

多硅白云母地质压力计的热力学模拟

朱文萍 魏春景*

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要 利用 THERMOCALC 323 程序, 以及最新的矿物固溶体模型, 模拟了相当于平均、富铝和富钾 3 种泥质岩石在 KFMASH(K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O)体系中的 P - T 视剖面图和多硅白云母硅等值线, 发现后者与矿物组合有关. 在含有绿泥石或黑云母的双变、三变域以及含有石榴石-蓝晶石的三变域中, 多硅白云母可以作为很好的地质压力计. 但在含有纤柱石而无绿泥石的组合中, 多硅白云母的硅等值线主要指示温度变化. 对相同的硅含量来说, 当多硅白云母与蓝晶石共生时指示压力较高, 与钾长石共生时指示压力较低. 在 KFMASH 体系中加入 Na_2O , 会引起 AFM 矿物相稳定域缩小. 在只含有一个含钠矿物相的矿物组合中, NKFMASH 体系下多硅白云母硅含量等值线的行为, 与 KFMASH 体系相似; 在含有两个或者两个以上的含钠矿物相组合中, 两个体系的多硅白云母硅含量等值线行为相差较大.

关键词 P - T 视剖面图 多硅白云母 地质压力计

白云母的结构通式为: $[K, Na]^{A=M1}[Mg, Fe, Al]^{M2A}[Al]^{M2B}[Al, Si]_2^{T1}Si_2^{T2}O_{10}(OH)_2$. 在变质岩石中, 白云母最具有意义的成分替代主要有两种: (1) $Na=K$; (2) $(Mg, Fe^{2+})+Si=Al^{IV}+Al^{VI}$, 后者称为多硅白云母型替代, 形成白云母 $[KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2]$ -绿鳞石 $K[Mg, Fe]Al(Si_4O_{10})(OH)_2$ 的固溶体. 一般随着变质压力的增加, 白云母中绿鳞石组分或硅含量增加. 早在 20 世纪 60 年代初期, Ernst^[1]就注意到蓝片岩中多硅白云母的地质意义. Velde^[2,3]首次实验合成了多硅白云母, 并且研究了白云母-绿鳞石固溶体的稳定性与温度和压力的关系. Massonne 和 Schreyer^[4,5]在 KMASH (K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O)体系中, 对多硅白云母的硅含量与温压条件的关系进行了实验研究. 提出了在钾长石+金云母+石英+多硅白云母、滑石+蓝晶石+石英+多硅白云母和滑石+金云母+石英+多硅白云母 3 个组合中多硅白云母的硅含量 P - T 等值线图. Massonne 和 Szpurka^[6]在 KFASH 体系中, 对多

硅白云母的成分与 P - T 条件的关系进行了实验研究, 大大地丰富了多硅白云母地质压力计的资料.

上述实验研究主要在 KMASH 和 KFASH 简单体系中进行的, 而自然界含多硅白云母的变质岩往往比这些实验体系复杂得多, 能否把简单的实验结果外延到成分更为复杂的岩石呢? 为此, Wei 和 Powell^[7,8]利用 THERMOCALC 3.1 程序在 KMASH, KFMASH 和 NKFMASH 体系的 P - T 视剖面图上, 对多硅白云母硅含量的 P - T 等值线进行了热力学模拟. 在 KMASH 体系的滑石+蓝晶石+石英+多硅白云母组合中, 所模拟的多硅白云母硅含量等值线与 Massonne 和 Schreyer^[5]的实验结果非常接近, 从而证明了 P - T 视剖面方法的适用性. 热力学模拟结果表明多硅白云母的硅含量等值线随矿物组合的不同而明显不同, 不能简单地把实验结果外延到全岩成分和矿物组合与实验条件相差较大的天然变质岩石, 值得推荐的方法是利用 P - T 视剖面图解.

尽管Wei 和 Powell^[7,8]研究了KFMASH和NKFMASH体系中多种矿物组合中多硅白云母硅含量与 P - T 条件的关系, 但是随着热力学数据库、THERMOCALC程序和矿物固溶体模型的更新, 尤其是白云母固溶体模型的改变, 有必要对多硅白云母硅含量压力计进行重新模拟。在Wei 和 Powell^[7,8]中, 白云母使用了理想溶液模型, 没有考虑A位的K-Na替代。因而白云母的端元成分只有白云母, 绿磷石, 铁绿磷石3种。本文使用了Coggon 和 Holland^[9]中的白云母的非理想对称(KFMASH)和非对称模型(NKFMASH), 利用THERMOCALC 323 程序, 选择平均、富铝和富钾3种泥质岩石计算KFMASH体系的 P - T 视剖面图, 和平均成分泥质岩计算NKFMASH体系的 P - T 视剖面图, 模拟多硅白云母硅含量等值线, 试图为在更多矿物组合中讨论多硅白云母压力计提供更多信息。

1 KFMASH 体系中多硅白云母硅含量与 P - T 条件的关系

利用 THERMOCALC323 程序, 选择平均、富铝和富钾3种泥质岩成分, 在KFMASH体系中计算 P - T 视剖面图, 模拟多硅白云母的硅含量等值线(图 1, 2, 3)。所包括的矿物相有: 石榴石(g)、硬绿泥石(ct)、绿泥石(chl)、黑云母(bi)、纤柱石(cr)、滑石(ta)、十字石(st)、蓝晶石(ky)、叶蜡石(prl)、夕线石(sill)、多硅白云母(phn)、石英(q)或者柯石英(coe)和水(H_2O), 并假设石英(柯石英)和水过量。温压范围为 400~750 °C, 0.5~3.5 GPa。

1.1 平均泥质岩的 P - T 视剖面图

平均泥质岩成分选自White等^[10], 各个氧化物的摩尔百分比为 $SiO_2:Al_2O_3:MgO:FeO:K_2O = 60:15.37:6.67:12.70:5.26$ 。计算的视剖面(图 1)主要由双变、三变以及三块四变域构成, 包括 5 段单变线, 多硅白云母出现于所有矿物组合中。计算多硅白云母硅等值线表明在大多数矿物组合中多硅白云母硅含量随着压力的增大而增大, 可以很好地指示变质作用的压力。尤其是在含黑云母的双变、三变组合中, 多硅白云母硅含量等值线斜率较缓, 有时甚至与温度无关。但是在 $g+cr+phn$ 组合中, 多硅白云母硅含量等值线斜率很大, 表现出随温度增加而明显增加, 几乎不能指示变质作用压力。在四变域 $g+phn$ 和

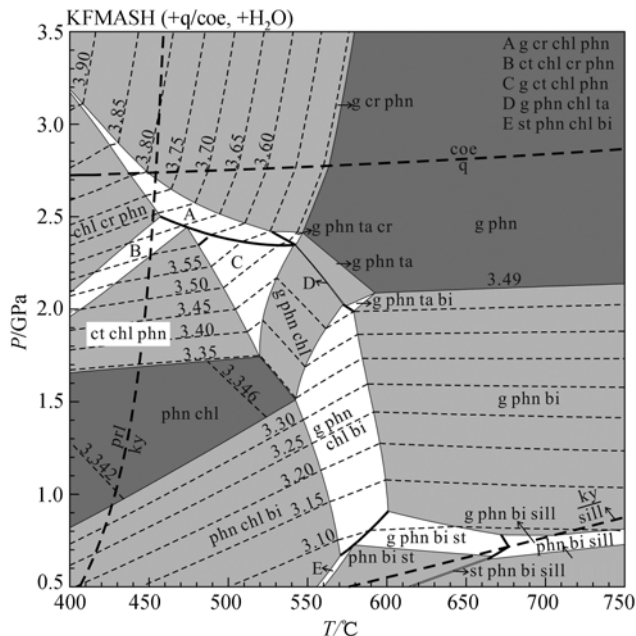


图 1 平均泥质岩成分在 KFMASH 体系中的视剖面图

假设石英(柯石英)和水过量, 岩石成分摩尔比为 $SiO_2:Al_2O_3:MgO:FeO:K_2O=60:15.37:6.67:12.70:5.26$ (引自White等^[10])。重实线为可见的单变反应, 细虚线为多硅白云母硅含量等值线。重虚线分别为反应: $coe = q$, $prl = ky$ 和 $ky = sill$ 转变线, 空白区为双变域, 轻阴影为三变域, 重阴影为四变域。矿物符号缩写见文中

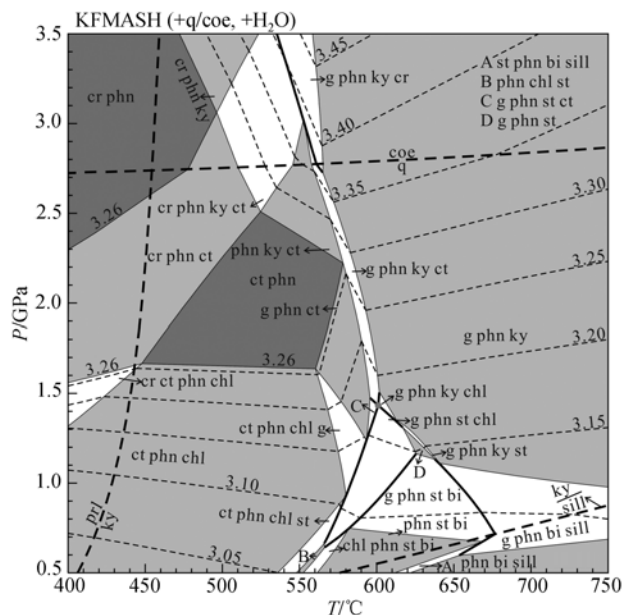


图 2 富铝泥质岩成分在 KFMASH 体系中的 P - T 视剖面图

假设石英(柯石英)和水过量。岩石成分摩尔比为 $SiO_2:Al_2O_3:MgO:FeO:K_2O=76.42:13.12:2.2:5.5:2.76$ (引自张建新等^[11], 标本号 ZJ01-11-1)。其他说明见图 1

$phn+chl$ 中, 硅含量随着温度压力变化很小或不变化, 不能用来做压力计。显然, 多硅白云母的硅含量等值

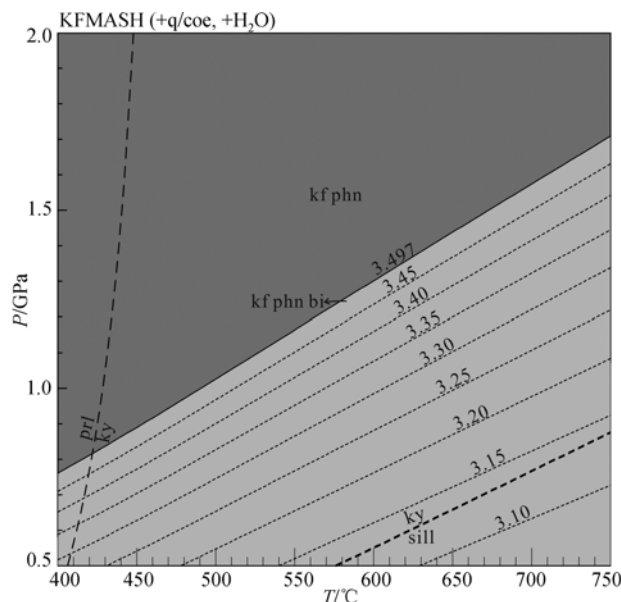


图3 富钾泥质岩成分在 KFMASH 体系中的 P - T 视剖面图
假设石英(柯石英)和水过量. 岩石成分摩尔比为 $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}:\text{FeO}:\text{K}_2\text{O}=86.23:6.9:0.76:1.73:4.38$ (引自刘福来等^[12], 标本号 B1291).
其他说明见图 1

线与矿物组合密切相关. 例如在组合 $\text{ct}+\text{chl}+\text{phn}$ 中, 硅含量为 3.35 时指示变质压力为 1.68 GPa, 而在另一个组合 $\text{g}+\text{phn}+\text{chl}+\text{bi}$ 中, 同样的硅含量, 压力变为 1.5 GPa.

1.2 富铝泥质岩的 P - T 视剖面图

富铝泥质岩样品选自张建新等^[11]描述的产于柴北缘西段鱼卡-落凤坡一带的榴辉岩相的变质泥质岩, 样品号为 ZJ01-11-1, 峰期矿物组合为石榴石+蓝晶石+多硅白云母+石英+金红石+硬绿泥石. 根据文中发表的全岩成分计算 KFMASH 体系的各氧化物摩尔百分比为 $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}:\text{FeO}:\text{K}_2\text{O}=76.42:13.12:2.2:5.5:2.76$. 根据这个成分计算的 P - T 视剖面图如图 2 所示, 该图主要由三变域组成, 见有 7 段单变线和 1 个不变点, 与图 1 的明显区别在于蓝晶石稳定范围扩大. 多硅白云母存在于所有的区域中, 计算多硅白云母硅含量等值线表明, 多硅白云母硅含量及其等值线斜率明显受矿物组合控制. 在较低压部分含有绿泥石和黑云母的组合中, 以及在较高温高压部分与石榴石、蓝晶石共生时, 多硅白云母硅含量等值线斜率较平缓, 可以很好地指示变质作用的压力变化; 在高压中温部分含有石榴石+硬绿泥石、石榴石+纤柱石、蓝晶石+纤柱石或硬绿泥石的组合中, 多硅

白云母的硅含量等值线斜率较陡, 主要受温度控制; 在低温高压部分含有硬绿泥石和纤柱石的三变、四变域中, 多硅白云母的硅含量与温压条件无关.

1.3 富钾泥质岩的 P - T 视剖面图

这里所用的富钾泥质岩石选自东海大陆科学钻探钻孔中的副片麻岩, 刘福来等^[12]将该区的副片麻岩分为 3 类. 本文所选取的样品属于其中第三类: 二云二长片麻岩. 样品号为 B1291, 主要矿物组合为: 斜长石、钾长石、黑云母、多硅白云母和石英. 根据刘福来等^[12]发表的全岩成分计算得到 KFMASH 体系中各氧化物的摩尔百分比为 $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}:\text{FeO}:\text{K}_2\text{O}=86.23:6.9:0.76:1.73:4.38$. 这是一种相当富钾, 贫铁镁的岩石, 用该成分所计算的 P - T 视剖面图如图 3 所示. 该图中只出现两个矿物组合: $\text{kf}+\text{phn}+\text{bi}$ 三变域稳定于较低压范围, 并且其稳定的压力随着温度的升高而变大, 最大可以达到 1.7 GPa; 四变组合 $\text{kf}+\text{phn}$ 广泛稳定于高压区域, 2.0 GPa 以上均为 $\text{kf}+\text{phn}$ 的稳定域, 故截去了图 3 中 2.0 GPa 以上的部分. 对这两个区域作硅的等值线表明, 三变域的硅等值线随着压力的升高而有规律地变大, 四变域的硅含量不随温压条件而变化. 在三变域 $\text{kf}+\text{phn}+\text{bi}$ 中, 当硅含量为 3.15, 指示的最高压力为 0.9 GPa. 而在图 2 中当多硅白云母与蓝晶石共生时, 在三变域 $\text{g}+\text{phn}+\text{ky}$ 中, 指示的最高压力为 1.35 GPa, 可见多硅白云母与蓝晶石共生时比与钾长石共生时指示更高的压力.

2 在 NKFMASH 体系中多硅白云母硅含量与 P - T 条件的关系

在 NKFMASH 体系中, 除了出现上面所述的 KFMASH 体系的矿物相外, 还可能出现钠云母(pa)、蓝闪石(gl)、硬玉(jd)和钠长石(ab). 全岩成分同样来自 White 等^[10], 在 NKFMASH 体系中, 各氧化物的摩尔百分比为 $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}:\text{FeO}:\text{K}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}=60:15.60:6.34:12.08:5:0.99$. 所计算的 P - T 视剖面图(图 4)主要由三变、四变和少量双变域组成, 包括四段单变线. 与图 1 对比, 发现 Na_2O 的加入, 导致滑石、黑云母这样的 AFM 矿物相的稳定范围缩小. 计算多硅白云母硅等值线, 其总体特征与图 1 相似. 在较低压部分含黑云母的双变和三变组合, 以及在低温较高压部分含有绿泥石+硬绿泥石(纤柱石)的双变

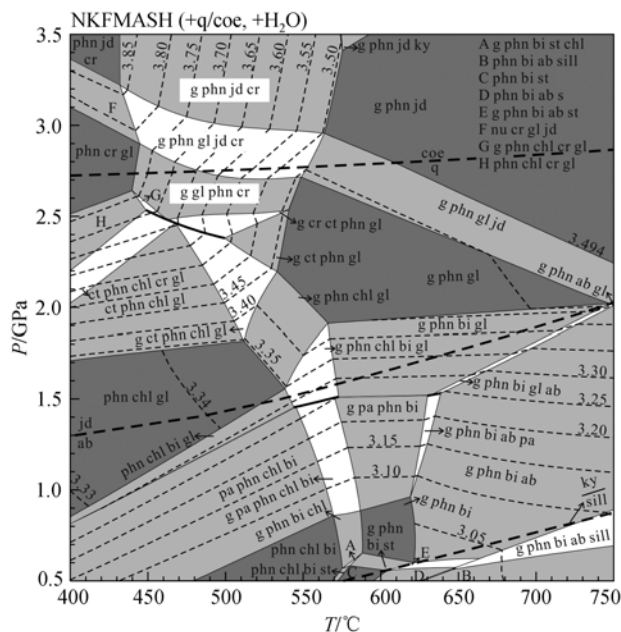


图 4 平均泥质岩成分在 NKFMASH 体系中的 P - T 视剖面图

假设石英(柯石英)和水过量, 岩石成分摩尔比为 $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}:\text{FeO}:\text{K}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}=60:15.60:6.34:12.08:5:0.99$ (引自White等^[10]), 重虚线分别为反应: $\text{coe}=\text{q}$, $\text{jd}=\text{ab}$, $\text{kv}=\text{sill}$ 转变线, 其他说明见图1

和三变组合中, 多硅白云母硅含量等值线斜率较缓, 可以很好地指示变质作用的压力变化. 在低温高压区域, 绿泥石消失后的双变或三变组合中, 如 $\text{g}+\text{ct}+\text{phn}+\text{gl}$, $\text{g}+\text{cr}+\text{ct}+\text{phn}+\text{gl}$, $\text{g}+\text{gl}+\text{phn}+\text{cr}$ 和 $\text{g}+\text{phn}+\text{jd}+\text{cr}$ 等, 多硅白云母硅含量等值线斜率很大, 硅含量随着温度的增加明显减少, 因而不能指示变质作用压力. 在三变域 $\text{g}+\text{phn}+\text{gl}+\text{jd}$ 以及四变域 $\text{g}+\text{phn}+\text{gl}$ 和 $\text{phn}+\text{chl}+\text{gl}$ 中, 多硅白云母的硅含量随温压条件变化很小; 在 $\text{phn}+\text{jd}+\text{cr}$ 和 $\text{g}+\text{phn}+\text{jd}$ 四变域中, 硅含量不随着温度压力的变化而变化. 可见在不同的矿物组合中, 硅等值线的变化趋势和数值均不一致.

为阐明 Na_2O 对体系相平衡关系和多硅白云母硅含量的影响, 选择计算了 $P\text{-}X_{\text{Na}}$ [$X_{\text{Na}} = \text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] 视剖面图(图 5)。温度固定为 580°C , 如图 5 所示。含钠矿物相的出现与全岩成分中 X_{Na} 值有关。随着压力增大, 可以保证含钠矿物相稳定的 X_{Na} 值降低, 这与白云母中的钠云母组分随压力降低有关。当压力低于 2.9 GPa 时, 矿物组合中含钠相的个数随着 X_{Na} 的增加而增加; 但当压力超过 2.9 GPa 时, 只出现一个含钠矿物相硬玉; 当压力低于 1.5 GPa 时, 多硅白云母出现于 $X_{\text{Na}} < 0.5 \sim 0.6$ 的低钠岩石中, 当 $X_{\text{Na}} >$

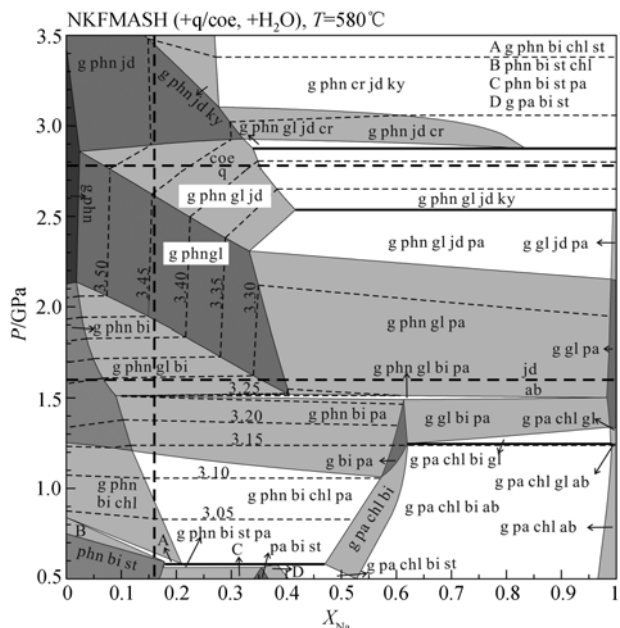


图 5 平均泥质岩成分在 NKFMASH 体系中, 温度为 580℃ 下的 $P-X_{Na_2O}$ [$X_{Na_2O} = Na_2O / (Na_2O + K_2O)$] 剖视图

假设石英(柯石英)和水过量。重虚线分别为反应: $\text{coe} = \text{q}$, $\text{jd} = \text{ab}$ 转变线, 以及平均泥质岩的真实 $X_{\text{Na}} = 0.16$ 。黑阴影为是五变区域, 其他说明见图 1

0.5~0.6 时, 多硅白云母不稳定; 当压力高于 1.5 GPa 时, 多硅白云母的稳定域明显增大(几乎包括 $X_{Na}=0\sim 1$ 的整个成分范围). 对含有多硅白云母的区域计算硅含量等值线表明, 在双变域中, 多硅白云母硅等值线不随着 X_{Na} 变化, 只与压力有关; 在含黑云母的低钠的三变和四变组合中, 多硅白云母硅含量随 X_{Na} 变化很小, 也随着压力增加而有规律地增加; 在三变域 $g+phn+gl+pa$, $g+phn+jd+cr$, $g+phn+jd+ky$ 中, 多硅白云母硅含量随 X_{Na} 变化不大, 但对于压力变化过于敏感; 在三变域 $g+phn+gl+jd$ 中, 多硅白云母硅含量与压力和 X_{Na} 都有关, 表现出随压力增加而增加, 随 X_{Na} 增加而降低的趋势; 在四变域 $g+phn+gl$ 和 $g+phn+jd$ 中, 多硅白云母的硅含量只随 X_{Na} 降低而增加, 与压力无关. 显然, 多硅白云母的硅含量明显与矿物组合有关. 如: 当多硅白云母与黑云母、石榴石共生时, 硅含量为 3.4 的等值线指示的压力约为 1.8 GPa; 当多硅白云母与石榴石、硬玉、蓝晶石共生时, 同样的硅含量指示的压力为 2.5~2.8 GPa.

3 多硅白云母地质压力计的应用

在高压变质岩石中,多硅白云母是确定变质作

用压力的重要矿物. 如在榴辉岩中, 多硅白云母+石榴石+绿辉石和(或)蓝晶石组合, 可作为有效的地质压力计. 但是在很多变质泥质或长英质岩中, 要确定变质作用压力, 只能依据多硅白云母硅含量的变化. 如果能够考虑全岩成分和矿物组合的影响, 可以得到非常理想的结果.

Mohr和Newton等人^[13]研究了美国北卡罗莱纳州 Great Smoky山区的巴洛型变质带, 其中蓝晶石-十字石变质带中的样品 1126 发育的矿物组合为 $g+phn+chl+bi+q$. Mohr根据石榴石-黑云母温度计和石榴石-斜长石- Al_2SiO_5 -石英压力计, 得到的温压范围为 $545\sim 615^\circ C$, $0.57\sim 0.75$ GPa. 在图 1 中, 这个组合是一个双变域, 根据白云母的氧化物含量, 用软件 AX 计算得到的硅含量为 3.14, 确定的温压范围为 $565\sim 600^\circ C$, $0.85\sim 0.95$ GPa. 压力虽然偏高, 但是仍然属于典型的中压区域.

张建新等^[14]将在柴北缘西段鱼卡地区发现的石榴石白云母片岩的矿物组合分为 3 期. 第一期进变质阶段的矿物组合为 $g+chl+ct+phn\pm st+q$, 第二期峰期阶段的矿物组合为 $g+ky+phn\pm ct+q$, 第三期退变质阶段的矿物组合为 $g+ct+chl+phn+st\pm ky+q$. 在图 2 中, 峰期矿物组合 $g+ky+phn+ct+q$ 是一个双变域, 其平衡温度不会超过 $600^\circ C$. 根据 Wei 和 Powell^[7]的 P - T 格子, 硬绿泥石的最高稳定温度也不会超过 $620^\circ C$. 在峰期矿物组合中测定的多硅白云母的硅含量为 3.40 的等值线并不通过图 2 中 $g+ky+phn+ct+q$ 的稳定区域, 说明所观测的组合并非平衡组合, 最可能的情况是峰期组合为不含硬绿泥石的三变组合. 图 2 中硅含量为 3.40 等值线位于 $P > 2.9$ GPa 的超高压区域, 与张建新等^[14]所估计的压力范围 $2.3\sim 3.1$ GPa 吻合, 但后者过于宽泛. 第三期矿物组合中出现十字石和绿泥石, 在图 2 中其稳定压力不会超过 1.45 GPa, 温度应该在 $565\sim 625^\circ C$ 之间, 与张建新等^[14]的温压条件 (581 ± 20) $^\circ C$, (1.22 ± 0.26) GPa 基本相似. 在图 2 中, 当十字石出现以后, 相应白云母的硅含量应降至 3.175 以下, 低于张建新等^[14]在第三期组合测定的多硅白云母的硅含量 3.32, 推测这一测定值并非代表真正与十字石共生的白云母成分.

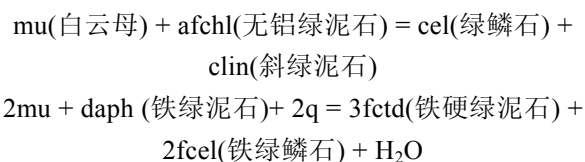
依据富钾泥质岩成分计算的 P - T 视剖面图(图 3)适用于确定二云二长片麻岩(片岩)的压力. 这种岩石在高压-超高压地体中非常普遍, 但是由于缺少适当的温压计, 难以确定其温压条件, 因此一直受到岩石

学家们的冷落, 以至于我们难以找到一个合适的应用实例. Massonne 和 Schreyer^[4]在 KFMASH 组合中用实验模拟了与钾长石、金云母和石英共生的多硅白云母的硅含量与温压条件的关系, 所得实验结果与图 3 基本一致. 例如实验样品 V113 的硅含量为 3.495, 温度为 $649^\circ C$, 压力为 1.5 GPa, 相应地在图 3 中得到的压力为 1.42 GPa. 另一个实验样品 V515 的硅含量为 3.314, 温度为 $593^\circ C$, 压力为 1.09 GPa, 相应地在图 3 中的压力为 1.0 GPa. 可见, 对相应的矿物组合来说, 用图 3 确定其压力条件是可行的.

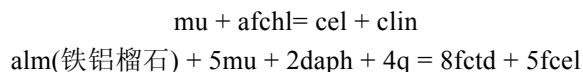
比较图 1 和 4 发现, 有含钠矿物相的组合指示的压力略高于没有含钠的相似组合. 例如在图 4 中组合 $g+phn+bi+ab$, 硅含量为 3.15, 温度为 $630\sim 750^\circ C$ 时, 压力为 $1.1\sim 1.25$ GPa, 在图 1 相似组合 $g+phn+bi$ 中, 当硅含量为 3.15, 温度为 $600\sim 750^\circ C$ 时, 压力为 $1.04\sim 1.08$ GPa. 因此对于钠含量很低的岩石, 利用忽略 Na_2O 的 KFMASH 体系也可以得到满意的结果.

4 讨论

多硅白云母的硅含量可以指示变质作用压力, 但是在不同的矿物组合中硅含量及其等值线的斜率不同. Massonne 和 Schreyer^[4,5]在 3 个矿物组合中的实验结果, 以及 Wei 和 Powell^[7,8]的热力学模拟研究也都证明了这一点. 这是因为在不同矿物组合中, 控制多硅白云母硅含量变化的端元相组分之间的变质反应不同. 如在图 1 的 $ct+chl+phn$ 三变组合中, 控制多硅白云母硅含量的反应为



由这两个反应所控制的多硅白云母硅含量等值线斜率很缓, 硅含量主要由压力控制. 但是在 $g+ct+chl+phn$ 双变组合中, 控制多硅白云母硅含量反应为



此时, 硅含量等值线出现中等的正斜率. 对于硅含量为 3.4 的多硅白云母来说, 在图 1 的 $ct+chl+phn$ 组合中, 指示的压力约为 $1.78\sim 1.88$ GPa. 而在 $g+ct+chl+phn$ 组合中, 指示的压力为 $1.88\sim 1.94$ GPa.

很多学者讨论过 Na_2O 对多硅白云母地质压力计

的影响。Massonne 和 Schreyer^[4]认为Na可以替代多硅白云母中的K,从而会降低硅含量。Wei和Powell^[8]研究认为Na的加入会使硅含量降低。从本文的研究来看,Na₂O对多硅白云母地质压力计的影响表现在3个方面:首先在同样的温压条件下,在KFMASH体系中加入Na会使多硅白云母硅含量降低,这一点与前人研究一致。例如在 $P=1.9\text{ GPa}$, $T=400^\circ\text{C}$ 的时候,图1三变组合ct+chl+phn中多硅白云母的硅含量为3.46,而在图4中,ct+chl+phn+gl三变组合中多硅白云母硅含量变为3.44。其次Na₂O的加入使得体系中AFM矿物相的稳定范围缩小,从而在不同程度上影响多硅白云母硅含量等值线的行为。对比图1和4很容易发现这一点。例如图1中黑云母的稳定上限为2.15 GPa,绿泥石的上限可达到3.2 GPa的超高压域,可以出现滑石。而在图4中黑云母的稳定上限为1.95 GPa,绿泥石的上限为2.6 GPa,不出现滑石。但是,在图1含有绿泥石和(或)黑云母的双变和三变矿物组合中多硅白云母硅含量等值线的性状,与图4中只含有一个含钠矿物相的相应矿物组合相似。例如在图1的g+phn+bi三变组合中,硅含量为3.30的等值线指示压力为1.6 GPa,在图4的g+phn+bi+gl和g+phn+bi+ab三变组合中,硅含量同样为3.30的等值线也指示压力为1.6 GPa左右,表明对那些只含有一个含钠矿物相的岩石,可以用KFMASH体系模拟其相平衡关系。第三,在NKFMASH体系中,随着Na₂O或 X_{Na} 的增加,或者 P - T 条件变化出现两个或两个以上的含钠矿物相时,多硅白云母的硅含量等值线的性状会明显变化(图5)。

5 结论

(i) 多硅白云母硅含量地质压力计明显受到矿物组合的控制。在KFMASH体系含有绿泥石或黑云母的双变和三变组合,以及在含有石榴石和蓝晶石的双变和三变组合中,多硅白云母硅含量等值线往往与压力有比较好的线性关系,可以用做地质压力计。在KFMASH体系含有纤柱石或硬绿泥石(而无绿泥石)的双变和三变组合中,多硅白云母的硅含量等值线往往斜率很陡,主要指示变质温度变化。而在KFMASH体系的四变组合中,多硅白云母硅含量与 P - T 条件无关。

(ii) 对于具有相同硅含量的多硅白云母来说,当与蓝晶石共生时指示的压力较高,而与钾长石共

生时,指示的压力较低。

(iii) 在KFMASH体系中加入Na₂O,会引起相同 P - T 条件和相似矿物组合中多硅白云母的硅含量降低。但如果只有一个含钠矿物相存在时,多硅白云母硅含量等值线的行为与KFMASH体系相似,在多数情况下可以用KFMASH体系模拟这种只含有一个含钠矿物相的天然岩石的 P - T 条件。但当矿物组合中含有两个或两个以上的含钠矿物相时,多硅白云母硅含量等值线往往与KFMASH体系相差很大。

致谢 感谢各位评审人对原稿提出的意见和建议。在本文撰写过程中,张景森博士给予了诸多指教,在此特表谢意。

参 考 文 献

- Ernst W G. Significance of phengitic micas from low-grade schists. *Am Miner*, 1963, 48: 1357—1373
- Velde B. Phengite micas: synthesis, stability, and natural occurrence. *Am J Sci*, 1965, 263: 886—913
- Velde B. Si^{+4} content of natural phengites. *Contrib Miner Petrol*, 1967, 14: 250—258
- Massonne H J, Schreyer W. Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and quartz. *Contrib Miner Petrol*, 1987, 96: 212—224[DOI]
- Massonne H J, Schreyer W. Stability field of the high-pressure assemblage talc+ phengite and two new phengite barometers. *Eur J Miner*, 1989, 1: 391—410
- Massonne H J, Szpurka Z. Thermodynamic properties of white micas on the basis of high-pressure experiments in the systems K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O and K_2O - FeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O . *Lithos*, 1997, 41: 229—250[DOI]
- Wei C J, Powell R. Phase relations in high-pressure metapelites in the system KFMASH(K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) with application to natural rocks. *Contrib Miner Petrol*, 2003, 145: 301—315[DOI]
- Wei C J, Powell R. Phase relations in high-pressure metapelites in the system NKFMASH(Na_2O - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) with application to natural rocks. *Contrib Miner Petrol*, 2004, 145: 301—315[DOI]
- Coggon R, Holland T J B. Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers. *J Metamorph Geol*, 2002, 20: 683—696 [DOI]
- White R W, Powell R, Holland T J B. Calculation of partial melting equilibria in the system Na_2O - CaO - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O (NCKFMASH). *J Metamorph Geol*, 2001, 19: 39—153
- 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 柴北缘西段榴辉岩相的变质泥质岩: 榴辉岩与围岩“原地”关系的证据. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(9): 825—834
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔2000~3000米正、副片麻岩的地球化学特性及其成因机制. *岩石学报*, 2005, 21: 305—324
- Mohr D W, Newton R C. Kyanite-staurolite metamorphism in sulfidic schists of the anakeesta formation, great smoky mountains, North Carolina. *Am J Sci*, 1983, 283: 97—134