

哀牢山变质带丫口宝石伟晶岩形成 物理化学条件及成因研究*

李兆麟 李 文 杨荣勇 翟 伟

(中山大学地球科学系 广州)

提 要: 丫口宝石伟晶岩产于哀牢山南段二长花岗岩及变质岩中, 伟晶岩含熔融包裹体、熔融-流体包裹体、 CO_2 流体包裹体及气-液包裹体。成矿温度为 $1050 \sim 185^\circ\text{C}$, 压力 $30 \sim 45 \text{ MPa}$, 成矿溶液富含 CO_2 、 HCO_3^- , 盐度 $17 \sim 24\% \text{ NaCl}$, $f_{\text{O}_2} = 10^{-36} \sim 10^{-37.47}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围在 $7.9\text{‰} \sim 8.7\text{‰}$, δD 为 $-57\text{‰} \sim -68\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 为 $2.1\text{‰} \sim -0.1\text{‰}$ 。成矿物质来源于基底建造, 属变质深熔成因, 成矿时代为喜山期。

关键词: 哀牢山宝石伟晶岩 成矿物理化学条件 变质深熔成因

1 区域地质

丫口宝石伟晶岩产于云南哀牢山褶皱变质带南段, 区内出露地层主要为元古界哀牢山群变质岩, 并伴有印支-喜山期片麻状混合花岗岩和少量镁铁质超基性岩。该区构造变质岩浆杂岩带呈 NW-SE 向展布, 变质岩系自前晋宁期到喜山期经受多期的变质作用, 最强烈变质期为喜山期 ($17 \times 10^6 \sim 35 \times 10^6 \text{ a}$)。宝石伟晶岩主要产于该区古仰冲板块上陆壳高温低压带中, 多在哀牢山群变质岩中分布, 少部分在片麻状混合花岗岩中产出。伟晶岩产状多与区域构造线方向一致, 受区域变质作用控制。该区已发现宝石伟晶岩矿床多处, 形成二个宝石伟晶岩成矿带, 延伸 80 km 以上, 宽 $1 \sim 4 \text{ km}$, 成矿时代属喜山期 ($25.2 \times 10^6 \sim 27 \times 10^6 \text{ a}$)。

2 丫口宝石伟晶岩矿床地质特征

矿区出露地层为哀牢山群阿龙组斜长变粒岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长变粒岩、角闪片岩等, 组成单斜层。出露侵入岩有喜山期稿吾丫口片麻状花岗岩 (γ_6), 同位素年龄为 $26.2 \times 10^6 \text{ a}$ 。丫口出露的花岗岩主要为黑云母二长花岗岩, 经化学分析属铝过饱和系列, 岩体内外均有花岗伟晶岩分布, 据伟晶岩矿物共生组合及矿化关系可分为以下类型:

- (1) 伟晶岩分离体: 属早期伟晶岩类型, 在岩体中呈囊状、不规则状分布, 大小 (cm) $30 \times 20 \sim 20 \times 20$, 由黑云母、微斜长石、石英组成, 不含矿。
- (2) 黑云母微斜长石伟晶岩: 在岩体中产出, 脉宽 $1.5 \sim 2 \text{ m}$, 由黑云母、白云母、微斜长石和石英组成, 中粒结构, 分异性较差。
- (3) 含绿柱石、海蓝宝石、白云母、微斜长石伟晶岩: 是本区主要含矿伟晶岩, 在花岗岩体中产出, 脉宽 $1 \sim 3 \text{ m}$, 长 $10 \sim 50 \text{ m}$ 。由白云母、黑云母、微斜长石、石英组成, 脉中晶洞发育, 含黄玉、海蓝宝石及水晶。伟晶岩分异良好, 由外向内分为细晶岩带、长石石英文象带、云母长石石英带、块状微斜长石石英带。

* 国家自然科学基金 (49673189)、中山大学基础性研究前沿项目及南京大学成矿作用研究国家重点实验室基金资助
李兆麟, 男, 65 岁, 教授, 从事实验地球化学研究。邮政编码: 510275

(4) 长石石英伟晶岩: 成分简单, 缺乏分异作用, 不含矿, 产于变质岩及混合岩化花岗岩中, 脉宽 5~15 cm, 长 1~2 m, 主要由长石、石英组成, 含少量黑云母。

3 绿柱石及海兰宝石的矿物特征

绿柱石及海蓝宝石主要分布于第三类型伟晶岩中, 可分为三个世代: 第一世代绿柱石, 在伟晶岩中主要产于块状微斜长石石英组合中, 晶体粗大 (cm), $9.5 \times 4.5 \times 3.5 \sim 6 \times 3.5 \times 2.5$, 六方柱状, 部分晶体为六方柱集合体, 有纵面条纹及熔蚀现象, 色浅, 海蓝、淡绿色不透明; 第二世代绿柱石, 主要产于云母石英组合中, 六方柱、短柱状, 半透明, 大小 (cm) $1.5 \times 1.2 \times 1.2 \sim 3 \times 1.5 \times 1.5$, 个别长达 5.0 cm, 蓝绿色、淡绿色; 第三世代绿柱石及海蓝宝石在伟晶岩晶洞产出, 与水晶、黄玉及少量半透明的电气石共生, 晶体完好, 六方柱、六方锥状, 锥面发育, 大小 (cm) $1 \times 0.5 \times 0.3 \sim 5 \times 3 \times 3$, 色浅蓝、海蓝色, 透明度高, 达宝石级。

4 矿物中包裹体特征及类型

在绿柱石、海蓝宝石及水晶等矿物中广泛发育不同成因类型及相态特征的包裹体, 据包裹体相态特征、相比例可分为下列各类:

(1) 固体包裹体 (Csi): 主要为锆石和白云母。锆石为锥形、四方柱状, 多出现于第一世代的绿柱石, 锆石晶体中含熔融包裹体。白云母主要在第二世代绿柱石中分布, 包裹体属晶体生长过程机械捕获, 大小 (μm) $40 \times 10 \sim 2.5 \times n$ 。

(2) 熔融包裹体及流体熔融包裹体 ($A_{\text{si}} + C_{\text{si}}$, $A_{\text{si}} + G$, $A_{\text{si}} + C_{\text{si}} + G$, $A_{\text{si}} + C_{\text{si}} + L + G$ ①): 在晶体中多平行 C 轴, 长条形、圆形、不规则状。大小 (μm) $n \times n \sim 25 \times 25$, 相比例: A_{si} 100%~50%, C_{si} 30%~0%, L 10%~0%, G 30%~0%。在绿柱石中由第一到第三世代数量递减, 部分熔融包裹体中含流体 ($L = 5\% \sim 30\%$), 属流体-熔融包裹体, 相态特征为 $A_{\text{si}} + C_{\text{si}} + L + G$, 流体含量由一、二到第三世代绿柱石及海兰宝石增加。反映成矿介质中熔体含量在伟晶岩早期阶段较高, 往晚期演化减少, 而熔体中流体含量则增加, 伟晶岩浆性质属熔体-溶液。

(3) 熔融-流体包裹体 ($L + G + A_{\text{si}}$, $L + G + A_{\text{si}} + C_{\text{si}}$, $L + L_{\text{CO}_2} + G + C_{\text{si}}$, $L + L_{\text{CO}_2} + G + C_{\text{si}} + A_{\text{si}}$): L 85%~15%, L_{CO_2} 50%~0%, G 50%~25%, C_{si} 10%~0%, A_{si} 20%~0%。在绿柱石及海蓝宝石中均有分布, 其中以第三世代为最多。 $L + L_{\text{CO}_2} + G$ ($A_{\text{si}} + C_{\text{si}}$, 且常含 L_{CO_2} , 反映出介质属富含 CO_2 的熔融-流体。包裹体常平行 C 轴分布, 长条形、负晶形态, 短柱状, 大小 (μm) $120 \times 10 \sim 10 \times 10$, 由一、二世代到第三世代绿柱石, 包裹体体积及数量均增加。

(4) 含 CO_2 气-液相包裹体 ($L + L_{\text{CO}_2} + G$, $L + G_{\text{CO}_2}$, $G + L_{\text{CO}_2} + L$, $G + L + L_{\text{CO}_2}$, $L_{\text{CO}_2} + L + G + C_{\text{NaCl}}$): L 85%~15%, L_{CO_2} 40%~0%, G 60%~15%, 大小 (μm) $320 \times 100 \sim 10 \times 10$, 多平行 C 轴或成群分布, 负晶形, 不规则状、长条形。此类包裹体在绿柱石、海蓝宝石、石英中广泛分布, 且由一世代到第三世代绿柱石、海蓝宝石, 其体积和数量均增加, CO_2 含量也增加, 反映出成矿流体从早期到晚期演化阶段, 介质中 CO_2 含量增加, 晶洞中海蓝宝石、水晶、黄玉是在富 CO_2 流体介质中形成。

(5) 气-液相包裹体 ($L + G$, $G + L$, $L + G + C_{\text{NaCl}}$): L 90%~20%, G 70%~10%, C_{NaCl} 25%~0%, 在伟晶岩各类矿物中广泛分布, 据相态比例可分为液相、气相及三相包裹体, 以液相居多。在水晶中常见含 NaCl 子晶三相包裹体, 其分布及大小与含 CO_2 气-液相包裹体相同, 局部出现沸腾包裹体, 矿物中次生包裹体多以液相包裹体为主。

① C—结晶质; A—非晶质; G—气相; L—液相; Si—硅酸盐

5 成矿流体成分

不同世代绿柱石、海蓝宝石成矿溶液及变质岩脉石英变质流体 pH 值变化在 7.24~6.87, 均高于 H_2O 的 pH 值 (6.82), 表明成矿溶液及变质流体为碱性。绿柱石电导率为 $7.6\sim 4.9\ \mu V/cm$, 由一、二世代到三世代下降, 变质流体较高, 为 $28.3\ \mu V/cm$, 阳离子 (R^+ 、 R^{2+}) 总量为 $5.998\times 10^{-6}\sim 0.904\times 10^{-6}$, 按含量高低 $Ca^{2+}>Na^+>Mg^{2+}>K^+>Fe^{2+}$, Na/K 为 $3.176\sim 1.272$, 其中一、二世代绿柱石比三世代高, 表明晶洞中流体碱度下降。变质流体阳离子总量比伟晶岩成矿流体高近 4 倍, 含量变化顺序二者相似, Ca^{2+} 含量高, 与围岩性质有密切关系。

成矿溶液及变质流体阴离子 (R^-) 总量变化在 $2.66\times 10^{-6}\sim 15.11\times 10^{-6}$, 由一世代到三世代绿柱石有规律下降, 而变质流体 (ΣR^-) 比成矿溶液高近 3~5 倍, 二者按阴离子含量大小顺序为 $HCO_3^->SO_4^{2-}>Cl^->F^-$, 二者具相似性, HCO_3^-/SO_4^{2-} 为 $2.17\sim 1.18$, HCO_3^-/F^- 为 $1.267\sim 4.862$ 。在二、三世代绿柱石部分样品为 $SO_4^{2-}>HCO_3^->Cl^->F^-$, SO_4^{2-}/HCO_3^- 为 $1.107\sim 2.376$, SO_4^{2-}/F^- 为 $1.159\sim 2.907$, 反映出成矿溶液阴离子主要为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} , 故属 $Ca^{2+}-Na^+-K^+-HCO_3^--SO_4^{2-}-Cl^- -F^-$ 体系。

绿柱石、海蓝宝石及变质岩脉石英包裹体气体总量为 $48.38\sim 210.74\ ml/100g$, $H_2O>CO_2>CO>C_6H_6$, 微量气体以 CO_2 为主, 与成矿溶液及变质流体富 HCO_3^- 相一致, 属富 CO_2 流体。在绿柱石、海蓝宝石中气体总量为 $48.38\sim 99.14\ ml/100g$, 第一、二世代高于三世代。而变质岩脉石英中气体总量为 $210.7\ ml/100g$, 比伟晶岩各世代绿柱石高 2~3 倍, 二者均含 C_6H_6 有机质, 且前者比后者高一倍, 表明变质作用与伟晶岩成矿作用具亲缘关系。

6 成矿温度、压力、盐度及热力学参数

绿柱石、海蓝宝石及水晶包裹体均一温度列于表 1。不同矿物各类型原生包裹体温度变化在 $1050\sim 185\ ^\circ C$, 可视为本区宝石伟晶岩形成温度范围。其中不同世代绿柱石及海蓝宝石中熔融包裹体均一温度为 $873\sim 1050\ ^\circ C$; 熔融-流体包裹体均一温度变化较大, $586\sim 1050\ ^\circ C$, 其温度介于熔融体与气-液相之间; 气-液包裹体均一温度变化在 $487\sim 185\ ^\circ C$, 由第一世代到第三世代绿柱石, 温度有明显下降规律; 水晶气液包裹体与第三世代绿柱石、海蓝宝石相似 ($445\sim 190\ ^\circ C$)。上述均一温度反映出伟晶岩浆演化过程由熔体 $\rightarrow$ 熔体-流体 $\rightarrow$ 流体的结晶温度为 ($1050\sim 873\ ^\circ C\rightarrow 1050\sim 450\ ^\circ C\rightarrow 487\sim 180\ ^\circ C$)。

表 1 伟晶岩矿物包裹体均一温度

主矿物	包裹体类型	$t_{CO_2}/^\circ C$	$t_f/^\circ C$	$t_h/^\circ C$	主要范围	平均 (个数)
一代世 绿柱石	熔融包裹体			933~1013	933~990	973 (7)
	熔融-流体包裹体			885~990		962 (5)
	气-液包裹体			305~487		461 (8)
二世代 绿柱石	熔融包裹体			865~1050		980 (12)
	熔融-流体包裹体		310~680	586~1050		810 (10)
	气-液包裹体	31		290~487	318~487	450 (8)
三世代 绿柱石 及海蓝 宝石	熔融包裹体			873~1050		986 (10)
	熔融-流体包裹体		390~450	450~1050		770 (7)
	气-液包裹体	29~30		185~29	320~430	360 (7)
晶洞	气相气液包裹体		190~409	340~445		430 (5)
水晶	气-液包裹体	28~29.5		190~438	360~433	366 (10)

注: t_{CO_2} — CO_2 部分均一温度; t_f —流体部分均一温度; t_h —完全均一温度

气-液包裹体成矿压力为 $300 \times 10^5 \sim 450 \times 10^5$ Pa, 氧逸度 $f_{O_2} = 10^{-31.6} \sim 10^{-37.47}$, 表明成矿作用是在中等压力, 约 1~2 km 深, 较还原条件下进行。本区不同世代绿柱石、海蓝宝石成矿溶液冰点分别为: 第一世代 $-15 \sim -33.5$ °C, 第二世代 $-13 \sim -23$ °C, 第三世代 $-15 \sim -21$ °C, 盐度约为 17%~25% NaCl; 水晶为 $-6 \sim -15$ °C, 盐度约为 9%~18% NaCl, 部分水晶中含 NaCl 子晶达 5%, 表明本区成矿溶液盐度较高。

7 同位素特征

本区花岗岩 $\delta^{18}O$ 为 10.36‰~11.22‰, 变质岩 $\delta^{18}O$ 为 11.67‰~12.58‰, 二者相近似, 花岗岩属 S 型, 物质来源与沉积变质岩相关。伟晶岩不同世代绿柱石、海蓝宝石及水晶 δD 为 -57 ‰~ -68 ‰, $\delta^{18}O$ 为 7.9‰~8.7‰, 将矿物包裹体水 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值和 δD 值一同投影于 $\delta^{18}O$ - δD 关系图上, 其成矿流体氢氧同位素组成落入原始岩浆水区。碳同位素分析表明, 伟晶岩绿柱石、石英碳同位素 $\delta^{13}C_{PDB}$ 变化为 0.1‰~2.1‰, 与南非地盾沉积岩系中海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值 -3.3 ‰~ -2.5 ‰相似, 故伟晶岩浆来源与沉积变质岩相关, 伟晶岩可能由沉积变质岩经变质深熔作用形成的独立伟晶岩浆侵入而成。

8 矿床成因

哀牢山丫口宝石伟晶岩研究程度较低, 孙克祥等(1986)认为与花岗岩具成因关系。本文对该区伟晶岩进行元素地球化学、同位素及实验地球化学综合研究基础上提出属变质深熔成因。其理由如下: ① 伟晶岩形成温度较高, 达 $1050 \sim 865$ °C, 与华南不同类型含矿花岗岩锆石中熔融包裹体均一温度 $1200 \sim 950$ °C 相近似^[1,2], 属花岗岩浆早期结晶温度; ② 伟晶岩包裹体类型反映出独立伟晶岩浆经熔融体→熔融-流体→流体演化阶段, 伟晶岩浆属熔体-溶液性质(富含挥发性组分的流体)。③ 伟晶岩成矿流体与变质流体具明显相似性, 二者同属富 CO_2 流体, 其组分特征、含量变化规律极为相似, 同属 Ca^{2+} - Na^+ - K^+ - HCO_3^- - SO_4^{2-} - Cl^- - F^- 体系。④ H、O、C 同位素分析成果表明, 伟晶岩成矿流体物质来源与沉积变质岩相关。⑤ 变质岩、花岗岩、绿柱石及变质石英脉的稀土配分曲线型态具相似性, 证明物质来源相同。基于上述各点, 证明伟晶岩物质来源于哀牢山群变质岩, 经历多期变质作用, 尤其是喜山期变质作用, 沉积变质岩在强烈变质及深熔作用条件下, 重熔形成富水、挥发分的独立伟晶岩浆, 沿构造裂隙侵入形成含宝石伟晶岩, 属变质深熔成因。

本文工作中得到赵梅芳、蒋浩深、黄跃生高级工程师, 刘继川、石贵勇、裘丽雯及李振敏工程师的帮助, 特表谢忱。

参 考 文 献

- 1 李兆麟, 杨荣勇, 李文. 不同成因伟晶岩流体形成演化与成矿关系, 南京大学学报(自然科学版, 地质流体及成矿作用专辑), 1997, 33: 34~52.
- 2 李兆麟, 岩浆岩矿物中硅酸盐熔融包裹体研究, 中山大学学报, 1994, 33: 82~94.