

DOI: 10.12401/j.nwg.2023042

阿尔金造山带南缘晚奥陶世碱性辉长岩 成因及其大地构造意义

陈宁^{1,2}, 曾忠诚^{1,*}, 赵端昌¹, 张若愚¹, 李琦¹, 赵江林¹, 王天毅¹, 刘向东¹

(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源陕西省卫星应用技术中心, 陕西 西安 710000)

摘要: 笔者以阿尔金造山带南缘出露的碱性辉长岩为研究对象, 在详细的野外地质调查基础上, 通过岩相学、锆石 U-Pb 定年和全岩地球化学分析, 确定其成因环境和源区性质, 来探讨阿尔金造山带在该时期的构造演化过程。辉长岩锆石 U-Pb 测试结果显示其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (448.1±3.3) Ma, 代表了晚奥陶世的侵位时代。全岩地球化学分析结果表明, 辉长岩样品的 SiO₂ 含量为 42.40%~44.21%, 全碱含量为 3.56%~3.66%, 且富 Na、贫 K, 里特曼指数(σ)和碱度率(AR) 分别为 11~33 和 1.33~1.44, 为典型的富 Na 碱质辉长岩。稀土元素配分图和微量元素蛛网图显示辉长岩样品富集轻稀土元素和大离子亲石元素(如 Sr、Sc), 而亏损高场强元素(如 Zr 和 Hf), 且 Nb、Th 元素变化较大, 结合构造环境判别图解以及区域地质最新研究成果, 推测大洋俯冲板片流体交代了形成于后碰撞构造环境的碱性辉长岩岩浆源区, 随后该碱性岩浆在上升侵位过程中遭受了一定程度的地壳混染作用。碱性辉长岩的发现进一步证明阿尔金造山带在早古生代时期处于后碰撞构造环境。

关键词: 阿尔金造山带; 晚奥陶纪; 碱性辉长岩; 后碰撞构造环境; 交代作用

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0091-12

Petrogenesis and Tectonic Implications of Late Ordovician Alkaline Gabbro in the South Altyn Orogenic Belt

CHEN Ning^{1,2}, ZENG Zhongcheng^{1,*}, ZHAO Duanchang¹, ZHANG Ruoyu¹,
LI Qi¹, ZHAO Jianglin¹, WANG Tianyi¹, LIU Xiangdong¹

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Satellite Application Technology Center for Natural Resource, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Alkaline gabbro, located at south Altyn orogeny, is used to discuss petrogenesis and mantle source by comprehensive studies of detailed field work, petrography, zircon dating and whole-rock geochemical analysis, which provide the more evidence to constrain the tectonic evolution process in the southern Altyn orogeny.

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-03-05; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 第二次青藏高原科学考察研究计划项目“昆仑-阿尔金-柴北缘成矿带战略储备综合评估”(2019QZKK0806), 中国地质调查局项目“阿尔金地区 1:5 万 J45E010020 等 6 幅区域地质矿产调查”(12120114081901)和“新疆西昆仑 1:5 万喀英迪吉勒嘎幅等 5 幅区调”(1212011120533)联合资助。

作者简介: 陈宁(1985-), 男, 工程师, 主要从事区域地质调查工作。E-mail: 269070357@qq.com。

* 通讯作者: 曾忠诚(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事基础地质调查及构造地质学方面的研究。E-mail: 113191186@qq.com。

Zircon U–Pb dating of the gabbro sample yielded a weighted $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of (448.1 ± 3.3) Ma, which is interpreted as intrusive time of the gabbro. Geochemical results show that the gabbro have relative low content of SiO_2 (42.40%~44.21%), but high values of alkali (3.56%~3.66%), and the Rittman index and Alkalinity ratios are 11~33 and 1.33~1.44, respectively. The lines of evidence indicate that the gabbro is classified as the alkaline gabbro series. In addition, the alkaline gabbro samples in the southern Altyn orogeny are enriched in REE and LILE (Sr and Sc), but depleted in HFSE (Hf and Zr), and varied contents of Nb and Th elements. Based on the plotting results of tectonic discrimination, regional geological survey and published data, it is proposed that the mantle source of the alkaline gabbro metasomatized by the fluid of the oceanic subducted slab, and contaminated by the continental crust during ascending process. Therefore, occurrence of the alkaline gabbro not only confirms that the Altyn orogeny was under the framework of the post–collision tectonic setting during early Paleozoic era, but also enriches the mafic magmatism of the orogeny.

Keywords: Altyn orogenic belt; Late Ordovician; alkaline gabbro; post–collision tectonic setting; metasomatism

阿尔金造山带位于青藏高原北缘,地处柴达木板块和塔里木板块之间,是一条经历多期次俯冲–碰撞事件的构造复合带(Li et al., 2015; 李琦等, 2015, 2018; 毕政家等, 2016; Liu et al., 2018; 赵江林等, 2018),自北向南依次为红柳沟–拉配泉蛇绿构造混杂岩带、阿中地块和阿南蛇绿构造混杂岩带3个构造单元(校培喜等, 2014)。近年来,阿尔金造山带的研究不断取得新进展,主要包括陆壳俯冲深度和极性、折返时限和变质演化等方面(刘良等, 2015),这对研究古俯冲–碰撞造山过程、壳–幔相互作用和构造体制转换等方面具有重要的指示意义。已有研究表明,南阿尔金造山带俯冲碰撞阶段可以分为洋壳俯冲、陆壳深俯冲、陆壳折返和碰撞后伸展等4个阶段(刘良等, 2015)。早古生代由深俯冲陆壳折返引起的碰撞挤压向伸展体制转换的区域构造过程,引起了造山带南缘最为强烈的一期岩浆活动(马中平等, 2009, 2011; 曹玉亭等, 2010; 孙吉明等, 2012; 杨文强等, 2012; 康磊等, 2013; Wang et al., 2014; 董洪凯等, 2014),这类岩浆岩均属于高K钙碱性岩石系列,很可能为幔源物质上涌引起的中上地壳部分熔融作用形成的产物(刘良等, 2015)。然而,这期由构造体制转换引起的岩浆活动却鲜见碱性岩浆事件的报道。

基性岩作为幔源岩浆的典型代表,对地幔物质组成、岩石圈演化和大陆动力学研究具有重要的指示意义(Hoek et al., 1995),可以形成于多种构造环境,具有明确的构造演化和地球动力学意义(Jiang et al., 2018; 蒋幸福等, 2021; 张海迪等, 2021)。碱性基性岩作为基性岩的一种特殊类型,常形成于伸展环境,是示踪

地幔性质和探讨地球动力学的理想研究对象(王联魁等, 2003; 赵甫峰等, 2011)。最近,笔者在阿尔金造山带北部的玉苏普勒克地区新识别出一套晚奥陶纪碱性辉长岩。通过岩相学、锆石年代学和全岩地球化学等手段,确定了该辉长岩的形成时代和成因背景,为限定阿尔金造山带北部的构造环境演化时限,以及该时期造山带的构造格架和构造体制转换提供更多的科学依据。

1 区域地质背景

阿尔金断裂带位于青藏高原西北部,走向呈NEE向,是柴达木盆地和塔里木盆地的“分隔线”(Wittlinger et al., 1998)。阿尔金地区侵入岩分布广泛,且形成时代覆盖了前南华纪至晚三叠世,但岩浆活动的高峰期主要集中于南华纪—中泥盆世,形成了酸性、中性、基性和超基性岩等多种性质的岩浆岩(计文化等, 2020),但鲜见碱性岩浆作用。

研究区位于阿尔金造山带南缘主断裂的南部,该断裂带南北两侧分别为阿南(蛇绿)构造混杂岩带和阿中地块(图1a)。阿南蛇绿混杂岩带主要由蛇纹石化纯橄岩和方辉橄榄岩,基性岩火山岩,枕状玄武岩和硅质岩以及少量的辉长岩、安山岩和硅质岩等(何国琦等, 1994; 刘良等, 1998; 王焰等, 1999)。笔者研究对象为侵入阿南蛇绿混杂岩带的晚奥陶纪辉长岩,根据本次地质调查成果,该辉长岩属于晚奥陶纪—早志留纪阿勒克塔格岩体,分布于玉苏普勒克一带(图1b)。根据岩石组合、接触关系和年代学特征,本

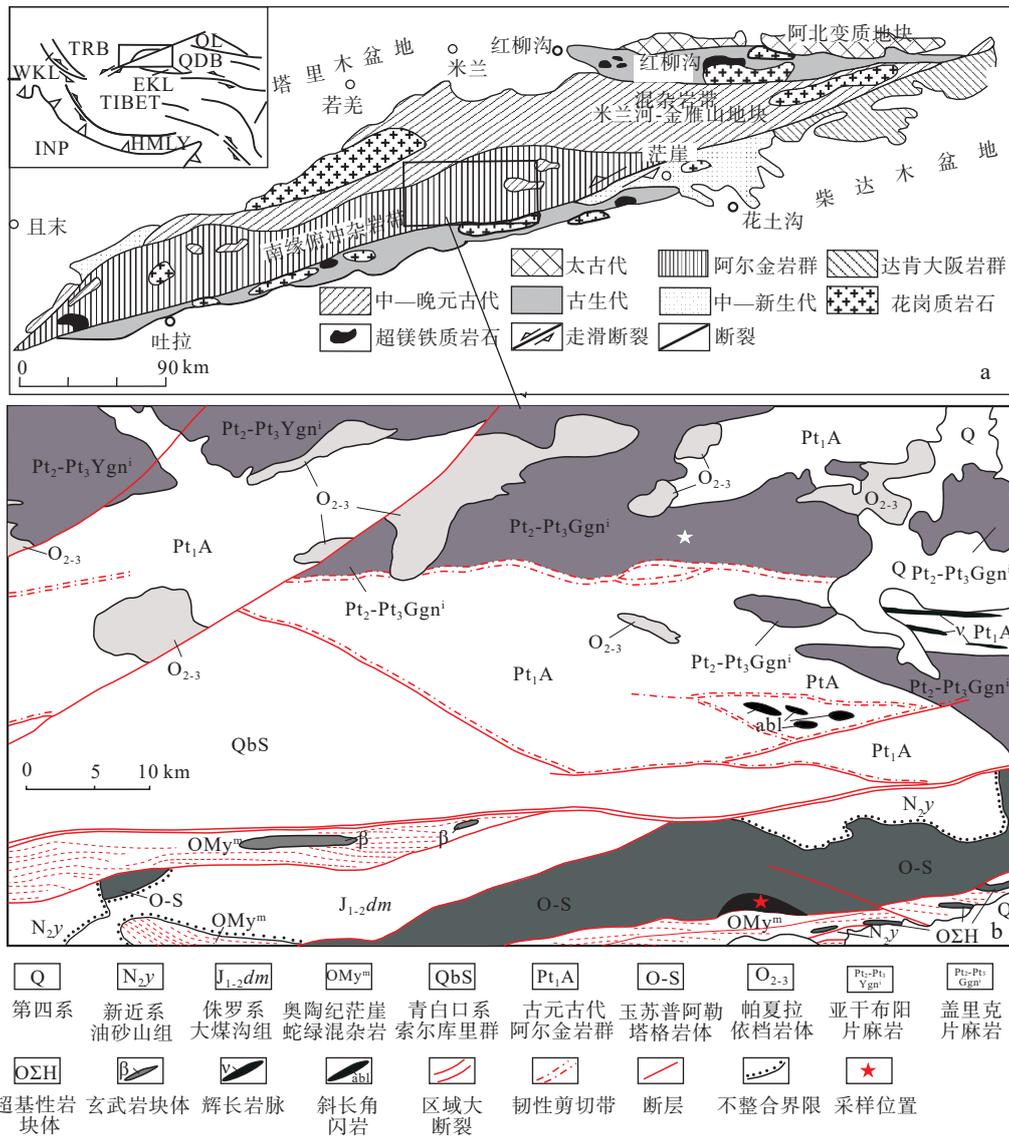


图 1 阿尔金造山带地质构造图(a)(据 Liu et al., 2002 修改)和研究区地质简图 (b)(据原西安地质矿产研究所, 2003 修改)

Fig. 1 (a) Tectonic map of the Altay Tagh and (b) sketch geological map of the study area

次地质调查过程中, 将阿勒克塔格岩体从早到晚依次划分为辉长岩、细粒闪长岩、中细粒花岗闪长岩、中粒二长花岗岩、正长花岗岩和碳酸岩等 6 个侵入体, 各侵入单元之间均呈脉动接触关系, 时代为 455~420 Ma (Wang et al., 2014)。

野外地质调查结果显示辉长岩主要呈小型岩株产出(图 2a), 出露面积约为 6.08 km²。辉长岩侵入体为近椭圆形, 与花岗闪长岩呈脉动接触关系, 且在辉长岩中可见大量花岗闪长岩脉体。遥感影像特征显示辉长岩侵入体为墨绿色色调, 树枝状、羽状影纹, 影纹较粗糙, 无植被覆盖, 尖棱状山脊, 树枝状水系, 水系紧密, 杂乱分布, 发育 V 形谷(图 2b)。

2 岩相学特征

野外露头显示, 辉长岩呈灰黑色, 块状构造(图 2c)。显微岩相学观察结果表明, 其主要由角闪石(50%~53%)、斜长石(28%~32%)、黑云母(10%~13%)和铁质矿物(3%~5%), 以及少量磷灰石、锆石和榍石等副矿物组成(图 2d)。角闪石多呈半自形柱状-他形粒状, 粒径大小为 0.2~2.5 mm, 浅黄-黄绿/绿色多色性, 干涉色多为一级黄至橙黄或受颜色的干扰而呈黄绿色, 部分颗粒可见典型的角闪石式解理或简单接触双晶。斜长石呈半自形柱状-他形粒状, 粒径

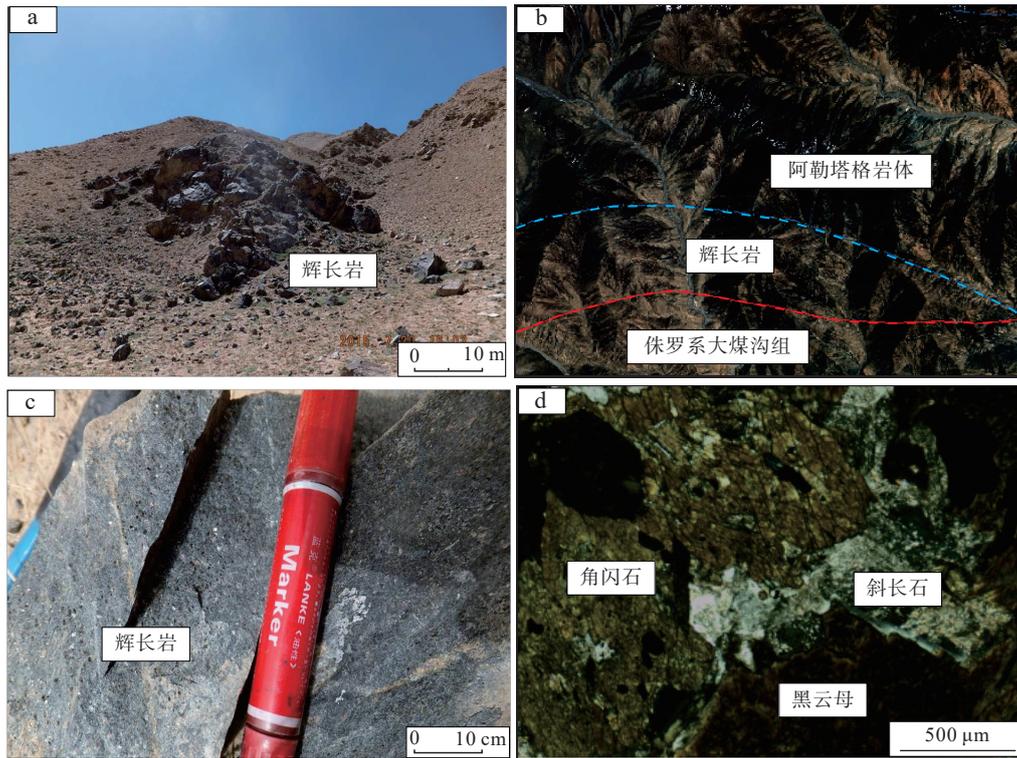


图2 阿尔金造山带南缘晚奥陶纪辉长岩野外、显微结构照片和遥感影像特征图
Fig. 2 Field and microscope photos and remote sensing image of late Ordovician gabbro
in the South Altyn orogeny

为0.2~1.4 mm, 表面浑浊多发生较强烈的黏土化和绢云母化, 部分蚀变较弱颗粒可观察到聚片双晶或卡钠复合双晶, 部分包含或边缘嵌入黑云母或角闪石呈包含嵌晶结构。黑云母呈半自形板片状-他形片状, 粒径大小为0.1~2.7 mm, 呈浅黄-黄褐色多色性显著, 可见一组极完全解理, 干涉色多受本身颜色影响而呈黄褐色, 部分颗粒局部绿泥石化或绿帘石化。铁质矿物呈半自形-他形粒状, 浸染状分布。

3 分析方法

3.1 锆石 U-Pb 同位素分析方法

晚奥陶世辉长岩年代学样品(约12 kg)的锆石挑选工作在核工业二〇三研究所完成, 制靶和抛光后, 在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成反射光、透射光和阴极发光显微照相工作, 锆石的 CL 图像分析在装有英国 Gatan 公司生产的 Mono CL3+阴极发光装置系统的电子显微扫描电镜上进行。通过对反射光、透射光和阴极发光图像分析, 选择吸收程度均匀和形态明显不同的区域进行分析。

锆石 U-Pb 定年和微量元素分析在西北大学大陆

动力学国家重点实验室完成。分析仪器为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a 型四极杆质谱仪和德国 Microlas 公司生产的 Geolas200M 型激光剥蚀系统。每个分析点的气体背景采集时间为 30 s, 信号采集时间为 40 s, 每完成 5 个待测样品测定, 插入标准锆石 91500 两次, 元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NISTSRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。数据采集处理采用 GLITTER, 年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLOT(3.0 版)软件完成。详细的实验原理和流程及仪器参见文献(Yuan et al., 2003)。

3.2 全岩地球化学分析方法

全岩地球化学分析工作在核工业二〇三研究所分析测试中心完成。FeO 采用容量法分析, 依据标准 GB/T14506.14-2010。其他常量元素和微量元素中 P、Ba、V、Cr、Rb、Sr、Zr、Sc 均采用 XRF 法分析, 依据标准 GB/T14506.28-2010。所有稀土元素及微量元素中 Co、Ni、Nb、Hf、Ta、Th、U 采用 ICP-MS 法分析, 依据标准 GB/T14506.30-2010。TFe₂O₃ 则通过公式 $T\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} \times 1.1113$ 计算获得。主量元素、微量元素和稀土元素分别在 Axios 型 X 射线光谱仪

和 XSERIES II 型 ICP-MS 仪器上完成, 其中常量元素分析误差小于 1%, 微量元素和稀土元素分析精度优于 5%。

4 年代学分析结果

本次研究的辉长岩锆石 CL 图像显示其颗粒晶形多为柱状, 粒径多为 $60\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}\sim 80\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$, 少数为浑圆状。根据 CL 图像特征(图 3), 锆石均具

有典型的岩浆震荡环带结构, 但部分颗粒的环带结构较宽, 可能与其结晶时高温导致微量元素扩散速度过快有关, 此外, 少量颗粒内部较为复杂, 且可见继承核和较窄的变质边。选取了辉长岩样品中 20 个锆石颗粒进行了 U-Pb 定年, 年代学结果见表 1。

辉长岩样品的 20 个颗粒锆石分析结果表明, 其 Th/U 值为 0.11~1.57, 结合其振荡环带结构特征, 显示锆石属于典型的岩浆成因(吴元保等, 2004)。其中#1 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 505 Ma, 推测其很可能为继承

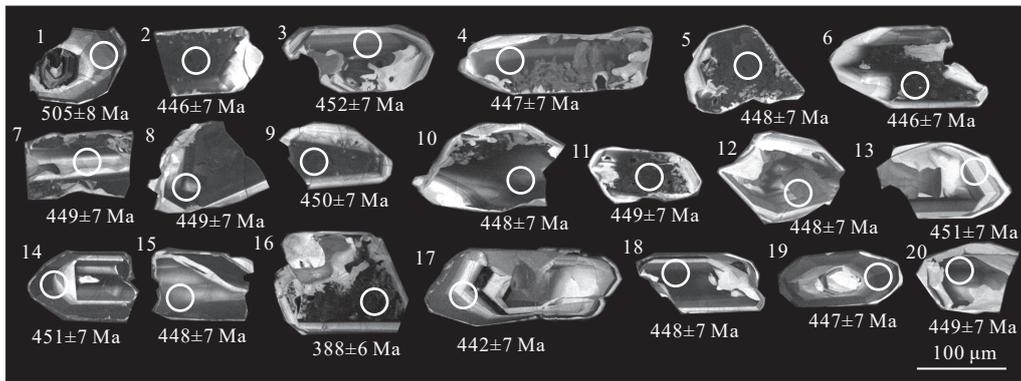


图 3 阿尔金造山带南缘晚奥陶纪辉长岩 CL 图像及和 U-Pb 年龄值图

Fig. 3 CL images and U-Pb ages of the late Ordovician gabbro in the South Altyn orogeny

表 1 阿尔金造山带南缘晚奥陶纪碱性辉长岩样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果表

Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical results of the late Ordovician alkaline gabbro in the South Altyn orogenic belt

点号	Th/U	U-Th-Pb同位素比值								T (Ma)							
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Th}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
		比率	1σ	比率	1σ	比率	1σ	比率	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
01	0.16	0.056 69	0.001 97	0.637 49	0.015 13	0.081 54	0.001 38	0.037 34	0.000 84	479	76	501	9	505	8	741	16
02	0.85	0.056 44	0.001 73	0.557 33	0.009 79	0.071 6	0.001 17	0.022 56	0.000 32	469	67	450	6	446	7	451	6
03	0.50	0.058 85	0.001 87	0.589 02	0.011 45	0.072 57	0.001 2	0.027 22	0.000 41	562	68	470	7	452	7	543	8
04	0.37	0.057 18	0.001 76	0.566 04	0.010 01	0.071 78	0.001 18	0.022 94	0.000 33	498	67	456	6	447	7	458	7
05	1.57	0.056 06	0.001 74	0.556 58	0.010 17	0.071 99	0.001 18	0.023 29	0.000 33	454	68	449	7	448	7	465	6
06	1.52	0.058 19	0.001 76	0.574 25	0.009 83	0.071 55	0.001 17	0.022 7	0.000 31	536	66	461	6	446	7	454	6
07	0.68	0.056 27	0.001 73	0.559 23	0.009 96	0.072 06	0.001 19	0.026 48	0.000 38	462	67	451	6	449	7	528	7
08	0.61	0.056 14	0.001 81	0.558 3	0.011 33	0.072 11	0.001 2	0.025 72	0.000 38	458	70	450	7	449	7	513	8
09	2.08	0.055 78	0.001 67	0.555 79	0.009 28	0.072 24	0.001 18	0.021 9	0.000 3	444	65	449	6	450	7	438	6
10	0.27	0.058 08	0.001 88	0.576 86	0.011 85	0.072 01	0.001 2	0.025 44	0.000 42	532	70	462	8	448	7	508	8
11	1.11	0.056 23	0.001 7	0.559 28	0.009 59	0.072 12	0.001 19	0.020 32	0.000 28	461	66	451	6	449	7	407	6
12	0.19	0.055 65	0.001 86	0.551 94	0.012 2	0.071 91	0.001 21	0.024 73	0.000 49	438	73	446	8	448	7	494	10
13	0.11	0.055 25	0.001 75	0.551 71	0.010 94	0.072 4	0.001 21	0.028 24	0.000 57	422	69	446	7	451	7	563	11
14	0.25	0.056 18	0.002	0.561 5	0.014 23	0.072 47	0.001 25	0.021 98	0.000 43	459	77	453	9	451	7	439	9
15	0.64	0.055 05	0.001 71	0.546 08	0.010 21	0.071 93	0.001 2	0.022 53	0.000 33	414	67	442	7	448	7	450	7
16	0.30	0.072 32	0.002 24	0.618 65	0.011 48	0.062 03	0.001 03	0.020 5	0.000 33	995	61	489	7	388	6	410	6
17	0.61	0.061 74	0.001 92	0.604 86	0.011 39	0.071 04	0.001 19	0.021 51	0.000 32	665	65	480	7	442	7	430	6
18	0.97	0.055 56	0.001 67	0.551 95	0.009 45	0.072 04	0.001 19	0.023 17	0.000 32	435	65	446	6	448	7	463	6
19	0.29	0.054 98	0.001 72	0.544 29	0.010 57	0.071 8	0.001 2	0.022 21	0.000 36	411	68	441	7	447	7	444	7
20	0.69	0.057 34	0.001 85	0.569 85	0.011 84	0.072 07	0.001 22	0.023 52	0.000 36	504	70	458	8	449	7	470	7

性锆石,这也与锆石 CL 图像结果一致(图 3);#16 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 388 Ma,表明该锆石颗粒可能遭受了晚期热事件的影响。剩余 18 个分析点均落在谐

和线上及其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (448.1 ± 3.3) Ma(MSWD=0.1)(图 4),代表该辉长岩侵入体的形成年龄。

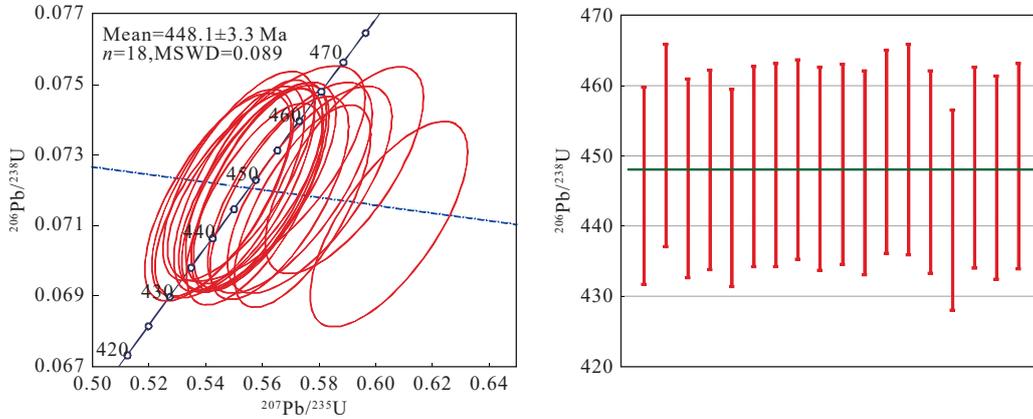


图 4 阿尔金造山带南缘晚奥陶纪辉长岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Concordia diagram of the late Ordovician gabbro in the South Altyn orogeny

5 全岩地球化学特征

辉长岩地球化学分析结果显示(表 2), SiO_2 含量

为 42.40%~44.21%; MgO 含量为 7.70%~8.29%, $\text{Mg}^\#$ 值为 51.91~52.77。 Na_2O 和 K_2O 含量分别为 2.02%~2.23% 和 1.38%~1.57%,具有富 Na、贫 K 的特点,全碱含量为 3.56%~3.66%,在 TAS 图解中,样品落入辉

表 2 阿尔金造山带南缘晚奥陶纪碱性辉长岩样品主量元素(%)和微量元素(10^{-6})地球化学分析结果表

Tab. 2 Major (%) and trace (10^{-6}) elements geochemical data of the late Ordovician alkaline gabbro in the South Altyn orogenic belt

样品号	D6060	D6061	D6062	D6063	样品号	D6060	D6061	D6062	D6063
SiO_2	44.04	42.4	43.4	44.21	Ho	1.13	1.02	1.06	1.07
TiO_2	2.75	2.88	2.69	2.84	Er	2.57	2.34	2.4	2.47
Al_2O_3	15.81	15.72	15.88	15.8	Tm	0.45	0.39	0.41	0.42
Fe_2O_3	5.3	5.53	5.6	5.46	Yb	2.14	2.06	2.08	2.09
FeO	7.95	8.23	8.05	7.99	Lu	0.35	0.27	0.31	0.32
MnO	0.12	0.12	0.12	0.12	Y	27.3	26.8	27.88	27.63
MgO	7.7	8.28	8.09	7.9	Sr	714.2	683.1	696.34	700.02
CaO	9.04	9.81	9.78	9.46	Ba	394.7	428.7	400.3	400.2
Na_2O	2.18	2.02	2.23	2.16	Rb	40.2	36.7	38.9	38.4
K_2O	1.38	1.57	1.43	1.49	Th	5.89	2.95	3.33	4.27
P_2O_5	0.22	0.22	0.22	0.22	Pb	19.9	17.6	18.04	19.03
烧失量	1.88	1.33	1.44	1.39	U	1.07	0.78	0.9	0.92
总量	98.37	98.11	98.93	99.04	Zr	89.8	82.7	88.6	85.2
La	19.7	21.8	20.4	21.5	Nb	49.9	11.3	22.59	36.78
Ce	47.3	48.1	48.2	47.9	Ta	2.17	2.19	2.19	2.18
Pr	7.17	6.35	6.65	6.92	Hf	2.3	2.22	2.3	2.29
Nd	32	30.6	31.3	31.7	δEu	0.92	0.94	0.92	0.93
Sm	7.81	7.22	7.65	7.48	δCe	0.96	0.97	0.99	0.94
Eu	2.19	2.14	2.16	2.17	$\sum\text{REE}$	162.77	161.27	162.77	164.31
Gd	6.48	6.45	6.45	6.47	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	6.21	7.13	6.62	6.93
Tb	0.99	1.02	1	1.01	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	1.59	1.9	1.68	1.81
Dy	5.19	4.71	4.8	5.21	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	2.44	2.53	2.5	2.5

长岩范围,属碱性系列(图 5a),与里特曼指数(11~33)结果一致。辉长岩碱度率(AR)为 1.33~1.44,在 SiO₂-AR 图解中也落入碱性岩区域(图 5b)。辉长岩

Al₂O₃ 和 TiO₂ 含量分别为 15.72%~15.88% 和 2.69%~2.88%, CaO 含量为 9.04%~9.81%。主量元素显示该辉长岩总体为一套钠质碱性系列。

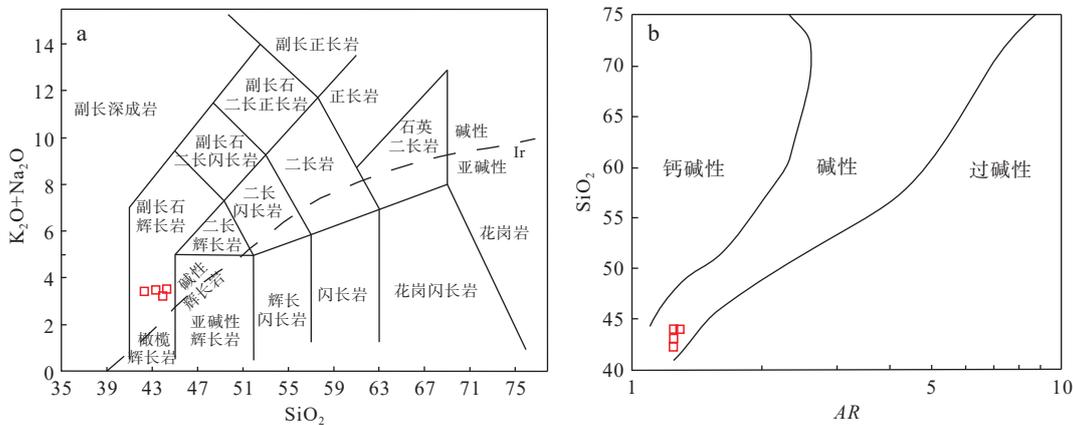


图 5 阿尔金造山带南缘晚奥陶纪辉长岩 TAS 图解(a)(Middlemost, 1994)和 SiO₂-AR 图解(b)

Fig. 5 (a) TAS diagram and (b) SiO₂-AR diagram for the late Ordovician gabbro samples in the South Altyn orogeny

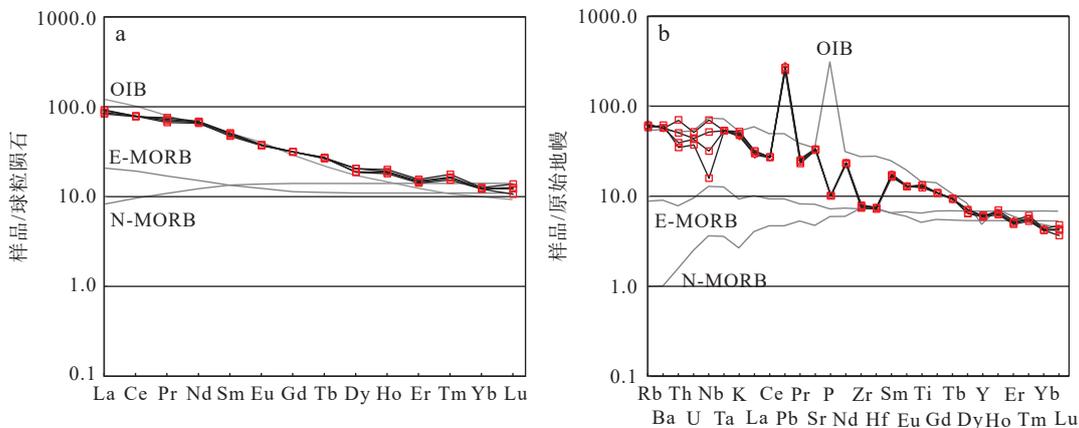
阿尔金造山带南缘玉苏普地区碱性辉长岩的稀土含量中等,ΣREE 值为 161.77×10⁻⁶~164.31×10⁻⁶,轻、重稀土含量分别为 111.17×10⁻⁶~117.67×10⁻⁶ 和 18.26×10⁻⁶~19.30×10⁻⁶。在球粒陨石标准化稀土元素配分图中(图 6),表现轻稀土富集,重稀土亏损特征,(La/Yb)_N 值为 6.21~7.13,指示轻重稀土分馏程度一般。此外,(La/Sm)_N 和 (Gd/Yb)_N 值分别为 1.59~1.90 和 2.44~2.53,表明重稀土分馏程度较轻稀土高。稀土元素配分图中,辉长岩样品的 δEu 和 δCe 不明显。玉苏普地区碱性辉长岩在微量元素原始地幔标准蛛网图中表现出一致的分布特征(图 6),样品整体富集大离子亲

石元素,如 Cs、Pb 和 Sr 等,而 Zr、Hf 等高场强元素和 La、P 等元素明显亏损。

6 讨论

6.1 阿尔金造山带南缘晚奥陶纪碱性岩浆事件

阿尔金造山带南缘广泛出露古生代岩浆作用,这类岩浆岩多为高 K 钙碱性花岗质岩石系列,且呈现出多期次特征,如刘良等(2015)综合前人研究认为该造山带存在 517 Ma, 501~496 Ma, 462~451 Ma 和 426~385 Ma 4 次岩浆作用(刘良等, 2015),并提出南



标准化值来自于 Sun et al. (1989); OIB. 洋岛玄武岩; E-MORB. 富集型洋中脊玄武岩; N-MORB. 正常洋中脊玄武岩

图 6 阿尔金造山带南缘晚奥陶纪碱性辉长岩稀土元素配分图(a)与微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 (a) Chondrite-normalized REE distribution diagram and (b) primitive mantle-normalized trace element diagram of the late Ordovician gabbro in the South Altyn orogeny

阿尔金构造背景在~450 Ma 处于俯冲碰撞向伸展抬升转换的阶段。近年来越来越多的研究表明,阿尔金南缘也发育少量的基性-超基性岩,如长沙沟和清水泉地区(马中等, 2009, 2011; 董洪凯等, 2014)。此外,曾忠诚等(2022)在该研究区发现了早古生代(~445 Ma)的赞岐质闪长岩。总的来说,阿尔金造山带南缘鲜见早古生代碱性岩浆事件的报导(曾忠诚等, 2022)。

笔者对南阿尔金造山带玉苏普地区碱性辉长岩进行的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,该辉长岩的形成时代为 448 Ma,这一数据记录了造山带南缘晚奥陶纪碱性岩浆事件的发生。此外,该碱质基性岩浆侵位时代与研究区的赞岐质闪长岩形成时间一致(曾忠诚等, 2022),也与区内古生代最为强烈的一期花岗质岩浆活动相当,暗示它们应形成于相似的构造背景。结合北阿尔金出露的同时代 S 型花岗岩和埃达克质岩石(吴才来等, 2005; Wu et al., 2009; Yu et al., 2018),表明早古生代最强烈的一期岩浆活动贯穿了整个阿尔金造山带。

6.2 岩石成因和源区性质

阿尔金造山带南缘玉苏普地区的碱性辉长岩具有高的 Mg 含量(MgO=7.70%~8.28%)和铁含量($Fe_2O_3=7.95\% \sim 8.23\%$), $Mg^\#$ 值为 51.91~52.77, 表明母岩浆在演化过程中分离结晶的作用较弱。在 MgO 与不相容元素比值图解中(图 7), 随着 MgO 含量的升高, Th/Nb 和 La/Nb 值增大而 Th/Ta 值则减小, 进一步证明了研究区碱性辉长岩形成过程中弱的分离结晶作用, 同时也显示该岩石形成过程中遭受了一定程度的地壳混染作用(庄玉军等, 2023)。在微量元素蛛网图中, 高场强元素 Th 和 Nb 含量变化较大, 然而在 MgO-Th/Nb 哈克图解中(图 7c), 两者却显示较好的正相关关系, 推测这很可能是地壳混染作用导致。除此之外, 辉长岩样品整体上富集大离子亲石元素, 如 Pb、Sr 等, 而亏损 Zr、Hf 等高场强元素和 La、P 等元素, 因此讨论其岩石成因和源区性质时, 可以考虑上述微量元素和稀土元素, 但应尽量排除 Th 和 Nb 元素的影响。

玉苏普地区碱性辉长岩的主量元素数据显示其为钠质碱性辉长岩系列, 这类岩石通常起源于富集地幔源区(张学诚, 1995), 这些异常地幔源的形成很可能与特殊的地幔深部动力学过程或地幔流体交代作用相关, 而超深大断裂作为岩浆上升的通道, 是钠质

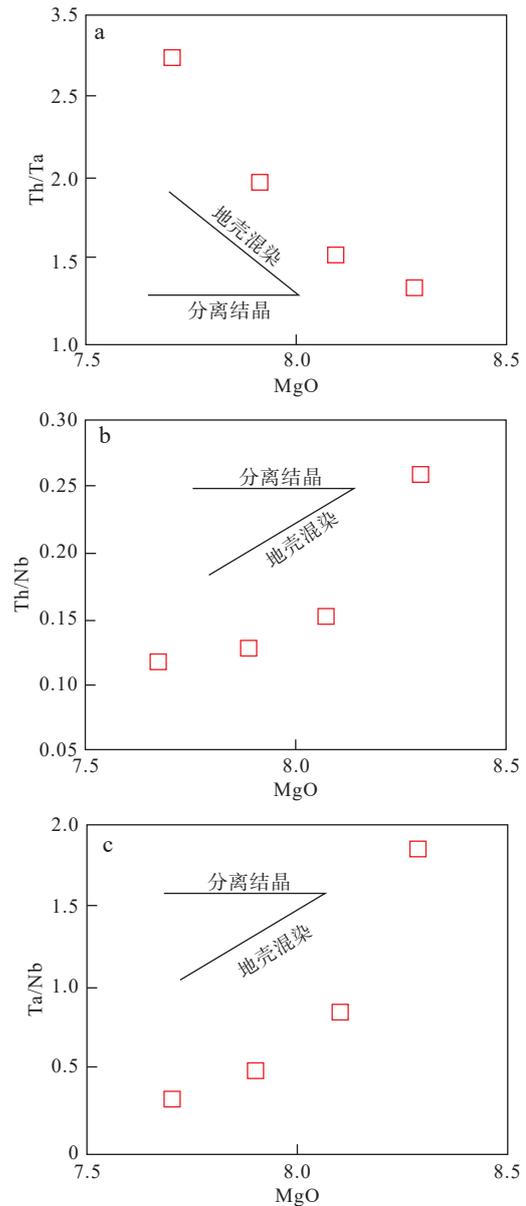


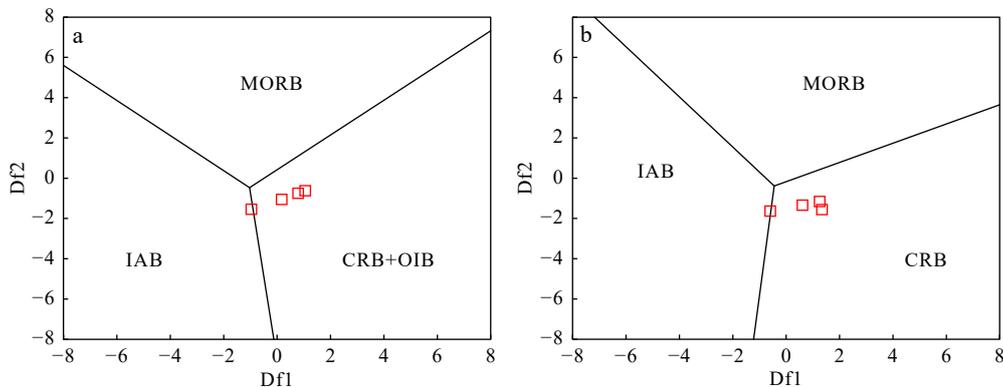
图7 南阿尔金造山带奥陶纪辉长岩 MgO-Th/Ta 图解 (a)、Th/Nb 图解(b)和 Ta/Nb 图解(c)

Fig. 7 (a) MgO-Th/Ta, (b) Th/Nb and (c) Ta/Nb diagrams of the late Ordovician gabbro in the South Altyn orogen

地幔富碱岩系形成的重要条件(张学诚, 1995; 郑海飞等, 1996; Marty et al., 2003)。研究区辉长岩微量元素整体富集 Rb、Cs、Pb 和 Sr 等大离子亲石元素而亏损 Hf、Zr 等高场强元素(图 6), 表明该源区岩浆性质与俯冲板片脱水交代上覆地幔楔发生部分熔融作用有关, 并且辉长岩的 Zr/Hf 值为 37.21~39.04(平均值为 38.01), 明显高于大陆地壳相应的比值(33)(Taylor et al., 1985)。这些证据表明, 玉苏普地区碱性辉长岩很可能起源于富集地幔源区, 但该源区在部分熔融之前遭受大洋俯冲板片俯冲熔/流体的交代作用, 在形成后

的侵位过程中, 阿尔金南缘主断裂为其提供了上升就位通道。

研究区碱性辉长岩在形成过程中, 遭受一定程度的地壳混染作用。地壳物质是在地幔源区遭受板片俯冲熔/流体作用交代时带入的大洋沉积物还是后期侵位过程中的陆壳物质, 这一问题的解决还需要进一步研究。曾忠诚等(2022)在研究区报道了~445.5 Ma 的赞岐质闪长岩, 并提出该闪长岩在形成过程中遭受了俯冲沉积物溶体的富集交代作用(曾忠诚等, 2022)。然而, 与该赞岐质闪长岩相比, 文中的碱性辉长岩微量元素分布特征与其不同且关键比值也差别较大。La/Nb 和 La/Ba 值是探讨岩石是否遭受地壳混染的有效手段之一(夏林圻等, 2016), 碱性辉长岩的分析样品具有高的 La/Nb 和较低的 La/Ba 值, 且随着 MgO 含量的升高, Th/Nb 和 La/Nb 值增大而 Th/Ta 值则减小(图 7), 加上~505 Ma 的继承性锆石特征(图 3)。笔者认为碱性辉长岩很可能在上升侵位过程中遭受了一定程度的地壳混染作用。



MORB. 大洋中脊玄武岩; IAB. 岛弧玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩; CRB. 大陆裂解玄武岩

图 8 南阿尔金造山带奥陶纪碱性辉长岩构造判别图解(Agrawal et al., 2008)

Fig. 8 Trace element tectonic discrimination diagrams of the late Ordovician gabbro in the South Altyn orogen

越来越多的幔源岩浆事件的报道, 表明其在阿尔金造山带应属于一期区域性构造热事件(刘良等, 2015)。例如, 南阿尔金造山带长沙沟中段记录的 464~445 Ma 辉长岩(马中平等, 2009, 2011; 董洪凯等, 2014); 南阿尔金造山带出露的~450 Ma 辉长岩和赞岐质闪长岩(康磊等, 2015; 曾忠诚等, 2022)。这一区域性幔源岩浆事件很可能与本研究中碱性辉长岩的成因机制存在密切关系, 因为碰撞构造环境中大洋俯冲板片的断离容易诱发地幔楔减压熔融形成幔源岩浆(刘良等, 2015)。随着俯冲-碰撞作用的持续, 在后

6.3 构造环境和大地构造意义

俯冲带构造背景下由于俯冲板片脱水交代上覆地幔楔发生部分熔融作用而引起的岩浆性质, 由于在富水环境中, 更易使得形成的岩石富集大离子亲石元素(富含于造岩矿物)而亏损高场强元素(残留在源区)。玉苏普地区辉长岩样品的地球化学数据表现出相似特征, 富集 Rb、Cs、Pb 和 Sr 等大离子亲石元素而亏损 Hf、Zr 等高场强元素(图 8), 表明该辉长岩可能形成于俯冲-碰撞构造环境或在形成过程中其岩浆源区遭受了俯冲板片流体的交代作用。在构造环境判别图解中(图 8), 研究区碱性辉长岩样品整体落入大陆裂谷环境, 因此排除其形成于俯冲-碰撞背景。结合研究区最新报道的~450 Ma 赞岐质闪长岩以及北阿尔金地区获得的同时代 S 型花岗岩和埃达克质岩花岗岩(吴才来等, 2005; Wu et al., 2009; Yu et al., 2018; 曾忠诚等, 2022), 笔者推测研究区该时期应处于后碰撞环境的构造演化阶段。

碰撞构造背景下, 板片流体交代富碱地幔源区形成的富碱岩浆沿阿尔金主断裂上升侵位, 并在侵位过程中捕获了~500 Ma 形成的锆石。

7 结论

(1) 全岩地球化学分析结果显示, 南阿尔金辉长岩富 Na、贫 K, 属于典型的富 Na 碱质辉长岩系列。

(2) 碱性辉长岩的锆石 U-Pb 年代学结果显示其形成时代为(448.1±3.3)Ma, 与南阿尔金造山带俯冲碰

撞向伸展抬升转换阶段而引起的区域岩浆侵入事件发生的时间一致。

(3)碱性辉长岩整体上富集大离子亲石元素且亏损高场强元素,结合区域研究成果,推测该辉长岩应形成于后碰撞构造环境下富碱岩浆沿阿尔金山主断裂主断裂上升侵位过程。

参考文献(References):

- 毕政家,曾忠诚,张昆昆,等.阿尔金山南缘帕夏拉依档沟斜长角闪岩年代学、地球化学及其构造意义[J].中国地质,2016,43(4):1149-1164.
- BI Zhengjia, ZENG Zhongcheng, ZHANG Kunkun, et al. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the amphibolite from Paxialayidang area on the southern margin of Altun terrain[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1149-1164.
- 曹玉亭,刘良,王超,等.阿尔金山南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成[J].岩石学报,2010,26(11):3259-3271.
- CAO Yuting, LIU Liang, WANG Chao, et al. Geochemical, zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions studies for Tatelekebulake granite in South Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(11): 3259-3271.
- 董洪凯,郭金城,陈海燕,等.新疆阿尔金山地区长沙沟一带奥陶纪侵入岩及其演化特征[J].西北地质,2014,47(4):73-87.
- DONG Hongkai, GUO Jincheng, CHEN Haiyan, et al. Evolution characteristics of Ordovician intrusive rock in Changshagou of Altun Region[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(4): 73-87.
- 何国琦,李茂松,刘德权,等.中国新疆古生代地壳演化及成矿[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1994:43-47.
- HE Guoqi, LI Maosong, LIU Dequan, et al. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang, China[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1994: 43-47.
- 计文化,李荣社,陈奋宁,等.中国西北地区南华纪—古生代构造重建及关键问题讨论[J].地质力学学报,2020,26(5):634-655.
- JI Wenhua, LI Rongshe, CHEN Fengning, et al. Tectonic reconstruction of northwest China in the Nanhua-Paleozoic and discussions on key issues[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 634-655.
- 蒋幸福,彭松柏,韩庆森.扬子克拉通黄陵背斜南部~860Ma岩墙的成因及地质意义[J].地球科学,2021,46(6):2117-2132.
- JIANG Xingfu, PENG Songbai, HAN Qingsen. Petrogenesis and geological significance of ca. 860 Ma dikes in southern Huangling anticline, Yangtze craton[J]. *Earth Science*, 2021, 46(6): 2117-2132.
- 康磊,刘良,曹玉亭,等.阿尔金山南缘塔特勒克布拉克复式花岗岩体东段片麻状花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].岩石学报,2013,29(9):3039-3048.
- KANG Lei, LIU Liang, CAO Yuting, et al. Geochemistry, zircon U-Pb age and its geological significance of the gneissic granite from the eastern segment of the Tatelekebulake composite granite in the south Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3039-3048.
- 康磊,校培喜,高晓峰.阿尔金山南缘早古生代岩浆作用及碰撞造山过程[J].地质论评,2015,61(S1):661-662.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng. Early Paleozoic magmatism and collisional orogenesis of the southern margin of Altun orogen[J]. *Geological Review*, 2015, 61(S1): 661-662.
- 李琦,曾忠诚,陈宁,等.阿尔金山南缘新元古代盖里克片麻岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J].现代地质,2015,29(6):1271-1283.
- LI Qi, ZENG Zhongcheng, CHEN Ning, et al. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and tectonic implications of neoproterozoic gailike gneiss in the South Altyn Tagh[J]. *Geoscience*, 2015, 29(6): 1271-1283.
- 李琦,曾忠诚,陈宁,等.阿尔金山造山带青白口纪亚干布阳片麻岩年龄、地球化学特征及其地质意义[J].地质通报,2018,37(4):642-654.
- LI Qi, ZENG Zhongcheng, CHEN Ning, et al. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and geological significance of Yaganbuyang gneiss in Qingbaikou period along the Altun orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(4): 642-654.
- 刘良,车自成,王焰,等.阿尔金山茫崖地区早古生代蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄证据[J].科学通报,1998,43(9):754-756.
- LIU Liang, CHE Zicheng, WANG Yan, et al. The evidence of Sm-Nd isochron age for the early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(9): 754-756.
- 刘良,康磊,曹玉亭,等.南阿尔金山早古生代俯冲碰撞过程中的花岗质岩浆作用[J].中国科学:地球科学,2015,45(8):1126-1137.
- LIU Liang, KANG Lei, CAO Yuting, et al. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China[J]. *Science China:Earth Sci-*

- ences, 2015, 45(8): 1126–1137.
- 马中平, 李向民, 孙吉明, 等. 阿尔金山南缘长沙沟镁铁-超镁铁质层状杂岩体的发现与地质意义—岩石学和地球化学初步研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(4): 793–804.
- MA Zhongping, LI Xiangmin, SUN Jiming, et al. Discovery of layered mafic-ultramafic intrusion in Changshagou, Altyn Tagh, and its geological implication: A pilot study on its petrological and geochemical characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 793–804.
- 马中平, 李向民, 徐学义, 等. 南阿尔金山清水泉镁铁-超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 1071–1078.
- MA Zhongping, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic-ultramafic intrusion southern Altun orogen, in northwestern China and its implication[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 1071–1078.
- 孙吉明, 马中平, 唐卓, 等. 阿尔金山南缘鱼目泉岩浆混合花岗岩 LA-ICP-MS 测年与构造意义[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 247–257.
- SUN Jiming, MA Zhongping, TANG Zhuo, et al. LA-ICP-MS zircon dating of the Yumuquan magma mixing granite in the southern Altyn Tagh and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(2): 247–257.
- 王联魁, 夏斌, 张玉泉, 等. 研究“钾质和钠质两个地幔富碱岩浆体系”的刍议[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 545–555.
- WANG Liankui, XIA Bin, ZHANG Yuquan, et al. A humble opinion on the “potassic and sodic two mantle alkali-rich magma systems” [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(4): 545–555.
- 王焰, 刘良, 车自成, 等. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的地球化学特征[J]. 地质论评, 1999, 45(S1): 1010–1014.
- WANG Yan, LIU Liang, CHE Zicheng, et al. Geochemical characteristics of early Paleozoic ophiolite in Mangnai area, Altun mountains[J]. *Geological Review*, 1999, 45(S1): 1010–1014.
- 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 等. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 846–858.
- WU Cailai, YANG Jingsui, YAO Shangzhi, et al. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong basin, north Altun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 846–858.
- 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. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *China Science Bull*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- 原西安地质矿产研究所. 新疆 1: 25 万苏吾什杰幅区域地质调查报告[R]. 原西安地质矿产研究所, 2003.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 等. 祁连山新元古代中—晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1087–1138.
- XIA Linqi, LI Xiangmin, YU Jiyuan, et al. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1087–1138.
- 校培喜, 高晓峰, 康磊, 等. 阿尔金-东昆仑西段成矿带地质背景研究[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, KANG Lei, et al. Study on Geological Background of Altyn Tagh—Eastern Kunlun Metallogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- 杨文强, 刘良, 丁海波, 等. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 4139–4150.
- YANG Wenqiang, LIU Liang, DING Haibo, et al. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunlike granite in South Altyn Tagn and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(12): 4139–4150.
- 曾忠诚, 洪增林, 边小卫, 等. 阿尔金造山带南缘晚奥陶世赞岐质闪长岩的发现及其地质意义[J]. 地学前缘, 2022, 29(4): 345–357.
- ZENG Zhongcheng, HONG Zenglin, BIAN Xiaowei, et al. The discovery of the late Ordovician sanukitoid-like diorite in south Altyn orogeny and its geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(4): 345–357.
- 张学诚. 昆阳裂谷带火山活动及其碱性(钠质)火山岩系特征[J]. 有色金属矿产与勘查, 1995, 4(6): 326–333.
- ZHANG Xuecheng. Volcanic activity and characteristics of (sodic) alkalic volcanic rocks series in the Kunyang rift zone[J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 1995, 4(6): 326–333.
- 赵江林, 曾忠诚, 陈宁, 等. 阿尔金山南缘玉苏普阿勒克塔格北侧冰沟南组变质火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2018, 37(4): 655–668.
- ZHAO Jianglin, ZENG Zhongcheng, CHEN Ning, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Binggounan Formation meta-volcanic rocks on the northern side of Yusupualeketage at the southern edge of the Altun Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(4):

- 655–668.
- 张海迪, 陈博, 吕鹏瑞, 等. 东天山黄山西角闪辉长岩成因及其地质意义: 来自锆石 U–Pb 年代学及地球化学的证据[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 51–65.
- ZHANG Haidi, CHEN Bo, LV Pengrui, et al. The petrogenesis and geological significance of the hornblende gabbro in western Huangshan of east Tianshan: Evidence from Zircon U–Pb chronology and geochemistry[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 51–65.
- 郑海飞, 谢鸿森, 徐有生, 等. 钠质与钾质中酸性岩浆的成因: 玄武质岩的高压熔融实验研究[J]. 矿物学报, 1996, 16(2): 109–117.
- ZHANG Haifei, XIE Hongsen, XU Yousheng, et al. Origin of the sodic and potassic intermediate–acid magmas: melting experiments on basaltic rocks at high pressures[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1996, 16(2): 109–117.
- 赵甫峰, 刘显凡, 楚亚婷, 等. 滇西富碱斑岩中特殊包体岩石的流体包裹体幔源不混溶特征[J]. 地球化学, 2011, 40(4): 305–323.
- ZHAO Fufeng, LIU Xianfan, CHU Yating, et al. Immiscible characteristics of mantle-derived fluid inclusions in special xenoliths from Cenozoic alkalic-rich porphyry in west Yunnan[J]. *Geochimica*, 2011, 40(4): 305–323.
- 庄玉军, 彭璇, 周艳龙, 等. 柴北缘赛什腾山滩间山群晚奥陶世富铋玄武岩成因及其地质意义[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 63–80.
- ZHUANG Yujun, PENG Xuan, ZHOU Yanlong, et al. Genesis and Geological Significance of Late Ordovician Nb-rich Basalts from Tanjianshan Group in Saishitengshan Mountain, Northern Margin of Qaidam Tectonic belt[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 63–80.
- Agrawal S, Guevara M, Verma S P. Tectonic discrimination of basic and ultrabasic volcanic rocks through log–transformed ratios of immobile trace elements[J]. *International Geology Review*, 2008, 50(12): 1057–1079.
- Hoek J D, Seitz H M. Continental mafic dyke swarms as tectonic indicators: an example from the Vestfold Hills, East Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 1995, 75(3–4): 121–139.
- Jiang X F, Peng S B, Kusky T M, et al. Petrogenesis and Geotectonic Significance of Early–Neoproterozoic Olivine–Gabbro within the Yangtze Craton: Constrains from the Mineral Composition, U–Pb Age and Hf Isotopes of Zircons[J]. *Journal of Earth Science*, 2018, 29(1): 93–102.
- Li Y S, Zhang J X, Yu S Y, et al. Origin of Early Paleozoic garnet peridotite and associated garnet pyroxenite in the south Altyn Tagh, NW China: Constraints from geochemistry, SHRIMP U–Pb zircon dating and Hf isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 100: 60–77.
- Liu L, Sun Y, Chen Z C, et al. Discovery of ultrahigh–pressure magnesite–bearing garnet ilmenite (>3. 8 GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(11): 881–886.
- Liu L, Zhang J F, Cao Y T, et al. Evidence of former stishovite in UHP eclogite from the South Altyn Tagh, western China. *Earth and Planetary Science Letters*[J], 2018, 484: 353–362.
- Marty B, Dauphas N. The nitrogen record of crust–mantle interaction and mantle convection from Archean to Present[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2003, 206(3–4): 397–410.
- Middlemost E. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System[J]. *Earth–Science Reviews*, 1994, 37(3–4): 215–224.
- 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.
- Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1985.
- Wang C, Liu L, Xiao P X, et al. Geochemical and geochronologic constraints for Paleozoic magmatism related to the orogenic collapse in the qimantagh–South Altyn region northwestern China[J]. *Lithos*, 2014, 202–203: 1–20.
- Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh fault[J]. *Science*, 1998, 282: 74–76.
- Wu C L, Yang J S, Robinson P T, et al. Geochemistry, age and tectonic significance of granitic rocks in north Altun, northwest China[J]. *Lithos*, 2009, 113(3–4): 423–436.
- Yu S Y, Zhang J X, Li S Z, et al. Continuity of the North Qilian and North Altun orogenic belts of NW China: Evidence from newly discovered Palaeozoic low–Mg and high–Mg adakitic rocks[J]. *Geological Magazine*, 2018, 155(8): 1684–1704.
- Yuan H L, Wu F Y, Gao S, et al. Determination of U–Pb age and Rare Earth Element Concentrations of Zircons from Cenozoic Intrusions in Northeastern China by Laser Ablation ICP–MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(22): 2411–2421.