

四川雪宝顶白钨矿稀土地球化学与 Sm-Nd 同位素定年

刘 琰 邓 军 李潮峰 施光海* 郑爱力

(中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029.

* 联系人, E-mail: shigh@cugb.edu.cn)

摘要 产于四川雪宝顶的白钨矿晶体大、晶形好, 是研究非金矿中的白钨矿中稀土配分型式及 Sm-Nd 同位素体系的理想研究对象。该区白钨矿为橙红色单晶体, 与绿柱石、锡石和白云母共生, 粒径为 1~10 cm。研究结果显示, 雪宝顶矿床中白钨矿稀土总量较高($275\sim 534\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 其稀土配分型式为无 MREE 富集的平坦型, 与 Ghaderi 等人划分的白钨矿型稀土配分型式总体类似, 但具负铈异常, 并且有与 A 型花岗岩较为相似的四分组效应。结合已报道过的包裹体测温资料, 雪宝顶白钨矿成矿流体主要为低钠流体, 其稀土配分型式推测取决于热液中稀土的分配系数, 而非晶体化学因素控制, 其成矿热液很可能源自其矿区附近的研究程度较低的碱性花岗岩。在白钨矿的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解中, 对应的等时线年龄为 $(182.0 \pm 9.2)\text{ Ma}$, $\text{MSWD} = 0.52$, 是白钨矿的形成年龄, 代表了雪宝顶 W-Sn-Be 矿的主成矿年龄, 属于燕山早期。本次白钨矿 Sm-Nd 同位素等时线年龄研究结果进一步明确了雪宝顶 W-Sn-Be 矿成矿年龄, 为研究川西稀有金属矿床成矿年龄及松潘-甘孜造山带的成矿时空特征提供了可靠和有用的数据。

关键词 白钨矿 REE Sm/Nd 同位素 W-Sn-Be 矿床 四川雪宝顶

自 Fryer 等人^[1]首次利用 Sm-Nd 同位素方法对热液矿床进行定年以来, 该同位素体系被广泛应用于金属矿床的同位素年代学研究, 萤石、黑钨矿、电气石、方解石等热液矿物的同位素体系相继成为研究的对象^[2~14]。作为钙矿物的白钨矿, 其所含稀土元素主要替代晶格中 Ca^{2+} , 被认为存在于封闭体系内而可以进行 Sm-Nd 同位素体系年龄测定。自 20 世纪 80 年代以来, 国内外学者对金矿床中的白钨矿 Sm-Nd 同位素体系进行了研究, 用以约束金矿化的时间从而探讨矿床成因, 特别是含有白钨矿的太古代—早元古代绿岩带型金矿床^[12~19]。然而, 对于非金矿床中白钨矿的稀土元素特征和 Sm-Nd 同位素特征目前尚无相应研究。产于四川雪宝顶的白钨矿晶体大、晶形好, 是研究非金矿中的白钨矿 Sm-Nd 同位素体系的理想研究对象。

四川平武雪宝顶 W-Sn-Be 矿床以盛产白钨矿、锡石、绿柱石、萤石、云母、磷灰石、锆黄锡矿、水晶、长石等晶体而著称, 这些矿物晶体绝大多数十分精美, 在国际矿物晶体矿床中享有很高的知名度, 与单纯提取 W-Sn-Be 等金属的矿床明显不同。目前仅有对于该区的绿柱石矿物学和花岗岩地球化学等方

面的研究, 雪宝顶 W-Sn-Be 矿与其他类似矿床的稀土地球化学研究多限于矿石和围岩, 对单矿物, 尤其是白钨矿的研究很少^[20~24]。对于该区的成矿年龄研究方面, 获得石英的等时线年龄约 $(186.9 \pm 0.12)\text{ Ma}$ ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法)^[20]。岩相学观察显示矿区中石英成因具多期性并在不同矿物分带中均有出现, 同一世代石英中的包裹体也有同生与次生之分, 其用于定年的石英产状在其文中未描述, 因此石英的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄能否代表成矿年龄尚需要商榷。

本次研究以雪宝顶 W-Sn-Be 矿中的白钨矿单晶体为研究对象, 用 ICP-MS 等测试分析了白钨矿的稀土元素含量, 通过白钨矿的稀土配分型式分析了白钨矿的物质来源、成矿环境和矿源区特征; 测试了 Sm-Nd 同位素组成并计算了相应的年龄, 讨论了该年龄的意义。

1 地质背景及样品特征

本次研究样品采自于蒲口岭和哗哗水一带的绿柱石、白钨矿和锡石矿区($32^{\circ}36.8'\text{N}$, $103^{\circ}56.4'\text{E}$, 海拔大于 4000 m, GPS 定位), 矿区位于摩天岭东西向复杂构造带磨子坪——上纳米倒转复式向斜核部的

紫柏杉穹窿构造中(图 1)。穹窿核部出露有 4 个碱性花岗岩体, 它们侵入三叠统杂谷脑组下段地层中。杂谷脑组下段为浅变质岩系千枚岩和大理岩, 自下而上分为 8 层: 灰色钙质千枚岩; 灰色绢云母千枚岩夹含钙炭质绢云母千枚岩; 灰白色薄层大理岩; 炭质绢云母千枚岩; 灰白色厚层状粗晶大理岩, 为含矿石英脉之围岩; 灰白色薄层大理岩夹绢云母石英千枚岩; 绿灰色含绿泥石石英千枚岩夹黑云母千枚岩和薄层大理层; 灰绿、灰色铁质石英千枚岩, 绢云母石英千枚岩。其中第 5 层张节理发育, 为成矿流体的迁移和沉淀提供了良好的空间, 为含矿岩层, 其厚度 0~22 m。

矿区中已知矿脉有 40 多条, 每条长数十米, 厚 0.05~1.5 m, 厚度变化大。大多数矿脉发育有明显的

带状构造, 从围岩向外分带依次是: 白云母化-萤石化大理岩带, 含少量白钨矿、萤石和绿柱石, 其厚度不均匀, 在 1~10 cm 之间; 萤石-石英带, 为白钨矿、萤石、绿柱石等有用矿物的富集带; 石英带, 几乎全部由石英构成。其中绿柱石、白钨矿、锡石常呈团块状或晶簇状赋存于中间带。矿石矿物为绿柱石、白钨矿、锡石及少量硫化物, 脉石矿物为石英, 次为白云母、长石、萤石等。白钨矿晶体主要为黄褐-橙红色, 经过晶体测角, 本区白钨矿晶体主要有四方双锥 $p\{111\}$, 个别样品出现 $\beta\{113\}$ 和 $e\{101\}$ 四方双锥。白钨矿晶体一般粒径为 1~3 cm, 部分可达 10~15 cm(约 8~9 kg)。本文研究样品采于第二带, 即白钨矿、萤石、绿柱石等有用矿物的富集带。白钨矿手标本如图 2。在中国科学院地质与地球物理研究所用 JXA-8100 EPMA 获得电子背散射图像, 结果显示内部成分均匀, 无明显环带, 未见任何生长间断(图 3)。

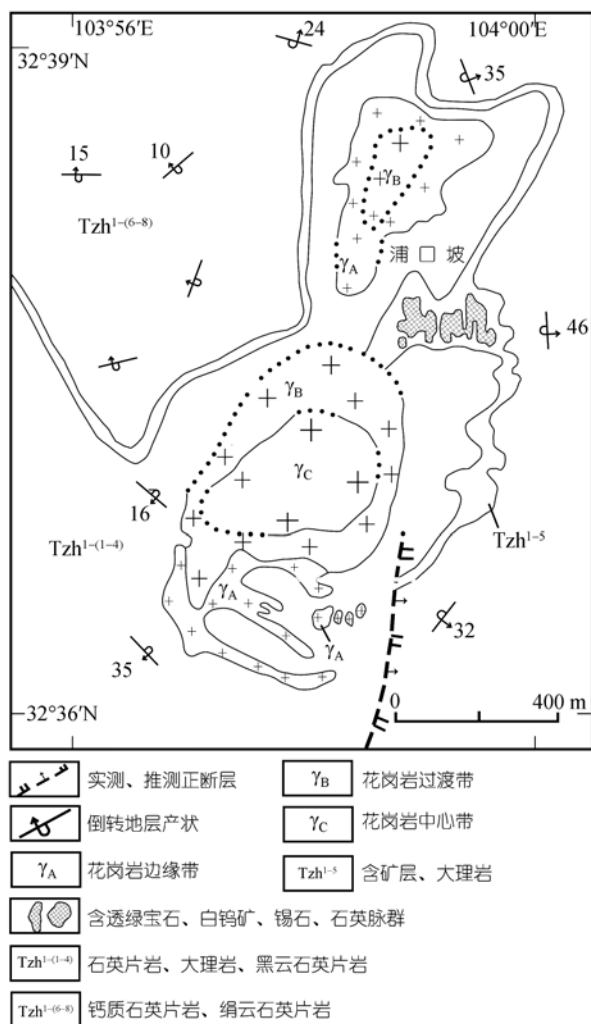


图 1 四川雪宝顶矿区 W-Sn-Be 矿区地质图

据文献 [23], 有改动

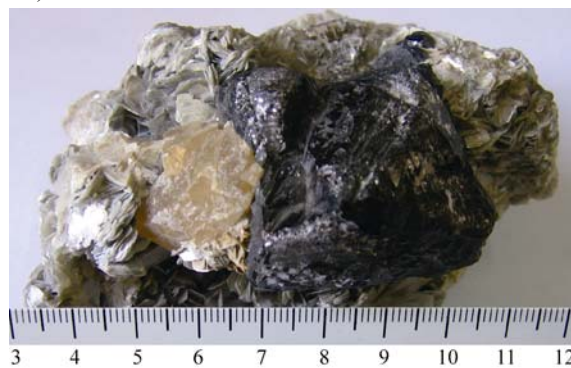


图 2 雪宝顶白钨矿手标本照片

橙黄四方双锥晶体为白钨矿, 黑色部分为锡石, 白色片状矿物为白云母, 在其周围有绿柱石、钾长石、电气石、石英等。标尺单位: cm

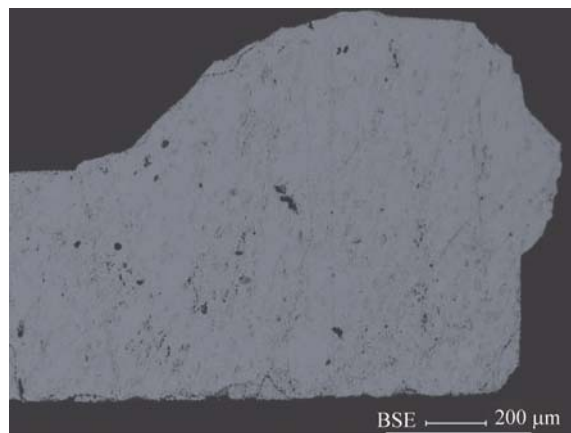


图 3 四川雪宝顶 W-Sn-Be 矿白钨矿背散射电子图片

显示其内成分均匀, 没有明显成分间断

2 测试方法

近年来高温、长时间的封闭酸溶法处理样品得到较广泛的应用 [25~28], 但对于白钨矿需要反复长时间溶解. 以往多采用 $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 9:2$ 的混合酸溶液溶解白钨矿, 需要加热至 150 并保持 72 h 的溶样时间, 或 $\text{HF}-\text{HNO}_3-\text{HCl}-\text{HClO}_4$ 四酸溶样法, 溶解效果都不理想. 用 LiBO_2 碱熔法, 可有效分解白钨矿, 但溶解过程会造成盐量过多, 形成高 Li, B 背景值, 并影响到待测元素的精度与准确度 [29]. 考虑到本次研究样品白钨矿的稀土含量较高, 为了更有利于稀土元素的分离, 本次研究采用 Na_2O_2 碱熔法溶解白钨矿, 因为 Na_2O_2 碱熔法溶解后的白钨矿更有利于稀土的单独分离 [30~32].

样品制备在净化实验室的超净工作台内完成. 挑选第二生长带内大颗粒 (2~5 cm) 白钨矿单晶体 24 个, 破碎到 200 目以下, 称好样品按 1:10 的质量比覆盖 Na_2O_2 , 混匀后放置于热解石墨坩埚中. 后将石墨坩埚放在瓷坩埚中, 置入 700 的马弗炉中加热 15 min. 稍冷后取出, 放置于 80 mL 纯净水中 24 h. 提取液经由 42 号紧密滤纸过滤, 用 6 mol/L 热 HCl 溶解沉淀, 再用 0.3 mol/L 热 HCl 定容.

白钨矿稀土测试在中国地质科学院国家测试中心完成, 仪器采用 TJA(VG)PQ ExCell ICP-MS, 分析误差 <10%, 代表性测试结果和其特征参数见表 1. 文中球粒陨石标准化的 REE 数据依据 Boynton [33]. 从 24 件稀土测试结果中挑选 Sm/Nd 比值差别大的 4 个样品进行 Sm 和 Nd 同位素测试, 以求获得比较理想的等时线图. 样品的 Sm, Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所进行. 分离 Sm 和 Nd 用萃淋树脂离子交换柱法, 用高纯水洗涤 Sm-Nd 交换柱 (P507) 内壁后加入纯化 3.0 mol/L HCl 酸再生交换柱, 加入纯水洗至中性后加入纯化 30.1 mol/L HCl 酸使交换柱 pH 与样品溶液相当. 用纯化 3.0 mol/L HCl 酸溶解提取稀土接收液并将稀土溶液加入交换柱. 用纯化 0.1 mol/L HCl 酸洗涤交换柱内壁 4 次并加入 2.8 mL 纯化 0.1 mol/L HCl 酸淋滤交换柱后加入纯化 0.2 mol/L HCl 酸淋洗并接受 Nd, 加入纯化 0.4 mol/L HCl 酸淋洗并接受 Sm. 实验全流程空白 $\text{Sm} = 7 \times 10^{-11}$, $\text{Nd} = 8 \times 10^{-11}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511838 \pm 8 \times 10^{-6}$. 在电热板上加热蒸干 Sm, Nd 接收液, 蒸干时将样品集中于一点, 以便质谱测定试点样. Sm, Nd 含量采用同位素稀释法, Nd 同位素比值是对提纯的样品直接测定.

白钨矿年龄值采用 ISOPLOT 软件计算, 分析结果见表 2.

3 结果

3.1 稀土元素特征

雪宝顶白钨矿稀土元素总含量较高, 变化范围较大 ($\Sigma\text{REE}: 275 \sim 534 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ 为 $(369 \sim 1076 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$ (表 1). 从球粒陨石标准化稀土配分型式曲线 (图 4) 可以看出, 雪宝顶白钨矿的 REE 球粒陨石标准化配分型式曲线总体上呈现轻稀土 (LREE) 略富集, 重稀土 (HREE) 略亏损的较平缓过渡的配分型式. 白钨矿未表现出明显的 Ce 异常, δCe 为 0.87~1.11, 而 Eu 均表现出较明显的负异常, δEu 为 0.41~0.94.

3.2 Sm-Nd 年龄

白钨矿样品的 Sm 和 Nd 含量及其同位素组成见表 2, 白钨矿晶体 Sm 和 Nd 含量分别为 $3.317 \sim 37.92$ 和 $15.27 \sim 105.4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 白钨矿的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值变化范围分别为 0.1504~0.5461, 0.51988~0.512457 (图 5). 利用 ISOPLOT 程序, 计算其等时线年龄为 $(182.0 \pm 9.2) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.52$), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值为 (0.511807 ± 0.000022) , 对应的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -11.6$.

4 讨论与结论

4.1 雪宝顶白钨矿稀土特征及成因分析

雪宝顶白钨矿的稀土元素总含量 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ ($369 \sim 1302 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 明显高于湘西沃溪金锑钨矿白钨矿 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ ($40.5 \sim 123.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 含量 [34], 并且略高于滇东南南秧田砂卡岩型和石英脉型多金属矿床中白钨矿的 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ ($96 \sim 252 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 含量 [35], 但低于大坪金矿中白钨矿的 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ ($1760 \sim 2004 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 含量 [34], 而在西澳大利亚太古代绿岩带型金矿中白钨矿的 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ 含量 ($288 \sim 4377 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 变化范围之内 [19]. 雪宝顶白钨矿中 Y 的含量 $94.2 \sim 649 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量 $346 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 明显高于湘西沃溪金锑钨矿白钨矿和滇东南南秧田砂卡岩型和石英脉型多金属矿床中白钨矿中 Y 含量. 雪宝顶白钨矿具中等程度的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.44 \sim 0.51$), 这明显有别于其他地区的白钨矿, 如大坪白钨矿 δEu (1.23~1.57) [36], 沃溪白钨矿的 δEu (0.92~1.75) 及西澳大利亚太古代绿岩带型金矿中白钨矿的 δEu 值 [19,34].

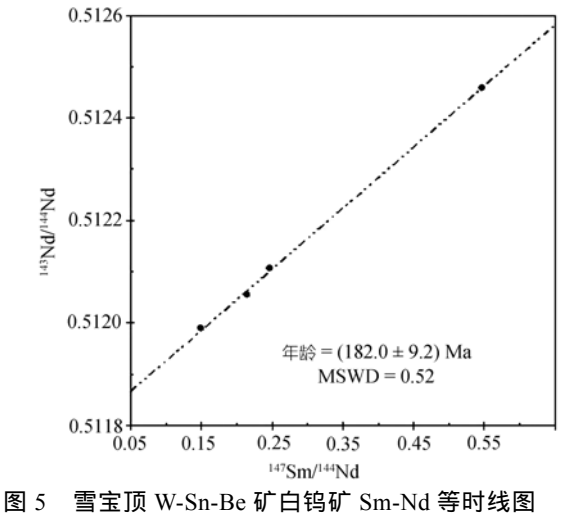
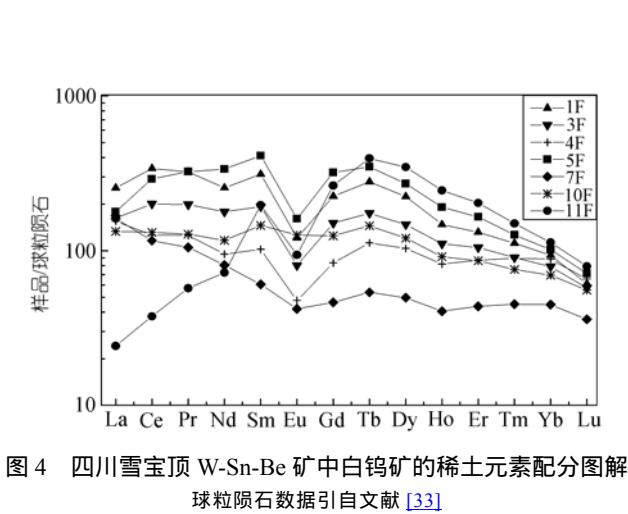
Gharderi 等人 [18] 曾根据西澳 Kalgoorlie-Norsman 地区太古代热液金矿中白钨矿的稀土配分型式将其

表 1 四川雪宝顶 W-Sn-Be 矿白钨矿稀土元素含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

样品号	1F	3F	4F	5F	7F	10F	11F	平均值
La	78.8	50.3	48.0	55.3	49.9	41.3	7.51	47.3
Ce	274	162	102	235	93.8	106	30.4	143
Pr	39.4	24.2	15.3	39.5	12.8	15.6	6.97	22.0
Nd	153	107	56.9	202	48.4	69.9	43.3	97.2
Sm	60.8	37.5	19.9	80.1	11.8	28.4	38.4	39.6
Eu	8.89	5.90	3.50	11.8	3.09	9.29	6.90	7.05
Gd	58.1	39.0	21.6	82.9	12.0	32.3	68.2	44.9
Tb	13.2	8.27	5.32	16.5	2.55	6.86	18.7	10.2
Dy	74.2	48.9	34.3	90.0	16.5	40.0	115	59.8
Ho	10.6	7.95	5.89	13.7	2.92	6.57	17.6	9.32
Er	27.6	22.0	18.2	34.7	9.18	18.1	42.7	24.6
Tm	3.62	2.92	2.90	4.10	1.46	2.45	4.86	3.19
Yb	19.5	16.5	18.4	21.2	9.36	14.5	23.6	17.6
Lu	1.97	1.85	2.11	2.29	1.16	1.79	2.55	1.96
Y	365	313	350	413	94.2	238	649	346
$\Sigma\text{REE}+\text{Y}$	1189	847	704	1302	369	631	1725	967
ΣREE	824	534	354	888	275	393	1076	621
LREE	615	387	246	624	220	270	133	356
HREE	574	460	459	678	149	361	942	518
LREE/HREE	1.07	0.84	0.54	0.92	1.47	0.75	0.14	0.82
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	2.72	2.06	1.76	1.76	3.59	1.92	0.21	2.00
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	0.82	0.84	1.52	0.43	2.66	0.91	0.12	1.04
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	2.40	1.91	0.95	3.16	13.43	0.11	2.33	3.47
δEu	0.45	0.47	0.51	0.44	0.79	0.94	0.41	0.57
δCe	1.18	1.11	0.90	1.16	0.87	1.00	0.92	1.02

表 2 四川雪宝顶 W-Sn-Be 矿白钨矿 Sm-Nd 同位素组成

样号	Sm/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Nd/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$
3F	37.41	105.4	0.2146	0.512054	11
7F	12.60	50.64	0.1504	0.511988	11
10F	28.84	70.83	0.2461	0.512107	14
11F	37.92	41.98	0.5461	0.512457	11



分为两种类型: MREE富集型(型)和无MREE富集的平坦型(型), 认为 型稀土配分型式的白钨矿形成于富钠的环境中并受晶体化学因素控制; 型白钨矿稀土配分型式取决于热液中稀土的配分系数, 目前 型和 型分类法已被广泛采用 [18,19,36]。然而, 雪宝顶白钨矿的稀土配分型式与其他地区的白钨矿相比, 显得较为独特, 为钨负异常的无MREE富集的平坦型; 其稀土配分型式与出现频率较多的 型(MREE富集型)明显不同, 与 型(无MREE富集的平坦型)相比, 其型式虽然平坦, 但其不具有平坦型中常见的Eu正异常。我国其他地区的白钨矿, 如湘西沃溪金锑钨矿白钨矿、大坪金矿中白钨矿、南秧田白钨矿, 它们的稀土配分型式都为MREE富集型 [34~36]。西澳大利亚太古代绿岩带型金矿中白钨矿的既有 型, 也有 型 [12]。与西澳大利亚太古代绿岩带型金矿中白钨矿的 型稀土配分型式相比, 雪宝顶白钨矿的轻稀土渐降型式不明显, 重稀土则有渐降趋势, 并有较为明显的四分组效应的稀土配分型式, 而这一特征与一些A型花岗岩相似 [37~41]。

已有研究结果显示: 雪宝顶绿柱石-白钨矿矿床流体实测盐度变化范围为 1.03%~15.0% (NaCl), 90% 以上的数据低于 10%(NaCl), 与成矿流体属于低盐度的NaCl-CO₂-H₂O体系相一致 [20]。野外观察中也没有发现有含钠矿物(如钠长石等)与白钨矿密切共生, 说明雪宝顶白钨矿形成于低钠的环境中, 其稀土配分型式取决于热液中稀土的分配系数, 而非晶体化学因素控制。因此雪宝顶白钨矿与A型花岗岩相似具有较为明显的四分组效应的稀土配分型的特征显然是受其成矿热液中稀土的分配系数控制。雪宝顶白钨矿的稀土配分型式揭示了形成W-Sn-Be矿的成矿热液很可能源自其矿区附近的花岗岩。出露于该区的 4 个岩体的稀土配分型式均表现出明显的钨负异常(图 6), 特别是白钨矿成矿主要产于浦口坡和盘口草地两个花岗岩与大理岩的接触带中, 这些花岗岩的稀土配分曲线呈现明显的Eu负异常和明显的四分组效应(图 6) [21~23], 与雪宝顶白钨矿的稀土配分型较为相似。这种近程的相似性可能正是这二者有成因联系的反映。已有的微量元素地球化学特征从另一方面说明二者可能存在成因上的联系。该区花岗岩富碱, 富含Be, W, Sn等稀有元素(富集系数达 13~100), 为Be, W, Sn矿化提供了丰富的成矿物质来源, 岩体中的WO₃²⁻含量普遍较高, 有时可达 0.03%~

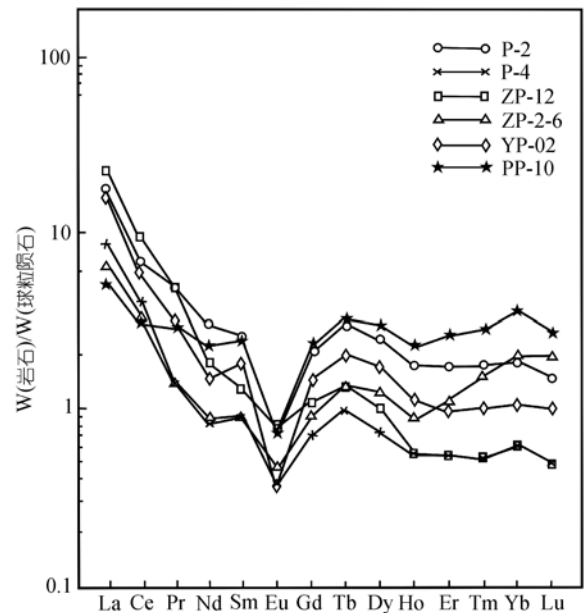


图 6 平武花岗岩稀土元素配分曲线 (据文献 [21])

0.3% [20~22], 推测其可能是白钨矿的含矿母岩。

4.2 主成矿时代

用于 Sm-Nd 同位素定年的第二带白钨矿晶体内部成分均匀, 无环带和生长间断特征出现, 因而其 Sm-Nd 同位素等时线年龄代表了白钨矿的形成时间, 其主成矿年龄为 182 Ma, 即形成于早侏罗纪。由于在矿脉中第二带中白钨矿与锡石、绿柱石等矿物密切共生, 为主要成矿阶段, 由此可以认定白钨矿的主成矿年龄能够用来代表雪宝顶 W-Sn-Be 矿稀有金属床的主成矿年龄。

由于该矿区的矿床较为特殊, 尽管矿区所在位置的区域地质研究程度很低, 但关于该矿的研究目前已成为一个热点, 并因此而产生一些争议。前已述及已有的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar快中子活化法定年作为该矿的成矿年龄值得商榷。前人的研究 [20~24]及我们的观察发现, 该矿区的石英在 3 个带中均有出现, 分带性很明显, 且第一、三矿带矿化很弱。显然, 如果用于测年的石英是产自第二带即主成矿带, 其年龄能够代表主成矿年龄, 但遗憾的是, 上述作者并没有对其用于测年的石英产状进行描述。另外, 该区较早形成的白云母长英质脉 (不含矿)边沿有叠加了白云母石英脉 (含白钨矿), 花岗岩体中也含有石英脉及长英质脉, 含石英的矿物共生组合甚多, 因此仅用石英来代替成矿年龄有很大局限性。由于形成石英的P-T条件跨度很大, 不同位置的石英其形成阶段上则可能相差

若干个世代。因此,没有产状约束的石英 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法定年数据的解释具有多种可能性,而不能直接作为成主矿年龄。本次雪宝顶白钨矿成矿年龄的测定和雪宝顶W-Sn-Be矿稀有金属床的主成矿年龄的确定,为进一步研究雪宝顶稀有金属矿床提供了依据和资料。

4.3 意义

对雪宝顶W-Sn-Be矿床中白钨矿的稀土地球化学特征和主成矿时间的研究有助于进一步认识矿床成因、区域构造和地球动力学背景和松潘-甘孜造山带形成过程。由于雪宝顶白钨矿的REE配分型式为受热液中稀土的分配系数控制的型,其组成与型式则能间接地反映其源区特征。白钨矿与A型花岗岩类似的配分型式与该区存在碱性花岗岩这一背景具有很好的一致性,说明这二者极有可能存在直接或间接的成因关系。已有研究成果显示该区碱性花岗岩的稀土配分型式与A型花岗岩的极为类似,遗憾的是作者没有作相应工作以证实,从构造特征上分析,其可能为造山后的A型花岗岩^[37]。A型花岗岩往往与W-Sn-Be矿床的矿化有关,钨矿化以黑钨矿为主^[42-44],与本处的成矿类型略有不同。本区的W-Sn-Be矿床很可能是与A型花岗岩相关的一种新类型的矿床。

白钨矿Sm-Nd同位素等时线年龄给出了约182 Ma的主成矿年龄。在该区的石英测年结果虽然没有给出采样位置,但从其测年数据(186.9 ± 0.2) Ma来看,其样品的位置很可能与我们所测样品位置相同^[20],这说明本次测试的矿化时间数据具有较高的可信度。关于紫柏杉穹隆碱性花岗岩体的成岩年龄,目前报道年龄有两个,分别为黑云母K-Ar年龄值224 Ma和白云母的K-Ar年龄值164 Ma^[45]。这两个数据出现约60 Ma差值,有两种可能的解释:一是测年的准确度有问题,二是该区可能存在上述两期花岗岩的成岩作用。

从三叠纪末古特提斯洋和阿尼玛卿洋封闭,到第三纪新特提斯洋闭合、喜马拉雅运动开始的这段时期内,松潘-甘孜造山带经历了复杂的地质过程。松潘-甘孜的造山过程、演化历史、板块构造动力学和成矿过程一直备受关注^[46,47]。松潘-甘孜造山带矿产种类多,资源丰富,但成矿过程与造山带演化之间的联系还有待深入研究。因此,对松潘-甘孜造山带稀有金属矿床进行准确地成岩成矿定年和时空分布的

研究对于研究松潘-甘孜造山带的造山过程和矿床成因具有重要的科学意义,同时结合成矿流体特征、成矿动力学研究和构造环境重塑研究^[48,49]有助于该区的矿产资源勘查和开发。

致谢 同位素年龄测定和背散射电子图像获得分别得到了中国科学院地质与地球物理研究所陈福坤、储著银、英吉丰、毛骞及马玉光的帮助和支持。审稿人建设性的评审意见对本文提高有很大帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Fryer B J, Taylor R P. Sm-Nd directs dating of the Collins Bay hydrothermal uranium deposit, Saskatchewan. *Geology*, 1984, 12: 479—482[DOI]
- 2 Jiang S Y, Slack J F, Palmer M R. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia. *Geology*, 2000, 28: 751—754[DOI]
- 3 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 北京密云沙厂环斑花岗岩杂岩体钨矿钇-钽同位素研究. *地质论评*, 2002, 48(1): 29—33
- 4 Nie F J, Bjørlykke A B, Nilsen K S. The origin of the Proterozoic Bidjovagge gold-copper deposit, Finnmark, northern Norway, as deduced from rare earth element and Nd isotope evidences on calcites. *Res Geol*, 1999, 49(1): 13—25
- 5 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 等. 武定迦纳厂Fe-Cu-REE矿床Sm-Nd同位素年代学及其地质意义. *科学通报*, 2005, 50(12): 1253—1258
- 6 Halliday A N, ShePherd T J, Dicken A P, et al. Sm-Nd evidence for the age and origin of a Mississippi Valley Type ore deposit. *Nature*, 1990, 344: 54—56
- 7 Chesley J T, Halliday A N, Scrivener R C. Samarium-Neodymium direct dating of fluorite mineralization. *Science*, 1991, 252: 949—951[DOI]
- 8 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 湘西沃溪Au-Sb-W矿床中白钨矿Sm-Nd和石英Ar-Ar定年. *科学通报*, 2005, 50(12): 1976—1981
- 9 彭建堂, 胡瑞忠, 林源贤, 等. 锡矿山锑矿床热液方解石的Sm-Nd同位素定年. *科学通报*, 2002, 47(10): 759—792
- 10 Anglin C D, Jonasson I R, Franklin J M. Sm-Nd dating of scheelite and tourmaline: Implications for the genesis of Archean gold deposits, Val d'Or, Canada. *Econ Geol*, 1996, 91: 1372—1382
- 11 Bell K, Anglin C D, Franklin J M. Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics of scheelites: Possible implications for the age and genesis of vein-hosted gold deposits. *Geology*, 1989, 17: 500—504[DOI]
- 12 Kent A J R, Campbell I H, McCulloch M T. Sm-Nd systematics of hydrothermal scheelite from the Mount Charlotte Mine, Kalgoorlie, Western Australia: An isotopic link between gold mineralization and komatiites. *Econ Geol*, 1995, 90: 2329—2335
- 13 Darbyshire D P F, Pitfield P E J, Campbell S D G. Late Archean and Early Proterozoic gold-tungsten mineralization in the Zimbabwe Archean craton: Rb-Sr and Sm-Nd isotope constraints. *Geology*, 1996, 24: 19—22[DOI]
- 14 Brugger J, Maas R, Lahaye Y, et al. Origins of Nd Sr Pb isotopic variations in single scheelite grains from Archean gold deposits,

- western Australia. *Chem Geol*, 2002, 182(2-4): 203—225[DOI]
- 15 Boyle R W. The geochemistry of gold and its deposits. *Geol Surv Can Bull*, 1979, 280: 1—584
- 16 Ludden J N, Daigneault R, Robert F, et al. Trace element mobility in alteration zones associated with Archean Au lode deposits. *Econ Geol*, 1984, 79: 1131—1141
- 17 Anglin C D, Franklin J M, Jonasson I R, et al. Geochemistry of scheelites associated with Archean gold deposits: Implications for their direct age determination. *Curr Res, Part A: Geol Surv Can Pap*, 1987, 87-1A: 591—596
- 18 Gharderi M, Palin J M, Campbell I H, et al. Rare earth element systematics in scheelite from hydrothermal gold deposits in the Kalgoorlie-Norseman region, western Australia. *Econ Geol*, 1999, 94: 423—438
- 19 Brugger J, Lahaye Y, Costa S, et al. Inhomogeneous distribution of REE in scheelites and the dynamics of Archean hydrothermal systems (Mt. Charlotte and Drysdale gold deposits, Western Australia). *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 139: 251—264
- 20 曹志敏, 李佑国, 任建国, 等. 雪宝顶绿柱石-白钨矿脉状矿床富挥发份成矿流体特征及其示踪与测年. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(1): 64—72
- 21 叶松, 元利剑, 罗永安, 等. 四川平武稀有金属花岗岩与绿柱石的成矿属性. *地质科技情报*, 2001, 20(2): 66—70
- 22 曹志敏, 郑建斌, 安伟, 等. 雪宝顶碱性花岗岩岩石地球化学与成矿控制. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(5): 874—880
- 23 周开灿, 元利剑, 向长金, 等. 四川平武绿柱石宝石成矿地质特征. *矿物岩石*, 2002, 22(4): 1—7
- 24 Liu Y, Deng J, Li G W, et al. Structure refinement of Cs-rich and Na-Li beryl and analysis of its typomorphic characteristic of configurations. *Acta Geol Sin*, 2007, 81(1): 61—67
- 25 Jenner G A, Longerich H P, Jackson S E, et al. ICP-MS A powerful tool for high-precision trace-element analysis in earth sciences: Evidence from analysis of selected USGS reference samples. *Chem Geol*, 1990, 83: 133—143[DOI]
- 26 Xie Q, Jian J, Sun M, et al. ICP-MS analysis of basalt BIR1 for trace elements. *Geostand News*, 1994, 18 (1): 53—63[DOI]
- 27 Wu S, Zhao Y, Feng X, et al. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry for total metal determination in silicon-containing solid samples using the microwave-assisted nitric acid-hydrofluoric acid-hydrogen peroxide-boric acid digestion system. *J Anal Atom Spect*, 1996, 11: 287—296[DOI]
- 28 李献华, 刘颖, 涂湘林, 等. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱溶分解样品方法的对比. *地球化学*, 2002, 31(32): 289—294
- 29 曾惠芳, 戴朝玉, 鲁锦英. 感耦等离子体质谱法同时测定岩石中痕量元素的研究. *岩矿测试*, 1995, 14(3): 173—179
- 30 王蕾, 何红蓼, 李冰. 碱熔沉淀-等离子体质谱法测定地质样品中的多元素. *岩矿测试*, 2003, 22(12): 86—91
- 31 Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 2000, 51: 507—513[DOI]
- 32 何红蓼, 李冰, 韩丽荣, 等. 封闭压力酸溶 ICP-MS 法分析地质样品中 47 个元素的评价. *分析试验室*, 2002, 21(5): 8—12
- 33 Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P, ed. *Rare Earth Element Geochemistry: Development: Development Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984. 63—107
- 34 彭建堂, 胡瑞忠, 赵红军, 等. 湘西沃溪金锑钨矿床中白钨矿的稀土元素地球化学. *地球化学*, 2005, 34(2): 115—122
- 35 曾志刚, 刘朝阳, 刘玉平, 等. 滇东南两种不同成因的白钨矿稀土元素地球化学特征. *地质地球化学*, 1998, 26(2): 34—38
- 36 熊德信, 孙晓明, 石贵勇, 等. 云南大坪金矿白钨矿微量元素、稀土元素和 Sm-Nd 同位素组成特征及其意义. *岩石学报*, 2006, 22(3): 733—741
- 37 Whalen J B, Currie K, Chappel B W. A-type granite: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib Miner Petrol*, 1987, 95: 407—419
- 38 Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granite in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem Geol*, 2002, 187: 143—173[DOI]
- 39 Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *J Asian Earth Sci*, 2004, 23: 691—703[DOI]
- 40 Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Contrib Miner Petrol*, 2004, 148: 489—501
- 41 施光海, 苗来成, 张福勤, 等. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义. *科学通报*, 2004, 49(4): 384—389
- 42 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 291—304
- 43 张文兰, 华仁民, 王汝成, 等. 赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究. *地质学报*, 2006, 80(7): 956—962
- 44 聂凤军, 江思宏, 胡朋, 等. 甘肃北山红尖兵山钨矿床地质特征及成矿物质来源. *矿床地质*, 2004, 23(1): 11—19
- 45 四川省地矿局. *四川省区域地质志*. 北京: 地质出版社, 1994
- 46 李建康, 王登红, 付小方. 川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代及其构造意义. *地质学报*, 2006, 80(6): 843—848
- 47 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. *中国松潘甘孜造山带的造山过程*. 北京: 地质出版社, 1992. 1—190
- 48 Deng J, Huang D H, Wang Q F, et al. Surplus Space Method: A new numerical model for prediction of shallow-seated magmatic bodies. *Acta Geol Sin*, 2004, 78(6): 1245—1249
- 49 邓军, 王庆飞, 黄宝华, 等. 铜陵矿集区浅层含矿岩浆输运网络与运移机制. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(3): 252—260