



引文格式: 李丽娟, 张涛, 李强, 等. 西天山阿吾拉勒西段石炭纪花岗岩与暗色包体岩石成因及地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 73-90. DOI: 10.12401/j.nwg.2024011

Citation: LI Lijuan, ZHANG Tao, LI Qiang, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of Carboniferous Granites and Its Dark Enclaves in the Western Awulale Mountain, Western Tianshan[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 73-90. DOI: 10.12401/j.nwg.2024011

西天山阿吾拉勒西段石炭纪花岗岩与暗色包体 岩石成因及地质意义

李丽娟¹, 张涛¹, 李强^{2,*}, 俞杰², 何立², 程学芹², 赵力颖²

(1. 河南地矿职业学院, 河南 郑州 451464; 2. 河北省区域地质调查院/河北省地学旅游研究中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 西天山出露的古生代岩浆岩的岩石成因及动力学背景对于恢复区域构造演化历史具有重要意义。笔者选取阿吾拉勒西段巩乃斯种羊场北西地区的花岗岩及其中暗色包体进行了岩石学研究、锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学分析。研究表明暗色包体为细粒闪长岩, 闪长质包体 $K_2O=0.93\sim 2.50$, $K_2O/Na_2O=0.20\sim 0.21$, $A/CNK=0.83\sim 0.87$, 里特曼指数 $\sigma=2.33\sim 3.02$, 为准铝质钙碱性岩石系列。寄主花岗岩 $K_2O=2.92\sim 3.48$, 含量较高, $K_2O/Na_2O=0.60\sim 0.79$, 里特曼指数 $\sigma=1.87\sim 2.17$, $A/CNK=1.01\sim 1.04$, 为弱过铝质钙碱性系列岩石, 属 I 型花岗岩。二者均富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Pb 等, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti, 稀土总量较低, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损。闪长质包体无显著 Eu、Sr 异常, 而花岗岩具明显的负 Eu 异常, 且 Sr、P、Ti 元素强烈亏损。锆石 U-Pb 测年结果显示花岗岩成岩年龄为 (320.0 ± 2.7) Ma, 属晚石炭世早期; 闪长质包体成岩时代为 (344.5 ± 1.4) Ma, 属早石炭世中期。闪长质包体类型为捕虏体, 是寄主花岗质岩浆上位过程中捕获的围岩。岩石地球化学和年代学特征揭示二者有不同的成因, 闪长质包体为早期北天山洋南向俯冲过程中形成的, 而花岗岩侵位于后碰撞伸展环境, 是由于软流圈上涌加热导致基性下地壳部分熔融而成。综合区域地质资料分析, 早晚石炭世之交很可能是西天山区域构造体制转换的重要阶段, 即由碰撞挤压环境转化为伸展拉张环境。

关键词: 西天山; 花岗岩; 包体; 锆石 U-Pb; 岩石成因

中图分类号: P581; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0073-18

Petrogenesis and Tectonic Implications of Carboniferous Granites and Its Dark Enclaves in the Western Awulale Mountain, Western Tianshan

LI Lijuan¹, ZHANG Tao¹, LI Qiang^{2,*}, YUN Jie², HE Li², CHENG Xueqin², ZHAO Liying²

(1. Henan Geology Mineral College, Zhengzhou 451464, Henan, China; 2. Regional Geological Survey Institute of Hebei Province / Geotourism Research Center of Hebei Province, Langfang 065000, Hebei, China)

收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2023-12-14; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502061), 中国地质调查局项目(1212011220649)联合资助。

作者简介: 李丽娟(1985-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事地质学教学研究工作。E-mail: 992346354@qq.com。

* 通讯作者: 李强(1986-), 男, 硕士, 工程师, 从事岩石学与区域矿产地质调查研究工作。E-mail: 1032564223@qq.com。

Abstract: The petrogenesis and dynamic background of the magmatic rocks in the West Tianshan Mountains are of great significance to reveal the tectonic evolution history of the restoration area. In this paper, the granite and its dark enclaves in the northwestern area of Kunes Zhongyangchang in the western Awulale Mountain were selected for petrology and zircon U-Pb chronology and petrogeochemical analysis. The results show that the dark enclaves are fine-grained diorite, with $K_2O=0.93\sim 2.50$, $K_2O/Na_2O=0.20\sim 0.21$, $A/CNK=0.83\sim 0.87$ and $\sigma=2.33\sim 3.02$, which are quasi-aluminous calc-alkaline rock series. Host granites belong to I type granites with $K_2O=2.92\sim 3.48$, $K_2O/Na_2O=0.60\sim 0.79$, Ritman index $\sigma=1.87\sim 2.17$, and $A/CNK=1.01\sim 1.04$, which are weakly peraluminous calc-alkaline rock series. Both of them are enriched in large ion lithophile elements (LILE, e.g. Rb, Ba, Pb) and depleted in high field strength elements (HSFE, e.g. Nb, Ta, Ti), The total amount of rare earth elements is low, accompanied by the relative enrichment of light rare earth elements, and the relative loss of heavy rare earth element. The diorite enclaves have no significant Eu and Sr anomalies, while the granites have obvious negative Eu anomalies and strong loss of Sr, P and Ti elements. Zircon U-Pb dating shows that the formation age of granite is (320.0 ± 2.7) Ma, belonging to the early Late Carboniferous. The diagenetic age of the diorite enclaves is (344.5 ± 1.4) Ma, belonging to the Early Carboniferous. The type of diorite enclaves is xenolith, which were captured during the rising of the host granitic magma. The geochemical and chronological characteristics of the rocks reveal that they have different petrogenesis. The dioritic enclaves were formed during the northern Tianshan Ocean subduction southward, and the granite intrusion was located in the post-collision extension environment, which was formed due to the upwelling of the asthenosphere, leading to the partial melting of the lower crust. Based on regional geological data, it is likely that the early Carboniferous to late Carboniferous is an important stage of tectonic system transformation in the western Tianshan Mountain, that is, the tectonic environment transformed from compression to extension.

Keywords: Western Tianshan; granite; enclave; zircon U-Pb dating; petrogenesis

中亚造山带由塔里木板块、西伯利亚板块、哈萨克板块等多地体之间的古亚洲洋板块经复杂俯冲增生-碰撞造山作用而形成的典型增生型造山带,其作为全球显生宙大陆生长最显著的地区,引发了许多学者的关注和研究(Coleman, 1989; Windley et al., 1990; Allen et al., 1992; Gao et al., 1998; 李锦轶等, 2006a; 2006b; 刘新等, 2012; 张永玲等, 2024)。位于古亚洲洋构造域中南缘的西天山地区发育大量的古生代岩浆岩,其中伊犁-中天山地块北缘早古生代岩浆岩是北天山洋早期南向俯冲的结果(Huang et al., 2013),而分布范围更广的泥盆纪—石炭纪岩浆岩为北天山洋俯冲中晚期的产物(Wang et al., 2020; 王盟等, 2023),而早二叠世A型花岗岩是后碰撞环境的产物(Li et al., 2015)。以上可以看出,石炭纪是北天山洋演化的关键时期, Han et al.(2018)综合前人资料认为北天山洋西段于 325~316 Ma 之间闭合,但确切的闭合时间仍需进一步研究,部分学者认为早石炭末期(~320)北天山洋仍在俯冲(汪帮耀等, 2011; 张博等, 2015),另有学者认为 320~310 Ma 期间已经处于同碰撞挤压向

后碰撞伸展转换阶段(王建中等, 2021)。

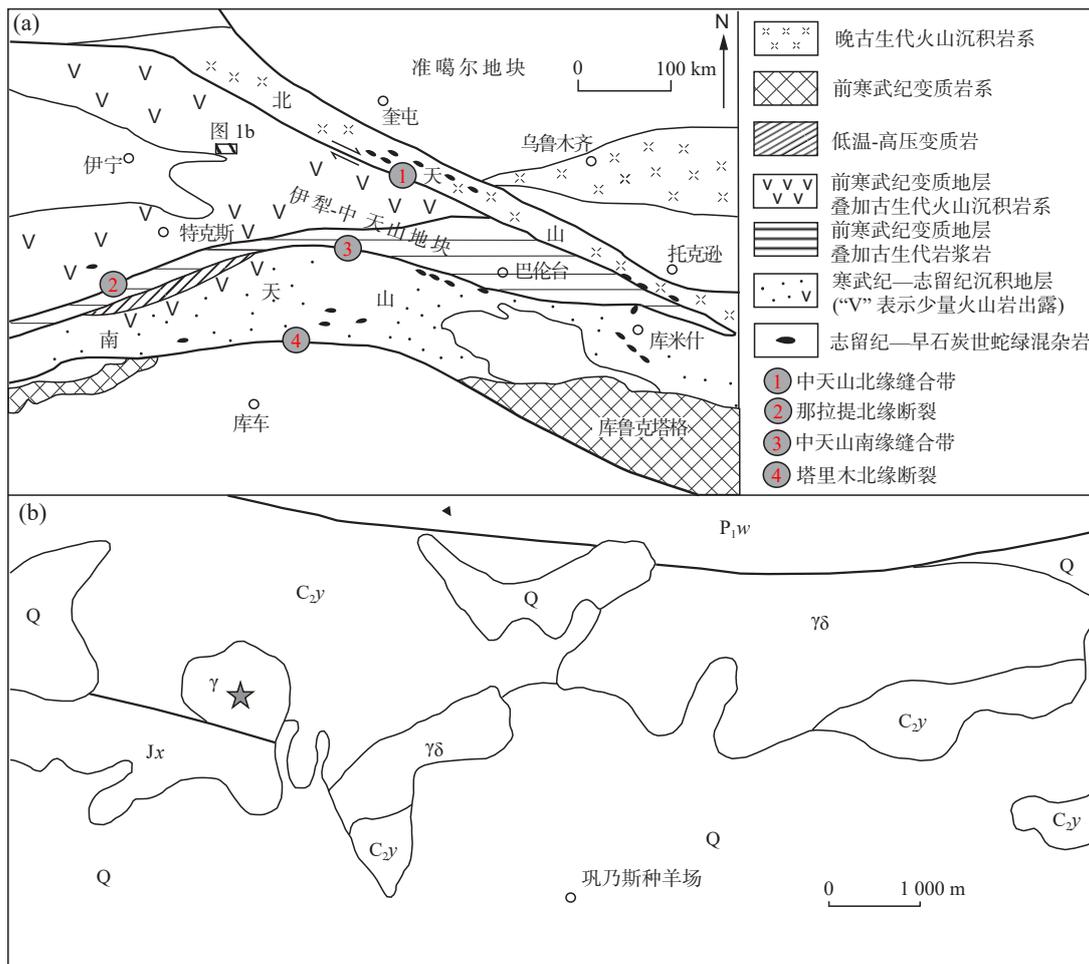
阿吾拉勒山地处伊犁-中天山地块中部,发育大量的晚古生代侵入岩,其岩石成因的研究对理解西天山造山带的形成和演化具有重要意义。其中石炭纪侵入岩以偏铝和过铝质花岗岩为主,二叠纪岩体岩性以富钾花岗岩为主(Long et al., 2011; 朱志新等, 2011)。关于阿吾拉勒山晚古生代时期的构造背景仍有争议,一种观点认为是伊利-中天山南缘活动陆缘的一部分,与南天山洋向北俯冲有关(Gao et al., 1998; 刘新等, 2012),另一种观点认为是伊利地块北部活动陆缘的一部分,与北天山洋的南向俯冲有成因联系(Wang et al., 2006; 汪帮耀等, 2011; 闫永红等, 2013; 张博等, 2015; 丁振信, 2019)。前人研究主要集中在阿吾拉勒中东段,而对西段岩浆岩的研究程度相对较低,这制约了区域构造背景的研究。笔者对阿吾拉勒西段巩乃斯种羊场北西花岗质岩体及其中的闪长质包体进行了岩石学、岩石地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,探讨了该岩体及其包体的岩石成因和形成环境,为研究区及西天山造山带的构造地质演化提

供了基础资料。

1 地质背景

西天山自北向南以中天山北缘缝合带, 中天山南缘缝合带为界, 分为北天山构造带、伊犁-中天山地块和南天山构造带(图 1a)。北天山构造带是准噶尔地块和伊犁-中天山地块之间的北天山洋于古生代南向俯冲消减时形成的增生楔, 主要地质体包括晚泥盆世—早石炭世蛇绿岩、晚泥盆世—石炭纪复理石、晚石炭世火山岩、晚二叠世及之后的陆相地层(王盟等, 2023); 伊犁-中天山地块为一个具有前寒武结晶基底的微陆块, 广泛发育古生代沉积岩和岩浆岩, 中部被中新生代沉积物覆盖, 向西进入哈萨克斯坦境内(王博等, 2022); 南天山构造带是哈萨克斯坦板块和塔里

木板块之间的缝合带(徐学义等, 2014), 主体由古生代海相沉积岩组成, 同时也发育有古生代侵入岩和火山岩(王博等, 2022)。阿吾拉勒构造带位于伊犁-中天山地块中部, 最新地质调查成果显示, 该构造带发育有前寒武系变质基底、石炭系—二叠系火山-沉积岩、新近系和第四系等地层。其中, 前寒武地层为新元古代晚期科克苏群, 为一套麻粒岩相变质地层(赵军, 2013), 石炭系—二叠系火山沉积岩自下而上分别为下石炭统大哈拉军山组钙碱性火山岩, 阿克沙克组碳酸盐岩-碎屑岩, 上石炭统伊石基里克组碱性双峰式火山岩、科古琴山组碎屑岩-碳酸盐岩, 下二叠统乌郎组双峰式火山岩、塔尔得套组双峰式火山岩夹碎屑岩, 中二叠统晓山萨依组磨拉石建造、哈密斯特组碎屑岩及火山岩、塔姆其萨依组碎屑岩, 上二叠统巴斯尔干组碎屑岩(李永军等, 2009; 赵军, 2013)。



Jx. 科克苏群; P_{1w}. 乌郎组; C_{2y}. 伊什基里克组; Q. 第四系; γ. 花岗岩; γδ. 花岗闪长岩; ★. 本次采样位置

图1 中国西天山地质简图(a 据 Long et al., 2011 修)和研究区地质简图(b)

Fig. 1 (a) Simplified geological map of western Tianshan and (b) the distribution of the granites and enclaves in the study region

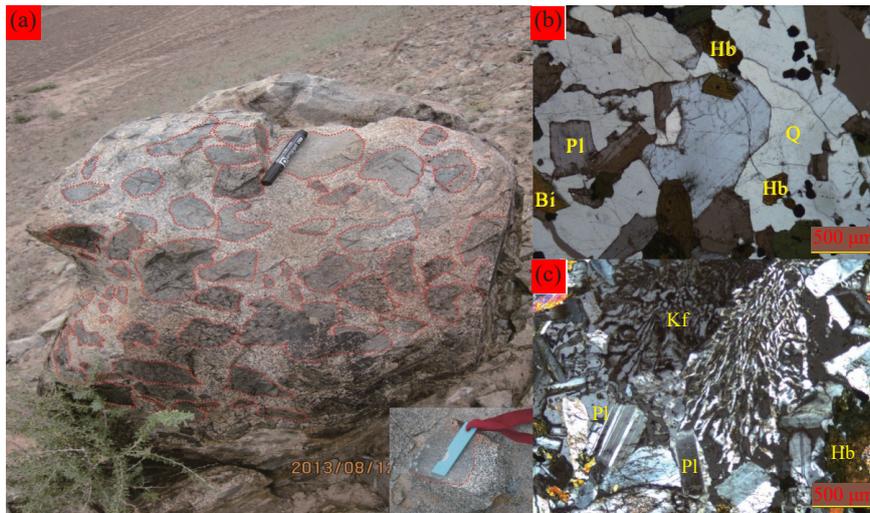
巩乃斯种羊场北西花岗岩体位于阿吾拉勒构造带西段,前人将研究区内出露地层划分为中元古界科克苏群、晚石炭统伊什基里克组和早二叠统乌郎组,它们之间均呈断层接触(图1b)。中元古界科克苏群主要为一套片麻岩夹变粒岩、大理岩的岩石组合,代表了伊利地块的变质结晶基底(李继磊等,2009);晚石炭统伊什基里克组主要为一套火山沉积岩系,岩性主要为流纹质火山凝灰岩、流纹岩、粗安岩夹砂岩、砾岩;早二叠统乌郎组为一套火山岩,主要由安山岩和凝灰岩组成;前人根据岩体与侵入地层的关係,认为研究区内的深成侵入岩形成时代为早二叠世至晚二叠世,背景为陆内裂谷环境(江西省地质矿产勘探开发局,2005)。

2 岩相学特征

本次样品采自于阿吾拉勒山西段巩乃斯种羊场

NW 218 国道北侧(E 82°32'06"、N 43°36'02")(图1b)。该岩体呈岩株、岩枝状产出,围岩为中酸性火山碎屑岩,岩体长轴方向近南北向展布,出露面积约为0.1 km²,岩性为花岗岩,岩体内部发育大量暗色包体,包体大小不一,大者直径可达30~40 cm,小者为2~5 cm,多数为10~20 cm;包体形态主要呈不规则状、棱角状,少量呈椭圆状,与寄主花岗岩之间的接触界线明显,边界清晰(图2a)。

花岗岩呈灰白色,细中粒花岗结构,块状构造。主要由钾长石(30%~40%)、斜长石(10%~20%)、石英(25%~40%)和少量黑云母(±5%)、角闪石(±5%)组成。副矿物主要为磁铁矿、榍石、磷灰石和锆石等。钾长石为正长石,呈半自形-他形晶,粒径多为1.5~4.0 mm,斜长石呈粒度相对较小的板状自形-半自形晶,部分被钾长石包裹。角闪石常呈自形-半自形柱状,个别见有六边形晶型,粒度多小于1.0 mm(图2b)。



a. 寄主花岗岩及闪长质包体野外特征; b. 花岗岩镜下特征; c. 闪长质包体镜下特征;
Q. 石英; Hb. 角闪石; Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Bi. 黑云母

图2 寄主花岗岩及闪长质包体野外照片及正交偏光显微照片

Fig. 2 Field photographs and cross-polarized micrographs of host granites and diorite inclusions

暗色包体呈灰色,细粒结构、块状构造,矿物粒度多在0.2~0.5 mm。主要由斜长石(55%~60%)、角闪石(20%~30%)及少量钾长石(5%~10%)、石英(1%~5%)构成,黑云母少见,副矿物有磁铁矿、钛铁矿、榍石、磷灰石和锆石等。斜长石多呈自形-半自形板状,聚片双晶、环带结构发育。角闪石多呈半自形柱粒状,部分呈他形粒状填隙在斜长石之间。钾长石呈不规则状交代斜长石,形成交代蠕虫结构(图2c)。部分斜

长石有弱的绢云母化,角闪石有轻微的绿泥石化。上述岩石的结构、构造及矿物组成显示该暗色包体的原岩为细粒闪长岩。

3 分析方法

锆石的分选、样品靶制备在廊坊市河北省区域地质调查院实验室完成。阴极发光(CL)显微照相在长

安大学实验室完成。锆石 LA-ICP-MS(激光剥蚀等
离子体质谱)原位微区 U-Th-Pb 同位素测定在西北大
学大陆动力学重点实验室完成。锆石 U-Pb 原位定年
分析所采用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产 Agi-
lent7500a, 激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产
GeoLas200M。激光剥蚀斑束的直径为 30 μm , 剥蚀深
度为 20~40 μm 。年龄采用标准锆石 91 500 作为外部
标准物质。元素含量以 NISTSRNI 610 作为外标。
 ^{29}Si 作为内标元素进行校正。测试过程中尽量选择阴

极发光中环带明显且无包裹体的锆石进行分析。年
龄计算及谐和图的制作采用 Isoplot/Ex(ver2.94)程序
完成。详细的实验原理及流程参见 Kosler 等(2002)、
袁洪林等(2003)。分析结果见表 1、表 2。

样品的主量、微量和稀土元素均在中国地质调查
局西安地质调查中心测试中心完成。主量元素采用
XiOS4.0KWX 荧光光谱仪进行分析, 稀土和微量元素
用离子质谱仪 ICP-MS 测试, 检测环境温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,
湿度为 66%。分析精度均优于 5%。测试结果见表 3。

表 1 花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试数据
Tab. 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb analytical data of granites

测点	含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U		1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
1	207	229	0.91	0.053 0	0.002 4	0.368 5	0.016 7	0.050 4	0.000 3	327.5	102.6	318.5	14.5	317.3	2.1
2	140	159	0.88	0.053 1	0.003 7	0.382 1	0.026 5	0.052 2	0.000 4	333.0	156.0	328.6	22.8	328.0	2.3
3	156	196	0.80	0.053 4	0.002 5	0.374 2	0.018 1	0.050 8	0.000 4	347.3	107.3	322.8	15.6	319.4	2.5
4	289	226	1.28	0.052 9	0.001 8	0.383 8	0.013 0	0.052 6	0.000 4	326.1	75.6	329.8	11.2	330.4	2.2
5	191	187	1.03	0.053 3	0.002 7	0.369 3	0.018 8	0.050 2	0.000 3	342.6	114.6	319.1	16.2	315.9	2.1
6	159	166	0.96	0.053 6	0.003 4	0.371 5	0.023 9	0.050 3	0.000 4	354.7	144.1	320.8	20.6	316.1	2.3
7	344	297	1.2	0.053 6	0.001 4	0.383 2	0.010 3	0.051 9	0.000 3	353.6	59.9	329.4	8.9	325.9	2.1
8	137	168	0.82	0.052 8	0.002 7	0.372 1	0.019 4	0.051 1	0.000 4	321.2	117.6	321.2	16.8	321.2	2.3
9	272	263	1.04	0.053 1	0.001 9	0.382 7	0.013 6	0.052 2	0.000 3	334.8	79.3	329.0	11.7	328.2	2.2
10	206	242	0.86	0.053 6	0.002 5	0.370 3	0.017 7	0.050 1	0.000 3	354.5	106.5	319.9	15.3	315.1	2.2
11	141	161	0.88	0.053 2	0.004 0	0.363 7	0.027 2	0.049 6	0.000 4	335.3	169.5	315.0	23.6	312.2	2.5
12	64	102	0.63	0.053 3	0.004 1	0.362 4	0.028 1	0.049 3	0.000 5	343.0	174.6	314.0	24.3	310.2	2.9
13	122	162	0.76	0.052 9	0.002 0	0.372 9	0.015 3	0.051 1	0.000 4	339.7	87.4	309.1	12.2	305.1	2.2
14	93	120	0.78	0.052 8	0.005 1	0.377 3	0.036 2	0.051 8	0.000 4	324.9	87.2	321.8	13.2	321.4	2.8
15	101	136	0.75	0.052 9	0.003 2	0.377 2	0.022 8	0.051 7	0.000 4	319.9	218.2	325.0	31.2	325.8	2.7
16	70	133	0.53	0.053 8	0.004 5	0.372 0	0.031 2	0.050 2	0.000 4	274.3	234.9	266.9	27.2	266.0	2.3
17	73	111	0.66	0.053 6	0.006 4	0.373 4	0.044 5	0.050 5	0.000 5	325.9	136.7	325.0	19.6	324.9	2.8
18	123	193	0.64	0.053 6	0.002 9	0.366 5	0.019 9	0.049 6	0.000 3	360.6	188.0	321.2	26.9	315.8	2.6
19	101	129	0.78	0.053 3	0.002 6	0.370 1	0.018 4	0.050 4	0.000 4	354.2	267.7	322.1	38.4	317.7	3.0
20	80	99	0.81	0.053 2	0.003 7	0.374 6	0.027 0	0.051 1	0.000 6	563.1	92.5	361.4	15.5	330.7	2.2
21	160	150	1.07	0.053 4	0.002 3	0.379 1	0.016 6	0.051 5	0.000 4	353.3	123.1	317.0	17.3	312.1	2.1
22	14	215	0.06	0.058 9	0.002 5	0.427 5	0.018 4	0.052 6	0.000 4	341.3	111.2	319.7	15.9	316.8	2.7
23	176	164	1.07	0.053 5	0.003 1	0.404 7	0.023 5	0.054 8	0.000 4	351.1	131.6	345.1	20.1	344.2	2.8
24	82	94	0.88	0.053 4	0.002 0	0.403 4	0.015 7	0.054 8	0.000 5	335.8	158.8	323.1	23.3	321.3	3.7
25	60	87	0.69	0.053 4	0.002 5	0.401 0	0.019 8	0.054 5	0.000 7	343.8	84.8	344.1	13.4	344.1	3.4
26	205	198	1.03	0.053 0	0.002 2	0.393 4	0.016 5	0.053 8	0.000 4	344.9	107.0	342.3	16.9	342.0	4.6

表2 闪长质包体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试数据

Tab. 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb analytical data of diorite enclaves

测点	含量 (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
1	150	284	0.53	0.053 8	0.003 3	0.405 0	0.025 8	0.054 6	0.000 4	361.5	140.3	345.3	22.0	342.9	2.6
2	239	344	0.69	0.001 4	0.001 4	0.482 5	0.012 8	0.063 6	0.000 4	413.7	57.7	399.8	10.6	397.4	2.7
3	157	284	0.55	0.054 0	0.002 0	0.408 6	0.015 3	0.054 9	0.000 3	371.8	83.7	347.8	13.0	344.3	2.1
4	153	262	0.59	0.053 3	0.002 6	0.400 0	0.019 5	0.054 5	0.000 3	340.0	111.1	341.6	16.7	341.8	2.0
5	218	413	0.53	0.054 3	0.001 6	0.409 1	0.012 5	0.054 7	0.000 3	382.3	67.9	348.2	10.6	343.1	1.9
6	225	424	0.53	0.053 8	0.002 3	0.395 3	0.016 8	0.053 3	0.000 3	364.3	95.3	338.2	14.4	334.5	2.0
7	256	369	0.69	0.053 7	0.001 6	0.410 7	0.012 5	0.055 5	0.000 3	356.9	67.3	349.4	10.6	348.2	1.9
8	311	505	0.62	0.054 2	0.001 6	0.407 6	0.011 9	0.054 6	0.000 3	377.7	64.8	347.2	10.1	342.6	2.0
9	426	597	0.71	0.053 5	0.001 0	0.408 2	0.008 2	0.055 3	0.000 3	351.3	44.0	347.6	7.0	347.0	2.2
10	139	929	0.45	0.053 9	0.001 4	0.412 2	0.010 3	0.055 5	0.000 3	365.1	56.8	350.4	8.8	348.2	1.9
11	232	366	0.63	0.053 7	0.001 2	0.410 2	0.009 6	0.055 4	0.000 3	360.5	51.5	349.0	8.2	347.3	2.0
12	170	347	0.49	0.053 5	0.001 6	0.404 5	0.012 4	0.054 9	0.000 3	348.7	68.7	344.9	10.6	344.3	2.0
13	135	237	0.57	0.053 4	0.003 0	0.405 6	0.022 9	0.055 0	0.000 3	347.7	125.5	345.7	19.5	345.4	2.2
14	294	402	0.73	0.054 1	0.001 5	0.409 6	0.011 7	0.054 9	0.000 3	375.2	64.2	348.6	10.0	344.6	2.2
15	195	348	0.56	0.054 0	0.002 0	0.406 6	0.015 0	0.054 6	0.000 3	370.6	82.5	346.4	12.8	342.8	2.0
16	147	285	0.52	0.053 6	0.002 0	0.405 8	0.015 5	0.055 0	0.000 3	352.2	85.2	345.8	13.2	344.9	2.0
17	110	346	0.32	0.053 9	0.001 6	0.413 0	0.012 8	0.055 5	0.000 3	368.2	67.9	351.0	10.9	348.4	2.1
18	205	404	0.51	0.054 0	0.001 3	0.407 7	0.010 3	0.054 7	0.000 3	372.2	56.1	347.2	8.7	343.5	2.0
19	243	426	0.57	0.054 1	0.001 5	0.405 4	0.011 4	0.054 4	0.000 3	374.5	62.1	345.5	9.7	341.2	1.9
20	200	319	0.06	0.053 6	0.002 0	0.403 7	0.014 8	0.054 6	0.000 3	353.3	82.4	344.3	12.6	343.0	1.9
21	136	256	0.53	0.053 6	0.002 0	0.404 0	0.014 7	0.054 6	0.000 3	356.0	82.2	344.6	12.6	342.9	2.0
22	180	421	0.43	0.053 7	0.001 2	0.410 4	0.009 4	0.055 4	0.000 3	357.9	50.8	349.2	8.0	347.9	2.2
23	320	516	0.62	0.054 0	0.001 3	0.403 9	0.010 1	0.054 3	0.000 3	332.2	75.8	350.1	12.0	352.8	2.0
24	271	457	0.59	0.053 7	0.001 3	0.411 4	0.009 8	0.055 6	0.000 4	369.1	55.4	344.5	8.6	340.8	2.0
25	266	559	0.48	0.054 1	0.001 4	0.412 2	0.010 3	0.055 2	0.000 3	363.6	66.4	341.5	10.2	338.3	1.9
26	181	349	0.52	0.053 7	0.001 5	0.404 7	0.011 5	0.054 6	0.000 3	357.3	54.0	349.8	8.3	348.7	2.3
27	126	281	0.45	0.054 0	0.002 5	0.409 7	0.019 2	0.055 0	0.000 3	377.2	56.2	350.4	8.8	346.4	2.0
28	202	387	0.52	0.053 8	0.001 6	0.412 0	0.012 5	0.055 5	0.000 3	360.6	62.6	345.1	9.8	342.8	2.0
29	226	395	0.57	0.053 8	0.001 5	0.408 0	0.011 2	0.055 0	0.000 3	371.9	105.6	348.7	16.4	345.2	2.2
30	239	344	0.69	0.055 0	0.001 4	0.482 5	0.012 8	0.063 6	0.000 4	363.3	67.0	350.3	10.7	348.4	2.0
31	226	395	0.57	0.053 8	0.001 5	0.408 0	0.011 2	0.055 0	0.000 3	363.7	61.3	347.4	9.5	345.0	2.0

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

笔者对巩乃斯种羊场以北的花岗岩(13XY-24)和其中的闪长质包体(13XY-12)分别进行了锆石 U-Pb 同位素测定。双目镜下两个样品的锆石均有较好的

晶型,多为无色柱状,长宽比值多 2:1~3:1,个别锆石为浑圆状。CL 图像中,花岗岩和闪长质包体锆石均无裂痕,都发育明显的振荡生长环带和弱的扇形分带(图 3),它们均符合岩浆锆石成因特征(吴元保等, 2004)。通常认为岩浆成因锆石的 Th/U 值大于 0.4,而变质重结晶的锆石则小于 0.1(Hoskin et al., 2000; Claesson et al., 2000)。除个别锆石可能受后期热事件

表3 花岗岩和闪长质包体主要元素(%)与微量元素(10^{-6})地球化学分析数据
Tab. 3 Major element (%) and trace element (10^{-6}) composition of the granite and diorite enclaves

样品	闪长质包体					寄主花岗岩				
	13XY-13h	13XY-29h	13XY-30h	13XY-31h	13XY-32h	13XY-24-1h	13XY-24-2h	13XY-24-3h	13XY-24-4h	13XY-24-4h
SiO ₂	57.03	59.44	57.05	56.72	57.77	75.48	75.34	74.57	73.5	73.5
Al ₂ O ₃	16.01	15.93	16.23	15.91	16.51	12.91	12.86	13.27	13.44	13.44
Fe ₂ O ₃	3.39	3.41	3.4	2.17	3.55	0.82	0.85	0.8	0.82	0.82
FeO	5.26	4.2	6.15	7.18	4.65	1.01	0.96	1.07	1.48	1.48
CaO	5.77	5.16	5.36	6.13	5.21	0.81	0.87	1.06	0.93	0.93
MgO	3.71	2.82	3.2	3.68	3.08	0.27	0.26	0.35	0.54	0.54
K ₂ O	1.98	2.18	0.93	1.05	2.5	3.29	3.48	2.92	3.44	3.44
Na ₂ O	3.9	4.34	4.71	4.17	4.1	4.5	4.43	4.88	4.7	4.7
TiO ₂	0.76	0.74	0.97	0.93	0.72	0.23	0.22	0.28	0.29	0.29
P ₂ O ₅	0.14	0.13	0.24	0.19	0.13	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
MnO	0.15	0.12	0.17	0.18	0.13	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04
LOI	1.86	1.5	1.54	1.63	1.59	0.61	0.65	0.72	0.76	0.76
H ₂ O [*]	0.95	0.71	0.94	0.81	0.83	0.45	0.41	0.48	0.45	0.45
Total	100.91	100.68	100.89	100.75	100.77	100.45	100.41	100.48	100.43	100.43
La	19.3	20.6	18.4	14.5	16.4	27.1	25.4	28.4	19.8	19.8
Ce	42.2	46.5	42.2	34.2	38.9	60.1	55.5	61.3	43.9	43.9
Pr	5.5	6	5.77	4.49	5.42	7.99	7.46	7.54	5.58	5.58
Nd	22	22.7	23.2	18.5	21.7	29.8	27.8	27.3	21.8	21.8
Sm	5.18	5.33	5.54	4.53	5.4	6.55	6.21	5.75	5.13	5.13
Eu	1.44	1.47	1.73	1.41	1.36	0.96	0.98	1.26	1.13	1.13
Gd	5.46	5.75	6.12	4.77	5.96	6.71	6.4	5.75	5.32	5.32
Tb	0.91	0.96	1	0.8	1.03	1.16	1.07	0.99	0.94	0.94
Dy	5.63	5.94	6.09	5.02	6.5	7.18	6.77	6.63	5.96	5.96
Ho	1.24	1.28	1.29	1.08	1.38	1.62	1.52	1.49	1.32	1.32
Er	3.57	3.72	3.61	3.12	4.02	4.87	4.51	4.41	4.06	4.06
Tm	0.54	0.59	0.55	0.48	0.62	0.76	0.72	0.72	0.65	0.65
Yb	3.57	3.97	3.52	3.13	4.03	5.12	4.8	4.77	4.46	4.46
Lu	0.57	0.64	0.56	0.49	0.63	0.85	0.8	0.8	0.76	0.76
Y	32.2	34.5	33.4	27.9	36.1	42.1	38.4	38.7	35.7	35.7
Cu	58.3	33.4	28.7	54.9	24.7	6.69	7.22	10.7	2.88	2.88
Pb	8.25	4.55	4.09	3.92	4.72	5.37	12.7	6.03	3.44	3.44
Zn	48.5	35.6	41.2	52.8	40.7	16.8	18.7	17.2	14.4	14.4
Cr	50.6	17.5	0.63	3.39	13.7	7.01	9.18	10	4.43	4.43
Ni	15.3	8.02	3.79	10.6	9.26	1.18	2.7	2.2	1.49	1.49
Co	22.3	14.3	19.7	24.2	17.2	2.1	2.45	5.02	7.34	7.34
Li	7.49	6.15	5.42	4.41	6.48	2.46	2.04	1.91	3.83	3.83
Rb	39.7	34.2	12.8	14	29.5	57.5	66	44.8	48.9	48.9
Cs	0.26	0.23	0.14	0.2	0.31	0.36	0.31	0.18	0.11	0.11
Mo	1.09	0.48	0.64	0.45	0.66	1.2	1.12	1.33	15.6	15.6
Sr	364	321	376	367	299	88.4	89.4	117	108	108
Ba	499	533	386	396	599	696	718	736	934	934
V	238	216	264	301	225	7.89	7.16	10.3	12.4	12.4
Sc	31.9	27.6	26.7	25.2	25.5	5.83	5.72	7.05	6.23	6.23
Nb	5.57	6.73	4.9	5.54	5.83	11.1	10.5	10.1	9.25	9.25
Ta	0.44	0.5	0.38	0.39	0.44	0.85	0.85	0.81	0.82	0.82
Zr	99.1	142	112	139	103	269	260	282	263	263
Hf	2.59	3.52	2.73	3.15	2.7	6.77	6.35	6.8	6.03	6.03
Ga	17.5	17.6	19.5	17.8	16.8	14.6	14.2	13.7	13.8	13.8
U	0.9	1.3	0.59	0.58	0.76	1.72	1.73	1.34	1.36	1.36
Th	3.2	3.53	2.61	2.36	3.24	7.86	7.87	7.78	6.56	6.56
σ	2.55	2.63	2.33	2.07	3.02	1.87	1.93	1.92	2.17	2.17
R1	1.672	1.668	1.605	1.742	1.551	2.615	2.589	2.504	2.359	2.359
R2	1.097	993	1.036	1.130	1.021	355	360	393	391	391
(La/Yb) _N	3.88	3.72	3.75	3.32	2.92	3.80	3.80	4.27	3.18	3.18
(La/Sm) _N	0.83	0.95	0.70	0.71	1.11	2.07	2.07	1.82	2.06	2.06
(Gd/Yb) _N	53.70	43.11	54.95	58.86	37.09	10.43	10.21	14.19	14.69	14.69
A/CNK	0.84	0.84	0.88	0.83	0.87	1.04	1.02	1.01	1.02	1.02
Mg [#]	44.31	40.88	38.25	41.80	41.17	21.59	21.18	25.85	30.27	30.27
Rb/Sr	0.11	0.11	0.03	0.04	0.10	0.65	0.74	0.38	0.45	0.45
δEu	0.82	0.81	0.90	0.92	0.73	0.44	0.47	0.66	0.66	0.66
δCe	0.99	1.01	1.00	1.03	1.01	0.99	0.98	1.01	1.01	1.01

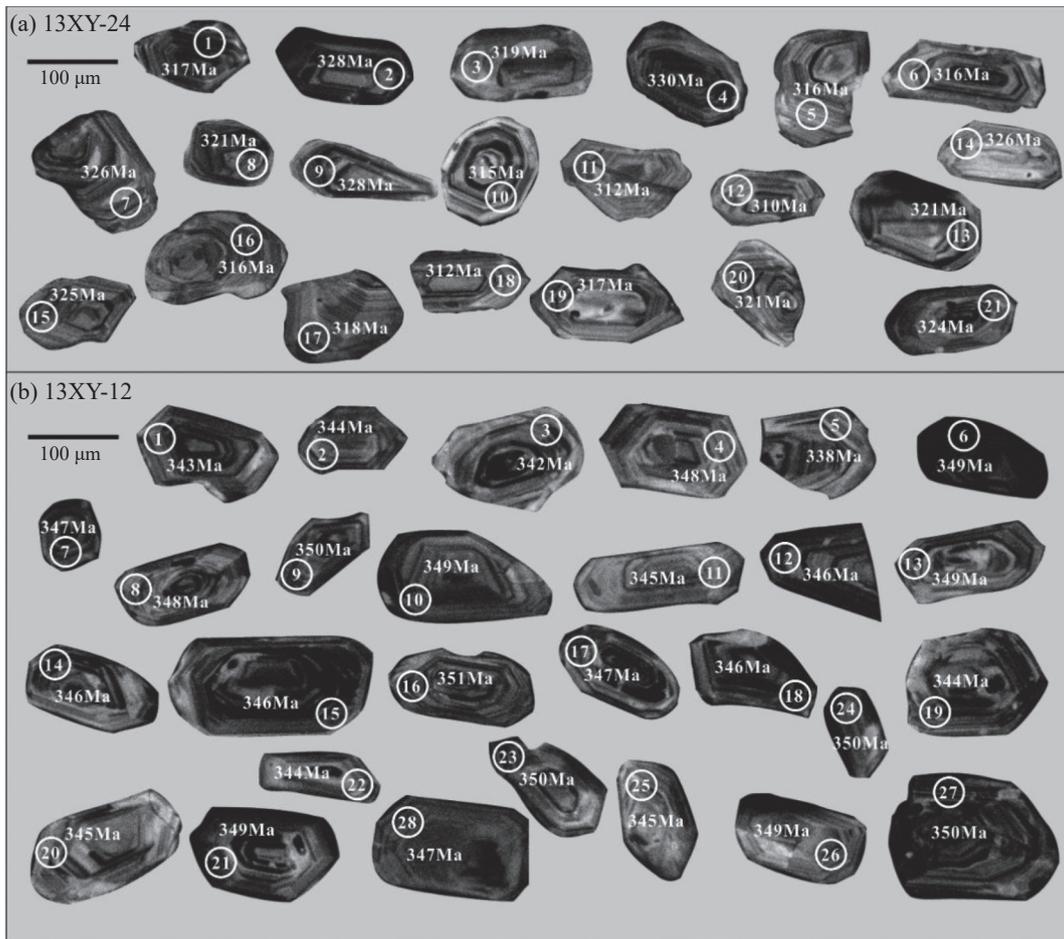


图3 花岗岩(13XY-24)和闪长质包体(13XY-12)锆石阴极发光图

Fig. 3 Zircon CL images of granites (13XY-24) and enclaves (13XY-12)

影响造成其 Th/U 值偏小外,此次所测绝大多数样品点 Th/U 值大于 0.4(表 1、表 2),同样表明它们均为岩浆锆石。

本次工作在寄主花岗岩(13XY-24)共测试了 26 个数据点。其中有一颗锆石测年谐和度较差;另有 4 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较大,介于 338~444 Ma,误差范围内与闪长质包体年龄一致,应是捕获包体中的锆石;剩余 21 个年龄数据在谐和线上较为集中分布, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (320.0 ± 2.7) Ma(MSWD=5.9),代表了花岗岩的形成年龄(图 4),成岩时代属晚石炭世。

闪长质包体(13XY-12)中选择了 31 颗锆石进行测试。其中,一颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (397.4 ± 2.7) Ma,可能为捕获或继承锆石;其余 30 个测点均分布在谐和线上,加权平均年龄为 (344.5 ± 1.4) Ma(MSWD=3.2),代表了闪长质包体的成岩年龄(图 4),其原岩成岩时代为早石炭世。暗色包体的结晶年龄较寄主花岗岩早了近 25 Ma。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素特征

寄主花岗岩 SiO_2 含量较高(73.50%~75.48%),低 TiO_2 (0.22%~0.29%),低 CaO (0.81%~1.06%),贫铁($\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}=1.81\%\sim 2.30\%$),富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.80\%\sim 8.14\%$);相对富钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.44\sim 0.79$); MgO 含量较低(0.26%~0.54%), $\text{Mg}^\#$ 值为 26~35;铝饱和指数 A/CNK 介于 1.01~1.04,里特曼指数 $\sigma=1.87\sim 2.17$,属于弱过铝质钙碱性岩石。在侵入岩 TAS 图解中,样品均落入 Irvine 线下方的花岗岩区(图 5a),与镜下定名一致。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中投点于钙碱性系列与高钾钙碱性系列界线附近(图 5b),整体偏属高钾钙碱性系列。

闪长质包体 SiO_2 含量较低(56.72%~59.44%),相比花岗岩具有较高的 TiO_2 (0.72%~0.97%)、 CaO (5.16%~6.13%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (5.20%~9.55%)、 MgO (2.82%~3.71%)和 $\text{Mg}^\#$ 值(43~50)。全碱含量($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)为 5.22%~6.60%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.20~0.58,同样相对富钠低钾。A/CNK 介于 0.83~0.87,里特曼指数 $\sigma=$

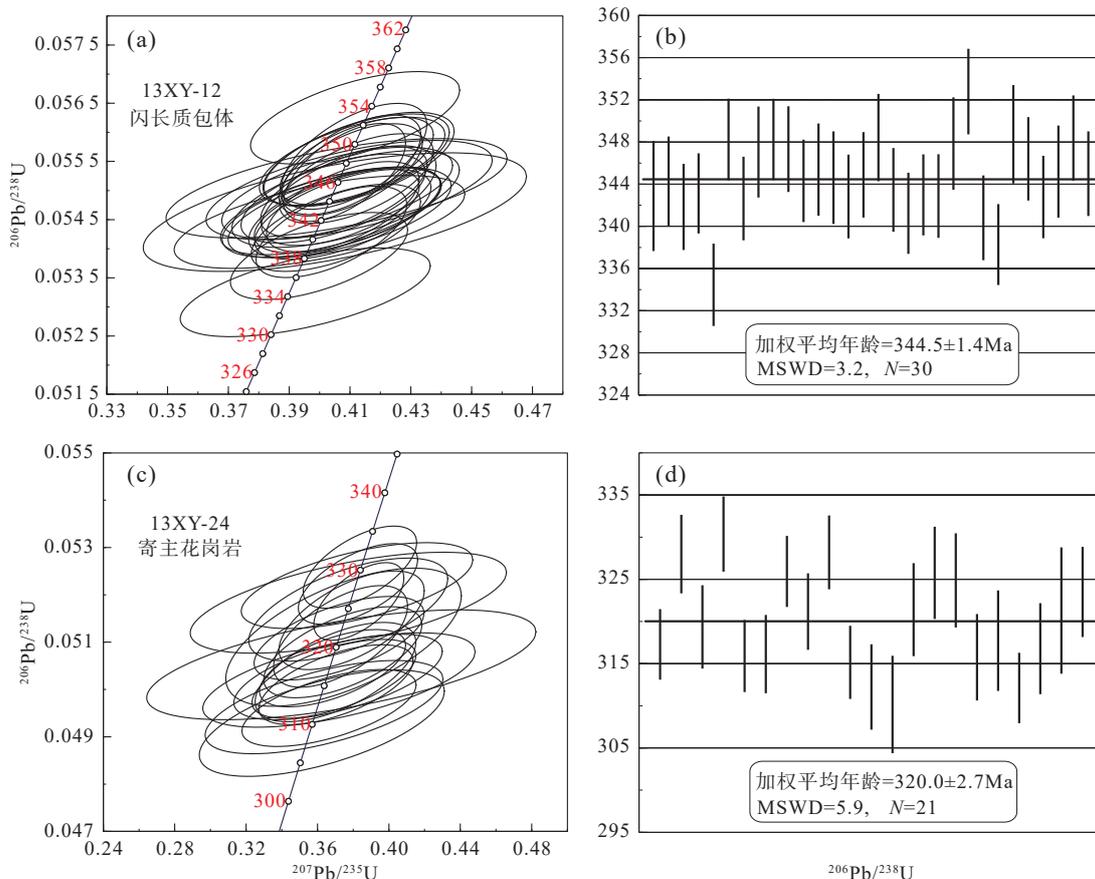


图 4 闪长质包体(a,b)和寄主花岗岩(c,d)锆石 U-Pb 谐和图及加权平均年龄图

Fig. 4 (a, b) Zircon U-Pb concordia diagrams and weight mean age diagrams of the enclaves and (c, d) granites

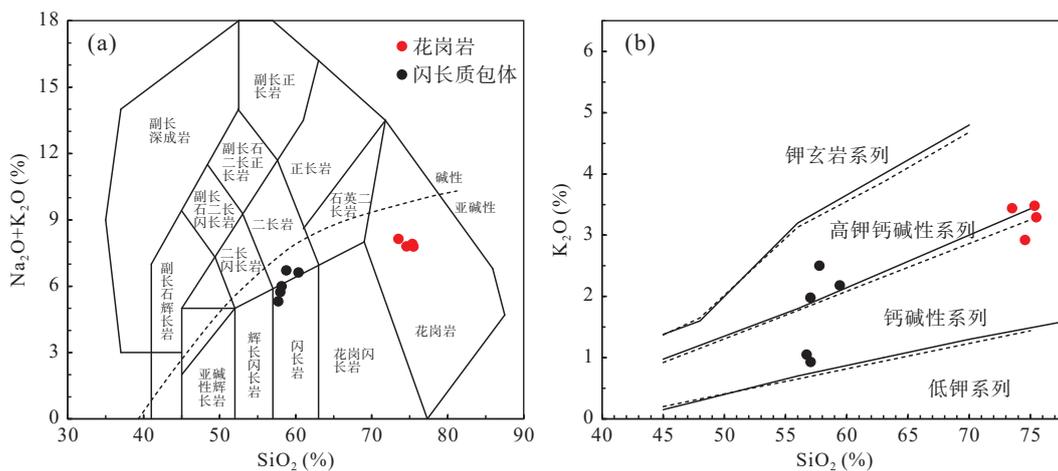


图 5 花岗岩和闪长质包体 TAS 图解(a 据 Middlemost, 1994)和 K₂O-SiO₂ 图解 (b 据 Peccerillo et al., 1976, 虚线据 Middlemost, 1985)

Fig. 5 (a) TAS and (b) K₂O-SiO₂ diagram for the granites and enclaves

2.33~3.02, 属准铝质钙碱性岩石。在侵入岩 TAS 图解中, 样品落入 Irvine 线下方的闪长岩和二长岩区 (图 5a), 与镜下定名基本一致。在 K₂O-SiO₂ 图解中样品多落入高钾钙碱性系列区内, 部分落入钙碱性系列

区域(图 5b)。

4.2.2 稀土元素和微量元素特征

寄主花岗岩稀土总量(Σ REE)为 $120.81 \times 10^{-6} \sim 160.77 \times 10^{-6}$, 平均值为 147.16×10^{-6} , $(La/Yb)_N = 2.94 \sim$

4.27, 轻稀土分馏程度高, 重稀土相对亏损; 在球粒陨石标准化图上(图 6a), 轻稀土斜率较大, 重稀土相对

平缓, 具明显的右倾曲线; 寄主花岗岩 $\delta\text{Eu}=0.44\sim 0.66$, 平均值为 0.56, 为中等程度的负 Eu 异常。

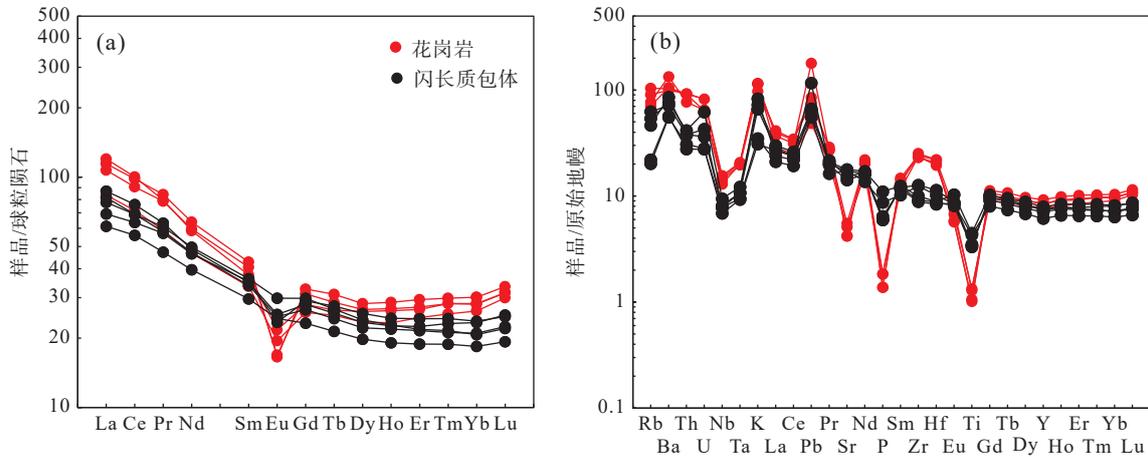


图6 花岗岩和捕虏体稀土元素球粒陨石标准化配图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 6 (a) The chondrite-normalized rare earth elements patterns and (b) primitive-mantle normalized spider diagram for the granites and xenolith

闪长质包体的 ΣREE 为 $96.52\times 10^{-6}\sim 125.45\times 10^{-6}$, 平均值为 114.40×10^{-6} , 整体低于花岗岩的稀土含量; $(\text{La}/\text{Yb})_N=2.92\sim 3.88$, 轻稀土分馏程度高, 重稀土相对亏损; 在球粒陨石标准化图上(图 6a), 配分曲线与寄主花岗岩相似, 但重稀土部分更为平缓; 其 $\delta\text{Eu}=0.73\sim 0.92$, 平均值 0.84, 具微弱的负 Eu 异常。

在微量元素原始地幔标准化蜘蛛图上, 所有样品均富集 Rb、Ba、Th、U、K、Pb 等大离子亲石元素及放射性生热元素, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等元素(图 6b), 具有典型的弧岩浆岩特征。与闪长质包体相比, 寄主花岗岩中 Sr、P、Ti 元素强烈亏损。

5 讨论

5.1 形成时代

近年来随着工作程度的逐步提高, 阿吾拉勒山巩乃斯一带基本实现了 1:5 万比例尺填图工作的全覆盖, 使得人们对该区的地质情况得到了进一步了解, 其中最令人关注的为该地区早、晚石炭世两套火山岩的识别。由于上述地区研究程度仍相对较低, 缺乏更大比例尺的填图和典型剖面的对比, 因而常将出露的两套火山岩作为一套火山地层, 或是将实际为早石炭世的部分火山岩认作为晚石炭世火山岩, 或者将部分为晚石炭世的火山岩误认为属于早石炭世, 从而导致许多火山地层的混淆或混乱(李钊, 2016), 进而导致

对侵入火山地层的深成岩成岩时代产生误判, 相应的对其岩石成因、构造环境的判定乃至区域构造的演化产生了不利的影响。

巩乃斯种羊场北西一带侵入岩出露面积较小, 岩性有辉长岩、闪长岩等中基性岩和花岗岩、花岗斑岩等酸性岩, 其围岩有流纹质火山凝灰岩、流纹岩、安山岩、粗安岩等中酸性火山岩及砂岩和砾岩。由于受当时测试手段的限制, 前人根据岩石组合及区域对比将包括研究区内的一套火山沉积岩划为晚石炭统伊石基里克组、早二叠统乌郎组, 并根据岩体与侵入地层的关系, 将研究区内的侵入岩形成时代置于早二叠世—晚二叠世(江西省地质矿产勘探开发局, 2005)。刘新等(2012)在阿吾拉勒西段木汗巴斯陶地区的角闪辉长岩、花岗岩中分别获得了 (317.0 ± 2.2) Ma 和 (319.1 ± 2.4) Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 表明阿吾拉勒西段存在晚石炭世早期侵入岩。笔者通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析方法对巩乃斯种羊场北西的花岗岩和其中的暗色包体分别进行了详细的年代学分析测试工作, 两件样品的测年结果分别为 (320.0 ± 2.7) Ma (MSWD=1.5)、 (344.5 ± 1.4) Ma (MSWD=3.2), 表明该花岗岩体形成时代为晚石炭世早期, 和刘新等(2012)在研究区西邻角闪辉长岩、花岗岩中获得的年龄相似, 与区域地质调查资料推断的年龄不一致。

此次对巩乃斯种羊场北西地区花岗岩及其中暗色包体年代学的测定, 再次明确了阿吾拉勒西段发育

有晚石炭世早期(~320 Ma)的侵入岩。~345 Ma 暗色包体的发现,暗示研究区附近及周边很可能发育有早石炭世中酸性侵入体及相配套的火山岩,与阿吾拉勒中东段地区大规模发育的NW向带状展布的早石炭世火成岩相一致(李钊, 2016)。

5.2 闪长质包体类型及岩石成因

花岗岩中的暗色包体含有非常丰富的岩石成因信息,对于了解花岗岩浆的起源,定位机制与成因演化具有重要意义(周新民等, 1991)。暗色包体揭示了岩浆深部作用过程,特别是壳幔相互作用深部过程,因此成为岩石学的重要研究对象(Castro et al., 1991; Silva et al., 2000)。

注入长英质岩浆中的镁铁质岩浆固结而成的暗色包体流变性好,一般呈球状、椭球状,包体的年龄与寄主岩同期或稍早于寄主岩,研究区闪长质包体呈不规则状(图 2a),且包体较寄主岩早约 25 Ma,故不属于淬冷包体。闪长质包体发育典型的岩浆岩矿物组合及结构构造,属于准铝质岩石,未见富铝难熔矿物,没有明显的变晶结构,在残留体成因模式中,包体应该具有变质结构,而不是岩浆结构(Yang et al., 2007),因此研究区闪长质包体并非难熔残留体。冷凝边包体的年龄与寄主岩同期或稍早于寄主岩,且包体形态多呈椭球状(陈伟等, 2019),区内包体形态特征和成岩年龄与上述不符,因而不属于冷凝边包体。研究区包体的粒度明显小于寄主岩石,不具堆晶结构,且与寄主花岗岩的界线明显,因此也不是同源岩浆演化的早期堆积包体或析离体。综上所述,研究区闪长质包体很可能为捕虏体,是寄主花岗岩浆上升侵位过程中捕获的围岩成分(肖庆辉等, 2003)。

一般认为闪长质岩石有以下成因:①受富水流体或熔体交代地幔橄榄岩的直接部分熔融。②板片熔体与地幔楔橄榄岩的相互作用。③幔源基性岩浆的分离结晶。④下地壳基性岩石的部分熔融。⑤幔源基性岩浆与壳源酸性岩浆混合或与地壳的同化混染(李强等, 2021)。

经过流体或熔体交代的地幔部分熔融产生的中性岩均具有高镁($MgO > 8\%$)的特点(邓晋福等, 2010),研究区闪长质包体 MgO 含量较低,不具有高镁特征,说明其不是地幔物质直接部分熔融的产物。俯冲板片或拆沉下地壳部分熔融产物与地幔橄榄岩反应形成的闪长质岩浆具有埃达克质岩高 Sr 低 Y 特征,调查区内低 Sr/Y 值及相对高 Y 含量的闪长质包体与埃

达克质岩浆岩明显不同,因此不是板片熔体与地幔楔橄榄岩相互作用而成。阿吾拉勒地区广泛发育的早石炭世火成岩以中酸性为主(李钊, 2016),如果该中酸性岩石是由基性岩浆经过分离结晶作用而成,这将需要巨量的基性岩浆,那么将伴生有大面积的玄武质岩石,这与区域实际情况不符,结合区内闪长质包体不具明显的负 Eu 异常,说明闪长质包体并非由基性岩浆分离结晶而来。基性下地壳部分熔融形成的岩浆岩通常具有较高的 SiO_2 含量和较低的 $Mg^\#$ 值(常低于 40)(Rapp et al., 1999),区内闪长质包体具有较低的 SiO_2 含量和较高的 $Mg^\#$ 值(43~50),与基性下地壳部分熔融形成的岩石明显不同,而具有幔源特征;同时壳源岩浆常具有相对较高的 Rb/Sr 值(>0.23),而幔源基性岩浆的 Rb/Sr 值通常较低(0.03~0.05)(Sun et al., 1989; Rudnick et al., 2003),研究区闪长质包体 Rb/Sr 值介于 0.03~0.11(平均 0.08),介于壳源岩浆岩和幔源基性岩之间,同样说明区内闪长质包体不是基性下地壳直接部分熔融而成。

综上所述,区内闪长质包体很可能为幔源基性岩浆与壳源酸性熔体混合或硅质围岩经同化混染作用而成。研究区闪长质包体以钙碱性和高钾钙碱性为特征(图 5b),富集大离子亲石元素、轻稀土元素及放射性元素,明显亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(图 6b),表明地幔源区曾遭受俯冲流体(熔体)的改造(李强等, 2021)。闪长质包体中存在早泥盆世继承或捕获锆石,表明该岩浆系统受到了新生地壳物质的同化混染。结合区域地质构造背景,研究区早石炭世细粒闪长质包体原岩岩浆很可能是来源于地幔楔富水基性岩浆与新生地壳物质在地壳深部经过 MASH(Melting, Assimilation, Storage and Homogenization)过程的混合岩浆(Hildreth et al., 1988; Richards, 2011; Li et al., 2014; 李强等, 2021),形成后沿通道上升并在一定位置冷却,最后被后期晚石炭世花岗质岩浆机械破坏并携带至近地表就位。

5.3 花岗岩成因类型及岩石成因

前人研究表明,花岗岩的成因类型,既可以体现它的岩浆源岩特征又能反映它的形成构造环境(Chappell et al., 1974; Picher, 1983; Bedard, 1990; Eby et al., 1992)。目前花岗岩主要分为 I 型、A 型、S 型、M 型。研究区花岗岩富含钾长石,属弱过铝质钙碱性岩石,很显然不属于 M 型花岗岩。化学成分上贫 Ce、Zn、Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Ga、Y,具有较低的(K_2O+Na_2O)/

CaO(7.36~9.62)、 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ (4.53~7.33)和 $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ 值(1.94~2.14),与 A 型花岗岩特征相差较大(Whalen et al., 1987),在 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ 图解中均位于分异的花岗岩区域(图 7a),与华南佛冈、西藏察隅高分异 I 型花岗岩较为相似(Li et al., 2007; 朱弟成等, 2009)。另外,研究区花岗岩中常见有角闪石,不含白云母、堇青石、石榴子石等富铝矿物,它们的铝饱和指数 A/CNK(1.01~1.04)都小于 1.1,刚玉标准

分子(0.12%~0.32%)小于 1%,以上特征均与典型的 S 型花岗岩不符,而与 I 型花岗岩特征一致。实验研究表明,磷灰石在准铝质-弱过铝质岩浆中的溶解度很低,且在岩浆分异过程中随 SiO_2 的增加而降低,而在强过铝质岩浆中与 SiO_2 的含量为正相关(Wolf et al., 1994)。文中花岗岩样品 P_2O_5 含量很低($<0.05\%$),且随 SiO_2 含量的增加而降低(图 7b),与 I 型花岗岩的演化趋势相同。因此,文中花岗岩应属于分异的 I 型花岗岩。

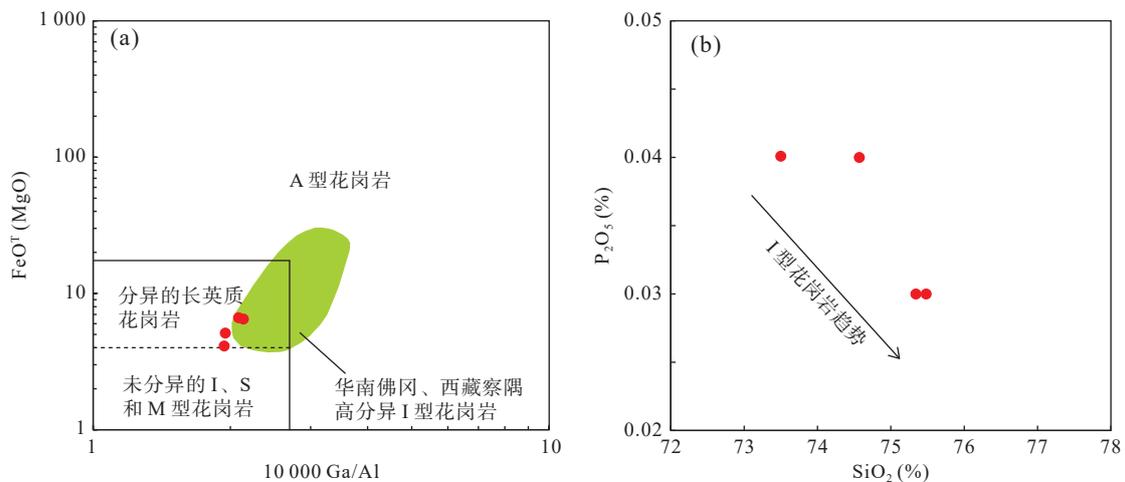


图7 花岗岩 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ 分类图解(a)(据 Whalen et al., 1987)和 $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ 图解(b)

Fig. 7 (a) $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ and (b) $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ diagrams of the granites

通常认为, I 型花岗岩是幔源基性岩浆的加热促使地壳中基性火成岩部分熔融而成,其特征是富集 Al、Th 和 LREE(Chappell et al., 1988)。在阿吾拉勒构造带东部查岗诺尔铁矿区发育有约为 321 Ma 的流纹岩,与研究区花岗岩成岩年龄相近,该流纹岩 $[N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})]_i$ 为 0.7089~0.7163, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)=68.55\sim 173.25$, Sr 同位素组成为富集型, $[N(^{87}\text{Nd})/N(^{86}\text{Nd})]_i$ 为 0.512314~0.512331, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=1.75\sim 2.07$, Nd 同位素组成为亏损型,岩浆源区最有可能为岛弧区下部地壳,主要由原有的陆壳物质(不成熟地壳)和幔源岩浆物质(亏损地幔)混合组成(汪帮耀等, 2011)。刘新等(2012)在研究区西侧木汗巴斯陶地区辉长岩、花岗岩中分别获得了 317 Ma、319 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,认为富集地幔楔发生部分熔融产生了基性熔体,热的基性岩浆导致局部地壳发生了部分熔融,从而产生了花岗质岩浆。研究区花岗岩具有较高的 SiO_2 含量(73.50%~75.48%); $\text{Rb}/\text{Sr}=0.38\sim 0.74$, 平均值为 0.56, 大于中地壳的 0.23 和上地壳的 0.26(Rudnick et al., 2003); Nb/Ta 值 11.28~13.06, 平均为 12.29, 接近陆壳岩石(11±, Rudnick et al.,

2003),说明区内花岗岩来源于壳源。另外它们的 Th 和 LREE 相对更加富集(图 4),且 $\text{Mg}^{\#}$ 值均小于 40(26~35),与下地壳玄武质岩石部分熔融产生的岩浆相似(Atherton et al., 1993; Rapp et al., 1995; Rapp et al., 1999),以上均指示研究区花岗岩来源于基性下地壳。研究区花岗岩富硅,明显亏损 Sr、P、Ti 和 Eu 等元素(图 4),指示其母岩浆经历了显著的分异结晶作用。Ti 元素的亏损指示富钛矿物相(如钛铁矿、金红石)的结晶分离,而 P 元素的强烈亏损表明发生了磷灰石的分异, Eu 元素的亏损应与斜长石的结晶分离有关, Sr 元素的强烈亏损进一步支持斜长石的分异结晶作用(Rogers et al., 1989; Sajona et al., 1996)。

综上所述,文中晚石炭世早期花岗岩属于分异的 I 型花岗岩,由下地壳变质中基性火成岩部分熔融而来,并经历了一定程度的结晶分离作用。

5.4 闪长质包体和花岗岩的构造环境及对构造演化的启示

研究区地处伊利-中天山地块东北缘(图 1a),紧邻北天山缝合带。北天山缝合带巴音沟蛇绿岩中斜

长花岗岩获得的锆石 U-Pb 年龄为 (324.8 ± 7.1) Ma (徐学义等, 2006), 说明北天山洋在 325 Ma 之前仍然存在, 阿吾拉勒地区经历了早石炭世以北天山洋为代表的大洋板块南向俯冲消减并最终闭合的过程 (李锦轶等, 2006b; 徐学义等, 2014), 形成了区域广泛发育的大哈拉军山组火山岩和配套的侵入岩。钙碱性岩石组合的存在可以作为判定古俯冲作用发生的有效标志, 岩石组合和地球化学特征综合表明阿吾拉勒构造带大哈拉军山组火山岩及同时期的侵入岩形成于火山弧环境 (Long et al., 2011; 荆德龙等, 2015; 韩琼等, 2015; 李钊, 2016)。研究区闪长质包体测得的锆石 U-Pb 年龄为 (344.5 ± 1.4) Ma, 为包体成岩年龄, 与区域广泛发育的大哈拉军山组基性及中酸性火山岩时代一致 (白建科等, 2011; 茹艳娇, 2012; 荆德龙等, 2015; 韩琼等, 2015), 它们应形成于相同的构造背景。

文中闪长质包体属钙碱性系列, 具有典型弧岩浆岩地球化学特征, 起源于受俯冲流体(熔体)交代的幔源基性岩浆与新生地壳物质经过 MASH 过程的混合

岩浆。已有研究表明, 不同构造背景形成的中酸性火成岩的 Th/Ta 值明显不同, 板内环境多介于 1~6, 活动陆缘一般为 6~20, 而大洋岛弧多在 20~90 之间 (Gorton et al., 2000)。研究区闪长质包体的 Th/Ta 值介于 6.05~7.36, 与活动陆缘环境相一致。同时闪长质包体具有较高的 Th/Yb 值, 在 Ta/Yb-Th/Yb 图解中投点于陆缘弧与大洋岛弧的重叠部位 (图 8a); 在中性岩判别图解 La/Yb-Th 中落入大陆边缘弧和演化的大洋弧交界附近 (图 8b), 均暗示其为不成熟的大陆边缘弧。岛弧构造背景下形成的中性岩通常具有强烈的正 Sr 异常, 而陆缘弧产生的中性岩一般无 Sr 异常或具微弱的负 Sr 异常 (李强等, 2021), 研究区闪长质包体大多不具有 Sr 异常, 个别显示微弱的正异常 (图 6b), 同样暗示其构造环境为不成熟的陆缘弧。根据早石炭世火山岩岩石组合、地球化学特征及研究区所处的大地构造位置, 结合区内存在中元古界结晶基底, 认为区内早石炭世闪长质包体的原岩形成于北天山洋南向俯冲的构造环境, 可能为不成熟的大陆边缘弧。

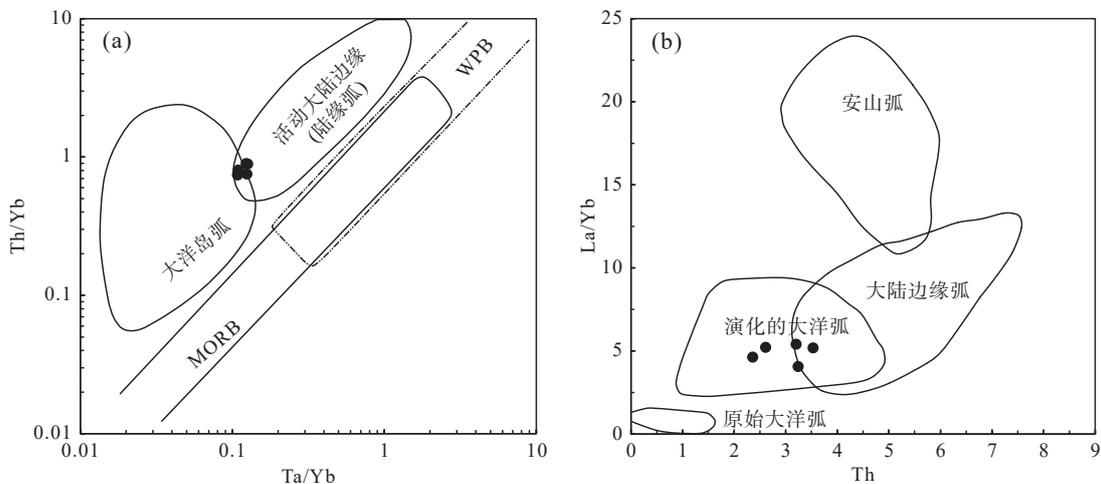


图8 研究区闪长质包体 Th/Yb-Ta/Yb (a 据 Pearce, 1982) 和 La/Yb-Th (b 据 Bailey, 1981) 图解

Fig. 8 (a) Diagrams of Th/Yb-Ta/Yb and (b) La/Yb-Th for diorite enclaves in the study area

通过前文讨论, 笔者可知伊利-中天山地块东北缘在早石炭世为活动大陆边缘, 侵入于北天山巴音沟蛇绿混杂带的四棵树花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 (315.9 ± 2.5) Ma, 代表巴音沟蛇绿岩的形成年龄介于 $(325 \sim 316)$ Ma (Han et al., 2010), 说明北天山洋在 316 Ma 之前已经闭合, 在晚石炭世时整体进入板内构造演化过程, 以区域广泛发育的伊什基里克组双峰式火山岩为代表 (朱永峰等, 2005, 2006, 2007, 李永军等, 2008; Wang et al., 2009)。阿吾拉勒构造带广泛发育

晚石炭世早期的火成岩, 如阿吾拉勒东段查岗诺尔铁矿区发育有一套火山岩, 自下而上从基性变化到酸性, 其上部流纹岩锆石 U-Pb 年龄为 (321.2 ± 2.3) Ma, $\epsilon_{Nd}(t) = 1.75 \sim 2.07$ (汪帮耀等, 2011), 备战铁矿区发育有一套偏基性火山岩, 在玄武安山岩中获得了 (320.6 ± 2.2) Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 其 $\epsilon_{Nd}(t) = 0.73 \sim 4.33$, 上述火山岩的 Sr、Nd 同位素特征与 Lesser Antilles 岛弧火山岩相似 (张博等, 2015), 暗示伊利-中天山地块东北活动陆缘具有较薄的陆壳。

区内花岗岩较闪长质包体原岩晚了近 25 Ma, 花岗岩具有较强的负 Sr 异常(图 6b), 与典型大陆边缘弧火成岩地球化学特征类似(Rudnick et al., 2003), 同时具有相对较高的 Ta/Yb 和 Th/Yb 值, 暗示此时该陆缘弧成熟度可能得到了较大的提高。在 R1-R2 图解中, 闪长质包体落入板块碰撞前消减区域内, 与前文论述一致, 而寄主花岗岩落入同碰

撞期与造山晚期的交界处(图 9a); 在花岗岩判别图解 Rb-Y+Nb 中, 区内花岗岩落入后碰撞花岗岩区内; 结合研究区西侧同期侵入岩岩性为辉长岩和花岗岩, 两者交生、穿插产出(刘新等, 2012), 该岩石组合具“双峰式”特点, 以上综合表明在晚石炭世早期(~320 Ma), 研究区很可能已经进入后碰撞伸展环境。

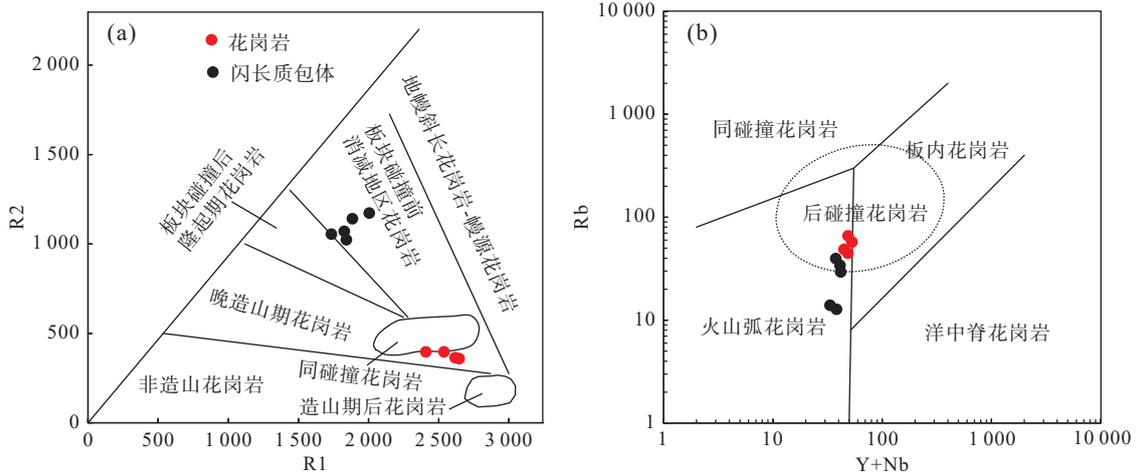


图9 花岗岩和包体 R_1 - R_2 (a 据 Batchelor et al., 1985) 和 Rb - $Yb+Nb$ (b 据 Pearce, 1996) 构造环境判别图解

Fig. 9 (a) R_1 - R_2 and (b) Rb - $Yb+Nb$ diagrams of granites and enclaves

由于岩浆锆石结晶温度较高, 锆石饱和温度可近似代表花岗质岩石的近液相温度(Miller et al., 2003)。计算结果显示, 文中花岗岩的锆石饱和温度为 829~836 °C(平均为 834 °C), 温度较高; 而闪长质包体中锆石饱和温度为 695~727 °C(平均为 711 °C), 温度相对较低, 两者结晶温度差别明显, 表明形成于不同的温度条件。暗色闪长质包体中含有大量角闪石、黑云母等含水矿物, 这表明其所代表的偏基性岩浆是富水和挥发份的, 因此其具有较低的结晶温度。研究认为 A 型花岗岩岩浆或者与地幔柱作用相关花岗质岩浆的结晶温度一般大于 800 °C, 而在富水饱和流体中结晶而成花岗岩的岩浆温度普遍小于 800 °C(Miller et al., 2003)。区内花岗岩为 I 型花岗岩, 岩浆结晶温度均大于 800 °C, 表明源区温度较高且较为贫水, 指示幔源岩浆在该岩体的形成过程中发挥了重要作用, 这得到了研究区西侧同期基性侵入岩的证实(刘新等, 2012)。

因此, 文中晚石炭世花岗岩很可能为碰撞晚期俯冲洋壳断裂引起软流圈上涌(Long et al., 2011), 受消减析出流(熔)体交代的地幔橄榄岩发生了部分熔融, 大规模玄武质岩浆底侵导致下地壳基性岩部分熔融, 形成了上述花岗质岩浆, 并经历了一定程度的分离结

晶作用。而其中的闪长质包体为早期洋壳俯冲过程中形成的弧岩浆岩, 后被晚期花岗质岩浆机械破坏并携带至近地表就位。结合区域已有资料及本次研究成果, 表明至少在晚石炭世早期(~320 Ma)阿吾拉勒地区已经进入后碰撞板内演化阶段。

6 结论

(1) 巩乃斯种羊场北西地区发育花岗岩体和闪长质包体, 锆石 U-Pb 测年结果显示花岗岩侵位时代为 (320.0 ± 2.7) Ma, 闪长质包体原岩成岩时代为 (344.5 ± 1.4) Ma, 包体类型为捕虏体。

(2) 闪长质包体起源于幔源基性岩浆与新生地壳物质的相互作用, 类似于前人提出的 MASH 模式。寄主花岗岩属于分异的 I 型花岗岩, 由下地壳变质中基性火成岩部分熔融而来, 并经历了一定程度的结晶分离作用。

(3) 花岗岩体和其内部的闪长质捕虏体均形成于活动大陆边缘环境, 为北天山洋板片向伊利-中天山地块下俯冲作用的产物。闪长质包体为早期俯冲过程中形成的弧岩浆岩, 花岗岩很可能为后碰撞伸展环境,

可能经历了由挤压向伸展环境的转换,是软流圈上涌加热导致基性下地壳部分熔融形成的。

致谢:孙吉明正高级工程师、白建科正高级工程师、高晓峰研究员,李平正高级工程师在文章写作过程中给予帮助,中国地质调查局西安地质调查中心实验室,西北大学大陆动力学重点实验室样品分析中给予帮助,审稿专家给予建议,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- 白建科,李智佩,徐学义,等.西天山阿吾拉勒地区下石炭统大哈拉军山组火山岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [A].中国矿物岩石地球化学学会.中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会论文集 [C].2011, 558.
- 陈伟,宋杨,刘洪章,等.同源岩浆不同期次之间混合产生的暗色包体——以北拉萨地块中部晚白垩世桑心日岩体为例 [J].岩石学报, 2019, 35(07): 2143–2157.
- CHEN Wei, SONG Yang, LIU Hongzhang, et al. MMEs formed by magma mixing of different episodes of the same sourced magma: A case study of the Late Cretaceous Sangxinri pluton in the middle part of the northern Lhasa Block [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(07): 2143–2157.
- 邓晋福,刘翠,冯艳芳,等.高镁安山岩/闪长岩类 (HMA) 和镁安山岩/闪长岩类 (MA): 与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类 [J].中国地质, 2010, 37(4): 1112–1118.
- DENG Jinfu, LIU Cui, FENG Yanfang, et al. High magnesian andesitic/dioritic rocks (HMA) and magnesian andesitic/dioritic rocks (MA): two igneous rock types related to oceanic subduction [J]. Geology in China, 2010, 37(4): 1112–1118.
- 丁振信,薛春纪,赵晓波,等.西天山阿吾拉勒西段早二叠世粗安岩年代学和地球化学特征 [J].岩石矿物学杂志, 2019, 38(5): 587–605.
- DING Zhenxin, XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Permian trachyandesites in the western Awulale area, West Tianshan Mountains [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2019, 38(5): 587–605.
- 韩琼,弓小平,马华东,等.西天山阿吾拉勒成矿带大哈拉军山组火山岩时空分布规律及其地质意义 [J].中国地质, 2015, 42(3): 570–586.
- HAN Qiong, GONG Xiaoping, MA Huadong, et al. Temporal and spatial distribution of Dahalajumshan Group volcanic rocks in the Awulale Metallogenic belt of West Tianshan Mountains and its geological significance [J]. Geology in China, 2015, 42(3): 570–586.
- 江西省地质矿产勘探开发局.新疆维吾尔自治区 1:5 万区域地质矿产调查报告 [R].江西省地质矿产勘探开发局, 2005.
- 荆德龙,汪帮耀,张博,等.西天山松湖铁矿区火山岩地球化学特征、成岩时代及其地质意义 [J].地球学报, 2015, 36(6): 729–741.
- JING Delong, WANG Bangyao, ZHANG Bo, et al. Geochemistry and Geochronology of the Volcanic Rocks in the Songhu Iron Deposit of Western Tianshan Mountains and Their Geological Significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(6): 729–741.
- 李继磊,苏文,张喜,等.西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义 [J].地质通报, 2009, 28(12): 1852–1862.
- LI Jilei, SU Wen, ZHANG Xi, et al. Zircon Cameca U-Pb dating and its significance for granulite-facies gneisses from the western Awulale Mountain, West Tianshan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12): 1852–1862.
- 李锦轶,何国琦,徐新,等.新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨 [J].地质学报, 2006a, 80(1): 148–168.
- LI Jinyi, HE Guoqi, XU Xin, et al. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation [J]. Acta Geologica Sinica, 2006a, 80(1): 148–168.
- 李锦轶,王克卓,孙桂华,等.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 [J].岩石学报, 2006b, 22(5): 1087–1102.
- LI Jinyi, WANG Kezhao, SUN Guihua, et al. Paleozoic active margin slices in the southern Turfan-Hami basin: geological records of subduction of the Paleo-Asian Ocean plate in central Asian regions [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006b, 22(5): 1087–1102.
- 李强,程学芹,陈伟,等.额尔古纳地块早-中三叠世安山岩的发现及其对蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲的指示 [J].地球科学, 2021, 46(8): 2768–2785.
- LI Qiang, CHENG Xueqin, CHEN Wei, et al. Discovery of Early-Middle Triassic Andesite in Erguna Massif and Its Indication of Southward Subduction of Mongol-Okhotsk Ocean Plate [J]. Earth Science, 2021, 46(8): 2768–2785.
- 李永军,李注苍,周继兵,等.西天山阿吾拉勒一带石炭系岩石地层单位厘定 [J].岩石学报, 2009, 25(6): 1332–1340.
- LI Yongjun, LI Zhucang, ZHOU Jibing, et al. Division of the Carboniferous lithostratigraphic units in Awulale area western Tianshan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(6): 1332–1340.
- 李永军,张天继,栾新东,等.西天山特克斯达坂晚古生代若干不整合的厘定及地质意义 [J].地球学报, 2008, 29(2): 145–154.
- LI Yongjun, ZHANG Tianji, LUAN Xindong, et al. Clarification of Late Paleozoic Unconformities in the Tekes Daban area of West Tianshan and Its Geological Significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(2): 145–154.
- 李钊.伊宁地块阿吾拉勒—巩乃斯地区大哈拉军山组与伊什基里克组火山岩对比研究 [D].西安:长安大学, 2016, 1–179.

- LI Zhao. Comparative study on the volcanic rocks of Dahalajunshan Formation and Yishijilike Formation, Awulale-Gongnaisi area, Yining Block, Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016, 1-179.
- 刘新, 钱青, 苏文, 等. 西天山阿吾拉勒西段木汗巴斯陶侵入岩体的地球化学特征、时代及地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2401-2413.
- LIU Xin, QIAN Qing, SU Wen, et al. Pluton from Muhanbasitao in the western of Awulale, Western Tianshan Geochemistry, geochronology and geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2401-2413.
- 茹艳娇. 西天山大哈拉军山组火山岩地层序列、岩石成因与构造环境[D]. 西安: 长安大学, 2012, 1-123.
- RU Yanjiao. The Stratigraphic Sequence, Petrogenesis and Tectonic Setting of the Volcanic Rocks of the Dahalajunshan Formation, Western Tianshan Mountain, China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012, 1-123.
- 汪帮耀, 姜常义. 西天山查岗诺尔铁矿区石炭纪火山岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地质科技情报, 2011, 30(6): 18-27.
- WANG Bangyao, JIANG Changyi. Petrogenesis and Geochemical Characteristics of Carboniferous Volcanic Rocks of Chagannur Iron Deposit Area in Western Tianshan, Xinjiang[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(6): 18-27.
- 王博, 宋芳, 倪兴华, 等. 天山古生代增生造山作用及其构造转换事件[J]. 地质学报, 2022, 96(10): 3514-3540.
- WANG Bo, SONG Fang, NI Xinghua, et al. Paleozoic accretionary orogenesis and major transitional tectonic events of the Tianshan orogen[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(10): 3514-3540.
- 王建中, 赵军, 段俊. 西天山察哈乌苏侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 世界地质, 2021, 40(3): 560-575.
- WANG Jianzhong, ZHAO Jun, DUAN Jun. LA-CP-MS zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of Chahawusu intrusion in West Tianshan, Xinjiang and their geological implication[J]. Global Geology, 2021, 40(3): 560-575.
- 王盟, 裴先治, 张进江, 等. 伊犁地块北缘早石炭世阿拉斯坦闪长岩成因及其对北天山俯冲过程的启示[J]. 地质通报, 2023, 42(5): 771-787.
- WANG Meng, PEI Xianzhi, ZHANG Jinjiang, et al. Petrogenesis of the Early Carboniferous Alasitandiorites from the northern margin of Yili Block and implication for subduction process of the North Tianshan Ocean[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(5): 771-787.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genetic mineralogy of zircon and its restriction on U-Pb age interpretation[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604.
- 肖庆辉, 邢作云, 张昱, 等. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. 地质前缘, 2003, 10(3): 221-229.
- XIAO Qinghui, XING Zuoyun, ZHANG Yu, et al. The major frontiers of the recent studies of granite[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 221-229.
- 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 等. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1521-1534.
- XU Xueyi, LI Rongshe, CHEN Junlu, et al. New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1521-1534.
- 徐学义, 夏林圻, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 83-94.
- XU Xueyi, XIA Linqi, MA Zhongping, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the plagiogranites from Bayingou ophiolite in North Tianshan Mountains and the petrogenesis of the ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1): 83-94.
- 闫永红, 薛春纪, 张招崇, 等. 西天山阿吾拉勒西段群吉萨依花岗岩斑岩地球化学特征及其成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(2): 139-153.
- YAN Yonghong, XUE Chunji, ZHANG Zhaochong, et al. Geochemistry and genesis of the Qunjisayi granite porphyry in the west of Awulale area, western Tianshan Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2013, 32(2): 139-153.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520.
- YUAN Honglin, WU Fuyuan, GAO Shan, et al. Zircon laser probe U-Pb age determination and REE composition analysis of Cenozoic intrusions in Northeast China[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1511-1520.
- 张博, 荆德龙, 汪帮耀, 等. 西天山备战铁矿石炭纪火山岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(6): 82-100.
- ZHANG Bo, JING Delong, WANG Bangyao, et al. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Carboniferous Volcanic Rocks from Beizhan Iron Deposit of West Tianshan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(6): 82-100.
- 张永玲, 张治国, 刘希军, 等. 内蒙朝克山辉长岩中单斜辉石矿物化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 122-138.
- ZHANG Yongling, ZHANG Zhiguo, LIU Xijun, et al. Mineralogical Chemistry Characteristics and Geological Significance of the Clinopyroxene from Chaokeshan Gabbro, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 122-138.
- 赵军. 新疆阿吾拉勒成矿带西段铜矿成矿环境与成矿规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2013, 1-161.
- ZHAO Jun. Study on the Metallogenic Settings and Metallogenic Regularity Of copper Deposits in Western Awulale Mountain,

- Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013, 1-161.
- 周新民, 徐夕生. 花岗岩岩石中岩石包体的成因类型及研究意义[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1991, 01: 6-8.
- ZHOU Xinmin, XU Xisheng. Genetic types and research significance of rock inclusions in granitic rocks[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 1991, 01: 6-8.
- 朱永峰, 王涛, 徐新. 新疆及邻区地质与矿产研究进展[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1785-1794.
- ZHU Yongfeng, WANG Tao, XU Xin. Progress of geology study in Xinjiang and its adjacent regions[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1785-1794.
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 西藏冈底斯东部察隅高分异I型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2009, 39(7): 833-848.
- ZHU Dicheng, MO Xuanxue, WANG Liquan, et al. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon. U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Sci China Ser D-Earth Science, 2009, 39(7): 833-848.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. 科学通报, 2005, 50(18): 78-88.
- ZHU Yongfeng, ZHANG Lifei, GU Libing, et al. SHRIMP chronology and trace element geochemistry of Carboniferous volcanic rocks in the West Tianshan Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(18): 78-88.
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1341-1350.
- ZHU Yongfeng, ZHOU Jing, GUO Xuan. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5): 1341-1350.
- 朱志新, 李锦轶, 董连慧, 等. 新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 170-179.
- ZHU Zhixin, LI Jinyi, DONG Lianhui, et al. Geological characteristics and tectonic significance of Paleozoic intrusive rocks in Western Tianshan of Xinjiang Province[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 170-179.
- Allen M B, Windley B F, Zhang C. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia[J]. Tectonophysics, 1992, 220(1-4): 89-115.
- Atherton M P, Petford N. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust[J]. Nature, 1993, 362(6416): 144-146.
- Bailey J C. Geochemical Criteria for a Refined Tectonic Discrimination of Orogenic Andesites[J]. Chemical Geology, 1981, 32(1-4): 139-154.
- Batchelor R A and Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1-4): 43-55.
- Bedard J. Enclaves from the A-type granite of the Mèganic Complex, White Mountain magma series: Clues to granite magmagenesis[J]. Journal of Geophysical, 1990, 95(B11): 17797-17819.
- Castro A, Moreno-Vent as I, de la Rosa J D. H-type (hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite-type classification and nomenclature[J]. Earth Science Reviews, 1991, 31(3-4): 237-253.
- Chappell B W, Stephens W E. Origin of infracrustal (I-type) granite magmas[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences, 1988, 79(2-3): 71-86.
- Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173-184.
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Pussia: A record of geological evolution from the Archaeozoic to the Palaeozoic[J]. Lithos, 2000, 51(1-2): 95-108.
- Coleman R G. Continental growth of northwest China[J]. Tectonics, 1989, 8(3): 621-635.
- Eby G N, Krueger H W, Creasy J W. Geology, Geochronology and geochemistry of the White Mountain batholith, New Hampshire [A]. In Puffer J H and Ragland P C, eds, Eastern North American Mesozoic magmatism[C]. Geological Society of America Special Paper, 1992, 268: 379-398.
- Gao J, Li M S, Xia X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 1998, 287(1-4): 213-231.
- Gorton M. P, Schandl E S. From Continents to Island Arcs: A Geochemical Index of Tectonic Setting for Arc-Related and within-Plate Felsic to Intermediate Volcanic Rocks[J]. The Canadian Mineralogist, 2000, 38(5): 1065-1073.
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, et al. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2010, 122(3-4): 627-640.
- Han Y, Zhao G. 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[J]. Earth Science Reviews, 2018, 186: 129-152.
- Hildreth W, Moorbath S. Crustal Contributions to Arc Magmatism in the Andes of Central Chile[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1988, 98(4): 455-489.
- Hoskin P W O, Irel and T R. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. Geology, 2000, 28(7): 627-630.
- Huang Z Y, Long X P, Kroner A, et al. Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu -Hf isotopes of early Paleozoic plutons in the northwestern Chinese Tianshan: Petrogenesis and geological implications

- tions[J]. *Lithos*, 2013, 182: 48–66.
- Kosler J, Fonnell and H, Sylvester P. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies—a comparison of laser ablation LACPMS and SIMS techniques[J]. *Chemical Geology*, 2002, 182(2–4): 605–618.
- Li N B, Niu H C, Shan Q, et al. Two episodes of Late Paleozoic A-type magmatism in the Qunjisayi area, western Tianshan: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 238–253.
- Li X H, Li Z X, Li W X, et al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab?[J]. *Lithos*, 2007, 96(1–2): 186–204.
- Li S M, Zhu D C, Wang Q, et al. Northward subduction of Bangong-Nujiang Tethys: Insight from Late Jurassic intrusive rocks from Bangong Tso in western Tibet[J]. *Lithos*, 2014, 205: 284–297.
- Long L L, Gao J, Klemd R, et al. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2011, 126(3–4): 321–340.
- Middlemost E A K. *Magma and Magmatic Rocks*[M]. London: Longman, 1985, 1–266.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37(3–4): 215–224.
- Miller C F, Mcdowell S M, Mapes R W. Hot and cold granites? Implication of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529–532.
- Pearce J A. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries[A]. In: Thoepe R S, ed. *Andesites*[M]. John Wiley and Sons, New York, 1982.
- Pearce J. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 1996, 19(4): 120–125.
- Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- Picher W S. Granite type and tectonic environment. *Mountain Building Processes*[M]. London: Academic Press, 1983, 19–40.
- Rapp R, Shimizu N, Norman, M. D, et al. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8GPa[J]. *Chemical Geology*, 1999, 160(4): 335–356.
- Rapp R P, Watson E B. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust - Mantle Recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891–931.
- Richards J P. Magmatic to Hydrothermal Metal Fluxes in Convergent and Collided Margins[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 40(1): 1–26.
- Rogers G, Hawkesworth C J. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 91(3–4): 271–285.
- Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust[A]. In: Rudnick R, ed. *The Crust, Treatise on Geochemistry*[M]. Elsevier, Amsterdam, 2003, 3: 1–64.
- Sajona F G, Maury R C, Bellon HJ, et al. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines)[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(3): 693–726.
- Silva M M V G, Neiva A M R, White house M J. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area, central Portugal[J]. *Lithos*, 2000, 50(1–3): 153–170.
- Sun S S, McDonough W F. *Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes*[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- Wang B, Cluzel D, Shu L S, et al. Evolution of calc-alkaline to alkaline magmatism through Carboniferous convergence to Permian transcurrent tectonics, western Chinese Tianshan[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1275–1298.
- Wang B, Faure M, Cluzel D. et al. Late Paleozoic tectonic evolution of the northern West Chinese Tianshan belt[J]. *Geodynamica Acta*, 2006, 19(3–4): 227–237.
- Wang X, Cai K, Sun M, et al. Evolution of late Paleozoic magmatic arc in the Yili Block, NW China: Implications for oroclinal bending in the western Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonics*, 2020, 39(12): e2019TC005822.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407–419.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia[J]. *Geology*, 1990, 18(2): 128–131.
- Wolf M B, London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and mechanism[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(19): 4127–4145.
- Yang T N, Wang Y, Li J Y, et al. Vertical and horizontal strain partitioning of the Central Tianshan(NW China): evidence from structures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29(10): 1605–1621.