

东天山卡拉塔格复式岩体的时代、成因及构造意义

袁鑫超¹, 王毓婧^{2*}, 杜龙³, 龙晓平^{1*}

(1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西西安 710069; 2. 西北大学城市与环境学院, 陕西西安 710127; 3. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590)

摘要: 东天山位于中亚造山带最南部, 记录了中亚造山带晚期的俯冲增生过程, 然而早古生代一些关键地质演化过程仍存在争议, 特别是大南湖-头苏泉带的构造属性、俯冲起始时间及俯冲极性。本文选取大南湖-头苏泉带北缘的卡拉塔格复式岩体开展了系统的年代学和地球化学工作, 以揭示该带早古生代构造演化过程。锆石 U-Pb 定年结果显示, 花岗岩、花岗闪长岩和辉长闪长岩分别形成于 434 ± 4 Ma、 442 ± 2 Ma 和 445 ± 4 Ma, 表明该复式岩体主要形成于早志留世。花岗岩和花岗闪长岩均显示低磷($P_2O_5 < 0.1\%$)、富钠($K_2O/Na_2O \leq 0.5$)、准铝质-弱过铝质($A/CNK=0.57\sim 1.24, 0.91\sim 1.03$)的钙碱性 I 型花岗岩特征。样品具有较低的 Sr/Y ($1.9\sim 4.5, 8.1\sim 11.4$) 和 $(La/Yb)_N$ 值 ($1.6\sim 2.4, 2.4\sim 3.0$), 较高的 $\epsilon_{Hf}(t)$ ($+12.7\sim +15.5, +11.0\sim +14.7$) 和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($+7.0\sim +7.5, +7.1\sim +7.7$), 以及年轻的二阶段 Hf 模式年龄 ($426\sim 589$ Ma, $485\sim 722$ Ma) 和 Nd 模式年龄 ($559\sim 603$ Ma, $555\sim 598$ Ma), 表明花岗岩和花岗闪长岩是年轻下地壳部分熔融的产物。辉长闪长岩相对富集大离子亲石元素 (LILE)、高度不相容元素, 亏损高场强元素 (HFSE), 显示典型的与俯冲相关的岩浆的地球化学特征; 其较高的 MgO 含量 ($5.26\%\sim 5.54\%$), 亏损的 $\epsilon_{Hf}(t)$ ($+12.1\sim +15.7$) 和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($+7.1\sim +7.3$), 说明母岩浆来源于亏损地幔。辉长闪长岩高的 Ce/Nb ($11.5\sim 16.1$) 和低的 Th/La 值 ($0.11\sim 0.13$) 指示地幔源区经历了板片流体的交代作用。综合前人对该地区早古生代岩浆活动的研究成果, 我们认为大南湖-头苏泉带岩浆弧早志留世处于康古尔洋向北俯冲的洋内弧环境, 且俯冲开始时间不晚于早志留世。

关键词: 东天山; 早古生代; 岛弧岩浆; 康古尔洋; 俯冲极性

中图分类号: P595; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2023)06-1381-032

0 引言

中亚造山带北邻欧洲和西伯利亚板块, 南接塔里木和华北板块, 是全球典型的增生造山带之一 (Şengör et al., 1993; Jahn et al., 2000; Wilhem et al., 2012; Yarmolyuk et al., 2014)。前人研究认为中亚造山带是古亚洲洋从新元古代-三叠纪长期俯冲消减的产物,

存在多个岩浆弧、蛇绿混杂岩、微陆块和洋底高原等构造单元的侧向拼贴作用, 并一致认为其南部地质演化稍晚于北部 (Windley et al., 2007; Xiao et al., 2015; Wan et al., 2018; Ao et al., 2021)。东天山作为中亚造山带西南缘俯冲增生最晚期的构造单元, 是准噶尔-哈萨克斯坦板块和塔里木板块最终碰撞拼合的重要区域, 成为解读中亚造山带古生代以来构

收稿日期: 2022-12-19; 改回日期: 2023-02-06; 网络出版日期: 2023-09-28

项目资助: 国家重点研发项目 (2019YFA0708601) 和大陆动力学国家重点实验室创新团队项目联合资助。

第一作者简介: 袁鑫超 (1996-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 1844687628@qq.com

通信作者: 王毓婧 (1982-), 女, 讲师, 从事岩石地球化学研究。E-mail: wyujing@nwu.edu.cn

龙晓平 (1979-), 男, 教授, 博士生导师, 从事造山带大陆地壳生长和前寒武纪岩浆作用及古环境研究。E-mail: longxp@nwu.edu.cn

造格局和地质演化过程的最佳选区(夏林圻等, 2002; Xiao et al., 2004, 2013; Han et al., 2018)(图 1a)。许多学者对区域内古洋盆演化、洋陆构造转换和碰撞造山过程及伴生的岩浆活动和成矿作用进行了诸多探讨并取得了系列研究成果, 然而研究多聚焦于晚古生代(Mao et al., 2014; Zhang et al., 2014; Du et al., 2018a, 2018b; Sun et al., 2020)。由于早古生代的物质记录相对较少且多集中于中天山地块(Lei et al., 2011; Wang et al., 2015; Zhong et al., 2015; Ma et al., 2020; Zhao et al., 2022), 致使东天山北部早古生代弧-盆体系演化尚未达成共识, 关于大南湖-头苏泉带的俯冲起始时间和俯冲极性仍旧存在争议: 有学者认为该带是卡拉麦里洋向南俯冲的产物(芮宗瑶等, 2002; Zhang et al., 2016), 也有学者认为是康古尔洋北向俯冲的结果(李锦轶等, 2006; 王京彬等, 2006; 王国灿等, 2019)。此外, 关于该带构造属性的认识也存在洋内弧(王京彬等, 2006; Xu et al., 2015)和陆缘弧(秦克章等, 2002; Chen and Jahn, 2004)的分歧。

本文以大南湖-头苏泉带北缘的卡拉塔格复式岩体为研究对象, 通过系统分析花岗岩、花岗闪长岩和辉长闪长岩的锆石 U-Pb 年代学、原位 Lu-Hf 同位素、全岩主微量元素和 Sr-Nd 同位素, 以及单矿物的化学组成, 并总结前人对该带早古生代岩浆活动的研究成果, 限定卡拉塔格复式岩体的侵位时间、岩石成因和动力学背景, 制约大南湖-头苏泉带的构造属性、俯冲起始时限和俯冲极性。

1 地质背景及岩石学特征

1.1 区域地质背景

中国境内天山造山带大致以乌鲁木齐-库尔勒公路为界划分为东天山和西天山, 东天山又依照内部的康古尔断裂带、雅满苏-苦水断裂和阿其克库都克-沙泉子大断裂细划为大南湖-头苏泉带、康古尔韧性剪切带、阿奇山-雅满苏带和中天山地块等次级构造单元(杨兴科等, 1996; Charvet et al., 2011; Xiao et al., 2014; 舍建忠等, 2018)(图 1b、c)。

大南湖-头苏泉带位于吐哈盆地南缘, 呈近 EW 向连续带状分布, 以大草滩断裂为界, 其北主要出露早古生代地层, 其南为石炭系企鹅山群火山-沉积岩系(张洪瑞等, 2010; Chai et al., 2019)。康古尔韧性剪切带为大南湖-头苏泉带与阿奇山-雅满苏带的弧-弧碰撞缝合带, 并于 276~291 Ma 经历了 SN 向挤压韧性变形至 EW 向右行走滑剪切的构造转换(王瑜

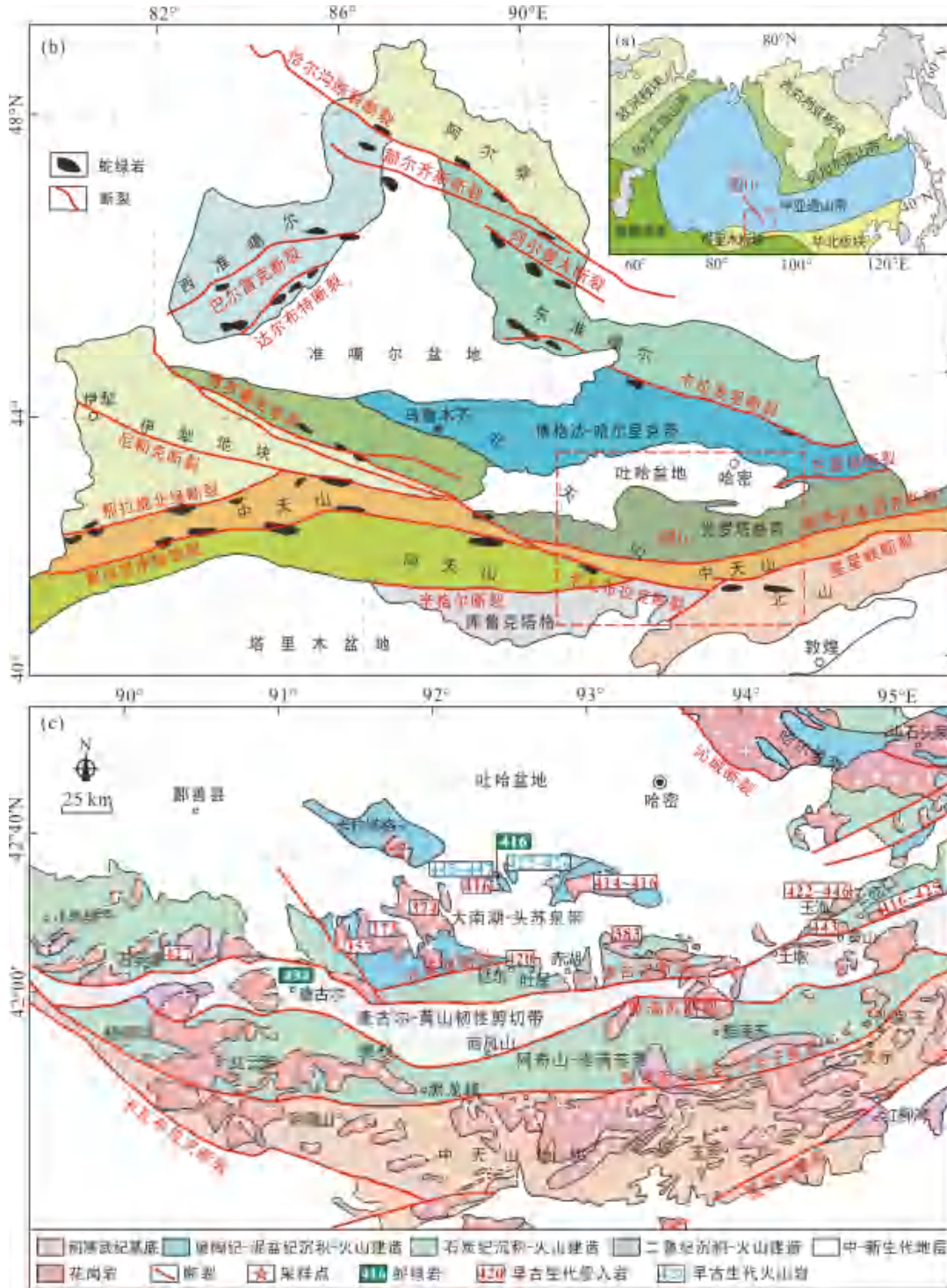
等, 2002; 陈文等, 2005; 张忠义等, 2021)。阿奇山-雅满苏带是中天山地块北缘的陆缘弧, 发育近 EW 向展布的晚古生代海相火山-沉积建造(张雄华等, 2012)。中天山地块疑为塔里木克拉通新元古代裂解的地块(Ma et al., 2012), 主要出露前寒武纪结晶基底, 包括中元古界星星峡群和卡瓦布拉克群, 其岩性包括中-高级变质的片麻岩、片岩、混合岩和大理岩等(胡霁琴等, 2006; Huang et al., 2021)。

研究区卡拉塔格位于大南湖-头苏泉带北段, 是吐哈盆地南缘的次级构造隆起(图 1c), 较好地保存了早古生代的物质记录, 在探讨东天山早古生代弧-盆演化上具有天然优势(秦克章等, 2001)。区域内主要出露一套奥陶纪-二叠纪的火山-沉积岩系, 且具有从隆起核部向外围地层逐渐变年轻的趋势(图 2)。大柳沟组(O₂~S_{1d})为区内出露最老地层, 主要分布于隆起核部红石-梅岭一带, 玉带南部也有小面积带状分布, 该组下段以中基性的玄武岩-玄武质安山岩-安山岩组合为主, 上段转变为中酸性安山岩-英安岩-流纹岩组合, 夹少量凝灰岩(李玮等, 2016; 龙灵利等, 2016)。红柳峡组(S_{2,3h})与下伏大柳沟组整合或断层接触, 是一套海相中酸性火山-碎屑沉积建造, 并表现出间歇性火山活动的特点, 仅在玉带-西二区零星出露(毛启贵等, 2010)。大南湖组(D_{1d})平行不整合于下伏红柳峡组和大柳沟组, 以浅海相火山碎屑岩、灰岩和细砂岩为主。脐山组(C_{2q})为基性-中酸性火山岩和火山碎屑岩, 并夹有少量碎屑沉积和煤层, 与下伏大柳沟组和大南湖组呈不整合接触, 集中分布于该区西北部, 但在隆起边缘也零星出露(马志杰等, 2021; 张雪等, 2022)。阿尔巴萨依组(P_{1a})是一套陆相的中酸性火山熔岩和火山碎屑岩, 在隆起带边缘均有分布, 与下伏地层呈角度不整合接触(张雪等, 2021)。另外, 在卡拉塔格断裂南部的山坳发现了侏罗纪湖沼相含煤地层。

卡拉塔格地区褶皱和断裂发育, 构造变形以近 EW 向为主, 与区域构造特征一致(毛启贵等, 2010)。区内岩浆侵入活动主要分为三期: 奥陶纪-志留纪(426~465 Ma)侵入体分布范围较广, 多呈不规则状、岩基状产出, 岩石类型较复杂(Du et al., 2018); 泥盆纪(377~389 Ma)侵入体规模相对较小, 多以岩脉和岩墙产出(Mao et al., 2018); 二叠纪(~280 Ma)发育铁镁质-超铁镁质侵入体, 受卡拉塔格和卡北主干断裂影响, 各侵入体具有走向一致、岩相界线清晰、成带成群分布的特征(Sun et al., 2019b)。此外, 卡拉

塔格地区的矿产资源丰富且矿床类型多样, 主要包括: 荒土坡 VMS 型 Cu-Zn 矿床(Yang et al., 2018)、玉带斑岩型 Cu-Au 矿床(Sun et al., 2018)、梅岭次火

山热液型 Cu-Au 矿床(Sun et al., 2021)、西二区矽卡岩型 Fe-Cu 矿床(Chen et al., 2020)以及月牙泉基性岩型 Cu-Ni 硫化物矿床(Zhou et al., 2021)等。



年龄单位: Ma; 数据来源见表 1。

图 1 东天山地质简图(据 Sun et al., 2019a; 舍建忠等, 2020 修改)

Fig.1 Simplified geological maps of the Eastern Tianshan

表 1 大南湖-头苏泉带早古生代岩浆岩年龄数据
Table 1 Age of the Early Paleozoic magmatic rocks in the Dananhu-Tousuquan belt

岩性	经度	纬度	定年方法	年龄(Ma)	数据来源
石英闪长玢岩	91°44'30"E	42°41'38"N	SHRIMP	432.0±3.0	Chen et al., 2017
辉长闪长岩	91°52'30"E	42°37'30"N	LA-ICP-MS	452.6±3.9	Sun et al., 2019a
辉长闪长岩	91°52'30"E	42°37'30"N	LA-ICP-MS	451.0±3.7	Sun et al., 2019a
石英闪长岩	91°52'30"E	42°37'30"N	LA-ICP-MS	441.1±5.2	Sun et al., 2019a
石英闪长岩	91°52'30"E	42°37'30"N	LA-ICP-MS	433.4±4.1	Sun et al., 2019a
石英闪长岩	91°52'30"E	42°37'30"N	LA-ICP-MS	428.7±3.2	Sun et al., 2019a
花岗闪长岩	91°52'30"E	42°37'30"N	LA-ICP-MS	426.9±4.4	Sun et al., 2019a
花岗岩	91°52'30"E	42°37'30"N	LA-ICP-MS	448.5±5.0	Sun et al., 2019a
花岗岩	91°52'30"E	42°37'30"N	LA-ICP-MS	449.5±5.8	Sun et al., 2019a
石英闪长岩	91°44'32"E	42°41'52"N	SHRIMP	386.9±3.9	Sun et al., 2019a
石英闪长岩	91°44'32"E	42°41'52"N	SHRIMP	397.2±6.6	Sun et al., 2019a
二长岩	91°44'32"E	42°41'52"N	LA-ICP-MS	378.5±3.8	Sun et al., 2019a
辉钼矿	91°45'30"E	42°43'30"N	Re-Os	449.5±4.2	Sun et al., 2018
石英闪长玢岩	91°45'30"E	42°43'30"N	LA-ICP-MS	452.7±2.8	Sun et al., 2018
花岗闪长岩	91°54'44"E	42°36'39"N	SIMS	430.0±1.7	Deng et al., 2018
花岗岩	91°46'50"E	42°37'0"N	LA-ICP-MS	447.0±5.0	Du et al., 2018c
闪长岩	91°57'18"E	42°35'1.3"N	LA-ICP-MS	442.0±3.0	Du et al., 2018c
花岗闪长岩	91°54'30"E	42°36'30"N	LA-ICP-MS	426.6±2.3	Cheng et al., 2020
石英闪长玢岩	91°44'30"E	42°41'50"N	LA-ICP-MS	389.7±2.5	Mao et al., 2018
石英闪长玢岩	91°44'25"E	42°38'10"N	LA-ICP-MS	382.1±2.4	Mao et al., 2018
花岗岩	91°56'30"E	42°34'0"N	LA-ICP-MS	435.0±2.0	Zheng et al., 2018
闪长岩	91°56'30"E	42°34'0"N	LA-ICP-MS	440.0±2.0	Zheng et al., 2018
石英闪长岩	91°55'30"E	42°34'30"N	LA-ICP-MS	439.2±1.4	Sun et al., 2020
黄铁矿	91°55'30"E	42°34'30"N	Re-Os	442.9±7.3	Sun et al., 2020
闪长岩	91°53'30"E	42°34'30"N	LA-ICP-MS	449.9±3.6	许骏等, 2020
花岗闪长岩	91°53'30"E	42°34'30"N	LA-ICP-MS	435.5±3.4	许骏等, 2020
闪长玢岩	91°52'46"E	42°41'35"N	SHRIMP	437.1±3.8	龙灵利等, 2016
闪长玢岩	91°52'46"E	42°41'35"N	SHRIMP	442.6±5.3	龙灵利等, 2016
闪长岩	91°55'35"E	45°35'36"N	LA-ICP-MS	465.2±2.4	庞博宸等, 2020
花岗闪长岩	92°00'32"E	42°29'32"N	LA-ICP-MS	377.8±2.4	庞博宸等, 2020
闪长岩	93°9'14"E	42°28'14"N	LA-ICP-MS	416.0±6.0	庞博宸等, 2020
二长花岗岩	93°7'36"E	42°27'15"N	LA-ICP-MS	414.1±2.1	庞博宸等, 2020
石英闪长玢岩	94°40'29"E	42°24'10"N	LA-ICP-MS	427.8±1.0	刘帅杰等, 2018
石英闪长岩	94°40'30"E	42°24'30"N	LA-ICP-MS	446.2±4.3	Wang et al., 2022
花岗闪长玢岩	94°40'30"E	42°24'30"N	LA-ICP-MS	406.0±4.1	Wang et al., 2022
闪长玢岩	94°40'30"E	42°24'30"N	LA-ICP-MS	440.0±1.4	Wang et al., 2022
闪长玢岩	94°40'30"E	42°24'30"N	LA-ICP-MS	413.7±7.6	Wang et al., 2022
石英闪长岩	94°40'30"E	42°24'30"N	LA-ICP-MS	439.7±2.5	Wang et al., 2016a
花岗闪长岩	94°40'30"E	42°24'30"N	LA-ICP-MS	430.9±2.5	Wang et al., 2016a
花岗闪长岩	94°40'30"E	42°24'30"N	LA-ICP-MS	425.5±2.7	Wang et al., 2016a
闪长岩	94°35'30"E	42°26'30"N	LA-ICP-MS	441.6±2.5	Wang et al., 2016b
花岗闪长岩	94°35'30"E	42°26'30"N	LA-ICP-MS	430.4±2.9	Wang et al., 2016b
花岗闪长岩	94°35'30"E	42°26'30"N	LA-ICP-MS	430.3±2.6	Wang et al., 2016b
花岗岩	94°40'30"E	42°26'30"N	LA-ICP-MS	325.4±2.5	Wang et al., 2018
石英闪长岩	94°40'30"E	42°26'30"N	LA-ICP-MS	443.5±4.1	Wang et al., 2018
辉石闪长岩	94°40'30"E	42°26'30"N	LA-ICP-MS	291.0±3.0	Wang et al., 2018
花岗闪长岩	94°34'~45"E	40°5'~10"N	LA-ICP-MS	431.2±1.9	于介禄等, 2019

续表 1:

岩性	经度	纬度	定年方法	年龄(Ma)	数据来源
闪长玢岩	94°34'~45'E	40°5'~10'N	LA-ICP-MS	433.2±2.2	于介禄等, 2019
花岗闪长岩	94°48'30"E	42°23'30"N	LA-ICP-MS	443.0±2.9	王超等, 2015
含矿闪长岩	94°45'20"E	42°21'30"N	LA-ICP-MS	425.0±3.9	林涛等, 2017
辉钼矿	94°45'20"E	42°21'30"N	Re-Os	416.0±6.4	林涛等, 2017
花岗闪长岩	94°37'30"E	42°24'30"N	SHRIMP	422.3±4.0	张照伟等, 2016
花岗闪长岩	95°59'00"E	42°37'00"N	LA-ICP-MS	427.0±3.0	He et al., 2021
辉长岩	95°59'00"E	42°37'00"N	LA-ICP-MS	406.0±3.0	He et al., 2021
辉长岩	95°59'00"E	42°37'00"N	LA-ICP-MS	397.0±4.0	He et al., 2021
二长花岗岩	95°59'00"E	42°37'00"N	LA-ICP-MS	382.0±4.0	He et al., 2021
英云闪长岩	96°15'59"E	42°45'43"N	LA-ICP-MS	414.0±3.5	施文翔等, 2015
辉长岩	92°55'30"E	42°34'30"N	LA-ICP-MS	416.5±4.0	舍建忠等, 2017
辉长岩	90°49'51"E	42°13'10"N	SHRIMP	427.0±7.3	Chen et al., 2019
淡色辉长岩	90°49'51"E	42°13'10"N	SHRIMP	428.0±8.5	Chen et al., 2019
花岗闪长岩	92°30'24"E	42°5'30"N	LA-ICP-MS	420.1±3.3	肖兵等, 2015
辉长岩	90°53'9.4"E	42°12'15"N	SHRIMP	496.0±11.0	李文铅等, 2008
英安岩	91°54'30"E	42°34'30"N	LA-ICP-MS	440.1±1.2	Chai et al., 2019
辉石安山岩	91°54'30"E	42°34'30"N	LA-ICP-MS	439.7±0.95	Chai et al., 2019
凝灰岩	91°54'30"E	42°34'30"N	LA-ICP-MS	442.0±1.1	Chai et al., 2019
流纹质火山角砾熔岩	91°55'30"E	42°30'30"N	SHRIMP	439.9±4.8	龙灵利等, 2017
次流纹岩	91°55'30"E	42°30'30"N	SHRIMP	439.0±7.0	龙灵利等, 2017
高镁安山岩	91°55'37"E	42°36'17"N	LA-ICP-MS	438.4±4.9	李玮等, 2016
英安岩	92°0'0"E	42°35'1"N	LA-ICP-MS	434.8±3.8	李玮等, 2016
绢云母	91°56'30"E	42°36'30"N	K-Ar	424.0±7.0	毛启贵等, 2010
酸性火山岩	91°56'30"E	42°36'30"N	离子探针	416.3±5.9	毛启贵等, 2010
安山岩	92°33'30"E	42°32'30"N	LA-ICP-MS	426.0±2.0	Zhang et al., 2018
安山岩	92°33'30"E	42°32'30"N	LA-ICP-MS	422.0±2.0	Zhang et al., 2018
玄武质安山岩	92°28'41"E	42°30'31"N	LA-ICP-MS	447.7±2.1	Zhao et al., 2019
安山岩	92°26'24"E	42°30'16"N	LA-ICP-MS	445.1±2.3	Zhao et al., 2019

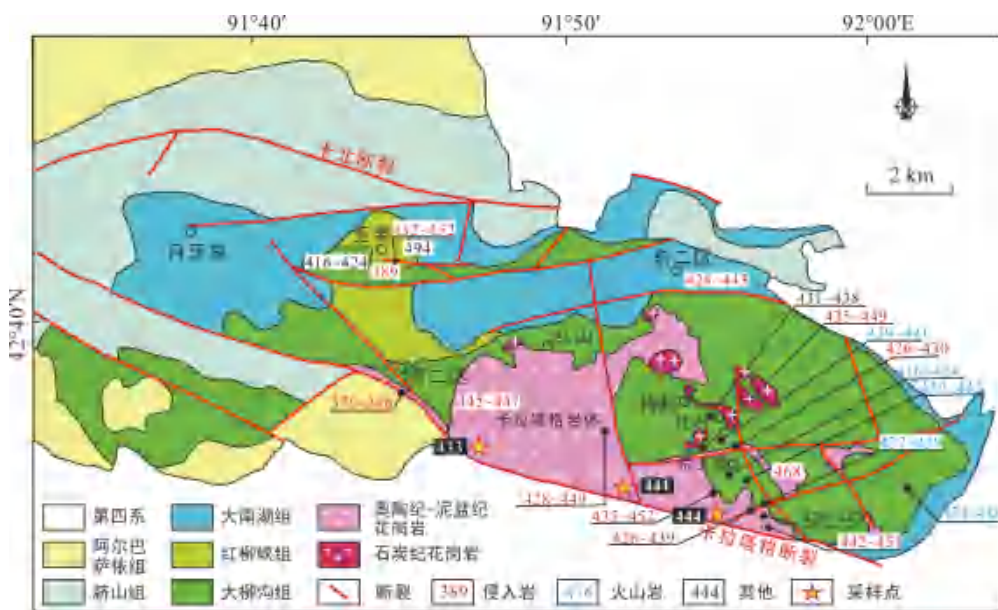


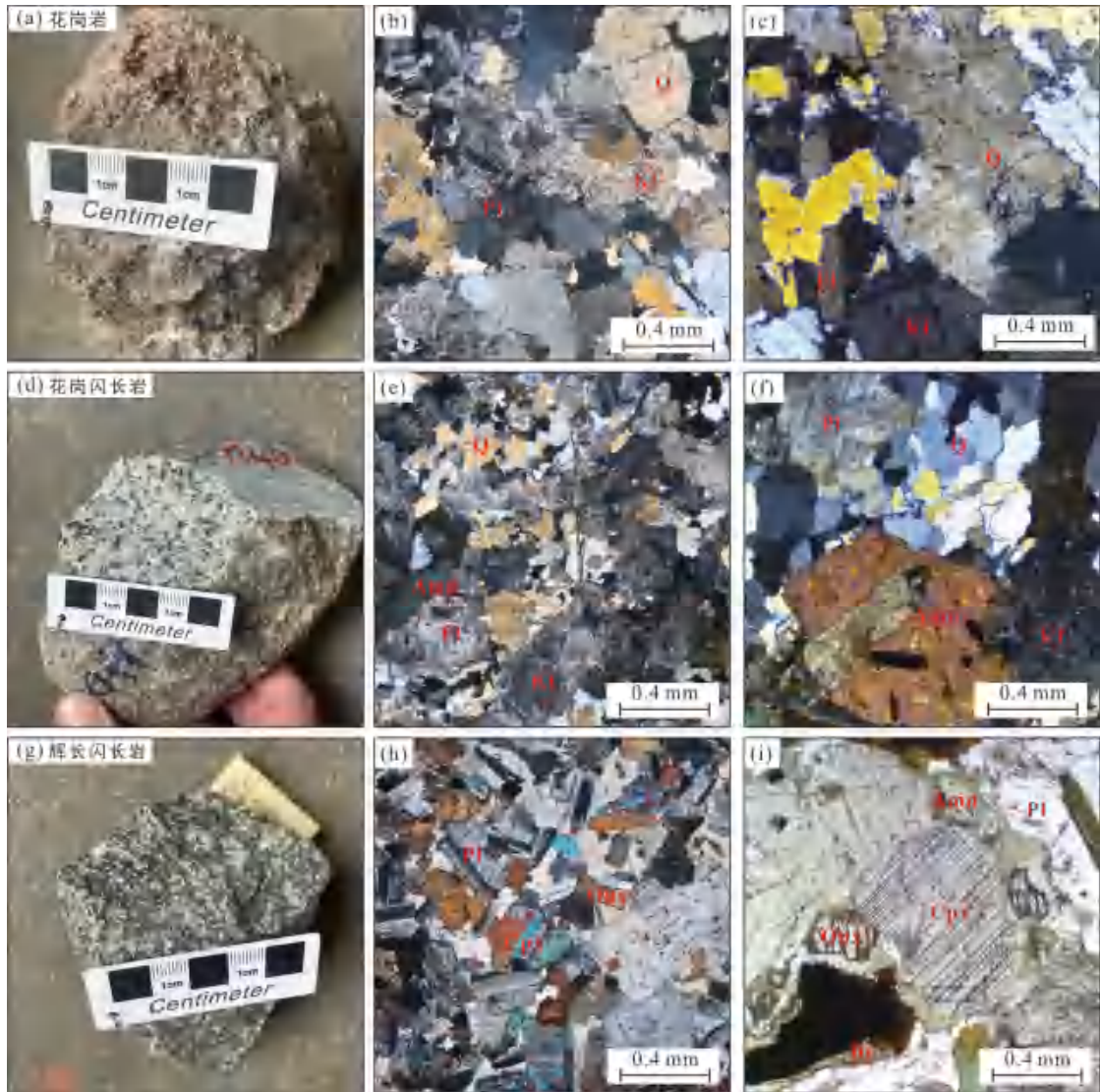
图 2 卡拉塔格地区地质简图(据毛启贵等, 2010 修改; 年龄单位: Ma, 数据来源见表 1)

Fig.2 Simplified geological map of the Kalatage area

1.2 岩石学特征

本次研究样品采自卡拉塔格断裂北侧的卡拉塔格复式岩体,不同岩石类型间接触界线突变且相互穿插,出露面积 $>74\text{ km}^2$,呈近NW向展布,侵入到荒草坡群大柳沟组中。岩体主要岩性为辉长闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩。花岗岩为肉红色中-粗粒块状结构,主要由石英(~40%)、斜长石(~15%)、钾长石(~45%)和少量副矿物组成,未见铁镁质暗色矿物。斜长石发育细条柱状聚片双晶,局部见鳞片状绢云母化。钾长石为半自形板状,表面多泥化(图 3a、b、c)。花岗闪长岩为中-细粒块状结构,新鲜面为浅灰白色,主要矿物组成为斜长石(~35%)、钾长石(~20%)、石英(~30%)、角闪石(~15%)和少量副矿物。斜长石

为半自形-自形柱状,发育聚片双晶,少部分具有环带结构且矿物中心见绢云母化。钾长石为自形板柱状,发育简单双晶。角闪石较自形,薄片呈浅绿-墨绿色,矿物粒径约 $1\sim 3\text{ mm}$,矿物边部见部分绿泥石化。副矿物主要为锆石、磷灰石、不透明氧化物等(图 3d、e、f)。辉长闪长岩新鲜面呈深灰色,中-细粒块状结构,镜下为典型的辉长结构,主要矿物为普通辉石(~30%)和基性斜长石(~50%),次要矿物为少量的紫苏辉石、角闪石和黑云母($<20\%$)。基性斜长石为自形程度较高的细条状晶体,发育聚片双晶和简单双晶,并见少量自形的大斑晶。普通辉石与基性斜长石自形程度相似,解理发育且较密,发育简单双晶。紫苏辉石发育浅绿-浅红色的多色性,



矿物代号: Q. 石英; Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Amp. 角闪石; Bt. 黑云母; Cpx. 单斜辉石; Opx. 斜方辉石。

图 3 卡拉塔格岩体代表性手标本和镜下鉴定特征

Fig.3 Typical photographs of hand specimens and microphotographs of the Kalatag intrusions

粒径较小且自形程度低, 其 $Mg^{\#}$ 值(57~59)低于普通辉石的 $Mg^{\#}$ 值(62~70), 表明结晶时间比普通辉石晚。角闪石自形程度较低, 围绕普通辉石边部生长或完全交代, 是普通辉石与残余熔体反应的结果。黑云母以自形片状为主, 为最晚期结晶矿物(图 3g、h、i)。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年和原位 Lu-Hf 同位素测试

锆石挑选在廊坊市宇能公司完成。制靶和阴极发光照相均在广州市拓岩检测技术有限公司完成。新鲜样品经去除表面和清洗后粉碎至 100 目以下, 利用人工重砂方式分离出锆石, 在双目镜下选择晶形较完整的锆石颗粒固定于环氧树脂上, 后续抛光处理至锆石内部结构完整呈现, 便于 CL 图像采集和微区 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素分析工作。

锆石的 U-Pb 定年和原位 Lu-Hf 同位素测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。U-Pb 定年在搭载 GeoLas 200M 型激光剥蚀系统的 Agilent7500a 型等离子体质谱仪上完成, 激光斑束直径为 30 μm , 脉冲频率为 10 Hz, 以 He 为载气, 标准锆石为 91500、GJ-1 和 NIST610, 详细仪器参数和实验流程见 Yuan et al. (2008)。Lu-Hf 同位素测试在搭载 Resolution M-50 型激光剥蚀系统的多接收器等离子体质谱仪, 激光斑束直径为 53 μm , 频率为 6 Hz, GJ-1 和 Mudtank 为仪器监控和样品校正标样, 详细仪器参数和实验流程见 Chu et al. (2002) 和 Yuan et al. (2008)。

2.2 全岩地球化学

全岩主量和微量元素含量以及 Sr-Nd 同位素测试在广州市拓岩检测技术有限公司完成。新鲜样品粉碎研磨至 200 目以下用于后续分析, 主量元素分析在 ZSX100e 型 X 射线荧光光谱仪上完成, 分析精度优于 2%, 微量元素分析在 Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000 型电感耦合等离子质谱仪上操作完成, 分析精度优于 5%, 详细实验流程见 Li et al. (2006)。Sr-Nd 同位素测试在 Micromass Isoprobe 型多接收电感耦合等离子质谱仪上完成。采用国际标样 BHVO-2 和实验室标样 Nd-GIG 对仪器运行状态监控和样品校正, 其中 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值分别用 $^{86}Sr/^{88}Sr=0.1194$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219$ 校正, 具体实验流程见韦刚健等(2002)和梁细荣等(2003)。

2.3 单矿物电子探针

矿物化学组成测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室 JXA-8230 型电子探针微区分析仪上完

成。采用美国 SPI 公司的矿物标样, 其检出限约为 0.01%。测试方法依据《电子探针定量分析方法通则》(GB/T 15074-2008)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素

花岗岩、花岗闪长岩和辉长闪长岩中的锆石均具有较高的 Th/U 值和左倾型稀土元素配分模式(表 2, 图 4), 显示出岩浆锆石的特点(Belousova et al., 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003)。区别在于锆石晶体形态, 花岗岩中锆石为自形的短柱状或粒状, 振荡环带较窄, 含少量继承锆石; 花岗闪长岩中锆石为自形的长条状, 振荡环带较宽; 辉长闪长岩中锆石为自形的板柱状, 多碎裂, 晶体表面颜色均一, 不发育振荡环带(图 4)。三者的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值分别为 434 ± 4 Ma(MSWD=0.02, $n=19$)、 442 ± 2 Ma(MSWD=0.09, $n=20$)和 445 ± 4 Ma(MSWD=0.01, $n=23$)(表 2, 图 4), 表明卡拉塔格复式岩体是早志留世不同批次岩浆就位的产物。

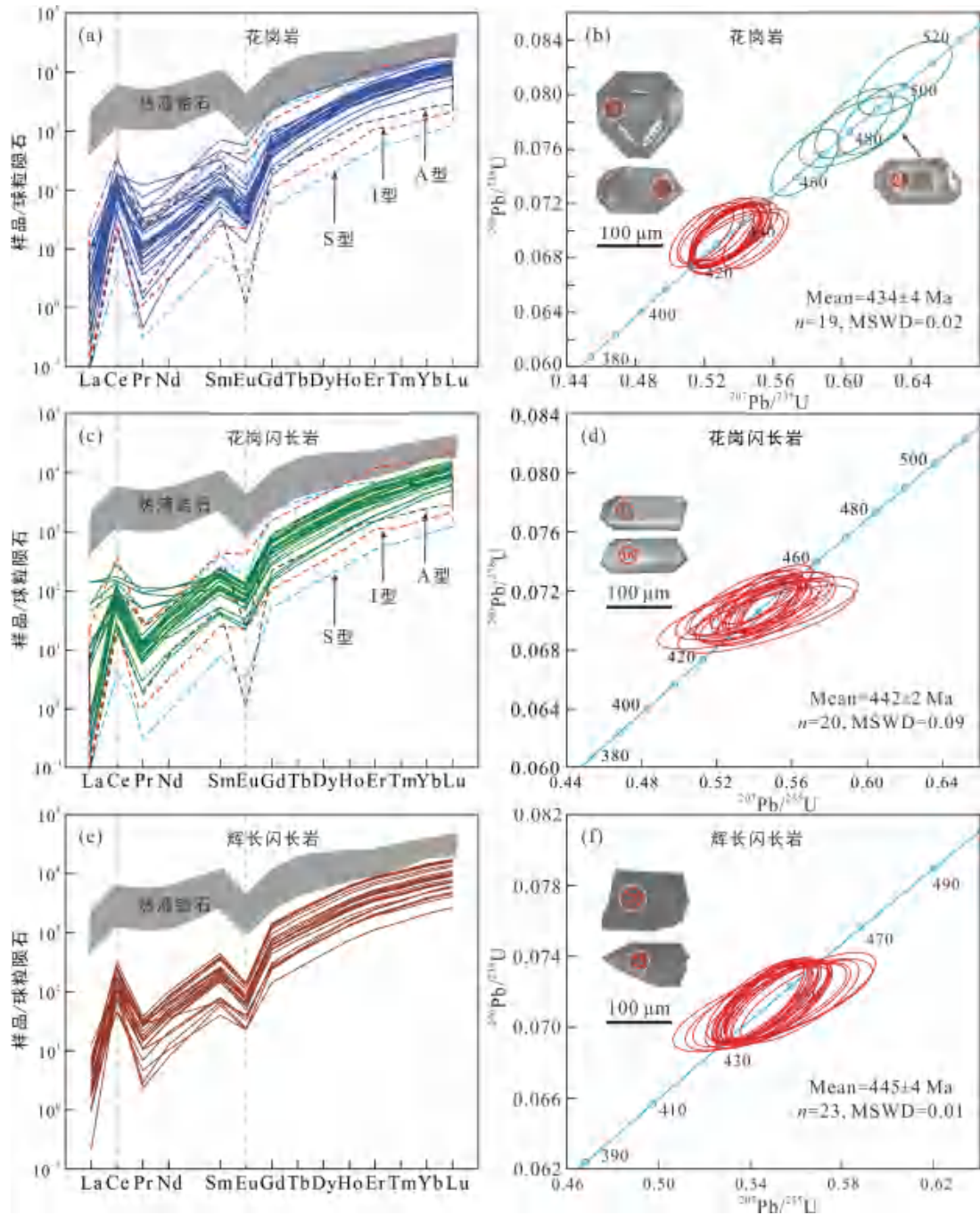
锆石的 Hf 同位素组成较均一, 花岗岩和花岗闪长岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分别为 $+10.1\sim+15.5$ 和 $+11.0\sim+14.7$, 二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})分别为 426~773 Ma 和 485~722 Ma。花岗岩中 5 颗含继承核的锆石产生了 464~500 Ma 的混合年龄和偏低的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值($+9.7\sim+11.4$)。辉长闪长岩锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $+12.1\sim+15.7$, 单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})为 429~589 Ma(表 3)。

3.2 全岩地球化学

花岗岩和花岗闪长岩的 SiO_2 含量相对较高, 分别为 70.29%~75.31% 和 67.45%~69.29%, 在 TAS 图解中花岗岩(除样品 21HM29)和花岗闪长岩样品均落入相对应区域内(表 4, 图 5a)。铝饱和指数($A/CNK=0.57\sim 1.24$, $0.91\sim 1.03$)显示准铝质-弱过铝质的特征(图 5b), 但花岗岩变化范围较大, 可能与后期的绢云母化有关。二者全碱含量相对较低($K_2O+Na_2O\leq 5.33\%$), 花岗岩较花岗闪长岩更富 Na($K_2O/Na_2O=0.1\sim 0.3$, $0.4\sim 0.5$), 在 K_2O-SiO_2 图解(图 5c)中, 花岗岩落在低钾(拉斑)系列区域内, 而花岗闪长岩则落在中钾钙碱性系列区域内。花岗岩和花岗闪长岩具有较低的 $MgO(0.60\%\sim 0.71\%, 1.10\%\sim 1.81\%)$ 和 $Fe_2O_3^T$ 含量($1.74\%\sim 2.60\%, 4.00\%\sim 5.43\%$), 在 AFM 图解(图 5d)中显示出钙碱性系列岩石特征。花岗岩和花岗闪长岩的稀土元素含量总体较低($\sum REE=61.4\times 10^{-6}\sim 91.4\times 10^{-6}$, $61.1\times 10^{-6}\sim 80.3\times 10^{-6}$), 稀土元素配分模式呈 LREE 富集的右倾型, 轻重稀

土元素分馏较弱, $(La/Yb)_N$ 值分别为 1.58~2.37 和 2.44~3.22, 具有较弱的 Eu 负异常($\delta Eu=0.64\sim 0.70$, $0.68\sim 0.93$)(图 6a、c)。微量元素蛛网图(图 6b、d)显示花岗岩和花岗闪长岩不同程度地富集 U-Pb 元素、亏损 Nb-Ta-P-Ti 元素, 区别在于花岗岩显示出明显的 Ba-Sr 正异常而花岗闪长岩为 Ba-Sr 负异常。此外花

岗闪长岩的过渡性金属元素含量(如 V、Cr、Co、Ni 等)高于花岗岩。岩石的 Sr-Nd 同位素组成较均一, 花岗岩和花岗闪长岩的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值分别为 0.703598~0.703739 和 0.703874~0.703941, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为 +7.0~+7.5 和 +7.1~+7.7, 二阶段 Nd 模式年龄(t_{DM2})分别为 559~603 Ma 和 555~598 Ma(表 5)。



图中阴影部分数据据李长民, 2009; 虚线部分数据据 Wang et al., 2012; 锆石微量元素组成见附表 1。

图 4 卡拉塔格复式岩体代表性锆石球粒陨石标准化稀土配分模式(a、c、e)、CL 图像和 U-Pb 年龄谐和图(b、d、f)
Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a, c, e), CL images and U-Pb concordia diagrams (b, d, f) of representative zircons from the Kalatage intrusions

表 2 卡拉塔格岩体中不同岩石的锆石 U-Pb 同位素分析结果
 Table 2 U-Pb dating results of zircon from the Kalatage intrusive rocks

点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
花岗岩(21HM19; 42°37'2.39"N, 91°46'42.01"E)															
1	332	628	0.53	0.0555	0.0014	0.5335	0.0140	0.0697	0.0015	433	55	435	9	434	9
2	372	675	0.55	0.0549	0.0012	0.5307	0.0124	0.0701	0.0015	410	48	437	9	432	8
3	458	798	0.57	0.0554	0.0015	0.5357	0.0149	0.0701	0.0016	430	59	437	9	436	10
4	475	686	0.69	0.0540	0.0012	0.5184	0.0123	0.0696	0.0015	373	50	434	9	424	8
5	212	431	0.47	0.0555	0.0013	0.5326	0.0131	0.0697	0.0015	430	51	434	9	434	9
6	102	219	0.49	0.0568	0.0016	0.6366	0.0181	0.0813	0.0018	485	61	504	11	500	11
7	358	492	0.73	0.0575	0.0013	0.6198	0.0147	0.0782	0.0017	511	49	485	10	490	9
8	184	376	0.49	0.0554	0.0012	0.5301	0.0125	0.0695	0.0015	426	49	433	9	432	8
9	330	634	0.52	0.0560	0.0012	0.5789	0.0131	0.0750	0.0016	451	47	466	10	464	8
10	462	743	0.53	0.0556	0.0015	0.5345	0.0147	0.0697	0.0015	437	58	434	9	435	10
11	174	369	0.47	0.0557	0.0016	0.5354	0.0158	0.0697	0.0015	440	63	435	9	435	11
12	552	821	0.53	0.0556	0.0012	0.5334	0.0125	0.0697	0.0015	434	48	434	9	434	8
13	645	786	0.82	0.0555	0.0013	0.5326	0.0134	0.0696	0.0015	434	53	434	9	434	9
14	353	547	0.53	0.0565	0.0013	0.6069	0.0150	0.0779	0.0017	472	52	484	10	482	10
15	140	282	0.50	0.0544	0.0013	0.5235	0.0128	0.0698	0.0015	388	52	435	9	428	9
16	713	898	0.53	0.0555	0.0020	0.5344	0.0189	0.0699	0.0016	431	77	435	9	435	13
17	352	574	0.61	0.0554	0.0013	0.5321	0.0127	0.0697	0.0015	426	50	434	9	433	8
18	550	791	0.70	0.0560	0.0016	0.5348	0.0158	0.0692	0.0015	454	63	431	9	435	10
19	332	465	0.53	0.0557	0.0014	0.5352	0.0141	0.0697	0.0015	441	56	434	9	435	9
20	662	1017	0.65	0.0565	0.0019	0.5384	0.0182	0.0691	0.0015	471	74	431	9	437	12
21	518	958	0.54	0.0556	0.0014	0.5332	0.0134	0.0695	0.0015	437	53	433	9	434	9
22	438	736	0.53	0.0574	0.0013	0.5496	0.0125	0.0694	0.0015	507	48	433	9	445	8
23	384	658	0.58	0.0570	0.0020	0.6077	0.0216	0.0773	0.0017	491	77	480	10	482	14
花岗闪长岩(21HM39; 42°36'2.05"N, 91°51'14.47"E)															
1	28.6	79.8	0.36	0.0561	0.0021	0.5452	0.0209	0.0705	0.0017	456	81	442	14	439	10
2	86.3	227	0.38	0.0544	0.0023	0.5336	0.0228	0.0712	0.0018	387	90	434	15	443	11
3	26.5	74.5	0.39	0.0554	0.0016	0.5451	0.0170	0.0714	0.0017	429	63	442	11	444	10
4	94.9	243	0.36	0.0557	0.0017	0.5467	0.0167	0.0711	0.0016	439	65	443	11	443	10
5	71.0	216	0.33	0.0560	0.0013	0.5487	0.0131	0.0710	0.0016	452	49	444	9	442	9
6	142	294	0.48	0.0548	0.0019	0.5398	0.0193	0.0714	0.0016	403	76	438	13	444	10
7	141	300	0.47	0.0557	0.0014	0.5465	0.0140	0.0711	0.0016	439	53	443	9	443	9
8	73.9	203	0.36	0.0551	0.0036	0.5402	0.0347	0.0710	0.0019	417	139	439	23	442	11
9	37.9	135	0.28	0.0562	0.0024	0.5457	0.0230	0.0703	0.0017	461	92	442	15	438	10
10	113	274	0.41	0.0561	0.0015	0.5499	0.0148	0.0710	0.0016	455	56	445	10	442	9
11	125	301	0.42	0.0562	0.0031	0.5467	0.0297	0.0705	0.0018	459	118	443	20	439	11
12	181	370	0.49	0.0550	0.0013	0.5394	0.0134	0.0711	0.0015	411	51	438	9	443	9
13	147	317	0.46	0.0558	0.0031	0.5445	0.0297	0.0707	0.0018	445	119	441	20	440	11
14	217	420	0.52	0.0551	0.0021	0.5457	0.0208	0.0718	0.0016	415	82	442	14	447	10
15	139	294	0.47	0.0551	0.0020	0.5461	0.0198	0.0718	0.0016	417	78	442	13	447	10
16	98.7	242	0.41	0.0555	0.0029	0.5416	0.0277	0.0707	0.0017	433	111	440	18	440	10
17	37.8	148	0.26	0.0559	0.0021	0.5451	0.0204	0.0707	0.0016	447	81	442	13	440	10
18	97.1	330	0.29	0.0557	0.0046	0.5418	0.0437	0.0705	0.0020	442	174	440	29	439	12
19	118	285	0.42	0.0555	0.0022	0.5429	0.0211	0.0710	0.0016	430	85	440	14	442	10
20	98.7	242	0.41	0.0565	0.0041	0.5463	0.0384	0.0701	0.0019	472	152	443	25	437	11

续表 2:

点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
辉长闪长岩(21HM52; 42°35'10.34"N, 91°55'44.64"E)															
1	375	600	0.63	0.0563	0.0014	0.5538	0.0145	0.0713	0.0015	464	56	448	9	444	9
2	383	772	0.50	0.0553	0.0013	0.5456	0.0129	0.0716	0.0015	424	50	442	9	446	9
3	51.9	156	0.33	0.0560	0.0030	0.5497	0.0287	0.0713	0.0017	450	114	445	19	444	10
4	384	967	0.40	0.0551	0.0015	0.5430	0.0146	0.0715	0.0015	415	57	440	10	445	9
5	253	457	0.55	0.0555	0.0014	0.5457	0.0142	0.0713	0.0015	433	56	442	9	444	9
6	634	1315	0.48	0.0553	0.0012	0.5443	0.0126	0.0715	0.0015	422	48	441	8	445	9
7	922	1337	0.69	0.0557	0.0015	0.5480	0.0151	0.0714	0.0015	439	59	444	10	445	9
8	282	520	0.54	0.0559	0.0013	0.5493	0.0135	0.0713	0.0015	447	52	445	9	444	9
9	97.8	210	0.47	0.0562	0.0015	0.5521	0.0149	0.0713	0.0015	459	58	446	9	444	9
10	285	704	0.40	0.0556	0.0014	0.5489	0.0137	0.0716	0.0015	435	53	444	9	446	9
11	339	712	0.48	0.0555	0.0013	0.5468	0.0130	0.0714	0.0015	434	50	443	9	445	9
12	1712	2401	0.71	0.0553	0.0014	0.5439	0.0137	0.0714	0.0015	423	53	441	9	444	9
13	1503	1918	0.78	0.0562	0.0022	0.5519	0.0210	0.0712	0.0016	459	83	446	14	444	10
14	456	765	0.60	0.0557	0.0013	0.5492	0.0136	0.0716	0.0015	439	52	445	9	446	9
15	327	727	0.45	0.0560	0.0015	0.5523	0.0153	0.0715	0.0015	453	59	447	10	445	9
16	447	945	0.47	0.0554	0.0014	0.5444	0.0140	0.0713	0.0015	427	55	441	9	444	9
17	1074	1639	0.66	0.0554	0.0020	0.5446	0.0196	0.0713	0.0016	428	78	442	13	444	10
18	200	682	0.29	0.0557	0.0017	0.5487	0.0167	0.0715	0.0015	439	66	444	11	445	9
19	591	1155	0.51	0.0560	0.0017	0.5491	0.0166	0.0711	0.0015	451	65	444	11	443	9
20	1271	1648	0.77	0.0570	0.0017	0.5616	0.0171	0.0715	0.0015	490	66	453	11	445	9
21	734	1465	0.50	0.0561	0.0014	0.5525	0.0139	0.0715	0.0015	455	54	447	9	445	9
22	1543	1994	0.77	0.0568	0.0022	0.5618	0.0216	0.0718	0.0016	482	84	453	14	447	10
23	172	346	0.50	0.0557	0.0024	0.5468	0.0233	0.0712	0.0016	442	92	443	15	443	10

表 3 卡拉塔格岩体不同岩石锆石原位 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Kalatage intrusive rocks

点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1 σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
花岗岩(21HM19; 42°37'2.39"N, 91°46'42.01"E)												
1	434	0.008869	0.000066	0.282862	0.000030	0.282790	3.2	10.2	1.1	-0.73	698	768
2	434	0.006288	0.000024	0.282985	0.000023	0.282934	7.5	15.3	0.8	-0.81	440	443
3	434	0.007384	0.000010	0.282969	0.000028	0.282908	7.0	14.4	1.0	-0.78	484	500
4	434	0.006937	0.000009	0.282881	0.000027	0.282825	3.9	11.4	1.0	-0.79	624	690
5	434	0.003656	0.000011	0.282932	0.000022	0.282902	5.7	14.2	0.8	-0.89	488	515
6	434	0.005691	0.000031	0.282974	0.000026	0.282928	7.1	15.1	0.9	-0.83	450	457
7	434	0.006288	0.000025	0.282988	0.000026	0.282936	7.6	15.4	0.9	-0.81	436	437
8	434	0.006010	0.000041	0.282935	0.000023	0.282887	5.8	13.6	0.8	-0.82	518	550
9	434	0.007086	0.000006	0.282927	0.000024	0.282869	5.5	13.0	0.8	-0.79	550	590
10	434	0.006306	0.000021	0.282977	0.000025	0.282925	7.2	15.0	0.9	-0.81	454	462
11	434	0.006154	0.000034	0.282913	0.000025	0.282863	5.0	12.8	0.9	-0.81	556	603
12	434	0.004639	0.000044	0.282826	0.000023	0.282788	1.9	10.1	0.8	-0.86	669	773
13	434	0.009146	0.000027	0.282883	0.000028	0.282808	3.9	10.8	1.0	-0.72	669	727
14	434	0.007294	0.000029	0.282944	0.000033	0.282885	6.1	13.6	1.1	-0.78	524	553
15	434	0.010969	0.000039	0.283030	0.000035	0.282941	9.1	15.5	1.2	-0.67	427	426
16	434	0.007020	0.000036	0.282949	0.000025	0.282891	6.2	13.8	0.9	-0.79	512	539
17	434	0.007587	0.000041	0.282983	0.000030	0.282921	7.5	14.8	1.1	-0.77	463	472
18	434	0.006076	0.000011	0.282969	0.000022	0.282920	7.0	14.8	0.8	-0.82	463	475

续表 3:

点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
花岗岩长岩(21HM39; 42°36'2.05"N, 91°51'14.47"E)												
1	442	0.062662	0.000164	0.282898	0.000016	0.282884	4.5	13.7	0.6	-0.95	511	551
2	442	0.094293	0.001610	0.282861	0.000015	0.282841	3.1	12.2	0.5	-0.93	576	649
3	442	0.148889	0.004040	0.282859	0.000019	0.282829	3.1	11.7	0.7	-0.89	599	676
4	442	0.107316	0.002210	0.282837	0.000021	0.282814	2.3	11.2	0.7	-0.92	618	710
5	442	0.127450	0.002860	0.282838	0.000018	0.282811	2.3	11.1	0.6	-0.90	625	717
6	442	0.169215	0.003290	0.282860	0.000019	0.282826	3.1	11.6	0.7	-0.88	606	682
7	442	0.130669	0.003040	0.282836	0.000020	0.282808	2.3	11.0	0.7	-0.90	630	722
8	442	0.086446	0.000575	0.282881	0.000015	0.282862	3.8	12.9	0.5	-0.93	544	600
9	442	0.069487	0.000402	0.282902	0.000014	0.282886	4.6	13.8	0.5	-0.94	508	545
10	442	0.099132	0.002130	0.282882	0.000016	0.282861	3.9	12.9	0.6	-0.92	546	602
11	442	0.085922	0.000744	0.282882	0.000018	0.282863	3.9	13.0	0.6	-0.93	544	598
12	442	0.088790	0.000943	0.282858	0.000016	0.282839	3.0	12.1	0.6	-0.93	578	652
13	442	0.152335	0.000730	0.282858	0.000019	0.282827	3.0	11.7	0.7	-0.89	602	679
14	442	0.119626	0.002120	0.282855	0.000019	0.282831	2.9	11.8	0.7	-0.91	594	672
15	442	0.071200	0.000774	0.282886	0.000016	0.282871	4.0	13.2	0.6	-0.94	531	581
16	442	0.168903	0.001100	0.282911	0.000017	0.282877	4.9	13.5	0.6	-0.88	527	566
17	442	0.082131	0.000779	0.282876	0.000017	0.282858	3.7	12.8	0.6	-0.93	550	609
18	442	0.084111	0.000756	0.282923	0.000014	0.282905	5.3	14.4	0.5	-0.93	482	504
19	442	0.060589	0.000696	0.282926	0.000015	0.282913	5.5	14.7	0.5	-0.95	469	485
20	442	0.121257	0.000436	0.282924	0.000017	0.282899	5.4	14.2	0.6	-0.91	491	517
辉长闪长岩(21HM52; 42°35'10.34"N, 91°55'44.64"E)												
1	445	0.002195	0.000005	0.282888	0.000018	0.282869	4.1	13.2	0.6	-0.93	534	-
2	445	0.002619	0.000019	0.282917	0.000016	0.282895	5.1	14.2	0.6	-0.95	496	-
3	445	0.000874	0.000010	0.282843	0.000021	0.282836	2.5	12.1	0.7	-0.94	578	-
4	445	0.001176	0.000018	0.282902	0.000016	0.282892	4.6	14.1	0.6	-0.91	499	-
5	445	0.003703	0.000020	0.282909	0.000021	0.282878	4.9	13.6	0.7	-0.85	523	-
6	445	0.001388	0.000003	0.282915	0.000018	0.282904	5.1	14.4	0.6	-0.89	482	-
7	445	0.002426	0.000005	0.282912	0.000020	0.282892	5.0	14.1	0.7	-0.94	500	-
8	445	0.002523	0.000025	0.282926	0.000020	0.282905	5.4	14.5	0.7	-0.93	482	-
9	445	0.003055	0.000005	0.282894	0.000015	0.282868	4.3	13.2	0.5	-0.87	537	-
10	445	0.001743	0.000006	0.282936	0.000016	0.282921	5.8	15.1	0.6	-0.94	457	-
11	445	0.001972	0.000009	0.282901	0.000017	0.282884	4.6	13.8	0.6	-0.93	511	-
12	445	0.002924	0.000033	0.282906	0.000020	0.282882	4.7	13.7	0.7	-0.92	517	-
13	445	0.004882	0.000008	0.282909	0.000020	0.282868	4.8	13.2	0.7	-0.86	543	-
14	445	0.003734	0.000022	0.282871	0.000018	0.282839	3.5	12.2	0.6	-0.91	583	-
15	445	0.001909	0.000024	0.282866	0.000015	0.282850	3.3	12.6	0.5	-0.86	561	-
16	445	0.002355	0.000010	0.282929	0.000016	0.282910	5.6	14.7	0.6	-0.93	474	-
17	445	0.004431	0.000015	0.282940	0.000021	0.282903	6.0	14.4	0.8	-0.97	486	-
18	445	0.001940	0.000002	0.282903	0.000016	0.282886	4.6	13.9	0.6	-0.96	508	-
19	445	0.002304	0.000029	0.282900	0.000017	0.282880	4.5	13.6	0.6	-0.89	517	-
20	445	0.004489	0.000035	0.282977	0.000018	0.282940	7.3	15.7	0.7	-0.96	429	-
21	445	0.002894	0.000051	0.282867	0.000019	0.282843	3.4	12.3	0.7	-0.93	575	-
22	445	0.004801	0.000011	0.282878	0.000020	0.282838	3.8	12.1	0.7	-0.92	589	-
23	445	0.002268	0.000041	0.282913	0.000018	0.282894	5.0	14.1	0.6	-0.91	498	-

表 4 卡拉塔格复式岩体不同岩石全岩主量(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果
 Table 4 Major (%) and trace element ($\times 10^{-6}$) concentrations of the Kalatage intrusive rocks

岩性 样品	花岗岩					花岗闪长岩					辉长闪长岩				
	21HM26	21HM27	21HM28	21HM29	21HM30	21HM39	21HM40	21HM41	21HM42	21HM43	21HM53	21HM54	21HM55	21HM56	21HM57
SiO ₂	74.73	73.02	71.87	70.29	75.31	68.07	69.29	68.93	68.12	67.45	55.39	54.17	54.97	54.45	54.89
TiO ₂	0.34	0.33	0.35	0.32	0.29	0.40	0.38	0.38	0.40	0.41	0.59	0.57	0.58	0.61	0.55
Al ₂ O ₃	12.93	12.83	13.39	9.99	11.65	14.74	14.62	14.79	14.79	14.05	15.43	16.00	15.85	15.43	15.71
Fe ₂ O ₃ ^T	2.60	1.74	2.03	2.12	2.12	4.81	4.00	4.05	4.24	5.43	9.63	9.81	9.68	9.93	9.61
MnO	0.03	0.04	0.03	0.07	0.04	0.08	0.09	0.09	0.08	0.12	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
MgO	0.71	0.68	0.60	0.64	0.62	1.49	1.37	1.10	1.34	1.81	5.53	5.52	5.26	5.54	5.50
CaO	1.16	2.55	2.46	6.09	2.39	4.14	3.83	4.34	3.77	4.91	8.84	9.10	8.87	9.01	8.98
Na ₂ O	4.67	4.09	4.28	3.51	4.62	3.09	3.58	3.36	3.60	3.15	2.38	2.44	2.44	2.40	2.44
K ₂ O	0.57	0.63	1.05	0.60	0.32	1.53	1.38	1.35	1.56	1.27	0.76	0.74	0.84	0.79	0.81
P ₂ O ₅	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.19	0.24	0.22	0.27	0.24
LOI	2.09	3.93	3.75	6.31	2.49	1.28	1.30	1.37	1.84	1.15	0.84	1.00	0.87	1.17	0.86
Total	99.91	99.91	99.88	100.01	99.91	99.71	99.94	99.87	99.85	99.83	99.75	99.76	99.75	99.77	99.75
Mg [#]	35.2	43.7	37.1	37.3	36.6	38.0	40.5	35.0	38.4	39.7	53.2	52.7	51.8	52.5	53.1
δ	0.87	0.74	0.98	0.62	0.76	0.85	0.93	0.86	1.06	0.80	0.80	0.91	0.90	0.89	0.89
AR	2.18	1.89	2.01	1.69	2.09	1.65	1.73	1.65	1.77	1.61	1.30	1.29	1.31	1.30	1.30
A/CNK	1.24	1.06	1.06	0.57	0.95	1.03	1.02	0.99	1.02	0.91	0.74	0.75	0.75	0.73	0.74
A/NK	1.56	1.73	1.64	1.56	1.46	2.18	1.98	2.11	1.94	2.14	3.25	3.31	3.21	3.20	3.21
10 ⁴ ×Ga/Al	1.96	1.88	1.96	1.78	1.85	1.68	1.81	1.78	1.79	1.84	1.90	1.92	1.90	1.97	1.92
Li	18.7	19.8	12.4	11.3	13.2	4.32	4.70	4.77	5.96	3.56	5.02	5.06	4.81	5.11	4.87
Be	0.48	0.50	0.40	0.41	0.51	1.02	0.56	0.52	0.57	0.49	0.46	0.46	0.45	0.45	0.47
Sc	14.6	13.0	12.7	13.0	12.5	17.0	18.4	16.9	17.9	24.0	34.0	34.3	30.5	34.6	35.0
V	38.9	27.1	39.1	27.2	32.5	88.0	61.7	60.1	63.3	95.9	249	284	255	278	251
Cr	5.70	25.7	6.27	10.9	5.51	5.94	11.2	5.79	6.56	14.7	111	103	99.0	110	119
Co	4.29	3.42	2.39	3.21	3.25	11.5	6.89	6.94	7.96	11.3	31.3	31.7	30.4	32.0	30.9
Ni	1.24	2.34	1.71	4.02	1.43	6.67	3.25	3.05	2.83	5.03	30.7	32.0	29.9	33.9	32.1
Cu	45.1	66.3	52.8	63.7	20.4	35.4	27.8	28.6	29.9	37.2	148	139	130	112	136
Zn	25.8	33.2	23.9	30.8	24.5	57.2	52.0	56.7	52.6	68.7	89.7	89.5	89.8	92.4	87.7
Ga	13.4	12.8	13.9	9.4	11.4	13.1	14.0	13.9	14.0	13.7	15.5	16.3	15.9	16.1	16.0
As	1.76	1.86	1.48	1.39	1.26	3.59	2.67	3.68	2.43	2.83	4.23	3.75	3.11	3.13	3.79
Rb	12.2	12.3	19.3	12.0	6.4	21.3	21.4	22.8	31.3	21.6	13.8	14.2	15.3	15.3	14.6
Sr	69.0	75.5	70.8	91.8	116	216	299	249	237	240	399	401	416	393	408
Y	35.9	33.5	30.2	30.7	25.9	20.9	26.2	25.8	21.5	29.5	18.6	20.5	17.7	21.5	19.6
Zr	128	139	136	110	128	104	87.0	77.4	77.0	79.7	72.5	44.2	46.6	76.5	65.7
Nb	6.78	6.57	6.51	5.79	5.70	3.37	3.90	3.60	3.58	3.75	2.37	2.07	2.20	2.76	2.64
Cs	0.57	0.42	0.27	0.23	0.26	0.31	0.25	0.28	0.26	0.22	0.19	0.25	0.18	0.23	0.19
Ba	85.7	65.6	56.1	56.2	74.4	389	381	372	395	425	340	333	330	338	329
La	9.21	12.7	8.11	10.7	9.11	9.72	10.3	11.3	10.1	11.0	11.8	14.7	12.1	15.1	13.8
Ce	25.7	31.7	20.6	26.6	25.0	20.2	27.7	28.2	24.3	28.8	27.4	33.5	27.0	33.4	30.6
Pr	2.96	4.15	2.34	3.54	2.86	2.84	3.11	3.21	2.72	3.42	3.11	3.95	3.21	4.14	3.66
Nd	13.1	18.1	9.8	15.4	12.7	11.4	13.5	13.7	11.1	14.9	13.3	16.4	13.4	17.2	15.0
Sm	3.89	4.29	2.86	4.41	3.48	2.78	3.59	3.46	2.85	3.92	3.15	3.88	3.28	3.97	3.58
Eu	0.93	0.86	0.66	1.00	0.78	0.85	0.88	0.88	0.86	0.86	0.87	0.91	0.92	0.92	0.90
Gd	4.25	3.89	3.31	4.29	3.43	3.01	3.49	3.30	2.78	3.84	2.85	3.39	2.83	3.51	3.11
Tb	0.83	0.76	0.66	0.78	0.63	0.50	0.62	0.61	0.52	0.71	0.49	0.58	0.48	0.59	0.53

续表 4:

岩性	花岗岩					花岗闪长岩					辉长闪长岩				
	21HM26	21HM27	21HM28	21HM29	21HM30	21HM39	21HM40	21HM41	21HM42	21HM43	21HM53	21HM54	21HM55	21HM56	21HM57
Dy	5.71	5.19	4.60	4.90	4.10	3.65	4.11	3.93	3.24	4.55	2.87	3.38	2.88	3.55	3.20
Ho	1.28	1.15	0.99	1.02	0.86	0.71	0.94	0.84	0.69	1.00	0.62	0.70	0.60	0.73	0.66
Er	3.98	3.62	3.15	3.20	2.69	2.12	2.73	2.60	2.17	3.06	1.87	2.05	1.82	2.16	2.00
Tm	0.62	0.58	0.49	0.50	0.42	0.37	0.42	0.41	0.34	0.48	0.28	0.30	0.27	0.32	0.29
Yb	4.17	3.84	3.30	3.42	2.82	2.58	2.78	2.70	2.25	3.24	1.80	1.98	1.74	2.05	1.90
Lu	0.67	0.61	0.52	0.55	0.46	0.41	0.45	0.44	0.37	0.53	0.29	0.31	0.27	0.32	0.30
Hf	3.64	3.83	3.79	3.00	3.73	3.17	2.64	2.32	2.36	2.53	1.90	1.36	1.40	2.10	1.87
Ta	0.69	0.45	0.49	0.68	0.54	0.28	0.43	0.28	0.25	0.46	0.14	0.17	0.15	0.24	0.29
Pb	3.94	3.73	2.68	3.80	2.71	3.94	3.70	3.30	3.02	3.35	4.47	3.89	4.21	4.42	6.13
Th	1.77	1.75	1.72	1.40	1.83	3.74	2.08	2.35	2.68	2.81	1.53	1.72	1.61	1.99	1.53
U	1.14	1.09	1.03	0.90	0.89	1.36	1.12	0.97	1.07	1.28	0.71	0.82	0.65	0.85	0.82
ΣREE	77.3	91.4	61.4	80.3	69.3	61.1	74.6	75.6	64.3	80.3	70.7	86.0	70.8	88.0	79.5
(La/Sm) _N	1.53	1.91	1.83	1.57	1.69	2.26	1.85	2.11	2.29	1.81	2.42	2.45	2.38	2.46	2.49
(Gd/Yb) _N	0.84	0.84	0.83	1.04	1.00	0.96	1.04	1.01	1.02	0.98	1.31	1.41	1.34	1.41	1.35
(La/Yb) _N	1.58	2.37	1.76	2.24	2.32	2.70	2.66	3.00	3.22	2.44	4.70	5.33	4.99	5.28	5.21
δEu	0.70	0.64	0.66	0.70	0.69	0.90	0.76	0.80	0.93	0.68	0.89	0.77	0.93	0.76	0.82
δCe	1.21	1.07	1.16	1.06	1.20	0.94	1.20	1.15	1.14	1.15	1.11	1.08	1.06	1.04	1.06
Sr/Y	1.92	2.25	2.34	2.99	4.48	10.3	11.4	9.65	11.0	8.14	21.5	19.6	23.5	18.3	20.8
Nb/Ta	9.80	14.6	13.4	8.48	10.5	12.2	9.07	12.7	14.1	8.12	16.8	12.3	14.8	11.6	9.17
Zr/Hf	35.2	36.3	35.9	36.7	34.3	32.8	33.0	33.4	32.6	31.5	38.2	32.5	33.3	36.4	35.1
Rb/Sr	0.18	0.16	0.27	0.13	0.06	0.10	0.07	0.09	0.13	0.09	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
Y/Yb	8.61	8.72	9.15	8.98	9.18	8.10	9.42	9.56	9.56	9.10	10.3	10.4	10.2	10.5	10.3
(Ho/Yb) _N	0.92	0.89	0.89	0.89	0.91	0.82	1.01	0.93	0.92	0.92	1.03	1.05	1.04	1.07	1.04
T _{Zr} (°C)	787	779	775	683	763	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注: T_{Zr}(°C)据 Watson and Harrison, 1983。

辉长闪长岩的 SiO₂ 含量为 54.17%~55.39%，在 TAS 图解中样品全部落入辉长闪长岩区域内(表 4, 图 5a)。样品的全碱含量低(K₂O+Na₂O=3.14%~3.29%)，贫 K 富 Na(K₂O/Na₂O=0.3~0.4)，在 K₂O-SiO₂图解(图 5c)中显示为中钾钙碱性系列。样品较高的 MgO(5.26%~5.54%)和 Fe₂O₃^T(9.61%~9.93%)含量，在 AFM 图解(图 5d)中显示拉斑向钙碱性系列过渡的地球化学特征。辉长闪长岩的 ΣREE 为 70.7×10⁻⁶~88.0×10⁻⁶，显示明显右倾的稀土元素配分模式，轻重稀土元素分馏中等，并具有较弱的 Eu 负异常(δEu=0.76~0.93)(图 6e)。微量元素蛛网图显示不同程度地富集 Ba-Sr-U-Pb 元素、亏损 Nb-Ta-Ti-Zr-Hf-Th 元素(图 6f)。样品的过渡性金属元素含量相对较高，如 V(249×10⁻⁶~284×10⁻⁶)、Cr(98.8×10⁻⁶~119×10⁻⁶)、Co(30.4×10⁻⁶~32.0×10⁻⁶)和 Ni (29.9×10⁻⁶~33.9×10⁻⁶)含量。辉长闪长岩的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.703675~0.703750，ε_{Nd}(t) 值为+7.1~+7.3，单阶段 Nd 模式年龄为 634~669 Ma

(表 5)。

3.3 矿物化学组成

花岗闪长岩(21HM40)中角闪石电子探针测试结果见附表 2。Si-Ti 图解(图 7b)指示其为未遭受后期蚀变的中酸性侵入岩(马昌前等, 1994)。角闪石具有较高的 MgO(9.34%~11.85%)、FeO^T(16.59%~19.87%)和 CaO 含量(10.44%~11.70%)，中等的 Al₂O₃(5.22%~6.75%)和 SiO₂ 含量(45.86%~47.69%)，以及较低的 TiO₂(0.67%~1.52%)、Na₂O(0.90%~1.51%)和 K₂O 含量(0.34%~0.67%)。根据 Leake et al. (1997)提出的角闪石命名原则，花岗闪长岩中角闪石为镁角闪石(图 7a)。

辉长闪长岩(21HM53)中辉石电子探针测试结果见附表 3。主要有斜方辉石和单斜辉石两种。斜方辉石的 SiO₂ 含量为 51.63%~52.82%，较高的 FeO^T(24.05%~25.76%)和 MgO 含量(18.77%~19.93%)，较低的 CaO(1.15%~2.98%)、TiO₂(0.15%~0.31%)、MnO (0.54%~0.81%)和 Al₂O₃ 含量(0.57%~0.78%)，以及极

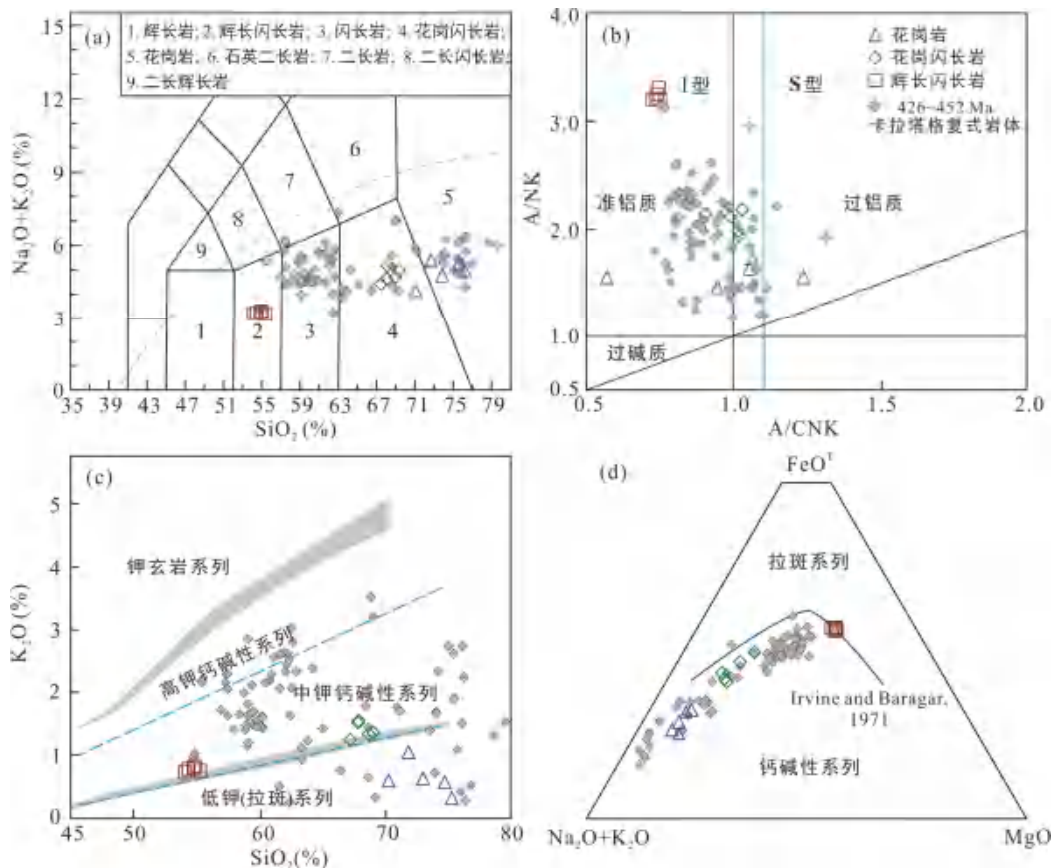
低的 Cr_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 含量。根据 Morimoto (1988) 提出的辉石命名原则, 斜方辉石的成分为 $\text{Wo}_{2-6}\text{En}_{54-57}\text{Fs}_{38-43}$, 除个别点落在易变辉石区域, 其余测试点落入紫苏辉石的区域内(图 7c)。单斜辉石的 SiO_2 含量在 51.01%~53.24% 之间, 较高的 CaO 含量(17.57%~22.01%), 中等的 FeO^{T} (10.31%~14.76%) 和 MgO 含量(12.58%~13.93%), 较低的 TiO_2 (0.12%~0.48%)、 MnO (0.25%~0.46%) 和 Al_2O_3 含量(0.77%~1.99%), 以及极低的 Cr_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 含量。单斜辉石的成分为 $\text{Wo}_{26-45}\text{En}_{36-41}\text{Fs}_{16-24}$, 属于普通辉石范畴(图 7c)。

卡拉塔格岩体中不同岩石中斜长石电子探针结果见附表 4。花岗岩(21HM30)中斜长石牌号为 An_{2-12} , 属于钠长石; 花岗闪长岩(21HM40)中斜长石牌号为 An_{46-69} , 主要落在拉长石区域内; 辉长闪长岩(21HM53)的 An 较高且变化范围较大, 介于 51~80 之间, 主要落在拉长石-倍长石区域内(图 7d)。

4 岩石成因

4.1 蚀变影响

花岗岩样品具有较高的烧失量($\text{LOI}=2.09\% \sim 6.31\%$), 而花岗闪长岩和辉长闪长岩的 $\text{LOI} < 2\%$, 说明花岗岩可能存在后期低温热液蚀变。一般来说, 稀土元素和高场强元素在低温热液蚀变过程中不易迁移, 而 Rb 、 Sr 、 K 等活泼元素易迁移(Bach et al., 2001; Polat et al., 2002, 2003)。在微量元素蛛网图(图 6b)中, 花岗岩的 Rb 、 K 元素含量明显波动, 而花岗闪长岩和辉长闪长岩趋于一致, 镜下鉴定中花岗岩中部分斜长石发生明显的绢云母化, 也说明花岗岩遭受了后期蚀变。因此, 后续讨论将利用不易迁移的元素特征来约束花岗岩的岩石成因、物质源区和构造属性。

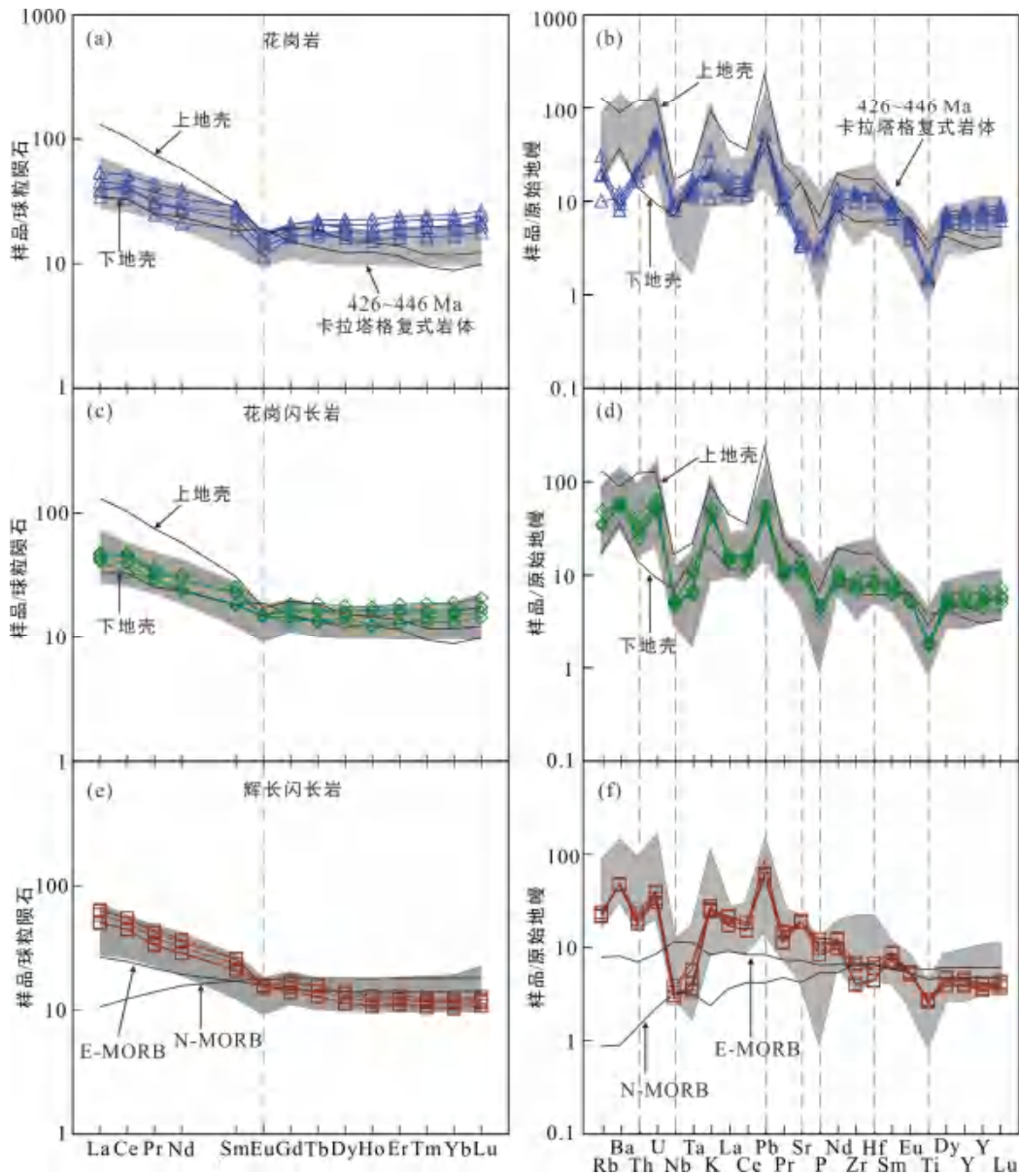


卡拉塔格复式岩体数据来源: 李文铅等, 2006; Du et al., 2018c; Zheng et al., 2018; Sun et al., 2019a; Sun et al., 2020; 许骏等, 2020。

(a) 据 Middlemost, 1994; (b) 据 Maniar and Piccoli, 1989; (c) 和 (d) 据 Irvine and Baragar, 1971。

图 5 卡拉塔格复式岩体不同岩石主量元素判别图

Fig.5 Major element discrimination diagrams of the Kalatage intrusive rocks



卡拉塔格复式岩体数据来源同图 5。球粒陨石标准化值据 Sun and Mcdonough, 1989。上地壳、下地壳、E-NORB、N-MORB 和原始地幔标准化值据 Mcdonough and Sun, 1995。

图 6 卡拉塔格复式岩体不同岩石球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a、c、e)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b、d、f)
 Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a, c, e) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b, d, f) of the Kalatage intrusive rocks

4.2 花岗岩和花岗闪长岩

花岗质岩石基于其化学组成和源岩特征可细划为 I、S、A 和 M 型(Chappell et al., 1974, 1987; Wu et al., 2002; Bonin et al., 2007)。花岗岩和花岗闪长岩具有弱的 Eu 负异常、缓右倾型稀土元素配分模式、以及未见碱性暗色矿物的特征, 明显区别于 A 型花岗岩(Wu et al., 2002)(表 4, 图 6), 在 $Zr \cdot 10^4 \times Ga/Al$ 和 $FeO^T/MgO \cdot (Zr+Nb+Ce+Y)$ 判别图解(图 8a、b)中均落在 I 或 S 型花岗岩区域内。此外, 花岗岩的 Zr 饱和

温度(763~787 °C)(表 4)和花岗闪长岩的角闪石结晶温度(726~775 °C)(附表 2)也显示出非 A 型花岗岩的特征。花岗岩和花岗闪长岩均显示出准铝质-弱过铝质的特征(图 5b), P_2O_5 含量极低($<0.1\%$), 且与 SiO_2 呈弱的负相关(图 9), 以及低的($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 值和亏损的 Nd-Hf 同位素组成(表 5), 表明二者属于 I 型花岗岩(Chappell and White, 1992; Wolf and London, 1994; Li et al., 2007; Champion and Bultitude, 2013)。此外, 花岗岩和花岗闪长岩样品 CIPW 标准矿物计算中极

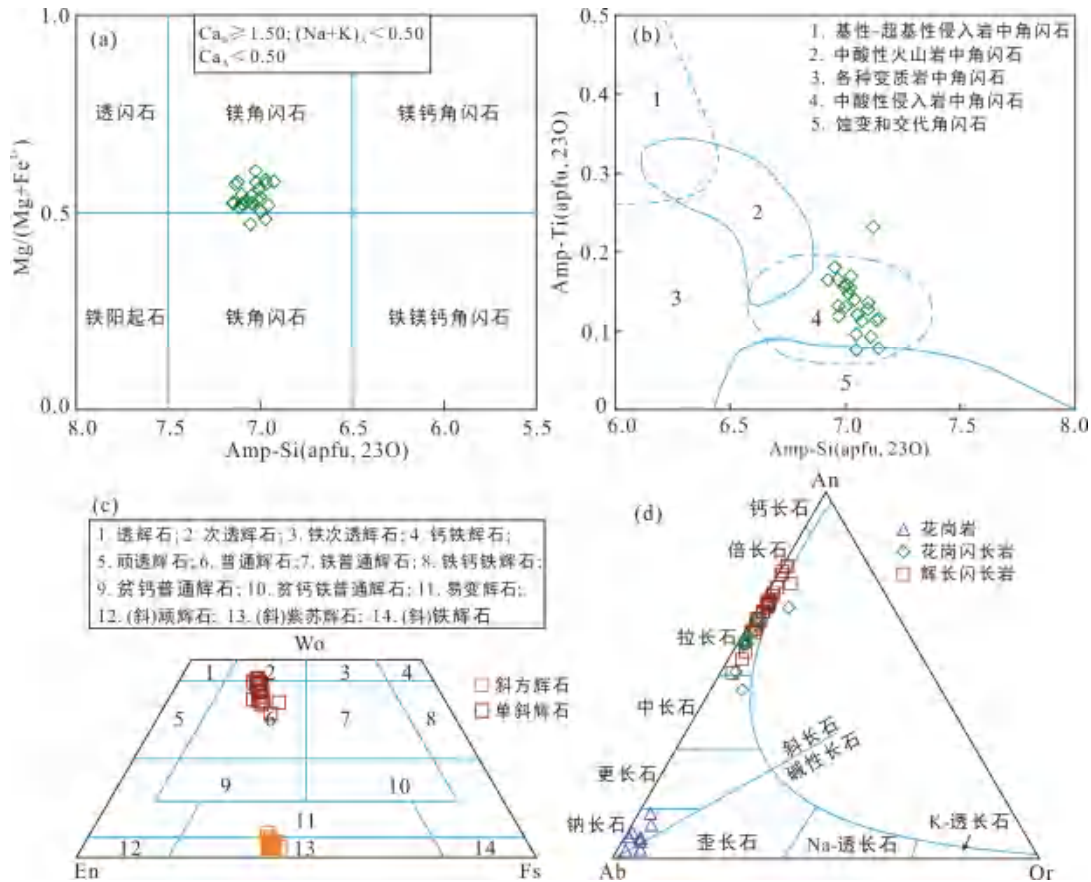
低的刚玉分子含量(路远发和李文霞, 2021)和锆石稀土配分模式也显示出 I 型花岗岩的特征(Wang et al., 2012)(图 4a、c)。

一般来说, 花岗质岩浆主要是壳源的, 其地球化学组成主要取决于源岩成分、熔融条件、幔源岩浆的参与程度及其后续的演化过程(吴福元等, 2007;

张旗等, 2008)。花岗岩和花岗闪长岩具有较高 SiO₂ 和较低 Al₂O₃、MgO 含量, 以及极低的 Sr/Y 和(La/Yb)_N 值而明显区别于埃达克岩, 显示出下地壳部分熔融形成的熔体特征(Defant and Drummond, 1990; Rapp and Watson, 1995; Martin, 1999)(表 4, 图 8c、d)。而亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素组成以及年轻的二阶段 Hf

表 5 卡拉塔格复式岩体不同岩石全岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 5 Whole-rock Sr-Nd isotopic compositions of the Kalatage intrusive rocks

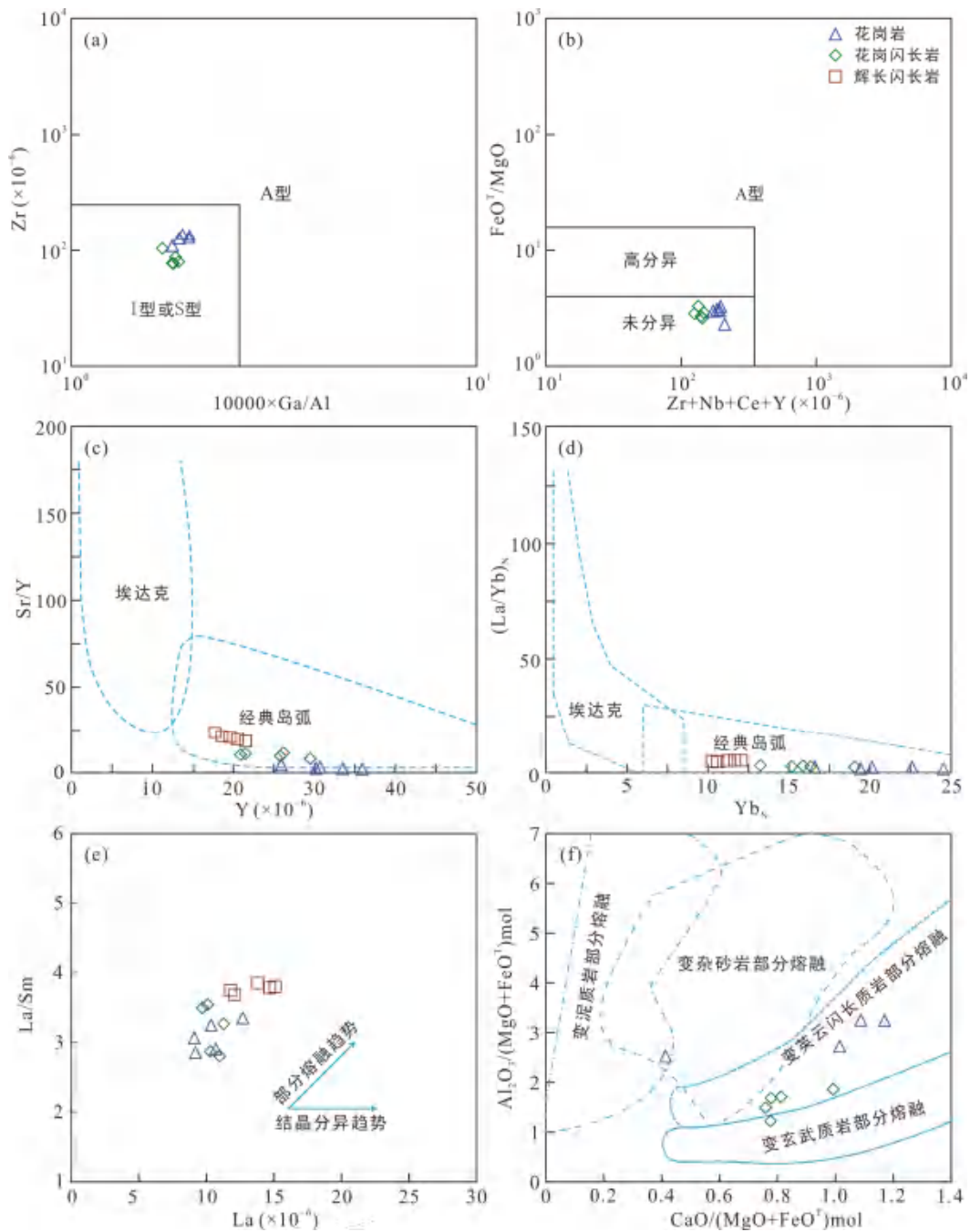
样品	年龄 (Ma)	Rb (×10 ⁻⁶)	Sr (×10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr±2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	Sm (×10 ⁻⁶)	Nd (×10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd±2σ	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Na(t)}	t _{DM1} (Ma)	t _{DM2} (Ma)
21HM26	434	12.2	69.0	0.000773	0.706897±9	0.703739	3.89	13.1	0.000804	0.512948±1	0.512438	7.0	906	603
21HM27	434	12.3	75.5	0.001061	0.706509±7	0.703598	4.29	18.1	0.000439	0.512873±5	0.512466	7.5	603	559
21HM40	442	21.4	299	0.000638	0.705244±8	0.703941	3.59	13.5	0.005295	0.512900±7	0.512435	7.1	724	598
21HM42	442	31.3	237	0.000318	0.706278±11	0.703874	2.85	11.1	0.000401	0.512908±6	0.512459	7.6	635	560
21HM43	442	21.6	240	0.000104	0.705565±8	0.703927	3.92	14.9	0.001510	0.512922±8	0.512462	7.7	640	555
21HM53	445	13.8	399	0.000075	0.704360±8	0.703726	3.15	13.3	0.001135	0.512858±8	0.512442	7.3	634	-
21HM54	445	14.2	401	0.000080	0.704323±8	0.703675	3.88	16.4	0.000448	0.512844±5	0.512428	7.1	662	-
21HM57	445	14.6	408	0.000054	0.704406±7	0.703750	3.58	15.0	0.000082	0.512847±6	0.512427	7.1	669	-



(a) 据 Leake et al., 1997; (b) 据马昌前等, 1994; (c) 据 Morimoto, 1988; (d) 据 Smith, 1974。

图 7 卡拉塔格复式岩体矿物成分判别图

Fig.7 Discrimination diagrams of mineral chemical compositions of the Kalatage intrusive rocks



(a)和(b) 据 Whalen et al., 1987; (c) 据 Defant and Drummond, 1990; (d) 据 Martin, 1999; (e) 据 Allègre and Minster, 1978; (f) 据 Yuan et al., 2007。

图 8 花岗质岩石类型、物质源区和岩浆过程判别图

Fig.8 Discrimination diagrams of rock types, material source area, and magmatic process for the granitic rocks

和 Nd 模式年龄指示其为年轻地壳部分熔融的产物。此外, 花岗闪长岩中角闪石明显低的 Al_2O_3 含量也指示其为壳源物质部分熔融的产物(姜常义和安三元, 1984)(图 10a), 而其 $\text{Mg}^\#$ 值(50~70)和 FeO^T 含量特征也区别于地幔源区(图 10b), 说明花岗闪长岩为年轻玄武质下地壳再次熔融的产物(Leake et al., 1997, 谢应雯和张玉泉, 1990)。

La 和 Sm 相似的化学性质可判断岩浆过程(Allègre and Minster, 1978), 在 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解中(图 8e)花岗岩和花岗闪长岩主要受控于部分熔融作用。在 Harker 图解(图 9)中, 花岗岩的部分主量和微量元素与 SiO_2 基本不相关, 说明花岗岩基本不存在矿物的分离结晶。而花岗闪长岩的部分主量元素和微量元素与 SiO_2 明显的线性关系指示可能存在一定量角闪石、

磁铁矿和斜长石的结晶分离。锆石和角闪石作为早期结晶矿物,它们的结晶温度可近似代表母岩浆形成温度的下限,花岗岩和花岗闪长岩所计算的结晶温度较低($<800\text{ }^{\circ}\text{C}$;表4,附表2),属于 Miller et al. (2003)划分的“低温花岗岩”,反映的是含水矿物脱水部分熔融的特征。地壳脱水熔融过程中,闪石类和云母类矿物是最主要的含水矿物,花岗岩和花岗闪长岩较低的 K、Rb、Cs 含量和显著低的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、Rb/Sr 值暗示其物质源区并非是含云母类矿物的砂岩或泥质岩脱水熔融产生的熔体(Harris and Inger, 1992),在 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}})\text{mol}-\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}})\text{mol}$ 图解(图 8f)中也显示为富角闪石的中基性岩部分熔融产生的熔体。此外,石榴石相对富集重稀土元素(HREE),角闪石相对富集中稀土元素(MREE)(Green, 1994; Rubatto and Hermann, 2007),花岗岩和花岗闪长岩相似的 $\text{Y}/\text{Yb}(<10)$ 和 $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}}(<1)$ 值同样说明其是以角闪石为主要残留相的中下地壳部分熔融的结果(Sisson, 1994)。花岗岩和花岗闪长岩的区别在于熔融程度,花岗岩中明显的 Ba-Sr-Eu 负异常说明源区有斜长石残留,结合未见铁镁质暗色矿物和含继承锆石的特征说明部分熔融程度较低。花岗闪长岩

中明显的 Ba-Sr 正异常和极弱的 Eu 负异常说明源区可能无斜长石的残留,结合前人对俯冲有关的钙碱性岩岩浆中角闪石的研究(Anderson and Smith, 1995; Ridolfi et al., 2010; Putirka, 2016),花岗闪长岩中角闪石化学组成反映出其母岩浆具有较高的氧逸度($\log f_{\text{O}_2}=-15.1\sim-13.9$)和水含量(4.9%~6.6%)(图 10c、d),体现了相对较高的部分熔融程度。花岗岩和花岗闪长岩均未发现暗色铁镁质包体,其 $\text{Mg}^{\#}$ 值分别为 35~37、35~40,均 <40 (Rapp and Watson, 1995),Zr/Hf(34.3~36.7, 31.5~33.4)和 Nb/U 值(6.0~6.5, 2.5~3.7)接近于下地壳对应值(35.7, 6.2)(McDonough and Sun, 1995; Rudnick and Gao, 2003),暗示幔源岩浆可能不参与成岩过程。

综上所述,花岗岩和花岗闪长岩均为年轻下地壳脱水部分熔融的产物,但花岗闪长岩的熔融程度相对较高。

4.3 辉长闪长岩

中性岩类是汇聚型板块边缘重要的岩石类型之一,其地球化学组成类似于陆壳平均组分,因此备受国内外学者关注(Miyashiro, 1974; Grove and Kinzler, 1986)。目前已经提出了多种成因模式,主要包括:①俯冲

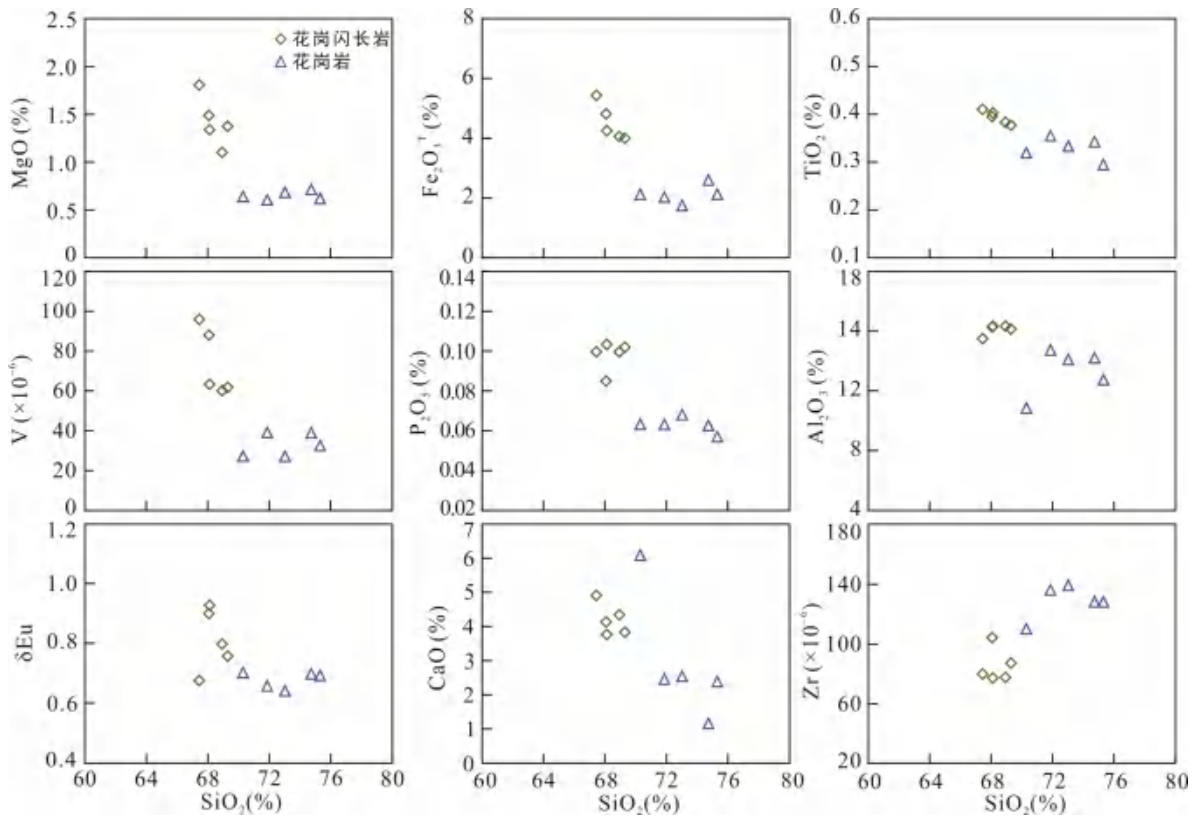
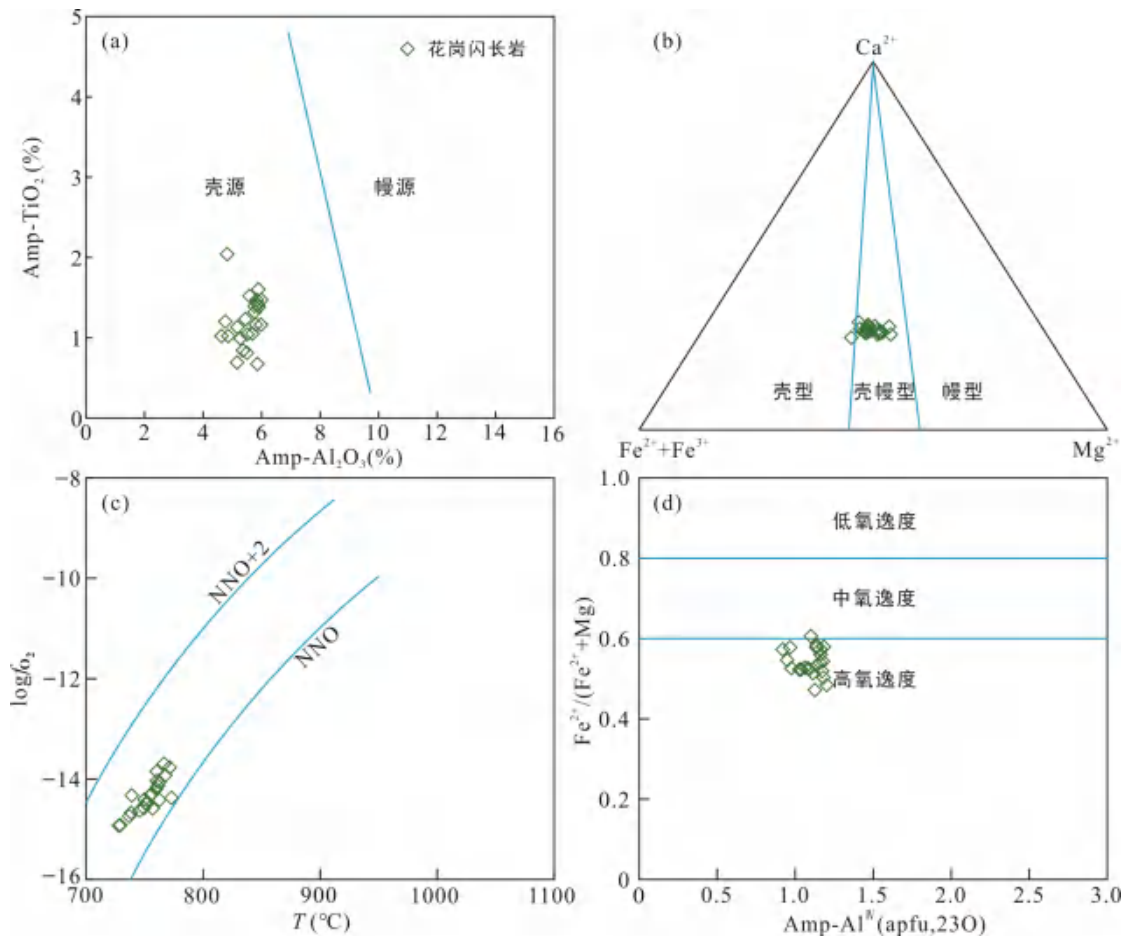


图 9 花岗质岩石 Haker 图

Fig.9 Haker diagrams of the granitic rocks



(a) 据姜常义和安三元, 1984; (b) 据谢应雯和张玉泉, 1990; (c) 据 Ridolfi et al., 2010; (d) 据 Anderson and Smith, 1995.

图 10 花岗闪长岩中角闪石氧逸度和物质源区判别图

Fig.10 Discrimination diagrams of oxygen fugacity and material source area for amphibole in the granodiorite

组分交代地幔楔的部分熔融(Kawamoto et al., 2012); ②含水地幔橄榄岩的部分熔融(Tamura et al., 2016); ③中下地壳玄武质岩石的部分熔融(Petford and Atherton, 1996); ④玄武质岩浆与长英质岩浆混合作用(Zhu et al., 2013)。

辉长闪长岩的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i值和(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i值变化范围小, 且与 SiO₂ 和 MgO 含量间无相关性, 结合其较中上地壳明显低 Th(1.53×10⁻⁶~1.99×10⁻⁶) 和 U (0.65×10⁻⁶~0.85×10⁻⁶)含量, 以及明显的 Zr-Hf 负异常(Rudnick and Gao, 2003)(表 4、5, 图 6f), 暗示岩浆侵位过程中基本未发生中上地壳的同化混染。

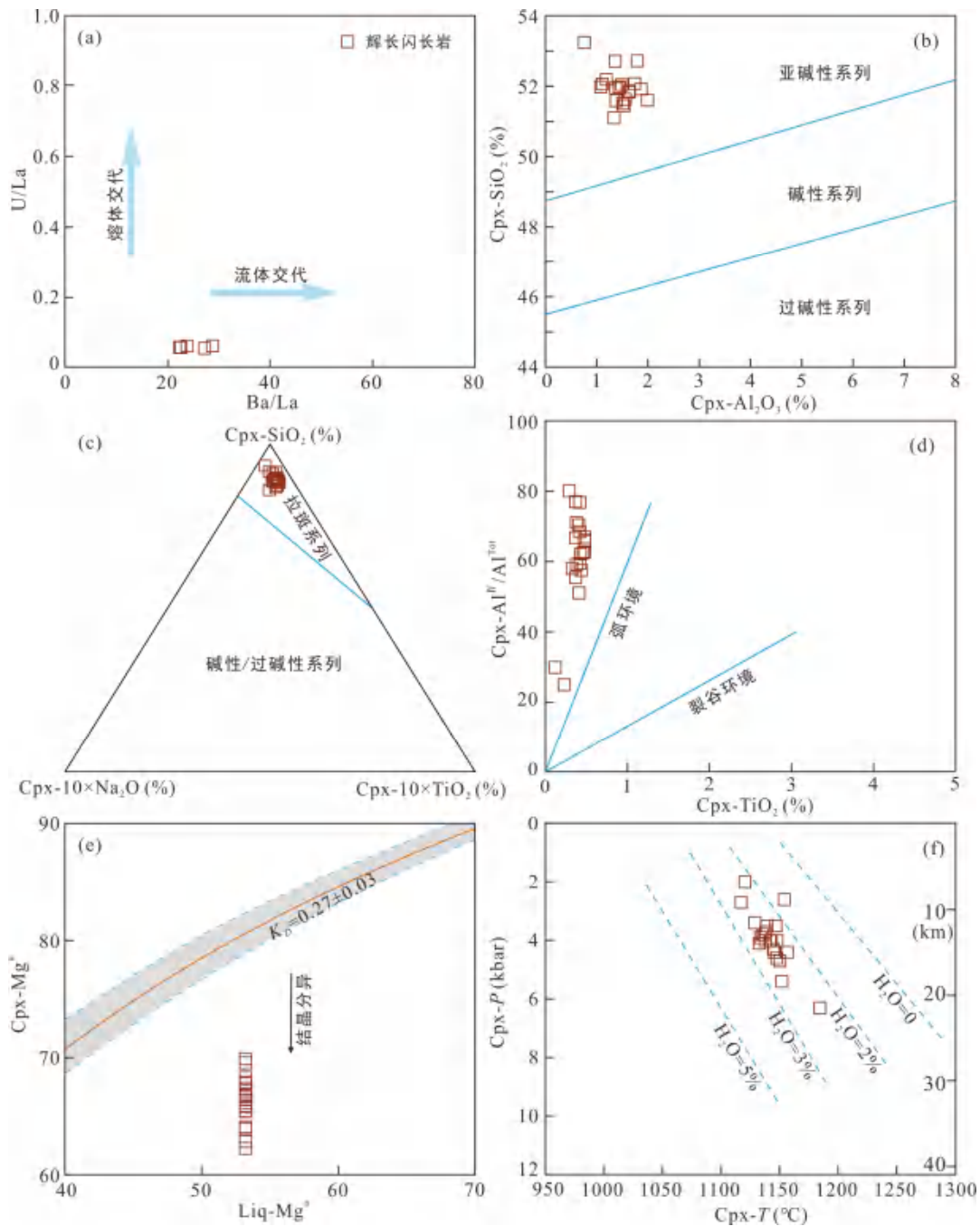
辉长闪长岩代表了卡拉塔格地区最基性的岩浆成分(图 5a), 具有较低的 SiO₂(54.17%~55.39%)和较高的 MgO 含量(5.26%~5.54%), 以及较高的 ε_{Hf}(t) (12.1~15.7)和 ε_{Nd}(t)(7.1~7.3)值, 表明母岩浆来自于亏损地幔源区。Sun et al. (2019)研究发现, 岩浆混合会导致锆石 ε_{Hf}(t)值离散, 而辉长闪长岩锆石

ε_{Hf}(t)值(+12.1~+15.7)相对均一, 结合岩石不存在长英质包体和斜长石异常环带, 可以排除玄武质-长英质岩浆混合成因。含水地幔橄榄岩在低温(~1000 °C)和水饱和条件下可形成高 Mg[#]值(>65)的安山质岩浆(Mitchell and Grove, 2015)。辉长闪长岩样品较低的 Mg[#]值(52~53), 以及单斜辉石较高的结晶温度(~1140 °C)(附表 3, 图 11f), 不支持这种成因(Putirka, 2008)。辉长闪长岩明显富集大离子亲石元素(Rb-Ba-Sr)和高度不相容元素(U), 亏损高场强元素(Nb-Ta-Ti), 符合典型的俯冲相关的岩浆特征(Mcculloch and Gamble, 1991), 在单斜辉石 Al^{IV}/Al^{Tot}-TiO₂图解(图 11d)中也反映出岛弧岩浆演化趋势。因此, 辉长闪长岩是俯冲组分交代地幔楔部分熔融的产物。研究表明俯冲组分主要包括俯冲板片脱水产生的流体和板片熔融形成的熔体(Pearce et al., 2005; Hermann and Rubatto, 2009), 流体一般富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 而熔体中高场强元素和重稀土元素含量较高, 该辉长闪

长岩具有较高的 Ce/Nb(11.5~16.1)和较低的 Th/La 值 (0.11~0.13), 且在 U/La-Ba/La 图解(图 11a)中显示出明显的流体交代地幔楔的特征。

研究发现, 单斜辉石中 Si 和 Al 元素含量及晶格位置可限制母岩浆性质(Kushiro, 1960; LeBas, 1962; 邱家骧和廖群安, 1996)。在 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2\text{-}$

$10\times\text{Na}_2\text{O}\text{-}10\times\text{TiO}_2$ 图解(图 11b、c)中, 辉长闪长岩中单斜辉石显示拉斑系列岩浆的演化趋势, 与全岩 AFM 图解(图 5d)一致。辉长闪长岩具有中等的 $\text{Mg}^\#$ 值和过渡金属元素(V、Cr、Ni、Co 等)含量, 说明该岩体并非直接来源于原始岩浆, 而是原始岩浆经历一定演化后的产物, 在 La/Sm-La 图(图 8e)中也得到体现。



(a) 据 Du et al., 2018c; (b) 据 Lebas, 1962; (c) 据 Deer et al., 1992; (d) 据 Loucks, 1990; (e) 据 Putirka, 2008; (f) 据 Cao et al., 2022。

图 11 辉长闪长岩的物质源区、岩浆过程和构造背景判别图

Fig.11 Discrimination diagrams of material source area, magmatic process, and tectonic settings for the gabbro-diorite

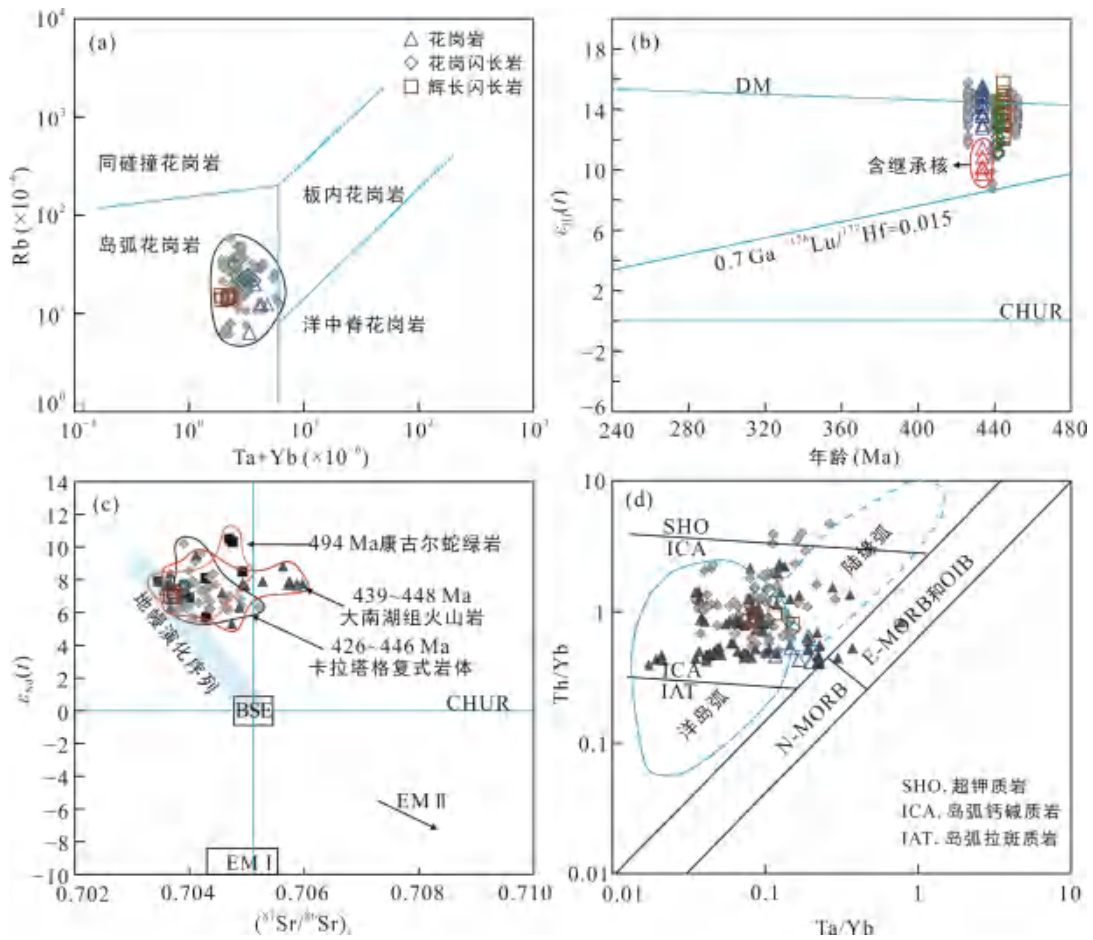
样品中单斜辉石与熔体间的 $K_{D_{Cpx-Liq}}$ 值(0.5~0.6)表明, 单斜辉石结晶时与残余岩浆之间存在明显不平衡(图 11e), 结合单斜辉石斑晶存在角闪石反应边或已被完全交代的特征, 认为岩浆过程中存在单斜辉石的结晶分离作用。样品中存在大斑晶和粒径较小的细条状晶体, 其中斑晶的牌号 An_{50-80} 变化范围较大, 结合全岩 Eu 的负异常($\delta Eu=0.76\sim 0.93$), 说明存在斜长石的结晶分离。随着岩浆演化, 熔体中水含量增加, SiO_2 活度增大, 致使紫苏辉石结晶, 且呈堆晶产出(Grove and Juster, 1989), 说明岩浆中期可能也存在紫苏辉石的分离结晶, 这与含水相矿物(角闪石和黑云母)出现的特征一致。

综上所述, 辉长闪长岩是流体交代的地幔楔熔融形成玄武质岩浆经过单斜辉石、斜长石和紫苏辉石等矿物结晶分离作用的产物。

5 讨论

5.1 大南湖-头苏泉带构造属性

对于大南湖-头苏泉带的构造属性, 是年轻洋壳和增生杂岩组成的洋内弧(秦克章等, 2002), 还是存在前寒武结晶基底的陆缘弧(李锦轶等, 2006), 仍存在不同的认识。东天山早古生代卡拉塔格复式岩体为强烈富 Na 的(低钾)拉斑-(中钾)钙碱性中酸性侵入体(图 5c), 具有较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值, 以及较低的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值, 显示出亏损地幔源区的特征。尽管在该岩体中均发现了较老的继承锆石年龄和 Hf 二阶段模式年龄(Du et al., 2018c; Zheng et al., 2018; Sun et al., 2019a; 庞博宸等, 2020)(图 4b), 但 Sr-Nd-Hf 同位素体系总体呈现出水平右漂趋势, 缺少古老地壳混染的痕迹(图 12b、c)。此外, 本次



(a) 据 Du et al., 2018a; (d) 据 Sun et al., 2019。卡拉塔格复式岩体数据来源: 李文铅等, 2006; Du et al., 2018c; Zheng et al., 2018; Sun et al., 2019a; Sun et al., 2020; 许骏等, 2020。大南湖组火山岩数据来源: 李玮等, 2016; Chai et al., 2019; Zhao et al., 2019。康古尔蛇绿岩数据来源: 李文铅等, 2008。

图 12 卡拉塔格岩体构造背景和 Sr-Nd-Hf 同位素组成判别图

Fig.12 Discrimination diagram of tectonic settings and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of the Kalatag intrusive rocks

研究获得的卡拉塔格复式岩体二阶段 Nd 和 Hf 模式年龄较为年轻(558~607 Ma, 422~722 Ma), 与前人的研究结果一致(Sun et al., 2019a; 许骏等, 2020)。该带早古生代地层缺失陆缘碎屑沉积, 主要为低钾拉斑至(少量)中钾钙碱性系列的玄武质-玄武安山质-安山质火山岩和火山碎屑岩岩石组合(含高镁安山岩), 以及海相碳酸盐岩和复理石建造(李玮等, 2016; 龙灵利等, 2016, 2017; Zhang et al., 2018; Chai et al., 2019; Zhao et al., 2019; Sun et al., 2020), 并发育 VMS 型 Cu-Zn 矿床(Yang et al., 2018)和埃达克质斑岩型 Cu-Au 矿床(Sun et al., 2018), 与洋内弧的岩石组合特征一致(邓晋福等, 2007; Timothy 和王璐, 2022)。在 Th/Yb-Ta/Yb 图解(图 12d)中, 卡拉塔格复式岩体连同早古生代大南湖组火山岩也基本落在了洋内弧的区域。上述岩石组合及其地球化学特征均说明大南湖-头苏泉带早古生代的构造属性为洋内弧。

5.2 大南湖-头苏泉带形成时限和俯冲极性

大南湖-头苏泉带卡拉塔格复式岩体中花岗岩、花岗闪长岩和辉长闪长岩的锆石 U-Pb 定年结果分别为 434 ± 4 Ma、 442 ± 2 Ma 和 445 ± 4 Ma, 属奥陶纪末-志留纪初。岩石的地球化学特征也与研究区近年来报道的近同期(382~465 Ma)的侵入体一致, 均表现为相对富集 LREE、LILE, 亏损 HREE、HSFE, 显示出俯冲带岛弧岩浆的特征(Gill, 1981; McCulloch and Gamble, 1991), 在 Rb-(Ta+Yb)图解(图 12a)也落入了火山岛弧范围内。此外, 前人在卡拉塔格地区发现了高镁安山岩和埃达克岩, 也为存在早古生代岛弧岩浆提供了直接证据(李玮等, 2016; Chai et al., 2019; Zhao et al., 2019)。因此, 我们认为康古尔洋向北的俯冲不晚于早志留世。

就俯冲极性而言, 本文结合前人关于大南湖-头苏泉带岩浆-地层的最新研究成果, 认为该岩浆弧是康古尔洋北向俯冲的产物(图 13a)。最新研究显示, 卡拉麦里蛇绿岩的形成于 329~416 Ma(唐红峰等, 2007; 赵恒乐等, 2012; 黄岗等, 2017), 与硅质岩中放射虫时代吻合(舒良树和王玉净, 2002), 结合前人在该带发现的碰撞后火山岩、钉合花岗岩体以及磨拉石建造的形成时代, 共同证明了卡拉麦里洋盆是一个早泥盆世-早石炭世末快速张合的大洋(吴琪等, 2012; Zhang et al., 2014; 田健等 2016; 李海等, 2021; 郑有伟等, 2022)。此外, 李锦轶等 (2009) 利用宽频地震探测发现卡拉麦里缝合带深部仅发育向北倾斜的转折波界面, 且自北而南呈现出火山

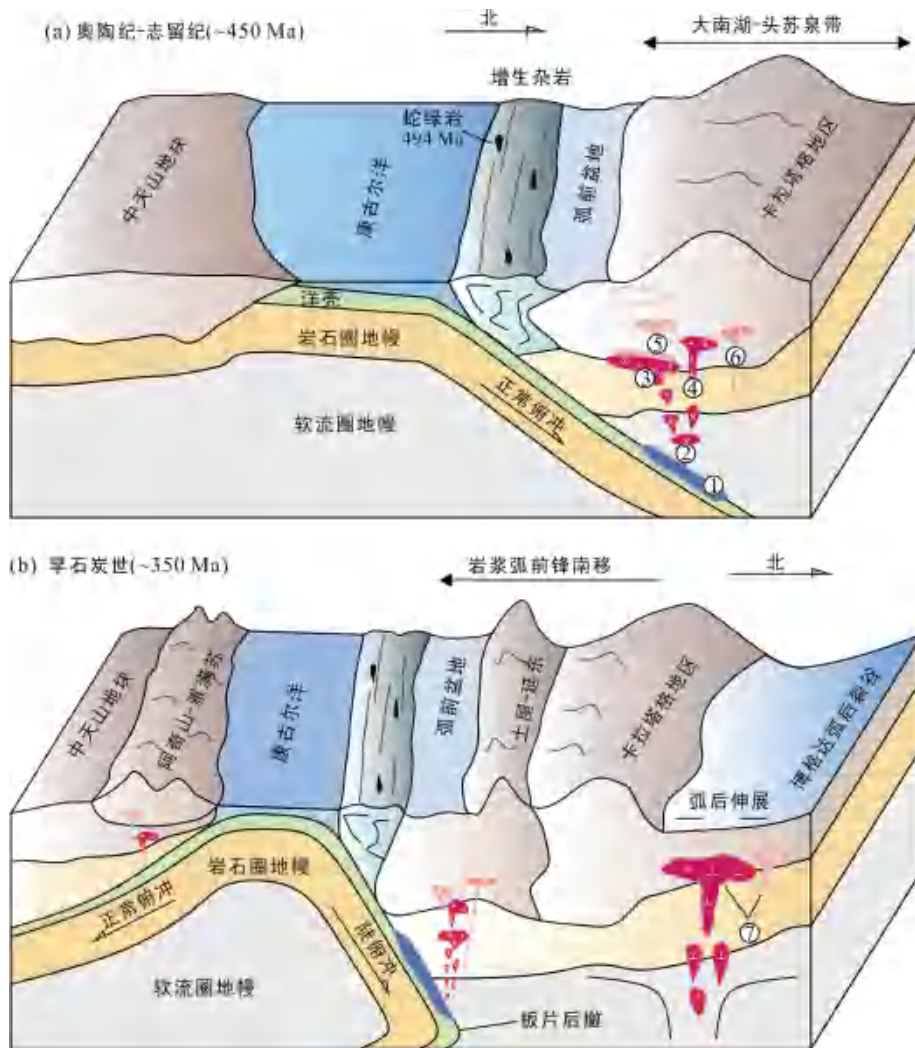
弧、增生杂岩和被动陆缘沉积岩系的展布特征, 也证明了以卡拉麦里蛇绿岩代表的古洋盆只存在向北的单向俯冲。相反, 前人在大南湖-头苏泉带南侧识别出了代表康古尔洋洋壳残片的蛇绿岩的年龄为 416~494 Ma(郭新成等, 2008; 李文铅等, 2008; 舍建忠等, 2017), 并发现了晚志留世放射虫硅质岩(李锦轶, 2004; 李文铅等, 2008), 结合徐兴旺等(2006)发现的~545 Ma 的裂谷成因的四顶黑山层状镁铁质-超镁铁质岩体, 显示康古尔大洋至少存在于寒武纪之前。此外, 康古尔带发育有不同构造岩片物质混杂堆积的海沟沉积岩系(贺军慧等, 2005; 李文亮, 2020), 且明显区别于两侧岛弧的重磁异常(邓振球, 1999; 梁月明等, 2001; 木合塔尔·扎日等, 2009), 结合该带是一条重要的植物区系界限(吴绍祖, 1993)和构造变形带(杨兴科等, 1999; 王京彬等, 2006), 共同证实了康古尔洋盆的存在且具有板块边界的属性。自李锦轶等(2006)发现大南湖-头苏泉带岩浆活动的时空分布具有明显向南增生的特征以来, 近年来更多的岩浆岩年代学数据也支持这一观点: 前泥盆纪弧岩浆活动主要分布在卡拉塔格地区(表 1), 而泥盆纪弧岩浆活动南移至大草滩断裂以北地区(宋彪等, 2002; 熊文勃, 2018; 陈红旗等, 2020; 司国浩等, 2020), 最终到土屋-延东地区的石炭纪弧岩浆前锋带(Wang et al., 2016c; Sun et al., 2020)。当石炭纪大南湖-头苏泉带弧岩浆前锋南移至土屋-延东一带时, 同时期的博格达地区广泛分布着与裂谷有关的基性侵入体(雷万杉等, 2016; 龙登红, 2021)和双峰式火山岩(Chen et al., 2013; Zhang et al., 2017), 这些研究指示俯冲板片后撤导致博格达地区伸展形成早石炭世弧后(弧间)盆地(Jara et al., 2021)(图 13b)。

6 结 论

(1) 卡拉塔格复式岩体中花岗岩、花岗闪长岩和辉长闪长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 434 ± 4 Ma、 442 ± 2 Ma 和 445 ± 4 Ma, 属奥陶纪末-志留纪初。

(2) 卡拉塔格复式岩体中辉长闪长岩是流体交代地幔楔熔融产生的玄武质岩浆经过分离结晶的产物, 花岗岩和花岗闪长岩均为年轻下地壳部分熔融的产物。

(3) 大南湖-头苏泉带是康古尔洋早古生代俯冲形成的洋内弧, 且北向俯冲不晚于早志留世。



① 俯冲流体/熔体(富 Cu-Mo-Au); ② 交代地幔楔熔融产生基性岩浆; ③ 基性岩浆底侵形成新生地壳; ④ 少量基性岩浆结晶分异形成玄武质-闪长质岩浆; ⑤ 持续底侵诱导新生地壳产生壳源岩浆; ⑥ 俯冲板片熔融直接形成埃达克质岩浆; ⑦ 板片后撤导致弧后伸展产生“双峰式”火山岩。

图 13 东天山北部古生代构造演化模式

Fig.13 A tectonic model for the Paleozoic evolution of the northern Eastern Tianshan

致谢: 本文得到了南京大学吴昌志教授和另一名匿名审稿人的细心审阅, 并提出宝贵的意见和建议, 在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

Morimoto N. 1988. 辉石命名法. 黄婉康, 译. 矿物学报, 8(4): 289-305.
 Timothy KUSKY, 王璐. 2022. 洋内弧和陆缘弧体系中的大陆地壳生长: 与太古宙体系的类比. 中国科学: 地球科学, 52(10): 1966-2001.
 陈红旗, 焦建刚, 王祚鹏, 刘海生, 何碧, 尹高攀, 赵德龙. 2020. 东天山北克孜尔卡拉塔格二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及地质意义. 矿产与地质, 34(6): 1112-1122.

陈文, 孙枢, 张彦, 肖文交, 王义天, 王清利, 姜立丰, 杨俊涛. 2005. 新疆东天山秋格明塔什-黄山韧性剪切带⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学研究. 地质学报, 79(6): 790-804.
 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 吴宗絮, 刘勇. 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论. 高校地质学报, 13(3): 392-402.
 邓振球. 1999. 新疆及其邻区卫星磁力异常与深部构造. 新疆地质, 17(3): 59-63.
 郭新成, 余元军, 徐晟. 2008. 新疆鄯善色尔特能蛇绿岩及构造意义. 新疆地质, 26(3): 225-230.
 贺军慧, 夏明, 张兴龙. 2005. 新疆东天山觉罗塔格地区梧桐窝子岩组构造环境探讨. 新疆地质, 23(1): 23-27.
 胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 张积斌, 陈林丽. 2006. 天山东段1.4 Ga花岗闪长质片麻岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及

- 其地质意义. 地球化学, 35(4): 333-345.
- 黄岗, 牛广智, 王新录, 郭俊, 宇峰. 2017. 东准噶尔卡拉麦里蛇绿混杂岩中斜长角闪岩的发现与洋中脊构造环境的确认. 中国地质, 44(2): 358-370.
- 贾小辉, 王强, 唐功建. 2009. A型花岗岩的研究进展及意义. 大地构造与成矿学, 33(3): 465-480.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义. 矿物岩石, 3(1): 1-9.
- 雷万杉, 许鹏, 郭俊锋, 肖良, 李相传, 李勇. 2016. 博格达山东段苏吉山辉长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、地质地球化学特征及构造意义. 地质论评, 62(2): 317-330.
- 李海, 李永军, 徐学义, 杨高学, 王祚鹏, 徐倩, 王龙江. 2021. 东准噶尔卡拉麦里地区碱性玄武岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 95(11): 3282-3300.
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. 地质论评, 50(3): 304-322.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. 地质学报, 80(1): 148-168.
- 李锦轶, 王克卓, 孙桂华, 莫申国, 李文铅, 杨天南, 高立明. 2006. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录. 岩石学报, 22(5): 1087-1102.
- 李锦轶, 杨天南, 李亚萍, 朱志新. 2009. 东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束. 地质通报, 28(12): 1817-1826.
- 李玮, 陈隽璐, 董云鹏, 徐学义, 李智佩, 柳小明, 何登峰. 2016. 早古生代古亚洲洋俯冲记录: 来自东天山卡拉塔格高镁安山岩的年代学、地球化学证据. 岩石学报, 32(2): 505-521.
- 李文亮. 2020. 新疆东天山康古尔-苦水构造混杂岩带地质特征及构造意义. 乌鲁木齐: 新疆大学硕士学位论文: 1-60.
- 李文铅, 马华东, 王冉, 王核, 夏斌. 2008. 东天山康古尔塔格蛇绿岩SHRIMP年龄、Nd-Sr同位素特征及构造意义. 岩石学报, 24(4): 773-780.
- 李文铅, 王冉, 王核, 夏斌. 2006. “吐哈天窗”卡拉塔格岩体的地球化学和岩石成因. 中国地质, 33(3): 559-565.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研究, 32(3): 161-174.
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 利用MC-ICP-MS精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和Sm/Nd比值. 地球化学, 32(1): 91-96.
- 梁月明, 黄旭钊, 徐昆, 于学政, 王越胜, 张文志, 蔡玉梅. 2001. 新疆康古尔塔格断裂带地球物理场及深部地质特征. 中国区域地质, 20(4): 398-403+367.
- 林涛, 邓宇峰, 屈文俊, 周涛发, 袁峰, 邓刚. 2017. 新疆东天山地区三岔口铜矿床的成因: 岩石学、年代学和地球化学证据. 矿物岩石, 37(4): 47-61.
- 刘帅杰, 余金杰, 王铁柱, 陆邦成. 2018. 新疆东天山玉海铜钼矿区志留纪侵入体岩石成因及构造意义. 矿床地质, 37(3): 535-555.
- 龙登红. 2021. 新疆博格达中段木垒地区基性侵入岩岩石地球化学、锆石U-Pb年代学及其构造意义. 西北地质, 54(1): 15-29.
- 龙灵利, 王京彬, 王玉往, 方同辉, 毛启贵, 高一涵, 赵路通, 高立明. 2017. 东天山卡拉塔格铜多金属矿集区黄铁矿化(次)流纹岩年代学、地球化学特征及其对成矿的潜在意义. 岩石学报, 33(2): 367-384.
- 龙灵利, 王京彬, 王玉往, 毛启贵, 邓小华, 赵路通, 孙志远, 孙燕, 高一涵. 2016. 东天山卡拉塔格矿集区赋矿火山岩地层时代探讨-SHRIMP锆石U-Pb年龄证据. 矿产勘查, 7(1): 31-37.
- 路远发, 李文霞. 2021. CIPW标准矿物计算方法与程序设计. 华南地质, 37(3): 348-360.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华. 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉: 中国地质大学出版社: 837-864.
- 马志杰, 柴凤梅, 许强奋, 王雯, 毛启贵, 祁冬梅. 2021. 东天山卡拉塔格晚石炭世岛弧火山岩发现的地质意义. 地质科学, 56(3): 683-700.
- 毛启贵, 方同辉, 王京彬, 王书来, 王宁. 2010. 东天山卡拉塔格早古生代红海块状硫化物矿床精确定年及其地质意义. 岩石学报, 26(10): 3017-3026.
- 木合塔尔·扎日, 张晓帆, 吴兆宁, 吴昌志, 陈川. 2009. 东天山准噶尔-哈萨克斯坦板块与塔里木板块缝合线的再厘定及其意义. 地学前缘, 16(3): 138-148.
- 庞博宸, 李秋根, 陈隽璐, 刘树文, 王宗起, 陈衍景, 肖兵. 2020. 东天山大南湖-头苏泉岛弧带古生代侵入岩浆活动期次及基底性质. 西北地质, 53(2): 1-26.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 王旭东. 2001. 吐哈盆地南缘古生代“天窗”卡拉塔格铜金矿化区的发现及其成矿潜力. 中国地质, 28(3): 16-23.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究. 新疆地质, 20(4): 302-308.
- 邱家骧, 廖群安. 1996. 浙闽新生代玄武岩的岩石成因学与Cpx矿物化学. 火山地质与矿产, 17(1): 16-25.
- 芮宗瑶, 刘玉琳, 王龙生, 王义天. 2002. 新疆东天山斑岩型铜矿带及其大地构造格局. 地质学报, 76(1): 83-94.
- 舍建忠, 杨万志, 屈迅, 贾健, 邸晓辰. 2017. 东天山大草

- 滩北镁铁超镁铁岩锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 36(1): 82-91.
- 舍建忠, 冯长丽, 贾健, 邸晓辰, 段旭杰. 2018. 东天山中段造山带构造单元划分及演化特征. 新疆地质, 36(2): 135-141.
- 舍建忠, 朱志新, 贾健, 段旭杰, 彭戈, 邸晓辰. 2020. 新疆主要断裂的分布及其特征. 新疆地质, 38(1): 9-20.
- 施文翔, 廖群安, 李奇祥, 张家新, 张旺生. 2015. 东天山东段四顶黑山一带早泥盆世岛弧花岗岩年龄、特征及构造意义. 新疆地质, 33(1): 21-26.
- 舒良树, 王玉净. 2002. 新疆卡拉麦里蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石. 地质论评, 49(4): 408-412, 450.
- 司国浩, 陈红旗, 杨高学. 2020. 东天山北埃达克质花岗岩闪长岩年代学、地球化学及地质意义. 矿物岩石, 40(3): 42-52.
- 宋彪, 李锦轶, 李文铅, 王克卓, 王瑜. 2002. 吐哈盆地南缘克孜尔卡拉萨依和大南湖花岗岩基锆石SHRIMP定年及其地质意义. 新疆地质, 20(4): 342-345.
- 唐红峰, 苏玉平, 刘丛强, 侯广顺, 王彦斌. 2007. 新疆北部卡拉麦里斜长花岗岩的锆石U-Pb年龄及其构造意义. 大地构造与成矿学, 31(1): 110-117.
- 田健, 廖群安, 樊光明, 聂小妹, 胡朝斌, 王富明, 陈帅, 吴魏伟. 2016. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南幔源底侵体、“钉合花岗岩体”的发现及其地质意义. 岩石学报, 32(6): 1715-1730.
- 王超, 陈斌, 马星华, 鄢雪龙. 2015. 东天山三岔口地区早、晚古生代岩体成因及其对康古尔缝合带演化的意义. 地球科学与环境学报, 37(5): 52-70.
- 王国灿, 张孟, 冯家龙, 廖群安, 张雄华, 康磊, 郭瑞禄, 玄泽悠, 韩凯宇. 2019. 东天山新元古代-古生代大地构造格架与演化新认识. 地质力学学报, 25(5): 798-819.
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪. 中国地质, 33(3): 461-469.
- 王瑜, 李锦轶, 李文铅. 2002. 东天山造山带右行剪切变形及构造演化的⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学证据. 新疆地质, 20(4): 315-319.
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002. (LP)MC-ICP-MS方法精确测定液体和固体样品的Sr同位素组成. 地球化学, 31(3): 295-299.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 吴琪, 屈迅, 常国虎, 张永, 董连慧, 徐兴旺. 2012. 红柳峡韧性剪切带形成时代及其对准噶尔洋盆闭合时限的约束. 岩石学报, 28(8): 2331-2339.
- 吴绍祖. 1993. 新疆石炭-二叠纪植物地理区的形成与演变. 新疆地质, 11(1): 13-22.
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 徐学义, 董云鹏, 李向民. 2002. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束-来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据. 地质通报, 21(2): 55-62.
- 肖兵, 陈华勇, 王云峰, 杨俊弢. 2015. 东天山土屋-延东铜矿矿区晚志留世岩体的发现及构造意义. 地学前缘, 22(6): 251-266.
- 谢应雯, 张玉泉. 1990. 横断山区花岗岩类中角闪石的标型特征及其成因意义. 矿物学报, 10(1): 35-45.
- 熊文勃. 2018. 新疆哈密大南湖一带岩浆岩地球化学特征及构造环境分析. 兰州: 兰州大学硕士学位论文: 1-62.
- 徐兴旺, 秦克章, 三金柱, 王瑜, 惠卫东, 康峰, 毛骞, 李金祥, 孙赫, 马玉光. 2006. 东天山四顶黑山地区545 Ma层状镁铁质-超镁铁质岩体的发现及其大地构造学和成矿学意义. 岩石学报, 22(11): 2665-2676.
- 许骏, 杨利亚, 陈曦, 陈磊, 张文东, 王丰丰, 王燕超, 王洋. 2020. 东天山卡拉塔格矿集区奥陶-志留纪侵入岩地球化学特征及成因. 矿产勘查, 11(9): 1797-1811.
- 杨兴科, 姬金生, 陈强, 陶洪祥. 1999. 东天山区域韧性剪切带特征. 新疆地质, 17(1): 56-65.
- 杨兴科, 陶洪祥, 罗桂昌, 姬金生. 1996. 东天山板块构造基本特征. 新疆地质, 14(3): 221-227.
- 于介禄, 于介江, 杨万志, 张元厚, 郭秀玮. 2019. 东天山觉罗塔格带东段早志留世中酸性侵入岩的年代学、地球化学及构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 49(3): 690-708.
- 张洪瑞, 魏刚锋, 李永军, 杜志刚, 柴德亮. 2010. 东天山南湖岛弧带石炭纪岩石地层与构造演化. 岩石矿物学杂志, 29(1): 1-14.
- 张旗, 王焰, 潘国强, 李承东, 金惟俊. 2008. 花岗岩源岩问题-关于花岗岩研究的思考之四. 岩石学报, 24(6): 1193-1204.
- 张雄华, 黄兴, 陈继平, 廖群安, 段先锋. 2012. 东天山觉罗塔格地区石炭纪火山-沉积岩地层序列及地质时代. 地球科学, 37(6): 1305-1314.
- 张雪, 翁凯, 赵晓健, 杜守礼, 尚颖. 2021. 新疆东天山卡拉塔格二叠纪火山岩成因及构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 51(4): 1119-1138.
- 张雪, 翁凯, 赵晓健, 杨文瑞, 付雪明. 2022. 东天山卡拉塔格石炭纪安山岩地球化学、年代学研究及地质意义. 新疆地质, 40(2): 196-203.
- 张照伟, 臧遇时, 王亚磊, 陈寿波. 2016. 新疆东天山玉海斑岩铜矿锆石SHRIMP U-Pb年龄及构造意义. 地球学报, 37(1): 59-68.
- 张忠义, 肖文进, 郑小明, 杨国龙, 高军辉. 2021. 东天山康古尔塔格构造带的组成、结构与晚古生代构造演化.

- 矿产勘查, 12(7): 1530–1538.
- 赵恒乐, 许凡, 张冀, 杨屹. 2012. 东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩形成时代、地质特征及构造意义. *新疆地质*, 30(2): 161–164.
- 郑有伟, 曾洋, 彭传凯, 李汶渝, 刘翔, 樊海龙. 2022. 东准噶尔晚古生代洋陆转换过程: 来自沉积学的约束. *地质找矿论丛*, 37(1): 68–75.
- Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1–25.
- Anderson J L, Smith D R. 1995. The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80(5–6): 549–559.
- Ao S J, Mao Q G, Windley B F, Song D F, Zhang Z Y, Zhang J E, Wan B, Han C M, Xiao W J. 2021. The youngest matrix of 234 Ma in the Kanguer accretionary mélange containing blocks of N-MORB basalts: Snapshots for the Ladinia northward subduction of the Paleo-Asian Kanguer ocean in the eastern Tianshan of the southern Altaids. *International Journal of Earth Science*, 110: 791–808.
- Bach W, Alt J C, Niu Y L, Humphris S E, Erzinger J, Dick H J B. 2001. The geochemical consequences of late-stage low-grade alteration of lower ocean crust at the SW Indian ridge: Results from ODP hole 735B (Leg176). *Geochimical et Cosmochimica Acta*, 65(19): 3267–3287.
- Belousova E, Griffin W, O'reilly S Y, Finsher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1–2): 1–29.
- Cao G Y, Xue H M, Tong Y. 2022. Complex magmatic processes recorded by clinopyroxene phenocrysts in a magmatic plumbing system: A case study of mafic volcanic rocks from the Laiyang basin, southeastern north China craton. *Lithos*, 416–417, 106673.
- Chai F M, Zhang Z C, Li W H, Santosh M, Wang H P, Wang W, Xu Q F. 2019. The Early Paleozoic Huangtupo VMS Cu-Zn deposit in Kalatag, eastern Tianshan: Implications from geochemistry and zircon U-Pb geochronology of volcanic host rocks. *Lithos*, 342–343: 97–113.
- Champion D C, Bultitude R J. 2013. The geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Paleozoic fractionated S-types granites of north Queensland: Implications for S-type granite petrogenesis. *Lithos*, 162–163: 37–56.
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173–174.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I-type and S-type granites in the Lachlan fold belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1–26.
- Chappell B W, White A J R, Wyborn D. 1987. The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis. *Journal of Petrology*, 28: 1111–1138.
- Charvet J, Shu L S, Sébastien L C, Wang B, Michel F, Dominique C, Chen Y, Koen D J. 2011. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China. *Earth Sciences*, 54(2): 166–184.
- Chen B, Jahn B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691–703.
- Chen B Y, Yu J J, Liu S J. 2019. Contributions of basaltic underplating to crustal growth in island arc and extensional tectonic settings in the Chinese Tianshan orogenic belt, NW China. *Gondwana Research*, 69: 106–121.
- Chen L, Deng X H, Bagas L, Wu X B, Wang J B. 2020. Petrogenesis of Middle Devonian diorite at the Xierqu Fe-Cu deposit in the Kalatag district, eastern Tianshan, NW China. *Geological Journal*, 55: 1620–1635.
- Chen L, Wang J B, Bagas L, Wu X B, Zou H Y, Zhang H X, Sun Y, Lv X Q, Deng X H. 2017. Significance of adakites in petrogenesis of Early Silurian magmatism at the Yudai copper deposit in the Kalatag district, NW China. *Ore Geology Reviews*, 91: 780–794.
- Chen X J, Shu L S, Santosh M, Zhao X R. 2013. Arc-type bimodal magmatism in the eastern Tianshan belt, northwest China: Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and implications for the Paleozoic crustal evolution in central Asia. *Lithos*, 168–169: 48–66.
- Cheng X H, Yang F Q, Zhang R, Xv Q F, Yang C D. 2020. Petrogenesis and geodynamic implications of Early Paleozoic granitic rocks at the Hongshi Cu deposit in east Tianshan orogenic belt, NW China: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes. *Geological Journal*, 55(3): 1890–1912.
- Chu N C, Taylor R, Nesbitt R. 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: 1567–1574.

- Deer W A, Howie R A, Zussman J. 1992. An introduction to the rock forming minerals. New York: Longman Scientific and Technical.
- Defant M, Drummond M. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665.
- Deng X H, Wang J B, Santosh M, Wang Y W, Long L L, Zhang H X, Yang L Y, Xv J, Chen X, Chen L. 2018. Early Paleozoic volcanic rocks with VMS mineralization from eastern Tianshan orogen: Implication for tectonic evolution. *Geological Journal*, 53: 2178–2192.
- Du L, Long X P, Yuan C, Zhang Y Y, Huang Z Y, Sun M, Xiao W J. 2018b. Petrogenesis of Late Paleozoic diorites and A-type granites in the central eastern Tianshan, NW China: Response to post-collisional extension triggered by slab breakoff. *Lithos*, 318–319: 47–59.
- Du L, Long X P, Yuan C, Zhang Y Y, Huang Z Y, Sun M, Zhao G C, Xiao W J. 2018c. Early Paleozoic dioritic and granitic plutons in the eastern Tianshan orogenic belt, NW China: Constraints on the initiation of a magmatic arc in the southern central Asian orogenic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 139–153.
- Du L, Long X P, Yuan C, Zhang Y Y, Huang Z Y, Wang X Y, Yang Y H. 2018a. Mantle contribution and tectonic transition in the Aqishan-Yamansu belt, eastern Tianshan, NW China: Insights from geochronology and geochemistry of Early Carboniferous to Early Permian felsic intrusions. *Lithos*, 304–307: 230–244.
- Gill J B. 1981. Orogenic Andesites and Plate Tectonics. New York: Springer-Verlag.
- Green T H. 1994. Experimental studies of trace element partitioning applicable to igneous petrogenesis — Sedona 16 years later. *Chemical Geology*, 117(1–4): 1–36.
- Grove T L, Kinzler R J. 1986. Petrogenesis of andesites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 417–454.
- Grove L T, Juster T C. 1989. Experimental investigations of low-Ca pyroxene stability and olivine-pyroxene-liquid equilibria at 1-atm in natural basaltic and andesitic liquids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103(3): 287–305.
- Han Y G, Zhao G C. 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern central Asian orogenic belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian ocean. *Earth-Science Reviews*, 186: 129–152.
- Harris N B W, Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 46–56.
- He X H, Deng X H, Bagas L, Zhang J, Chen S B, Wu L N, Mao Q G, Gu Z C, Xue D, Shen P. 2021. The Silurian to Devonian magmatic evolution of the eastern Tianshan terrane: New insights from geochemistry, geochronology, and Sr-Nd-Hf isotopes of new-discovered Sidingheishan porphyry Cu-Mo deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 135, 104228.
- Hermann J, Rubatto D. 2009. Accessory phase control on the trace element signature of sediment melts in subduction zones. *Chemical Geology*, 265(3–4): 512–526.
- Hoskin P W, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62.
- Huang Z Y, Yuan C, Long X P, Zhang Y Y, Ma X L, Soldner J, Du L, Shu C T. 2021. The cause for Nuna breakup in the Early to Middle Mesoproterozoic. *Precambrian Research*, 362, 106287.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548.
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Granitoids of the central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 91(1–2): 181–193.
- Jara J J, Barra F, Reich M, Leisen M, Romero R, Morata D. 2021. Episodic construction of the Early Andean cordillera unravelled by zircon petrochronology. *Nature Communications*, 12, 4930.
- Kawamoto T, Kanzaki M, Mibe K, Matsukage K N, Ono S. 2012. Separation of supercritical slab-fluids to form aqueous fluid and melt components in subduction zone magmatism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(46): 18695–18700.
- Kushiro I. 1960. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks. *American Journal of Science*, 258(8): 518–551.
- Leake B E, Woolley A R, Birch W D. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association. Commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219–246.
- Lebas M J. 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes

- with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260(4): 267–288.
- Lei R X, Wu C Z, Gu L X, Zhang Z Z, Chi G X, Jiang Y H. 2011. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope of the Xingxingxia granodiorite from the central Tianshan zone (NW China): Implications for the tectonic evolution of the southern Altaids. *Gondwana Research*, 20(2–3): 582–593.
- Li X H, Li Z X, Wingate M T D, Chung S L, Liu Y, Lin G C, Li W X. 2006. Geochemistry of the 755 Ma Mundine Well Dyke Swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? *Precambrian Research*, 146(1–2): 1–15.
- Li X H, Li W X, Li Z X. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling range, south China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873–1885.
- Loucks R R. 1990. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belt by the Al/Ti ratio in clinopyroxene. *Geology*, 18(4): 346–349.
- Ma X X, Shu L S, Jahn B M, Zhu W B, Michel F. 2012. Precambrian tectonic evolution of central Tianshan, NW China: Constraints from U-Pb dating and *in situ* Hf isotopic analysis of detrital zircons. *Precambrian Research*, 222–223: 450–473.
- Ma X X, Shu L S, Meert J G, Li J Y. 2020. The Paleozoic evolution of central Tianshan: Geochemical and geochronological evidence. *Gondwana Research*, 25(2): 797–819.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Mao Q G, Xiao W J, Fang T H, Windley B F, Sun S, Ao S J, Zhang J E, Huang X F. 2014. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Early Permian alkaline magmatism in the eastern Tianshan: Implications for tectonics of the southern Altaids. *Lithos*, 190–191: 37–51.
- Mao Q G, Yu M J, Xiao W J, Windley B F, Li Y C, Wei X F, Zhu J J, Lv X Q. 2018. Skarn-mineralized porphyry adakites in the Harlik arc at Kalatage, E. Tianshan (NW China): Slab melting in the Devonian-Early Carboniferous in the southern central Asian orogenic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 365–378.
- Mao Q G, Ao S J, Windley B F, Lv X Q, Liao Z, Wang Y, Sang M, Zhou T F, Han C M, Xiao W J. 2021. Cu-Ni mineralization in Early Permian mafic complexes in the Kalatage area of eastern Tianshan (NW China): Petrogenetic constraints from geochronology, geochemistry, and Hf-Sr-Nd-Os isotopes. *Ore Geology Reviews*, 136, 104258.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429.
- Mcculloch M T, Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102: 358–374.
- Mcdonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37: 215–224.
- Miller C F, Mcdowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31: 529–532.
- Mitchell A L, Grove T L. 2015. Melting the hydrous, sub-arc mantle: The origin of primitive andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(2): 1–23.
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321–355.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A C. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956–983.
- Pearce J A, Stern R J, Bloomer S H. 2005. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7): 1525–2027.
- Petford N, Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491–1521.
- Polat A, Hofmann A W. 2003. Alteration and geochemical patterns in the 3.7–3.8 Ga Isua greenstone belt, west Greenland. *Precambrian Research*, 126(3–4): 197–218.
- Polat A, Hofmann A W, Rosing M T. 2002. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7–3.8 Ga Isua greenstone belt, west Greenland: Geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early earth. *Chemical Geology*, 184(3–4): 231–254.
- Putirka K D. 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69: 61–120.
- Putirka K D. 2016. Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption

- mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *American Mineralogist*, 101(4): 841–858.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931.
- Ridolfi F, Renzulli A, Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview: New thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160: 45–66.
- Rubatto D, Hermann J. 2007. Experimental zircon/melt and zircon/garnet trace element partitioning and implications for the geochronology of crustal rocks. *Chemical Geology*, 241(1–2): 38–61.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust // Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier.
- Şengör A, Natalin B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307.
- Sisson T W. 1994. Hornblende-melt trace element partitioning measured by ion microprobe. *Chemical Geology*, 117(1–4): 331–344.
- Smith J V. 1974. *Feldspar Minerals*. New York: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg.
- Sun B K, Ruan B X, Lv X B, Tuohan B, Ratchford M E. 2020. Geochronology and geochemistry of the igneous rocks and ore-forming age in the Huangtan Au-Cu deposit in the Kalatag district, eastern Tianshan, NW China: Implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization. *Lithos*, 368–369, 105594.
- Sun J F, Zhang J H, Yang J H, Yang Y H, Chen S. 2019. Tracing magma mixing and crystal-melt segregation in the genesis of syenite with mafic enclaves: Evidence from *in situ* zircon Hf-O and apatite Sr-Nd isotopes. *Lithos*, 334–335: 42–57.
- Sun M, Wang Y H, Zhang F F, Lin S Y, Xue C J, Liu J J, Zhu D C, Wang K, Zhang W. 2020. Petrogenesis of Late Carboniferous intrusions in the Linglong area of eastern Tianshan, NW China, and tectonic implications: Geochronological, geochemical, and zircon Hf-O isotopic constraints. *Ore Geology Reviews*, 120, 103462.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Chemical Geology*, 42: 313–345.
- Sun Y, Wang J B, Li Y C, Wang Y W, Yv M J, Long L L, Lv X Q, Chen L. 2018. Recognition of Late Ordovician Yudai porphyry Cu (Au, Mo) mineralization in the Kalatag district, eastern Tianshan terrane, NW China: Constraints from geology, geochronology, and petrology. *Ore Geology Reviews*, 100: 220–236.
- Sun Y, Wang J B, Lv X Q, Yu M J, Li Y C, Wang Y W, Long L L. 2019b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the newly discovered Cu-Ni sulfide-mineralized Yueyawan gabbroic complex, Kalatag district, northwestern eastern Tianshan, NW China. *Ore Geology Reviews*, 109: 598–614.
- Sun Y, Wang J B, Wang Y W, Long L L, Mao Q G, Yu M J. 2019a. Ages and origins of granitoids from the Kalatag Cu cluster in eastern Tianshan, NW China: Constraints on Ordovician-Devonian arc evolution and porphyry Cu fertility in the southern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 330–331: 55–73.
- Sun Z Y, Wang J B, Wang Y, Zhang Y, Zhao L T. 2021. Multistage hydrothermal quartz veins record the ore-forming fluid evolution in the Meiling Cu-Zn(Au) deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 131, 104002.
- Tamura Y, Sato T, Fujiwara T, Kodaira S, Nichols A. 2016. Advent of continents: A new hypothesis. *Earth Science and Technology*, 6, 33517.
- Wan B, Li S H, Xiao W J, Windley B F. 2018. Where and when did the Paleo-Asian ocean form? *Precambrian Research*, 317: 241–252.
- Wang M, Zhang J J, Zhang B, Qin G W. 2015. An Early Paleozoic collisional event along the northern margin of the central Tianshan block: Constraints from geochemistry and geochronology of granitic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(1): 325–338.
- Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, Guan Q, Zhang X Q, Sui Q L, Hu Z C, Mo X X. 2012. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 59–66.
- Wang Y F, Chen H Y, Falloon T, Han J S. 2022. The Paleozoic-Mesozoic magmatic evolution of the eastern Tianshan, NW China: Constraints from geochronology and geochemistry of the Sanchakou intrusive complex. *Gondwana Research*, 103: 1–22.
- Wang Y F, Chen H Y, Han J S, Chen S B, Huang B Q, Li C, Tian Q L, Wu J X, Chen M X. 2018. Paleozoic tectonic

- evolution of the Dananhu-Tousuquan island arc belt, eastern Tianshan: Constraints from the magmatism of the Yuhai porphyry Cu deposit, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 282–306.
- Wang Y H, Zhang F F, Liu J J. 2016a. The genesis of the ores and intrusions at the Yuhai Cu-Mo deposit in eastern Tianshan, NW China: Constraints from geology, geochronology, geochemistry, and Hf isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 77: 312–331.
- Wang Y H, Zhang F F. 2016b. Petrogenesis of Early Silurian intrusions in the Sanchakou area of eastern Tianshan, northwest China, and tectonic implications: Geochronological, geochemical, and Hf isotopic evidence. *International Geology Review*, 58(10): 1294–1310.
- Wang Y H, Zhang F F, Liu J J, Que C Y. 2016c. Carboniferous magmatism and mineralization in the area of the Fuxing Cu deposit, eastern Tianshan, China: Evidence from zircon U-Pb ages, petrogeochemistry, and Sr-Nd-Hf-O isotopic compositions. *Gondwana Research*, 34: 109–128.
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295–304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M. 2012. The Altaids of central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review. *Earth-Science Reviews*, 113(3–4): 303–341.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the central Asian orogenic belt. *Journal of the Geological Society London*, 164: 31–47.
- Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127–4145.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1–2): 143–173.
- Xiao W J, Han C M, Liu W, Wan B, Zhang J E, Ao S J, Zhang Z Z, Song D F, Tian Z H, Luo J. 2014. How many sutures in the southern central Asian orogenic belt: Insights from east Xinjiang-west Gansu (NW China)? *Geoscience Frontiers*, 5(4): 525–536.
- Xiao W J, Kusky T, Safonova I, Seltmann R, Sun M. 2015. Tectonics of the central Asian orogenic belt and its Pacific analogues. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(1): 1–6.
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B, Han C M. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. *Gondwana Research*, 23(4): 1316–1341.
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S, Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370–395.
- Xu X W, Li X H, Jiang N, Li Q L, Qu X, Yang Y H. 2015. Basement nature and origin of the Junggar terrane: New zircon U-Pb-Hf isotope evidence from Paleozoic rocks and their enclaves. *Gondwana Research*, 28(1): 288–310.
- Yang C D, Chai F M, Yang F Q, Santosh M, Xv Q F, Wang W. 2018. Genesis of the Huangtupo Cu-Zn deposit, eastern Tianshan, NW China: Constraints from geology, Rb-Sr and Re-Os geochronology, fluid inclusions, and H-O-S-Pb isotopes. *Ore Geology Reviews*, 101: 725–739.
- Yarmolyuk V V, Kuzmin M I, Ernst R E. 2014. Intraplate geodynamics and magmatism in the evolution of the central Asian orogenic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 158–179.
- Yuan C, Sun M, Xiao W J, Li X H, Chen H L, Lin S F, Xia X P, Long X P. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. *Chemical Geology*, 242(1–2): 22–39.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Günther D, Fontaine G H, Liu X M, Diwu C R. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by Excimer Laser-Ablation Quadrupole and Multiple-Collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1–2): 100–118.
- Zhang D Y, Zhou T F, Yuan F, Fan Y, Deng Y F, Xu C, Zhang R F. 2014. Genesis of Permian granites along the Kangguer shear zone, Jueluotage area, northwest China: Geological and geochemical evidence. *Lithos*, 198–199: 141–152.
- Zhang X R, Zhao G C, Sun M, Eizenhöfer P R, Han Y G, Hou W Z, Liu D X, Wang B, Liu Q, Xu B. 2016. Tectonic evolution from subduction to arc-continent collision of

- the Junggar ocean: Constraints from U-Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from the north Tianshan belt, NW China. *Geological Society of America Bulletin*, 128 (3–4): 644–660.
- Zhang Y Y, Guo Z J, Pepiper G, Piper D J W. 2014. Geochemistry and petrogenesis of Early Carboniferous volcanic rocks in east Junggar, north Xinjiang: Implications for post-collisional magmatism and geodynamic process. *Gondwana Research*, 28(4): 1466–1481.
- Zhang Y Y, Sun M, Yuan C, Long X P, Jiang Y D, Li P F, Huang Z Y, Du L. 2018. Alternating trench advance and retreat: Insights from Paleozoic magmatism in the eastern Tianshan, central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 37: 2142–2164.
- Zhang Y Y, Yuan C, Long X P, Sun M, Huang Z Y, Du L, Wang X Y. 2017. Carboniferous bimodal volcanic rocks in the eastern Tianshan, NW China: Evidence for arc rifting. *Gondwana Research*, 43: 92–106.
- Zhao H, Liao Q N, Li S Z, Xiao D, Wang G C, Guo R L. 2019. Early Paleozoic tectonic evolution and magmatism in the eastern Tianshan, NW China: Evidence from geochronology and geochemistry of volcanic rocks. *Gondwana Research*, 102: 354–371.
- Zhao L D, Chen H H, Han J S, Jiao J G. 2022. Paleozoic tectonic setting and evolution of the central Tianshan block: Insights from Devonian arc-related granitoids. *Journal of Asian Earth Sciences*, 239, 105402.
- Zheng J H, Chai F M, Feng W Y, Yang F Q, Shen P. 2018. Geochemistry and chronology of the Early Paleozoic diorites and granites in the Huangtupo volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit, eastern Tianshan, NW China: Implications for petrogenesis and geodynamic setting. *Lithos*, 302–303: 455–466.
- Zhong L L, Wang B, Shu L S, Liu H S, Mu L X, Ma Y Z, Zhai Y Z. 2015. Structural overprints of Early Paleozoic arc-related intrusive rocks in the Chinese central Tianshan: Implications for Paleozoic accretionary tectonics in SW central Asian orogenic belts. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(1): 194–217.
- Zhou G C, Wang Y W, Shi Y, Xie H J, Guo B R. 2021. Petrogenesis and sulfide saturation in the Yueyawan Cu-Ni sulfide deposit in eastern Tianshan, NW China. *Ore Geology Reviews*, 139(B), 104596.
- Zhu M S, Miao L C, Yang S H. 2013. Genesis and evolution of subduction-zone andesites: Evidence from melt inclusions. *International Geology Review*, 55(10): 1179–1190.

Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of the Kalatage Intrusive Rocks in the Eastern Tianshan, Xinjiang

YUAN Xinchao¹, WANG Yujing^{2*}, DU Long³, LONG Xiaoping^{1*}

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: The Eastern Tianshan (ET) is located at the southernmost part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and has recorded the late stage of the subduction-accretion process of the CAOB. However, some key tectonic evolution processes of the ET in the Early Paleozoic remains controversial, such as the tectonic property, the onset of subduction, and the subduction polarity of the Dananhu-Tousuquan belt. In order to reveal the Early Paleozoic tectonic evolution of the Dananhu-Tousuquan belt, we carried out a systematical study on zircon U-Pb age and whole-rock geochemistry of the Kalatage intrusions. Our dating results indicate the granite, granodiorite, and gabbro-diorite were intruded at 434 ± 4 Ma, 442 ± 2 Ma, and 445 ± 4 Ma, respectively. These ages suggest that the Kalatage intrusions were mainly generated in the Early Silurian. The granite and granodiorite samples exhibit characteristics of calc-alkaline I-type granites with low P_2O_5 ($< 0.1\%$), high Na_2O ($K_2O/Na_2O \leq 0.5$), and metaluminous to weakly peraluminous geochemistry ($A/CNK = 0.57 - 1.24$ and $0.91 - 1.03$, respectively). They have very low Sr/Y ($1.9 - 4.5$ and $8.1 - 11.4$, respectively) and $(La/Yb)_N$ ($1.6 - 2.4$ and $2.4 - 3.0$, respectively), higher $\epsilon_{Hf}(t)$ ($+12.7 - +15.5$ and $+11.0 - +14.7$, respectively) and $\epsilon_{Nd}(t)$ ($+7.0 - +7.5$ and $+7.1 - +7.7$, respectively), and more juvenile two stage Hf ($426 - 589$ Ma and $485 - 722$ Ma, respectively) and Nd model ages ($559 - 603$ Ma, and $555 - 598$ Ma, respectively), indicating that they are the products of partial melting of the juvenile lower crust. Gabbro-diorite is characterized by enrichments in large ion lithophile elements (LILE) and highly incompatible elements, and depletions in high field strength elements (HFSE), displaying typical geochemical features of a subduction-related origin. They have low SiO_2 ($54.17\% - 55.39\%$) and high MgO contents ($5.26\% - 5.54\%$), positive $\epsilon_{Hf}(t)$ ($+12.1 - +15.7$) and $\epsilon_{Nd}(t)$ values ($+7.1 - +7.3$), together with their relatively young Hf and Nd model ages ($429 - 589$ Ma and $634 - 669$ Ma, respectively), suggesting that their parental magmas were derived from depleted mantle. The gabbro-diorite samples have relatively high Ce/Nb ($11.5 - 16.1$) and low Th/La ($0.11 - 0.13$), indicative of a magmatic source metasomatized by slab-derived fluids. Combining with the previous results of the Early Paleozoic magmatic rocks in this area, we suggest that the Dananhu-Tousuquan igneous arc were formed in an intra-oceanic arc environment triggered by the northward subduction of the Kanggur ocean plate, and the initiation subduction of the Kanggur plate is no later than the Early Silurian.

Keywords: Eastern Tianshan; Early Paleozoic; arc magmas; Kanggur ocean; subduction polarity

附表1 卡拉塔格岩体中不同岩石中锆石的稀土元素含量($\times 10^{-6}$)
 Attached table 1 REE contents ($\times 10^{-6}$) of zircon from rocks in the Kalatage intrusions

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE	HREE	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
花岗岩(21HM19, 42°37'2.39"N, 91°46'42.01"E)																				
1	0.19	63.3	0.93	9.94	16.9	2.08	101	39.3	500	201	895	183	1766	331	4113	93.3	4020	0.00008	0.15	36.6
2	0.52	58.2	1.00	10.5	15.3	1.69	102	39.9	520	206	914	188	1758	348	4164	87.4	4077	0.00021	0.13	19.8
3	1.25	207	4.11	48.4	109	32.9	512	139	1350	433	1722	321	2846	488	8217	403	7814	0.00031	0.42	22.4
4	1.00	46.0	0.64	6.54	14.4	1.94	101	47.9	646	219	918	187	1694	322	4206	70.0	4136	0.00042	0.16	14.1
5	0.32	47.5	1.09	10.4	13.9	2.01	79.0	29.1	356	145	667	142	1289	241	3024	75.0	2948	0.00018	0.19	19.7
6	<0.00	13.5	0.04	1.38	4.93	0.72	36.4	14.5	195	81.8	400	80.2	767	148	1743	21.0	1723	0.00000	0.16	-
7	0.60	65.9	0.80	9.40	14.3	2.51	75.7	29.7	365	152	676	133	1319	243	3086	94.0	2993	0.00033	0.23	23.3
8	0.61	57.1	1.00	12.3	17.5	3.02	89.5	33.6	413	166	763	158	1462	282	3457	91.0	3366	0.00029	0.23	18.1
9	0.09	60.0	0.52	5.60	12.5	1.63	102	38.1	445	185	854	202	1710	319	3936	80.0	3856	0.00004	0.14	67.2
10	1.45	89.8	3.14	23.7	23.2	3.54	104	38.2	500	184	812	166	1563	279	3793	145	3648	0.00066	0.22	10.3
11	0.11	24.8	0.34	3.67	7.97	1.33	51.3	19.6	269	105	495	111	998	189	2276	38.0	2238	0.00008	0.20	31.6
12	0.18	79.6	0.66	7.63	17.5	2.37	108	39.5	495	188	839	174	1590	296	3837	108	3729	0.00008	0.17	57.3
13	0.77	85.2	2.17	18.5	17.8	3.41	99.3	34.3	426	180	808	156	1449	260	3541	128	3414	0.00038	0.25	16.2
14	0.68	32.2	1.9	22.7	37.4	3.89	115	37.0	400	140	608	127	1229	225	2979	99.0	2881	0.00040	0.18	6.96
15	3.80	112	11.5	74.7	50.3	7.09	165	58.0	664	257	1168	261	2283	398	5514	259	5255	0.00119	0.24	4.25
16	0.37	72.4	0.93	8.55	14.8	2.16	87.9	33.5	417	166	743	153	1423	271	3394	99.0	3295	0.00019	0.18	30.3
17	0.80	55.8	1.18	11.3	20.7	2.94	121	45.3	597	219	959	204	1871	334	4444	93.0	4352	0.00031	0.18	14.1
18	0.06	26.9	0.14	2.42	9.76	1.73	74.2	28.4	355	142	633	129	1236	249	2888	41.0	2847	0.00003	0.20	74.3
19	0.83	124	2.00	17.7	24.6	2.72	130	49.2	604	235	1050	215	2009	374	4840	172	4667	0.00030	0.15	23.6
20	0.11	60.8	0.42	5.79	14.7	1.57	105	41.0	527	207	919	191	1894	342	4309	83.0	4226	0.00004	0.12	68.5
21	2.40	116	7.17	59.6	72.9	16.9	205	58.3	603	213	914	192	1847	335	4643	276	4367	0.00093	0.42	6.97
22	2.70	74.1	4.62	31.7	31.0	4.35	102	35.3	439	169	766	157	1471	275	3563	148	3415	0.00132	0.24	5.12
23	0.61	99.3	1.69	16.3	29.0	5.93	148	50.1	594	229	1003	204	1909	355	4644	153	4491	0.00023	0.28	23.9
花岗闪长岩(21HM39, 42°36'2.05"N, 91°51'14.47"E)																				
1	0.01	10.7	0.14	2.43	6.19	1.26	33.9	12.5	164	68.5	327	73.8	801	164	1666	20.8	1645	0.00001	0.27	59.7
2	<0.00	7.52	0.11	1.99	4.10	0.86	22.8	9.38	117	49.5	245	60.4	702	146	1366	14.6	1351	-	0.25	-
3	0.01	15.8	0.24	4.42	9.33	1.91	59.4	20.4	256	110	526	107	1043	221	2373	31.7	2342	0.00001	0.24	66.2
4	0.01	17.1	0.21	3.95	10.4	1.96	60.9	22.3	280	112	519	112	1094	217	2452	33.6	2418	0.00001	0.22	75.4
5	11.2	31.0	2.66	11.6	5.41	0.77	20.5	7.77	99.4	43.9	224	52.7	575	125	1211	62.6	1148	0.01400	0.27	1.47

续附表 1:

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe
花岗岩长岩(21HM39, 42°36'2.05"N, 91°51'14.47"E)																				
6	0.02	8.84	0.13	2.35	4.98	1.07	29.1	11.3	143	60.5	299	69.5	742	153	1525	17.4	1508	0.00002	0.29	39.3
7	0.79	7.04	0.29	1.74	2.28	0.50	12.5	5.16	68.3	30.7	162	39.1	439	98.5	868	12.7	855	0.00130	0.27	3.69
8	0.57	14.0	0.19	2.87	5.64	1.12	34.5	13.5	175	72.4	351	78.9	810	165	1725	24.3	1700	0.00050	0.24	10.6
9	0.01	11.7	0.20	3.25	7.66	1.50	40.4	15.5	200	85.0	417	93.8	980	207	2063	243	2039	0.00001	0.26	72.9
10	4.10	28.1	1.34	9.34	12.3	2.29	64.0	23.4	289	118	548	120	1186	241	2647	57.5	2589	0.00248	0.25	2.90
11	0.36	24.5	0.40	6.30	13.7	2.61	80.3	29.5	364	146	681	148	1441	285	3223	47.9	3175	0.00018	0.24	15.9
12	4.06	63.9	2.77	16.4	10.5	1.99	36.9	12.9	163	66.5	324	74.4	774	165	1717	100	1617	0.00376	0.31	4.79
13	0.23	16.2	0.29	4.52	9.74	1.86	55.4	20.0	252	102	485	106	1042	211	2306	32.9	2273	0.00016	0.24	15.3
14	2.98	18.8	1.37	8.45	8.90	1.51	42.2	16.0	201	81.6	390	93.9	931	191	1990	42.0	1948	0.00230	0.24	2.34
15	11.1	36.9	3.41	16.3	8.96	1.58	40.7	15.0	184	75.7	361	80.4	817	167	1819	78.2	1740	0.00976	0.25	1.54
16	0.01	4.71	0.05	0.83	1.87	0.38	10.7	4.60	64.7	29.0	156	39.5	446	101	861	7.86	853	0.00001	0.26	59.5
17	0.32	24.1	0.31	4.85	10.9	2.01	63.2	24.0	303	121	567	121	1183	235	2660	42.5	2617	0.00020	0.23	18.8
18	0.63	17.4	0.28	3.99	7.45	1.45	45.2	17.6	214	88.5	426	97.9	977	191	2087	31.1	2056	0.00046	0.24	10.2
19	0.26	10.4	0.16	2.27	5.49	1.04	28.7	11.2	149	61.3	282	61.4	64	140	1402	20.0	1382	0.00029	0.25	12.4
20	0.01	10.3	0.14	3.17	6.20	1.18	35.5	13.1	169	66.2	327	76.7	771	154	1631	21.2	1610	0.00001	0.24	78.2
21	0.01	4.14	0.03	0.65	1.72	0.32	9.72	3.78	49.8	22.2	121	31.9	372	77.8	695	6.87	688	0.00001	0.24	79.9
22	0.03	20.5	0.26	5.43	12.9	2.44	71.6	26.8	333	133	627	137	1329	262	2960	41.5	2919	0.00001	0.25	60.9
辉长闪长岩(21HM52, 42°35'10.34"N, 91°55'44.64"E)																				
1	0.03	16.0	0.36	5.41	9.60	1.27	55.2	19.6	241	97.7	437	88.7	818	155	1944	32.9	1912	0.00003	0.17	36.1
2	0.26	27.3	0.50	7.67	11.9	1.39	54.5	18.7	224	84.3	379	77.2	718	131	1736	49.0	1688	0.00026	0.17	18.6
3	0.18	7.76	0.05	1.05	1.65	0.33	9.85	3.42	44.5	18.4	88.4	19.1	185	36.7	416	11.1	405	0.00071	0.25	15.3
4	0.66	26.6	0.71	4.61	3.09	0.64	19.8	6.94	89.6	37.1	180	39.4	383	74.4	867	36.3	830	0.00123	0.25	9.68
5	0.04	16.1	0.23	3.97	8.32	1.03	46.3	15.8	186	71.5	324	65.7	605	117	1461	29.7	1431	0.00005	0.16	42.4
6	0.08	30.3	0.33	6.42	12.5	1.24	63.7	22.0	266	106	478	98.1	914	170	2168	50.9	2118	0.00006	0.13	46.7
7	0.20	38.3	0.66	8.99	15.0	2.08	89.6	32.2	387	154	691	138	1255	238	3050	65.2	2985	0.00012	0.17	25.7
8	0.07	18.3	0.35	5.77	10.1	1.27	52.9	18.2	205	79.6	349	70.6	653	120	1585	35.8	1549	0.00007	0.17	29.8
9	0.06	8.3	0.13	2.35	3.73	0.56	21.7	7.42	90.7	36.1	165	33.7	315	60.6	746	15.2	731	0.00015	0.19	22.0
10	0.01	19.3	0.05	1.30	2.99	0.35	17.8	6.97	88.1	35.6	170	37.1	356	68.8	804	24.0	780	0.00001	0.15	289.4
11	0.16	20.5	0.31	4.78	8.27	1.11	43.7	14.9	178	70.7	322	66.4	630	121	1481	35.1	1446	0.00018	0.18	22.8
12	0.31	75.4	0.98	14.6	27.3	2.65	143	48.9	572	220	971	194	1776	327	4374	121	4252	0.00012	0.13	33.7

续附表 1:

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe
辉长闪长岩(21HM52, 42°35'10.34"N, 91°55'44.64"E)																				
13	0.36	58.8	0.82	11.9	23.4	2.78	134	47.2	562	218	966	191	1723	317	4257	98.0	4159	0.00015	0.15	26.4
14	0.12	24.7	0.41	6.60	10.9	1.40	62.3	22.2	265	104	462	92.4	861	161	2074	44.2	2030	0.00010	0.16	27.3
15	0.07	21.1	0.31	4.90	9.05	0.78	46.1	15.8	189	75.8	339	68.4	643	121	1535	35.8	1499	0.00008	0.12	35.4
16	0.26	25.9	0.21	2.11	3.49	0.48	23.6	9.09	113	47.6	228	49.8	487	92.4	1082	32.5	1050	0.00038	0.16	27.2
17	0.07	47.7	0.60	10.2	20.6	2.35	114	39.3	462	178	770	153	1394	258	3449	81.5	3367	0.00005	0.15	46.6
18	<0.00	14.3	0.04	0.75	2.59	0.32	18.6	7.66	103	44.5	220	49.1	494	99.6	1054	18.0	1036	0.00000	-	-
19	0.30	32.8	0.65	8.66	14.0	1.45	71.7	24.8	293	114	512	104	957	180	2315	57.9	2257	0.00022	0.14	18.3
20	0.10	52.1	0.78	11.2	22.2	2.63	123	43.9	526	205	891	175	1595	293	3942	89.1	3853	0.00005	0.15	44.9
21	0.37	33.7	0.73	8.41	13.5	1.62	70.0	24.8	302	119	539	113	1048	196	2470	58.0	2412	0.00025	0.16	15.9
22	0.09	59.9	0.68	12.2	23.9	2.54	136	47.8	570	217	951	189	1695	310	4217	99.2	4118	0.00004	0.14	59.3
23	0.03	13.5	0.22	3.82	7.49	0.93	36.7	12.6	147	56.0	252	51.5	479	91.1	1151	25.9	1125	0.00005	0.27	38.0

附表 2 花岗闪长岩中角闪石电子探针分析结果(%)
Attached table 2 Electron probe micro analysis results of amphibole in the granodiorite (%)

点号	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
SiO ₂	45.86	46.66	47.33	46.49	46.51	47.27	46.31	46.55	47.06	46.48	47.31	46.48	47.66	46.38	47.23	46.64	46.62	47.69	47.16	46.02	47.12	46.61	46.90
TiO ₂	1.04	1.23	1.39	1.47	0.67	1.20	1.05	1.47	1.41	0.84	1.52	1.38	0.69	1.60	1.02	0.99	0.81	1.02	2.04	1.16	1.32	1.16	1.13
Al ₂ O ₃	6.22	6.14	6.50	6.75	6.60	5.37	6.41	6.58	6.63	6.05	6.30	6.66	5.82	6.64	5.48	5.95	6.20	5.22	5.44	6.74	6.50	6.55	5.83
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.07	0.00	0.08	0.01	0.01	0.00	0.10	0.00	0.10	0.06	0.04	0.04
NiO	0.00	0.04	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
FeO	19.87	19.30	17.92	18.37	18.24	19.68	18.63	18.05	18.28	19.24	17.21	19.84	19.30	19.62	19.29	19.58	18.65	18.32	16.59	19.73	19.52	18.98	18.90
MnO	0.99	0.93	0.72	0.79	0.80	1.12	0.92	1.02	0.96	0.69	0.52	0.97	1.00	1.10	1.14	0.94	0.96	1.04	0.88	0.92	0.96	0.87	1.02
MgO	9.93	10.11	11.23	11.09	10.45	10.18	11.02	10.93	10.74	10.29	11.85	9.54	10.18	9.84	10.12	10.03	9.87	11.25	11.27	9.34	10.20	10.38	10.16
CaO	10.83	10.93	10.64	10.56	11.27	10.69	10.47	10.68	10.79	11.25	10.44	10.86	11.42	10.61	10.79	10.46	11.28	10.93	11.14	11.70	10.53	10.76	11.07
Na ₂ O	1.05	1.12	1.43	1.34	1.01	1.00	1.00	1.29	1.19	1.19	1.51	1.12	0.90	1.37	1.00	1.14	0.94	1.08	0.92	1.04	1.32	1.19	1.08
K ₂ O	0.56	0.57	0.41	0.46	0.67	0.53	0.53	0.34	0.40	0.65	0.38	0.41	0.50	0.40	0.52	0.64	0.59	0.53	0.38	0.65	0.41	0.64	0.63
Total	95.69	96.29	97.17	96.95	95.62	96.22	95.82	96.22	96.81	96.21	96.88	96.63	96.66	96.82	95.71	95.75	95.09	96.39	95.09	96.58	97.30	96.58	95.90

续附表 2:

点号	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
以23个氧原子为基准																							
T-Si	7.05	7.04	7.02	6.93	7.05	7.10	6.97	6.97	7.01	7.05	7.03	7.00	7.15	6.96	7.15	7.07	7.11	7.14	7.12	6.97	7.02	7.00	7.10
T-Al ^{IV}	0.95	0.96	0.98	1.07	0.95	0.90	1.03	1.03	0.99	0.95	0.97	1.00	0.85	1.04	0.85	0.93	0.89	0.86	0.88	1.03	0.98	1.00	0.90
C-Al ^{VI}	0.18	0.13	0.16	0.11	0.23	0.05	0.11	0.13	0.17	0.13	0.13	0.18	0.18	0.13	0.12	0.14	0.23	0.06	0.09	0.18	0.16	0.16	0.14
C-Ti ⁴⁺	0.12	0.14	0.16	0.17	0.08	0.14	0.12	0.17	0.16	0.10	0.17	0.16	0.08	0.18	0.12	0.11	0.09	0.11	0.23	0.13	0.15	0.13	0.13
C-Cr ³⁺	0.00	-	0.00	0.01	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.01	-	0.01	0.00	0.00	-	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.00
C-Fe ³⁺	0.37	0.37	0.40	0.50	0.33	0.58	0.58	0.45	0.41	0.34	0.43	0.38	0.34	0.42	0.38	0.45	0.25	0.42	0.24	0.25	0.45	0.40	0.30
C-Ni ²⁺	-	0.01	-	0.01	-	-	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	-	-	-
C-Fe ²⁺	2.42	2.07	1.80	1.75	1.99	1.90	1.72	1.81	1.87	2.10	1.65	2.12	2.08	2.04	2.06	2.03	2.13	1.88	1.86	2.25	1.98	1.98	2.09
C-Mn ²⁺	-	0.01	-	-	0.02	0.06	-	0.00	0.00	0.01	-	0.02	0.05	0.02	0.04	-	0.05	0.02	0.04	0.07	-	-	0.04
C-Mg ²⁺	2.28	2.27	2.48	2.46	2.36	2.28	2.47	2.44	2.39	2.33	2.62	2.14	2.28	2.20	2.28	2.27	2.24	2.51	2.54	2.11	2.27	2.32	2.29
B-Fe ²⁺	0.14	-	0.03	0.04	-	-	0.05	-	-	-	0.06	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	0.01	0.01	-
B-Mn ²⁺	0.13	0.11	0.09	0.10	0.08	0.08	0.12	0.13	0.12	0.08	0.07	0.11	0.08	0.12	0.11	0.12	0.07	0.12	0.07	0.05	0.12	0.11	0.09
B-Ca ²⁺	1.74	1.77	1.69	1.69	1.83	1.72	1.69	1.71	1.72	1.83	1.66	1.75	1.84	1.71	1.75	1.70	1.84	1.75	1.80	1.90	1.68	1.73	1.80
B-Na ⁺	-	0.13	0.19	0.17	0.09	0.20	0.15	0.16	0.16	0.09	0.22	0.14	0.09	0.18	0.14	0.17	0.08	0.13	0.13	0.05	0.19	0.15	0.12
A-Na ⁺	0.31	0.20	0.22	0.22	0.21	0.10	0.15	0.22	0.18	0.26	0.22	0.19	0.18	0.22	0.15	0.16	0.19	0.18	0.14	0.25	0.19	0.19	0.20
A-K ⁺	0.11	0.11	0.08	0.09	0.13	0.10	0.10	0.06	0.08	0.13	0.07	0.08	0.10	0.08	0.10	0.12	0.12	0.10	0.07	0.13	0.08	0.12	0.12
Mg [#]	47.1	52.3	57.6	57.8	54.3	54.5	58.2	57.3	56.0	52.5	60.5	50.2	52.2	51.8	52.5	52.6	51.3	57.2	57.7	48.4	53.3	53.9	52.9
I -P(kbar)	97.1	92.2	98.6	105	104	75.4	98.6	101	102	91.0	93.7	105	84.3	103	78.2	88.7	95.4	72.2	77.3	108	99.1	101	85.5
I -d(km)	3.67	3.49	3.73	3.99	3.96	2.85	3.73	3.85	3.87	3.44	3.54	3.98	3.19	3.92	2.96	3.35	3.61	2.73	2.92	4.10	3.75	3.84	3.23
II -P(GPa)	0.11	0.10	0.11	0.12	0.12	0.07	0.11	0.12	0.12	0.10	0.10	0.12	0.09	0.12	0.08	0.10	0.11	0.07	0.08	0.13	0.11	0.12	0.09
II -d(km)	4.14	3.83	4.24	4.68	4.62	2.76	4.24	4.45	4.48	3.76	3.93	4.66	3.33	4.56	2.94	3.61	4.04	2.55	2.88	4.86	4.27	4.43	3.41
I -T(°C)	756	751	760	771	762	728	766	767	761	755	760	757	736	762	729	738	749	739	750	773	751	759	745
II -T(°C)	-	726	754	761	723	712	736	756	745	722	764	730	700	748	706	716	710	719	744	728	736	736	719
I -logfO ₂	-14.3	-14.5	-14.0	-13.7	-14.0	-14.9	-13.7	-13.9	-14.1	-14.3	-13.8	-14.5	-14.7	-14.4	-14.9	-14.6	-14.5	-14.3	-14.4	-14.3	-14.4	-14.2	-14.6
I -ΔNNO	0.52	0.44	0.70	0.71	0.62	0.58	0.89	0.64	0.57	0.54	0.88	0.22	0.55	0.26	0.56	0.57	0.41	0.91	0.57	0.06	0.46	0.54	0.45
I -H ₂ O _{melt}	5.70	5.66	5.63	5.55	6.01	5.37	5.50	5.99	6.18	5.29	5.18	6.59	6.20	6.10	5.65	5.42	6.29	4.99	5.45	6.26	6.08	5.59	5.46

注: I. 据 Ridolfi et al., 2010; II. 据 Putirka, 2016。

续附表 3:

普通辉石																					
点号	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9
SiO ₂	52.72	51.10	51.83	51.44	51.59	51.98	51.63	51.61	52.07	52.06	51.98	52.53	52.19	52.04	51.86	52.71	51.94	53.14	51.95	53.24	51.92
TiO ₂	0.23	0.38	0.43	0.42	0.37	0.37	0.41	0.48	0.48	0.38	0.29	0.44	0.48	0.48	0.42	0.46	0.37	0.33	0.38	0.12	0.41
Al ₂ O ₃	1.79	1.34	1.64	1.53	1.38	1.44	1.56	1.99	1.74	1.11	1.08	1.36	1.19	1.49	1.63	1.36	1.45	1.18	1.37	0.76	1.87
Cr ₂ O ₃	0.02	0.04	0.00	0.04	0.10	0.04	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.05	0.07	0.01	0.06	0.01	0.03	0.06
FeO	13.25	13.91	12.61	11.32	11.01	11.13	12.47	11.70	12.17	12.07	13.93	14.77	11.92	11.63	11.55	11.02	11.30	10.31	11.10	10.57	12.51
MnO	0.25	0.38	0.38	0.30	0.27	0.39	0.34	0.32	0.30	0.38	0.36	0.46	0.29	0.32	0.33	0.32	0.37	0.35	0.36	0.30	0.33
MgO	12.58	13.93	13.37	12.99	12.74	12.89	13.25	12.83	13.18	13.57	13.84	13.66	13.48	12.89	12.96	13.35	13.40	13.43	13.11	13.55	13.51
CaO	18.96	18.75	19.41	21.25	21.38	20.86	19.81	20.88	20.29	19.46	18.47	17.57	20.04	20.94	21.11	21.30	21.13	22.09	21.40	21.23	18.52
Na ₂ O	0.25	0.19	0.23	0.22	0.28	0.30	0.26	0.31	0.21	0.23	0.22	0.20	0.26	0.27	0.22	0.23	0.24	0.16	0.23	0.25	0.43
K ₂ O	0.04	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07
Total	100.09	100.03	99.89	99.53	99.15	99.41	99.78	100.13	100.45	99.26	100.16	100.99	99.86	100.13	100.15	100.81	100.22	101.06	99.90	100.06	99.63
以6个氧原子为基准																					
T-Si	1.99	1.93	1.95	1.94	1.96	1.97	1.95	1.94	1.95	1.97	1.96	1.97	1.97	1.96	1.95	1.96	1.94	1.97	1.95	1.99	1.96
T-Al ^{IV}	0.01	0.07	0.05	0.06	0.04	0.03	0.05	0.06	0.05	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.06	0.03	0.05	0.01	0.04
M1-Al ^{VI}	0.07	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.00	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04
M1-Fe ²⁺	0.48	0.35	0.38	0.32	0.32	0.35	0.36	0.34	0.37	0.38	0.40	0.47	0.37	0.36	0.34	0.34	0.31	0.33	0.32	0.34	0.37
M1-Mn ²⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
M1-Cr ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M1-Ti ⁴⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
M1-Mg ²⁺	0.43	0.64	0.57	0.65	0.64	0.60	0.59	0.61	0.58	0.57	0.57	0.48	0.59	0.60	0.62	0.61	0.65	0.63	0.64	0.62	0.57
M2-Mg ²⁺	0.27	0.14	0.19	0.09	0.09	0.13	0.15	0.11	0.16	0.19	0.20	0.29	0.16	0.13	0.11	0.13	0.10	0.12	0.09	0.14	0.20
M2-Ca ²⁺	0.77	0.76	0.78	0.86	0.87	0.85	0.80	0.84	0.81	0.79	0.74	0.71	0.81	0.84	0.85	0.85	0.85	0.88	0.86	0.85	0.75
M2-Na ⁺	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03
M2-K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.06	3.91	3.99	3.96	3.98	3.99	3.97	3.97	3.99	4.00	3.96	4.01	3.99	3.99	3.98	4.00	3.96	4.01	3.97	4.01	3.98
En	0.36	0.41	0.39	0.38	0.38	0.38	0.39	0.38	0.38	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.38	0.38	0.39	0.38	0.38	0.39	0.40
Fs	0.25	0.19	0.20	0.17	0.17	0.18	0.19	0.18	0.19	0.20	0.21	0.24	0.19	0.18	0.18	0.18	0.16	0.17	0.17	0.18	0.20
Wo	0.39	0.40	0.41	0.45	0.45	0.44	0.42	0.44	0.42	0.41	0.39	0.36	0.42	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45	0.45	0.44	0.40
Mg#	62.8	64.1	65.4	67.2	67.4	67.4	65.4	66.2	65.9	66.7	63.9	62.2	66.8	66.4	66.7	68.3	67.9	69.9	67.8	69.6	65.8
I-KdCpx	0.68	0.64	0.6	0.56	0.55	0.55	0.6	0.58	0.59	0.57	0.64	0.69	0.57	0.58	0.57	0.53	0.54	0.49	0.54	0.5	0.59
I-T(°C)	1143	1142	1133	1146	1157	1148	1152	1135	1147	1117	1129	1148	1145	1134	1139	1138	1120	1137	1154	1184	1138
I-P(kbar)	4.1	4.0	4.1	4.4	4.4	4.6	5.4	3.8	3.5	2.7	3.4	4.3	4.3	3.9	3.5	4.3	2.7	3.8	2.6	6.3	3.7

注: I. 据 Putirka, 2008。

附表4 卡拉塔格复式岩体不同岩石中斜长石电子探针分析结果(%)

Attached table 4 Electron probe micro analysis results of plagioclase in the different rocks from the Kalatage intrusions (%)

点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	NiO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SrO	Total	An	Ab	Or
辉长闪长岩																
1-1	59.70	0.03	25.40	0.00	0.18	0.05	0.00	0.00	7.66	7.02	0.42	0.04	101.00	51	47	3
1-2	58.70	0.05	25.70	0.01	0.23	0.01	0.03	0.00	8.41	6.57	0.49	0.06	100.00	54	43	3
1-3	57.40	0.00	26.50	0.00	0.25	0.00	0.02	0.02	8.80	6.31	0.46	0.05	99.80	57	41	3
1-4	55.90	0.02	27.10	0.05	0.28	0.01	0.00	0.00	9.83	5.49	0.37	0.00	99.00	63	35	2
1-5	56.80	0.05	26.80	0.02	0.30	0.02	0.00	0.00	9.61	5.60	0.40	0.00	99.60	62	36	3
1-6	55.60	0.00	27.50	0.01	0.23	0.02	0.01	0.01	10.30	5.48	0.25	0.02	99.50	64	34	2
1-7	50.90	0.09	30.00	0.00	0.36	0.01	0.03	0.00	13.30	3.18	0.16	0.00	98.10	80	19	1
1-8	52.90	0.02	29.10	0.00	0.40	0.01	0.01	0.03	12.30	4.07	0.26	0.00	99.10	74	24	2
1-9	53.30	0.03	28.30	0.01	0.50	0.04	0.01	0.02	11.50	4.73	0.29	0.00	98.70	70	29	2
1-10	54.30	0.03	28.40	0.00	0.40	0.00	0.01	0.04	11.50	4.81	0.34	0.00	99.80	69	29	2
1-11	54.40	0.04	28.00	0.01	0.27	0.00	0.02	0.00	11.20	4.78	0.34	0.02	99.00	69	29	2
1-12	54.00	0.06	28.10	0.00	0.39	0.00	0.00	0.03	11.40	4.67	0.31	0.00	99.00	70	29	2
1-13	53.50	0.03	28.70	0.00	0.39	0.03	0.01	0.00	11.50	4.63	0.31	0.03	99.20	70	28	2
1-14	52.80	0.06	28.60	0.00	0.37	0.01	0.04	0.01	12.20	4.38	0.25	0.00	98.70	73	26	1
2-1	53.90	0.04	28.70	0.04	0.40	0.01	0.00	0.03	11.50	4.55	0.22	0.07	99.50	71	28	1
2-2	52.20	0.00	30.30	0.00	0.43	0.01	0.07	0.02	13.30	3.70	0.14	0.10	100.00	78	22	1
2-3	53.30	0.07	28.90	0.00	0.41	0.01	0.00	0.03	11.80	4.39	0.27	0.01	99.10	72	27	2
2-4	54.10	0.00	28.40	0.00	0.45	0.01	0.00	0.03	11.50	4.79	0.23	0.02	99.60	70	29	1
2-5	51.00	0.02	30.30	0.00	0.43	0.04	0.00	0.02	13.90	3.38	0.19	0.00	99.20	80	19	1
2-6	55.80	0.00	27.80	0.00	0.34	0.02	0.00	0.03	10.50	5.30	0.34	0.00	100.00	65	33	2
3-1	56.10	0.00	27.60	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	9.90	5.40	0.33	0.00	99.60	63	35	2
3-2	54.70	0.00	28.00	0.04	0.39	0.00	0.00	0.00	11.00	5.05	0.26	0.00	99.40	67	31	2
3-3	54.70	0.00	27.90	0.00	0.31	0.01	0.00	0.02	11.00	5.02	0.28	0.03	99.30	68	31	2
3-4	54.40	0.00	28.30	0.00	0.30	0.03	0.00	0.01	11.60	4.75	0.29	0.03	99.70	70	29	2
3-5	53.80	0.00	28.70	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	11.50	4.63	0.25	0.00	99.20	70	28	2
3-6	50.80	0.00	30.00	0.06	0.44	0.00	0.07	0.01	13.40	3.56	0.13	0.01	98.50	78	21	1
3-7	53.60	0.01	28.50	0.00	0.36	0.00	0.06	0.00	11.40	4.74	0.29	0.08	99.00	69	29	2
3-8	55.70	0.06	27.50	0.00	0.17	0.00	0.00	0.01	10.60	5.36	0.21	0.00	99.60	66	33	1
3-9	54.60	0.02	28.10	0.00	0.31	0.00	0.01	0.07	10.30	5.30	0.22	0.00	98.90	65	33	1

续附表 4:

点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	NiO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SrO	Total	An	Ab	Or
辉长闪长岩																
3-10	56.70	0.00	26.90	0.00	0.22	0.00	0.04	0.03	9.92	5.78	0.24	0.05	99.90	62	36	2
3-11	50.30	0.04	29.40	0.15	0.29	0.00	0.00	0.01	12.58	3.48	0.72	0.00	97.10	75	21	4
花岗闪长岩																
1-1	58.20	0.03	25.40	0.00	0.20	0.02	0.00	0.06	7.17	6.41	0.50	0.13	98.20	51	46	4
1-2	55.60	0.00	27.40	0.03	0.14	0.00	0.00	0.00	10.00	5.69	0.20	0.00	99.10	63	36	1
1-3	58.10	0.00	25.80	0.03	0.21	0.00	0.00	0.06	6.56	6.64	1.07	0.15	98.70	46	47	8
1-4	56.60	0.00	26.90	0.00	0.11	0.00	0.00	0.01	9.54	5.93	0.25	0.05	99.40	61	38	2
2-1	51.80	0.02	29.20	0.00	0.32	0.01	0.03	0.16	11.20	4.00	1.17	0.00	98.00	69	24	7
2-2	54.90	0.06	27.50	0.00	0.12	0.02	0.00	0.00	10.60	5.35	0.22	0.00	98.80	66	33	1
2-3	57.20	0.00	26.50	0.00	0.13	0.00	0.02	0.01	8.88	6.10	0.25	0.00	99.00	58	40	2
3-1	56.40	0.00	26.70	0.15	0.16	0.01	0.08	0.00	9.10	6.11	0.35	0.09	99.20	59	39	2
3-2	56.40	0.00	26.80	0.00	0.19	0.02	0.00	0.01	9.30	6.05	0.21	0.12	99.00	60	39	1
3-3	57.40	0.01	26.70	0.01	0.20	0.00	0.04	0.02	9.07	6.13	0.27	0.02	99.80	59	40	2
3-4	56.80	0.00	26.80	0.02	0.22	0.01	0.00	0.01	9.12	6.21	0.25	0.07	99.50	59	40	2
3-5	57.00	0.01	26.60	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	9.44	6.17	0.21	0.06	99.60	60	39	1
花岗岩																
1-1	62.40	0.02	22.80	0.09	0.57	0.00	0.00	0.33	1.21	8.78	2.36	0.00	98.50	10	71	19
1-2	65.10	0.01	19.50	0.20	0.30	0.03	0.00	0.32	0.85	10.80	0.13	0.03	97.30	7	92	1
1-3	66.80	0.03	20.10	0.04	0.21	0.00	0.00	0.00	1.58	10.90	0.36	0.02	100.00	12	85	3
1-4	65.10	0.01	21.70	0.00	0.26	0.02	0.03	0.10	0.27	10.10	0.59	0.09	98.30	3	92	5
1-5	68.60	0.04	19.70	0.07	0.25	0.05	0.00	0.01	0.78	12.00	0.11	0.11	102.00	6	93	1
1-6	67.50	0.00	19.90	0.00	0.14	0.01	0.00	0.04	0.59	11.30	0.52	0.09	100.00	5	91	4
1-7	68.50	0.03	19.00	0.01	0.28	0.03	0.00	0.15	0.27	11.70	0.26	0.13	100.00	2	96	2
1-8	66.80	0.01	20.30	0.02	0.08	0.03	0.05	0.04	1.23	11.50	0.61	0.12	101.00	9	86	5