

文章编号: 1000- 6524 (2002) 04- 0398- 09

西昆仑南带斜长角闪岩中方柱石的形成 与流体挥发分的作用

任留东¹, 高岩²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 国土资源部珠宝玉石首饰管理中心, 北京 100013)

摘要: 对西昆仑南带变基性岩矿物组合及矿物成分变化的研究表明, 挥发分的种类和含量直接影响到变基性岩矿物组合和矿物成分, 如角闪石、黑云母、方柱石、磷灰石和榍石; 方柱石并非如有人总结的那样没有出溶现象, 实际上其自身亦可沿{100}析出黄铁矿晶体, 所含硫的赋存状态很可能是 S^{2-} , 而不是 SO_4^{2-} ; 方柱石是早期(高温)变质过程中大部分挥发分(如 Cl 、 CO_3^{2-} 、 S^{2-})的存储器, 晚期剪切变形降温或/或降压时挥发分释出, 伴随的流体作用可形成金属硫化物, 并可能导致矿化。

关键词: 西昆仑南带; 方柱石; 流体挥发分; 矿物成分; 矿化

中图分类号: P578.955

文献标识码: A

The role of volatiles in the formation of scapolite in amphibolites of southern West Kunlun Mountains

REN Liu_dong¹ and GAO Yan²

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. National Gemstone Testing Center, Beijing 100013, China)

Abstract: According to the observation of mineral compositions and assemblages of the amphibolites along the China-Pakistan highway profile in southern West Kunlun Mountains, it is held that the components of the volatiles directly affect the assemblages and compositions of amphibole, biotite, scapolite and titanite. Someone once believed that scapolite did not experience exsolution, but this opinion seems not to stand. Pyrite rods are actually exsolved parallel to the {100} crystal faces, henceforth the state of sulfur in scapolite is most likely S^{2-} , not SO_4^{2-} . Scapolite is the reservoir of such volatiles as Cl , CO_3^{2-} and S^{2-} in the early metamorphic process. In the late shear deformation period, cooling and/or decompression result in the release of the volatiles, and the associated hydrothermal process might form metal sulfides and even lead to mineralization.

收稿日期: 2002- 04- 28; 修订日期: 2002- 06- 29

基金项目: 国土资源部资助项目(992022)

作者简介: 任留东(1965-), 男, 研究员, 从事变质地质研究。

Key words: southern West Kunlun Mountains; scapolite; volatiles; mineral composition; mineralization

方柱石是钙硅酸盐岩、变质基性火山岩、变质粒玄岩和一些变质蒸发岩中的一种常见矿物,是一种架状铝硅酸盐,成分基本介于 $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{Cl}$ (marialite, Ma) 和 $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{CO}_3$ (meionite, Me) 两个端员之间(Comodi *et al.*, 1990),更准确地说,介于 $[(\text{Na}_{3.4}\text{Ca}_{0.6})(\text{Al}_{3.6}\text{Si}_{8.4})\text{O}_{24}]^{+1.0}$ 和 $[(\text{Na}_{1.4}\text{Ca}_{2.6})(\text{Al}_{4.7}\text{Si}_{7.3})\text{O}_{24}]^{+1.9}$ 之间(Teertstra and Sherriff, 1997)。该矿物可产于高角闪岩相-麻粒岩相的变质矿物组合中。在区域变质岩中,它往往被认为是变质峰期组合矿物之一,有时亦可被当作一种交代矿物。方柱石的形成通常与挥发分(Cl 、 CO_2 、 SO_3)密切相关。本文拟通过对西昆仑南带变质基性岩中方柱石及有关矿物组合的形成条件及过程的研究,探讨流体挥发分在矿物组成、成分及成矿方面的影响机制。

1 区域地质概况

研究区位于西昆仑塔什库尔干县城北(图1),北临西昆仑加里东造山带,南部为喀喇昆仑造山带(姜春发等,1992)。重点研究地段水电站和慕士塔格峰以西均被认为隶属于西昆仑南带(姜春发等,1992;中国科学院青藏高原综合科学考察队,2000)。中巴公路东西两侧产出大量变质岩,如千枚岩、片岩和片麻岩,多处出现角闪片岩。角闪片岩中常常产出石榴黑云角闪片岩、绿帘石榴角闪岩、含榴斜长角闪片岩和含方柱石辉石斜长角闪岩。

2 含方柱石辉石斜长角闪岩的产状

含方柱石辉石斜长角闪岩本身或其附近曾经历强烈的变形作用,向两侧迅速递变为变质程度更低的石榴角闪岩、角闪片岩、黑云角闪片岩、绿帘角闪片岩或云母石英片岩,直至绿帘绿泥片岩和千枚岩。矿物组成以石榴石、普通角闪石和斜长石为主,可含少量的单斜辉石、方柱石、黑云母、石英、绿帘石、钛铁矿和磁铁矿等矿物。岩石具有明显的应变分解特征,即强应变带和弱应变域相间排列。角闪片岩在变质峰期前阶段的矿物组合为 $\text{Ep}-\text{Bt}-\text{Qtz}^*$ 和 $\text{Act}-\text{Ep}-\text{Ab}-$

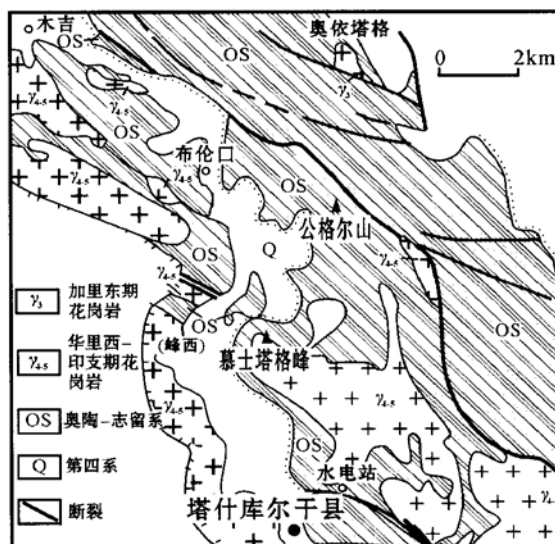


图1 西昆仑南带地质简图

Fig. 1 Schematic geological map of southern West Kunlun Mountains

* 矿物代号: Ab—钠长石; Act—阳起石; Alm—铁铝榴石; Ap—磷灰石; Bt—黑云母; Ce—方解石; Chl—绿泥石; Cpx—单斜辉石; Ep—绿帘石; Grs—钙铝榴石; Grt—石榴石; Hbl—普通角闪石; Ilm—钛铁矿; Mt, Fe_3O_4 —磁铁矿; Pl—斜长石; Qtz—石英; Rt—金红石; Scap—方柱石; Tit—榍石。

Qtz, 变质峰期阶段为 Ep- Bt- Qtz, Cpx- Ilm- Rt- Hbl- Pl- Qtz, Hbl- Pl ± Qtz 及 Grt- Hbl- Pl- Qtz, 峰后阶段为 Ap- Tit- Scap- Bt, 而在退变及矿化阶段出现 Ep- Pl- Cc- Qtz, Grt- Act- Cc- Ep- Chl, Trn- Bt ± Mt 和黄铁矿- 黄铜矿- 磁铁矿矿化组合。样品采自县城北水电站(图 1)和慕士塔格峰以西(图 1 中“峰西”的位置)。

3 岩相学特征

含方柱石辉石斜长角闪岩由普通角闪石、单斜辉石、方柱石、绿帘石、斜长石、方解石、钛铁矿、榍石、黑云母和少量硫化物矿物组成,与希腊北部 Sarti 地区 Chalkidiki 半岛含方柱石组合非常相似(Kassoli-Fournaraki, 1991)。方柱石常常沿角闪石和斜长石边缘出现(图 2), 内部可见角闪石包裹体,表明由角闪石变化而成,有时亦可包裹单斜辉石、磷灰石、钛铁矿、榍石和金红石。方柱石中有平行{100}排列的针状、长柱状黄铁矿出溶(图 3)。钛铁矿含量较多的岩石中,斜长石往往很少,在钛铁矿周围有榍石的反应边形成。晚期形成帘石-斜长石的后成合晶,并伴随黑云母的出现,在变形较为强烈的部位,形成方解石-帘石-黄铁矿-黄铜矿-磁铁矿脉,伴随有退变闪石形成,并见有少量钙铝榴石质铁铝榴石。



图 2 沿角闪石和斜长石之间形成的方柱石
Fig. 2 Scapolite formed between amphibole and plagioclase

水电站, 正交偏光, 10×10, 加 M4 试板

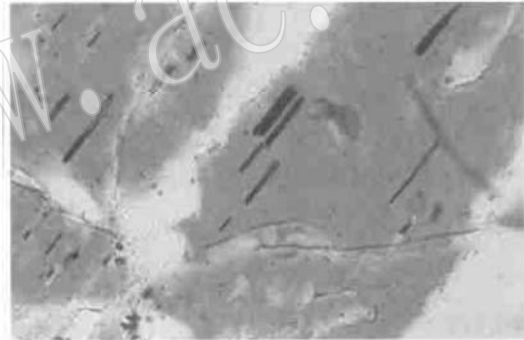


图 3 方柱石中平行{100}出溶的细长柱状黄铁矿
Fig. 3 Exsolved pyrite rods parallel to{100} of scapolite

其中黑色者为黄铁矿, 正交偏光, 25×4, 加 M4 试板

根据详细的岩石结构和矿物之间接触、反应关系的研究,确定本区变基性岩中矿物结晶序列如下(其中下标代表矿物的不同世代):Hbl₁, Pl₁→Grt(Alm), Cpx, Ilm, Rt→Ap, Tit→Scap, Pl₂→Hbl₂, Bt, Ep, Grt (Grs), FeS₂, CuFeS₂。在水电站和慕士塔格峰以西的变基性岩中,矿物组合中单斜辉石与方柱石相伴出现,但有石榴石时则无方柱石。根据大量的结构关系分析,可认为方柱石形成于变质峰期稍后的时期内。

4 矿物化学

4.1 方柱石

方柱石是一种富含挥发分的钙铝硅酸盐矿物(表 1),其出现一方面说明了较高的变质温度,另一方面表明有大量的挥发分存在。本区方柱石内多处出现沿{100}平行排列的黄铁矿出溶(图 3), Teertstra 和 Sherriff(1997)认为方柱石内缺少出溶现象的总结并不全面。

表1 方柱石及有关矿物的电子探针成分(w_B%)和分子式组成
慕士塔格峰西水电站

	Scap	Scap	Scap	Hbl ₁	Hbl ₂	Tit	Ap	Ep	Bt	P ₂	Scap	Hbl ₁	Hbl ₂	Tit	Δp	Ep	Pl
Na ₂ O	4.723	4.942	4.964	1.530	1.389	0.019			0.061	8.589	2.707	1.598	1.626		0.004		0.556
K ₂ O	0.138	0.092	0.110	0.855	0.591			10.380	0.087	0.087	0.067	0.504	0.476	0.004			0.010
MnO	0.013	0.020	0.001	0.215	0.240	0.035	0.009	0.145	0.157	0.018	0.023	0.183	0.144	0.050	0.065	0.048	0.001
MgO	15.424	14.998	15.255	11.612	12.020	28.866	56.668	23.340	0.009	0.008	0.029	9.150	9.539	0.012	0.019	0.072	0.016
CaO	0.079	0.084	0.094	16.311	17.654	0.432	0.018	12.966	18.098	0.102	0.125	17.476	17.904	0.489	0.051	9.670	19.429
FeO	25.447	25.029	25.259	13.352	11.516	0.508	0.006	24.092	15.410	25.340	29.231	14.177	14.290	1.622		26.508	36.789
Al ₂ O ₃				1.554	0.364	36.002		0.017	2.903			0.697	0.727	37.820	0.003	0.071	0.034
TiO ₂				0.011	0.005	0.018			0.050	0.020				0.030			0.016
C ₂ O ₃				40.152	42.499	29.832	0.024	37.040	35.830	59.852	41.567	38.239	37.887	27.307	0.067	35.035	42.471
SiO ₂				0.158	0.066	0.161	2.563		0.058			0.053	0.145	0.132	0.801	0.030	0.072
F				0.263	0.139	0.001	0.081		0.161	0.003	0.297	1.375	1.383		4.599	0.004	
Cl				0.008	0.008	0.029	0.029	0.022			0.148				0.036		
SO ₃				0.012	0.002	0.111	42.107	0.031						0.105	41.649	0.031	
P ₂ O ₅				95.370	96.876	95.906	100.631	97.654	96.281	100.081	92.827	95.250	95.816	96.665	100.316	95.014	99.506
Total	1.400	1.473	1.482	0.454	0.403	0.001	0	0.002	0.009	1.173	0.826	0.480	0.484	0	0.001	0	0.080
Na	0.027	0.018	0.022	0.167	0.113	0.006	0	0	1.033	0.008	0.013	0.100	0.093	0	0	0	0.001
K				0.0001	0.028	0.030	0.001	0.010	0.010	0.001	0.003	0.024	0.019	0.001	0.005	0.003	0
Mn				0.003	0.003	0.0004	0.0006	0.001	1.486	0	0.001	2.114	2.185	0.0006	0.0024	0.007	0.002
Mg	2.526	2.47	2.517	1.902	1.927	1.041	5.035	1.971	0.001	0.457	3.153	2.014	1.987	1.047	4.997	2.023	1.543
Ca	0.010	0.011	0.012	2.086	2.209	0.012	0.001	0.855	1.158	0.006	0.016	2.265	2.301	0.014	0.004	0.648	0.008
Fe	4.584	4.536	4.584	2.406	2.031	0.020	0.001	2.238	1.390	2.103	5.422	2.589	2.588	0.064	0	2.504	3.214
Al				0.179	0.041	0.911	0	0.001	0.167	0	0	0.081	0.084	0.954	0	0.005	0.002
Ti				0.0013	0.0006	0	0.001	0	0.003	0.0011	0	0	0	0.0008	0	0	0.0009
Cr				7.317	6.140	6.358	1.004	2.919	2.742	4.215	6.542	5.926	5.823	0.915	0.006	2.808	3.148
Si	0.0773	0.0815	0.0630	0	0.0009	0	0.0018	0.001	0	0.0356	0.0175	0	0	0.0023	0	0	
S	0.0004	0.0026	0.0003	0.0016	0.0003	0.0032	2.9565	0.0021	0	0	0	0	0	0.0030	2.9834	0.002	
P				0.0764	0.0312	0.017	0.672	0	0.0140	0	0	0.0260	0.0705	0.014	0.2143	0.0076	0
F				0.0833	0.0690	0.0357	0	0.012	0.0212	0	0.0802	0.3658	0.3649	0	0.6680	0	
Cl	0.125	0.076	0.0833	0.0690	0.0357	0	0.012	0	0.0212	0	0.0802	0.3658	0.3649	0	0.6680	0	
CO ₂ , OH	0.437	0.462	0.458			0.316					0.460				0.1177		

分析者: 中国地质科学院矿床资源研究所余静; 仪器型号: JXA-8800A, 电压 20 kV, 电流 2 × 10⁻⁸ A, 电子束直径 1 ~ 2.0 μm; 陈常规氧化物分析外, 对以下 4 种元素的标样选择: F—氟磷灰石; Cl—氯化钠; P—磷灰石; S—重晶石; 含 F、Cl 的矿物总量计算中按 2F=O 和 2Cl=O 的原子比例扣除了多计算的氧; 矿物缩写下的下角标代表不同的世代; * 表示计算值, 假设方柱石中 F+Cl+OH=1, 磷灰石中 F+Cl+OH=1; 矿物分子式计算过程中采用的阳离子总数; 方柱石为 16, 斜长石、绿帘石、磷灰石及黑云母均为 8, 楣石为 3, 闪石的阳离子总数 - (Na + K + Ca) = 13。

采自两处的方柱石成分上有一些差别(表 1):水电站方柱石的端员组成为 $Me_{62.9-64.3}Ma_{35.7-37.1}$, SiO_2 、 Na_2O 和 K_2O 较高,可能与附近具有混合花岗质片麻岩的形成有关;而慕士塔格峰以西的方柱石组成为 $Me_{79.2}Ma_{20.8}$, Al_2O_3 和 CaO 含量稍高。两者的差异表明其主要组分 Na 、 Ca 、 Al 受岩石成分的控制。

两处方柱石均可含少量的 Cl 和 S ,但未检测到氟。实际上方柱石中 F 的含量往往很低 (Teertstra and Sherriff, 1997)。阳离子可有微量的 Ba^{2+} (BaO 0.02% ~ 0.05%,表中未列入)。同一体系内方柱石中的 Cl 与 K 、 Ca 、 Al , S 与 Si 之间为正相关; Na 与 Ca 、 Al 之间为负相关。 Cl 与 Na 之间并非正相关关系,表明方柱石内 Cl 不是以 $NaCl$ 形式代入的,应受到其他因素的影响。

矿物组合中方解石的出现及方柱石的组成特点说明方柱石中成分不足 100% 的部分可能主要为 CO_3^{2-} , OH^- 的含量则微不足道,因为激光拉曼光谱中未检测到 OH^- 或 H_2O 的存在(图 4)。

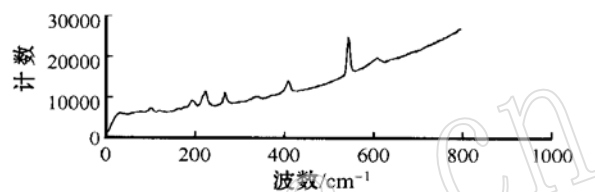


图 4 方柱石的激光拉曼图谱

Fig. 4 Laser Raman spectrum of scapolite

4.2 单斜辉石

水电站的透辉石 Al_2O_3 、 $TFeO$ 和 Na_2O 含量较高(表 1),含一定的硬玉分子,反映了较低的温压梯度;慕士塔格峰以西的透辉石 MgO 含量较高,反映了受原岩成分的控制。后期变化使得辉石中的 Na_2O 和 Al_2O_3 降低,并含有微量的 F 和 Cl 。

4.3 角闪石

水电站角闪石成分(表 1,考虑到篇幅,只列出了部分结果)中 MgO 和 TiO_2 含量高, FeO 、 Na_2O 和 Al_2O_3 低, Cl 含量低于方柱石;慕士塔格峰以西正相反,角闪石 Cl 含量较高,在闪石中亦可含氟(F)。对水电站角闪石的 5 个分析结果统计表明,其中 Cl 与 Ti 、 Al 呈正相关,而与 Si 、 Mg 呈负相关。较粗粒的早期闪石 Cl 、 Ti 含量均较高(岩石中富 Ti 矿物如榍石的含量极低);细粒的晚期闪石 Cl 含量降低,高 Fe 、 Ca 、 Mg , 低 Al 、 Ti 、 K 、 Na 。与剪切带有关的裂隙中的角闪石 Cl 含量则急剧降低,相应的 Ti 含量降低也非常显著,表明挥发分 Cl 影响到闪石中 Ti 的含量。

慕士塔格峰以西的 4 个角闪石样品的 Cl 与 Ti 、 Al 、 Na 呈正相关,而与 Mg 呈负相关。晚期闪石 Fe 高, K 、 Si 低。与水电站相比,岩石中具丰富的榍石、金红石等富钛矿物(5%),即岩石较富 Ti ,而角闪石中 Ti 含量却较低。因此,闪石中元素 Ti 的含量受挥发分较之岩石成分的影响更明显,这一点与水电站的闪石成分特征是一致的。与水电站相比,慕士塔格峰以西的变基性岩较富 Cl ,但 F 含量较低,此处角闪石 Cl 含量较高,但方柱石中 Cl 的含量并无明显变化。

水电站与慕士塔格峰以西两处角闪石的 $X_{Mg}[Mg/(Mg+Fe)]$ 基本与 Cl/F 呈负相关,与 Mg 和 F 、 Fe 和 Cl 相伴的原则相一致 (Perchuk *et al.*, 1985),也说明了挥发分对其主要元素含量的控制,这是因为,盐溶液中溶解阳离子的种类强烈地受阴离子种类的限制 (Yardley, 1997)。

4.4 黑云母

基本能分出峰期和晚期变质两种黑云母。通常,早期黑云母较粗大, TiO_2 和 MgO 含量

较高(表1);晚期的黑云母颗粒较为细小,含一定的氟和氯,少量样品的对比表明,Cl与Na、Fe-Al呈正相关,与Si-Mg呈负相关; X_{Mg} 与Cl/F呈负相关,黑云母成分亦受挥发分成分控制。

因此,角闪石(包括黑云母)的主要元素含量及其比值均可在一定程度上受挥发分成分种类和含量的影响,对矿物的温压环境估算应该考虑到这一因素。

4.5 斜长石

水电站基性片岩中早期斜长石成分 $An=30.5$,可含微量F,其后与绿帘石后成合晶有关的斜长石成分 $An=30.1$,两者成分基本一致。而方柱石附近的斜长石 $An=27.4\sim 28$ 。

慕士塔格峰西斜长石中 $An=95.1$,已为钙长石,这里方柱石中Me端员的含量也很高。该岩石中斜长石含量很低,缺失石英,而角闪石和榭石很多,岩石成分富Ca。斜长石成分受原岩成分影响较大,其他岩石的矿物组合及成分与水电站很近似。

4.6 榭石

在挥发分中,榭石主要吸收一些氟。因其化学成分总量不足100%,其余组分应为 OH^- 。

4.7 磷灰石

水电站基性岩中磷灰石集中了岩石的氟,而慕士塔格峰以西基性岩中磷灰石则含有大量的氯和少量的氟(表1)。

综上所述,水电站基性岩中F集中于磷灰石、早期闪石和榭石中,Cl集中于方柱石、晚期闪石(尤其早期闪石)和黑云母中,S集中于方柱石、磷灰石和黄铁矿中,P绝大部分赋存于磷灰石中,少部分赋存于榭石内。 CO_3^{2-} 集中于方柱石和方解石中。磷灰石中 $F>Cl$ 。

慕士塔格峰以西F集中于磷灰石、晚期闪石和榭石中,斜长石可含微量F,方柱石中则缺失。Cl集中于磷灰石、闪石和方柱石中,S集中于方柱石和磷灰石中,P绝大部分赋存于磷灰石中,少部分赋存于榭石内。 CO_3^{2-} 集中于方柱石和方解石中。磷灰石中 $F<Cl$ 。

5 变质温压条件

黝帘石和单斜辉石的存在标示着高角闪岩相的变质条件(Kassoli-Fournaraki, 1991)。共生的单斜辉石比角闪石的 X_{Mg} 稍高(Leake, 1968)。对于水电站含石榴石而不含方柱石的峰期变质组合采用Holland & Blundy (1994)的Pl-Hbl温度计和Kohn & Spear (1989)的Grt-Hbl-Pl-Qtz压力计确定峰期变质条件为 $550\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.92\sim 0.95\text{ GPa}$,所用温度计有较大的不确定性,但计算结果与世界上同类型地区条件相当,说明可以适用于本区。从产状上看,不含方柱石的石榴角闪岩与含方柱石辉石斜长角闪岩密切相伴,且方柱石紧随峰期变质之后,其形成条件不至于与前者偏离太远。由资料分析,富Ca方柱石形成温度较高,贫氯方柱石也形成于较高的温度(Teertstra and Sherriff, 1997)。地壳范围内的温压变化对方柱石储存阴离子的“笼子”大小影响不大(Comodi *et al.* 1990),即方柱石中阴离子的种类主要受流体成分而不是温压控制。

6 方柱石中的挥发分

一般认为,方柱石形成时 a_{H_2O} 活度较低,而 a_{Cl^-} 及 $a_{(CO_3)^{2-}}$ 活动明显,并可有 SO_3 出现,方

柱石的形成往往伴随着富含挥发分流体的存在(同时消耗斜长石)(Kassoli_Fournarakis, 1991)。Kullerud 和 Eramert(1999)认为,变基性岩中方柱石是斜长石与渗透流体之间相互作用的结果,并指出,含氯矿物是在等压和等温条件下快速结晶的结果。相对于基性岩中的闪石或黑云母而言,Cl 更易存在于流体当中。如果体系是开放的,由变质作用造成的脱挥发分作用和流体渗透作用均可使氯逸失(Teertstra and Sherriff, 1997)。在封闭体系中,先结晶的矿物贫 Cl,使得流体中的 Cl 含量及 $\alpha_{\text{Cl}^-} / \alpha_{\text{OH}^-}$ 值逐步升高,Cl 开始进入闪石或黑云母中: $\text{AB}(\text{OH}) + \text{HCl} = \text{AB}(\text{Cl}) + \text{H}_2\text{O}$, 其中 AB 代表闪石或黑云母(Zhu & Sverjensky, 1991)。随着 $\alpha_{\text{Cl}^-} / \alpha_{\text{OH}^-}$ 值进一步升高,组分合适时,方柱石结晶,吸收了大部分的剩余 Cl。Pan 等(1994)认为方柱石中的氯含量受阳离子晶格占位及电价平衡所控制,而 Jiang 等(1994)则强调是受平衡流体中 NaCl 的活度影响。当流体同时富含 Cl 和 CO_2 流体时,由于富 Cl 流体和富 CO_2 流体湿润性质的差异(Gibert *et al.*, 1998),流体分异成富 Cl 流体和富 CO_2 流体,富 Cl 流体更易逃逸。随着闪石和黑云母的结晶,流体中 CO_2 含量逐渐增加,最终亦固结于方柱石中(Kullerud and Eramert, 1999)。至于方柱石的成分与 CO_3^{2-} 和 Cl 含量的关系,根据代换的耦合效应(Rebbert and Rice, 1997): $\text{Na} \rightleftharpoons \text{Ca}$, $\text{Si} \rightleftharpoons \text{Al}$ 和 $\text{Cl} \rightleftharpoons (\text{CO}_3)^{2-}$, 即 $\text{Na}_{2.4}\text{Si}_{1.4}\text{Cl} \rightleftharpoons \text{Ca}_{2.4}\text{Al}_{1.4}\text{CO}_3$ 或 $\text{NaCl}_{\text{scapolite}} + \text{CaCO}_{3\text{fluid}} \rightleftharpoons \text{CaCO}_{3\text{scapolite}} + \text{NaCl}_{\text{fluid}}$, 由此导致 CO_3^{2-} 进入可淡化方柱石中的 Cl, 因此,方柱石的成分主要受流体中 $\alpha_{\text{Cl}^-} / \alpha_{(\text{CO}_3)^{2-}}$ 比值的控制,这一点与闪石成分取决于 $\alpha_{\text{Cl}^-} / \alpha_{\text{OH}^-}$ 有所不同。

在流体运移过程中,随着流体-矿物的相互作用,流体成分,尤其流体活度 $\alpha_{\text{Cl}^-} / \alpha_{\text{OH}^-}$ 和 $\alpha_{\text{Cl}^-} / \alpha_{(\text{CO}_3)^{2-}}$ 值不断发生变化,从而造成新生矿物成分具多变性(Kullerud and Eramert, 1999)。如果方柱石中的 $\text{Na} \rightleftharpoons \text{Ca}$ 和 $\text{Al} \rightleftharpoons \text{Si}$ 代换与斜长石之间达到平衡,那么,作为少量组分的氯的活度则控制了方柱石的含量(Teertstra and Sherriff, 1997)。

从原岩成分方面来说,基性岩即非海相蒸发沉积导致方柱石较富 CO_2 、 OH^- 而贫 Cl (Vanko & Bishop, 1982)。

至于硫在方柱石中的表现形式, Lin(1977)指出, SO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 代换 CO_3^{2-} 都可以, S^{2-} 也可能存在,因为其离子半径与 Cl^- 非常接近。有人认为,方柱石的黄色荧光即是由 S^{2-} 的代入造成的(Verbeek, 1988)。本区方柱石内多处具有沿{100}平行排列的黄铁矿出溶(图 2),而含方柱石的组合中又无明显的氧化迹象,如极少见到磁铁矿等,由 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} 的可能性不大。因此,方柱石中硫可能以 S^{2-} 而不是 SO_4^{2-} 的形式存在。

7 方柱石形成的地质意义

根据岩相关系,方柱石形成于峰期变质之后,其与峰期的角闪石、单斜辉石和斜长石之间具有反应关系。外部渗入的流体挥发分组分既可影响造岩矿物的成分,亦可改变矿物组合,形成磷灰石、榍石、方柱石和方解石等。与方柱石基本同时或稍早的磷灰石和榍石富集了相当一部分的 F 和 Cl。方柱石赋存了大部分的 Cl 和几乎全部的 S 和 CO_3^{2-} 。当晚期变形(降压)和/或降温时挥发分部分或全部逸出,磷灰石形成少量的沿{100}排列的黄铁矿,方柱石则发生分解,与有关组分结合形成相当量的黄铁矿和黄铜矿等硫化物矿物。因此,方柱石是早期(高温)大部分挥发分(如 Cl、 CO_3^{2-} 、 S^{2-})的存储器,晚期低温和/或降压时挥发分释

出,进而形成金属硫化物。F、Cl等挥发分则进入阳起石、黑云母或绿泥石中,甚至沿裂隙逸出。

剪切变形-变质过程在剪切带外部(边缘)的矿物组合与外部渗透进来的含Cl、Ba的流体密切相关(Kullerud, 1996);变形的同时使得方柱石分解释放出挥发分,与岩石中的有关组分相结合,形成一些硫化物矿物,并可能导致矿化。

8 结 论

(1)挥发分的种类和多少直接影响到变基性岩矿物组合和矿物成分,如角闪石、黑云母、方柱石、磷灰石和榍石,尤其角闪石(包括黑云母)的 X_{Mg} 、Ti含量受流体挥发分的控制均很显著;

(2)方柱石自身亦可析离出黄铁矿晶体,所含硫的存在状态很可能是 S^{2-} ,而不是 SO_4^{2-} ;

(3)方柱石是早期(高温)大部分挥发分(如Cl、 CO_3^{2-} 、 S^{2-})的存储器,晚期剪切变形降温 and/或降压时挥发分释出,伴随的流体作用可形成金属硫化物,并可能导致矿化。

致谢 与耿元生研究员的讨论对成文帮助很大,特此致谢。谨以此文献给尊敬的导师沈其韩院士80寿辰,并祝沈先生健康长寿。

Reference

- Comodi P, Mellini M and Zanazzi F. 1990. Scapolite: variation of structure with pressure and possible role in the storage of fluids[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2: 195~ 202.
- Gibert F, Guillaume D and Laporte D. 1998. Importance of fluid immiscibility in the H_2O - NaCl- CO_2 system and selective CO_2 entrapment in granulites: Experimental phase diagram at 5~ 7 kbar, 900 and wetting textures[J]. *European Journal of Mineralogy*, 10: 1 097~ 1 123.
- Holland T and Blundy J. 1994. Non_ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole- plagioclase thermometry[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 116: 433~ 447.
- Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, *et al.* 1992. Opening- Closing Tectonics of Kunlun Mountains (No. 5 Geological Special)[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Jiang S Y, Palmer M R, Xue C J, *et al.* 1994. Halogen_rich scapolite- biotite rocks from the Tongmugou Pb- Zn deposit, Qinling, north_western China: Implications for ore_forming processes[J]. *Mineralogical Magazine*, 58: 543~ 552.
- Kassoli-Fournaraki A. 1991. Ca_rich scapolite in quartz amphibolites from the Sarti area, Northern Greece[J]. *European Journal of Mineralogy*, 3: 887~ 894.
- Kohn M J and Spear F S. 1989. Empirical calibration of geobarometers for assemblage garnet+ hornblende+ plagioclase+ quartz [J]. *American Mineralogist*, 74: 77~ 84.
- Kullerud K. 1996. Chlorine_rich amphiboles: interplay between amphibole compositions and an evolving fluid[J]. *European Journal of Mineralogy*, 8: 355~ 370.
- Kullerud K and Eramert M. 1999. Cl_scapolite, Cl_amphibole, and plagioclase equilibria in ductile shear zones at Nusfjord, Lofoten, Norway: Implications for fluid compositional evolution during fluid- mineral interaction in the deep crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 3 829~ 3 844.
- Lin S B. 1977. Chemistry of scapolite group and its relationship to petrogenesis[J]. *Acta Geol. Taiwan.*, 19: 29~ 36.

- Pan Y, Fleet M E and Ray G E. 1994. Scapolite in two gold deposits: Nickel Plate, British Columbia and Hemlo, Ontario[J]. *Canadian Mineralogist*, 32: 825~ 837.
- Perchuk L L, Aranovich L A, Podlesski K K, *et al.* 1985. Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia, USSR [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 3: 265~ 310.
- Rebbert C R and Rice J M. 1997. Scapolite- plagioclase exchange: Cl- CO₃ scapolite solution chemistry and implications for peristerite plagioclase[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 555~ 567.
- Teertstra D K and Sherriff B L. 1997. Substitutional mechanisms, compositional trends and the end-member formulae of scapolite[J]. *Chemical Geology*, 136: 233~ 260.
- The Integrated Scientific Expedition to the Qinghai- Xizang Plateau, Chinese Academy of Sciences. 2000. The Geological Formation and Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains[M]. Beijing: Science Publishing House, 525(in Chinese).
- Vanko D A and Bishop F C. 1982. Occurrence and origin of marialitic scapolite in the Humboldt Lopolith, N. W. Nevada[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 81: 277~ 289.
- Verbeek E R. 1988. Zoned fluorescence of scapolite from Valyermo, California[J]. *Journal Fluoresc. Mineral. Soc.*, 14: 28~ 36.
- Yardley B W D. 1997. The evolution of fluids through the metamorphic cycle[A]. Jamtveit B and Yardley B W D. *Fluid Flow and Transport in Rocks* [C]. Chapman & Hall, 99~ 121.
- Zhu C and Sverjensky D A. 1991. Partitioning of F- Cl- OH between minerals and hydrothermal fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 1 837~ 1 858.

附中文参考文献

- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 1992. 昆仑开合构造[M]. 北京: 地质出版社.
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 2000. 喀喇昆仑山- 昆仑山地区地质演化[M]. 科学出版社.