

青海都兰县色德日辉绿岩地球化学特征、 锆石U-Pb年龄及其地质意义

岳维好¹, 周家喜^{2*}, 高建国³, 黄艳华⁴, 贾福聚³

1. 中化地质矿山总局 云南地质勘查院, 昆明 650100; 2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 3. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 4. 昆明理工大学 资产管理处, 昆明 650504

摘要: 为探讨青海都兰县沟里地区基性脉岩的成岩时代与构造环境, 理解早古生代东昆仑地区的地质演化历史, 对沟里地区发育的色德日辉绿岩进行了系统的岩石学、岩石地球化学和锆石U-Pb年代学研究。岩石学观察显示, 色德日辉绿岩蚀变强烈, 但仍保留明显的辉绿结构。岩石地球化学分析表明, 辉绿岩的SiO₂含量(45.70%~46.70%)与基性岩相当, 属亚碱性玄武岩系列; 全岩的CaO含量较高(19.64%~21.50%), 与碳酸盐化、云母化等蚀变特征吻合; 全岩稀土总量较低(64.53×10⁻⁶~182.99×10⁻⁶), 具有轻稀土元素富集特征, 其δEu为0.80~0.96, δCe为0.84~0.92, 均呈负异常; 富集大离子亲石元素(Rb、Th和U), 而亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti和Y)。全岩地球化学特征呈现岛弧玄武岩特征。LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为417.4±3.2 Ma, 形成于晚志留世。研究表明, 色德日辉绿岩是俯冲板片的消减作用引发地幔物质产生部分熔融的产物, 其形成与晚志留世东昆仑地区古特提斯洋壳俯冲消减作用有关。

关键词: LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄; 岩石成因; 构造背景; 辉绿岩; 青海; 东昆仑东段

中图分类号: P588.124; P597.3 文章编号: 1007-2802(2017)02-0270-09 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2017.02.010

Geochemistry, Zircon U-Pb Chronology and Geological Implications of Sederi Diabase, Dulan County, Qinghai Province

YUE Wei-Hao¹, ZHOU Jia-Xi^{2*}, GAO Jian-Guo³, Huang Yan-hua⁴, Jia Fu-Ju³

1. Yunnan Geological Prospecting Institute, China Chemical Geology and Mine Bureau, Kunming 650206, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposits Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. College of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 4. Division of Assets Administration, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China

Abstract: In order to explore the age and tectonic setting of the Gouli mafic dykes in eastern Kunlun, and further understand the early Paleozoic geological evolution of the Gouli area, the petrology, geochronology and geochemistry of the Sederi diabase has been performed in this paper. The petrographical characteristics show that the Sederi diabase has experienced strong alteration, but remains diabase texture. The rocks have SiO₂ contents of 45.70%~46.70% and belong to sub-alkaline basalt series. They have high CaO contents of 19.64%~21.50%, consistent with the alteration characteristics of carbonatization and micacization. The diabase is characterized by low total REE (Σ REE = 64.53×10⁻⁶~182.99×10⁻⁶), enrichment in LREE and negative Eu (0.80~0.96) and Ce (0.84~0.92) anomalies. Meanwhile, the rocks are enriched in LILE (Rb, Th and U) and depleted in HFSE (Nb, Ta, Ti and Y). Therefore, the geochemistry indicates an arc origin. LA-ICP-MS zircon U-Pb age is 417.4±3.2 Ma, indicative of the product of Early Paleozoic magmatic activity. In conclusion, the Sederi diabase is a product of partly melted mantle material caused by Paleo-Tethys oceanic crust subduction during late Silurian in Eastern Kunlun.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology; petrogenesis; tectonics setting; diabase; Qinghai province; east section of eastern Kunlun orogenic belt

收稿日期: 2016-04-12 收到, 2016-05-25 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272111); 山东黄金集团基本科研业务费专项基金项目(201122010100)

第一作者简介: 岳维好(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: 137053132@qq.com.

* 通讯作者简介: 周家喜(1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: jarcy@163.com.

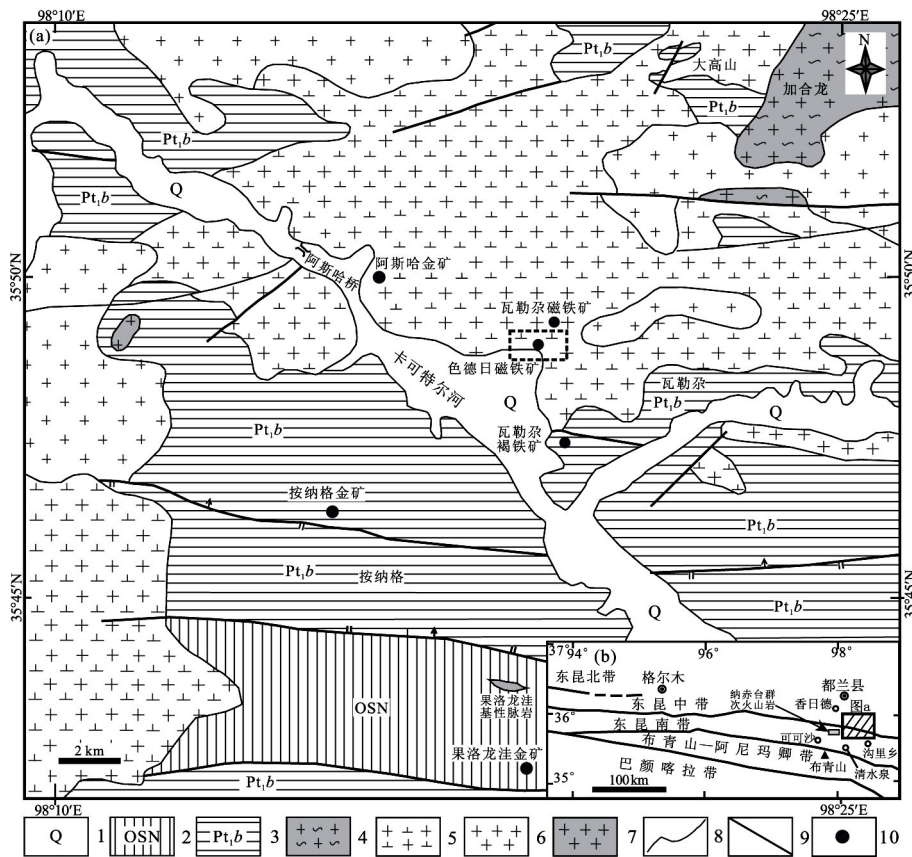
东昆仑造山带位于青藏高原东北缘,是中央造山带的重要组成部分(殷鸿福和张克信,1997,1998)。都兰县沟里地区位于东昆仑造山带东段,近年来区内发现了果洛龙洼(大型)、阿斯哈(大型)、按纳格(小型)、瓦勒尔(小型)及达里吉格塘(矿点)等多个金矿床(点),以及瓦勒尔、色德日等与基性岩有关的铁矿点。关于沟里地区与金成矿作用已有较多的研究(文雪峰和王怀超,2006;杨宝荣和杨小斌,2007;胡荣国等,2010;李碧乐等,2012;刘心开等,2013;贾福聚等,2013;肖晔等,2014),而有关基性岩成岩成矿作用方面的研究则相对薄弱(岳维好等,2013)。已有研究表明,东昆仑地区至少经历了早古生代和晚古生代-早中生代两次构造演化历程,但由于研究区早古生代岩浆记录不完整(姜春发等,1992,2000;谌宏伟等,2006),限制了对早古生代东昆仑地区地质演化历史的认识。本次工作在野外调查的基础上,选择色德日磁铁矿区与铁矿化关系极为密切的基性脉岩为研究对象,通过系统的岩石学、岩石地球化学和

锆石U-Pb年代学研究,旨在揭示其岩石成因、构造环境及动力学背景,为理解东昆仑地区构造演化过程提供新的信息,对认识铁矿床成因和指导相关找矿勘查也具有重要意义。

1 区域地质背景

东昆仑造山带为复合造山带,具有多岛洋、软碰撞和多旋回等特征,具有复杂的地质演化历史(殷鸿福和张克信,1997,1998)。东昆仑地区从北向南依次展布着昆北、昆中及昆南3条主断裂,总体均呈近东西向展布,将东昆仑造山带划分为北、中和南3个构造亚带(姜春发等,1992,2000;图1b)。昆北断裂带长约700 km,西至新疆,多被第四系覆盖;昆中断裂和昆南断裂分别是昆中缝合带和昆南缝合带的主断裂,延伸1000 km以上,均向北倾,且上陡下缓,是较强的地震带和重力、磁力的梯度带(崔军文等,1992)。

沟里地区出露地层相对简单(图1a),主要有古元古代金水口群白沙河组(2.0~1.9 Ga;王国灿



1-第四系; 2-奥陶-志留系纳赤台群; 3-古元古代金水口群白沙河组; 4-早古生代灰白色片麻状斜长花岗岩; 5-晚古生代-早中生代灰白色中粗粒花岗岩闪长岩、闪长岩; 6-晚古生代-早中生代灰白色-肉红色花岗岩、钾质花岗岩; 7-早中生代肉红色花岗岩、钾质花岗岩; 8-地质界线; 9-断层; 10-矿床(点)

图1 沟里地区区域地质略图(修改自青海省地质局,1973;李碧乐等,2012)

Fig.1 Regional geological map of the Gouli area(modified after Qinghai Geological Bureau,1973; and Li Bile et al.,2012)

等 2007) ,由大理岩、片麻岩、混合岩和角闪岩等变质岩组成 ,其原岩为灰岩、海相砂泥质碎屑岩和中基性火山岩等; 中元古代万保沟群 ,由一套浅变质碎屑岩、火山岩及碳酸盐岩等组成; 奥陶-志留系纳赤台群 ,自下而上为绿泥石英千枚岩、千糜岩、角闪片岩、硅质岩、绢云石英千糜岩、绢云母绿泥石千枚岩等变质火山沉积岩; 第四系残坡积沉积物广泛分布。沟里地区夹持于昆北断裂和昆南断裂之间 ,昆中大断裂从区内穿过 ,受近东西向三大主体构造控制 ,东西向和北东向次级构造较为发育。区内岩浆活动强烈 ,以早古生代和晚古生代-早中生代为主 ,岩石类型以花岗闪长岩、闪长岩、二长花岗岩及碱长花岗岩等中-酸性岩浆岩为主 ,伴有少量基性-超基性脉岩。已有研究表明 ,中-酸性岩浆岩主要形成于 244~228 Ma(李碧乐等 2012; 岳维好 2013) ,基性岩主要形成于 416 Ma(岳维好等 2013)。

2 岩石学和岩相学特征

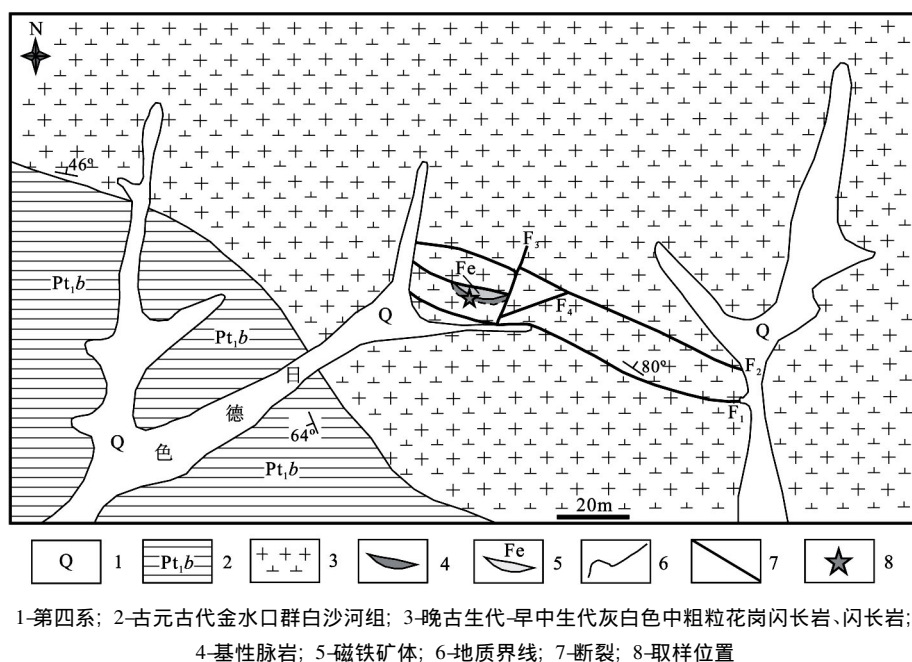
本次研究所用样品采自青海省都兰县沟里乡色德日磁铁矿区 ,坐标为 E98°20'13.2" ,N35°48'39.7" ,海拔 3805 m (图 2)。岩脉与阿斯哈花岗闪长岩呈包裹关系 ,与磁铁矿体呈层状接触。岩脉呈北西-南东走向 ,产状平缓(倾角多在 15°左右) ,宽 3~5 m ,长 20~30 m ,延伸 30 m ,其西端呈舌状 ,东端发育一组近南北向的张性断裂构造(图 2)。

岩体蚀变强烈 ,主要有透闪石-阳起石化、绿泥

石-绿帘石化和碳酸盐化 ,并可见大片的云母集合体(图 3d) ,岩石呈深灰色-灰绿色 ,具块状构造和辉绿结构。岩石主要矿物为斜长石(45%~55%)、辉石(22%~28%)、碳酸盐矿物(8%~10%)和绿泥石(10%~12%) ,其中斜长石呈自形或半自形板状 ,蚀变较强 ,粒径在斑晶中约为 0.2~4 mm ,基质中为 0.1~0.4 mm ,用垂直 a 轴切面消光角法测得为拉长石(An_{62-68}) ; 辉石呈他形粒状 ,蚀变强 ,粒径 0.1~0.4 mm ; 绿泥石为蚀变矿物 ,他形。副矿物主要为磁铁矿、磷灰石、榍石、锆石和铁钛矿物等。

3 分析方法

本次共采集样品 6 件 ,1 件用于锆石分选 ,其余 5 件用于岩石地球化学测试。锆石分选由河北廊坊诚信地质服务有限公司完成 ,锆石阴极发光(CL)、透反射光观察及 U-Th-Pb 同位素比值测试 ,均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行 ,其中测年采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)。该仪器配备有 193 nm ArF-excimer 激光器的 Geolas 200 M (Microlas Gottingen Germany) ,激光剥蚀孔径 30 μm ,剥蚀深度 20~40 μm ,激光脉冲为 10 Hz ,能量为 32~36 mJ。采用国际锆石标样 91500 作为外标校正。分析方法及流程参阅相关参考文献(袁洪林等 ,2003) ,样品的同位素比值和元素含量计算采用 ICPMSDATA CAL 程序(Liu *et al.* 2008)。全岩主量和微量元素分析 ,在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重



1-第四系; 2-古元古代金水口群白沙河组; 3-晚古生代-早中生代灰白色中粗粒花岗闪长岩、闪长岩;
4-基性脉岩; 5-磁铁矿体; 6-地质界线; 7-断裂; 8-取样位置

图 2 色德日磁铁矿区地质略图(修改自青海省有色地勘局八队, 2013)

Fig.2 Geological map of the Sederi iron deposit(modified after No. 8 Geological Team ,Qinghai Nonferrous Geological Bureau ,2013)

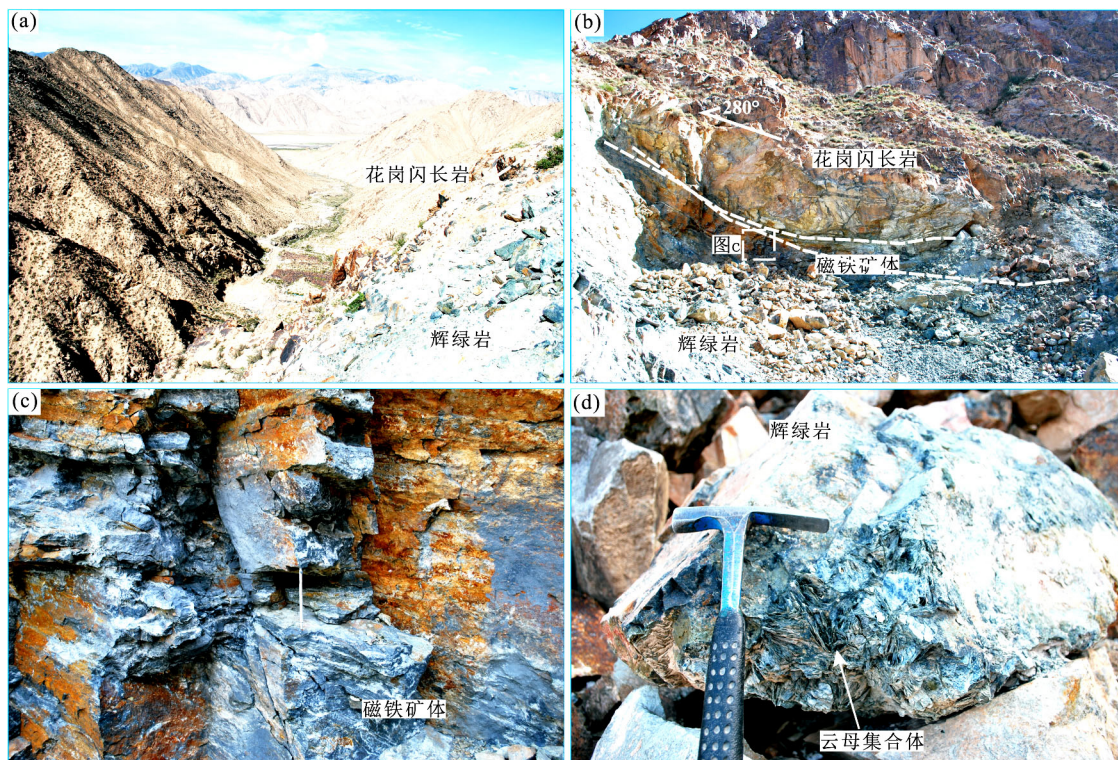


图3 色德日辉绿岩野外照片
Fig.3 Field photographs of the Sederi diabase

点实验室完成,分别采用 XRF 和 ICP-MS 方法分析,主量元素分析精度优于 10%,稀土元素分析精度优于 5%,其中 ICP-MS 分析方法及测试流程见相关参考文献(Qi *et al.*, 2000)。

4 测试结果

4.1 主量元素

由 5 件样品的全岩地球化学分析结果(表 1)可见,其 SiO₂ 含量为 45.70% ~ 46.70%,均值为 46.35%,与基性岩相当; Al₂O₃ 含量为 11.20% ~ 14.55%,均值为 12.34%,略低于太平洋洋中脊拉斑玄武岩(14.86%, Melon *et al.*, 1976),明显不同于岛弧拉斑玄武岩(16%, Jakeš and White, 1972)、大西洋及印度洋洋中脊拉斑玄武岩(15.6% 和 15.15%; Melon *et al.*, 1976) 和大陆溢流玄武岩(17.08%, Wilson, 1989); TiO₂ 含量为 1.01% ~ 2.09%,均值为 1.78%,接近东太平洋洋隆(1.77%, Melon *et al.*, 1976),略高于岛弧钙碱性玄武岩(0.98%, Pearce, 1982),低于洋岛拉斑玄武岩(2.63%, Wilson, 1989)、板内拉斑玄武岩和板内碱性玄武岩(2.23% 和 2.9%, Pearce, 1982); Na₂O + K₂O 为 0.73% ~ 1.19%, Na₂O/K₂O 值为 1.41 ~ 3.29,钠较钾富; CaO 含量(19.64% ~ 21.50%) 较高,与碳酸盐化、云母化等蚀变特征相吻合。综上可见,色德日辉绿岩的主

量元素特征与岛弧亚碱性玄武岩相似,明显有别于板内玄武岩。

在 NaO+K₂O-SiO₂(TAS) 图解(图 4a) 中,本区样品投点全部落入亚碱性系列玄武岩范围。考虑到 Na 和 K 活动元素易受蚀变作用的影响,而本次研究的样品蚀变较强烈,进一步采用 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解(图 4b) 进行判别,1 件落入安山岩、玄武岩与亚碱性玄武岩分界线附近外,其余样品均落入亚碱性玄武岩区域。因此,色德日辉绿岩应属于亚碱性玄武岩系列。

4.2 稀土和微量元素

由表 1 可见,色德日辉绿岩的 ΣREE 为 64.53 × 10⁻⁶ ~ 182.99 × 10⁻⁶,均值为 121.65 × 10⁻⁶,其中 LREE 为 49.52 × 10⁻⁶ ~ 153.11 × 10⁻⁶,均值为 97.51 × 10⁻⁶, HREE 为 15.01 × 10⁻⁶ ~ 29.88 × 10⁻⁶,均值为 24.14 × 10⁻⁶,具有明显的轻稀土富集特征。ΣLREE/ΣHREE 值为 3.05 ~ 5.12, La_N/Yb_N 值为 2.17 ~ 5.44,显示轻、重稀土分异不显著。δEu 为 0.80 ~ 0.96,呈弱负异常, δCe 为 0.84 ~ 0.92,亦呈弱 Ce 负异常。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 5b) 上,显示 Ta、Nb、Ti 等高场强元素相对亏损,而大离子亲石元素(Rb、Th、U)、LREE 和不相容元素(Th、U) 相对富集。该特征与岛弧玄武岩特征相似(张本仁和傅家谟, 2005; 刘立文等, 2012), 与大洋中脊玄武岩

表 1 色德日辉绿岩主量元素、稀土元素及微量元素分析结果

Table 1 Major, rare earth and trace element contents of the Sederi diabase

样号	SDR1	SDR2	SDR3	SDR4	SDR5	样号	SDR1	SDR2	SDR3	SDR4	SDR5
岩性	蚀变辉绿岩					岩性	蚀变辉绿岩				
SiO ₂	46.40	45.70	46.70	46.31	46.63	Cr	197.0	58.1	75.6	110.0	70.6
TiO ₂	1.01	2.03	2.09	1.78	2.01	Co	27.3	24.5	18.0	23.3	22.8
Al ₂ O ₃	14.55	11.20	11.85	12.56	11.55	Ni	7.52	36.60	33.60	25.90	35.10
TFeO	9.25	11.40	10.29	10.35	10.89	La	9.51	35.80	12.60	19.40	24.20
MnO	0.15	0.25	0.26	0.22	0.23	Ce	19.8	62.8	28.7	37.1	46.7
MgO	6.37	5.77	5.99	6.04	5.88	Pr	3.00	8.77	4.68	5.52	6.78
CaO	19.64	21.30	21.50	20.92	21.40	Nd	13.0	35.6	22.3	23.7	29.3
Na ₂ O	0.85	0.52	0.56	0.64	0.54	Sm	3.17	8.00	5.90	5.69	6.95
K ₂ O	0.34	0.37	0.17	0.31	0.27	Eu	1.04	2.14	1.78	1.65	1.96
P ₂ O ₅	0.28	0.37	0.23	0.27	0.35	Gd	3.43	8.12	5.89	5.81	7.12
LOI	1.29	1.33	0.59	0.78	0.46	Tb	0.56	1.21	0.97	0.91	1.09
Total	100.13	100.24	100.23	100.18	100.21	Dy	4.22	8.10	7.17	6.54	7.65
Mg [#]	58	51	54	54	52	Ho	0.91	1.69	1.50	1.39	1.61
Rb	35.80	24.10	8.13	22.69	16.28	Er	2.40	4.60	3.98	3.66	4.29
Ba	118.85	20.08	8.51	49.23	14.98	Tm	0.39	0.72	0.65	0.59	0.69
Th	4.15	6.90	6.74	5.95	6.82	Yb	2.69	4.72	4.16	3.86	4.44
U	2.28	4.11	1.89	2.76	3.57	Lu	0.41	0.72	0.61	0.58	0.67
Ta	0.69	1.38	1.04	1.04	1.21	Y	23.4	43.2	35.9	34.3	39.6
Nb	6.17	23.70	17.80	15.89	20.75	ΣREE	64.53	182.99	100.89	116.40	143.45
Sr	226	233	230	220	231	ΣLREE	49.52	153.11	75.96	93.06	115.89
Zr	83.6	150.0	147.0	127.0	148.5	ΣHREE	15.01	29.88	24.93	23.34	27.56
Hf	2.58	3.86	3.94	3.46	3.96	ΣLREE/ΣHREE	3.30	5.12	3.05	3.99	4.21
Ga	19.3	15.7	16.5	17.2	16.1	La _N /Yb _N	2.54	5.44	2.17	3.61	3.91
Sc	21.94	13.92	16.57	17.53	15.25	δEu	0.96	0.80	0.91	0.87	0.84
V	349	196	317	287	258	δCe	0.90	0.84	0.92	0.87	0.88

注: Mg[#] = Mg / (Mg + TFeO) × 100 摩尔数比; TFeO 为全铁含量; 主量元素单位为% 微量元素单位为×10⁻⁶。

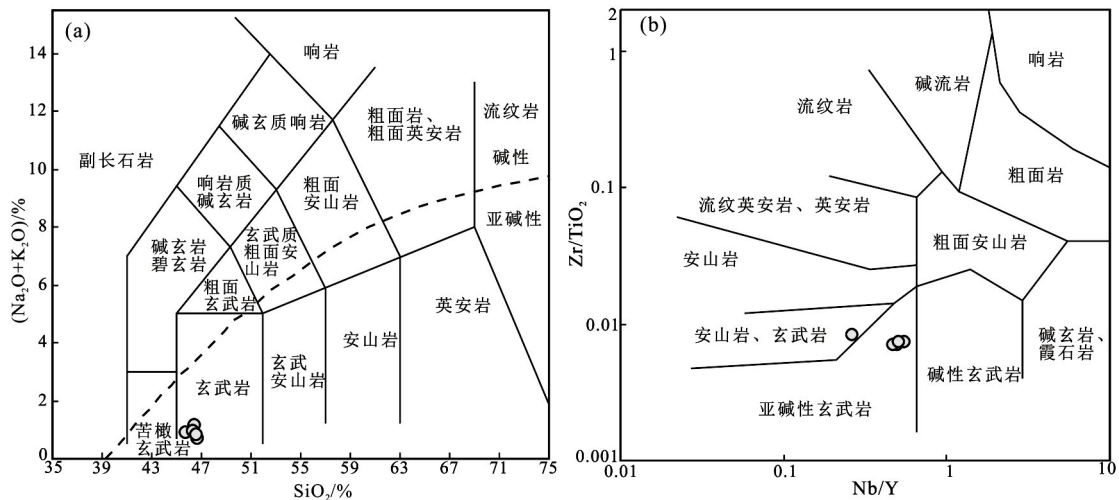


图 4 色德日辉绿岩 TAS 图解 (a-据 Le Maitre *et al.*, 1989) 和 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解 (b-据 Winchester and Floyd, 1977)

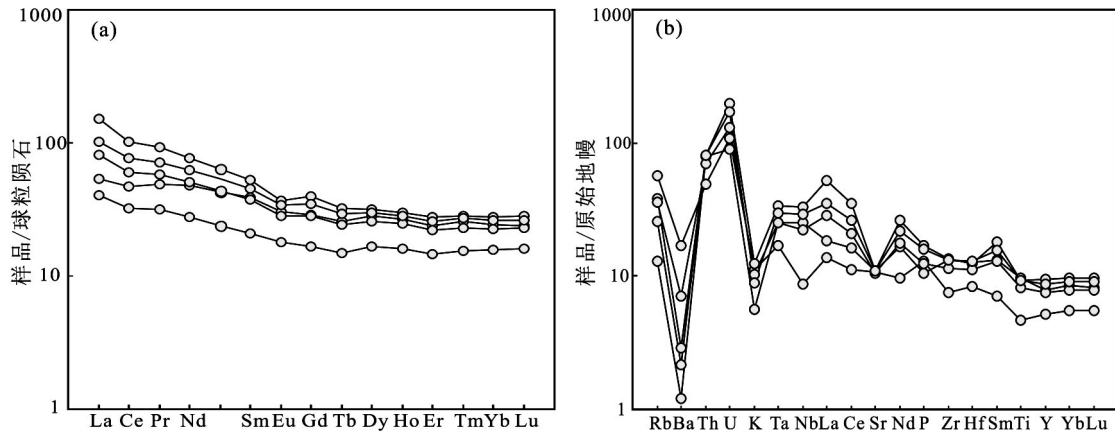
Fig.4 TAS (a-framework cited after Le Maitre *et al.*, 1989) and Zr/TiO₂-Nb/Y (b-framework cited Winchester and Floyd, 1977) diagrams of the Sederi diabase

(MORB) 及洋岛玄武岩 (OIB) 存在明显差别。

4.3 锆石U-Pb年龄

对样品 SDR01 的 18 颗锆石进行了 U-Th-Pb 同

位素分析, 得到 18 个分析点数据 (表 2)。所分析的锆石为无色透明-浅黄色, 多数为长柱状, 部分呈短柱状、颗粒状, 锆石晶形比较完整, 多数颗粒自形程



(a) 球粒陨石标准化值据 Boynton(1984); (b) 原始地幔标准化值据 Sun 和 McDonough(1989)

图5 色德日辉绿岩球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图和原始地幔标准化的微量元素蛛网图

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and PM-normalized trace element spider diagrams of the Sederi diabase

度较高,长度 90~160 μm,宽度 50~85 μm,长宽比为 1.6~2.8,锆石的阴极发光图像均显示完好的内部环带结构(图 6),不发育震荡环带,具有岩浆结晶锆石特征。所分析的锆石中 U 和 Th 含量范围较宽,分别为 $88.83 \times 10^{-6} \sim 450.05 \times 10^{-6}$ 和 $22.87 \times 10^{-6} \sim 119.63 \times 10^{-6}$,除 SDR01/18(Th/U=0.05)外,其余样品的 Th/U 值(0.19~0.55)均大于 0.1,属于比较典型的岩浆成因锆石(Belousova *et al.*, 2002)。

所获得的 18 个数据点有 16 个分布在谐和线上(图 7), ^{207}Pb 校正的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分为两组:① SDR01/18、SDR01/15、SDR01/17 和 SDR01/164 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分别为 $668.57 \pm 12.55 \text{ Ma}$ 、 $793.09 \pm 12.53 \text{ Ma}$ 、 $949.43 \pm 33.2 \text{ Ma}$ 和 $1368.41 \pm 14.01 \text{ Ma}$,明显高于其他测点,结合锆石 CL 图像(图 6),可见这些年龄较老的锆石均具有较高的磨圆度,可能为继承或捕获的中、新元古代地层锆石。②其余 14 个测点的锆石 U-Pb 年龄比较集中,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $410.22 \pm 4.68 \sim 427.01 \pm 5.08 \text{ Ma}$,加权平均年龄为 $417.4 \pm 3.2 \text{ Ma}$ (MSWD=1.4),该年龄与纳赤台群中次火山岩(416 Ma,青海省地质调查院,内部资料)和果洛龙洼金矿基性脉岩($416.2 \pm 3.5 \text{ Ma}$,岳维好等,2013)形成年龄一致,结合锆石 CL 特征(图 6),笔者认为 417 Ma 可代表色德日辉绿岩的形成年龄。

5 讨论

5.1 岩石成因

辉绿岩的 SiO_2 含量低(均值为 46.35%), $\text{Mg}^\#$ 较高(51~58),接近幔源玄武质原生岩浆镁质范围,指示其可能属部分熔融或岩浆分异成因(凌文黎

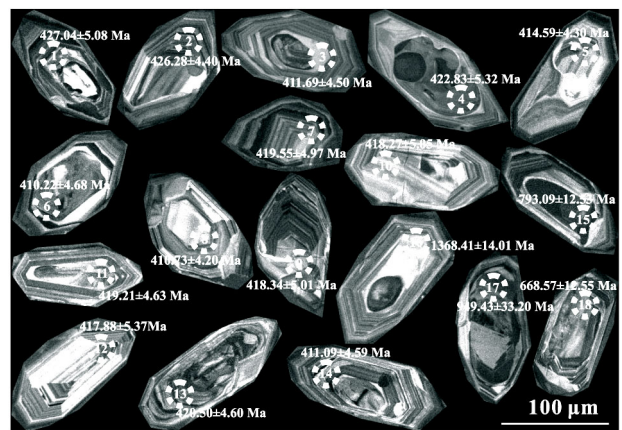


图6 色德日辉绿岩锆石 CL 图像和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig.6 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons from the Sederi diabase

等,2001;董国臣等,2008)。全岩稀土元素配分曲线呈右倾平缓型,轻、重稀土元素分异和 Eu、Ce 异常均不显著,表明成岩过程的分异作用不明显。在 La-La/Sm 图解(图 8)中,全部样品显示良好的线性特征,暗示其为部分熔融的产物,而非分离结晶作用的结果。

辉绿岩富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,指示岩石母岩浆或源区或在侵位过程中可能受到地壳物质的混染(孟繁聪等,2005),而岩石的“TNT”负异常,反映出具有消减带岩浆岩的特征(蔡克大等,2007)。

5.2 成岩构造环境及演化过程

岩石的蚀变作用会导致活泼元素(Ca、K、Rb、Sr、Ba、P)明显变化,而高场强元素(HFSE)、稀土元素(REE)和 Th 在次过程中受到的影响较小,更适合用来判别源区特征与构造环境(Prestvik,1982;

表 2 色德日辉绿岩 LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Sederi diabase

测点号	含量/($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	^{206}Pb	^{232}Th	^{238}U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
SDR01/1	13.82	51.98	182.63	0.28	0.05609	0.00209	0.52992	0.01996	0.06849	0.00084	431.76	13.25	427.04	5.08
SDR01/2	27.24	119.63	358.30	0.33	0.05257	0.00159	0.49826	0.01585	0.06836	0.00073	410.52	10.74	426.28	4.40
SDR01/3	13.42	47.88	181.94	0.26	0.05476	0.00233	0.49785	0.02131	0.06595	0.00074	410.24	14.45	411.69	4.50
SDR01/4	14.36	54.73	190.28	0.29	0.05203	0.00214	0.48319	0.01882	0.06779	0.00088	400.26	12.88	422.83	5.32
SDR01/5	27.25	91.28	366.02	0.25	0.05494	0.00173	0.50345	0.01577	0.06643	0.00071	414.03	10.65	414.59	4.30
SDR01/6	15.85	62.78	213.08	0.29	0.05335	0.00189	0.48239	0.01723	0.06570	0.00077	399.71	11.80	410.22	4.68
SDR01/7	7.98	25.04	106.04	0.24	0.05735	0.00267	0.52932	0.02424	0.06725	0.00082	431.36	16.10	419.55	4.97
SDR01/8	30.99	79.68	424.57	0.19	0.05511	0.00167	0.49953	0.01515	0.06579	0.00069	411.39	10.26	410.73	4.20
SDR01/9	20.79	62.65	283.11	0.22	0.05543	0.00196	0.51123	0.01811	0.06705	0.00083	419.27	12.17	418.34	5.01
SDR01/10	17.85	56.53	241.38	0.23	0.05362	0.00202	0.49259	0.01843	0.06704	0.00084	406.67	12.54	418.27	5.05
SDR01/11	13.36	42.91	178.59	0.24	0.05550	0.00216	0.51505	0.01994	0.06719	0.00077	421.84	13.37	419.21	4.63
SDR01/12	10.22	27.68	139.04	0.20	0.05315	0.00237	0.48808	0.02207	0.06697	0.00089	403.60	15.06	417.88	5.37
SDR01/13	23.12	81.68	303.76	0.27	0.05557	0.00177	0.51737	0.01665	0.06740	0.00076	423.39	11.14	420.50	4.60
SDR01/14	25.11	108.22	334.68	0.32	0.05428	0.00197	0.49322	0.01756	0.06585	0.00076	407.10	11.94	411.09	4.59
SDR01/15	34.55	59.44	224.11	0.27	0.07981	0.00238	1.45732	0.05219	0.13092	0.00220	912.90	21.57	793.09	12.53
SDR01/16	25.99	48.70	88.83	0.55	0.08962	0.00288	2.93071	0.09403	0.23649	0.00269	1389.88	24.29	1368.41	14.01
SDR01/17	34.98	68.33	201.68	0.34	0.07944	0.00226	1.80253	0.08818	0.15868	0.00597	1046.37	31.96	949.43	33.20
SDR01/18	53.30	22.87	450.05	0.05	0.06431	0.00158	0.98216	0.03219	0.10928	0.00216	694.71	16.49	668.57	12.55

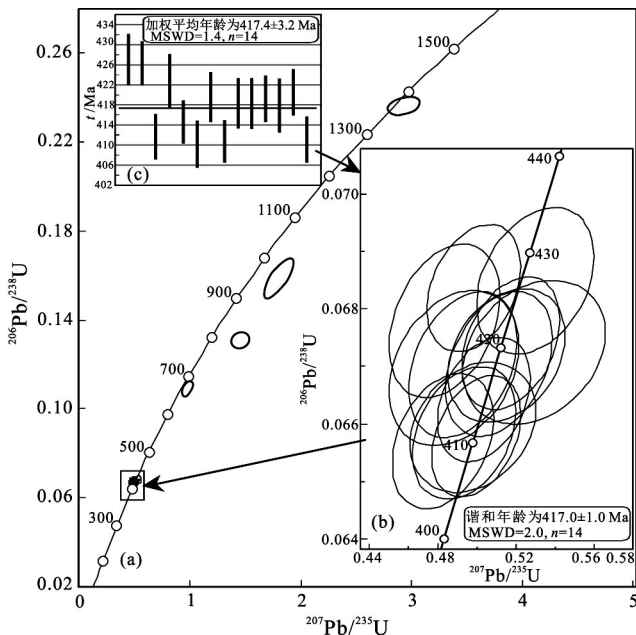


图 7 色德日辉绿岩 LA-ICP-MS 锆石U-Pb谐和图
Fig.7 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of the Sederi diabase

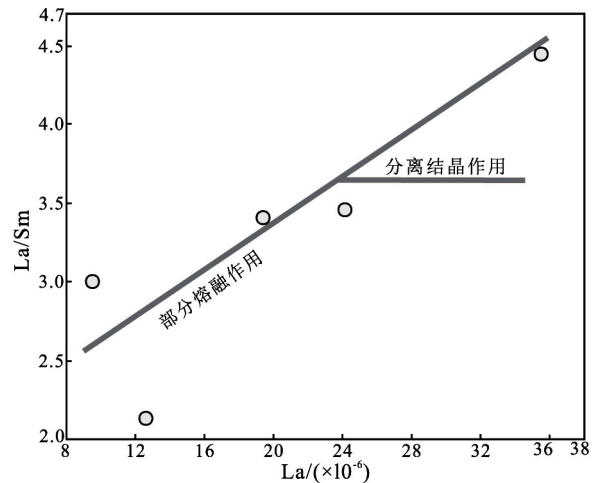


图 8 色德日辉绿岩 La-Lu/Sm 图解
Fig.8 La-Lu/Sm diagram for the Sederi diabase

Myers and Bretkopf, 1989)。在 Hf/3-Th-Ta 图解(图 9a; Wood, 1979)中,样品均落在了岛弧玄武岩区域,而在 Ta/Yb-Th/Yb 图解(图 9b) (Pearce, 1982)中,样品则落入活动大陆边缘弧玄武岩范围,这表明成岩过程可能受到地壳物质的混染。因此,本文认为色德日辉绿岩形成于与俯冲消减作用有关的

活动大陆边缘环境,类似于岛弧环境。色德日辉绿岩的形成年龄(417.4 ± 3.2 Ma),显示其属于原特提斯洋俯冲消减作用形成的岛弧型岩浆岩。

已有研究显示,东昆仑地区阿尼玛卿辉长岩(555 Ma,李王晔等,2007)、清水泉蛇绿岩(522 ~ 518 Ma, Yang et al., 1996; 陆松年, 2002)、布青山蛇绿岩(516 Ma, 刘战庆等, 2011a)、可可沙镁铁-超镁铁质岩组合(509 Ma, 张亚峰等, 2010)代表了早古生代洋盆残余,而上述地发育的岛弧型中-酸性侵入岩(493 ~ 427 Ma, 冯建赞等, 2010; 刘战庆等, 2011b),表明晚寒武世后洋壳开始向北俯冲。都兰

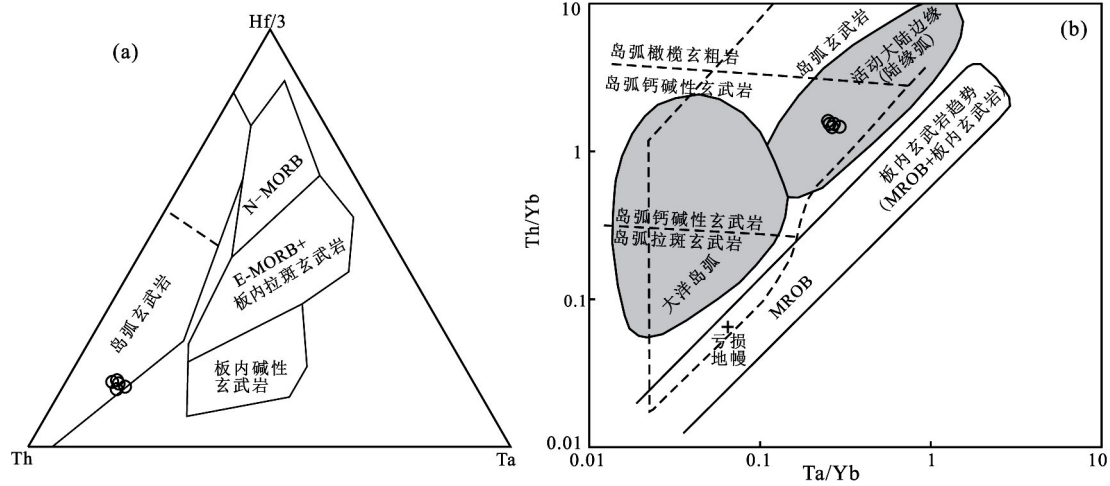


图9 色德日辉绿岩构造环境判别图解

Fig.9 Tectonic setting identification diagram of the Sederi diabase

县香日德南部侵入于古元古界苦海岩群的闪长岩体(446.5 Ma, 陈能松等, 2000)和清水泉辉绿岩(436.4 Ma, 任军虎等, 2009), 则表明了东昆仑地区早志留世俯冲消减作用已经开始, 而本次研究表明至晚志留世(417 Ma), 东昆仑地区的俯冲消减作用仍在继续。此外, 早泥盆世大量出现高温过铝质-强过铝质花岗岩(多数锆石饱和温度大于800℃)、富镁闪长岩($Mg^{\#}$ 均大于45)和少量富集HFSE(如Nb、Ta和Ti)辉长岩(赵振明等, 2008; 刘彬等, 2012), 则指示东昆仑地区早泥盆世进入了碰撞阶段。因此, 本文获得的色德日辉绿岩锆石U-Pb年龄(417.4±3.2 Ma)将东昆仑地区早古生代造山作用的俯冲碰撞阶段约束至晚志留世。

6 结论

(1) 色德日辉绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb年龄为417.4±3.2 Ma, 形成于晚志留世, 是早古生代岩浆活动的产物。

(2) 色德日辉绿岩属于亚碱性玄武岩系列, 为轻稀土富集型, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有岛弧岩浆岩特征, 且在成岩过程中受到地壳物质的混染。

(3) 色德日辉绿岩为俯冲板片的消减作用引发地幔物质发生部分熔融的产物, 与晚志留世东昆仑地区古特提斯洋壳俯冲消减作用有关。

致谢: 成文过程与中国科学院地球化学研究所黄智龙研究员进行了探讨, 在此致谢!

参考文献 (References):

Belousova E A, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous

zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P ed. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63-114

Jakeš P, White A J R. 1972. Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas. *Geological Society of America Bulletin*, 83(1): 29-40

Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre J, Le Bas M J, Sabine P A, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Wooley A R, Zanettin B. 1989. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Oxford: Blackwell

Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. *In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard*. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43

Meloni W G, Vallier T L, Wright T L, Byerly G, Nelen J. 1976. Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic, and Indian Ocean Sea-Floor Spreading Centers. In: Sutton G H, Manghnani M H, Moberly R, McAfee E U eds. *The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and its Margin*. Washington, DC: American Geophysical Union, 351-367

Myers R E, Breitkopf J H. 1989. Basalt geochemistry and tectonic settings: A new approach to relate tectonic and magmatic processes. *Lithos*, 23(1-2): 53-62

Pearce J A. 1982. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth C J, Norry M J eds. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich, Cheshire: Shiva Publications, 158-185

Prestvik T. 1982. Basic volcanic rocks and tectonic setting. A discussion of the Zr-Ti-Y discrimination diagram and its suitability for classification purposes. *Lithos*, 15(3): 241-247

Qi L, Jing H, Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507-513

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of o-

- ceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J eds. *Magmatism in Oceanic Basins*. London: Geological Society, Special Publications, 313-345
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis*. London: Unwin Hyman, 1-466
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343
- Wood D A. 1979. A variably veined suboceanic upper mantle-genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence. *Geology*, 7(10): 499-503
- Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, Xu Z Q. 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 258(1-4): 215-231
- 蔡克大, 袁超, 孙敏, 肖文交, 陈汉林, 龙晓平, 赵永久, 李继亮. 2007. 阿尔泰塔尔浪地区斜长角闪岩和辉长岩的形成时代、地球化学特征和构造意义. *岩石学报*, 23(5): 877-888
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 张雪亭, 王瑾, 王秉璋. 2006. 东昆仑喀拉克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 25-32
- 陈能松, 孙敏, 张克信, 朱云海. 2000. 东昆仑变闪长岩体的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和 U-Pb 年龄: 角闪石过剩 Ar 和东昆仑早古生代岩浆岩带证据. *科学通报*, 45(21): 2337-2342
- 崔军文, 朱红, 武长得. 1992. 青藏高原岩石圈变形及其动力学. 北京: 地质出版社, 1-164
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 宋云涛, 王磊. 2008. 西藏冈底斯南带辉长岩及其所反映的壳幔作用信息. *岩石学报*, 24(2): 203-210
- 冯建赞, 裴先治, 于书伦, 丁仁平, 李瑞保, 孙雨, 张亚峰, 李佐臣, 陈有炘, 张晓飞, 陈国超. 2010. 东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. *中国地质*, 37(1): 28-38
- 胡荣国, 赖健清, 张绍宁, 窦洪伟, 施根红, 杨宝荣. 2010. 青海省都兰县果洛龙洼金矿床地质地球化学特征. *地质与勘探*, 46(5): 931-941
- 贾福聚, 高建国, 周家喜, 岳维好, 刘心开. 2013. 青海果洛龙洼金矿床地球化学垂向分带研究. *地质与勘探*, 49(5): 907-913
- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵. 1992. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社, 1-224
- 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 2000. 中央造山带开合构造. 北京: 地质出版社, 1-154
- 李碧乐, 孙丰月, 于晓飞, 钱烨, 王冠, 杨延乾. 2012. 东昆中隆起带东段闪长岩 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究. *岩石学报*, 28(4): 1163-1172
- 李王晔, 李曙光, 郭安林, 孙延贵, 张国伟. 2007. 青海东昆南构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及痕量元素地球化学对“祁-柴-昆”晚新元古代-早奥陶世多岛洋南界的制约. *中国科学(D辑)*, 37(S1): 288-294
- 凌文黎, 王歆华, 程建萍. 2001. 扬子北缘晋宁期望江山基性岩体的地球化学特征及其构造背景. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 218-221
- 刘彬, 马昌前, 张金阳, 熊富浩, 黄坚, 蒋红安. 2012. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示. *岩石学报*, 28(6): 1785-1807
- 刘立文, 李建峰, 夏斌, 邱亮斌, 黄强太. 2012. 西藏那木如辉绿岩岩脉的年代学和地球化学特征. *矿物岩石地球化学通报*, 31(2): 114-120
- 刘心开, 高建国, 周家喜. 2013. 青海东昆仑果洛龙洼金矿床东区 I 矿体群稀土元素地球化学. *地球化学*, 42(2): 131-142
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 张晓飞, 刘智刚, 陈国超, 陈有炘, 丁仁平, 郭俊锋. 2011a. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义. *地质学报*, 85(2): 185-194
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 陈国超, 陈有炘, 高景民, 刘成军, 魏方辉, 王学良, 张刚. 2011b. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据. *中国地质*, 38(5): 1150-1167
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社, 1-130
- 孟繁聪, 薛怀民, 李天福, 杨怀仁, 刘福来. 2005. 苏鲁造山带晚中生代地幔的富集特征来自辉长岩的地球化学证据. *岩石学报*, 21(6): 1583-1592
- 青海省地质局. 1973. 1:20 万加鲁河幅区域地质调查报告
- 青海省有色地勘局八队. 2013. 青海省都兰县色德日铁矿普查报告
- 任军虎, 柳益群, 冯乔, 韩文中, 高辉, 周鼎武. 2009. 东昆仑清水泉辉绿岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年. *岩石学报*, 25(5): 1135-1145
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴, 张克信, 李德威, 朱云海, 向树元. 2007. 关于东昆仑地区前寒武纪地质的几点认识. *地质通报*, 26(8): 929-937
- 文雪峰, 王怀超. 2006. 青海省都兰县果洛龙洼金矿床地质特征及成因探讨. *黄金科学技术*, 14(5): 27-29
- 肖晔, 丰成友, 李大新, 刘建楠. 2014. 青海省果洛龙洼金矿区年代学研究及流体包裹体特征. *地质学报*, 88(5): 895-902
- 杨宝荣, 杨小斌. 2007. 青海都兰果洛龙洼金矿床地质特征及控矿因素浅析. *黄金科学技术*, 15(1): 26-30
- 殷鸿福, 张克信. 1997. 东昆仑造山带的一些特点. *地球科学-中国地质大学学报*, 22(4): 339-342
- 殷鸿福, 张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点. *地球科学-中国地质大学学报*, 23(5): 438-442
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 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. *科学通报*, 48(14): 1511-1520
- 岳维好, 高建国, 周家喜. 2013. 青海果洛龙洼金矿基性岩脉锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征. *矿物岩石*, 33(3): 93-102
- 岳维好. 2013. 东昆仑东段沟里金矿集区典型矿床地质地球化学及成矿机理研究. 博士学位论文. 昆明: 昆明理工大学
- 张本仁, 傅家谟. 2005. *地球化学进展*. 北京: 化学工业出版社
- 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 李瑞保, 冯建赞, 孙雨, 李佐臣, 陈有炘. 2010. 东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义. *地质通报*, 29(1): 79-85
- 赵振明, 马华东, 王秉璋, 拜永山, 李荣社, 计文化. 2008. 东昆仑早泥盆世碰撞造山的侵入岩证据. *地质评论*, 54(1): 47-56

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 高剑峰)