

变质矿物生长的局部平衡体系

——以贺兰山北段孔兹岩系为例*

刘建忠¹ 卢良兆² 李铁胜³ 欧阳自远¹

1. (中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

2. (长春科技大学地球科学学院 长春 130026)

3. (中国科学院地质研究所 北京 100029)

提 要 贺兰山北段孔兹岩系详细的岩石学和矿物学的研究表明, 岩石中的特征变质矿物如石榴子石、堇青石等的成分与其周围相邻的同世代变质矿物具有很好的相关性, 而与其寄生主岩成分的相关性较小, 而贯通矿物如斜长石却与其寄生主岩成分的相关性较为密切, 同时天然块状样品的脱水熔融实验的结果也显示, 变质反应是在一个局部平衡体系中进行的。说明在变质作用过程中, 变质反应的进行以及新矿物的形成是在一个局部平衡的体系下完成的, 因此在矿物对温压计的使用上, 应利用处于平衡状态的相邻变质矿物来计算。

键 词 变质矿物 局部平衡体系 孔兹岩系 贺兰山

变质岩是原岩的化学组分在变质作用的物化条件下所形成的矿物集合体。自本世纪二十年代以来, 很多学者从热力学平衡理论出发, 把变质岩看成是热力学的多相体系内部的变化, 在热力学平衡理论和相律的指导下, 一方面通过深入的矿物共生分析并结合拓扑学、线性代数和立体几何投影方法的引入, 形成岩石成因格子的研究方法, 通过这类研究使得变质作用 $p-T$ 条件的判断逐渐量化^[1]。另一方面通过结合变质反应的实验研究, 发展了矿物对温度计和压力计, 促进了 $p-T$ 条件判断的精确量化, 为变质作用 $p-T-t$ 轨迹的研究奠定了基础。尽管目前矿物对温压计的研究有了长足的发展, 但这些温压计的精度和可信度仍然存在着许多问题, 如在同一岩石的峰期矿物组合中, 不同矿物对所估算的温压差别相当大。最近几年来温压计的发展处于相对停滞的状态, 原因是许多学者在变质岩系的研究过程中发现了诸多的非平衡物理化学过程, 传统的非平衡一定向平衡转化的观念受到冲击, 对于矿物对

温压计能否用来研究变质作用过程的温度、压力变化也一度成为讨论的热点^[2~4]。本文通过对贺兰山北段孔兹岩系全岩地球化学和矿物化学的详细研究认为, 即使在体系处于不平衡状态的情形下, 相邻矿物之间也处于一个局部平衡的体系中, 因此, 可以利用相邻矿物对来计算变质作用的温压条件。

1 区域地质背景

贺兰山北段是我国境内孔兹岩系出露较为典型的地区之一, 近年来对于该区孔兹岩系已有许多学者就孔兹岩系的地质产状、原岩建造、变质与变形作用的动力学以及与之相伴生的花岗岩的成因等诸多方面进行了较为详细的研究^[5,6], 为进一步探讨变质作用演化中矿物生长理论方面的问题, 提供了便利条件。

该区的孔兹岩系主要分布于巴音—三恒恩德—宗别立一线以南, 按岩石组合特点及产状, 可划分出 3 种岩石组合类型: ① 秃鲁根变粒岩-大理岩组。以石榴黑云变粒岩、黑云斜长变粒岩为主, 夹大理岩、钙硅酸盐岩、浅粒岩、长石石英岩及少量夕线石榴堇青片麻岩。② 阿楞呼都格变粒岩组。亦以(石榴)黑云变粒岩为主, 下部夹浅粒岩和长石石英岩, 上部夕线石榴堇青片麻岩夹层增

ISSN 1000-4734 1999 年 7 月收稿 1999 年 9 月改回

第一作者简介 刘建忠 男 1968 年 10 月生 博士 从事岩石学及地球化学研究

* 中国科学院重点项目(批准号: KZ952-J1-413)和国家自然科学基金(批准号: 49573194)联合资助

多。③ 柳树沟片麻岩组。以富含夕线石、石榴子石和堇青石的黑云钾长片麻岩为主,岩石中常含有少量石墨鳞片。

而在该区的北部出露有太古宙 TTG 岩系及古元古代花岗质岩石。其中太古宙 TTG 岩系经过复杂的变质、变形作用改造,现今呈角闪黑云斜长片麻岩形式产出,仅在蒙果特地区分布。古元古代花岗质岩石是本区重要的组成部分,岩石类型多样、成分复杂,按照岩石的岩相学特征及产状可划分为:① 浩尧尔巨斑钾长花岗岩类;② 巴音及扣笨石榴黑云花岗岩类;③ 黑沟片麻状石榴黑云花岗岩类。

2 变质矿物成分变异的规律

本文所使用的样品均采自柳树沟片麻岩组,其中 153-1, 228-2, 30-2, 245-1 及 H029-1 为夕线

表 1 变质岩石的全岩化学成分

Table 1. Chemical composition of the whole rock

序号	1	2	3	4	5	6
样号	125-2	153-1	228-2	30-2	245-1	H029-1
SiO ₂	71.46	59.96	59.95	57.58	60.93	53.81
TiO ₂	0.45	0.68	0.86	0.65	0.64	0.74
Al ₂ O ₃	11.96	18.98	17.87	21.73	18.40	23.26
Fe ₂ O ₃	1.24	0.94	1.25	0.42	1.38	3.69
FeO	3.41	6.26	6.23	8.01	6.16	5.60
MnO	0.08	0.08	0.05	0.15	0.10	0.10
MgO	1.87	2.89	3.34	3.18	2.45	3.44
CaO	1.08	0.83	0.91	1.08	0.35	2.55
Na ₂ O	2.92	1.58	1.36	1.65	1.57	1.84
K ₂ O	2.82	4.72	4.57	3.33	5.06	4.47
P ₂ O ₅	0.07	0.14	0.13	0.10	0.10	0.24
H ₂ O	1.72	2.24	2.62	1.70	2.45	
CO ₂	0.25	0.64	0.20	0.04	0.10	
SO ₃	0.01	0.05	0.06	0.04	0.04	
Σ	99.34	99.99	99.40	99.66	99.73	99.79
Al	36.29	41.59	39.14	43.37	41.94	
Fm	34.16	38.33	41.54	40.20	38.36	
C	5.96	3.31	3.63	3.92	1.45	
Alk	23.58	16.77	15.65	12.51	18.25	
Si	364.72	220.93	221.09	193.30	233.54	
K	0.38	0.67	0.69	0.57	0.68	
C/Fm	0.17	0.09	0.09	0.10	0.04	

注: 1~5 据文献 [5]; 6 为本文, 由北京大学地质学系测试中心测试。

石榴堇青石片麻岩, 125-2 为含夕线石榴黑云斜长变粒岩, 均为富铝岩石, 其化学成分见表 1。

典型特征变质矿物化学成分的研究表明^[5,6], 不论是石榴子石还是黑云母亦或堇青石, 在不同地段、不同岩石类型中其化学成分变化范

围均较小, 比如石榴子石, 其 FeO 含量在 46 个电子探针分析结果^[5~7]中, 最低的为含石榴子石黑云斜长变粒岩中的石榴子石, 含量为 31.35%, 最高的为夕线堇青石榴斜长片麻岩中的石榴子石, 也只有 38.75%, 而大多数石榴子石的 FeO 含量集中于 36%~38% 之间, 其他的氧化物含量变化也有类似的特点(表 2)。这种现象说明, 这些特征变质矿物的化学成分与全岩化学成分的相关性并不大。镁铁质矿物(石榴子石、黑云母、堇青石)之间 Mg²⁺、Fe²⁺ 的平衡交换, 是建立矿物对温压计的基础, 因此对于这一类矿物含镁指数的研究可以了解整个矿物的生长历史。

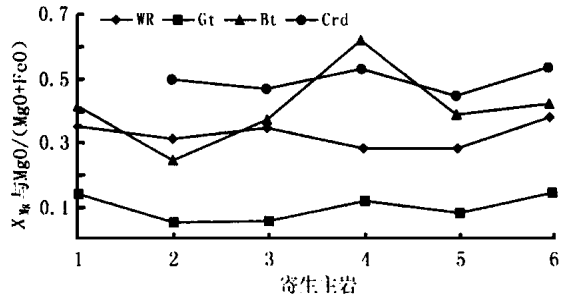


图 1 典型变质矿物的 X_{Mg} 值与寄生主岩的 MgO/(MgO+FeO) 之间成分变异图解

Fig. 1. Relationship between typical metamorphic minerals and host rocks with respect to their composition.

图中横坐标寄生主岩的代号同表 1, WR 为全岩, Gt 为石榴子石, Bt 为黑云母, Crd 为堇青石。图中序号 1 岩石中的石榴子石成分点为 2 个数据平均, 黑云母为 2 个平均, 堇青石缺。序号 2 样品中的石榴子石成分点为 3 个数据平均, 黑云母为 2 个平均, 堇青石为 2 个平均。序号 3 样品中的石榴子石成分点为 3 个数据平均, 黑云母为 2 个平均, 堇青石为单个数据。序号 4 样品中的石榴子石成分点为 2 个数据平均, 黑云母为 2 个平均, 堇青石为 2 个平均。序号 5 样品中的石榴子石成分点为 3 个数据平均, 黑云母为 1 个数据, 堇青石为单个数据。序号 6 样品中的石榴子石成分点为 4 个数据平均, 黑云母为 2 个平均, 堇青石为单 2 个数据。

图 1 为石榴子石、堇青石和黑云母的 X_{Mg} 值与寄生主岩的 MgO/(MgO+FeO) 之间成分变异图解, 从图中可以看出, 变质矿物的 X_{Mg} 值的变化与寄生主岩的 MgO/(MgO+FeO) 之间基本没有相关性, 在图中表现为全岩的成分投影点与变质矿物成分投影点的变化不是同步升降, 也不是负相关变化; 而不同矿物之间的 X_{Mg} 值呈现明显的同步变化关系, 即其投影点具有同步升降关系。

图 2 为贯通矿物斜长石的号码与寄生主岩的

表 2 矿物的化学成分

Table 2. Chemical compositions of minerals

序号	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
1	125-2-Gt1	35.63	0.04	22.7	4	31.35	5.16	0.6	0.87	0.08	0
2	125-2-Gt2	36.54	0.02	22.38	2.32	34.87	3.86	0.58	1.06	0	0
3	153-1-Gt1	36.59	0.11	19.97	2.47	37.94	2.18	0.64	0.79	0.04	0
4	153-1-Gt2	37.72	0	18.61	2.14	38.75	2.51	0.57	0.96	0	0
5	153-1-Gt3	37.78	0	20.38	1.15	34.7	4.89	0.6	0.85	0	0
6	228-2-Gt1	37.08	0	22.77	0	37.24	2.4	1.02	0.73	0.06	0
7	228-2-Gt2	36.59	0.06	19.59	2.77	37.26	2.34	0.72	1.14	0.04	0
8	228-2-GT3	36.92	0.13	23.47	0	36.96	2.59	0.81	0.82	0.09	0
9	245-1-Gt1	38.36	0.03	21.26	0	35.88	3.37	0.72	0.89	0.08	0
10	245-1-Gt2	38.26	0	20.71	0	35.88	2.24	0.72	0.81	0.08	0
11	30-2-Gt1	37.46	0.03	23.12	0	33.83	4.71	0.46	0.83	0.09	0
12	30-2-Gt2	35.55	0.02	22.61	1.94	33.18	4.25	0.5	0.42	0.14	0
13	30-2-Gt3	35.26	0.02	23.12	2.2	32.8	4.35	0.51	0.96	0	0
14	125-2-Bt1	35.99	4.21	19.4	4.39	14.01	9.92	0.04	0.24	0.4	9.36
15	125-2-Bt2	35.54	3.61	18.65	7.77	10.21	11.51	0.07	0	0	10.03
16	153-1-Bt1	39.84	2.53	17.72	0	18.95	6.26	0.01	0.08	0	9.63
17	153-1-Bt2	38.45	0.01	19.24	8.32	5.62	14.15	0	0.03	0.2	9.86
18	228-2-Bt1	35.6	2.57	19.68	6.33	14.71	8.76	0	0	0.1	9.68
19	228-2-Bt2	35.53	2.59	20.35	5.82	14.858	8.74	0.04	0	0.15	9.35
20	245-1-Bt1	38.18	2.4	18.37	3	15.01	9.52	0.07	0.12	0.47	9.49
21	245-1-Bt2	37.5	2.5	17.75	4.36	12.74	10.08	0	0.02	0.04	10.33
22	30-2-Bt1	39.45	3.74	16.48	3.11	8.41	13.72	0.02	0.03	0.07	10.84
23	153-1-Crd1	47.93	0.06	34.88	2.56	7.61	7.56	0.09	0.06	0.12	0
24	153-1-Crd2	45.96	0.09	34.58	3.79	6.51	7.56	0	0	0.06	0
25	228-2-Crd	46.74	0.03	35.5	1.37	7.68	6.8	0.03	0.01	0.27	0
26	245-1-Crd1	49.11	0	32.83	0	8.56	6.95	0.75	0.02	0.12	0
27	245-1-Crd2	46.78	0	33.68	4.5	5.36	8.22	0	0	0.22	0
	30-2-Crd2	46.48	0.03	35.36	2.87	6.47	7.39	0.06	0	0.2	0
28	H029-1-Gt1	38.58	0.03	22.34	1.14	32.13	5.45	0.61	1.07	0.01	0.00
29	H029-1-Gt2	38.18	0.03	21.60	1.87	31.55	4.45	0.68	0.99	0.1	0.00
30	H029-1-Gt3	38.4	0.00	21.12	1.1	33.43	4.42	0.64	0.88	0.61	0.00
31	H029-1-Gt4	38.89	0.03	22.18	1.94	29.03	6.15	0.44	1.51	0.06	0.00
32	H029-1-Bt1	37.59	3.87	18.64	0.34	15.19	11.11	0.04	0.00	0.15	9.26
33	H029-1-Bt2	36.11	4.8	17.95	8.9	8.32	9.64	0.06	0.02	0.18	9.82
34	H029-1-Crd1	48.03	0.00	34.9	0.18	7.67	8.92	0.06	0.00	0.1	0.00
35	125-2-Pl1	59.58	0.06	25.88	0.00	0.02	0.00	0.04	5.41	8.11	0.28
36	30-2-Pl1	58.06	0.10	27.07	0.00	0.00	0.04	0.04	6.57	9.37	0.09
37	30-2-Pl2	58.35	0.08	27.05	0.00	0.00	0.00	0.00	6.18	9.14	0.17
38	153-1-Pl1	60.93	0.03	24.51	0.00	0.08	0.05	0.05	5.61	9.86	0.22
39	228-2-Pl1	58.06	0.00	27.71	0.00	0.01	0.05	0.00	7.66	8.41	0.13
40	228-2-Pl2	56.82	0.03	26.63	0.00	0.04	0.00	0.00	7.07	9.91	0.21
41	245-1-Pl1	61.39	0.08	25.98	0.00	0.09	0.00	0.00	5.16	8.46	0.27
42	245-1-Pl2	59.04	0.00	23.90	0.00	0.11	0.00	0.00	5.60	10.53	0.07
43	H029-1-Pl1	59.11	0.03	26.56	0.72	0.028	0.10	0.02	6.84	6.97	0.24
44	H029-1-Pl2	58.75	0.00	26.15	0.00	0.00	0.04	0.01	5.50	8.44	0.11

注: 1-27, 35-42 据方面文献 [5]; 28-34, 43-44 为本文; Gt 为石榴子石, Bt 为黑云母, Crd 为堇青石。

CaO/(CaO+Na₂O)相关图解,由图可知,斜长石的An值与寄生主岩的CaO/(CaO+Na₂O)大体呈正相关,即其成分投影点的升降是同步的,要升一起升,要降一起降。

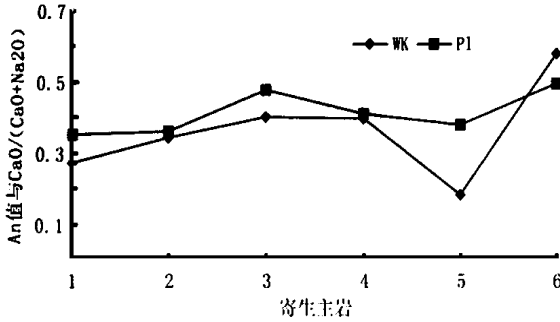


图2 斜长石的An值与寄生主岩的CaO/(CaO+Na₂O)之间成分变异图解

Fig. 2. Diagram showing the compositional variation between plagioclase and host rock.

图中横坐标寄生主岩的代号同表1中的序号,WR代表全岩P1为斜长石其中序号1岩石中的斜长石成分点为单个数据,序号2为2个数据平均,序号3为单个数据,序号4为2个平均,序号5为2个平均,序号6为2个平均

以上现象表明,典型变质矿物成分的变化与全岩化学成分的相关性较小,而主要与其形成时的反应矿物及生成矿物相关,而贯通矿物的成分变化却与全岩化学成分的变化密切相关。本文认为这种矿物成分演变的差异性,与矿物结晶初期所处的“环境”有关,因为斜长石等贯通矿物在其产生的初期因沉积岩的粒度细小,故各个质点上的成分近于相等,故其晶出的斜长石成分与沉积岩的总化学成分呈相关关系,如斜长石的An值与全岩CaO/(CaO+Na₂O)呈正相关关系。因已经过变质作用而使沉积物发生重结晶导致粒度变大,使岩石系统中各个质点上的化学成分不同,这样当这些矿物(如Gt、Crd、Bt等)经反应而生长时,其成分的变化只和与其相邻的矿物有相关关系,而与寄生主岩的总化学成分相关性较差。这是一个意义非常重大的现象,说明矿物的成分变化应该主要受控于生成时所处的“环境”,即岩石系统是一个均匀体系还是具有各向异性的结构构造。这种初始环境不同对矿物成分的控制作用可能要远远大于后期的扩散作用。可见矿物的生长尤其是非贯通矿物的生长是处于一个系统不平衡而局部平衡的体系中,这种局部体系是对自然界的真实反映,花岗岩块状样品的实验结果也证

实了这一点^[8]。因此在选择矿物进行温压估算时,应尽量选择相邻的、能够处于同一个平衡体系中的矿物对,这种成分计算的结果才能真正代表矿物对平衡时温压条件。

3 高温高压实验研究的验证

本文利用贺兰山北段孔兹岩系的天然块状样品进行了高温高压实验研究,实验是在中国科学院地球化学研究所地球深部物质研究室的YJ3000t压力机上进行的,具体实验过程和实验条件见刘建忠等^[7,9~11]。实验结果表明,熔体成分的演化、变质反应的发生,均严格受参与熔融和反应的矿物相的控制,即这种演化过程是在局部平衡体系中进行的,即熔体成分的变化仅与参与熔融的矿物相有关,而变质反应的发生同样也与周围的矿物相相关,并没有涉及到整个岩石体系。大量的地质事实和实验证明^[8],在自然的变质过程中这种局部体系对变质反应和矿物成分的控制作用是占主导地位的。反之尽管整个体系可能是处于不平衡的状态当中,但局部的反应已经达到平衡,因此可以利用相邻的已达到平衡的矿物对进行平衡温压条件的估算,而且能够获得较为理想的结果。

4 结 论

(1) 典型变质矿物如Gt、Crd及Bt等的成分变化范围均较小,且它们成分的变化与寄生主岩的成分变化关系较小。

(2) 贯通矿物如P1等其成分变化却与寄生主岩的成分变化同步。

(3) 典型变质矿物之间的成分变化具有同步变化关系如 X_{Mg}^{Bt} 与 X_{Mg}^{Gt} 及 X_{Mg}^{Crd} 的变化相互耦合。

(4) 孔兹岩系的高温高压实验结果表明,无论是熔体成分的变化还是变质反应的发生均与周围的矿物相有关,是在一个局部平衡体系中完成的。

(5) 尽管在变质作用进行过程中可能整个岩石系统是处在一个不平衡的状态中,但相邻矿物之间的反应已经达到局部的平衡,因此利用相邻矿物的矿物对温压计能够获得其反应平衡时温压条件。

参 考 文 献

- 1 穆克敏, 李树勋. 结晶岩石物理化学. 北京: 地质出版社, 1988. 197~287
- 2 Spear F S. A model for garnet and plagioclase growth in pelitic schists: implications for thermobarometry and p - T path determination. *J. metamorphic Geol.*, 1991, (8): 683~696
- 3 靳是琴, 贺义兴, 蒋引珊, 等. 中国北方孔兹岩系变质矿物成分环带. 北京: 地质出版社, 1994
- 4 胡大千, 贺义兴, 于洪林. 试论变质矿物的固相反应与结晶机理. 长春地质学院学报, 1996, 增刊: 24~27
- 5 胡能高. 贺兰山变质杂岩的组成及演化. 西安: 西安地图出版社, 1994, 1~98
- 6 刘建忠, 李铁胜, 卢良兆. 贺兰山北段早前寒武纪孔兹岩系的变质变形演化和动力学. 矿物学报, 1998, 18(4): 431~440
- 7 刘建忠. 贺兰山北段早前寒武纪孔兹岩系变质动力学与脱水熔融实验研究(学位论文). 长春: 长春地质学院, 1996, 1~118
- 8 吴福元. 花岗岩熔融的局部体系及熔融系列. 长春: 吉林科学技术出版社, 1993, 1~183
- 9 刘建忠, 卢良兆, 谢鸿森, 等. 贺兰山北段孔兹岩系脱水熔融实验研究-临界熔体比例的确定及意义. 地质科学, 1998, 33(4): 447~454
- 10 刘建忠, 卢良兆, 谢鸿森, 等. 孔兹岩系脱水熔融实验中水逸度、氧逸度和氢逸度的确定及意义——以贺兰山北段为例. 长春科技大学学报, 1999, 29(1): 15~19
- 11 刘建忠, 卢良兆, 谢鸿森, 等. 贺兰山北段孔兹岩系脱水熔融实验研究——岩石结构对变质反应的制约. 矿物学报, 1999, 19(4): 453~458

LOCAL EQUILIBRIUM SYSTEM OF METAMORPHIC MINERALS

—— AN EXAMPLE FROM KHONDALITE OF HELAN MOUNTAIN

Liu Jianzhong¹ Lu Liangzhao² Li Tiesheng³ Ouyang Ziyuan¹

1. (Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

2. (Changchun University of Science and Technology, Changchun 100029)

3. (Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: Studies on mineralogy and petrology of khondalite in Helan Mountain indicate that the typical metamorphic minerals such as garnet biotite and cordierite have good correlations with the adjacent equivalents, but the correlation between the typical minerals and the host rocks is not apparent. The composition of transition minerals such as plagioclase is correlative with that of the host rock. In the mean time, results of dehydration-melting experiments for natural solide khondalite samples indicate that metamorphic reactions took place in the local equilibrium system. During metamorphism the reactions and growth of minerals occurred in the local system. So we should select an adjacent equilibrium mineral assemblage to calculate metamorphic temperature and pressure.

Key words: metamorphic mineral; local equilibrium system; khondalite; Helan Mountain