

四川丹巴伟晶岩型白云母矿床的成矿流体研究

李建康¹⁾, 王登红¹⁾, 付小方²⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 2) 四川省地质调查院, 成都, 610081

内容提要:四川丹巴伟晶岩型白云母矿床是我国第二大白云母产地,但其研究程度很低,形成机理的研究停留在定性推断的水平上,本文拟从流体的角度来研究其形成机理。丹巴北部的布衣沟位于白云母矿区的中心地带,自西向东穿过混合岩化变质带→部分混合岩化变质带→夕石化变质带,分布有蒋家→下蒋家→水大→二道桥等伟晶岩矿脉,其流体包裹体的均一温度峰值依次降低,CO₂-H₂O包裹体的数量逐渐减少,盐度有增高的趋势。碳、氢、氧同位素示踪出成岩成矿流体主要由携带深源碳的岩浆热液、建造水及脱碳反应产生的CO₂组成。从蒋家→下蒋家→水大→二道桥伟晶岩脉,流体中的CO₂/CH₄和CO₂/N₂呈降低。这些特征显示出成岩成矿流体的演化过程:携带深源碳的岩浆热液自春牛场穹隆体的深部向外迁移,在部分混合岩化带与脱碳反应产生的CO₂混合,在夕石带与建造水混合而稀释。因此丹巴白云母矿床属于“岩浆+变质”混合成因。

关键词: 流体;白云母;伟晶岩;丹巴

四川丹巴白云母矿床是我国的第二大白云母产地,其储量占四川省的93.3%,全国的10%(中国地质矿产信息研究院,1993),以白云母质量好和产出较多的大号、特大号白云母片而闻名于国内外。

依据前苏联的研究成果,伟晶岩型白云母矿床的成因类型可分为变质型、岩浆型和岩浆期后热液型(见地质科技动态,1972)。变质型白云母伟晶岩产于角闪相变质带中,变质作用所特有的热力学条件使围岩再结晶而生成伟晶岩。岩浆型白云母伟晶岩为重熔型花岗岩浆结晶分异的产物,其不仅产于角闪相的岩石中,在绿帘石、绿片岩相中也可见,与之有成因联系的花岗岩通常是片麻状粗粒花岗岩,且与伟晶岩脉的关系清楚。岩浆期后型白云母伟晶岩属于高温气液成因,主要由更长石、石英、白云母组成,不含明显数量的黑云母。那么,丹巴白云母矿床属于那种成因?由于地理位置偏僻,目前对该矿床的研究尚停留在定性描述的尺度上,只能推断其成因可能与区域混合岩化作用有关(侯立玮等,2002),这对理解该矿床的形成机理是远远不够的。

因此,本文通过研究丹巴白云母矿床成矿流体的特征,解释丹巴白云母矿床的形成机理。

1 区域地质概况

丹巴伟晶岩型白云母矿床位于松潘—甘孜造山带主体的丹巴弧形构造带(图1),该造山带的北侧以阿尼玛卿缝合线带与劳亚古陆相隔,西侧以金沙江缝合带与冈瓦纳大陆外缘的羌塘—昌都陆块毗邻,东南缘以龙门山—锦屏山与扬子陆块相连。

在丹巴地区,自春牛场、妥皮、青杠林及公差等混合片麻岩穹隆体向外依次出露震旦系→志留系→泥盆系→三叠系。震旦系主要分布在混合片麻岩穹隆体内,为一套混合岩化的海相碎屑岩、泥质岩、碳酸盐岩沉积,厚146~507m;志留系以含石榴二云(英)片岩为主,厚1330~3250m;泥盆系以石英岩、二云片岩(或千枚岩)为主,厚3328~5283m;三叠系以板岩、砂岩为主,总厚2800~5270m。在印支末期,丹巴地区结束海侵历史,遭受剥蚀,缺失侏罗系、白垩系和第三系(1:5万区域地质调查报告,巴底幅,2000)。

丹巴地区的构造表现为一个复式背斜,在空间上呈现为穹隆体。前震旦系混合片麻岩套构成春牛场、青杠林和公差等背斜的核部,这些背斜的两翼主要为志留系、泥盆系、三叠系。与这些背斜配套的是

注:本文为国家自然科学基金青年基金(编号40202012,40573033)、国家科技支撑计划课题(编号2006BAB01A01)、中国地质调查局国土资源大调查项目(编号1212010733803,1212010535804)项目资助的成果。

收稿日期:2007-05-08;改回日期:2007-06-15;责任编辑:郝梓园。

作者简介:李建康,男,1976年生,博士。从事矿床地质的研究。Email: li9968@126.com。

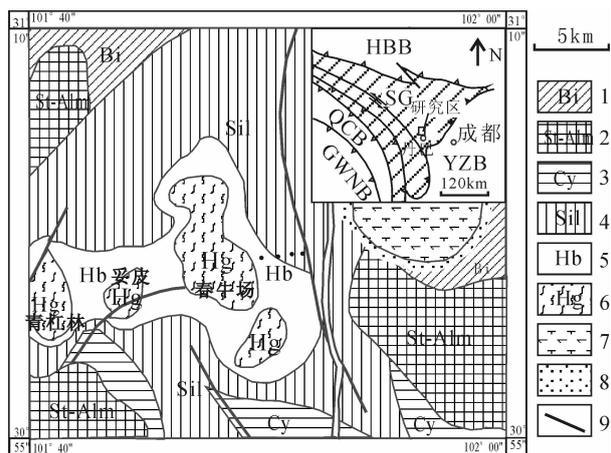


图 1 丹巴地区变质带分布图

(据 1 : 20 万区域地质调查报告,丹巴幅,1980)

Fig. 1 Metamorphic zone in Danba (after 1 : 200000 Regional Geology Survey Report, Danba Piece, 1980)

1—黑云母带;2—十字石—铁铝榴石带;3—蓝晶石带;4—夕线石带;5—部分混合岩化带;6—混合演化带;7—马奈辉石正长岩;8—角岩;9—断层;SG—松潘—甘孜造山带;HBB—华北陆块;YZB—扬子陆块;QCB—羌塘—昌都陆块;GWNB—冈瓦纳大陆

1—Biotite metamorphic zone; 2—croisette-almandine metamorphic zone; 3—cyanite metamorphic zone; 4—sillimanite metamorphic zone; 5—part migmatite zone; 6—migmatite zone; 7—Manai syenite body; 8—hornberg; 9—fault; SG—Songpan-Ganzi orogenic zone; HBB—North China Block; YZB—Yangtse Block; QCB—Qiangtang-Changdu Block; GWNB—Gondwana Block

麦尔多、丹巴等向斜。

丹巴地区至少经历了二次以上的强烈变质作用,即印支末期—燕山期与混合岩化有关的巴罗型递进变质和喜马拉雅早期的巴肯型热流变质。白云母伟晶岩脉大量分布的春牛场穹隆体及其附近保存了较完整的巴罗型变质带(图 1),自穹隆体向外依次为混合岩化带(Hg)、部分混合岩化带(Hb)、夕线石带(Sil)、蓝晶石带(Cy)、十字石带(St)、铁铝榴石带(Alm)和黑云母带(Bi),但许多变质带因遭受后期巴肯型变质带叠加而不容易识别(1 : 5 万区域地质调查报告,巴底幅,2000)。

丹巴复式背斜的周缘存在许多燕山期岩浆岩,如,猛古黑云母花岗岩、马奈碱性岩体、甲斯观闪长花岗岩体、边耳石英闪长岩体等。矿区的伟晶岩脉多形成于 83~138Ma(李建康等,2006),也属于燕山期的产物。

2 丹巴白云母矿床的地质特征

丹巴白云母矿床的矿化伟晶岩脉主要分布在青杠林、妥皮、春牛场等穹隆体周缘的部分混合岩化带和夕线石带中,次为蓝晶石带、十字石带,少数产于石榴石带中。

围岩对白云母矿化程度有着明显的控制作用。就岩性而言,白云母伟晶岩主要产在夕线石二云片岩、含石榴夕线二云片岩、含石榴蓝晶二云片岩及石榴二云英片岩中。就化学成分而言,围岩属于高铝富钾岩石,能够提供白云母矿化所必需的 K^+ 、 Al^{3+} 等组分。就物理性质而言,这些岩石较致密,有利于防止成矿溶液和热量的散失,为相对封闭的条件,使伟晶岩脉能够在较充裕的时间内很好地进行结晶作用,利于白云母的矿化(1 : 20 万地质调查报告,丹巴幅(矿产部分),1980)。

本文研究的白云母矿化伟晶岩脉位于丹巴北部的布衣沟,布衣沟横穿春牛场穹隆体及外围变质带,自西向东分布着蒋家、下蒋家、水大、二道桥等多条伟晶岩脉(图 2),是研究丹巴伟晶岩成因的理想场所。现以布衣沟的伟晶岩脉为例,说明丹巴白云母矿床的地质特征。

(1) 伟晶岩脉主要产于志留系通化群的富铝二云母石英片岩和震旦系混合片麻岩中。

(2) 伟晶岩脉的形态以脉状为主,次为透镜状、蝌蚪状、筒状、串珠状,及不规则状。春牛场混合岩中的伟晶岩脉主要受穹隆体翼部、鞍部片理和裂隙控制,有的明显受到构造变形的改造,发生透镜化、劈理化或明显碎裂,各伟晶岩脉可彼此穿插,伟晶岩脉与混合岩间有截然的接触界线。部分混合岩化带和夕线石带中的伟晶岩脉一般受变质围岩的层理控制,各伟晶岩脉间无穿插现象。

(3) 伟晶岩脉的类型主要为更长石—微斜长石型及更长石型,岩脉的成分比较简单,主要矿物有长石、石英、白云母及黑云母等。

(4) 沿布衣沟自西向东,各伟晶岩脉的物质组成和分带具有一定的继承性。在混合岩中仅产有少量伟晶岩脉,且分异差、交代弱,一般不具白云母矿化;在部分混合岩化带和夕线石变质带内,伟晶岩脉的分带逐渐明显,脉体产出最多且白云母矿化最好。

由上述特征可知,丹巴白云母矿床的伟晶岩脉围绕春牛场等混合片麻岩穹隆体分布,与巴罗型变质带有良好的耦合关系,表现在自混合岩化带向夕线石带,伟晶岩脉的矿物分带型逐渐明显,由长英质

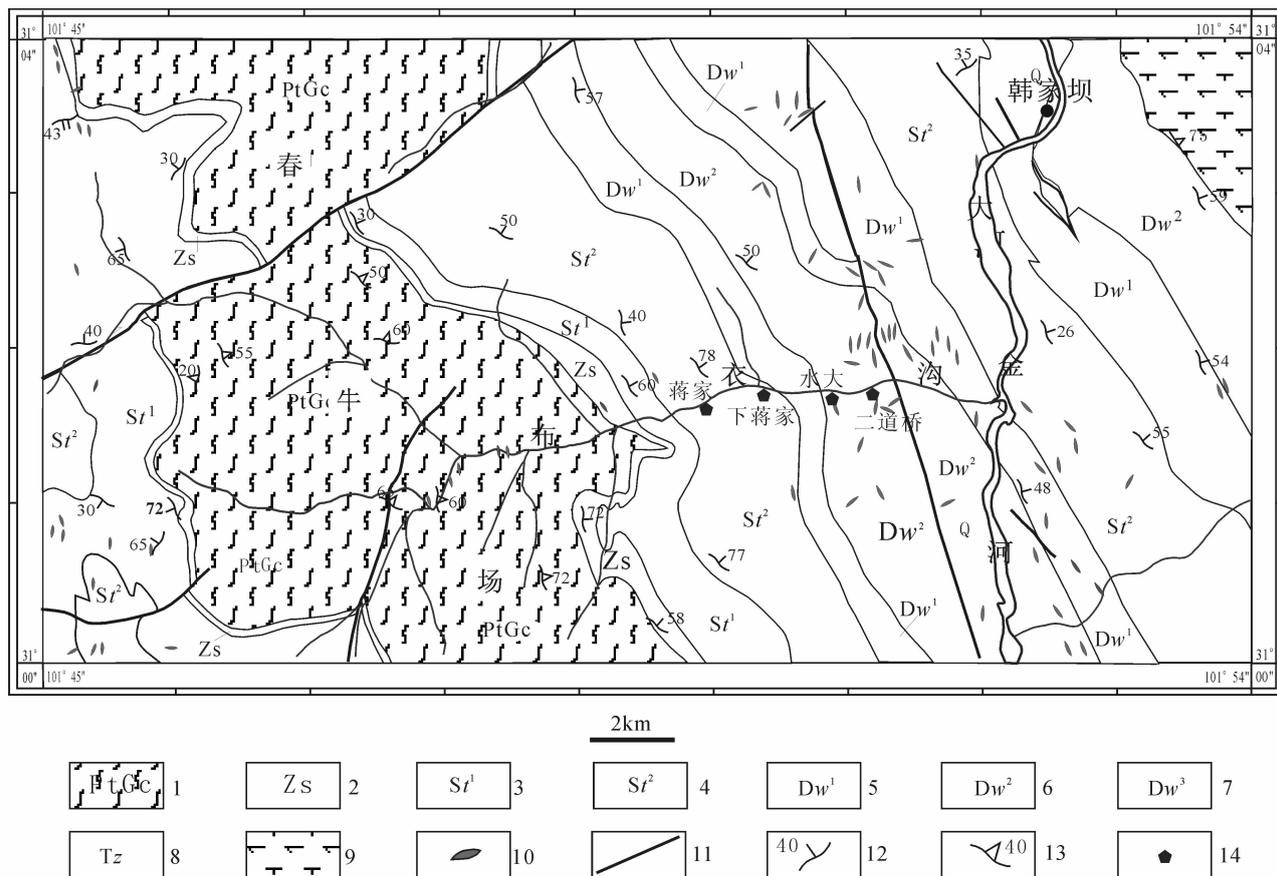


图2 丹巴布衣沟地区伟晶岩区域地质图(据1:5万区域地质调查报告,巴底幅,2000)

Fig. 2 Geological map of Buyigou pegmatite in Danba (after 1:50000 Regional Geology Survey Report, Badi Piece, 2000)

- 1—前震旦系混合片麻岩;2—震旦系;3—志留系通化组下段;4—志留系通化组上段;5—泥盆系危关组下段;6—泥盆系危关组中段;7—泥盆系危关组上段;8—三叠系杂谷脑组;9—马奈岩体;10—伟晶岩脉;11—断层;12—面理产状;13—片麻理产状;14—采样点
- 1—Presinian amphogneiss; 2—Sinian; 3—lower segment of Tonghua Formation in Silurian; 4—upper segment of Tonghua Formation in Silurian; 5—lower segment of Weiguan Formation in Devonian; 6—middle segment of Weiguan Formation in Devonian; 7—upper segment of Weiguan Formation in Devonian; 8—Zaguniao Formation in Trias; 9—Manai rock body; 10—pegmatite dike; 11—fault; 12—attitude of faces; 13—attitude of gneissosity; 14—sampling location

伟晶岩逐渐过渡到含大量白云母矿化的伟晶岩脉。这些现象说明区域伟晶岩脉的热流中心很可能位于春牛场等穹隆体,各伟晶岩脉属于同期热事件的产物。

3 流体包裹体研究

笔者对布衣沟中的蒋家、下蒋家和二道桥伟晶岩脉进行了包裹体测温研究,采样点见图3。由于水大伟晶岩脉样品太破碎,未对其进行显微测温工作。蒋家伟晶岩脉位于部分混合岩化带,顺层侵入二云母片麻岩之中,脉宽约1~1.5m,由石英和长石组成,无矿物分带,致密结构;下蒋家伟晶岩脉位于部分混合岩化带和夕石变质带的过渡位置,岩脉呈透镜状侵入到二云母石英片岩中,长石、石英和少量

白云母共生,矿物粒度较蒋家伟晶岩脉大,脉厚约3.0m。二道桥伟晶岩脉位于硅石化带,沿硅线二云母石英片岩的层理延伸,厚约2.0m,分带性良好:上部以石英为主,以一层黑云母与下部接触;在下部,大片白云母垂直岩脉伸展方向生长,由岩脉的边部到中心,呈现黑云母→长石+石英→白云母+石英+长石的矿物分带(图3)。

3.1 流体包裹体类型

本文观测的包裹体为石英中的原生包裹体,蒋家和下蒋家伟晶岩脉中的石英与长石共生,二道桥伟晶岩脉中的石英采于长石—石英带和石英—白云母—长石带。本实验得到显微测温数据234个,观测到的包裹体类型主要有两种(图4):

类型I:NaCl-H₂O盐水溶液包裹体,流体包裹

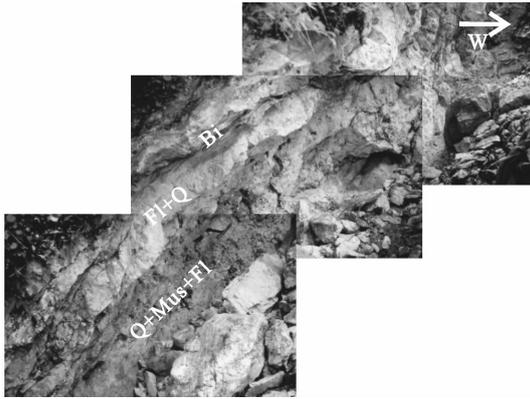


图 3 二道桥伟晶岩脉照片

Fig. 3 Pictures of Erdaoqiao pegmatite dike

Bi—黑云母; Pl—长石; Q—石英; Mus—白云母

Bi—Biotite; Pl—feldspar; Q—quartz; Mus—muscovite

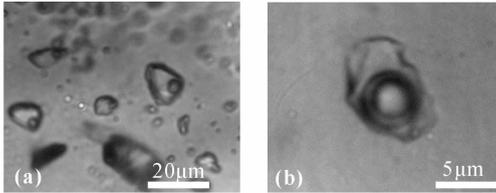


图 4 丹巴布衣沟内伟晶岩脉中流体包裹体照片

Fig. 4 Pictures of fluid inclusion in Buyigou

pegmatite dikes in Danba

(a)一下蒋家伟晶岩脉中的 NaCl-H₂O 盐水溶液包裹体;

(b)一蒋家伟晶岩脉中的 CO₂-NaCl H₂O 三相包裹体;

(a)—NaCl-H₂O inclusions in Xiajiangjia pegmatite dike;

(b)—CO₂- NaCl-H₂O inclusion in Jiangjia pegmatite dike

体的大小不等,一般在 2~20µm 之间,气体百分比一般在 10%~20%,形态比较规则,常呈椭圆形或近圆形,在加热过程中,随温度升高气泡逐渐变小(部分气泡剧烈跳动直至消失),最后均一到液相。

类型 II :CO₂-NaCl-H₂O 包裹体,室温(20℃)呈现出气态 CO₂、液态 CO₂ 和水溶液三相,包裹体的大小一般在 5~20µm 之间,呈椭圆状或近圆形。在蒋家伟晶岩脉中,包裹体中的 CO₂ 所占百分比为 15%~30%,部分大于 50%;在下蒋家伟晶岩脉中,CO₂ 所占百分比为 5%~20%。CO₂ 部分在 20℃~30℃ 均一为液态,整个包裹体加热到 300℃±50℃ 时完全均一到液态水溶液,超过 300℃ 时容易发生爆裂或者漏气。

3.2 流体包裹体的均一温度

包裹体测温实验系笔者在中国地质大学(北京)流体包裹体实验室完成的,采用的冷热台为 Linkam

TH600。测温时,首先以 30℃/min 降温至 -100℃,再以 20℃/min 升温至 -22℃;然后以 1℃/min 升温至 0℃,观测盐水溶液包裹体的冷却温度,对于 CO₂-NaCl-H₂O 包裹体,还要继续以 1℃/min 升温至 35℃ 以观测笼形物溶解温度和 CO₂ 的部分均一温度;随后以 20℃/min 升温,如各相稍有变化则降低升温速率降至 5℃/min,接近均一时降至 1℃/min,观测均一温度。

伟晶岩型白云母矿床的形成深度一般为 7~11km(斯米尔诺夫,1985; Pedrosa et al., 2000),属于深成矿床,所以有必要对其包裹体的均一温度进行压力校正。由区域地质概况可知,丹巴白云母伟晶岩脉侵入前(燕山期前)的地层总厚度为 7604~14310m,可取该区间的平均值(约 11km)作为丹巴白云母矿床的形成深度,然后根据不同浓度 NaCl 溶液的温压关系图(张文淮等,1994)对蒋家、下蒋家和二道桥伟晶岩脉中的包裹体均一温度进行校正。

从图 5 可以看出,自西向东——蒋家→下蒋家→二道桥伟晶岩脉中的包裹体均一温度呈现出降低的趋势:蒋家伟晶岩脉的均一温度的峰值在 300℃,

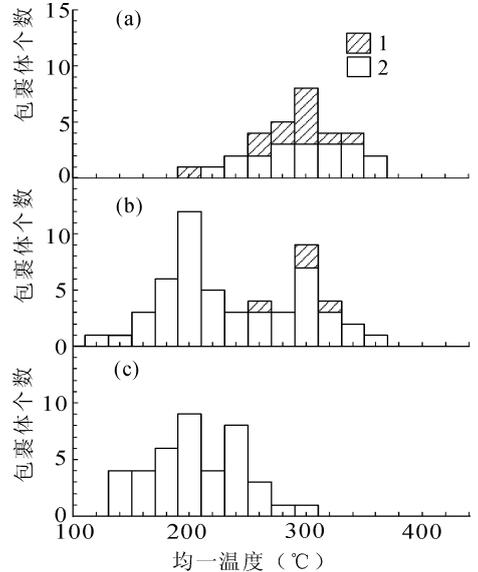


图 5 四川丹巴布衣沟内蒋家、下蒋家和二道桥伟晶岩脉中包裹体均一温度直方图

Fig. 5 Histogram showing homogenization temperature of fluid inclusions in Jiangjia, Xiajiangjia, and Erdaoqiao pegmatite dikes in Buyigou, Danba deposit

(a)一蒋家伟晶岩脉; (b)一下蒋家伟晶岩脉; (c)一二道桥伟晶岩脉; 1—CO₂-NaCl-H₂O 包裹体; 2—NaCl-H₂O 包裹体

(a)—Jiangjia pegmatite dike; (b)—Xiajiangjia pegmatite dike; (c)—Erdaoqiao pegmatite dike; 1—CO₂-NaCl-H₂O inclusion; 2—NaCl-H₂O inclusion

压力校正后约为 550℃;下蒋家伟晶岩脉的均一温度存在两个峰值——200℃和 300℃附近,压力校正后分别为 445℃和 560℃;二道桥伟晶岩脉的均一温度的峰值在 200℃附近,压力校正后约为 465℃。在组分方面,三个伟晶岩脉中的 CO₂-NaCl-H₂O 包裹体逐渐减少:在蒋家伟晶岩脉,以 CO₂-NaCl-H₂O 包裹体为主;在下蒋家伟晶岩脉,CO₂-NaCl-H₂O 包裹体仅分布在 300℃附近;而二道桥伟晶岩脉中只发育 NaCl-H₂O 包裹体。

3.3 流体包裹体的盐度

盐度是根据盐水溶液包裹体的冰点和 CO₂-NaCl-H₂O 包裹体的笼形物熔化温度估算的。根据温度—盐度表(卢焕章等,2004)查出盐水溶液的盐度,由 Parry(1986)的公式: $\% \text{NaCl} = 15.52022 - 1.02342t - 0.05286t^2$ (t 为笼型物熔化温度,℃),计算出 CO₂-NaCl-H₂O 流体的盐度。蒋家、下蒋家和二道桥伟晶岩脉中包裹体的盐度—均一温度关系如图 6 所示,可以看出自西向东蒋家→下蒋家→二道桥流体的盐度表现出升高的趋势。

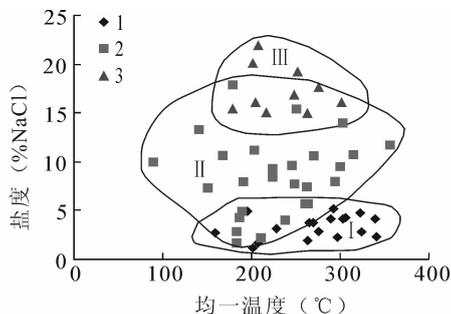


图 6 丹巴布衣沟伟晶岩中包裹体的盐度—温度分布图

Fig. 6 Distribution of temperature-salinity of fluid inclusions in Buyigou pegmatite dikes, Danba deposit

I—蒋家伟晶岩脉中包裹体的盐度—温度范围; II—下蒋家伟晶岩脉中包裹体的盐度—温度范围; III—二道桥伟晶岩脉中包裹体的盐度—温度范围; 1—蒋家伟晶岩脉; 2—下蒋家伟晶岩脉; 3—二道桥伟晶岩脉

I—Area of temperature-salinity in Jiangjia pegmatite dike;
II—area of temperature-salinity in Xiajiangjia pegmatite dike;
III— area of temperature-salinity in Erdaoqiao pegmatite dike;
1—Jiangjia pegmatite dike; 2—Xiajiangjia pegmatite dike; 3—Erdaoqiao pegmatite dike

3.4 流体成分

石英中群体包裹体成分测试是中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室完成的。石英矿物分别采于蒋家(JJX)、下蒋家(XJJ)、水大(SD)和二道桥(EDQ)伟晶岩脉。样品的制备

过程为:将纯度大于 99%的石英样品放入烧杯中,然后用盐酸溶液清洗,每天(共 7 天)用离子交换水清洗 3~4 次,以去除石英表面的吸附物和其他矿物,在 60℃下把石英烘干,已备流体包裹体气液成分测试使用(朱和平等,2003)。

包裹体的气相成分分析采用加热爆裂法提取气体(朱和平等,2003)。其过程为:将清洗干净的 500mg 样品放入石英管中,120℃预热并抽真空,待分析管内真空度为 6×10^{-6} Pa 以下时,逐步升温到 500℃,并保持 1h,释放出流体包裹体中的气相成分,把这些气体导入四极质谱仪进行分析测试,测试结果见表 2。分析仪器为日本真空技术株式会社生产的 RG202 四极质谱仪,分析误差 < 3%。

包裹体的液相成分分析过程为:将清洗干净的 1g 样品放入石英管中,500℃爆裂 15min,离心 5min,然后把样品放入离子色谱仪上进行液相成分分析。分析仪器为日本岛津公司(SHIMADZU)的 HIC-6A 型离子色谱仪,分析误差 < 5%。

由测试结果(表 1、2)可知,气体的主要成分为 CO₂和 N₂,及少量 CH₄、C₂H₆、He、Ar,这些组分的含量及 CO₂/N₂、CO₂/CH₄沿 JJX→XJJ→SD→EDQ 依次降低。特别是 CO₂,在蒋家伟晶岩脉中的含量明显高于其他伟晶岩脉中的含量。此外,蒋家伟晶岩脉中还含有少量的 H₂S。阳离子主要为 Na⁺、Ca²⁺,Na⁺ > K⁺,阴离子主要由 F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻组成。沿 JJX→XJJ→SD→EDQ,F⁻的含量逐步增高。

4 碳氢氧同位素组成

同位素的测试在国土资源部同位素实验室完成。首先把石英矿物破碎到 60~80 目,然后采取真空热爆法提取包裹体中的水,包体水经纯化除杂质后,与金属锌反应转化为 H₂。矿物的氧同位素制样采用 BrF₅法。采用分步加热爆裂法提取包裹体中的 CO₂气体,将其用液氮冷冻在样品管中,经约 -70℃的酒精干冰冷冻后抽去样品管中未能冷冻的气体(如 CO、CH₄、C₂H₆),以保证提取纯 CO₂气体。 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ (‰SMOW)和 $\delta^{13}\text{C}$ (‰PDB)的测定是在 MAT251 质谱仪上完成的,分析精度分别为 $\pm 3\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 。得到测试结果(表 3)后,根据石英—水的氧同位素分馏公式: $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 2.90$ (Clayton et al., 1972),将石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}$ 换算成与之平衡的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 。

表 1 丹巴布衣沟伟晶岩群体包裹体气体分析结果 (mol%)

Table 1 Composition of gas phase in inclusions in Buyigou pegmatites, Danba deposit (mol%)

样品号	H ₂ O	N ₂	CO ₂	He	Ar	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂ S	CO ₂ /N ₂	CO ₂ /CH ₄
JJX-1	28.7	8.955	61.11	0.0018	0.095	0.304	0.834	—	6.824	200.865
JJX-2	37.4	6.827	54.98	0.0022	0.066	0.309	0.378	0.010	8.053	177.614
JJX-3	40.0	7.723	51.61	0.0014	0.082	0.352	0.183	0.085	6.683	146.511
XJJ	88.2	2.322	9.14	0.0011	0.028	0.148	0.130	—	3.935	61.672
SD	97.6	0.875	1.44	0.0001	0.025	0.048	0.037	—	1.639	30.021
EDQ	98.0	0.739	1.18	0.0002	0.012	0.068	0.040	—	1.595	17.284

注:“—”表示未检测出结果。

表 2 丹巴布衣沟伟晶岩群体包裹体阴、阳离子分析结果 (μg/g)

Table 2 Composition of liquid phase in inclusions in Buyigou pegmatites, Danba deposit (μg/g)

样品号	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
JJX	0.37	0.59	1.64	0.52	—	0.07	0.29
XJJ	0.41	1.75	1.64	1.67	0.33	0.05	0.28
SD	0.63	1.42	2.73	1.09	—	—	0.42
EDQ	0.79	1.10	1.57	1.17	0.25	—	0.27

注:“—”表示超出检测限。

表 3 丹巴布衣沟内伟晶岩中石英及石英中包裹体水的 H、O、C 同位素组成

Table 3 H、O、C isotope composition of water in inclusions and O isotope compositions of quartz in Buyigou pegmatites, Danba deposit

样品号	δ ¹⁸ O _{石英-SMOW} (‰)	δD _{H₂O-SMOW} (‰)	δ ¹³ C _{CO₂-PDB} (‰)	δ ¹⁸ O _{H₂O} (‰)
JJX-1	16.8	-76	2.0	9.4
JJX-2	15.8	-82	2.3	8.4
XJJ-1	12.1	-86	-6.1	2.6
XJJ-4	12.1	-107	-7.6	2.6
SD-1	9.5	-98	-2.7	-1.2
SD-3	10.1	-93	-8.2	-0.6
SD-4	10.0	-77	-1.3	-0.7
EDQ-2	10.8	-86	-4.2	-1.4

氢氧同位素组成(图 7)表明,蒋家伟晶岩脉的成岩成矿流体属于原生岩浆水范畴,下蒋家、水大和二道桥伟晶岩脉的成岩流体属于岩浆热液与建造水(大气来源水)混合的产物。蒋家伟晶岩脉的碳同位素组成与海相碳酸盐岩的碳同位素组成(0.56‰±1.55‰)(Barnes, 1979)相近,属于浅源碳范畴;下蒋家、水大和二道桥伟晶岩脉的碳同位素组成介于-1.3~-8.2 之间,与深源碳的同位素组成(岩浆成因的碳同位素组成:5.1‰±1.4‰,火成碳酸岩白云石的碳同位素组成:-5‰±0.7‰,地幔岩石部分熔融形成的岩浆碳同位素组成:-5‰±2‰)(Barnes, 1979)十分接近,说明碳与深源岩浆活动有关。

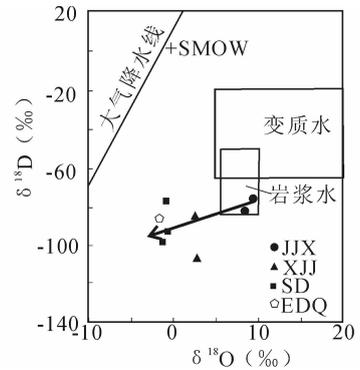


图 7 布衣沟伟晶岩脉内石英中包裹体水的 δD-δ¹⁸O_{H₂O}‰ 的组成,底图参考魏菊英等(1988)

Fig. 7 Plot of δD-δ¹⁸O_{H₂O} of water in the inclusions in quartz in Buyigou pegmatites, Danba deposit (base map from Wei, 1988)

5 成矿机理分析

根据以上的分析测试结果,可以得出以下认识。

(1) 丹巴伟晶岩的成岩成矿流体中的 H₂O 和 CO₂ 至少有两个来源。

同其他三条伟晶岩脉相比,蒋家伟晶岩脉的 CO₂ 含量明显偏高, F⁻、Cl⁻、Na⁺ 的含量明显偏低(表 1, 2), 这暗示蒋家伟晶岩脉同其他三条伟晶岩脉的流体来源可能不完全相同。

因此,蒋家伟晶岩脉的 H₂O 来源于深源岩浆热液,碳属于浅源碳范畴;而下蒋家、水大和二道桥伟晶岩脉的 H₂O 为建造水和岩浆混合的产物,碳则属于岩浆热液携带的深源碳。

(2) 那么,这种复杂的成岩成矿流体是如何形成的? 其形成过程可描述如下:在构造挤压作用

使区域发生穹隆,诱发深部重熔岩浆在春牛场等热穹隆的底部上涌,并向四周迁移,在混合岩化带和部分混合岩化带,岩浆热液与早期混合岩化阶段脱碳反应产生的 CO_2 混合,形成以浅源碳和岩浆热液为主的成岩流体;在夕石带迁移时,岩浆热液中逐渐混入大量的建造水,同时从地层(二云母片岩)中淋滤出 K、Al 等白云母矿化元素,但由于夕石带未发生脱碳反应,流体中的碳仍以少量深源碳为主,且逐渐被稀释,从而形成以建造水和深源碳为主的成矿流体(图 8)。依据如下:

自蒋家→下蒋家→水大→二道桥,氢氧同位素组成逐渐漂移岩浆水区域,直接描述出岩浆水与建造水的混合轨迹。

蒋家伟晶岩脉位于部分混合岩化带,属高级变质带,其他三个伟晶岩脉位于角闪岩相夕石带。许多研究证明,从中级变质带到高级变质带的边界处,变质流体会从以 H_2O 为主的流体变为以 CO_2 为主的流体,碳主要是脱碳反应的产物,在瑞士阿尔卑斯地区的变质岩、挪威南部地区的变质岩中均可以发现这种现象(卢焕章,1997),这可能是研究区的混合岩化带和部分混合岩化带缺乏大理岩,而夕石带地层中夹有大理石的原因。因此可以推断,蒋家伟晶岩脉中的浅源碳主要是混合岩化阶段脱碳反应的产物;而在夕石带,较低的温

压变质环境阻碍了脱碳反应的发生,使下蒋家、水大和二道桥伟晶岩脉的碳主要为岩浆热液携带的深源碳。

由蒋家→下蒋家→二道桥,包裹体均一温度峰值依次降低, $\text{CO}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ 包裹体的数量逐渐减少,直至在二道桥伟晶岩脉中消失。 Na^+ 和 Cl^- 在蒋家伟晶岩脉中的含量明显低于其在下蒋家、水大和二道桥伟晶岩中的含量(表 1),与图 6 所示的自西向东流体的盐度有增高的趋势相一致。这些特征均表明岩浆热液自春牛场混合岩带底部向四周迁移,并不断与建造水混合,使流体的温度降低,盐度增高。

下蒋家伟晶岩脉的包裹体均一温度直方图出现两个峰值,温度高的峰值含 $\text{CO}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ 包裹体,温度低的峰值为盐水溶液包裹体,同位素显示前者的 CO_2 来源于深源,后者含大量建造水。这种现象也暗示出携带深源碳的岩浆热液与建造水的混合作用。

下蒋家、水大、二道桥伟晶岩脉中的 CO_2 与 H_2O 含量呈反比, CH_4 、 C_2H_6 、 N_2 、He、Ar 等组分沿蒋家→下蒋家→水大→二道桥也逐渐降低,该现象一般可用流体沸腾的去气过程和与大气来源流体的混合过程来解释。研究表明随着沸腾作用的进行,难溶于液相的组分将相对易溶组分分馏到

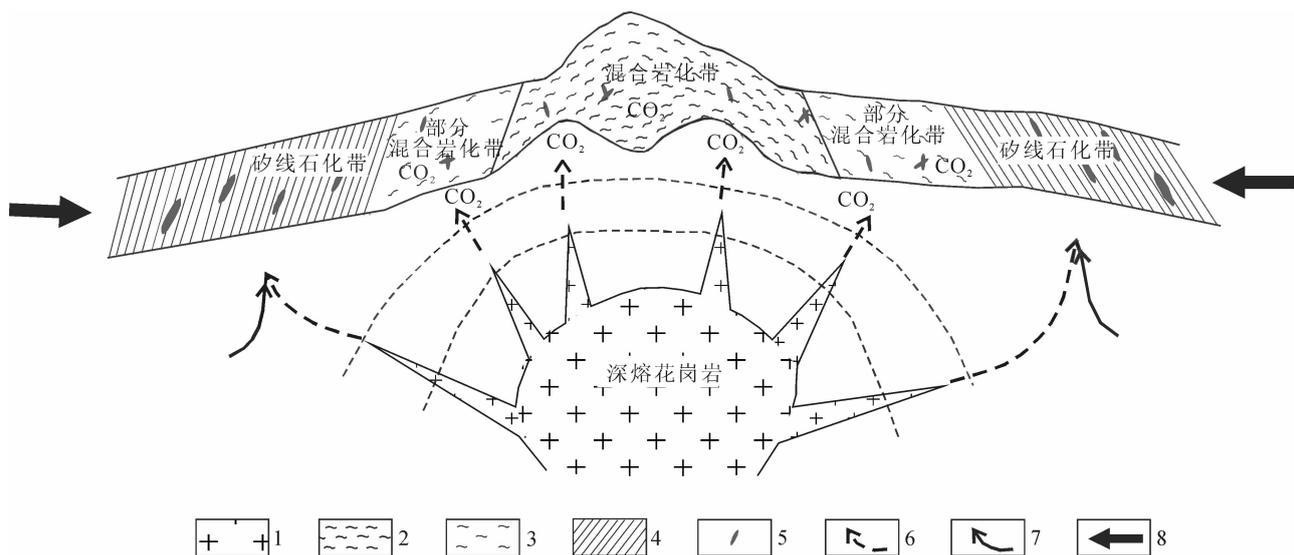


图 8 丹巴伟晶岩型白云母矿床成因模式

Fig. 8 Ore-forming model of Danba pegmatite type deposit

1—深熔花岗岩;2—混合岩;3—部分混合岩化片岩;4—片岩夹大理岩;5—伟晶岩脉;6—岩浆热液迁移方向;
7—建造水迁移方向;8—构造应力

1—Anatectic granite; 2—chorismite; 3—migmatizing schist; 4—schist clipping marble; 5—pegmatite dike;
6—transferring path of magmatic hydrothermal fluid; 7—transferring path of building water; 8—tectonic stress

气相中,难溶的顺序为 $N_2 > CH_4 > CO_2$,因此,去气作用将向着 CO_2/CH_4 和 CO_2/N_2 比值升高的方向演化(刘伟等,2002a;2002b)。而在布衣沟,随着流体均一温度的降低, CO_2/CH_4 和 CO_2/N_2 呈降低的趋势(表 1),宜用含深源碳的岩浆热液与建造水的混合作用来解释。

综合以上的分析,丹巴白云母矿床的成矿流体既包含深源岩浆热液,又有早期变质阶段脱碳反应产生的 CO_2 的混入,不属于单纯的岩浆成因或变质成因,是岩浆作用和变质作用共同作用的结果。因此,丹巴矿床属于“岩浆+变质”的混合成因模式。

上述分析与矿床地质特征是相吻合的。由前述可知,伟晶岩脉的围岩对白云母矿化的程度起着一定的控制作用,白云母矿化伟晶岩脉主要赋存于富钾高铝的二云母石英片岩中。根据图 8 所示的成因模式,经变质作用,围岩中的 Al^{3+} 、 K^+ 等白云母矿化组分将进入变质流体中,从而在片理、层理及其他裂隙中成岩成矿。此外,矿区周围还分布有燕山晚期的花岗岩,说明丹巴地区确实存在岩浆活动,图 8 中的深部岩浆活动是可能的。

因此,丹巴白云母矿床属于“岩浆+变质”的混合成因,两者在成岩成矿过程中起着不同的作用。若参考季克俭等(1994)的“三源说”,岩浆活动对白云母成矿作用的贡献相当于“热源”,变质作用相当于“水源”,变质围岩相当于“矿源”。

参 考 文 献

侯立伟,付小方等. 2002. 松潘—甘孜造山带东缘穹隆状变质地质体. 成都:四川大学出版社,45~57.
季克俭,王立本. 1994. 热液源研究的重要进展和“三源”交代热液成矿学说. 地学前缘,1(3~4):126~132.
李建康,王登红,付小方. 2006. 四川丹巴伟晶岩型白云母矿床的成矿时代及其构造意义. 矿床地质,25(1):95~100.

刘伟,李新俊,邓军. 2002. 东天山金窝子石英脉金矿床成矿流体和成矿物质的来源. 中国科学(D辑),32(增刊):105~119.
刘伟,李新俊,谭骏. 2002. 内蒙古大井铜—锡—银—铅—锌矿床的流体混合作用——流体包裹体和稳定同位素证据. 中国科学(D辑),32(5):405~414.
卢焕章,范宏瑞,倪培等. 2004. 流体包裹体. 北京:科学出版社,232~240.
卢焕章. 1997. 成矿流体. 北京:北京科学技术出版社,193~205.
四川地质局,1980. 中华人民共和国区域地质调查报告,丹巴幅,1:20万,238.
四川省地质矿产勘查开发局. 2000. 中华人民共和国区域地质调查报告,巴底幅,1:5.
斯米尔诺夫. 1985. 矿床地质学(中文译本). 北京:地质出版社,87~104.
魏菊英,王关玉. 1988. 同位素地球化学. 北京:地质出版社,118~124.
许志琴,侯立玮,王宗秀. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程. 北京:地质出版社,190.
张文淮,陈紫英. 1994. 流体包裹体地质学. 北京:地质出版社,132~154.
中国地质矿产信息研究院. 1993. 中国矿产. 北京:中国建材工业出版社,391.
朱和平,王莉娟,刘建明. 2003. 不同阶段流体包裹体气相成分的四极质谱测定. 岩石学报,19(2):341~318.
作者不祥. 1972. 白云母伟晶岩的成因分类. 地质科技动态,9,19~24.
Barnes H L. 1979. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Second Edition. New York: John Wiley & Sons.
Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. Journal of Geophysical Research, B77, 3057~3067.
Parry W T. 1986. Estimation of X_{CO_2} , P, and fluid inclusion volume from fluid inclusion temperature measurement in the system CO_2 -NaCl-H₂O. Economic Geology, 81: 1009~1013.
Pedrosa A C, Lobato L M, Noce C M. 2000. Cambrian pegmatitic and hydrothermal mineral deposits: the last mineralization record prior to the south Atlantic opening in eastern Brazil. 31th IGC Abstract Volume, digital edition.

Mineralizing Fluid of the Danba Pegmatite—Type Muscovite Deposit, Sichuan

LI Jiankang¹⁾, WANG Denghong¹⁾, FU Xiaofang²⁾

1) *Institute of Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *Academe of Geological Survey, Sichuan Province, Chengdu, 610081*

Abstract

Danba muscovite pegmatite-type deposit in western Sichuan province is the second largest muscovite producing area. But the mineralizing mechanism is still stays in debate. Located at the the center part of the muscovite deposit in the northern Danba area, Buyigou gradually transfers from west to east migmatized metamorphic zone, partially-migmatized metamorphic zone to sillimazitized zone, along which Jiangjia, Xiajiangjia, Shuida and Erdaoqiao pegmatite mineralized veins are distributed. The peaking values of homogeneous temperature of fluid inclusions from these pegmatite veins along the WE-trending belt decrease; CO₂-H₂O inclusions decrease, but their salinity increases gradually. C, O and H isotopic analyses suggest that metallogenic fluid mainly consists of magmatic hydrothermal fluid with deep-sourced carbon, formation water, and CO₂ from decarburization. The ratios of CO₂/CH₄ and CO₂/N₂ from the above-mentioned veins from inward to outward are also decreasing. All these features indicate an evolution process of metallogenic fluid: magmatic hydrothermal fluid carrying carbon from deep mantle immigrated outward from the deep Chunmiuchang dome, mixed with CO₂ from decarburization at the partially-migmatized metamorphic zone, further was diluted by formation water at the sillimazitized zone; Therefore, the Danba muscovite deposit belongs to mixed genesis of magma and metamorphism.

Key words: fluid; muscovite; pegmatite; Danba