

北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究*

徐学义¹ 夏林圻¹ 马中平^{1,2} 王彦斌^{1,3} 夏祖春¹ 李向民^{1,2} 王立社^{1,2}

XU XueYi¹, XIA LinQi¹, MA ZhongPing^{1,2}, XIA ZuChun¹, LI XiangMin^{1,2} and WANG LiShe^{1,2}

1. 西安地质矿产研究所, 西安 710054

2. 西北大学地质学系, 西安 710063

3. 中国地质科学院北京离子探针中心, 北京 100037

1. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xian 710054, China

2. Northwest University, Xian 710063, China

3. Beijing SHRIMP Centre, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

2005-10-05 收稿, 2005-11-30 改回.

Xu XY, Xia LQ, Ma ZP, Wang YB, Xia ZC, Li XM and Wang LS. 2006. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the plagiogranites from Bayingou ophiolite in North Tianshan Mountains and the petrogenesis of the ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 83–94

Abstract The plagiogranites intruding as veins in gabbros in Bayingou ophiolite fragment are depleted in LREE and incompatible elements with $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.67 \sim 0.88$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.63 \sim 0.73$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 9.20 \sim 9.35$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.70365 \sim 0.70408$, indicating they are derived from depleted mantle source and is a part of the ophiolite. The representative samples of plagiogranites yield the SHRIMP zircon U-Pb age of $324.8 \pm 7.1 \text{ Ma}$, which is consistent with the formation age of the ophiolite and showing the Bayingou ophiolite occurred in late stage of Early Carboniferous. The gabbros, diabases and basic volcanic rocks in Bayingou ophiolite fragment show flat patterns in chondrite-normalized REE diagram and primitive mantle-normalized trace elements diagram with $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.63 \sim 1.36$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.02 \sim 1.41$ and are characterized by the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70306 \sim 0.70439$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.63 \sim 8.37$, suggesting the basic magma of the ophiolite mainly originated from N-MORB source but mixed with OIB source during the processes of magma formation. Combining with the study of Carboniferous regional volcanic rocks and the geochronological and geochemical data from the Bayingou ophiolite fragment, can provide us an insight into the understanding of the tectonic setting of the ophiolite: The Bayingou ophiolite occurred in a transition tectonic setting from continental riftism to ocean riftism, which is the geological record of an Early Carboniferous "Red Sea type" ocean basin.

Key words Bayingou ophiolite fragment, Plagiogranite, SHRIMP Zircon U-Pb dating, Petrogenesis, Northern Tianshan Mountains

摘要 巴音沟蛇绿岩侵位于辉长岩中的斜长花岗岩亏损 LREE 和不相容元素, $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.67 \sim 0.88$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.63 \sim 0.73$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 8.36 \sim 8.52$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.70365 \sim 0.70408$, 为亏损地幔来源花岗岩, 是蛇绿岩的组成部分。斜长花岗岩的精细 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $324.8 \pm 7.1 \text{ Ma}$, 表明巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世晚期。巴音沟蛇绿岩中辉长岩、辉绿岩、基性熔岩 REE 球粒陨石标准化和微量元素原始地幔标准化分配型式呈平坦型分布, $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.63 \sim 1.36$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.02 \sim 1.41$, 近似于 N-MORB 分配型式。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化于 $0.70306 \sim 0.70439$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.63 \sim 8.69$, 表明其岩浆主体来源于 N-MORB, 但在形成过程中有 OIB 组分的加入。结合天山石炭纪区域火山岩的研究, 认为巴音沟蛇绿岩形成于大陆裂谷向大洋裂谷转化的构造环境, 它是天山造山带晚古生代“红海型”洋盆的地质记录。

关键词 巴音沟蛇绿岩; 斜长花岗岩; SHRIMP U-Pb 定年; 蛇绿岩成因; 北天山

* 国土资源大调查项目(编号: 200313000063; 200313000028)、国家自然科学基金项目(编号: 40472044)和科技部“973”项目(编号: 2001CB409801)联合资助。

第一作者简介: 徐学义, 男, 1966 年生, 研究员, 博士, 主要从事区域岩石学及地球化学研究。E-mail: xaxueyi@cgs.gov.cn

中图法分类号 P588.12; P597.3

1 前言

位于中国西北部的天山造山带是中亚巨型复合造山系(又可称为乌拉尔-蒙古巨型古生代复合造山系)的中国境内部分,它是挟持于北部西伯利亚地块与南部塔里木地块、华北地块之间的古亚洲洋,在形成、演化和消亡过程中伴随诸多陆块拼合、增生-俯冲、碰撞造山的产物。古生代蛇绿岩是天山造山带古生代地质演化历史的重要记录,对研究天山古生代洋陆转化具有重要作用。天山造山带由北向南分布有4条重要的古生代蛇绿岩带或蛇绿混杂岩带,分别是北天山晚古生代蛇绿岩带、中天山北缘早古生代蛇绿混杂岩带、中天山南缘早古生代晚期—晚古生代早期蛇绿混杂岩带和南天山晚古生代蛇绿混杂岩带,它们的组成结构及其所揭示的大地构造含义一直是国内外研究的热点问题(郭继易等,1989;胡受奚等,1990;王作勋等,1990;肖序常等,1992;何国琦等,1994;汤耀庆等,1995;高长林等,1995;高俊等,1993;1995;李锦轶等,1999;Gao J *et al.*, 2001;李向民等,2002;夏林圻等,2002)。分布于中天山北缘断裂带北侧的北天山晚古生代蛇绿岩带,位于北天山伊连哈比尔晚古生代构造岩浆岩带内,呈北西-南东东展布,从艾比湖、经巴音沟向东延伸至后峡地区(王作勋等,1990),构成北天山一条重要的晚古生代蛇绿岩带,巴音沟蛇绿岩是该条蛇绿岩带的重要组成部分和典型代表。关于巴音沟蛇绿岩的形成时代和大地构造环境,多年来相继开展了其物质组成、结构、古生物等方面的研究(王作勋等,1990;肖序常等,1992;郭继易等,1989;高长林等,1995),但系统的年代学和岩石地球化学研究仍显得较为薄弱。关于蛇绿岩形成的时代,目前的资料可归结为两种认识,第一种是依据巴音沟蛇绿岩的下伏地层和上覆地层的时代认为其形成于石炭纪(郭继易等,1989;高长林等,1995),第二种是依据蛇绿岩套上部的放射虫硅质岩中放射虫及牙形刺微体化石定年,认为其形成于晚泥盆至早石炭世(肖序常等,1992;王作勋等,1990)。由于巴音沟蛇绿岩与下伏下石炭统阿克沙克组呈断层接触,与上覆上石炭统奇尔古斯套群呈角度不整合接触,因此根据蛇绿岩下伏及上覆地质体时代无法准确厘定蛇绿岩的形成年龄。前述第二种认识确定了蛇绿岩形成时代的上限,但它是一个时间段,仍然无法断定蛇绿岩是形成于晚泥盆世或是早石炭世。同样,对巴音沟蛇绿岩形成环境的提出了边缘海盆环境(郭继易等1989)、弧后盆地(王作勋,1990;高长林等,1995)、弧前盆地(卢华复等,2001);准噶尔早古生代洋盆(古亚洲洋盆的组成部分)向南俯冲诱发岩石圈拉伸而形成的小洋盆环境(肖序常等,1992)等。如此,巴音沟蛇绿岩精细年代学和系统元素-同位素资料的相对缺乏以及对其成因机制的不同

理解,已制约对天山晚古生代地质演化、构造格局及其动力学机制的深入理解。因此,本文选择巴音沟蛇绿岩开展了精细的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和元素-同位素地球化学研究,以准确厘定巴音沟蛇绿岩形成时代,确定该蛇绿岩的形成环境和形成机理,并进而为约束天山晚古生代构造演化的动力学机制提供资料。

2 地质背景与岩石学特征

巴音沟蛇绿岩位于“中天山北缘断裂”北侧,是北天山晚古生代构造岩浆作用的重要组成部分(图1)。野外填图揭示,巴音沟地区从南西至北东存在三个主要地质单元,依次为下石炭统阿克沙克组,巴音沟蛇绿岩和上石炭统奇尔古斯套组。巴音沟蛇绿岩呈推覆岩片逆冲于阿克沙克组之上,其上又被上石炭统奇尔古斯套组角度不整合覆盖(图2)。前人(郭继易,刘成德,1989;新疆维吾尔自治区地质矿产局,1999)曾将该蛇绿岩单元视为一地层单元,并将其称作“沙大王组”。

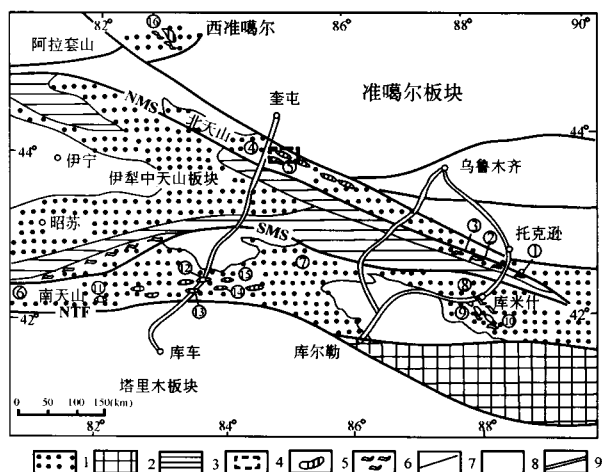


图1 天山西段地质构造略图(简示古生代蛇绿岩分布)(据张旗等,2001修改)

1-古生代地层;2-前寒武系;3-古生代弧火山-沉积岩系;4-巴音沟蛇绿岩工作区;5-蛇绿岩岩片;6-高压变质带;7-断层;8-中新世地层;9-公路。古生代蛇绿岩产地:①-干沟;②-乌斯特沟;③-米什沟;④-芦苇沟;⑤-巴音沟;⑥-长阿吾子;⑦-古洛沟;⑧-榆树沟;⑨-铜花山;⑩-硫磺山;⑪-米斯布拉克;⑫-库勒湖;⑬-独库公路;⑭-色日牙依布拉克;⑮-科克铁克达坂;⑯-唐巴勒。NMS-中天山北缘断裂带;SMS-中天山南缘断裂带;NTF-塔里木北缘断裂

Fig. 1 Geological and tectonic sketch map of west stage of Tianshan Mountains (also showing the distribution of the ophiolite suites)

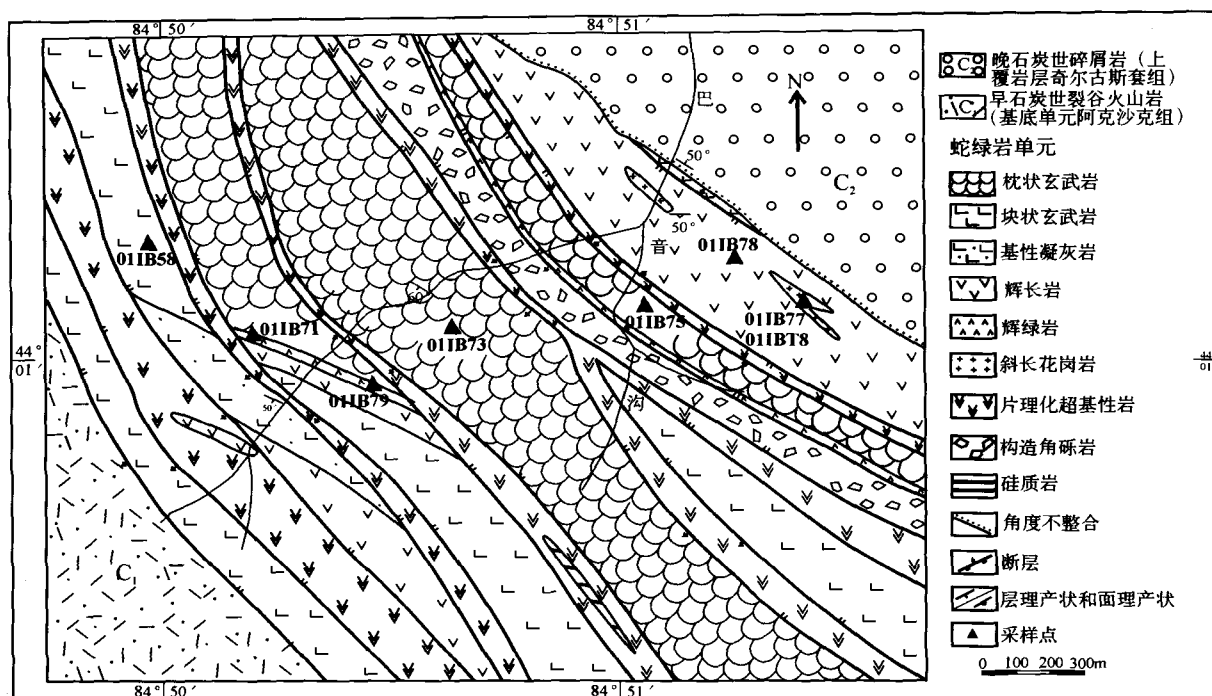


图2 巴音沟蛇绿岩平面地质略图

Fig. 2 Geological sketch map of Bayingou ophiolite fragment

下石炭统阿克沙克组由早石炭世火山-沉积岩系组成,包括有低级变质沉积岩和火山岩。变沉积岩为浅海相至陆相浊积岩、灰岩、页岩、粉砂岩(含维宪阶腕足类和珊瑚化石(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1999)、砂岩和砾岩。火山岩占比最大,有玄武岩、安山岩和凝灰岩,形成同沉积夹层。

蛇绿岩单元由蚀变超基性岩、含斜长花岗岩脉的辉长岩、闪长岩、辉绿岩墙、枕状玄武岩、块状熔岩(玄武岩、安山岩)、基性凝灰岩和硅质岩组成。缺失典型席状辉绿岩墙。辉绿岩墙清楚地根植于辉长岩中,对上覆玄武岩起着补给通道的作用。在巴音沟地区,虽然蛇绿岩组合出露的比较完整,但原始的蛇绿岩组合已被后期构造变动破坏。蚀变超基性岩主要由蛇纹岩化辉绿岩和纯橄岩组成。

上石炭统奇尔古斯套组,主要由碎屑岩和火山碎屑岩组成。

蛇绿岩中辉长岩主要由粗粒斜长岩和单斜辉石组成,斜长石通常被辉石包裹构成嵌晶结构,岩石中含有少量钛铁矿、磁铁矿、榍石、锆石及石英(含量<5%)。可见斜长石、具辉石假晶的角闪石充填于重结晶钠质斜长石构成的间隙中,岩石中不均一分布的绿色角闪石、阳起石、绿帘石、绿泥石、方沸石、方解石。闪长岩呈脉状出现于蛇绿岩中,具半自形晶结构,主要由含量近于相等的斜长石和角闪石组成,部分角闪石已蚀变为阳起石,少量其它矿物包括钾长石、榍石、磁铁矿、钛铁矿和石英,有时可见单斜辉石、锆石、磷灰石和黑云母。辉绿岩呈辉绿结构,有时见斑状结构,斜长石通常被单斜辉石所环绕,少量矿物有钛铁矿、磁铁矿、榍石、磷灰石

和锆石。基性熔岩通常具有聚斑结构、玻基交织结构、斑状结构或微晶结构,主要由斜长石、单斜辉石、磁铁矿、钛铁矿和少量锆石组成,发育低级变质作用形成钠长石、绿帘石、绿泥石、方解石、榍石和阳起石等矿物,它们常出现在基质中。枕状玄武岩是构成蛇绿岩的主体,具斑状结构,斑晶主要为斜长石和少量单斜辉石,基质为间隐结构(玻璃质已脱玻化),斜长石微晶发育海相火山岩特有的水下“淬火”结构。

本次研究所取的斜长花岗岩,呈细脉状或不规则脉状侵入于辉长岩中,规模很小,具半自形粒状结构,主要矿物组由斜长石(70%~75%)、石英(15%~20%)、角闪石(部分已绿泥石化)(5%~10%)组成,含少量黑云母及榍石、锆石、磁铁矿等副矿物(小于2%)。斜长石呈半自形粒状,粒度0.15~1.5mm,普遍发生轻微钠黝帘石化;石英呈它形粒状,粒度为0.1~1.1mm,分布于长石晶体之间;角闪石呈他形一半自形柱状,亦形成于斜长石晶体之间,部分已蚀变为片状绿泥石。

3 分析方法

通过人工重砂法从新鲜的斜长花岗岩样品中分选出锆石,然后在双目镜下挑选出无裂隙、无包体、透明干净的自形锆石颗粒,将其与一片 RSES 参考样 SL13 及数粒标准锆石 Tempra(年龄为 417Ma)在玻璃板上用环氧树脂固定、抛光,然后进行反射光和透射光照相,并在中国科学院地质与地球物理研究所用阴极发光扫描电镜进行图像分析以检查锆石内部的结构。锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质科学院地质

研究所用离子探针中心 SHRIMP-II 型离子探针测定,详细的分析流程和原理参考宋彪等(2002)和 Williams IS and Claesson S(1987)。分析时采用跳峰扫描,每7次扫描记录一次平均值。一次离子为约4.5nA, 10kV 的 O^{-2} , 靶径约25~30 μm 。质量分辨率约5400(1%峰高)。应用 RSES 参考锆石进行元素间的分馏校正, Temrra(年龄为417Ma)做二次校正。Temrra 测定重现性2%。数据处理采用 LudwigSQUID1.0(2001)及 ISOPLLOT(1999)程序。年龄计算采用 IUGS(1977)推荐值。主量元素在中国科学院地球化学研究所 XRF 法测试, FeO 和 Fe_2O_3 湿化学法单独分析。微量元素在中国地质大学(北京) ICP-HEX-MS 测试, 标样为 BCR-1, 大部分元素的分析精度优于3%, 具体的分析流程参阅刘颖等(1996)。Sr-Nd 同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所的 VG354 质谱仪上完成, NBS987 标样 $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.710265 \pm 12$, La Jolla $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.511862 \pm 10$ 。整个过程中 Sr 空白含量低于 $5 \times 10^{-10}g$, Nd 空白值低于 $5 \times 10^{-11}g$, $^{86}Sr/^{87}Sr = 0.1194$, $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$ 。 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 、 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值用 $^{86}Sr/^{87}Sr = 0.1194$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$ 进行分馏质量校正。

4 分析结果

4.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年

选用侵入于辉长岩中的斜长花岗岩细脉(01IBT8)开展

了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定。其矿物组成有斜长石($\approx 73\%$)、石英($\approx 20\%$)、角闪石($\approx 5\%$)、黑云母($\approx 1\%$)及锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等。相应的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测试结果列于表1。

依据阴极发光图像可将斜长花岗岩中的锆石分为三类,第一类型锆石发育典型的岩浆成因的韵律环带结构(图3, 颗粒1, 3, 4, 6, 7, 9, 10), 晶形相对完整, 代表了斜长花岗质岩浆结晶的产物。第二类锆石环带结构发育较弱, 但阴极发光的强度与环带结构发育的锆石基本相同(图3, 颗粒13), 可能亦为岩浆成因锆石。第三类锆石阴极发光图明显发黑, 不发育环带结构, 内部有退晶质化现象, 形态均呈它形不规则状(图3, 颗粒12, 14), 可能为捕获锆石。三种类型锆石均有阴极发光呈白色的次生锆石发育, 并使原来的锆石发生熔蚀作用, 明显为次生成因。

第一类和第二类锆石的 U 含量低, 变化于 $29 \times 10^{-6} \sim 69 \times 10^{-6}$ (表1), Th 含量变化于 $9 \times 10^{-6} \sim 27 \times 10^{-6}$, Th/U 比值变化于 0.25~0.42, 显示了很小的变化范围, 且 Th、U 含量呈现较好的正相关关系(图4a, b), 与典型岩浆锆石特征一致。其相应的 SHRIMP 测年结果表明, 01IBT8 样品中锆石的9个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 304~339Ma, 变化范围较小, 在一致曲线中图中成群分布(图4c), 加权平均年龄为 $324.8 \pm 7.1Ma(2\sigma)$, MSWD = 1.2, 加权平均值的误差与单个分析的误差基本一致, 代表了该斜长花岗岩的形成年龄。第三类锆石的 U 含量高, 为 $175 \times 10^{-6} \sim 246 \times 10^{-6}$ (表1),

表1 巴音沟蛇绿岩中斜长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果

Table 1 SHRIMP zircon U-Pb results for plagiogranites from Bayingou ophiolite

点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}Th}{^{238}U}$	$^{206}Pb_e$ (%)	$^{206}Pb^*$ ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{206}Pb^*}{^{238}U}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}Pb^*}{^{235}U}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}Pb^*}{^{206}Pb^*}$	$\pm\%$	误差	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(Ma)	$^{207}Pb/^{235}U$ 年龄(Ma)	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄(Ma)	% Discordant
斜长花岗岩:01IBT8																
1-1	33	9	0.29	3.18	1.55	0.0524	2.9	0.340	9.2	0.0471	8.7	.311	329 \pm 10	297.2 \pm 24	54.3 \pm 210	-7
3-1	32	11	0.35	8.72	1.50	0.0502	2.9	0.242	24	0.0349	24	.120	316 \pm 11	220.1 \pm 48	-716.6 \pm 670	77
4-1	47	18	0.38	4.40	2.30	0.0540	2.7	0.400	7.5	0.0537	7.0	.364	339 10	341.6 22	358.5 160	69
6-1	44	14	0.34	4.84	2.00	0.0505	2.8	0.412	19	0.059	19	.146	317 10	350.3 56	567.1 410	76
7-1	29	10	0.35	11.32	1.39	0.0497	3.0	0.276	15	0.0403	15	.194	312 12	247.5 33	-331.7 390	56
9-1	69	27	0.41	1.88	3.06	0.0509	2.5	0.388	4.7	0.0553	4.0	.535	320.2 8.6	332.9 13	424.4 89	31
10-1	35	9	0.27	10.92	1.61	0.0483	3.9	0.312	22	0.047	22	.177	304 15	275.7 53	49.2 530	57
12-1	426	214	0.52	0.32	20.1	0.0547	2.3	0.398	3.2	0.0528	2.2	.714	343.1 8.4	340.2 9.3	320.2 50	-43
13-1	34	10	0.30	4.52	1.62	0.0537	3.2	0.353	11	0.0477	11	.289	337 12	307 29	84.4 260	36
13-2	63	20	0.32	3.87	3.03	0.0538	2.6	0.391	6.2	0.0526	5.7	.422	338.0 9.7	335.1 18	311.6 130	66
14-1	175	59	0.35	2.70	8.57	0.0556	2.4	0.375	6.9	0.0489	6.4	.353	348.6 9.1	323.4 19	84.4 260	63

注: $^{206}Pb_e$ (%)指普通铅中的 ^{206}Pb 占全铅 ^{206}Pb 的百分数; $^{206}Pb^*$ (%)指放射性 ^{206}Pb 占全铅 ^{206}Pb 的百分数; 应用实测 ^{206}Pb 校正普通铅; 表中所有分析误差为 1σ 。

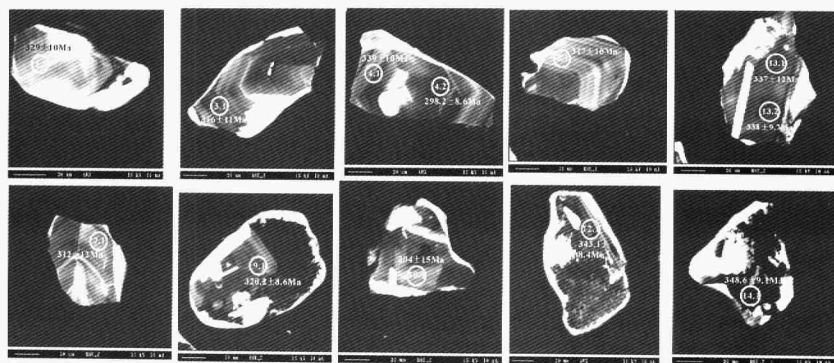


图3 斜长花岗岩代表性锆石的背散射电子图像

圈和数字分别表示 U-Pb 分析位置、测量编号和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄

Fig. 3 BSE imaging of the representative analyzed zircons from the plagiogranites

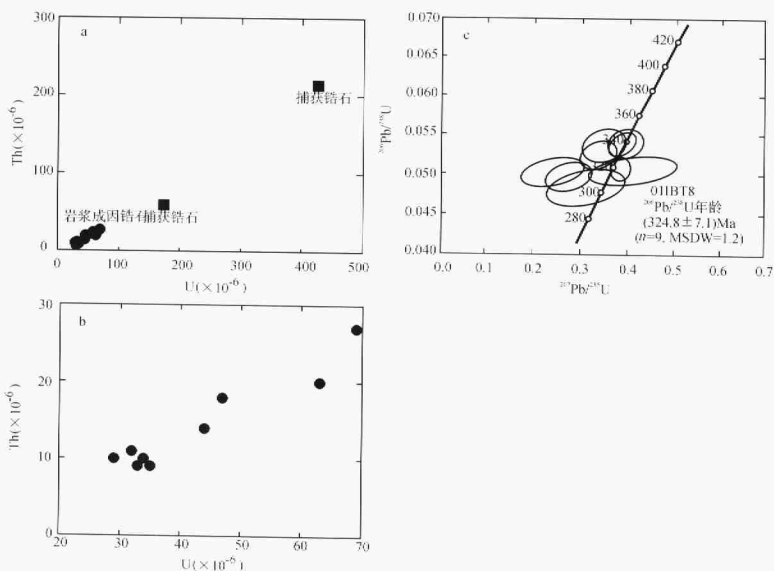


图4 巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩锆石 Th-U 图解(a,b) 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 和渐年年龄谱(c)

图 a 包括岩浆锆石和捕获锆石;图 b 为图 a 中岩浆锆石放大图

Fig. 4 Th-U contents (a, b) and SHRIMP U-Pb Concordia (c) diagrams for zircons from the plagiogranites of Bayingou ophiolite

明显高于第一和第二类锆石, Th/U 比值变化于 0.35 ~ 0.52, 位于岩浆锆石的 Th/U 比值范围, 显示了很小的变化。 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年同样给出了基本一致的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄, 为 343.1 ~ 348.6 Ma (表 1)。

4.2 地球化学特征

斜长花岗岩、辉长岩、辉绿岩、基性熔岩代表性样品的主、微量元素和 Sr-Nd 同位素测试结果列于表 2。

表 2 巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩、辉长岩、辉绿岩、基性熔岩主量 (wt%)、微量 ($\times 10^{-6}$) 和 Sr-Nd 同位素分析测试结果

Table 2 Major, trace elemental and Sr-Nd isotopic results for plagiogranites, gabbros, diabases and basic volcanic rocks

样 品	斜长花岗岩		辉长岩	辉绿岩		基性熔岩		
	01IB77	01IB78	01IB78	01IB79	01IB71	01IB73	01IB75	01IB58
SiO ₂	76.52	74.45	52.72	51.89	50.76	52.82	52.60	50.71
TiO ₂	0.10	0.10	0.80	0.90	0.92	1.25	1.40	0.80
Al ₂ O ₃	12.79	14.76	15.25	15.61	15.99	15.67	15.87	14.97
Fe ₂ O ₃	0.74	0.45	3.03	3.07	3.66	3.76	3.32	3.96
FeO	1.50	1.79	5.60	7.10	7.35	6.50	4.30	6.90
MnO	0.07	0.05	0.18	0.21	0.20	0.20	0.12	0.18
MgO	0.60	0.56	7.23	6.29	6.83	5.43	4.59	6.71
CaO	2.05	1.24	8.88	9.35	9.06	6.87	9.94	10.16
Na ₂ O	3.65	3.81	2.02	1.40	2.25	3.61	3.69	1.02
K ₂ O	0.20	0.30	0.56	0.39	0.18	0.25	0.31	0.08
P ₂ O ₅	0.08	0.13	0.27	0.27	0.16	0.33	0.47	0.33
LOI	1.40	2.21	3.36	2.97	1.96	2.76	2.68	3.51
Total	99.70	99.85	99.90	99.45	99.32	99.45	99.28	99.33
Sc	6.2	1.5	42.8	47.7	50.3	55.4	23.9	53.7
V	10	10	277	293	300	296	182	322
Cr	10.1	6.5	260	216	200	121	264	194
Co	4.1	3.3	43.1	45.4	46.1	41.2	35.1	43.2
Ni	4.6	7.3	123	187	113	56.3	130	107
Rb	5.0	5.9	13.3	15.7	8.3	12.9	0.6	6.1
Sr	197	211	67	127	160	215	127	117
Y	5.8	5.0	17.1	18.1	18.1	33.0	21.1	20.7
Zr	103	70	36	43	46	78	144	45
Nb	0.8	0.7	0.4	2.4	2.1	2.1	19.6	2.1
Cs	0.42	0.54	0.28	0.14	0.41	0.19	0.12	0.07
Ba	38	40	131	56	37	38	12	30
La	1.2	1.0	2.1	2.8	3.0	2.5	5.0	3.3
Ce	2.6	2.6	5.9	7.8	7.8	8.2	13.1	7.3
Pr	0.40	0.34	1.0	1.1	1.2	1.5	2.0	1.2
Nd	1.7	1.6	5.0	6.0	6.0	8.5	10.7	6.3
Sm	0.50	0.54	1.7	1.8	2.0	3.1	3.1	2.3
Eu	1.3	1.1	0.62	0.79	0.81	1.0	1.1	1.1
Gd	0.78	0.69	2.8	2.8	2.7	4.6	4.0	2.9

续表 2

Continued Table 2

样 品	斜长花岗岩		辉长岩	辉绿岩		基性熔岩		
	01IB77	01IB78	01IB78	01IB79	01IB71	01IB73	01IB75	01IB58
Tb	0.12	0.11	0.45	0.51	0.53	0.83	0.71	0.56
Dy	1.0	0.75	3.1	3.2	3.4	5.8	4.5	3.6
Ho	0.25	0.22	0.66	0.71	0.74	1.32	0.99	0.74
Er	0.84	0.59	2.1	2.2	1.9	3.9	2.9	2.0
Tm	0.13	0.10	0.25	0.30	0.30	0.50	0.42	0.35
Yb	1.0	0.76	1.6	1.8	1.9	3.4	2.5	2.3
Lu	0.18	0.13	0.30	0.29	0.29	0.52	0.40	0.33
Hf	2.3	1.5	1.1	1.3	1.4	2.3	2.1	1.7
Ta	0.05	0.05	0.05	0.16	0.15	0.13	0.15	0.58
Pb	1.3	0.20	0.21	0.43	0.78	0.06	1.3	4.9
Th	0.07	0.08	0.14	0.18	0.19	0.12	0.30	1.1
U	0.10	0.07	0.06	0.05	0.05	0.19	0.13	0.09
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.078	0.105	0.886	0.467	0.818		0.452	0.100
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1946	0.1912	0.2195	0.2058	0.2075		0.1830	0.2055
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2\sigma)$	0.704011(18)	0.704564(18)	0.707160(20)	0.705799(17)	0.705476(16)		0.706195(20)	0.704848(18)
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(2\sigma)$	0.513070(15)	0.513055(16)	0.513115(13)	0.512913(15)	0.512927(15)		0.513054(11)	0.512920(10)
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.70365	0.70408	0.70306	0.70364	0.70429		0.70410	0.70439
$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	8.52	8.36	8.37	4.99	4.63		8.69	5.14

注: ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR} = 0.1967, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR} = 0.512638, λ_{Nd} = 0.00000654 Ma⁻¹, ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$)_{CHUR} = 0.0847, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_{CHUR} = 0.7047, λ_{Sr} = 0.0000142 Ma⁻¹。同位素回时计算 t = 325 Ma。

从表 2 可以看出,巴音沟侵入于辉长岩中的斜长花岗岩主要元素变化范围很小, SiO₂ 74.45% ~ 76.52%, Al₂O₃ 12.79% ~ 14.76%, MgO 0.56% ~ 0.60%, TiO₂ 0.10%, (K₂O + Na₂O) 3.95% ~ 4.11%, Mg' 值 = 0.31 ~ 0.33。蛇绿岩单元中从辉长岩、辉绿岩至基性熔岩,主量元素的变化范围同样很小, SiO₂ 50.71% ~ 52.72%, Al₂O₃ 14.97% ~ 15.99%, MgO 4.59% ~ 7.23%, TiO₂ 0.80% ~ 1.40%, K₂O 0.08% ~ 0.56%, Na₂O = 1.02% ~ 3.69%, Mg' 值 = 0.50 ~ 0.61。其中基性熔岩 mg 值介于 0.50 ~ 0.54 之间,但其 SiO₂ 含量(50.71% ~ 52.82%) 大于 50%, Cr 含量(121 × 10⁻⁶ ~ 264 × 10⁻⁶) 小于 1000 × 10⁻⁶, Ni 含量(56.3 × 10⁻⁶ ~ 130 × 10⁻⁶) 小于 400 × 10⁻⁶, 表明基性熔岩的源岩浆为演化型岩浆。

代表性斜长花岗岩样品的 REE 元素总量为 10.53 × 10⁻⁶ ~ 12 × 10⁻⁶, 在球粒陨石标准化图解上(图 5a), 样品表现为相似的 LREE 亏损, HREE 富集的左倾型配分模式, 轻重稀土分异较为明显, (Ce/Yb)_N = 0.67 ~ 0.88 (平均值为 0.78), (Gd/Yb)_N = 0.63 ~ 0.73 (平均值为 0.68); 具强烈的 Eu 正异常(Eu/Eu* = 5.51 ~ 6.36, 平均值为 5.94)。代表性斜长花岗岩样品具有较低的相容元素含量, 如 Sc 1.5 ×

10⁻⁶ ~ 6.2 × 10⁻⁶, Ni 4.6 × 10⁻⁶ ~ 7.3 × 10⁻⁶, Cr 6.5 × 10⁻⁶ ~ 10.1 × 10⁻⁶。Rb 含量变化于 5.0 × 10⁻⁶ ~ 5.6 × 10⁻⁶, Ba 含量变化于 5.0 × 10⁻⁶ ~ 5.9 × 10⁻⁶, Sr(变化于 197 × 10⁻⁶ ~ 211 × 10⁻⁶)、Eu(变化于 1.1 × 10⁻⁶ ~ 1.3 × 10⁻⁶)、U(0.07 × 10⁻⁶ ~ 0.1 × 10⁻⁶) 含量相对较高。不相容元素比值 Nb/La = 0.67 ~ 0.7, Nb/U = 8 ~ 10, Zr/Nb = 100 ~ 128, Th/Ta = 1.4 ~ 1.6, 在微量元素大洋中脊花岗岩标准化图解上(图 5c), 整体显示亏损不相容元素的特点, 除 Ba、Rb 约相当于大洋中脊花岗岩标准值之外, 其它元素(Th、Ta、Nb、Ce、Hf、Zr、Sm、Y、Yb) 均明显低于大洋中脊玄武岩的标准值, 与 Troodos 洋中脊花岗岩分布型式(Pearce JA *et al.*, 1984) 相比, 整体分配型式相似, 除 Zr、Hf 外, 其它元素更为亏损。

代表性辉长岩、辉绿岩、基性辉岩(玄武岩)的 REE 总量为 27.58 × 10⁻⁶ ~ 51.42 × 10⁻⁶, 并且显示了从辉长岩(REE 总量 27.58 × 10⁻⁶)、辉绿岩(REE 总量 32.1 × 10⁻⁶ ~ 32.57 × 10⁻⁶)、基性熔岩(34.28 × 10⁻⁶ ~ 51.42 × 10⁻⁶) REE 总量增高的趋势, 在 REE 球粒陨石标准化图解上(图 5b), 样品表现出相似的平坦型配分模式, 轻重稀土分异不明显, (Ce/Yb)_N = 0.63 ~ 1.36 (平均值为 0.99), (Gd/Yb)_N = 1.02 ~ 1.41 (平均值为 1.20); Eu/Eu* = 0.81 ~ 1.30, 平均值为 1.01。代表

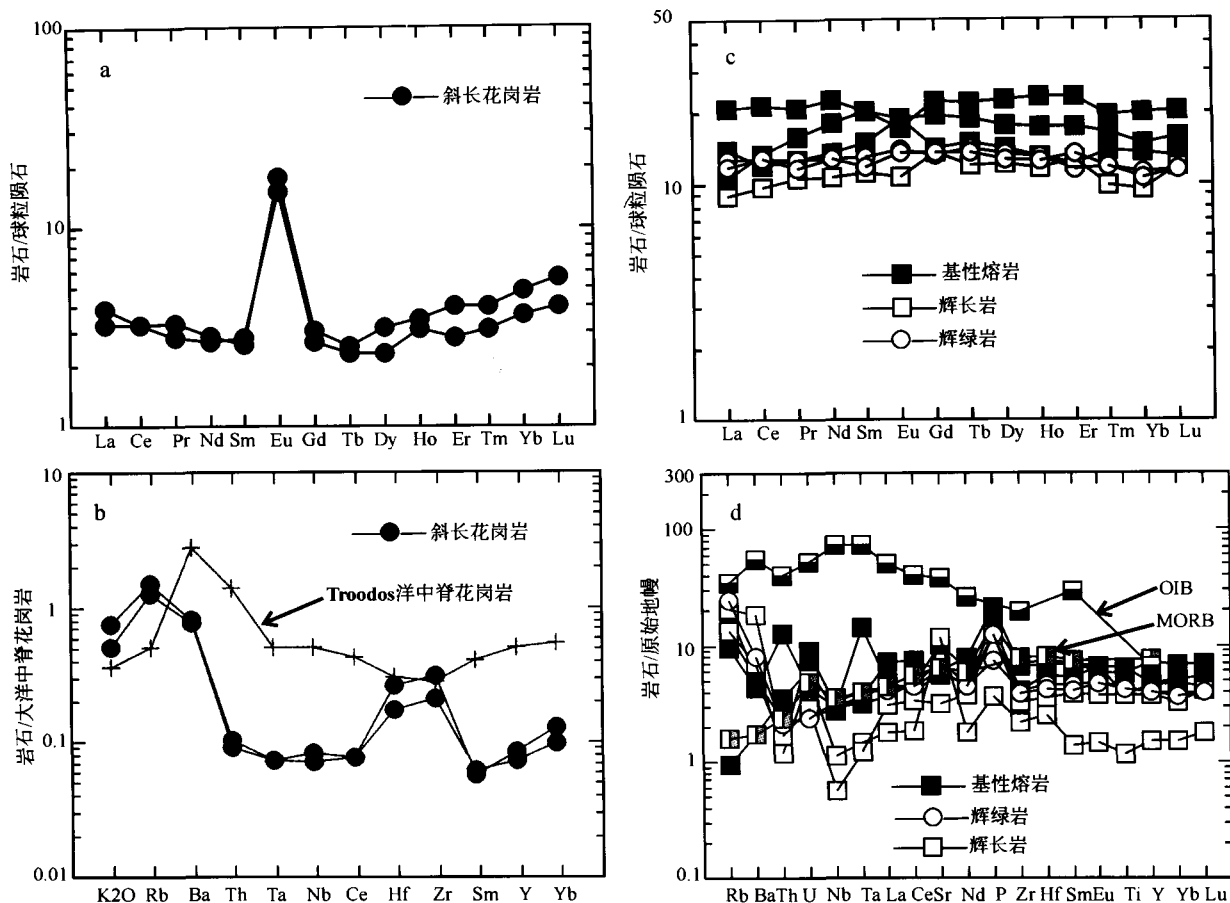


图5 巴音沟蛇绿岩中斜长花岗岩、辉长岩、辉绿岩、基性熔岩的 REE 球粒陨石标准化分配图和不相容元素洋中脊花岗岩、原始地幔标准化蛛网图

图 a 为斜长花岗岩 REE 球粒陨石标准化分配图, 图 b 为辉长岩、辉绿岩、基性熔岩的 REE 球粒陨石标准化分配图, 图 c 为斜长花岗岩大洋中脊花岗岩标准化蛛网图, 图 d 为辉长岩、辉绿岩、基性熔岩原始地幔标准化蛛网图

图中 Troodos 大洋中脊花岗岩数据引自 pearce JA (1984); OIB 引自 Sun SS (1980); N-MORB 引自 Saunders AD (1992)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a, c), ORG-normalized (b) and primitive mantle-normalized (d) dergrams for the plagiogranites(a,b), and gabbros, diabbases and basic volcanic rocks (c,d)

性样品具有较高的相容元素含量, 如 Sc $23.9 \times 10^{-6} \sim 52.7 \times 10^{-6}$, Ni $56.3 \times 10^{-6} \sim 187 \times 10^{-6}$, Cr $121 \times 10^{-6} \sim 264 \times 10^{-6}$, 大离子亲石元素 (Rb、Ba、Sr) 含量中等。不相容元素比值 Nb/La = 0.19 ~ 3.92, Nb/U = 6.67 ~ 150, Zr/Nb = 3.78 ~ 90, Th/Ta = 0.90 ~ 2.8。在微量元素原始地幔标准化图解上 (图 5d), 元素整体分布比较平坦, 除活动性元素 Rb、Ba 外, 整体分布近似 N-MORB (Sun SS, 1980), 且从辉长岩、辉绿岩至基性熔岩不相容元素总体含量呈增加趋势。

两个斜长花岗岩样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化于 0.70365 ~ 0.70408, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 8.37 \sim 8.52$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.11 \sim -0.13$, 在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 对 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($t = 325\text{Ma}$) 图解上, 斜长花岗岩显示出近似 MORB 地幔同位素特征, 其亏损地幔二阶段模式年龄变化于 332 ~ 319Ma (平均 325.5Ma), 与斜长花岗岩的形成年龄一致。本区一个辉长岩、二个辉绿岩和二个基性熔岩的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化于 0.70306 ~ 0.70439,

$\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.63 \sim 8.69$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.12 \sim -0.12$, 在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 对 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($t = 325\text{Ma}$) 图解 (图 6) 上, 辉长岩显示出近似 MORB 地幔同位素特征, 辉绿岩及基性熔岩显示出具有 OIB 地幔源特点, 但投点均靠近于 MORB 源区。相对于中天山早石炭世基性火山岩 Sr-Nd 同位素特征相比 (车自成等, 1996; 陈丹玲等, 2001; Xia LQ *et al.*, 2004), 辉长岩、辉绿岩、基性熔岩具有相对高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和明显低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 值, 显示其相对于中天山早石炭世基性火山岩来源于更加亏损的地幔源区。

5 讨论

5.1 蛇绿岩形成的时代

巴音沟蛇绿岩目前还没有任何精确的同位素测年资料,

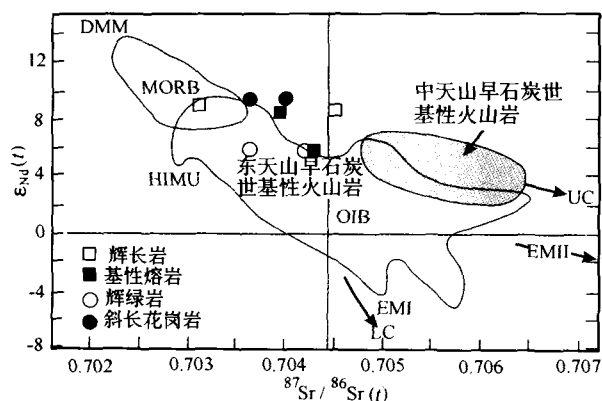


图6 巴音沟蛇绿岩中辉长岩、辉绿岩、基性熔岩、斜长花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解 (据 Zindler A and Hart SR, 1986)

中天山早石炭世火山岩系成分范围据 Xia LQ *et al* (2004)

Fig. 6 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagrams of the gabbros, diabases, basic volcanic rocks and plagiogranites from Bayingou ophiolite

目前文献报道或认为其形成于石炭纪(邬继易等, 1989; 高长林等, 1995), 或依据巴音沟蛇绿岩上部硅质岩中微体化石认为其形成的时间上限为晚泥盆世至早石炭世(注: 放射虫微体化石认为形成于早石炭世; 牙形刺化石认为形成于晚泥盆世)(王作勋等, 1990; 肖序常等, 1992)。如此不确切的年代学资料严重制约了对巴音沟蛇绿岩形成演化历史乃至整个天山造山带晚古生代构造岩浆作用时空格局的对比和动力学讨论。蛇绿岩中出现的幔源斜长花岗岩是基性岩浆最终分异的产物, 它的形成年龄与蛇绿岩中的辉长岩、辉绿岩、基性熔岩形成年龄基本相当, 代表了蛇绿岩形成年龄的精确上限。因此, 蛇绿岩中出现的斜长花岗岩是测试蛇绿岩形成年龄的理想对象。巴音沟斜长花岗岩 REE 球粒陨石 (Boynton WV, 1984) 标准化图解显示其具有 LREE 亏损的特点, 微量元素 ORG (Pearce JA *et al.*, 1984) 标准化图解显示其与 Troodos 洋脊花岗岩相似的分配型式, 加之它具有高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 值, 均表示其来源于亏损地幔源区, 无疑它是蛇绿岩组成的一部分, 其形成年龄应该代表了蛇绿岩的形成年龄。SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素体系由于其有着较高的封闭温度, 且不易受后期地质事件所扰动, 其测试的年龄代表了岩石的形成年龄。因此, 巴音沟蛇绿岩中侵位于辉长岩中的斜长花岗岩 $324.8 \pm 7.1\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄代表了斜长花岗岩的形成年龄, 该年龄即为巴音沟蛇绿岩形成的精确上限。因此巴音沟蛇绿岩形成年龄为 $324.8 \pm 7.1\text{Ma}$, 属早石炭世晚期。

至于 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测试中所获得的 $343.1 \sim 348\text{Ma}$ 捕获锆石年龄, 它的地质意义目前还不明确, 但有可能代表了斜长花岗岩的寄主辉长岩岩浆的早期结晶年龄, 目前项目组正在进行与辉长岩相关的年代学研究。

5.2 蛇绿岩的成因

上世纪 70 年代建立的蛇绿岩 (Ophiolite) 概念认为出露在造山带中的一套镁铁-超镁铁岩组合大洋岩圈的残留, 其岩性单元可以与现代大洋岩石圈各个层圈一一对应, 因此将蛇绿岩作为板块边界存在与否的重要证据 (Miyashiro A, 1975), 对板块构造学说的发展起了积极的推动作用。随着人们对大洋地质认识的不断深入, 逐渐认识到蛇绿岩可以形成多种构造环境, 诸如大洋中脊、弧后盆地、弧前盆地、岛弧、大陆裂谷、转换断层等 (Wilson M, 1989; 张旗等, 2001; 夏林圻等 2001), 相应地建立了蛇绿岩的地球化学类型。张旗等 (2001) 将蛇绿岩中基性火山岩的地球化学类型归结为岛弧拉斑玄武岩 (IAT) 和洋脊玄武岩 (MORB) 两种, 认为产于消减带之上的岛弧和弧前环境蛇绿岩中基性熔岩具 IAT 特征, 产于不成熟弧后盆地蛇绿岩的基性熔岩兼具 IAT 和 MORB 的特征, 产于成熟弧后盆地蛇绿岩的玄武岩为 MORB 特征。蛇绿岩中基性熔岩亦可能具 E-MORB 特征, 它们是 N-MORB 源和 OIB 源混合的结果。巴音沟蛇绿岩中辉长岩、辉绿岩、基性熔岩代表性样品 REE 球粒陨石标准化图解显示出近似平坦的分配型式, LREE 或稍亏损, 或稍富集; 微量元素原始地幔标准化 (McDonough WF *et al.*, 1991) 图解上显示出和 N-MORB 分配型式 (Saunders AD *et al.*, 1992) 相似的特点。巴音沟蛇绿岩中基性熔岩的 Th/Ta 比值除一个样品为 0.90 外, 类似于 N-MORB, 其它两个样品均大于 1 (1.9 ~ 2), 显示其具有岛弧环境基性火山岩的地球化学特点。另外, Xiao WJ *et al.* (2004a; 2004b) 研究认为包括天山在内的南阿尔泰地区晚古生代 (包括石炭纪) 存在弧陆碰撞的侧向增生作用; 朱永峰等 (2004) 认为西天山哈拉山组形成于岛弧环境, 时代为泥盆纪—晚石炭世; 李日俊等 (2002, 2005) 认为南天山存在二叠纪的残余洋盆。上述认识均暗示着具有 MORB 及岛弧微量元素特征的巴音沟基性熔岩可能形成于弧后盆地环境。

另有学者的研究认为, 早石炭世天山古生代洋盆已经闭合, 天山造山带进入到大规模造山后裂谷拉伸阶段 (夏林圻等, 2002a, b; Xia LQ *et al.*, 2004; 李向民等, 2004)。天山早石炭世火山岩系 (包括巴音沟蛇绿岩下伏地层下石炭统阿克沙克组) 普遍具有大陆裂谷火山岩系的岩石地球化学特点, 来源于与 OIB 源相似的地幔软流圈源 (夏林圻等, 2002; Xia LQ *et al.*, 2004), 天山自早石炭世开始, 已进入到一种拉伸环境 (夏林圻等, 2002a, b; Xia LQ *et al.*, 2004)。巴音沟蛇绿岩中辉长岩、辉绿岩、基性熔岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70306 \sim 0.70439$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.63 \sim 8.69$, 在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 对 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($t = 325\text{Ma}$) 图解上 (Zindler A and Hart SR, 1986) 均显出 MORB 源和 OIB 源混源 (DePaolo DJ *et al.*, 1979; Fitton JG, 1995; Hoffman A, 1997; Weaver BL, 1991; Gribble RF *et al.*, 1998) 的特征 (图 6); 在 La/Sm-Sm/Yb 图解上 (图 7), 巴音沟基性岩投点靠近于 MORB 源, 部分样品显示 OIB 组分加入的特

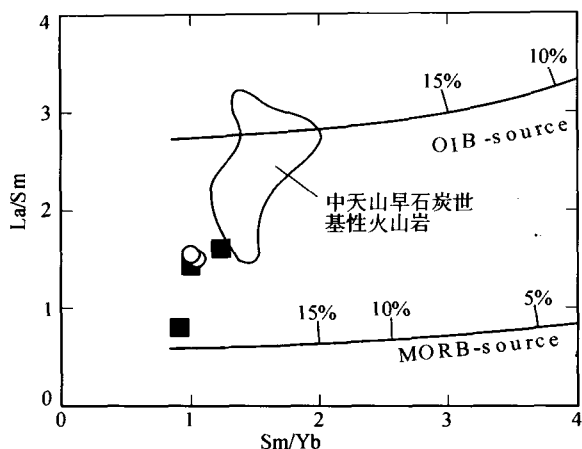


图7 巴音沟蛇绿岩中基性熔岩及辉绿岩 La/Sm-Sm/Yb 图解(图例同图6)

中天山早石炭世火山岩系成分范围据 Xia LQ *et al.* (2004)

Fig. 7 La/Sm-Sm/Yb diagrams for the basic volcanic rocks and diorites in Bayingou ophiolite

点;在基性熔岩构造环境判别图解上(Winchester JA *et al.*, 1977;图8),巴音沟蛇绿岩中基性熔岩均位于大洋中脊玄武岩区。因此,巴音沟蛇绿岩中基性熔岩的源区主体应具有 MORB 混源,但在形成过程中有 OIB 源的混入。具有这种地球化学特征的蛇绿岩形成有两种可能的构造环境,一种是类似于现今的冰岛地区大洋中脊玄武岩(Wilson M, 1989),另一种是大陆裂谷向大洋裂谷转化的环境,类似于现今的“红海”(Saunders AD *et al.*, 1992; Wilson M, 1989; Xia LQ *et al.*, 2004)。按照该段上述的观点,形成于早石炭世晚期的巴音沟蛇绿岩可能是形成于大陆裂谷向大洋裂谷转变的环境,类似于现今的红海。至于巴音沟蛇绿岩具有 MORB 和

OIB 混源的特点,可能是由于早期大陆裂谷大规模火山岩浆作用对 OIB 的地幔源的萃取,形成局部具 N-MORB 源的地幔软流圈源,当大陆裂谷向大洋裂谷转换时,形成初始洋盆,洋脊玄武岩主要源区为 N-MORB 源,但同时又受到区域 OIB 地幔源的影响。

然而,天山在石炭纪是否存在洋盆,仍然是天山构造演化历史中的一个重大问题。天山石炭纪火山岩形成于岛弧还是大陆裂谷,是牵涉到天山古生代洋陆转化时限的关键。认为天山石炭纪火山岩形成于岛弧构造环境,必须面对天山造山带从西至东普遍存在着早石炭世地层不整合覆盖于前寒武系基底或前石炭纪褶皱基底之上的地质事实(1:20万、1:25万区域地质调查资料);认为天山石炭纪火山岩形成于大陆裂谷环境的,须回答石炭纪火山岩中一系列岛弧火山岩的地球化学信息。已有的研究表明,天山地区石炭-二叠纪花岗岩的研究显示花岗岩大多具有高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,具有俯冲或同碰撞的岩石地球化学信息,暗示着天山地区存在新生弧壳基底(洪大卫等,20003;徐学义等,2005)。在这种弧壳基底上发生大陆裂谷,形成的火山岩将同时具有大陆裂谷和岛弧环境火山岩的地球化学标志。至于天山地区普遍存在的早石炭世地层不整合于下伏基底的地质事实,笔者倾向认为它代表了一次重大地质事件的发生,很可能是天山古生代洋盆闭合的表现。因此,巴音沟蛇绿岩形成于大陆裂谷向大洋裂谷转化环境,类似于现今的“红海”。但大陆裂谷发生的基底,很可能或至少可能包含了新生的弧壳基底。当然,巴音沟蛇绿岩的成因仍然需要进一步在大区域范围内进行深入研究探讨。

5.3 构造意义

巴音沟蛇绿岩作为天山造山带晚古生代蛇绿岩的典型代表,一直是前人确定天山晚古生代地质构造演化的主要研

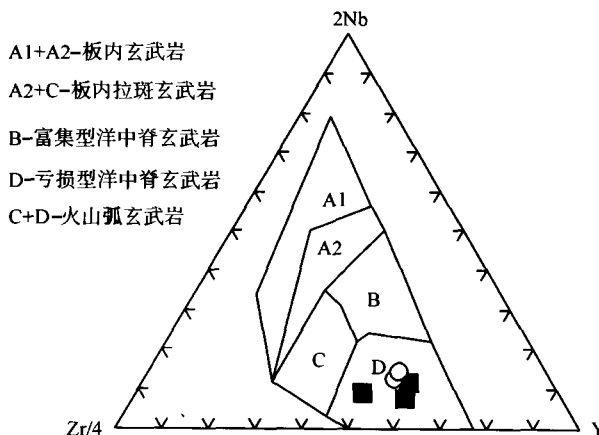
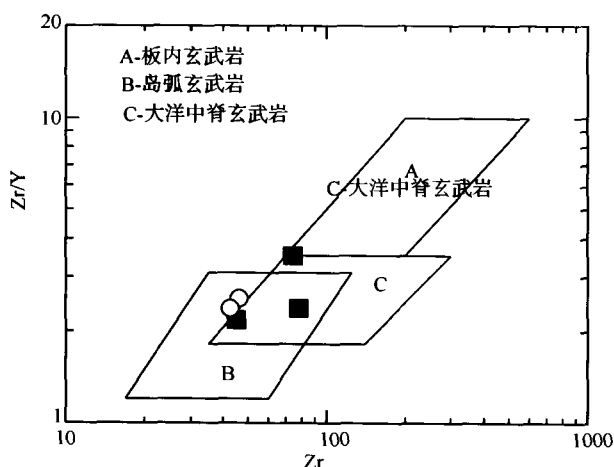


图8 巴音沟蛇绿岩中基性熔岩及辉绿岩构造环境判别图解

a. Zr/Y-Zr 图解; b. 2Nb-Zr/4-Y 图解 图例同图6

Fig. 8 Tectonic setting of the basic volcanic rocks and diorites in Bayingou ophiolite

研究对象(王作勋等,1990;肖序常等,1992;高长林等,1995;卢华复等,2001)。虽然近几年的研究不断揭示出天山石炭-早二叠世处于造山后大陆裂谷环境,但对其动力学机制多解释为造山后岩石圈增厚、减薄,从而发生拆沉,诱发软流圈地幔上涌产生大陆裂谷来解释(Xia LQ *et al.*, 2004)。巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世晚期,是大陆裂谷向大洋裂谷转化的产物的新认识,说明石炭纪时,天山造山带内存在非常强烈的裂解作用,局部地区由于拉张强烈,已经出现初始洋壳。结合整个中亚地区广泛的石炭-二叠纪火山岩的分布(大于500000km², Xia LQ *et al.*, 2004; 夏林圻等,2002a,b),表明石炭纪时整个中亚地区可能有着更为深刻的地质背景。我们认为天山乃至整个中亚地区石炭纪这种大规模、强烈的大陆裂谷作用很可能是一次大的地幔柱作用的岩浆响应,该地幔柱可能与造成古特提斯拉伸裂解作用的古地幔柱上涌影响到天山乃至整个中亚地区有关(Sengör AMC *et al.*, 1984; 1989; Xia LQ *et al.*, 2004),所以才造成天山及其邻区出现如此强烈的大陆裂谷作用和大规模的构造岩浆活动。

6 结论

巴音沟蛇绿岩侵入于辉长岩中的斜长花岗岩亏损 LREE 和不相容元素, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 8.52 \sim 8.36$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.70365 \sim 0.70408$, 表明该斜长花岗岩为亏损幔源花岗岩, 为蛇绿岩的组成部分。斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $324.8 \pm 7.1 \text{ Ma}$, 这一年龄代表了巴音沟蛇绿岩的形成年龄, 表明巴音沟蛇绿岩形成早石炭世晚期。巴音沟蛇绿岩中辉长岩、辉绿岩、基性熔岩 REE 球粒陨石标准化呈平坦型, 微量元素原始地幔标准化分配型式近似于 MORB, 它形成于大陆裂谷向大洋裂谷转化的构造环境, 裂谷作用发生的基底可能包含了新生的弧壳基底, 巴音沟蛇绿岩天山造山带晚古生代“红海型”洋盆的地质记录。

致谢 两位审稿人张旗研究员和肖文交研究员提出的具体意见对我们探讨巴音沟蛇绿岩的成因具有很大帮助。冯益民研究员和张二朋研究员提供了一些参考意见, 在此一并致谢!

References

- Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: meteorite studies. In: Henderson P (ed). Rare earth element geochemistry. New York: Elsevier, 63-114
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1999. Stratigraphy (lithostratic) of Xinjiang Uygur autonomous region. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 1-430 (in Chinese)
- DePaolo DJ. 1979. Implications of correlated Nd and Sr isotopic variations for the chemical evolution of the crust and mantle. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 43: 201-211
- Fitton JG, James D and Leeman WP. 1991. Basic magmatism associated with the late Cenozoic extension in the western United States; compositional variations in space and time. *Journal of Geophysical Research*, 96: 13693-13711
- Gao CL, Cui KR and Qian YX. 1995. Microplate tectonics from the Tianshan Mountains and northern Tarim basin. Beijing: Geological Publishing House, 1-132 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Tang Y Q and Zhao M. 1995. The geochemistry and tectonic setting of the ophiolites in southern Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica (supplement)*. 11: 85-97 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Xiao X C and Tang Y Q. 1993. The discovery of Kumishi blueschist and its tectonic significance from South Tianshan Mountains. *Chinese Regional Geology*, 4: 344-347 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Zhang L and Liu S. 2001. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar age record of formation and uplift of the blueschists and eclogites in the Western Tianshan Mountains. *Chin. Sci. Bull.*, 45: 1047-1051
- Gribble RF, Stern RJ, Newman S, Bloomer SH and O'Hearn T. 1998. Chemical and isotopic composition of lavas from the Northern Mariana Trough: implications for magmatogenesis in back-arc basins. *Journal of Petrology*, 39(1): 125-154
- He GQ, Li MS and Liu DQ. 1994. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House; 1-437 (in Chinese)
- Hoffman A. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 389: 219-229
- Hong DW, Wang SG, Xie XL and Zhang JS. 2000. Genesis of positive (Nd, t) granitoids in the Dahinggan Mts. Mogolia orogenic belt and growth continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441-456 (in Chinese with English abstract)
- Li JY and Xiao XC. 1999. The review on some questions about the tectonic evolution and crustal structure of Xinjiang, China. *Science of Geology*, 34(4): 405-419
- Li XM, Dong YP, Xu XY, Xia LQ, Ma ZP and Wang LS. 2002. The discovery of ophiolitic mélange in Wuwamen area from southern margin of central Tianshan mountains. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 304-307
- Li YJ, Sun LG, Wu HR, Wang GL, Yang CS and Peng GX. 2004. Permo-Carboniferous radiolaria from the Wupatarkan group, west terminal of Chinese south Tianshan. *Chinese Jour. Geol.*, 40(2): 220-226 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Wang ZM, Mai GR, Wu HR, Huang ZB and Tan ZJ. 2002. New discovery of radiolarian fossils from Aiktik group in Tarim Basin and its significance. *Xinjiang Petroleum Geology*, 23(6): 496-500 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552-558 (in Chinese with English abstract)
- Lu HF, Jia CZ, Jia D and Chen CM. 2001. Features of the thrust wedge of deformation belt in Kuqa rejuvenation foreland basin. *Geological Journal of China Universities*, 7: 257-271 (in Chinese with English abstract)
- McDonough WF, Sun SS, Ringwood AE, Jagoutz E and Hoffmann AW. 1991. K, Rb, Cs in the earth and moon and the evolution of the earth's mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta. Ross Taylor Symposium volume*, 141-162
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites. *Journal of Geology*, 83: 249-281
- Pearce JA, Nigel BW and Andrew GT. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983
- Saunders AD, Storey M, Kent RW and Norry MJ. 1992. Consequences of plume lithosphere interactions. In: Storey BC, Alabaster T and Pankhurst RJ (eds). *Magmatism and the cause of continental breakup*. London: Geological Society Special Publication, 68: 41-60
- Sengör AMC and Hsu K J. 1984. The Cimmerides of eastern Asia history of the eastern end of Paleo-Tethys. *Mem. Spoc. Geol.*, 147: 139-167

- Sengör AMC, Altmer D, Cin A, Ustaomer T and Hsu KJ. 1989. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land. In: *Gondwana and Tethys*. Oxford: Geological Society Special Publication, 37: 119–181
- Song B, Zhang YH and Wang YS. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48 (suppl.): 26–30 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS. 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A297: 409–455
- Tang YQ, Gao J and Zhao M. The ophiolites and blueschists from southwestern Tianshan mountains. Beijing: Geological Publishing House: 1–315 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZX, Wu JY, Lu XC, Zhang JG and Liu CD. 1990. Polycyclic tectonic evolution and metallogeny of the Tianshan Mountains. Beijing: Science Press: 1–217 (in Chinese with English abstract)
- Weaver BL. 1991. The origin of ocean island basalts end-member composition: trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 104: 381–397
- Williams IS and Claesson S. 1987. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides, II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 97: 205–217
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis*. London: Unwin Hyman: 1–464
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 25–343
- Wu J Y and Liu CD. 1989. Geological characteristics of Bayingou ophiolite from northern Tianshan Mountains. *Xinjiang: Acta Petrologica Sinica*, 5: 87 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Zhang GW, Xia ZC, Xu XY, Dong YP and Li XM. 2002a. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks. *Geological Bulletin of China*, 21 (5): 55–62 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2002b. Some thoughts on the characteristics of Paleozoic ocean-continent transition from Tianshan Mountains. *Northwestern Geology*, 35 (4): 9–20 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift volcanic rocks in the Tianshan Mountains, northwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 419–433
- Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li J, Qin KZ and Wang ZH. 2004a. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: implications for the lateral growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society, London*, 161: 339–342
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004b. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304: 370–395
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic evolution of northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House: 1–169 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Ma ZP, Xia ZC, Xia LQ, Li XM and Wang LH. 2005. Discussion of the sources and characteristics on Sr, Nd, Pb isotopes of the Carboniferous to Permian post-collision granites from Tianshan. *Northwestern Geology*, 38 (2): 1–18
- Zhang Q and Zhou GQ. 2001. Ophiolites of China. Beijing: Geological Publishing House, 1–182 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493–571
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005. SHRIMP chronology and the geochemistry of trace elements of Carboniferous volcanic rocks from Western Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 50 (18): 2004–2014 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 高长林, 崔可锐, 钱一雄, 刘斌, 丁道桂, 殷伟. 1995. 天山微板块构造与塔北盆地. 北京: 地质出版社, 132
- 高俊, 肖序常, 汤耀庆. 1993. 南天山库米什蓝片岩的发现及其大地构造意义. *中国区域地质*, 4: 344–347
- 高俊, 汤耀庆, 赵民. 1995. 新疆南天山蛇绿岩的地质地球化学特征及形成环境初探. *岩石学报*, 11 (增刊): 85–97
- 何国琦, 李茂松, 刘德权. 1994. 中国新疆古生代地壳演化与成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 662
- 洪大卫, 王式光, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon(\text{Nd}, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7 (2): 441–456
- 李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. *地质科学*, 34 (4): 405–419
- 李向民, 董云鹏, 徐学义, 夏林圻, 马中平. 2002. 中天山南缘乌瓦门地区发现蛇绿混杂岩. *地质通报*, 21 (6): 304–307
- 李曰俊, 孙龙德, 吴浩若, 王国林, 杨朝世, 彭更新. 2005. 南天山西端乌帕塔坎群发现石炭—二叠纪放射虫化石. *地质科学*, 40 (2): 220–226
- 李曰俊, 王招明, 买光荣, 吴浩若, 黄智斌, 谭泽金. 2002. 塔里木盆地艾克提克群中放射虫化石及其意义. *新疆石油地质*, 23 (6): 496–500
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 5 (6): 552–558
- 卢华夏, 贾承造, 贾东. 2001. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征. *高校地质学报*, 7 (3): 257–271
- 宋彪, 张玉海, 万渝生. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48 (增刊): 26–30
- 汤耀庆, 高俊, 赵民. 1995. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩. 北京: 地质出版社, 215
- 王作勋, 邬继易, 吕喜朝, 张经国. 1990. 天山多旋回构造及成矿. 北京: 科学出版社, 217
- 邬继易, 刘成德. 1989. 北天山巴音沟蛇绿岩的地质特征. *岩石学报*, 5: 76–87
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 徐学义, 董云鹏, 李向民. 2002a. 天山古生代洋盆开启闭合时限的岩石学约束: 来自震旦纪和石炭纪火山岩的证据. *地质通报*, 21 (5): 55–62
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王利社. 2002b. 天山古生代洋陆转化特点的几点思考. *西北地质*, 35 (4): 9–20
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 169
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 430
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 夏林圻, 李向民, 王立社. 2005. 天山石炭—二叠纪后碰撞花岗岩的 Nd, Sr, Pb 同位素源区示踪. *西北地质*, 38 (2): 1–18
- 张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京: 地质出版社, 182
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 郭璇, 周晶. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究. *科学通报*, 50 (18): 2004–2014