

# 南祁连哈拉湖地区中奥陶世花岗岩地球化学特征及年代学意义

李五福<sup>1,2</sup>, 张新远<sup>1,2</sup>, 曹锦山<sup>1,2</sup>, 王国良<sup>1,2</sup>, 王春涛<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 乔国栋<sup>1,2</sup>,  
刘建栋<sup>1,2</sup>, 陈丽娟<sup>1,2</sup>

LI Wufu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinyuan<sup>1,2</sup>, CAO Jinshan<sup>1,2</sup>, WANG Guoliang<sup>1,2</sup>, WANG Chuntao<sup>1,2</sup>,  
WANG Wei<sup>1,2</sup>, QIAO Guodong<sup>1,2</sup>, LIU Jiandong<sup>1,2</sup>, CHEN Lijuan<sup>1,2</sup>

1.青海省地质调查院, 青海 西宁 810012;

2.青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012

1. Geological Survey Institute of Qinghai Province, Xi'ning 810012, Qinghai, China;

2. Northern Tibetan Plateau Geological Process and Mineral Resources Key Laboratory of Qinghai Province, Xi'ning 810012, Qinghai, China

**摘要:**哈拉湖地区奥陶纪花岗岩相对富钠( $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ), 具有中钾-高钾钙碱性系列特征, 岩石类型以辉长闪长岩和花岗闪长岩为主。岩石稀土及微量元素特征均显示物质来源有地幔物质参与, 构造环境判别图显示形成于大洋俯冲的环境。利用LA-ICP-MS进行锆石U-Pb同位素年龄测定, 样品锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $466 \pm 4$  Ma, 限定该花岗岩的形成时代为中奥陶世, 该时期北祁连洋发生双向扩张俯冲, 南部中祁连陆块遭受俯冲挤压, 导致地幔物质上涌, 同时陆壳部分熔融, 岩体为两者混合形成的产物, 该岩体年龄的确定为祁连洋的多阶段俯冲提供了新的证据。

**关键词:**南祁连; 奥陶纪; 岛弧; 花岗岩

**中图分类号:** P534.42; P588.12<sup>†</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)02/03-0215-09

Li W F, Zhang X Y, Cao J S, Wang G L, Wang C T, Wang W, Qiao G D, Liu J D, Chen L J. Geochemical characteristics and chronological significance of Middle Ordovician granite in Halahu area of southern Qilian Mountain. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(2/3): 215-223

**Abstract:** The Ordovician granite in the Hala Lake area is characterized by relatively rich sodium ( $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ) and medium potassium-high potassium calc-alkaline series. Rock types include gabbroic diorite and granodiorite. The whole-rock rare earth and trace element characteristics indicate that the material source was derived from mantle material, and the tectonic environment was most likely the island arc granite formed during the ocean subduction. The zircon U-Pb isotope ages were determined by LA-ICP-MS. These zircons yielded a  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted mean age of  $466 \pm 4$  Ma, suggesting that the granite was formed in Middle Ordovician. In the two-way expansion and subduction stage of the North Qilian Ocean, the southern Zhongqilian block was subjected to subduction and extrusion, which caused the mantle material to migrate upward. At the same time, the continental crust was partially melted and the intrusions were formed by the mixture of the two melts. The age of the intrusion provides new evidence for multi-stage subduction of the Qilian Ocean.

**Key words:** South Qilian; Ordovician; island arc; granite

祁连造山带位于青藏高原东北缘, 自新元古代至古生代经历了大陆裂解、洋盆扩张、多期次、多个方向俯冲-增生-闭合和碰撞作用<sup>[1-8]</sup>, 从北到南由北祁连、中祁连、南祁连、柴达木等多个微陆块最终

收稿日期: 2018-11-27; 修订日期: 2019-01-18

资助项目: 中国地质调查局项目《青海区域地质调查与片区总结》(编号: 12120114079701) 和《青海省德令哈市哈拉湖西部地区四幅 1:5 万区域地质矿产调查》(编号: 1212011221151)

作者简介: 李五福(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事区域地质调查研究。E-mail: 15422504@qq.com

通讯作者: 张新远(1988-), 男, 硕士, 工程师, 从事区域地质调查研究。E-mail: 235299800@qq.com

形成广义的祁连造山带<sup>[9-14]</sup>。随着 Rodinia 超大陆的裂解,早古生代古亚洲洋与原特提斯洋连为一体,称为古亚洲-原特提斯洋<sup>[15]</sup>。祁连洋和昆仑洋作为原特提斯洋的分支,在空间上展布于不同位置<sup>[16]</sup>。自 20 世纪 70 年代始,国内外学者对祁连造山带内的蛇绿岩、增生杂岩体、海相火山岩、高压-超高压变质岩系及岛弧相关的火成岩建造开展了一系列研究,取得了祁连洋的构造属性、物质组成、弧盆系空间配置等方面的研究成果<sup>[17-22]</sup>。宋述光等<sup>[23]</sup>认为,北祁连低温高压变质带与柴北缘超高压变质带分别代表板块俯冲不同阶段的产物,是北祁连大洋俯冲消亡后柴-祁大陆逐渐向华北克拉通俯冲碰撞的结果。虽然关于俯冲-碰撞的过程和机制还存在争议,但该地区存在洋陆俯冲事件基本上已被多数学者接受。然而对南祁连地块古生代构造演化历史存在不同的认识:一种观点认为,南祁连是柴北缘超高压变质带北侧的晚古生代弧后盆地<sup>[24]</sup>;另一种观点则认为,因北祁连地块对华北克拉通的北向俯冲引发南祁连与中祁连地块的裂解,进而形成洋壳俯冲之后伸展背景下的小洋盆<sup>[14, 25]</sup>。产生上述争议的重要原因之一是对南祁连地块早古生代岩浆作用的研究相对缺乏。虽然近年来对该地区出露的早古生代花岗质岩石进行了年代学和地球化学研究,确定了它们的形成时代和岩石成因,并证实了中、南祁连地块之间北向俯冲消减带和一系列岛弧岩浆岩带的存在<sup>[25-29]</sup>,但对中南祁连西段岩浆作用研究报道较少,使南祁连早古生代构造演化研究存在局限。鉴于此,对南祁连构造带哈拉湖一带进行了大比例尺地质填图。在此过程中识别出一套奥陶纪岩浆岩,其中火山岩属岛弧型<sup>[30]</sup>,侵入岩多呈构造岩块赋存于拉脊山混杂岩带中,与周围地层断层接触。本文在对该时期侵入体空间展布特征及接触关系研究的基础上,进行了岩石学、地球化学研究和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,进而探讨中南祁连造山带奥陶纪的构造演化。

## 1 地质特征

祁连构造带由北往南依次划分出北祁连、中祁连和南祁连 3 个构造单元。北祁连构造带发育完整的沟-弧-盆体系岩石组合,包括增生楔、洋岛/海山、蛇绿岩、HP/LT 变质带、岛弧和弧前/弧

后盆地等地质单元<sup>[2, 6-7, 11, 16]</sup>。中祁连构造带由前寒武纪花岗岩片麻岩、斜长角闪岩和变沉积岩<sup>[9, 31-34]</sup>及叠加于其上的早古生代俯冲和碰撞相关的钙碱性侵入岩共同构成。南祁连构造带岩石组合类型时空差异较大,其中西段由早古生代杂砂岩、板岩夹硅质岩及灰岩透镜体组成,东段由前寒武纪黑云母斜长片麻岩、黑云母钾长片麻岩及少量石榴子石斜长角闪岩和石英岩共同组成<sup>[3]</sup>,同时发育大量与早古生代俯冲、碰撞作用密切相关的花岗岩和镁铁质-超镁铁质岩侵入体<sup>[5, 8]</sup>。Song 等<sup>[21]</sup>重新厘定了南祁连构造带的属性,认为从西部的党河南山开始,经刚察、拉脊山、永靖,由蛇绿岩和弧岩浆岩构成了南祁连增生杂岩带,并且向东延伸到西秦岭,形成了近 2000 km 的“祁秦增生杂岩带”。

研究区位于南祁连增生杂岩带西段(图 1-a),以拉脊山南缘断裂为界,北侧为拉脊山蛇绿混杂岩带,南侧为南祁连岩浆弧。该区未见前寒武纪地质建造,自早古生代以来,该地区发生了强烈的构造岩浆活动,分布有与洋壳俯冲有关的岛弧岩浆组合和碰撞及后碰撞的产物。本次研究的中奥陶世花岗岩亦呈构造岩块展布于增生杂岩带中(图 1-b),在扎尔玛格东侧与早奥陶世吾力沟组呈断层接触,疏勒南山南坡辉长闪长岩和石英闪长岩呈脉动接触,岩石组合为石英闪长岩、英云闪长岩、辉长闪长岩,呈小的岩基状产出,平面形态呈椭圆状,出露面积约 2.4 km<sup>2</sup>。

## 2 岩石学特征

岩石类型为中酸性侵入岩,将 6 件侵入岩样品测试结果经铁调整换算后投点于国际地科联 1989 年推荐的划分方案 TAS 图解(图 2-a),2 件样品落入辉长闪长岩区,3 件样品落入闪长岩区,另有 1 件样品落入二长岩区,与室内薄片鉴定基本一致。岩石学特征描述如下。

辉长闪长岩:露头尺度上整体岩性较均匀,未见明显的堆晶结构或岩相变化。矿物粒径 0.2~0.4 mm 及 0.6 mm 左右,主要由基性斜长石、角闪石组成,辉石、石英、黑云母等含量较少,副矿物有锆石、磷灰石、榍石等。斜长石含量约 55%,呈半自形板条状杂乱分布,聚片双晶非常发育,测得个别长石颗粒 An=34%~35%,为中长石,环带构造隐约

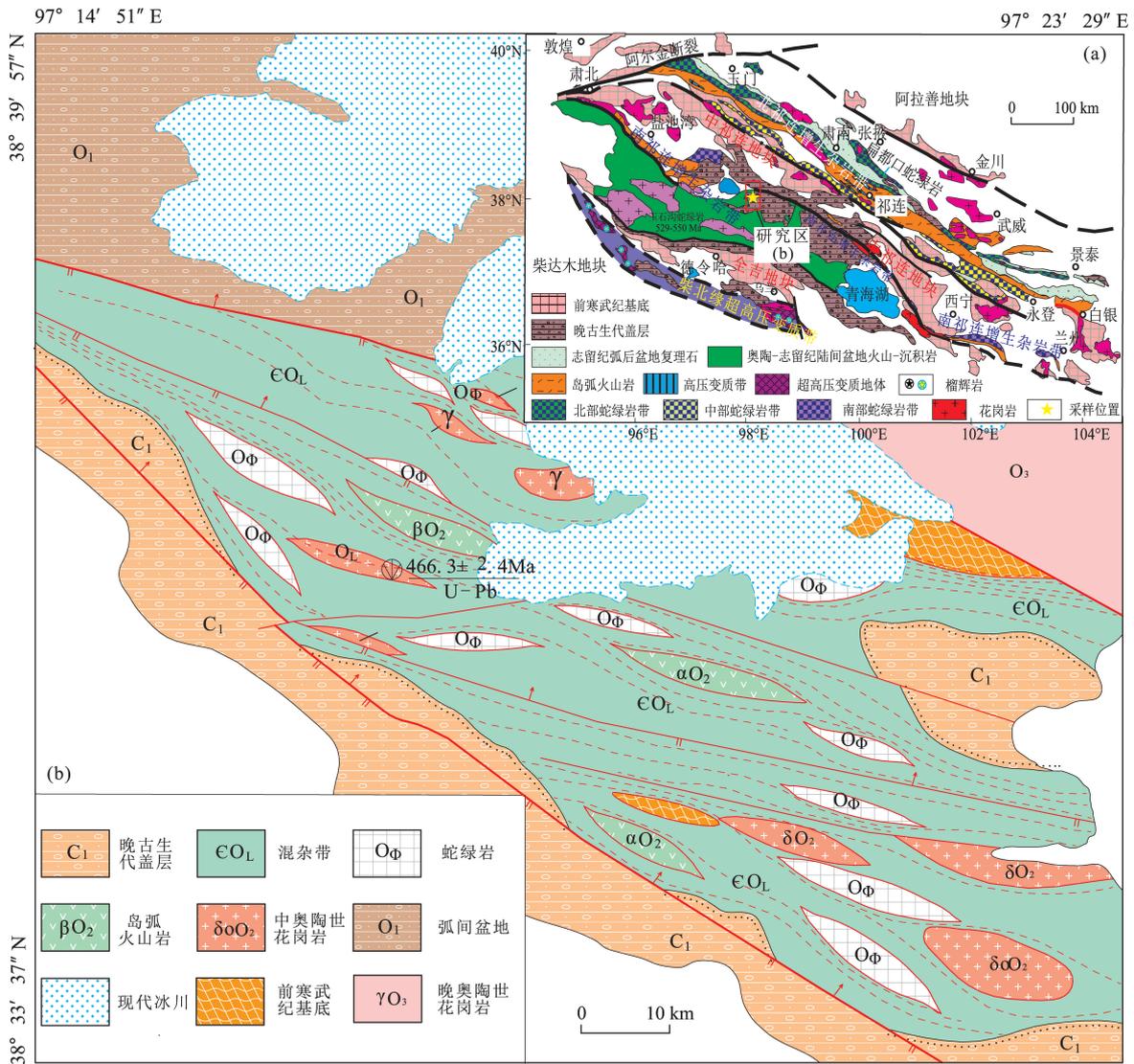


图 1 哈拉湖地区大地构造位置图(a,据参考文献[35]修改)和地质简图(b)  
 Fig. 1 The tectonic position (a) and simplified geological map(b) of Halahu area

可见;角闪石含量约 30%,呈半自形板条状或短柱状,Ng' 褐绿色,Np' 淡黄绿色多色性吸收显著,次闪石化明显,部分角闪石颗粒内部及边缘嵌布板状斜长石;辉石含量较少,约 10%,蚀变作用较强,核部偶见辉石残留;另有少量石英及黑云母分布于各矿物间隙。

石英闪长岩:块状构造,岩石由斜长石、石英、黑云母、不透明矿物,以及大量蚀变矿物绿泥石、方解石等组成。岩石受强烈的应力破坏并伴有强烈热液蚀变(绿泥石化、碳酸盐化),产生大量的绿泥石和方解石交代岩石中的暗色矿物及其他矿物。

矿物破碎成 0.09~0.1 mm,0.2~0.4 mm。斜长石含量约 64%,呈破碎粒状-柱粒状晶,保留环带状构造,为中长石。石英含量约 10%,呈他形粒状晶分布于其他矿物粒间。暗色矿物为黑云母,已完全蚀变为绿泥石(约 15%)、碳酸盐矿物(约 10%),大部分假象不保存,见含钛矿物(约 1%)分解物存在于绿泥石及碳酸盐矿物中。

英云闪长岩:具中粒半自形粒状结构(图 3-a),主要矿物成分为石英、斜长石、黑云母、角闪石。斜长石含量约 36%,无色,板状,突起较低,粒度为 0.9~2.8 mm,干涉色为一级灰白,聚片双晶发育,部分斜

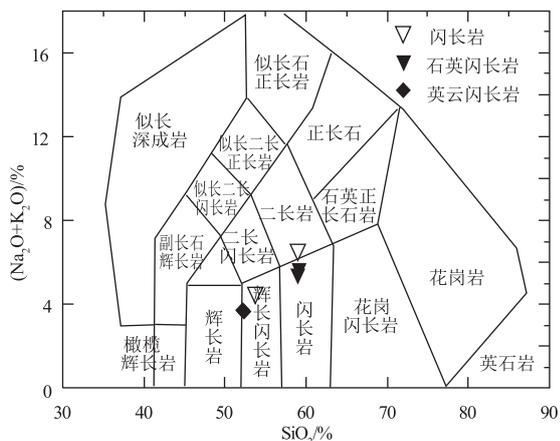


图2 哈拉湖中奥陶世侵入岩 TAS 图解<sup>[36]</sup>

Fig. 2 TAS diagram of Middle Ordovician intrusions in Halahu area

长石发生绢云母化和粘土化, 颗粒表面可见有显微鳞片状的绢云母小颗粒, 粘土化多发生在斜长石内部, 粘土化较强的斜长石仅残留有少量原先矿物成分, 聚片双晶不明显。石英含量约 28%, 无色, 半自形-他形粒状, 正低突起, 表面洁净, 粒度为 0.64~1.4 mm, 呈黄褐色-棕黄色, 多色性明显, 具一组极完全解理, 干涉色为二级绿-橙黄, 部分颗粒发生微弱的弯曲变形(图 3-b)。角闪石含量约 18%, 浅黄绿色-绿色, 多色性明显, 柱状, 正高突起, 可见 2 组完全解理, 部分颗粒表面发育有裂纹, 斜消光, 局部可见黑云母化。副矿物: 磷灰石含量约 1%, 无色, 短柱状, 正中突起, 干涉色为一级暗灰, 平行消光; 锆石含量约 1%, 无色, 短柱状、粒状, 正极高突起, 干涉色为二级紫红-三级绿, 平行消光, 颗粒边缘可见放射晕。

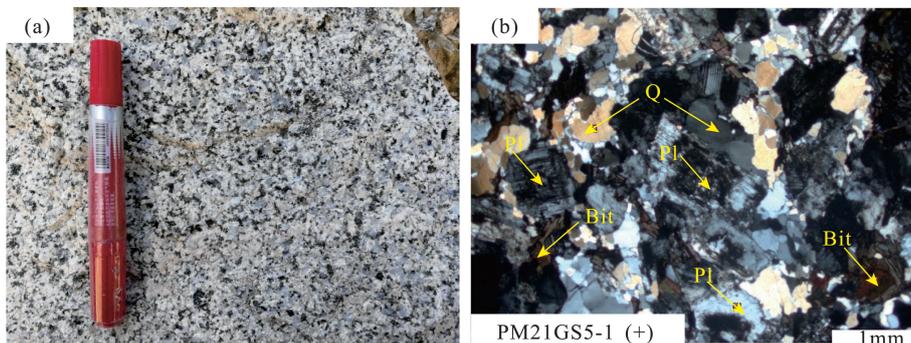


图3 英云闪长岩野外(a)和镜下照片(b)

Fig. 3 Field outcrop(a) and microscopic(b) characteristics of diorite

Q—石英; Pl—斜长石; Bit—黑云母

### 3 地球化学特征

侵入岩样品的主量、稀土和微量元素分析结果列于表 1, 样品烧失量较小, 对样品的主量元素扣除烧失量后重新进行了换算。由于 K、Na 和低场强元素 Cs、Rb、Sr、Ba 在蚀变过程中可能发生迁移, 因此本文主要依据高场强元素 Ti、Zr、Y、Nb、Ta、Hf 及 Th、稀土元素 (REE) 等不活泼元素对样品进行岩石学分类、构造环境及成因讨论。

#### 3.1 主量元素

从哈拉湖地区中奥陶世侵入岩主量元素看(表 1), 中奥陶世侵入岩  $\text{SiO}_2$  含量为 50.44%~57.99%, 平均 54.14%, 岩石偏中性。 $\text{TiO}_2$  含量为 0.74%~0.90%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  为含量 12.19%~16.32%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 2.10%~5.56%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.90%~2.72%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值在 0.16~1 之间, 平均为 0.72, 具相对富钠、贫钾的特点。在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解(图 4-a)中, 显示以中钾-高钾系列为主; AFM 图解(图 4-b)显示钙碱性系列特征。

#### 3.2 稀土、微量元素

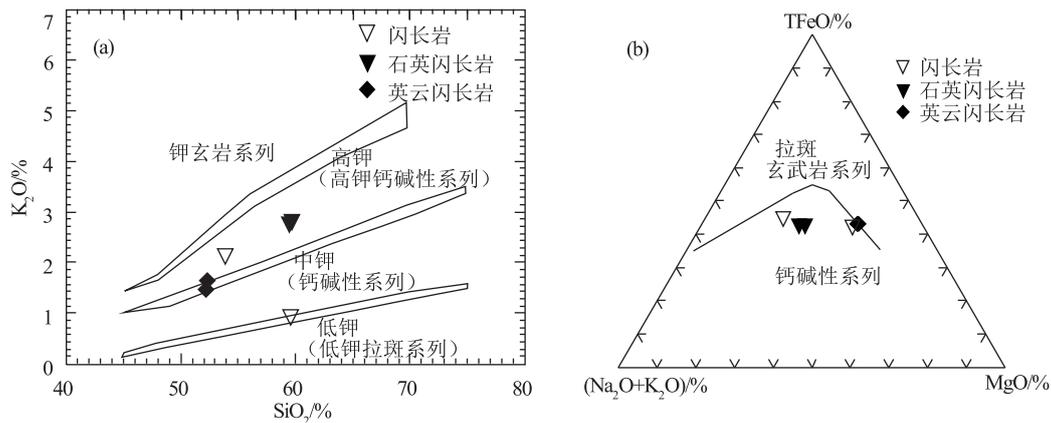
研究区中奥陶世侵入岩稀土和微量元素特征显示(表 1), 稀土元素总量 ( $\Sigma\text{REE}$ ) 一般在  $68.21 \times 10^{-6}$ ~ $117.66 \times 10^{-6}$  之间, 总量偏低。LREE/HREE 值在 3.83~7.33 之间,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  均大于 1, 轻、重稀土元素分馏明显, 轻稀土元素富集, 重稀土元素 (HREE) 相对亏损;  $\delta\text{Eu}$  值介于 0.79~0.88 之间, 显示弱负 Eu 异常; 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 5-a)中, 曲线右倾, 具弱负 Eu 异常, LREE 明显富集, 向右倾斜, HREE 较平缓; 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图解上(图 5-b), 高场强元素 Nb、Ta、Ti 具有明显的负异常。

表 1 哈拉湖地区中奥陶世侵入岩地球化学分析结果

Table 1 Geochemical compositions of Middle Ordovician intrusions in Halahu area

样品号	IGsC3097 QIVPM21GS5IPm103Gs2 IPm103Gs16 IGS0809						样品号	IGsC3097 QIVPM21GS5IPm103Gs2 IPm103Gs16 IGS0809					
	IGs2003	-1	-1	-1	-1	IGs2003		-1	-1	-1	-1	IGs2003	
岩性	石英闪长岩	英云闪长岩			辉长闪长岩		岩性	石英闪长岩	英云闪长岩			辉长闪长岩	
SiO <sub>2</sub>	56.89	57.45	57.99	50.44	50.45	51.64	Eu	1.09	1.15	0.92	0.96	1.21	1.09
TiO <sub>2</sub>	0.80	0.80	0.77	0.83	0.90	0.74	Gd	4.08	3.97	3.24	3.62	4.42	3.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.87	15.53	16.32	12.19	12.27	12.26	Tb	0.70	0.63	0.59	0.59	0.71	0.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.47	3.97	3.78	2.23	2.14	1.36	Dy	3.82	3.87	3.77	3.27	3.73	3.69
FeO	4.12	3.73	4.75	7.65	7.67	8.80	Ho	0.81	0.77	0.84	0.68	0.76	0.76
MnO	0.12	0.12	0.16	0.17	0.18	0.20	Er	2.27	2.15	2.46	1.85	2.09	2.07
MgO	4.71	4.41	3.79	9.07	8.99	9.46	Tm	0.35	0.34	0.38	0.30	0.32	0.34
CaO	5.14	4.48	3.30	10.08	10.11	6.85	Yb	2.32	2.07	2.50	2.00	2.04	2.04
Na <sub>2</sub> O	2.64	2.81	5.56	2.10	2.34	2.35	Lu	0.35	0.31	0.37	0.32	0.30	0.30
K <sub>2</sub> O	2.64	2.72	0.90	1.59	1.43	2.04	Sr	474.99	484.95	300.81	428.41	448.96	277.45
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	0.27	0.14	0.17	0.23	0.24	Rb	87.91	87.36	20.10	35.85	28.86	61.12
烧失量	3.62	3.01	1.84	2.40	2.27	3.24	Ba	671.66	760.40	246.84	379.85	439.84	405.40
总量	99.71	99.70	99.73	99.76	99.74	99.74	Th	8.05	9.21	5.41	4.96	5.68	7.13
Mg <sup>#</sup>	60.32	59.57	51.86	65.41	65.25	64.33	Ta	0.70	0.69	0.47	1.28	0.82	0.54
A/NK	2.07	2.05	1.61	2.36	2.27	2.02	Nb	6.31	7.46	6.16	5.53	6.12	7.09
A/CNK	0.90	0.99	1.01	0.52	0.52	0.66	Zr	124.90	129.00	82.20	67.70	75.00	96.40
La	23.70	22.80	10.77	16.06	18.06	21.46	Hf	4.31	4.52	2.43	2.04	2.36	2.57
Ce	45.54	46.30	23.36	32.07	36.55	42.58	Cr	115.81	91.19	30.35	274.80	279.40	369.60
Pr	5.72	5.95	3.10	4.13	5.14	5.27	V	207.94	183.50		272.83	252.36	220.00
Nd	22.12	22.91	12.81	16.84	21.57	20.34	U	1.57	1.73	1.14	1.03	1.24	1.71
Sm	4.38	4.44	3.12	3.62	4.71	4.37	Y	20.22	19.43	20.56	17.40	19.09	17.77
							Sc	19.20	18.18		38.23	41.17	30.16

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

图 4 哈拉湖中奥陶世侵入岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O(a) 和 AFM 图解(b)Fig. 4 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O(a) and AFM(b) diagrams for Middle Ordovician intrusions in Halahu area

(a,b 底图分别据参考文献[37][38])

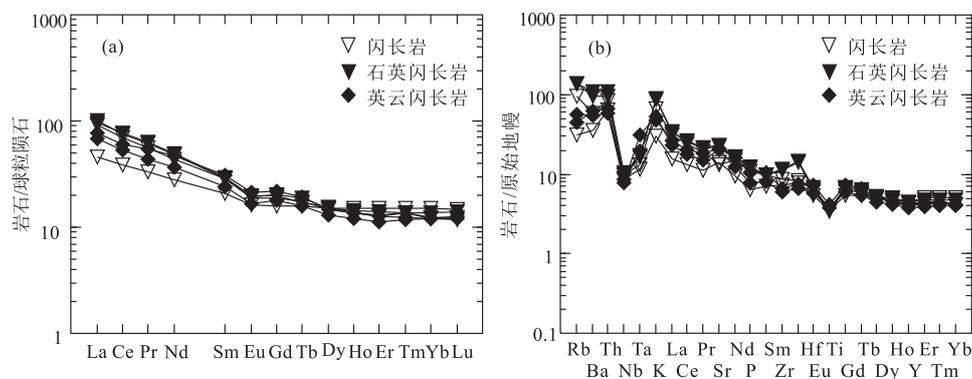


图5 哈拉湖中奥陶世侵入岩稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

(球粒陨石标准化数据参考文献[39],原始地幔标准化数据参考文献[40])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams(b) for Middle Ordovician intrusions in Halahu area

#### 4 锆石 U-Pb 测年

本次单颗粒锆石 U-Pb 测年样品由自然资源部华北矿产资源监督检测中心天津地质矿产研究所实验测试室分析(测试),检测依据 DZ/T0184.3—1997,主要仪器设备为 LA-MC-ICP-MS,检测环境温度 22°C,湿度 16%。选取 24 颗锆石开展测年工作,用于阴极发光(CL)照相的锆石样采自辉长闪长岩,在双目镜下,几乎所有的锆石呈短柱状,少量为长柱状,淡棕色,透明(图 6)。总体上锆石核部具有较好的振荡环带,边部的环带很模糊或缺少环带,有

的呈残缺不全的镶边状。测年锆石是经过精心选择的棕黄色透明自形中长柱状晶体,皆为岩浆锆石。本次所测辉长闪长岩样品(IU-Pb0803)24 颗锆石中,点 19 获得明显年轻且异常的年龄( $194 \pm 2$  Ma),可能存在明显的铅丢失,其余 23 颗锆石的 U-Pb 年龄近于谐和一致(图 7-a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为 368~858 Ma, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  表面年龄为 374~864 Ma,16 颗锆石 U-Pb 年龄集中在 460 Ma 左右,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄加权平均值为  $466 \pm 4$  Ma(图 7-b;表 2),根据同位素年龄可确定岩体形成时代为中奥陶世。

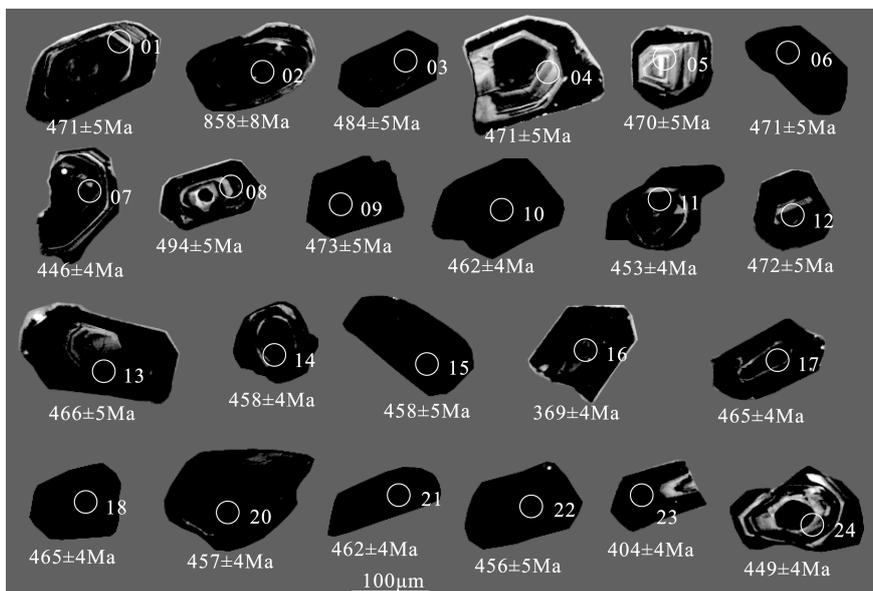


图6 哈拉湖地区辉长闪长岩同位素测年锆石阴极发光图像(IU-Pb0803)

Fig. 6 Zircon cathodoluminescence images for gabbroic diorite in Halahu area

表 2 哈拉湖地区辉长闪长岩锆石 U-Th-Pb 同位素测定结果(IU-Pb0803)

Table 2 Zircon U-Th-Pb isotope determination results for gabbroic diorite in Halahu area

点号	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	
			$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$		
1	59	777	0.0758	0.0008	0.602	0.012	0.0575	0.0009	0.0303	0.0010	0.0247	0.0005	471	5	478	10
2	98	714	0.1424	0.0014	1.342	0.019	0.0683	0.0008	0.0472	0.0013	0.137	0.001	858	8	864	12
3	41	502	0.0780	0.0008	0.620	0.013	0.0576	0.0011	0.0215	0.0006	0.572	0.003	484	5	490	10
4	44	574	0.0758	0.0007	0.598	0.009	0.0572	0.0008	0.0261	0.0006	0.318	0.002	471	5	476	7
5	23	294	0.0757	0.0007	0.590	0.014	0.0565	0.0012	0.0230	0.0005	0.3880	0.0004	470	5	471	11
6	38	474	0.0758	0.0007	0.592	0.012	0.0566	0.0011	0.0224	0.0005	0.528	0.001	471	5	472	10
7	41	570	0.0716	0.0007	0.565	0.010	0.0572	0.0009	0.0331	0.0008	0.2261	0.0001	446	5	455	8
8	49	590	0.0797	0.0008	0.640	0.009	0.0582	0.0008	0.0130	0.0004	0.924	0.002	494	4	502	7
9	91	1181	0.0762	0.0008	0.610	0.010	0.0581	0.0008	0.0224	0.0006	0.369	0.003	473	5	484	8
10	34	449	0.0743	0.0007	0.590	0.011	0.0576	0.0010	0.0242	0.0006	0.3392	0.0007	462	5	471	9
11	94	1275	0.0727	0.0007	0.576	0.008	0.0575	0.0007	0.0230	0.0005	0.3392	0.0004	453	4	462	7
12	53	676	0.0759	0.0007	0.598	0.014	0.0572	0.0013	0.0241	0.0006	0.3989	0.0004	472	4	476	11
13	19	244	0.0750	0.0008	0.599	0.018	0.0579	0.0016	0.0125	0.0003	0.946	0.005	466	5	477	14
14	43	568	0.0737	0.0007	0.577	0.011	0.0568	0.0010	0.0215	0.0005	0.4411	0.0003	458	5	462	9
15	73	995	0.0736	0.0007	0.578	0.009	0.0570	0.0009	0.0165	0.0004	0.450	0.003	458	4	463	7
16	46	762	0.0587	0.0006	0.446	0.007	0.0551	0.0008	0.0100	0.0003	0.7160	0.0005	368	5	374	6
17	60	821	0.0749	0.0007	0.589	0.010	0.0570	0.0008	0.0160	0.0005	0.317	0.002	465	4	470	8
18	44	564	0.0748	0.0007	0.583	0.012	0.0565	0.0011	0.0219	0.0006	0.490	0.001	465	4	466	9
20	28	405	0.0735	0.0007	0.576	0.013	0.0569	0.0013	0.0210	0.0005	0.0628	0.0000	457	4	462	11
21	35	471	0.0742	0.0007	0.585	0.011	0.0572	0.0009	0.0217	0.0005	0.3703	0.0004	462	4	468	8
22	150	1821	0.0732	0.0007	0.596	0.009	0.0590	0.0007	0.0210	0.0005	0.819	0.002	456	5	475	7
23	122	1841	0.0647	0.0006	0.498	0.007	0.0559	0.0007	0.0160	0.0004	0.497	0.002	404	4	411	6
24	95	1320	0.0722	0.0007	0.560	0.008	0.0563	0.0007	0.0226	0.0006	0.3214	0.0007	449	4	452	7

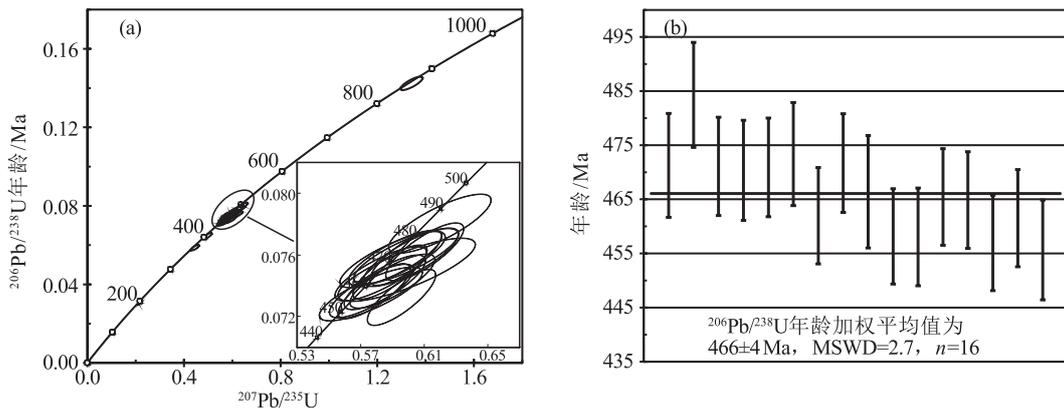


图 7 哈拉湖地区辉长闪长岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值图(b) (IU-Pb0803)

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagrams(a) and weighted average  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age(b) for gabbroic diorite in Halahu area

## 5 构造环境

研究表明,岩浆形成和地球深部动力学背景关系密切。早古生代中期,古祁连洋壳发生俯冲,岩浆活动强烈,形成沟—弧—盆构造环境<sup>[41]</sup>。夏林圻等<sup>[42-43]</sup>认为,北祁连加里东造山带在前寒武纪基底之上发生了拉张(679~574 Ma)。宋述光等<sup>[16,35]</sup>认为,祁连洋的形成最早不晚于550 Ma,俯冲从520 Ma开始,俯冲初期地幔岩浆上涌与中上地壳相互作用,导致大陆地壳发生大规模部分熔融形成过铝质花岗岩(510~516 Ma)<sup>①</sup>;早志留世(440 Ma)洋盆闭合,440 Ma后大陆碰撞开始,420 Ma为造山的高峰期。北祁连高压变质带变质岩年龄为489~442 Ma,其中榴辉岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄介于489~463 Ma 之间<sup>[12,44-45]</sup>,片岩<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 年龄集中在460~440 Ma<sup>[46]</sup>,前者代表了北祁连洋壳俯冲至最深处(≥60 km)时的峰期变质年龄,后者可能代表了高压变质岩上升折返阶段所形成的年龄<sup>[47]</sup>。由此推测,北祁连洋盆在中寒武世发生俯冲作用,早志留世祁连洋闭合。

大多数造山带经历了多次海底扩张和海沟撤退复杂的增生过程,这种增生过程在大陆的形成与成长中非常重要。祁连洋向北俯冲过程中,从南祁连、天水—巫山到东秦岭形成了长约2000 km的祁—秦增生带<sup>[21,48]</sup>。南祁连构造带为秦岭增生带的一部分,其中蛇绿岩年龄为500~534 Ma,岛弧火山岩为470~440 Ma,是中祁连地块南侧的洋内弧岩浆岩带,从党河南山,经过哈拉湖、刚察、拉脊山、永靖到西秦岭。岩石类型以中基性火山岩为主,少量酸性火山岩,并有中酸性深成岩体。本次研究的哈拉湖地区侵入岩亦属于南祁连构造带的一部分,为中钾—高钾钙碱性系列,年龄为466±4 Ma,时代为中奥陶世,形成于俯冲阶段。

## 6 结论

(1) 哈拉湖地区中奥陶世侵入岩由石英闪长岩、英云闪长岩、辉长闪长岩组成,在辉长闪长岩中获得锆石 U-Pb 年龄为466±4 Ma,代表岩体形成时代为中奥陶世。

(2) 地球化学特征表明,哈拉湖地区中奥陶世侵入岩偏中性,具相对富钠、贫钾的特点,显示为中钾—高钾钙碱性系列,轻稀土元素富集,重稀土元素相对亏损。微量元素中高场强元素(Nb、P、Ti)强

烈亏损,绝大多数样品的亲石元素 Rb、Th、U 和稀土元素 La、Sm 富集明显,Nd、Hf 微弱富集,总体显示弧花岗岩特征,综合认为是俯冲环境下的一套 TTG 花岗岩组合。

(3) 祁连山地区中寒武世开始经历了俯冲、碰撞造山和陆内造山作用,在祁连浪士当地区出现了中寒武世(508~516 Ma)俯冲型的花岗岩组合,由此可以判断俯冲造山开始于516 Ma 或更早。大规模俯冲消减发生在奥陶纪,在祁连出现了大量奥陶纪(481~440 Ma)俯冲期 TTG、GG 花岗岩组合及岛弧火山岩组合,其中哈拉湖地区中奥陶世侵入岩为该俯冲阶段的产物。

**致谢:**野外工作得到哈拉湖西项目组全体成员的大力帮助,写作过程中北京大学宋述光老师给予了指导,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此表示诚挚的谢意。

## 参考文献

- [1] Song S G, Niu Y L, Zhang L F, et al. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision, and exhumation: an example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25: 2067-2077.
- [2] 许志琴,徐惠芬,张建新,等.北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J]. *地质学报*, 1994, 68: 1-15.
- [3] 张雪亭,杨生德,杨站军,等.青海省板块构造研究1:100万青海省大地构造说明书[M].北京:地质出版社,2007:1-221.
- [4] Xiao W J, Windley B F, Yong Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3/4): 323-333.
- [5] Yan Z, Aitchison J C, Fu C L, et al. Hualong Complex, South Qilian terrane: U-Pb and Lu-Hf constraints on Neoproterozoic micro-continental fragments accreted to the northern Proto-Tethyan margin[J]. *Precambrian Research*, 2015, 266: 65-85.
- [6] Xia L Q, Li X M, Yu J Y, et al. Mid-late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilianshan, NW China[J]. *Geo. Res. J.*, 2016, 9/12: 1-41.
- [7] Zhang J X, Yu S Y, Mattinson C G.. Early Paleozoic polyphase metamorphism in northern Tibet, China [J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 267-289.
- [8] Fu C L, Yan Z, Guo X Q, et al. Assembly and dispersal history of continental blocks within the Altun-Qilian-North Qaidam mountain belt, NW China[J]. *International Geology Review*, 2018: 1-24.
- [9] Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geo-chronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 94-107.
- [10] 陈宣华,邵兆刚,熊小松,等.祁连山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. *中国地质*, 2019, 46(5): 995-1020.

- [11] Wang Q Y, Pan Y M, Chen N S. Proterozoic polymetamorphism in the Quanji Block, northwestern china: evidence from microtextures, garnet compositions and monazite CHIME ages[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 686-698.
- [12] Song S G, Niu Y L, Zhang L F, et al. Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35: 334-353.
- [13] Xu Y J, Du Y S, Cawood P A, et al. Detrital zircon record of continental collision: assembly of the Qilian Orogen, China [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 230(1/2): 35-45.
- [14] Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B, et al. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western china: zircon U-Pb age and Sr-Nd-Os-S isotope constraints from the Yulonggou and Yaqu gabbroic intrusions[J]. *Mineralium Deposita*, 2014, 49(2): 279-292.
- [15] 李文渊. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. *岩石学报*, 2018, 34(8): 2201-2210.
- [16] Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Tectonics of the North Qilian orogeny, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1378-1401.
- [17] 许志琴, 张建新, 许惠芬, 等. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-99.
- [18] 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-101.
- [19] 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. *岩石矿物杂志*, 1997, 16(2): 112-119.
- [20] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩浆成因[J]. *中国地质*, 2003, 30(1): 48-60.
- [21] Song S G, Yang L M, Zhang Y Q, et al. Qi-Qin accretionary belt in Central China Orogen: Accretion by trench jam of oceanic plateau and formation of intra-oceanic arc in the Early Paleozoic Qin-Qi-Kun Ocean[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62: 1035-1038.
- [22] 吴才来, 徐学义, 高前明, 等. 北祁连早古生代花岗质岩浆作用及构造演化[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1027-1044.
- [23] 宋述光, 张立飞, Niu Y, 等. 青藏高原北缘早古生代板块构造演化和大陆深俯冲[J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10): 918-925.
- [24] 丁仁平, 裴先治, 李佐臣, 等. 祁连造山带中段雾宿山群的构造属性探讨[J]. *中国地质*, 2008, 35(4): 577-589.
- [25] 刘志武, 王崇礼, 石小虎. 南祁连党河南山花岗岩类特征及其构造环境[J]. *现代地质*, 2006, 20(4): 545-554.
- [26] 师江朋, 霍腾飞, 来强, 等. 南祁连北缘东段早志留世刚察大寺花岗岩的成因: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学制约[J]. *地球学报*, 2015, 36(6): 781-789.
- [27] 罗志文, 张志诚, 李建锋, 等. 中南祁连西缘肃北三个洼塘地区古生代两类花岗质侵入岩年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 176-188.
- [28] 郭周平, 李文渊, 张照伟, 等. 南祁连化隆地区鲁满山花岗岩的岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. *中国地质*, 2015, 42(4): 864-880.
- [29] Yang H, Zhang H F, Luo B J, et al. Early Paleozoic intrusive rocks from the eastern Qilian Orogen NE Tibetan plateau: petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 2015, 224/225: 13-31.
- [30] 李春昱, 刘仰文, 朱宝清, 等. 秦岭及祁连山构造发展史[C]//国际交流地质学术论文集(1). 北京: 地质出版社, 1978: 174-187.
- [31] 李五福, 张新远, 王春涛, 等. 祁连山哈拉湖地区奥陶纪岛弧火山岩及其构造意义[J]. *地质通报*, 2019, (388): 1287-1296.
- [32] 左国朝, 张淑玲, 程建生, 等. 祁连地区蛇绿岩带划分及其构造意义[C]//张旗. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 1996: 129-134.
- [33] Wan Y S, Zhang J X, Yang J S, et al. Geochemistry of highgrade metamorphic rocks of the North Qaidam Mountains and their geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 28: 174-184.
- [34] 何世平, 李荣社, 王超, 等. 祁连山西段甘肃肃北地区北大河岩群片麻状斜长角闪岩的形成时代[J]. *地质通报*, 2010, 29(9): 1275-1280.
- [35] Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 129: 59-84.
- [36] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [37] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- [38] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523-548.
- [39] Boynton W V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteoric Studies[J]. *Rare Earth Element Geochemistry*, 1984, 2: 63-114.
- [40] 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.
- [41] 冯益民. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [42] 夏林圻, 夏祖春. 北祁连山古洋壳火山作用基本特征[C]//中国矿物学岩石学地球化学研究新进展学术交流会, 1994.
- [43] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩浆成因[J]. *中国地质*, 2003, 30(1): 48-60.
- [44] 张建新, 孟繁聪. 北祁连和北阿尔金硬柱石榴辉岩: 冷洋壳俯冲作用的证据[J]. *科学通报*, 2006, 51(14): 1683-1688.
- [45] 张建新, 孟繁聪, Mattinson C G. 南阿尔金-柴北缘 HP/UHP 变质带研究进展、问题及挑战[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 526-545.
- [46] 张建新, 许志琴. 北祁连中段加里东俯冲-增生杂岩/火山弧带及其变形特征[J]. *地球学报*, 1995, (2): 36-46.
- [47] 董顺利, 李忠, 高剑, 等. 阿尔金-祁连-昆仑造山带早古生代构造格架及结晶岩年代研究进展[J]. *地质论评*. 2013, 59(4): 731-747.
- [48] Zhang Y Q, Song S G, Yang L M, et al. Basalts and picrites from a plume-type ophiolite in the South Qilian Accretionary Belt, Qilian Orogen: Accretion of a Cambrian Oceanic Plateau? [J]. *Lithos*, 2017, 278: 97-110.
- ①宋述光, 苏犁, 张贵宾, 等. 秦-祁-昆地区典型高压变质带与蛇绿岩杂岩带关系研究. 北京大学, 2015: 1-505.