

西昆仑柯岗蛇绿岩地质地球化学特征及构造意义

黄朝阳^{1,2}, 王核^{1*}, 刘建平³, 胡军^{1,2}, 慕生禄^{1,2}, 丘增旺^{1,2}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 柯岗蛇绿岩位于青藏高原北缘, 与北部的奥依塔格蛇绿岩、南部的库地蛇及苏巴什绿岩组成青藏高原“第五缝合带”。本文对柯岗蛇绿岩中辉长岩进行了岩石学、地球化学及锆石 LA-ICP-MS 分析。柯岗辉长岩 SiO₂ 含量为 43.65%~49.29%, 在 TAS 分类图解上, 样品主要落在辉长岩区域, 与野外及镜下观察一致。柯岗辉长岩稀土元素总量较低, Σ REE 范围在 12.12~45.45 $\mu\text{g/g}$, 经球粒陨石标准化的 REE 分布模式显示, 3 个样品显示轻稀土略亏损特征, Eu^{*} 为正异常, 平均为 1.34, 1 个样品显示轻稀土富集特征, Eu^{*} 为 0.86, 为岩浆分异结晶不同时期的产物。柯岗辉长岩锆石 Th/U 范围为 0.28~0.67, 且具有典型岩浆锆石的震荡环带结构或扇形结构特征。22 颗锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (488.8±2.6) Ma, MSWD = 0.81, 代表柯岗蛇绿岩套中辉长岩结晶年龄。通过柯岗蛇绿岩中辉长岩地球化学特征和构造环境判别图解, 并结合前人资料, 认为柯岗蛇绿岩形成环境为岛弧或者弧前环境。

关键词: 辉长岩; 蛇绿岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 柯岗; 西昆仑

中图分类号: P59; P595 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2014)06-0592-10

Geological, geochemical features and structure significance of Kegang ophiolite, West Kunlun

HUANG Chao-yang^{1,2}, WANG He^{1*}, LIU Jian-ping³, HU Jun^{1,2}, MU Sheng-lu^{1,2} and QIU Zeng-wang^{1,2}

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Kegang ophiolite is located at the northern Qingzang Plateau. It is part of the Fifth Suture Zone of Qingzang Plateau with Oytage, Kudi and Subashi ophiolite. This paper reports petrology, geochemistry, and zircon LA-ICP-MS analyses of gabbro in Kegang ophiolite. The major elements show that the distribution of SiO₂ from 43.65%~49.29%, and in the TAS classification diagram, the samples plot in gabbro area, which is consistent with the field and microscopy observations. The total REE abundances are low, ranging between 12.12~45.45 $\mu\text{g/g}$, three samples show slightly enrichments in LREE and depletions in HREE, while other samples shows depletions in LREE and enrichments in HREE. Eu^{*} shows slightly positive anomaly in LREE enriched samples, with an average of 1.34, and reflect weak magmatic plagioclase fractional crystallization, while in the LREE depleted samples, the Eu^{*} is 0.86, and reflects strong magmatic plagioclase fractional crystallization. In the cathodoluminescence images, the zircons in Kegang gabbro show crystal morphology and clear oscillatory zoning, which together with the high Th/U (0.28 to 0.67), indicate magmatic origin. 22 single grain zircon U-Pb yielded a weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of (488.8±2.6) Ma (MSWD = 0.81), which represents the crystallizing age of the gabbro. Based on the geological, geochemical characteristics and previous research results, we believe that Kegang ophiolite was formed in an island arc or forearc environment.

Key words: gabbro; ophiolite; geochemistry; zircon U-Pb ages; Kegang; West Kunlun

收稿日期(Received): 2013-12-30; 改回日期(Revised): 2014-02-19; 接受日期(Accepted): 2014-04-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAB06B05-01); 中国科学院广州地球化学研究所“一三五”布局项目(Y234021001)

作者简介: 黄朝阳(1985-), 男, 博士研究生, 矿床学专业。E-mail: yishiyiyi@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): WANG He, E-mail: wanghe@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85291422

0 引言

西昆仑地区出露多处蛇绿岩, 从北往南发育奥依塔格-柯岗-库地-他龙及苏巴什等蛇绿岩, 这些蛇绿岩组成了青藏高原“第五缝合带”^[1]。蛇绿岩的构造环境分析是对青藏高原北缘的地质组成、板块构造格局恢复、造山演化及成矿作用的关键, 是多年来地质学家的研究热点^[2-5]。

柯岗蛇绿岩是西昆仑构造单元重要组成部分。前人根据其镁铁-超镁铁岩、火山岩及火山碎屑岩岩石组合划分为柯岗蛇绿岩^[6-9]。在“第五缝合带”中, 研究程度最高的是库地蛇绿岩, 但其形成年代从元古代-中新代, 均有学者提出观点; 其构造背景有大洋盆地、弧前、岛弧、弧后盆地等, 存在较大争议^[10-15]。蛇绿岩及花岗岩的研究, 通常是解决西昆仑地区以及青藏高原北部早古生代构造演化的关键。肖序常等^[14]认为库地蛇绿岩形成于早古生代, 为原特提斯洋提供了年龄证据, 潘裕生则通过花岗岩地球化学特征, 肯定了西昆仑地区加里东期岩浆活动^[4,11]。

本文通过对柯岗蛇绿套进行野外地质特征、岩石学特征分析及室内地球化学、锆石 LA-ICP-MS 测定了该蛇绿岩的形成时代, 为分析柯岗蛇绿岩构造背景及探讨西昆仑构造演化提供依据。

1 区域地质概况

西昆仑山地区地质构造复杂, 存在多条缝合带和多个地体^[1,2,8,16-18]。由北向南为: 北昆仑地体、奥依塔格-柯岗-库地-苏巴什缝合带、南昆仑地体、麻扎-康西瓦-木孜塔格缝合带, 塔什库尔干-甜水海地体、阿塔西-乔尔天山缝合带、喀喇昆仑-羌塘地体(图 1a)。这些缝合带不仅控制了西昆仑构造格局, 且对西昆仑地区构造演化及矿产分布有重要影响。

北昆仑地体北接塔里木盆地, 南以奥依塔格-柯岗-库地-苏巴什缝合带为界(第五缝合带), 出露蓊县系地层及奥陶系和石炭系地层, 发育塔木铅锌矿, 卡兰古铅锌矿等大中型砂砾岩型铅锌矿; 南昆仑地体位于奥依塔格-柯岗-库地-苏巴什缝合带和麻扎-康西瓦缝合带之间, 该地体以出露中元古界地层和大量加里东期花岗岩为特征。毕华等认为该带花岗岩形成于岛弧环境, 并对原特提斯洋的向南或者向北消减, 指出在志留纪末期, 西昆仑地区原特提斯洋俯冲消减并发

生碰撞, 形成了一系列同碰撞同造山花岗岩类^[19]。

柯岗蛇绿岩出露于塔什库尔干县大同乡栏杆村一带, 北西-南东向展布, 受奥依塔格-柯岗-库地-苏巴什缝合带控制。从北西往南东依次沿中元古界库浪那古岩群和下中奥陶统地层不整合面, 加里东期花岗岩与元古宙花岗岩以及加里东期花岗岩、中元古界库浪那古岩群接触带展布。

2 柯岗蛇绿岩地质特征

柯岗蛇绿岩位于塔什库尔干县大同乡栏杆村, 地理坐标 37°41'39"N, 76°16'42"E。岩性主要为蚀变橄榄岩、蚀变方辉橄榄岩和辉长岩。蚀变橄榄岩分布于中部(图 2), 岩石发生强烈的蛇纹石化, 具次生纤维状结构, 块状构造, 组成矿物完全被蛇纹石(纤维状, <0.3 mm, 微显定向性)取代, 原矿物为粒状橄榄石。蚀变方辉橄榄岩分布于橄榄岩南北两侧, 岩石具次生鳞片粒状结构, 块状构造, 局部被后期花岗质脉体穿插而呈角砾状。主要矿物为滑石 40%~70%(平均 55%), 蚀变辉石; 菱铁矿 20%~60%(平均 40%); 蛇纹石 1%~10%, 鳞片状, <0.1 mm, 蚀变橄榄石。橄榄岩外侧多与辉长岩接触, 接触面上见斜长花岗岩脉贯入或呈断层接触关系, 主要矿物成分为石英和斜长石。该斜长花岗岩分布辉长岩分布密切, 可能为辉长岩结晶分异晚期的产物, 片理化产状: 235°∠65°。部分变橄榄岩等超基性岩成囊状、透镜状分布于辉长岩、花岗闪长岩中; 花岗闪长岩与辉长岩呈断层接触, 可能与西侧大同岩体为同期, 成岩时代应晚于橄榄岩及辉长岩。

辉长岩岩石较新鲜, 灰绿色-黑绿色, 岩石具有辉长结构, 块状构造。主要矿物由辉石及斜长石组成, 其中辉石 45%~65%(平均 56.6%), 半自形短柱状, 大小 0.4 mm×0.25 mm~1.3 mm×0.8 mm; 斜长石 30%~60%(平均 42%); 次要矿物可见少量角闪石、磁铁矿(图 3)。

3 测试方法

岩石主元素、微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。主元素使用 PANalytical Axios-advance 型 XRF 完成, 精度优于 5%; 微量元素使用 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRC-e 型 ICP-MS 完成, 具体分析流程见刘颖等^[20]。

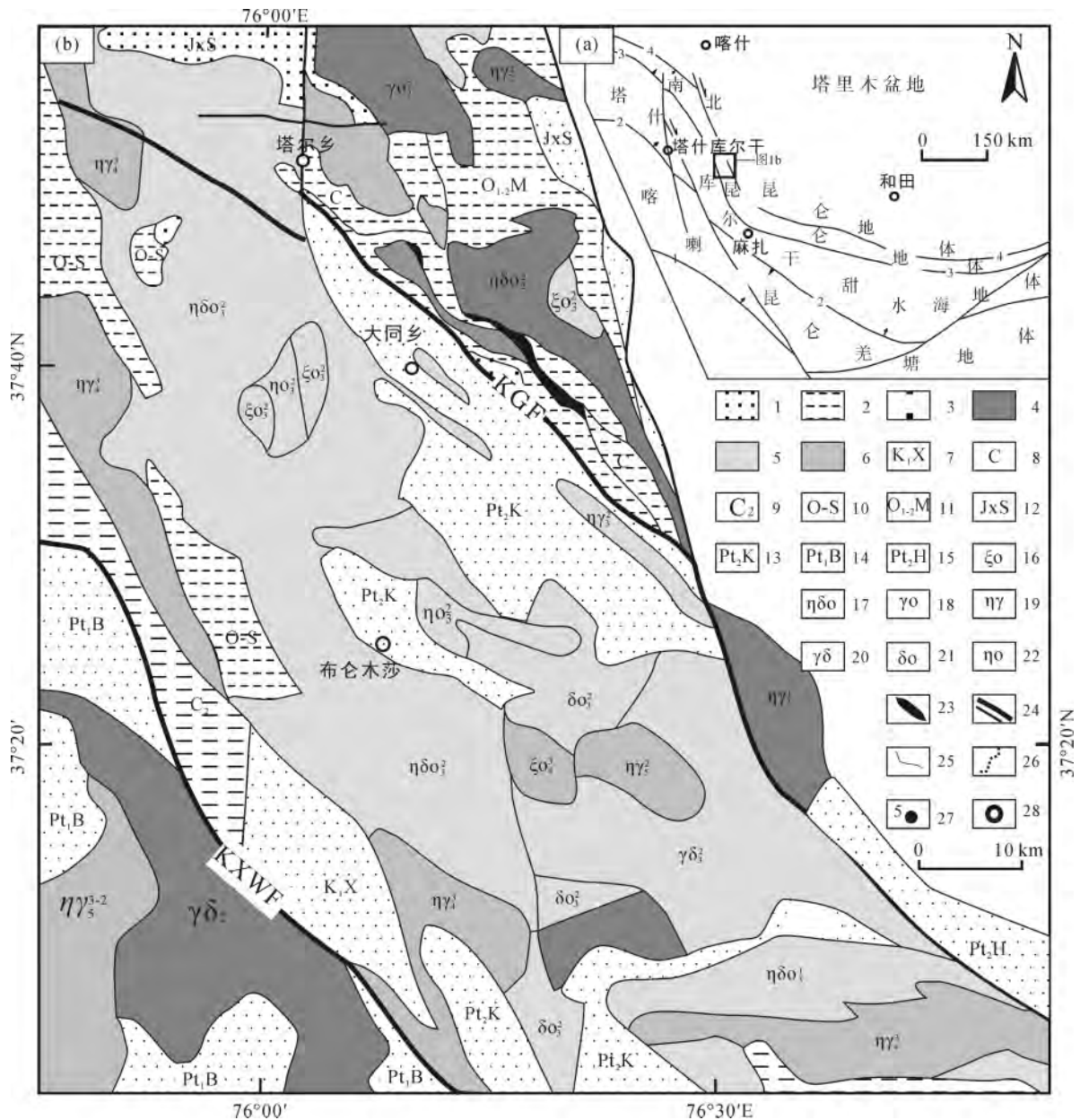


图1 西昆仑构造分区图(a)及西昆仑柯岗一带地质略图(b) (据1-25万区调资料简绘)

Fig.1 Geological map of the Kegang region in West Kunlun

- (a) 1. 班公湖缝合带; 2. 塔阿西-乔尔天山缝合带; 3. 麻扎-康西瓦-木孜塔格缝合带; 4. 奥依塔格-柯岗-库地-苏巴什缝合带。
 (b) 1. 前寒武系地层; 2. 古生界地层; 3. 中生界地层; 4. 元古宙花岗岩类; 5. 加里东期花岗岩类; 6. 海西-燕山期花岗岩类; 7. 下拉夫底群; 8. 石炭系未分; 9. 中石炭统; 10. 奥陶-志留系未分; 11. 玛列兹肯群; 12. 桑株塔格群; 13. 库浪那古岩群; 14. 布伦阔勒岩群; 15. 赫罗斯坦岩群; 16. 石英正长岩; 17. 石英二长闪长岩; 18. 英云闪长岩; 19. 二长花岗岩; 20. 花岗闪长岩; 21. 石英闪长岩; 22. 石英二长岩; 23. 蛇绿岩带; 24. 断层; 25. 地质界线; 26. 河道; 27. 矿点及编号; 28. 乡镇; KGF-柯岗断裂; KXWF-麻扎-康西瓦断裂。

采集辉长岩(样号 824-3C)约 4 kg, 用于锆石 U-Pb 年龄测定。样品选取新鲜岩石, 经过人工破碎成约 80 目, 将粉末用清水淘洗, 得到重砂部分, 再经过电磁选分离出锆石, 在双目镜下挑选出颗粒完整、无裂隙、透明度好的锆石。阴极发光在中国科学院广州地球化学研究所 JXA-8100 电子探针分析仪采集图像, 锆石分析结果在中国科学院广州地球化学研究所完成, 采用标准锆石 TEM (417 Ma)作为

标样, 数据处理采用 ICPMSDataCal 计算, 最后经 ISPLIT 3.0 完成协和图及加权平均年龄^[21-22]。

4 岩石地球化学特征

4.1 主元素特征

主元素烧失量除 824-1A(5.35)较大外, 其余介于 2.01%~2.67%之间(表 1), 说明岩石具有一定程度

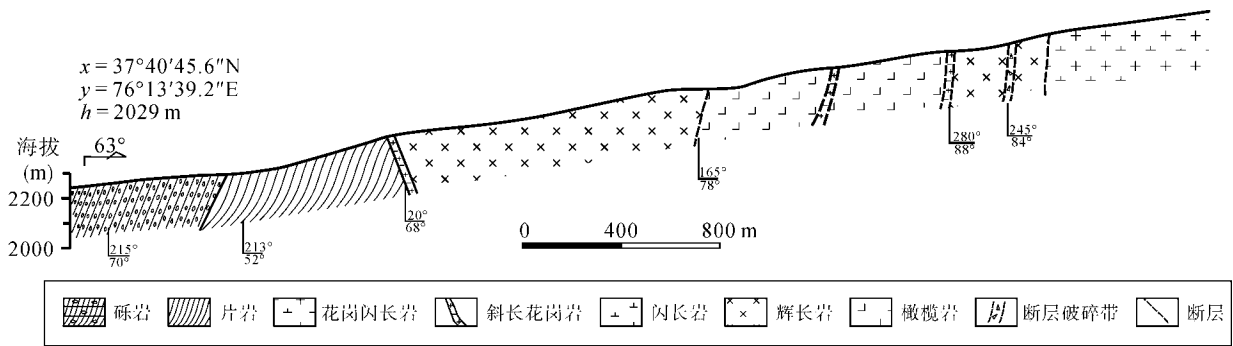


图 2 西昆仑柯岗蛇绿岩实测地质剖面图

Fig.2 The geological section of the Kegang ophiolite in West Kunlun

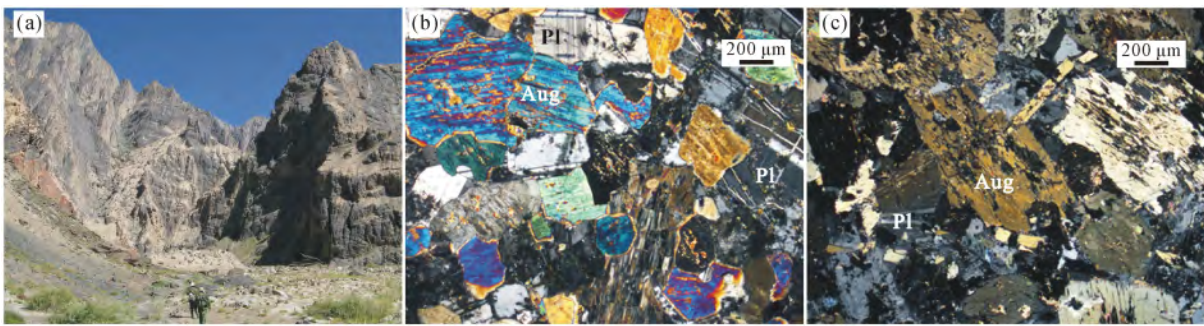


图 3 辉长岩及橄榄岩野外及显微照片(Aug 辉石, Pl 斜长石)

Fig.3 Outcrop and microphotographs of gabbro in the Kegang ophiolite

的风化，而 824-1A 风化程度较强。柯岗辉长岩 SiO_2 分布范围为 43.65%~49.29%，属于基性岩范畴；MgO 含量在 6.02%~13.17%，除 824-3C 外 2.50， TiO_2 含量变化为 0.48%~0.89%，具有岛弧拉班玄武岩特征(0.8%)^[23]； Al_2O_3 为 1.25%~16.11%， $Fe_2O_3^T$ 范围较广，8.18%~18.06%，MgO 为 6.02%~13.17%， $Mg^\#$ 值范围为 43.7~74.0，平均为 63.6；岩石总体表现为富 Na(平均为 2.54%)，低 K(平均为 0.43%)特征。

在 TAS 分类图解上(图 4)，柯岗辉长岩主要落在辉长岩区域，与野外及镜下观察一致。

4.2 微量及稀土元素特征

柯岗辉长岩稀土元素总量较低， $\sum REE$ 范围为 45.45~12.12 $\mu g/g$ ，球粒陨石标准化的 REE 分布模式(图 5)显示，一个样品显示轻稀土的富集，3 个样品显示轻稀土略亏损特征， $(La/Yb)_N$ 比值为 0.45~6.18，总体具有轻稀土亏损和富集两种分布模式。轻稀土亏损样品中， Eu^* 为正异常，平均为 1.34，显示该辉长岩样品经历较低程度的岩浆分异结晶作用；轻稀土富集样品中，该分布模式反映岩浆形成过程中岩浆分离结晶程度较高，可能为岩浆后期产物，同时

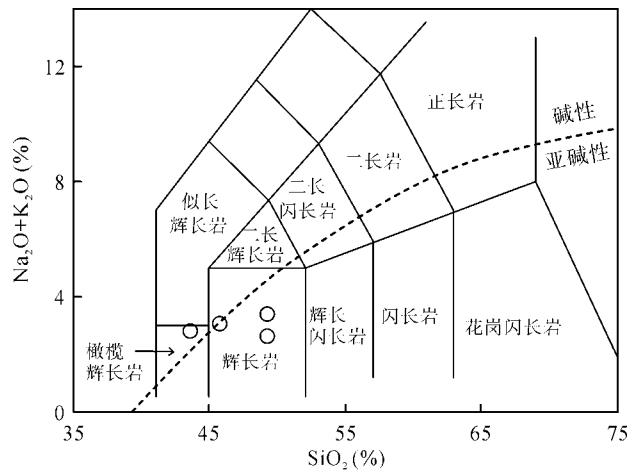


图 4 柯岗蛇绿岩中辉长岩 TAS 图解^[24]

Fig.4 TAS diagram of gabbro in the Kegang ophiolite

Eu^* 为 0.86，也反映该样品中斜长石的分离结晶作用强。在 N-MORB(大洋中脊玄武岩)标准化微量元素蛛网图显示，柯岗辉长岩具有富集 Rb、Sr 大离子亲石元素(LILF)，亏损 Nb、Ta、Th 高场强元素(HFSE)。该样品在原始地幔标准化微量元素蛛网图分布模式具有一致性，指示样品具有同一岩浆来源，为岩浆分异结晶作用先后产物。

表 1 柯岗蛇绿岩中辉长岩主元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)含量
Table 1 Major (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) components of gabbro in the Kegang ophiolite

样号	824-1A	824-3C	824-4C	824-4D	样号	824-1A	824-3C	824-4C	824-4D
SiO ₂	45.72	43.65	49.29	49.18	Nb	5.67	1.56	0.10	0.32
TiO ₂	0.89	2.50	0.58	0.48	Cs	2.86	0.58	0.63	0.71
Al ₂ O ₃	11.25	13.82	14.90	16.11	Ba	258	80.8	42.5	18.1
Fe ₂ O ₃	10.80	18.06	8.21	8.18	La	13.64	2.45	0.93	1.11
MnO	0.17	0.19	0.15	0.14	Ce	29.61	6.60	2.81	2.94
MgO	13.17	6.02	7.57	7.56	Pr	3.93	1.06	0.52	0.48
CaO	9.34	10.49	13.28	13.73	Nd	17.24	5.61	3.24	2.72
Na ₂ O	2.03	2.49	3.17	2.47	Sm	3.86	1.90	1.31	1.02
K ₂ O	1.05	0.35	0.20	0.10	Eu	1.08	1.02	0.70	0.59
P ₂ O ₅	0.14	0.03	0.00	0.00	Gd	3.88	2.83	2.09	1.62
LOI	5.35	2.22	2.67	2.01	Tb	0.59	0.52	0.39	0.30
Total	99.91	99.83	100.03	99.98	Dy	3.34	3.39	2.67	2.01
Mg#	74.0	43.7	68.3	68.3	Ho	0.70	0.77	0.61	0.46
					Er	1.82	2.08	1.62	1.23
Sc	33.8	49.4	57.1	48.4	Tm	0.25	0.32	0.23	0.18
Ti	5318	14987	3498	2894	Yb	1.58	1.94	1.50	1.12
V	224.3	866.9	238.1	190.5	Lu	0.25	0.30	0.22	0.18
Cr	1205.5	100.5	119.30	157.8	Hf	2.38	0.98	0.43	0.44
Co	52.9	59.5	30.8	33.8	Ta	0.36	0.11	0.02	0.03
Ni	289.2	65.1	42.7	38.8	Pb	35.3	4.00	1.37	1.23
Ga	13.7	18.8	14.0	14.6	Th	3.55	0.30	0.02	0.06
Ge	1.58	1.46	1.54	1.40	U	0.71	0.09	0.05	0.03
Rb	28.59	6.93	3.88	1.04	ΣREE	81.8	30.8	18.8	16.0
Sr	251	219	198	158	Eu*	0.86	1.34	1.29	1.39
Y	17.1	18.2	14.3	10.6	(La/Yb) _N	6.18	0.90	0.45	0.71
Zr	87.5	30.3	9.57	11.2	(La/Sm) _N	2.28	0.83	0.46	0.70

玄武岩类构造环境判别图广泛应用于辉长岩构造环境判别中。在 Nb-Zr-Y 图解(图 6a)中,柯岗辉长岩落入板内玄武岩和火山弧玄武岩中;在 TiO₂-MnO-P₂O₅ 图解(图 6b)中,柯岗辉长岩落入岛弧钙碱性玄武岩和岛弧拉班玄武岩中;在 Hf-Th-Nb 图解(图 6c)中均落在岛弧火山岩及靠近区域。

5 辉长岩锆石 U-Pb 年代学

蛇绿岩中辉长岩锆石 U-Pb 年龄一般代表古洋盆扩张时代,是确定蛇绿岩形成年龄的优选方法之一。为了厘定柯岗蛇绿岩形成时代,选取出露在栏杆村附近的辉长岩(824-3C)锆石进行 LA-ICP-MS 年代学测试。锆石整体晶型完整,多数为长柱状,大小差别较大,长为 100~190 μm ,长短向之比约为 3 1~2 1,锆石无色透明。阴极发光图像中,锆石发育典型的震荡环

带结构或扇形结构,为典型的岩浆锆石(图 7)。

本次共测定 22 颗锆石。锆石 Pb 含量为 54.77~143.86 $\mu\text{g/g}$, Th 含量为 249.98~769.59 $\mu\text{g/g}$, U 含量在 580.48~1519.13 $\mu\text{g/g}$, Th/U 范围为 0.28~0.67(表 2),显示出岩浆锆石特征。22 颗锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(488.8 \pm 2.6) Ma, MSWD = 0.81 (图 8),代表柯岗蛇绿岩套中辉长岩结晶年龄。

6 讨论

西昆仑经历了漫长而复杂的地质演化,其过程受众多地质学者关注^[12]。由于复杂的地质运动及强烈的造山及剥蚀作用,西昆仑地区缺失太古宇地层记录;在元古宙时期,昆仑山地区南北均有元古宇地层大量出露,标志西昆仑陆核形成。西昆仑地区早古生代构造演化以蛇绿岩及花岗岩属性

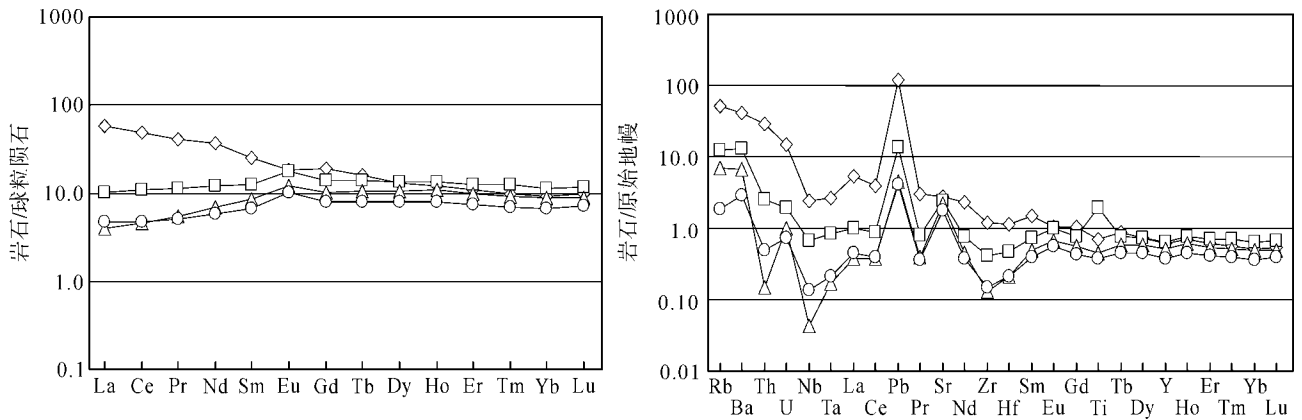


图 5 柯岗辉长岩稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素 N-MORB 标准化图解(据 Sun *et al.*^[25])

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and N-MORB-normalized trace element patterns of gabbro in the Kegang ophiolite (after Sun *et al.*^[25])

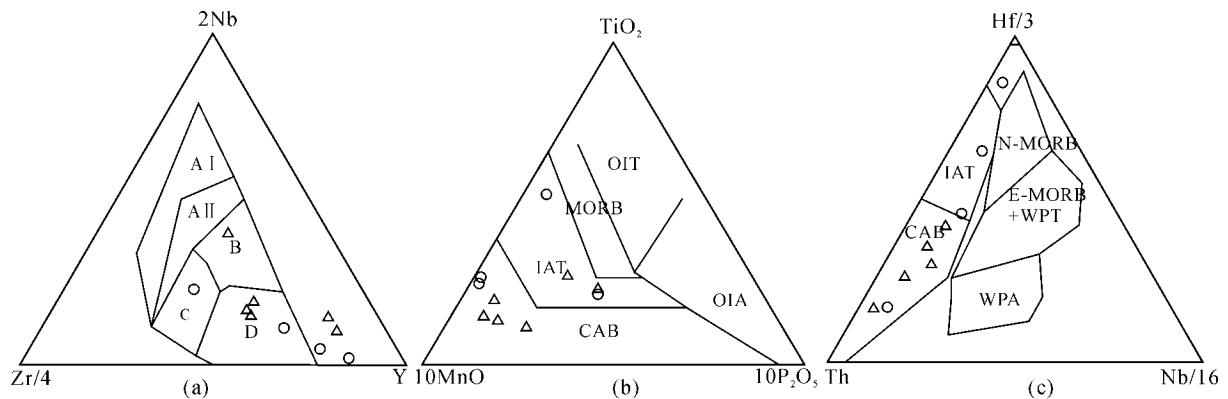


图 6 柯岗辉长岩构造环境判别图解(三角数据来源于尹得功等^[26])

Fig.6 Tectonic setting discrimination diagrams for the gabbro in the Kegang ophiolite

- (a) Nb-Zr/Y 图解^[27] (A I-板内碱性玄武岩; A II-板内碱性玄武岩和板内拉张玄武岩; B-富集型洋中脊玄武岩; C-板内玄武岩; D-火山弧玄武岩);
 - (b) TiO₂-MnO-P₂O₅ 图解^[28] (MORB-洋中脊玄武岩; OIT-岛弧拉班玄武岩; OIA-洋岛碱性玄武岩; CAB-岛弧钙碱性玄武岩; IAT-岛弧拉班玄武岩);
 - (c) Hf-Th-Nb 图解^[29] (N-MORB-正常洋中脊玄武岩; E-MORB-富集洋中脊玄武岩; CAB-岛弧钙碱性玄武岩; WPA-板内碱性玄武岩; IAT-岛弧拉班玄武岩)。
- (a) Nb-Zr-Y diagram; (b) TiO₂-MnO-P₂O₅ diagram; (c) Hf-Th-Nb diagram..

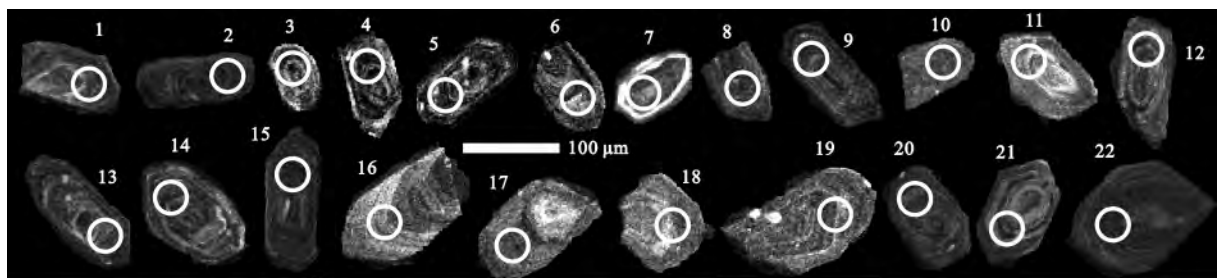


图 7 柯岗辉长岩(样号 824-3C)锆石阴极发光图像

Fig.7 Cathodoluminescence (CL) images of zircons for gabbro in the Kegang ophiolite

为关键, 肖序常^[14]通过对库地蛇绿岩中石英辉长岩锆石 SHRIMP 测年并得到 510 Ma 年龄, 是证明原特提斯洋盆发育于早古生代早期的重要依据; 原特提斯洋在奥陶纪发生俯冲消减, 形成以大同岩体为代表的大量岛弧花岗岩; 奥陶纪末期, 原特提斯洋两侧大陆碰撞, 形成一系列同碰撞-后碰撞花岗岩^[19,30]。

6.1 形成时代

青藏高原“第五缝合带”最先由潘裕生^[1]提出, 但关于第五缝合带形成的年龄, 一直存在较大的争议。由于使用的地质测年方法、对象不同以及该地区地质复杂, 库地蛇绿岩形成时代从古元古代、新元古代至早古生代、晚古生代均有学者提出。

表 2 柯岗辉长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of gabbro in the Kegang ophiolite

点号	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Age (Ma)	1 σ
401	91.32	466.66	988.68	0.47	0.049952	0.002047	0.546818	0.021791	0.078283	0.000984	485.87	5.88
402	130.75	433.49	1486.45	0.29	0.051195	0.001777	0.559878	0.019231	0.078143	0.000984	485.03	5.88
403	87.14	336.45	958.61	0.35	0.053316	0.001919	0.586756	0.021263	0.078789	0.001046	488.89	6.25
404	115.15	568.81	1227.87	0.46	0.051864	0.001741	0.568884	0.019019	0.078477	0.000895	487.03	5.35
405	143.86	468.47	1603.34	0.29	0.053629	0.001862	0.599802	0.021290	0.079950	0.001019	495.82	6.08
406	95.03	362.20	1056.56	0.34	0.052580	0.001951	0.582528	0.021629	0.079120	0.000940	490.87	5.61
407	116.09	792.19	1179.68	0.67	0.053828	0.001942	0.594065	0.021532	0.078521	0.000985	487.29	5.89
408	98.41	311.40	1111.00	0.28	0.051511	0.001805	0.576776	0.020302	0.079541	0.000999	493.38	5.97
409	109.36	449.06	1223.57	0.37	0.053004	0.001966	0.581769	0.021076	0.077795	0.000943	482.95	5.64
410	119.19	433.31	1351.82	0.32	0.052045	0.002227	0.574266	0.023820	0.078091	0.001037	484.72	6.20
411	57.23	349.68	594.35	0.59	0.051110	0.002237	0.576110	0.024612	0.080125	0.001092	496.87	6.52
412	85.89	444.86	960.26	0.46	0.049329	0.001921	0.533217	0.020294	0.076766	0.000900	476.79	5.39
413	72.97	320.87	820.13	0.39	0.050660	0.001947	0.555404	0.020500	0.078355	0.001077	486.30	6.44
414	114.48	769.59	1198.44	0.64	0.050180	0.001931	0.552140	0.020830	0.078333	0.000990	486.16	5.92
415	135.83	543.29	1519.13	0.36	0.049784	0.002031	0.557643	0.022460	0.079806	0.001129	494.97	6.74
416	67.76	301.07	763.29	0.39	0.049608	0.002172	0.547988	0.023295	0.078689	0.001117	488.29	6.68
417	119.29	450.97	1380.07	0.33	0.052514	0.002086	0.583368	0.022647	0.078362	0.001011	486.34	6.05
418	61.97	249.98	693.71	0.36	0.054899	0.002497	0.617376	0.026835	0.079160	0.001017	491.11	6.08
419	99.23	360.12	1115.94	0.32	0.056437	0.002703	0.648254	0.030021	0.079894	0.001085	495.49	6.48
420	77.36	375.35	836.90	0.45	0.056700	0.003307	0.659794	0.036640	0.080642	0.001206	499.95	7.19
421	54.77	302.26	580.48	0.52	0.050696	0.002508	0.579360	0.027721	0.079842	0.001155	495.18	6.89
422	102.27	328.93	1170.04	0.28	0.051811	0.002350	0.579340	0.024913	0.078303	0.001154	485.99	6.90

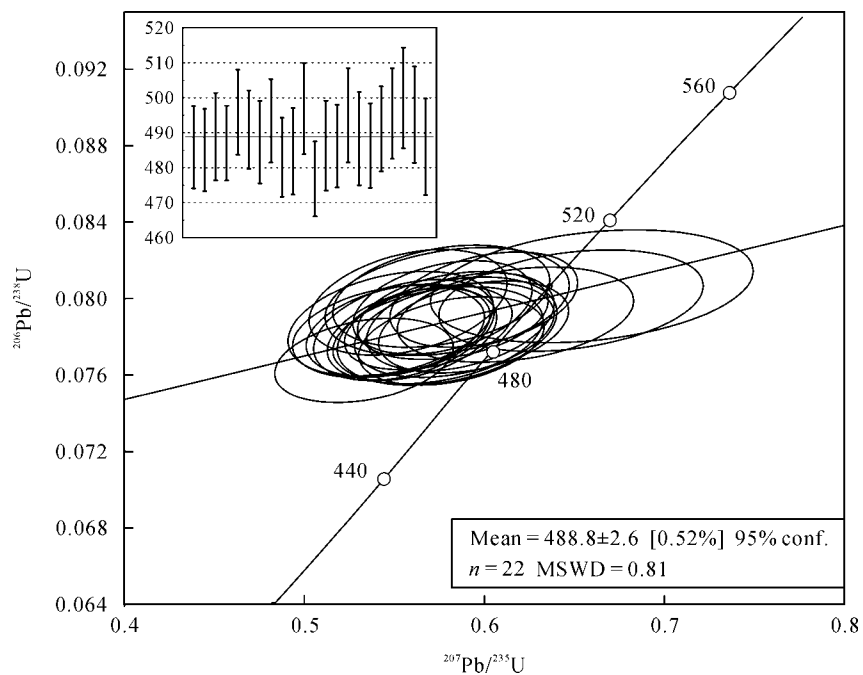


图 8 柯岗辉长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄图

Fig.8 Zircon U-Pb concordia diagram of gabbro in the Kegang ophiolite

潘裕生^[1]认为该缝合带形成于震旦纪至奥陶纪(800~450 Ma), 邓万民^[12]通过研究库地蛇绿岩的地质特征, 认可该缝合带的存在, 提供了地质证据, 并从 Sm-Nd 年龄与库地北侧的侵入岩年龄的对比, 认为库地蛇绿岩形成于 6900~4800 Ma。张传林等^[31]对侵入于库地蛇绿岩纯橄榄岩中伟晶辉长岩做了锆石 SHRIMP 测年, 测得其年龄值为(525.0±2.9) Ma, 库地蛇绿岩的形成年龄应早于这个年龄。肖序常等^[14]对该蛇绿岩中石英辉长岩进行了锆石 SHRIMP 测年, 给出了 510 Ma 的锆石年龄。认为库地蛇绿岩形成于晚古生代也有充分的证据, 姜春发等^[18]得到全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 359 Ma, 而周辉等^[32]及方爱民等^[33]在库地蛇绿岩中硅质岩和复理石建造中, 发现了早古生代和晚泥盆世-早石炭世的生物化石。在库地蛇绿岩北部的柯岗蛇绿岩, 其研究程度较低, 董连慧等^[34]通过辉长岩 3 组锆石 U-Pb 年龄的测定, 认为辉长岩形成时代大于 757 Ma。

本文通过柯岗辉长岩锆石 LA-ICP-MS 的测定, 确定柯岗蛇绿岩中辉长岩形成年龄为(488.8±2.6) Ma, 为西昆仑原特提斯洋形成年代提供了年龄证据。

6.2 构造意义

自发现青藏高原“第五缝合带”后, 关于西昆仑地区蛇绿岩所形成的构造背景, 国内外学者用不同方法进行了大量的研究, 也得出了不同的结论, 包括大洋环境、岛弧、弧后盆地及过渡环境等。

邓万民^[12]根据库地蛇绿岩系统的地质产状特征和岩石地球化学、同位素研究, 认为库地蛇绿岩形成于大洋环境; 杨树锋等^[35]通过库地基性熔岩及堆晶辉长岩地质、地球化学特征分析, 也认为其形成环境为成熟大洋盆地。肖序常等^[14]认为库地蛇绿岩主体可能来自上地幔的部分熔融, 喷溢于大洋或洋盆环境, 但遭受后期消减俯冲、洋壳重熔混染作用的影响。

许多学者认为库地蛇绿岩形成于俯冲带(SSZ), 包括弧前、岛弧及弧后盆地。王志宏等^[36-37]根据库地地方辉橄榄岩、二辉石玄武岩具有低 Al、高 Cr*及富 Rb、Ba、U、Th、LREE 等特征, 认为库地蛇绿岩形成于消减带之上的弧间或弧后盆地。方爱民等^[38]则根据库地蛇绿岩中基性火山岩地球化学具有大洋岛弧和成熟洋中脊火山岩特征, 认为库地蛇绿岩形成于成熟大洋中的岛弧环境。肖文交等^[39-40]通过对库地一带的构造特征以及对蛇绿岩不同单元的地球

化学研究, 认为它属于早古生代叠加于消减带之上的弧间或弧后盆地蛇绿岩。尹得功等^[26]通过玄武岩地球化学特征分析, 认为柯岗蛇绿岩形成于弧后盆地或破坏性大陆边缘小洋盆快速拉张环境。

玻安岩形成于板块消减和弧后盆地, 袁超等^[41]在库地蛇绿岩带依莎克群火山岩中发现玻安岩, 并认为库地蛇绿岩形成于弧前环境。王元龙等^[42]认为, 在蛇绿岩中, LREE 亏损型基性火山岩可能来源于亏损的洋壳地幔源区, LREE 富集型基性火山岩则来源于富 LREE 流体交代的地幔源区, 两种地区化学特征同时出现的构造环境多为岛弧和弧间盆地环境, 并指出库地蛇绿岩应形成于靠近岛弧的弧后盆地-岛弧-弧间盆地过渡性构造环境。

柯岗蛇绿岩中辉长岩岩石(La/Yb)_N 范围为 0.45~6.18, 同时具有轻稀土亏损和轻稀土富集两种分布模式, 且微量元素 Nb、Ta 具有岛弧特征的强烈亏损。在玄武岩 Nb-Zr-Y 图解中, 柯岗辉长岩落入板内玄武岩和火山弧玄武岩中; 在 TiO₂-MnO-P₂O₅ 图解中, 柯岗辉长岩落入岛弧钙碱性玄武岩和岛弧拉班玄武岩中; 在 Hf-Th-Nb 落入上均落在岛弧火山岩及靠近区域。通过柯岗蛇绿岩中辉长岩地球化学特征和构造环境判别图解, 结合前人资料, 认为柯岗蛇绿岩形成环境为岛弧或者弧前环境。

7 结 论

(1) 柯岗辉长岩 SiO₂ 分布范围从 43.65%~49.29%, 属于基性岩范畴, MgO 范围较大 6.02%~13.17%; 微量及稀土元素特征显示, 柯岗辉长岩同时具有岩浆分异结晶先后产物。

(2) 根据柯岗辉长岩锆石 LA-ICP-MS 测年, 确定柯岗蛇绿岩中辉长岩形成年龄为(488.8±2.6) Ma, 为西昆仑原特提斯洋形成年代提供年龄证据。

(3) 柯岗蛇绿岩中辉长岩地球化学特征和构造环境判别图解, 结合前人资料, 认为柯岗蛇绿岩形成环境为岛弧或者弧前环境。

本文得到两位匿名审稿专家认真负责的修改, 并得到建设性意见, 表示衷心的感谢! 野外工作得到新疆塔什库尔干县大同乡政府、派出所的帮助; 主元素和微量元素测试分别得到中国科学院广州地球化学研究所刘颖高级工程师和胡光黔高级工程师的帮助; 锆石分析得到涂湘林高级工程师及其课题组人员的帮助。在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 潘裕生. 青藏高原第五缝合带的发现与论证[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 184-192.
Pan Yu-sheng. Discovery and evidence of the Fifth Suture Zone of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Acta Geophys Sin, 1994, 37(2): 184-192 (in Chinese with English abstract).
- [2] Mattern F, Schneider W., Suturing of the Proto- and Paleotethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China) [J]. J Asian Earth Sci, 2000, 18(6): 637-650.
- [3] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 2000, 28(1): 211-280.
- [4] 潘裕生. 西昆仑山构造特征与演化[J]. 地质科学, 1990, 25(3): 224-232.
Pan Yu-sheng. Tectonic features and evolution of the western Kunlun mountain region [J]. Sci Geol Sin, 1990, 25(3): 224-232 (in Chinese with English abstract).
- [5] Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, Xu Z Q. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications [J]. Tectonophysics, 1996, 258(1): 215-231.
- [6] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-841.
Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-841 (in Chinese).
- [7] 潘裕生, 周伟明, 许荣华, 王东安, 张玉泉, 谢应雯, 陈挺恩, 罗辉. 昆仑山早古生代地质特征与演化[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 302-307.
Pan Yusheng, Zhou Weiming, Xu Ronghua, Wang Dong'an, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Chen Ting'en, Luo Hui. Geological characteristics and evolution of the Kunlun Mountains region during early Paleozoic [J]. Sci Chin (D), 1996, 26(4): 302-307 (in Chinese).
- [8] 李荣社, 计文化, 杨永成, 潘晓平. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-389.
Li Rong-she, Ji Wen-hua, Yang Yong-cheng, Pan Xiao-ping. The Geology in Kunlun and Its Adjacent Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-389 (in Chinese with English abstract).
- [9] 丁道桂, 王道轩, 刘伟群. 西昆仑造山带与盆地[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-230.
Ding Dao-gui, Wang Dao-xuan, Liu Wei-qun. The West Kunlun Orogenic Belts and Basins [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-230 (in Chinese).
- [10] 潘裕生. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-523.
Pan Yu-sheng. Geological Evolution of the Karakorum-Kunlun Mountains [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-523 (in Chinese).
- [11] 邓万明. 喀喇昆仑-西昆仑地区蛇绿岩的地质特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 98-111.
Deng Wan-ming. Geological features of ophiolite and tectonic significance in the Karakorum-West Kunlun Mts [J]. Acta Petrol Sin, 1995, 11(Suppl): 98-111 (in Chinese with English abstract).
- [12] 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 许志琴, 吴才来. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. 中国地质, 2004, 31(3): 225-239.
Yang Jing-sui, Wang Xi-bin, Shi Ren-deng, Xu Zhi-qin, Wu Cai-lai. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: A fragment of paleo-Tethyan oceanic crust [J]. Geol Chin, 2004, 31(3): 225-239 (in Chinese with English abstract).
- [13] 肖序常, 王军, 苏犁, 宋述光. 再论西昆仑库地蛇绿岩及其构造意义[J]. 地质通报, 2003, 22(10): 745-750.
Xiao Xu-chang, Wang Jun, Su Li, Song Shu-guang. A further discussion of the Kuda ophiolite, west Kunlun, and its tectonic significance [J]. Geol Bulletin China, 2003, 22(10): 745-750 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王志洪, 李继亮, 侯泉林, 陈海泓. 西昆仑库地蛇绿岩地质、地球化学及其成因研究[J]. 地质科学, 2000, 32(5): 151-160.
Wang Zhi-hong, Li Ji-liang, Hou Quan-lin, Chen Hai-hong. Geology, geochemistry and genesis of the Kuda ophiolite, western Kunlun, China [J]. Sci Geol Sin, 2000, 35(2): 151-160 (in Chinese with English abstract).
- [15] 肖序常, 王军. 西昆仑-喀喇昆仑及其邻区岩石圈结构、演化中几个问题的探讨[J]. 地质论评, 2004, 50(03): 285-294.
Xiao Xu-chang, Wang Jun. Discussion on the lithospheric structure and evolution of the West Kunlun Mountains-Karakorum Mountains and their adjacent areas [J]. Geol Rev, 2004, 50(3): 285-294 (in Chinese with English abstract).
- [16] 计文化, 李荣社, 陈守建, 何世平, 赵振明, 边小卫, 朱海平, 崔继岗, 任绢刚. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(9): 1268-1280.
Ji Wenhua, Li Rongshe, Chen Shoujian, He Shiping, Zhao Zhenming, Bian Xiaowei, Zhu Haiping, Cui Jigang, Ren Juan'gang. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and its geological significance [J]. Sci China Earth Sci, 2011, 41(9): 1268-1280 (in Chinese).
- [17] 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1-107.
Jiang Chun-fa, Wang Zong-qi, Li Jin-yi. Opening and Closing Tectonics of Central Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-107 (in Chinese).
- [18] 毕华, 王中刚, 王元龙, 朱笑青. 西昆仑造山带构造岩浆演化史[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 398-406.
Bi Hua, Wang Zhonggang, Wang Yuanlong, Zhu Xiaoping. History of tectonic-magmatic evolution of Western Kunlun [J]. Sci Chin (D), 1999, 29(5): 398-406.
- [19] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552-558.
Liu Ying, Liu Hai-chen, Li Xian-hua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements using ICP-MS [J]. Geochimica, 1996, 25(6): 552-558 (in Chinese with English abstract).
- [20] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [Z]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication 1a, 2001: 1-55.
- [21] Harris A C, Allen C M, Bryan S E, Campbell I H, Holcombe R J, Palin J M. ELA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of regional volcanism hosting the Bajo de la Alumbrera Cu-Au

- deposit: Implications for porphyry-related mineralization [J]. *Mineral Deposit*, 2004, 39(1): 46–67.
- [22] Jakeš P, White A J R. Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas [J]. *Geol Soc Am Bulletin*, 1972, 83(1): 29–40.
- [23] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks on the total alkali-silica diagram [J]. *J Petrol*, 1986, 27(3): 745–750.
- [24] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 42(1): 313–345.
- [25] 尹得功, 高军, 弓小平, 韩琼. 柯岗蛇绿岩地质特征及构造环境分析[J]. *新疆地质*, 2013, 31(3): 141–147.
Yin De-gong, Gao Jun, Gong Xiao-ping, Han Qiong. Geological characteristics and tectonic setting of the Kegang ophiolite [J]. *Xinjiang Geol*, 2013, 31(3): 141–147 (in Chinese with English abstract).
- [26] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chem Geol*, 1986, 56(3): 207–218.
- [27] Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1983, 62(1): 53–62.
- [28] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 50(1): 11–30.
- [29] 高晓峰, 校培喜, 康磊, 奚仁刚, 过磊, 谢从瑞, 杨再朝. 西昆仑大同西岩体成因: 矿物学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3065–3079.
Gao Xiao-feng, Xiao Pei-xi, Kang Lei, Xi Ren-gang, Guo Lei, Xie Cong-rui, Yang Zai-chao. Origin of Datongxi pluton in the West Kunlun orogen: Constraints from mineralogy, elemental geochemistry and zircon U-Pb age [J]. *Acta Petrol Sin*, 2013, 29(9): 3065–3079 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张传林, 于海锋, 沈家林, 董永观, 叶海敏, 郭坤一. 西昆仑库地伟晶辉长岩和玄武岩锆石 SHRIMP 年龄: 库地蛇绿岩的解体[J]. *地质论评*, 2004, 50(6): 639–643.
Zhang Chuan-lin, Yu Hai-feng, Shen Jia-lin, Dong Yong-guan, Ye Hai-min, Guo Kun-yi. Zircon SHRIMP age determination of the giant-crystal gabbro and basalt in Kuda, West Kunlun: Dismembering of the Kuda ophiolite [J]. *Geol Rev*, 2004, 50(6): 639–643 (in Chinese with English abstract).
- [31] 周辉, 李继亮, 侯泉林, 方爱民, 李红生. 西昆仑库地蛇绿混杂带中早古生代放射虫的发现及其意义[J]. *科学通报*, 1998, 43(22): 2448–2451.
Zhou Hui, Li Jiliang, Hou Quanlin, Fang Aimin, Li Hongsheng. Discovery of early Paleozoic radiolaria in ophiolitic imbricate zone at Kudi of West Kunlun, and its geological significance [J]. *Chin Sci Bulletin*, 1998, 43(22): 2448–2451 (in Chinese).
- [32] 方爱民, 李继亮, 侯泉林, 李红生, 郝杰. 新疆西昆仑“依沙克群”中的放射虫组合及其形成时代探讨[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 212–217.
Fang Ai-min Li Ji-liang, Hou Quan-lin, Li Hong-sheng, Hao Jie. The assemble ages of the radiolaria fossils found in “Yisak Group” of West Kunlun of Xinjiang, and discussion on its age [J]. *Sci Geol Sin*, 2000, 35(2): 212–217 (in Chinese with English abstract).
- [33] 董连慧, 朱志新, 屈迅, 王克卓, 赵同阳. 新疆蛇绿岩带的分布、特征及研究新进展[J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 2894–2904.
Dong Lian-hui, Zhu Zhi-xin, Qu Xun, Wang Ke-zhuo, Zhao Tong-yang. Spatial distribution, geological features and latest research progress of the main ophiolite zones in Xinjiang, NW China [J]. *Acta Petrol Sin*, 2010, 26(10): 2894–2904 (in Chinese with English abstract).
- [34] 杨树锋, 陈汉林, 董传万, 沈晓华, 齐德文, 赵冬冬, 贾承造, 魏国齐, 李继亮. 西昆仑山库地蛇绿岩的特征及其构造意义[J]. *地质科学*, 1999, 34(3): 281–288.
Yang Shu-feng, Chen Han-lin, Dong Chuan-wan, Shen Xiaohua, Qi De-wen, Zhao Dong-dong, Jia Chen-zao, Wei Guo-qi, Li Ji-liang. The characteristics of Kudi ophiolite suite and its tectonic setting [J]. *Sci Geol Sin*, 1999, 34(3): 281–288 (in Chinese with English abstract).
- [35] Wang Z H, Sun S, Li J L, Hou Q L. Petrogenesis of tholeiite associations in the Kudi ophiolite (western Kunlun Mountains, northwestern China): Implication for evolution of back-arc basins [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143(4): 471–483.
- [36] 方爱民, 李继亮, 刘小汉, 侯泉林, Lee I J, 肖文交, 俞良军, 周辉. 新疆西昆仑库地混杂带中基性火山岩构造环境分析[J]. *岩石学报*, 2003, 19(3): 409–417.
Fang Ai-min, Li Ji-liang, Liu Xiao-han, Hou Quan-lin, Lee I J, Xiao Wen-jiao, Yu Liang-jun, Zhou Hui. Tectonic settings of the basic igneous rocks in the Kudi ophiolite zone of West Kunlun Mountains, Xinjiang [J]. *Acta Petrol Sin*, 2003, 19(3): 409–417 (in Chinese with English abstract).
- [37] Xiao W J, Windley B F, Hao J, Li J L. Arc-ophiolite obduction in the western Kunlun range (China): Implications for the Palaeozoic evolution of central Asia [J]. *J Geol Soc London*, 2002, 159(5): 517–528.
- [38] Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, Jian P, Liu C Z, Yuan C, Sun M. Accretionary tectonics of the Western Kunlun Orogen, China: A Paleozoic-early Mesozoic, Long-lived active continental margin with implications for the growth of Southern Eurasia [J]. *J Geol*, 2005, 113(6): 687–705.
- [39] 袁超, 孙敏, 李继亮, 侯泉林, 周美福. 西昆仑库地蛇绿岩的构造背景: 来自玻安岩系岩石的新证据[J]. *地球化学*, 2002, 31(1): 43–48.
Yuan Chao, Sun Min, Li Ji-liang, Hou Quan-lin, Zhou Mei-fu. Tectonic background of the Kuda ophiolite, western Kunlun: New constraints from boninite series rocks [J]. *Geochimica*, 2002, 31(1): 43–48 (in Chinese with English abstract).
- [40] 王元龙, 李向东, 毕华, 王中刚, 朱笑青, 黄智龙. 西昆仑库地蛇绿岩的地质特征及其形成环境[J]. *长春地质学院学报*, 1997, 27(3): 304–309.
Wang Yuan-long, Li Xiang-dong, Bi Hua, Wang Zhong-gang, Zhu Xiao-qing, Huang Zhi-long. Geological characteristics and geotectonic setting of Kudi Ophiolite in western Kunlun Mountains [J]. *J Changchun Colleg Geol* [J]. 1997, 27(3): 304–309 (in Chinese with English abstract).