

西秦岭宕昌好梯新生代火山岩中橄榄石捕虏晶的特征及其地质意义*

苏本勋^{1,2} 张宏福¹ 肖燕^{1,2} 赵新苗^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 西秦岭宕昌好梯新生代火山岩中含有少许具有明显环带结构的橄榄石。这些橄榄石颗粒较大, 且常出现裂纹或破碎现象, 其中心部分的组成(Mg#为 90.4—91.0; $[Mg\# = 100 Mg / (Mg + Fe^{2+})]$)与火山岩中橄榄岩捕虏体中橄榄石的组成相近, 其边缘与火山岩中橄榄石斑晶的组成相近(Mg#为 85.5—81.9); 而且, 这些橄榄石的 CaO 含量小于 0.1%。这些特征表明这些具有环带结构的橄榄石是捕虏晶, 为地幔橄榄岩的解体矿物。橄榄石捕虏晶的环带结构是橄榄石与寄主岩浆相互作用的结果。对比已有的研究资料发现寄主岩浆很可能来源于古老的俯冲蚀变洋壳交代富集的地幔源区。这些新生代火山岩的形成可能与青藏高原的隆升密切相关。

关键词 西秦岭 宕昌好梯 新生代火山岩 橄榄石捕虏晶 环带结构

长期以来, 岩石圈地幔性质、组成及其演化过程的研究主要集中在地幔橄榄岩捕虏体, 但近年来火山岩中矿物捕虏晶已成为研究岩石圈地幔的又一重要对象, 并取得了许多重要成果^[1-5], 特别是在不存在地幔橄榄岩捕虏体的火山岩地区。橄榄石捕虏晶的环带结构通常被认为是橄榄石捕获后与寄主岩浆相互作用的结果^[4,6]。橄榄石捕虏晶的环带结构可以指示橄榄石与寄主岩浆的反应程度和变化过程, 进而推测岩浆源区的成分特征及其上升速度。橄榄石捕虏晶的中心部分组成也可以用于推测岩石圈地幔橄榄岩的性质, 尤其是在不存在地幔橄榄岩捕虏体时。

西秦岭地区新生代火山岩零星分布在甘肃省礼县-宕昌-西和三县境内。火山岩中含有大量地幔橄榄岩捕虏体。目前, 对本区火山岩及其橄榄岩捕虏体已有许多报道^[7-17], 而对火山岩中橄榄石捕虏晶尚未开展工作。本文旨在报道该区火山岩中的具有环带状结构的橄榄石的矿物学特征、环带的形成过程及其所反映的地质意义。

1 地质背景

中国大陆中部的西秦岭地区属于秦岭-大别造山带的西段, 其东北与华北地块相邻, 西北与祁连造山带相连, 西邻柴达木地块, 南部以松潘-甘孜褶皱带为界分别与青藏高原、扬子地块毗邻(图 1), 即西秦岭地区是构成中国大陆主要造山带及地块的交接汇聚区, 因而成为东西向的中央造山系、近南北向的川滇-贺兰构造带和青藏高原之间交接转换的关键构造域^[18-20]。

好梯火山岩位于甘肃省宕昌县好梯乡东南, 天水-礼县新生代断陷盆地中(图 1)。火山岩呈角度不整合覆盖在第三系红层之上, 其形成年龄分别为 7.1, 7.9, 18.9 和 22—23 Ma^[7,10,21], 即中新世火山活动的产物。火山岩主要为斑状结构, 块状构造, 气孔构造和杏仁构造发育。斑晶主要为橄榄石、单斜辉石、金云母, 基质以隐晶质和玻璃质为主^[10]。好梯火山岩中含有丰富的地幔橄榄岩捕虏体, 其类型包括尖晶石二辉橄榄岩、石榴石二辉橄榄岩、橄

2005-12-15 收稿, 2006-03-27 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40534022 和 40421202)

E-mail: subenxun170@163.com

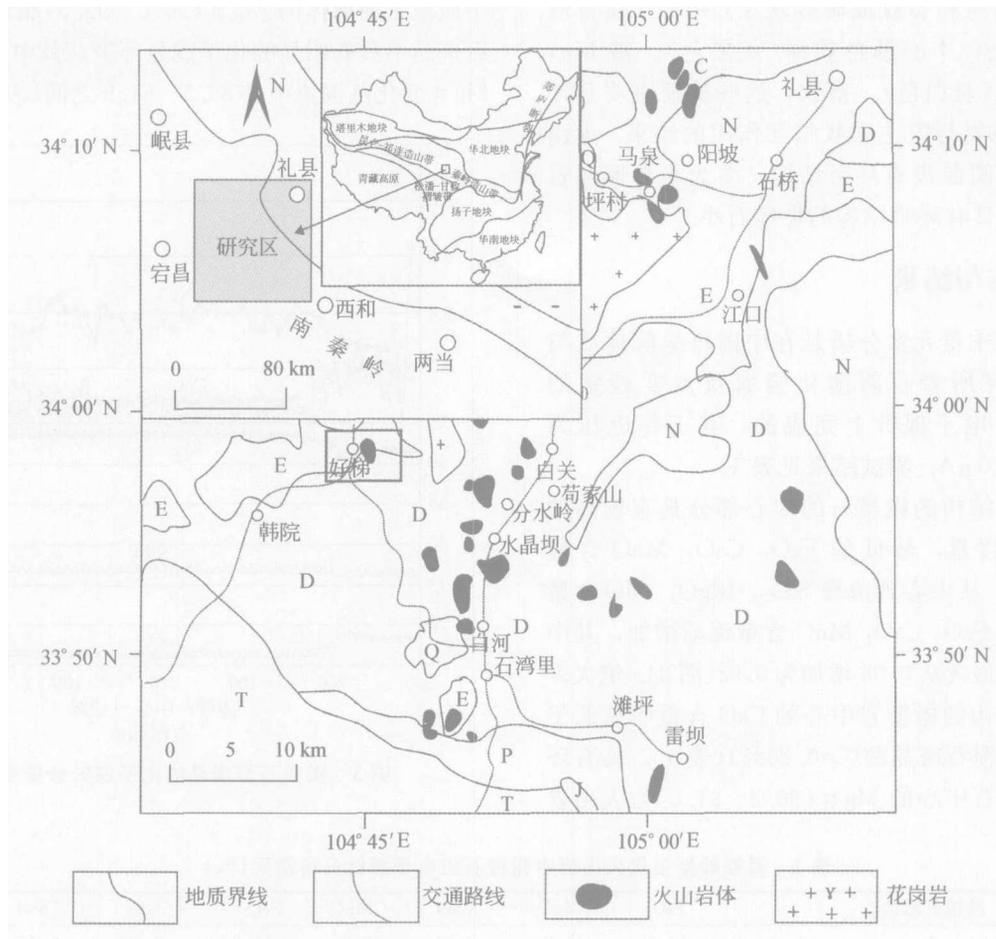


图1 甘肃西秦岭地区新生代火山岩分布图(据文献[10, 15, 17]修改)

D: 泥盆系; C: 石炭系; P: 二叠系; T: 三叠系; J: 侏罗系; E: 老第三系; N: 新第三系; Q: 第四系

辉岩、纯橄岩等^[9,16]。这些地幔橄橄榄岩捕虏体个体小, 直径一般为1—4 cm, 个别可达7—8 cm, 捕虏体多数新鲜。火山岩中尚含有少量具有明显环带结构的矿物, 主要有橄榄石和单斜辉石。

2 橄榄石的矿物学特征

西秦岭新生代火山岩中具有环带结构的橄榄石直径一般在200—800 μm 之间(图2)。这些橄榄石

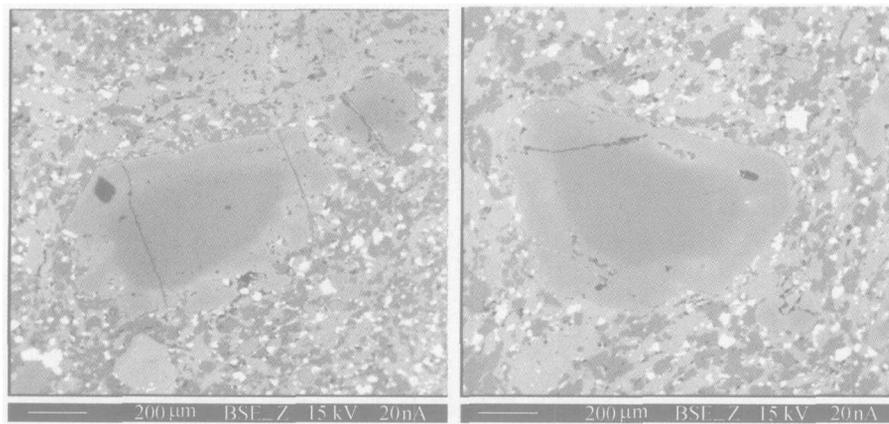


图2 橄榄石捕虏晶的背散射电子像图

常具有溶蚀港湾和裂纹或破碎现象(图2)。在背散射电子像图上,中心颜色较深(灰黑色)、富Mg,边缘颜色较浅(灰白色)、富铁,这些特征表明其环带结构为橄榄岩与寄主岩浆相互作用的结果。火山岩中的橄榄石斑晶没有环带结构,多为半自形和自形晶,粒径较具有环带结构的橄榄石小。

3 分析方法与结果

橄榄石的主量元素分析是在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的Cameca SX50电子探针上完成的,其工作电压为15 kV,电流20 μA。测试结果见表1。

具有环带结构的橄榄石的中心部分具有较高的MgO和NiO含量,较低的FeO, CaO, MnO含量(表1和图3)。从中心到边缘SiO₂, MgO, NiO含量逐渐降低,而FeO, CaO, MnO含量逐渐增加,其中CaO含量变化最大从0.08增加为0.92(图3)。绝大多数具有环带结构的橄榄岩中心的CaO含量明显低于火山岩中的橄榄石斑晶的(>0.20%)(表1)。具有环带结构的橄榄石中心的Mg#(90.4—91.0)与火山岩

中橄榄岩捕虏体的Mg#(90.0—92.5)相近^[12]。橄榄石斑晶不具有明显的化学成分环带,其中心到边缘的Mg#变化范围集中在85.5—81.9之间(表1)。

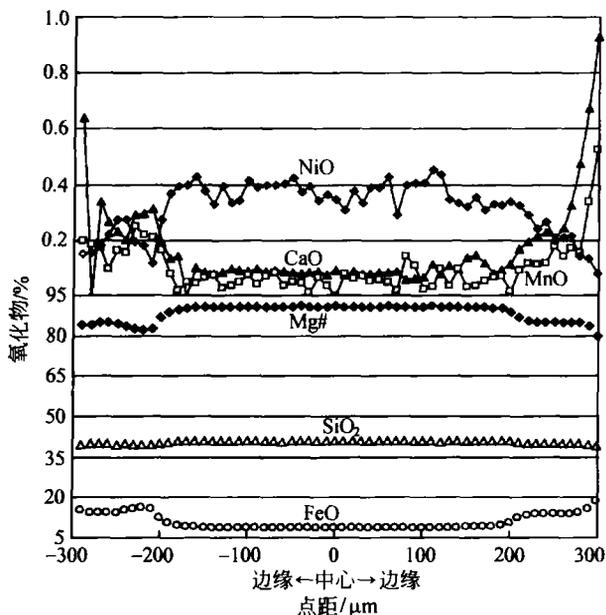


图3 橄榄石捕虏晶的电子探针分析剖面

表1 西秦岭新生代火山岩中橄榄石的电子探针分析结果(%)

| 橄榄石颗粒 | | SiO ₂ | MgO | CaO | MnO | FeO * a) | NiO | Total | Mg# b) | | |
|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|----------|------|--------|--------|-------|------|
| 捕虏晶 | A | 39.46 | 43.23 | 0.64 | 0.20 | 15.22 | 0.15 | 99.07 | 84.1 | | |
| | | 39.94 | 44.35 | 0.00 | 0.19 | 14.58 | 0.16 | 99.40 | 84.3 | | |
| | | 40.05 | 44.95 | 0.34 | 0.18 | 14.25 | 0.18 | 100.11 | 85.1 | | |
| | | 39.93 | 44.77 | 0.27 | 0.10 | 14.36 | 0.22 | 99.75 | 85.0 | | |
| | | 39.74 | 43.92 | 0.23 | 0.16 | 14.57 | 0.27 | 99.13 | 84.4 | | |
| | | 39.88 | 44.02 | 0.20 | 0.16 | 15.33 | 0.28 | 100.05 | 83.7 | | |
| | | 39.70 | 43.15 | 0.29 | 0.25 | 15.99 | 0.19 | 99.78 | 82.9 | | |
| | | 39.42 | 42.69 | 0.30 | 0.22 | 16.40 | 0.18 | 99.38 | 82.4 | | |
| | | 39.60 | 42.99 | 0.31 | 0.21 | 15.99 | 0.12 | 99.26 | 82.9 | | |
| | | 40.22 | 45.75 | 0.20 | 0.16 | 12.55 | 0.27 | 99.32 | 86.7 | | |
| | | 40.61 | 46.97 | 0.14 | 0.08 | 10.60 | 0.37 | 98.87 | 88.9 | | |
| | | 边 | | 40.79 | 48.05 | 0.14 | 0.02 | 9.79 | 0.39 | 99.34 | 89.9 |
| | | | | 41.10 | 48.45 | 0.00 | 0.05 | 9.27 | 0.40 | 99.32 | 90.3 |
| 41.02 | 48.67 | | | 0.10 | 0.05 | 9.03 | 0.43 | 99.44 | 90.7 | | |
| 40.95 | 48.58 | | | 0.08 | 0.07 | 8.94 | 0.38 | 99.19 | 90.7 | | |
| 40.96 | 48.66 | | | 0.08 | 0.08 | 8.79 | 0.33 | 99.08 | 90.8 | | |
| 缘 | | | | 40.98 | 49.00 | 0.08 | 0.03 | 8.79 | 0.39 | 99.40 | 90.9 |
| | | | | 41.11 | 48.63 | 0.10 | 0.04 | 8.81 | 0.34 | 99.19 | 90.9 |
| | | 41.10 | 48.73 | 0.09 | 0.05 | 8.88 | 0.35 | 99.35 | 90.8 | | |
| ↑ | | 41.19 | 49.25 | 0.09 | 0.08 | 8.76 | 0.42 | 99.92 | 91.0 | | |
| | | 40.94 | 48.62 | 0.10 | 0.04 | 8.78 | 0.39 | 99.02 | 90.9 | | |
| | | 40.79 | 49.01 | 0.09 | 0.07 | 8.87 | 0.40 | 99.39 | 90.8 | | |

续表

| 橄榄石颗粒 | | SiO ₂ | MgO | CaO | MnO | FeO * a) | NiO | Total | Mg# ^{b)} | |
|-------|---|------------------|-------|-------|------|----------|-------|--------|-------------------|------|
| | | 40.94 | 49.23 | 0.09 | 0.08 | 8.84 | 0.40 | 99.72 | 90.9 | |
| | | 40.75 | 48.95 | 0.09 | 0.04 | 8.93 | 0.40 | 99.30 | 90.8 | |
| | | 41.13 | 49.01 | 0.08 | 0.05 | 8.83 | 0.42 | 99.72 | 90.9 | |
| | | 41.16 | 49.35 | 0.08 | 0.05 | 8.73 | 0.37 | 99.84 | 91.0 | |
| | 中 | 40.97 | 48.75 | 0.09 | 0.01 | 8.76 | 0.39 | 99.09 | 90.9 | |
| | | 40.98 | 48.69 | 0.09 | 0.07 | 8.84 | 0.34 | 99.18 | 90.8 | |
| | | 40.99 | 48.96 | 0.07 | 0.04 | 8.75 | 0.37 | 99.32 | 90.9 | |
| | | 41.07 | 48.95 | 0.09 | 0.00 | 8.75 | 0.35 | 99.34 | 91.0 | |
| | | 41.05 | 48.85 | 0.08 | 0.08 | 8.83 | 0.31 | 99.38 | 90.8 | |
| | 心 | 40.83 | 48.70 | 0.09 | 0.06 | 8.77 | 0.38 | 98.93 | 90.9 | |
| | | 41.05 | 48.75 | 0.08 | 0.07 | 8.69 | 0.33 | 99.12 | 90.9 | |
| | | 40.96 | 48.90 | 0.08 | 0.05 | 8.76 | 0.39 | 99.26 | 90.9 | |
| | | 40.97 | 48.74 | 0.08 | 0.06 | 8.70 | 0.39 | 99.02 | 90.9 | |
| | | 41.12 | 49.01 | 0.09 | 0.05 | 8.68 | 0.43 | 99.57 | 91.0 | |
| | ↓ | 41.04 | 48.63 | 0.09 | 0.02 | 8.74 | 0.29 | 98.95 | 90.9 | |
| | | 41.22 | 48.66 | 0.06 | 0.14 | 8.87 | 0.40 | 99.51 | 90.7 | |
| | | 41.00 | 48.78 | 0.06 | 0.11 | 8.69 | 0.41 | 99.19 | 90.9 | |
| | | 41.18 | 49.06 | 0.07 | 0.03 | 8.94 | 0.41 | 99.81 | 90.8 | |
| | | 41.11 | 48.97 | 0.11 | 0.03 | 8.71 | 0.46 | 99.60 | 91.0 | |
| | 边 | 40.67 | 48.50 | 0.08 | 0.10 | 8.70 | 0.44 | 98.67 | 90.9 | |
| | | 40.97 | 48.84 | 0.11 | 0.04 | 8.89 | 0.35 | 99.36 | 90.8 | |
| | | 41.07 | 48.65 | 0.10 | 0.10 | 8.86 | 0.33 | 99.28 | 90.8 | |
| | | 41.04 | 48.83 | 0.14 | 0.03 | 9.04 | 0.32 | 99.52 | 90.7 | |
| | | 41.18 | 48.90 | 0.15 | 0.04 | 9.28 | 0.36 | 100.04 | 90.5 | |
| | 缘 | 40.90 | 48.88 | 0.12 | 0.05 | 9.21 | 0.31 | 99.64 | 90.5 | |
| | | 40.84 | 48.82 | 0.08 | 0.07 | 9.21 | 0.33 | 99.51 | 90.5 | |
| | | 40.98 | 48.66 | 0.10 | 0.07 | 9.56 | 0.33 | 99.84 | 90.1 | |
| | | 40.78 | 47.43 | 0.11 | 0.02 | 10.65 | 0.34 | 99.51 | 88.9 | |
| | | 40.46 | 46.01 | 0.17 | 0.09 | 12.62 | 0.33 | 99.86 | 86.8 | |
| | | 40.20 | 45.13 | 0.19 | 0.12 | 13.66 | 0.29 | 99.80 | 85.6 | |
| | | 39.89 | 44.80 | 0.22 | 0.11 | 14.20 | 0.24 | 99.61 | 85.0 | |
| | | 40.28 | 44.53 | 0.23 | 0.12 | 14.13 | 0.27 | 99.73 | 85.0 | |
| | | 40.28 | 44.82 | 0.21 | 0.18 | 14.06 | 0.20 | 99.92 | 85.1 | |
| | | 40.06 | 44.55 | 0.24 | 0.14 | 14.02 | 0.21 | 99.27 | 85.2 | |
| | | 40.13 | 44.71 | 0.32 | 0.17 | 14.16 | 0.22 | 99.88 | 85.1 | |
| | | 40.08 | 44.14 | 0.47 | 0.16 | 14.28 | 0.14 | 99.51 | 85.1 | |
| | | 39.76 | 43.17 | 0.67 | 0.34 | 15.79 | 0.13 | 100.06 | 83.4 | |
| | | 39.07 | 40.79 | 0.93 | 0.52 | 18.94 | 0.08 | 100.61 | 79.9 | |
| | B | 中心 | 41.23 | 48.71 | 0.05 | 0.14 | 9.14 | 0.42 | 99.7 | 90.4 |
| | | ↓ | 41.17 | 48.63 | 0.02 | 0.18 | 9.08 | 0.37 | 99.5 | 90.4 |
| | | | 40.81 | 47.92 | 0.02 | 0.19 | 10.00 | 0.38 | 99.4 | 89.4 |
| | | 边缘 | 39.92 | 44.55 | 0.18 | 0.16 | 13.84 | 0.29 | 99.1 | 85.2 |
| | C | 中心 | 41.26 | 48.26 | 0.10 | 0.13 | 9.13 | 0.40 | 99.4 | 90.4 |
| | D | 中心 | 41.30 | 48.58 | 0.11 | 0.14 | 9.11 | 0.40 | 99.7 | 90.5 |
| | E | 中心 | 40.27 | 44.78 | 0.37 | 0.21 | 14.23 | 0.25 | 100.2 | 85.1 |
| 斑 | | 边缘 | 39.65 | 42.08 | 0.61 | 0.30 | 16.40 | 0.15 | 99.4 | 82.5 |
| 晶 | F | 中心 | 39.44 | 42.11 | 0.70 | 0.45 | 16.97 | 0.17 | 100.0 | 81.9 |
| | G | 中心 | 40.22 | 45.37 | 0.20 | 0.25 | 13.73 | 0.23 | 100.1 | 85.5 |

a) FeO * 代表全铁; b) Mg# = 100 Mg / (Mg + Fe²⁺); A—HT-15-颗粒 1; B—HT-15-颗粒 2; C—HT-20-颗粒 1; D—HT-20-颗粒 2; E—HT-15-颗粒 1; F—HT-15-颗粒 2; G—HT-15-颗粒 3

4 讨论

4.1 具有环带结构的橄榄石为捕虏晶

现有的研究^[1-6]表明, 橄榄石捕虏晶通常具有浑圆的外形和/或溶蚀港湾并伴有裂隙/裂纹, 并具有特征环带结构. 而橄榄石斑晶多为自形-半自形, 很少见裂隙/裂纹等特征. 在背散射图像中捕虏晶的环带结构非常清晰, 一般中心部位颜色深(富镁), 边缘部分颜色浅(富铁). 在化学成分上, 捕虏晶的主量元素含量自中心至边缘向橄榄石斑晶过渡. Mg#是鉴别橄榄石斑晶和捕虏晶的重要参数. 具环带结构的橄榄石中心的Mg#与该区新生代火

山岩所携带的地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石的Mg#相近, 其边缘的Mg#与无环带结构的橄榄石斑晶的Mg#接近. 这些特征皆说明西秦岭新生代火山岩中具有环带结构的橄榄石为捕虏晶. CaO的含量是判别岩浆成因还是残留橄榄石的一个重要标志, 地幔橄榄岩中CaO的含量小于0.1%^[22], 岩浆成因的橄榄石一般具有较高的CaO含量(>0.1%)^[23]. 本区橄榄石捕虏晶几乎都落在了地幔橄榄岩的区域内(图4(b)). 这表明这些橄榄石的捕虏晶是地幔橄榄岩的解体矿物. 因此, 这些橄榄石捕虏晶能够提供本区新生代岩石圈地幔性质的某些信息.

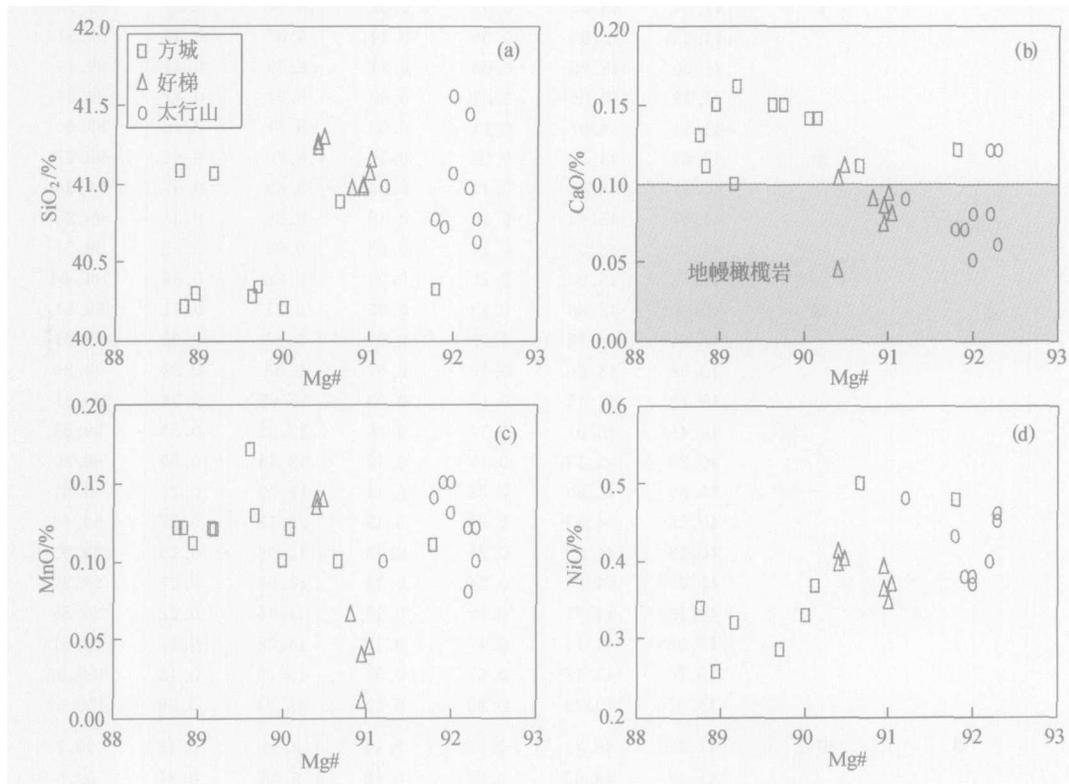


图4 橄榄石中心部分的常量元素含量与Mg#的相关图解

数据来源: 方城中生代橄榄石捕虏晶^[1,4]; 太行山新生代橄榄石捕虏晶^[2]

4.2 环带结构的形成过程 与橄榄石的组成相比, 西秦岭新生代火山岩富CaO(11.1%—15.5%), FeO*(11%—13%), MnO(0.16%—0.27%), 贫MgO(8.4%—16.7%), 略贫SiO₂(37.7%—42.7%)^[15]. 当橄榄石被高温的寄主岩浆捕获后, 化学组成上的不平衡致使橄榄石捕虏晶受溶蚀, 并与寄主岩发生反应^[6], 从而导致橄榄石的边缘部分

向富Ca, Fe, Mn和贫Mg方向演化, 逐渐与寄主岩浆及其斑晶的化学成分趋于一致, 或者橄榄石的边缘为直接从岩浆中结晶的.

当温度和/或压力降低到一定值时, 橄榄石与寄主岩之间的反应被迫停止, 从而保存了这种不平衡的环带结构. 在如此高的岩浆温度中, 橄榄石的反应速率很快. 因此, 要保存完好的环带结构则说

明反应的时间很短,即岩浆捕获橄榄石后迅速上升乃至喷出地表.这与 Bailey^[24]提出碱性火山岩和碳酸岩伴生是岩浆直接快速地从地幔源区上升形成的观点相一致.因此,橄榄石捕虏晶的环带结构是地幔橄榄石与寄主岩浆反应的结果.

4.3 寄主岩浆的可能来源

已有研究资料表明^[11, 15],西秦岭地区火山岩具有高的 Cr, Ni, Co 含量.并具有轻稀土元素和大离子亲石元素富集特征,这些微量元素及其同位素组成特征皆与洋岛玄武岩的组成特征相似(图5, 6),这说明其来源类似于洋岛玄武岩的地幔源区,即软

流圈地幔.有些火山岩的 Sr-Nd 同位素组成具有海水蚀变的趋势(图5).这些地球化学特征表明寄主岩浆很可能来源于经过古俯冲洋壳交代富集的地幔源区.

喻学惠^[10]认为西秦岭新生代火山岩是由于软流圈局部热上隆而使岩石圈底部的热边界层发生低程度部分熔融的结果,即为岩石圈地幔源的,但其与洋岛玄武岩相近的微量元素配分形式(图5)和同位素特征(图6)不支持该论断.其富集组分有可能来源于循环进入软流圈的地壳物质.邓晋福等^[26]对青藏高原周边陆-陆碰撞后的新生代火山岩的研究发现,这些火山岩既具有弧火山岩特征,又具有板内火山岩特征,这表明其岩浆源区有滞留于地幔内的再循环古洋壳.俯冲的古洋壳可能是消亡的特提斯洋.

4.4 不同构造单元橄榄石捕虏晶的对比研究及其意义

西秦岭新生代火山岩中的橄榄石捕虏晶与华北中生代玄武岩中的橄榄石捕虏晶具有明显地差异.西秦岭橄榄石捕虏晶中心的 Mg # (90—91)和 SiO₂, CaO, NiO 含量介于方城中生代玄武岩中橄榄石捕虏晶与太行山新生代玄武岩中橄榄石捕虏晶之间(图4(a), (b), (d)), MnO 含量则偏低(图4(c)).这些特征表明西秦岭地区与华北地区的中新生代地幔存在成分上的差异.西秦岭橄榄石捕虏晶更为清晰的环带结构说明西秦岭橄榄石与寄主岩浆的化学成分差异更大.本区新生代火山岩中的幔源橄榄石捕虏晶的 Mg # 较太行山中段新生代玄武岩(7.8 Ma)^[2]中的幔源橄榄石捕虏晶明显偏低(图4).这也与我国的主要构造块体的演化史相一致,华北陆块为古老的克拉通,其岩石圈地幔为难熔型的.因此,其岩石圈地幔来源的橄榄石的中心部位的 Fo 高,如太行山地区^[2].华北东部方城地区^[4]和辽西地区^[5]橄榄石的相对较低的橄榄石的 Fo 被认为是橄榄岩-熔体相互作用的结果.而西秦岭地区为年轻的古生代造山带,其岩石圈地幔亦相对年轻,为亏损程度低的橄榄岩,即具有较低的 Fo.

西秦岭地区经历了复杂的地质演化,古生代时期该区属于古特提斯洋的一部分;随后古特提斯洋扩张、俯冲、碰撞,至三叠纪末消亡,从而形成西

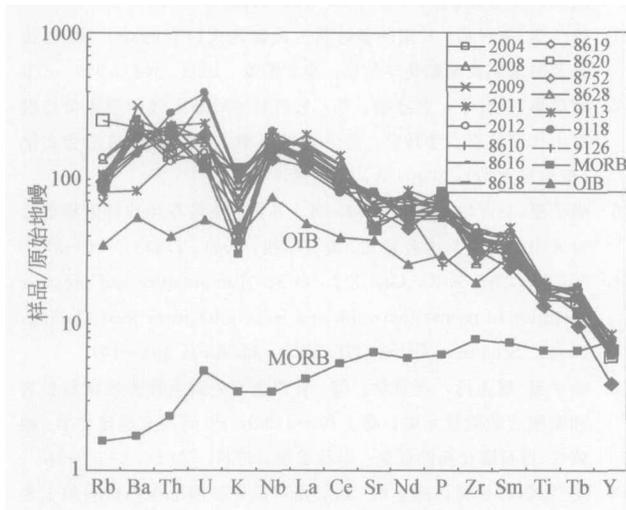


图5 火山岩原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图

火山岩数据引自文献^[15];原始地幔, MORB, OIB 值引自文献^[25]

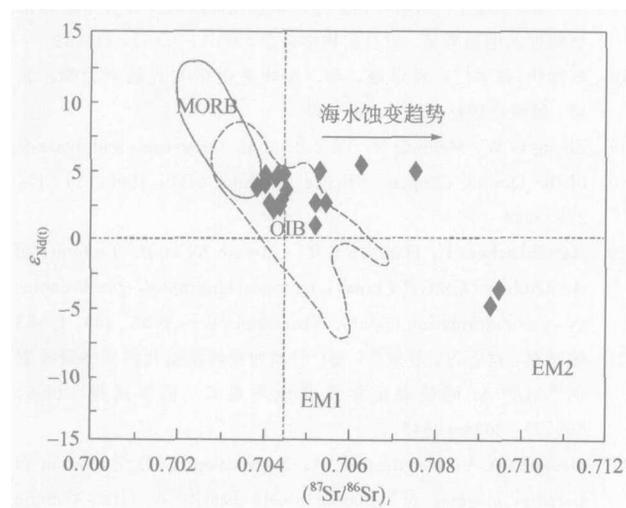


图6 火山岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-εNd 相关图

火山岩数据引自文献^[15]; MORB, OIB 区域引自文献^[25]

秦岭造山带^[26]。新生代时期, 印度板块向欧亚大陆俯冲碰撞造成青藏高原快速隆升(8 Ma)^[27-30], 对该区的构造岩浆活动有重要影响, 造成断陷盆地, 走滑断裂以及火山岩的形成。新生代时期西秦岭火山作用与印度板块和欧亚大陆的碰撞以及青藏高原的隆升有关。

新生代以来青藏高原的快速隆升, 使得受华北陆块、扬子陆块、青藏高原三面围限的西秦岭地区遭受强烈挤压和剪切变形^[28-30], 这种构造作用可能波及深部的岩石圈地幔, 使得地幔橄榄岩发生破碎、变形, 形成具有很好定向排列的橄榄岩, 并被火山岩所捕获。因此, 该时期的岩浆活动、捕虏体和捕虏晶是西秦岭地区构造运动事件的见证。

5 结论

(1) 西秦岭新生代火山岩中具明显环带结构的橄榄石是捕虏晶, 为地幔橄榄岩的解体矿物。其中心部分的组成与火山岩中橄榄岩捕虏体的橄榄石组成相近, 边缘与火山岩橄榄石斑晶的组成相近。橄榄石捕虏晶的环带结构是橄榄石与寄主岩浆反应的结果。寄主岩浆的源区可能为受俯冲蚀变洋壳物质交代富集的软流圈。

(2) 新生代时期, 青藏高原相对东部的差异隆升造成西秦岭的构造变形可能波及岩石圈地幔深度。该时期的火山活动、捕虏体及捕虏晶是西秦岭地区构造运动事件的表现。

致谢 衷心感谢周新华研究员、英基丰副研究员、汤艳杰博士在文章修改过程中给予的帮助和支持。

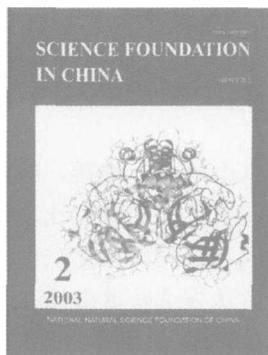
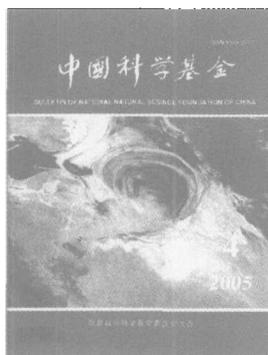
参 考 文 献

- 张宏福, 英基丰, 徐平, 等. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶: 对岩石圈地幔置换过程的启示. 科学通报, 2004, 8: 784—789
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 太行山中段新生代玄武岩中高镁橄榄石捕虏晶: 残留古老岩石圈样品. 岩石学报, 2004, 20(5): 1243—1252
- 裴福萍, 许文良, 王清海, 等. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约. 高校地质学报, 2004, 10(1): 88—97
- Zhang H F. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237: 768—780
- 邵济安, 路凤香, 张履桥, 等. 辽西义县组玄武岩捕虏晶的发现及其意义. 岩石学报, 2005, 21(6): 1547—1558
- 张宏福. 橄榄岩-熔体的相互作用: 岩石圈地幔组成转变的重要方式. 地学前缘, 2006, 13(2): 65—75
- 刘素剑. 岩昌好梯第三纪超镁铁质岩中巨晶及其形成条件. 甘肃地质学报, 1996, (2): 65—72
- 喻学惠. 甘肃岩昌好梯碱性超基性火山岩: 一种含上地幔包体和巨晶的钾质超镁铁煌斑岩. 地质论评, 1991a, 37(2): 144—153
- 喻学惠. 甘肃岩昌好梯超镁铁煌斑岩中深源包体和巨晶. 地质科技情报, 1991b, 10(增刊): 97—107
- 喻学惠. 甘肃礼县-岩昌地区新生代钾质超基性火山岩的特征及成因. 特提斯地质, 1994, 18: 114—129
- 喻学惠, 张春福. 甘肃西秦岭新生代碱性火山岩的 Sr, Nd 同位素及微量元素地球化学特征. 地学前缘, 1998, 5(4): 319—328
- 喻学惠, 莫宜学, 曹永清, 等. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩火山作用及岩石学特征. 第二届世界华人地质科学讨论会文集(斯坦福大学), 2000, A: 249—254
- 喻学惠, 莫宜学, Flower M, 等. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩火山作用及其构造意义. 岩石学报, 2001, 17(3): 366—377
- Yu X H, Mo X X, Liao Z L, et al. Temperature and pressure condition of garnet lherzolite and websterite from west Qinling, China. Science in China (D), 2001, 44(sup): 155—161
- 喻学惠, 赵志丹, 莫宜学, 等. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩和碳酸岩的微量元素、稀土和 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学: 地幔柱-岩石圈交换的证据. 岩石学报, 2004, 20(3): 483—494
- 史兰斌, 林传勇, 陈孝德. 由甘肃岩昌好梯幔源包体推导的上地幔物质组成、热结构和流变学特征. 地震地质, 2003, (4): 525—542
- 王建, 李建平. 西秦岭礼县地区新生代钾霞橄黄长岩系地球化学特征及地质意义. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(1): 11—19
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001, 3—432
- Zhang G W, Meng Q R, Yu Z P, et al. Orogenesis and dynamic of the Qinling Orogen. Science in China (D), 1996, 39(3): 225—234
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. Tectonophysics, 2003, 366: 1—53
- 喻学惠, 赵志丹, 莫宜学, 等. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素定年及其地质意义. 科学通报, 2005, 50(23): 2638—2643
- Gruenke A A, Hansteen T H, Schmincke H U. Evolution of parental magmas of Miocene shield basalts of Gran Canaria (Canary Islands): Constrains from crystal, melt and fluid inclusions in minerals. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 124: 422—435

- 23 Xu Y G, Huang X L, Menzies M A, et al. Highly magnesian olivines and green-core clinopyroxenes in ultrapotassic lavas from western Yunnan, China: Evidence for a complex hybrid origin. *European Journal of Mineralogy*, 2003, 15: 965—975
- 24 Bailey D K. Carbonate magmas. *Journal of Geological Society of London*, 1993, 150: 637—651
- 25 Sun S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins* (eds. A. D. Saunders and M. J. Norry). *Journal of Geological Society of London*, 1989, 313—345
- 26 Gao S, Zhang B R, Wang D P, et al. Geochemical evidence for the Proterozoic tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt and its adjacent margins of the North China and Yangtze cratons. *Precambrian Research*, 1996, 80: 23—48
- 27 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考. *中国地质*, 2002, 29(1): 7—13
- 28 姜晓玮, 王江海, 张会化. 西秦岭断裂走滑与盆地的耦合——西秦岭—松甘块体新生代向东走滑挤出的证据. *地学前缘*, 2003, 10(3): 201—208
- 29 周民都, 吕太乙, 张元生, 等. 青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究. *地震学报*, 2000, 22(6): 645—653
- 30 邓万明. 中国西部新生代火山活动及其大地构造背景—青藏及邻区火山岩的形成机制. *地学前缘*, 2003, 10(2): 471—478

2007 年度期刊征订

《中国科学基金》、《Science Foundation in China》



《中国科学基金》(双月刊)、《Science Foundation in China》(半年刊)是国家自然科学基金委员会的委刊,是以基础研究和应用基础研究为背景的综合指导性期刊,主要报道和介绍国家自然科学基金委员会出台的各种重要的政策和文件通告,每年公布“优先资助领域”;介绍国家自然科学基金各类资助项目的研究进展和优秀成果;科学基金管理的研讨和重要信息,每年公布重大、重点科学基金项目批准情况、重点优秀项目的结题情况等。《中国科学基金》中英文期刊是对外展示科学基金工作一

个窗口,为科学家提供信息,为研究和决策部门提供参考。

主要栏目

学科进展与展望 刊登各学科领域最新进展;报道和评述科学重大战略问题和国内、外重要科学成就。

成果介绍 及时报道国家自然科学基金资助项目取得的优秀成果。

基金纵横 探讨基础研究和科学基金管理工作中若干问题及建议等。

科学论坛 基础研究学科发展规划及科学管理的战略讨论。

资料与信息 国家自然科学基金委员会发布的各种文告、资料及信息等。

凡是在我杂志社订阅 2007 年度《中国科学基金》者,将免费赠送《2007 年度国家自然科学基金项目指南》1 册。

联系电话: 010-62327204

传 真: 010-62326921

邮 编: 100085

通信地址: 北京海淀区双清路 83 号 国家自然科学基金委员会杂志社

联系人: 刘俐 程宇

E-mail: chengyu@nsfc.gov.cn

银行账户名: 国家自然科学基金委员会科学基金杂志社

开户银行: 中国工商银行北京北太平庄支行 帐 号: 0200010009200062483