

# 北秦岭榴辉岩的地球化学特征及形成环境

张安达, 刘 良, 王 焰, 陈丹玲, 罗金海

(西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

**摘要:**地球化学研究表明:北秦岭榴辉岩原岩属于拉斑玄武岩系列,岩石的  $Nb/La=0.68\sim 0.92$ ,  $Ce/Nb=2.11\sim 3.62$ ,  $Th/Yb=0.42\sim 1.00$ ,  $Ti/Zr=75.26\sim 125.84$ ,显示源区具有N-MORB的特征;岩石Nb含量  $9\sim 13\ \mu\text{g/g}$ ,  $Zr/Y$ 值为  $4.24\sim 6.92$ ,同时明显富Ti和Fe,又显示了OIB的特征,因此岩石源区应是N-MORB和OIB两个端元的混合。结合地质资料综合分析,认为北秦岭榴辉岩原岩可能是洋盆中的海山玄武岩,具有洋壳性质,洋壳被消减俯冲到下地壳或地幔深处,经高压变质形成榴辉岩。

**关键词:**榴辉岩;拉斑玄武岩;海山玄武岩;北秦岭

**中图分类号:**P588.14<sup>+5</sup> **文献标识码:**A **文章编号:**1000-274X(2003)02-0191-05

近年来,在秦岭-大别造山带的大别山及东延的苏鲁地区,对高压、超高压变质作用的研究已取得成果,而作为造山带主体的北秦岭,研究比较薄弱。1994年,在北秦岭豫陕交界的官坡一带发现了榴辉岩<sup>[1]</sup>,之后又获岩石矿物内部Sm-Nd等时线年龄为  $(400\pm 16)\text{Ma}$ <sup>[2]</sup>,引起了人们的重视。本文比较系统地研究了北秦岭官坡一带榴辉岩的地球化学特征,以期探讨其原岩性质及其形成的古构造环境。

## 1 区域地质背景

在大地构造分区上,对秦岭-大别造山带一是划分为南、中、北三带;二是将南和中合并,分为南、北两带,各带间均以区域性大断裂带为界(见图1)<sup>[3]</sup>。

已有研究表明,秦岭造山带是经历了多期复杂变形的复合型大陆造山带,剔除晚期构造的叠加改造,重建的古构造环境表明,晚元古宙末—早古生代达到大洋扩张的鼎盛时期,形成了南秦岭的古被动陆缘和北秦岭的活动陆缘,其间发育古秦岭大洋板块。秦岭造山带代表华北与扬子两陆块对接拼合的汇聚带,是研究两陆块及其间南北秦岭相互关系与发展、演化的关键地区,而北秦岭又是秦岭造山带的主体。北秦岭官坡一带榴辉岩出露于北秦岭造山带

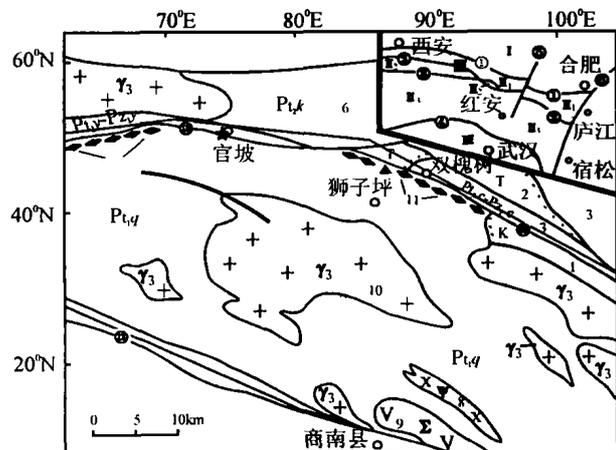


图1 北秦岭榴辉岩产地的地质简图

Fig.1 Geological sketch map of north Qinling

右上角小图: I 华北地块 I 秦岭-大别造山带 I<sub>1</sub>北秦岭造山带 I<sub>2</sub>中秦岭造山带 I<sub>3</sub>南秦岭造山带 II 扬子地块 ① 洛南-深川-明港断裂 ② 商丹-信阳-商城-磨子潭断裂 ③ 山阳-丰镇断裂 ④ 城口-房县断裂 ⑤ 商城-团凤断裂 ⑥ 郟庐断裂 图中黑方块为主图位置;主图中的星号为采样位置;1 白垩系 2 三叠系 3 二郎坪群(Pt<sub>3c</sub>-Pz<sub>1c</sub>) 4 云架山岩群(Pt<sub>3y</sub>-Pz<sub>1y</sub>) 5 丹凤岩群(Pt<sub>3d</sub>-Pz<sub>1d</sub>) 6 宽坪岩群(Pt<sub>2k</sub>) 7 秦岭岩群(Pt<sub>1q</sub>) 8 松树沟超基性岩体( $\Psi$ ) 9 富水基性岩体( $\Sigma$ ) 10 灰池子花岗岩体(中部)和其他花岗岩体( $\gamma_3$ ) 11 高压-超高压带 12 商丹断裂 13 朱夏断裂

收稿日期:2002-03-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(140032010,49672141);教育部骨干教师基金资助项目(教技司[2002]143)。

作者简介:张安达(1976-),男,山东曹县人,西北大学硕士生,从事岩石大地构造学研究。

秦岭岩群北侧(见图 1),位于商丹断裂带之北,以朱夏断裂与其北侧的宽坪群、二郎坪群相接。

## 2 原岩性质

区内 10 件榴辉岩样品的主、微量元素分析结果

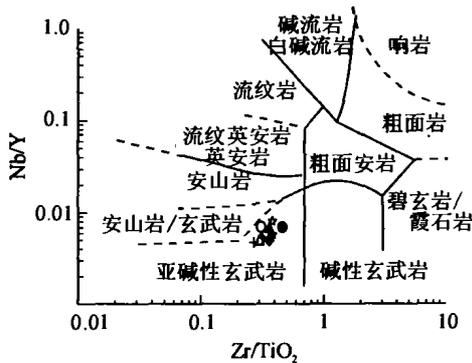


图 2 北秦岭榴辉岩的 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解

Fig. 2 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> diagram of eclogites in north Qinling

列于表 1。在 SiO<sub>2</sub>-Zr/TiO<sub>2</sub>(图略)和 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解(见图 2)<sup>[4]</sup>上,样品的投影点均落在亚碱性玄武岩区,Y/Nb 值均大于 1,应属亚碱性岩石系列。进一步在 AFM 图解(见图 3)和 Nb/Y-Zr/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 图解上(图略),投影点均显示拉斑玄武岩的演化趋势。因此,可认为区内榴辉岩的原岩应为基性火山岩。

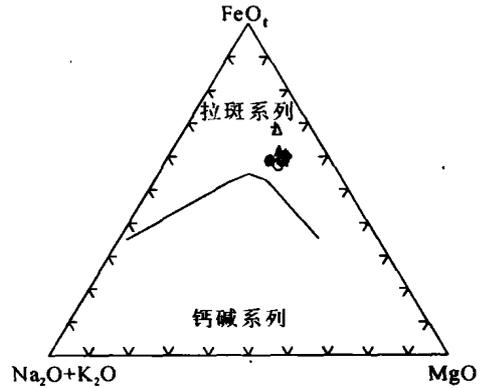


图 3 AFM 岩浆系列判别图解

Fig. 3 AFM diagram of eclogites in north Qinling

表 1 北秦岭榴辉岩主量和微量元素分析结果

Tab. 1 The analytic result for main and trace elements of eclogite in north Qinling ×10<sup>-6</sup>

元素	样 品									
	98Q-61	98Q-65	98Q-71	98Q-72	98Q-73	98Q-74	98Q-81	98Q-84	98Q-85	98Q-87
SiO <sub>2</sub>	49.79	50.13	47.91	49.01	49.00	48.39	46.52	49.16	49.26	47.17
TiO <sub>2</sub>	2.75	1.81	2.78	2.26	2.50	2.67	4.01	1.72	2.76	3.63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.91	13.45	13.26	13.69	13.19	12.71	11.41	13.57	12.49	11.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.69	14.34	15.86	14.25	15.12	15.87	20.04	15.17	15.82	19.54
FeO	11.72	10.90	11.64	10.35	10.80	11.49	15.01	11.41	11.74	14.44
MnO	0.22	0.22	0.22	0.20	0.22	0.22	0.26	0.20	0.22	0.24
MgO	6.46	6.06	6.58	6.71	6.61	6.90	5.99	6.45	6.37	5.91
CaO	9.47	9.91	10.06	10.11	10.15	10.15	9.39	10.74	9.53	9.34
Na <sub>2</sub> O	2.30	2.50	2.32	2.28	2.40	2.29	2.06	2.38	2.23	2.02
K <sub>2</sub> O	0.39	0.44	0.31	0.37	0.34	0.26	0.21	0.34	0.36	0.23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.14	0.17	0.19	0.19	0.18	0.27	0.14	0.24	0.26
Cr	125.90	54.00	118.00	125.50	143.40	147.20	66.90	47.70	105.80	60.70
Ni	60.40	40.40	62.60	69.30	69.10	69.80	63.70	39.90	52.10	77.10
Co	92.20	81.80	73.70	90.90	82.30	101.70	96.20	74.30	105.80	100.10
V	414.00	348.00	474.00	376.00	434.00	487.00	802.00	349.00	384.00	695.00
U	0.60	1.00	0.50	0.40	0.40	0.30	0.50	0.50	0.40	0.60
Pb	1.90	3.20	5.30	6.40	4.40	4.60	0.90	10.70	0.70	1.20
Sr	207.00	201.00	194.00	422.00	186.00	134.00	126.00	122.00	169.00	129.00
Rb	9.00	13.00	9.00	10.00	10.00	8.00	5.00	8.00	8.00	4.00
Ba	141.00	207.00	166.00	145.00	175.00	104.00	72.00	162.00	102.00	135.00
Th	1.80	3.20	1.50	1.30	1.40	1.20	1.90	1.40	1.50	2.10
Ta	1.08	1.08	0.79	0.82	0.86	0.84	1.11	0.65	1.12	1.50
Nb	11.00	12.00	9.00	10.00	10.00	9.00	12.00	9.00	13.00	12.00
Zr	194.00	129.00	142.00	180.00	162.00	134.00	191.00	107.00	189.00	182.00
Hf	2.20	2.60	1.60	1.50	1.70	1.70	3.70	1.10	1.10	2.10
Y	35.00	26.00	27.00	26.00	29.00	25.00	45.00	23.00	36.00	40.00
La	15.50	17.20	12.30	10.90	11.40	8.00	14.40	10.40	14.30	17.70
Ce	34.70	33.30	29.90	26.70	27.10	19.00	32.40	23.10	34.70	42.30
Pr	5.10	4.50	4.20	3.90	3.90	2.70	4.80	3.20	5.00	6.20
Nd	24.90	19.40	20.80	19.80	19.60	13.00	23.80	14.80	25.20	30.90
Sm	7.00	4.90	5.60	5.60	5.40	3.70	6.90	4.10	6.70	8.40
Eu	1.90	1.30	1.70	1.60	1.50	0.90	1.80	1.20	1.80	2.20
Gd	6.60	5.00	5.30	5.30	5.50	4.00	7.00	4.10	6.60	7.80
Tb	1.10	0.80	0.80	0.80	0.90	0.70	1.20	0.70	1.10	1.20
Dy	6.50	5.30	5.20	5.30	5.70	4.40	7.40	4.40	6.70	7.60
Ho	1.40	1.20	1.10	1.10	1.20	1.00	1.60	1.00	1.40	1.60
Er	3.70	3.30	3.10	3.20	3.50	2.80	4.50	2.80	4.00	4.40
Tm	0.50	0.50	0.40	0.40	0.50	0.40	0.60	0.40	0.50	0.60
Yb	3.20	3.20	2.70	2.90	3.20	2.80	4.20	2.80	3.60	3.80
Lu	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.40	0.50	0.50

### 3 元素地球化学特征

从表 1 可看出,区内榴辉岩的  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  和  $\text{TiO}_2$  含量分别为 46.52%~50.13%, 11.14%~13.69%, 5.91%~6.90%, 9.34%~10.74% 和 1.72%~4.01%。其中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  含量偏低,  $\text{TiO}_2$  含量较高(平均为 2.69%)是其显著特征。 $\text{TiO}_2$  含量偏高显然不同于岛弧拉斑玄武岩(岛弧拉斑玄武岩的  $\text{TiO}_2$  含量平均为 0.8%)<sup>[6]</sup>。在  $\text{TiO}_2$ - $\text{MnO}$ - $\text{P}_2\text{O}_5$  图解(见图 4)、 $\text{Ti}/1000$ - $V$  图解(见图 5)中,绝大多数样品均落在 MORB 区,而在  $\text{FeO}/\text{MgO}$ - $\text{TiO}_2$  图解(见图 6)中,大部分样品的投影点落在 OIB 区内。

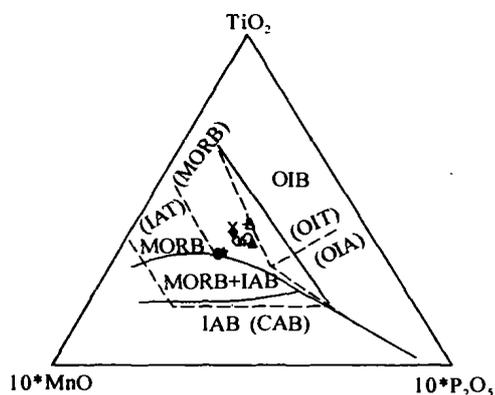


图 4 不同构造环境玄武岩的判别

Fig. 4 Discrimination diagram for the tectonic setting of basalts in north Qinling

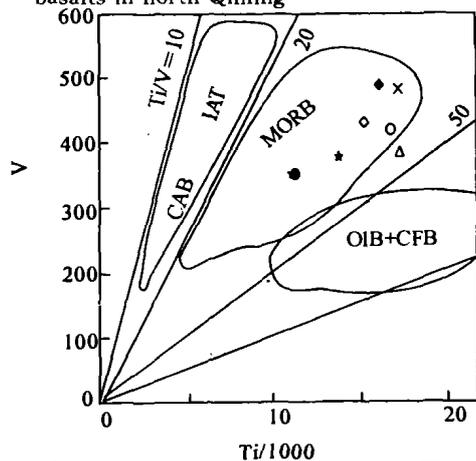


图 5 北秦岭榴辉岩的  $\text{Ti}/1000$ - $V$  图解

Fig. 5  $\text{Ti}/1000$ - $V$  diagram of eclogites in north Qinling

表 1 显示:榴辉岩稀土含量  $63.8 \times 10^{-6} \sim 135.2 \times 10^{-6}$ , 是球粒陨石的 17~38 倍,明显大于 N-MORB 的稀土元素含量(N-MORB 的稀土元素含量一般为球粒陨石的 10~20 倍);LREE/HREE

和  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值较高,分别为 2.87~7.09 和 1.93~3.62,反映它们的轻、重稀土元素发生了分馏。上述值与 N-MORB 明显不同(东太平洋隆起玄武岩的  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.59 \sim 0.97$ )。图 7 为稀土元素球粒陨石标准化配分型式图,为 LREE 略富集型。样品的  $\delta\text{Eu}$  值小于 1,为 0.71~0.94,属于轻微负异常,反映岩石的原岩曾发生了分异结晶作用。

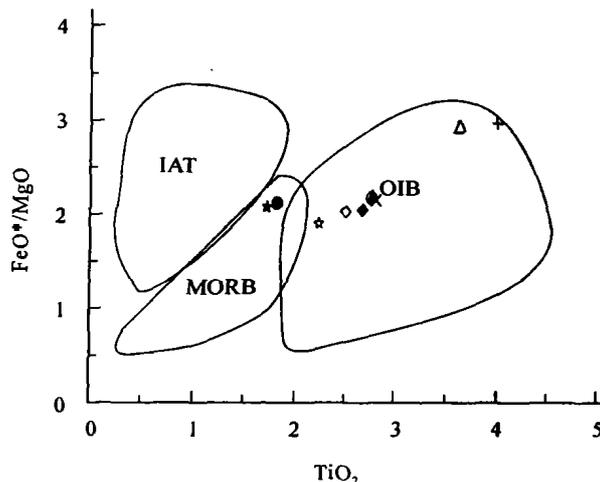


图 6 北秦岭榴辉岩的  $\text{FeO}/\text{MgO}$ - $\text{TiO}_2$  图解

Fig. 6  $\text{FeO}/\text{MgO}$ - $\text{TiO}_2$  diagram of eclogites in north Qinling

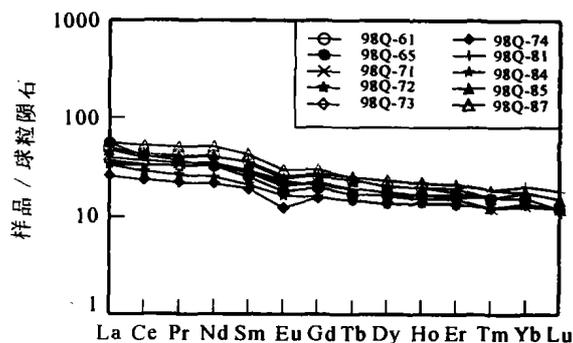


图 7 北秦岭榴辉岩 REE 配分型式图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern of eclogites in north Qinling

由表 1 知,微量元素  $\text{Nb}/\text{La} = 0.68 \sim 0.92$ ,  $\text{Ce}/\text{Nb} = 2.11 \sim 3.62$ ,  $\text{Th}/\text{Yb} = 0.42 \sim 1.00$ ,  $\text{Ti}/\text{Zr} = 75.26 \sim 125.84$ ,表明岩石源区具有 N-MORB 的特征,  $\text{Th}/\text{Ta}$  值(变化于 1.40~2.15)近似相等,因此榴辉岩原岩的形成与消减作用无关。微量元素在 MORB 标准化的蛛网图(见图 8)上,表现出强不相容元素(K, Rb, Ba, Th, Ta, Nb)较之中等不相容元素(Ce, P, Zr, Hf, Sm)富集,并从 Sm 到 Cr 呈现逐渐降低的趋势,有些样品的 Y, Yb 与 N-MORB 的型式相似,没有 Nb(Ta), Ti 的明显负异常。另外,岩石中 Sm-Nd 矿物对的  $\epsilon_{\text{Nd}} = 3.6$ <sup>[2]</sup>,说明其原岩起源于

亏损的软流圈地幔,并暗示有富集地幔物质的加入。

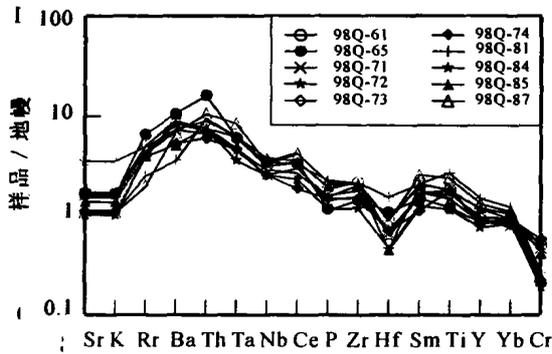


图 8 北秦岭榴辉岩的微量元素配分型式图

Fig. 8 Mantle-normalized trace element diagram of eclogites in north Qinling

在所分析的样品中,区内榴辉岩 Nb 含量近于一致,变化于  $9\sim 13\ \mu\text{g/g}$  之间,与 OIB 的 Nb 含量比较接近,而明显高于 N-MORB 的 Nb 含量(N-MORB 的 Nb 含量为  $4.6\ \mu\text{g/g}$ ,OIB 的 Nb 含量为  $13.0\ \mu\text{g/g}$ )<sup>[5]</sup>; Zr/Nb 为  $10.8\sim 18.0$ ,相当于 N-MORB 和 OIB 之间的过渡类型(N-MORB 的 Zr/Nb 平均为 27,OIB 的 Zr/Nb 平均为 4)<sup>[6]</sup>; Zr/Y 为  $4.24\sim 6.92$ ,显示 OIB 的特征(OIB 的 Zr/Y 为 5.7)。因此,可以认为该榴辉岩兼具 N-MORB 和 OIB 的特征,岩石源区应是 N-MORB 端元和 OIB 混合的结果,但 OIB 的组分可能更多一些。

综上所述,北秦岭官坡地区榴辉岩地球化学特征既不同于典型 N-MORB 的地球化学特征,又与典型 OIB 的地球化学特征有所区别,而是兼有二者的特征。因此,有理由认为岩石源区是 N-MORB 端元和 OIB 端元的混合。

## 4 讨论

本文所述榴辉岩中 Sm-Nd 矿物对的  $\epsilon_{\text{Nd}} = 3.6$ <sup>[2]</sup>,说明岩石起源于亏损的软流圈地幔,并暗示有富集地幔物质的加入。前已述及,该榴辉岩又具有 OIB 的地球化学特征。据文献[7]对赤道附近东太平洋脊(EPR)附近的海山玄武岩样品的分析,海山玄武岩样品在微量元素蛛网图上表现出很大的变化范围,可以从类似 OIB 的熔岩变化到极端亏损的、类似从 EPR 采集到的最亏损 MORB 的样品,说明赤道附近东太平洋脊附近海山下的地幔存在两种端元,一种为亏损的上地幔物质,一种为富集的地幔柱物质,二者在熔融作用之前或熔融作用时以不同比例混合在一起,然后上涌、熔融,从而形成微量元素

组成从亏损至富集变化很大的海山玄武岩。因此,可以推测北秦岭榴辉岩的原岩可能是洋盆中的海山玄武岩,因而具有洋壳性质,当洋盆消减闭合时,洋壳俯冲消减到下地壳或地幔深处,经高压变质形成榴辉岩。

在区域构造上,本文所述榴辉岩与二郎坪蛇绿岩同处于北秦岭造山带之中,并以朱夏断裂相分离(见图 1)。从 20 世纪 80 年代至今,许多学者对北秦岭蛇绿岩进行了多方面的研究,大多认为二郎坪蛇绿岩套是东秦岭造山带中保存最好的古蛇绿岩<sup>[8~16]</sup>。张国伟等已通过区域构造综合研究,提出二郎坪蛇绿岩代表弧后扩张小洋盆的模式<sup>[3]</sup>。文献[16]对二郎坪弧后盆地沉积建造、岩浆活动及变形变质特征进行了综合分析,指出随古商丹洋在早奥陶世扩张至极限,从中奥陶世开始向华北板块之下俯冲,由于板块间相互作用及深部次级地幔对流柱的形成,引起弧后地壳扩张、伸展变薄,地幔物质上侵就位,出现了洋壳并进一步扩展为弧后小洋盆,发育弧后小洋盆型蛇绿岩。但是,文献[17]则认为尽管二郎坪群中存在少量具有 N-MORB 性质的基性熔岩,但缺少变质橄榄岩,二郎坪不是蛇绿岩。“二郎坪蛇绿岩”的存在虽然是有争议的,但本文通过对北秦岭官坡地区榴辉岩的地球化学特征的研究表明,其主要表现为 OIB 的特征,因此其原岩应该是具有洋壳性质的玄武岩,这预示着该区曾经有过洋盆的存在。

## 5 结论

1) 北秦岭造山带榴辉岩的原岩是基性火山岩,其 Y/Nb 均大于 1,应属于拉斑玄武岩系列。微量元素比值  $\text{Nb/La} = 0.68\sim 0.92$ ,  $\text{Ce/Nb} = 2.11\sim 3.62$ ,  $\text{Th/Yb} = 0.42\sim 1.00$ ,  $\text{Ti/Zr} = 75.26\sim 125.84$ ,表明岩石源区具有 N-MORB 的特征。Nb 含量近于一致,介于  $9\sim 13\ \mu\text{g/g}$  之间,Zr/Y 值为  $4.24\sim 6.92$ ,同时明显富 Ti 和 Fe,显示了 OIB 的特征。因此,其原岩源区应是 N-MORB 端元和 OIB 两个端元的混合。

2) 结合区域地质构造和地球化学特征综合分析表明,北秦岭榴辉岩的原岩可能是洋盆中的海山玄武岩,具有洋壳性质。当洋壳被消减俯冲到下地壳或地幔深处时,经高压变质形成榴辉岩,之后再抬升出露地表。

## 参考文献:

- [1] 胡能高,王涛,杨家喜,等.东秦岭秦岭岩群中榴辉岩的发现及其地质意义[J].西安地质学院学报,1994,16(2):105-106.
- [2] 胡能高,杨家喜,赵东林.北秦岭榴辉岩 Sm-Nd 同位素年龄[J].矿物学报,1996,16(4):349-352.
- [3] 张国伟.秦岭造山带的形成及演化[M].西安:西北大学出版社,1987.1-64.
- [4] 王仁民,贺高品,陈珍珍,等.变质岩原岩图解判别法[M].北京:地质出版社,1987.
- [5] HOLM P E. The geochemical fingerprints of different tectonomagmatic environments using hydro-magmatophile element abundances of tholeiitic basalts and basaltic andesites[J]. Chem Geol, 1985, 51: 303-323.
- [6] SUN S S. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs [J]. Phil R Soc Lon A, 1980, 297: 409-445.
- [7] NIU Y L, BATIZA R. Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the eastern Pacific mantle[J]. Earth Planet Sci Lett, 1997, 148: 471-483.
- [8] 张秋生.中国东秦岭变质地质[M].长春:吉林人民出版社,1980.
- [9] 林潜龙,符光宏,张建军.东秦岭汤河-二郎坪-刘山崖-马馱蛇绿岩套[J].河南地质,1984,2(2):45-55.
- [10] 于贵田,田国良,廉杰三.桐柏地区蛇绿岩[J].河南地质,1984,2(2):56-63.
- [11] 汤耀庆,卢一伦.东秦岭蛇绿岩的形成和构造环境[J].成都地质学院学报,1986,13(2):52-65.
- [12] 孙勇,卢欣祥,韩松,等.北秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩片的组成和地球化学[J].中国科学(D辑),1996,26:49-55.
- [13] 贾承造.东秦岭板块构造[M].南京:南京大学出版社,1988.
- [14] 胡受溪,林潜龙.华北与华南板块拼合带地质和找矿[M].南京:南京大学出版社,1988.
- [15] 许志琴,卢一伦,汤耀庆.东秦岭复合山链的形成-变形、演化及板块动力学[M].北京:中国环境科学出版社,1988.
- [16] 李亚林,张国伟,宋传中.东秦岭二郎坪弧后盆地双向式俯冲特征[J].高校地质学报,1998,4(3):286-293.
- [17] 张旗,周国庆.中国蛇绿岩[M].北京:科学出版社,2001.

(编辑 张银玲)

## Geochemistry and tectonic setting of the protolith of eclogites in north Qinling

ZHANG An-da, LIU Liang, WANG Yan, CHEN Dan-ling, LUO Jin-hai

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** The protolith of eclogites in north Qinling belongs to tholeiitic basalt. The ratios of Nb/La, Ce/Nb, Th/Yb and Ti/Zr of the eclogites are 0.68~0.92, 2.11~3.62, 0.42~1.00 and 75.26~125.84, respectively, showing the characteristics of N-MORB. However, Their Nb contents of 9~13  $\mu\text{g/g}$  and Zr/Y ratios of 4.24~6.92, together with the enrichment of Ti and Fe, show the affinity of OIB. Therefore the protolith of the eclogites is probably derivation from the source with the mixture of N-MORB and OIB members. Based on regionally geological information, the protolith of eclogites is possibly seamount basalt in the oceanic basin, and is of the component of oceanic crust. The basalts subducted downward to the low crust or the mantle, and metamorphized to eclogite at high-pressure.

**Key words:** eclogite; tholeiitic basalt; seamount basalt; north Qinling