北祁连山扎麻什地区东沟蛇绿岩LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及其地球化学特征

武 鹏[1],李向民[1],徐学义[1],余吉远[1],孙吉明[1],唐 卓[1],王国强[1,2]
WU Peng[1], LI Xiang-min[1], XU Xue-yi[1], YU Ji-yuan[1],
SUN Ji-ming[1], TANG Zhuo[1], WANG Guo-qiang[1,2]

1. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710054; 2. 长安大学地球科学与资源学院,陕西 西安 710064
1. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*
2. *College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China*

摘要:东沟蛇绿岩位于北祁连造山带中东段的扎麻什一带,主要由辉橄岩、辉长岩和基性火山岩组成较为完整的蛇绿岩单元。对基性火山岩进行单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测定,获得 499.3Ma±6.2Ma 年龄加权平均值,代表蛇绿岩的形成年龄,相当于晚寒武世。岩石地球化学研究表明,该蛇绿岩中的基性火山岩属于拉斑玄武岩系列,球粒陨石标准化稀土元素分配模式为近平坦型,$(La/Yb)_N$ 在 0.97~1.26 之间;微量元素分配模式除个别大离子亲石元素(Ba、Rb、U、K)外基本为平坦型曲线,Nb、Ta、Zr、Hf 无亏损,显示出洋中脊玄武岩(N-MORB)的地球化学特征;在 Zr-Zr/Y 和 Ti/100-Zr-3Y 等构造环境判别图中,所有样品数据点均落入 MORB 区域内,表明其形成于洋中脊环境。经区域对比,该蛇绿岩与玉石沟、川刺沟蛇绿岩等一起构成了大洋扩张脊型蛇绿岩带。

关键词:LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年;东沟蛇绿岩;洋中脊环境;北祁连造山带
中图分类号:P588.14+5; P597+.3; P595 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2012)06-0896-11

Wu P, Li X M, Xu X Y, Yu J Y, Sun J M,Tang Z, Wang G Q. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Donggou ophiolites in Zamashi area of northern Qilian Mountain. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(6):896-906

Abstract: Donggou ophiolite occurs in Zamashi area along the eastern segment of northern Qilian orogenic belt. The ophiolite is mainly composed of pyroxene peridotite, gabbro and mafic volcanic rocks, making up a relatively complete ophiolite unit. Single-grain zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating of mafic volcanic rocks yielded a weighted average age of 499.3±6.2 Ma, which represents the ophiolite formation age, equivalent to Late Cambrian. According to geochemical studies, the ophiolite mafic volcanic rocks are of tholeiitic series, the chondrite-normalized REE patterns are nearly of flat-type; the $(La/Yb)_N$ ratios are between 0.97 and 1.26; the trace element distribution patterns basically show flat curves with the exception of a few large-ion lithophile elements (Ba, Rb, U, K); Nb, Ta, Zr, Hf have not experienced loss, suggesting geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalt (N-MORB); in Zr-Zr/Y and Ti/100-Zr-3Y tectonic discrimination diagrams, all the samples fall into the MORB area formed in mid-ocean ridge. A comparative study of the region shows that the ophiolite and Yushigou as well as Cuancigou ophiolite jointly constitute the spreading ridge-type ocean ophiolite.

Key words:LA-ICP-MS zircon U-Pb dating;Donggou ophiolite;mid-ocean ridge;northern Qilian orogenic belt

北祁连山是中国最早研究蛇绿岩的造山带之一[1-3],带内发育了多条蛇绿岩带[4-6]。其中,产于晚寒武世至早奥陶世的洋脊蛇绿岩主要分布于托莱山北坡的玉石沟、川刺沟一带,向北西至吊大坂,南东段

收稿日期:2011-07-25;**修订日期**:2011-12-13
资助项目:中国地质调查局青藏专项《北祁连成矿带成矿条件研究与找矿靶区优选》(编号:1212010818090)
作者简介:武鹏(1982-),男,工程师,从事岩石学、矿物学、矿床学研究。E-mail:312725578@qq.com

延至天祝县大克岔[7]。

扎麻什东沟蛇绿岩位于青海省祁连县西南21km 处,处于北祁连俯冲杂岩带与中祁连地块隆起带的交会部位。扎麻什东沟蛇绿岩出露在清水沟-百经寺俯冲杂岩的南侧,沿托莱南山的北坡分布,属典型的玉石沟、川刺沟蛇绿岩的东南延伸部分。1:20万祁连幅区调报告①将其归结为上奥陶统“扣门子组”。然而到目前为止,对其形成环境都未取得统一认识。刘传周等[8]认为,扎麻什地区主要以基性杂岩体的形式存在,形成于北祁连向南俯冲的岛弧环境,并属于阿拉斯加型岩体[9];冯益民等[10]将该地区火山岩划归为晚奥陶世的被动陆缘裂谷环境。而在该地区尚未出现有关蛇绿岩的报道。近年来,在扎麻什东沟基性火山岩系中发现存在有工业价值的东沟铜多金属矿床,笔者对该含矿围岩的性质进行了系统的研究,发现扎麻什东沟地区保存了较为完整的蛇绿岩层序。因此,准确测定该蛇绿岩的形成时代与形成环境,对于探讨北祁连洋盆的分布及其构造演化具有重要意义,对于厘定该含矿火山岩系的分布及其成矿特点,指导区域找矿,也具有重要的科学意义。

1　蛇绿岩地质特征

扎麻什东沟地区地层在 1:20 万祁连幅区调报告①中被归为上奥陶统“扣门子组”。笔者通过路线地质调查与实测剖面发现,扎麻什东沟地区保存有较为完整的蛇绿岩单元,地层以上寒武统为主,沿托莱山主脊在祁连县扎麻什东沟一带出露,以构造岩片的形式断续延至冰沟南侧,东西长数十千米(图 1)。其南北两侧均与二叠系、三叠系(P+T)呈断层关系接触;上部被泥盆系(D)角度不整合覆盖;局部被加里东早期中粒花岗岩(γ_3^1)及中期闪长岩(δ_3^2)所侵入。蛇绿岩主要由辉橄岩、蛇纹岩、辉长岩和变质火山岩单元构成,彼此之间呈断层关系接触,构成较为完整的蛇绿岩单元。辉橄岩(图版Ⅰ-A)呈灰黑色,

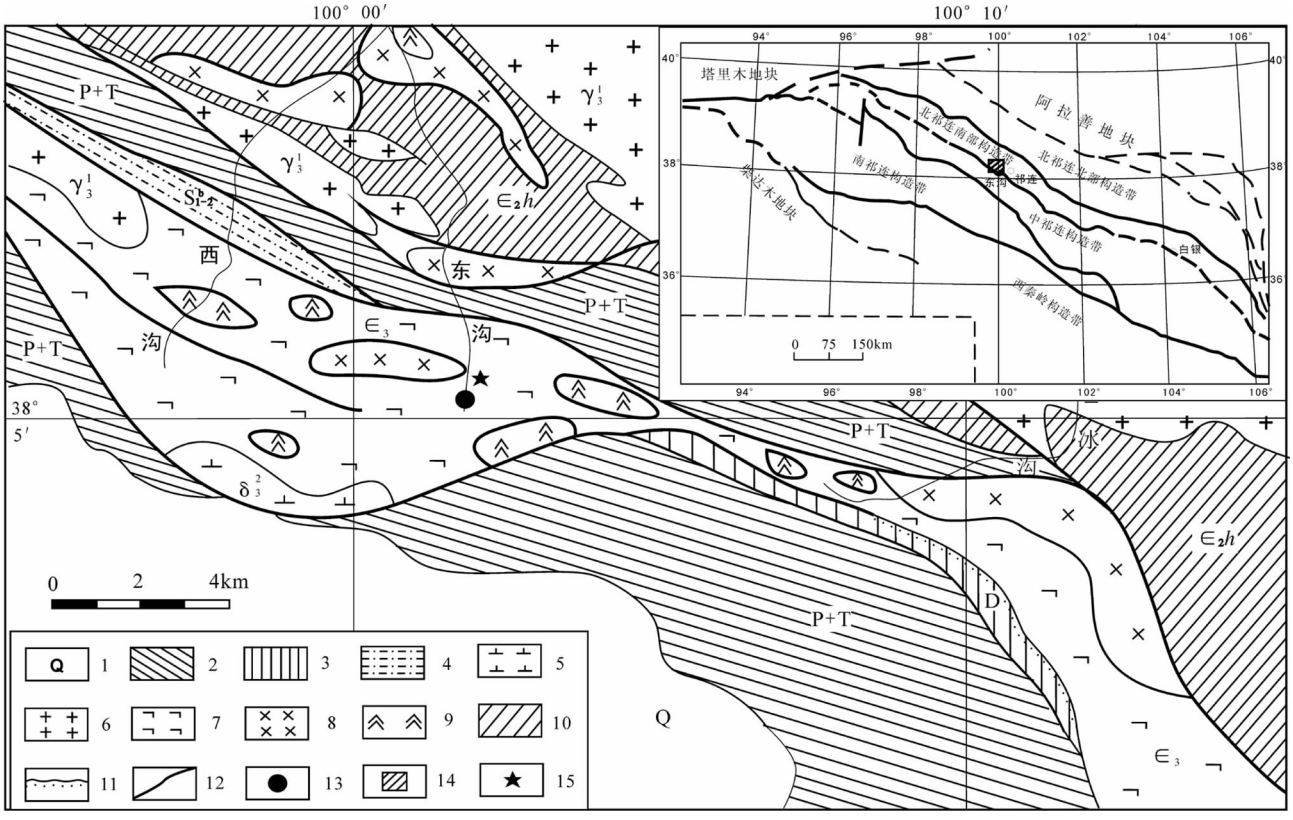


图 1　祁连县扎麻什东沟地区地质简图①

Fig. 1　Geological sketch map of Donggou area, Zamashi, Qilian County

1—第四系(Q);2—二叠系-三叠系(P+T)砂岩;3—泥盆系臭牛沟组(D);4—早中志留世(S_{1+2})碎屑岩组;5—加里东期中期闪长岩(δ_3^2);6—加里东期早期花岗岩(γ_3^1);7—晚寒武世($\in_3$)基性火山岩;8—辉长岩;9—超基性岩;10—中寒武世黑刺沟群($\in_2h$);11—不整合;12—断层;13—矿体;14—研究区范围;15—采样点

鳞片变晶结构,片状构造,岩石强烈蛇纹石化,所见矿物多为具橄榄石假像的蛇纹石和纤状蛇纹石,以及强烈交代的斜方辉石、少量碳酸盐矿物、滑石、菱铁矿及微量磁铁矿,有少量蚀变而成的绿泥石,云母类矿物主要在裂隙中。辉长岩呈灰绿色,辉长结构,块状构造,矿物成分主要为辉石、斜长石及少量的黄铁矿,有少量辉石已被蚀变为黑云母。变质火山岩主要由细碧岩、凝灰岩及少量的角斑岩组成。细碧岩(图版Ⅰ-B)由于变质作用的结果,原岩的组织结构受到了破坏,在部分地方枕状、杏仁状构造非常发育,杏仁体主要为方解石。本次研究所采集的样品位于扎麻什东沟和西沟 2 条路线剖面上(图 2)。

2 锆石 U-Pb 同位素分析

2.1 样品概述

本次研究采集了青海省祁连县扎麻什东沟蛇绿岩中的基性火山岩样品(08QB-02)。08QB-02 样品为灰色枕状细碧岩,采样位置的坐标为北纬 38°05′、东经 100°00′15.7″,海拔 3983m。样品为枕状、杏仁状构造,细碧质、微晶结构,杏仁体大多被方解石充填,蚀变较强。样品在武警黄金五支队实验室粉碎,送咸阳地质调查院用常规的浮选和磁选法进行锆石分选。在双目镜下挑选出晶型较完好的锆石作为测定对象。将锆石样品置于 DEVCON 环氧树脂中,固结后抛磨至大小约为锆石粒径的 1/2,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相、CL 显微图像(图 3)研究和 LA-ICP-MS 分析。

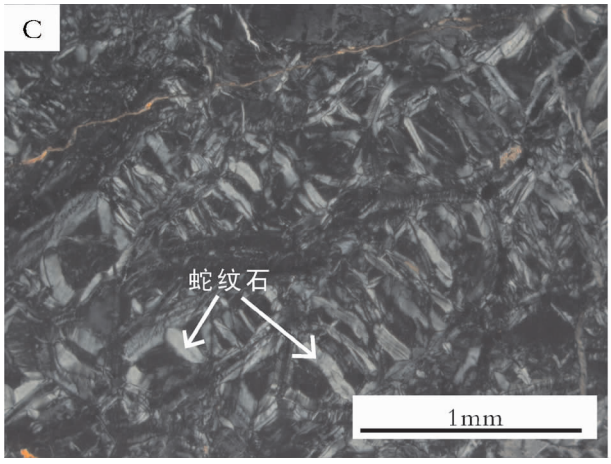
2.2 分析方法

LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用 Agilent7500 型 ICP-MS、德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193nm)和 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统

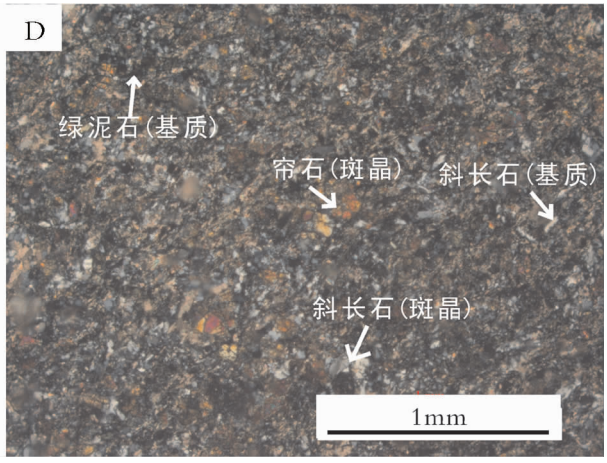
图版Ⅰ Plate Ⅰ

东沟路线剖面蛇纹石化辉石橄榄岩标本

西沟路线剖面绿泥石化细碧岩标本



蛇纹石化辉石橄榄岩显微特征(5×10,+)



绿泥石化细碧岩显微特征(5×10,+)

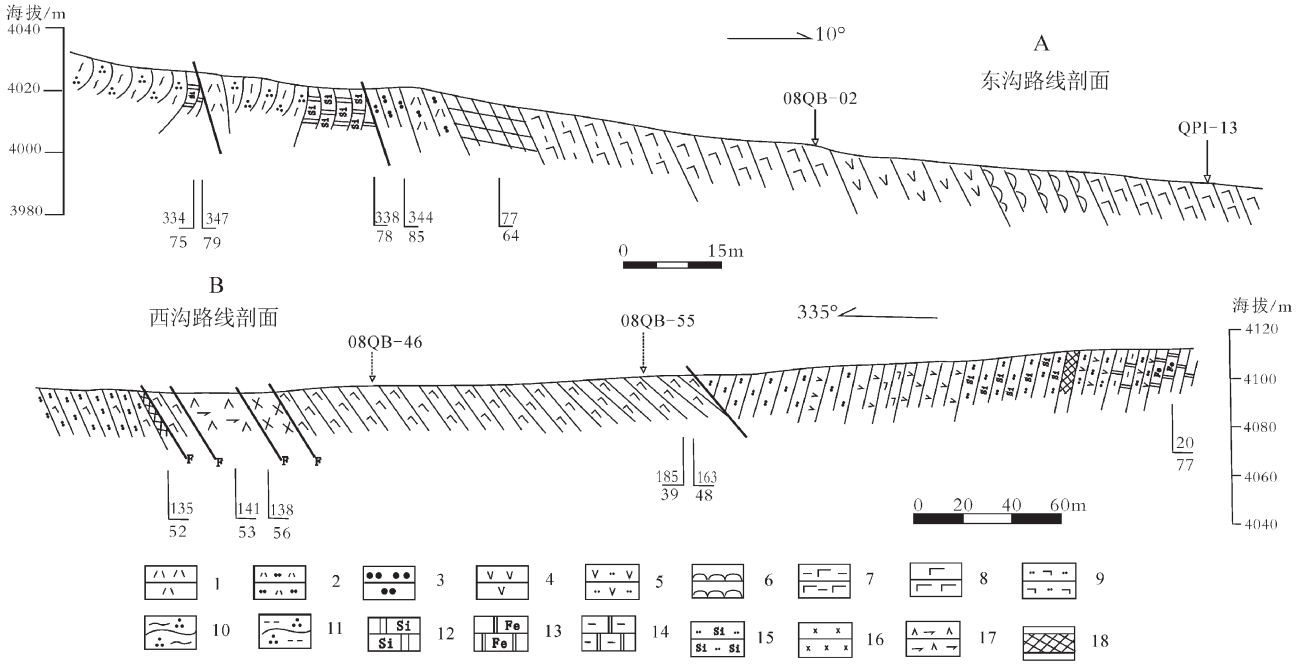


图 2　祁连县扎麻什东沟和西沟路线剖面

Fig. 2　Geological route profile of Donggou and Xigou, Zamashi, Qilian County

1—石英角斑岩;2—石英角斑质凝灰岩;3—凝灰岩;4—细碧质角斑岩;5—角斑质凝灰岩;6—枕状熔岩;7—绿泥石化细碧岩;8—细碧岩;9—细碧质凝灰岩;10—绢云绿泥石英片岩;11—黑云石英片岩;12—硅化大理岩;13—黄铁矿化大理岩;14—绿泥石化大理岩;15—硅化凝灰岩;16—辉长岩;17—辉橄岩;18—矿体;08QB-02—样品编号及采样点

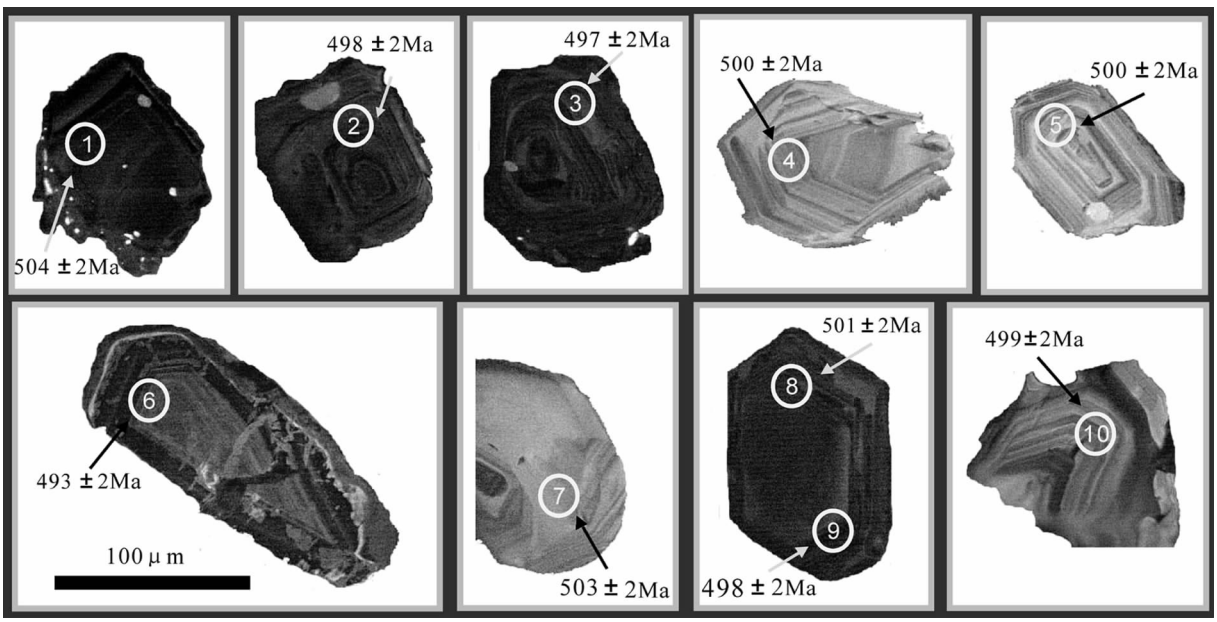


图 3　东沟蛇绿岩中基性火山岩锆石阴极发光图像(CL)

Fig. 3　CL images of zircons in basic volcanic rocks from Donggou ophiolite

圆圈内的数字表示 U-Pb 分析点号(编号与表 1 相同),其它数字表示 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄

联机进行。详细分析步骤和数据处理方法参见文献[11-13]。分析结果见表 1。

2.3 测试结果

此次成功地测定了 9 颗锆石(有效测试点 10 个),其中,4 个测点(3、5、8、9)位于 U-Pb 同位素谐和线上,另外 6 个测点(1、2、4、6、7、10)离开谐和线或位于其附近,主要是铅丢失或测试误差引起的。根据对锆石阴极发光电子图像(CL)的分析,锆石为半透明—透明的自形程度较高的柱状晶体,长宽比在 1:1~3:1 之间,粒径多在(50×80)~(40×150)μm 之间。锆石内部裂纹与包裹体均较少,由于碎样粒度较小,个别锆石形态遭到一定程度的破坏(10 号样品)。所有锆石均发育有典型的岩浆锆石所具有的震荡环带,但少数 CL 图像颜色较暗,可能与后期热液交代作用有关[14]。锆石 Th/U 比值变化于 0.34~1.00 之间(除 16 号点外,Th/U=0.136),平均为0.57,显示出典型岩浆锆石的地球化学特征[15]。它们的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(图 4)变化于 493~504Ma 之间,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为(499.3±6.2)Ma(MSWD=0.099)。该年龄可解释为研究区内基性火山岩的岩浆结晶年龄,表明东沟蛇绿岩形成于晚寒武世。

3 岩石地球化学特征

3.1 样品分析方法

岩石地球化学成分分析样品野外选择相对新鲜的岩石样品,室内通过岩石薄片观察后选择蚀变相对较弱的岩石,将其细碎至 200 目,然后在中国地质调查局西安地质调查中心实验室完成其成分测试工作。除 FeO、LOI 采用标准湿化学法分析外,其它主量元素测定采用 X-荧光光谱仪(型号:Axios4.0kw)方法完成;微量和稀土元素测定用等离子体质谱仪(型号:XseriesⅡ)方法完成。

3.2 主量元素特征

扎麻什东沟蛇绿岩中细碧岩的岩石化学分析结果见表 2。细碧岩的 SiO_2 介于 47.76%~49.94%之间,平均 48.43%,TiO_2 含量高,介于 1.08%~2.52%之间,平均 1.48%,Al_2O_3 的含量较低,介于 12.28%~15.54%之间,平均 14.68%,TFeO 含量较高(9.86%~20.03%,平均 13.85%),

表 1 北祁连山扎麻什地区东沟蛇绿岩的基性火山岩(08QB-02)锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic analytical results of basic volcanic rocks from Donggou ophiolites (08QB-02) in Zamashi area of northern Qilian Mountain

样品分析点	同位素比值								同位素年龄/Ma								元素含量/10^{-6}			Th/U
	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		^{232}Th	^{238}U	^{206}Pb	
	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ				
08QB-0201	0.0616	0.0006	0.6897	0.0033	0.0813	0.0004	0.0270	0.0001	659	5	533	2	504	2	539	2	902.59	1492.22	505.9	0.60
08QB-0202	0.0584	0.0007	0.6463	0.0068	0.0803	0.0004	0.0249	0.0001	545	26	506	4	498	2	496	2	492.56	1055.94	342.5	0.47
08QB-0203	0.0570	0.0005	0.6305	0.0053	0.0802	0.0004	0.0249	0.0001	491	21	496	3	497	2	498	2	746.04	1876.29	616.5	0.40
08QB-0204	0.0598	0.0007	0.6654	0.0048	0.0807	0.0004	0.0261	0.0001	598	8	518	3	500	2	520	3	168.96	241.53	83.2	0.70
08QB-0205	0.0568	0.0006	0.6314	0.0044	0.0806	0.0004	0.0238	0.0001	485	8	497	3	500	2	475	2	449.55	660.98	208.2	0.68
08QB-0206	0.0620	0.0006	0.6789	0.0053	0.0794	0.0004	0.0244	0.0002	675	19	526	3	493	2	488	4	748.58	5484.67	2182.2	0.14
08QB-0207	0.0549	0.0007	0.6135	0.0049	0.0811	0.0004	0.0251	0.0001	407	10	486	3	503	2	501	2	295.4	295.34	101.6	1.00
08QB-0208	0.0569	0.0006	0.6326	0.0029	0.0808	0.0004	0.0239	0.0001	486	5	498	2	501	2	479	2	836.92	2270.59	760.3	0.37
08QB-0209	0.0570	0.0006	0.6299	0.0030	0.0802	0.0004	0.0248	0.0001	491	5	496	2	498	2	495	2	806.46	2365.24	780.7	0.34
08QB-0210	0.0552	0.0006	0.6121	0.0040	0.0805	0.0004	0.0230	0.0001	419	7	485	3	499	2	460	2	305.83	311.24	107.5	0.98

注:LA-ICP-MS U-Pb 同位素含量和年龄测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,使用 Andersen 等的软件进行了普通铅校正

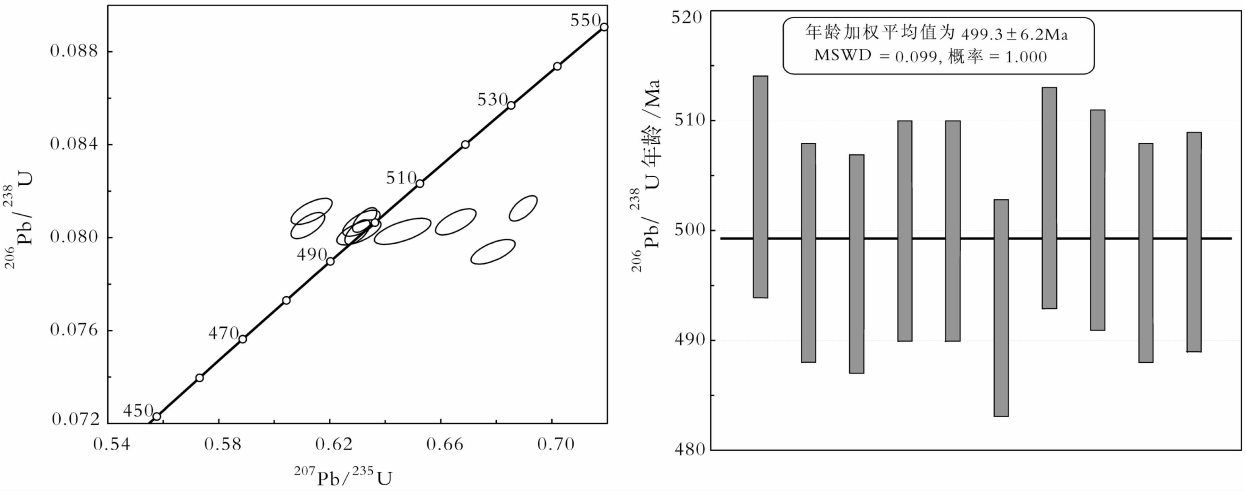


图 4　东沟蛇绿岩基性火山岩锆石 U-Pb 谐和图和年龄加权平均图

Fig. 4　Zircon concordia diagram of basic volcanic rocks in Donggou ophiolites

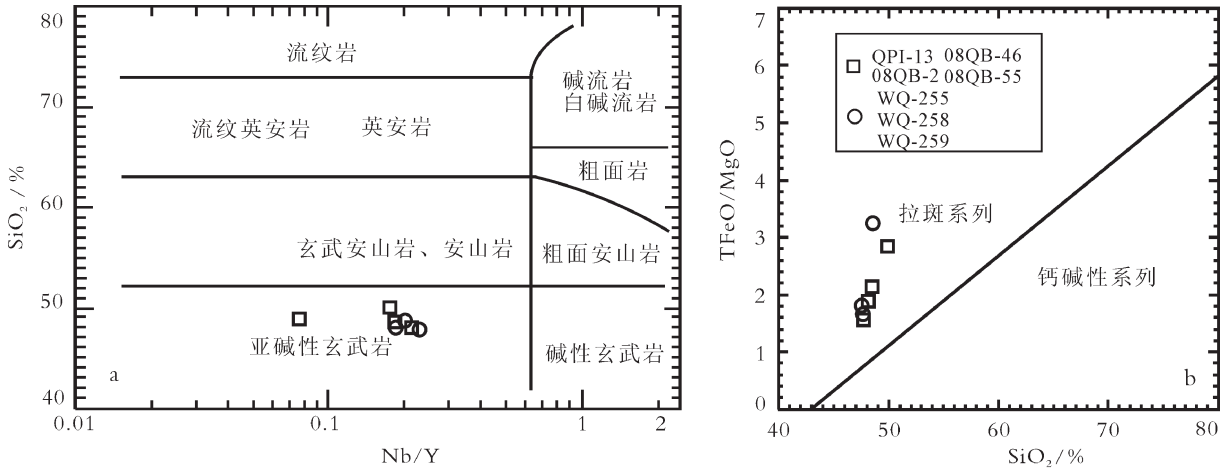


图 5　东沟蛇绿岩的基性火山岩 SiO_2-Nb/Y 和 TFeO/MgO-SiO_2 图解(底图分别据参考文献[16]和[17])

Fig. 5　SiO_2-Nb/Y and TFeO/MgO-SiO_2 diagrams of basic volcanic rocks from Donggou ophiolites

MgO、CaO 含量较低,分别介于 6.20%~7.16%(平均 6.45%)、4.40%~10.49%(平均 7.94%)之间,Na_2O 在 2.20%~4.19%之间, 平均为 3.40%,K_2O 介于 0.04%~2.39%之间,大多数在 0.08%左右,强烈富集 Na_2O、贫 K_2O,Na_2O/K_2O 比值较高(1.75~102.75,大部分大于 30),P_2O_5 介于 0.10%~0.24%之间,平均为 0.15%。相对洋中脊玄武岩的含量,样品富集 TFeO、Na_2O 而相对贫 Al_2O_3、MgO、CaO。$Mg^{\#}$ 较低,为 35.33~52.84,表明岩浆在演化过程中经历了较强的分离结晶作用。在 SiO_2~Nb/Y 和 FeOT/MgO~SiO_2 岩石系列图解(图 5)中所有样品均属拉斑系列玄武岩。

3.3　稀土、微量元素特征

扎麻什东沟蛇绿岩中细碧岩的稀土和微量元素分析结果见表 2。细碧岩的 $\sum REE=48.11\times10^{-6}$~$89.98\times10^{-6}$,大部分在 50.00×10^{-6} 左右,是原始地幔稀土元素总量的 11 倍左右,它们的 $(La/Sm)_N$ 介于 0.82~1.10 之间, 平均为 0.954,$(La/Yb)_N$ 在 0.97~1.26 之间,平均为 1.15,$(Ga/Yb)_N$=0.91~1.31,平均为 1.17,表明细碧岩样品的 HREE、LREE 没有明显的分馏,δEu=0.87~1.12,平均为 0.94,无明显的 Eu 异常, 显示出与 MORB 一致的稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图 6);在稀土元素 N-MORB 和 E-MORB 标准化分配模式图中呈现出轻稀土元素

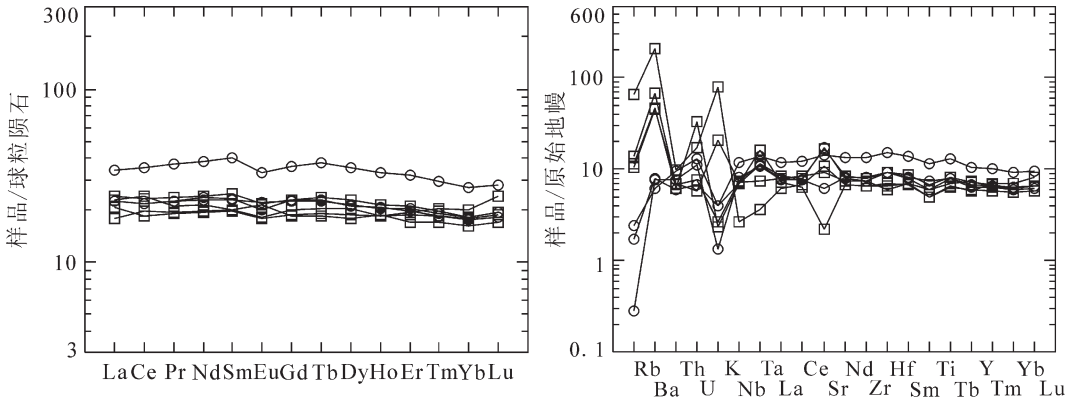


图 6 东沟蛇绿岩的基性火山岩球粒陨石标准化稀土元素分配模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化数据均引自参考文献[19])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagram of basic volcanic rocks in Donggou ophiolites

轻微富集和轻稀土元素亏损的形式,而 Ce/Yb=3.3~4.9,与 N-MORB 的 Ce/Yb 值(>2.0)[18]相一致。

细碧岩的微量元素标准化分配图(图 6)显示:微量元素总量高于原始地幔的含量,大部分接近原始地幔的 10 倍;样品中强不相容大离子亲石元素 Ba、Rb、U 相对富集,但 K 呈现出亏损状态,可能与后期蚀变作用有关,弱不相容元素不分异,Nb、Ta、Zr、Hf 无异常,总体上从强不相容元素到弱不相容元素近平坦型;在 N-MORB 标准化分配模式图中(图略)Ba、Rb、U 呈现出富集的模式,弱不相容元素都在 1 附近,显示出大洋中脊玄武岩(N-MORB)的地球化学特征。

4 构造环境判别

北祁连山海相火山岩系是新元古代至寒武纪在现今华北大陆板块南缘的位置,发生裂谷拉张并进一步裂解、大洋化的基础上,洋盆扩张继而向北俯冲消减、碰撞拼合过程中所形成的大陆边缘沟-弧-盆系火山活动的产物,其中北祁连山在寒武纪末完成了从大陆断陷向洋盆的转化。本文的岩石地球化学特征研究表明,扎麻什东沟蛇绿岩中的基性火山岩(细碧岩)是具有大洋中脊岩浆岩特征的 MORB 系列,细碧岩的球粒陨石标准化分配模式与标准洋中脊玄武岩的分配模式一致,都呈平坦式的分布模式。在玄武岩 Zr-Zr/Y 环境判别图解中(图 7-a),大部分样品的数据点都落入了洋中脊玄武岩或洋中脊与岛弧玄武岩重合的区域中,Nb、Ta、Zr 和 Hf 无负异常,排除了玄武岩形成于岛弧环境的可能性;在 Ti/100-Zr-3Y 图解中样品点也分布在 MORB 区域内(图 7-b),表明其形成于洋中脊环境或弧后扩张脊环境。在 Zr-Y-Nb 和 Hf-Th-Nb 构造环境判别图(图 7-c、d)中除个别点落入富集洋中脊区(E-MORB)外,主要为正常洋中脊玄武岩(N-MORB)。夏林圻等[22]认为,玉石沟、川刺沟、大克岔等蛇绿岩中火山岩包含有洋脊拉斑玄武岩系和洋岛玄武岩系,其中,前者的 $w(K_2O)<0.34\%$, K_2O 含量较低,东沟蛇绿岩中基性火山岩的 $w(K_2O)$大多在 0.08%左右,它们均反映出低钾拉斑玄武岩系的特征,这与世界现代大洋中脊拉斑玄武岩的低钾特点相同。在基性火山岩 REE 配分模式图中,东沟与玉石沟的配分曲线都为近平坦型[4,23],均无明显的 Eu 负异常,接近 N-MORB 曲线。本文将东沟与玉石沟[24]基性火山岩的微量元素经同一球粒陨石标准化(图 6),两者 Rb、K、U、Sr 都呈现出正或负异常,前者 Ba 还有很高的正异常。从冯益民等[4]对玉石沟蛇绿岩中基性火山岩的球粒陨石[24]标准化蛛网图中可以看出,Ba、Rb、Th、K 丰度较高,这与东沟分析结果基本相同,这些元素都是活跃于地壳中的元素,呈现出正或负的异常,与岩石受到明显的蚀变作用有关,其余元素的配分曲线则呈平坦型,其特征与洋中脊型基本一致。通过上述地球化学特征和图解判别,认为扎麻什东沟蛇绿岩与玉石沟蛇绿岩应是相同构造环境下的产物,都形成于洋中脊环境。

5 讨论及地质意义

蛇绿岩是大陆造山带中残存的古代大洋岩石圈残片,记录了古洋盆形成、演化和消亡的地质过程。肖序常等[3]最早对北祁连山蛇绿岩套进行鉴别,确认了北祁连山早古生代洋壳的存在,主要有洋脊蛇绿岩和弧后扩张脊蛇绿岩 2 种类型[5-6,25]。本文将东沟蛇绿岩与玉石沟、塔墩沟蛇绿岩的柱状序列[26]进行了对比(图 8)。玉石沟蛇绿岩与东沟蛇绿岩在组成上具有很大的相似性,席状岩墙杂岩和硅质岩都

表 2　北祁连山扎麻什地区东沟蛇绿岩的基性火山岩主量元素、微量元素、稀土元素含量

Table 2　Major elements, trace elements and REE compositions of basic volcanic rocks from Donggou ophiolites in Zamashi area of northern Qilian Mountain

岩性	东沟细碧岩				玉石沟枕状玄武岩		
样品号	QPI-13	08QB-55	08QB-2	08QB-46	WQ-255	WQ-258	WQ-259
SiO_2	48.70	49.94	48.41	47.87	48.46	47.87	47.76
TiO_2	1.08	1.31	1.45	1.09	2.52	1.31	1.63
Al_2O_3	15.22	14.43	15.33	14.21	13.81	15.25	14.53
Fe_2O_3	9.39	12.14	4.31	4.18	6.78	3.96	5.35
FeO	7.06	9.11	8.21	6.12	8.97	7.76	8.25
TFeO	15.51	20.03	12.12	9.86	15.07	11.32	13.06
MnO	0.15	0.19	0.17	0.12	0.20	0.17	0.14
MgO	7.16	6.99	6.35	6.20	4.62	6.72	7.10
CaO	6.82	8.86	9.98	10.49	5.99	9.06	4.40
Na_2O	4.19	3.48	2.71	2.2	3.79	3.35	4.11
K_2O	2.39	0.62	0.08	0.07	0.12	0.12	0.04
P_2O_5	0.10	0.13	0.14	0.12	0.24	0.13	0.16
LOI	3.91	11.00	3.53	6.73	3.85	3.12	5.66
Total	100.39	99.09	99.59	99.34	100.26	99.59	99.96
Ba	1468.00	315.00	470.00	326.00	42.60	55.00	53.90
Rb	41.00	6.55	8.65	7.36	1.54	1.08	0.18
Sr	230	192	352	47	303	365	131
Y	27.00	33.20	32.25	26.30	46.90	30.40	28.50
Zr	73.5	83.9	88.1	73.5	151.0	83.8	89.7
Nb	1.87	5.15	5.21	4.90	8.33	5.01	5.76
Th	0.83	0.60	0.58	0.53	0.82	0.5	0.64
Pb	12.60	1.03	1.49	1.59	1.97	1.08	1.08
Ga	12.70	16.00	17.51	17.8	21.8	18.3	18.7
Zn	52.90	70.00	70.50	85.62	173.10	82.21	106.24
Cu	84.30	22.80	77.42	39.41	57.41	119.02	37.22
Ni	59.40	60.40	47.53	47.64	24.33	55.84	15.51
Hf	2.05	1.83	2.86	2.18	4.72	2.83	2.87
Cs	2.62	0.44	0.27	0.40	1.01	0.39	0.82
Sc	40.30	41.9	41.5	31.9	43.7	40.5	36.6
Ta	0.15	0.30	0.47	0.67	0.57	0.45	0.44
Co	39	50	54	41	66	51	42
Li	15.40	6.12	6.31	7.16	5.01	6	4.59
Be	0.46	0.48	0.45	0.58	0.53	0.30	0.37
U	0.36	0.12	0.16	0.70	0.27	0.14	0.23
Ti	6473.52	7852.14	8631.36	6353.64	15104.88	7852.14	9770.22
K	19840.11	5146.81	664.10	581.09	996.156	996.16	332.05
La	4.25	5.42	5.73	4.91	8.06	5.37	5.32
Ce	12.00	14.70	14.16	11.23	21.62	13.37	13.43
Pr	1.85	1.99	2.23	1.81	3.49	2.12	2.15
Nd	9.17	9.96	11.27	9.07	17.95	10.69	10.98
Sm	3.08	3.09	3.82	3.01	6.15	3.48	3.58

续表 2

岩性	东沟细碧岩				玉石沟枕状玄武岩		
样品号	QPI-13	08QB-55	08QB-2	08QB-46	WQ-255	WQ-258	WQ-259
Eu	1.25	1.06	1.26	1.03	1.91	1.28	1.16
Gd	3.78	4.15	4.72	3.83	7.38	4.61	4.67
Tb	0.69	0.76	0.89	0.71	1.41	0.84	0.85
Dy	4.57	5.2	5.77	4.77	8.86	5.42	5.37
Ho	1.07	1.04	1.22	1.05	1.86	1.16	1.18
Er	2.81	3.09	3.49	3.19	5.28	3.38	3.29
Tm	0.43	0.47	0.5	0.52	0.75	0.49	0.47
Yb	2.73	3.03	3.07	3.42	4.55	3.1	2.98
Lu	0.43	0.48	0.49	0.61	0.71	0.49	0.46
$Mg^{\#}$	45.13	38.34	48.28	35.33	52.84	51.41	49.21
$(La/Sm)_N$	0.87	1.10	0.94	0.82	1.03	0.97	0.94
$(La/Yb)_N$	1.05	1.21	1.26	1.20	0.97	1.17	1.21
$(Gd/Yb)_N$	1.12	1.11	1.25	1.31	0.91	1.21	1.27
δEu	1.12	0.90	0.91	0.87	0.93	0.98	0.87

注:氧化物单位为%,微量和稀土元素为 10^{-6};东沟数据为本次的,玉石沟数据引自文献[23]

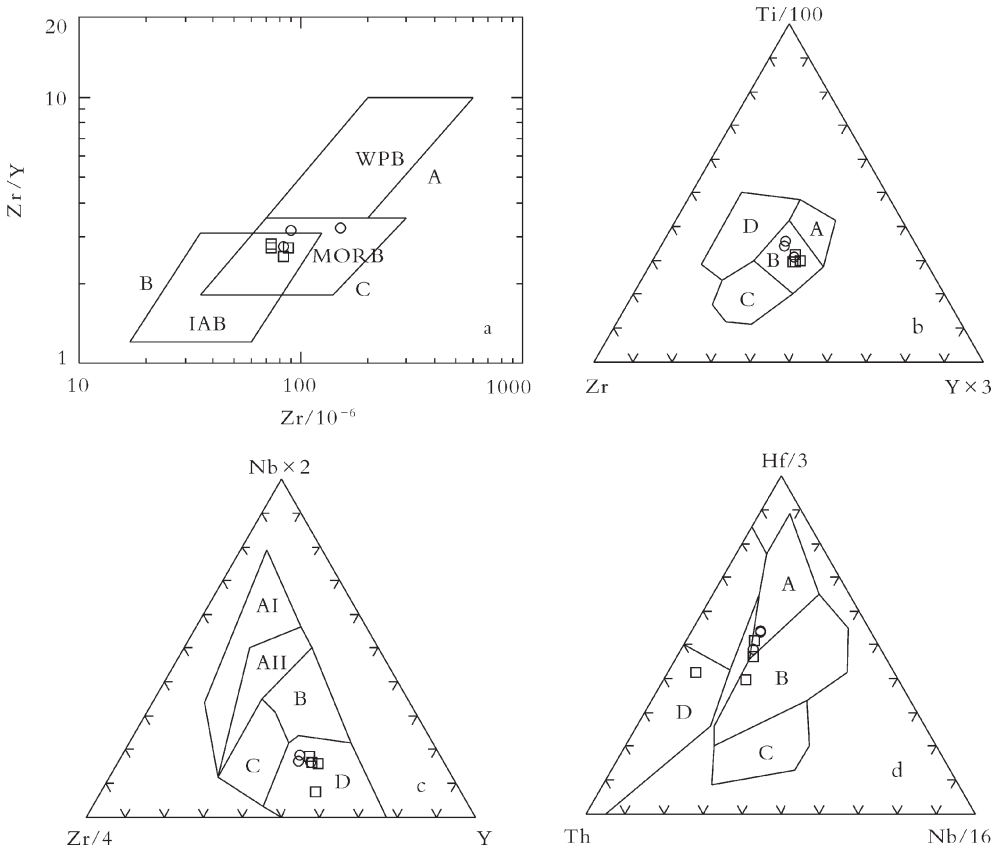


图 7 东沟蛇绿岩的基性火山岩构造环境判别图

Fig. 7 Diagrams for discriminating tectonic settings of basic volcanic rocks in Donggou ophiolites

a 图的底图据参考文献[20]:A—板内玄武岩,B—岛弧玄武岩,C—洋脊玄武岩;b 图的底图据文献[21]:A—岛弧拉斑玄武岩,B— MORB,C—钙碱性玄武岩,D—板内玄武岩;c 图的底图据文献[21]:AⅠ-AⅡ—板内碱性玄武岩,AⅡ-C—板内拉斑玄武岩,B—过度洋中脊玄武岩,D—正常洋中脊玄武岩,C-D—火山弧玄武岩;d 图的底图据文献 Wood(1980):A—正常洋脊玄武岩,B—富集型洋脊玄武岩和板内拉斑玄武岩,C—板内碱性玄武岩,D—火山弧玄武岩

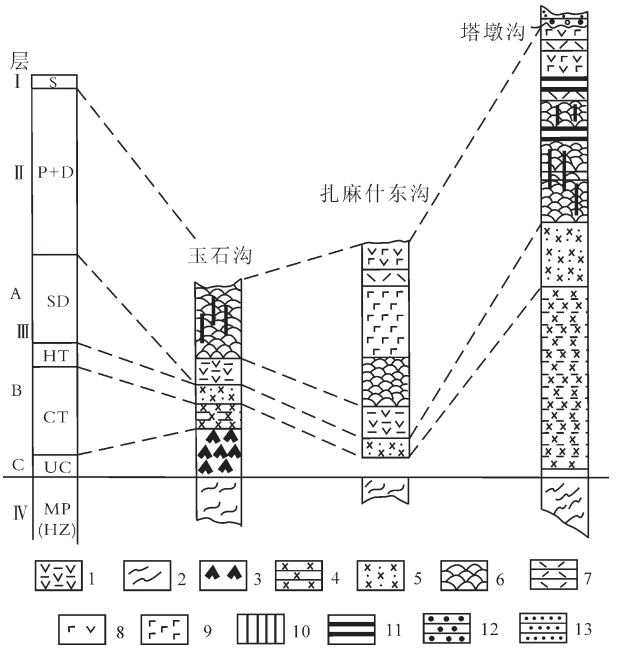


图 8　北祁连山大洋扩张脊与弧后扩张脊蛇绿岩柱状序列对比图

Fig. 8　Sequence correlation of ocean spreading ridge and back-arc ridge of northern Qilian Mountain

1—角斑质火山岩;2—变质橄榄岩(MP(HZ));3—超镁铁质堆晶岩(UC);4—镁铁质堆晶岩(CT);5—均质辉长岩(HT);6—枕状熔岩(P);7—凝灰岩;8—中基性熔岩;9—块状基性熔岩;10—席状岩墙杂岩(SD);11—硅质岩;12—砾岩;13—砂岩

不发育;没有发现二辉橄榄岩,辉橄岩大都被蛇纹石化。塔墩沟蛇绿岩的火山岩系中有较多的火山碎屑岩分布,并发育流体成分较多的中心式爆发的火山岩,普遍以紫红色碧玉岩的伴生为特征,在东沟地区却极少发育碧玉岩;蛇绿岩顶部均广泛分布有巨厚的火山碎屑岩和火山熔岩互层。上述对比表明,东沟蛇绿岩是具有洋脊蛇绿岩特征的岩石组合。

关于扎麻什东沟蛇绿岩的形成时代,前人大多是通过区域对比所得的,缺乏精确的同位素年代学依据。本文对该蛇绿岩单元中的基性火山岩利用 LA-ICP-MS 进行锆石 U-Pb 同位素年龄测定结果约为 499.8Ma,表明东沟蛇绿岩形成于晚寒武世。大家知道,洋脊蛇绿岩带以玉石沟、川刺沟蛇绿岩为典型代表,其中以发育较为完整的岩石组合为特征。对于该洋脊环境蛇绿岩的形成时代的认识主要有:肖序常等[3]根据覆盖在基性熔岩上板岩夹层灰岩中的化石,认为玉石沟蛇绿岩形成于寒武纪;夏林圻等[27]采用 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线法测定,玉石沟和川刺沟的基性火山熔岩的同位素地质年龄分别为 521Ma 和 495Ma,并且在蛇绿岩带发育的火山岩-沉积岩系中含有丰富的早奥陶世三叶虫、笔石和腕足类化石[5];熬油沟蛇绿岩中的辉长辉绿岩墙的 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测定结果为 503.7~507Ma[28-29];北侧清水沟-百经寺俯冲杂岩的年龄为 489~440Ma,清水沟北弧火山岩的年龄为 495~466Ma[30]。结合这些资料可以认为,北祁连山发生大洋化的时限主要集中在寒武纪末—中奥陶世阶段。

岩石地球化学和年代学证据支持扎麻什东沟蛇绿岩形成于晚寒武世的洋中脊环境,与玉石沟、川刺沟蛇绿岩一起构成了大洋扩张脊型蛇绿岩带,在扎麻什东沟蛇绿岩上部的基性火山岩中已发现多处具有工业价值的铜矿床(点),表明成矿与蛇绿岩密切相关,而该早古生代北祁连洋壳俯冲消减的残留岩片以玉石沟、川刺沟蛇绿岩岩片的出露最为完整,这些地质体的存在预示该地区具有找寻东沟型富铜矿的可能性。

6　结　论

(1)扎麻什东沟地区保存了较为完整的蛇绿岩单元,主要由辉橄岩、辉长岩和基性火山岩组成。对其中的基性火山岩(细碧岩)进行地球化学研究,反映出其为具有 N-MORB 特征的拉斑系列玄武岩,形成环境为洋中脊环境。

(2)对蛇绿岩中的基性火山岩通过 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素测年获得锆石 U-Pb 年龄为 499.3Ma±6.2Ma(MSWD=0.099)。因此,认为东沟蛇绿岩的形成时代为晚寒武世。

(3)前人对于东沟铜矿的成因认识分歧较大,不利于找矿工作的开展。本文通过研究认为,东沟铜矿产出于东沟蛇绿岩上部的基性火山岩中,成矿与该蛇绿岩密切相关。

致谢:锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年得到西北大学大陆动力学实验室柳晓明和第五春荣等的支持和帮助,论文编写过程中西安地质调查中心计文化、何时平研究员提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并表示感谢。

参考文献

[1]王荃, 刘雪亚. 我国西部的古海洋地壳及其大地构造意义[J]. 地质科学, 1976, (1):14-24.

[2]黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等.中国大地构造基本轮廓[J]. 地质学报, 1977,(2): 117-135.

[3]肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J]. 地质学报, 1978, 54(1):287-295.

[4]冯益民, 何世平. 北祁连蛇绿岩的地质地球化学特征[J]. 岩石学报, 1995, 11 (增刊):125-146.

[5]冯益民, 何世平. 蛇绿岩与造山作用——北祁连造山带例析[C]//张旗. 蛇绿岩与地球动力学研究.北京: 地质出版社, 1996:135-138.

[6]张旗, 孙晓猛, 周德进, 等. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义[J]. 地球科学进展, 1997, 12:366-393.

[7]夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京: 地质出版社, 1996:52-53.

[8]刘传周, 肖文交, 袁超, 等. 祁连山扎麻什基性杂岩体岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(1):57-64.

[9]周德进, 陈雨, 张旗, 等.北祁连山南侧阿拉斯加型岩体的发现及其地质意义[J]. 地质科学, 1997, 32(1):122-127.

[10]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, 1996:102-106.

[11]柳小明, 高 山, 袁洪林, 等. 193nm LA-ICPMS 对国际地质标准参考物质中 42 种主元素和微量元素的分析 [J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 408-418.

[12]袁洪林, 吴福元, 高 山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520.

[13]何艳红, 孙勇, 陈亮, 等. 陇山杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 126-134.

[14]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, (16):1589-1604.

[15]Belousova E, Suzanne G W. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[M]. Contrib. Mineral. Petrol., 2002, 143: 602-622.

[16]Winchester. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [M]. Chemical Geology, 1977, 20 :325-343.

[17]Miyashiro A. Classification, characteristics and origin of ophiolites [J]. Journal of Geology, 1975, 83:249-281.

[18]Condie. Geochemical changes in baslts and andesites across the Archean -Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. Lithos, 1989, 23:1-18.

[19]McDonough W F, Sun S S. The composition of the earth [J]. Chem. Geol., 1995, 120: 223-253.

[20]Pearce J A, Cann G H. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19(2):339-349.

[21]Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[M]. Chem. Geol., 1986, 56: 207-218.

[22]夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山早古生代洋脊一洋岛和弧后盆地火山作用[J]. 地质学报, 1998, 72(4):301-312.

[23]侯青叶, 赵志丹, 张宏飞, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩印度洋 MORB 型同位素组成特征及其地质意义[J].中国科学(D 辑), 2005, 35(8):710-719.

[24]Thompson R N ,Morrison M A. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis[J]. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1984, A310:549-90.

[25]夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 北祁连山构造-岩浆-成矿动力学[M]. 北京: 中国大地出版社, 2001.

[26]冯益民, 何世平, 阎军. 北祁连山中段早中奥陶世蛇绿岩中席状岩墙杂岩的发现及其地质意义[J]. 地质论评, 1994, 40(3):252-264.

[27]夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连山及邻区火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998:18-26.

[28]相振群, 陆松年, 李怀坤, 等. 北祁连西段熬油沟辉长岩的锆石 SHRIMP U- Pb 年龄及地质意义[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1686-1691.

[29]张招崇, 毛景文, 杨建民, 等. 北祁连山西段熬油沟蛇绿岩岩石成因的矿物学研究[J]. 矿物学报, 1999, 19(1): 77- 82.

[30]张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. 岩石矿物杂志, 1997, 16(2):112-119.

① 青海省地质局区域地质测量队四分队. 1:20 万祁连幅区域地质测量报告书. 1967.