

与碱性火成岩相关的典型轻稀土矿床研究

费红彩¹, 侯增谦², 肖荣阁³, 李彩霞⁴(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 中国地质大学地球科学与资源学院(北京), 北京 100083; 4. 山东省第四地质矿产勘查院, 山东 261021)

[摘要]轻稀土矿床和火成碱性岩系密切相关, 典型轻稀土矿床以白云鄂博、四川冕宁以及北美西海岸科迪勒拉(Cordillera)矿带的芒廷帕斯、加里诺斯稀土矿(Gallinas Mountains)等为代表, 这些矿床表现出一定的相似性, 但是也有本质的区别。文章着重对以上矿床在产出环境、含矿岩性、成矿流体和物质来源、地球化学等方面做了对比, 分析了它们之间的共性和特殊性, 并对目前研究所存在的问题加以总结, 这将有助于对轻稀土矿床成矿机制的理解, 并对轻稀土找矿工作有一定指导意义。

[关键词]轻稀土 成矿研究 白云鄂博 四川冕宁 北美

[中图分类号]P618.7 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2007)03-0011-06

目前, 多数研究者将轻稀土矿床分为两类, 碳酸岩浆喷发型和正长-碳酸岩浆热液型。内蒙白云鄂博稀土矿和美国芒廷帕斯稀土矿为前者的代表, 而四川冕宁和加里诺斯则为后者的典型矿床, 其中以白云鄂博矿床最为复杂, 虽有近半个世纪的研究, 对其成因的认识仍有分歧, 主要是海底碳酸岩浆沉积成矿模式^[1-2]和沉积变质热液交代成矿模式^[3-4], 分歧的焦点集中在含矿白云岩的“火成和水成”之说。美国芒廷帕斯稀土矿床, 随着1960年南非碳酸岩浆的喷溢而成为不争的事实^[5], 而20世纪80年代中期在四川冕宁发现的“牦牛坪式”单一氟碳铈矿轻稀土矿床, 以及在该地区南部发现的大陆槽和里庄稀土矿, 表明四川西南部具有潜在轻稀土成矿条件。实际上, 冕宁并不是这种“牦牛坪式”的单一稀土矿物矿床的唯一产出地, 在北美西海岸科迪勒拉(Cordillera)矿带上就有许多稀土矿床, 加里诺斯矿(Gallinas Mountains)则为其中之一, 是与正长岩浆有关的热液矿床^[6]。这些稀土矿之间有着许多相似性, 但也存在诸多区别。因此, 文章着重对轻稀土矿床的产出环境、矿石及容矿岩石特点、矿床地球化学特征、成矿流体、矿床成因等方面进行了对比研究, 这有助于对该类轻稀土矿床的成矿机制有更好的认识和理解。

1 地质构造背景

深断裂是控制碱性岩上侵定位和控岩控矿的主

要构造, 侵入岩多呈串珠状沿深断裂作线状延展, 构成碱性侵入岩带^[7], 是经济型稀土矿床的重要产出构造。通过对白云鄂博、冕宁和北美的轻稀土矿床研究, 发现轻稀土矿床大多产在地壳活动区的褶皱系或过渡带, 或板块边缘深断裂带内或其附近。即受板块边缘构造活动带或板内裂谷带的控制, 是这类矿床的共性, 但是它们在成矿时代以及具体构造上仍有差异。

从矿床产出的地质背景分析(表1), 稀土矿床一般都赋存于构造活动强烈的地区, 矿体受构造的严格控制, 这种构造可以是裂谷, 可以是断裂, 都为岩浆的活动提供了运移通道, 为稀土矿床的形成提供了良好的构造环境条件。

2 矿床成因

目前, 多数学者认为轻稀土型矿床与火成碱性岩正长岩和碳酸岩相关, 与火成碳酸岩相关的有白云鄂博、美国芒廷帕斯; 与正长-碳酸岩浆热液有着成因联系的如冕宁稀土矿和加里诺斯稀土矿床。

2.1 白云鄂博稀土矿

白云鄂博稀土矿是世界最大的稀土矿床, 主要含矿岩性为H8白云岩和H9富钾板岩, 因此, 这两者的成因成为解决白云鄂博矿床成因的关键所在。许多学者认同白云岩为火成碳酸岩浆^[1-2, 7]; 也有学者^[3-4]支持含矿白云岩的沉积来源。而对含矿围岩H9富钾板岩, 中科院地化所^[3]认为是原H9砂岩地

[收稿日期]2007-01-09; [修订日期]2007-01-18; [责任编辑]曲丽莉。

[基金项目]杰出青年基金(编号:40425014)资助。

[第一作者简介]费红彩(1965年—), 女, 2005年毕业于中国地质大学(北京), 获博士学位, 工程师, 现在中国地质科学院资源所博士后流动站从事矿床地质研究工作。

表 1 不同稀土矿床的成矿背景对比

矿床	白云鄂博	冕宁轻稀土矿带	科迪勒拉矿带 (Cordillera)
构造环境	华北地台北缘与内蒙一大兴安岭褶皱系的衔接地带,大陆裂谷作用 ^[3,8]	攀西裂谷之中,属喜马拉雅和印度板块造山挤压的东缘,受雅砻江和安宁河断裂控制 ^[9]	与早期俯冲相关的正长岩浆活动相关 ^[6]
控矿构造	乌兰宝力格深大断裂和白云鄂博—白银角拉克两大断裂 ^[3]	受北东—南西向哈哈断裂带控制,沿断裂呈带状分布 ^[10]	
形成时代	元古代	喜山期	晚白垩世、元古代
典型矿床	白云鄂博	牦牛坪、大陆槽等	加里诺斯矿、芒廷帕斯等

层霓长岩化蚀变产物,白鸽等^[8]提出了 H9 板岩是粗面正长岩的观点,肖荣阁等^[11]提出火山期后岩浆热液沉积钾长石岩的观点,因此,对于 H9 板岩的成因有待于更深的研究。

2.2 四川冕宁稀土矿

四川冕宁地区从南到北分布有一系列稀土矿,其中以牦牛坪储量和规模最大,矿体主要赋存于碳酸岩与正长岩杂岩体之中,碳酸岩呈平行脉状穿入正长岩岩体,两者与稀土矿化在时空上有密切关系^[10]。多数学者^[12-13]都认为四川攀西地区内生稀土矿床为岩浆演化体系,富 REE 和挥发组分的碱性岩浆上侵,晚期热液充填构造裂隙成矿,成矿只受岩浆演化及成矿构造控制。王登红^[14]认为是地幔和地表富稀土岩石相互叠加而成,矿区内矿化正长岩多为源区富碱岩石在喜马拉雅期构造活动和地幔热流作用下熔融、上侵、定位、冷凝结晶形成。

2.3 北美稀土矿

美国芒廷帕斯稀土矿位于美国加州,含矿碳酸岩体由 8 个碱性岩锥和多达 200 多条矿化细脉组成,赋存于前寒武系的变质岩地层中,其成因随着 1960 年南非碳酸岩浆的喷溢而成为不争的事实。

加里诺斯稀土矿床位于北美西海岸的科迪勒拉 (Cordillera) 矿带南端,该矿带从美国新墨西哥州到加拿大哥伦比亚省,全长数百公里,矿带上分布有众多热液稀土矿床,加里诺斯矿则为其中之一。Anthony 等^[6]认为侵入岩体是与俯冲相关的岩浆活动产物,矿床与渐新世的浅成石英正长岩侵入体相关,矿体赋存于萤石角砾岩和断层之中,属正长岩浆热液矿床。

从以上分析可以看出,这类轻稀土矿床和碱性火成岩相关的结论已得到普遍认可,轻稀土、特别是氟碳铈矿和氟碳钙铈矿矿床与碱性岩系、正长岩—碳酸岩有着密切的关系,并且可以划分为:一类是与碱性碳酸岩浆喷发直接成矿,一类是与碱性正长—碳酸岩浆热液喷发成矿。

3 矿石脉石矿物

3.1 稀土矿物

从表 2 中不难看出,白云鄂博稀土矿的矿物组

合最为复杂,集稀土、铌和铁为一体,稀土矿物呈细粒状,黄褐色,矿石主要呈细粒状结构,块状、浸染状和条带状构造^[8]。冕宁牦牛坪主要以氟碳铈矿为主,矿体主要表现为大脉状、细脉状和晶簇状,矿物呈自形或半自形晶结构,矿物结晶颗粒粗大,多为伟晶状,晶形完整,颜色呈土黄色或黄褐色;矿物组合有两类^[15]。北美加里诺斯稀土矿以氟碳铈矿为主,含少量氟碳钙铈矿和微量磷铈矿等,氟碳铈矿呈自形或半自形晶柱状体(长度达 0.5cm),通常呈双锥形产出,并为萤石所交代。另外,氟碳铈矿中 CaO 含量较高(含量达 4wt% 时),称为钙氟碳铈矿,并呈叶片玫瑰花形。局部有氟碳钙铈矿,这是由于局部 CaO 含量超过 9wt%,矿物呈单片状出现在萤石基质中^[6]。

3.2 脉石矿物

萤石和重晶石是与稀土矿床密切相关的脉石矿物,在世界几大稀土矿中都有范围分布,对稀土矿床的成因有着重要的指示意义。

3.2.1 萤石

白云鄂博稀土矿床中,萤石、重晶石与稀土矿物一起呈块状、浸染状、条带状出现,萤石多是细粒状,颜色多为紫色,尽管它的含量较高,但并没有太多的研究。

冕宁牦牛坪稀土矿中的萤石,颜色多样——紫色、淡绿色和无色 3 种,既有粗晶萤石,也有粉末状颗粒,在主矿体和后期细脉中均有出现。据作者野外对萤石产状的观察,结合萤石与其他矿物之间的关系,将萤石分为 4 种类型:粗晶状萤石、细粒块状萤石、紫色粉末状萤石和黑色变质萤石,这 4 种萤石可能是岩浆在上侵过程中 4 个不同演化阶段,与区内碳酸和正长岩浆的活动有密切关系(另文讨论)。而许成等^[10,16]将萤石分为 LREE 富集型、平坦型和亏损型,是同源不同阶段岩浆热液的产物,表明成矿环境从相对氧化向相对还原转化,但并没有指明萤石的产状。牛贺才等^[17]在萤石中发现大量的流体—熔融包裹体,均一温度高达 500℃ 左右,说明萤石形成温度很高,并且包裹体内含有重晶石子矿物,进一步表明牦牛坪的稀土矿中萤石和重晶石的岩浆成因。

表2 典型稀土矿床的对比表

矿床	白云鄂博稀土矿	四川冕宁稀土矿带(牦牛坪)	北美稀土矿带	
			芒廷帕斯	加里诺斯矿
地理位置	距内蒙包头以北150km,东经109°57',北纬41°46'。属华北陆块北缘	位于四川南部冕宁西南22km,攀西裂谷的北段	美国加州的圣博纳迪澳镇(San Bernardino),地处两个冲断断层的交汇部位	美国新墨西哥州,是科迪勒拉(Cordillera)矿带最南端的矿床,林肯斑岩带的北部
矿体展布	矿床呈东西向,东西长18km,南北宽0.5~5km	矿体主要呈一系列北北东向的平行大脉	矿区长7km,宽3km,8个碱性岩锥组成,形成200多条矿化细脉	矿体赋存于萤石角砾岩和断层之中
含矿岩性和产状	H8白云岩和H9富钾板岩,铁矿体与矿化白云岩和富钾板岩呈整合接触	容矿岩石:碳酸岩+正长岩碳酸岩呈平行的脉状穿入正长岩岩体,产状与矿体一致	碱性辉长岩等色岩和碳酸岩组成,呈独立侵入岩锥	容矿岩石:灰白色石英正长岩,钠长石+少量(钾长石+黑云母+角闪石斑晶,基质隐晶质 ^[6])
矿物组合	铁:磁铁矿+赤铁矿+褐铁矿 REE:氟碳铈矿+独居石+氟碳钙铈矿 Nb:铌铁矿+烧绿石+易解石+铌金红石	REE:氟碳铈矿+少量(硅铈铈矿+氟碳钙铈矿) 脉石矿物:方解石+辉辉石等 硫化物:方铅矿+辉钼矿	氟碳铈矿+重晶石+菱铁矿	氟碳铈矿+少量(氟碳钙铈矿和微量磷钇矿等)
矿石结构	块状、浸染状、条带状	块状、条带状、细脉状等	带状	角砾状
成矿期次	以中元古代为主成矿期,加里东和海西期为辅	可能有4期的成矿作用	一期	二期岩浆活动,与成矿早期脉冲式的岩浆活动相关
围岩蚀变	霓长岩化、黑云母化、金云母化等	霓长岩化、钠铁闪石和钠长石化、黑云母化、绢云母化	霓长岩化、绢云母化	霓长岩化、绢云母化,硅化作用等
矿床成因	火成碳酸岩浆喷发和白云岩沉积变质两种观点。	富REE和挥发组分岩浆演化体系,早期碱性岩浆上侵,晚期热液充填构造裂隙成矿	火成碳酸岩侵入前寒武系变质岩地层之中	富含挥发分的碱性正长和花岗岩浆,在上侵过程中所形成的热液稀土矿床

美国芒廷帕斯稀土矿中没有出现萤石,由于该矿床早已停止生产,故此没有更多资料可寻。而在北美的加里诺斯稀土矿,脉石矿物主要为萤石,既是角砾基质,也出现在细脉之中。萤石在成矿各个阶段都有出现,但是表现有所不同,早期萤石为蓝色或绿色,自形或半自形晶体,中期是富含包裹体的紫色萤石,最后为细粒紫色萤石,表明它们是同一岩浆源不同演化阶段的产物。Williams-Jones^[18]流体包裹体分析认为这些萤石均为正长岩浆热液成因。

3.2.2 重晶石

重晶石是另一种与稀土矿相关的脉石矿物。白云鄂博的重晶石,呈细粒状,与其他矿物共存,对其还没有太多的研究。而在冕宁稀土矿区,重晶石分布范围十分广泛,与萤石和氟碳铈矿成交生结构,由于风化作用,重晶石多为粉末状。重晶石表现出正铈异常,铈富集原因是岩浆中含大量的Sr,而Eu²⁺和Sr²⁺半径相似,发生类质同象反应;另外,在萤石流体包裹体中发现重晶石籽晶^[19],均一温度451.8℃~502.3℃,C、O、Sr同位素均与国内外碳酸岩一致,都表明萤石是从富含萤石、重晶石组分的盐溶液中结晶出来,其成矿早期硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ (+2.5‰~+6.9‰)^[12]与陕西略阳东沟坝重晶石矿(火山喷气)的 $\delta^{34}\text{S}$ (+6.9‰)相近^[20],表现出深源硫的特征。加里诺斯稀土矿中的重晶石晶形较大(直径达2cm),呈他形晶,Anthony et al^[6]对其研究后认为,在成矿后期由于含Ca和Ba离子外部流体

的介入,与正长岩浆中硫化物离子反应,形成大量石膏和重晶石。

4 矿床地球化学特征

岩石地球化学分析是有效解决岩石分类、成岩成矿地质过程以及成矿流体成分演化过程的手段。目前,许多学者已对上述矿床进行了大量同位素及地球化学分析,得出许多有价值的成果。在表3中,作者将白云鄂博和牦牛坪稀土矿中主要含矿岩性的同位素与世界典型碳酸岩进行了对比。白云鄂博稀土矿具有较高的碳、氧同位素值,这种高氧同位素值表明它们和海水或地下水进行了互换作用,或经历了重结晶作用,但又不同于灰岩同位素值^[21],尽管中科院地化所^[3]素 $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 测定,结合 $\delta^{34}\text{S}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的初始值(0.704~0.708),推断白云鄂博矿床具有以海相沉积成因为主的特征,但不否认部分成矿物质为海底火山来源。目前,多数学者的稳定同位素研究^[13-14]表明成矿物质来源于地幔深部。

许成等^[16]对冕宁产于花岗岩、火山岩和碳酸岩中萤石的Sr同位素进行了对比分析,其中碳酸岩中萤石Sr都低于其他两类,冕宁碳酸岩中的Sr表现出幔源特征,另外,冕宁碳酸岩和正长岩在空间上密切共生, $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、及 $\delta^{34}\text{S}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 特征与世界典型碳酸岩相似。

表 3 典型矿床和碳酸岩的稳定同位素对比表

矿床	白云鄂博矿床	冕宁轻稀土矿带	世界典型碳酸岩
$\delta^{18}\text{O}$	灰岩	18.3‰ ^[21]	正长岩
	白云岩	13.2‰ ^[21]	碳酸岩
$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	灰岩	-4.5‰ ~ +1.1‰ ^[11]	正长岩
	白云岩	-6.3‰ ~ +1.62‰ ^[11]	碳酸岩
$\delta^{34}\text{S}$	主东矿硫化物: -2.7‰ ~ +7.8‰ ^[22]	+2.5‰ ~ +6.9‰ ^[12]	
	西矿硫化物: -2.2‰ ~ +6.9‰ ^[22]		
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	白云鄂博群	0.704 ~ 0.708 ^[1]	正长岩
		0.704 108 ^[24]	0.705 972 ~ 0.706 302 ^[10]
	碳酸岩	0.711 8 ~ 0.713 9 ^[1]	碳酸岩
	H8 灰岩	0.718 ~ 0.725 ^[1]	0.706 05 ~ 0.706 91 ^[21]

产于碱性岩的稀土矿,其稀土化学分配模式基本一致,多为从左向右的陡倾曲线,伴有弱负异常,轻重稀土严重分馏。而产于碱性花岗岩的矿床轻重稀土含量都高,也具强的负异常^[23]。

Smith and Henderson^[24]对白云鄂博不同阶段的稀土矿物进行研究,发现轻重稀土分馏的程度与成矿流体性质相关,在早期浸染状独居石和主要成矿阶段层状矿石中,其 La/Nd 比值在 3 ~ 7 之间,细脉中的氟碳铈矿和独居石的 La/Nd 比值在 4.8 ~ 5.8 之间,认为这种富 La 特性表明热液中富含 CO₂;成矿后期稀土萤石碳酸盐的 La/Nd 比值在 0.6 ~ 2 之间,表明低 La/Nd 比值的矿物形成于富含水的流体之中,矿化发生在相对低温条件(150℃ ~ 250℃),以上分析表明白云鄂博稀土矿矿化的多阶段性和后期外来流体加入。

许成等^[10]对牦牛坪稀土矿中的矿物稀土元素分析可与白云鄂博相比较,正长岩、碳酸岩和萤石等矿物的 La/Nd 值分别为 3.8 ~ 4.8、2.09 ~ 2.68、1.6 ~ 2.3,表明来自正长岩-碳酸岩岩浆热液中的稀土元素严重分异,正长岩-碳酸岩的高 La/Nd 值表明它们可能是正长岩浆或碳酸岩浆分异的产物。稀土化学分析^[12]显示碳酸岩和正长岩具有同样 REE 分配模式,碳酸岩中富集 Sr、Ba 和 REE 等不相容元素,正长岩富集高场强元素(HSF),Huge 等^[25]认为这种元素上的分异表明在成矿期间可能有水溶液的加入,也有可能碳酸岩上侵过程中与地壳岩石发生混染作用。

从上述白云鄂博、牦牛坪稀土地球化学特征方面来看,两个矿床的稀土分配模式完全类似,Ba、Sr 和轻稀土富集,而贫重稀土,并有弱负异常存在^[2,10]。La/Nd 的分异特征则表明两个矿床的形成环境差异和成矿的期次。La/Nd 的分异现象在 REE 矿化碳酸岩中最为普遍,Smith and Henderson^[24]对这种现象的解释是在高温下 La 高配位数络合物比低配位数络合物具有更强的结合力,致使 La 的分异。

5 成矿流体和成矿物质

流体包裹体以及稳定同位素可以很好地解释成矿物理化学条件、成矿物质和成矿流体的来源问题。

许多学者对白云鄂博矿作了大量流体包裹体分析,获得了丰富的资料。白鸽等^[8]认为白云鄂博含矿岩系矿物包裹体是类型多、体积小、温差大、成分以 CO₂、Ca 和 Mg 为主。Smith and Henderson^[24]对多种矿物流体包裹体分析后认为,早期浸染状独居石中,包裹体含 H₂O - CO₂ - NaCl,盐度 1% ~ 5%,温度 280℃ ~ 330℃,压力超过 0.7 × 10⁸ Pa;在主成矿阶段,由于在 300℃ ~ 400℃ 高温时,CO₂ 从碳酸岩中溶解出来,磷灰石和氟碳铈矿中的包裹体主要以水溶液为主,盐度达 6% ~ 10%,压力 0.9 × 10⁸ ~ 1.4 × 10⁸ Pa;后期萤石和重晶石中包裹体均一温度为 240℃ ~ 150℃ 和 200℃ ~ 130℃;含石盐的包裹体可能代表沸腾和碳-水不混溶的阶段,矿物组合分析表明成矿流体的变化和其所处的成矿阶段,矿床与碱性火成碳酸岩或其他含 REE 或富铁的岩浆热液系统相关。另外稀土籽晶的发现^[26]表明成矿流体中含有过饱和的稀土组分,进一步证明稀土的火成来源;然而,一些学者^[3-4]认为 REE 是来自下伏的白云鄂博群和元古宙地层,但不否认部分成矿物质为海底火山来源,及后期岩浆热液活动叠加成矿。

阳正熙等^[15]对冕宁牦牛坪包裹体进行了系统的研究,发现有 4 种类型包裹体:液-气相、液-气-固相、纯气相和固相,矿物包裹体显微温度:423℃ ~ 122℃,盐度:11.46% ~ 14.36%,含 CO₂ 和其他挥发分,并且富含籽晶,分析认为成矿作用是由碳酸岩岩浆气液流体的沸腾、充填和交代过程而实现,大多数学者都持这种观点。但是前者将成矿过程划分为两个阶段——早期的稀土矿化阶段,晚期则是硫化物矿化阶段。另外包裹体中 3 种含铜合金矿物^[13]的发现都表明该矿带与喜马拉雅期(幔源)岩浆作用有关。

对于北美加里诺斯矿床, Anthony 等^[6]对其进行了流体包裹体分析, 认为成矿热液来自正岩浆源, 并富含稀土和硫化物, 但这一阶段并没有稀土矿化, 主要形成石英, 成矿温度在 400℃ 左右, 后期由于富含 CO₂、贫硫化物的卤液从围岩中淋滤的 Ca, 在与正岩浆热液混合后, 致使氟碳铈矿的沉积, 认为后期卤液在稀土成矿中起到关键作用, 由于外来卤液携带大量 Ca 和 Ba, 促使重晶石和硫化物沉积, 并且认为在流体演化的最后阶段, 氟碳铈矿蚀变形成钙氟碳铈矿, 于是就有少量钙氟碳铈矿与氟碳铈矿共生成矿, 是热液演化最后阶段的产物。这种解释与阳正熙等^[15]对托牛坪稀土矿的成矿分析正好相反, 成矿前期是形成石英, 而后期则形成稀土矿物, 但是两者都认可硫化物是成矿最后阶段的产物。

6 讨论

关于稀土矿物种类的问题, 主要轻稀土矿物是独居石、氟碳铈矿和氟碳钙铈矿, 有三者共生成矿, 也有单独成矿。稀土矿物种类与成矿环境密切相关。Metz^[27]实验观察到在 620℃ 时氟碳钙铈矿转化为氟碳铈矿 + 方解石, 基于此项实验, Williams - Jones^[18]的热液实验提出一套压力 - 温度网格, 低温时形成氟碳钙铈矿 + 萤石或氟碳钙铈矿 + 方解石组合, 高温高压下氟碳钙铈矿性质稳定。Metz^[27]流体包裹体热力学和温度研究表明氟碳钙铈矿的形成温度不会超过 600℃。从以上对典型稀土矿床成矿物化条件的研究中, 稀土矿物的形成温度在 400℃ ~ 600℃ 度之间。

关于氟碳钙铈矿, 在此有必要提到位于科迪勒拉(Cordillera)矿带北端的雪鸟矿(Snowbird), 为单矿物 - 氟碳钙铈矿矿床, 矿物呈巨晶状(长度可达 24cm), 目前研究还没有显示出其与碱性岩浆热液相关, 流体包裹分析表明, 矿床形成最低温度是 400℃ ~ 500℃, 压力 200 ~ 300MPa, 流体盐度达 30% ~ 35%, 其中 $Ca/(Na + Ca) = 0.1$ 到 0.2, 显然表明氟碳钙铈矿形成于高温、高盐度的成矿环境^[28], 因此, 有必要对氟碳铈矿和氟碳钙铈矿之间的转化、成矿流体地化特征、成矿温度等问题进行研究, Samson^[28]认为解释这个问题, 要结合不同稀土矿物热力学的稳定性、溶解性以及成矿流体和环境的物化条件等, 但是目前在这方面的研究还不是很多。

关于物质来源和运移, 多数学者认为稀土和氟是与深部(地幔)相关, 并呈氟络合物形式随热液运移; 钙可以来自碳酸岩浆, 也可是淋滤围岩中的钙; 成矿液体可以是岩浆热液, 或大气水和岩浆热液的混合。研究^[6]显示, 成矿流体中的钙促使氟络合物

络解和萤石沉淀, 但是对于成矿物质的运移、富集、络解成矿机制, 以及岩浆热液与后期外来流体加入与后期成矿作用关系等, 还没有太多的认识。

目前, 关于脉石矿物萤石和重晶石的成因, 有两种可能的成因解释——岩浆(气)热液型和沉积改造型。与稀土矿物共生的萤石和重晶石, 其地球化学性质在本节中做了详细的描述, 低 S 和 Sr 同位素以及包裹体中重晶石子晶^[19]的发现都表明硫的地幔来源, 这与沉积成因的萤石和重晶石完全不同。因此, 许多学者认为萤石和重晶石是碱性火成岩, 特别是与碳酸岩浆热液相关的稀土矿床的重要特征。

关于萤石的颜色, 无论何种成因, 颜色都具多样性, 根据资料和野外观察发现, 新鲜萤石多呈白色、无色或淡绿色, 暴露在地表的萤石多呈紫色。韩文斌等^[29]认为萤石的颜色可能与稀土元素和含量、所含杂质有关, 并提出在表生状态下, 萤石被氧化, 与之同时发生了氢化和羟基化作用, 导致氧加入晶格形成色核, 从而使萤石变色, 但这并不能解释白云鄂博稀土矿中原生紫色萤石致色机理。

7 结论

基于现有资料分析发现, 该类矿床严格受断裂构造的控制, 而且轻稀土矿床可能与地幔深部岩浆活动和岩浆期后热液交代等相关。尽管各类轻稀土矿床产于不同的构造背景和时代, 这些矿床表现出一定的相似性, 但又有其特殊的成矿特征。内蒙白云鄂博和美国的芒廷帕斯都是以碳酸岩为含矿母岩的稀土矿床, 但白云鄂博除含有铈矿物外, 还有大量铈矿物, 表现出其独有的成矿特征; 冕宁稀土矿床则表现深(幔)源岩浆快速上涌、岩浆期后高度富集挥发分和稀土元素的气成热液、低温热液及隐爆特征^[13], 成矿分为两个阶段: 早期高温、碱性、氧化的成矿环境, 晚期低温、酸性、还原的硫化物矿化阶段^[15]。北美芒廷帕斯稀土矿则为含矿碳酸岩浆沿构造薄弱地区上侵到上覆地层中, 矿化作用则发生在脉体和细脉之中^[5]; 加里诺斯稀土矿则呈现出典型的与正长岩浆相关的低温热液矿床特点, 后期的外部流体对成矿作用起到关键作用^[6]。另外, 通过上述几种典型轻稀土的对比研究分析, 作者认为还有以下几方面有待进一步研究:

- 1) 两种不同轻稀土矿床的成矿机制及 REE 元素的运移、富集、沉淀机制;
- 2) 稀土矿物种类与成矿物化条件之间的关系;
- 3) 碳酸岩型稀土矿(白云鄂博和芒廷帕斯)与碳酸岩 - 正长岩浆热液型稀土矿(冕宁和加里诺斯)在岩石地球化学方面的异同点;
- 4) 外来流体对稀土成矿的影响及其作用方式;

5) 脉石矿物萤石、重晶石的岩浆成因证据以及与热液沉积成因的区别;

6) 对含矿建造包括矿化围岩岩石组合与矿化围岩蚀变两个方面研究。

致谢:感谢中国地质科学院资源研究所白鸽、袁忠信以及芮宗瑶研究员,在文章撰写期间所给予建议和帮助。

[参考文献]

- [1] 白 鸽,袁忠信.白云鄂博矿床成因分析[J].中国地质科学院矿床地质研究所所刊,1983(4):1-15.
- [2] 肖荣阁,费红彩,安国英,等.内蒙古白云鄂博区的白云岩岩石学及其成因研究[J].现代地质,2003b,17(3):287-293.
- [3] 中国科学院地球化学研究所.白云鄂博矿床地球化学[M].北京:科学出版社,1988.
- [4] Chao E T C, Tatsumoto M, et al. Host rock controlled epigenetic hydrothermal and metasomatic origin of the Bayan Obo REE - Re - Nb ore deposit, Inner Mongolia [J]. PRC Applied Geochem, 1992(7):443-458.
- [5] Olson, et al. Rare - earth Mineral deposits of the Mountain Pass District San Bernardino Country California [M]. United States Comernement Pringting Office, Washington, 1954.
- [6] Anthony E W J, Iain M S, Gema R O. The Genesis of Hydrothermal Fluorite - REE Deposit in the Gallinas Mountains, New Mexico [J]. Economy Geology, 2000,95:327-342.
- [7] 袁忠信,白 鸽.中国碱性侵入岩的空间分布及有关金属矿床[J].地质与勘探,1997,33(1):42-48.
- [8] 白 鸽,袁忠信,吴澄宇,等.白云鄂博矿床地质特征和成因讨论[M].北京:地质出版社,1996.
- [9] 吴根耀.攀枝花—西昌古裂谷晚古生代的演化[J].成都理工大学报,1997,24(2):48-53.
- [10] 许 成,黄智龙,漆 亮,等.四川牦牛平稀土矿床成矿流体来源与演化初探——萤石稀土地球化学的证据[J].地质与勘探,2001,37(5):24-28
- [11] 肖荣阁,史淑玲,安国英.内蒙古白云鄂博区富钾板岩的热液沉积成因研究[J].现代地质,2003a,17(3):281-286.
- [12] 刘丛强,黄智龙,许 成,等.地幔流体及其成矿作用——以四川冕宁稀土矿床为例[M].北京:地质出版社,2004.
- [13] 谢玉龄,侯增谦,许九华,等.四川冕宁—德昌稀土成矿带铜锌、铜锡合金的发现及成因意义[J].中国科学 D 辑,2005,35(6):572-577
- [14] 王登红,杨建民,闫升好,等.四川牦牛坪碳酸岩同位素地球化学及其成矿动力学[J].成都理工学院学报,2002,9(25):539-544.
- [15] 阳正熙,Anthony,蒲广平.四川牦牛坪稀土矿床流体包裹体研究[J].矿物岩石,2001,21(2):26-33.
- [16] 许 成,黄智龙,刘丛强,等.四川牦牛坪稀土矿床 Sr, Nd 同位素对地幔成矿流体的指示意义[J].地球科学——中国地质大学学报,2003,28(1):41-46.
- [17] 牛贺才,林传仙.萤石流体包裹-熔体包裹体研究[J].地质评论,1995,41(1):28-33.
- [18] Williams - Jones A E, Samson I M A preliminary petrogenetic grids for REE fluorocarbonates and associated minerals. Geochimica [J], Cosmochimica Acta, 1992, 56: 725-738.
- [19] 牛贺才,陈繁荣,林茂青.岩浆成因重晶石、萤石的稀土元素地球化学特征[J].矿物学报,1996,16(4):382-387.
- [20] 涂怀奎,陕、甘、川邻区不同类型重晶石成矿条件与成因机理的讨论.化工矿产地质[J],1998,20(4):295-300.
- [21] 魏菊英,上官志冠.白云鄂博铁围岩白云岩的氧、碳同位素组成极成因[J].岩石学研究,1983,(2):14-21.
- [22] 曹荣龙,朱寿华,王俊文,白云鄂博铁-稀土矿床的物质来源和成因理论问题[J].中国科学(B辑),1994(12):1298-13.7.
- [23] 杨学明,杨晓勇,范宏瑞,等.白云鄂博海西期花岗岩体的稀土元素地球化学[J].稀土,2000(2):1-6.
- [24] Smith M P, Hendeson P, Campbell L S. Fractionation of the REE during hydrothermal processes; Constraints from the Bayan Obo Fe - REE - Nb deposit, Ineer Mongolica, China [J]. Deochimica et Cosmochimica Acta, 2000,64(18):3141-3160.
- [25] Huge R Rollison. 岩石地球化学[M].杨学明,等译.合肥:中国科技大学出版社,2000.
- [26] Xie Y H, Wang Y L, Zhang R F. A Discovery of REE minerals in Fluid Inclusions in the Bayan Obo RE - Fe - Nb Ore Deposit [J], Chinese Science Bulletin, 1996,41(5):401-404.
- [27] Metz M C. The geology of the Snowbird deposit, Mineral Co., Montana; Unpublished M. Sc. thesis, Pullman, WA, Washington State University, 1971.
- [28] Samson Iain M. Fluid Inclusion Characteristics and Genesis of the Fluorite - Parosite Mineralization in the Snowbird Deposit, Montana [J]. Economic Geology, 2004, 99(8): 1727-1744.
- [29] 韩文斌,马承安,王玉荣,等.萤石矿床地质及地球化学特征——以浙江武义矿田为例[M].北京:地质出版社,1991.

TYPICAL LIGHT REE DEPOSITS RELATED WITH ALKALINE IGNEOUS ROCKS

FEI Hong - cai¹, HOU Zen - qian², XIAO Rong - ge³, Li Cai - xia⁴

1. Institute of Mineral Resources, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
3. College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;
4. No. 4 Institute of Geology and Resources Exploration of Shandong, 261021)

Abstract: Recent research on light REE deposits indicates that they are closely related with alkaline igneous rocks. The typical light REE deposits are mainly represented by Bayan Obo, Mianning at Sichuan in China, Mountain Pass in U. S. and Gallinas Mountains in the Cordillera belt located along the western coast of North America. Although the deposits display some similarities, a great sum of differences does exist in some aspects. This paper focuses on the comparison of geologic structure, host rocks, origin of ore - forming fluids and materials, as well as geochemical features of these typical deposits, sorting out the latest research development and current problems. Deep understanding to their similarities and differences is conducive to exploration of such kind of light REE deposits.

Key words: light REE deposit, metallogeny, Bayan Obo, Sichuan Mianning, North America