

# 西秦岭石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩包体的温度和压力条件\*

喻学惠<sup>①</sup> 莫宣学<sup>①</sup> 廖忠礼<sup>①②</sup> 赵欣<sup>①</sup> 苏祺<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100081; <sup>②</sup>国土资源部成都地质矿产研究所, 成都 610082)

**摘要** 运用 Brey 等人和 Bertrand 等人矿物温压计, 计算了甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩中石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩包体的平衡温压条件. 计算结果表明, 石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩的稳定温度、压力范围分别为 1172~1266℃, 2.9~3.6 GPa 和 1169~1248℃, 2.8~3.2 GPa. 两类包体稳定的压力范围均达到或超出尖晶石相橄榄岩稳定的压力条件(2.0~3.0 GPa), 进入石榴石相橄榄岩的稳定区. 包体的平衡温度达到或超过大洋地温线, 并与实验确定的造山作用后岩石圈伸展条件下钾霞橄黄长岩浆的起源温度一致. 因此, 西秦岭新生代地幔的热状态具有发生钾霞橄黄长岩岩浆作用的条件. 包体的岩石矿物学研究及温压计算显示, 石榴石二辉岩与石榴石二辉橄榄岩同为本区地幔的组成, 因此都可能成为钾霞橄黄长岩的源区岩石.

**关键词** 西秦岭 二辉橄榄岩包体 二辉岩包体 温压计

幔源火山岩及其所携带的各种深源岩石包体被誉为是窥测地球内部的一扇窗口<sup>[1]</sup>. 对幔源岩石及深源包体的研究与地球物理资料的结合, 是反演岩石圈结构及深部作用过程的有效方法. 20 世纪 90 年代以来, 在这一研究领域有了很大进展. 如从 20 世纪 60 年代对个别地区上地幔组成及热状态的研究, 发展到现今进行大区域岩石圈填图; 从岩石圈三维制图发展为现今具有时间坐标的岩石圈四维制图; 从讨论 400 km 以上的地幔发展到现今讨论 670 km 界面及核、幔边界; 以及对俯冲带深部地幔动力学研究等<sup>[2~7]</sup>, 显示了这一领域的研究已进入较高的层次<sup>[6]</sup>.

甘肃西秦岭新生代高钾火山岩中含有多种幔源包体, 为研究和查明西秦岭地区地幔的热状态提供了良好的条件. 钾霞橄黄长岩在全球出露很少, 它的成因及源区类型目前还存在较多的争议<sup>[8]</sup>. 西秦岭是目前中国惟一报道了的新生代钾霞橄黄长岩区, 因此开展该区火山岩中深源包体的研究和平衡温压计算, 对阐明该区地幔源区特征及这类岩石的成因具有十分重要的意义.

## 1 包体的岩石学和矿物学特征

用于进行温度和压力计算的两个石榴石二辉橄榄岩包体, 均采自甘肃礼县白关的新生代钾霞橄黄长岩中. 包体呈黄绿色略带红色, 不规则圆形, 大小分别为 4 cm×4 cm×3 cm 和 4

2001-02-12 收稿, 2001-07-16 收修改稿

\*国家重点基础研究发展规划(G1998040800)、国家自然科学基金(批准号: 49973014)及国土资源部“青藏高原专项”资助项目

cm×5 cm×2.5 cm 左右,由橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和石榴石组成,两类包体中具代表性的矿物电子探针分析结果列于表 1.

表 1 石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩包体矿物具代表性的电子探针分析结果及计算的阳离子系数<sup>a)</sup>

| 矿物名称                           | 石榴石二辉橄榄岩 |       |         |       |        |        |       |       | 石榴石二辉岩 |        |       |       |        |        |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|---------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--|--|
|                                | 1        |       |         |       | 2      |        |       |       | 1      |        |       |       | 2      |        |  |  |
|                                | Olv      | Opx   | Cpx     | Grt   | Olv    | Opx    | Cpx   | Grt   | Opx    | Cpx    | Grt   | Opx   | Cpx    | Grt    |  |  |
| Si <sub>2</sub> O              | 41.18    | 52.42 | 51.04   | 41.09 | 41.03  | 55.73  | 52.17 | 42.33 | 55.04  | 53.61  | 42.74 | 55.46 | 53.44  | 42.59  |  |  |
| Ti <sub>2</sub> O              | 0        | 0.09  | 0.02    | 0.11  | 0      | 0.4    | 0.73  | 0     | 0.28   | 0.68   | 0.37  | 0.19  | 0.68   | 0.33   |  |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0        | 3.75  | 4.54    | 20.39 | 0.01   | 4.08   | 4.85  | 20.5  | 3.74   | 5.22   | 22.65 | 3.87  | 4.92   | 22.13  |  |  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.01     | 1.18  | 1.16    | 4.17  | 0.19   | 0.42   | 1.12  | 3.36  | 0.64   | 0.97   | 1.4   | 0.75  | 0.99   | 1.46   |  |  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0        | 4.44  | 2.68    | 1.99  | 0      | 0.16   | 0     | 2.42  | 0      | 0      | 0     | 0     | 0      | 0.01   |  |  |
| FeO                            | 9.25     | 2.11  | 0.69    | 5.18  | 8.47   | 5.52   | 3.31  | 4.57  | 6.32   | 3.7    | 6.47  | 6     | 3.79   | 7.19   |  |  |
| MnO                            | 0.25     | 0.32  | 0.25    | 0.39  | 0.06   | 0.16   | 0     | 0.27  | 0.2    | 0      | 0.4   | 0.04  | 0.02   | 0.47   |  |  |
| NiO                            | 0.22     | 0.2   | 0.11    | 0.05  | 0.3    | 0.18   | 0.14  | 0     | 0.5    | 0.31   | 0     | 0     | 0      | 0.07   |  |  |
| MgO                            | 47.85    | 31.78 | 17.46   | 19.56 | 49.91  | 32.15  | 16.52 | 20.53 | 31.99  | 16.68  | 20.46 | 31.61 | 16.67  | 20.51  |  |  |
| CaO                            | 0.08     | 1.09  | 20.09   | 6.47  | 0.11   | 1.15   | 18.76 | 5.61  | 1.19   | 17.77  | 4.72  | 1.23  | 18.19  | 5.24   |  |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.03     | 0.42  | 0.74    | 0.1   | 0      | 0.51   | 0.96  | 0.43  | 0      | 0.98   | 0     | 0     | 1.46   | 0      |  |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0        | 0.06  | 0.05    | 0     | 0      | 0      | 0.02  | 0     | 0.06   | 0.06   | 0.09  | 0     | 0.09   | 0.07   |  |  |
| 合计                             | 98.87    | 98.48 | 99.19   | 99.5  | 100.08 | 100.46 | 98.58 | 98.92 | 99.96  | 100.16 | 99.3  | 99.15 | 100.25 | 100.07 |  |  |
| Si                             | 1.017    | 1.851 | 1.875   | 2.962 | 1      | 1.916  | 1.91  | 2.843 | 1.912  | 1.925  | 3.033 | 1.93  | 1.923  | 3.02   |  |  |
| Ti                             | 0        | 0.002 | 0.002   | 0.006 | 0.01   | 0.02   | 0     | 0     | 0.007  | 0.018  | 0.02  | 0.005 | 0.018  | 0.018  |  |  |
| Al                             | 0        | 0.156 | 0.195   | 1.732 | 0      | 0.165  | 0.209 | 1.417 | 0.153  | 0.221  | 1.894 | 0.159 | 0.209  | 1.849  |  |  |
| Cr                             | 0.1      | 0.051 | 0.003   | 0.238 | 0.004  | 0.011  | 0.032 | 0.202 | 0.018  | 0.028  | 0.079 | 0.021 | 0.028  | 0.082  |  |  |
| Fe <sup>3+</sup>               | 0        | 0.118 | 0.074   | 0.108 | 0      | 0.004  | 0     | 0.107 | 0      | 0      | 0     | 0     | 0      | 0      |  |  |
| Fe <sup>2+</sup>               | 0.191    | 0.062 | 0.03321 | 0.312 | 0.173  | 0.159  | 0.101 | 0.224 | 0.184  | 0.111  | 0.384 | 0.175 | 0.114  | 0.427  |  |  |
| Mn                             | 0.005    | 0.01  | 0.008   | 0.024 | 0.001  | 0.005  | 0     | 0.013 | 0.006  | 0      | 0.024 | 0.001 | 0.001  | 0.028  |  |  |
| Ni                             | 0.004    | 0.006 | 0.003   | 0.003 | 0.006  | 0.005  | 0.004 | 0     | 0.014  | 0.009  | 0     | 0     | 0      | 0.004  |  |  |
| Mg                             | 1.762    | 1.673 | 0.95    | 2.102 | 1.813  | 1.648  | 0.902 | 1.975 | 1.657  | 0.902  | 2.164 | 1.64  | 0.894  | 2.168  |  |  |
| Ca                             | 0.002    | 0.041 | 0.785   | 0.5   | 0.003  | 0.042  | 0.736 | 0.353 | 0.044  | 0.684  | 0.359 | 0.046 | 0.701  | 0.398  |  |  |
| Na                             | 0.001    | 0.029 | 0.052   | 0.014 | 0      | 0.034  | 0.068 | 0.049 | 0      | 0.068  | 0     | 0     | 0.102  | 0      |  |  |
| K                              | 0        | 0.003 | 0.002   | 0     | 0      | 0      | 0.001 | 0     | 0.003  | 0.003  | 0.008 | 0     | 0.004  | 0.006  |  |  |
| Sum                            | 2.983    | 4     | 4       | 8     | 2.999  | 4      | 3.984 | 7.813 | 3.997  | 3.968  | 7.965 | 3.976 | 3.994  | 8      |  |  |
| [Mg]                           | 90.2     | 90.3  | 90.9    | 87.1  | 91.3   | 91.2   | 89.9  | 88.9  | 90     | 89     | 84.9  | 90.4  | 88.7   | 83.6   |  |  |
| [Ca]                           | 0.11     | 2.4   | 45.2    | 19.2  | 0.17   | 20.3   | 44.9  | 16.4  | 2.6    | 43.1   | 14.2  | 2.7   | 43.9   | 15.5   |  |  |

a) 由中国地质大学电子探针室分析. Oliv: 橄榄石; Opx: 斜方辉石; Cpx: 单斜辉石; Grt: 石榴石

第 1 个石榴石二辉橄榄岩包体具等粒板状变晶结构, 橄榄石颗粒在 1~2.5 mm 左右, 黄绿色, 薄片无色无环带, 成分均一, 多数颗粒呈压扁拉长状, 并普遍发育不均匀消光和扭折带. 化学成分富 MgO (Fo > 90), 为镁橄榄石. 斜方辉石为黑色, 薄片无色, 无环带, 化学成分富 MgO, Mg/(Mg+Fe)均大于 0.90, 其变形特征同橄榄石. 单斜辉石呈翠绿色, 边缘有海绵状熔蚀边, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高(1.16%), 为铬透辉石. 石榴石含量约占 5%, 颗粒大(1.5~3 mm), 边缘已轻度蚀变. 化学成分富 MgO 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mg/(Mg + Fe)大于 80, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 最高达 4.17% (图 1, 2).

第 2 个石榴石二辉橄榄岩包体具粒状镶嵌结构, 橄榄石边界平直, 颗粒粗大(达 3~4 mm), 有波状消光和扭折带, 但压扁拉长特征不明显. 石榴石颗粒较细(1~2 mm), 呈不连续的条带状

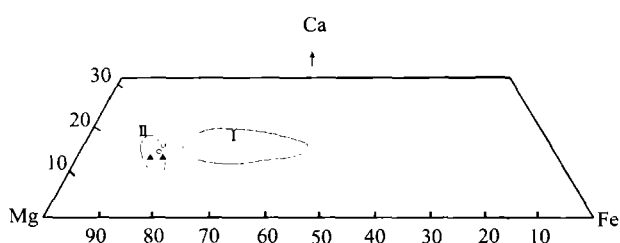


图 1 石榴石的化学成分范围

I. 中国东部辉石岩中石榴石的成分范围, II. 中国东部橄榄岩中石榴石的成分范围

具粒状结构, 局部见碎裂结构, 多数辉石边界平直, 可见三连点, 不均匀消光, 但压扁拉长特征不明显. 石榴石颗粒大, 多数在 1.5~3 mm 之间, 最大可达 5~6 mm. 边缘强烈蚀变为不透明的次变榴石, 仅颗粒中心残留了新鲜透明的石榴石. 斜方辉石和单斜辉石特征与石榴石二辉橄榄岩中相同 (图 2).

分布于橄榄石和辉石颗粒之间, 边缘已强烈蚀变为次变榴石 (Kelyphite), 仅中心部分残留了少量新鲜透明的石榴石, 其他特征与第 1 个包体相同 (图 1, 2).

两个石榴石辉石岩包体与二辉橄榄岩包体采自同一地区, 外观特征与二辉橄榄岩相似, 但由斜方辉石、单斜辉石和石榴石组成, 斜方辉石与单斜辉石含量相近, 几乎未见橄榄石. 辉石岩包体

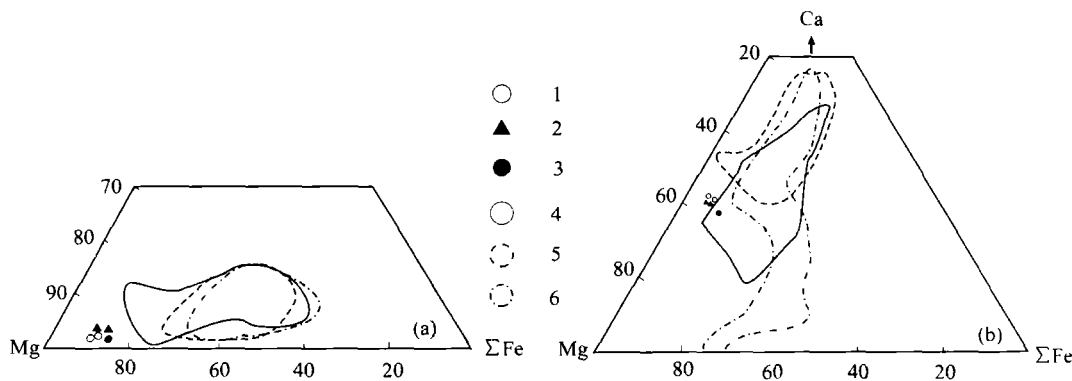


图 2 斜方辉石和单斜辉石的成分范围

(a) 斜方辉石; (b) 单斜辉石. 1. 石榴石二辉橄榄岩; 2. 石榴石二辉岩; 3. 尖晶石二辉橄榄岩; 4~6. 中国东部二辉橄榄岩包体中辉石的成分范围

两类包体的岩石学和矿物学特征表明, 西秦岭新生代地幔经历了变质变形作用、重结晶作用、局部熔融和交代作用等演化历史. 另外, 本区二辉橄榄岩和二辉岩包体中石榴石的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量都很高, 分别达到 4.17% 和 1.46%, 高于中国东部碱性玄武岩中同类包体的石榴石. 这暗示着本区二辉橄榄岩包体和二辉岩包体的平衡压力条件要高于中国东部新生代玄武岩中同类包体. 因此, 这种二辉岩包体可能不是一种堆晶岩, 而是本区上地幔的组成之一.

## 2 包体平衡温度和压力计算

自 70 年代初矿物平衡温压计方法问世以来, 矿物温压计方法发展很快, 方法也很多, 仅 1985 年以来公开发表的适用于超镁铁质岩系的温压计方法就达十几种. 因为矿物温压计都是采用高温高压实验研究和热力学方法推导获得的, 由于实验条件的限制, 以及实验体系与天然体系的差异, 将矿物温压计方法应用于天然岩石时, 有时得不到符合实际情况的结果. 对此很多学者对温压计的选择和使用进行了评述<sup>[6, 9~12]</sup>, 并指出温压计的使用在研究地幔热状态时

是一个关键、应用的方法不同, 计算出的地幔地温可能有差别<sup>[6]</sup>。有的研究者则强调, 只有用包含石榴石的超镁铁岩矿物组合进行平衡温度和压力计算, 才能获得可靠的地温数据和地幔地温曲线<sup>[2]</sup>。显然, 好的地幔包体和选择恰当的计算方法是获得可靠的平衡温度和压力数据的关键。

本次工作我们从下述几方面对计算结果的合理性及可靠性给予保证: (1) 挑选样品, 确保样品的新鲜性和代表性; (2) 选择包体矿物电子探针分析数据中重现性好的分析结果用作温度和压力计算, 保证计算结果的可靠性; (3) 选择恰当的温压计。本次主要采用 Opx/Cpx 中顽火辉石交换温度计<sup>[13]</sup>、Opx 中 Ca 的溶解度温度计<sup>[14]</sup>、Ol/Cpx 中 Ca 分配压力计<sup>[15]</sup>和 Opx/Grt 中 Al 分配压力计<sup>[13]</sup>来进行计算。

运用上述方法的计算机软件<sup>[16]</sup>, 计算了本区石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩的平衡温度和压力条件。按照深度-压力关系的经验公式  $D = 4.02 + 0.03P$  (Ave, lallemant 等, 1980) 将压力值( $P$ )换算为深度( $D$ )。结果列于表 2。

表 2 采用地质温压计计算获得的几个包体样品具代表性的温度和压力数值<sup>a)</sup>

| 包体名称<br>样品号 | 石榴石二辉橄榄岩             |                |               |                      |                |               | 石榴石二辉岩               |                |               |                      |                |               |
|-------------|----------------------|----------------|---------------|----------------------|----------------|---------------|----------------------|----------------|---------------|----------------------|----------------|---------------|
|             | 8905                 |                |               | 9102                 |                |               | 9103                 |                |               | 9104                 |                |               |
|             | $T/^{\circ}\text{C}$ | $P/\text{GPa}$ | $D/\text{km}$ | $T/^{\circ}\text{C}$ | $P/\text{GPa}$ | $D/\text{km}$ | $T/^{\circ}\text{C}$ | $P/\text{GPa}$ | $D/\text{km}$ | $T/^{\circ}\text{C}$ | $P/\text{GPa}$ | $D/\text{km}$ |
| 温 压<br>计算结果 | 1266                 |                |               | 1220                 |                |               | 1225                 |                |               | 1217                 |                |               |
|             | ①                    |                |               | ①                    |                |               | ①                    |                |               | ①                    |                |               |
|             | 1194                 | 3.6①           | 112           | 1174                 | 3.3①           | 103           | 1177                 | 3.2②           | 100           | 1182                 | 3.0②           | 94            |
|             | ②                    | 2.9③           | 91            | ②                    | 2.9③           | 91            | ②                    | 2.8③           | 88            | ②                    | 2.9③           | 91            |
|             | 1206                 |                |               | 1172                 |                |               | 1248                 |                |               | 1169                 |                |               |
|             | ③                    |                |               | ③                    |                |               | ③                    |                |               | ③                    |                |               |

a) 温度计算方法: ①文献[13]Opx/Cpx 中顽火辉石交换温度计; ②文献[14]Opx 中的溶解度温度计; ③文献[15]Opx/Cpx 中 Ca 的交换平衡温度计。压力计算方法: ①文献[13] Ol/Cpx 中 Al 分配压力计; ②文献[14]Opx/Grt 中 Ca 分配压力计; ③文献[15]Ol/Cpx 中 Ca 分配压力计。

### 3 讨论和结论

由上述计算获得的石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩的温度和压力范围分别为 1172 ~ 1266 $^{\circ}\text{C}$ 、2.9~3.6 GPa 和 1169~1248 $^{\circ}\text{C}$ 、2.8~3.2 GPa。计算结果显示, 这两类包体具有相近的平衡温度和压力范围, 均高于本区尖晶石二辉橄榄岩的平衡温度条件(970 $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[17]</sup>。两类包体的平衡压力, 均达到或超过公认的尖晶石相橄榄岩的稳定范围(2.5~3.0 GPa)<sup>[18,19]</sup>, 但石榴石二辉岩的平衡压力低于石榴石二辉橄榄岩。

将上述计算结果投到橄榄岩包体平衡温度和压力关系图(图 3)上, 均落到大洋地温线附近, 表明西秦岭地区新生代岩石圈处于一种过热状态, 与用实验确定的造山作用后岩石圈伸展条件下, 钾霞橄黄长岩浆起源的温度(1250~1450 $^{\circ}\text{C}$ )一致(图 4, P. J. Wyllie 提供)。石榴石二辉岩的岩石矿物学特征及平衡温压计算表明, 本区石榴石二辉岩不是堆晶岩, 而是地幔组成。因此, 源区岩石可能是石榴石二辉橄榄岩, 也可能包括石榴石二辉岩。从以上研究和计算可获得如下初步结论:

(i) 石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩具有相近的平衡温压条件, 均达到大洋地温线附近石榴石橄榄岩地幔稳定的温压范围。石榴石二辉岩包体具变形结构和碎粒结构等特征, 斜方辉石成分富 MgO, 石榴石成分富 MgO 和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 且具有与橄榄岩相似的平衡温度、压力条

件, 似表明本区石榴石二辉岩不是堆晶岩, 而是本区上地幔的组成之一;

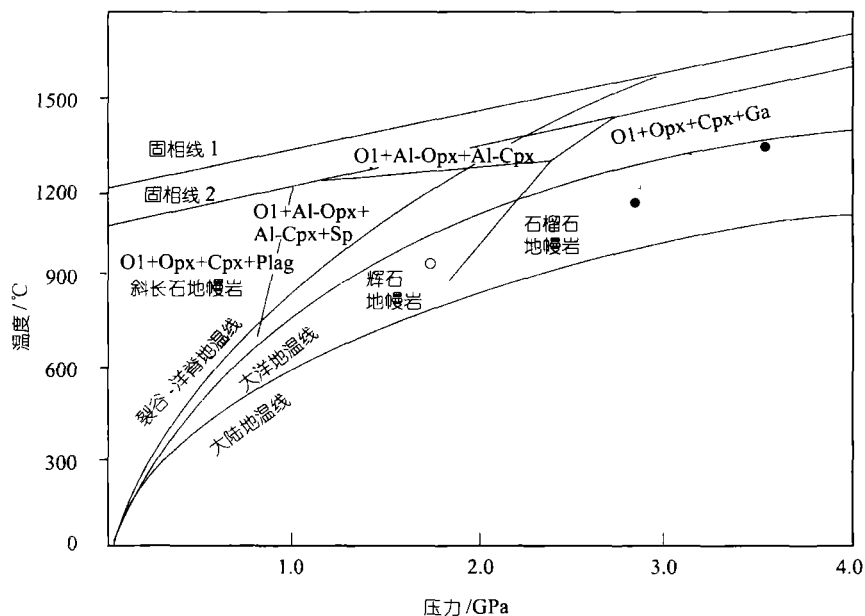


图 3 西秦岭石榴石二辉橄辉岩和石榴石二辉岩的温度和压力条件

● 示石榴石二辉橄辉岩; + 示石榴石二辉岩; ○ 示尖晶石二辉橄辉岩

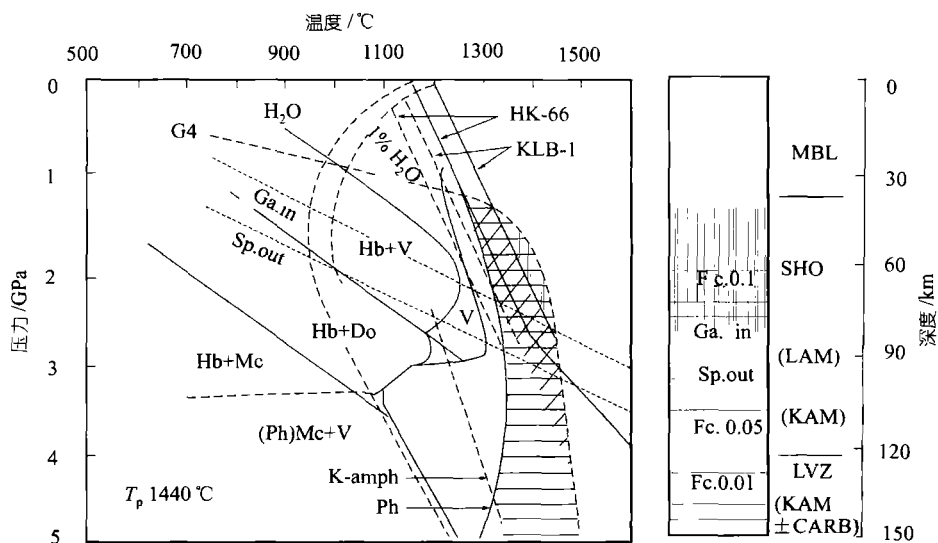


图 4 造山作用后岩石圈伸展条件下实验确定的三类超钾质岩石起源的温度和压力条件

(P. J. Wyllie 提供)

SHO: 钾玄岩; LAM: 钾镁煌斑岩; KMF: 钾霞橄黄长岩; CARB: 碳酸盐岩

(ii) 包体平衡温度计算结果显示, 西秦岭新生代岩石圈地幔处于过热状态, 具有发生岩浆作用的条件. 结合对造山作用后岩石圈强烈伸展的条件下超钾质岩浆起源条件的实验相图,

推测西秦岭新生代钾霞橄黄长岩原生岩浆的起源和成因与造山作用后岩石圈强烈伸展和地幔部分熔融有关。源区岩石可能是石榴石二辉橄榄岩, 也可能包括石榴石二辉岩。

### 参 考 文 献

- 1 Menzies M A. Alkaline rocks and their inclusions: A window of the Earth's interior. In: Fitton J G, Upton B G J, eds. *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society Special Publication, 1987, 30: 15~27
- 2 Griffin W L. Is the continental Moho and crust-mantle boundary? *Geology*, 1987, 15: 241~244
- 3 Menzies M A, Bodinier J L. Growth of the European lithospheric mantle dependence of upper-mantle peridotite facies and chemical heterogeneity on tectonics and age. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 1993, 79: 219~240
- 4 Griffin J L, Rissanen J, Pooley G D, et al. A new diamondiferous eclogite-bearing kimberlitic occurrence from Finland. In: 6th IKC. Extended Abstract. Novosibirsk Russia, 1995. 198~199
- 5 Harggerty S H. Petrochemistry of ultradeep (>300 km) and transition zone xenoliths. In: 6th IKC. Extended Abstract. Novosibirsk Russia, 1995. 214~215
- 6 路凤香. 地幔捕虏体及捕虏晶. 见: 张炳熹主编. 岩石圈研究的现代方法. 北京: 原子能出版社, 1997. 151~164
- 7 李晓波, 肖庆辉. 国际岩石圈计划的执行情况与若干研究进展. 见: 张炳熹主编. 岩石圈研究的现代方法. 北京: 原子能出版社, 1997. 1~7
- 8 Foley S. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: geochemical and experimental constraints. *Lithos*, 1992, 28: 187~204
- 9 Carswell D A, Gibb F G F. Evaluation of mineral thermometers and barometers applicable to garnet lherzolite assemblages. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95: 499~511
- 10 支霞臣. 我国东部上地幔的物质成分和温压特征. 见: 中国上地幔特征及动力学论文集. 北京: 地震出版社, 1990. 142~150
- 11 徐义刚. 适用于幔源包体的地质温度计. *岩石学报*, 1993, 19(2): 167~179
- 12 马鸿文. 结晶岩热力学概论. 北京: 地质出版社, 1993
- 13 Brey G B, Kohler T. Geothermobarometry in four-phase Lherzolites. II. New thermo-barometers and practical assessment of existing thermobarometres. *Petrology J*, 1990, 31: 1353~1378
- 14 Bertrand P, Mercier J C. The mutual solubility of ortho- and clinopyroxene: Toward an absolute geothermometer for the natural system. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 76: 109~122
- 15 Kohler T, Brey G P. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with. *Applications Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54: 2375~2388
- 16 马鸿文. 结晶岩热力学软件. 北京: 地质出版社, 1997
- 17 喻学惠. 甘肃好梯超镁铁煌斑岩中的深源包体和巨晶. *地质科技*, 1992, 10(增刊): 97~108
- 18 Ringwood A E. *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. New York: McGraw Hill, 1975
- 19 Gasparik T. Two-pyroxene thermobarometry with new experimental data in the system  $\text{CuO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ . *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 85: 186~196