

东天山白石头泉天河石花岗岩岩浆-热液过渡阶段的副矿物

邵毅^{1,2,3,4}, 张遵忠^{3,4}, 吴昌志^{3,4}, 肖娥^{3,4}, 顾连兴^{3,4}, 柳建新^{1,2}, 曹剑华^{1,2}

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 有色金属华东地质勘查局, 南京 210007;
4. 南京大学 地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 新疆哈密星星峡白石头泉天河石花岗岩从下往上分为5个岩相带, 即淡色花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩、含黄玉天河石花岗岩和黄玉钠长花岗岩。各相带中都有一些岩浆晚期形成的不规则状孔洞。孔洞多小于2 mm, 其充填物以萤石为主, 并有石榴石、锡石、钠长石和白色云母等。这些充填物是岩浆-热液过渡阶段晚期的产物。充填物的成分表明, 贫钙镁铁而富氟的过铝花岗岩, 其岩浆-热液过渡阶段的晚期产物以含大量萤石为特征, 并表明氟化物或氟络合物是该阶段流体中锡的重要搬运形式。该阶段初步富集锡的孔洞流体如因构造裂隙贯通而发生运移, 就可能在有利地段聚集, 形成脉状锡矿床。

关键词: 天河石; 黄玉; 花岗岩; 岩浆-热液过渡; 白石头泉; 东天山

中图分类号: P588.1; P571

文献标志码: A

Accessory minerals formed during magmatic-hydrothermal transition of Baishitouquan amazonite granite, Eastern Tianshan

SHAO Yi^{1,2,3,4}, ZHANG Zun-zhong^{3,4}, WU Chang-zhi^{3,4}, XIAO E^{3,4},
GU Lian-xing^{3,4}, LIU Jian-xin^{1,2}, CAO Chuang-hua^{1,2}

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. East China Mineral Exploration and Development Bureau for Non-Ferrous metals, Nanjing 210007, China;
4. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The Baishitouquan amazonite granite pluton near Xinxinxia of Hami County, Xinjiang, China, includes five lithological zones. They are, up the pluton, the leucogranite zone, amazonite-bearing granite zone, amazonite granite zone, topaz-bearing amazonite granite zone and topaz albite granite zone. Irregular-shaped cavities formed during the late magmatic stage are found in all the five zones. These cavities, mostly less than 2 mm in size, were filled dominantly with fluorite accompanied by garnet, cassiterite, albite and white mica. These infilling minerals were crystallized late at the magmatic-hydrothermal transition stage. The composition of the infillings indicates that the product at this stage is an evolving calcium-, magnesium-, and iron-poor and fluorine-rich peraluminous granite, which is characterized by abundant fluorite, and that the fluorides or fluorine complexes are the important forms that transport tin in fluids at this stage. In case the cavities are connected by tectonic fractures, the tin initially enriched in the infilling fluids will migrate and then precipitate the metallic minerals at favorable sites with formation of a vein-type tin deposit.

Key words: amazonite; topaz; granite; magmatic-hydrothermal transition; Baishitouquan; Eastern Tianshan

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB403501); 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室资助项目(2010TP4012-6); 国家科技支撑计划资助项目(2011BAB04B08)

收稿日期: 2011-11-14; **修订日期:** 2012-01-03

通信作者: 邵毅, 博士研究生; 电话: 15605168866; E-mail: shaoyi@china-ece.com

自从 1986 年 LONDON^[1]提出岩浆作用晚期常发生富含流体的硅酸盐岩浆向富含硅酸盐的热液过渡以来,前人对花岗岩类岩浆-热液过渡阶段的岩石学、矿物学和地球化学已开展了大量研究^[2-5]。李兆麟^[6]曾论述过粒间溶液对成矿作用的重要意义,其所称的固相-低熔点熔体-溶液平衡系统实际上就是岩浆-热液过渡阶段的产物。但是,从副矿物的角度研究这种过渡阶段的报道迄今为止仍相对较少。本文作者以新疆哈密市白石头泉天河石花岗岩为例,探讨若干副矿物在岩浆-热液过渡阶段的行为。

1 岩体地质和岩相学特征

白石头泉岩体位于甘-新边界星星峡镇北东约 30 km 处,大地构造位置属于中天山前寒武纪构造带东部北缘,侵入于中元古界星星峡群片岩、片麻岩和可能属于加里东期的闪长岩、英云闪长岩、黑云母花岗岩

和片麻状花岗岩中。该岩体已报道的矿物-全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(209.6 \pm 9.6) \text{ Ma}$ ^[7]。顾连兴等^[8-9]和张遵忠等^[10]已对该区的地质发展史和该岩体的侵位环境作过简要叙述。

白石头泉的南部被第四系覆盖,北部沿山岗出露,露头面积约 7 km^2 (见图 1 和 2(a))。不同石材公司开采该岩体作板材已 20 多年,使各相带岩石被充分揭露。岩体因含天河石而远望呈蓝绿色(见图 2(a))。

GU 等^[7]将岩体中分为 5 个渐变的相带(见图 1),即淡色花岗岩(a 带,天河石 <1%),含天河石花岗岩(b 带,天河石 1%~5%),天河石花岗岩(c 带,天河石 5%~15%),含黄玉天河石花岗岩(d 带,黄玉 1%~3%,天河石 5%~15%)和黄玉钠长花岗岩(e 带,黄玉 10%~20%,天河石 3%~10%)。各相带的主要造岩矿物有斜长石、石英、钾长石、白色云母和黄玉。此岩体以石英呈斑晶产出为特征,且越往顶部斑晶晶形越好,颗粒越大。电子探针测定表明,各相带之斜长石均为钠长石。钾长石可分为早、晚两个世代:早世代钾长石

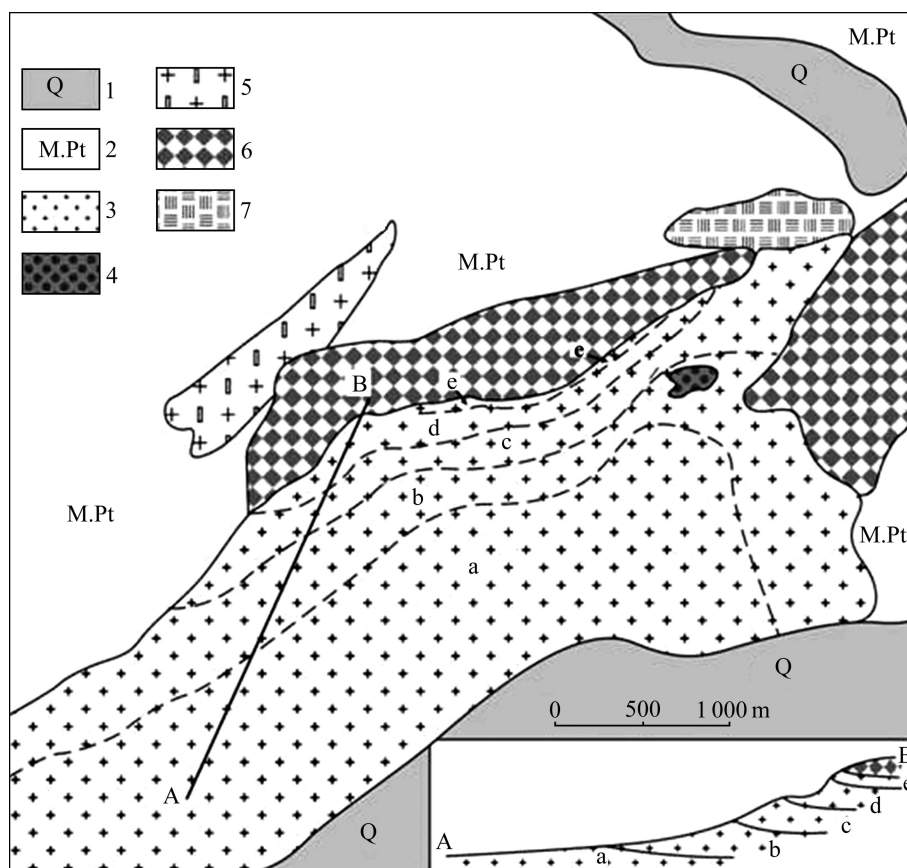


图 1 白石头泉岩体地质与剖面图(据文献[8])

Fig. 1 Geology and profile of the Baishitouquan pluton (From Ref. [8]): 1—Quaternary system; 2—Mesoproterozoic schist and gneiss; 3—Indosinian granite; 4—Caledonian intrusive diorite; 5—Caledonian intrusive biotitic granite; 6—Caledonian granodiorite; 7—Caledonian gneissic granite; a—Light color granite; b—Amazonite-bearing granite; c—Amazonite granite; d—Topaz-bearing amazonite granite; e—Topaz albite granite

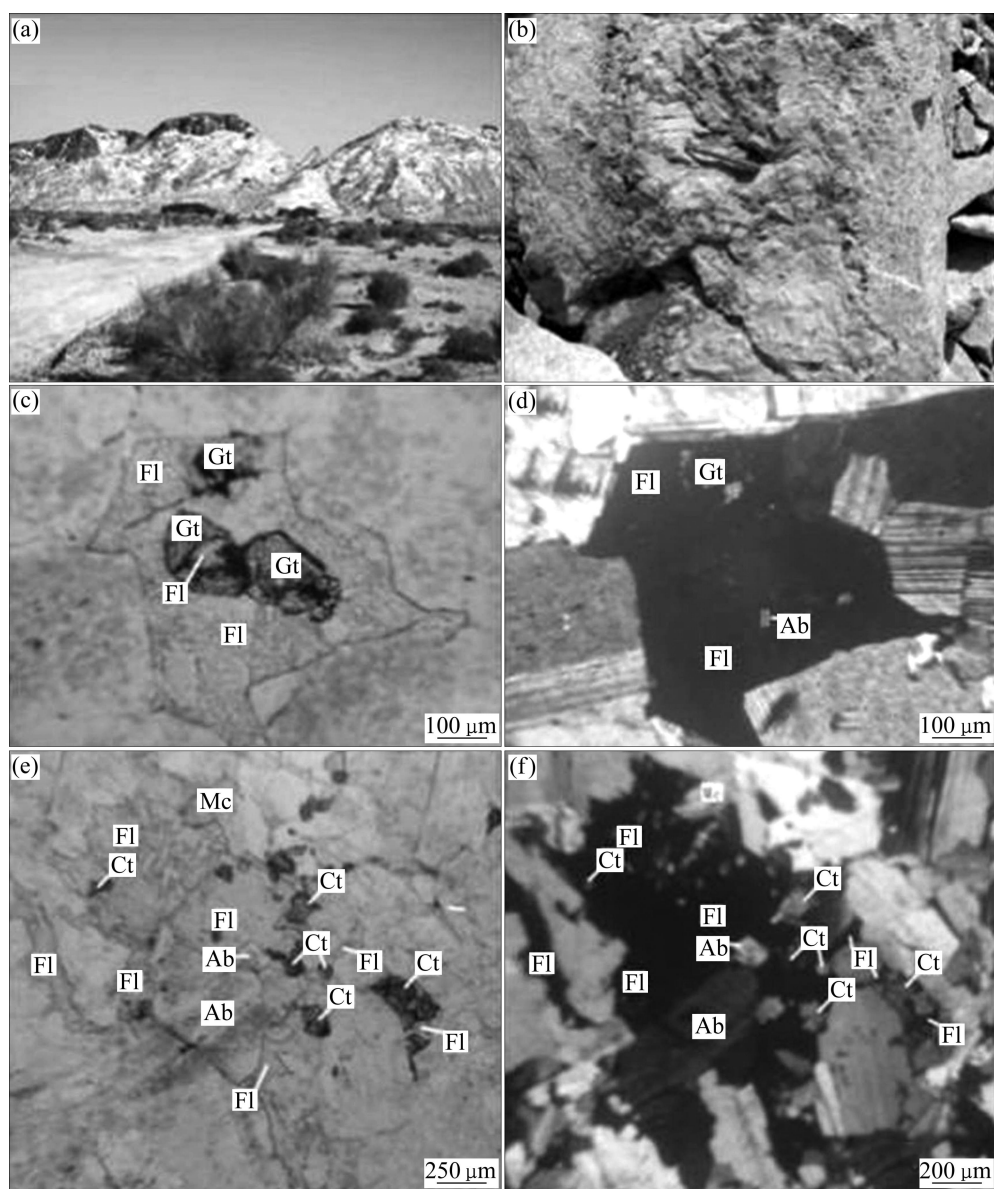


图 2 白石头泉岩体野外和显微镜照片

Fig. 2 Field and microscopic photographs for Baishitouquan pluton: (a) Distant view of amazonite granite mining deposit; (b) Amazonite pegmatite cystidium from amazonite granite; (c) Cavity filled with fluorite and garnet, single-polarized light; (d) Cavity filled with fluorite and garnet, orthogonal polarized light; (e) Cavity filled with fluorite and cassiterite, single polarized light; (f) Cavity filled with fluorite and cassiterite, orthogonal polarized light. Abbreviations: Ab—Albite; Ct—Cassiterite; Fl—Fluorite; Gt—Garnet; Mc—Muscovite

以缺乏格状双晶和贫铷为特征; 晚世代钾长石则为发育格状双晶的天河石, 其 29 个点电子探针 Rb 含量平均值为 1 700 g/t。GU 等^[1]的详细研究表明, 黄玉和石英斑晶是岩体中最早结晶的矿物, 而天河石则是富含流体的残余岩浆直接结晶和交代先存矿物的产物。在地球化学上, 白石头泉岩体以贫钙、贫镁、贫铁而富氟、富铷、过铝为特征。GU 等^[1]根据岩石中的黄玉含量推测, a 带的 F 含量在结晶之前应超过 2%。顾

连兴等^[8]测得 a、b、d 和 e 带石英中熔体包裹体熔融温度分别为 860~810 °C、850~790 °C、810~660 °C 和 680~660 °C, 因此认为该岩体各相带是从下到上先后结晶的产物。WU 等^[5]的研究发现, 5 个相带的全岩稀土均显示 M 型四分组效应, 并且从 a 带到 c 带, Eu 负异常显著增强。

在岩体各相带中普遍存在含天河石的伟晶岩脉和囊团(见图 2(b)), 在 a 带中还局部产有含绿柱石的伟

晶岩脉(目前已被当地居民作为绿柱石矿床采尽)和囊状体。整个岩体热液蚀变微弱,仅在 e 带中适度发育黄玉和钠长石的绢云母化,仅局部见到微弱碳酸盐化。

2 岩体副矿物特征

白石头泉岩体的副矿物主要有石榴石、萤石、锡石、锆石和独居石等。本文作者将取自 c 带的 15 kg 样品分选后,共获得副矿物总含量为 1 067 g/t,其中主要为石榴石(865 g/t),其次有少量锡石(85 g/t)、萤石(51 g/t)、绿帘石(37 g/t)和磷灰石(26 g/t),此外,尚有少量榍石(2.0 g/t)、独居石(0.7 g/t)和锆石(0.4 g/t)。今将萤石、石榴石、锡石和锆石这 4 种副矿物特征描述如下。

2.1 萤石

白石头泉岩体中的萤石大致可分为两个世代。第一世代萤石仅在显微镜下清晰可见,主要充填岩石中的不规则状显微孔洞(见图 2(c)~2(f))。有些孔洞外侧与造岩矿物粒间的萤石脉相连。显微孔洞多小于 2 mm,其充填物多以半自形-他形萤石为主,个别全部被萤石充填。萤石在显微镜下无色透明,表面光洁,两组解理清晰。在多数孔洞的萤石充填物背景上,嵌布着不同数量的石榴石(见图 2(c)和 2(d)),还经常存在自形钠长石微晶(见图 2(d))和白色云母微细鳞片。在个别孔洞充填物中,石榴石、钠长石和白色云母等硅酸盐可占 50%以上。同时,有的孔洞内可见较多锡石(见图 2(e)和 2(f)),有的孔洞边部有钠长石柱状微晶或白色云母鳞片从孔洞壁指向中心生长,有的孔洞外侧与含石榴石和/或锡石的薄膜状显微萤石脉相连。从岩

体的 a 带到 e 带,这种被萤石+硅酸盐±锡石充填的孔洞有增加的趋势。

被萤石等充填的孔洞切面多数具有带尖角的多边形或不规则状形态,其尖角多突入围岩矿物颗粒之间。填隙矿物与钠长石、钾长石和白色云母等围岩造岩矿物的边界多平直而清晰(见图 2(c)和 2(d)),仅局部可见由交代作用形成的模糊而呈港湾状的边界。

孔洞内局部可见萤石交代石榴石、钠长石和白色云母形成的结构。被交代矿物具港湾状边界,或呈光性方位一致的孤岛状残留体。

第二世代的萤石见于 d 带和 e 带,它们分布于岩石裂隙面上,呈紫色薄膜状。此外,伟晶岩透镜体中也可见到嵌布于钾长石和石英晶体间隙中的紫色萤石。

2.2 石榴石

石榴石多为自形颗粒,粒径为 0.05~0.20 mm,在白石头泉岩体 5 个相带中均普遍存在,且从 a 带到 e 带有含量逐渐增加的趋势。在黄玉和石英斑晶中未发现石榴石包裹体。虽然偶见石榴石被包于钠长石或钾长石颗粒中,但石榴石多与白色云母和填隙萤石在空间上紧密伴生,表明石榴石虽有少量较早结晶,但主要是岩浆结晶较晚期的产物。在萤石+硅酸盐±锡石孔洞充填组合中,石榴石常被萤石交代(见图 2(c)和 2(d)),交代后生成的铁氧化物,在正交偏光下呈现红褐内反射色。就成分而言,岩体中的石榴石以富锰、富铁、贫钙为特征。电子探针分析表明,b~c 带中的石榴石含锰铝榴石 53%~64%,铁铝榴石 34%~45%,钙铁榴石 1%~3%(见表 1),并表明锰铝榴石在 c 带中较在 b 带中更富(见图 3)。白石头泉岩体中富含锰铝榴石和铁铝榴石,这与前人^[12]关于过铝花岗岩中的石榴石往往富锰的认识相一致。

表 1 白石头泉岩体 b 和 c 带中石榴石的电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analysis results for garnet from zone b and c of Baishitouquan pluton (mass fraction, %)													
Zone	Sample No.	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Y ₂ O ₃	Total	And	Alm	Spess
b	x-117-1	0.33	—	—	24.88	20.21	18.32	35.38	—	99.12	1	41	59
	x-117-2	0.29	—	—	24.50	20.96	19.55	34.48	—	99.78	1	42	57
	x-117-3	0.32	—	—	24.44	20.80	19.54	35.06	—	100.16	1	43	57
	x-118-1	0.60	0.01	—	22.02	20.30	19.90	36.79	0.193	99.81	2	45	53
	x-118-2	0.89	0.004	0.003	22.23	20.86	18.94	36.48	0.615	100.02	3	43	54
	x-118-3	0.65	—	0.016	24.83	20.20	18.53	35.40	0.240	99.87	2	40	58
c	X-124-1	0.82	—	—	28.48	20.16	15.57	34.69	0.155	99.88	3	36	61
	X-124-2	0.49	0.004	—	26.27	20.68	18.14	35.33	0.012	100.92	1	39	60
	X124-3	0.60	—	0.019	28.21	20.96	16.04	35.93	0.12	101.88	2	34	64

样品在内生金属矿床成矿作用研究国家重点实验室(南京大学)测定。

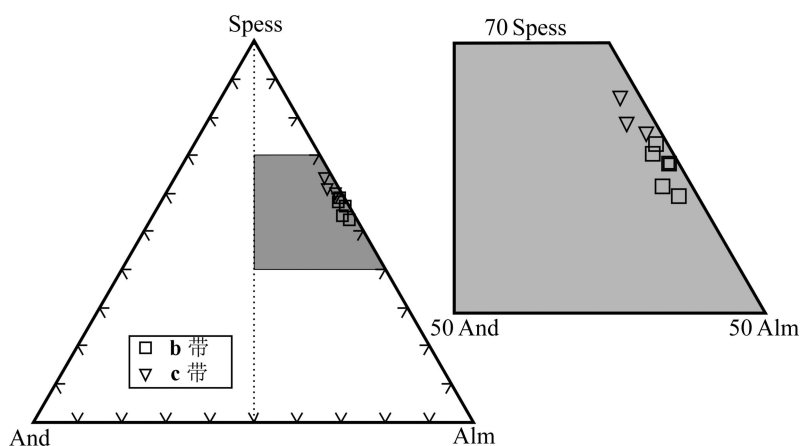


图 3 白石头泉岩体石榴石在锰铝榴石-铁铝榴石-钙铁榴石(Spess-Alm-And)三角图中的投影

Fig. 3 Plots of garnet in spessartite-almandite-andradite triangle

2.3 锡石

在白石头泉岩体中, 锡石多呈粒径为 0.02~0.07 mm 的柱粒状自形晶, 沿着被萤石充填的显微孔洞边缘排列或被包含于萤石内部, 而在远离孔洞的岩石中则少见。c 带中的锡石颗粒经淘选后用环氧树脂固定于玻璃板上磨片进行电子探针测试。其结果表明, 锡石中的 Ta、Nb、Zr、W 等微量元素较为富集, 其 Ta_2O_5 含量(质量分数)达 0.90%, Nb_2O_5 达 0.80%, ZrO_2 达 0.24%, WO_3 达 0.05%(见表 2)。

2.4 锆石

白石头泉岩体中的锆石透明、无色、自形性好, 多被包于钠长石或白色云母内部, 而未见被包于石英斑晶内部者。鳞片状白色云母内的锆石包裹体常发育放射晕。各相带的锆石柱面和锥面均发育良好, 长径为 0.20~0.35 mm, 长宽比例变化为 2.5~3.5。薄片显微镜观察表明, 从 a 带到 e 带, 锆石的含量明显降低, 这与从 a 带到 e 带全岩锆元素含量降低的测定结果^[9]相一致。在以萤石、石榴石、锡石为特征的孔洞充填物中未曾见到锆石。从 c 带中淘选出的锆石颗粒用环氧树脂固定于玻璃板上磨片进行电子探针测试。其结果表明, 该带锆石微量元素含量变化范围较大, 其 UO_2 含量可达 0.893%, ThO_2 含量可达 0.107%, HfO_2 含量可达 4.197%(见表 3)。

按 PUPIN^[13]的分类, c 带中 224 颗锆石的晶形主要属于 P1 型, 其次为 G1 和 G18 型。据此所算得的锆石结晶温度为 646~696 °C(计算方法见文献[13]), 此温度与上文所述石英中熔体包裹体熔融温度相比, 显著低于 b 带熔融温度(850~790 °C), 而略低于 d 带熔融温度(810~660 °C)。这可能是由于石英斑晶是此岩体

岩浆中最早结晶的组分, 而锆石的结晶稍晚于石英斑晶, 所以, 石英斑晶熔体包裹体所代表的是最接近液相线的熔体成分, 其熔融温度应当高于锆石结晶温度。

3 讨论

综上所述, 白石头泉岩体各相带中普遍存在着被萤石+硅酸盐±锡石充填的孔洞。孔洞多呈带尖角的多边形或不规则状形态, 其边界清晰。这样的特征表明孔洞是岩浆主体结晶后因体积收缩所形成的残留空间, 而其充填物则是由熔体或流体直接结晶的产物。孔洞外侧造岩矿物颗粒之间含硅酸盐的薄膜状萤石脉, 可以看作富含熔体的流体进入孔洞的通道。

在孔洞充填物中, 硅酸盐/萤石比例差异较大。在有的孔洞中, 石榴石、钠长石和白色云母等硅酸盐矿物含量高达 50%以上。实际上, 在有些孔洞中从孔洞壁指向孔洞中心生长的钠长石和白色云母等矿物, 可能本来就是孔洞中早期生长的硅酸盐矿物, 因此可以推测, 在充填这些孔洞的初始熔体-流体中, 硅酸盐含量要高于目前所见充填物中的含量。这类富含硅酸盐的充填物, 应当代表了富含流体的硅酸盐。与之成鲜明对照的是, 全部由萤石或仅含少量硅酸盐的充填物则代表了富含硅酸盐的流体。因此, 硅酸盐/萤石比例不同的这些孔洞充填物, 形象地代表了岩浆-热液过渡阶段^[1,14]残留熔体/流体比例的变化。

孔洞中充填的熔体-流体未对洞壁的硅酸盐产生普遍而强烈的热液蚀变, 这表明这些矿物的生长和孔洞充填几乎是一个连续的过程, 因而系统的压力、温度、pH、氧化还原电位等物理化学条件并未发生显著

表 2 白石头泉岩体 c 带中锡石的电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analysis results for cassiterite from zone c of Baishitouquan pluton (mass fraction, %)

Sample No.	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Ta ₂ O ₅	Y ₂ O ₃	SnO ₂	WO ₃	Ga ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	MnO	ZrO ₂	FeO	Sc ₂ O ₃	Total
(T11+T15)-1	—	—	0.37	—	98.22	—	—	0.18	0.06	—	0.009	—	98.80
(T11+T15)-2	—	—	—	—	98.89	0.02	—	0.06	0.01	0.05	—	—	99.03
(T11+T15)-3	—	—	0.08	—	99.04	—	—	0.16	—	0.10	0.007	—	99.40
(T11+T15)-4	0.06	—	0.90	—	96.02	0.05	—	0.80	—	0.21	0.001	—	98.00
(T11+T15)-5	—	—	0.76	—	97.80	—	—	0.54	0.06	0.24	0.035	—	99.40

样品在内生金属矿床成矿作用研究国家重点实验室(南京大学)测定。

表 3 白石头泉岩体 c 带中锆石的电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analysis results for zircon from zone c of Baishitouquan pluton (mass fraction, %)

Sample No.	SiO ₂	ZrO ₂	UO ₂	Al ₂ O ₃	HfO ₂	ThO ₂	Y ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Total
T11+T15-1	32.21	59.24	0.893	0.107	4.197	0.105	—	0.003	96.76
T11+T15-2	32.48	64.13	0.015	—	—	0.045	—	—	96.67
T11+T15-3	31.60	64.87	0.107	0.001	0.017	—	—	—	96.60
T11+T15-4	31.62	66.99	0.067	—	0.017	0.107	—	—	98.79
T11+T15-5	32.29	65.72	0.083	—	0.024	—	—	—	98.12

样品在内生金属矿床成矿作用研究国家重点实验室(南京大学)测定。

变化。

几乎所有的孔洞充填物中都有不同数量的萤石,这符合萤石在富氟、贫钙、过铝花岗岩中延迟结晶的特性^[15]。从白石头泉岩体的 a 带至 e 带,被萤石+硅酸盐±锡石充填的孔洞有增加的趋势,表明较晚结晶的顶部岩相中富 F 流体的富集,而这种富集与分离结晶过程中的挥发份出溶有关^[16-17]。相对于孔洞充填物而言,岩体中的伟晶岩脉和囊团(含和不含绿柱石)中含萤石相对较少,表明这些伟晶岩从岩浆体中的分离要早于上述残留孔洞的充填。有人把伟晶岩也作为岩浆-热液过渡阶段的产物^[1,18],但白石头泉的伟晶岩应当形成于该阶段的初期,而萤石+硅酸盐±锡石孔洞充填物则形成于该阶段的晚期。与之不同的是,分布于岩体裂隙面上的第二世代萤石,则形成于岩浆期后热液作用阶段。

越来越多的文献倾向于认为锡石可能是岩浆成因^[19-24]。在白石头泉岩体中,锡石主要产在岩浆-热液过渡阶段形成的孔洞充填物中,而在远离孔洞的岩石中则少见,表明在这种富氟花岗岩中,锡直到岩浆-热液过渡阶段才大量沉淀。在孔洞中的熔体-流体固结之前,如果岩体发生强烈变形和破碎,广泛散布的孔洞就会得以贯通,初步富集锡的熔体-流体就能被释放出来,并在有利部位聚集成脉状锡矿床。白石头泉岩体之所以未能形成锡矿床,可能是被圈捕的熔体

-流体就地凝结的缘故。

前人早已认识到氟化物或氟络合物对于锡在岩浆热液中迁移的重要性^[22]。在白石头泉岩体的孔洞中,锡与萤石密切伴生,表明氟的化合物也是该岩体岩浆-热液过渡阶段锡的重要搬运形式。

在白石头泉岩体中, 锆含量变化范围为 $50.3 \times 10^{-6} \sim 131.6 \times 10^{-6}$, 并且从 a 带到 c 带, 其含量降低^[11]。据显微镜观察, 锆石主要包裹于钠长石和白色云母中, 而在萤石+硅酸盐±锡石孔洞充填物中未曾见到。这表明在白石头泉这种低温花岗岩中, 随着锆石的分离结晶, 锆在岩浆-热液过渡阶段熔体-流体中的含量已经变得很低。

4 结论

1) 白石头泉花岗岩体孔洞中充填的萤石+硅酸盐±锡石副矿物组合为岩浆-热液过渡阶段晚期的产物。

2) 在贫钙镁铁而富氟的过铝花岗岩浆中, 氟化物或氟络合物是锡的重要搬运形式。在这种岩浆中, 锡直到岩浆-热液过渡阶段的晚期才大量沉淀, 并与大量萤石伴生。

3) 在岩浆-热液过渡阶段晚期, 初步富集锡的孔洞熔体-流体如因被构造裂隙贯通而发生运移, 再在

有利地段聚集,就能形成裂隙充填型脉状锡矿床。

REFERENCES

- [1] LONDON D. Magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare-element pegmatite: Evidence from fluid inclusions and phase-equilibrium experiments[J]. *American Mineralogist*, 1986, 71(4): 376–395.
- [2] 朱金初. 硅铝质熔浆体系中的水质流体[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 1997, 33(1): 11–20.
ZHU Jin-chu. Aqueous fluids in sialic magmatic system[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1997, 33(1): 11–20.
- [3] IRBER W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(4): 489–508.
- [4] JAHN B M, WU F, CAPDEVILA R, MARTINEAU F, WANG Y, ZHAO Z. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China[J]. *Lithos*, 2001, 59(4): 147–175.
- [5] WU Chang-zhi, LIU Si-hai, GU Lian-xin, ZHANG Zun-zhong, LEI Ru-xiong. Formation mechanism of the lanthanide tetrad effect for a topaz- and amazonite-bearing leucogranite pluton in eastern Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(5): 903–916.
- [6] 李兆麟. 粒间溶液与成矿作用[J]. *地质学报*, 1986, 60(2): 189–201.
LI Zhao-lin. The bearing of intergranular solution on mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 60(2): 189–201.
- [7] GU Lian-xing, YANG Hao, GOU Xiao-qin, WANG Jin-zhu. Geochemistry of the Baishitouquan amazonite granite of the Mid-Tianshan belt[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1994, 13(4): 289–304.
- [8] 顾连兴, 苟晓琴, 张遵忠, 吴昌志, 廖静娟, 杨浩, 尹琳, 闵茂中. 东天山一个多相带高铷氟花岗岩的地球化学及成岩作用[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 585–600.
GU Lian-xing, GOU Xiao-qin, ZHANG Zun-zhong, WU Chang-zhi, LIAO Jing-juan, YANG Hao, YIN Lin, MIN Mao-zhong. Geochemistry and petrogenesis of a multi-zoned high Rb and F granite in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 585–600.
- [9] 顾连兴, 吴昌志, 张遵忠, 苟晓琴, 刘四海, 郑远川, 张光辉. 东疆白石头泉含黄玉天河石花岗岩体的地球化学: 分带和岩浆演化[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2): 207–223.
GU Lian-xing, WU Chang-zhi, ZHANG Zun-zhong, GOU Xiao-qin, LIU Si-hai, ZHENG Yuan-chuan, ZHANG Guang-hui. Geochemistry of the Baishitouquan topaz-bearing amazonite granite: Zoning and magma evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2): 207–213.
- [10] 张遵忠, 顾连兴, 吴昌志. 东天山岩浆活动与碰撞造山过程和成矿作用[M]. 南京: 南京大学出版社, 2010: 1–329.
ZHANG Zun-zhong, GU Lian-xing, WU Chang-zhi. *Magmatism in eastern tianshan mountains and its relation to collisional orogeny and metallogenesis*[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2010: 1–329.
- [11] GU Lian-xing, ZHANG Zun-zhong, WU Chang-zhi, GUO Xiao-qin, LIAO Jing-juan, YANG Hao. A topaz- and amazonite-bearing leucogranite pluton in eastern Xinjiang, NW China and its zoning[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(5): 885–902.
- [12] CLARKE D B. The mineralogy of peraluminous granites: A review[J]. *Canadian Mineralogist*, 1981, 19(1): 3–18.
- [13] PUPIN J P. Zircon and granite petrology[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980, 73(3): 207–220.
- [14] ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin, HAN Xiao-dong, WANG Yi-xian, WANG Qiang, BAO Zhi-wei, JAHN Bor-ming. Controls on the REE tetrad effect in granites: Evidence from the Qianlishan and Baerzhe granites, China[J]. *Geochemical Journal*, 2002, 36(6): 527–543.
- [15] SCAILLET B, MACDONALD R. Fluorite stability in silicic magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 147(3): 319–329.
- [16] KOVALENKO V I, KOVALENKO N I. Ongonites (topaz-bearing Quartz keratophyre)-subvolcanic analogue of rare-metal Li-F granites[M]. Moscow: Science Press, 1976: 1–124.
- [17] XIONG Xiao-lin, ZHAO Zhen-hua, ZHU Jin-chu. Phase relations in albitite granite-H₂O-HF system and their petrogenetic applications[J]. *Geochemical Journal*, 1999, 33(2): 199–214.
- [18] 王贤觉, 牛贺才, 郭国章. 阿尔泰三号伟晶岩脉岩浆演化过程中铌、钽示踪的研究[J]. *地球化学*, 1998, 27(1): 1–11.
WANG Xian-jue, NIU He-cai, GUO Guo-zhang. The tracing study of Nb and Ta in magmatic evolution process for pegmatite vein No.3, Altay, China [J]. *Geochimica*, 1998, 27(1): 1–11.
- [19] HAAPALA I. Petrography and geochemistry of the Eurajoki stock, a rapakivi granite complex with greisen-type mineralisation in southwestern Finland[M]. Kuopio: Bulletin-Geological Survey of Finland, 1977: 1–128.
- [20] HAAPALA I. Magmatic and postmagmatic processes in tin-mineralised granites: Topaz-bearing leucogranites in the Eurajoki stock, Finland[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(12): 1645–1659.
- [21] LEHMANN B. Metallogeny of tin[M]. New York: Springer-Verlag, 1990: 1–211.
- [22] WEBSTER J D. Exsolution of magmatic volatile phases from Cl-enriched mineralizing granitic magmas and implications for ore metal transport[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(5): 1017–1029.
- [23] 陈骏, 王汝成, 周建平, 季峻峰. 锡的地球化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2000: 1–320.
CHEN Jun, WANG Ru-cheng, ZHOU Jian-ping, JI Jun-feng. *Geochemistry of tin*[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2000: 1–320.
- [24] 李福春, 朱金初, 饶冰, 金章东, 张林松. 花岗质熔体中 SnO₂ 含量与结晶温度和时间的关系[J]. *矿床地质*, 2002, 21(4): 393–398.
LI Fu-chun, ZHU Jin-chu, RAO Bing, JIN Zhang-dong, ZHANG Lin-song. SnO₂ concentration in granitic melt and its relation with crystallization temperature and time duration[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(4): 393–398.

(编辑 何学锋)