

论四川冕宁稀土矿床的成因

牛贺才 林传仙

(中国科学院广州地质新技术研究所, 广州)

提 要: 矿物包裹体、稀土元素地球化学、碳、氧及锶同位素地球化学研究显示, 四川冕宁稀土矿床主要组成部分——碱性伟晶岩型矿体和碳酸岩型矿体早期的石英、重晶石、萤石及方解石具有岩浆成因的特征, 而矿石矿物氟碳铈矿则是典型热液作用的产物。作者认为该矿床是一个与富含挥发份盐熔体有直接成因联系的热液稀土矿床。

主题词: 矿床成因 多晶包裹体 盐熔体 热液矿床

四川省冕宁县西南牦牛坪地区的稀土矿床是近年发现的与喜山期岩浆活动有关的内生矿床。初步勘探结果显示, 该矿床为大型轻稀土矿床, 除含有数量可观的轻稀土元素外, 其Eu、Y等中重稀土含量较国内外同类矿床高。此外, 该矿床还具有埋藏浅、物质组成简单、矿石矿物颗粒大, 易采、选、冶等特点, 因而具有较高的经济价值。该矿床目前仍处于详查阶段, 其研究程度较低, 特别是有关矿床成因的研究更显薄弱。

1 矿床的地质特征

冕宁稀土矿床受北东向展布的哈哈断裂带控制, 矿体呈带状分布, 南北长13 km, 东西宽2.6 km。它是由多组相互贯通、穿插、交织成大脉、平行脉带及网状脉带的稀土矿脉和被其穿插的霓石石英正长岩、碱长花岗岩和少量流纹岩构成的综合地质体。

冕宁稀土矿床矿物种类繁多, 高达85种, 脉石矿物以霓石、霓辉石、微斜长石、微斜条纹长石、方解石、石英、重晶石及萤石为主; 矿石矿物则以氟碳铈矿为主。根据矿体自然产状和矿物组合可将矿床划分成霓辉重晶伟晶岩型、碳酸岩型和细脉型三种矿体, 其中以前两类最为重要, 各类矿体矿物组合及含量见表1。

根据矿物组合及共生关系可将不同矿体划分三个成矿阶段: 在碱性伟晶岩型矿体中矿物生成顺序为霓辉石+长石+块状石英+伟晶状重晶石→细粒它形重晶石+萤石+伟晶状石英→(晚期)萤石+微细薄板状重晶石+氟碳铈矿; 在碳酸岩型矿体中矿物生成顺序为霓石—霓辉石→方解石+重晶石+长石+石英+萤石→晚期萤石+氟碳铈矿。

2 矿物中包裹体特征

为了探讨矿床形成的物理化学条件, 作者对霓辉重晶伟晶岩型矿体中石英、早期萤石和

牛贺才, 男, 31岁, 副研究员, 博士, 从事矿床地球化学工作。邮政编码: 510640
1993-7-9收稿, 1994-8-9修改回

表 1 各种类型矿体中主要矿物含量

Table 1. Major mineral contents of various types of orebodies

矿物名称 矿体类型	霓辉重晶伟 晶岩型矿体 (重量%)	碳酸岩 型矿体 (体积%)	矿物名称 矿体类型	霓辉重晶伟 晶岩型矿体 (重量%)	碳酸岩 型矿体 (体积%)
氟碳铈矿	4.31	2.73	方解石		29.28
硅铈铈矿	0.40	0.87	石英	0.52	8.29
贝塔石	0.01	微	碱性长石		19.19
褐钨铈矿		微	霓石		7.87
钍石		微	霓辉石		1.64
方铅矿		0.21	钠铁闪石	0.22	1.44
褐铁矿	2.96	0.43	白云母		1.39
铁钛氧化物		0.24	黑云母	0.56	0.53
硫化物		0.10	楣石	1.07	0.64
白铅矿		0.45	绿帘石		0.08
重晶石	37.19	12.78	绿泥石		0.09
毒重石		0.90	磷灰石		0.04
菱锆矿		0.17	锆石	0.01	0.03
萤石	32.49	10.70	褐黑色矿泥 (霓辉石风化物)	20.28	
金红石		0.01	合 计	100.02	100.10

据施泽民 (1992)

碳酸岩型矿体中石英进行了包裹体研究。

2.1 多晶包裹体特征及其均一温度

萤石：在霓辉重晶伟晶岩型矿体的早期萤石中发现了大量的多晶包裹体^[1,4]。包裹体较大，一般为 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 左右，个别可达 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 。晶体所占比例在70%~90%，气体约占5%~10%，液相则在5%~25%之间变化。该类包裹体呈孤立点状分布，为原生包裹体。由于包裹体体积较大，作者对其内部的晶体进行了光性测定。包裹体内矿物主要是板状矿物，解理较发育，正突起，干涉色较低，平行消光。该矿物为二轴晶矿物， $2V \approx 30^\circ$ ，正延长。根据矿物的光性特征及本矿床的矿物共生组合，作者认为多晶包裹体中晶体矿物为重晶石。为了验证这个推论，作者选择大小为 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 的多晶包裹体进行了激光拉曼光谱分析。分析结果显示，多晶包裹体内的晶体主要是重晶石（见图1）。

在法国 Chaixmeca 冷热两用台上对多晶包裹体进行了初步研究。由于萤石解理十分发育，多晶包裹体在未均一化之前大多发生了泄漏，仅获得了少量的均一化温度。已有的研究结果显示，该类包裹体的均一化温度在 $493.7 \sim 502.3^\circ\text{C}$ ，其均一化状态是气相+液相均一成气相，晶体相全部熔化，这与一般包裹体的均一化状态有明显的不同。从理论上讲，在均一

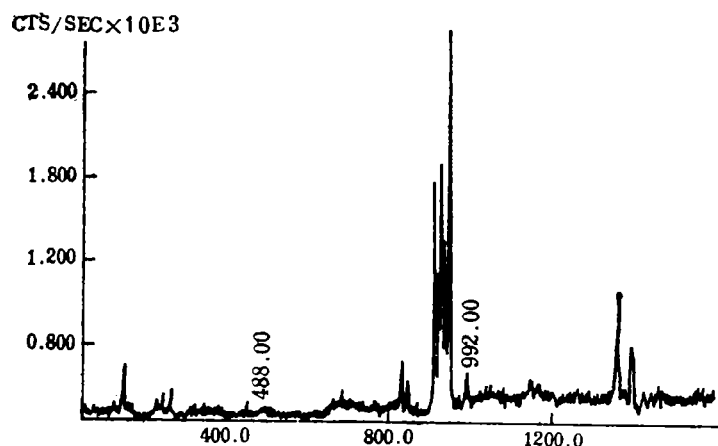


图1 多晶包裹体内晶体的激光拉曼谱图

Fig. 1. Laser Raman spectra of crystals from polycrystal inclusions.

化温度下气相流体应与熔体相充分混合,形成含有大量挥发分的稀薄熔体。但由于包裹体体积很小,其热力学条件限制了流体相与熔体相充分混合,这就导致了该类包裹体的均一化状态与一般包裹体的均一化状态不同。

石英:在霓辉重晶伟晶岩型矿体的块状石英和碳酸岩型矿体的石英中也发现了含气相、液相和结晶相的多晶包裹体。霓辉重晶伟晶岩型矿体的块状石英中多晶包裹体的结晶相由长石、石英组成,碳酸岩型矿体的石英中多晶包裹体的结晶相很可能是重晶石。霓辉重晶伟晶岩型矿体块状石英中多晶包裹体均一化温度为454~519.5℃,均一化状态与萤石中多晶包裹体的相类似。

2.2 流体包裹体特征及其捕获温度

在霓辉重晶伟晶岩型矿体早期萤石中不但分布着数量可观的原生多晶包裹体,而且还存在着大量的次生流体包裹体,按其组成可以将该类包裹体分成简单流体包裹体、含CO₂的流体包裹体的含易溶盐的流体包裹体。包裹体分布特征及测温结果显示,三种流体包裹体是同时形成的。该类包裹体大小不等,大者可达100μm×40μm以上,小者在10μm×10μm左右。气体所占比例一般不超过20%。根据流体包裹体的相态组成可以推断,它们所捕获的流体是富CO₂的流体。由于在早期萤石中既有原生多晶包裹体,又有次生流体包裹体,两者那一个与稀土成矿作用更为密切呢?众所周知,氟碳铈矿本身含有碳酸根离子,它要求成矿流体富CO₂,而激光拉曼光谱测试表明,多晶包裹体几乎不含气相CO₂(见图1)。显然,次生流体包裹体所捕获的流体更有利于氟碳铈矿矿化。此外,在氟碳铈矿中的包裹体均为流体包裹体。作者认为,萤石中次生流体包裹体是稀土矿化时形成的,它的捕获温度代表了稀土矿化的温度。测温结果显示,萤石中次生流体包裹体均一化温度范围为76.5~200℃,大多数集中在90~130℃;根据Roedder等(1980)所提供的不同密度的NaCl-H₂O溶液等容曲线对次生流体包裹体捕获压力进行了估算。次生流体包裹体的捕获压力在700×10⁵Pa左右。次生流体包裹体的捕获温度范围为150~270℃,主要集中在160~200℃之间。

在霓辉重晶伟晶岩型矿体和碳酸岩型矿体的氟碳铈矿中作者发现了相当数量的流体包裹体。包裹体大小为5μm×5μm左右,形态以椭圆状为主,气体所占比例为5%~15%。其分

布特征显示,该类包裹体为原生流体包裹体。由于氟碳铈矿本身很脆,极易破碎,故没能对其中流体包裹体进行测温研究。

综上所述,在霓辉重晶伟晶岩型矿体中早期石英、萤石具岩浆成因特征,它们是富含挥发分熔体结晶的产物;在碳酸岩型矿体中与伟晶状方解石共生的石英也具有岩浆成因特征,这说明碳酸岩型矿体的主体组成矿物——伟晶状方解石是盐熔体^[6]结晶的产物。无论是霓辉重晶伟晶岩型矿体,还是碳酸岩型矿体中的矿石矿物——氟碳铈矿均是晚期热液作用的产物。

3 矿床中主要矿物的稀土元素地球化学特征

为了探讨矿床的地球化学特征,作者对霓辉重晶伟晶岩型矿体中的早期萤石、晶簇状方解石,碳酸岩型矿体中伟晶状方解石进行了稀土元素地球化学研究(表2)。

表2 不同矿物的稀土元素含量(10^{-6})
Table 2. REE contents of different minerals

样号	矿物	产状	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
1-6 QL	萤石	霓辉重晶伟晶岩型矿体	114.85	185.10	24.30	111.95	29.31	8.62	33.88	4.55	21.29	4.13	10.49	1.31	6.40	0.79	353.05
1-6L	萤石	霓辉重晶伟晶岩型矿体	37.92	96.30	18.05	99.95	30.67	9.25	36.85	4.84	22.95	4.57	10.34	0.87	4.22	0.22	360.45
1-12L	萤石	霓辉重晶伟晶岩型矿体	150.25	237.85	28.62	127.35	29.02	8.25	31.76	3.82	18.73	3.59	8.96	1.04	4.52	0.35	306.35
1-12 Z	萤石	霓辉重晶伟晶岩型矿体	70.65	131.30	19.05	93.65	24.21	6.97	26.89	3.20	16.27	3.22	7.95	1.05	5.69	0.55	263.90
1-8	方解石	霓辉重晶伟晶岩型矿体	18.32	22.27	2.23	5.57	0.93	0.33	0.78	0.20	0.65	0.26	0.48	0.06	0.27	0.01	8.59
3-6	方解石	碳酸岩型矿体	174.88	337.75	36.18	128.38	18.02	4.11	11.23	1.30	5.94	0.99	2.27	0.26	1.01	0.06	25.88
3-6H	方解石	碳酸岩型矿体	145.53	292.43	32.43	115.10	16.14	3.73	1.18	1.09	5.14	0.90	2.33	0.35	2.21	0.23	24.78

样品由南京大学地球科学系中心实验室测定(1992)

萤石:该类萤石是含有多晶包裹体的早期萤石,其稀土总量为 $(674.55\sim 910.02)\times 10^{-6}$, LREE/HREE 值在 5.34~7.99 间变化。 δEu 为 0.83~0.89, 呈现出较弱的负异常, δCe 为 0.80~0.91, 也表现为弱的负异常。稀土元素分布模式呈较缓的右倾曲线(见图2), 与白云鄂博稀土矿床中萤石的稀土元素分布模式不同^[3], 后者与典型热液成因萤石的稀土元素分布模式(图3)十分相似。这在一定程度上反映了两类萤石成因有明显的差别。萤石的稀土元素地球化学特征表明, 霓辉重晶伟晶岩型矿体中早期萤石与热液作用形成的萤石有较大差别。

晶簇状方解石:霓辉重晶伟晶岩型矿体中晶簇状方解石的稀土元素含量很低, 其稀土总量仅为 60.95×10^{-6} , 稀土元素分布模式是一条较复杂的曲线(图4), 在 Yb/La-Yb/Ca 方解石成因判别图上它的投影点远离热液成因的方解石, 但与典型岩浆成因的碳酸岩又有较大

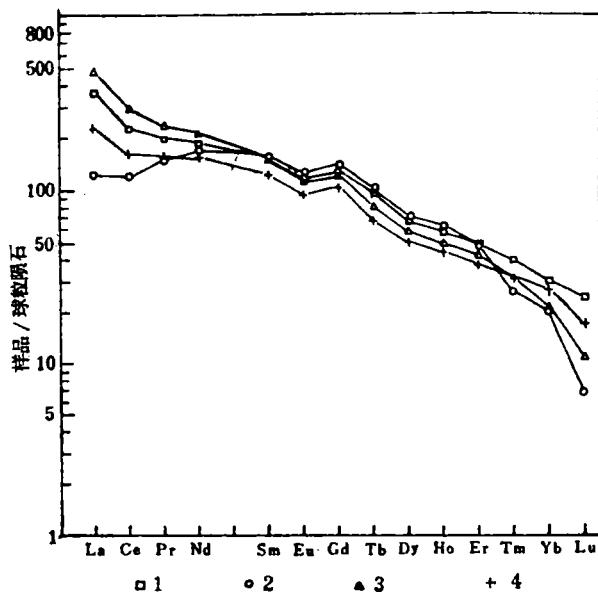


图 2 霓辉重晶伟晶岩型稀土矿体中早期萤石的稀土分布模式

1—1-6QL; 2—1-6L; 3—1-12L; 4—1-12L.
(样号同表 2)

Fig. 2. Chondrite-normalized REE patterns of early fluorite from aegirine-augite barite pegmatite veins.

1—1-6QL; 2—1-6L; 3—1-12L; 4—1-12L. Sample number as for Table 2.

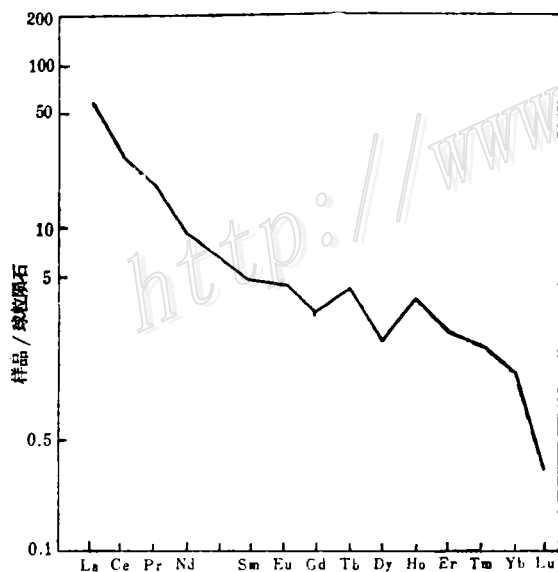


图 4 霓辉重晶伟晶岩型矿体中晶簇状方解石的稀土元素分布模式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of drusy calcite from aegirine-augite barite pegmatite veins.

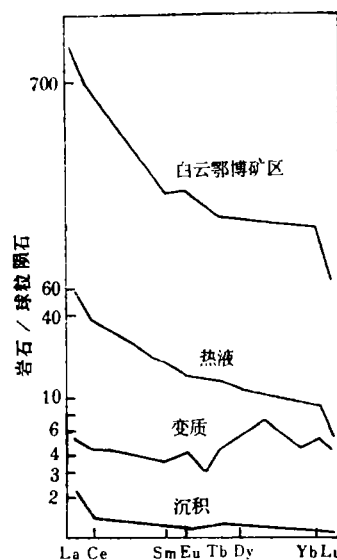


图 3 不同成因萤石的稀土分布模式

Fig. 3. Chondrite-normalized REE patterns of genetically different fluorite samples.

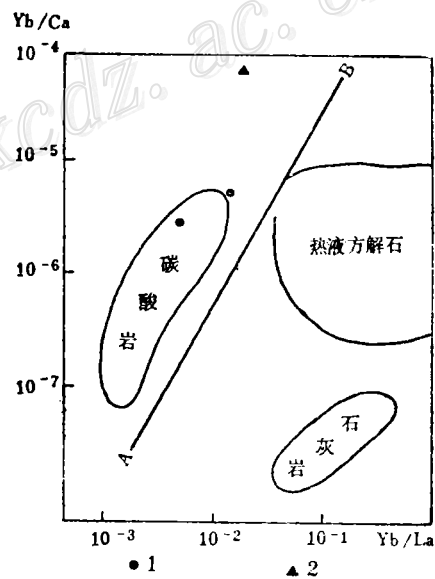


图 5 不同类型方解石在Yb/Ca-Yb/La图解上的投影

1—碳酸岩型矿体中伟晶状方解石; 2—霓辉重晶伟晶岩型矿体中晶簇状方解石

Fig. 5. Yb/Ca-Yb/La plot of different types of calcite.

1—Giant calcite crystals from carbonatite veins; 2—Drusy calcite from aegirine-augite barite pegmatite veins.

差别。作者认为这可能反映了该矿物形成于岩浆与热液的过渡阶段。

伟晶状方解石：碳酸岩型矿体中伟晶状方解石的稀土元素含量较高，其变化范围为 $(651.74 \sim 744.25) \times 10^{-6}$ ，较前一种方解石高一个数量级。稀土元素分布模式呈右倾的平滑曲线，与典型岩浆成因碳酸岩的十分相似（见图6）⁽²⁾。在 Yb/La-Yb/Ca 方解石成因判别图上的投影点落在岩浆成因碳酸岩的区域内或附近（见图5）。这说明该类方解石是典型岩浆结晶的产物。

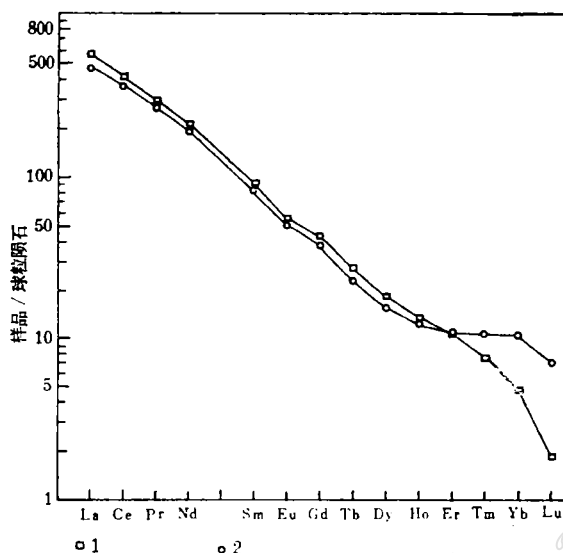


图6 碳酸岩型矿体中伟晶状方解石的稀土元素分布模式

1—3-6; 2—3-6H

(样号同表2)

Fig. 6. Chondrite-normalized REE patterns of giant calcite from carbonatite orebodies.

1—3-6; 2—3-6H. Sample number as for Table 2.

4 矿床中方解石的碳、氧及锶同位素特征

为了进一步判别方解石的成因，在上述研究的基础上，又分别对两类方解石进行了碳、氧同位素测定。分析结果表明，碳酸岩型矿体中伟晶状方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-6.94\text{‰} \sim -6.58\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $6.37\text{‰} \sim 7.25\text{‰}$ ，与岩浆成因碳酸岩的碳、氧同位素特征十分相似（见图7）。这说明该类方解石的形成确实与碳酸岩盐熔体有关。霓辉重晶伟晶岩型矿体中方解石的碳、氧同位素值分别为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} -10.59\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} 16.28\text{‰}$ ，既不同于典型岩浆成因的方解石，又有别于热液成因的方解石（见图7），而是介于两类方解石之间。

碳、氧同位素分析结果证实了稀土元素地球化学研究所得出的结论。

碳酸岩型矿体中伟晶状方解石 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 变化范围为 $0.70593 \sim 0.70598$ ，与岩浆成因碳酸岩的锶同位素特征相类似⁽³⁾。

碳、氧及锶同位素研究结果表明，碳酸岩型矿体中伟晶状方解石是岩浆作用的产物；而霓辉重晶伟晶岩型矿体中方解石则兼有岩浆和热液作用的共同特点，它很可能是极富水岩浆结晶的产物。

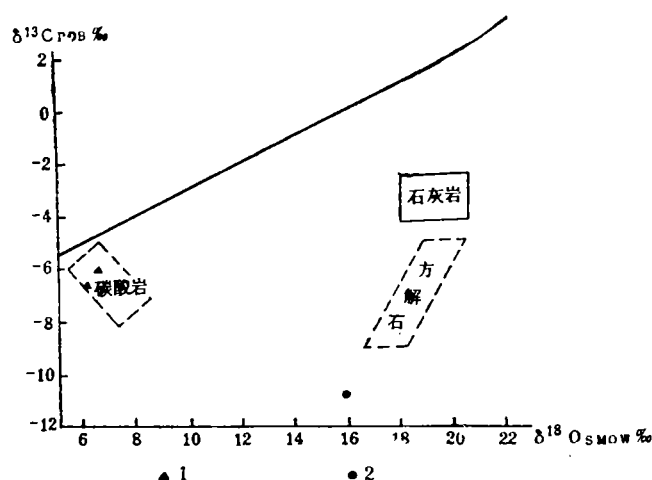


图 7 不同类型方解石的碳、氧同位素特征

1—碳酸岩型矿体中伟晶状方解石; 2—霓辉重晶伟晶岩型矿体中晶簇状方解石

Fig. 7. Carbon and oxygen isotopic composition of different types of calcite.

1—Giant calcite crystals from carbonatite veins; 2—Drusy calcite from aegirine-augite barite pegmatite veins.

5 矿床成因

包裹体相态及测温研究显示, 冕宁稀土矿床中块状石英、早期萤石具有岩浆成因的特征, 稀土元素地球化学的研究证实了包裹体研究所得出的结论。根据矿物生成顺序和矿物共生组合关系, 长石、霓石—霓辉石、伟晶状重晶石等或者与块状石英、早期萤石同时形成, 或者先于它们结晶, 它们也应是岩浆结晶的产物。由于霓石—霓辉石、块状石英、块状长石、伟晶状重晶石、早期萤石是构成霓辉重晶伟晶岩型矿体的主体矿物, 因此霓辉重晶伟晶岩型矿体的主体是由岩浆作用形成的。

在与伟晶状方解石共生的石英中发现了多晶包裹体这一客观事实及伟晶状方解石稀土元素、碳、氧、锶同位素地球化学研究结果均表明, 碳酸岩型矿体的主体组成矿物也是岩浆结晶的产物。

多晶包裹体存在的客观事实还表明, 形成霓辉重晶伟晶岩型矿体和碳酸岩型矿体的母体岩浆是富水岩浆, 随着结晶作用的进行将分异出相当数量的成矿热液, 为后期的热液矿化创造了有利条件。

化学分析结果显示, 霓辉重晶伟晶岩型矿体和碳酸岩型矿体的化学组成与硅酸岩有明显差别(表3), 它们分别以 BaSO_4 和 CaCO_3 为主要组成物质, 这说明形成它们的母体岩浆分别是以 BaSO_4 和 CaCO_3 为主的富水盐熔体^[5~7]。两种盐熔体均明显地富含 SO_3 、 CO_2 、 P_2O_5 、F及 H_2O^+ 等挥发分, 这对于稀土元素的富集是十分有利的。

与美国Mountain Pass、蒙古南部稀土矿床一样, 冕宁稀土矿床的霓辉重晶伟晶岩型矿体、碳酸岩型矿体与碱性正长岩(霓石石英正长岩)在空间上和时间上紧密共生。二者究竟

表 3 不同类型矿体及霓石英正长岩的化学成分(%)
Table 3. Chemical composition of different types of orebodies
as well as aegirine-quartz syenite

岩石类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	BaO
霓辉重晶伟晶岩型矿体	26.75	0.15	3.91	1.60	2.35	0.99	1.50	7.30	23.58
碳酸岩型矿体	23.70	0.12	2.02	2.08	0.69	0.55	1.10	31.39	—
霓石英正长岩	66.75	0.15	17.01	2.59	—	0.05	0.53	0.43	0.52
岩石类型	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	CO ₂	H ₂ O	F	REO	总量
霓辉重晶伟晶岩型矿体	1.48	1.73	0.68	13.72	2.12	0.12	4.53	2.81	95.40
碳酸岩型矿体	1.00	1.45	0.07	10.01	21.85	0.14	0.664	3.86	100.48
霓石英正长岩	4.45	5.26	0.09	0.57	—	—	0.12	—	98.60

是什么关系呢? Самойлов等(1988)、Соловова等(1992)通过对蒙古南部与正长质岩套有关的稀土矿床的研究,认为与稀土成矿直接相关的盐熔体(碳酸岩盐熔体、磷酸岩盐熔体)是通过液态不混熔作用从正长质岩浆中分异出来的特殊岩浆^[6,7]。作者赞同他们的观点,认为冕宁与稀土成矿极为密切的碳酸岩盐熔体(碳酸岩型矿体的母体岩浆)和硫酸岩盐熔体(霓辉重晶伟晶岩型矿体的母体岩浆)是通过液态不混熔作用从霓石英正长岩的母体岩浆中分异出来的特殊岩浆。

早期萤石中次生流体包裹体及氟碳铈矿中包裹体的研究表明,冕宁稀土矿床中氟碳铈矿是典型热液作用的产物,其形成温度范围在150~270℃之间。

综上所述,冕宁稀土矿床是一个与特殊岩浆-盐熔体有直接成因联系的热液矿床。由于这种盐熔体是富水熔体,在其结晶演化过程中分异出了相当数量的成矿热液,为后期的氟碳铈矿矿化创造了有利条件。同时,又由于盐熔体富含CO₂、F、P₂O₅、SO₃及H₂O⁺等挥发分,因此它具有较强的活动能力,既可以在寄主岩石——碱性正长岩中定位,也可以进行较长距离的运移,定位于其它围岩中。这在一定程度上解释了冕宁稀土矿床各矿体与不同围岩相接触的地质事实。

通过对冕宁稀土矿床主要矿体——霓辉重晶伟晶岩型和碳酸岩型矿体中主要矿物包裹体、稀土元素地球化学和碳、氧、锆同位素地球化学的研究,作者认为该矿床是与盐熔体有直接联系的热液矿床,而这种盐熔体是通过液态不混熔作用从霓石英正长岩中分离出来的特殊岩浆。

在野外工作过程中,曾蒙施泽民高级工程师,杨光荣、李小渝工程师的大力协作,在此表示衷心谢忱!

参 考 文 献

- 1 卢焕章.地球化学.1990,(3):225~229
- 2 中国科学院地球化学研究所.白云鄂博矿床地球化学.北京:科学出版社,1988.252~484

- 3 王中刚等. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 156~160
- 4 London D. *American mineralogist*, 71: 376~396
- 5 Давюшевский Л В и др. *Геохимия*, 1991, 12: 1711~1723
- 6 Самойлов В С и др. *Геохимия*, 1988, 10: 1447~1459
- 7 Соловова И П и др. *Геохимия*, 1992, 1: 68~77

THE GENESIS OF THE MIANING REE DEPOSIT, SICHUAN PROVINCE

Niu Hecai and Lin Chuanxian

(*Institute of New Geotechnology, Academia Sinica, Guangzhou 510640*)

Key words: genesis of the ore deposit, multi-crystal inclusion, salt melt, hydrothermal deposit

Abstract

According to studies on mineral inclusions, REE geochemistry, and carbon, oxygen and strontium isotopic geology, it is concluded that the early stage quartz, barite, fluorite and calcite from the major part of the Mianning REE deposit (alkali pegmatite orebodies and carbonatite orebodies) are characterized by magmatic origin, whereas the ore mineral bastnaesite is a typical hydrothermal product. The author holds that the deposit is a hydrothermal REE deposit genetically in direct connection with salt melt rich in volatile components.

欢迎订阅《建材地质》

《建材地质》是国家级建材与非金属矿地质类综合性科技期刊。主要报导我国建材、非金属矿资源地质, 找矿与勘探方法, 水文与工程地质, 矿产开发与利用, 节能矿产、选矿、加工工艺, 岩矿、化学及物性测试, 环境保护与评价, 管理科学, 消息动态等。主要读者对象: 相关行业的科技人员, 管理人员及大、中院校师生。

本刊为双月刊, 每期约7.5万字。1995年每本定价3.00元, 全年18.00元, 邮发代号82—319。本刊1995年的征订工作已经开始, 订户可通过当地邮局订阅, 亦可与本编辑部联系。

本刊尚存部分历年合订本, 欢迎选购。

本刊地址: 北京市朝内大街甲190号 邮编: 100010

电话: 5249331—2101