

冀东地区新太古代晚期的岩浆事件与地壳增生: 来自岩石地球化学和锆石年龄及 Hf 同位素的制约^{*}

耿元生 杨崇辉 杜利林 任留东 宋会侠

GENG YuanSheng, YANG ChongHui, DU LiLin, REN LiuDong and SONG HuiXia

中国地质科学院地质研究所 北京 100037

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2017-12-01 收稿, 2018-02-12 改回.

Geng YS, Yang CH, Du LL, Ren LD and Song HX. 2018. Late Neoarchean magmatism and crustal growth in eastern Hebei: Constraint from geochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4): 1058–1082

Abstract Amphibolites (basic volcanics), TTG gneisses and hypersthene-diorite/charnockite of Late Neoarchean age are widely distributed throughout the Zunhua-Qianxi-Qian'an area in eastern Hebei, North China Craton. SHRIMP zircon U-Pb isotopic dating reveals that amphibolites, TTG gneisses and hypersthene-diorite/charnockites were synchronously from 2529 ± 30 Ma to 2555 ± 14 Ma, reflecting an important Late Neoarchean magmatic event in the North China Craton, followed by sequential granulite facies metamorphism at ~ 2.5 Ga. CL images exhibited that some cores of zircons from TTG gneisses and hypersthene-diorite/charnockites are black-gray with fir-tree structure or structureless, implying that the U-Th-Pb isotopic system of the cores of the zircons have been turbulenced or reseted during metamorphism, so the $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ weighted mean ages in cores of magmatic zircons are generally interpreted as the youngest age of magmatic event. Magmatic zircons of the Late Neoarchean TTG gneisses and charnockites have positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of $-0.08 \sim 9.49$ and calculated $t_{\text{DM1}}(\text{Hf})$ ages from 2572 Ma to 2896 Ma with a peak age of 2.72 Ga, suggesting that the TTG gneissic and charnockitic magma were derived from depleted mantle source, and 2.7 Ga was an important crustal growth event in the studied area and the North China Craton. Geochemical and petrogenetic studies reveal that the TTG gneisses and hypersthene-diorite/charnockites in the area were formed by fractional crystallization in the magmas derived from juvenile crustal rocks with hornblende as the primary fractionated phase. A mantle plume model is favored from petrogenesis of TTG gneisses and hypersthene-diorite/charnockite which explains the many other geological features in the eastern Hebei of the North China Craton as well.

Key words Late Neoarchean magmatic event; SHRIMP zircon dating; Zircon Hf isotope; TTG gneiss; Hypersthene-diorite/charnockite; Eastern Hebei; North China Craton

摘 要 在华北克拉通东部冀东的遵化-迁西-迁安地区广泛分布有新太古代晚期的斜长角闪岩(基性火山岩)、TTG 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩。锆石 U-Pb 同位素测定表明,该区的斜长角闪岩、TTG 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩几乎同时形成于 2529 ± 30 Ma 到 2555 ± 14 Ma 期间。这是华北克拉通新太古代晚期一次重要的岩浆事件,并紧随后有 2.5 Ga 左右的麻粒岩相变质作用。阴极发光图像显示,TTG 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩中一些锆石的核部为灰黑色,具杉树叶结构或无内部结构,意味着这些锆石核部的 U-Th-Pb 同位素体系在变质作用期间受到了干扰或重置,因此岩浆锆石核部的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄通常被解释为代表岩浆事件最年轻的年龄。新太古代晚期 TTG 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的岩浆锆石具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-0.08 \sim 9.49$),计算的 $t_{\text{DM1}}(\text{Hf})$ 模式年龄介于 2572 ~ 2896 Ma 之间,峰值年龄为 2.72 Ga。这表明,TTG 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的母岩浆是从亏损地幔源分异出来的,且 2.7 Ga 是研究区和华北克拉通最重要的一次地壳增生事件。地球化学和岩石成因研究表明,本区的 TTG 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩是由来自新生地壳基性岩石部分熔融形成的岩浆通过结晶分离形成的,其中角闪石是主要的分离相矿物。地幔柱模式更有利于解释本区 TTG 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的成因以及冀东地区的许多其他地质特征。

* 本文受国家自然科学基金项目(41572175)和地质调查项目(DD20160121-04、DD20160120-04)联合资助。

第一作者简介:耿元生,男,1950年生,研究员,长期从事前寒武纪地质和变质岩石学研究, E-mail: ys-geng@cags.ac.cn

关键词 新太古代晚期岩浆事件; SHRIMP 锆石 U-Pb 定年; 锆石 Hf 同位素; TTG 片麻岩; 紫苏闪长岩/紫苏花岗岩; 冀东; 华北克拉通

中图法分类号 P588.345; P597.3

早前寒武纪是大陆地壳生长的重要阶段。由于该阶段大陆地壳的生长速率比晚前寒武纪地壳生长速率快得多,因此在 2800~2500Ma 之前现有大陆地壳质量的 50%~80% 已经形成(Moorbath, 1977; O' Nions *et al.*, 1979)。较新的资料统计表明 3.0~2.5Ga 形成的大陆地壳占现今大陆地壳的 36%, 2.15~1.65Ga 形成的大陆地壳占现今大陆地壳的 39%(Condie, 1998)。由于大陆地壳主要在早前寒武纪阶段形成,因此早前寒武纪大陆地壳的生长方式、生长阶段以及壳幔的相互作用等问题始终是前寒武纪地质学家关注的重要问题(McCulloch and Wasserburg, 1978; Depaolo *et al.*, 1991; McCulloch and Bennett, 1994; Stein and Hofmann, 1994; Condie, 1998, 2000)。

一些学者提出早前寒武纪大陆地壳主要形成于 3.6Ga、2.7Ga 和 1.8Ga 三个阶段(McCulloch and Bennett, 1994),一些学者则认为前寒武纪大陆地壳的生长主要集中在 2.7Ga、1.9Ga 和 1.2Ga 三个阶段(Condie, 1998, 2000)。从全球范围看 2.7Ga 左右的构造热事件是一次导致地壳增生的重要事件,不论在北半球的苏布里尔克拉通(Beakhouse *et al.*, 1999; Henry *et al.*, 2000; Percival *et al.*, 2001)、西加拿大地盾(Sandeman *et al.*, 2006)、怀俄明绿岩带(Rino *et al.*, 2004)、波罗的地盾(Baltic shield)(Öhlander *et al.*, 1987; Bibikova *et al.*, 2005; Samsonov *et al.*, 2005)、西格陵兰克拉通(Steenfelt *et al.*, 2005),还是在南半球的南非和津巴布韦克拉通(Kröner *et al.*, 1999; Horstwood *et al.*, 1999; Hofmann *et al.*, 2004)、西澳大利亚的皮尔巴拉和伊尔冈克拉通(Bateman *et al.*, 2001; Rasmussen *et al.*, 2005),这期构造热事件表现强烈,造成太古宙大陆地壳在一个短的阶段快速形成。在华北克拉通 2.7Ga 的构造热事件原认为仅在鲁西等局部地区有所反映(Jahn *et al.*, 1988; 庄育勋等, 1997; 杜利林等, 2003, 2010; 陆松年等, 2008; Wan *et al.*, 2011a),而依据锆石 U-Pb 年龄确定的 2.5Ga 左右的构造热事件则在整个克拉通范围内广泛分布(Wilde *et al.*, 2005; Kröner *et al.*, 2005; 沈其韩等, 2005; Geng *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008; Grant *et al.*, 2009; 耿元生等, 2010)。华北克拉通 500 余个基性和酸性岩浆岩的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄(t_{DM})的峰值为 2.82Ga,代表从地幔萃取物质形成大陆地壳的时间(Wu *et al.*, 2005)。大量的锆石 Hf 同位素数据和锆石的形成年龄表明,华北克拉通最早的地壳增生事件发生在 4.0Ga 之前,形成了以基性岩石为主的下地壳并有陆壳物质形成。经过较短的地壳滞留,通过下地壳基性岩石的部分熔融以及壳内物质的再循环形成了以辽宁鞍山地区 3.6~3.8Ga 奥长花岗岩为代表的古老地壳(Wan *et al.*, 2015)。在 2.7Ga 左右,华北克拉通发生了最强烈的壳幔分

异事件,形成了大量的新生地壳,同时也形成了在东部陆块和中部带都有分布的基性火山岩和/或 TTG 片麻岩(Wan *et al.*, 2011a, 2012, 2014; Han *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2013; 路增龙等, 2014)。在 2.5Ga 左右,前期(2.7Ga)形成的新生地壳发生了广泛的部分熔融,形成华北克拉通分布最广的新太古代晚期的岩浆岩,奠定了华北克拉通的基本格局(Geng *et al.*, 2012)。

对于新太古代晚期岩浆事件作用的构造背景目前还存在不同认识,一种认为太古宙末已经存在板块构造体制,这些岩浆岩是弧-陆、陆-陆碰撞的产物(Zhao *et al.*, 1999a, b, 2005; Kusky and Li, 2003; Kröner *et al.*, 2005; Li and Kusky, 2007);而一些研究者则提出新太古代晚期的岩浆事件主要是地幔柱导致的岩浆事件(Yang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009a; 耿元生等, 2010; Geng *et al.*, 2012)。

冀东地区是新太古代岩浆岩非常发育的地区,本文通过该区新太古代岩浆事件产物的地质、地球化学、全岩 Sr-Nd 同位素、锆石 U-Pb 年代学和锆石 Hf 同位素的研究进一步探讨新太古代晚期岩浆事件与地壳增生和演化的关系。

1 区域地质背景

前人研究认为,华北克拉通由多个微陆块组成(白瑾等, 1993; 伍家善等, 1998; Zhai *et al.*, 2000, 2005; Zhai and Santosh, 2011)。这些微陆块在新太古代末期通过陆-陆或弧-陆碰撞拼合在一起,初步形成华北克拉通的基本轮廓(Shen and Qian, 1995; 伍家善等, 1998; Zhai *et al.*, 2000, 2005; Zhai, 2011; Zhai and Santosh, 2011)。近十多年研究认为,华北克拉通由东部陆块、西部陆块和中部造山带组成,并通过东、西两个陆块的拼合完成华北克拉通化过程(Zhao *et al.*, 1999a, b, 2005; Kusky and Li, 2003; Li and Kusky, 2007)。但对于东、西陆块之间的俯冲方向和陆块的拼合时代有两种不同认识:一种观点认为,从新太古代末期开始,西部陆块向东部陆块连续俯冲,古元古代末期(1.85~1.8Ga)东西陆块拼合(Zhao *et al.*, 1999a, b, 2000, 2005, 2008, 2010; Liu *et al.*, 2004, 2006, 2012; Kröner *et al.*, 2005; Wilde *et al.*, 2005; Wan *et al.*, 2006a, b; Zhang *et al.*, 2007, 2009);而另一种观点提出,新太古代晚期东部陆块向西部陆块俯冲,在新太古代末期东西陆块拼合,并在古元古代早期华北克拉通转入陆内伸展阶段(Kusky and Li, 2003; Polat *et al.*, 2005; Kusky *et al.*, 2007; Li and Kusky, 2007)。

冀东变质基底是华北克拉通东部陆块结晶基底的重要组成部分,大致出露于密云-遵化-迁安-迁西-青龙-卢龙-秦皇岛一带,基底岩石主体是太古宙的 TTG 质片麻岩,其次是富

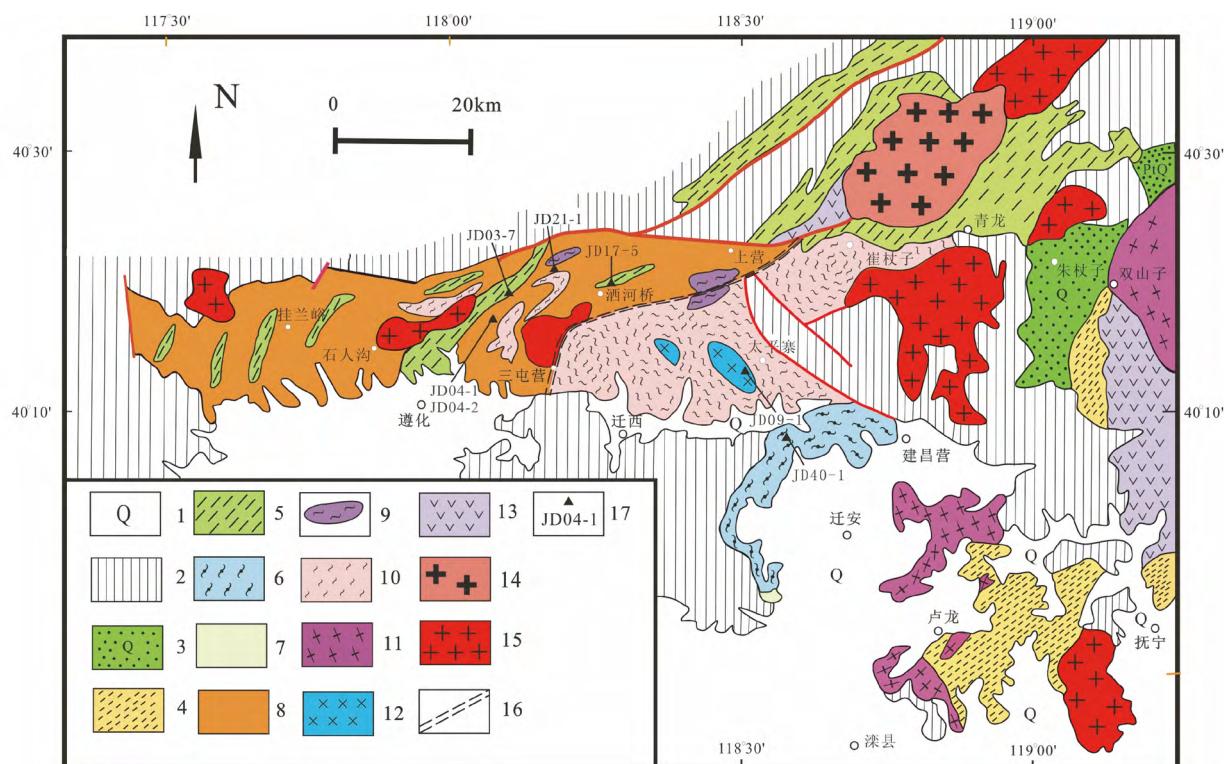


图1 冀东地区前寒武纪变质基底地质简图及采样点位置

1-第四系;2-中元古代-中生代盖层;3-青龙群;4-滦县群;5-遵化群;6-迁西岩群;7-曹庄岩组;8-三屯营片麻岩;9-辉长质片麻岩;10-太平寨TTG片麻岩;11-迁安花岗-花岗闪长质片麻岩;12-紫苏闪长岩/紫苏花岗岩;13-界岭口闪长岩;14-海西期都山花岗岩;15-燕山期花岗岩;16-三屯营-金厂峪-王厂剪切带;17-年龄样品采样点及样品编号

Fig. 1 Geological sketch map of Precambrian metamorphic basement in the eastern Hebei Province and sample locations

1-Quaternary; 2-Mesoproterozoic-Mesozoic cover; 3-Qinglonghe Group; 4-Luanxian Group; 5-Zunhua Group; 6-Qianxi rock group; 7-Caozhuang rock formation; 8-Santunying gneiss; 9-gabbroic gneiss; 10-Taipingzhai TTG gneisses; 11-Qian'an granitic-granodioritic gneisses; 12-hypersthene-diorite /charnockite; 13-Jielingkou diorite; 14-Hercynian granite; 15-Yanshanian granite; 16-Santunying-Jinchangyu-Wangchang shear zone; 17-locality and number of age samples

钾的二长-正长花岗岩类和少量中-基性侵入岩类,太古宙的表壳岩呈残片和包体形式存在于上述正片麻岩中(图1)。冀东太古宙基底变质作用程度存在差异,其中迁安-迁西一带变质程度较高,以麻粒岩相为主;西部的遵化、迁西北部、东部青龙、秦皇岛以及东南部卢龙等地变质程度相对低,主要为角闪岩相,部分为绿片岩相。变质作用的时间大多集中在2520~2490Ma间(Yang *et al.*, 2008; Nutman *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2013),局部记录了1.85Ga的变质作用(Duan *et al.*, 2015; 杨崇辉等, 2017)。关于新太古代晚期变质作用的P-T路径,目前也有逆时针(Zhao *et al.*, 2001; Duan *et al.*, 2017)和顺时针(Lu *et al.*, 2017; Yao and Zhang, 2017)两种不同的认识。在麻粒岩相变质地区构造以卵形构造为主,在角闪岩相变质地区则以线性构造为特点(图1)。

笔者与伍家善等早期的工作曾将冀东地区的早前寒武系划分为遵化深变质绿岩区、三屯营-太平寨岩浆杂岩区、迁安片麻岩穹隆区、水厂-杏山早-中太古代残留区、滦县陆缘火山-沉积岩区(伍家善等, 1998)。近年一些研究者将冀东地

区从北向南依次划分为大陆岩浆弧、过渡带、弧后盆地和东部陆块内部的大陆地壳等构造单元(Bai *et al.*, 2016);有的研究者则根据变质作用特点和年代学提出西北部古老的基性岩向南东遵化-太平寨弧俯冲的演化模式(Yao and Zhang, 2017)。这些不同的划分表明对于冀东地区的构造背景还存在不同认识(Geng *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008; Nutman *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2015, 2017; Bai *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2017; Yao and Zhang, 2017)。

遵化深变质绿岩区是指主要分布在遵化、迁西北部、宽城东南部和青龙西部的一套经历了高角闪岩相变质改造的高级变质杂岩,其中变质表壳岩占60%左右,各种古老侵入岩约占40%。前人称该区变质表壳岩为遵化群或遵化岩群,其原岩以玄武质火山岩、中酸性火山凝灰岩、凝灰质杂砂岩和硅铁建造为主。中国和英国联合在三屯营等地进行区域地质调查时认为该区分布的变质深成岩以奥长花岗质-英云闪长质为主,包括秋花峪片麻岩、小关庄片麻岩、上营片麻岩等,还有少量变质辉长岩或辉长闪长岩,如青杨树片麻岩等,将该区广泛分布的片麻岩则称为三屯营片麻岩(李勤和杨振

升,1992)。在该区的一些地段出露有蛇纹石化橄榄岩、辉石岩等超镁铁质岩石,有人认为它们属于科马提岩(王仁民等,1983),有人则认为它们与变质基性火山岩、变质辉长岩等一起构成了太古宙的蛇绿岩组合,是大洋残片(Kusky *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2002),但也有学者对此提出质疑(Zhai *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2007)。大量的年代学资料表明它们主要形成于新太古代晚期。

三屯营-太平寨岩浆杂岩区西起迁西县的三屯营、东到青龙县的逃军山一带。该杂岩区位于遵化深变质绿岩区的东南,二者之间以建明-金厂峪-青龙剪切带为界。20世纪80年代中期以前多将该区的变质岩石作为地层系统的一部分划归到迁西群。此后,多数研究者认识到该区内分布的深变质岩石主要是不同类型、不同成分的变质岩浆杂岩(贺同兴等,1992),它们可占该区面积的80%以上(王安建,1991)。区内主要的片麻岩体有王厂片麻岩、邢厂片麻岩、太平寨粗粒花岗质片麻岩、崔杖子片麻岩等。此外,在渔户寨、鸽子庵、太平寨、郭家沟等地还有规模不等的紫苏花岗岩出露。年代学资料表明该区深成片麻岩主要形成于新太古代的晚期。该区的片麻岩我们统称为太平寨TTG片麻岩,其与遵化深变质绿岩区的三屯营片麻岩在成分上相似,但是本区的片麻岩普遍经历了麻粒岩相的变质改造,而三屯营片麻岩通常只经历了角闪岩相-高角闪岩相的变质改造。

迁安片麻岩穹隆区分布在迁安一带,大体以迁安县城为中心,平面近圆形,直径约30km,面积约700km²。该片麻岩穹隆在区域重力和航磁图上也显示出完整的穹状。该穹隆区内出露的主要有两类深成片麻岩。一类为浅色-浅粉色、弱片麻状的富钾片麻岩,主要由斜长石、石英、碱性长石、黑云母和角闪石组成,岩石的Na₂O/K₂O比值小于1。另一类为暗色弱片麻状的富钠片麻岩,主要由斜长石、石英、黑云母和角闪石组成,含少量或不含碱性长石,偶见透辉石,其Na₂O/K₂O比值大于1(伍家善等,1998)。暗色富钠片麻岩多分布在穹隆的北部,浅色的富钾片麻岩多分布在穹隆的南部。在蟒山,浅色钾质片麻岩的一些分枝贯入到暗色钠质片麻岩之中。在片麻岩穹隆中有规模不等的二辉麻粒岩、斜长角闪岩、夕线石榴长英片麻岩、铁英岩的包体。该穹隆区的深成片麻岩主要形成于25亿年左右。

水厂-杏山中太古代残留区分布在迁安片麻岩穹隆区的西侧,该区分布的主要是迁西岩群和曹庄岩组。曹庄岩组主要分布在杏山一带,其下部为夕线黑云斜长片麻岩夹石榴石英岩、含堇青石石英岩,中部为黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩,上部为角闪黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩及具工业意义的条带状铁建造。在该岩组的铬云母石英岩和其他类型变质沉积岩中获得过3610~3851Ma的碎屑锆石年龄(Liu *et al.*, 1992),在曹庄地区还发现少量3287~3129Ma的英云闪长质片麻岩包体及2940Ma的花岗质片麻岩(Nutman *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; 孙会一等, 2016),故推断曹庄地区可能存在古太古代岩石。迁西岩群主要分布在水厂至松

汀一带,它们主要由暗色麻粒岩、含辉石黑云斜长片麻岩、浅色麻粒岩、条带状铁建造构成的互层组成。近年锆石原位定年表明迁西群主要形成于新太古代,由于曾在顺层侵入到迁西岩群中的岩席状花岗岩获得过2960~2980Ma的锆石U-Pb年龄(Liu *et al.*, 1990),推断迁西岩群局部可能保留有中太古代岩石。在该区还有一些规模较小的变质岩浆杂岩,如水厂、羊崖山地区的紫苏花岗岩、脑峪门等地出露的花岗二长岩、花岗闪长岩等。由于该区曾获得过一些中太古代的年龄数据,故称之为水厂-杏山中太古代残留区。

滦县陆源火山-沉积区分布于研究区的东南部。由于变质程度相对较低,前人曾把它们单独划分为滦县群,主要由变粒岩、斜长角闪岩、条带状铁英岩、片麻状混合岩、长石石英岩等组成,上部有少量大理岩。根据岩石组合和原岩建造,它们属于新太古代的陆源沉积岩带(伍家善等,1998)。近些年的研究表明,该区分布的片麻状混合岩多为变质的深成岩体,可划分出阳山片麻岩、饮马河片麻岩等。最近,初航等在卢龙南部喇叭山南麓发现含有大量3.3~3.8Ga碎屑锆石的铬云母石英岩,并认为该区在太古宙期间与曹庄属同一陆块(初航等, 2016)。

2 样品的岩石学特征

本次研究的样品主要采自三屯营片岩和遵化斜长角闪岩,同时对太平寨地区的紫苏花岗岩以及水厂花岗片麻岩中的麻粒岩包体进行了采样,样品采样点见图1。采样的地理坐标和基本矿物组成见表1。根据矿物组合和地质产状,样品可以分为斜长角闪岩类、片麻岩类和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体几类。

斜长角闪岩类主要出露在遵化深变质绿岩区,它们多呈规模不等的透镜体产于三屯营片麻岩中(图1),透镜体规模一般宽10~50m,延长近千米。一些地点(如挂兰峪、增庄、洒河桥)的斜长角闪岩类出露宽度可以达到数百米(图2a),延长数千米。也有的透镜体规模很小,仅几十厘米宽。斜长角闪岩类成分变化很大,原岩主要为基性火山岩。本次的样品主要采自遵化头道村和迁西洒河桥。头道村的样品较均匀,主要由斜长石和角闪石组成,不同样品中含有少量的石榴石或单斜辉石。该区的样品蚀变较强,斜长石表面多已帘石或高岭土化,角闪石多有不同程度的绿泥石化(图2g)。洒河桥地区的斜长角闪岩类以普遍含有单斜辉石为特点,矿物组成变化较大,既有较典型的含辉石斜长角闪岩/麻粒岩,也有以石榴石为主的(可达70%)角闪石榴岩(图2i)。在野外局部见有1cm左右的石榴石变斑晶集合体,边部还有较窄的斜长石边(白眼圈)(图2b)。在镜下有的样品中可以看到暗色矿物以单斜辉石为主,粒度较大;而石榴石粒度较小多分布在单斜辉石边部,构成“红眼圈”结构(图2h)。

片麻岩类样品主要采自三屯营片麻岩,由于三屯营片麻岩成分和成因变化较大所以本次样品采自三屯营片岩的不同

表1 冀东地区样品采样位置和基本特征

Table 1 Locations and petrological features of the studied samples

样品号	采样位置	地理坐标	岩性	矿物组合	备注
斜长角闪岩类					
JD03-1	遵化县头道村	40°18'46.7", 118°06'09.3"	含石榴斜长角闪岩	Hb + Pl + Grt + Chl + Op	
JD03-2	遵化县头道村	40°18'46.7", 118°06'09.3"	斜长角闪岩	Pl + Hb + Grt + Chl + Op	
JD03-6	遵化县头道村	40°18'46.7", 118°06'09.3"	含辉石斜长角闪岩	Pl + Hb + Cpx + Grt + Chl	
JD17-1	迁西洒河桥	40°19'47.9", 118°16'11"	辉石斜长角闪岩/麻粒岩	Hb + Pl + Cpx	
JD17-2	迁西洒河桥	40°19'47.9", 118°16'11"	石榴斜长角闪岩	Grt + Pl + Hb	
JD17-3	迁西洒河桥	40°19'47.9", 118°16'11"	石榴辉石角闪岩/麻粒岩	Pl + Hb + Cpx + Grt	
JD17-5	迁西洒河桥	40°19'47.9", 118°16'11"	石榴角闪斜长辉石岩	Cpx + Pl + Grt + Hb	年龄样
片麻岩类					
JD03-3	遵化县头道村	40°18'46.7", 118°06'09.3"	角闪斜长片麻岩	Pl + Qtz + Hb + Chl	
JD03-4	遵化县头道村	40°18'46.7", 118°06'09.3"	黑云角闪斜长片麻岩	Pl + Hb + Qtz + Grt + Op	
JD03-7	遵化县头道村	40°18'46.7", 118°06'09.3"	含榴角闪斜长片麻岩	Pl + Qtz + Hb + Cpx + Grt	年龄样
JD04-1	遵化洪火路边	40°16'36.7", 118°05'43.6"	含辉角闪斜长片麻岩	Pl + Qtz + Hb + Bt + Cpx	年龄样
JD04-2	遵化洪火路边	40°16'36.7", 118°05'43.6"	含榴角闪斜长片麻岩	Pl + Qtz + Hb + Bt + Grt	年龄样
JD05-1	遵化小关庄	40°19'49", 118°09'33.9"	黑云斜长片麻岩	Pl + Qtz + Bt + Chl	
JD17-4	迁西洒河桥	40°19'47.9", 118°16'11"	黑云角闪斜长片麻岩	Pl + Qtz + Bt + Hb	
JD21-1	遵化汗儿庄	40°19'59.5", 118°11'53.7"	角闪二辉斜长片麻岩	Pl + Cpx + Qtz + Opx + Hb	年龄样
紫苏花岗岩及包体					
JD09-1	迁西太平寨	40°13'56.1", 118°31'33.3"	紫苏闪长岩	Pl + Qtz + Cpx + Opx + Hb	年龄样
JD09-2	迁西太平寨	40°13'56.1", 118°31'33.3"	麻粒岩	Pl + Hb + Cpx + Op	包体
JD09-3	迁西太平寨	40°13'56.1", 118°31'33.3"	麻粒岩	Hb + Pl + Opx + Cpx	包体
JD09-5	迁西太平寨	40°13'56.1", 118°31'33.3"	石榴紫苏花岗岩	Pl + Hb + Qtz + Cpx + Opx	
JD10-1	迁西王庄子	40°14'08.3", 118°30'02.6"	紫苏花岗岩	Pl + Qtz + Opx + Hb + Cpx	
JD10-2	迁西王庄子	40°14'08.3", 118°30'02.6"	麻粒岩	Pl + Hb + Cpx + Qtz	包体
JD10-3	迁西王庄子	40°14'08.3", 118°30'02.6"	紫苏闪长岩	Pl + Qtz + Cpx + Opx + Bt	
JD16-1	迁西高家窝		紫苏闪长岩	Pl + Hb + Cpx + Op	
JD40-1	迁安水厂大桥	40°08'55.1", 118°35'24.2"	麻粒岩(包体)	Pl + Qtz + Cpx + Bt + Opx	年龄样
JD40-2	迁安水厂大桥	40°08'55.1", 118°35'24.2"	黑云母二长花岗岩	Pl + Kfs + Qtz + Bt	
JD40-3	迁安水厂大桥	40°08'55.1", 118°35'24.2"	含石榴麻粒岩	Pl + Qtz + Bt + Cpx	包体

部位(图1)。在片麻岩中有长30余厘米的斜长角闪岩透镜体,围绕透镜体发生局部深熔,形成小规模不规则的伟晶岩(图2c)。片麻岩有时呈条带状,一些条带长英质矿物含量较多,一些条带镁铁质矿物含量较多(图2d)本区的片麻岩类主要为中粗粒变晶结构,片麻状或条带状构造,矿物组成有所变化,浅色矿物主要由斜长石和石英组成,暗色矿物以角闪石为主,除角闪石之外有的地区出现较多的黑云母,有的地区出现较多的单斜辉石,有的地区则含有石榴石(表1),部分样品中含有少量的条纹长石。其中JD21-1号样品暗色矿物以单斜辉石为主,其边部有较明显的退变质,形成角闪石的外圈(图j)。

紫苏闪长岩/紫苏花岗岩类样品主要采自太平寨、王庄子等地。紫苏闪长岩/紫苏花岗岩在野外通常为灰黑色,块状,弱片麻状构造(图2e)。用于定年的JD09-1样品为中粗粒花岗变晶结构,弱片麻状,矿物组成为斜长石(Pl, 50%) + 石英(Qtz, 15%) + 单斜辉石(Cpx, 15%) + 斜方辉石(Opx,

10%) + 角闪石(Hb, 5%) + 不透明矿物(Op, 少量)(图2k)。紫苏闪长岩/紫苏花岗岩包体基本为基性岩的包体,有的为斜长角闪岩,有的为麻粒岩,但多含有少量的单斜辉石和紫苏辉石,通常呈团块状。黑云二长片麻岩中的包体(JD40-1, JD40-3)为中性麻粒岩并含有退变质形成的黑云母(图2l),规模一般在30~50cm左右(图2f)。

3 分析方法

全岩粉末样品的制备由河北省区域地质矿产调查研究所完成。选取300~500g新鲜的岩石样品利用鄂式破碎机破碎后,用粉碎机将样品碎块粉碎研磨至200目以下,取其中30~50g以备全岩化学分析。全岩主量、稀土和微量元素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。其中主量元素用日本理学3080E型X荧光光谱仪(XRF)分析,误差<0.5%;稀土和微量元素用电感耦合等离子体质谱(X-

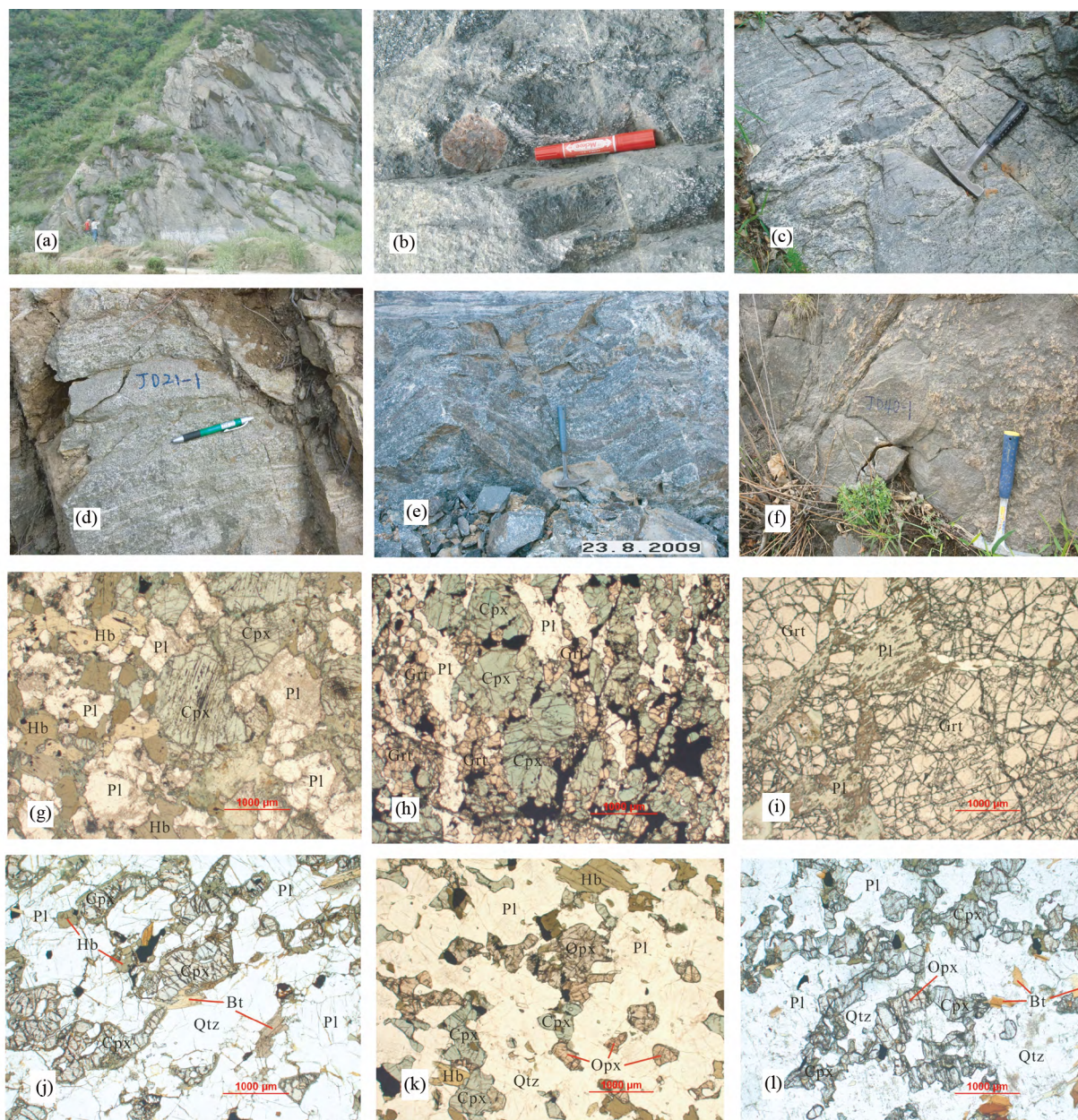


图2 冀东地区斜长角闪岩、片麻岩、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩等的野外照片(a-f)和单偏光显微照片(g-l)

(a) 迁西洒河桥斜长角闪岩露头; (b) 迁西洒河桥斜长角闪岩中的石榴石变斑晶; (c) 遵化头道村角闪斜长片麻岩中的基性岩透镜体; (d) 遵化汗儿庄条带状片麻岩外貌; (e) 迁西太平寨紫苏花岗岩外貌; (f) 迁安水厂大桥黑云二长片麻岩中的基性岩包体; (g) JD03-6 辉石斜长角闪岩; (h) JD17-5 石榴麻粒岩; (i) JD17-2 角闪石榴岩; (j) JD21-4 透辉斜长片麻岩; (k) JD09-4 紫苏闪长岩; (l) JD40-4 二辉麻粒岩包体

Fig. 2 Field photographs (a-f) and photomicrographs (g-l, PPL) showing geological relationships and lithological features for the amphibolite, gneiss, hypersthene-diorite/charnockite and enclave

(a) outcrop of basic metavolcanics, Saheqiao, Qianxi; (b) garnet porphyroblast in amphibolite, Saheqiao, Qianxi; (c) basic lens in hornblende gneiss, Toudaocun, Zunhua; (d) banded gneiss, Han'erzhuang, Zunhua; (e) outcrop of charnockite, Taipingzhai, Qianxi; (f) granulite enclave in biotite monzonite, Shuichang Bridge, Qian'an; (g-l) petrographical features: (g) JD03-6 pyroxene amphibolite; (h) JD17-5 garnet granulite; (i) JD17-2 garnet granulite; (j) JD21-4 diopside plagioclase gneiss; (k) JD09-4 hypersthene-diorite; (l) JD40-4 granulite (enclave)

Series) 分析,分析误差 <5%。

锆石单矿物分选在河北区域地质矿产调查研究所完成。锆石 SHRIMP U-Pb 测年利用北京离子探针中心的 SHRIMP II 仪器完成。分析原理与流程见文献(Williams, 1998;

Nelson, 1999)。用标准锆石 SL13(年龄为 572Ma, U 含量为 238×10^{-6} , Williams, 1998) 标定锆石的 U、Th、Pb 含量,应用锆石标样 TEM(TEMORA1, 年龄为 417Ma) 进行年龄校正(Black *et al.*, 2003)。测试过程中仪器质量分辨率大于

5000(1%峰高),一次离子流 O^{2-} 强度为 $1.8 \sim 2nA$,一次离子流束斑大小约为 $30\mu m$ 。每分析3个待测样品点进行一次TEM标样测定,每个测点记录采用5组扫描。数据处理采用SQUID1.02及ISPLIT程序(Ludwig, 2001)。普通铅用实测的 ^{204}Pb 校正。单个测定的数据点误差采用 1σ 。年龄结果采用 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均值,不确定度(误差)为95%的置信度。

锆石 Hf 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素实验室利用 LA-MC-ICPMS 进行微区原位同位素测定。分析仪器为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune 多接收器等离子质谱仪和美国 ESI 公司生产的 UP193-FX ArF 准分子激光器,激光波长 193nm 脉冲宽度 5ns。分析方法见耿建珍等(2011)。Hf 同位素分析点和锆石 U-Pb 定年分析点位置相同。采用 $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.7325$ (Patchett and Tatsumoto, 1981) 对 Hf 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正,采用 $^{173}Yb/^{172}Yb = 1.35274$ (Chu *et al.*, 2002) 对 Yb 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正。在 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 计算时,球粒陨石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为 0.282772, $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值为 0.0332 (Blichert-Toft and Albarède, 1997)。在单阶 Hf 模式年龄计算时亏损地幔的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值分别为 0.28325 和 0.03842 (Griffin *et al.*, 2000);在两阶段 Hf 模式年龄计算时,平均地壳与亏损地幔的 $f_{Lu/Hf}$ 比值分别为 -0.5482 和 0.1566 (Griffin *et al.*, 2000)。 ^{176}Lu 的衰变常量选用 $1.867 \times 10^{-11}y^{-1}$;相关计算中锆石的 U-Pb 年龄选择单点 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄,相关计算公式参考吴福元等(2007)。

Sm-Nd 和 Rb-Sr 化学分离及同位素比值测试在核工业地质研究院分析测试中心完成。使用仪器为 ISOPROBE-T 热电质谱仪,检测方法和依据详见国标 GB/T 17672—1999《岩石中铅铋钨同位素测定方法》,误差以 2σ 计。Sr 同位素比值测定的内校正因子采用 $^{86}Sr/^{88}Sr = 0.1194$,标准测量结果 NBS987 为 0.710250 ± 7 。Nd 同位素比值采用 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$ 校正,标准测量结果 SHINESTU 为 0.512118 ± 3 (标准值为 0.512110)。

4 分析结果

4.1 岩石化学

研究区斜长角闪岩类、片麻岩类、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体的岩石化学分析结果见表2。其中斜长角闪岩类的 SiO_2 含量从 44.86% 到 51.13%, MgO 含量变化较大,从 4.7% 到 10.16%, Al_2O_3 含量从 12.52% 到 19.07%。在 $SiO_2-K_2O+Na_2O$ 岩浆岩分类图解中主要位于辉长岩区(图3a),少量位于二长辉长岩区。根据火山岩的 Nb/Y-Zr/Ti 图解,本区的斜长角闪岩类主要位于玄武岩区,少量位于玄武安山岩区(图3b),且多属于钙碱性系列(图3d)。斜长角闪岩样品中除 JD03-6 号样品的稀土元素标准化图上为平坦型之外,其他样品的轻稀土元素略微富集,轻重稀土元素有一

定分馏。JD17-2 号样品中稀土部分较亏损,轻重稀土都相对富集(图4a),这与该样品中石榴石是主要暗色矿物有关。不同样品的微量元素变化较大,在微量元素蜘蛛网图上,尽管不同样品有所变化,但总体上以 Th、Ta、Nb、P 和 Ti 相对亏损为特征(图4b)。本区斜长角闪岩类成分变化较大一方面与其矿物组成差异明显有关,还可能与后期变质的流体(热液)改造有关。

片麻岩类的 SiO_2 含量从 58.63% 到 69.73%, Na_2O 含量为 3.32% ~ 4.68%, Na_2O 含量普遍大于 K_2O 含量(表2), Al_2O_3 含量从 12.61% 到 17.98%。在 SiO_2 对 K_2O+Na_2O 图解上本区的片麻岩类主要位于花岗闪长岩和闪长岩区(图3a),在 An-Ab-Or 图解上它们主要位于英云闪长岩区,个别位于花岗闪长岩区(图3c),属于低钾拉斑系列和钙碱性系列(图3d)。本区片麻岩类的稀土元素总量相对较低($\Sigma REE = 39.69 \times 10^{-6} \sim 121.9 \times 10^{-6}$),轻重稀土元素分馏较弱,在稀土元素的球粒陨石标准化图解中轻稀土稍富集,重稀土较平缓, Eu 异常不明显($Eu/Eu^* = 0.83 \sim 1.45$),各样品之间差异不大(图4c),与冀东地区闪长质片麻岩的稀土元素特征(Bai *et al.*, 2016) 类似。在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛网图解上,总体相对平缓, Th, P, Ti 有较明显的负异常, Sm 有较弱的负异常,多数样品的 Rb 相对 Ba 较亏损(图4d)。

本区紫苏闪长岩/紫苏花岗岩 SiO_2 含量从 53.95% 到 68.51%, Na_2O 含量为 3.90% ~ 4.35%, Na_2O 含量普遍大于 K_2O 含量, Al_2O_3 含量从 15.70% 到 17.59% (表2)。由于多数样品的 SiO_2 含量小于 60% 在 SiO_2 对 K_2O+Na_2O 图解上本区的紫苏闪长岩/紫苏花岗岩主要位于辉长闪长岩和闪长岩区,少部分位于花岗闪长岩区(图3a),因此称之为紫苏闪长岩/紫苏花岗岩。在 An-Ab-Or 图解上多位于英云闪长岩区(图3c),主要属于钙碱性系列(图3d)。紫苏闪长岩/紫苏花岗岩中的包体,除 SiO_2 略低外,其他组分与寄主岩石类似,因此它们在不同图解中与紫苏花岗岩基本位于同一区域内(图3a, c, d)。水厂大桥黑云二长片麻岩的 SiO_2 含量为 73.95%, K_2O 含量达到 7.13% (表2)。其中的包体成分与紫苏花岗岩中的包体成分类似(表2)。紫苏闪长岩/紫苏花岗岩和其包体的稀土元素特征相近,稀土元素总量变化较大($\Sigma REE = 72.47 \times 10^{-6} \sim 366.3 \times 10^{-6}$),轻重稀土元素有一定程度分馏($(La/Yb)_N = 3.39 \sim 13.6$),通常有不同程度 Eu 负异常($Eu/Eu^* = 0.43 \sim 1.10$)。在球粒陨石标准化图解上各样品之间大体平行(图4e)。在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛网图解上,大离子亲石元素变化较大, P 和 Ti 负异常明显(图4f)。水厂大桥二长花岗岩质片麻岩中包体的稀土元素和微量元素特点与紫苏闪长岩/紫苏花岗岩和其中包体类似,二长花岗岩质片麻岩(JD40-2)不论是稀土元素还是微量元素含量都明显偏高,轻重稀土有明显的分馏($(La/Yb)_N = 128$),微量元素在标准化的蜘蛛网图解上也与其他样品有明显区别(图4e, f)。

表 2 冀东地区新太古代斜长角闪岩、片麻岩、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体的主量元素 (wt%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析表Table 2 Major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) compositions of Neoproterozoic plagioclase-amphibolites, gneisses, hypersthene-diorite/charnockites and enclaves in eastern Hebei Province

样品号	JD03-1	JD03-2	JD03-6	JD17-1	JD17-2	JD17-3	JD17-5	JD03-3	JD03-4	JD03-7	JD04-1	JD04-2	JD05-1
岩石类型	基性岩类							片麻岩类					
SiO ₂	46.93	51.13	50.08	47.56	44.86	50.47	45.37	59.55	64.25	65.64	58.63	69.65	69.73
Al ₂ O ₃	15.81	18.8	16.28	19.07	19.00	18.81	12.52	15.95	15.3	15.34	17.98	15.46	12.61
Fe ₂ O ₃	4.21	3.50	4.44	3.06	3.43	2.54	7.78	3.54	2.57	2.48	3.62	1.89	2.98
FeO	10.04	4.87	5.19	4.11	7.69	4.31	11.46	3.65	3.18	2.89	3.36	2.08	3.34
CaO	8.90	8.38	10.91	8.97	8.63	9.11	11.28	6.6	6.49	4.62	6.55	3.50	2.51
MgO	6.30	4.70	6.30	9.65	10.16	6.51	5.99	3.23	2.62	2.17	2.05	0.93	2.22
K ₂ O	0.83	0.80	0.90	2.26	0.75	0.97	0.28	0.56	0.47	0.83	0.94	0.92	1.69
Na ₂ O	2.74	4.9	3.13	2.62	1.16	4.18	1.93	4.16	3.73	3.47	4.52	4.68	3.32
TiO ₂	1.74	0.90	0.82	0.09	0.13	0.17	2.31	0.75	0.47	0.53	0.89	0.35	0.24
MnO	0.21	0.11	0.21	0.15	0.41	0.13	0.33	0.15	0.13	0.17	0.12	0.09	0.08
P ₂ O ₅	0.16	0.47	0.06	0.09	0.01	0.04	0.30	0.16	0.13	0.12	0.12	0.10	0.05
H ₂ O ⁺	1.28	0.92	0.90	1.62	2.78	1.46	0.32	1.06	0.86	1.22	0.62	0.38	0.82
CO ₂	0.26	0.26	0.17	0.6	0.34	0.69	0.09	0.09	0.09	0.09	0.26	0.09	0.34
LOI	0.85	0.69	0.93	2.22	2.4	1.69	0.38	0.96	0.7	1.03	0.67	0.30	0.88
总量	100.26	100.43	100.32	102.07	101.75	101.08	100.34	100.41	100.99	100.6	100.33	100.42	100.81
La	20.4	39.2	2.58	7.08	3.43	12.9	14.4	12.9	11.8	11.5	9.28	6.78	21.7
Ce	60.7	90.2	6.85	13.3	7.03	28.1	40.2	31.5	26.3	25.1	24.7	19.6	44.9
Pr	8.62	11.1	1.02	1.9	0.8	3.44	5.93	4.17	3.24	2.79	2.88	1.54	5.06
Nd	37.7	46.5	5.16	6.96	3.07	13.7	28.7	18.7	13.1	11.4	13	6.31	18.8
Sm	8.01	8.23	1.77	1.23	0.55	2.68	7.46	4.15	2.7	2.53	2.98	1.22	3.06
Eu	1.91	2.14	0.74	0.44	0.21	0.92	2.07	1.18	1.06	1.04	1.03	0.59	0.84
Gd	8.2	7.11	2.68	1.29	0.93	2.62	9.31	4.59	3.08	3.02	3.19	1.28	2.92
Tb	1.2	0.84	0.46	0.18	0.16	0.35	1.56	0.72	0.46	0.46	0.44	0.18	0.33
Dy	7.52	4.78	3.16	1.08	1.59	2.15	9.97	4.71	2.88	3.02	2.6	1.03	1.92
Ho	1.55	0.92	0.66	0.21	0.44	0.42	2.17	1.05	0.59	0.64	0.48	0.18	0.39
Er	4.26	2.59	1.98	0.64	1.67	1.13	6.37	3.05	1.73	1.99	1.33	0.5	1.19
Tm	0.55	0.33	0.28	0.08	0.28	0.14	0.93	0.42	0.24	0.28	0.16	0.06	0.17
Yb	3.57	2.16	1.87	0.57	2.15	0.98	6.12	2.82	1.62	1.94	1.08	0.42	1.13
Y	36.4	21.8	16.9	5.58	11.3	10.8	56.5	24	15.1	15.4	11.6	4.46	9.81
Lu	0.51	0.33	0.28	0.09	0.39	0.15	0.9	0.45	0.26	0.32	0.15	0.07	0.19
Ba	180	462	154	406	270	152	137	226	265	299	267	238	349
Co	37.5	31.5	56.5	48.6	63	33.4	65	19.7	18.3	15.8	17.6	7.27	6.95
Cr	261	60.2	368	199	191	215	78.4	102	80.5	82.9	6.7	7.6	62.5
Cs	0.43	0.36	0.47	0.29	0.56	0.24	0.07	1.00	0.89	1.81	0.77	0.41	4.18
Ga	25.3	24.7	17.3	14.2	12.4	17.9	22.6	18.3	18	17.1	21	17.3	15.3
Hf	2.58	5.37	1.02	0.52	0.63	0.79	3.01	3.81	2.22	3.84	2.35	3.52	3.26
Mo	0.63	0.23	0.46	0.31	0.39	0.27	0.75	0.61	0.52	0.69	0.33	0.42	3.23
Nb	11.2	4.99	1.72	1.6	1.22	1.99	18.4	5.6	2.9	4.01	5.58	2.58	2.99
Ni	83.3	58.8	172	187	178	69.1	65.9	53	35.2	24.5	8.47	6.41	24.4
Pb	2.91	5.76	1.93	12	2.9	8.3	2.05	6.33	4.61	4.14	6.14	4.58	3.38
Rb	8	4.85	7.71	57.5	20.9	15.3	3.8	5.47	6.2	21.5	18.4	14.5	68.4
Sc	45.4	23	46.6	27.5	53.1	35	61	22.6	19.7	12.1	10.7	3.67	6.34
Sr	352	967	311	342	223	541	147	523	459	303	428	288	161
Ta	0.61	0.25	0.14	0.18	0.22	0.15	0.98	0.3	0.17	0.2	0.35	0.09	0.16
Th	0.22	0.98	0.14	0.67	1.04	0.48	0.42	0.14	0.14	0.08	0.42	0.15	0.76
U	<0.05	0.18	0.06	0.37	0.4	0.13	0.08	0.12	0.05	0.08	0.12	0.11	0.11
V	372	164	302	98.2	100	137	440	131	117	84.4	109	30.4	41.7
Zr	68.7	212	28.5	12.5	21	23.2	94.8	150	82.4	150	90.9	132	103

续表 2

Continued Table 2

样品号	JD17-4	JD21-1	JD09-1	JD09-5	JD10-1	JD10-3	JD16-1	JD09-2	JD09-3	JD10-2	JD40-1	JD40-3	JD40-2
岩石类型	片麻岩类		紫苏花岗岩类					包体				二长花岗岩	
SiO ₂	68.5	64.03	53.95	58.99	68.51	55.04	53.4	50.7	53.29	53.59	61.07	67.22	73.95
Al ₂ O ₃	15.96	15.85	17.59	17.25	15.62	16.9	15.7	13.75	10.69	15.75	17.28	16.73	13.77
Fe ₂ O ₃	1.71	2.41	2.13	2.29	1.30	1.45	4.37	4.34	2.11	3.96	1.67	1.05	0.51
FeO	2.10	3.40	5.91	4.87	2.71	5.59	4.8	8.57	9.75	6.59	3.97	2.54	0.27
CaO	4.00	3.5	8.86	6.30	3.93	8.79	6.87	7.80	9.58	8.31	5.51	4.51	0.91
MgO	1.45	2.92	4.89	2.96	1.21	5.20	5.57	6.05	9.39	5.31	3.31	1.60	0.45
K ₂ O	1.49	2.58	0.90	1.00	1.48	1.12	1.72	0.90	0.62	1.32	1.24	1.56	7.13
Na ₂ O	3.87	4.04	4.35	4.26	4.22	4.01	3.91	3.05	2.31	3.90	3.89	4.01	2.24
TiO ₂	0.15	0.57	0.70	0.62	0.45	0.47	0.95	1.21	0.36	0.76	0.63	0.57	0.18
MnO	0.10	0.07	0.15	0.14	0.09	0.15	0.14	0.18	0.27	0.22	0.08	0.05	0.01
P ₂ O ₅	0.10	0.22	0.16	0.13	0.10	0.09	0.37	0.26	0.12	0.06	0.36	0.26	0.07
H ₂ O ⁺	0.66	0.82	0.36	0.80	0.16	0.32	1.70	2.08	0.64	0.34	0.88	0.39	0.74
CO ₂	0.34	0.09	0.17	0.52	0.09	0.17	0.78	0.43	0.26	0.26	0.26	0.17	0.26
LOI	0.47	0.42	0.02	0.94	-0.12	-0.11	1.56	1.73	0.12	0.1	0.57	0.75	0.54
总量	100.9	100.92	100.14	101.07	99.75	99.19	101.84	101.05	99.51	100.47	100.72	101.41	101.03
La	16.6	27.3	15.2	36.8	15.9	14.7	36.7	50.1	17.2	12.7	27.6	35.7	40.7
Ce	28.5	51.5	34.8	79.6	33.2	32.6	85.1	143	48	28	54.6	70.5	75.5
Pr	2.87	5.87	4.41	9.42	2.97	4	10.3	19.2	6.64	3.34	6.2	7.86	7.8
Nd	9.74	22.8	18.1	38.2	11.4	16.2	41.7	84.1	28.9	13.4	24.9	29.9	27.4
Sm	1.36	3.94	3.61	7.07	2.01	3.28	8.07	17.1	6.62	3.23	4.42	5.54	4.46
Eu	0.49	1.31	1.16	1.36	0.74	0.99	1.98	2.33	1.24	0.88	1.26	1.32	1.24
Gd	1.36	3.54	3.67	6.45	2.13	3.69	7.07	15.8	7.55	3.86	3.64	5.1	3.04
Tb	0.13	0.44	0.49	0.85	0.27	0.51	0.91	2.28	1.1	0.63	0.5	0.71	0.34
Dy	0.77	2.36	3.13	5.1	1.66	3.21	5.17	13.9	6.99	4.24	2.67	4.08	1.22
Ho	0.16	0.42	0.62	1.01	0.32	0.64	0.98	2.71	1.38	0.89	0.49	0.74	0.16
Er	0.43	1.18	1.81	2.85	0.88	1.88	2.82	7.68	3.78	2.51	1.37	1.86	0.35
Tm	0.05	0.17	0.25	0.39	0.11	0.27	0.36	0.98	0.51	0.35	0.21	0.27	<0.05
Yb	0.4	1.1	1.71	2.33	0.77	1.74	2.39	6.19	3.34	2.39	1.27	1.58	0.21
Y	3.59	10.6	15.6	23.7	7.69	16.7	25	66.1	36	22.8	12.7	19.7	4.01
Lu	0.07	0.16	0.25	0.36	0.11	0.27	0.37	0.89	0.51	0.38	0.19	0.25	<0.05
Ba	596	906	168	173	347	377	604	140	125	467	625	390	2647
Co	9.2	19.1	32.7	30.3	10.3	29.2	37.6	42.6	36.9	43	17.6	8.72	2.24
Cr	106	151	98.7	40.9	17.3	40.1	163	10.7	14.3	61.4	153	31.2	6.65
Cs	0.17	0.17	0.06	0.26	0.08	0.11	1.37	0.24	0.1	0.08	0.89	0.15	0.21
Ga	15	19	20.2	23.4	18.7	19.7	23.9	25.9	18.5	18.2	19.4	17.9	11.8
Hf	2.05	3.86	2.47	7.41	3.19	4.24	3.86	2.59	3.19	2.35	3.09	4.46	2.13
Mo	0.65		0.75	0.87	0.29	47	0.26	0.6	1.05	0.57			
Nb	0.67	5.28	3.54	9.08	5.93	3.56	11.1	14.6	2.37	9.41	4.88	8.31	2.56
Ni	17.8	68.7	88.3	101	12.7	64.5	86.5	67.5	33.7	54.2	41.9	12.2	3.21
Pb	7.64	12.6	3.48	8.75	6.53	5.11	7.85	5.52	2.94	6.41	12.8	17.1	36.4
Rb	16.2	51.8	5.39	16.4	28	33.1	30.7	7.06	5.48	17.7	44.7	29.4	155
Sc	5.2	13.7	27.2	20.5	6.4	27.7	28.9	54.9	22.9	37.5	13.3	9.6	0.83
Sr	405	612	400	400	306	476	647	255	167	153	616	491	426
Ta	<0.05	0.18	0.24	0.31	0.28	0.22	0.45	0.71	0.19	0.73	0.42	0.52	0.09
Th	0.2	1.12	0.44	0.57	0.19	0.16	0.41	1.26	0.45	1.46	5.68	7.58	23.1
U	0.11	0.21	0.1	0.16	0.09	0.11	0.1	0.06	0.09	1.27	1.39	0.95	0.78
V	20	111	166	128	52.7	113	190	315	81.1	216	134	70.9	18.5
Zr	76.1	139	96.5	308	118	181	135	61.7	106	64.5	107	160	73.8



表3 冀东地区新太古代斜长角闪岩、片麻岩、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及其包体的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成

Table 3 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions of Neoproterozoic plagioclase-amphibolites, gneisses, hypershene-diorite/charnockites and enclaves in charnockites in eastern Hebei Province

样品号	Rb	Sr	$\frac{^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}}{(\times 10^{-6})}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	Rb/Sr	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm	Nd	$\frac{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}}{(\times 10^{-6})}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(t)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	t_{DM1}	t_{DM2}	t_{CHUR}
																			(Ma)
JD03-1	3.13	330	0.0275	0.703391	0.000011	0.009485	0.702377	7.34	35.4	0.1254	0.511573	0.000006	-20.77	0.509481	2.45	-0.36	2707	2565	2283
JD03-2	2.36	894	0.0076	0.702361	0.00001	0.002640	0.702081	7.61	43.1	0.1069	0.511309	0.000012	-25.92	0.509525	3.32	-0.46	2613	2828	2261
JD03-6	4.42	279	0.0457	0.703541	0.000013	0.015842	0.701856	1.62	5.02	0.1948	0.512827	0.000008	3.69	0.509577	4.33	-0.01	2591	1158	-15212
JD17-1	38.1	329	0.3348	0.710943	0.000016	0.115805	0.698598	1.21	6.79	0.1078	0.511332	0.000009	-25.48	0.509533	3.48	-0.45	2603	2799	2245
JD17-2	13.8	221	0.1805	0.709725	0.00001	0.062443	0.703069	0.549	3.03	0.1093	0.511384	0.000006	-24.46	0.50956	4.01	-0.44	2565	2730	2193
JD17-3	8.68	488	0.0515	0.707451	0.000011	0.017787	0.705552	2.55	13.1	0.1175	0.511455	0.000015	-23.08	0.509495	2.72	-0.40	2671	2686	2283
JD17-5	1.82	114	0.0461	0.703619	0.000011	0.015965	0.701919	7	26.7	0.1584	0.512195	0.000007	-8.64	0.509552	3.85	-0.19	2618	1857	1768
JD03-3	3.37	485	0.0201	0.703357	0.000011	0.006948	0.702616	3.88	17.9	0.1314	0.51169	0.000008	-18.49	0.509498	2.78	-0.33	2689	2431	2219
JD03-4	3.25	420	0.0224	0.70332	0.00001	0.007738	0.702494	2.61	13.3	0.1188	0.51148	0.000009	-22.59	0.509498	2.78	-0.40	2667	2657	2272
JD03-7	14.2	290	0.1416	0.70595	0.000016	0.048966	0.700729	2.34	11.4	0.1242	0.511638	0.000006	-19.51	0.509566	4.11	-0.37	2562	2453	2108
JD04-1	11.7	414	0.0818	0.703194	0.000012	0.028261	0.700178	2.98	13.6	0.132	0.511794	0.000006	-16.46	0.509592	4.62	-0.33	2517	2272	1994
JD04-2	9.1	297	0.0886	0.706036	0.000011	0.030640	0.702769	1.44	8.56	0.1016	0.511256	0.000006	-26.96	0.509561	4.02	-0.48	2562	2868	2221
JD05-1	44.1	146	0.8715	0.741881	0.000013	0.302055	0.709746	2.76	17.5	0.0953	0.511088	0.000006	-30.24	0.509498	2.78	-0.52	2640	3080	2336
JD17-4	10	385	0.0752	0.704799	0.000011	0.025974	0.702026	1.28	9.57	0.081	0.510785	0.000011	-36.15	0.509434	1.52	-0.59	270	3437	2447
JD09-1	2.62	360	0.0211	0.702528	0.000011	0.007278	0.701750	5.01	22.6	0.134	0.51178	0.000013	-16.74	0.509544	3.69	-0.32	2606	2310	2092
JD09-2*	3.73	235	0.046	0.704332	0.000012	0.015872	0.702636	15.7	78.4	0.121	0.511506	0.000008	-22.08	0.509487	2.57	-0.38	2688	2635	2285
JD09-3*	3.22	150	0.0623	0.704678	0.000011	0.021467	0.702381	6.35	28.1	0.1365	0.511861	0.000006	-15.16	0.509584	4.46	-0.31	2532	2203	1973
JD09-5	11.5	429	0.0777	0.705611	0.000012	0.026807	0.702746	6.44	35.9	0.1084	0.511277	0.000007	-26.55	0.509468	2.20	-0.45	2696	2891	2355
JD10-1	18.8	316	0.1721	0.710742	0.000012	0.059494	0.704396	2.2	13.2	0.1005	0.511103	0.000009	-29.94	0.509426	1.37	-0.49	2740	3099	2438
JD10-2*	9.04	121	0.2162	0.712963	0.000011	0.074711	0.704991	3.03	13.1	0.1397	0.511845	0.000008	-15.47	0.509514	3.10	-0.29	2673	2255	2126
JD10-3	20.2	421	0.1386	0.70856	0.000015	0.047981	0.703449	3.25	16.3	0.1205	0.51147	0.000007	-22.78	0.50946	2.03	-0.39	2732	2687	2342
JD16-1	22.8	716	0.0921	0.705617	0.000011	0.031844	0.702221	7.6	40.4	0.1137	0.511396	0.000006	-24.23	0.509499	2.80	-0.42	2659	2747	2287

注: $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_s - (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_s \times (e^{\lambda t} - 1)$; $\varepsilon_{\text{Nd}}(0) = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1) \times 10^4$; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s(t) / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(t) - 1) \times 10^4$; $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \ln(1 + ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}))$; $t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \ln(1 + ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s))$; 其中, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$ (Jacobsen and Wasserburg, 1980); $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51315$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2137$ (Jahn *et al.*, 1996). $t = 2550\text{Ma}$ (本区片麻岩形成的主要时代), 带星号(*)的样品为包体

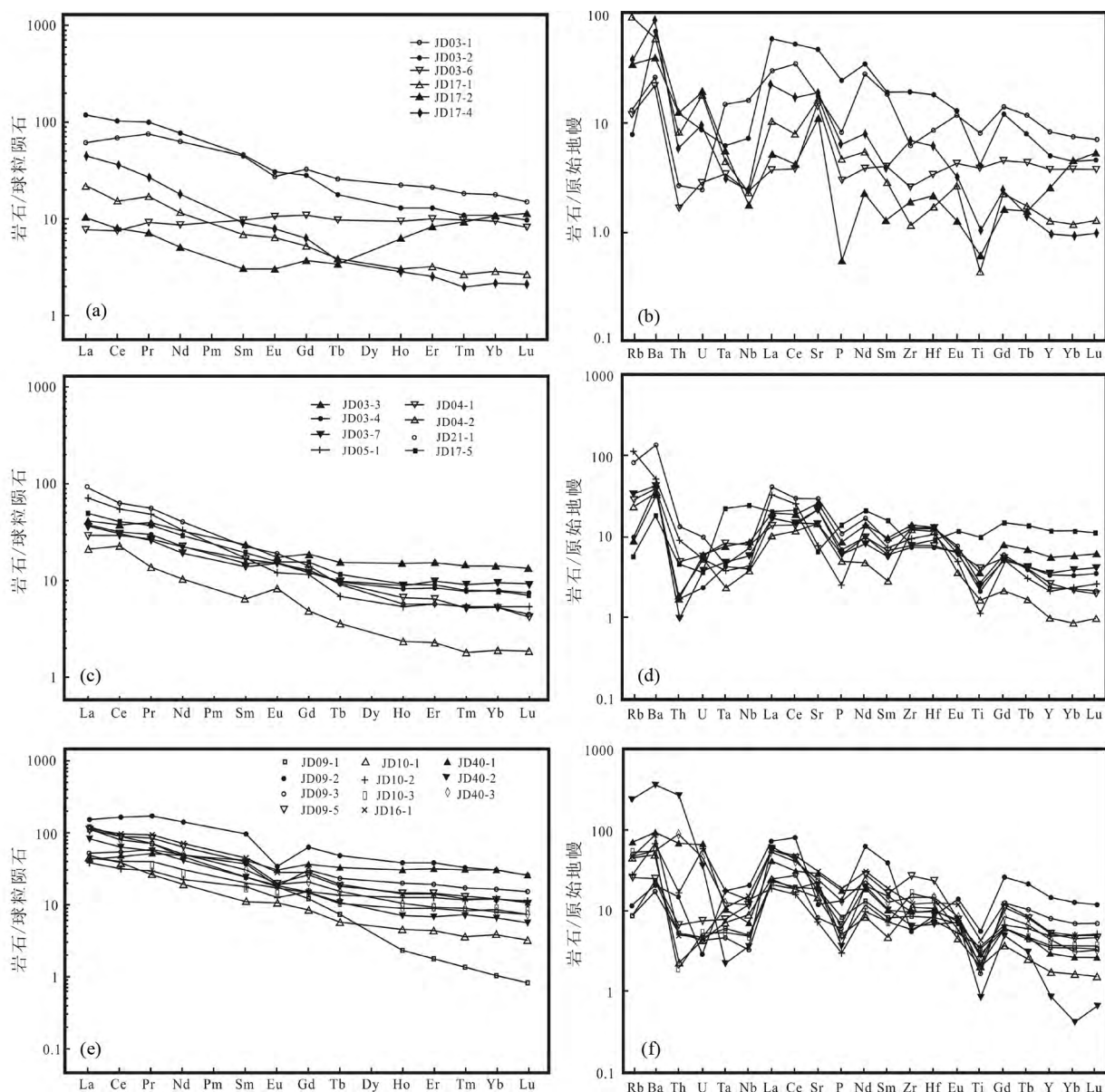


图4 斜长角闪岩类(a、b)、片麻岩类(c、d)、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体(e、f)的球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化值据 Haskin *et al.*, 1968)和原始地幔标准化微量元素蜘蛛图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (normalization values after Haskin *et al.*, 1968) and primitive mantle-normalized spider diagrams (normalization values after Sun and McDonough, 1989) for the amphibolites (a, b), gneisses (c, d), hypersthene-diorite/charnockites and enclaves (e, f)

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 分别变化于 0.1210 ~ 0.1397 和 0.511506 ~ 0.511845 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t = 2530\text{Ma})$ 值变化于 2.57 ~ 4.46 相应的亏损地幔模式年龄 t_{DM} 变化于 2532 ~ 2688Ma 之间(表3)。

4.3 锆石 U-Pb 年龄

笔者等曾对小官庄片麻岩、秋花峪片麻岩、龙湾片麻岩进行过锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定,对青杨树片麻岩、崔杖子片麻岩以及渔户寨紫苏花岗岩等进行过锆石蒸发法年龄测定(Geng *et al.*, 2006)。本次研究重点对冀东地区西部

分布最广的三屯营片麻岩进行年龄测定,同时对太平寨紫苏花岗岩、酒河桥基性麻粒岩进行年龄测定。由于以往曾报道在水厂大桥片麻岩包体中有中太古代的年龄信息,因此本次研究也对水厂大桥附近片麻岩中麻粒岩的包体进行了年龄测定。

4.3.1 三屯营片麻岩的锆石 U-Pb 年龄

本次研究对 4 个三屯营片麻岩样品(JD03-7、JD04-1、JD04-2、JD21-4)进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定。

JD03-7 号样品中的锆石外形呈次浑圆状,通常具有核-

幔-边结构,核部保留较少,具有典型的振荡环带;幔部通常发光较弱,没有明显的结构;边部通常较窄(个别较宽),发光较强,在 CL 图像中为亮白色(图 5a)。对该样品测定了 30 个点,大多位于核部和幔部,少部分位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $11 \times 10^{-6} \sim 2417 \times 10^{-6}$, $2 \times 10^{-6} \sim 307 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.02 ~ 1.18(见电子版附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,18 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2533 \pm 6\text{Ma}$ ($n = 18$, MSWD = 1.45); 位于幔部的为一组,8 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2482 \pm 22\text{Ma}$ ($n = 8$, MSWD = 2.5)(图 6f)。

有发光较强的边部,在 CL 图像中为亮白色(图 5f)。对该样品测定了 31 个点,大多位于核部和幔部,个别分析点位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $21 \times 10^{-6} \sim 804 \times 10^{-6}$, $11 \times 10^{-6} \sim 1085 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.09 ~ 2.28(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,18 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2533 \pm 6\text{Ma}$ ($n = 18$, MSWD = 1.45); 位于幔部的为一组,8 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2482 \pm 22\text{Ma}$ ($n = 8$, MSWD = 2.5)(图 6f)。

4.3.2 基性岩类的锆石 U-Pb 年龄

JD04-1 样品中的锆石外形呈长柱状,长宽比一般为 2 : 1 ~ 3 : 1,晶棱多有熔蚀。在阴极发光图像中通常具有核-幔结构,核部保留的大小不一,核部通常不具有明显的振荡环带,在阴极发光中成黑灰色;部分颗粒核部具有斑杂状环带;幔部通常发光较弱,没有明显的结构,宽度不一,多呈灰色到浅灰色;一些颗粒具有发光较强的边部,在 CL 图像中为亮白色(图 5b)。对该样品测定了 19 个点,大多位于核部和幔部,少部分位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $21 \times 10^{-6} \sim 183 \times 10^{-6}$, $7 \times 10^{-6} \sim 214 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.31 ~ 1.63(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,7 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2529 \pm 30\text{Ma}$ ($n = 7$, MSWD = 7.1); 位于幔部的为一组,4 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2487 \pm 18\text{Ma}$ ($n = 4$, MSWD = 1.8)(图 6b)。

JD17-5 号样品中的锆石外形为近等轴状,长宽比一般为 1 : 1 左右,晶体边缘多有熔蚀。在阴极发光图像中通常具有核-幔-边结构,核部保留的大小不一,核部通常不具有明显的振荡环带,在阴极发光中成黑灰色;部分颗粒核部具有斑杂状环带;幔部通常发光较弱,没有明显的结构,宽度不一,多呈灰色到浅灰色;一些颗粒具有发光较强的边部,在 CL 图像中为亮白色(图 5e)。对该样品测定了 32 个点,大多位于核部和幔部,个别分析点位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $11 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$, $4 \times 10^{-6} \sim 126 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.07 ~ 1.55(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,7 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2536 \pm 15\text{Ma}$ ($n = 7$, MSWD = 0.33); 位于幔部的为一组,17 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2486 \pm 17\text{Ma}$ ($n = 17$, MSWD = 2.4)(图 6e)。

4.3.3 紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体的锆石 U-Pb 年龄

JD04-2 号样品中的锆石外形呈长柱状,长宽比一般为 2 : 1 ~ 4 : 1,晶棱多有熔蚀。在阴极发光图像中通常具有核-幔结构,核部保留的大小不一,一些颗粒核部较大,具有典型的振荡环带或斑状环带,一些颗粒核部基本消失;幔部通常发光较弱,没有明显的结构,宽度不一;一些颗粒具有发光较强的边部,在 CL 图像中为亮白色(图 5c)。对该样品测定了 35 个点,大多位于核部和幔部,少部分位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $17 \times 10^{-6} \sim 2047 \times 10^{-6}$, $2 \times 10^{-6} \sim 207 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.02 ~ 1.4(附表 1),其中核部和幔部分析点的 Th/U 比值都大于 0.1,而边部分析点的 Th/U 比值都小于 0.1。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,11 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2527 \pm 8\text{Ma}$ ($n = 11$, MSWD = 1.7); 位于幔部的为一组,14 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2473 \pm 16\text{Ma}$ ($n = 14$, MSWD = 1.15)(图 6c)。

JD09-1 号采自太平寨的紫苏闪长岩/紫苏花岗岩,样品中的锆石外形为近等轴状到长柱状,长宽比一般为 1 : 1 到 3 : 1,晶体边缘多有熔蚀。在阴极发光图像中通常具有核-幔-边结构,核部通常不具有明显的振荡环带或板状环带;幔部通常发光较弱,没有明显的结构,宽度不一,多呈暗灰色;一些颗粒具有发光较强的边部,在 CL 图像中为亮白色(图 5d)。对该样品测定了 35 个点,大多位于核部和幔部,个别分析点位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $11 \times 10^{-6} \sim 1871 \times 10^{-6}$, $8 \times 10^{-6} \sim 1174 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.04 ~ 1.26(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近,少数分析点有一定程度的铅丢失。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,13 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2511 \pm 10\text{Ma}$ ($n = 13$, MSWD = 2.3); 位于幔部的为一组,8 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2479 \pm 26\text{Ma}$ ($n = 8$, MSWD = 3.2)(图 6d)。

JD21-1 号样品中的锆石外形为短柱状到长柱状,长宽比一般为 1 : 1 ~ 3 : 1,晶棱多有熔蚀。在阴极发光图像中通常具有核-幔-边结构,核部保留的大小不一,核部通常不具有明显的振荡环带,在阴极发光中成黑灰色;幔部通常发光较弱,没有明显的结构,宽度不一,多呈灰色到浅灰色;一些颗粒具

有发光较强的边部,在 CL 图像中为亮白色(图 5f)。对该样品测定了 31 个点,大多位于核部和幔部,个别分析点位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $21 \times 10^{-6} \sim 804 \times 10^{-6}$, $11 \times 10^{-6} \sim 1085 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.09 ~ 2.28(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,18 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2533 \pm 6\text{Ma}$ ($n = 18$, MSWD = 1.45); 位于幔部的为一组,8 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2482 \pm 22\text{Ma}$ ($n = 8$, MSWD = 2.5)(图 6f)。

4.3.2 基性岩类的锆石 U-Pb 年龄

JD17-5 号样品中的锆石外形为近等轴状,长宽比一般为 1 : 1 左右,晶体边缘多有熔蚀。在阴极发光图像中通常具有核-幔-边结构,核部保留的大小不一,核部通常不具有明显的振荡环带,在阴极发光中成黑灰色;部分颗粒核部具有斑杂状环带;幔部通常发光较弱,没有明显的结构,宽度不一,多呈灰色到浅灰色;一些颗粒具有发光较强的边部,在 CL 图像中为亮白色(图 5e)。对该样品测定了 32 个点,大多位于核部和幔部,个别分析点位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $11 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$, $4 \times 10^{-6} \sim 126 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.07 ~ 1.55(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,7 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2536 \pm 15\text{Ma}$ ($n = 7$, MSWD = 0.33); 位于幔部的为一组,17 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2486 \pm 17\text{Ma}$ ($n = 17$, MSWD = 2.4)(图 6e)。

4.3.3 紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体的锆石 U-Pb 年龄

JD09-1 号采自太平寨的紫苏闪长岩/紫苏花岗岩,样品中的锆石外形为近等轴状到长柱状,长宽比一般为 1 : 1 到 3 : 1,晶体边缘多有熔蚀。在阴极发光图像中通常具有核-幔-边结构,核部通常不具有明显的振荡环带或板状环带;幔部通常发光较弱,没有明显的结构,宽度不一,多呈暗灰色;一些颗粒具有发光较强的边部,在 CL 图像中为亮白色(图 5d)。对该样品测定了 35 个点,大多位于核部和幔部,个别分析点位于边部。锆石的 U、Th 含量分别为 $11 \times 10^{-6} \sim 1871 \times 10^{-6}$, $8 \times 10^{-6} \sim 1174 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.04 ~ 1.26(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中绝大多数点位于谐和线上或附近,少数分析点有一定程度的铅丢失。去掉分析误差较大或偏离谐和线的点之外,位于核部的为一组,13 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2511 \pm 10\text{Ma}$ ($n = 13$, MSWD = 2.3); 位于幔部的为一组,8 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2479 \pm 26\text{Ma}$ ($n = 8$, MSWD = 3.2)(图 6d)。

JD40-1 号样品采自迁安水厂大桥下黑云二长片麻岩中的麻粒岩包体,样品中的锆石外形为近等轴状到短柱状,长宽比一般为 1 : 1 到 2 : 1,晶体边缘多有熔蚀。在阴极发光图像中通常具有核-幔结构,核部具有明显的振荡环带或板状环带;幔部通常发光较弱,没有明显的结构,多呈暗灰色;

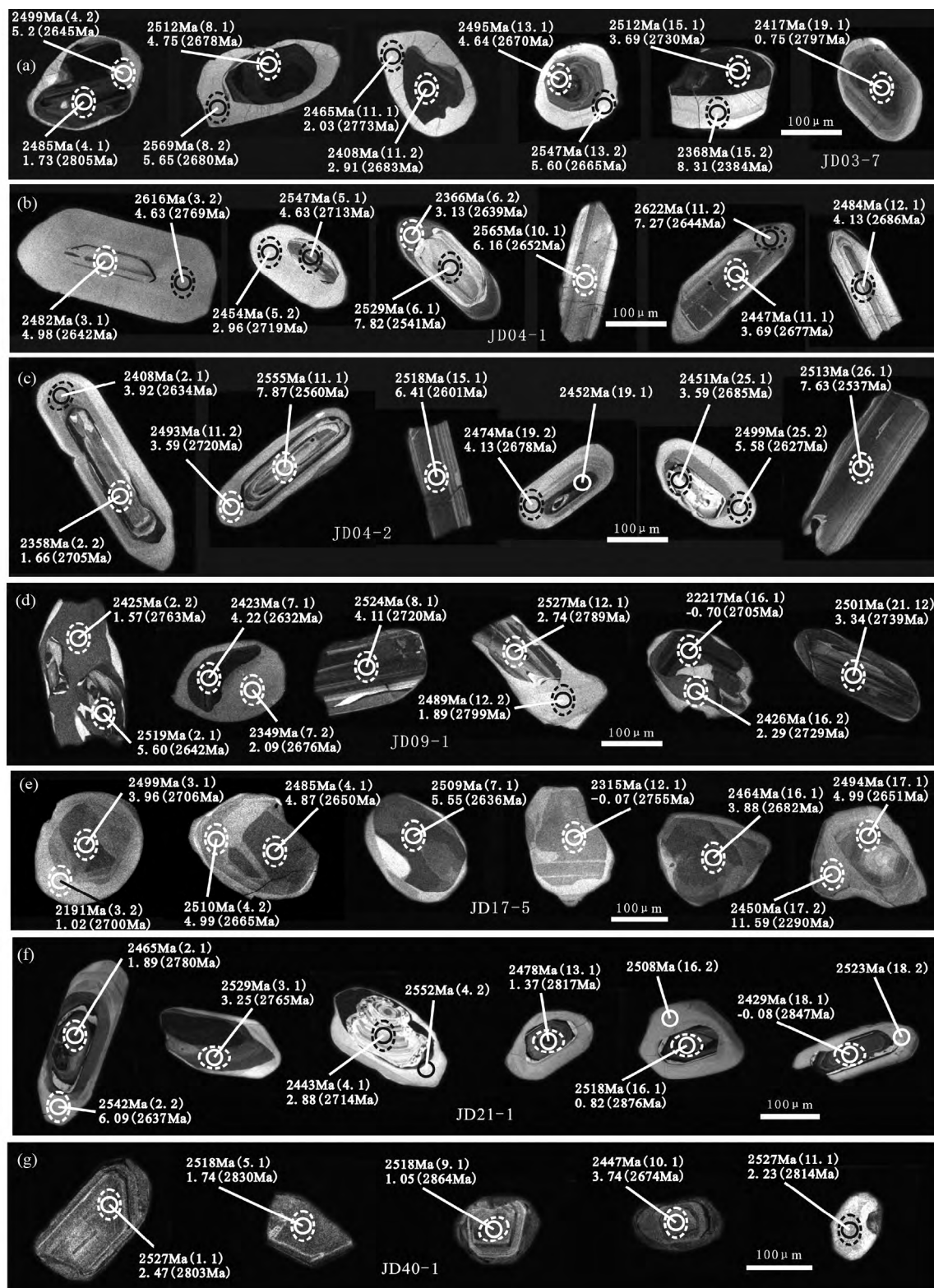


图5 片麻岩、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩和斜长角闪岩类的锆石 CL 图像

线条圆代表 SHRIMP U-Pb 分析点,断线椭圆代表 LA-ICP-MS Hf 同位素分析点,2512Ma (8.1), 4.75 (2678Ma) 分别代表锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄、分析点号、锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$

Fig. 5 CL images of zircons from gneisses, hypersthene-diorite /charnockite and amphibolite in eastern Hebei Province

Circle represents the spot of U-Pb analysis, ellipse represents the Lu-Hf analysis, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age, spot number, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value and $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ value also are shown against each spot

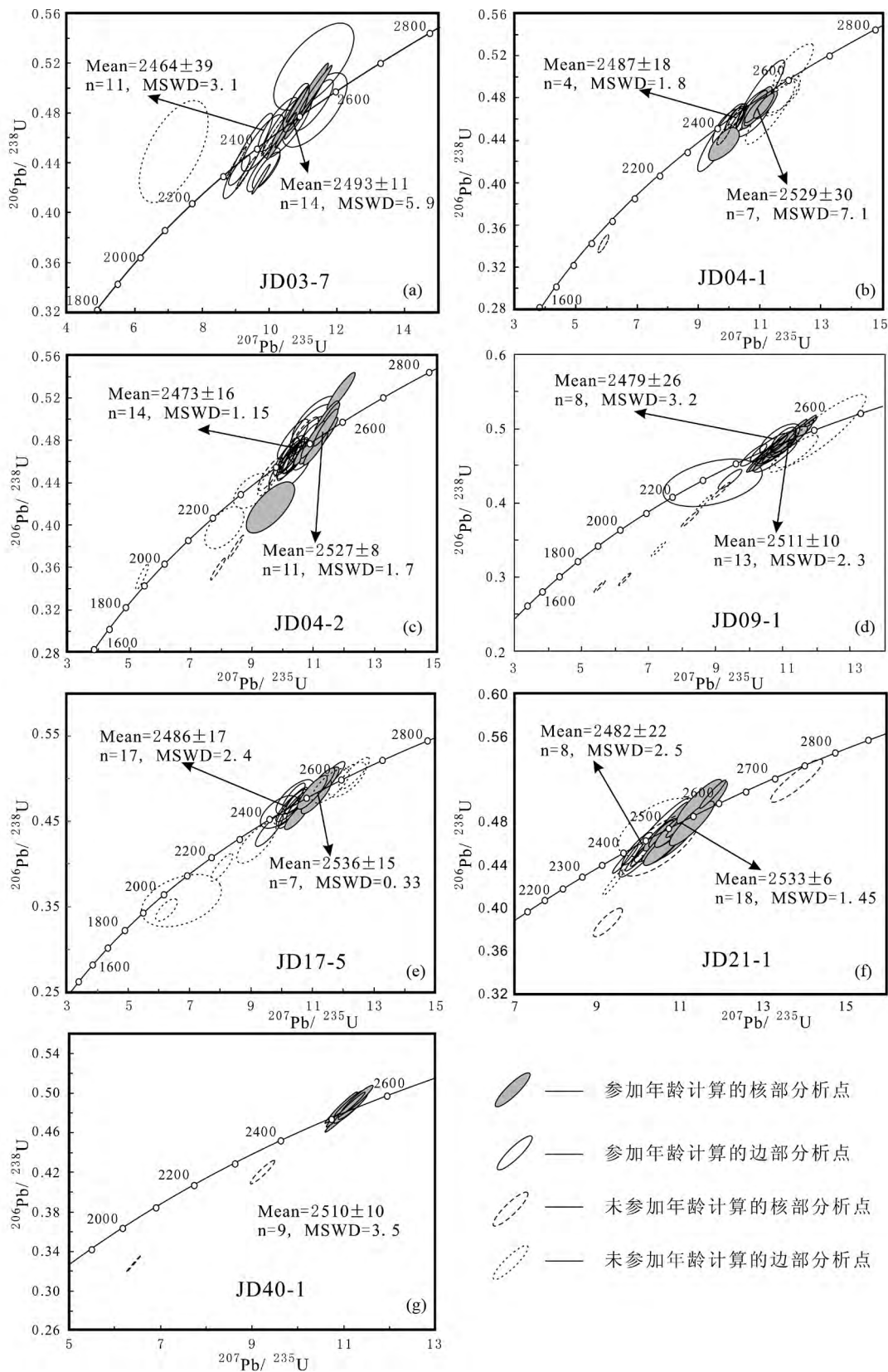


图6 片麻岩类、基性岩类、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体的锆石 U-Pb 同位素谐和图

Fig. 6 SHRIMP U-Pb concordia diagrams of the zircon from gneisses, basic rock, hypersthene-diorite /charnockite and enclave

个别颗粒发光较强,在 CL 图像中为亮白色(图 5g)。对该样品测定了 11 个点,大多位于核部。锆石的 U、Th 含量分别为 $143 \times 10^{-6} \sim 1210 \times 10^{-6}$, $64 \times 10^{-6} \sim 602 \times 10^{-6}$, Th/U 变化于 0.44 ~ 1.21(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谱和图中除 2 个分析点(4.1 和 10.1)有明显的 Pb 丢失之外,其他分析点基本位于谱和线上。位于谱和线上 9 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 $2510 \pm 10\text{Ma}$ ($n=9$, MSWD=3.5)(图 6g)。

4.4 锆石 Hf 同位素组成特征

在锆石 U-Pb 年龄分析的基础上基本在原位进行了锆石 Hf 同位素的分析,结果见电子版附表 2。

4 个片麻岩样品中锆石不论是核部点还是幔部点所分析的 Hf 同位素非常相近(除个别反映古元古代变质反应边的分析点外),JD03-7、JD04-1、JD04-2 和 JD21-1 样品中锆石的($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值分别为 0.281244 ~ 0.281505、0.281211 ~ 0.281473、0.281259 ~ 0.281403 和 0.281197 ~ 0.281342; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 0.25 ~ 8.31、1.65 ~ 7.82、1.66 ~ 8.15 和 -0.08 ~ 8.43; 相对于亏损地幔的单阶段模式年龄(t_{DM1}) 分别为 2611 ~ 2732Ma、2538 ~ 2773Ma、2516 ~ 2711Ma 和 2601 ~ 2785Ma; 反映地壳滞留时间的两阶段模式年龄(t_{DM2}) 分别为 2645 ~ 2802Ma、2541 ~ 2847Ma、2515 ~ 2807Ma 和 2635 ~ 2876Ma(附表 2)。

来自洒河桥的石榴角闪斜长辉石岩(JD17-5)样品中锆石的($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值为 0.281291 ~ 0.281544, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -3.23 ~ 11.59 之间,且绝大多数为正值。除 1 个分析点的相对于亏损地幔的单阶段模式年龄(t_{DM1}) 明显小于 2.5Ga 之外,其余介于 2489 ~ 2686Ma 之间,略大于其形成年龄(2536Ma); 反映地壳滞留时间的两阶段模式年龄(t_{DM2}) 介于 2510 ~ 2755Ma 之间(附表 2)。

来自太平寨的紫苏闪长岩/紫苏花岗岩(JD09-1)样品中锆石的初始($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值为 0.281245 ~ 0.281437, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -0.70 ~ 9.49 之间,且绝大多数为正值。相对于亏损地幔的单阶段模式年龄(t_{DM1}) 介于 2516 ~ 2896Ma 之间,略大于其形成年龄; 反映地壳滞留时间的两阶段模式年龄(t_{DM2}) 介于 2530 ~ 3001Ma 之间(附表 2)。

来自水厂大桥黑云二长片麻岩中麻粒岩(JD40-1)包体中锆石的($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值为 0.281182 ~ 0.281350, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -0.44 ~ 5.85 之间,且绝大多数为正值。相对于亏损地幔的单阶段模式年龄(t_{DM1}) 介于 2590 ~ 2766Ma 之间,略大于其形成年龄; 反映地壳滞留时间的两阶段模式年龄(t_{DM2}) 介于 2614 ~ 2899Ma 之间(附表 2)。

5 讨论

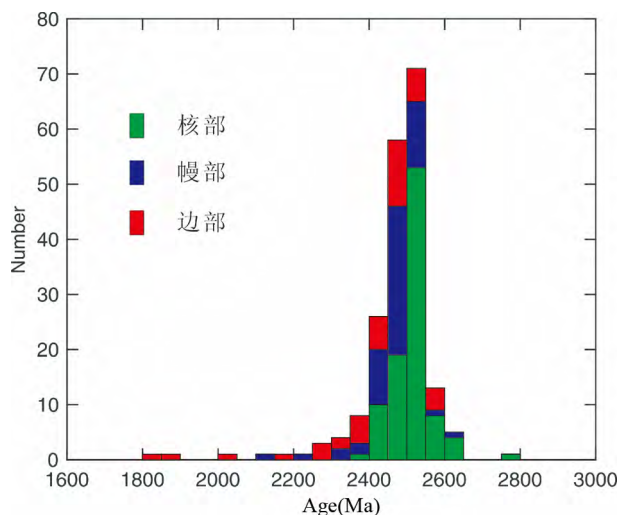
5.1 年龄数据的地质意义

麻粒岩相变质岩石中的锆石通常较为复杂,一些研究者认为控制锆石年龄的因素包括新生锆石的生长(包括流体下

的生长和固态生长)和已有锆石的改造(包括重结晶、熔蚀-再沉淀及 Pb 的扩散和丢失),并根据锆石阴极发光图像将遭受麻粒岩相变质改造的锆石颗粒划分为岩浆成因的核部、重结晶的内部亮层、具有扇状环带的重结晶域、流体与变质作用共同作用形成的变质边以及有流体存在的重结晶的外部亮层(Grant *et al.*, 2009)。Ma *et al.* (2012) 则根据对内蒙大青山地区麻粒岩的研究把遭受到高级变质改造的锆石划分为具有明显振荡环带的岩浆成因的核部、内部结构不明显的重结晶的核部、变质成因的幔部以及有流体参与的重结晶的边部。这些遭受新太古代晚期麻粒岩相变质改造的岩石,通常还受到后期(主要是古元古代晚期)的变质改造,由于麻粒岩相的变质改造使岩石形成干体系,在这种情况下即使受到后期改造,很少形成古元古代晚期的新生锆石,但是可以使新太古代末期变质改造后的锆石发生 Pb 丢失,产生一些沿谱和线分布的介于新太古代晚期-古元古代晚期的分析点,但是它们通常不具有明确的地质意义(Wan *et al.*, 2011b)。可见遭受麻粒岩相变质改造的锆石内部结构复杂、同位素体系变化较大,因此对所获得的年龄解释需要慎重。

冀东地区的 TTG 片麻岩、变质火山岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩等经历了强烈的变质与变形改造,因此不同岩石中的锆石通常具有核-幔-边的复杂结构。一般来说把核部解释为早期岩浆锆石的形成时代,幔部解释为早期的变质时间,边部代表晚期的构造热事件。由于该区经历了麻粒岩相的变质改造,甚至高压麻粒岩相的变质改造,峰期变质温压条件可以达到 11 ~ 13kbar/790 ~ 810°C (Duan *et al.*, 2015) 或 12 ~ 13kbar/820 ~ 850°C (Lu *et al.*, 2017),还发现有变质温度可以达到 950 ~ 1025°C 的超高温麻粒岩(Yang and Wei, 2017)。由于温度已超过 800°C,高于锆石的结晶温度。高级变质通常伴有含水矿物的脱水熔融,在高温和流体参与的高级变质作用过程中锆石的同位素体系是否会影响,从而改造锆石的原有结构和同位素体系的重置需要认真考虑。

从所有样品锆石年龄的直方图(图 7)可以看出,很多核部分分析点和幔部甚至边部分分析点的年龄是重合的,也就是说幔部和边部的一些分析点的年龄部分继承了原来岩浆锆石的 U-Pb 同位素组成,而一些核部的分析点与幔部、边部重合则是由于核部岩浆锆石的同位素体系在幔部或边部重结晶时受到了同位素体系的重置,造成年龄的年轻化。本次分析的样品中 JD03-7、JD17-5 和 JD21-1 在锆石阴极发光图像中,内核多为暗灰黑色,内部环带不明显(图 5a, e, f),基本属于变质重结晶的核部,所计算的核部分分析点的加权平均年龄只能作为其形成的最小年龄值。JD04-1 号样品中一些颗粒中保留有具有振荡环带的核部,其中 3 号颗粒核部很小,有非常宽的幔,核部受到影响比较大,因此出现了核部年龄小于幔部年龄的情况; 6 号颗粒具有振荡环带的核部较大,幔部相对较小,核部的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2529 \pm 45\text{Ma}$ (图 5b),与该样品核部加权平均年龄 $2529 \pm 30\text{Ma}$ 一致,可以大致代表该样品岩浆锆石的形成年龄。JD04-2 号样品中锆石多数具

图7 所有样品锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄直方图Fig. 7 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age histogram for studied samples

有振荡环带的核部,但是有的已经被幔部改造(图5c中19号颗粒和25号颗粒),11号颗粒的核部较大,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 $2555 \pm 14\text{Ma}$,该年龄大于核部加权平均年龄 $2527 \pm 8\text{Ma}$ 。由于统计核部年龄时包括了一些被改造过的核部年龄,所以可能偏小,我们认为 $2555 \pm 14\text{Ma}$ 可以代表该样品早期岩浆事件的年龄。JD09-1号样品中锆石的核部部分已经被幔部改造,内部结构基本消失,而8号和12号颗粒核部振荡环带比较清晰,可能受幔部重结晶的影响比较小,其年龄分别为 2524Ma 和 2527Ma ,比核部所有点的加权平均年龄 $2511 \pm 10\text{Ma}$ 略大,可能代表早期的岩浆事件年龄。JD40-1号样品锆石颗粒较小,其中1号点振荡环带发育,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 $2527 \pm 10\text{Ma}$,较位于谐和线上所有核部点的加权平均年龄 $2510 \pm 10\text{Ma}$ 略大,可以大致代表岩浆核部的形成年龄。以上分析表明,由于遭受过麻粒岩相变质改造岩石中锆石核部可能受到变质重结晶的影响,部分同位素体系重置,加权平均年龄可能偏小,应以基本没有受到重结晶影响、具有清晰振荡环带的最老的锆石核部(需要排除继承锆石核部)作为早期岩浆事件发生的时间。

近年获得了冀东地区大量变质作用时间的同位素年龄数据,综合已有资料,该区变质作用的年龄大体可以分为4组,第一组年龄为 2.5Ga 左右,代表冀东地区区域麻粒岩相变质作用时间(Nutman *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2008, 2016b; Lu *et al.*, 2017; Yao and Zhang, 2017);第二组年龄为 $2.47 \sim 2.48\text{Ga}$,或认为是麻粒岩相变质作用时间,或认为是麻粒岩相晚期的冷却时间(Bai *et al.*, 2015; 韩鑫等, 2016; Duan *et al.*, 2017; Yao and Zhang, 2017);第三组年龄为 $2.35 \sim 2.46\text{Ga}$,可能代表晚期的变质事件或麻粒岩相的冷却时间(Guo *et al.*, 2013; Bai *et al.*, 2014, 2015, 2016; Fu *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016a);第四组年龄为 1.85Ga 左右,主要表现在古元古代基性岩墙的麻粒岩相变质,在一些新太

古代晚期辉长质片麻岩中也有所反映(Duan *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2016b; 杨崇辉等, 2017)。在迁西娄子山变泥质岩中,获得有 $2499 \pm 11\text{Ma}$ 和 $2496 \pm 6\text{Ma}$ 的年龄数据(Lu *et al.*, 2017),由于变泥质岩中的锆石主要是变质锆石(基本没有继承核),不受继承锆石的影响,所以 2.5Ga 左右的年龄数据可以代表区域麻粒岩相变质作用的时间。对于第二组和第三组年龄有不同的认识。由于在金厂峪绿片岩相剪切带中糜棱岩化绿片岩中获得 $2475 \pm 13\text{Ma}$ 、绿片岩相糜棱岩(原岩为花岗岩脉)中获得 $2474 \pm 30\text{Ma}$ 的年龄,代表绿片岩相变质作用的时间(Yao and Zhang, 2017),可以说第二组年龄近似于麻粒岩相退变到绿片岩相的冷却时间。由于冀东地区普遍遭受到麻粒岩相高级变质,使岩石处于干体系状态,在这种情况下尽管受到古元古代晚期变质事件的影响,但很难形成新生锆石,但是可以使新太古代末期变质改造后的锆石发生Pb丢失,产生一些沿谐和线分布的介于新太古代晚期-古元古代晚期的分析点,但是它们通常不具有明确的地质意义(Wan *et al.*, 2011b)。从本区特点看,第三组年龄时间跨度大,从 2366Ma 到 2461Ma ,这样长的时间跨度且没有其他同时的地质事件相对应,很难用变质事件或早前麻粒岩相变质事件冷却来解释,所以我们认为这一组年龄数据很可能并不具有实际的地质意义。 1.85Ga 的变质年龄数据目前主要来自古元古代侵位的基性岩脉的变质事件,似乎是局限的,但是在一些辉长质片麻岩和奥长花岗质片麻岩中已有类似的反映(Yang *et al.*, 2016b; Fu *et al.*, 2016)。前已述及,在新太古代晚期遭受了麻粒岩相变质后岩石多已为干体系,在干体系中受到第二期麻粒岩相变质改造是很难形成新生锆石,所以我们推断在冀东地区 1.85Ga 左右的麻粒岩相变质不是局部的,分布范围可能更广。

5.2 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的成因

在全岩 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解上不论是基性岩类、片麻岩类还是紫苏闪长岩/紫苏花岗岩类(包括包体)都位于球粒陨石演化线和亏损地幔演化线之间,很多样品直接位于亏损地幔演化趋势范围(图8),表明冀东地区的基性岩类主要来源于亏损地幔源,片麻岩类和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩主要来源于亏损地幔演化的新生地壳,较少受到古老地壳的混染。在锆石 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解上,基性岩样品石榴角闪斜长辉石岩(JD17-5)、部分片麻岩(JD04-1, JD04-2)和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩样品(JD09-1)更接近亏损地幔演化线,表明他们主要是亏损地幔演化的产物,较少受到地壳的混染。而片麻岩(JD03-7, JD21-4)和包体(JD40-1)则偏离亏损地幔演化线较多,靠近球粒陨石的演化线(图9a),表明它们虽然也来自亏损地幔衍生的新生地壳,但是受到较低程度的地壳混染。在该图解中一些点的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值,似乎表明它们受到了较多的地壳物质混染,但是根据分析点的位置可以看出,这些明显位于亏损地幔演化线($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 0$)之下的分析点,主要位于所分析锆石的边部和幔部,而核部的分析点 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值基本为正

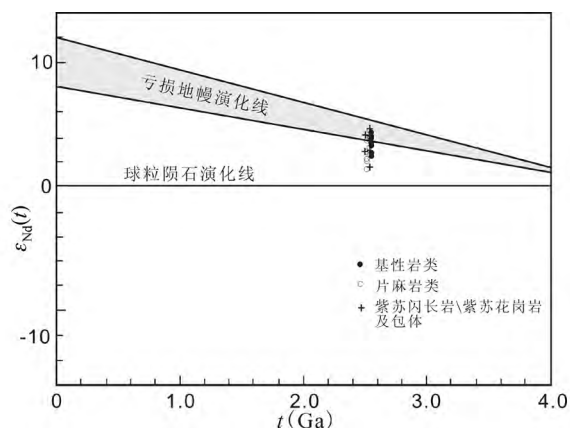


图8 基性岩类、片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解

Fig. 8 Diagram of t vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ for basic rocks, gneisses and hypersthene-diorite/charnockites

值,接近亏损地幔演化线,表明岩浆成因的锆石主要来自亏损地幔的演化。一些 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值的点主要位于边部和幔部(图9b),属于变质锆石,说明在变质过程中结晶的锆石有来自地壳物质的加入和改造。

根据全岩 Sm-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素特征我们认为,本区的片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体主要来源于亏损地幔,只有少量的地壳物质加入。从本区片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体的稀土元素标准化图解和微量元素的蜘蛛网图可以看出(图4),不同样品之间的分布有一定差异,与受到地壳混染的程度有关。由于地壳中富集轻稀土元素、大离子亲石元素和 Zr、Hf(Rudnick and Fountain, 1995; Wedepohl, 1995; Gao *et al.*, 1998),受到地壳混染的岩石通常具有轻稀土富集、大离子亲石元素和 Zr、Hf 相对富集,本区片麻岩和紫苏花岗岩的稀土元素和微量元素具有相对富集的特点(图4),因此可以判断本区的片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩主要来源于亏损地幔产生的新生地壳,

但是受到了一定程度的地壳混染,且混染程度不同,导致不同样品之间的差异。

所研究的8个片麻岩类样品的 CFM 参数($\text{CaO}/(\text{MgO} + \Sigma\text{FeO})$, 摩尔数)和 AFM($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \Sigma\text{FeO})$, 摩尔数)分别为 0.47 ~ 1.00 和 1.04 ~ 2.43。紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体的 CFM 参数和 AFM 参数分别为 0.45 ~ 0.99 和 0.28 ~ 2.05。在 CFM 对 AFM 图解中这两类岩石落入变质玄武岩和变英云闪长岩源区的部分熔融(图10a),只有水厂大桥附近包裹有麻粒岩包体的黑云二长片麻岩的 AFM 值为 7.61,表明 Al_2O_3 含量高,而 FeO 和 MgO 含量低,因此投影在变质硬砂岩部分熔融区域的上方。常量元素的特征也表明所研究的片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩是由新生的下地壳玄武质岩石部分熔融形成的。

全岩 Sm-Nd 同位素、锆石 Hf 同位素和 AFM 对 CFM 图解表明研究区的片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的原始岩浆是从亏损地幔部分熔融产生的,而一些微量元素可以解释从岩浆到岩石形成过程的因素。在 Ce 对 Ce/Sm 图解中本区片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩(包括基性岩类)基本水平分布,显示了分离结晶的特点(图10b)。与 Fu *et al.* (2016) 所研究的冀东地区富含石英的闪长岩、低分异型英云闪长岩-奥长花岗岩以及 Bai *et al.* (2016) 所研究的该区闪长质片麻岩具有相同的分布趋势,表明这些岩石经历了岩浆的分离结晶作用。在 Sc 对 Zr 图解中投点较分散,但是可以看出基本具有分离结晶的演化趋势(图10c),这与 Bai *et al.* (2016) 所研究的冀东地区闪长质片麻岩和 TTG 片麻岩具有相似分布特点,也意味着它们经历了岩浆的分离结晶作用。在 Yb_N 对 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 图解中(图10d)本区的片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩都表现为向右倾斜的分布,与 Bai *et al.* (2016) 所研究的闪长质片麻岩和 TTG 片麻岩具有相同的分布特点,表明本区的闪长质片麻岩和 TTG 片麻岩在分离结晶过程中,角闪石是主要的分离结晶相矿物。由于本区的片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩多已经历了麻粒岩相的变质改造,在许多岩石的暗色矿物中角闪石含量相对较少,而

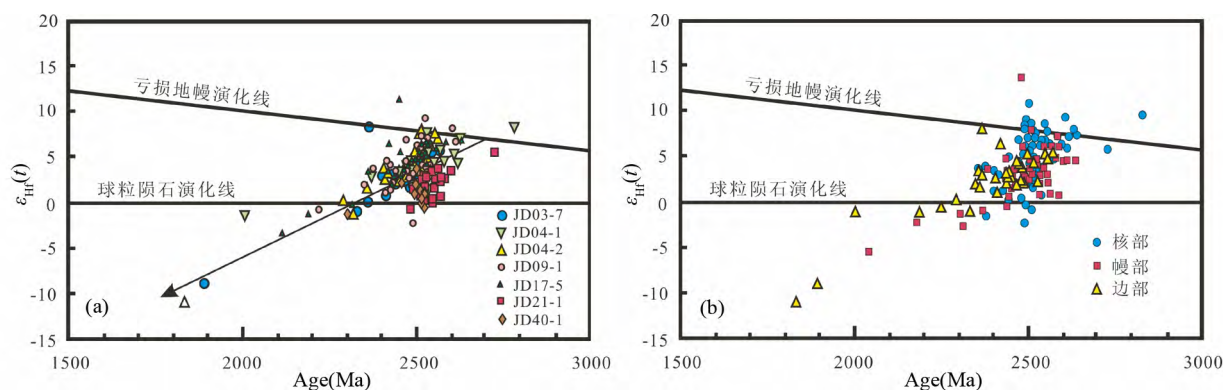


图9 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(a,以样品为单位;b,以分析点位置为单位)

Fig. 9 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age plot for dated zircon grains (a, showing samples; b, showing spot locations)

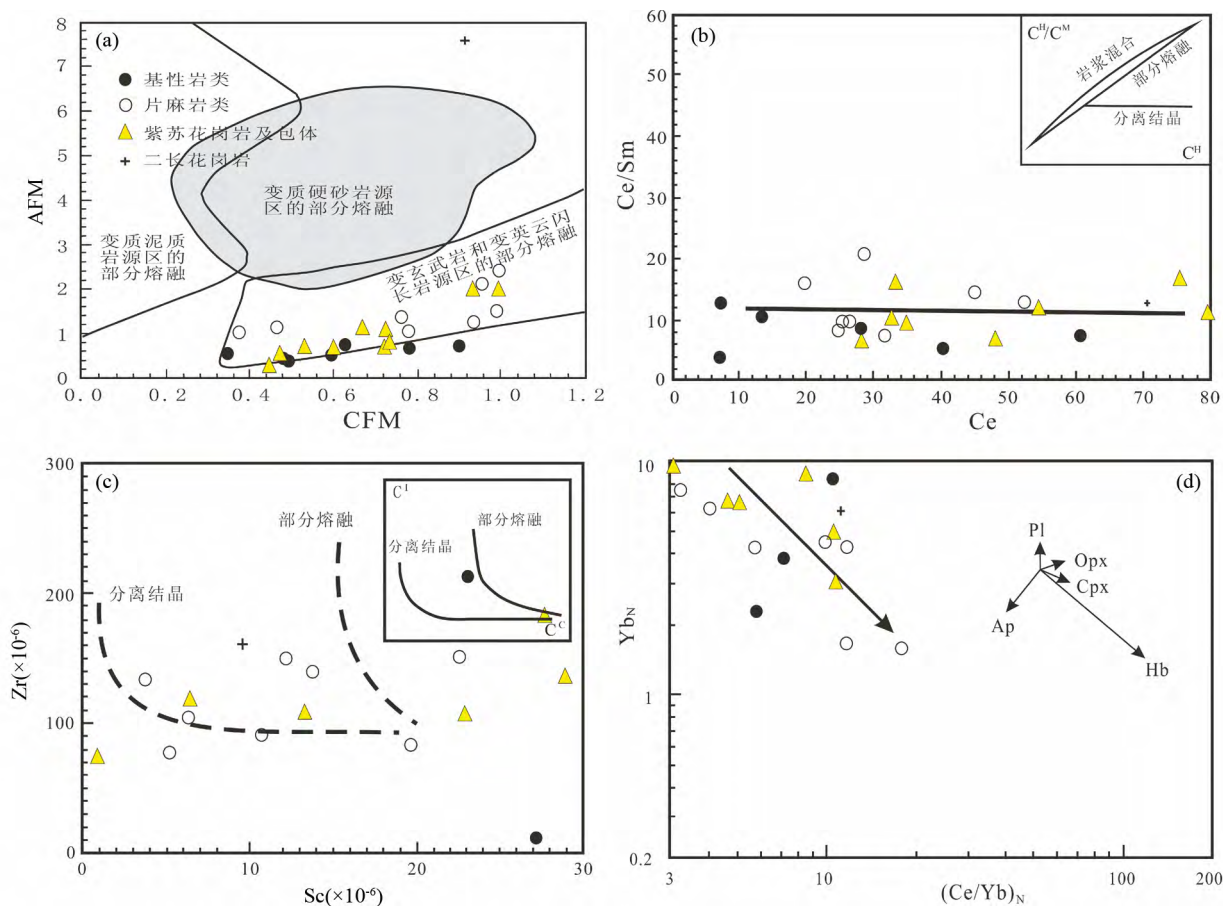


图 10 基性岩类、片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的 CFM-AFM (a, 据 Altherr *et al.*, 2000)、Ce-Ce/Sm (b, 据 Schiano *et al.*, 2010)、Sc-Zr (c, 据 Peccerillo *et al.*, 2003) 和 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ - Yb_N (d, 据 Bai *et al.*, 2016) 图解

Fig. 10 Digrams of CFM vs. AFM (a, modified after Altherr *et al.*, 2000), Ce vs. Ce/Sm (b, modified after Schiano *et al.*, 2010), Sc vs. Zr (c, modified after Peccerillo *et al.*, 2003) and $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ vs. Yb_N (d, modified after Bai *et al.*, 2016) for basic rocks, gneisses and hypersthene-diorite / charnockites

单斜辉石和紫苏辉石含量较多,但这已经是变质矿物,并不代表岩浆阶段结晶的矿物。

通过以上分析,本区片麻岩和紫苏花岗岩的岩浆演化大体可以归结为:最初从亏损地幔分异出的新生地壳的部分熔融形成了初始岩浆,岩浆经历了分离结晶作用,暗色矿物角闪石是主要的分离结晶相矿物,形成了 TTG 或紫苏闪长岩/紫苏花岗岩,后经过麻粒岩相的变质改造,形成以辉石为主要暗色矿物的麻粒岩相变质岩石。

5.3 新太古代的地壳增生和区域构造意义

本文作者等统计了华北克拉通锆石 Hf 同位素数据,提出 2.7Ga 是华北克拉通地壳增生的最主要时期,并统计了锆石 Hf 同位素的单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 和两阶段模式年龄 (t_{DM2}) 峰值分别为 $2698 \pm 4\text{Ma}$ 和 $2714 \pm 5\text{Ma}$,二者相差不到 20Ma,表明中酸性岩浆岩的母岩在地壳滞留的时间较短 (Geng *et al.*, 2012),因此本文以锆石 Hf 两阶段模式年龄

(t_{DM2}) 作为基本参数。本次研究的 7 个样品中锆石的 Hf 两阶段模式年龄不论是核部、幔部和边部具有相似的结果,其峰值为 2.72Ga (图 11),与华北全区锆石 Hf 的同位素统计的结果一致。表明 2.7Ga 左右是华北克拉通最主要的地壳增生时间。全岩 Sm-Nd 同位素计算的单阶段模式年龄为 2532 ~ 2740Ma,两阶段模式年龄为 2255 ~ 3080Ma,比锆石 Hf 同位素计算的模式年龄相对较小,且变化较大,表明全岩 Sm-Nd 同位素体系在变质、变形过程中受到了改造。Fu *et al.* (2016) 对遵化-青龙微地块中斑杂状闪长质-英云闪长质片麻岩中锆石 Hf 同位素的研究认为 2.53 ~ 2.50Ga 既是新生地壳从富集地幔生长的主要时期,也是地壳再造的主要时期。我们认为这一阶段主要是地壳的再造,新生地壳的生长只是少量的。

以往认为反映华北克拉通 2.7Ga 地壳增生的事件主要表现在鲁西地区 (Jahn *et al.*, 1988; 杜利林等 2003, 2010; 陆松年等 2008; 王伟等 2009),现在越来越多的资料表明,这期地壳增生事件在华北克拉通有广泛的岩浆事件反映,不仅

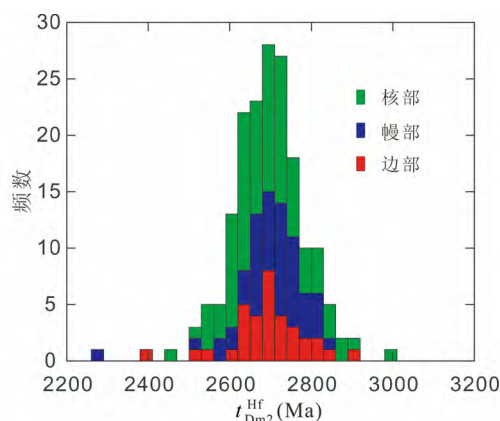


图 11 所有样品锆石二阶段模式年龄直方图

Fig. 11 zircon t_{DM2} (Hf) age histogram for studied samples

在鲁西有该时期的火山岩和岩浆岩,在胶东地区、华南北缘、中条地区、赞皇地区、阜平地区以及西部的大青山地区都有这期岩浆事件的表现 (Guan *et al.*, 2002; Kröner *et al.*, 2005; Jahn *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009b; Wan *et al.*, 2011a, b; Han *et al.*, 2012; 董晓杰等, 2012; Yang *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2013; 马铭株等, 2013; 路增龙等, 2014), 说明这期地壳增生事件对华北影响是广泛的。

本文资料和以往资料都表明,冀东地区最主要的岩浆事件发生在 2.55 ~ 2.52 Ga 期间,并紧密伴随有高级的区域变质改造。对于这一阶段的岩浆构造热事件产生的构造背景存在不同认识,一种认为与陆缘岩浆弧背景有关 (Nutman *et al.*, 2011; Lv *et al.*, 2012; Bai *et al.*, 2014, 2016; Yao and Zhang, 2017), 一种认为与太古宙大洋消减和碰撞有关 (Kusky and Li, 2003; Li and Kusky, 2007), 一种认为主要与地幔柱的活动有关 (Zhao *et al.*, 1998; Geng *et al.*, 2006, 2012; Wu *et al.*, 2012; 韩鑫等, 2016), 还有一种认为与微陆块的拼贴有关 (Yang *et al.*, 2016a, b)。不论何种模式,都需要回答或解答冀东变质基底以下的基本地质特征: (1) 冀东地区广泛分布有钙碱性 TTG 深成岩体 (已变质变形为片麻岩), 它们在时间和空间上没有明显的分带性, 火山岩以基性火山岩为主, 缺少显生宙岩浆弧广泛出露的安山岩; (2) 冀东地区具有复杂的变形构造格局, 西部以 NNE 向向东北转变为 NE 向的线性带为特点、中部的迁西太平寨-迁安以穹状构造为特点, 东部和南部以近南北向的构造为特点, 迁安穹窿西部以近南北轴向的紧闭褶皱为特点; (3) 冀东地区从西到东、从北到南都存在形成时代基本一致的阿尔戈马型条带状铁建造, 如西部的北京密云铁矿、遵化石人沟铁矿, 东部的扎兰屯子铁矿, 迁安穹窿西侧的水厂铁矿、柳河峪铁矿等, 南部的长凝铁矿、马城铁矿等, 这些基本同时代的铁矿分布于不同研究者的不同构造单元之中; (4) 冀东新太古代晚期的基底变质岩所经历的变质改造明显不同, 中部经历了广泛的麻粒岩相变质, 西部及北部经历了角闪岩相的变质, 东部青

龙和南部滦县一带的变质基底岩石只受到高绿片岩相-低角闪岩相的变质改造; (5) 冀东地区存在与底辟作用相关的穹状构造, 但在穹状构造地区缺少与裂谷作用相关的碱性侵入岩。不论是陆缘岩浆弧模式还是大洋消减碰撞模式, 都难以圆满回答冀东地区以上基本地质特征。微陆块拼贴模式可以部分解释以上的一些特点, 但是找不到胶辽微陆块和迁怀微陆块拼合的边界和地质证据。因此本文作者曾用地幔柱的模式解释新太古代晚期冀东地区在很短时间内 TTG 质岩浆侵位与麻粒岩相变质作用产生的缘由 (Geng *et al.*, 2006); 之后根据华北克拉通不同块体之间的相似性, 提出在新太古代末-元古代初华北克拉通应在统一的构造热体制下才能形成遍布华北克拉通的、具有相似特征和成因的正片麻岩, 地幔柱是这种构造热体制产生的原因 (耿元生等, 2010)。地幔柱模式可以较好地解释冀东地区以上的基本地质特征, 由于大规模的地幔柱使得 2.7 Ga 从亏损地幔分异出的基性下地壳部分熔融产生了冀东广泛分布的 TTG 片麻岩, 由于分异程度的差异和分异原岩的差异产生了同时代不同岩性的岩浆岩 (如秦皇岛 2.5 Ga 的花岗岩)。由于地幔柱侵位深度的差异和原始地质体距离地幔柱距离的差异使冀东地区产生了不同的变质相, 由于位于地幔柱隆升的不同部位导致不同构造部位产生不同的变形特征。而变质沉积铁建造是冀东作为一个浅海盆地时由于局部构造差异广泛形成的, 因此这些铁矿可以出露在大陆岩浆弧或太古宙大洋俯冲及碰撞模式的不同构造单元。因此我们认为, 新太古代晚期的地幔柱是冀东地区的基本构造热体制。

6 结论

(1) 冀东地区经历麻粒岩相变质改造岩石中的锆石在变质重结晶过程中 U-Pb 同位素体系发生了部分重置, 简单的加权平均年龄可能并不具有明确的地质意义, 早期的岩浆锆石应以受到重结晶影响小的分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄作为其形成年龄, 岩浆锆石的加权平均年龄只代表形成时代的下限, 据此我们认为该区早期的岩浆事件主要发生在 2527 ~ 2553 Ma 期间, 麻粒岩相的变质事件主要发生在 2.5 Ga 左右, 2.47 ~ 2.48 Ga 则代表麻粒岩相变质晚期阶段冷却的时间。

(2) 地球化学特征和锆石 Hf 同位素特征表明, 本区的片麻岩类和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩是从亏损地幔分异出的新生地壳 (2.7 Ga 左右) 的部分熔融形成了初始岩浆, 岩浆经历了分离结晶作用, 暗色矿物角闪石是主要的分离结晶相矿物, 形成了 TTG 或紫苏闪长岩/紫苏花岗岩 (2.55 ~ 2.52 Ga), 后经过麻粒岩相的变质改造 (2.5 Ga 左右), 形成以辉石为主要暗色矿物的麻粒岩相变质岩石。

(3) 地幔柱模式有利于解释冀东地区 TTG 片麻岩及紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的成因, 该模式不仅可以有效揭示冀东地区 TTG 片麻岩和紫苏闪长岩/紫苏花岗岩的源区, 而且能够合理解释冀东地区的变质变形特征及其形成与演化。

致谢 本文在成文过程中与万渝生研究员进行过多次有益探讨,对作者深有启发;同时在 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测试期间得到了北京离子探针中的支持和帮助;在锆石 Hf 同位素测定时得到了天津地质调查中心同位素实验室的支持和帮助;张磊研究员和秦切博士在做图方面给予了帮助;两位审稿人提出了中肯的修改意见;在此一并表示感谢!

30 多年来一直追随沈其韩先生进行前寒武纪地质的研究,先生言传身教,给我很多教益。适逢先生 96 华诞,谨以此文祝先生健康长寿!

References

- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C and Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73
- Bai J, Huang XG, Dai FY and Wu CH. 1993. The Precambrian Crustal Evolution of China. Beijing: Geological Publishing House, 1-223 (in Chinese)
- Bai X, Liu SW, Guo RR, Zhang LF and Wang W. 2014. Zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of Neoproterozoic dioritic-trondhjemitic gneisses, eastern Hebei, North China Craton: Constraints on petrogenesis and tectonic implications. *Precambrian Research*, 251: 1-20
- Bai X, Liu SW, Guo RR and Wang W. 2015. Zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of two contrasting Neoproterozoic charnockitic rock series in eastern Hebei, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Precambrian Research*, 267: 72-93
- Bai X, Liu SW, Guo RR and Wang W. 2016. A Neoproterozoic arc-back-arc system in eastern Hebei, North China Craton: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of dioritic-tonalitic-trondhjemitic-granodioritic (DTTG) gneisses and felsic paragneisses. *Precambrian Research*, 273: 90-111
- Barker F. 1979. Trondhjemitic: Definition, environment and hypotheses of origin. *Developments in Petrology*, 6: 1-12
- Bateman R, Costa S, Swe T and Lambert D. 2001. Archaean mafic magmatism in the Kalgoorlie area of the Yilgarn Craton, Western Australia: A geochemical and Nd isotopic study of the petrogenetic and tectonic evolution of a greenstone belt. *Precambrian Research*, 108(1-2): 75-112
- Beakhouse GP, Heaman LM and Creaser RA. 1999. Geochemical and U-Pb zircon geochronological constraints on the development of a Late Archaean greenstone belt at Birch Lake, Superior Province, Canada. *Precambrian Research*, 97(1-2): 77-97
- Bibikova EV, Petrova A and Claesson S. 2005. The temporal evolution of sanukitoids in the Karelian Craton, Baltic Shield: An ion microprobe U-Th-Pb isotopic study of zircons. *Lithos*, 79(1-2): 129-145
- Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1-2): 155-170
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258
- Chu H, Wang HC, Rong GL, Chang QS, Kang JL, Jin S and Xiao ZB. 2016. The geological significance of the rediscovered fuchsite quartzite with abundant Eoarchean detrital zircons in eastern Hebei Province. *Science Bulletin*, 61(20): 2299-2308 (in Chinese)
- Chu NC, Taylor RN, Chavagnac V, Nesbitt RW, Boella RM, Milton JA, German CR, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567-1574
- Condie KC. 1998. Episodic continental growth and supercontinents: A mantle avalanche connection? *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1-4): 97-108
- Condie KC. 2000. Episodic continental growth models: After thoughts and extensions. *Tectonophysics*, 322(1-2): 153-162
- DePaolo DJ, Linn AM and Schubert G. 1991. The continental crustal age distribution: Methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data and application to the southwestern United States. *Journal of Geophysical Research*, 96(B2): 2071-2088
- Dong XJ, Xu ZY, Liu ZH and Sha Q. 2012. 2.7 Ga granitic gneiss in the northern foot of Daqingshan Mountain, central Inner Mongolia, and its geological implications. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 37(Suppl. 1): 20-27 (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Zhuang YX, Yang CH, Wan YS, Wang XS, Wang SJ and Zhang LF. 2003. Characters of zircons in the Mengjiazhuang Formation in Xintai of Shandong and their chronological significance. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 359-366 (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Yang CH, Zhuang YX, Wei RZ, Wan YS, Ren LD and Hou KJ. 2010. Hf isotopic compositions of zircons from 2.7 Ga metasedimentary rocks and biotite-plagioclase gneiss in the Mengjiazhuang Formation complex, western Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 991-1001 (in Chinese with English abstract)
- Duan ZZ, Wei CJ and Qian JH. 2015. Metamorphic P-T paths and Zircon U-Pb age data for the Paleoproterozoic metabasic dykes of high-pressure granulite facies from eastern Hebei, North China Craton. *Precambrian Research*, 271: 295-310
- Duan ZZ, Wei CJ and Rehman HU. 2017. Metamorphic evolution and zircon ages of pelitic granulites in eastern Hebei, North China Craton: Insights into the regional Archean P-T-t history. *Precambrian Research*, 292: 240-257
- Fu JH, Liu SW, Chen X, Bai X, Guo RR and Wang W. 2016. Petrogenesis of taxitic dioritic-tonalitic gneisses and Neoproterozoic crustal growth in eastern Hebei, North China Craton. *Precambrian Research*, 284: 64-87
- Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Zhao ZD and Hu YK. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959-1975
- Geng JZ, Li HK, Zhang J, Zhou HY and Li HM. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508-1513 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Liu FL and Yang CH. 2006. Magmatic event at the end of the Archean in eastern Hebei Province and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 819-833
- Geng YS, Shen QH and Ren LD. 2010. Late Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 1945-1966 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Du LL and Ren LD. 2012. Growth and reworking of the Early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes. *Gondwana Research*, 21(2-3): 517-529
- Grant ML, Wilde SA, Wu FY and Yang JH. 2009. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary. *Chemical Geology*, 261(1-2): 155-171
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achenbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147
- Guan H, Sun M, Wilde SA, Zhou XH and Zhai MG. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for

- formation and assembly of the North China craton. *Precambrian Research*, 113(1-2): 1-18
- Guo RR, Liu SW, Santosh M, Li QG, Bai X and Wang W. 2013. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of metavolcanics from eastern Hebei reveal Neoproterozoic subduction tectonics in the North China Craton. *Gondwana Research*, 24(2): 664-686
- Guo RR, Liu SW, Wyman D, Bai X, Wang W, Yan M and Li QG. 2015. Neoproterozoic subduction: A case study of arc volcanic rocks in Qinglong-Zhuzhangzi area of the eastern Hebei Province, North China Craton. *Precambrian Research*, 264: 36-62
- Guo RR, Liu SW, Bai X and Wang W. 2017. A Neoproterozoic subduction recorded by the eastern Hebei Precambrian basement, North China Craton: Geochemical fingerprints from metavolcanic rocks of the Saheqiao-Shangying-Qinglong supracrustal belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 135: 347-369
- Han BF, Xu Z, Ren R, Li LL, Yang JH and Yang YH. 2012. Crustal growth and intracrustal recycling in the middle segment of the Trans-North China Orogen, North China Craton: A case study of the Fuping Complex. *Geological Magazine*, 149(4): 729-742
- Han X, Pei L, Zheng YY and Liu JL. 2016. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of charnockitic rocks from Qian'an in the northern part of North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2823-2838 (in Chinese with English abstract)
- Haskin LA, Haskin MA, Frey FA and Wildeman TR. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: Ahrens LH (ed.). *Origin and Distribution of the Elements: A volume in International Series of Monographs in Earth Sciences*. Oxford: Pergamon Press, 889-911
- He TX, Lin Q, Fang ZR, Liu SW, Zhao GC and Liu CH. 1992. The Petrogenesis of Archaean Granitoid Rocks in Eastern Hebei Province. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1-171 (in Chinese)
- Henry P, Stevenson RK, Larbi Y and Gariépy C. 2000. Nd isotopic evidence for Early to Late Archean (3.4-2.7 Ga) crustal growth in the western Superior Province (Ontario, Canada). *Tectonophysics*, 322(1-2): 135-151
- Hofmann A, Dirks PHGM and Jelsma HA. 2004. Clastic sedimentation in a Late Archean accretionary terrain, Midlands greenstone belt, Zimbabwe. *Precambrian Research*, 129(1-2): 47-69
- Horstwood MSA, Nesbitt RW, Noble SR and Wilson JF. 1999. U-Pb zircon evidence for an extensive Early Archean craton in Zimbabwe: A reassessment of the timing of craton formation, stabilization, and growth. *Geology*, 27(8): 707-710
- Jacobsen SB and Wasserburg GJ. 1980. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 139-155
- Jahn BM, Auvray B, Shen QH, Liu DY, Zhang ZQ, Dong YJ, Ye XJ, Zhang QZ, Cornichet J and Mace J. 1988. Archean crustal evolution in China: The Taishan Complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. *Precambrian Research*, 38(4): 381-403
- Jahn BM, Cornichet J, Cong BL and Yui TF. 1996. Ultrahigh- ϵ_{Nd} eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. *Chemical Geology*, 127(1-3): 61-79
- Jahn BM, Liu DY, Wan YS, Song B and Wu JS. 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry. *American Journal of Science*, 308(3): 232-269
- Kröner A, Jaekel P, Brandl G, Nemchin AA and Pidgeon RT. 1999. Single zircon ages for granitoid gneisses in the Central Zone of the Limpopo belt, southern Africa and geodynamic significance. *Precambrian Research*, 93(4): 299-337
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 577-595
- Kusky TM, Li JH and Tucker RT. 2001. The Archean Dongwanzi ophiolite complex, North China craton: 2.505-billion-year-old oceanic crust and mantle. *Science*, 292(5519): 1142-1145
- Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383-397
- Kusky T, Li JH and Santosh M. 2007. The Paleoproterozoic North Hebei Orogen: North China craton's collisional suture with the Columbia supercontinent. *Gondwana Research*, 12(1-2): 4-28
- Le Maitre RW. 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge: Cambridge University Press
- Li Q and Yang ZS. 1992. Mapping of the High-grade Terrains: A Case with Tectono-rock-mass Unit Method in Eastern Hebei Province of China. Beijing: Geological Publishing House, 1-131 (in Chinese)
- Li JH, Kusky TM and Huang XN. 2002. Archean podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélange, North China Craton: A record of early oceanic mantle processes. *GSA Today*, 12(7): 4-11
- Li JH and Kusky T. 2007. A Late Archean foreland fold and thrust belt in the North China Craton: Implications for early collisional tectonics. *Gondwana Research*, 12(1-2): 47-66
- Liu DY, Shen QH, Zhang ZQ, Jahn BM and Auvray B. 1990. Archean crustal evolution in China: U-Pb geochronology of the Qianxi complex. *Precambrian Research*, 48(3): 223-244
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339-342
- Liu DY, Wilde SA, Wan YS, Wang SY, Valley JW, Kita N, Dong CY, Xie HQ, Yang CX, Zhang YX and Gao LZ. 2009b. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic. *Chemical Geology*, 261(1-2): 140-154
- Liu F, Guo JH, Lu XP and Diwu CR. 2009a. Crustal growth at ~ 2.5 Ga in the North China Craton: Evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane. *Chinese Science Bulletin*, 54(24): 4704-4713
- Liu SJ, Wan YS, Sun HY, Nutman AP, Xie HQ, Dong CY, Ma MZ, Liu DY and Jahn BM. 2013. Paleo-to Eoarchean crustal evolution in eastern Hebei, North China Craton: New evidence from SHRIMP U-Pb dating and in-situ Hf isotopic study of detrital zircons from paragneisses. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 4-17
- Liu SW, Pan YM, Xie QL, Zhang J and Li QG. 2004. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. *Precambrian Research*, 130(1-4): 229-249
- Liu SW, Zhao GC, Wilde SA, Shu GM, Sun M, Li QG, Tian W and Zhang J. 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Liliang and Wutai complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 148(3-4): 205-224
- Liu SW, Zhang J, Li QG, Zhang LF, Wang W and Yang PT. 2012. Geochemistry and U-Pb zircon ages of metamorphic volcanic rocks of the Paleoproterozoic Liliang Complex and constraints on the evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton. *Precambrian Research*, 222-223: 173-190
- Lu JS, Zhai MG, Lu LS and Zhao L. 2017. P-T-t evolution of Neoproterozoic to Paleoproterozoic pelitic granulites from the Jidong terrane, eastern North China Craton. *Precambrian Research*, 290: 1-15
- Lu SN, Chen ZH and Xiang ZQ. 2008. Highly Precise Geochronology of the Oldest Intrusive Complex in Taishan Geological Park, Shandong Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-90 (in Chinese)
- Lu ZL, Song HX, Du LL, Ren LD, Geng YS and Yang CH. 2014. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Fuping Complex,

- North China Craton and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2872–2884 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. *Squid 1.02: A User's Manual*. Berkeley: Berkeley Geochronology Centre, 1–19
- Lv B, Zhai MG, Li TS and Peng P. 2012. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Qinglong volcano-sedimentary rock series in eastern Hebei: Implication for ~2500Ma intra-continental rifting in the North China Craton. *Precambrian Research*, 208–211: 145–160
- Ma MZ, Wan YS, Santosh M, Xu ZY, Xie HQ, Dong CY, Liu DY and Guo CL. 2012. Decoding multiple tectonothermal events in zircons from single rock samples: SHRIMP zircon U-Pb data from the Late Neoproterozoic rocks of Daqingshan, North China Craton. *Gondwana Research*, 22(3–4): 810–827
- Ma MZ, Xu ZY, Zhang LC, Dong CY, Dong XJ, Liu SJ, Liu DY and Wan YS. 2013. SHRIMP dating and Hf isotope analysis of zircons from the Early Precambrian basement in the Xi Ulanbulang area, Wuchuan, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 501–516 (in Chinese with English abstract)
- McCulloch MT and Wasserburg GJ. 1978. Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science*, 200(4345): 1003–1011
- McCulloch MT and Bennett VC. 1994. Progressive growth of the earth's continental crust and depleted mantle: Geochemical constraints. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(21): 4717–4738
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224
- Moorbath S. 1977. Ages, isotopes and evolution of Precambrian continental crust. *Chemical Geology*, 20: 151–187
- Nelson DR. 1999. *Compilation of SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology Data*. Perth: Geological Survey of Western Australia, 1–189
- Nutman AP, Wan YS, Du LL, Friend CRL, Dong CY, Xie HQ, Wang W, Sun HY and Liu DY. 2011. Multistage Late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. *Precambrian Research*, 189(1–2): 43–65
- O' Nions RK, Evensen NM and Hamilton PJ. 1979. Geochemical modeling of mantle differentiation and crustal growth. *Journal of Geophysical Research*, 84(B11): 6091–6101
- Öhlander B, Skiöld T, Hamilton PJ and Claesson LÅ. 1987. The western border of the Archaean province of the Baltic shield: Evidence from northern Sweden. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 437–450
- Patchett PJ and Tatsumoto M. 1981. A routine high-precision method for Lu-Hf isotope geochemistry and chronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 75(3): 263–267
- Pearce JA. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman DA (ed.). *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Winnipeg: Geological Association of Canada, 79–113
- Peccerillo A, Barberio MR, Yirgu G, Ayalew D, Barbieri M and Wu TW. 2003. Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: A petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa Volcano, Central Ethiopian Rift. *Journal of Petrology*, 44(11): 2003–2032
- Percival JA, Stern RA and Skulski T. 2001. Crustal growth through successive arc magmatism: Reconnaissance U-Pb SHRIMP data from the northeastern Superior Province, Canada. *Precambrian Research*, 109(3–4): 203–238
- Polat A, Kusky TM, Li JH, Fryer B, Kerrich R and Patrick K. 2005. Geochemistry of Neoproterozoic (ca. 2.55–2.50Ga) volcanic and ophiolitic rocks in the Wutaishan greenstone belt, central orogenic belt, North China Craton: Implications for geodynamic setting and continental growth. *Geological Society of America Bulletin*, 117(11): 1387–1399
- Rasmussen B, Blake TS and Fletcher IR. 2005. U-Pb zircon age constraints on the Hamersley spherule beds: Evidence for a single 2.63Ga Jeerinah-Carawine impact ejecta layer. *Geology*, 33(9): 725–728
- Rino S, Komiya T, Windley BF, Katayama I, Motoki A and Hirata T. 2004. Major episodic increases of continental crustal growth determined from zircon ages of river sands; Implications for mantle overturns in the Early Precambrian. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(1–2): 369–394
- Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267–309
- Samsonov AV, Bogina MM, Bibikova EV, Petrova AY and Shchipansky AA. 2005. The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: Implications for the tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield. *Lithos*, 79(1–2): 83–106
- Sandeman HA, Hanmer S, Tella S, Armitage AA, Davis WJ and Ryan JJ. 2006. Petrogenesis of Neoproterozoic volcanic rocks of the MacQuoid supracrustal belt: A back-arc setting for the northwestern Hearne subdomain, western Churchill Province, Canada. *Precambrian Research*, 144(1–2): 140–165
- Schiano P, Monzier M, Eissen JP, Martin H and Koga KT. 2010. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(2): 297–312
- Shen QH and Qian XL. 1995. Assemblages, episodes and tectonic evolution in the Archaean of China. *Episodes*, 18: 44–48
- Shen QH, Geng YS, Song B and Wan YS. 2005. New information from the surface outcrops and deep crust of Archean rocks of the North China and Yangtze blocks, and Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 616–627 (in Chinese with English Abstract)
- Shi YR, Wilde SA, Zhao XT, Ma YS, Du LL and Liu DY. 2012. Late Neoproterozoic magmatic and subsequent metamorphic events in the northern North China Craton: SHRIMP zircon dating and Hf isotopes of Archean rocks from Yunnengshan Geopark, Miyun, Beijing. *Gondwana Research*, 21(4): 785–800
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324
- Steenfelt A, Garde AA and Moyen JF. 2005. Mantle wedge involvement in the petrogenesis of Archaean grey gneisses in West Greenland. *Lithos*, 79(1–2): 207–228
- Stein M and Hofmann AW. 1994. Mantle plumes and episodic crustal growth. *Nature*, 372(6501): 63–68
- Sun HY, Xie HQ, Liu SJ, Dong CY, Liu DY and Wan YS. 2016. Archean magmatism and metamorphism in the Huangbaiyu-Yangyashan area, eastern Hebei Province: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Geological Bulletin of China*, 35(1): 27–42 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006a. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Research*, 149(3–4): 249–271
- Wan YS, Wilde SA, Liu DY, Yang CX, Song B and Yin XY. 2006b. Further evidence for ~1.85Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province. *Gondwana Research*, 9(1–2): 189–197
- Wan YS, Liu DY, Wang SJ, Yang EX, Wang W, Dong CY, Zhou HY, Du LL, Yang YH and Diwu CR. 2011a. ~2.7Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon. *Precambrian Research*, 186(1–4): 169–180
- Wan YS, Liu DY, Dong CY, Liu SJ, Wang SJ and Yang EX. 2011b. U-

- Th-Pb behavior of zircons under high-grade metamorphic conditions: A case study of zircon dating of meta-diorite near Qixia, eastern Shandong. *Geoscience Frontiers*, 2(2): 137–146
- Wan YS, Wang SJ, Liu DY, Wang W, Kröner A, Dong CY, Yang EX, Zhou HY, Xie HQ and Ma MZ. 2012. Redefinition of depositional ages of Neoproterozoic supracrustal rocks in western Shandong Province, China: SHRIMP U-Pb zircon dating. *Gondwana Research*, 21(4): 768–784
- Wan YS, Xie SW, Yang CH, Kröner A, Ma MZ, Dong CY, Du LL, Xie HQ and Liu DY. 2014. Early Neoproterozoic (~2.7 Ga) tectono-thermal events in the North China Craton: A synthesis. *Precambrian Research*, 247: 45–63
- Wan YS, Liu DY, Dong CY, Xie HQ, Kröner A, Ma MZ, Liu SJ, Xie SW and Ren P. 2015. Formation and evolution of Archean continental crust of the North China Craton. In: Zhai MG (ed.). *Precambrian Geology of China*. Berlin, Heidelberg: Springer, 59–136
- Wang AJ. 1991. Disintegration of the Archean Qianxi Group in eastern Hebei. *Regional Geology of China*, (1): 60–67 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM, Chen NS and Li PF. 1984. Archean komatiite with meta-spinifex texture in China. *Chinese Science Bulletin*, 29(9): 1236–1238
- Wang W, Yang EX, Wang SJ, Du LL, Xie HQ, Dong CY and Wan YS. 2009. Petrography of the metamorphic pillow basalt and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the intruding trondhjemite in Archean Taishan “Group”, western Shandong. *Geological Review*, 55(5): 737–745 (in Chinese with English abstract)
- Wedepohl KH. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217–1232
- Wilde SA, Cawood PA, Wang KY and Nemchin AA. 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai complex, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 597–613
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks III WC and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. Reviews in Economic Geology, 1–35
- Wu FY, Zhao GC, Wilde SA and Sun DY. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 523–545
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract)
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea. Beijing: Geological Publishing House, 1–212 (in Chinese)
- Wu ML, Zhao GC, Sun M, Yin CQ, Li SZ and Tam PY. 2012. Petrology and P-T path of the Yishui mafic granulites: Implications for tectonothermal evolution of the western Shandong Complex in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222–223: 312–324
- Yang C and Wei CJ. 2017. Ultrahigh temperature (UHT) mafic granulites in the East Hebei, North China Craton: Constraints from a comparison between temperatures derived from REE-based thermometers and major element-based thermometers. *Gondwana Research*, 46: 156–169
- Yang CH, Du LL, Ren LD, Song HX, Wan YS, Xie HQ and Geng YS. 2013. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Zhanhuang Complex, North China Craton and its geological implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 178–189
- Yang CH, Du LL, Geng YS, Ren LD, Lu ZL and Song HX. 2017. Paleoproterozoic metamorphic dyke swarms in the eastern Hebei massif, the eastern North China Craton: ~2.1 Ga extension and ~1.8 Ga metamorphism. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2827–2849 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA and Zhao GC. 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence. *Precambrian Research*, 167(1–2): 125–149
- Yang QY, Santosh M, Collins AS and Teng XM. 2016a. Microblock amalgamation in the North China Craton: Evidence from Neoproterozoic magmatic suite in the western margin of the Jiaoliao Block. *Gondwana Research*, 31: 96–123
- Yang QY, Santosh M and Tsunogae T. 2016b. High-grade metamorphism during Archean-Paleoproterozoic transition associated with microblock amalgamation in the North China Craton: Mineral phase equilibria and zircon geochronology. *Lithos*, 263: 101–121
- Yao X and Zhang JJ. 2017. A Late Neoproterozoic-Early Paleoproterozoic crustal thickening event in the eastern North China Craton: Petrological and geochronological evidence from Eastern Hebei terrane. *International Geology Review*, 59(4): 502–522
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Paleoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(1): 219–232
- Zhai MG, Zhao GC, Zhang Q, Kusky TM and Li JH. 2002. Is the Dongwanzi complex an Archean ophiolite? *Science*, 295(5557): 923
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547–561
- Zhai MG. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review. *Science China Earth Sciences*, 54(8): 1110–1120
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6–25
- Zhang J, Zhao GC, Li SZ, Sun M, Liu SW, Wilde SA, Kröner A and Yin CQ. 2007. Deformation history of the Hengshan Complex: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen. *Journal of Structural Geology*, 29(6): 933–949
- Zhang J, Zhao GC, Li SZ, Sun M, Wilde SA, Liu SW and Yin CQ. 2009. Polyphase deformation of the Fuping Complex, Trans-North China Orogen: Structures, SHRIMP U-Pb zircon ages and tectonic implications. *Journal of Structural Geology*, 31(2): 177–193
- Zhang XJ, Zhang LC, Xiang P, Wan B and Pirajno F. 2011. Zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Shuichang Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: Constraints on the ore-forming age and tectonic setting. *Gondwana Research*, 20(1): 137–148
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1998. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. *International Geology Review*, 40(8): 706–721
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1999a. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 310(1–4): 37–53
- Zhao GC, Cawood P and Lu LZ. 1999b. Petrology and P-T history of the Wutai amphibolites: Implications for tectonic evolution of the Wutai Complex, China. *Precambrian Research*, 93(2–3): 181–199
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA, Sun M and Lu LZ. 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the north China craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103(1–2): 55–88
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1–2): 45–73
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202
- Zhao GC, Wilde SA, Li SZ, Sun M, Grant ML and Li XP. 2007. U-Pb zircon age constraints on the Dongwanzi ultramafic-mafic body, North China, confirm it is not an Archean ophiolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1–2): 85–93

- Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Li SZ, Li XP and Zhang J. 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Liliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 160(3-4): 213-226
- Zhao GC, Wilde SA, Guo JH, Cawood PA, Sun M and Li XP. 2010. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China craton. *Precambrian Research*, 177(3-4): 266-276
- Zhu XY, Zhai MG, Chen FK, Lyu B, Wang W, Peng P and Hu B. 2013. ~2.7 Ga crustal growth in the North China Craton: Evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Sushui Complex in the Zhongtiao terrane. *The Journal of Geology*, 121(3): 239-254
- Zhuang YX, Wang XS, Xu HL, Ren ZK, Zhang FZ and Zhang XM. 1997. Main geological events and crustal evolution in Early Precambrian of Taishan region. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 313-330 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 吴昌华. 1993. 中国前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 1-223
- 初航, 王惠初, 荣桂林, 常青松, 康健丽, 靳松, 肖志斌. 2016. 冀东地区含大量始太古代碎屑锆石的太古宙锆石母石英岩再次发现及地质意义. *科学通报*, 61(20): 2299-2308
- 董晓杰, 徐仲元, 刘正宏, 沙茜. 2012. 内蒙古大青山北麓 2.7 Ga 花岗质片麻岩的发现及其地质意义. *地球科学 中国地质大学学报*, 37(增1): 20-27
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 万渝生, 王新社, 王世进, 张连峰. 2003. 山东新泰孟家屯岩组锆石特征及其年代学意义. *地质学报*, 77(3): 359-366
- 杜利林, 杨崇辉, 庄育勋, 韦汝征, 万渝生, 任留东, 侯可军. 2010. 鲁西新泰孟家屯 2.7 Ga 变质沉积岩与黑云斜长片麻岩锆石 Hf 同位素特征. *地质学报*, 84(7): 991-1001
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. *地质通报*, 30(10): 1508-1513
- 耿元生, 沈其韩, 任留东. 2010. 华北克拉通新太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制. *岩石学报*, 26(7): 1945-1966
- 韩鑫, 裴磊, 郑媛媛, 刘俊来. 2016. 华北克拉通北部迁安紫苏花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学及地质意义. *岩石学报*, 32(9): 2823-2838
- 贺同兴, 林强, 方占仁, 刘树文, 赵国春. 1992. 冀东太古宙花岗岩成因. 长春: 吉林科学技术出版社, 1-171
- 李勤, 杨振升. 1992. 高级变质岩区填图方法 冀东地区构造-岩石法填图研究. 北京: 地质出版社, 1-131
- 陆松年, 陈志宏, 相振群. 2008. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架. 北京: 地质出版社, 1-90
- 路增龙, 宋会侠, 杜利林, 任留东, 耿元生, 杨崇辉. 2014. 华北克拉通阜平杂岩中 ~2.7 Ga TTG 片麻岩的厘定及其地质意义. *岩石学报*, 30(10): 2872-2884
- 马铭株, 徐仲元, 张连昌, 董春艳, 董晓杰, 刘守偈, 刘敦一, 万渝生. 2013. 内蒙古武川西乌兰不浪地区早前寒武纪变质基底锆石 SHRIMP 定年及 Hf 同位素组成. *岩石学报*, 29(2): 501-516
- 沈其韩, 耿元生, 宋彪, 万渝生. 2005. 华北和扬子陆块及秦岭-大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息. *地质学报*, 79(5): 616-627
- 孙会一, 颜炳强, 刘守偈, 董春艳, 刘敦一, 万渝生. 2016. 冀东黄柏峪-羊崖山地区太古宙岩浆作用和变质作用——SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. *地质通报*, 35(1): 27-42
- 王安建. 1991. 论冀东地区太古宙迁西群的解体. *中国区域地质*, (1): 60-67
- 王仁民, 陈能松, 李平凡. 1983. 具变质鬣刺结构的太古代科马提岩在我国首次发现. *科学通报*, 28(21): 1319-1321
- 王伟, 杨恩秀, 王世进, 杜利林, 颜炳强, 董春艳, 万渝生. 2009. 鲁西泰山岩群变质枕状玄武岩岩相学和侵入的奥长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学. *地质论评*, 55(5): 737-745
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185-220
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1-212
- 杨崇辉, 杜利林, 耿元生, 任留东, 路增龙, 宋会侠. 2017. 冀东古元古代基性岩墙群的年龄及地球化学: ~2.1 Ga 伸展及 ~1.8 Ga 变质. *岩石学报*, 33(9): 2827-2849
- 庄育勋, 王新社, 徐洪林, 任志康, 张富中, 张锡明. 1997. 泰山地区早前寒武纪主要地质事件与陆壳演化. *岩石学报*, 13(3): 313-330

附表 1 冀东新太古代斜长角闪岩、片麻岩、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及包体的锆石 SHRIMP U – Pb 同位素数据

Appendix Table 1 SHRIMP zircon U-Pb data of Neoproterozoic plagioclase-amphibolites, gneisses, hypersthene-diorite/charnockites and enclaves in granite in eastern Hebei Province

测点号	U Th		Th/U	同位素比值						误差 相关性	年龄(Ma)		不谐 和性		
	(×10 ⁻⁶)			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	± %	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	± %		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			
JD03-7 角闪斜长片麻岩															
-1.1	551	8	0.02	0.16248	0.4	10.74	2	0.4794	1.9	0.979	2482	±7	2525	±41	-2
-1.2	125	103	0.85	0.1606	1	10.85	2.4	0.49	2.1	0.901	2462	±17	2571	±45	-4
-2.1	315	4	0.01	0.16475	0.53	10.75	2.1	0.4734	2	0.968	2505	±9	2499	±42	0
-2.2	11	3	0.33	0.1584	5.2	11.3	6.8	0.517	4.5	0.653	2438	±88	2688	±98	-10
-3.1	28	4	0.14	0.1581	2.3	10.27	3.8	0.471	3	0.798	2436	±39	2489	±62	-2
-4.1	312	11	0.03	0.1628	0.62	10.24	2.1	0.4564	2	0.954	2485	±11	2424	±40	2
-4.2	34	29	0.89	0.1641	2	9.82	3.3	0.434	2.7	0.809	2499	±33	2324	±52	7
-5.1	325	41	0.13	0.16043	0.53	10.37	2.2	0.4689	2.1	0.969	2460	±9	2479	±43	-1
-5.2	55	63	1.18	0.1525	1.5	9.01	3.1	0.429	2.7	0.875	2374	±25	2299	±52	3
-6.1	185	109	0.61	0.1653	1.1	11.45	2.3	0.502	2.1	0.893	2511	±18	2623	±45	-4
-7.1	275	13	0.05	0.14878	0.61	9.02	2.1	0.4399	2	0.957	2332	±11	2350	±40	-1
-8.1	444	29	0.07	0.16542	0.47	11.07	2	0.4853	2	0.973	2512	±8	2550	±41	-2
-8.2	13	2	0.18	0.1712	3.8	11.38	5.6	0.482	4	0.722	2569	±64	2537	±84	1
-9.1	264	9	0.03	0.15896	0.6	10.08	2.1	0.4599	2	0.958	2445	±10	2439	±41	0
-9.2	465	10	0.02	0.16352	0.56	11.38	2	0.5046	2	0.962	2492	±9	2634	±42	-6
-10.1	1065	4	0.00	0.16293	0.35	10.45	1.9	0.4652	1.9	0.984	2486	±6	2463	±39	1
-11.1	562	27	0.05	0.16087	0.41	10.49	2	0.473	1.9	0.978	2465	±7	2497	±40	-1
-11.2	23	9	0.40	0.1556	2.5	9.77	4.2	0.456	3.3	0.796	2408	±43	2420	±67	-1
-12.1	11	3	0.31	0.116	7.3	7.18	9.4	0.449	6	0.635	1896	±130	2391	±120	-26
-13.1	214	31	0.15	0.1638	0.66	11.11	2.2	0.492	2.1	0.952	2495	±11	2579	±44	-3
-13.2	33	12	0.38	0.169	1.9	11.32	3.4	0.486	2.8	0.829	2547	±32	2553	±60	0
-14.1	715	11	0.02	0.16544	0.35	11.11	2	0.487	1.9	0.984	2512	±6	2558	±41	-2
-15.1	2417	307	0.13	0.16546	0.33	9.75	1.9	0.4275	1.9	0.985	2512	±6	2294	±37	9
-15.2	48	5	0.11	0.152	1.7	9.45	4.5	0.451	4.2	0.923	2368	±30	2400	±83	-1
-16.1	427	6	0.01	0.1653	0.71	11.36	2.1	0.4984	2	0.941	2511	±12	2607	±42	-4
-17.1	487	25	0.05	0.16134	0.47	10.84	2	0.4871	2	0.973	2470	±8	2558	±41	-4
-17.2	115	7	0.07	0.1657	1.6	9.92	2.7	0.4341	2.2	0.812	2515	±27	2324	±43	8
-18.1	19	10	0.56	0.1627	2.7	10.55	4.4	0.47	3.5	0.793	2484	±45	2486	±72	0
-19.1	624	42	0.07	0.15642	0.41	9.32	2.1	0.4321	2.1	0.980	2417	±7	2315	±40	4
-20.1	22	24	1.12	0.1515	4.1	9.73	5.2	0.466	3.2	0.618	2363	±70	2465	±66	-4
JD04-1 含辉角闪斜长片麻岩															
-1.1	32	50	1.63	0.1655	2	11.08	4.6	0.486	4.1	0.899	2512	±34	2552	±87	-2
-2.1	23	26	1.19	0.1675	2.5	10.66	3.6	0.462	2.6	0.726	2533	±42	2447	±53	3
-3.1	44	19	0.44	0.1625	2.6	9.76	3.4	0.4354	2.3	0.665	2482	±43	2330	±45	6
-3.2	22	25	1.16	0.1761	2.3	11.72	3.5	0.483	2.6	0.752	2616	±38	2539	±55	3
-4.1	40	43	1.10	0.1749	3.1	11.62	3.8	0.482	2.2	0.582	2605	±52	2536	±47	3
-5.1	112	68	0.63	0.1689	1.5	10.98	2.5	0.4714	2.1	0.811	2547	±25	2490	±42	2
-5.2	24	25	1.06	0.1598	2.4	9.76	5.2	0.443	4.6	0.886	2454	±41	2363	±92	4
-6.1	24	7	0.32	0.1671	2.7	10.74	4.2	0.466	3.2	0.770	2529	±45	2466	±66	3

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	U Th		Th/U	同位素比值						误差 相关性	年龄(Ma)				不谐 和性
	(×10 ⁻⁶)			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	± %	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	± %		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		
- 6. 2	144	44	0. 31	0. 1518	0. 98	8. 99	2. 1	0. 4296	1. 8	0. 879	2366	± 17	2304	± 35	3
- 7. 1	183	214	1. 21	0. 1234	1	5. 82	2	0. 3423	1. 7	0. 859	2006	± 18	1898	± 28	5
- 8. 1	24	31	1. 34	0. 1613	2. 9	10. 05	3. 9	0. 452	2. 6	0. 666	2470	± 50	2403	± 53	3
- 9. 1	21	23	1. 16	0. 1721	2. 3	12. 11	3. 6	0. 511	2. 7	0. 763	2578	± 39	2659	± 59	- 3
- 10. 1	83	53	0. 66	0. 1707	1. 1	11. 13	2. 2	0. 4729	1. 9	0. 861	2565	± 19	2496	± 39	3
- 11. 1	137	68	0. 51	0. 1592	0. 89	9. 67	2	0. 4403	1. 7	0. 889	2447	± 15	2352	± 34	4
- 11. 2	29	8	0. 31	0. 1766	1. 9	11. 35	4. 7	0. 466	4. 3	0. 912	2622	± 32	2466	± 88	6
- 12. 1	77	36	0. 48	0. 1627	1. 2	10. 23	2. 8	0. 456	2. 5	0. 908	2484	± 20	2422	± 51	3
- 13. 1	88	52	0. 61	0. 1672	1	10. 86	3	0. 471	2. 8	0. 938	2530	± 18	2487	± 58	2
- 14. 1	76	46	0. 63	0. 1594	1. 3	10. 14	2. 3	0. 4614	1. 9	0. 833	2450	± 22	2446	± 39	0
- 14. 2	71	60	0. 88	0. 1634	1. 6	10. 19	2. 5	0. 4521	2	0. 769	2491	± 27	2405	± 39	3
JD04-2 含榴角闪斜长片麻岩															
- 1. 1	25	2	0. 10	0. 1506	5. 5	10. 82	6. 3	0. 521	3	0. 480	2352	± 94	2704	± 66	- 15
- 1. 2	111	30	0. 28	0. 1619	1	10. 2	2. 5	0. 457	2. 2	0. 908	2476	± 18	2426	± 45	2
- 2. 1	125	7	0. 06	0. 1551	2. 7	10. 03	7. 3	0. 469	6. 8	0. 931	2403	± 46	2478	± 140	- 3
- 2. 2	87	34	0. 41	0. 142	4. 1	8. 92	5. 9	0. 456	4. 2	0. 715	2252	± 71	2421	± 85	- 8
- 3. 1	32	13	0. 41	0. 1596	1. 7	10. 31	3. 2	0. 468	2. 7	0. 849	2452	± 29	2477	± 57	- 1
- 4. 1	123	23	0. 19	0. 1122	1. 2	5. 43	2. 6	0. 3509	2. 4	0. 894	1835	± 21	1939	± 40	- 6
- 5. 1	155	119	0. 79	0. 166	0. 74	11. 28	2. 2	0. 493	2. 1	0. 942	2518	± 12	2584	± 44	- 3
- 6. 1	128	83	0. 66	0. 1678	1	11. 41	2. 4	0. 493	2. 1	0. 903	2536	± 17	2585	± 45	- 2
- 7. 1	31	12	0. 39	0. 1631	2. 4	10. 54	3. 7	0. 469	2. 8	0. 758	2488	± 41	2477	± 58	0
- 8. 1	43	20	0. 49	0. 1619	3. 4	11. 12	4. 6	0. 498	3. 1	0. 674	2475	± 57	2606	± 66	- 5
- 9. 1	48	23	0. 50	0. 1567	1. 5	9. 59	2. 9	0. 444	2. 5	0. 868	2420	± 25	2369	± 51	2
- 10. 1	33	17	0. 53	0. 1672	1. 9	10. 88	3. 4	0. 472	2. 8	0. 824	2530	± 32	2491	± 58	2
- 11. 1	135	104	0. 80	0. 1697	0. 81	11. 04	2. 3	0. 472	2. 1	0. 935	2555	± 14	2492	± 44	2
- 12. 1	27	9	0. 34	0. 1636	2. 4	10. 86	3. 8	0. 481	3	0. 777	2493	± 41	2533	± 63	- 2
- 11. 2	118	15	0. 13	0. 164	1. 2	10. 55	2. 5	0. 466	2. 2	0. 869	2497	± 21	2468	± 45	1
- 13. 1	22	27	1. 26	0. 1477	4. 3	8. 11	5. 4	0. 398	3. 3	0. 604	2320	± 74	2160	± 60	7
- 14. 1	37	19	0. 51	0. 1455	3	8. 47	4. 1	0. 422	2. 8	0. 679	2293	± 51	2272	± 53	1
- 15. 1	233	207	0. 92	0. 166	0. 68	10. 74	2. 1	0. 4694	2	0. 949	2518	± 11	2481	± 42	1
- 16. 1	39	16	0. 43	0. 164	1. 7	10. 85	3. 2	0. 48	2. 7	0. 840	2498	± 29	2527	± 57	- 1
- 17. 1	159	156	1. 01	0. 1687	0. 8	11. 02	2. 6	0. 474	2. 5	0. 952	2545	± 13	2500	± 52	2
- 18. 1	120	67	0. 58	0. 1705	0. 99	11. 41	2. 4	0. 485	2. 2	0. 910	2563	± 17	2550	± 46	1
- 19. 1	772	21	0. 03	0. 1596	0. 66	7. 89	2	0. 3587	1. 9	0. 947	2452	± 11	1976	± 33	19
- 19. 2	45	22	0. 50	0. 1618	2. 5	10. 46	3. 7	0. 469	2. 7	0. 723	2474	± 43	2478	± 55	0
- 20. 1	387	135	0. 36	0. 16656	0. 47	11. 22	2	0. 4887	2	0. 973	2523	± 8	2565	± 42	- 2
- 20. 2	35	13	0. 37	0. 1629	1. 9	10. 52	3. 3	0. 468	2. 8	0. 826	2486	± 32	2476	± 57	0
- 21. 1	18	11	0. 60	0. 1616	2. 9	10. 68	5. 6	0. 479	4. 8	0. 859	2473	± 49	2523	± 100	- 2
- 22. 1	2047	194	0. 10	0. 16209	0. 3	8. 49	1. 9	0. 3799	1. 9	0. 988	2478	± 5	2076	± 34	16
- 23. 1	100	45	0. 46	0. 1602	1. 8	10. 7	2. 9	0. 485	2. 2	0. 776	2458	± 31	2547	± 47	- 4
- 24. 1	43	18	0. 43	0. 156	1. 9	10. 35	3. 2	0. 481	2. 6	0. 819	2413	± 32	2532	± 55	- 5

续附表 1
Continued Appendix Table 1

测点号	U		Th/U	同位素比值						误差 相关性	年龄(Ma)				不谐 和性
	(× 10 ⁻⁶)			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	± %	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	± %		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			
-25.2	31	12	0.38	0.1596	2.6	10.95	3.9	0.498	2.9	0.749	2451	±43	2604	±62	-6
-25.1	97	2	0.02	0.1642	1.2	11.89	2.6	0.525	2.3	0.892	2499	±19	2720	±50	-9
-26.1	202	181	0.92	0.1656	0.71	11.44	2.2	0.501	2.1	0.945	2513	±12	2619	±44	-4
-27.1	17	23	1.40	0.1643	3	10.28	4.6	0.454	3.5	0.757	2501	±51	2412	±70	4
-1.1	18	1	0.08	0.1677	3.9	9.63	5.5	0.417	3.9	0.712	2535	±65	2245	±74	11
-1.2	228	21	0.09	0.1617	0.97	9.55	2.3	0.4287	2.1	0.911	2473	±16	2300	±41	7
-2.1	109	7	0.07	0.1556	1.6	9.62	2.8	0.448	2.2	0.806	2408	±28	2387	±45	1
-2.2	74	32	0.45	0.1511	3.8	9.01	4.5	0.433	2.5	0.545	2358	±65	2317	±48	2
JD09-4 紫苏闪长岩/紫苏花岗岩															
-1.1	316	306	1.00	0.1653	0.61	10.63	2.1	0.4664	2	0.958	2510	±10	2468	±42	2
-2.1	342	342	1.03	0.16611	0.57	11.01	2	0.4806	2	0.960	2519	±10	2530	±41	0
-2.2	152	96	0.65	0.1571	1.2	10.08	2.5	0.465	2.2	0.870	2425	±21	2463	±44	-2
-3.1	597	667	1.15	0.1645	0.58	10.37	2	0.4572	1.9	0.957	2503	±10	2427	±39	3
-4.1	594	15	0.03	0.16547	0.46	11.09	2	0.4859	1.9	0.973	2512	±8	2553	±40	-2
-5.1	419	411	1.01	0.16607	0.52	11.17	2.1	0.488	2	0.967	2518	±9	2562	±42	-2
-6.1	299	57	0.20	0.1669	0.88	11.52	2.2	0.501	2	0.916	2527	±15	2617	±43	-4
-6.2	47	27	0.60	0.1611	2.2	10.82	3.6	0.487	2.8	0.784	2467	±37	2559	±59	-4
-7.2	11	8	0.73	0.15	9.8	8.89	11	0.429	4.8	0.440	2349	±170	2300	±92	2
-7.1	327	53	0.17	0.157	0.69	8.19	2.1	0.3783	2	0.946	2423	±12	2068	±35	15
-8.1	409	260	0.66	0.16666	0.52	11.56	2.1	0.503	2	0.967	2524	±9	2627	±43	-4
-9.1	1072	43	0.04	0.15608	0.38	8.61	1.9	0.4002	1.9	0.981	2414	±6	2170	±35	10
-10.1	900	814	0.93	0.15264	0.5	6.28	2	0.2984	1.9	0.967	2376	±9	1683	±28	29
-11.1	398	456	1.18	0.16541	0.54	11.18	2	0.4903	2	0.964	2512	±9	2572	±42	-2
-11.2	1089	28	0.03	0.15567	0.39	7.29	1.9	0.3398	1.9	0.979	2409	±7	1885	±31	22
-12.1	27	41	1.54	0.1669	2.2	10.71	4	0.466	3.3	0.832	2527	±37	2464	±67	2
-12.2	157	74	0.49	0.163	1	10.7	2.4	0.476	2.1	0.906	2487	±17	2510	±44	-1
-13.1	298	266	0.92	0.1632	0.62	10.25	2.1	0.4556	2	0.955	2489	±10	2420	±40	3
-13.2	265	156	0.61	0.1628	0.73	10.84	2.3	0.483	2.2	0.947	2485	±12	2540	±45	-2
-14.2	161	77	0.50	0.1618	0.96	10.87	2.3	0.487	2.1	0.911	2475	±16	2559	±45	-3
-14.1	190	146	0.79	0.1682	0.92	11.38	2.3	0.491	2.1	0.916	2539	±15	2574	±45	-1
-15.1	56	62	1.14	0.1613	2.2	10.52	3.4	0.473	2.7	0.772	2469	±37	2498	±55	-1
-16.1	1871	1174	0.65	0.13914	0.43	5.54	1.9	0.2889	1.9	0.975	2217	±7	1636	±27	26
-16.2	198	75	0.39	0.1572	1.3	9.4	2.5	0.4335	2.1	0.860	2426	±21	2322	±41	4
-17.1	12	8	0.70	0.1756	3.3	12.04	7.3	0.497	6.5	0.891	2612	±55	2602	±140	0
-18.1	218	112	0.53	0.1659	0.75	11.1	2.2	0.4852	2	0.939	2517	±13	2550	±43	-1
-18.2	62	25	0.42	0.1652	1.8	10.75	3.1	0.472	2.6	0.828	2509	±30	2493	±54	1
-19.1	219	110	0.52	0.162	0.85	10.53	2.2	0.4714	2.1	0.925	2477	±14	2490	±43	-1
-20.1	715	301	0.43	0.15842	0.43	9.1	1.9	0.4165	1.9	0.975	2439	±7	2244	±36	8
-20.2	153	86	0.58	0.1681	0.85	11.32	2.3	0.489	2.1	0.928	2538	±14	2565	±45	-1
-21.1	282	203	0.75	0.1644	0.64	11.28	2.1	0.4978	2	0.953	2501	±11	2604	±43	-4
-22.1	912	406	0.46	0.1666	0.34	11.01	1.9	0.4791	1.9	0.984	2524	±6	2524	±40	0

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	U Th		Th/U	同位素比值						误差 相关性	年龄(Ma)				不谐 和性
	($\times 10^{-6}$)			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm \%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm \%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm \%$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	\pm	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	\pm	
-23.1	362	276	0.79	0.16727	0.55	10.99	2	0.4765	2	0.964	2531	± 9	2512	± 41	1
-24.1	234	82	0.36	0.1622	0.73	10.29	2.8	0.46	2.7	0.965	2479	± 12	2440	± 54	2
-24.2	22	27	1.26	0.1744	2.2	11.24	4.1	0.467	3.5	0.850	2600	± 36	2472	± 72	5
JD17-5 石榴角闪斜长辉石岩															
-1.1	72	8	0.11	0.1771	1.2	12.37	2.7	0.506	2.4	0.889	2626	± 21	2641	± 52	-1
-1.2	131	14	0.11	0.1575	1	10.4	2.4	0.479	2.2	0.905	2429	± 18	2522	± 46	-4
-2.1	65	16	0.25	0.1616	1.8	10.28	3.1	0.461	2.5	0.823	2473	± 30	2446	± 52	1
-2.2	19	5	0.29	0.1728	4.4	11.8	5.8	0.495	3.7	0.643	2585	± 74	2593	± 80	0
-3.1	72	26	0.38	0.1641	2.1	10.39	3.2	0.459	2.5	0.772	2499	± 35	2435	± 51	3
-3.2	11	4	0.36	0.137	12	6.75	13	0.357	5.5	0.422	2191	± 210	1968	± 93	10
-4.1	180	23	0.13	0.1628	0.87	10.76	2.3	0.479	2.1	0.924	2485	± 15	2524	± 44	-2
-4.2	123	10	0.08	0.1653	1.2	11.19	2.5	0.491	2.3	0.888	2510	± 20	2575	± 48	-3
-5.1	90	70	0.80	0.1597	1.3	10.25	2.8	0.466	2.5	0.888	2453	± 22	2464	± 51	0
-6.1	48	73	1.55	0.1581	2.8	10.44	3.9	0.479	2.8	0.710	2436	± 47	2521	± 58	-3
-7.1	200	41	0.21	0.1651	0.81	10.62	2.2	0.4664	2.1	0.932	2509	± 14	2468	± 43	2
-8.1	96	39	0.42	0.1678	1.2	10.55	2.6	0.456	2.3	0.888	2536	± 20	2422	± 47	4
-8.2	114	43	0.39	0.1513	1.2	8.81	2.6	0.4222	2.3	0.881	2361	± 21	2271	± 43	4
-9.1	15	7	0.49	0.1686	3.5	11.36	5.4	0.489	4.1	0.763	2543	± 58	2565	± 86	-1
-9.2	112	8	0.07	0.1679	1.1	11.62	2.6	0.502	2.3	0.899	2537	± 19	2622	± 50	-3
-10.1	111	58	0.54	0.1645	1.2	10.6	2.6	0.467	2.3	0.891	2502	± 20	2472	± 47	1
-11.2	79	45	0.59	0.1661	1.6	11.13	3	0.486	2.6	0.843	2519	± 27	2553	± 54	-1
-11.1	111	17	0.16	0.1699	1.2	11.17	2.9	0.477	2.7	0.912	2557	± 20	2513	± 55	2
-12.1	72	55	0.79	0.1474	1.5	8.05	2.9	0.3962	2.5	0.859	2315	± 26	2152	± 46	7
-13.1	93	64	0.71	0.1656	1.3	11.25	2.7	0.493	2.4	0.871	2514	± 22	2582	± 50	-3
-14.1	82	10	0.12	0.1585	1.6	9.6	3.3	0.439	2.9	0.881	2440	± 26	2347	± 57	4
-15.1	180	113	0.65	0.1669	0.84	10.84	2.3	0.471	2.1	0.931	2527	± 14	2488	± 44	2
-15.2	23	22	0.98	0.1568	3.1	9.18	4.8	0.425	3.7	0.772	2421	± 52	2282	± 72	6
-16.1	175	94	0.55	0.1608	1.3	10.48	2.5	0.473	2.1	0.856	2464	± 22	2495	± 44	-1
-17.1	111	126	1.17	0.1636	1.3	10.66	2.6	0.473	2.3	0.876	2494	± 21	2495	± 48	0
-17.2	98	56	0.59	0.1595	1.5	10.23	2.8	0.465	2.4	0.855	2450	± 25	2462	± 49	0
-18.1	74	29	0.41	0.1678	1.3	11.07	2.8	0.478	2.5	0.881	2536	± 23	2519	± 52	1
-18.2	68	47	0.71	0.1669	1.7	11.37	3	0.494	2.5	0.833	2526	± 28	2589	± 54	-2
-19.1	166	27	0.17	0.1682	0.82	11.23	2.3	0.485	2.1	0.933	2539	± 14	2547	± 45	0
-19.2	102	12	0.13	0.1668	1.1	11.27	2.6	0.49	2.3	0.909	2526	± 18	2570	± 50	-2
-20.1	82	28	0.36	0.1313	2.7	6.26	3.6	0.346	2.4	0.670	2115	± 47	1915	± 40	9
-20.2	42	13	0.33	0.1564	3.1	9.94	4.2	0.461	2.8	0.680	2417	± 52	2444	± 58	-1
JD21-4 角闪二辉斜长片麻岩															
-1.1	49	99	2.10	0.1661	1.3	10.81	2.6	0.472	2.2	0.860	2518	± 22	2493	± 46	1
-2.1	804	1085	1.39	0.16092	0.43	9.4	1.9	0.4235	1.9	0.976	2465	± 71	2276	± 36	8
-2.2	25	35	1.44	0.1685	1.9	11.49	3.7	0.495	3.2	0.862	2542	± 31	2591	± 68	-2
-3.1	339	254	0.78	0.16708	0.39	11.11	1.8	0.4822	1.8	0.977	2529	± 71	2537	± 38	0

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	U Th		Th/U	同位素比值						误差 相关性	年龄(Ma)			不谐 和性	
	(×10 ⁻⁶)			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	± %	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	± %		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			
-4.2	43	29	0.69	0.1695	1.2	10.69	2.6	0.458	2.3	0.889	2552	±20	2429	±47	5
-4.1	58	47	0.84	0.1588	1.1	9.97	2.5	0.455	2.2	0.890	2443	±19	2419	±45	1
-5.1	152	145	0.99	0.1696	0.62	11.07	2	0.4734	1.9	0.952	2554	±10	2498	±40	2
-6.1	72	126	1.80	0.1627	1.2	10.49	2.3	0.4674	2	0.867	2484	±20	2472	±42	0
-7.1	92	204	2.28	0.1626	0.82	10.85	2.1	0.4841	2	0.921	2482	±14	2545	±41	-3
-8.1	79	82	1.07	0.1674	0.77	11.11	2.4	0.482	2.3	0.948	2531	±13	2534	±48	0
-9.2	42	48	1.16	0.1704	1.5	10.87	3	0.463	2.5	0.857	2562	±26	2451	±52	4
-9.1	459	251	0.57	0.16444	0.39	11.08	2.3	0.489	2.2	0.985	2502	±71	2564	±48	-2
-10.1	309	181	0.61	0.16891	0.37	11.79	1.8	0.5063	1.8	0.979	2547	±6	2641	±39	-4
-10.1	31	20	0.66	0.171	1.3	11.28	3.2	0.479	2.9	0.909	2567	±22	2521	±60	2
-11.1	240	164	0.71	0.16238	0.61	10.12	2.2	0.4522	2.1	0.959	2481	±10	2405	±42	3
-11.2	62	131	2.19	0.1682	1.6	10.6	3	0.457	2.5	0.841	2539	±27	2427	±50	4
-12.1	83	131	1.63	0.1631	1.3	10.33	2.7	0.459	2.4	0.874	2488	±22	2436	±49	2
-12.2	28	23	0.88	0.1596	4.8	10.46	6.1	0.475	3.8	0.620	2451	±81	2507	±78	-2
-13.1	423	331	0.81	0.1621	0.81	10	2.1	0.4473	1.9	0.924	2478	±14	2383	±39	4
-14.1	275	304	1.14	0.16873	0.53	11.21	2	0.4818	1.9	0.962	2545	±9	2535	±39	0
-15.1	37	11	0.32	0.1933	1.6	13.82	3	0.518	2.6	0.859	2771	±25	2693	±57	3
-16.1	288	218	0.78	0.16599	0.49	10.79	1.9	0.4716	1.9	0.968	2518	±81	2491	±39	1
-16.2	33	33	1.02	0.1651	4.2	10.48	6.1	0.46	4.4	0.717	2508	±71	2441	±89	3
-17.1	103	82	0.82	0.1691	0.8	11.17	2.2	0.479	2.1	0.932	2549	±13	2523	±43	1
-17.2	499	44	0.09	0.16459	0.59	10.34	1.9	0.4559	1.8	0.949	2503	±10	2421	±36	3
-18.2	53	69	1.34	0.1665	1.5	11.52	2.8	0.502	2.3	0.847	2523	±25	2622	±50	-4
-18.1	181	128	0.73	0.1575	0.71	9.67	2.1	0.4454	1.9	0.938	2429	±12	2375	±38	2
-19.1	28	18	0.67	0.162	2	10.41	5.6	0.466	5.2	0.936	2476	±33	2467	±110	0
-20.1	69	123	1.85	0.1737	1.5	9.25	2.7	0.3861	2.2	0.834	2594	±25	2105	±40	19
-21.1	308	310	1.04	0.16729	0.5	11.18	1.9	0.4849	1.8	0.965	2531	±81	2548	±39	-1
-22.1	258	187	0.75	0.1635	0.98	10.59	2.1	0.4699	1.9	0.889	2492	±16	2483	±39	0
JD40-1 麻粒岩(黑云二长片麻岩中的包体)															
-1.1	441	186	0.44	0.16694	0.58	11.2	1.8	0.4867	1.8	0.950	2527	±10	2557	±37	-1
-2.1	363	286	0.81	0.16422	0.33	11.1	1.8	0.4901	1.8	0.983	2500	±6	2571	±37	-3
-3.1	330	315	0.98	0.1634	0.47	10.99	1.9	0.4878	1.8	0.968	2491	±8	2561	±39	-3
-4.1	1210	328	0.28	0.14188	0.24	6.41	1.7	0.3274	1.7	0.990	2250	±4	1826	±27	19
-5.1	515	602	1.21	0.16598	0.27	11.15	1.9	0.4874	1.9	0.990	2518	±5	2559	±40	-2
-6.1	230	223	1.00	0.16368	0.39	10.89	1.8	0.4824	1.8	0.977	2494	±7	2538	±37	-2
-7.1	171	64	0.39	0.16682	0.45	10.89	1.8	0.4734	1.8	0.969	2526	±8	2498	±37	1
-8.1	279	280	1.04	0.16543	0.43	10.95	2.1	0.4803	2	0.978	2512	±7	2528	±42	-1
-9.1	143	64	0.46	0.16599	0.6	11.3	2	0.4936	1.9	0.952	2518	±10	2586	±40	-3
-10.1	190	97	0.52	0.15919	0.59	9.22	1.9	0.4203	1.8	0.953	2447	±10	2262	±35	8
-11.1	109	70	0.67	0.1669	0.7	11.13	2.1	0.4835	1.9	0.941	2527	±12	2543	±41	-1

附表2 冀东地区新太古代斜长角闪岩、片麻岩、紫苏闪长岩/紫苏花岗岩及其包体的锆石 Hf 同位素数据

Appendix Table 2 zircon Hf data of Neoarchean plagioclase-amphibolites, gneisses, hypersthene-diorite/charnockite and enclaves in granite in eastern Hebei Province

Spot No.	位置	Age(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{HM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{HD}}(\text{Ma})$
JD03-7 角闪斜长片麻岩												
-2.2	r	2438	0.0171	0.0006	0.281314	0.000017	-0.98	0.281287	-51.6	2.18	2674	2744
-3.1	r	2436	0.0188	0.0006	0.281348	0.000017	-0.98	0.281319	-50.4	3.26	2631	2689
-4.1	m	2485	0.0187	0.0007	0.281275	0.000014	-0.98	0.281244	-52.9	1.73	2732	2805
-4.2	r	2499	0.0154	0.0005	0.281359	0.000016	-0.98	0.281333	-50.0	5.20	2611	2645
-5.1	m	2460	0.0165	0.0006	0.281308	0.000015	-0.98	0.281282	-51.8	2.50	2680	2746
-6.1	m	2511	0.0037	0.0001	0.281301	0.000015	-1.00	0.281296	-52.0	4.16	2659	2706
-7.1	r	2332	0.0277	0.0010	0.281314	0.000017	-0.97	0.281268	-51.6	-0.96	2706	2812
-8.1	c	2512	0.0185	0.0007	0.281344	0.000016	-0.98	0.281311	-50.5	4.75	2640	2678
-8.2	r	2569	0.0141	0.0005	0.281326	0.000017	-0.98	0.281300	-51.1	5.65	2655	2680
-9.1	c	2445	0.0169	0.0006	0.281308	0.000017	-0.98	0.281281	-51.8	2.10	2682	2753
-9.2	m	2492	0.0239	0.0009	0.281315	0.000015	-0.97	0.281272	-51.5	2.91	2694	2753
-10.1	m	2486	0.0387	0.0015	0.281355	0.000014	-0.96	0.281285	-50.1	3.20	2681	2733
-11.1	c	2465	0.0150	0.0005	0.281289	0.000016	-0.98	0.281266	-52.4	2.03	2702	2773
-11.2	r	2408	0.0189	0.0006	0.281354	0.000019	-0.98	0.281327	-50.2	2.91	2620	2683
-12.1	r	1896	0.0181	0.0006	0.281345	0.000020	-0.98	0.281325	-50.5	-8.90	2631	2850
-13.1	c	2495	0.0116	0.0004	0.281337	0.000017	-0.99	0.281319	-50.7	4.64	2629	2670
-13.2	r	2547	0.0152	0.0005	0.281338	0.000017	-0.98	0.281312	-50.7	5.60	2638	2665
-14.1	c	2512	0.0261	0.0010	0.281352	0.000018	-0.97	0.281304	-50.2	4.50	2651	2691
-15.1	c	2512	0.0476	0.0016	0.281356	0.000018	-0.95	0.281281	-50.1	3.69	2685	2730
-15.2	r	2368	0.0172	0.0006	0.281534	0.000017	-0.98	0.281505	-43.8	8.31	2380	2384
-16.1	c	2511	0.0183	0.0007	0.281310	0.000015	-0.98	0.281275	-51.7	3.44	2689	2742
-17.1	c	2470	0.0246	0.0009	0.281321	0.000017	-0.97	0.281278	-51.3	2.59	2687	2750
-17.2	r	2515	0.0127	0.0005	0.281321	0.000019	-0.99	0.281298	-51.3	4.34	2657	2700
-18.1	m	2484	0.0150	0.0005	0.281304	0.000019	-0.99	0.281283	-51.9	3.09	2678	2737
-19.1	m	2417	0.0241	0.0009	0.281302	0.000017	-0.97	0.281260	-52.0	0.75	2713	2797
-20.1	m	2363	0.0122	0.0004	0.281299	0.000021	-0.99	0.281281	-52.1	0.25	2681	2778
JD04-1 含辉角闪斜长片麻岩												
-1.1	m	2512	0.0164	0.0005	0.281253	0.000017	-0.98	0.281226	-53.7	1.74	2754	2827
-2.1	m	2533	0.0101	0.0003	0.281228	0.000016	-0.99	0.281211	-54.6	1.65	2773	2847
-3.1	c	2482	0.0354	0.0012	0.281392	0.000023	-0.97	0.281337	-48.8	4.98	2607	2642
-3.2	m	2616	0.0089	0.0003	0.281256	0.000017	-0.99	0.281240	-53.6	4.63	2733	2769
-4.1	c	2605	0.0072	0.0002	0.281292	0.000019	-0.99	0.281280	-52.3	5.78	2680	2703
-5.1	c	2547	0.0198	0.0006	0.281316	0.000021	-0.98	0.281285	-51.5	4.63	2675	2713
-5.2	r	2454	0.0100	0.0003	0.281314	0.000021	-0.99	0.281299	-51.6	2.96	2657	2719
-6.1	c	2529	0.0341	0.0011	0.281438	0.000024	-0.97	0.281387	-47.2	7.82	2538	2541
-6.2	r	2366	0.0033	0.0001	0.281366	0.000019	-1.00	0.281360	-49.7	3.13	2574	2639
-7.1	r	2006	0.0516	0.0016	0.281534	0.000028	-0.95	0.281473	-43.8	-1.13	2441	2555
-8.1	m	2470	0.0103	0.0003	0.281346	0.000020	-0.99	0.281330	-50.4	4.42	2615	2660
-9.1	c	2578	0.0099	0.0003	0.281291	0.000021	-0.99	0.281274	-52.4	4.93	2689	2723
-10.1	c	2565	0.0551	0.0018	0.281406	0.000026	-0.94	0.281317	-48.3	6.16	2634	2652
-11.1	r	2447	0.0322	0.0011	0.281377	0.000023	-0.97	0.281324	-49.3	3.69	2627	2677
-11.2	c	2622	0.0077	0.0003	0.281327	0.000018	-0.99	0.281311	-51.1	7.27	2639	2644
-12.1	m	2484	0.0246	0.0008	0.281352	0.000017	-0.97	0.281312	-50.2	4.13	2641	2686
-13.1	c	2530	0.0386	0.0012	0.281389	0.000023	-0.96	0.281329	-48.9	5.78	2618	2642
-14.1	c	2450	0.0206	0.0007	0.281351	0.000022	-0.98	0.281317	-50.3	3.51	2634	2688
-14.2	m	2491	0.0059	0.0002	0.281250	0.000017	-0.99	0.281240	-53.8	1.72	2734	2810

续附表 2

Continued Appendix Table 2

Spot No.	位置	Age(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{HM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{HD}}(\text{Ma})$
JD04-2 含榴角闪斜长片麻岩												
-1.1	c	2535	0.0250	0.0010	0.281353	0.000013	-0.97	0.281303	-50.2	4.97	2652	2686
-1.2	m	2476	0.0378	0.0016	0.281403	0.000014	-0.95	0.281329	-48.4	4.53	2621	2659
-2.1	c	2408	0.0358	0.0014	0.281420	0.000015	-0.96	0.281355	-47.8	3.92	2586	2634
-2.2	r	2358	0.0158	0.0006	0.281350	0.000013	-0.98	0.281324	-50.3	1.66	2625	2705
-3.1	m	2452	0.0164	0.0005	0.281312	0.000017	-0.99	0.281290	-51.6	2.58	2669	2735
-4.1	r	1835	0.0165	0.0005	0.281323	0.000014	-0.98	0.281306	-51.2	-10.99	2656	2904
-5.1	c	2518	0.0517	0.0015	0.281473	0.000023	-0.96	0.281403	-45.9	8.15	2516	2515
-6.1	c	2536	0.0652	0.0019	0.281365	0.000019	-0.94	0.281271	-49.8	3.86	2700	2741
-7.1	m	2488	0.0187	0.0005	0.281306	0.000014	-0.98	0.281281	-51.8	3.11	2682	2740
-8.1	m	2475	0.0115	0.0003	0.281301	0.000015	-0.99	0.281286	-52.0	2.99	2674	2735
-9.1	m	2420	0.0132	0.0004	0.281352	0.000017	-0.99	0.281333	-50.2	3.40	2611	2669
-10.1	c	2530	0.0207	0.0007	0.281291	0.000021	-0.98	0.281259	-52.4	3.30	2711	2764
-11.1	c	2555	0.0381	0.0012	0.281431	0.000018	-0.96	0.281371	-47.4	7.87	2559	2560
-11.2	r	2493	0.0126	0.0004	0.281310	0.000014	-0.99	0.281291	-51.7	3.59	2667	2720
-12.1	m	2497	0.0339	0.0011	0.281352	0.000020	-0.97	0.281301	-50.2	4.02	2657	2702
-13.1	m	2320	0.0139	0.0004	0.281291	0.000015	-0.99	0.281273	-52.4	-1.06	2693	2807
-14.1	r	2293	0.0131	0.0004	0.281347	0.000016	-0.99	0.281330	-50.4	0.39	2616	2714
-15.1	c	2518	0.0558	0.0016	0.281430	0.000024	-0.95	0.281354	-47.4	6.41	2583	2601
-16.1	m	2498	0.0156	0.0005	0.281368	0.000015	-0.99	0.281346	-49.7	5.66	2593	2621
-17.1	c	2545	0.0515	0.0016	0.281414	0.000023	-0.95	0.281338	-48.0	6.47	2605	2621
-18.1	c	2563	0.0442	0.0013	0.281408	0.000019	-0.96	0.281347	-48.2	7.18	2592	2600
-19.2	r	2474	0.0113	0.0004	0.281335	0.000014	-0.99	0.281318	-50.8	4.13	2630	2678
-20.1	c	2523	0.0027	0.0001	0.281282	0.000015	-1.00	0.281278	-52.7	3.82	2683	2733
-20.2	r	2486	0.0108	0.0003	0.281320	0.000013	-0.99	0.281304	-51.4	3.89	2649	2699
-21.1	m	2473	0.0076	0.0002	0.281332	0.000016	-0.99	0.281321	-50.9	4.17	2627	2674
-22.1	c	2478	0.0182	0.0006	0.281330	0.000013	-0.98	0.281302	-51.0	3.63	2653	2705
-23.1	c	2458	0.0126	0.0004	0.281315	0.000016	-0.99	0.281295	-51.5	2.91	2662	2724
-24.1	m	2413	0.0162	0.0006	0.281352	0.000015	-0.98	0.281327	-50.2	3.01	2620	2682
-25.1	c	2451	0.0316	0.0015	0.281387	0.000014	-0.96	0.281318	-49.0	3.59	2636	2685
-25.2	r	2499	0.0096	0.0003	0.281359	0.000017	-0.99	0.281343	-50.0	5.58	2597	2627
-26.1	c	2513	0.0707	0.0024	0.281506	0.000019	-0.93	0.281392	-44.8	7.63	2533	2537
JD09-1 紫苏闪长岩/紫苏花岗岩												
-1.1	c	2510	0.0823	0.0030	0.281465	0.000024	-0.91	0.281323	-46.2	5.14	2631	2658
-2.1	c	2519	0.0298	0.0011	0.281381	0.000020	-0.97	0.281331	-49.2	5.60	2615	2642
-2.2	m	2425	0.0102	0.0004	0.281297	0.000015	-0.99	0.281279	-52.2	1.57	2684	2763
-3.1	c	2503	0.0780	0.0027	0.281495	0.000023	-0.92	0.281365	-45.2	6.43	2572	2587
-4.1	m	2512	0.0123	0.0005	0.281353	0.000016	-0.99	0.281330	-50.2	5.40	2615	2646
-5.1	c	2518	0.1140	0.0035	0.281526	0.000026	-0.89	0.281356	-44.0	6.49	2585	2598
-6.1	c	2527	0.0207	0.0008	0.281304	0.000021	-0.98	0.281267	-51.9	3.49	2701	2752
-6.2	r	2467	0.0078	0.0003	0.281353	0.000018	-0.99	0.281340	-50.2	4.72	2602	2643
-7.1	c	2423	0.0048	0.0002	0.281362	0.000016	-0.99	0.281354	-49.9	4.22	2582	2632
-7.2	r	2349	0.0104	0.0004	0.281358	0.000017	-0.99	0.281342	-50.0	2.09	2599	2676
-8.1	c	2524	0.1272	0.0043	0.281493	0.000028	-0.87	0.281285	-45.2	4.11	2691	2720
-9.1	m	2414	0.0276	0.0009	0.281417	0.000018	-0.97	0.281374	-47.9	4.70	2559	2600
-10.1	m	2376	0.0867	0.0026	0.281492	0.000028	-0.92	0.281373	-45.3	3.79	2570	2614
-11.1	c	2512	0.0601	0.0018	0.281473	0.000023	-0.95	0.281387	-45.9	7.43	2539	2546
-11.2	r	2409	0.0170	0.0007	0.281308	0.000017	-0.98	0.281278	-51.8	1.19	2687	2769

续附表 2

Continued Appendix Table 2

Spot No.	位置	Age(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{HM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{HD}}(\text{Ma})$
-12.1	c	2527	0.0124	0.0004	0.281265	0.000018	-0.99	0.281245	-53.3	2.74	2728	2789
-12.2	r	2487	0.0564	0.0019	0.281339	0.000024	-0.94	0.281247	-50.7	1.89	2736	2798
-13.1	c	2489	0.0523	0.0017	0.281212	0.000026	-0.95	0.281131	-55.2	-2.22	2896	3001
-13.2	m	2485	0.0084	0.0003	0.281263	0.000017	-0.99	0.281249	-53.4	1.90	2722	2796
-14.1	c	2539	0.0258	0.0009	0.281388	0.000022	-0.97	0.281345	-48.9	6.57	2595	2611
-14.2	m	2475	0.0060	0.0002	0.281313	0.000017	-0.99	0.281303	-51.6	3.57	2651	2705
-15.1	m	2469	0.0159	0.0005	0.281428	0.000019	-0.98	0.281404	-47.5	7.05	2516	2530
-16.1	m	2217	0.0256	0.0010	0.281391	0.000021	-0.97	0.281350	-48.9	-0.70	2597	2705
-16.2	c	2426	0.0207	0.0008	0.281333	0.000019	-0.98	0.281298	-50.9	2.29	2661	2729
-17.1	c	2612	0.0074	0.0003	0.281318	0.000019	-0.99	0.281305	-51.4	6.83	2647	2657
-18.1	c	2517	0.0053	0.0002	0.281306	0.000019	-0.99	0.281296	-51.8	4.34	2659	2703
-18.2	c	2509	0.0403	0.0015	0.281424	0.000025	-0.95	0.281352	-47.7	6.11	2588	2609
-19.1	m	2477	0.0045	0.0002	0.281303	0.000018	-0.99	0.281295	-52.0	3.35	2660	2718
-20.1	m	2439	0.0055	0.0002	0.281338	0.000018	-0.99	0.281329	-50.7	3.67	2616	2671
-20.2	m	2538	0.0088	0.0003	0.281299	0.000015	-0.99	0.281283	-52.1	4.33	2678	2720
-21.1	c	2501	0.0358	0.0014	0.281344	0.000027	-0.96	0.281279	-50.5	3.34	2688	2739
-22.1	c	2524	0.1230	0.0043	0.281643	0.000032	-0.87	0.281437	-39.9	9.49	2464	2454
-23.1	c	2530	0.0824	0.0033	0.281528	0.000026	-0.90	0.281371	-44.0	7.29	2562	2568
-24.1	r	2479	0.0267	0.0010	0.281322	0.000022	-0.97	0.281274	-51.3	2.65	2693	2754
-24.2	c	2600	0.0093	0.0003	0.281370	0.000021	-0.99	0.281353	-49.6	8.27	2583	2577
JD17-5 石榴角闪斜长辉岩												
-1.1	c	2626	0.0013	0.0000	0.281302	0.000017	-1.00	0.281301	-52.0	7.00	2652	2661
-1.2	m	2429	0.0034	0.0001	0.281295	0.000018	-1.00	0.281291	-52.2	2.10	2665	2740
-2.1	m	2473	0.0009	0.0000	0.281322	0.000019	-1.00	0.281321	-51.3	4.20	2625	2673
-2.2	c	2585	0.0013	0.0000	0.281322	0.000017	-1.00	0.281321	-51.3	6.77	2626	2638
-3.1	c	2499	0.0018	0.0000	0.281299	0.000018	-1.00	0.281298	-52.1	3.96	2656	2706
-3.2	r	2191	0.0003	0.0000	0.281357	0.000019	-1.00	0.281357	-50.0	-1.02	2578	2700
-4.1	c	2485	0.0039	0.0001	0.281336	0.000017	-1.00	0.281332	-50.8	4.87	2610	2650
-4.2	m	2510	0.0026	0.0001	0.281322	0.000016	-1.00	0.281319	-51.3	4.99	2628	2665
-5.1	m	2453	0.0134	0.0004	0.281397	0.000021	-0.99	0.281377	-48.6	5.71	2552	2582
-6.1	m	2436	0.0045	0.0001	0.281316	0.000016	-1.00	0.281311	-51.5	2.97	2640	2704
-7.1	c	2509	0.0019	0.0000	0.281338	0.000018	-1.00	0.281336	-50.7	5.55	2605	2636
-8.1	c	2536	0.0035	0.0001	0.281350	0.000021	-1.00	0.281346	-50.3	6.51	2593	2611
-8.2	r	2361	0.0018	0.0000	0.281377	0.000019	-1.00	0.281375	-49.3	3.51	2554	2616
-9.2	c	2537	0.0021	0.0001	0.281358	0.000021	-1.00	0.281355	-50.0	6.89	2580	2593
-10.1	c	2502	0.0013	0.0000	0.281332	0.000017	-1.00	0.281330	-50.9	5.18	2614	2649
-11.1	c	2557	0.0037	0.0001	0.281330	0.000019	-1.00	0.281325	-51.0	6.27	2620	2640
-11.2	c	2519	0.0016	0.0000	0.281328	0.000020	-1.00	0.281326	-51.1	5.42	2619	2651
-12.1	m	2315	0.0012	0.0000	0.281305	0.000016	-1.00	0.281303	-51.9	-0.07	2649	2755
-13.1	c	2514	0.0016	0.0000	0.281359	0.000019	-1.00	0.281357	-50.0	6.41	2577	2598
-14.1	c	2440	0.0034	0.0001	0.281312	0.000016	-1.00	0.281307	-51.6	2.92	2645	2709
-15.1	c	2527	0.0453	0.0014	0.281367	0.000019	-0.96	0.281297	-49.7	4.57	2663	2699
-15.2	r	2421	0.0054	0.0002	0.281433	0.000017	-0.99	0.281424	-47.3	6.65	2489	2510
-16.1	c	2464	0.0025	0.0001	0.281321	0.000017	-1.00	0.281318	-51.3	3.88	2629	2682
-17.1	c	2494	0.0232	0.0008	0.281368	0.000020	-0.98	0.281330	-49.6	4.99	2616	2651
-17.2	m	2450	0.0173	0.0006	0.281573	0.000021	-0.98	0.281544	-42.4	11.59	2326	2290
-18.1	c	2536	0.0025	0.0001	0.281278	0.000019	-1.00	0.281275	-52.8	4.03	2686	2733
-18.2	m	2526	0.0071	0.0003	0.281373	0.000019	-0.99	0.281360	-49.5	6.80	2574	2589

续附表 2

Continued Appendix Table 2

Spot No.	位置	Age(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{HM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{HE}}(\text{Ma})$
-19.1	c	2539	0.0066	0.0002	0.281363	0.000020	-0.99	0.281353	-49.8	6.85	2583	2597
-19.2	m	2526	0.0015	0.0000	0.281322	0.000018	-1.00	0.281320	-51.3	5.38	2627	2659
-20.1	m	2115	0.0022	0.0001	0.281346	0.000018	-1.00	0.281344	-50.4	-3.23	2596	2748
-20.2	m	2417	0.0010	0.0000	0.281343	0.000021	-1.00	0.281341	-50.6	3.62	2598	2656
JD21-1 角闪二辉斜长片麻岩												
-1.1	m	2518	0.0173	0.0005	0.281358	0.000016	-0.98	0.281332	-50.0	5.64	2611	2639
-2.1	r	2465	0.0283	0.0009	0.281303	0.000020	-0.97	0.281261	-51.9	1.89	2710	2780
-2.2	c	2542	0.0114	0.0003	0.281346	0.000019	-0.99	0.281329	-50.4	6.09	2615	2637
-3.1	c	2529	0.0178	0.0006	0.281287	0.000017	-0.98	0.281258	-52.5	3.25	2711	2765
-4.1	c	2443	0.0161	0.0005	0.281327	0.000021	-0.99	0.281303	-51.1	2.88	2651	2714
-5.1	r	2554	0.0249	0.0008	0.281326	0.000022	-0.98	0.281289	-51.1	4.93	2669	2703
-6.1	m	2484	0.0170	0.0005	0.281311	0.000020	-0.98	0.281285	-51.7	3.18	2675	2732
-7.1	m	2482	0.0295	0.0009	0.281299	0.000015	-0.97	0.281255	-52.1	2.07	2718	2786
-8.1	c	2531	0.0159	0.0005	0.281299	0.000016	-0.98	0.281273	-52.1	3.84	2691	2738
-9.1	c	2502	0.0162	0.0005	0.281254	0.000018	-0.98	0.281228	-53.7	1.54	2752	2828
-10.1	c	2547	0.0198	0.0007	0.281307	0.000023	-0.98	0.281273	-51.8	4.20	2691	2733
-10.2	m	2567	0.0088	0.0003	0.281288	0.000021	-0.99	0.281275	-52.5	4.72	2687	2725
-11.1	c	2481	0.0315	0.0011	0.281392	0.000021	-0.97	0.281342	-48.8	5.10	2601	2635
-12.1	m	2488	0.0235	0.0007	0.281310	0.000016	-0.98	0.281275	-51.7	2.89	2691	2750
-13.1	c	2478	0.0192	0.0007	0.281271	0.000021	-0.98	0.281238	-53.1	1.37	2739	2817
-14.1	c	2545	0.0382	0.0012	0.281344	0.000021	-0.96	0.281285	-50.5	4.58	2677	2714
-15.1	c	2771	0.0261	0.0009	0.281292	0.000023	-0.97	0.281246	-52.4	8.43	2724	2710
-16.1	c	2518	0.0308	0.0012	0.281253	0.000021	-0.96	0.281197	-53.7	0.82	2798	2876
-17.1	c	2549	0.0242	0.0009	0.281246	0.000019	-0.97	0.281204	-54.0	1.80	2785	2853
-18.1	c	2429	0.0272	0.0010	0.281274	0.000020	-0.97	0.281230	-53.0	-0.08	2755	2848
-19.1	r	2476	0.0114	0.0004	0.281356	0.000019	-0.99	0.281339	-50.1	4.90	2603	2642
-20.1	c	2594	0.0179	0.0006	0.281322	0.000018	-0.98	0.281293	-51.3	6.00	2663	2684
-21.1	c	2531	0.0188	0.0007	0.281267	0.000019	-0.98	0.281235	-53.2	2.46	2743	2806
-22.1	c	2492	0.0161	0.0006	0.281354	0.000021	-0.98	0.281326	-50.1	4.81	2621	2659
JD40-1 麻粒岩(黑云二长片麻岩中的包体)												
-1.1	c	2527	0.0241	0.0009	0.281280	0.000018	-0.97	0.281237	-52.8	2.47	2741	2803
-2.1	c	2500	0.0487	0.0016	0.281428	0.000017	-0.95	0.281350	-47.5	5.85	2590	2614
-3.1	c	2491	0.0401	0.0013	0.281317	0.000018	-0.96	0.281255	-51.5	2.27	2720	2783
-4.1	r	2250	0.0167	0.0005	0.281359	0.000017	-0.98	0.281335	-50.0	-0.44	2611	2720
-5.1	c	2518	0.0597	0.0018	0.281309	0.000022	-0.95	0.281223	-51.8	1.74	2766	2830
-6.1	m	2494	0.0328	0.0010	0.281342	0.000022	-0.97	0.281292	-50.6	3.65	2668	2718
-7.1	c	2526	0.0172	0.0006	0.281211	0.000023	-0.98	0.281182	-55.2	0.48	2814	2899
-8.1	c	2512	0.0445	0.0015	0.281329	0.000019	-0.96	0.281258	-51.0	2.85	2717	2772
-9.1	c	2518	0.0294	0.0010	0.281251	0.000020	-0.97	0.281204	-53.8	1.05	2788	2864
-10.1	c	2447	0.0129	0.0004	0.281346	0.000019	-0.99	0.281325	-50.4	3.74	2622	2674
-11.1	r	2527	0.0232	0.0007	0.281267	0.000020	-0.98	0.281231	-53.2	2.23	2749	2814

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)) \times 10000$; $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \ln\{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$; $t_{\text{DMC}} = 1/\lambda \ln\{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}] + [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CC}}] \times (e^{\lambda t} - 1) / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CC}}]\}$; $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$; where, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ are the measured values of the samples, t = crystallization time of zircon; mean continent crust $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CC}} = 0.015$; chondrite homogeneous reservoir $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997); depleted mantle $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000); $\lambda_{\text{Lu}} = 1.867 \times 10^{-11}$ /year (Söderlund *et al.*, 2004)