

文章编号: 1000- 6524(2002)04- 0363- 08

## 斜方角闪石组合的变质压力类型

游振东, 周汉文, 钟增球

(中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 斜方角闪石组合是前寒武纪变质岩系中的一种特殊的岩石类型, 以富 Mg、Al, 贫 Ca、K 为特征, 矿物组成为堇青石、斜方角闪石和富铝矿物如  $Al_2SiO_5$ 、十字石、石榴石、斜长石、云母类和单斜角闪石类。其分布遍及欧亚及大洋洲各地的古老岩系中, 在许多产地与硫化物矿床有密切关系。按其变质条件可以分为低压和高压两种类型: 低压型以堇青石- 直闪石- 镁铁闪石组合为特征; 高压型以蓝晶石、铝直闪石组合为特征, 有时有石榴石。堇青石、十字石构成围绕蓝晶石周围的冠状体, 成为变质地体经历近绝热抬升的极好证据。本文论述其特征矿物组合、结构的演化、所涉及的变质反应及其形成的构造环境。

**关键词:** 前寒武纪; 斜方角闪石组合; 压力类型; 结构演化; 变质岩

**中图分类号:** P584; P578.955

**文献标识码:** A

### A study on the baric types of the orthoamphibole association

YOU Zhen\_dong, ZHOU Han\_wen and ZHONG Zeng\_qiu

(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The orthoamphibole association is a special rock type developed mostly in Precambrian metamorphic terranes. It is rich in Mg and Al but depleted in Ca and K. Its major mineral constituents include cordierite, orthoamphibole,  $Al_2SiO_5$  minerals, staurolite, garnet, plagioclase, micas and clinoamphiboles. Associations of this kind are distributed in a lot of ancient metamorphic complexes throughout the world, with some of them closely related to sulfide deposits. According to metamorphic conditions, the orthoamphibole association can be tentatively divided into two types: the lower pressure type and the high pressure type. The former type is characterized by the cordierite- anthophyllite- cummingtonite association, while the latter type is  $Al_2SiO_5$  minerals- gedrite association, sometimes with garnet. The  $Al_2SiO_5$  in high-pressure terranes is kyanite. Cordierite and staurolite mainly formed corona textures surrounding kyanite or garnet, indicating the nearly adiabatic uplift of a metamorphic terrane. The present paper deals with the mineral paragenesis, the baric types, the related metamorphic reactions and the conditions under which these rocks were formed.

收稿日期: 2002- 05- 28; 修订日期: 2002- 08- 05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999- 0755- 06)

作者简介: 游振东 (1928- ), 男, 教授, 主要从事变质岩石学的教学和科研工作。

**Key words:** Precambrian; orthoamphibole association; baric types; texture evolution; metamorphic rock

堇青石斜方角闪石岩是主要由堇青石和斜方角闪石类矿物(包括直闪石和铝直闪石或两者并存)构成的变质岩。Eskola 于 1915 年研究了芬兰 Orijarvi 地区的堇青石直闪石岩,并据此建立了变质相体系,从那以后,对这类岩石做了大量的工作。此类岩石组合在世界各地分布甚广。它之所以受到重视,一方面因为这种岩石成分很特别,在前寒武纪变质建造中占有重要地位;另一方面,在世界许多地区发现其与硫化物矿床关系密切,具有经济效益。我国过去对该类型的岩石注意甚少,1980 年末至 1990 年初,游振东等报道了大别山区浠水蔡家大湾的蓝晶石铝直闪石片岩中的冠状体结构,随后 Liu Jun 等(1995)从超高压变质带的角度,对该岩石进行了更全面的研究。王凯怡等(1996)报道了五台金刚库的蓝晶石铝直闪石片岩。目前此类岩石组合在国内已受到广泛关注。

经详细研究发现斜方角闪石组合存在不同的成因类型。Eskola 所研究的堇青石直闪石片岩属于低压型,形成的地温梯度高,堇青石和直闪石同属进变质的共生组合,大部分是沉积变质成因。而我国所发现的蓝晶石铝直闪石片岩形成的地温梯度较低,堇青石只是作为原生的富铝相(如蓝晶石)与铝直闪石退变质反应的产物,成分上富镁富铝,极可能是原岩在变质交代过程中钙质大量带出的结果。本文旨在研究对比这两类含堇青石的斜方角闪石岩石的时空分布、矿物共生、岩石化学、结构演化的特征,并试图说明其形成的构造环境。

## 1 斜方角闪石组合的空间分布

世界上不少变质地区报道有各种不同类型的斜方角闪石组合,从构造环境看,其中不少出现于前寒武纪的结晶基底,但亦不乏造山带中的实例。从其形成的温压梯度来看,可以大致分为两种类型,即形成于较高地温梯度区的低压型和形成于较低地温梯度区的高压型。据现有资料,斜方角闪石组合在世界各地的分布如表 1。从表中可以粗略看出:低压型堇青石直闪石岩石多发育于前寒武纪的地盾区,高压型的蓝晶石铝直闪石片岩则多见于不同时代的造山带。

## 2 矿物化学

直闪石和铝直闪石的区别在于:晶体化学式中 A 位和<sup>IV</sup>Al 的和小于还是大于 1.0,小于 1.0 的属于直闪石;大于 1.0 的属铝直闪石。根据这一原则,可以看出大别山区和五台金刚库的斜方角闪石极不同于经典地区(如英国的外赫布里底群岛的蛇纹岩),多为铝直闪石,而极少直闪石(表 2)。

从表中可看出,多数铝直闪石 A 位离子数与<sup>IV</sup>Al 之和大于 1,样品 1 虽然小了点,但亦趋近 1。多数铝直闪石是富镁的,所以 X<sub>Fe</sub>均小于 50。从样品 5 和 7 看来,斜方角闪石的 X<sub>Fe</sub>还取决于原岩的成分。

## 3 岩石化学

斜方角闪石组合的岩石化学成分以富 Mg、Al 和贫 Ca、K 为特征。SiO<sub>2</sub>的含量可变,以

表1 斜方角闪石组合的空间分布

Table 1 Spatial distribution of orthoamphibole associations

序号	产地	矿物组合	构造环境	资料来源
1	Orijarvi, 芬兰	Crd- Ath; Crd- Grt- Ath; Sil- Crd; Kfs- Sil- Crd- Bt	波罗的地质	Eskola, 1915
2	Whyntie Head Banffshire, 苏格兰	Crd- Sil- Oamp; Sil- Grt- Oamp; And- Sil- Crd; Ms- And- Sil- Bt	Buchan 带	Hudson <i>et al.</i> , 1985
3	Fiskenaeset, 格陵兰	Crd- Sil- Oamp; Crd- Sil- Oamp- Grt	地盾	Friend, 1976
4	Godthabsfjord, 西格陵兰	Qtz- Crd- Oamp- Bt (±Sil, Ky, Grt, St)	Malene 表壳岩	Dymek, 1987; Dymek <i>et al.</i> , 1990
5	Pistil Ogo, Cornwall	Crd- Sil- Oamp; Crd- Grt- Oamp; And- Sil- Crd	加里东带	Tilley, 1937
6	Vishnu complex 美国大峡谷	Sil- Grt- Oamp; Ms- Sil- Grt- Bt; Ms- Chl- Sil- Bt	地台基底	Brown <i>et al.</i> , 1979
7	Beartooth Mountains, Montana/ Wyoming	Crd- Sil- Oamp; Crd- Sil- Oamp- Grt; Crd- Sil- Grt	地台基底	Butler, 1969
8	Whetstone Lake, Ontario	Chl- Crd- Sil- Oamp; Chl- Sil- Grt; Ms- Sil- Grt - Bt	北美地盾	Carmichael, 1978
9	Fishtail Lake, Ontario	Crd- Grt- Oamp; Sil- Crd- Grt	北美地盾	Lal & Moorhouse, 1969
10	Coronation 矿区 Saskatchewan, 加拿大	Crd- Grt- Oamp; Crd- Sil- Grt; And- Sil- Crd; And- Sil- Oamp; Ms- Sil- Bt	北美地盾	Froese, 1969
11	Khetri 铜矿带, Rajasthan, 印度	Crd- Grt- Oamp; Chl- Oamp; Chl- And- Crd; Chl- And- Crd; Ms- Chl- And- Bt	印度元古宙褶皱带	Lal & Shukla, 1975
12	N. Krivoy rog, 俄	Crd- Oamp- Hbl; Phl- Ath- Crd; Phl- Ath; Bt- Qtz	俄罗斯地台基底	Goroshnikov <i>et al.</i> , 1965
13	Shuretsky, Karelia, 俄	Ky- Grt- Oamp(Ged) ±Sil	卡累利阿带	Tilley, 1939
14	Nessoden, 奥斯陆	Sil- Grt- Oamp; Ky- Sil; Chl- Ky	瑞芬褶皱带	Broch 1926
15	津巴布韦北部 Chewore 内露层, 非洲	Ky- Ged- Drv- Qtz- Hem- Ru; Ky- Chl- Hem- Tc- Yo; Ky- Tc- Hem- Drv- Ru- Qtz	赞比西带, 550- 520 Ma	Johnson, 2002
16	Ammonoosuc, SW New Hampshire	Ky(Sil) - Oamp	阿帕拉阡带	Spear, 1982
17	Arunta complex, 澳	Ky- Grt- Oamp	前寒武纪地盾	Vernon, 1972
18	Errabiddy, 西澳	Ky- Grt- Ged		Baker <i>et al.</i> , 1983
19	浠水, 湖北	Ky- Ged(Ath) - Ru; Grt- Ged(Ath)	大别造山带	游振东, 1990; Liu, 1995
20	金刚库, 五台	Ky- Ged(Ath) - Ru; Grt- Oamp	前寒武纪造山带	王凯怡等, 1996

表内所列资料,除单独注明者外均采自 Hudson *et al.*, 1985; 矿物代号据 Kretz, 1983: And—红柱石; Ath—直闪石; Bt—黑云母; Crd—堇青石; Chl—绿泥石; Drv—镁电气石; Grt—石榴石; Ged—铝直闪石; Hbl—普通角闪石; Hem—赤铁矿; Kfs—钾长石; Ky—蓝晶石; Ms—白云母; Oamp—斜方角闪石; Phl—金云母; Qtz—石英; Ru—金红石; Sil—夕线石; Tc—滑石; Yo—紫硅镁铝石; 1~ 12 属低压型, 13~ 20 属高压型。

我国两个产地的样品而言,  $\text{SiO}_2$  (w B/%) 变动于 47.3~ 56.58 之间。可是格陵兰的石英—堇青石片麻岩系中含少量斜方角闪石的堇青石石英岩的  $\text{SiO}_2$  可达 86.54, 表 3 列举了国内含斜方角闪石岩石的化学成分, 并和世界上其他典型地区进行了对比。

从表 3 看出, 具斜方角闪石组合的岩石, 以富 Al、Mg, 贫 Ca、K 为特征。如果按 Dymek

表 2 斜方角闪石的矿物化学成分对比

w B/ %

Table 2 A comparison of mineral composition of orthoamphiboles

序号	1	2	3	4	5	6	7
产地	大别山浠水		五台金刚库		Chewore(非洲)	Idaho(美国)	Outer Hebrides(Gt. Britain)
SiO <sub>2</sub>	47.63	48.00	50.66	52.04	50.15	44.89	58.48
TiO <sub>2</sub>	0.31	0.13	0.13	0.07	0.14	0.67	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.31	13.09	7.86	6.98	14.69	17.91	0.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	1.53	0.67	0.58
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	-	0.06	0.08	-	-	-
FeO	15.77	17.51	16.25	15.33	0.00	13.31	7.85
MnO	0.14	0.08	0.13	0.10	0.01	0.37	0.27
MgO	17.68	17.12	22.14	21.98	29.13	18.09	29.25
NiO	0.06	-	-	-	-	-	-
CaO	0.57	0.48	0.39	0.49	0.06	0.40	0.14
Na <sub>2</sub> O	0.50	0.94	0.18	0.57	1.40	1.45	0.08
K <sub>2</sub> O	-	0.00	0.04	0.00	0.02	0.05	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	-	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	-	-	-	-	-	2.02	2.60
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	-	-	-	-	-	0.00	0.20
F	-	-	-	-	-	-	-
Total	95.38	97.35	97.85	97.64	97.121	99.87	100.20
以 24(O, OH) 为基础的离子数							
Si	6.68	6.86	7.47	7.65	6.67	6.325	7.885
<sup>VI</sup> Al	1.32	1.14	0.53	0.35	1.33	1.675	0.090
<sup>IV</sup> Al	0.73	1.06	0.83	0.86	0.97	1.301	-
Ti	0.03	-	0.01	0.01	0.01	0.071	0.003
Fe <sup>3+</sup>	-	-	-	-	0.15	0.070	0.058
Mg	3.69	3.65	4.87	4.81	5.77	3.799	5.876
Fe <sup>2+</sup>	1.85	2.09	2.0	1.88	0.00	1.569	0.885
Mn	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.044	0.031
Na	0.13	0.26	0.04	0.16	0.36	0.396	0.020
Ca	0.09	0.07	0.05	0.08	0.01	0.060	0.020
K	-	0.00	0.01	0.00	0.00	0.008	0.004
OH	-	-	-	-	-	1.898	2.338
X <sub>Fe</sub>	33.6	36.4	29.4	28.2	2.5	41.0	13.1
名称	铝直闪石		铝直闪石		铝直闪石	铝直闪石	直闪石
矿物组合	Ky+ Gd±Grt		Ky+ Gd+ Grt		Gd+ Ky+ Tc	Ky+ Grt+ Gd	蛇纹岩

资料来源: 1—游振东等, 1990; 2—Liu *et al.*, 1995; 3—4—王凯怡等, 1996; 5—Johnson, 2002; 6—7—Deer *et al.*, 1982。

(1990) 所提的计算方法:  $A = Al_2O_3 - CaO - Na_2O + 3.3P_2O_5$ ,  $F = FeO + MnO - TiO_2$ ,  $M = MgO$ , 计算中  $Fe_2O_3$  均换算成  $FeO$ , 在 AFM 图解中, 斜方角闪石组合  $A/(A+F)$  大都小于 50, 故均投绘于图解的中下部(图 1), 恰在蓝晶石和斜方角闪石投影区之间, 与石榴石、堇青石的成分区相近。因此, 此类岩石常可出现堇青石和石榴石, 样品 7 为堇青石石英片麻岩, 因此投影点接近堇青石。

#### 4 矿物共生分析

在低的变质温度下(约 600~ 625 °C, 0.5 GPa), 斜方角闪石出现不混溶间隔, 即直闪石

表3 斜方角闪石组合的岩石化学成分对比  
Table 3 A comparison of chemical composition of orthoamphibole associations

名称及产地	1. 蓝晶直闪片岩 (湖北)	2. 蓝晶直闪片岩 (湖北)	3. 蓝晶直闪片岩 (湖北)	4. 蓝晶直闪片岩 (湖北)	5. 斜方角闪白片岩 (非洲)	6. 堇青直闪片岩 (芬兰)	7. 堇青石英岩 (格陵兰)
SiO <sub>2</sub>	56.58	48.48	47.9	47.3	57.16	57.65	86.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.16	15.88	20.6	14.6	15.96	16.84	8.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.19	1.51	0.0	0.0	8.66	0.85	0.81(t)
FeO	10.68	12.10	11.5	14.4		10.33	
MgO	13.30	15.46	15.4	17.1	13.88	5.30	2.45
MnO	0.10	0.09	0.1	0.1	0.02	-	0.00
TiO <sub>2</sub>	1.18	1.38	1.0	2.4	1.78	1.60	0.19
CaO	1.02	1.03	0.3	0.8	0.06	1.28	0.18
Na <sub>2</sub> O	0.35	0.60	1.1	0.4	0.27	2.34	0.33
K <sub>2</sub> O	0.0	0.10	0.00	0.1	0.04	2.36	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.78	0.18	1.4	2.2	0.08	-	0.04
H <sub>2</sub> O	1.78	2.21	-	0.2	2.80	1.08(H <sub>2</sub> O <sup>-</sup> )	0.67(LOI)
总和	99.44	99.02	99.8	94.3	100.73	99.03	99.34
A	22.73	23.74	28.98	20.19	28.13	37.56	49.13
F	18.65	18.12	16.22	19.92	6.15	32.58	9.34
M	58.52	58.14	54.80	59.89	65.71	29.86	41.52

资料来源: 1—Liu *et al.*, 1995; 2,3—游振东等, 1990; 4—Liu *et al.*, 1995; 5—Jonson, 2002; 6—Eskola, 1915; 7—Dymek, 1990。

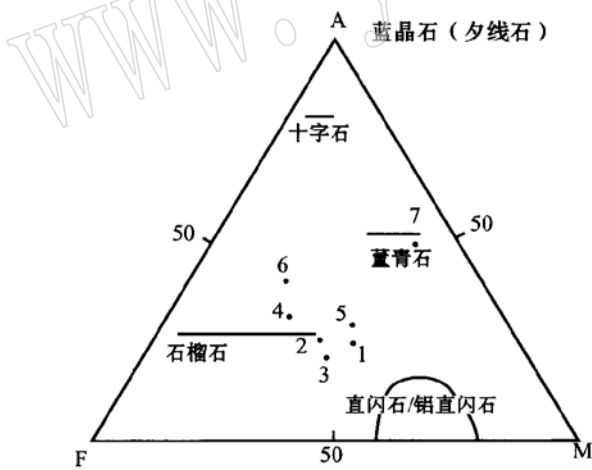


图1 斜方角闪石组合的AFM图解

Fig. 1 AFM plots of typical orthoamphibole associations

和铝直闪石共存(Spear, 1995)。直闪石是低Al低Na的, 铝直闪石则是高Al高Na的斜方角闪石变种。在镜下直闪石多为无色或是弱多色性的柱状晶, 而铝直闪石则呈灰色, 可以具绿灰、蓝灰或粉红灰色多色性, 含铁量的增加, 使矿物的多色性增强。所以, 当两种斜方角闪石交生或相互包容时, 运用多色性来鉴别它们是比较容易的。

堇青石斜方角闪石组合的岩石成因格子见图2。图中曲线①说明了斜方角闪石的混溶间隔。从该图可以看出: Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> + 斜方角闪石是相对高压变质条件的产物, 尤其是蓝晶石+ 铝直闪石组合, 仅在上部AFM小图中出现, 有实验资料说明其形成的压力当在1.0 GPa以上

(Schreyer, 1969, 1977); 堇青石+ 镁铁闪石组合, 见于下部AFM小图中, 是低压变质的特征, 最典型的如芬兰的Orijarvi; 在下部AFM图中, 堇青石+ 十字石和堇青石+ 石榴石组合的结线把AFM图分为两半, 因为堇青石是富镁矿物, 而十字石、石榴石则是富铁的, 只要这两个组合中任何一个出现就不可能有Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>矿物与绿泥石或铝直闪石的共生。这两个组

合在图 2 上表示为曲线 ②, 说明其稳定区压力小于 0.5 GPa 且曲线斜率很小, 近平行于温度轴, 所以有以下反应产生:  $\text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{铝直闪石} = \text{堇青石} + \text{十字石}$ ,  $\text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{铝直闪石} = \text{堇青石} + \text{石榴石}$ 。这两个反应显然具有减压的特点, 它们必将在岩石的结构上反映出来。

## 5 斜方角闪石组合的结构演化

低压型的堇青石直闪石组合多具有某种型式的变晶结构。例如有石英存在时, 堇青石常呈不规则的粒状变晶包裹石英晶粒, 它们与共生的直闪石柱状晶一起构成柱粒状变晶结构(美国大峡谷)。奇特的是格陵兰 Godthabsfjord 的沉积变质岩系中竟出现酸性岩类, 堇青石竟成厘米级(最大的有 10 cm)的变斑晶出现(Dymek, 1990)。

高压型的铝直闪石岩石, 由于上述减压退变质反应, 在岩石结构上会出现堇青石的冠状体或次变边围绕反应矿物的周围。以湖北浠水蔡家大湾的样品为例(游振东等, 1990), 岩石以铝直闪石( $X_{\text{Fe}} = 0.31 \sim 0.33$ )为主, 蓝晶石见于铝直闪石基质中。沿着蓝晶石的边缘出现细粒堇青石构成的冠状体(图 3a), 有时可见细粒状或蠕虫状的十字石围绕蓝晶石的晶界生长(图 3b), 有时十字石可整体替代蓝晶石。石榴石呈毫米级变晶, 其周围也有堇青石的冠状体。

美国新罕布什尔(New Hampshire)西南的铝直闪石堇青石片麻岩中出现两种类型的冠状体(Schumacher *et al.*, 1987): 堇青石冠状体围绕富 Al 相, 如夕线石; 堇青石+斜长石冠状体围绕富 Al 矿物。前者主要中心晶体是夕线石, 另有少量的蓝晶石叶片状硅酸盐、十字石、假蓝宝石等高 Al 矿物和金红石。据研究, 此类铝直闪石堇青石片麻岩乃是中奥陶世火山岩系中的玄武岩类在中压条件下的变质产物, 温压条约为 0.6 GPa, 650 °C。

五台金刚库的蓝晶石铝直闪石岩和石榴蓝晶石铝直闪石岩晶粒粗大, 铝直闪石( $X_{\text{Fe}} = 0.28 \sim 0.35$ )、石榴石、蓝晶石呈厘米级巨晶, 说明岩石峰期变质过程中有丰富的流体参与。该区的铝直闪石岩同样也有堇青石十字石的冠状体, 即峰期变质后也经历过减压退变质的过程。

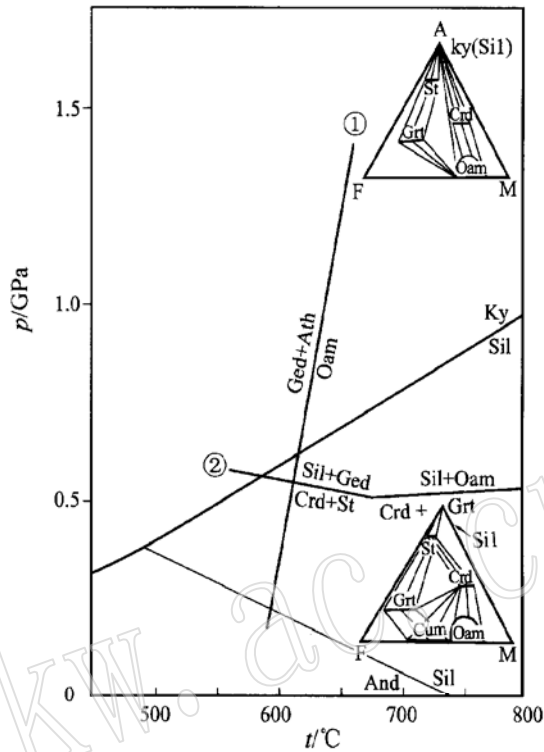


图 2 斜方角闪石组合的岩石成因格子  $pt$  图  
Fig. 2  $pt$  diagram showing the petrogenetic grid of the orthoamphibole associations  
St—十字石; Cum—镁铁闪石

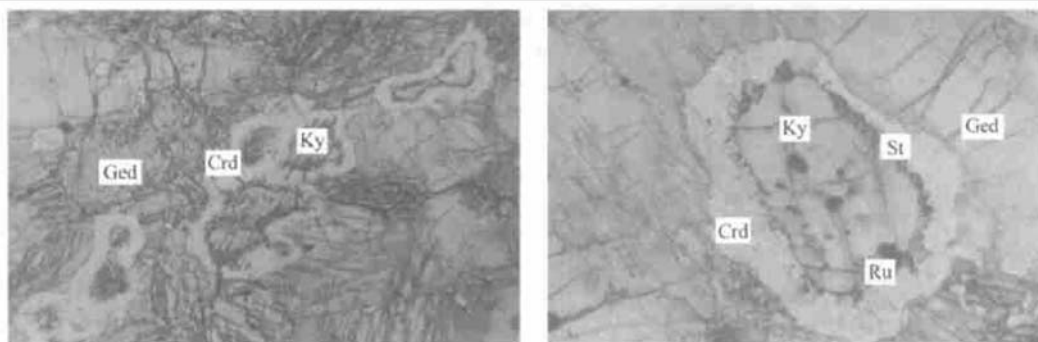


图3 湖北浠水蓝晶石铝直闪石岩石中的堇青石冠状体结构

Fig. 3 The corona texture of kyanite from gedrite rock in Xishui, Hubei Province

a—蓝晶石晶粒沿面理排列,单偏光,视域宽3.8 mm; b—堇青石冠状体围绕蓝晶石晶粒,垂直晶面有针状十字石,单偏光,视域宽1.2 mm

## 6 斜方角闪石组合的构造环境

沈其韩院士(1992)曾经指出,不同时期在深部形成的麻粒岩相带是通过什么方式被抬升上来的,是什么时期发生的,是一个十分重要的问题。对于斜方角闪石组合也是如此。

斜方角闪石岩石,化学成分很特殊,常常发育一些有特殊意义的矿物组合,代表一种特有的温压条件,而且此类岩石往往保留着变质反应历史的记录,矿物包裹体、交代假象、冠状体及各种类型的反应结构,为重溯岩石的变质历史提供了珍贵的资料,尤其是蓝晶石铝直闪石组合形成的压力较高,它所发育的种种退变质结构,是判断岩石抬升过程的极好资料。斜方角闪石组合,成分上富Mg,有的富Al,贫Ca贫K,它的成因至少有3种:①变质伴随交代作用;②部分熔融的残留体;③变质前的次生变化,如风化作用、晚期岩浆热液的蚀变或海水导致的热液蚀变,导致了某些成分的富集和另一些成分的贫化。但无论哪种都不能圆满地解释斜方角闪石组合的形成,看来水热流体尤其是与海水有关的流体,是导致其成分特异的原因。由扩张中心和其他活动的火山环境所引发的洋底热水作用、热水溶液的环流,导致岩石中CaO的带出和Na<sub>2</sub>O的富集,同时也降低了Fe/Mg值。因此,这些岩石很可能携带了古热液系统的信息,对于分析其形成的构造环境极为有利。最近,Johnson等(2002)指出赞比西带Kadungri的斜方角闪石白片岩,变质温度为550~600℃,压力为1.3~1.5 GPa,所有变质反应均显示有高氧逸度的流体参与,推测这种同变质的高 $f_{O_2}$ 的交代流体应来源于约55 km的深部,而赞比西带的构造变质作用应与冈瓦纳古陆的拼合所引起广泛的陆壳增厚有关。

## Reference

- Baker J, *et al.* 1983. Corona textures between kyanite, garnet and gedrite in gneisses from Errabiddy, Western Australia[J]. *J. Metamorphic Geol.*, 5: 357~ 370.
- Deer H & Zussman. 1982. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*[M]. Hongkong: Longman, 151, Table 15.
- Dymek R F. 1987. Petrogenesis of Archaean cordierite-orthoamphibole rocks(COR) from west Greenland: trace element con-

- straints[J]. *Trans. Am. Geophys. Union(EOS)*, 68: 453.
- Dymek R F and Smith M S. 1990. Geochemistry and origin of Archaean quartz – cordierite gneisses from the Godthabsfjord region, west Greenland [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 105: 715~ 730.
- Eskola P. 1915. On the relations between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijarvi region[J]. *Comm. Geol. Finlande Bull.*, 44: 1~ 145 .
- Goroshnikov B I, Euriev L D. 1965. On cordierite– polyamphibole and anthophyllite– cordierite rocks from north Krivoy Rog [J]. *Doelad. Academy of Science SSSR*, 164 (3): 720~ 723.
- Hudson N F C and Harte B. 1985. K<sub>2</sub>O-poor aluminous assemblages from the Buchan Dalradian and the variety of orthoamphibole assemblages in Aluminous bulk composition in Amphibolite Facies[J]. *Am. Journal of Science*, 285: 224~ 266.
- Johnson S P and Oliver G J H. 2002. High  $f_{O_2}$  metasomatism during whiteschist metamorphism, Zambesi belt, northern Zimbabwe[J]. *J. of Petrology*, 43(2): 271~ 290.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals [J]. *Am. Mineral.*, 68: 277~ 279 .
- Liu J and Liou J G. 1995. Kyanite– anthophyllite schist and southwest extension of the Dabie mountain superhigh- to high-pressure belt [J]. *The Island Arc*, 4(4): 334~ 347.
- Schumacher J C and Robinson P. 1987. Mineral chemistry and metasomatic growth of Aluminous enclaves in gedrite– cordierite– gneiss from southwestern New Hampshire, USA[J]. *Journal of Petrology*, 28 (6): 1 033~ 1 073.
- Schreyer W, *et al.* 1977. Whiteschists: their compositions and pressure– temperature regimes based on experimental, field and petrographic evidence [J]. *Tectonophysics*, 43: 127~ 144.
- Schreyer W and Seifert F. 1969. Compatibility relations of the aluminum silicates in the systems MgO– Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>– SiO<sub>2</sub>– H<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O– MgO– Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>– SiO<sub>2</sub>– H<sub>2</sub>O at high pressures [J]. *American J. of Science*, 267: 371~ 388.
- Shen Qihan, Xu Huifen, Zhang Zongqing, *et al.* 1992. The Early Precambrian Granulites in China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Spear F S. 1995. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure – Temperature– Time Paths*[M] (second printing). Washington D. C: Mineralogical society of America, 90~ 91, 478~ 489.
- Wang Kaiyi, Zhou Shaoping and Hao Jie. 1996. The metamorphism and significance of Kyanite-bearing assemblages from the original Jigangku formation of Wutaishan area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 88~ 98 (in Chinese with English abstract).
- You Zhendong, Zhou Hanwen and Lu Xuemiao. 1990. Corona textures in kyanite gedrite schist from Xishui, Hubei[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 15(4): 345~ 356 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 等. 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩[M]. 北京: 地质出版社, 222~ 223.
- 王凯怡, 周少平, 郝杰. 1996. 五台山地区原金刚库组中含蓝晶石组合的变质作用及其意义[J]. *岩石学报*, 12(1): 88~ 98.
- 游振东, 周汉文, 吕学森. 1990. 湖北浠水蓝晶石铝直闪石片岩中的冠状体结构的研究[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 15(4): 345~ 356.