

从变质反应空间看宣化、密云两地基性麻粒岩不同的 P - T 演化*

马 军 王仁民

(北京大学地质系, 北京 100871)

摘要 宣化、密云两地的基性麻粒岩具有相似的矿物组合, 但结构上存在显著差异. 本文应用“反应空间理论”对两地区基性麻粒岩的变质反应空间进行对比, 进一步确定了两地麻粒岩不同的演化历史, 宣化地区基性麻粒岩经历的是顺时针等温减压型(CW-ITD)的 P - T - t 轨迹, 而密云地区基性麻粒岩经历的是逆时针等压降温型(ACW-IBC)的 P - T - t 轨迹.

关键词 反应空间 P - T - t 演化 麻粒岩

反应空间(reaction space)是通过由一系列线性独立的转化反应建立起来的反应多边形或反应多面体图形, 对矿物集合体中可能发生的变质反应进行描述, 它是表述矿物集合体中反应进程和 P - T 变化的一种极为重要的方法.

传统的 P - T - t 轨迹的确立是依据平衡热力学温压计算, 考虑到: (1) 变质历史的多阶段性; (2) 岩石反应结构的存在; (3) 矿物环带的出现; (4) 矿物固溶体性质的复杂性等, 平衡热力学温压计算存在相当大的局限性. Thompson 的反应空间理论^[1,2]因其应用过程中可以不必考虑矿物平衡与否及开放体系与封闭体系的热力学平衡性质差异, 因而为具复杂历史的变质岩的岩石学研究提供了一种非常好的研究方法. 反应空间理论自提出以来, 已有多名学者运用它来揭示不同地区的多期次变质历史^[3~7]. Thompson 自己也将其反应空间的概念发展为众数空间(Modal Space), 以强调反应空间内的一系列点是由矿物丰度定义的^[8], 用以解决岩石学问题.

关于宣、密两地麻粒岩的研究已有很多报道, 但对两地麻粒岩的 P - T - t 轨迹, 特别是密云地区至今仍存在较多争议^[9,10]. 宣化、密云两地的基性麻粒岩在岩石类型和矿物组成上十分相似, 其主要的岩石类型均为: 石榴斜长辉石岩、石榴二辉基性麻粒岩、斜长角闪二辉石岩和石榴单斜辉石基性麻粒岩等. 但二者在矿物结构关系上有着显著的区别. 宣化大东沟基性麻粒岩中的石榴石被斜长石包围, 外接紫苏辉石和斜长石的后成合晶反应边, 构成特征的“白眼圈”结构, 密云基性麻粒岩则以“红眼圈”结构为特征: 石榴石呈串珠状分布于斜方辉石颗粒外围, 石榴石和辉石之间常充填着细小的长石、石英集合体. 二者的矿物共生系列有明显区别(表1).

表 1 宣化、密云基性麻粒岩矿物共生系列变化

世 代	密 云	宣 化
(1)	Cpx + Opx + Pl + Q	Cpx + Grt + Pl + Q
(2)	Grt + Opx + Cpx + Pl + Q	Grt + Cpx + Opx + Pl + Q
(3)	Grt + Cpx + Pl + Q	Cpx + Opx + Pl + Q $\pm$ Amp
(4)	Amp $\pm$ Cpx + Pl + Q	Amp + Cpx + Pl + Q

笔者曾据两地麻粒岩的结构特征、矿物共生组合变化特点及石榴石-辉石有关温压计的讨论,确定了宣、密两地麻粒岩的不同性质,前者经历的是等温降压型顺时针的 P - T - t 轨迹,后者则为近等压降温型逆时针的 P - T - t 轨迹^[11]。

本文引入变质反应空间理论,对宣、密两地基性麻粒岩的 P - T 演化、变质历史提供了强有力的验证,也反证了这一理论和方法的可行性。

1 独立组分与独立变质反应

反应空间的研究建立在正确确定岩石体系的独立组分数及独立变质反应的基础上。前人对于宣化、密云等地的基性麻粒岩原岩的研究,一般都认为是玄武岩类正变质岩石。玄武岩的主要矿物为斜长石和单斜辉石,按照反应空间描述矿物相的方法,可以用 di 和 an 两附加组分来代表其原始矿物,将全岩组分表示成以 di, an 及其一系列交换组分的形式。由于纯交换反应不影响矿物的丰度,只改变端元组分的组成,且受压力的影响很小,在进行反应空间研究中可以不考虑。因此,本文选择 NCMAS 体系作为简化的基性麻粒岩全岩组分体系。其 Thompson 组分的选择见表 2 和表 3。表 4 列出了宣化、密云基性麻粒岩的初始 Thompson 组分。

表 2 变质基性岩的 Thompson 附加组分(据 Thompson 1991)

矿物	符号	附加组分	符号
石英	Qtz	SiO ₂	qtz
斜长石	Plg	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	an
单斜辉石	Di	CaMgSi ₂ O ₆	di
斜方辉石	En	Mg ₂ Si ₂ O ₆	en
橄榄石	Olv	Mg ₂ SiO ₄	fo
尖晶石	Spl	MgAl ₂ O ₄	sp
石榴石	Grs	Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	grs
磷灰石	Ap	Ca ₅ P ₃ O ₁₂ (OH)	ap

表 3 变质基性岩的 Thompson 交换组分(据 Thompson 1991)

交换组分	符号
MgCa ₋₁	mc
Al ₂ Mg ₋₁ Si ₋₁	tk
NaSiCa ₋₁ Al ₋₁	pl
FeMg ₋₁	fm
KNa ₋₁	kn
MgTiAl ₂	mt
FeAl ₋₁ MnMg ₋₁	fa, mm
NaAlSi ₋₁	ed

对于 Grt + Cpx + Plg + Qtz 共生组合,在 NCMAS 体系中的独立附加组分为 4,交换组分为 5,体系的独立变质反应数为 $9 - 5 = 4$,其中两个交换反应: $pl_{Cpx} = pl_{Plg}$, $mc_{Cpx} = mc_{Grt}$,两个转化反应(1)、(2)式,其反应空间可由反应(1)、(2)或其线性变化后的其它形式构成的二维空间限定。经线性变换后可写出反应(3)、(4)式。

$$di + tk + qtz - an = 0, \quad (1)$$

$$2di + tk - grs - mc = 0, \quad (2)$$

$$grs + 2qtz + tk - 2an + mc = 0, \quad (3)$$

$$di - mc + an - grs - qtz = 0. \quad (4)$$

将上述反应的附加组分均转化成以氧平衡为单位, 交换组分以每个氧转换所需交换组分的摩尔数表示, 得到:

表 4 宣化、密云基性麻粒岩的全岩成分及 Thom-

pson 组分

样品号	28264	S26292	S26302	M27228
矿物组成 ^{a)}	1	2	1	2
SiO ₂	43.2	49.24	48.13	55.26
Al ₂ O ₃	16.94	13.27	20.34	13.70
TiO ₂	0.82	1.59	1.63	1.69
Fe ₂ O ₃	4.21	7.02	5.59	4.17
FeO	9.84	9.40	5.56	11.16
MgO	8.18	5.47	1.88	5.50
MnO	0.29	0.28	0.20	0.28
CaO	12.87	9.50	10.47	9.12
Na ₂ O	1.25	3.13	3.88	2.25
K ₂ O	0.45	0.50	0.75	0.38
P ₂ O ₅	0.17	0.32	0.50	0.22
烧失	1.49	0.53	0.82	0.84
di	11.77	14.80	10.56	13.45
an	0.87	1.31	4.45	2.36
mc	0.00	5.20	2.42	5.90
tk	7.77	8.42	7.48	6.06
pl	1.59	3.21	4.15	2.35
fm	9.32	8.58	5.12	10.30
kn	0.46	0.49	0.74	0.37
nt	0.60	1.12	1.16	1.21
fa	3.58	5.77	4.64	3.64
mm	0.28	0.25	0.18	0.25
ap	0.03	0.05	0.09	0.04
qtz	0.00	0.00	0.00	0.00
fo	5.51	0.00	0.00	0.00

a) 1——Grt, Cpx, Plg, Qtz; 2——Grt, Cpx, Opx, Plg, Qtz

$$3/4di + 1/4qtz + 1/8tk - an = 0, \quad (1a)$$

$$di - 1/12mc + 1/12tk - grs = 0, \quad (2a)$$

$$3/4grs + 1/4qtz + 1/16tk + 1/16mc - an = 0, \quad (3a)$$

$$3/7di - 1/14mc - 6/7grs + 4/7an - 1/7qtz = 0. \quad (4a)$$

上述反应中, (1a)式与石榴石无关, 其失量方向应平行于石榴石的丰度等值线, 且限定了[pl-]极限值; (2a)式代表石榴石向辉石的转变反应, 应平行于斜长石和石英的丰度等值线; (3a)式代表斜长石向石榴石、石英的转变, 应平行于辉石的丰度等值线; (4a)式与 tk 无关, 限定了[tk-]线。

对于 Grt + Cpx + Opx + Plg + Qtz 的共生组合, NCMAS 体系的相组分为 grs, di, en, an, qtz, tk, pl, mc, 独立转化反应数为 3, 除上述反应(1a)、(2a)式外, 还有:

$$1/6mc - en + di = 0 \quad (5)$$

由于反应(5)式涉及的只是单斜辉石与斜方辉石之间 mc 交换, 该反应主要受温度控制。若把二辉石看作全辉石处理, 其反应空间仍可看成是由反应(2a)、(3a)式或其线性组合限定的。

2 反应空间的建立

在已知独立组分及独立变质反应的情况下, 对于某一全岩组成及其矿物组分, 可通过相应的 Thompson 组分计算, 得出矿物的众数变化, 根据它们在反应空间内的一系列投影点, 判断出岩石反应的变化方向及进程。具体方法是:

(1)将已知岩石的全岩组分经化学计量关系矩阵式(如下)及其逆矩阵变换式运算, 并经氧平衡标准化, 转化成 Thompson 组分矢量, 求出其初始 Thompson 组分。

SiO ₂	=	2	2	0	-1	1	0	0	0	0	0	*	di
TiO ₂		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		an
Al ₂ O ₃		0	1	0	1	-1/2	0	0	-1	-1/2	0		mc
Fe ₂ O ₃		0	0	0	0	0	0	0	0	1/2	0		tk
FeO		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		pl
MnO		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		fm
MgO		1	0	1	-1	0	-1	0	1	0	-1		kn
CaO		1	1	-1	0	-1	0	0	0	0	0		mt
Na ₂ O		0	0	0	0	1/2	0	-1/2	0	0	0		fa
K ₂ O		0	0	0	0	0	0	1/2	0	0	0		mm
P ₂ O ₅		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3/2	ap

对于 SiO₂ 饱和的岩石, 其初始组分 tk 可为负, 可通过 $an = di + qtz + tk$ 使 tk 值增加至零, 此时代表的岩石组合 $Pyx + Plg + Qtz$. 而对于含石榴石或尖晶石、橄榄石等的岩石, 可以通过下列反应: $di + an = grs + qtz + mc$; $2di + 2tk + mc = an + sp$; $2di + mc + tk = an + fo$ 来改变初始 Thompson 组分值, 以适应新的矿物共生组合.

表 5 宣化、密云基性麻粒岩中石榴石、单斜辉石的初始 Thompson 组分

样品号	石榴石					单斜辉石				
	28264(C)	28264(r)	S26292	S26302	M27228	28264(C)	28264(r)	S26292	S26302	M27228
SiO ₂	38.93	38.93	38.09	37.81	38.07	49.48	50.37	49.25	48.38	50.34
TiO ₂	0.00	0.23	0.00	0.12	0.03	0.65	0.60	0.28	0.73	0.35
Al ₂ O ₃	20.71	20.69	16.41	21.12	21.18	5.26	3.98	2.59	5.29	3.67
FeO *	25.26	21.34	27.91	23.65	27.04	10.23	9.24	12.63	9.48	9.89
MnO	0.62	0.44	2.69	1.30	1.01	0.19	0.08	0.40	0.24	0.02
CaO	6.85	11.00	8.26	7.08	6.49	21.80	22.86	21.00	22.17	23.01
Na ₂ O						0.61	0.53	0.68	0.74	0.84
K ₂ O						0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
di						1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
gr	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000					
mc	2.426	2.078	2.283	2.401	2.455	0.027	-0.001	0.025	-0.030	-0.053
tk	-0.046	0.035	-0.073	-0.039	-0.053	0.088	0.065	0.037	0.082	0.061
pl						0.047	0.040	0.054	0.059	0.065
fm	1.529	1.28	1.674	1.446	1.630	0.264	0.224	0.278	0.177	0.185
mt	0.000	0.014	0.000	0.007	0.002	0.019	0.018	0.009	0.022	0.010
mm	0.041	0.029	0.185	0.087	0.067	0.006	0.003	0.014	0.008	0.001

表 6 宣化、密云基性麻粒岩中斜方辉石、斜长石的初始 Thompson 组分

样品号	斜方辉石		斜长石				
	S26292	M27228	28264(C)	28264(r)	S26292	S26302	M27228
SiO ₂	49.12	53.83	52.68	50.87	54.23	56.32	57.71
TiO ₂	0.06	0.06	0.00	0.04	0.03	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	15.0	2.27	28.02	29.97	27.25	26.70	26.11
FeO *	29.27	22.98	0.15	0.03	0.10	0.25	0.39
MnO	0.88	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	17.17	18.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.58	0.46	12.81	15.31	8.54	9.86	8.68
Na ₂ O	0.06	0.14	4.53	3.43	7.53	5.76	6.35
K ₂ O	0.00	0.08	0.00	0.00	0.46	0.33	0.56
di	1.000	1.000					
an			1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
mc	0.970	0.969					
tk	0.004	0.061					
pl	0.005	0.011	0.391	0.290	0.624	0.523	0.583
fm	0.895	0.777					
mt	0.002	0.002					
mm	0.030	0.012					
kn			0.000	0.000	0.024	0.019	0.032

(2)将岩石中的各矿物组分以同样的 Thompson 组分表示(表 5,6). 可用求岩石 Thompson 组分一样的方法(或利用矿物分子式计算结果)求矿物的初始 Thompson 组分.

(3)据岩石及矿物的初始 Thompson 组分,将岩石以附加组分模式丰度的形式表示. 由变质反应(1a)~(4a)式可绘出岩石的反应空间(图 1).

3 结论

由图 1 显示的宣化、密云基性麻粒岩的反应进程及其矿物模式丰度的变化可以看出:

(1)宣化石榴单斜辉石基性麻粒岩,其主要的 Thompson 组分变量为:an, grs;变质反应主要以沿 Y 轴的变化为主,其矿物丰度变化趋势与实验确定的等温变化曲线近于平行,而与等压变化曲线呈较大夹角,反映了一个近等温减压的变化过程.

(2)宣化、密云两地的石榴(或含石榴)二辉基性麻粒岩,反应表现为截然相反的过程,变质反应均为 $Grt + Cpx + Qtz \rightleftharpoons Opx + Plg$,但由于前者以石榴石含量的减少,斜方辉石含量的增加为特征,而后者则以斜方辉石的消耗和石榴石含量的增加为特征,同样的矿物组合表现出不同的 P-T 演化特征,前者由矿物模式丰度演化趋势看,以压力的变化为主;后者则主要表现出受温度的控制,总体反映出一个降温过程.

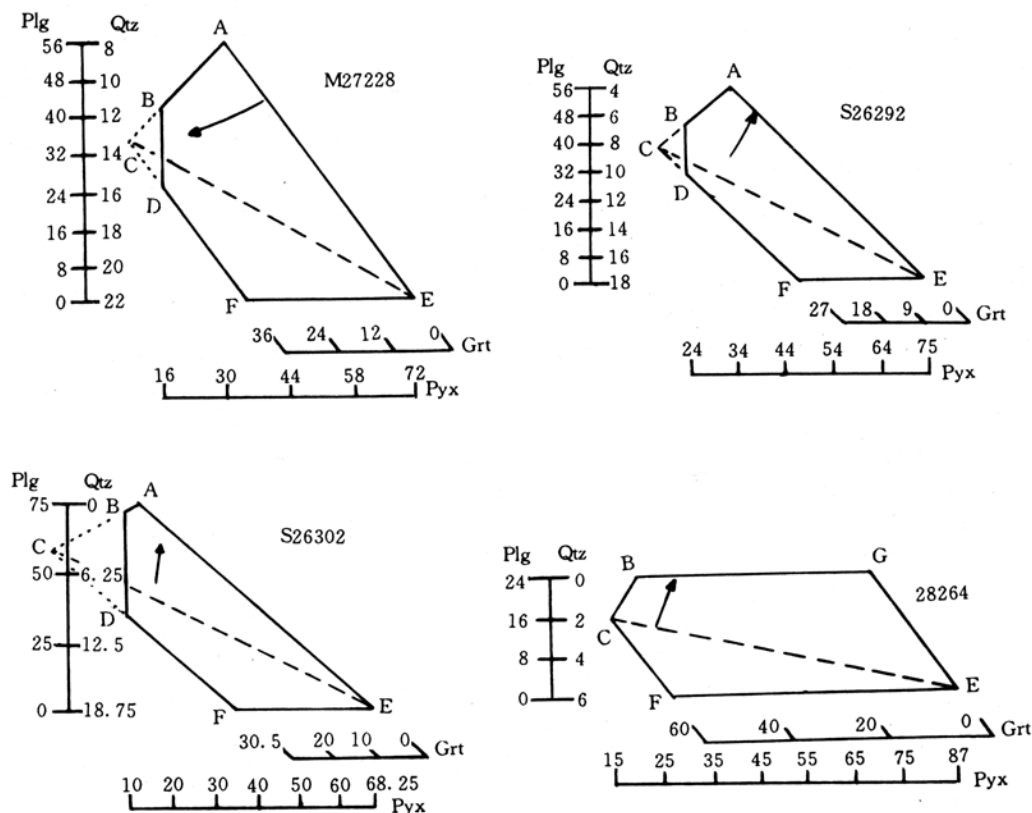


图1 宣化、密云两地有代表性的基性麻粒岩的变质反应空间

图中水平与垂直方向对应的反应分别为(2a)(3a)式。据 Green 和 Ringwood^[12]的实验, CE 线近似平行等压变化曲线, 平行该曲线向上方向压力递减; 等温变化曲线与之近于直交, 且延 CE 方向温度递增。M27228, S26302 分别为密云、宣化石榴二辉麻粒岩, S26292 为宣化二辉麻粒岩, 28264 为宣化石榴单斜辉石麻粒岩, 箭头所指方向为岩石的 P - T 及矿物丰度演化方向

(3) $\text{Cpx} + \text{OPx} + \text{Pl} + \text{Q}$ 为密云石榴二辉麻粒岩的早期矿物共生组合, 它以石榴石的生成反应为特征, 由其变质反应空间可看出, 在其石榴石的生成过程中, 压力应略有升高。这证实了以前的观点^[11]。

根据反应空间的研究, 可以肯定, 宣化、密云两地麻粒岩的成因类型是不同的, 二者的 P - T - t 轨迹演化方向完全不同。由此, 我们更进一步确定: 宣化麻粒岩为顺时针等温减压(CW-ITD)型, 密云为逆时针等压降温(ACW-IBC)型。

参 考 文 献

- 1 Thompson Jr J B. Composition Space: an algebraic and geometric approach. In: Ferry J M, ed. Characterization of Metamorphism through Mineral Equilibria, Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy, 1982, 10:1~31
- 2 Thompson Jr J B. Reaction Space: an algebraic and geometric approach. In Ferry J M ed. Characterization of Metamorphism

- through Mineral Equilibria, Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy, 1982, 10:33~51
- 3 Chamberlain C P. Evidence for the repeated folding of isotherms during regional metamorphism. J Petrol, 1986, 27:63~89
 - 4 Nicholis J, Stoout M Z, Ghent E D. Characterization of partly-open-system chemical variations in clinopyroxene amphibolite boudins, Three Valley GAP, British Columbia, using Thompson space calculations. Canadian Mineralogist, 1991, 29:633~653
 - 5 Poli S. Reaction spaces and P - T paths: from amphibole eclogite to greenschist facies in the Austroalpine domain(Oetztal Complex). Contrib Mineral Petrol, 1991, 106:399~416
 - 6 Thompson Jr J B, Laird J, Thompson A B. Reactions in amphibolite, greenschist and blueschist. Journal of Petrology, 1982, 23(part 1):1~27
 - 7 Zigg A J. Intra -and Intercrystalline cation-exchange reactions in zoned calcic amphibole from the Bushveld Complex. Canadian Mineralogist, 1993, 31(part3):649~664
 - 8 Thompson Jr J B. Modal Space: Applications to ultramafic and mafic rocks. Canadian Mineralogist, 1991, 29:615~632
 - 9 王仁民. 略论我国麻粒岩的压力类型、变质状态和 P - T - t 轨迹类型. 岩石圈地球科学(北京大学地质系), 1994, 87~93
 - 10 贺高品, 叶慧文, 夏胜利. 北京密云麻粒岩相区变质作用演化及 P - T - t 轨迹的研究. 岩石学报, 1994, 10(1):15~24
 - 11 马 军, 王仁民. 石榴石-辉石温度计、压力计综述及应用: 密云(遵化)、宣化两地麻粒岩形成条件对比. 见: 钱祥麟、王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 1994. 71~88
 - 12 Green D H, Ringwood A E. An Experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. Geochim Cosmochim Acta, 1967, 31:767~833