第13卷第3期 岩 石 学 报 Vol. 13, No. 3
1997年8月 ACTA PETROLOGICA SINICA Aug., 1997

含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石相平衡：以新疆萨尔托海蛇绿岩中变基性岩石为例*

Phase Equlibrium of Grossular-bearing Prehnite-Pumpellyite Facies: An Example From Metabasites in Saertuohai Ophiolite of Xinjiang

张立飞
Zhang Lifei

（北京大学地质学系 北京 100871）
(*Department of Geology, Peking University, Beijing*, 100871)

摘 要 利用矿物内部一致性热力学数据，建立了在 CaO-Al_2O_3-MgO-SiO_2-H_2O 体系中含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石变质相平衡，确立了在葡萄石-绿纤石-钙铝榴石-绿帘石-绿泥石-石英组合中出现绿纤石-钙铝榴石共生、葡萄石-绿纤石共生、葡萄石-绿帘石共生和绿泥石-绿帘石-钙铝榴石共生的 *PT* 区间及其意义。根据该相平衡计算了新疆萨尔托海蛇绿岩中变基性岩石的葡萄石-绿纤石相变质 *PT* 条件为 $T=325℃$～$335℃$，$P=0.45$～$0.475GPa$。并讨论了 $Fe^{3+}=Al$ 替代对于形成钙铝榴石-绿纤石共生的影响。本文的研究表明，葡萄石-绿纤石-钙铝榴石-绿帘石-绿泥石-石英共生组合是葡萄石-绿纤石相中偏高压组合，钙铝榴石-绿纤石共生与绿纤石-阳起石相一样代表着葡萄石-绿纤石相中较高压相，钙铝榴石在葡萄石-绿纤石相中是可以稳定存在的。

Abstract Using the internally-consistent thermodynamic data, the mineral phase equilibrium of grossular-bearing prehnite-pumpellyite facies has been set up in this paper. The pressure-temperature conditions of the parageneses of Pu-Gro-Ep, Pr-Pu, Pr-Ep and Chl-Pr-Gro and their significance have been also discussed. According to this phase equilibrium, the metamorphic pressure and temperature conditions of prehnite-pumpellyite facies of metabasite in Saertuohai ophiolite of Xinjiang are 325℃～335℃ and 0.45～0.475GPa. It is shown that the mineral association of pumpellyite-grossular is controlled by the substitution of Fe^{3+} and Al. It is also shown that the prehnite-pumpellyite-grossular-epidote-chlorite-quartz is a higher pressure paragenesis of prehnite-pumpellyite facies. According to this petrogenetic grid , the mineral associa-

* 1997-01-15收稿，1997-06-10改回.
本文为国家自然科学基金资助（项目号49202026）成果.
作者简介：张立飞 男 1963年生 副教授 岩石学专业

tion of pumpellyite and grossular is formed in the higher pressure similar to that of pumpellyite-actinolite facies. Grossular is stable in the prehnite-pumpellyite facies metabasites.

主题词： 相平衡 钙铝榴石 葡萄石-绿纤石相 蛇绿岩 新疆
Key words： Phase equilibrium; Grossular; Prehnite-pumpellyite facies; ophiolite; Xinjiang

分类号：P588.34
Classific. code：P588.34

1 引言

葡萄石-绿纤石相最早是由 Coombs (1960) 和 Seki (1961) 提出来的，用来衔接由沸石相到绿片岩相的转化。后来 Hashimoto (1966) 发现在压力较高的条件下，葡萄石不出现，而出现绿纤石-阳起石共生，因而提出了绿纤石-阳起石相的概念。Liou et al. (1985) 提出在压力较低的条件下，绿纤石不稳定而形成葡萄石-阳起石共生，又定义了葡萄石-阳起石相。在此基础上，根据实验热力学数据的总结，Liou et al. (1985, 1987) 建立了葡萄石-阳起石相、葡萄石-绿纤石相和绿纤石-绿纤石相平衡岩石成因格子，奠定了葡萄石-绿纤石相研究基础。近来，Frey et al. (1991)，Powell et al. (1993)，Beiersdorfer and Day (1994) 利用矿物内部一致性热力学数据 (Berman, 1988, 1991; Powell and Holland, 1990) 对此又进行了进一步的计算和补充，使其更加完善和使用。不难看出该相平衡岩石成因格子只是讨论了在葡萄石-绿纤石相中出现了葡萄石-绿纤石-阳起石-绿帘石-绿泥石矿物共生组合的相平衡与转化。早在七十年代，Coombs et al. (1977) 就报道在新西兰葡萄石-绿纤石相变质火山岩中出现了葡萄石-钙铝铁榴石-磁铁矿组合，但有关含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石相平衡关系及其形成条件都没有进一步的工作。最近，Frey et al. (1991) 在进行很低温变质相理论计算时，虽然注意到了钙铝榴石是可以出现的，但却认为在绿泥石存在的组合中，钙铝榴石是不稳定的。

本文在研究新疆西准噶尔萨尔托海蛇绿岩的变辉长辉绿岩中发现了钙铝榴石-绿纤石-葡萄石-绿帘石-绿泥石共生组合，利用矿物内部一致性热力学数据 (Berman, 1988; 1991)，建立了含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石相平衡岩石成因格子，并利用该岩石成因格子讨论了萨尔托海蛇绿岩中变质基性岩石的葡萄石-绿纤石相变质条件及其影响因素。

2 CMASH 体系中含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石相平衡

基性岩石的主要组分为 CaO、MgO、FeO、Al_2O_3、Fe_2O_3、SiO_2和 H_2O，通常 MgO 和 FeO 组分、Fe_2O_3和 Al_2O_3组分作为类质同相组分，SiO_2视为过剩组分。这样基性岩石可以概括为 CMASH ($CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) 体系，其 $A(Al_2O_3+Fe_2O_3)$-C(CaO)-F(FeO+MgO) 组分三角形如图1所示。以往在讨论葡萄石-绿纤石相平衡时都是以葡萄石-绿纤石-阳起石-绿泥石-绿帘石-石英矿物组合为基础，这是由于富 Fe-Mg 的基性玄武岩组分通常投影在 Gro-Chl 线以下的区域（图1中的实心圆点，矿物代号见表1，下同）。但较富含 Al 的辉长（绿）岩类组分则投影在 Gro-Chl 线之上的部位（图1中的实心三角点），这样阳起石不出现，而出现

了钙铝榴石，形成了葡萄石-绿纤石-钙铝榴石-绿帘石-绿泥石-石英矿物共生组合。根据矿物内部一致性热力学数据（Berman，1988，1991），并利用 TWEEQU Geo-Cal 软件计算该矿物组合的平衡相关系和温压条件（图2）。为了叙述方便，本文计算所用矿物分子式、热力学端员矿物结构式及其缩写表示在表1中。

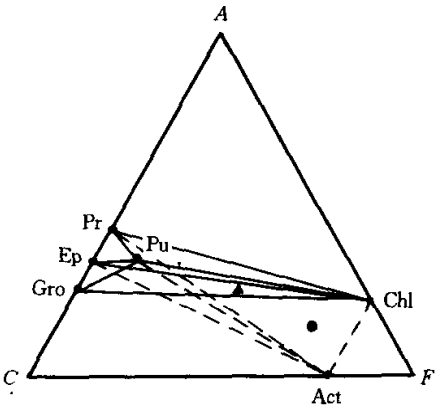


图1 变基性岩石中葡萄石-绿纤石相矿物投影 *ACF* 图解

实心三角点为较富 Al 的辉长岩组分；实心圆点为基性玄武岩组分

Fig. 1 *ACF* diagramm of prehnite-pumpellyite facies minerals in metabasites

Solid triangle: Al-gabbro; Solid circle: basalt

纯理想矿物端员相平衡关系如图2a 所示，从不变点 CHEPPGQ（示绿泥石-绿帘石-葡萄石-绿纤石-钙铝榴石-石英相平衡）有7条单变线发出，每条反应线都包含有6个矿物相。在玄武质岩石很低温变质过程中，Chl、Q 和 H_2O 几乎在所有矿物组合中都普遍存在，因此可以视为过剩相组分，反应〈Chl〉，〈Q〉和〈H_2O〉可以从相平衡中减除如图2b 所示。这样从不变点发出的5条单变线把很低温变质 *PT* 范围划分为4个 *PT* 区间：Pr-Pu 相，Pr-Ep 相，Pu-Gro 相和 Gro-Chl-Ep 相。与葡萄石-绿纤石-阳起石-绿帘石-绿泥石-石英矿物组合相平衡比较，可以得出以下几点结论：

1）通常认为 Pu-Pr-Act-Ep-Chl-Q 矿物共生组合的不变点为325℃，0.3～0.4GPa（Powell et al.，1993；Beiersdorfer and Day，1994），本文计算表明 Pu-Pr-Gro-Ep-Chl-Q 组合的不变平衡点为350℃，0.5GPa，因此 Pu-Pr-Gro-Ep-Chl-Q 组合比 Pu-Pr-Act-Ep-Chl-Q 组合的平衡压力偏高，温度也稍高；即在相同的缓冲矿物组合 Pu-Pr-Ep-Chl-Q 中，钙铝榴石的出现，阳起石的消失可能代表着相对较高的压力条件。

2）Pu-Gro 共生出现在较高的压力条件下，与 Pu-Pr-Act-Ep-Chl-Q 组合中的 Pu-Act 相一样，是 Pu-Pr-Gro-Ep-Chl-Q 组合中的相对高压相矿物组合。

3）Pr-Ep 相与 Powell et al.（1993）所确定的 Pu-Pr-Act-Ep-Chl-Q 组合中的 Pr-Ep 相相同，都相当于 Liou et al.（1985）提出的 Pr-Act 相，属于很低温变质矿物组合中的低压相。

4）Pr-Pu 相稳定的 *PT* 区间比较宽，并可进一步划分为含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石相（Pr-Pu-Gro）和含绿泥石的葡萄石-绿纤石相（Pr-Pu-Chl）。这比在 Pu-Pr-Act-Ep-Chl-Q 组合中所确定的 Pr-Pu 相范围要宽得多，这可能与广泛出现的 Pr-Pu 相矿物组合的地质条件相符合。Frey et al.（1991）利用矿物内部一致性热力学数据建立很低温变质相时，曾注意到 Pr-Pu 相狭窄的 *PT* 条件，认为是由于没有考虑组分的替代所造成的活度变化所致。本文的研究结果表明，有钙铝榴石出现的葡萄石-绿纤石相稳定的 *PT* 区间可能更具有广泛性，比较接近于其广泛出现的地质条件。

表1 本文计算所用矿物分子式、热力学端员矿物结构式及其缩写符号

Table 1 Mineral formula, thermodynamic end-members structure formula and their abbreviations used for thermodynamic calculation in this paper

矿物名称	分子式	缩写符号
葡萄石	$(Ca,Mg)_2(Al,Fe^{3+})_2Si_3O_{10}(OH)_2$	Pr
Ca-葡萄石	$Ca_2Al^{M1}(Si,Al)^{M2}Si_2O_{10}(OH)_2$	Ca-Pr
绿纤石	$Ca_4Al_4(Mg,Fe)_{2-x}(Al,Fe^{3+})_xSi_6O_{20+x}(OH)_{8-x}$	Pu
Mg-Al 绿纤石	$Ca_4Al_4^{M1}(Mg,Al)^{M2}Si_6O_{21}(OH)_7$	Mg-Al-Pu
石榴石	$(Ca,Fe^{2+},Mg,Mn)_3(Al,Fe^{3+})_2Si_3O_{12}$	Gt
钙铝榴石	$Ca_3Al_2Si_3O_{12}$	Gro
绿帘石	$Ca_2(Al,Fe)_3Si_3O_{12}(OH)$	Ep
黝帘石	$Ca_2Al^{M1}Al_2^{M2}Si_3O_{12}(OH)$	Zo
绿泥石	$(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	Chl
斜绿泥石	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$	Cln
石英	SiO_2	Q

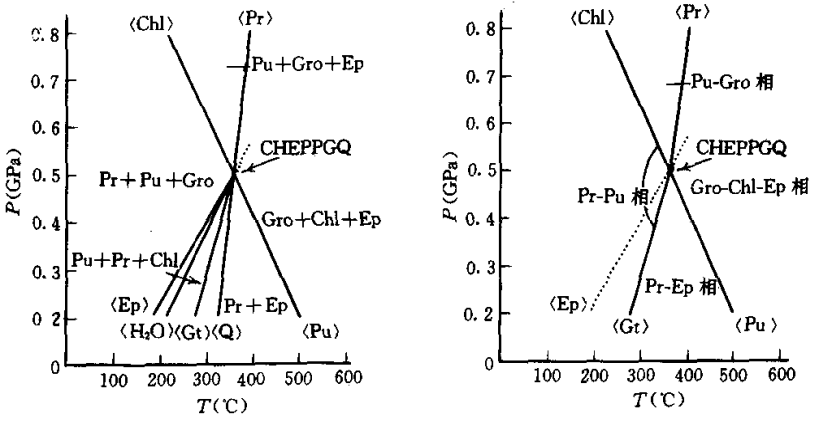


图2 CMASH 体系中含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石相平衡

a. Pu-Pr-Gro-Ep-Chl-Q 组合的相平衡，图中各反应线：〈Ep〉为 $10Pu+15Q+6Gro+2H_2O=29Pr+2Chl$；〈Chl〉-〈Pu〉为 $2Ep+2Gro+3Q+4H_2O=5Pr$；〈H_2O〉为 $20Pu+10Gro+27Q=4Chl+53Pr+2Ep$；〈Q〉为 $5Pu+5Ep+2Pr+2Gro+Chl+9H_2O$；〈Pr〉为 $25Pu=29Ep+6Q+14Gro+5Chl+53H_2O$；〈Gt〉为 $5Pu+3Q=3Ep+7Pr+Chl+5H_2O$。b. Chl、Q 和 H_2O 作为过剩相组分的相平衡

Fig. 2 Petrogenetic grid of grossular-bearing prehnite-pumpellyite facies in CMASH system

3 新疆萨尔托海蛇绿岩的基本特征

3.1 野外产状及岩石学特征

新疆萨尔托海蛇绿岩属于达拉布特蛇绿岩带的一部分，集中分布在西准噶尔达拉布特断裂以西的萨尔托海地区（图3）。大致呈北东-北西西方向分布，最宽约5～8km，其上为石炭系地层不整合覆盖，其形成时代一般认为属于早-中泥盆世（肖序常等，1992）。

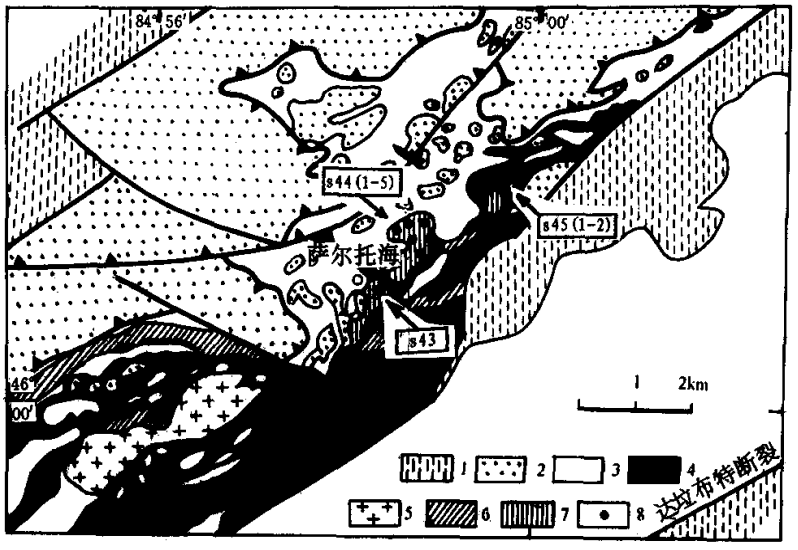


图3 新疆萨尔托海蛇绿岩地质简图（据 Feng et al., 1989）

1. 石炭系碎屑岩；2. 泥盆系基性火山岩；3. 泥盆系基性熔岩；4. 超基性岩；5. 花岗岩；6. 硬砂岩；7. 辉长辉绿岩；8. 样品号

Fig. 3 The geological skech of Saertuohai ophiolite in Xinjiang (after Feng et al., 1989)

该蛇绿岩大都已被肢解，以蛇绿混杂岩形式出现（肖序常等，1992），但根据其岩性特征，大致自上而下恢复其层序为（朱宝清等，1985）（图4）：

硅质岩：有时夹凝灰岩及少量灰岩透镜体，含有放射虫。

基性熔岩：气孔状构造、枕状构造熔岩，球粒玄武岩及少量安山质玄武岩和角斑。

辉长辉绿岩：以辉长岩为主，通常以小岩株状或层状侵入体出现，向上则出现少量。

超基性岩：以斜辉辉橄岩为主，少量的纯橄岩，橄榄岩和二辉橄榄岩团块，但多已蛇纹石化。

3.2 变质矿物学特征

根据岩相学研究结合电子探针分析，萨尔托海蛇绿岩中基性岩石普遍经历了葡萄石-绿纤石相变质作用，其主要的变质矿物有绿纤石、葡萄石、钙铝榴石、绿帘石、绿泥石等。其分布如图4所示。

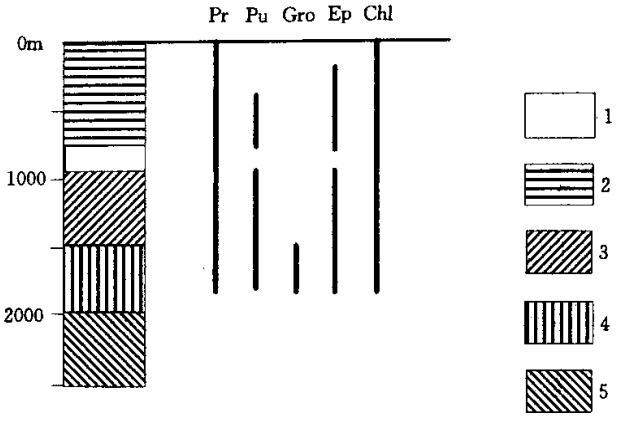


图4 新疆萨尔托海蛇绿岩剖面及变质矿物分布示意图（据朱保清等，1985）①

Fig. 4 The litho section of Saertuohai ophiolite and the distribution of metamorphic minerals (after Zhu et al., 1985)

3.2.1 绿纤石

主要出现在枕状基性熔岩和其下的辉绿辉长岩脉中，绿纤石在单偏光下具有翠绿色多色性，常以针柱状和放射状出现在火山岩的玻璃、火山熔岩的杏仁孔中，与绿帘石、绿泥石等共生。或以长柱状与钙铝榴石共生出现在辉长辉绿岩中。

绿纤石的成分分析数据如表2所示，根据 Coombs et al.（1984），该矿物的化学式为 $W_4X_2Y_4Z_6O_{20+x}(OH)_{8-x}$，其中 $x=1$，W=Ca，Mn；X=Mg，Fe^{2+}，Mn，Al，Fe^{3+}；Y=Al，Fe^{3+}；Z=Si。其 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al)$ 变化于0.01～0.03之间。在 Al-Fe^*-Mg 图解中，研究区绿纤石主要集中在 Al>70%；Mg<10%，Fe^*<30% 的范围内（图5）。

3.2.2 葡萄石

葡萄石在萨尔托海变蛇绿岩中分布普遍，常以放射状或颗粒状出现在基性火山岩的杏仁孔中。在火山碎屑岩中则以脉状或放射状与绿帘石或绿泥石共生。在变辉长辉绿岩中以粒状与绿纤石、钙铝榴石共生。葡萄石在单偏光下无色，中正突起，在正交偏光下具有蝴蝶状消光现象。其化学成分特征如表3所示，接近于理想钙葡萄石成分，其 Fe/(Fe+Al)变化于0.10～0.11之间。

3.2.3 钙铝榴石

只出现在变辉长辉绿岩中，颗粒细小，粒度变化于0.01～0.03mm，与绿纤石共生。粒状钙铝榴石的成分几乎接近于钙铝榴石端员（表2），而脉状的石榴石含一定量的钙铁榴石。同一颗粒中心和边部成分变化不明显。

① 朱保清等. 1985. 新疆北部蛇绿岩. 新疆305项目报告.

表 2 绿纤石、石榴石矿物成分的电子探针分析数据(%)

Table 2 Representative electronic microprobe analyses(%) of gemet and purpellyite

矿 物	石榴石					绿纤石							
样品号	s44-1	s44-2	s44-3	s44-5	s43	s44-1	s44-2	s44-4	s44-5	s44-6	s45-1	s45	
SiO_2	39.41	39.11	38.27	39.12	38.80	36.51	36.59	35.82	36.48	36.00	36.60	37.44	37.91
TiO_2	0.35	0.77	0.62	0.55	0.01	0.02	0.01	0.07	0.09	0.03	0.01	0.01	0.01
Al_2O_3	22.06	21.08	21.47	20.57	21.04	24.40	26.01	24.84	25.23	25.19	25.56	21.51	21.59
FeO*	2.61	3.53	5.66	3.46	2.81	5.85	3.03	3.26	4.00	3.57	4.06	7.71	8.21
MnO	0.32	0.29	0.46	0.58	0.51	0.03	0.13	0.04	0.09	0.06	0.06	0.02	0.00
MgO	0.30	0.21	2.26	0.12	1.96	2.20	1.90	1.49	1.34	2.31	1.39	1.50	
CaO	34.77	34.62	30.63	34.94	36.23	24.90	24.98	25.91	25.98	25.80	24.39	24.69	25.02
Total	99.92	99.61	99.37	99.34	100.1	93.71	93.34	92.05	93.61	92.15	93.18	92.97	94.39
	以 12 个氧计算					以 24.5 个氧计算							
Si	2.97	2.98	2.91	2.99	2.96	5.93	5.89	5.88	5.90	5.90	5.91	6.19	6.19
Al^{IV}	0.03	0.02	0.09	0.01	0.04	0.07	0.11	0.12	0.10	0.10	0.09	0.00	0.00
Al^{VI}	1.93	1.87	1.83	1.84	1.85	4.60	4.82	4.68	4.71	4.76	4.77	4.19	4.15
Ti	0.02	0.04	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe^{3+}	0.08	0.11	0.18	0.11	0.15	0.03	0.14	0.09	0.10	0.07	0.07	0.07	0.06
Fe^{2+}	0.08	0.11	0.18	0.11	0.03	0.77	0.27	0.36	0.44	0.42	0.48	0.99	1.06
Mg	0.03	0.02	0.26	0.01	0.03	0.47	0.53	0.47	0.36	0.33	0.56	0.34	0.37
Mn	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Ca	2.81	2.82	2.49	2.86	2.96	4.34	4.31	4.56	4.50	4.53	4.22	4.38	4.38
$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al)$						0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
$\alpha_{Mg\text{-}Al\text{-}Pu}$						0.34	0.56	0.50	0.40	0.41	0.50	0.10	0.08
Alm	0.04	0.04	0.06	0.03	0.01								
Gro	0.93	0.94	0.83	0.94	0.96								
Prp	0.02	0.02	0.09	0.02	0.02								
Spe	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01								

表中数据由北京大学电子探针实验室测试.

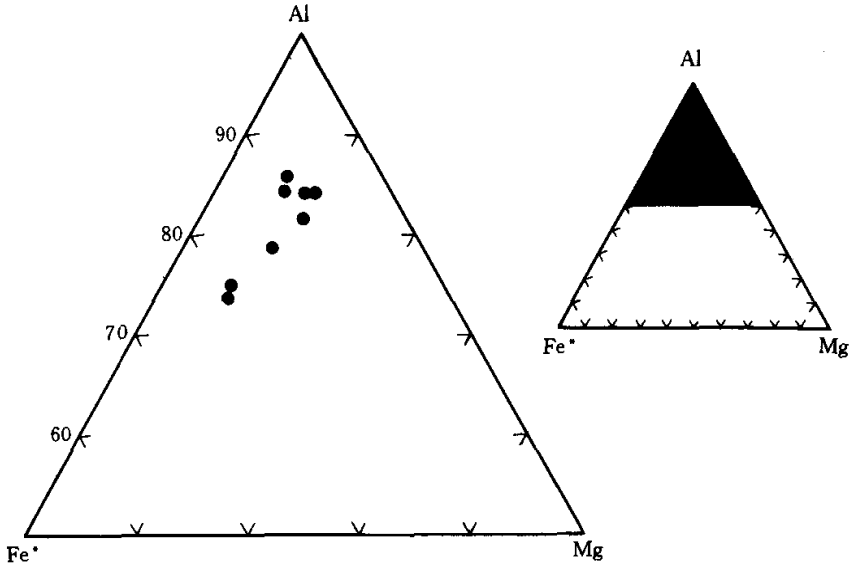


图5 绿纤石的 Al-Fe*-Mg 图

Fig. 5 The diagram of Al-Fe*-Mg of pumpellyite

表3 绿泥石、绿帘石和葡萄石电子探针分析数据表

Table 3 Representative electronic microprobe analyses of chlorite, epidote and prehnite

矿 物	绿泥石					绿帘石			葡萄石	
样品号	s43	s44-1	s44-2	s44-3	s44-4	s44-1	s44-2	s44-4	s44-1	s44-4
SiO_2	26.95	27.10	27.98	31.77	27.17	38.25	37.37	34.17	42.54	42.47
TiO_2	0.00	0.02	0.02	0.03	0.08	0.25	0.04	0.04	0.04	0.13
Al_2O_3	17.53	18.70	19.21	20.11	18.59	24.82	21.54	19.85	22.05	20.79
FeO*	28.04	19.91	22.26	7.80	22.00	3.49	14.22	22.83	3.35	3.73
MnO	0.57	0.14	0.18	0.12	0.20	0.12	0.09	0.31	0.15	0.04
MgO	13.65	19.98	19.51	9.71	18.52	2.89	0.04	0.36	0.14	0.00
CaO	0.16	0.30	0.06	15.21	0.05	27.97	25.06	19.82	26.60	27.42
Total	86.91	86.35	89.82	85.38	86.89	97.91	98.43	97.52	95.69	94.77
	以14个氧计算					以12.5个氧计算			以11个氧计算	
Si	2.92	2.82	2.83	3.24	2.84	3.00	2.99	2.82	2.99	3.02
Al^{IV}	1.08	1.18	1.17	0.77	1.16	0.00	0.00	0.18	1.83	1.74
Al^{VI}	1.15	1.12	1.12	1.66	1.13	2.30	2.03	1.75	1.83	1.74
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe^{3+}						0.21	0.86	1.42	0.20	0.22
Fe^{2+}	2.54	1.74	1.88	0.67	1.92					
Mn	0.05	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00
Mg	2.20	3.10	2.94	1.48	2.89	0.34	0.00	0.04	0.01	0.00
Ca	0.02	0.03	0.01	1.66	0.01	2.35	2.15	1.75	2.00	2.09
Fe/(Fe+Al)	0.53	0.43	0.45	0.22	0.46	0.08	0.30	0.45	0.11	0.10
α（活度）	0.02	0.10	0.07	0.01	0.07	0.77	0.70	0.58	0.91	0.87

样品由北京大学电子探针实验室测试.

3.2.4 绿帘石

绿帘石几乎在整个蛇绿岩剖面中都有出现，在基性火山熔岩中常以放射状与绿泥石、葡萄石或绿纤石共生。在变辉长辉绿岩中，则以粒状与绿纤石、钙铝榴石共生。同一颗粒由中心至边部成分变化不明显，其 Fe/(Fe+Al)变化于0.08～0.45之间（表3）。

3.2.5 绿泥石

绿泥石几乎出现在所有的基性火山岩和变辉长辉绿岩中，常以他形或片状与绿纤石、葡萄石、绿帘石等共生。在 Hey（1954）的 Fe/(Fe+Mg)-Si 图中，本区绿泥石成分则属于蠕绿泥石到密绿泥石。

4 萨尔托海蛇绿岩变基性岩石的葡萄石-绿纤石相变质条件及 $Fe^{3+}=Al$ 替代对平衡的影响

该区葡萄石-绿纤石相变质矿物成分的电子探针分析如表2、3所示，利用目前已发表的有关 Mg-Al 绿纤石、Ca-葡萄石、黝帘石、斜绿泥石的理想混合活度模型（表4），其结构式及 M1 和 M2位置替代见表1，计算其实际矿物活度列于表2、3中。

需要指出的是有关石榴石的活度计算问题，一般认为石榴石是由钙铝榴石-镁铝榴石-铁铝榴石-锰铝榴石构成的四元固溶体，现已建立了许多有关石榴石非理想活度模型，但目前应用比较多的是 Berman（1990）的石榴石四元固溶体非理想非对称混合模型，其活度系数（γ）如下由方程给出：

$$nRT\ln\gamma_m = \sum W_{i,j,k}(Q_m X_i X_j X_k / X_m - 2X_i X_j X_k)$$

其中 n 为固溶体中离子替代位置数目，W 为 Margules 常数，Q_m 为相 i、j、k 相对于相 m 替代的统计数目。

表4 本文计算所用矿物活度模型及其资料来源

Table 4 Mineral activity expressions used in this paper and the irsource references

矿物	活度模型	来源文献	热力学参数
Mg-Al 绿纤石	$4(X^{M1}_{Mg}X^{M2}_{Al})$	Freyetal(1991)	Berman(1988)
Ca-葡萄石	$X^{c}_{Ca}X^{M1}_{Al}$	Digeland and Gordon(1993)	Berman(1988)
黝帘石	$(X_{Ca})^2(X^{M1}_{Al})$	Droop(1985)	Berman(1988)
斜绿泥石	$14.93(Mg/6)^5(Al/6)$	Begin(1992)	Berman(1988)

各端员矿物活度则为：$\alpha_{Gro}=(X_{Gro}\gamma_{Gro})^3$，$\alpha_{Py}=(X_{Py}\gamma_{Py})^3$，$\alpha_{Al_m}=(X_{Al_m}\gamma_{Al_m})^3$，$\alpha_{Sp}=(X_{Sp}\gamma_{Sp})^3$。根据图2中所确定的含钙铝榴石葡萄石-绿纤石相平衡关系，利用以上实际矿物计算活度，萨尔托海蛇绿岩变质基性岩石含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石相变质条件如图6所示，温度变化于 325℃～335℃，压力变化于0.45～0.475GPa，其大致的地热梯度相当于20℃/km。

由图2可以看出控制钙铝榴石（Gro）出现的主要变质反应是：

$$4Chl + 53Pr + 2Ep = 10Gro + 20Pu + 27Q$$

这是个典型的连续反应，反应物绿帘石和生成物绿纤石之间构成固溶体，明显地受体系中

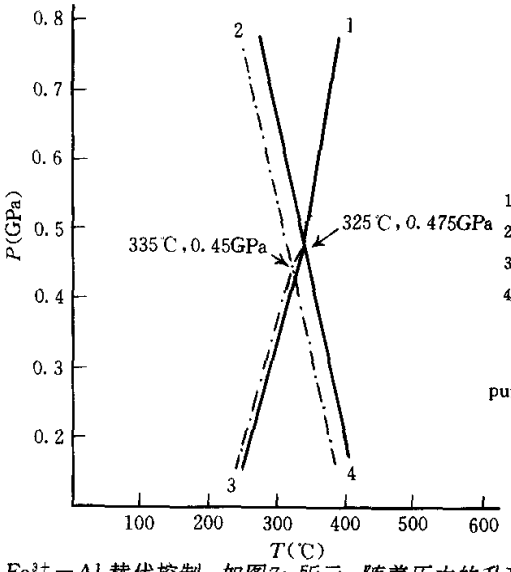


图6 新疆萨尔托海蛇绿岩中变基性岩石的葡萄石-绿纤石相变质 *P-T* 图

1. $25Pu=29Ep+6Q+14Gro+5Chl+53H_2O$;
2. $2Ep+2Gro+3Q+4H_2O=5Pr$;
3. $5Pu+3Q=3Ep+7Pr+Chl+5H_2O$;
4. $5Pr=2Ep+2Gro+3Q+4H_2O$;

实线为样品 s44-1；虚线为样品 s44-4

Fig. 6 The P-T diagram of prehnite-pumpellyite facies metabasites of Saertuohai ophiolite in Xinjiang

$Fe^{3+}=Al$ 替代控制，如图7a 所示，随着压力的升高，富铁绿帘石 (Fe-Ep) 与葡萄石反应形成了绿纤石和钙铝铁榴石 (Gra)，随着压力的逐渐升高，富铁绿帘石逐渐向富铝绿帘石 (Al-Ep) 转化，而形成的钙铝铁榴石则逐渐向着钙铝榴石组分转化。最后绿帘石的成分替代的 $Fe^{3+}=Al$ 滑动线穿过 Pu-Pr-Gra 平面，反应结束。这一过程用相图表示如图7b。

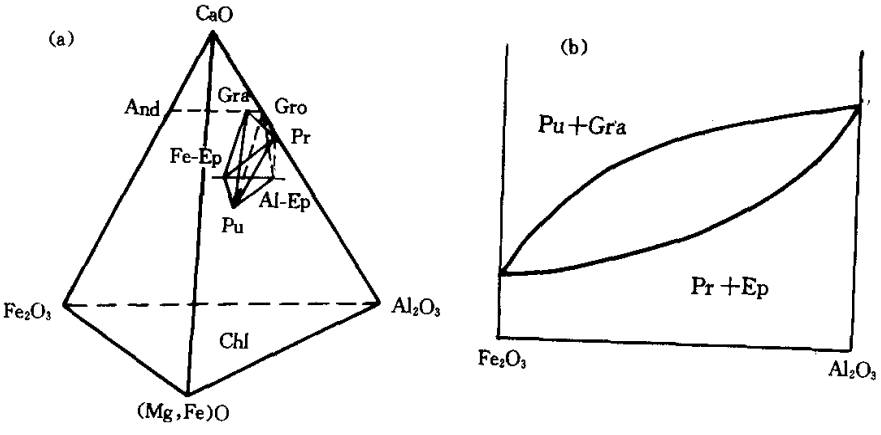


图7 $Fe^{3+}=Al$ 替代对反应 Chl+Pr+Ep→Pu+Gro+Q 平衡的影响

a. 含石榴石的葡萄石-绿纤石相矿物的 $CaO-(Mg,Fe)O-Fe_2O_3-Al_2O_3$ 四面体投影图；

b. 固溶体反应 $4Chl+53Pr+2Ep = 20Pu+10Gro+27Q$ 的 $P-X_{Fe^{3+}}$ 图解

Fig. 7 The effect of $Fe^{3+}=Al$ on the reaction of Chl+Pr+Ep→Pu+Gro+Q

5 结论

1. 钙铝榴石在很低温葡萄石-绿纤石相变质过程中是可以稳定存在的。根据矿物内部一致性热力学数据计算，在CMASH体系中出现葡萄石-绿纤石-钙铝榴石-绿帘石-绿泥石-石英组合的变质条件是：压力为0.5GPa，温度为350℃左右。

2. 绿纤石-钙铝榴石的共生相当于绿纤石-阳起石相，也是在相对较高的压力条件下形成的。其平衡的 PT 区间明显受 $Fe^{3+}=Al$ 替代的影响。

3. 利用本文所建立的含钙铝榴石的葡萄石-绿纤石相平衡，新疆萨尔托海蛇绿岩中变基性岩石的变质条件为 $T=325℃\sim335℃$，$P=0.45\sim0.475GPa$。

致谢 滕晓炯同学参加了部分野外工作，S. Banno教授对此文提出过宝贵的修改意见，在此一并表示感谢。谨以此文献给导师董申保院士八十寿辰！

参 考 文 献

肖序常等 1992，新疆北部及其邻区大地构造．北京：地质出版社

Begin N J. 1992. Contrasting mineral isograd sequences in metabasites of the Cape Smith Belt, northern Quebec, Canada: three new bathograds for mafic rocks. J. Metamorphic Geol., 10: 685～704

Beiersdorfer R E and Day H. 1994. Mineral paragenesis of pumpellyite in low-grade mafic rocks. In: Low-Grade Metamorphism of Mafic Rocks (eds. Schiffman P and Day H W), Geological Society of America, Special Paper, 296: 5～27

Berman R G. 1988. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2. J. Petrol., 29: 445～522

Berman R G 1990. Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets, American Mineralogist, 75: 328～344

Berman R G 1991. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique with petrological applications. Canada Mineralogist, 29: 833-855

Coombs D S. 1960. Lower grade mineral facies in New Zealand. 21st Int. Geol. Congr. Copenhagen, 13: 339～351

Coombs D S, Nakamura Y and Vuagnat M. 1976. Pumpellyite-actinolite facies schists of the Tayanne Formation near Loeche, Valialis, Switzerland. J. Petrol., 17: 440～471.

Coombs D S, Kawachi Y, Houghton B F, Hyden G, Pringle, I J and Williams J G 1977. Andradite and andradite-grossular solid solutions in very low grade regionally metamorphosed rocks in South New Zealand. Contrib. Mineral. Petrol., 63: 229～246

Digel S and Ghent E D. 1994. Fluid-mineral equilibria in prehnite-pumpellyite to greenschist facies metabasites near Flin Flon, Manitoba, Canada: implications for petrogenetic grids. J. Metamorphic Geol., 12: 467～477

Droop G T R. 1985. Alpine metamorphism in the south-east Tauern Window, Austria. 1. P-T varations in space and time. J. Metamorphic Geol., 3: 371～402

Feng Y M, Coleman R C, Tilton C and Xiao X. 1989. Tectonic evolution of the west Junggar region, Xinjiang, China. Tectonics, 8: 729～752

Frey M, De Capitani C and Liou J G. 1991. A new petrogenic grid for low-grade metabasites. J. Metamorphic Geol., 9:497～509

Hashimoto M. 1966. On the prehnite-pumpellyite metagraywacke facies. J. Geol. Soc. Japan, 72: 253～265

Hey M H. 1954. A new review of the chlorites. Mineralogical Magazine, 30: 277-292

Liou J G, Maruyama S and Cho M. 1985. Phase equilibria and mineral parageneses of metabasites in low-grade metamor-

phism. Mineralogical Magazine,. 49: 321～333

Liou J G, Maruyama S and Cho M. 1987. Very low grade metamorphism of volcanic and volcanoclastic rocks-minearl assemblages and mineral facies. In: Low Temperature Metamorphism (ed. M. Frey). Blackie, Glasgow, 59～113

Powell W G, Carmichael D M and Hodgson C J. 1993. Thermobarometry in a subgreenschist to greenschist transition in metabasites of the Abitibi greenstone belt, Superior Province. Canada. J. Metamorphic Geol., 11: 165～178

Seki Y. 1961. Pumpellyite in low-grade regional metamorphism. J. Petrol., 2: 407～423