

# 北秦岭松树沟超镁铁质岩体接触变质带中锆石特征及其地质意义

李洪英<sup>1</sup>, 刘军锋<sup>2</sup>, 杨磊<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037 2 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素重点实验室, 广东 广州 510640 3 中海石油研究中心, 北京 100027)

**摘要:** 松树沟超镁铁质岩体位于秦岭商丹断裂以北, 是该地区出露最大的超基性岩体, 以侵位方式与秦岭杂岩接触。该岩体主要由细粒纯橄岩、中粗粒纯橄岩和斜辉橄岩组成。对松树沟超镁铁质岩体接触变质带榴闪岩中锆石包裹体成分及锆石微量元素含量进行了研究, 结果表明松树沟超镁铁质岩体与相邻的镁铁质岩 (主要是斜长角闪岩) 不是同一构造旋回的地质体。斜长角闪岩先形成, 之后松树沟岩体侵位其中。斜长角闪岩的地球化学特征显示其具有 MORB 和 IAT 两个端员组分特征, 很可能是秦岭群的组成部分。

**关键词:** 松树沟; 镁铁质岩体; 锆石; 地球化学

中图分类号: P588.12<sup>+</sup> § P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)03-0225-10

## Characteristics of zircons from a metamorphic contact zone of the Songshugou ultramafic pluton in North Qinling and their geological significance

LI Hong-yi<sup>1</sup>, LIU Jun-feng<sup>2</sup> and YANG Lei<sup>3</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2 Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China 3 Research Center, CNOOC, Beijing 100027, China)

**Abstract** The Songshugou ultramafic pluton north of the Shangdan fault is the largest ultramafic body in the East Qinling Orogen and assumes the emplacement contact with the Qinling complex. The pluton is composed mainly of fine-grained as well as medium- and coarse-grained dunite and plagioclase-pyroxene peridotite. Debates exist concerning whether ultramafic rocks and adjacent mafic rocks were formed in the same tectonic cycle and whether they experienced a common metamorphism-deformation event or not. This paper presents new data on the inclusions and trace element concentrations of zircons from garnet amphibolites that occur in a metamorphic contact zone. Studies indicate that the ultramafic intrusion and adjacent amphibolites experienced different tectonic events, and the ultramafic pluton was emplaced in amphibolites formed before. Geochemical data suggest that amphibolites have characteristics of MORB and IAT and likely belong to the Qinling Group.

**Key words** Songshugou mafic pluton; zircon; geochemistry

松树沟超镁铁质岩体是秦岭造山带出露最大的阿尔卑斯型纯橄岩体, 出露面积超过 20 km<sup>2</sup>。由于其特殊的地质意义, 自发现以来, 就受到国内外地质学者的重视 (安三元等, 1981; 许志琴等, 1988; 高

收稿日期: 2009-01-16 修订日期: 2009-03-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本业务费资助项目 (K0810)

作者简介: 李洪英 (1979-), 女, 博士研究生, 主要从事矿床地球化学研究, E-mail: lhongying@163.com.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

山等, 1990; 李曙光等, 1991; 刘良等, 1995; 周鼎武等, 1995; 董云鹏等, 1997; 张国伟等, 2001; 苏犁等, 2005; 王希斌等, 2005; 刘军锋等, 2005)。一些研究者将该超镁铁质岩体及其外围的镁铁质岩 (主要是斜长角闪岩) 一并认为是一套洋壳蛇绿岩残片 (汤耀庆等, 1986; 匡少平等, 1993; 周鼎武等, 1995; 董云鹏, 1996; 裴先治等, 1996; Li *et al.*, 2004)。但该岩体的成因一直存在争议, 尤其是超镁铁质岩和相邻的镁铁质岩体是否是同一构造旋回的地质体, 是否经历了共同的变形变质过程等问题还没有明确的回答。本次研究选择采自接触变质带榴闪岩中的锆石, 在已有年代学研究的基础上, 对其包裹体成分和锆石微量元素含量进行分析, 结合镁铁质岩的地球化学特征, 对超镁铁质岩和外围镁铁质岩的关系进行研究。

## 1 地质背景及采样位置

松树沟地区位于北秦岭构造带的南部边缘, 在商丹主边界断裂带北侧。区内出露地质体主要有松树沟超镁铁质岩和镁铁质岩、秦岭群变质杂岩以及富水杂岩体。它们分属于不同时代, 各具不同岩石组合和构造面貌, 但都遭受了角闪岩相和绿片岩相两期主要的区域变质作用及构造变形的叠加改造, 此外还遭受了高压麻粒岩相的区域变质作用和构造变形的改造 (刘良等, 1995, 1996), 现今表现为由断层分隔的构造岩块、岩片叠置成组合体 (图 1)。秦岭群变质杂岩是一套经历了长期构造演化的变质结晶杂岩, 主要由斜长片麻岩、斜长角闪岩和大理岩组成。同位素研究表明, 其主体形成时代为早元古代,

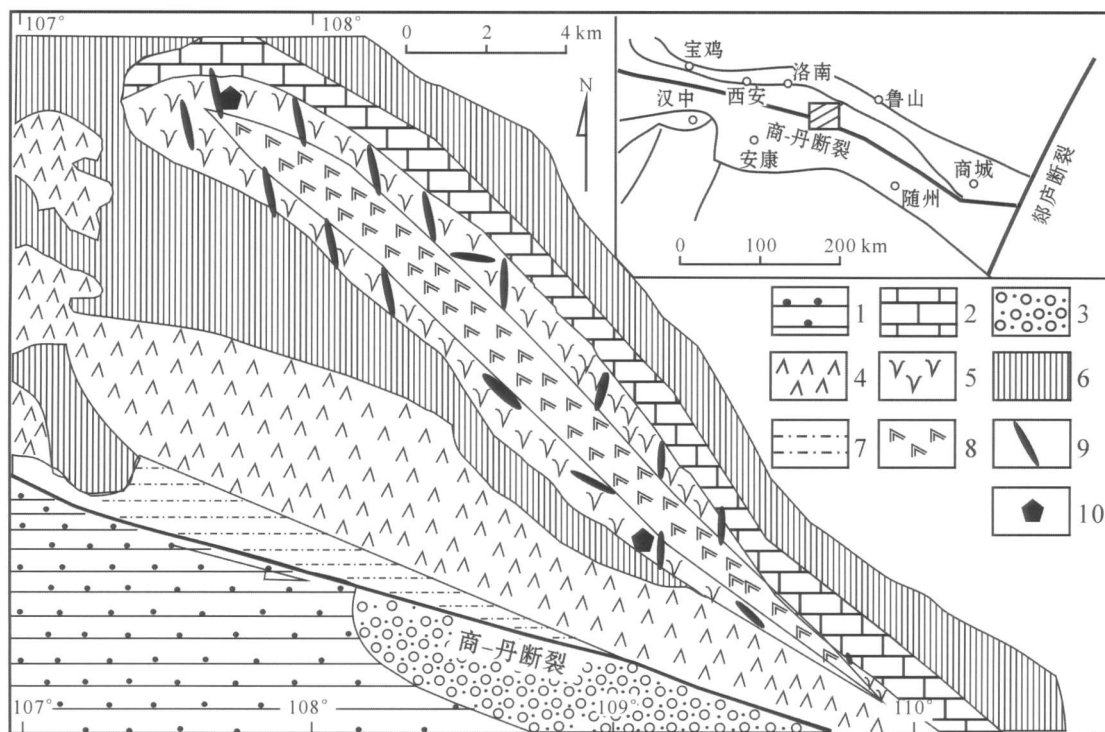


图 1 松树沟岩体及采样位置略图 [据董云鹏等 (1997) 修改]

Fig 1 Distribution of Songshugou ultramafic pluton and sampling locations (modified after Dong Yunpeng *et al.*, 1997)

1—变质砂岩; 2—大理岩; 3—白垩系到新近系; 4—富水杂岩; 5—斜长角闪岩; 6—秦岭群变质杂岩; 7—韧性剪切带; 8—超镁铁岩体;  
9—榴闪岩; 10—采样位置

1—metamorphosed sandstone 2—marble 3—Cretaceous-Neogene 4—Fushui complex 5—amphibolite 6—Qinling complex 7—ductile shear zone  
8—ultramafic body 9—garnet plagioclase amphibolite 10—sampling location

大约 20 亿年左右 (张宗清等, 1994)。富水杂岩主体为粗粒-细粒浅色变辉长岩, 还有暗色变辉长岩、变辉岩和超基性岩, 多呈不规则的大小不等的角砾状、团块状或蝌蚪状包裹于浅色变辉长岩中, 角闪黑云二长

岩中锆石 U-Pb 同位素研究表明, 其形成时代也是早元古代, 大约为 514 Ma 左右 (陈志宏等, 2004)。

商南县松树沟超镁铁质岩体位于陕西省商南县境内商州丹凤断裂之北。岩体长约 18 km, 最宽处约

2 km, 面积约 20 km<sup>2</sup>, 是中国境内出露最大的阿尔卑斯型橄榄岩体。南部以西沟断裂与富水基性侵入杂岩体相邻, 北部以界岭韧性剪切带与秦岭群变质杂岩相分割(图 1)。松树沟超镁铁质岩体与围岩的接触比较简单, 界限清楚, 见不到同化混染现象。野外观察发现, 接触变质带主要可分为内外两个带。内带为榴闪岩带, 宽约 1~2 m, 主要由石榴石和角闪石组成, 大颗粒的石榴石可见环带结构, 周围有后成合晶形式产出的斜长石和角闪石, 内侧夹有滑石、透闪石和蛇纹石等低温矿物。外带主要由透镜状细粒斜长角闪岩组成, 主要矿物是斜长石和角闪石, 一般厚 1m 左右, 具不等粒变晶结构, 偶尔可见帘石。松树沟超镁铁质岩体主要由细粒纯橄岩、中粗粒纯橄岩和斜辉橄榄岩组成。岩体边缘为一规则的接触变质带。接触带往外依次是斜长角闪岩、大理岩和片麻岩。此外, 在超镁铁质岩体的南侧韧性剪切带还有高压基性麻粒岩(刘良等, 1995, 1996)。该麻粒岩多呈片麻理的块状, 主要组成矿物有石榴石、单斜辉石、斜长石、斜方辉石及少量石英和不等量的角闪石, 副矿物有金红石、磁铁矿、钛铁矿和磷灰石等。

锆石样品选自该岩体北侧接触变质带的榴闪岩中。榴闪岩带平均宽 2~3 m, 最宽处不过 10m。岩石呈深绿灰色, 粒状变晶结构, 以块状构造为主。主要组成矿物有石榴石、角闪石、斜长石, 且含有少量帘石、榍石、石英等矿物。

斜长角闪岩采自岩体南侧的小松树沟。样品呈灰绿色, 粒状变晶结构、块状构造。多数长石属于钠长石。特征矿物组合为斜长石、角闪石、帘石、石英、榍石等。

## 2 测试方法

所有测试工作都在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。选择 2 件榴闪岩样品进行锆石挑选, 共挑选 12 颗锆石, 对挑选好的锆石, 先做好样品靶, 进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究。利用美国 FEI 公司生产的 FEG quanta 400 热点电场发射环境扫描电子显微镜, 配套英国牛津仪器公司 NCA 350 能谱仪, 对锆石中包裹体组成进行分析。仪器工作电压 20 kV, 电流 SP=40 A。

为了进一步研究, 还测试了锆石部分元素含量: <sup>31</sup>P, <sup>42</sup>Ca, <sup>45</sup>Sc, <sup>89</sup>Y, <sup>139</sup>La, <sup>140</sup>Ce, <sup>141</sup>Pr, <sup>143</sup>Nd, <sup>147</sup>Sm, <sup>151</sup>Eu, <sup>157</sup>Gd, <sup>159</sup>Th, <sup>163</sup>Dy, <sup>165</sup>Ho, <sup>166</sup>Er, <sup>169</sup>Tm, <sup>173</sup>Yb, <sup>175</sup>Lu。

<sup>208</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U。测试使用的 ICP-MS 为 PerkinElmer/SC EX 公司最新一代、带有动态反应池的四极杆 ICP-MS 7500。所采用的激光剥蚀系统为德国 Microlas 公司生产的 GeoLas 200 M。测试使用的标准锆石是 91500 和 TEM, 硅酸盐玻璃标准参考物 NIST 610 作外标。数据处理及元素浓度计算采用 GLITTER (Version 4.0) 软件进行。

斜长角闪岩地球化学研究, 主量元素测试选用日本理学公司的 XRF。微量元素的分析仪器 ICP-MS 为 Perkin Elmer/SC EX 公司新一代有动态反应池的四极杆 ICP-MS Eln6100DCR, 该仪器可以在一般模式和 DRC 模式下运行。测试采用人工进样, 用 Rh 作内标, 外标是 BHVO-1。具体测试标准及仪器工作参数见相关文献(柳小明等, 2002)。

## 3 测试结果

### 3.1 锆石年龄

对选取的 12 颗锆石进行了 15 点的测试, 结果显示所有的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 数据都分布在 499.8~521.3 Ma 间, 各点的年龄结果非常一致(表 1)。<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权平均年龄为 506.2±7.4 Ma(图 2)。同时对测试数据进行了 Th/U 的计算, 所有测试点的该值都远小于 0.1, 具有变质锆石的特征。

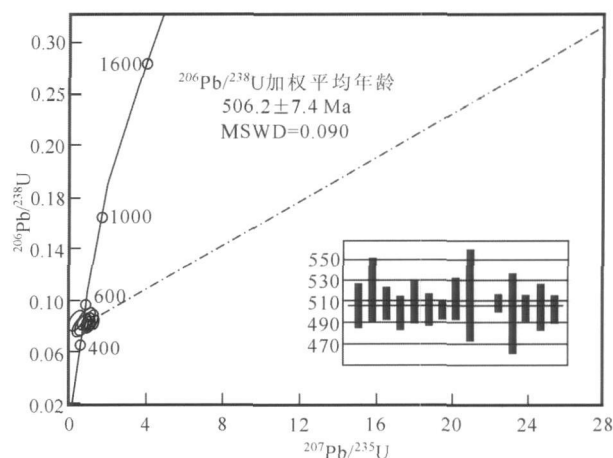


图 2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig 2 Concordia diagrams showing U-Pb analyses of zircons

### 3.2 锆石稀土元素特征

扫描电镜能谱对接触变质带锆石中包裹体的分析结果表明其是斜长石(图 3)。锆石样品的稀土元素分析结果见表 2 稀土元素配分图见图 4。绝大多数锆石颗粒稀土元素配分模式是一致的, 具有明显

表 1 松树沟超镁铁质岩体接触变质带榴闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果  
Table 1 U-Pb zircon data for garnet amphibolite from a metamorphic contact zone in Songshugou

样号	$w_R/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	U	Th		Pb *	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	
LJF-1.01	11.24	0.446	1.038	0.080 04	0.013 30	0.903 81	0.146 32	0.081 90	0.003 44	1 198.0	296.89	653.8	78.04	507.5	20.47
LJF-1.02	4.24	0.019	0.391	0.064 76	0.019 29	0.751 97	0.220 02	0.084 22	0.005 12	766.6	526.96	569.4	127.52	521.3	30.42
LJF-1.03	21.16	0.927	2.009	0.057 98	0.007 57	0.656 91	0.083 99	0.082 17	0.002 50	528.8	263.48	512.7	51.47	509.1	14.92
LJF-1.04	9.16	0.509	0.757	0.073 24	0.009 94	0.814 97	0.108 02	0.080 71	0.002 64	1 020.7	252.75	605.2	60.43	500.4	15.76
LJF-1.05	7.85	0.245	0.722	0.208 60	0.018 93	2.368 49	0.198 99	0.082 36	0.003 17	2 894.7	140.09	1 233.1	59.98	510.2	18.86
LJF-1.06	14.26	0.609	1.278	0.068 09	0.008 04	0.762 19	0.087 73	0.081 19	0.002 42	871.4	227.07	575.3	50.55	503.2	14.43
LJF-1.06	28.51	1.907	2.366	0.070 52	0.003 99	0.788 30	0.043 49	0.081 09	0.001 37	943.4	111.64	590.2	24.70	502.6	8.18
LJF-1.07	9.73	0.050	1.144	0.104 76	0.013 75	1.198 37	0.151 55	0.082 97	0.003 27	1 710.2	223.77	799.8	70.00	513.8	19.46
LJF-1.08	3.67	0.084	0.357	0.067 84	0.029 30	0.781 33	0.331 65	0.083 52	0.007 23	863.8	706.22	586.1	189.07	517.1	43.00
LJF-1.08	5.55	0.137	0.547	0.091 30	0.022 98	1.052 01	0.256 14	0.083 58	0.005 88	1 452.7	415.87	729.9	126.74	517.5	34.95
LJF-1.09	30.77	0.523	2.623	0.054 36	0.003 24	0.615 92	0.035 97	0.082 19	0.001 35	385.8	128.43	487.3	22.60	509.2	8.01
LJF-1.10	3.03	0.016	0.223	0.061 98	0.033 49	0.688 82	0.369 01	0.080 61	0.006 21	673.5	863.96	532.1	221.86	499.8	37.04
LJF-1.11	19.44	1.081	1.679	0.066 30	0.006 06	0.744 7	0.066 38	0.081 47	0.001 95	816.0	180.20	565.1	38.63	504.9	11.64
LJF-1.12	8.42	0.441	0.739	0.065 76	0.012 07	0.739 79	0.132 48	0.081 59	0.003 63	798.8	343.73	562.3	77.32	505.6	21.64
LJF-1.12	16.12	0.217	1.517	0.117 16	0.009 05	1.311 79	0.096 54	0.081 21	0.002 22	1 913.3	132.56	850.9	42.40	503.4	13.25

的重稀土元素富集特征。只有点 L<sub>JF</sub>-1 03 具有异常高的稀土元素含量和 Eu 的负异常,但其位置附近的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄是 509 1 M a(表 1),和其他点的年龄在误差范围内一致。

3 3 斜长角闪岩常量元素和微量元素特征

镁铁质岩体组成几乎全是斜长角闪岩,因此本次主要测试的是斜长角闪岩。从表 3 可知,斜长角闪岩的 S<sub>D2</sub> 含量在 47% ~ 51% 之间, A<sub>1</sub>O<sub>3</sub> 含量为 13. 2% ~ 15. 95%, T<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量在 1% ~ 2% 之间, T<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量较高, K<sub>2</sub>O ( 0 38% ~ 0 89% ) 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ( 0 09% ~ 0 23% ) 含量较低(表 3)。AFM 图显示斜长角闪岩为低钾拉斑系列,在斜长角闪岩的 T<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-10 M nO-10 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 图中落入 MORB 和 AT 区域内(图 5)。

从斜长角闪岩的稀土元素配分图(图 6)可知, ΣREE 为 55 × 10<sup>-6</sup> ~ 80 × 10<sup>-6</sup>, (La/Yb)<sub>N</sub> 为 1. 5~2. 0 (La/Sm)<sub>N</sub> 为 1. 8 左右,表现为轻稀土元素略富集特征。δEu 的值在 1. 1 左右,不具有异常。稀土元素配分图具有明显的右倾特征, LREE 富集, 重稀土元素相对比较平坦。

由斜长角闪岩的微量元素蛛网图(图 6b)可知,斜长角闪岩明显富集 Rb( 13 × 10<sup>-6</sup> > 2 × 10<sup>-6</sup> )和 Ba ( 113 2 × 10<sup>-6</sup> > 20 × 10<sup>-6</sup> ), 强不相容元素具有明显的右倾特征,而部分样品却显示 Z<sub>K</sub> H<sub>T</sub> 的负异常,显示有消减组分的加入。但同时 Nb 含量为 6. 3 ×

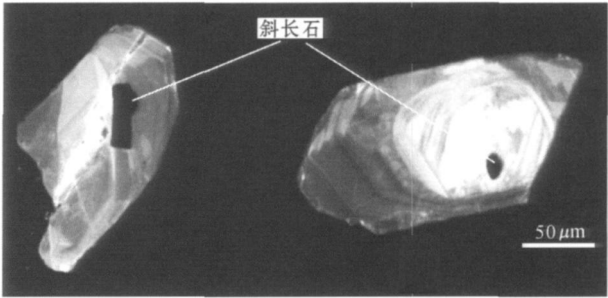


图 3 接触变质带榴闪岩中锆石 CL 照片  
Fig. 3 CL images of zircons from garnet amphibolite in a metamorphic contact zone

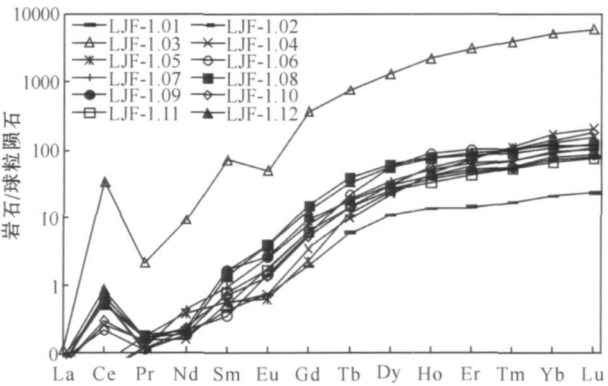


图 4 接触变质带榴闪岩中锆石的 REE 球粒陨石标准化图  
Fig. 4 Chondrite-normalized REE-patterns of zircons from garnet amphibolite in a metamorphic contact zone

表 2 接触变质带榴闪岩中锆石的部分微量元素含量														$w_B / 10^{-6}$
Table 2 Trace element concentrations of zircons from garnet amphibolite in a metamorphic contact zone														
元素	LJF-1. 01	LJF-1. 02	LJF-1. 03	LJF-1. 04	LJF-1. 05	LJF-1. 06	LJF-1. 07	LJF-1. 08	LJF-1. 09	LJF-1. 10	LJF-1. 11	LJF-1. 12	NIST610	
<sup>29</sup> Si	153225	23 153225	22 153225	22 153225	22 153225	22 153225	22 153225	22 153225	22 153225	22 153225	23 153225	23 153225	22 327104	44
<sup>31</sup> P	52 38	72 14	349. 66	59. 22	50. 39	63 84	66 86	59 51	53. 17	70. 38	58 46	66 38	340 82	
<sup>42</sup> Ca	< 166 03	< 160 43	< 157. 58	< 192. 46	< 243. 63	< 168 23	< 166 36	< 157 47	< 186. 34	< 179. 96	576 76	< 183 74	82678. 41	
<sup>45</sup> Sc	201 11	222 4	236. 92	218. 7	231. 91	263 69	236 28	252 33	232. 98	255. 17	216 84	225 21	445 21	
<sup>89</sup> Y	23 69	69 61	3196. 45	81. 84	72. 63	162 34	92 67	139 29	75. 67	98. 49	65 37	132 88	452 71	
<sup>139</sup> La	< 0 0154	< 0 0141	0 025	0 0155	< 0 020	< 0 0191	< 0 0170	< 0 016	0 016	< 0 0148	< 0 0198	< 0 0184	459 02	
<sup>140</sup> Ce	0 031	0 346	19 64	0 15	0 041	0 129	0 365	0 319	0 403	0 177	0 302	0 505	449 2	
<sup>141</sup> Pr	< 0 0111	< 0 0100	0 195	< 0 0140	< 0 016	< 0 0103	< 0 0111	< 0 0168	< 0 0154	< 0 0135	< 0 0151	< 0 0154	430 69	
<sup>143</sup> Nd	< 0 084	< 0 082	4 1	< 0 071	0 17	< 0 096	0 192	< 0 093	< 0 096	< 0 106	< 0 086	< 0 103	432 56	
<sup>147</sup> Sm	< 0 062	0 075	10 51	< 0 082	< 0 083	0 052	0 138	0 199	0 246	0 102	0 113	0 238	453 95	
<sup>151</sup> Eu	0 04	0 097	2 73	0 041	< 0 034	0 078	0 141	0 22	0 146	0 073	0 093	0 218	462 86	
<sup>157</sup> Gd	0 373	1 25	71 61	0 68	0 45	1 16	1 55	2 92	1 84	1 02	1 23	2 45	421 65	
<sup>159</sup> Tb	0 219	0 538	26 91	0 343	0 416	0 781	0 664	1 398	0 651	0 509	0 522	1 172	443 81	
<sup>163</sup> Dy	2 65	6 44	324. 09	5. 46	5. 89	13 51	8 44	14 78	7 31	7. 25	6. 15	13 24	429 73	
<sup>165</sup> Ho	0 735	2 005	119. 95	2 39	2 27	4 88	2 7	4 1	2 237	2 94	1 799	4	451 05	
<sup>166</sup> Er	2 34	7 48	493. 37	11. 48	9. 28	16 16	9 98	12 9	7 94	12 16	6 92	13 91	426 75	
<sup>169</sup> Tm	0 416	1 354	95 42	2 73	1 7	2 48	1 691	2 17	1 343	2 54	1 268	2 44	421 2	
<sup>173</sup> Yb	3 41	11 61	842. 75	27. 83	14. 62	18 74	15 29	17 83	12 61	22 87	10 71	20 95	462 49	
<sup>175</sup> Lu	0 571	1 931	144. 77	5. 07	2 59	2 88	2 51	2 94	2 097	4 34	1 807	3 59	436 52	
<sup>208</sup> Pb	0 293	0 59	17. 7	0 322	1 08	0 373	0 984	0 953	0 654	0 107	0 18	0 165	417 93	
<sup>232</sup> Th	0 0394	0 326	254. 69	0 253	0 266	0 119	0 283	0 247	1 203	0 174	0 567	0 795	451 58	
<sup>238</sup> U	4 37	10 35	210. 53	6 2	3 41	16 04	11 25	21 83	13 04	7 38	8 74	16 26	459 37	

表 3 斜长角闪岩岩石化学分析数据

$w_B / \%$

Table 3 Major element data of amphibolite

样品	M-03	M-04	M-05	N-04	N-05	N-06	N-07	N-09
SiO <sub>2</sub>	49.86	47.33	49.07	48.88	50.05	50.24	49.15	49.39
TiO <sub>2</sub>	0.56	1.74	1.10	1.65	1.60	1.41	1.37	2.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.41	14.39	13.39	14.17	13.78	13.92	14.41	13.77
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.17	15.27	11.63	13.37	13.19	13.85	11.88	13.13
FeO	7.62	10.90	7.02	7.80	8.47	7.92	9.20	7.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.70	3.16	3.83	4.70	3.77	5.05	1.66	4.66
MnO	0.14	0.25	0.17	0.18	0.17	0.17	0.16	0.17
MgO	8.52	6.12	8.95	6.99	7.09	5.79	8.10	6.81
CaO	11.88	11.31	12.29	10.32	9.79	9.42	11.66	10.77
Na <sub>2</sub> O	2.12	1.94	1.73	2.55	2.61	3.10	1.63	2.34
K <sub>2</sub> O	0.32	0.41	0.29	0.52	0.58	0.89	0.53	0.37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.23	0.14	0.17	0.12	0.15	0.13	0.19
LOI	0.50	0.59	0.95	0.71	0.63	0.58	0.81	0.61
TOTAL	99.53	99.58	99.71	99.51	99.61	99.52	99.83	99.56

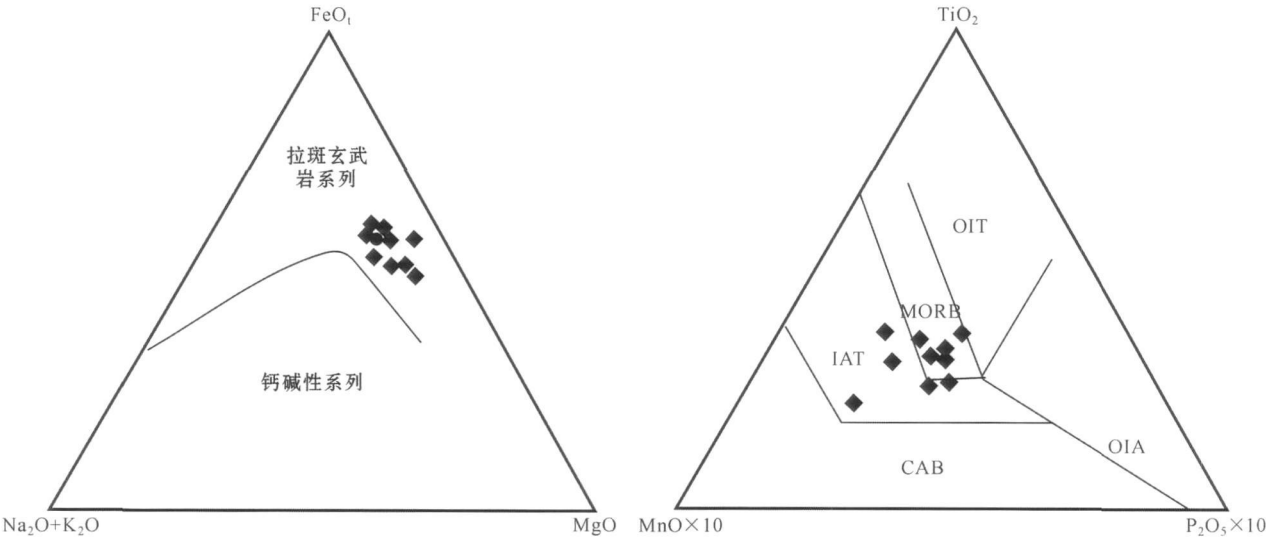


图 5 松树沟斜长角闪岩 AFM 和 TiO<sub>2</sub> - 10 MnO - 10 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 图解

Fig 5 AFM and TiO<sub>2</sub>-10 MnO-10 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> diagrams of Songshugou amphibolite

CAB—钙碱性玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; OIA—洋岛碱性玄武岩; OIT—洋岛拉斑玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩  
CAB—calc-alkaline basalt; IAT— island arc tholeiite; OIA—ocean island alkaline basalt; OIT— oceanic island tholeiite;  
MORB— mid-ocean ridge basalts

$10^{-6}$ , Ta 含量为  $0.52 \times 10^{-6}$ , 与原始地幔值 ( $Nb = 6.5 \times 10^{-6}$ ,  $Ta = 0.4 \times 10^{-6}$ , Sun and McDonough, 1989) 比较接近, 而高于 MORB 含量 (表 4)。

4 讨论

(1) 野外地质产状、接触带特征和超镁铁质岩石地球化学及构造特征表明, 超镁铁质岩是底辟侵位的, 其外侧的榴闪岩是超镁铁质岩体侵位过程中形成的。扫描电镜能谱对接触变质带锆石中包裹体

成分进行分析, 谱图中仅有 Ca、C、O、Na、Al 和 Si 元素出现, 而且 Ca 的峰值很高, 而 Na 的峰值很低, 且 Ca 的含量远远大于 Na, 因此锆石中包裹体成分是斜长石。考虑到锆石斑晶具有极低 Th/U 的变质成因特征, 从 CL 照片和年龄结果中均未发现早期残留锆石信息, 因此, 该锆石中包裹体, 只能来源于早先形成的岩石。很显然, 超镁铁质岩体自身是橄榄石含量高达 ~90% 的纯橄榄岩, 侵位过程中不可能提供斜长石, 因此锆石中长石包裹体很可能来自于岩体外围的镁铁质岩-斜长角闪岩, 侵位过程中接触变质

表 4 斜长角闪岩微量元素分析数据

Table 4 Trace element data of amphibolite

$w_B / 10^{-6}$

样品	N-04	N-05	N-06	N-07	N-09	样品	N-04	N-05	N-06	N-07	N-09
Li	20 84	20 37	22 31	18 75	16 92	Ce	16 8	15 4	14 2	15 5	23 1
Be	0 56	0 67	1 39	0 61	0 67	Pr	2 43	2 26	2 19	2 28	3 32
Sc	46 7	47 3	49 4	39 9	41 6	Nd	12 8	12 1	12 1	12 1	16 9
V	350	345	291	318	344	Sm	3 68	3 61	3 72	3 47	4 58
Cr	61	58	66	321	239	Eu	1 19	1 18	1 49	1 17	1 51
Co	73	73	68	73	78	Gd	4 16	4 01	4 20	3 59	4 76
Ni	54	50	39	125	68	Tb	0 77	0 76	0 80	0 63	0 86
Cu	26 7	40 2	42 6	43 3	90	Dy	4 81	4 76	5 04	3 80	5 14
Zn	103	105	113	86	109	Ho	1 04	1 06	1 14	0 83	1 09
Ga	17 0	16 8	18 0	17 5	18 5	Er	2 74	2 78	3 00	2 11	2 81
Ge	1 74	1 99	1 60	1 88	2 02	Tm	0 43	0 43	0 47	0 33	0 43
Rb	13 36	16 35	19 79	17 95	7 29	Yb	2 86	2 88	3 16	2 07	2 75
Sr	141	125 8	256	134	272	Lu	0 47	0 46	0 52	0 32	0 43
Y	29 8	30 5	33 3	24 2	32 0	Hf	2 50	1 58	1 23	2 12	2 51
Zr	94 4	55 3	33 3	78 3	91 9	Ta	0 54	0 55	0 36	0 42	0 76
Nb	7 74	7 92	5 34	5 96	11 0	Pb	7 29	6 19	14 84	4 78	1 89
Cs	0 765	0 93	1 30	1 20	0 177	Th	0 52	0 45	0 405	0 314	0 77
Ba	103 2	102 6	1564	128 3	97 4	U	0 199	0 169	0 119	0 164	0 259
La	6 67	5 82	5 90	6 41	9 76						

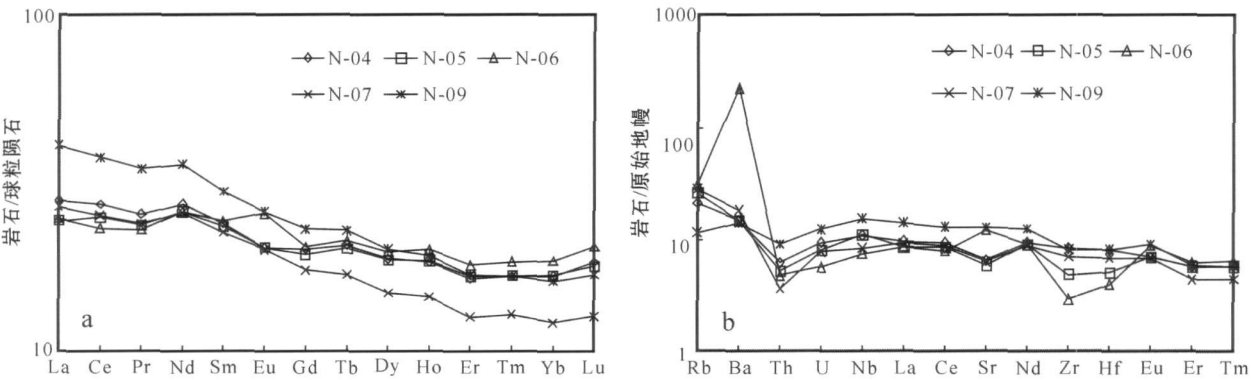


图 6 斜长角闪岩稀土元素配分图 (a)和微量元素蛛网图 (b)

Fig 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and PM-normalized spidergram (b) of amphibolite

带的锆石在结晶过程中将围岩中的长石捕获进来。

锆石微量元素数据也很好地支持了这个认识。重稀土元素碱性较弱, 易在分异作用的早期富集, 部分熔融时易保留在残余固相中, 若岩浆分离结晶石榴石, 则应亏损重稀土元素, 但是一颗锆石 (LJF-1 03)具有异常高的重稀土元素含量和  $Eu$  的负异常, 因此这颗锆石形成时还没有石榴石。与此相对的, 其他锆石颗粒具有一致的稀土元素配分模式、较低的稀土元素含量和没有  $Eu$  异常, 这些特征说明锆石颗粒形成于石榴石出现后, 表明石榴石的形成是在侵位过程中。在秦岭岩群中, 已报道有大量 500 Ma 作用的变质事件年龄, 如北侧的官坡榴辉岩 (杨

经绥等, 2002)以及松树沟的高压麻粒岩 (陈丹玲等, 2004)和石榴辉石岩 (苏犁等, 2004), 因此  $506 \pm 7.4$  Ma 的锆石年龄代表接触带榴闪岩的形成, 也代表松树沟超镁铁质岩体的侵位时代。

(2) 对镁铁质岩 (斜长角闪岩) 的主、微量元素研究发现, 兼具有 IAT 和 MORB 的特征, 有活动陆缘特征。稀土元素模式配分图显示 LREE 富集, 同时 HREE 平缓。在岛弧区, 由于发生洋壳和沉积物向岩石圈深部的再循环, 有水的加入, 而使得易溶于水的  $Rb$ 、 $Ba$  增加。在那样的物理化学条件下, 由于高场强元素倾向于留在难熔矿物中, 或者在流体与上覆地幔楔相互作用过程中高场强元素有较其他不相

容元素高的晶/液分配系数,从而造成高场强元素的亏损。董云鹏等(1997)在对该镁铁质岩进行岩石学和地球化学研究后也证明,铁镁质岩体形成于岛弧环境。另外众多年代学和地球化学研究已经表明早古生代北秦岭已演化成一个复杂的古岛弧系列(李曙光等,1993;孙卫东等,1996;张旗等,1995;崔智林等,1995;Xue *et al.*, 1996;陆松年等,2003),如崔志林等(1995)通过对丹凤蛇绿岩带的放射虫研究证明该区的层状放射虫硅质岩来源于岛弧环境。李曙光(1993)研究发现北秦岭垃圾庙苏长辉长岩体中的辉长岩和苏长辉长岩均有与岛弧玄武岩类似的地球化学特征,如较高的 Ba/Pb、Sr 和较低的 Nb/Zr、Ni 含量等。张旗等(1995)对丹凤群变质玄武岩进行了研究,对于 LREE 富集型的变质玄武岩  $(Ce/Yb)_N$  为 5 ~ 20, 贫 Tj/Nb, Ta/Th > Ta/Nb/La < 0.8, Hf/Th > 8, Zr/Y < 3, 这些都说明丹凤群变质玄武岩形成于消减带之上的洋内岛弧环境。

李曙光等(1991)对岩体的直接围岩石榴斜长角闪岩,利用 Sm-Nd 矿物等时线法得到的年龄为  $983 \pm 140$  Ma, 认为其代表了超镁铁质岩体的侵位年龄。董云鹏等(1997)用 Sm-Nd 矿物等时线法得出了松树沟地区斜长角闪岩的年龄为  $1030 \pm 46$  Ma。因此一些学者认为,  $1000$  Ma 左右的变质年龄代表了晋宁期的构造作用发生时间,也成为秦岭晋宁期构造运动的主要依据。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,镁铁质岩体的成岩时代为  $973 \pm 35$  Ma (Liu *et al.*, 2004),远早于本次用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测定的松树沟超镁铁质岩体的侵位时代 ( $506.2 \pm 7.4$  Ma)。显然,二者不是同一构造旋回的地质体。

(3) 松树沟超镁铁质岩构造变形相对简单,而与其相邻的镁铁质岩(主要是斜长角闪岩)变形却较为复杂,镁铁质岩中多期褶皱叠加和纵向片理的存在,秦岭群片麻岩普遍发育北西向片理构造,镁铁质岩与秦岭群片麻岩相近的构造样式,说明其与秦岭群是密不可分的。松树沟超镁铁质岩体与围岩斜长角闪岩或者榴闪岩之间以韧性剪切带相接触,这一韧性剪切带主要发育在岩体中,围岩中仅出现几十厘米的斜长角闪岩退变质的云母片岩。据此,可以认为松树沟岩体是在其围岩角闪岩相变质以后构造侵位的。

## 5 结论

野外地质、地球化学特征、成岩时代几方面的研究表明,松树沟超镁铁质岩体外围的镁铁质岩接近于秦岭群,而不同于超镁铁质岩。对该岩体接触变质带榴闪岩锆石的研究也表明,镁铁质岩是先形成的 ( $973 \pm 35$  Ma),而超镁铁质岩是  $506.2 \pm 7.4$  Ma 侵位的异地体,二者不是同一旋回的地质体,也不是同一蛇绿岩套的组成部分。

## References

- An Sanyuan, Wang Dangrong and Hu Nenggao. 1981. Geological features and genesis of Songshugou ultramafic rock body in Shaanxi [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 3 (2): 14~20 (in Chinese with English abstract).
- Chen Danling, Liu Liang, Sun Yong *et al.* 2004. Zircon LA-ICP-MS U-Pb of high pressure mafic granulite and their geological implications from the Songshugou Area in the North Qinling [J]. Science Bulletin, 49 (18): 1901~1908 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhihong, Lu Songnian, Li Hua kun, *et al.* 2004. Age of the Fushui intermediate-mafic intrusive complex in the Qinling orogen: new zircon U-Pb and whole-rock Sm and Nd isotope chronological evidence [J]. Geological Bulletin of China, 23 (4): 322~328 (in Chinese with English abstract).
- Cui Zhilin, Sun Yong and Wang Xueren. 1996. A discovery of Radiolaria from Danfeng ophiolite, North Qinling and its tectonic significance [J]. Chinese Science Bulletin, 41 (11): 916~919 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yunpeng, Zhou Dingwu and Zhang Guowei. 1996. Textures and structures of Songshugou ophiolitic peridotites in East Qinling and their rheological implications [A]. Zhang Qi. Study on Ophiolites and Geodynamics [C]. Beijing: Geol. Publ. House, 150~153 (in Chinese).
- Dong Yunpeng, Zhou Dingwu and Zhang Guowei. 1997. The emplacement mechanism and tectonic evolution of ultramafites in Songshugou area, eastern Qinling [J]. Scientia Geologica Sinica, 32 (2): 173~180 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Zhang Benren, Xie Qianli *et al.* 1990. Geochemical characteristics of sediments for Proterozoic intracontinental rifting in the Qinling orogen [J]. Chinese Science Bulletin, 19: 1494~1496 (in Chinese with English abstract).
- Kuang Shaoping and Zhang Benren. 1993. Geochemical research of Songshugou ultramafic rocks in Shangdan fault of East Qinling [J]. Mineral Petrology, 13 (2): 14~20 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Chen Yizhi, Zhang Guowei *et al.* 1991. A large B. P. Alpine peridotite body emplaced into the Qinling Group: evidence for



- the existence of the late Proterozoic plate tectonics in the north Qinling area [J]. Geological Review, 37(3): 235~242 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Chen Yizhi, Zhang Zongqing *et al*. 1993. Trace elements and Sr-Nd isotopic geochemistry of the La jiniao norite-gabbro from the north Qinling belt [J]. Acta Geologica Sinica, 67(4): 310~322 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junfeng and Sun Yong. 2005. New data on the "hot" emplacement ages of the ultramafic rocks from the Songshugou area in the eastern Qinling [J]. Geological Review, 51(2): 189~192 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Chen Danling, Zhang Anda *et al*. 2004. Geochemical characteristics and LA-ICPMS zircon U-Pb dating of amphibolites in the Songshugou ophiolite in the Eastern Qinling [J]. Acta Geologica Sinica, 78(1): 137~145.
- Liu Liang, Zhou Dingyu, Dong Yunpeng *et al*. 1995. High pressure metabasites and their retrograde metamorphic PT path from Songshugou area, eastern Qinling Mountain [J]. Acta Petrologica Sinica, 11(2): 127~136 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Zhou Dingyu, Wang Yan *et al*. 1996. Study and implication of the high-pressure felsic granulite in the Qinling complex of East Qinling [J]. Science in China (D), 26: 56~63 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoming, Gao Shan, Yuan Honglin *et al*. 2002. Analysis of 42 major and trace element in glass standard reference material by 193 nm LA-ICPMS [J]. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 408~418 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huaikun and Chen Zhihong. 2003. Characteristics sequence and ages of Neoproterozoic tectono-tectonic events between Tarim and Yangzi blocks—a hypothesis of Yangtze-Tarim connection [J]. Earth Science Frontiers, 10(4): 321~326 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Zhang Weiqi, Wang Quanqing *et al*. 1996. The formation environment of Songshugou ophiolite in the eastern Qinling [J]. Journal of Xi'an College Geology, 18(3): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Su Li, Song Shuguang, Song Biao *et al*. 2004. New zircon U-Pb of the Fushui complex and garnet pyroxenite in Songshugou and their restriction to tectonic evolution of qin ling orogenic zone [J]. Science Bulletin, 49(12): 1209~1211 (in Chinese with English abstract).
- Su Li, Song Shuguang and Zhou Dingyu. 2005. Petrogenesis of Songshugou dunite body in the Qinling orogenic belt, Central China: Constraints from geochemistry and melt inclusions [J]. Science in China (D), 35(1): 38~47 (in Chinese with English abstract).
- Sun S.S. and McDonough W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A.D. & Norry M.J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. Geological Society Special Publications, 42: 313~345.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Sun Yong *et al*. 1996. Chronology and geochemistry of a lava pillow in the Erlangping group at Xixia in the north Qinling Mountains [J]. Geological Review, 42(2): 144~153 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yaoqing and Lu Yilun. 1986. The tectonic environment and age of the ophiolites in East Qinling [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 13(1): 52~65 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xibin, Yang Jingsui, Shi Rendeng *et al*. 2005. The Songshugou rock body from Qinling—an example of ultramafic cumulate underg-one amphibolitic phases metamorphism [J]. Acta Geologica Sinica, 79(1): 174~189 (in Chinese with English abstract).
- Xue F., Kroner A., Reischmann T. *et al*. 1996. Paleozoic pre- and post-collision calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks [J]. Geol. Society, 153: 409~417.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Pei Xianzhi *et al*. 2002. Discovery of diamond in North Qinling: Evidence for a giant UHPM belt across Central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze Plates [J]. Acta Geologica Sinica, 76(4): 484~495 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng *et al*. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 655~724 (in Chinese).
- Zhang Qi, Zhang Zongqing, Sun Yong *et al*. 1995. Trace element and isotopic geochemistry of metabasalts from Danfeng Group (DFG) in Shangxian-Danfeng area, Shaanxi Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 11(1): 43~54 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Liu Dunyi and Fu Guomin. 1994. The Study of Isotopic Age of Metamorphic Geology in Qinling [M]. Beijing: Geological Press, 1~190 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Dingyu, Zhang Zejun, Dong Yunpeng *et al*. 1995. Geological and geochemical characteristics on Proterozoic Songshugou ophiolite piece from Shangnan County, Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 11: 154~164 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 安三元, 王档荣, 胡能高. 1981. 陕西南南松树沟超镁铁质岩体的地质特征及其成因 [J]. 西安地质学院学报, (2): 9~21.
- 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 科学通报, 49(18): 1901~1908.
- 陈志宏, 陆松年, 李怀坤, 等. 2004. 秦岭造山带富水中基性侵入杂岩的成岩时代——锆石 U-Pb 及全岩 Sn、Nd 同位素年代学新证据 [J]. 地质通报, 23(4): 322~328.
- 崔智林, 孙勇, 王学仁. 1995. 秦岭丹凤蛇绿岩带放射射的发现及其地质意义 [J]. 科学通报, 40(18): 1686~1688.
- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟. 1996. 东秦岭松树沟蛇绿岩中地幔橄榄岩的结构构造特征及其流变学意义 [A]. 张旗. 蛇绿岩与地球动力学研究 [C]. 北京: 地质出版社, 150~153.
- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟. 1997. 东秦岭松树沟超镁铁岩侵位机制及其构造演化 [J]. 地质科学, 32(2): 173~180.

- 高山, 张本仁, 谢千里, 等. 1990. 秦岭造山带元古宙陆内裂谷作用的沉积地球化学证据 [J]. 科学通报, 19(1): 494~496
- 匡少平, 张本仁. 1993. 东秦岭商丹断裂带中松树沟超镁铁质岩系地球化学研究 [J]. 矿物岩石, 13(2): 14~20
- 李曙光, 陈移之, 张国伟, 等. 1991. 一个距今 10 亿年侵位的阿尔卑斯型橄榄岩体: 北秦岭晚元古代板块构造体制的证据 [J]. 地质论评, 37(3): 235~242
- 李曙光, 陈移之, 张宗清, 等. 1993. 北秦岭拉坝庙苏长辉长岩的痕量元素和  $Sr/Nd$  同位素地球化学 [J]. 地质学报, 67(4): 310~322
- 刘军锋, 孙勇. 2005. 东秦岭松树沟超基性岩体 "热" 侵位时代新知 [J]. 地质论评, 51(2): 189~192
- 刘良, 周鼎武, 董云鹏, 等. 1995. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的  $P-T-t$  演化轨迹 [J]. 岩石学报, 11(2): 127~136
- 刘良, 周鼎武, 王焰, 等. 1996. 东秦岭秦岭杂岩中的长英质高压麻粒岩及其地质意义初探 [J]. 中国科学 (D 辑), 26(增刊): 56~63
- 柳小明, 高山, 袁洪林, 等. 2002. 193mm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析 [J]. 岩石学报, 18(3): 408~418
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 2003. 塔里木与扬子新元古代热-构造事件特征、序列和时代——扬子与塔里木连接 (YZ-TAR) 假设 [J]. 地学前缘, 10(4): 321~326
- 裴先治, 张维吉, 王全庆, 等. 1996. 东秦岭松树沟蛇绿岩的形成环境探讨 [J]. 西安地质学院学报, 18(3): 1~6
- 苏犁, 宋述光, 周鼎武. 2005. 秦岭造山带松树沟纯橄榄岩体成因: 岩石学、地球化学和岩浆包裹体制约 [J]. 中国科学 (D), 35(1): 38~47
- 苏犁, 宋述光, 宋彪, 等. 2004. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约 [J]. 科学通报, 49(12): 1209~1211
- 孙卫东, 李曙光, 孙勇, 等. 1996. 北秦岭西峡二郎坪群枕状熔岩中一个岩枕的年代学和地球化学研究 [J]. 地质论评, 42(2): 144~153
- 汤耀庆, 卢一伦. 1986. 东秦岭蛇绿岩的形成时代和构造环境 [J]. 成都地质学院学报, 13(2): 52~65
- 王希斌, 杨经绥, 史仁灯, 等. 2005. 秦岭松树沟岩体——一个遭受角闪岩相变质作用的超镁铁堆晶岩的实例 [J]. 地质学报, 79(1): 174~189
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, 等. 1988. 东秦岭复合山链的形成 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1~245
- 杨经绥, 徐志琴, 裴先治, 等. 2002. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别 [J]. 地质学报, 76(4): 484~495
- 张国伟, 张本仁, 袁学成, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 655~724
- 张旗, 张宗清, 孙勇, 等. 1995. 陕西商县丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学 [J]. 岩石学报, 11: 43~54
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1994. 北秦岭变质地质同位素年代研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1~190
- 周鼎武, 张泽军, 董云鹏, 等. 1995. 东秦岭商南松树沟元古宙蛇绿岩片的地质地球化学特征 [J]. 岩石学报, 11(增刊): 154~164