

北祁连九个泉玄武岩的形成环境及地幔源区特征： 微量元素和 Nd 同位素地球化学制约¹

钱青¹ 张旗¹ 孙晓猛²

QIAN Qing¹, ZHANG Qi¹ and SUN XiaoMeng²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 吉林大学地质学系, 长春 130022

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Geological Department, Jilin University, Changchun 130022, China

2000-12-28 收稿, 2001-02-28 改回。

Qian Q., Zhang Q. and Sun X.M. 2001. Tectonic setting and mantle source characteristics of Jiugequan basalts, North Qilian: Constraints from trace elements and Nd-isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 385-394

Abstract Basalts from Jiugequan ophiolite, North Qilian mountains, are of MORB-type, and are composed of N MORBs in the lower section and E-MORBs in the upper section. Most of the basalts show negative Nb anomaly. From the bottom to the top, Th, Nb, LREE and Zr contents and $(La/Yb)_N$, $(La/Sm)_N$, Ce/Zr, Zr/Y, Th/La, Th/Yb ratios of the basalts are gradually increased, accompanied with continuous decreasing of Y, Yb, Lu and Sc contents, Zr/Nb and La/Nb ratios, as well as $\epsilon_{Nd}(t)$. In addition, the samples show significant correlations between incompatible element ratios and $\epsilon_{Nd}(t)$, that is, incompatible elements and isotopes are coupled. We interpret these correlations as mixing trends of N-MORB source and OIB source resulting from melting of a heterogeneous mantle domain. Trace elemental and Nd-isotopic characteristics indicate that the Jiugequan ophiolite was from a seamount in a back-arc basin, and the geochemical variations records the motive geological processes that the seamount being gradually developed and moved away from the spreading ridge. It is proposed that many ophiolites were actually from seamounts.

Key words North Qilian mountains, Basalt, Trace element, Nd-isotopes, Seamount

摘要 北祁连九个泉蛇绿岩中的玄武岩为 MORB, 根据其地质产状和地球化学特征又可以分为两部分, 剖面下部的玄武岩为 N-MORB, 上部的玄武岩主要为 E-MORB。玄武岩多数具有 Nb 负异常。从下向上, 九个泉玄武岩的 Th, Nb, LREE, Zr 等含量及 $(La/Yb)_N$, $(La/Sm)_N$, Ce/Zr, Zr/Y, Th/La, Th/Yb 比值逐渐增加, 并伴随着 Y, Yb, Lu, Sc 含量、Zr/Nb 和 La/Nb 比值以及 $\epsilon_{Nd}(t)$ 的逐渐减小。不相容元素比值及 $\epsilon_{Nd}(t)$ 之间具有很好的相关性。上述特征反映不均一地幔部分熔融过程中 N-MORB 源区和富集地幔之间的混合作用。微量元素和 Nd 同位素地球化学特征表明九个泉蛇绿岩形成于弧后盆地中的海山环境, 玄武岩的化学成分在垂向上的变化记录了海山生长并逐渐远离扩张脊的动态的地质过程。海山可能是形成蛇绿岩的一种重要环境。

关键词 北祁连; 九个泉; 玄武岩; 微量元素; Nd 同位素; 海山

中图法分类号 P588.145; P597

1 引言

在全球尺度上, 洋脊玄武岩(MORB)的地球化学成分较为一致(Sun and McDonough, 1989; Niu *et al.*, 1999)。与板

内和汇聚板块边缘的玄武岩相比, MORB 的成分变化较小, 不相容元素和放射性成因 Sr、Pb 同位素含量较低, 放射性成因 Nd 同位素含量较高, 因此, MORB 来自亏损地幔源区(DMM)的部分熔融(Zindler and Hart, 1986)。然而, 几乎在所有的洋脊和洋盆中都发育富集不相容元素的 MORB

• 本文受国家自然科学基金(40002006)资助。

第一作者简介: 钱青, 男, 1969 年生, 博士, 助研, 岩石学专业, E-mail: qq613@263.net

(E-MORB) (Melson *et al.*, 1976; Niu *et al.*, 1999), 并且, MORB 的微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素组成在不同尺度上往往存在细微而有规律的变化 (White and Schilling, 1978; Sigurdsson, 1981; Schilling *et al.*, 1983; Batiza and Vanko, 1984; Zindler *et al.*, 1984; Reynolds *et al.*, 1992; Perfit *et al.*, 1994; Niu *et al.*, 1996, 1999), 这些变化不能够仅仅用部分熔融和结晶分离作用得到完全解释, 而是说明 DMM 本身也存在不同尺度上的不均一性 (Batiza and Vanko, 1984; Zindler *et al.*, 1984; Niu *et al.*, 1996, 1999; Lundstrom *et al.*, 1999)。DMM 不均一性的成因是地幔对流和壳幔演化研究中的重要内容。

在海底扩张的过程中, 新生的洋壳逐渐变老, 离开扩张脊, 海底磁条带记录了这一过程; 而海底玄武岩的地球化学成分可以较磁条带记录更小时空尺度上的这种变化 (Reynolds *et al.*, 1992)。随着海底打捞、深海钻探的持续进行和分析测试技术的迅速发展, 目前人们对洋内各种构造环境的玄武岩的成分变化及其成因已经有了非常细致、深入的认识。蛇绿岩是仰冲到陆壳上的洋壳残片, 其中的玄武岩通常用于确定蛇绿岩的性质、形成的古构造环境以及古地幔源区的特征 (张旗, 1995), 然而, 蛇绿岩中 MORB 成分的细微变化是否也蕴含着更为深入的地质信息呢? 通过对北祁连九个泉蛇绿岩中玄武岩的主量、微量元素和 Nd 同位素的研究,

笔者发现蛇绿岩 (及其伴生) 的玄武岩的地球化学成分可能存在细微的、规律性的变化, 并且这种变化可以反映其形成和演化的动态地质过程, 对判定蛇绿岩的形成环境具有更为细致的制约。

2 地质概况

北祁连造山带位于华北板块和柴达木板块之间, 呈近东西向分布。其中广泛分布着新元古代-早古生代的海相火山岩 (冯益民等, 1996; 夏林圻等, 1996)。九个泉玄武岩形成于中晚奥陶世弧后盆地环境 (冯益民等, 1996; 夏林圻等, 1996; 张旗等, 1997), 其构造位置隶属于许志琴等 (1994) 划分的走廊南山北缘弧后盆地单元, 其南部与大岔大坂岛弧火山岩 (以玻安岩为代表) 相邻 (陈雨等, 1995; 张旗等, 1997)。有的学者将九个泉玄武岩及其下部的地幔橄辉岩和辉长岩称为九个泉蛇绿岩 (冯益民等, 1995)。九个泉蛇绿岩向东可能与甘肃景泰县老虎山蛇绿岩相连, 形成九个泉-老虎山蛇绿岩带 (张旗等, 1997a)。九个泉蛇绿岩向西南逆冲在一套变质砂岩、蓝片岩以及泥盆系红色磨拉石之上 (图 1, 2), 蓝片岩的变质年龄为 447 Ma (宋述光, 1997)。蛇绿岩顶部不整合覆盖着志留系的复理石。

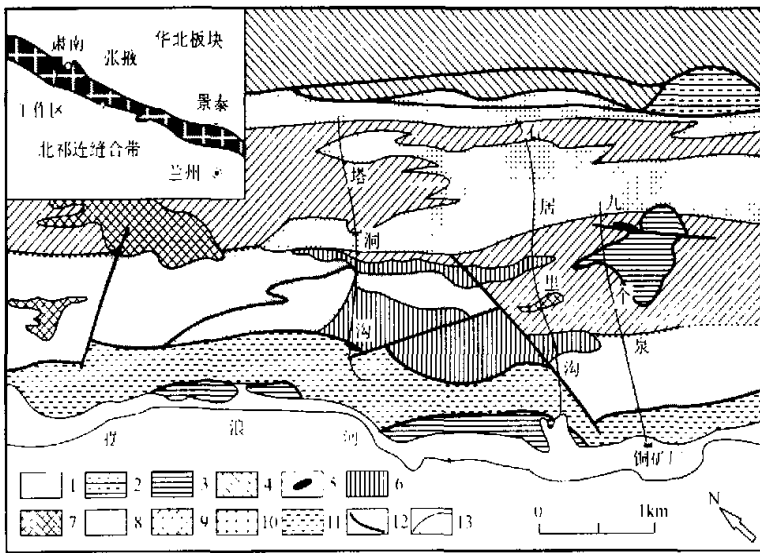


图 1 北祁连九个泉地区地质图

1. 第四系; 2. 三叠系-石炭系; 3. 泥盆系; 4. 志留系; 5. 变质橄辉岩; 6. 辉长岩; 7. 辉绿岩; 8. 玄武岩; 9. 火山-沉积岩组合;
10. 海相沉积岩; 11. 蓝片岩; 12. 断层; 13. 不整合

Fig. 1 Geological map of Jiugequan area, North Qilian Mountains

有的学者进一步将剖面分为上下两部分, 下部主要由变质橄辉岩、辉长岩、火山角砾岩和玄武岩组成, 不含沉积岩层, 被称为九个泉蛇绿岩; 其上部整合覆盖着一套玄武岩和

沉积岩的互层, 被称为蛇绿岩的上覆岩系 (张旗等, 1997, 1998)。

九个泉变质橄辉岩呈大约 100 m 宽的零星岩块, 强烈片

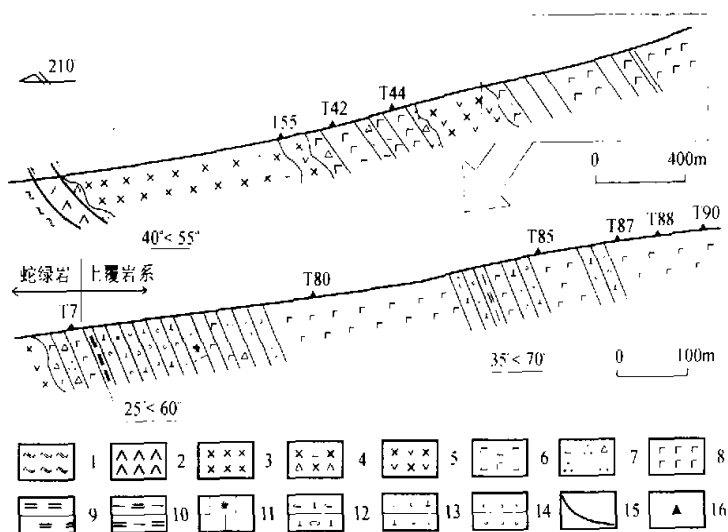


图2 北祁连九个泉地区塔洞沟剖面图

1. 蓝片岩; 2. 变质橄榄岩; 3. 中粗粒辉长岩; 4. 角砾状辉长岩; 5. 中细粒辉长岩; 6. 火山角砾岩; 7. 细火山碎屑岩; 8. 玄武岩;
9. 硅岩; 10. 硅质泥岩; 11. 灰岩; 12. 以火山碎屑为主的含砾砂岩; 13. 以火山碎屑为主的砂岩; 14. 长石岩屑石英砂岩; 15. 断层;
16. 采样点

Fig. 2 Tadungou section in Jiugequan area, North Qilian Mountains

理化、蛇纹石化。辉长岩为侵入于火山岩中的岩床,厚度可达1000 m以上。沉积岩呈层状、透镜状,岩层总体倾向北东,倾角约60°,主要有放射虫硅岩、硅质泥岩、灰岩以及浊积成因的火山碎屑砂岩和粉砂岩,从下到上砂岩层中陆源碎屑的含量有增高趋势;火山碎屑砂岩中常含有少量褐色尖晶石的晶屑,其Cr/(Cr+Al)比值可高达90以上,与玻安岩中尖晶石成分相似,可能来自岛弧火山岩或高度亏损的地幔橄榄岩(钱青,1999)。

九个泉玄武岩主要由块状玄武岩和枕状熔岩组成,夹玄武质火山角砾岩。火山角砾岩厚5~20 m不等,角砾大小在几毫米到几十厘米之间,在同一层内,从下向上角砾有变小的趋势。在剖面的中下部,形成火山角砾岩-玄武岩-细火山碎屑岩的旋回,玄武岩的单层厚度在20~300 m之间。九个泉蛇绿岩及其上覆岩系以塔洞沟剖面出露最齐全(图2)。

3 玄武岩的岩石学特征

镜下观察表明,九个泉玄武岩多数含有斜长石或单斜辉石斑晶,两者常常同时出现,未见橄榄石斑晶,表明岩浆经历了相当程度的分离结晶作用。斑晶大多数小于2mm,含量一般<10%,个别可达25%。玄武岩具典型的淬火结构,根据其基质结构,可分为三类:全隐晶质玄武岩、具辉绿结构的玄武岩和全晶质具粗玄结构的玄武岩。玄武岩中玻璃质普遍蚀变形形成绿泥石,斜长石部分蚀变为钠长石,部分仍较新鲜;

单斜辉石微晶基本新鲜。蛇绿岩与上覆岩系中的玄武岩在矿物组成及结构上没有明显区别。

在九个泉蛇绿岩上覆岩系的顶部还出现少量玄武安山岩,其中的斜长石为0.2~0.3 mm大小的板柱状,含量可达70%,半定向,具安山结构。斜长石间隙中含有大量铁质氧化物。玄武安山岩应为岩浆演化程度较高的产物。

4 玄武岩的地球化学特征

对九个泉地区的部分玄武岩作了常量、微量、稀土元素(表1)和Nd同位素分析(表3)。首先通过显微镜观察,选择蚀变较弱的样品供化学分析。样品在铸铁材料的压机上压碎,筛选出20~40目之间的颗粒,再用玛瑙研钵磨至200目以下。常量元素、Ba、Co、Cr、Nb、Ni、Rb、Sr、V、Y和Zr用中国科学院地质与地球物理研究所 Philips PW1400 X 荧光光谱仪分析。其它微量元素和稀土元素(REE)在中国科学院高能物理研究所用中子活化法(INAA)分析。标样的分析误差为:主量元素,<5%(Na<6%); Ba, Co, Ni, Cr, V, Lu和Eu,<10%; 其它微量元素,<5%。

Nd同位素用中国科学院地质与地球物理研究所 VG-354 固体质谱计分析,分析方法见 Qiao (1988)。La Jolla 标样的测定结果为: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511862 \pm 0.00004$ ($n=13$)。

表2 九个泉塔洞沟剖面玄武岩的不相容元素比值

Table 2 Incompatible element ratios for basalts from Tadungou section, Jiugequan area

样品	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	La/Nb	Ce/Zr	Zr/Nb	Y/Nb	Th/Yb	Th/La	Zr/Y	Ti/Y	剖面	
上	T90	3.96	2.07	0.90	0.16	11.0	2.2	0.83	1.11	5.58	331	上
覆 岩 系	T88	3.65	2.15	1.00	0.16	11.5	2.4	1.00	1.00	4.87	272	↑
	T87	3.61	1.93	1.09	0.18	12.3	2.5	0.98	0.92	4.51	256	
	T85 ₁	2.11	1.33	1.13	0.11	18.5	4.1	0.71	0.88	3.97	262	
	T80	1.52	1.13	1.05	0.13	18.9	5.0	0.34	0.96	3.59	275	
蛇 绿 岩	T7	0.68	0.60	1.29	0.09	40.4	11.0	0.07	0.77	2.84	243	↓
	T44	0.91	0.74	1.43	0.10	36.3	8.9	0.06	0.70	2.86	259	
	T42	0.71	0.64	1.28	0.08	36.1	10.0	0.15	0.78	2.81	246	
	T55	0.60	0.55	1.36	0.11	43.3	12.9		2.47	232	下	
OIB	12.29	2.39	0.77	0.29	5.8	0.8	1.85	1.32	9.66	594		
E-MORB	1.91	1.56	0.76	0.21	8.8	3.5	0.25	1.30	3.32	273		
N-MORB	0.59	0.61	1.07	0.10	31.8	11.2	0.04	0.93	2.64	254		

注: N-MORB, E-MORB 和 OIB 的数据根据 Sun and McDonough(1989)

4.1 主量元素

九个泉玄武岩的 SiO₂ 含量在 47%~52% (两件样品为玄武安山岩), MgO 含量在 5%~9% 之间, TiO₂ 含量大多在 1.5%~2.2% 之间, 少数略大于 1%, Al₂O₃ 含量在 14%~17% 之间, P₂O₅ 含量一般小于 0.3%。玄武岩的 Mg' = 0.45~0.64, 表明经历了一定程度的分离结晶作用 (两件玄武安山岩分别为 0.43 和 0.37, 演化程度更高), 与镜下观察的结论一致。K₂O 含量一般小于 0.4%, 但个别蚀变较强的岩石可达 1%~2%。在 AFM 图和 FeO*/MgO-SiO₂ 图中, 九个泉玄武岩和玄武安山岩呈明显 FeO*/MgO 比值增高的趋势, 属拉斑系列 (钱青, 1999)。

4.2 微量元素

在轻微蚀变及低级变质条件下, 大离子亲石元素 (LILE) (Cs, K, Rb, Ba, Sr) 是活动的, 而 REE 和高场强元素 (HFSE) (Sc, Y, Th, Zr, Hf, Ti, Nb, P 等) 基本保持稳定 (Rollinson, 1993)。因此, 本文主要利用 HFSE 进行讨论。

微量和稀土元素比值计算结果表明, 九个泉玄武岩包括 N-MORB 和 E-MORB 两种类型。在塔洞沟剖面上, 蛇绿岩中的玄武岩都为 N-MORB, 蛇绿岩上覆岩系中的玄武岩都为 E-MORB; 前者 (La/Yb)_N = 0.68~0.91, (La/Sm)_N = 0.60~0.74, Zr/Y = 2.81~2.84, 与世界上典型的 N-MORB 的相应比值基本一致, 后者 (La/Yb)_N = 1.52~3.96, (La/Sm)_N = 1.13~2.15, Zr/Y = 3.59~5.58 (表 2)。九个泉沟剖面的玄武岩成分较塔洞沟略复杂: 蛇绿岩中的玄武岩都为 N-MORB, 蛇绿岩上覆岩系中的玄武岩既有 E-MORB,

也有 N-MORB。在 N-MORB 标准化的微量元素分布图和球粒陨石标准化的稀土分布图中 (图 3a, b), 可以看到, 九个泉蛇绿岩中玄武岩从 La 到 Lu 呈平坦型分布, 而上覆岩系中的玄武岩与世界上典型的 E-MORB 相似。多数样品具有 Nb 负异常, La/Nb 比值 > 1, 但无明显的 Ti 负异常, 与弧后盆地玄武岩的特征相似 (Wilson, 1989), 表明九个泉玄武岩很可能形成于弧后盆地环境, 与前人 (冯益民等, 1996; 夏林圻等, 1996; 1998; 张旗等, 1997) 的认识是一致的。值得注意的是, 在九个泉塔洞沟剖面上, 从下往上, 玄武岩中不相容程度较高的元素 (Th, Nb, La, Ce, Nd 和 Zr) 含量逐渐增高, 并且伴随着不相容程度较低的元素 (Y, Yb, Lu 和 Sc) 含量有规律的降低 (图 3a, b)。相应地, 不相容元素如 (La/Yb)_N, (La/Sm)_N, Ce/Zr, Zr/Y, Th/Yb 和 Th/La 比值呈递增趋势, 而 La/Nb, Y/Nb 和 Zr/Nb 比值则呈递减趋势 (表 2)。在 Zr/Y-Zr, Th/Yb-Nb/Yb, TiO₂-MnO-P₂O₅ 和 Nb-Zr-Y 图中 (图 4a, b, c, d), 塔洞沟剖面从下向上, 玄武岩成分逐渐由洋脊玄武岩向板内玄武岩方向演化。在 V-Ti 图中 (钱青, 1999), 亦有类似现象, 剖面下部玄武岩的 Ti/V 比值在 20~50 之间, 与洋底玄武岩一致; 而剖面上部玄武岩的 Ti/V 比值 > 50, 落在碱性玄武岩范围 (Shervais, 1982)。在 Th/Yb-Nb/Yb 图中, 部分样品落在 MORB 演化区之上, 进入岛弧玄武岩范围, 很可能反映消减作用的影响。

4.3 Sm-Nd 同位素

Sm-Nd 同位素分析表明, 九个泉地区蛇绿岩及其上覆岩系中玄武岩 (包括一个辉绿岩) 的 Nd 同位素比值也有明显的不同, 蛇绿岩中玄武岩的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值介于 0.512980~

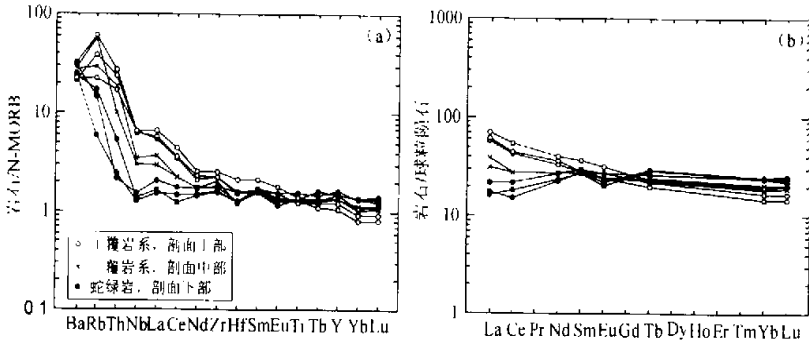


图 3 九个泉塔洞沟玄武岩的 N-MORB 标准化微量元素分布图(a)和球粒陨石标准化稀土分布图(b)
Fig. 3 N-MORB-normalized trace element distribution diagram (a) and chondrite-normalized REE distribution diagram (b) for basalts from Tadungou section, Jiugequan area

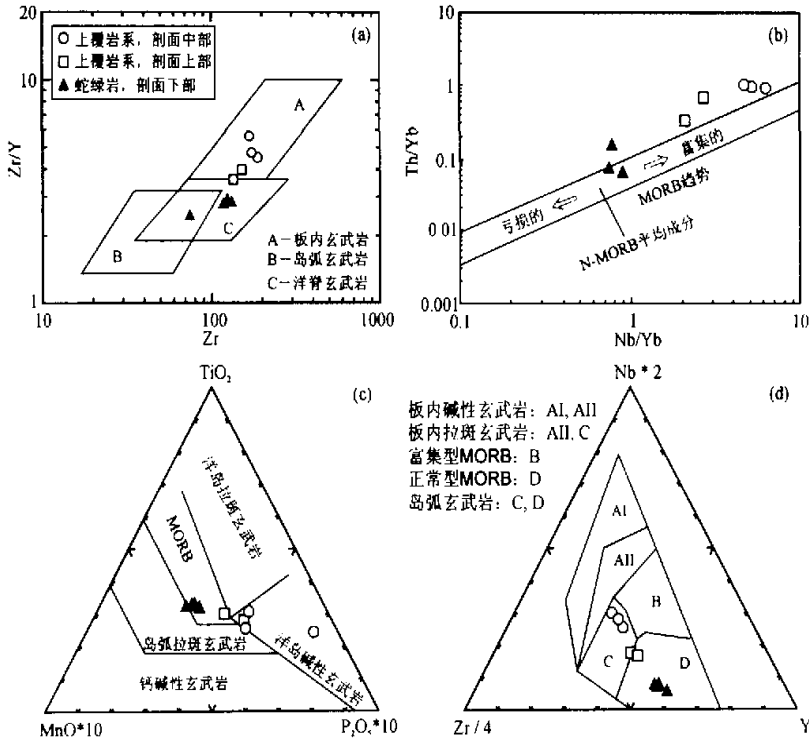


图 4 九个泉地区玄武岩的微量元素判别图解
a. Zr/Y-Zr 图; b. Th/Yb-Nb/Yb 图; c. TiO₂-MnO-P₂O₅ 图; d. Nb-Zr-Y 图
Fig. 4 Trace element discrimination diagrams for basalts from Jiugequan area

0.513049 之间,上覆岩系中玄武岩的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值介于 0.512629~0.512824 之间,明显低于前者。蛇绿岩中玄武岩的 ε_{Nd}(t) 值(按 t=450 Ma 计算)为 +5.5~+6.8,上覆岩系中玄武岩的 ε_{Nd}(t) 值为 +2.7~+4.6,表明它们都来自亏损地幔源区,但后者的地幔源区更富集些。

5 讨论

5.1 九个泉玄武岩的地球化学变化规律

在九个泉塔洞沟剖面,从下往上,玄武岩中不相容元素 Th, Nb, La, Ce, Nd, Zr 的含量以及不相容元素比值

表3 九个泉塔洞沟剖面火成岩的 Sm-Nd 同位素数据

Table 3 Sm-Nd isotopic data for igneous rocks from Jiugequan area

样品	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
T88	4.103	16.86	0.1472	0.512629 \pm 10	-0.1756	2.7
T85	4.4	15.9	0.1674	0.512702 \pm 9	1.2484	2.9
T80	3.871	13.07	0.1791	0.512824 \pm 12	3.6283	4.6
T44	4.128	11.95	0.2089	0.512980 \pm 8	6.6714	6.0
T42	3.814	10.9	0.2117	0.513015 \pm 8	7.3541	6.5
T55	2.498	6.952	0.2173	0.513049 \pm 8	8.0174	6.8

(La/Yb)_N, (La/Sm)_N, Ce/Zr, Zr/Y, Th/Yb 和 Th/La 比值呈递增趋势,并且伴随着元素 Y, Yb, Lu, Sc 含量和 La/Nb, Y/Nb 和 Zr/Nb 比值有规律的降低(表 2,图 3a, b)。总体上玄武岩成分从 LREE 亏损的 N-MORB 向 LREE 富集的 E-MORB 方向演化,板内趋势逐渐增强。分配系数相近的不相容元素之比的明显改变,不可能是低压下橄榄石、斜长石和单斜辉石的分离结晶所引起,而可能是受地幔不均一性影响(Pearce and Cann, 1973)。在 Zr/Y-Zr 图中(图 4a), Zr/Y 比值呈明显增高的趋势可能有以下原因(Pearce and Norry, 1979): (1)地幔源区中存在不均一性; (2)石榴石二辉橄榄岩发生不同程度的部分熔融; (3)单一的地幔源区持续的部分熔融; (4)分离结晶过程中石榴石作为主要结晶相存在。但是,石榴石的存在并不能引起 Ce-Zr, La-Nb, Th-La 及 Zr-Nb 之间的明显分离,因此, (2)和(4)并不能解释九个泉玄武岩中微量元素丰度和比值的规律性变化。

5.2 地幔源区的不均一性

图 3 和 4 直观地显示,九个泉玄武岩中 E-MORB 为 N-MORB 源区和 OIB 源区的混合产物。图 5 表明,九个泉蛇绿岩及其上覆岩系中的玄武岩的微量元素比值(Ti/Y, Zr/Y 和 Ce/Zr, (La/Sm)_N, (La/Yb)_N 和 Sm/Nd)及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 之间,具有很好的线性相关。无论是分离结晶还是部分熔融程度的变化,都不会改变 Nd 同位素比值,因此,九个泉玄武岩不相容元素比值的规律性变化不能用均一地幔源区的持续部分熔融来解释,而是反映了其地幔源区的不均一性。不相容元素比值及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 之间的线性相关说明来自两种不同成分地幔的岩浆之间的混合作用。

5.3 九个泉玄武岩的成因

在九个泉塔洞沟剖面上,从下向上(表 2,图 3,4),玄武岩成分从 N-MORB 向 E-MORB 逐渐演化,板内趋势逐渐增强,并且不相容元素比值和 Nd 同位素比值间线性相关。类似的现象在各大洋中脊都有发现。在北大西洋和印度洋中脊,向附近的洋岛(如 Iceland, Azores, Bouvet 等)方向,玄武岩的 La/Sm 和不相容元素含量递增,形成 E-MORB (White and Schilling, 1978; Sigurdsson, 1981; Schilling, 1983,

1991, 1995),这种现象反映地幔柱-洋脊之间的相互作用(plume-ridge interaction), E-MORB 是 N-MORB 源区和 OIB 源区发生混合的产物(Sun *et al.*, 1975; Schilling *et al.*, 1983, 1995)。然而,在东太平洋中脊(EPR)旁的年轻海山中,发现玄武岩成分具有随时间从 N-MORB 经 E-MORB 向碱性玄武岩演化的趋势(Batiza and Vanko, 1984), LREE, Th, Zr, TiO₂ 的富集伴随着 Sc 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的降低,相关性明显;由于远离地幔柱,该现象很难用地幔柱影响解释,而被认为是均一地幔在部分熔融过程中混合作用形成的(Batiza and Vanko, 1984; Zindler *et al.*, 1984; Niu *et al.*, 1996, 1999)。在扩张脊之下,地幔部分熔融程度较高,地幔中富集脉体的影响常被掩盖,当洋壳离开扩张脊之后,随地幔部分熔融程度减小,地幔中的富集脉体进入熔体的比例增高,形成 E-MORB (Perfit, 1994)。深海钻探资料表明海山往往具有从下向上玄武岩成分逐渐富集的特征 (Shervais, 1982; Robinson P T, 交流)。虽然洋岛玄武岩也具有从下向上不相容元素逐渐富集的特征 (Frey *et al.*, 1991; Leeman *et al.*, 1994),但是,九个泉玄武岩的地球化学成分与洋岛玄武岩明显不同。海山不仅在现今的各大洋中广泛分布,在弧后盆地中也普遍存在 (Ikeda and Yuasa, 1989; Yamashita, 1991; Argnani *et al.*, 1993; Fryer *et al.*, 1997; Prieto *et al.*, 1997; Kamenetsky *et al.*, 1997; Stern and Pearce, 1998; Yaoling Niu, 交流)。

综上所述,笔者认为,九个泉蛇绿岩及其上覆岩系中玄武岩的微量元素和 Nd 同位素的特征及变化,表明它形成于弧后盆地的海山环境。以塔洞沟为代表的九个泉玄武岩在垂向上不相容元素的逐步富集,可能反映洋壳在逐渐离开扩张脊的过程中,随着地幔源区部分熔融程度的减小,岩浆中富集地幔成分比例逐渐增高。玄武岩在垂向上的成分演化记录了海山生长发育和洋壳逐渐离开扩张脊的动态的地质过程。

5.4 海山-蛇绿岩形成的一种重要环境

蛇绿岩是侵位到陆壳上的洋壳残片,1972 年的彭罗斯会议把蛇绿岩定义为“具有特定成分的镁铁-超镁铁岩组合”,张旗(1995)和周国庆(1996)认为蛇绿岩是“产于洋盆扩张脊的洋壳+地幔的岩石组合”。一个完整的蛇绿岩剖面主要包括

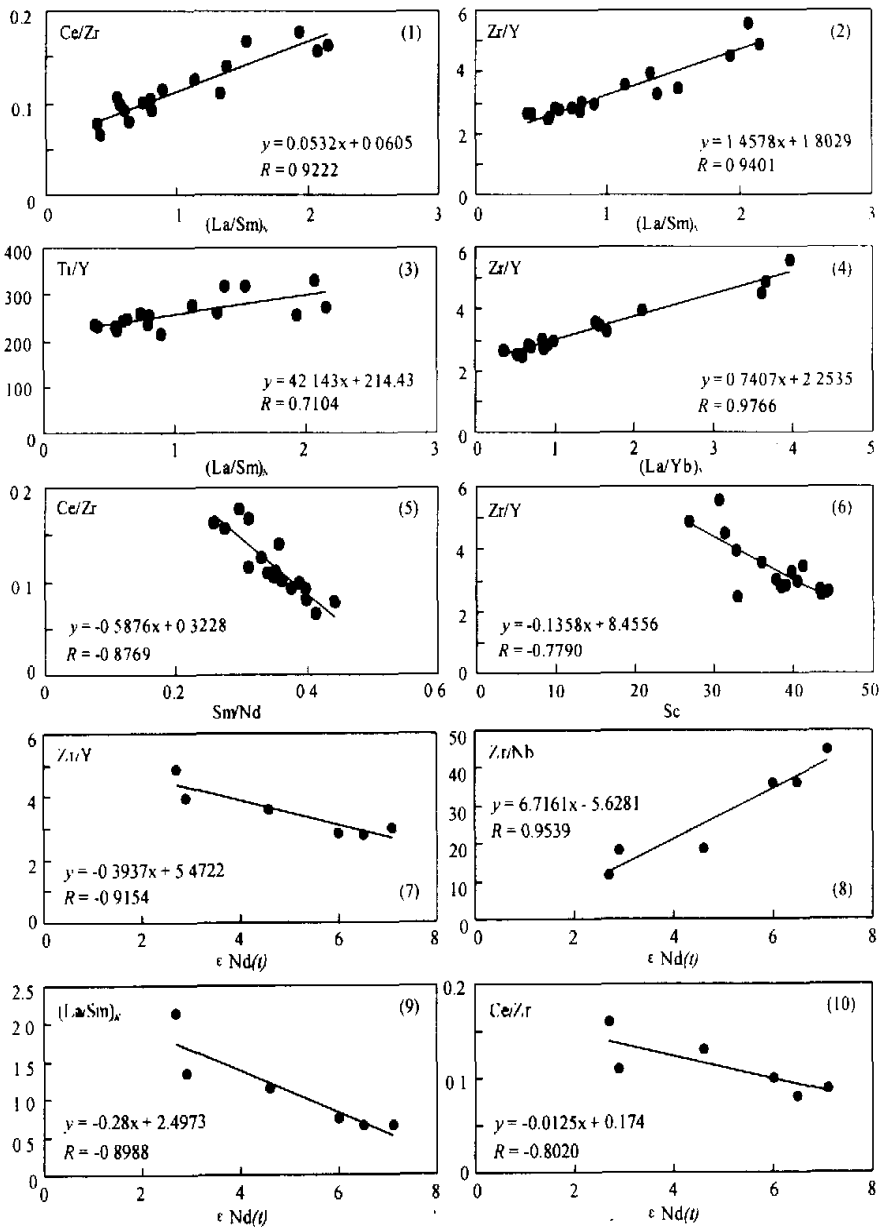


图5 九个泉玄武岩中不相容元素比值及 $\epsilon_{Nd}(t)$ 间的相关图解

Fig. 5 Diagrams of correlations between incompatible element ratios and $\epsilon_{Nd}(t)$ for Jiugequan basalts

四个部分：变质橄榄岩、超碱性-碱性堆晶岩、席状岩墙群和枕状熔岩，然而，世界上绝大多数的蛇绿岩均缺乏席状岩墙群单元，只有少数几个蛇绿岩具有完整的剖面组成，如特罗多斯、阿曼、巴布亚新几内亚、岛湾和日喀则蛇绿岩 (Pearce, *et al.*, 1981; 邓万明等, 1982; Ishiwatari, 1985; Robinson *et al.*, 1990; Elkhon, 1991)。席状岩墙群单元被认为是蛇绿岩形成于板块扩张脊的最重要的证据，但是，特罗多斯、阿

曼、巴布亚新几内亚、岛湾和日喀则蛇绿岩均形成于岛弧环境，也并非典型的洋盆扩张脊环境。通常，不完整的蛇绿岩剖面被认为是受构造肢解所致，不可否认，造山带中的蛇绿岩都受到了不同程度的构造作用，但是，构造肢解作用会优先选择席状岩墙群单元吗？席状岩墙群单元在蛇绿岩剖面中的普遍缺失意味着什么呢？

Zhang *et al.* (1998) 发现蛇绿岩剖面大体可以分为两类，

第一类以特罗多斯为代表,层序齐全,具有席状岩墙群和较厚的堆晶岩单元,第二类由变质橄榄岩、辉长岩和玄武岩组成,缺失席状岩墙群单元。Zhang *et al.* (1998)认为不同的洋壳剖面反映了洋脊之下的不同的动力学过程,第二类蛇绿岩剖面是在慢速扩张和岩浆供给不充分的条件下形成的。根据张旗等(2001),中国的几十个蛇绿岩中,一些明显形成于岛弧环境,例如:唐巴勒、月牙山、安多、丁青、改则、申扎水珠、日喀则、泽当和大盆大坂蛇绿岩;还有很多蛇绿岩中 N-MORB 和 E-MORB 甚至 OIB 共存,例如:松树沟、赣东北、玛依勒、达拉布特、乌苏-巴音沟、长吾阿子、米什沟、鸭子泉、铜厂街、孟连、白马雪山、共卡、双沟、中甸洛吉、甘孜、理塘、碧上、茫崖、德尔尼、玛积雪山、班公湖、公珠错、休古嘎布、拉昂错、贺根山、哈马顶子和九个泉蛇绿岩等。笔者认为,蛇绿岩中 N-MORB、E-MORB 和 OIB 的广泛共存与席状岩墙群的广泛缺失这两种现象之间是有内在的成因联系的,这可能表明很多蛇绿岩形成于海山环境,而不是板块扩张脊环境。海山下面存在岩浆房,但不存在扩张脊,因此不能形成席状岩墙群,所以,很多蛇绿岩“天生”没有席状岩墙群单元,并非构造胶解所致。海山和岛弧都是海底的正地形,在俯冲带较它们正常洋壳更容易被仰冲上陆,这也可以解释为什么蛇绿岩中的岩浆岩很多形成于岛弧环境,也有很多具有轴外(off-axis)岩浆岩的特点。形成于海山环境的蛇绿岩在国内外都有过报道(Chung and Sun, 1992; Meyer *et al.*, 1996)。在地球演化过程中,海山与岛弧可能都对大陆的增生起着重要的作用。

笔者提出,海山可能是蛇绿岩形成的一种重要环境。Edelman (1988)也曾提出,蛇绿岩并不代表正常的洋壳,而是大洋中一种特殊的不稳定构造作用的体现。这当然并不是否认有的蛇绿岩形成于板块扩张脊。但是,很重要的一点,蛇绿岩形成于扩张脊的认识只是建立在板块构造理论基础上的一个假设。蛇绿岩中 N-MORB、E-MORB 和 OIB 常常共存,研究它们在时空上的演化规律及其内在的成因联系,结合大洋岩石学研究的新成果,有可能揭示蛇绿岩中蕴含的更为细致的、动态的地质过程,对明确蛇绿岩的形成环境很有意义。

6 结论

(1) 九个泉蛇绿岩中的玄武岩为 N-MORB, 上覆岩系中的玄武岩主要为 E-MORB, 两者具有不同的微量元素(LREE, Th, Nd, Zr, Y, Yb, Lu 等)含量、比值和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 。大多数玄武岩具有明显的 Nb 负异常, 可能形成于弧后盆地环境。

(2) 九个泉玄武岩的微量元素比值 $(La/Yb)_N$, $(La/Sm)_N$, Sm/Nd , Zr/Y , Zr/Nb , Ce/Zr 等) 以及 $\epsilon_{Nd}(t)$ 之间具有很好的线性相关, 可能是不均一地幔部分熔融的结果。

(3) 九个泉塔洞沟剖面从下向上, 玄武岩不相容元素

Th, Nb, LREE, Zr 等的含量以及 $(La/Yb)_N$, $(La/Sm)_N$, Ce/Zr , Zr/Y 比值逐渐增加, 并伴随着 Y, Yb, Lu, Sc 含量及 Zr/Nb , La/Nb , Y/Nb 比值的逐渐减小, 玄武岩在垂向上的成分变化记录了海山生长发育和逐渐离开板块扩张脊的动态的地质过程。

(4) 除了岛弧环境外, 海山可能是形成蛇绿岩的一个重要环境。后者可以解释许多蛇绿岩中 N-MORB、E-MORB 和 OIB 的共存现象以及席状岩墙群的缺失现象。

致谢 与澳大利亚 Queensland 大学的 Yaoling Niu 博士和加拿大 Dalhousie 大学的 Paul T. Robinson 教授作了有益的讨论。杨玉华高级工程师在 XRF 分析中提供了大力帮助, INAA 由韩松和贾秀琴完成, Nd 同位素分析是乔广生研究员完成的。本文还得到中科院地质与地球物理研究所创新经费的支持。

References

- Argnani A, Savelli C, Borgia A. 1993. Structure and dynamics of Marsili Volcanic Seamount (Tyrrhenian backarc basin). *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 74 (Suppl.): 646
- Batiza R, Vanko D. 1984. Petrology of young Pacific Seamounts. *J. Geophys. Res.*, 89(B13): 11235-11260
- Deng Wanming. 1982. Studies on the igneous petrology of the Yarlung-Zangbo ophiolite, Xizang. In: *Proceedings of Geological Research on Qinghai-Xizang*. Beijing Geological Publishing House, 36-52
- Edelman SH. 1988. Ophiolite generation and emplacement by rapid subduction hinge retreat on a continental-bearing plate. *Geology*, 16: 311-313
- Elthon D. 1991. Geochemical evidence for formation of the Bay of Islands Ophiolite above a subduction zone. *Nature*, 354: 140-143
- Feng Yimin, He Shipin. 1995. Research for geology and geochemistry of several ophiolites in the North Qilian Mountains, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (Suppl.): 125-146 (in Chinese with English abstract)
- Feng Yimin, He Shiping. 1996. Geotectonics and Orogeny of the Qilian Mountains, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract)
- Frey FA, Garcia MO, Wise WS, Kennedy A, Gurriet P and Albarede F. 1991. The evolution of Mauna Kea volcano, Hawaii: petrogenesis of tholeiitic and alkalic basalts. *J. Geophys. Res.*, 96 (B9): 14347-14375
- Fryer P, Gill JB, Jackson MC. 1997. Volcanologic and tectonic evolution of the Kasuga Seamounts, northern Mariana Trough, Alvin submersible investigations. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 79: 277-311
- Ikeda Y, Yuasa M. 1989. Volcanism in nascent back-arc basins

- behind the Shichito Ridge and adjacent areas in the Izu-Ogasawara Arc, Northwest Pacific; evidence for mixing between E-type MORB and island arc magmas at the initiation of back-arc rifting. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 101: 377-393
- Ishiwatari A. 1985. Igneous petrogenesis of the Yakuno ophiolite (Japan) in the context of the diversity of ophiolites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 76: 93-108
- Kamenetsky VS, Crawford AJ, Eggins S, Muehe R. 1997. Phenocryst and melt inclusion chemistry of near-axis seamounts, Valu Fa Ridge, Lau Basin; insight into mantle wedge melting and the addition of subduction components. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 151: 205-223
- Leeman WP, Gerlach DC, Garcia MO and West HB. 1994. Geochemical variations in lavas from Kahoolawe volcano, Hawaii; evidence for open system evolution of plume-derived magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116: 62-77
- Lundstrom CC, Sampson DE, Perfit MR, Gill J and Williams Q. 1999. Insights into mid-ocean ridge basalt petrogenesis U-series disequilibria from the Siqueiros Transform, Lamont Seamounts, and East Pacific Rise. *J. Geophys. Res.*, 104 (B6): 13035-13048
- Melson WG, Vallier TL, Wright TL, Byerly G, and Nelen J. 1976. Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic and Indian Ocean sea-floor spreading centers, in: *The Geophysics of the Pacific Ocean and its Margin: A Volume in Honor of George P. Woollard*, Geophys. Monogr. Ser. Vol. 19, edited by G. H. Sutton, M. H. Manghni, and R. Moberly, 351-368. AGU, Washington, D. C
- Meyer J, Mercolli I, Immenhauser A. 1996. Off-ridge alkaline magmatism and seamount volcanoes in the Masirah island ophiolite, Oman. *Tectonophysics*, 267: 187-208
- Niu Y, Waggoner DG, Sinton JM, Mahoney JJ. 1996. Mantle source heterogeneity and melting processes beneath seafloor spreading centers; The East Pacific Rise, 18°-19°S. *J. Geophys. Res.*, 101(B12): 27711-27733
- Niu, Y., Collerson KD, Batiza R, Wendt I & Regleous M. 1999. The origin of E-type MORB at ridges far from mantle plumes; The East Pacific Rise at 11°20' N. *J. Geophys. Res.*, 104: 7067-7087
- Pearce J A, Alabaster T, Shelton AW, *et al.* 1981. The Oman ophiolite as a Cretaceous arc-basin complex; evidence and implications. *Phil. Trans. R. Lond.*, A 300: 299-317
- Pearce JA, Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19: 290-300
- Pearce JA, Norry MJ. 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33-47
- Perfit MR, Fornari DJ, Smith MC, Bender J F, Langmuir C H, Haymon R M. 1994. Small-scale spatial and temporal variations in mid-ocean ridge crest magmatic processes. *Geology*, 22: 375-379
- Prieto MJ, Gracia E, Canals M, Ercilla G, De Batist M. 1997. Sedimentary history of the central Bransfield Basin (NW Antarctic Peninsula). In: *The Antarctic Region, Geological Evolution and Processes*. Terra Antarctica Publication, Siena, Italy, 711-717
- Qian Qing, 1999. Lithochemical characteristics and geodynamic significance of Jiugequan ophiolite and Jiugequan-Laohushan ophiolite's cover, North Qilian. Institute of Geology and Geophysics, CAS. Doctoral dissertation (in Chinese with English abstract)
- Qiao Guangsheng. Normalization of isotopic dilution analysis. *Scientia Sinica*, 1988, 31: 1263-1268
- Reynolds JR, Langmuir CH, Bender JF, Kastens KA, William BFR. 1992. Spatial and temporal variability in the geochemistry of basalts from the East Pacific Rise. *Nature*, 359: 493-499
- Robinson PT, Malpas J. 1990. The Troodos ophiolite of Cyprus: New perspectives on its origin and emplacement. in: Malpas J, *et al.*, eds. *Ophiolites, Oceanic Crustal Analogues*. Nicocia, Cyprus: Geol. Sur. Dept., 13-26
- Rollinson HR. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Singapore Publishers Ltd.
- Schilling JG, Ruppel C, Davis AN, McCully B, Tighe SA, Kindsley RH, Lin J. 1995. Thermal structure of the mantle beneath Equatorial Mid-Atlantic Ridge; inferences from spatial variations of dredged basalt glass compositions. *J. Geophys. Res.*, 100: 10057-10076
- Schilling JG, Zajac M, Evans R, Johnston T, White W, Devine JD, Kingsley R. 1983. Petrological and geochemical variation along the Mid-Atlantic Ridge from 29° N to 73° N. *Am. J. Sci.*, 283: 510-586
- Schilling JG. 1991. Fluxes and excess temperatures of mantle plumes inferred from their interaction with migration mid-ocean ridges. *Nature*, 352: 397-403
- Shervais JW. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59: 101-118
- Sigurdsson H. 1981. First-order major element variation in basalt glasses from the mid-Atlantic Ridge, 29° N to 73° N. *Journal of Geophys. Res.*, 86: 9483-9502
- Song Shuguan. 1997. Tectonic evolution of subductive complex belts in the north Qilian Mountains. *Advance in Earth Sciences*, 12: 351-365 (in Chinese with English abstract)
- Stern RJ, Pearce J. 1998. Back-arc basin TTG suites, the Mariana Trough example. *Geol. Soc. Am.*, 30: 259
- Sun S-S, and Hanson GN. 1975. Origin of Ross Island basanitoids and limitations upon the heterogeneity of mantle sources for alkali basalts and nephelinites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 52: 77-106
- Sun S-S, McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and

- processes. From Saunders A. D. & Norry M. J. (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society Special Publication, 42: 313–345
- White WM, Schilling JG. 1978. The nature and origin of geochemical variation in Mid-Atlantic Ridge basalts from the central North Atlantic; *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42: 1501–1516
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London; Unwin Hyman.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi *et al.* 1996. Petrogenesis of marine volcanic rocks from North Qilian Mountains. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract)
- Yamashita S. 1991. Origin of felsic magmas at Meiyō-Daini Seamount in Yamato backarc basin, Japan Sea. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 36: 431–441
- Zhang Qi, Qian Qing. 1998. Ophiolite, overlying rock series of ophiolite and their comparison to the oceanic crust. *Earth Science Frontiers*, 5: 193–199 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Sun Xiaomeng, Zhou Dejin, Qian Qing, Chen Yu, Wang Yueming, Jia Xiuqin, Han Song. 1997. The characteristics of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance. *Advance in Earth Sciences*, 12: 366–393 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Zhou Dejin, Chen Yu, Qian Qing. 1998. Two types of ophiolite sections and their genesis. *Progress in Natural Science*, 8: 202–207 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Zhou Guoqing. 2001. *Ophiolites of China*. Science Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi. 1995. Some problems concerning the ophiolite study. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (Suppl.): 228–240 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Science*, 14: 493–571
- Zindler A, Staudigel H, Batiza R. 1984. Isotope and trace element geochemistry of young Pacific seamounts; implications for the scale of upper mantle heterogeneity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70: 175–195

附中文参考文献

- 邓万明. 1982. 雅鲁藏布蛇绿岩带火成岩研究. 青藏高原地质论文专辑, 北京: 地质出版社, 36–52
- 冯益民, 何世平. 1995. 北祁连蛇绿岩的地质地球化学研究. *岩石学报*, 11(增刊): 125–146
- 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用. 北京: 地质出版社, 1996.
- 钱青. 1999. 北祁连九个泉蛇绿岩及九个泉和老虎山“蛇绿岩上覆岩系”的岩石地球化学特征和地球动力学意义. 中国科学院地质研究所博士论文.
- 宋述光. 1997. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化. *地球科学进展*, 12(4): 351–365
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社, 74–129
- 张旗, 钱青, 陈雨. 1998. 蛇绿岩、蛇绿岩上覆岩系及其与洋壳的对比. *地学前缘*, 5(4): 193–200
- 张旗, 孙晓猛, 周德进, 钱青, 陈雨, 王岳明, 贾秀琴, 韩松. 1997. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. *地球科学进展*, 12(4): 366–393
- 张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 科学出版社
- 张旗. 蛇绿岩研究中的几个问题. 1995. *岩石学报*, 11(增刊): 228–240