1000-0569/ 1999/015(03)-0463-68 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

黑云母-斜方辉石温度计的重新标度及其应用*

吴春明 潘裕生 王凯怡

中国科学院地质研究所, 北京 100029.

Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029.

1999-01-20 收稿, 1999-05-21 改回.

Wu Chunming, Pan Yusheng and Wang Kaiyi. 1999. Refinement of the biotite-orthopyroxene geothermometer with applications. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 463～468

Abstract Biotite-orthopyroxene geothermometer is refined on the basis of Fonarev and Konilov's (1986) Fe-Mg exchange experiment. Five runs are excluded from regression due to possible disequilibrium. In the first step, both biotite and orthopyroxene are treated as binary symmetric regular solutions, and the non-ideal Fe-Mg mixing properties are described as W_G^{Bio} = 4490(±2050) + 7.2910(±0.7125)T (J/mol) and W_G^{Opx} = 2145(±614) + 7.9627(±0.7429)T (J/mol), respectively, on one cation exchange basis, on 95% confidence level. Parameters concerning biotite Fe-Mg mixing properties of Dasgupta *et al.* (1991) and Patino Douce *et al.* (1993), and that concerning orthopyroxene Fe-Mg mixing properties of von Seckendorff and O'Neill (1993), are adopted in describing the solid solutions. The thermometer has a resolution of±60℃ in reproducing the experimental temperatures, and a precision of ±70℃ when applied to natural rocks compared to other kinds of thermometers. The geothermometer is suitable to amphibolite to granulite facies metamorphic rocks.

Key words Biotite, Orthopyroxene, Geothermometer, Regression

摘 要 黑云母-斜方辉石是较为常见的共生矿物对, 它们之间Fe-Mg交换模式反应的标准熵变与标准体积变化量之比很大, 具备了构成温度计的必要条件。根据Fonarev and Konilov的平衡实验数据, 考虑了黑云母、斜方辉石中Fe-Mg的非理想混合效应, 得出了合理的黑云母、斜方辉石中Fe-Mg的交换能数据。此外还采纳了Dasgupta等.关于黑云母活度的数据、von Seckendorff and O'Neill关于斜方辉石活度的数据和Pattino Douce等.关于黑云母中Al^{VI}、Ti对黑云母活度效应的数据, 重新标度了黑云母-斜方辉石温度计。该温度计重现实验温度的误差为±60℃, 应用于天然岩石的温度计算误差一般小于±70℃, 适用于绿帘角闪岩相至麻粒岩相的变质岩变质温度的估算。

关键词 黑云母; 斜方辉石; 地质温度计; 标度

中图法分类号: P574

1 前言

共生铁镁质矿物之间Fe-Mg离子分配系数显著地与温度呈函数关系, 地质学家们已据此标度了许多矿物温度计, 如石榴石-黑云母温度计(Ferry and Spear, 1978; Perchuk and Lavrent'eva, 1983; Dasgupta *et al.*, 1991; Bhattacharya *et al.*, 1992; Holdaway *et al.*, 1997)、石榴石-斜方辉石温度计(Harley, 1984; Perchuk and Lavrent'eva, 1990; Bhattacharya *et al.*, 1991)、石榴石-单斜辉石温度计(Ellis and Green, 1979)、二辉石温度计(Kretz, 1982; Slavinskiy, 1993)等。但是, 许多中高级变质岩中并不含石榴石(Sengupta *et al.*, 1990), 斜方辉石和单斜辉石也仅仅共生于基性麻粒岩相岩石中, 这些都给变质温度估算带来了困难。

* 本文为国家重点基础研究专项经费资助、中国科学院青藏高原研究项目(KZ951-A1-204-01-05、KZ95T-06)和国家自然科学基金研究项目(49802020)成果。

第一作者简介: 吴春明, 男, 1967年生, 博士研究生, 构造地质学专业.

© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

黑云母-斜方辉石矿物对是角闪岩相到麻粒岩相岩石乃至地幔衍生岩石中较为常见的矿物组合(Nixon, 1987), 它们之间 Fe-Mg 交换模式反应的标准熵变与标准体积变化量之比又很大(据 Helgeson *et al*.(1978)或 Holland and Powell (1998)的热力学数据), 从而使黑云母-斜方辉石矿物对具备了构成温度计的必要条件。Fonarev and Konilov (1986) 在 700℃～800℃和 490MPa 条件下做了黑云母-斜方辉石 Fe-Mg 交换实验, 获得了 63 组数据。通过对实验数据的统计处理, 他们得到了一个经验公式, 该公式是黑云母-斜方辉石温度计的雏形。但是其推导是纯粹的统计学处理, 而不是从热力学原理出发, 使用该温度计时面临解一元二次方程的麻烦, 还会遇到对负数求平方根的不合理现象, 所以并不具有有效性。Aranovich *et al*.(1988)考虑了黑云母中 Al^{VI}、F 的效应, 将黑云母中 Fe-Mg 混合作为理想混合, 斜方辉石中 Fe-Mg 混合作为非理想混合, 经黑云母-石榴石温度计和黑云母-斜方辉石温度计的线性组合得出黑云母-斜方辉石温度计, 但是该温度计再现实验温度的误差较大(图 1a)。Sengupta *et al*.(1990) 从该实验数据中挑选出两矿物铁镁端元成分在 0.2～0.8 之间的数据, 重新标度了该温度计。他们虽然考虑了黑云母中 Al^{VI}、Ti 对 Fe-Mg 离子分配的效应, 却忽略了对温度影响最大的因素即黑云母中 Fe-Mg 非理想混合性质(即他们令 $W_G^{Bio}=0$), 所以他们的温度计对实验数据的重现性差, 其中有 5 组数据的再现误差超过±100℃(图 1b)。本文对此温度计做进一步改进。

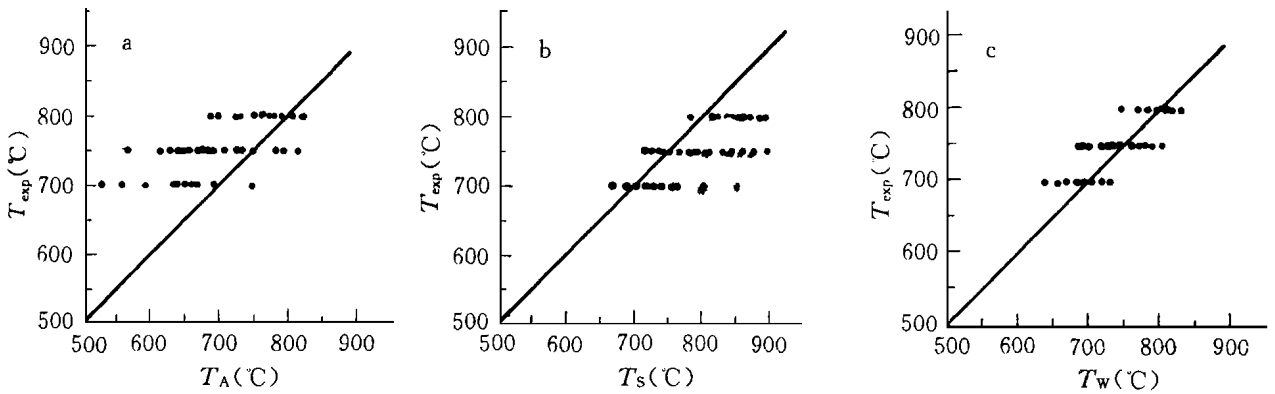


图 1 不同作者标度的黑云母-斜方辉石温度计重现温度与实验温度(T_{exp})的关系

T_A、T_S 和 T_W 分别是用 Aranovich *et al*.(1988), Sengupta *et al*.(1990) 和本文的温度计计算的温度

Fig. 1 Experimental temperature vs. temperatures calculated by the three versions of biotite-orthpyroxene geothermometry. T_A is calculated temperafute using the thermomefer of Aranovich *et al*. (1988); T_S is calculated temperafute using the thermomefer of Sengupta *et al*. (1990); and T_W is calculated temperafute using the thermomefer of the authors

2 热力学模型

一定温度、压力下黑云母-斜方辉石之间 Fe-Mg 交换的模式反应形式是 (Fonarev and Konilov, 1986):

$$1/3KFe_3Si_3AlO_{10}(OH)_2 + 1/2\,Mg_2Si_2O_6 = 1/3\,KMg_3Si_3AlO_{10}(OH)_2 + 1/2\,Fe_2Si_2O_6 \quad \cdots\cdots (1)$$

根据热力学第二定律, 反应达到平衡时有如下关系:

$$G_{PT} = 0 = H^\circ - TS^0 + (P-0.1)V^0 + RT\ln(X_{Mg}/X_{Fe})^{Bio} + RT\ln(X_{Fe}/X_{Mg})^{Opx} + PT\ln K_d \quad \cdots\cdots (2)$$

其中 G 是压力为 P、温度为 T 时反应(1)的 Gibbs 自由能变化(平衡时为零), H^0、S^0、V^0 分别是标准状态(0.1MPa、273.15K)下反应(1)的标准焓、熵和体积变化量, K_d 是 Fe-Mg 分配系数($K_d = (X_{Fe}/X_{Mg})^{Opx}/(X_{Fe}/X_{Mg})^{Bio}$)。根据 Holland and Powell (1998) 内洽的(internally consistent)热力学数据库, $V^0 = 0.09$J/MPa。矿物等压热膨胀系数和等温压缩系数对反应平衡状态影响很小, 所以忽略不计。

将黑云母、斜方辉石 Fe-Mg 二元固溶体作为对称正规溶液, 则有 (Ganguly and Kennedy, 1974):

$$RT\ln(X_{Mg}/X_{Fe})^{Bio} = W_G^{Bio}(X_{Fe}^{Bio} - X_{Mg}^{Bio}) = [W_H^{Bio} - T\cdot W_S^{Bio} + (P-0.1)W_V^{Bio}](X_{Fe}^{Bio} - X_{Mg}^{Bio}) \quad \cdots\cdots (3)$$

$$RT\ln(X_{Fe}/X_{Mg})^{Opx} = W_G^{Opx}(X_{Mg}^{Opx} - X_{Fx}^{Opx}) = [W_H^{Opx} - T\cdot W_S^{Opx} + (P-0.1)W_V^{Opx}](X_{Mg}^{Opx} - X_{Fe}^{Opx}) \quad \cdots\cdots (4)$$

其中 $X_i^{Bio} = i/(Fe+Mg)$, $X_j^{Opx} = j/(Fe+Mg+0.5Al)$。i、j 代

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 Fe、Mg 离子。上式中各 W 项分别是 Fe–Mg 混合焓、混合熵、混合体积对交换能 (或曰 Margules 参数) 的贡献, 其中 W_V 很小可忽略不计。Dasgupta *et al*. (1991) 通过黑云母–石榴石温度计的研究得出 W_H^{Bio} = 4490 (±2050) J/mol, von Seckendorff and O'Neill (1993) 通过橄榄石–斜方辉石 Fe–Mg 交换反应的实验得出 = 2145 (±614) J/mol, 本文采用这些数据。

自然界产出的黑云母还含有 Ti、Al^{VI}, 斜方辉石还含有 Al 等 "杂质离子"。如不考虑这些 "额外元素", 计算出的温度将会有所偏差。所以应该考虑这些因素。Indares and Martigole (1985) 指出, 天然黑云母实际上应该被看作 Fe–Mg–Al^{VI}–Ti 四元固溶体 (其中 Al^{VI}、Ti 含量较少), 这样活度系数之比应该表达为 (Ganguly and Kenedy, 1974):

$$RT\ln(X_{Mg}/X_{Fe})^{Bio} = W_G^{Bio}(X_{Fe}^{Bio} - X_{Mg}^{Bio}) + (W_{MgAl}^{Bio} - W_{FeAl}^{Bio})X_{Al^{VI}}^{Bio} + (W_{MgTi}^{Bio} - W_{FeTi}^{Bio})X_{Ti}^{Bio} \quad \cdots\cdots (5)$$

黑云母矿物端元此时应该重新定义为 $X_i^{bio} = i/(Fe + Mg + Al^{VI} + Ti)$, i 指 Fe、Mg、$Al^{VI}$、Ti 等四种离子。Patino Douce *et al*. (1993) 通过石榴石–黑云母之间的 Fe–Mg 交换实验得出 $(W_{MgAl}^{Bio} - W_{FeAl}^{Bio}) = -2700$J/mol, $(W_{MgTi}^{Bio} - W_{FeTi}^{Bio}) = 10000$J/mol。斜方辉石中 Al 含量一般很小, Al 对温度的影响很小, 所以不予考虑。

将 (4)、(5) 式及上述参数代入方程 (2) 得到温度计标度模型如下:

$$H^0 - T \cdot S^0 - T \cdot W_S^{Bio}(X_{Fe}^{Bio} - X_{Mg}^{Bio}) - T \cdot W_S^{Opx}(X_{Mg}^{Opx} - X_{Fe}^{Opx}) = -RT\ln K_d - 0.09(P - 0.1) - 4490(X_{Fe}^{Bio} - X_{Mg}^{Bio}) + 2700X_{Al^{VI}}^{Bio} - 10000X_{Ti}^{Bio} - 2145(X_{Mg}^{Opx} - X_{Fe}^{Opx}) \quad \cdots (6)$$

3 温度计的标度

铁镁质矿物富集 Fe 的能力依次为石榴石> 斜方辉石> 黑云母> 单斜辉石 (Spear and Markussen, 1997), 即黑云母总是比斜方辉石富集 Mg, 所以 Fonarev and Konilov (1986) 第 445、446、554、566 号实验中的 5 组数据可能是不平衡数据, 故予以剔除。将其余 58 组数据代入方程 (6), 经非线性回归分析得到 $H^0 = -8611.74 \pm 1095.374$) J/mol, $S^0 = -7.1630(\pm 1.0220)$ J/Kmol, $W_S^{Bio} = 7.2910(\pm 0.7125)$ J/Kmol, $W_S^{Opx} = 7.9579(\pm 0.7581)$ J/Kmol, 相关系数 $R = 0.9114$。本文得到的相关热力学数据比 Aranovich *et al*. (1988)、Sengupta *et al*. (1990) 得到的数据更接近由 Holland and Powell (1998) 内洽热力学数据库计算的结果 (表 1)。

表 1 相关热力学数据的对比

Table 1 Comparison of related parameters derived by different authors

作 者	H^0 (J/mol)	S^0 (J/K · mol)
Aranovich *et al*. (1988)	–12783	–10.5906
Sengupta *et al*. (1990)	–17281	–13.6828
Holland and Powell (1998)	–7912	–4.2833
本文	–8612	–7.1630

将上述参数代入方程 (6) 即得温度计如下:

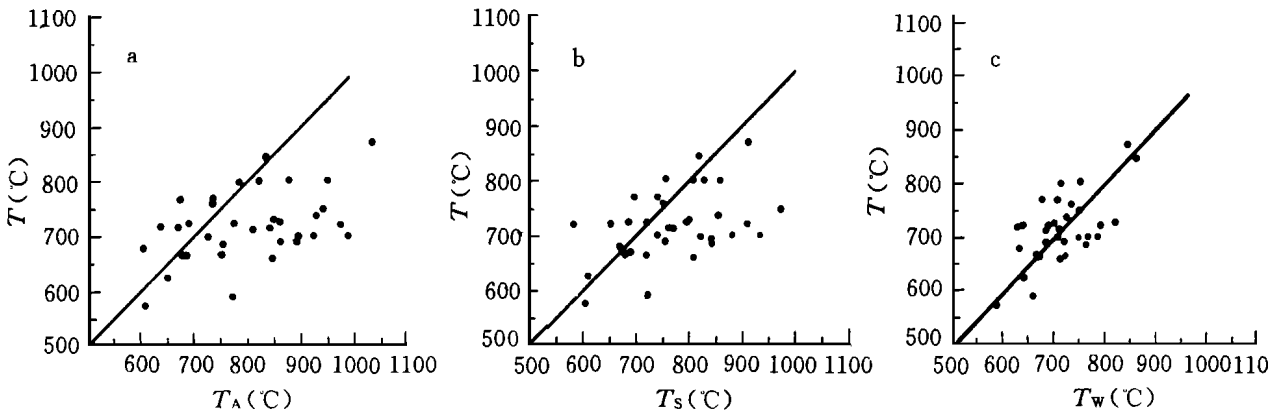


图 2 其它种类温度计计算结果 (T) 与三种黑云母–斜方辉石温度计计算结果的对比

T_A 是用 Aranovich *et al*. (1988) 温度计计算的温度; T_S 是用 Sengupta *et al*. (1990) 温度计计算的温度; T_W 是用本文温度计计算的温度

Fig. 2 Comparison of calculated temperatures by the three biotite–orthopyroxene geothermometers and other kinds of geothermometers. T_A is calculated tempratures using the thermometer of Aranovich *et al*. (1988); T_S is calculated tempratures using the thermometer of Sengupta *et al*. (1990); T_W is calculated tempratures using the thermometer of the anthors

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 三种黑云母-斜方辉石温度计同其它种类温度计对天然岩石变质温度计算值的对比

Table 2 Comparison of the calculated temperatures by the three biotite-orthopyroxene and other kinds of geothermometers

样品号	岩性	P(MPa)	T(℃)	T_A(℃)	T_S(℃)	T_W(℃)	X_{Fe}^{Bio}	X_{Mg}^{Bio}	$X_{Al}^{Bio(M)}$	X_{Ti}^{Bio}	$N_{Al}^{Bio(M)}$	X_{Fe}^{Opx}	X_{Mg}^{Opx}	X_{Al}^{Opx}	数据来源
363020	橄榄二辉岩	1500	698 *	739	825	749	0.1915	0.7317	0.0677	0.009	0.229	0.2709	0.723	0.006	Brueckner(1998)
363020	橄榄二辉岩	1500	686 *	761	845	764	0.1972	0.7229	0.0676	0.0123	0.214	0.2709	0.723	0.006	Brueckner(1998)
407513	橄榄二辉岩	2350	749 *	978	973	749	0.1991	0.6935	0.0255	0.0819	0.156	0.2427	0.7477	0.0095	Brueckner(1998)
322a	麻粒岩	550	665 *	714	682	673	0.3718	0.509	0.0247	0.0945	0.0741	0.4916	0.492	0.0164	Grew(1981)
139146	麻粒岩	670	668 *	770	695	667	0.3657	0.5055	0.0217	0.1071	0.0651	0.4742	0.4954	0.0303	Bingen(1988)
139160	麻粒岩	670	700 *	878	745	708	0.2741	0.5821	0.0432	0.1006	0.1296	0.3444	0.5836	0.0719	Bingen(1988)
732	麻粒岩	530	803 *	865	761	753	0.2765	0.5982	0.0524	0.0729	0.1572	0.3392	0.5823	0.0785	Harris(1982)
cb88-5c	麻粒岩	800	729 *	917	803	701	0.39	0.4835	0	0.1265	0	0.4666	0.5217	0.0117	Barth & May(1992)
cb88-5r	麻粒岩	800	713 *	877	775	686	0.3907	0.4851	0	0.1242	0	0.4773	0.5106	0.0121	Barth & May(1992)
cb86-1a	麻粒岩	800	692 *	951	846	721	0.35	0.5297	0	0.1203	0	0.4164	0.5823	0.0127	Barth & May(1992)
cc83-157c	麻粒岩	800	736 *	991	859	726	0.3239	0.5494	0	0.1267	0	0.376	0.6	0.024	Barth & May(1992)
cc83-157r	麻粒岩	800	660 *	893	811	714	0.3053	0.5805	0.0092	0.1051	0.121	0.3748	0.6025	0.0227	Barth & May(1992)
273bc	麻粒岩	800	723 *	832	726	640	0.3025	0.5527	0.0101	0.1347	0.1465	0.4016	0.5778	0.0206	Barth & May(1992)
273br	麻粒岩	800	592 *	811	725	659	0.3052	0.5421	0.0287	0.124	0.1623	0.4058	0.5741	0.02	Barth & May(1992)
81-sp-1	片麻岩	750	725	676	688	703	0.3807	0.4743	0.0583	0.0867	0.1455	0.5076	0.4848	0.0075	Lamb-Valley(1988)
15	片麻岩	800	800	1006	861	719	0.3838	0.4682	0	0.148	0	0.4467	0.5533	0	Todd-Evans(1994)
18	片麻岩	800	800	848	830	757	0.3307	0.5456	0.0357	0.088	0.153	0.4051	0.5949	0	Todd-Evans(1994)
61	片麻岩	800	800	799	811	755	0.3178	0.5745	0.0378	0.0699	0.1385	0.3994	0.6006	0	Todd-Evans(1994)
91141	变粒玄武岩	1140	625 * *	582	610	643	0.2722	0.5272	0.1175	0.0831	0.205	0.4286	0.551	0.0204	Glassley (1980)
hu1dark	变辉长岩	790	720	1054	914	793	0.4143	0.4536	0.0143	0.1179	0.0429	0.455	0.53	0.015	Pattison(1991)
p262bmg	变辉长岩	850	700	1095	937	784	0.4113	0.4645	0	0.1241	0	0.445	0.54	0.015	Pattison(1991)
hu15adark	变辉长岩	830	700	1012	885	766	0.4184	0.4574	0.0071	0.117	0.0213	0.4688	0.5187	0.0125	Pattison(1991)
3-1a	麻粒岩	700	720	621	655	690	0.4653	0.3958	0.0521	0.0868	0.125	0.6036	0.3887	0.0077	Janardhan(1982)
11-1	麻粒岩	700	720	586	586	632	0.247	0.493	0.137	0.096	0.23	0.4049	0.563	0.0321	Janardhan(1982)
2-8	麻粒岩	700	760	716	754	735	0.3428	0.6007	0.0141	0.0424	0.0423	0.4451	0.5495	0.0055	Janardhan(1982)
4-13	麻粒岩	800	845 *	789	820	864	0.4137	0.4353	0.1043	0.0468	0.235	0.4884	0.4884	0.0231	Janardhan(1982)
4-1c	麻粒岩	510.9	665	740	724	724	0.4623	0.4315	0.0308	0.0753	0.0924	0.559	0.4205	0.0205	Janardhan(1982)
10-1a	麻粒岩	837.3	575	648	605	588	0.2535	0.6338	0.0211	0.0915	0.0633	0.4019	0.5617	0.0363	Janardhan(1982)
dv-38	片麻岩	650	770	712	746	704	0.242	0.641	0.057	0.06	0.12	0.34	0.66	0	Reenen(1986)
dv-3	片麻岩	650	680	662	671	631	0.255	0.666	0.005	0.073	0.256	0.388	0.612	0	Reenen(1986)
92303	紫苏石英岩	700	714	879	766	709	0.2211	0.6903	0.0094	0.0792	0.1115	0.2842	0.6379	0.0779	仝来喜等(1997)
92114	麻粒岩	700	690	908	752	690	0.3701	0.5132	0.0092	0.1167	0.115	0.4394	0.5039	0.0567	仝来喜等(1997)
92378	片麻岩	700	870	1113	943	838	0.3697	0.5314	0	0.0727	0	0.3832	0.5406	0.0761	仝来喜等(1997)

注：各样品中 T(℃)带 * 号的数据、T_A、T_S 和 T_W 是作者计算的，其余各项数据都引自数据来源栏中列出的文献。标有“ * ”的(℃)是由石榴石-斜方辉石温度计(Perchuk and Lavrent'eva，1990)计算的温度，标有“ * * ”的 T (℃) 是由石榴石-黑云母温度计 (Bhattacharya *et al.*，1992) 计算的温度，T_A (℃) 是用 Aranovich *et al.* (1988) 温度计计算的温度，T_S (℃) 是用 Sengupta *et al.* (1990) 温度计计算的温度，T_W (℃) 用本文温度计 (方程 7) 计算的温度。$N_{Al}^{Bio(M)}$ 指以 11 个氧原子为基础计算的黑云母结构式中 Al^{M} 的原子数。

$$T(\mathrm{K}) = [7.1630 + 7.2910\,(X_{\mathrm{Fe}}^{\mathrm{Bio}} - X_{\mathrm{Mg}}^{\mathrm{Bio}}) + 7.9579\,(X_{\mathrm{Mg}}^{\mathrm{Opx}} - X_{\mathrm{Fe}}^{\mathrm{Opx}}) + 8.3143\ln K_{\mathrm{d}}] = 8611.74 - 0.09P\ (\mathrm{MPa}) - 4490\,(X_{\mathrm{Fe}}^{\mathrm{Bio}} - X_{\mathrm{Mg}}^{\mathrm{Bio}}) + 2700X_{\mathrm{Al}}^{\mathrm{BioVI}} - 10000\,X_{\mathrm{Ti}}^{\mathrm{Bio}} - 2145\,(X_{\mathrm{Mg}}^{\mathrm{Opx}} - X_{\mathrm{Fe}}^{\mathrm{Opx}}) \quad (7)$$

该温度计再现实验数据的误差< ±60℃(图1c),精度明显有所提高,这是因为充分考虑了两矿物内Fe-Mg混合的非理想性质(即, W_G^{Bio}, W_G^{Opx}的效应)。

4 应用与讨论

将温度计(方程7)应用于天然的片麻岩、麻粒岩、变粒玄岩、石英岩和橄榄二辉岩(表2),计算结果与其它种类温度计计算结果非常接近,两者相差一般< ±70℃,说明该温度计是可信的,且总体上比Aranovich *et al*.(1988)、Sengupta *et al*.(1990)的温度计精确(表2,图2a,b,c)。该温度计适用于绿帘角闪岩相至麻粒岩相的天然岩石。

需要说明的是,应用上述温度计(方程7)时可将黑云母、斜方辉石中的Fe全部作为Fe^{2+}。这是因为,目前还没有哪种校正Fe^{3+}的方法与湿化学分析或者Mossbaur分析结果一致,即人为的校正有时会歪曲实际情况(Graham and Powell, 1984; Dasgupta *et al*., 1991)。当然,如果使用了矿物的湿化学分析或者Mossbaur分析数据,那么应当使用Fe^{2+}数据用于温度的估算。此外,本文温度计没有考虑斜方辉石中Al的效应,因为Al对温度计算结果的影响很小。

近年来,几乎所有的温压计都有数个修正版本,例如石榴石-黑云母温度计目前至少已有28个版本问世。所以可以预见,本文对黑云母-斜方辉石温度计的修正只能是一项阶段成果,其精确标度仍有待于进一步的研究。

致谢 本文写作得到了伍向阳博士、倪志耀博士、郭敬辉博士、张进江博士、丁林博士的鼓励,并得到程本合、旺罗、邓成龙、季建清、李铁胜、钱青、李铁军、邓希光、孙宏娟等同学的帮助。沈步明教授审阅了本文初稿并提出了宝贵的修改意见。作者向上述老师和同学致以真挚的感谢。

References

Aranovich L Ya, Lavrent'eva I V and Kosyakova N A. 1988. Calibration of the biotite-garnet and biotite-orthopyroxene geothermometers corrected for the variable Al level in biotite. Geochem. Intl., 25 (12): 50～69

Barth A P and May D J. 1992. Mineralogy and pressure-temperature-time path of Cretaceous granulite gneiss, south-eastern San Gabriel Mountains, southern California. J. Metamorphic Geol., 10: 529～544

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

Bhattacharya A, Mohanty L, Maji A, Sen S K and Raith M. 1992. Non-ideal mixing in the phogopite-annite binary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer. Contrib. Mineral. Petrol., 111: 87～93

Bingen B and Demaiffe D. 1988. Aluminous granulites of the Archean Craton of Kasai (Zaire): Petrology and *P-T* conditions, J. Petrol., 29: 899～919

Bohlen S R, Montana A and Kerrick D M. 1991. Precise determination of the equilibria kyanite) sillimanite and kyanite (andalusite and a revised triple point for Al_2SiO_5 polymorphs. Am. Mineral., 76: 677～680

Brueckner H K, Gilotti J A and Nutman A P. 1998. Caledonian eclogite-facies metamorphism of Early Proterozoic protoliths from the North-East Greenland eclogite province. Contrib. Mineral. Petrol., 130: 103～120

Dasgupta S, Sengupta P, Guha D and Fukuoka M. 1991. A refined garnet-biotite Fe-Mg exchange geothermometer and its application in amphibolites and granulites. Contrib. Mineral. Petrol., 109: 130～137

Fonarev V I, Konilov A N. 1986. Experimental study of Fe-Mg distribution between biotite and orthopyroxene at *P*= 490MPa. Contrib. Mineral. Petrol., 93: 227～235

Ganguly J, Kennedy J C. 1974. The energetics of natural garnet-solid solution, I: Mixing of the aluminosilicate end members. Contrib. Mineral. Petrol., 48: 137～148

Glassley W E, Sorensen K. 1980. Constant P_s-*T* amphibolite to granulite facies transition in Agto (West Greenland) metadolerites: implications and applications. J. Petrol., 21: 69～105

Grew ES. 1981. Granulite-facies metamorphism at Molodezhnaya Station, East Antarctica. J. Petrol., 22: 297～336

Harris N B W, Holt R W and Drury S A. 1982. Geobarometry, geothermometry and Late Archean geotherms from the granulite facies terrain of south India, J. Geol., 90: 509～527

Holdaway M J, Mukhopadhyay B, Dyar M D, Guidotti and Dutrow B L. 1997. Garnet-biotite geothermometry revised: new Margules parameters and a natural specimen data set from Maine. Am. Mineral., 82: 582～595

Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. J Meta Geol., 16: 309～343

Indares A and Martignole J. 1985. Biotite-garnet geothermometry in the granulite facies: the influence of Ti and Al in biotite. Am. Mineral., 70: 272～278

Janardhan A S, Newton R C and Hansen E C. 1982. The transformation of amphibolite facies gneiss to charnockite in Southern Karnataka and Northern Tamil Nadu, India. Contrib. Mineral. Petrol., 79: 130～149

Lamb W M and Valley J W. 1988. Granulite facies amphibole and biotite equlibria, and calculated peak-metamorphic water activities. Contrib. Mineral. Petrol., 100: 349～360

Nixon P H. 1978. Kimberlitic xenoliths and their cratonic setting. In: Mantle Xenoliths (Nixon P H ed.), John Wiley & Sons, Chichester, 215～239

Patino Douce A E, Johnson A D and Rice J M. 1993. Octahedral excess mixing properties in biotite: A working model with appli-

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net