

文章编号: 0258-7106(2008)02-0177-11

川西冕宁-德昌 REE 成矿带成矿年代学研究： 热液系统维系时限和构造控矿模型约束*

田世洪^{1,2}, 侯增谦³, 杨竹森¹, 陈文^{2,3}, 杨志明³, 袁忠信¹, 谢玉玲⁴,
费红彩⁵, 尹淑苹³, 刘英超¹, 李政⁴, 李小渝⁶

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 国土资源部同位素地质重点实验室, 北京 100037;
3 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;
5 中国地质科学院, 北京 100037; 6 四川省地质矿产局 109 地质队, 四川 成都 610100)

摘要 川西冕宁-德昌 REE 成矿带是中国最重要的 REE 成矿带之一, 包括牦牛坪超大型 REE 矿床、大陆槽大型 REE 矿床、木落寨中型 REE 矿床和里庄小型 REE 矿床以及一系列矿点和矿化点。REE 成矿作用与碳酸岩-碱性杂岩体有关, 受印度-亚洲大陆碰撞带的一系列新生代走滑断裂系统控制, 岩体主要侵位于元古代结晶基底岩石和古生代—中生代沉积盖层中。⁴⁰Ar/³⁹Ar 快中子活化分析表明, 大陆槽白云母、里庄黑云母和木落寨白云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄分别为 13.2 Ma、30.6 Ma 和 35.5 Ma。结合前人成岩成矿年龄资料, 牦牛坪矿床岩浆-热液活动时限约 12 Ma, 大陆槽矿床约 5 Ma, 而里庄矿床则为 2 Ma。热液活动持续时间与矿床的 REE 储量存在正相关关系。研究发现, 冕宁-德昌 REE 矿带从北到南, 成岩成矿年龄逐渐变新, 时间跨度长达 27 Ma。碳酸岩-正长岩岩浆初始活动时间与雅砻江左旋走滑断裂开始活动时间相一致, 成岩成矿年龄的系统变化, 有可能是由于雅砻江左旋走滑断裂右侧板片在相对固定的幔源岩浆“热点”上从南至北滑移造成的(相对于左侧板片)。

关键词 地质学; 成矿年龄; 构造模式; 川西冕宁-德昌 REE 成矿带

中图分类号: P618.7

文献标识码: A

Geochronology of REE deposits in Mianning-Dechang REE metallogenic belt: Constraints on duration of hydrothermal activities and tectonic model for carbonatite-alkalic complexes in southwestern Sichuan

TIAN ShiHong^{1,2}, HOU ZengQian³, YANG ZhuSen¹, CHEN Wen^{2,3}, YANG ZhiMing³, YUAN ZhongXin¹,
XIE YuLing⁴, FEI HongCai⁵, YIN ShuPing³, LIU YingChao¹, LI Zheng⁴ and LI XiaoYu⁶

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Key Laboratory on Isotope Geology, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China; 3 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 4 Civil and Environmental Engineering School, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 5 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 6 No. 109 Geological Party, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610100, Sichuan, China)

Abstract

The Mianning-Dechang REE metallogenic belt in western Sichuan, is one of the most significant REE belts in China and consists

* 本文得到国家自然科学基金(40603012)、国家杰出青年基金(40425014)、国家重点基础研究发展规划项目(2002CG412610)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金、南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室资金(13-7-5)、国家自然科学基金面上基金(40573035)和中国地质科学院重点开放实验室专项资金(KL05-9)的联合资助

第一作者简介 田世洪,男,1973年生,博士,副研究员,主要从事矿床学和同位素地球化学研究工作。E-mail: s. h. tian@163. com.

收稿日期 2007-12-05; 改回日期 2008-01-26。李德先编辑。

of a superlarge (Maoniuping), a large (Dalucuo), an intermediate-sized (Muluozhai) and a number of small REE deposits (e. g., Lizhuang) as well as ore spots. REE mineralization is associated with the carbonatite-alkalic complexes, controlled by a series of Cenozoic strike-slip faults in eastern Indo-Asian collision zone. These complexes consist of carbonatite sills or dykes and associated alkalic syenite stocks, which intruded the Proterozoic basement and Devonian-Cretaceous sedimentary sequence. Using the ^{40}Ar - ^{39}Ar isotope chronological method, the authors obtained the plateau age of 13.2 Ma for muscovite (Dalucuo), 30.6 Ma for biotite (Lizhuang) and 35.5 Ma for phlogopite (Muluozhai), respectively. Combined with other rock-forming and metallogenic ages, it is held that the duration periods of magmatic-hydrothermal activities are about 12 Ma in Maoniuping, 5 Ma in Dalucuo, and 2 Ma in Lizhuang, which are positively related to their REE ore reserves. It is also found that the rock-forming and metallogenic ages decrease systematically from north to south, covering a period of 27 Ma. The beginning of carbonatite-syenite magmatism coincided with the onset of Yalongjiang sinistral strike-slip fault. Age sequence can be plausibly explained by assuming that mantle magmatism was a relatively fixed "hot spot", and the right plate moved from south to north along Yalongjiang sinistral strike-slip fault relative to the left plate.

Key words: geology, metallogenic ages, tectonic model, Mianning-Dechang (MD) REE metallogenic belt in western Sichuan

川西冕宁-德昌 REE 成矿带是中国最重要的 REE 成矿带之一,长约 270 km,宽 15 km,包括牦牛坪超大型 REE 矿床、大陆槽大型 REE 矿床、木落寨中型 REE 矿床和里庄小型 REE 矿床以及一系列矿点和矿化点,为中国三大 REE 生产基地之一。这些 REE 矿床与碳酸岩-碱性杂岩体有关,构造上位于印度-亚洲大陆碰撞带东缘,受一系列新生代走滑断裂系统控制(Hou et al., 2003; 侯增谦等, 2006b)。前人对牦牛坪和大陆槽等 REE 矿床的研究主要集中在矿床地质、矿物学、岩石学、地球化学和成矿作用等方面(叶幼兰, 1992; 蒋明全, 1992; 牛贺才等, 1994; 1995a; 1995b; 1996a; 1996b; 1997; 2002; 袁忠信等, 1993; 1995; 2001; 杨光明^①等, 1998; 阳正熙等, 2000; 2001; 蒲广平, 1988; 1993; 1995; 2001; 王登红等, 2002a; 2002b; 许成等, 2001; 2002a; 2002b; 2003; 2004; 田世洪等, 2003; 2005a; 2005b; 2005c; 2006a; 2006b; 2006c; 2006d; 刘丛强等, 2004; 李小渝, 2005; 侯增谦等, 2006b; 2008; Wang D H et al., 2001; Huang et al., 2003; Tian et al., 2006e; Hou et al., 2006a)。然而,对该成矿带不同 REE 矿床年代学的系统研究还相对薄弱,这在很大程度上制约了对 REE 矿床成矿地球动力学背景和 REE 超富集过程的理解和认识。本文通过对大陆槽、里庄、木落寨等 REE 矿床中热液云母的 Ar-Ar 年龄测定,并结合前人报道的有关数据,重点讨论了冕宁-德昌 REE 成矿带的成岩成矿时代,并对 REE 成矿地球动力学背景提供了新约束。

1 地质背景

冕宁-德昌 REE 成矿带位于印度-亚洲大陆碰撞形成的青藏高原东缘,构造上是吸纳和调节印度-亚洲大陆碰撞应力应变的构造转换带(侯增谦等, 2006b),先后经历了中生代古特提斯造山作用和喜马拉雅期大规模陆内变形等构造演化,于新生代卷入印度-亚洲大陆碰撞造山带中。本区新生代变形经历了多个阶段:古新世—始新世转换压扭变形(55~40

Ma), 始新世—渐新世转换过渡变形(40~38 Ma), 早—中新世转换张扭变形(24~17 Ma)以及晚第三纪以来东西向伸展,先后形成了一系列不同方向的走滑断裂组合(Wang J H et al., 2001; Hou et al., 2003)。其中,西部组合为环绕东构造结的嘉黎和高黎贡走滑断裂,中部组合包括北段巴塘-丽江断裂和南段哀牢山-红河断裂,前者 SN 向展布,右行走滑,后者 NW 向延伸,左行走滑,两者构成东侧的扬子陆块与西侧的羌塘地体的边界断裂带;东部组合包括龙门山逆冲带和鲜水河、小江走滑断裂(见侯增谦等, 2008, 图 2A)。

印度-亚洲大陆碰撞带东缘喜马拉雅期岩浆活动颇为频繁且具特色,构成一条由一系列新生代走滑断裂控制的半连续的钾质火成岩区(Guo et al., 2005),从西至东分布有:①受一系列走滑断裂控制的、与新生代拉张盆地有关的、长达 1 000 余公里的富碱斑岩(张玉泉等, 1997; 邓万明等, 1998; Wang J H et al., 2001; Hou et al., 2003);②位于红河断裂东侧,面积约 50 000 km² 的钾质煌斑岩区(骆耀南等, 2001; Guo et al., 2005);③以碰撞期间复活的雅砻江断裂和安宁河断裂为界、长达 270 km 的碳酸岩-碱性岩杂岩带(见侯增谦, 2008, 图 2B; Hou et al., 2006a)。这些岩浆活动出现在相对较短的时期内(40~24 Ma)并在 35 Ma 达到高峰(Chung et al., 1998; Hou et al., 2006a)。富碱斑岩带中的二长花岗斑岩与 Cu-Mo 成矿作用有关,形成玉龙斑岩铜矿带(Hou et al., 2003),而碳酸岩-碱性杂岩体与 REE 成矿作用有关,形成川西冕宁-德昌 REE 成矿带(侯增谦等, 2006b; 2008)。

2 典型矿床地质特征

冕宁-德昌 REE 成矿带中所有 REE 矿床均与碳酸岩-碱性杂岩体有关,从北至南,包括牦牛坪、木落寨、里庄和大陆槽 REE 矿床。下面简要说明每个矿床的地质特征(详见侯增谦等, 2008)。

牦牛坪 REE 矿床是一个世界级大型矿床,规模仅次于中

① 杨光明, 常 诚, 左大华, 刘学良. 1998. 四川省德昌县 DLREE 矿床成矿条件研究. 内部资料.

国内蒙古白云鄂博 REE 矿床和美国芒廷帕斯 REE 矿床。矿区出露的地层仅有泥盆纪的泥砂碎屑岩、碳酸盐岩和第四纪的洪积、坡积物。构造以 NNE 向断裂为主,主要有南河断裂、哈哈断裂、马头山断裂等。矿区广泛发育霓长岩化,形成一条长 1 800 m、宽 100~600 m 的霓长岩化带,耗牛坪的所有矿体均产于其中。该矿床是由一系列不同的矿化细脉、网脉和大脉组成的脉状矿床,沿 NNE 向展布,长 2.65 km,平面呈“S”型,显示受走滑断裂控制的特征。矿石矿物主要为氟碳铈矿,脉石矿物以萤石、重晶石、方解石、石英、云母和霓辉石为主(田世洪等,2003,2006c)。矿石类型主要为伟晶岩型、碳酸岩型、角砾型和网脉型。

木落寨矿床由碉楼山和郑家梁子 2 矿段组成。矿区仅出露古生代二叠纪地层,包括峨眉山组和阳新组。与成矿作用有关的蚀变主要为霓长岩化、碳酸岩化。矿体为似层状、条带状和不规则透镜状及细脉状等。矿石矿物主要为氟碳铈矿,脉石矿物以萤石、重晶石、方解石、长石、石英、云母和霓辉石为主。矿石类型主要为致密块状萤石-氟碳铈矿型、浸染状型和条带状型矿石。

里庄矿床是一个小型的 REE 矿床,由众多小透镜体和网脉状矿石组成,赋存于碳酸岩和英碱正长岩中。与成矿作用有关的蚀变主要为霓长岩化。矿石类型主要为褐色浸染状矿石、黄色条带状矿石、网脉状矿石和黑色粉末状矿石。

大陆槽 REE 矿床位于南段,受大陆槽走滑断裂控制。喜马拉雅期英碱正长岩和霓辉正长岩主要侵入到石英闪长岩之中,而碳酸岩则沿走滑断裂形成的构造裂隙侵入。与 REE 成矿作用有关的 2 个角砾岩筒发育于英碱正长岩之中。与成矿作用有关的蚀变主要为霓长岩化。大陆槽 REE 矿床由 2 个大透镜体和诸多个小矿体组成。该矿床包括 2 套成矿系统,以发育角砾岩筒及其与之有关的成矿作用为特征,第一套成矿系统发育于 2 个角砾岩筒中,形成 1 号矿体和 3 号矿体,1 号矿体的矿物组合为重晶石+萤石+霓辉石+氟碳铈矿,3 号矿体的矿物组合为天青石+萤石+霓辉石(体积百分数为 1%~5%)+氟碳铈矿(体积百分数为 5%~8%);第二套成矿系统发育于 2 个矿化角砾岩筒之间,因受磨房沟走滑断裂影响而发生位移。该成矿系统由发育在英碱正长岩中的矿脉群和发育在霓辉正长岩顶部的下覆似层状矿化带组成。矿体形状主要是透镜状、筒状和少量细脉状。矿石类型主要为角砾状矿石、块状重晶石(天青石)+萤石+氟碳铈矿矿石、细脉状矿石和浸染状矿石。

3 样品处理及 Ar-Ar 分析方法

用于年龄测定的样品为金云母、黑云母和白云母,分别采自木落寨 REE 矿床致密块状萤石-氟碳铈矿型矿石、里庄 REE 矿床褐色浸染状矿石以及大陆槽 REE 矿床 1 号和 2 号矿体矿石中。所有样品均采自主要成矿期,矿物成分为氟碳铈矿、萤石、重晶石、霓辉石等,被测试矿物均为未风化、未蚀

变样品,能够代表各个矿床的成矿年龄。具体分析方法如下:

首先挑选纯度大于 99% 的单矿物用超声波清洗。先用经过 2 次亚沸蒸馏净化的纯净水清洗 3 次,每次 3 min,以清除矿物表面和解理缝中在天然状态下和碎样过程中吸附的粉末和杂质,然后在丙酮中清洗 2 次,每次 3 min,以清除矿物表面吸附的油污等有机物质。

然后将清洗后的样品封进石英瓶中送核反应堆接受中子照射,照射工作在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行。使用 H8 孔道或 B4 孔道,其中子流密度约为 $6.0 \times 10^{12} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,照射总时间为 3 223 min,积分中子通量为 $1.16 \times 10^{18} \text{ n}/\text{cm}^2$ 。监控标准样 ZBH-25 黑云母为国内标样,其标准年龄为 132.7 Ma, K 含量为 7.60%。

样品的阶段升温加热使用电子轰击炉,每个阶段加热 30 min,纯化 30 min。质谱分析在国土资源部同位素地质重点实验室 MM-1200B 质谱仪上进行,每个峰值均采集 8 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。系统空白水平 m/e 为 40、39、37、36,分别小于 $6 \times 10^{-15} \text{ mol}$ 、 $4 \times 10^{-16} \text{ mol}$ 、 $8 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 和 $2 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为 $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.0002389$ 、 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004782$ 、 $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正, ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (Steiger et al., 1977); 坪年龄误差以 2σ 给出。用 Ludwig 编写的 ISOPLOT 程序计算反等时线(Ludwig, 2001)。详细实验流程见有关文章(陈文等,2006;张彦等,2006)。

4 分析结果

大陆槽、木落寨、里庄 REE 矿床白云母、金云母和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的分析数据列于表 1。

大陆槽 REE 矿床:1 号矿体白云母(样品号为 DLC072-3)的 12 个温度阶段组成了一个年龄谱(图 1a),总气体年龄为 14.3 Ma。由 1 100~1 400℃ 的 5 个中-高温阶段组成了一个年龄坪,坪年龄 t_p 为 $(13.45 \pm 0.34) \text{ Ma}$,对应了 87.9% 的 ^{39}Ar 释放量,相应的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 等时线年龄 t_i 为 $(13.33 \pm 0.41) \text{ Ma}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 295 ± 95 (MSWD = 0.71)(图 2a);2 号矿体白云母(样品号为 DLC087-1)的 13 个温度阶段组成了一个年龄谱(图 1b),总气体年龄为 13.3 Ma。其中 900~1 400℃ 的 8 个中-高温阶段组成了一个年龄坪,坪年龄 t_p 为 $(12.94 \pm 0.20) \text{ Ma}$,对应了 99% 的 ^{39}Ar 释放量,相应的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 等时线年龄 t_i 为 $(12.95 \pm 0.22) \text{ Ma}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 283 ± 21 (MSWD = 0.85)(图 2b)。

木落寨 REE 矿床:金云母(样品号为 ML-009)的 12 个温度阶段组成了一个年龄谱(图 1c),总气体年龄为 40.4 Ma。

表1 川西冕宁-德昌 REE 矿带白云母、金云母和黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温测年结果Table 1 Results of ⁴⁰Ar/³⁹Ar stepwise heating dating for muscovite, phlogopite and biotite from the Mianning-Dechang REE belt

$\theta/^\circ\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	F	$^{39}\text{Ar}/(\times 10^{-14}\text{mol})$	$^{39}\text{Ar}/\%$	t/Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
大陆槽矿床:白云母(样品号为 DLC072-3)									
400	13.9950	0.0311	0.4088	0.0226	4.8341	58.98	1.12	47.4	5.2
500	9.8882	0.0143	0.2337	0.0387	5.6721	22.71	1.55	55.4	5.4
600	9.8746	0.0183	0.3396	0.0231	4.4794	29.38	2.11	43.9	5.5
700	6.8752	0.0125	0.5155	0.0269	3.2218	20.44	2.49	31.7	7.2
800	3.3484	0.0076	1.1475	0.0127	1.1716	21.34	2.90	11.6	7.5
900	3.3104	0.0075	0.8656	0.0140	1.1428	50.80	3.86	11.3	2.0
1000	2.0709	0.0022	0.3048	0.0137	1.4422	432.55	12.06	14.26	0.39
1100	1.5661	0.0006	0.1359	0.0127	1.3954	621.80	23.85	13.80	0.44
1200	1.4981	0.0003	0.0871	0.0129	1.4028	881.79	40.57	13.87	0.41
1300	1.4120	0.0002	0.0109	0.0129	1.3426	2034.73	79.16	13.28	0.22
1350	1.5060	0.0006	0.0046	0.0131	1.3388	848.70	95.25	13.24	0.65
1400	2.0847	0.0027	0.0088	0.0139	1.2787	250.59	100.00	12.6	1.4
大陆槽矿床:白云母(样品号为 DLC087-1)									
400	19.8757	0.0446	0.3576	0.0291	6.7156	33.72	0.52	66.8	9.3
500	23.9458	0.0735	0.5339	0.0315	2.2750	3.50	0.58	23	52
600	24.7151	0.0638	0.3421	0.0269	5.8702	7.44	0.69	58	15
700	18.2711	0.0404	0.2637	0.0400	6.3358	9.99	0.85	63	16
800	16.1417	0.0426	0.4127	0.0424	3.5936	12.85	1.05	36	11
900	11.6046	0.0365	0.2059	0.0216	0.8361	29.34	1.50	8.4	7.7
1000	3.3485	0.0071	0.0759	0.0151	1.2382	168.33	4.11	12.5	1.0
1070	1.7052	0.0017	0.0449	0.0135	1.2127	537.28	12.43	12.24	0.47
1140	1.5297	0.0008	0.0325	0.0131	1.3011	546.62	20.90	13.13	0.42
1220	1.4505	0.0005	0.0184	0.0134	1.2986	853.28	34.12	13.10	0.32
1300	1.3795	0.0004	0.0033	0.0129	1.2703	2089.98	66.49	12.82	0.18
1350	1.3745	0.0002	0.0022	0.0133	1.2963	1406.83	88.29	13.08	0.17
1400	1.4481	0.0005	0.0024	0.0133	1.2820	756.13	100.00	12.93	0.39
木落寨矿床(引自田世洪等, 2006a):金云母(样品号为 ML-009)									
500	20.7716	0.0222	0.0967	0.0531	14.2275	28.84	0.26	284.1	7.9
600	19.4987	0.0186	0.1128	0.0533	13.9925	23.06	0.46	280	35
700	20.9521	0.0222	0.1663	0.0544	14.3986	19.66	0.64	287	11
800	18.1493	0.0307	0.5782	0.0570	9.1073	13.76	0.76	187	26
900	16.1507	0.0222	0.2676	0.0270	9.6007	17.03	0.92	196	16
1000	12.0015	0.0291	0.0323	0.0286	3.4089	79.46	1.63	72	15
1100	4.0570	0.0053	0.0062	0.0141	2.4950	763.38	8.47	53.2	1.6
1150	2.9559	0.0021	0.0060	0.0133	2.3364	604.32	13.88	49.82	0.79
1200	2.4052	0.0014	0.0030	0.0130	1.9877	1044.82	23.24	42.47	0.66
1250	2.1651	0.0016	0.0011	0.0127	1.6853	2365.79	44.44	36.08	0.81
1300	1.9602	0.0010	0.0007	0.0127	1.6611	2324.08	65.26	35.56	0.44
1350	1.9035	0.0009	0.0004	0.0130	1.6359	3877.46	100.00	35.03	0.41
里庄矿床:黑云母(样品号为 LZ-127)									
500	24.5079	0.0574	12.4327	0.0611	8.4948	12.20	0.09	166	43
600	27.8420	0.0866	23.1952	0.1166	3.9535	19.05	0.22	79	17
700	20.0797	0.0685	10.9252	0.0417	0.6159	19.57	0.36	12.6	9.0
800	16.9743	0.0570	9.4362	0.0342	0.7865	22.95	0.53	16	11
900	10.9303	0.0284	0.9584	0.0220	2.5963	92.36	1.18	52.5	6.1
1000	3.3868	0.0066	0.2408	0.0149	1.4570	409.45	4.10	29.6	1.9
1100	1.9019	0.0014	0.0210	0.0132	1.4976	3947.44	32.21	30.46	0.42
1170	1.8189	0.0010	0.0460	0.0129	1.5160	3245.83	55.32	30.83	0.33
1240	1.9215	0.0014	0.0310	0.0129	1.5014	2857.70	75.67	30.54	0.36
1300	1.9622	0.0015	0.0398	0.0127	1.5122	2570.35	93.97	30.75	0.43
1400	1.9547	0.0017	0.1897	0.0137	1.4659	846.44	100.00	29.82	0.52

注:表中下标 m 代表质谱测定的同位素比值;F 指放射性成因⁴⁰Ar 和³⁹Ar 比值。实验条件为 DLC072-3:Step=12,W=60.87 mg,J=0.005503;DLC087-1:Step=13,W=73.49 mg,J=0.005613;ML-009:Step=12,W=50.00 mg,J=0.011986;LZ-127:Step=11,W=51.85 mg,J=0.011370

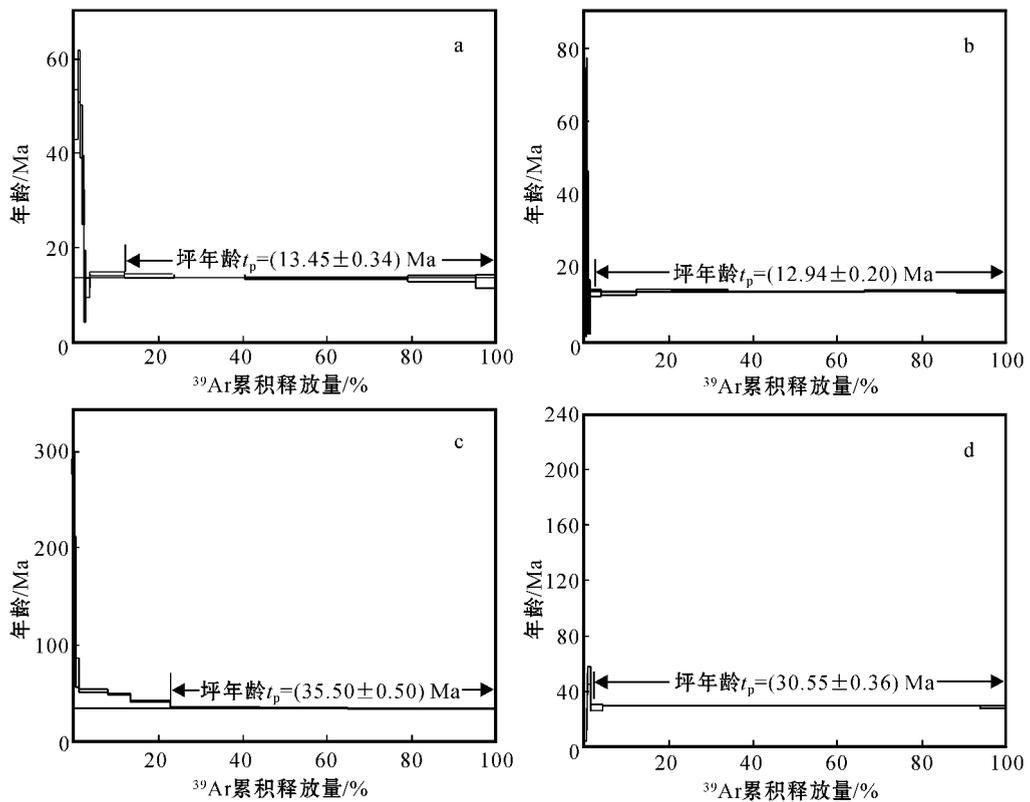


图 1 川西冕宁-德昌 REE 矿带白云母、金云母和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄坪谱图

a 和 b. 大陆槽矿床白云母样品 DLC072-3 和 DLC087-1 ; c. 木落寨矿床金云母样品 ML-009 ; d. 里庄矿床黑云母样品 LZ-127

Fig. 1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra for muscovite, phlogopite and biotite from the Mianning-Dechang REE metallogenic belt, southwestern Sichuan

其中, 1 250~1 350℃ 的 3 个中-高温阶段组成了一个年龄坪, 坪年龄 $t_p = (35.5 \pm 0.50)\text{Ma}$, 对应了 76.8% 的 ^{39}Ar 释放量。相应的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 等时线年龄 $t_i = (35 \pm 1)\text{Ma}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 314 ± 25 (MSWD=0.26) (图 2c)。

里庄 REE 矿床: 黑云母(样品号为 LZ-127)的 11 个温度阶段组成了一个年龄谱(图 1d), 总气体年龄为 30.8 Ma。其中, 1 000~1 400℃ 的 6 个中-高温阶段组成了一个年龄坪, 坪年龄 $t_p = (30.55 \pm 0.36)\text{Ma}$, 对应了 98.8% 的 ^{39}Ar 释放量。相应的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 等时线年龄 $t_i = (31.24 \pm 0.68)\text{Ma}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 272 ± 23 (MSWD=1.4) (图 2d)。

上述 3 个矿床的等时线年龄和坪年龄在误差范围内一致, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值接近于现代大气氩比值, 说明所测数据具有地质意义。根据坪年龄可确定, 大陆槽矿床 REE 矿化成矿时代为中新世, 里庄和木落寨矿床 REE 矿化成矿时代为渐新世。

5 讨论和结论

冕宁-德昌 REE 成矿带所有 REE 矿床均与碳酸岩-碱性杂岩体有关, 这是不争的事实。然而, 尚有一些科学问题需要

回答: REE 矿化发生于岩浆演化的具体阶段; 单个矿床的岩浆-热液系统发育时限的长短; 岩浆-热液系统时限与矿床规模关系如何; 不同矿床所产出的成矿环境和地球动力学背景有何差异等等。本文获得的新的成矿年代学资料为解决这些问题提供了新的约束和限定。

5.1 REE 矿床成岩成矿时代

岩石地球化学研究已表明, 碳酸岩-碱性杂岩系幔源富 CO_2 的硅酸盐岩浆发生不混溶的产物(刘丛强等, 2004; Hou et al., 2006a)。据此杂岩体内正长岩和碳酸岩的成岩年龄可以大致限定不混溶的两岩浆单元的演化历史, REE 矿床的年龄资料则可以大体约束 REE 矿化与岩浆演化的成因联系。

冕宁-德昌 REE 成矿带碳酸岩-碱性杂岩的成岩年龄已初步限定(表 2)。牦牛坪矿区杂岩体中正长岩全岩和碳酸岩钠铁闪石的 K-Ar 年龄分别为 40.8 Ma(骆耀南等, 2001)和 31.7 Ma(蒲广平, 2001), 碳酸岩岩浆的演化比正长岩岩浆延长近 10 Ma; 富 REE 矿石的热液黑云母 K-Ar 年龄为 40.3 Ma, 含 REE 细脉中黑云母 K-Ar 年龄为 27.8 Ma(袁忠信等, 1995), 表明 REE 矿化开始出现于正长岩岩浆结晶固结阶段, 热液成矿活动延续至碳酸岩岩浆结晶固结阶段, 即 REE 矿化伴随着不混溶岩浆侵位后结晶—固结的始终。这一认识得到了大陆槽矿床成岩成矿资料的佐证, 大陆槽矿区, 杂岩体中正

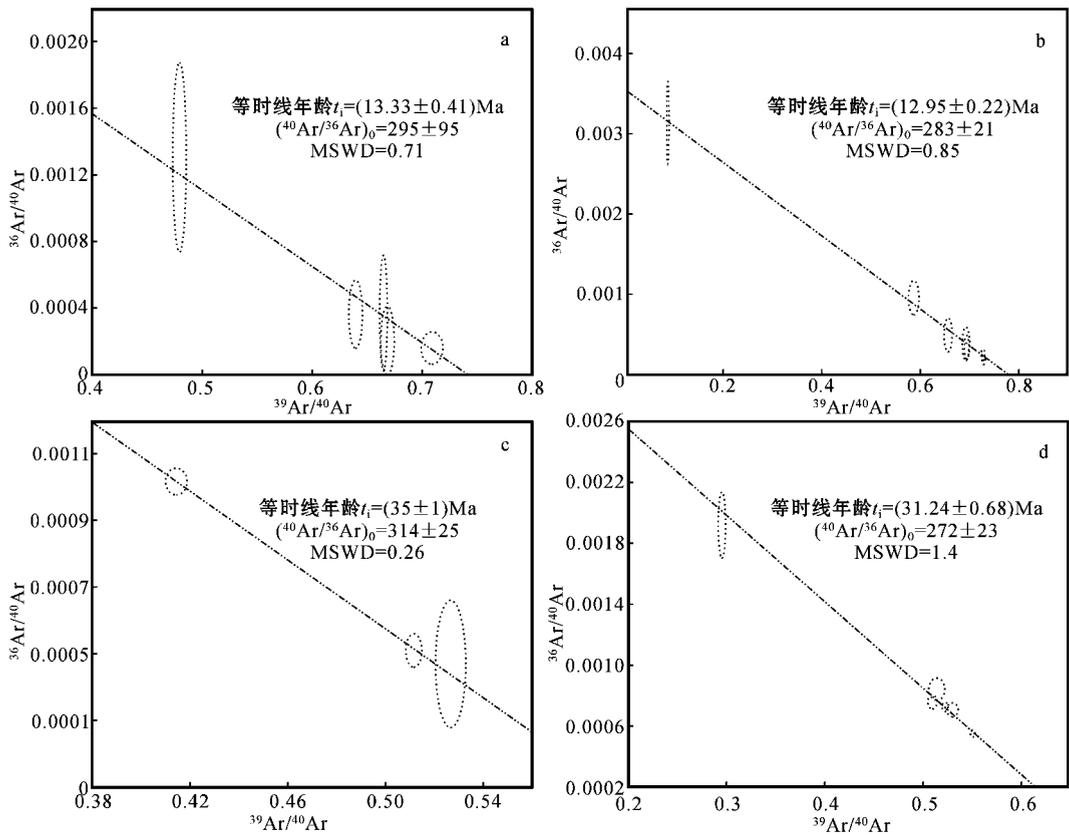


图 2 川西冕宁-德昌 REE 矿带白云母、金云母和黑云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 等时线年龄图

a 和 b. 大陆槽矿床白云母样品 DLC072-3 和 DLC087-1; c. 木落寨矿床金云母样品 ML-009; d. 里庄矿床黑云母样品 LZ-127

Fig. 2 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ isochronal diagram for muscovite, phlogopite and biotite from the Mianning-Dechang REE metallogenic belt, southwestern Sichuan

表 2 川西冕宁-德昌 REE 矿带碳酸岩-碱性杂岩及其矿化的成岩成矿年龄

Table 2 Geochronology of carbonatite-alkalic complexes and their mineralizations in the Mianning-Dechang REE metallogenic belt, southwestern Sichuan

矿床名称	成岩年龄/Ma			成矿年龄/Ma				资料来源
	Ar/Ar	SHRIMP	K-Ar	Ar/Ar	K-Ar	Re-Os	Rb-Sr	
牦牛坪			40.8 (Sy) 31.7 (Af)			40.3 (Bi) 27.8 (Bi)		袁忠信等, 1995; 骆耀南等, 2001; 蒲广平, 2001
木落寨	31.2 (K)			35.5 (Ph)				田世洪等, 2006a
里庄	27.1 (K)			30.6 (Bi)		28.5 (Mo)		本文; 田世洪, 未发表资料
大陆槽		14.5 (Sy) 13.0 (Ca)		13.5 (Mu) 12.9 (Mu)	10.2 (Bi) 11.3 (Mu)		15.3	本文; 田世洪等, 2008; 杨光明等 ^①

注 Sy—正长岩全岩; Ca—碳酸岩; K—微斜长石; Af—碳酸岩中钠铁闪石; Mo—辉钼矿; Ph—金云母; Mu—白云母; Bi—黑云母

长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 14.5 Ma, 碳酸岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 13.0 Ma (田世洪等, 2008), 碳酸岩岩浆经历了相对较长的演化历史; 2 个矿体的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为 13.5 Ma 和 12.9 Ma, 与杂岩体的成岩年龄大体相当, 说明 REE 成矿发生在杂岩体就位后的结晶—固结阶段。

整个矿带, 杂岩体通常遭受全岩蚀变和全岩矿化, 表明 REE 成矿流体必定在深部岩浆房不混溶过程中便分离出来, 并伴随着岩浆侵位和结晶-固结而向上运移并交代杂岩, 最后形成 REE 矿床。木落寨和里庄 2 个 REE 矿床的成岩成矿年龄资料证实了这一推论: 木落寨和里庄杂岩体正长岩的微斜长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为 31.2 Ma (田世洪等, 2006a) 和

① 杨光明, 常 诚, 左大华, 刘学良. 1998. 四川省德昌县 DLREE 矿床成矿条件研究. 内部资料.

27.1 Ma(田世洪,未发表资料),云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为 35.5 Ma 和 30.6 Ma(表 2),大于伴生杂岩的成岩年龄,说明 REE 矿化伴随着不混溶两岩浆单元从结晶到固结。这是因为正长岩中的微斜长石是岩浆结晶至最后阶段的产物,它们的年龄实际上记录了杂岩岩浆结晶演化至最晚阶段的年龄。如果将热液云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄看作岩浆开始结晶的年龄,那么岩浆持续时限大约在 3~4 Ma,与其他杂岩体岩浆结晶演化时限大体相当。

从冕宁-德昌 REE 成矿带碳酸岩-碱性杂岩的成岩年龄资料可以发现,牦牛坪矿床的成矿年龄差最大,大约在 12 Ma 左右;里庄矿床成矿年龄差在 2 Ma,大陆槽矿床的成矿年龄差在 5 Ma 左右。作为一级近似,热液矿物年龄差可以代表热液活动的大致时限。由此可得出,热液持续时限与矿床 REE 储量存在正相关关系:牦牛坪矿床的热液持续时限最长,矿床规模最大;里庄矿床的热液持续时限最短,矿床规模最小;大陆槽矿床介于其间,矿床规模居中。

侯增谦等(2006b)通过对青藏高原碰撞造山过程与成矿事件时空坐标的详细厘定,提出大陆碰撞带发育三大成矿作用,即主碰撞汇聚成矿作用(65~41 Ma)、晚碰撞转换成矿作用(40~26 Ma)和后碰撞伸展成矿作用(<25 Ma),REE 成矿作用主要发育于晚碰撞期构造转换环境,并受大规模走滑断裂活动的控制。本研究获得的最新成岩成矿资料表明,冕宁-德昌 REE 成矿带大部分 REE 矿床形成于 40~28 Ma,即晚碰撞期,但位于矿带南端的大陆槽 REE 矿床则形成于 10~15 Ma。可见,尽管大规模的 REE 成矿作用主要发育于晚碰撞期,但后碰撞期也可以发育 REE 成矿作用。

5.2 构造控矿模式的年代学约束

岩石学研究表明(Hou et al., 2006a),在晚碰撞构造转换环境,软流圈物质上涌诱发了碰撞带东缘大陆岩石圈富集地幔(EM I-EM II)部分熔融,导致了喜马拉雅期富 CO_2 硅酸岩

岩浆,后者在岩浆房发生岩浆不混溶后上升侵位形成碳酸岩-碱性杂岩体。这些杂岩岩浆沿古裂谷期形成的、晚碰撞期活化的走滑断裂上升侵位,在压力释放条件下导致了大量富稀土元素、富氟的流体从不混溶的碳酸岩-正长岩浆体系中释放出来,交代杂岩体,形成 REE 矿床,据此建立了 REE 矿床“三层楼”模式(侯增谦等, 2006b, 2008)。然而,这一模式尚未对冕宁-德昌 REE 成矿带成岩成矿年龄从北至南逐渐变新的现象给出合理解释。

冕宁-德昌 REE 成矿带成岩成矿年龄随地理位置而系统变化的现象,也见于受大规模走滑断裂控制的富碱侵入岩带。Liang 等(2006)研究发现,玉龙斑岩铜矿带斑岩成岩年龄从 NW 至 SE 呈现类似规律:玉龙 41.2 Ma→扎纳嘎 38.5 Ma→莽总 37.6 Ma→多露松多 37.5 Ma→马拉松多 36.9 Ma,认为这几套岩浆均来源于下部板片的熔融区(相当于热点),并与托坝-芒康左旋走滑断裂有关。

冕宁-德昌 REE 成矿带受渐新一中新世形成的雅砻江左旋走滑断裂控制,并导致碳酸岩-碱性杂岩体沿其上升,在浅部次级断裂(如哈哈断裂、大陆槽断裂)侵位。冕宁-德昌 REE 成矿带正长岩侵位年龄介于 40.8~14.5 Ma 之间,REE 成矿年龄介于 40.3~13.2 Ma 之间,故可以推断碳酸岩-正长岩浆初始活动时间与雅砻江左旋走滑断裂开始活动时间基本一致。假定形成冕宁-德昌 REE 成矿带的热源来自相对固定的幔源岩浆“热点”,则可以计算出雅砻江左旋走滑断裂运动速度为 1.03 cm/a(270 km/26.3 Ma),与鲜水河左旋走滑断裂(0.93 cm/a,唐文清等, 2005)和托坝-芒康左旋走滑断裂(1.2 cm/a, Liang et al., 2006)运动速度基本一致,说明这 3 条左旋走滑断裂受控于同一机制,即印度-亚洲大陆碰撞。因此本文成岩年龄的系统变化可以参考 Liang 等(2006)的模式,对冕宁-德昌 REE 成矿带成岩成矿年龄给与合理解释。

综上所述,笔者提出如下构造模式(图 3)碰撞造山过程

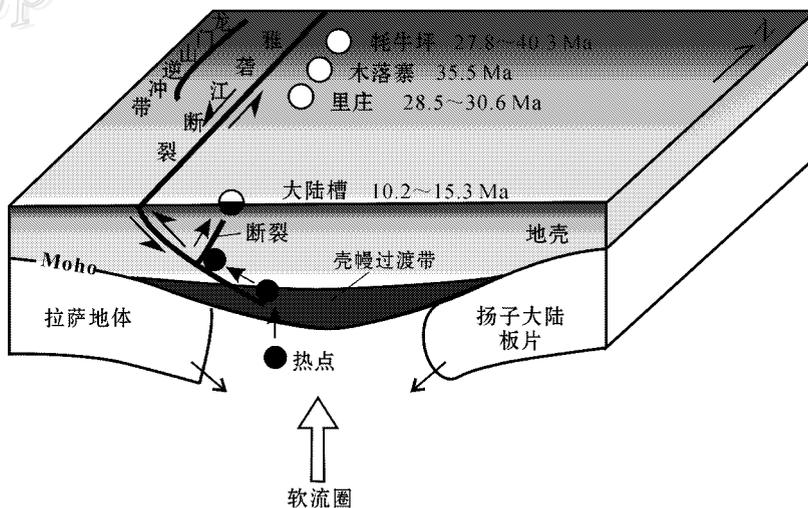


图 3 川西冕宁-德昌 REE 矿带成矿的构造模式

中的大陆板片俯冲引起地壳缩短和加厚,并诱发大规模走滑断裂。曾经遭受古洋壳板片流体交代和地壳物质深俯冲及循环而成的富集地幔,在软流圈构造-热侵蚀以及小股熔体注入下,发生部分熔融。从相对固定的幔源岩浆“热点”上分凝出的富 CO_2 硅酸盐岩浆沿雅砻江左旋走滑断裂的右侧板片从南至北滑移(相对于左侧板片),并在浅部次级断裂(如哈哈断裂、大陆槽断裂)侵位形成一系列相对孤立的岩浆房,并发生岩浆不混溶作用,产生碳酸岩岩浆和正长岩岩浆。从不混溶岩浆中分凝出的富REE成矿流体伴随岩浆上升侵位和结晶固结而发生水/岩反应,最后形成REE矿床。由于岩浆活动的早晚不同,导致这些岩浆沿雅砻江左旋走滑断裂的右侧板片运移的距离不一,先期岩浆运移距离远,形成了牦牛坪碳酸岩-碱性杂岩体及其矿床,而晚期岩浆运移距离近,形成了大陆槽碳酸岩-碱性杂岩体及其矿床,最终导致成岩成矿年龄自南向北逐渐变老。依据该模式推测,在冕宁牦牛坪至德昌大陆槽之间,还可以找到类似的REE矿床。目前,在里庄REE矿床南部发现了太和REE矿床就是一个很好的例子。

致谢 野外工作期间,得到四川省地质勘查与开发局109地质队蒲广平总工、余波高工等的大力支持和帮助,室内工作期间,得到国土资源部同位素地质重点实验室张彦、刘新宇等同志的大力支持。在此一并表示衷心感谢!

References

- Chen W, Zhang Y, Jin G S and Zhang Y Q. 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau: Evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867~872.
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y Q, Xie Y W, Li X H, Wang K L and Wang P L. 1998. Disynchronous uplift of the Tibetan plateau starting from 40 Ma ago[J]. *Nature*, 349: 769~773.
- Deng W M, Huang X and Zhong D L. 1998. Petrological characteristics and genesis of Cenozoic alkali-rich porphyries in eastern Yunnan [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33: 412~425 (in Chinese with English abstract).
- Guo Z T, Hertogen J, Liu J Q, Pasteels P, Boven A, Punzalan L, He H Y, Luo X J and Zhang W H. 2005. Potassic magmatism in western Sichuan and Yunnan Provinces, SE Tibet, China: Petrological and geochemical constraints on petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 46: 33~78.
- Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, Zhang Y Q, Wang M J, Wang Z and Pan G T. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product by large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet[J]. *Econ. Geol.*, 98: 125~145.
- Hou Z Q, Tian S H, Yuan Z X, Xie Y L, Yin S P, Yi L S, Fei H C and Yang Z M. 2006a. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 244: 234~250.
- Hou Z Q, Pan G T, Wang A J, Mo X X, Tian S H, Sun X M, Ding L, Wang E Q, Gao Y F, Xie Y L, Zeng P S, Qin K Z, Xu J F, Qu X M, Yang Z M, Yang Z S, Fei H C, Meng X J and Li Z Q. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521~543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Tian S H, Xie Y L, Yuan Z X, Yang Z S, Yang Z M, Yin S P, Fei H C, Zou T R and Li X Y. 2008. Mianning-Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone, southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model [J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 145~176 (in Chinese with English abstract).
- Huang Z L, Xu C, Liu C Q, Xu D R, Li W B and Guan T. 2003. Sr and Nd isotope geochemistry of fluorites from the Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China: Implications for the source of ore-forming fluids[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 78-79: 643~648.
- Jiang M Q. 1992. Structure feature of the Maoniuping REE deposit and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 11(4): 351~358 (in Chinese with English abstract).
- Li X Y. 2005. Geological characteristics of Dalucao REE deposit in Dechang County, Sichuan Province[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 151~160 (in Chinese with English abstract).
- Liang H Y, Campbell I H, Allen C, Sun W D, Liu C Q, Yu H X, Xie Y W and Zhang Y Q. 2006. Zircon $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet[J]. *Miner Deposita*, 41: 152~159.
- Liu C Q, Huang Z L, Xu C, Zhang H X, Su G L, Li H P and Qi L. 2004. Geofluids in the earth's mantle and its role in mineralization: A case study of the Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~229 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Isoplot/Ex, rev. 2.49: A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley geochronological center[M]. Special Publication.
- Luo Y N and Yu R L. 2001. Major features and dynamic model of the Himalayan tectonic-magmatism in the introcontinental orogenic belt in Longmenshan-Jinpingshan, Sichuan Province[A]. In: Chen Y C and Wang D H, eds. Study on Himalayan endogenic mineralization [M]. Beijing: Seismological Press. 88~96 (in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Zhao Z D, Deng J F, Dong G C, Zhou S, Guo T Y, Zhang S Q and Wang L L. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135~148 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C and Lin C X. 1994. The genesis of the Mianning REE deposit, Sichuan Province[J]. *Mineral Deposits*, 13(4): 345~353 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C and Lin C X. 1995a. Study on the fluid-melt inclusions in fluo-

- rit[J]. *Geological Review*, 41(1):28~33 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C and Lin C X. 1995b. Geochemical characteristics of trace elements in major minerals of Mianning REE deposit, Sichuan Province[J]. *Geochimica*, 24(3):287~293 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C, Chen F R and Lin M Q. 1996a. REE geochemistry of magmatogenic barite and fluorite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(4):382~388 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C, Shan Q and Lin M Q. 1996b. A study on inclusions in minerals from Mianning REE deposit in Sichuan Province[J]. *Geochimica*, 25(6):559~567 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C, Shan Q and Chen P R. 1997. Natures of fluids in magmatic-hydrothermal transitional stage—Exemplified by Mianning deposit, Sichuan, China[J]. *Journal of Nanjing University*, 33:21~27 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C, Shan Q, Chen X M and Zhang H X. 2002. Relationship between light rare earth deposits and mantle processes in Panxi rift, China[J]. *Science in China (Series D)*, 32(Supp.):33~40 (in Chinese).
- Pu G P. 1988. Discovery of an alkalic pegmatite-carbonatite complex zone in Maoniuping, southwestern Sichuan Province[J]. *Geological Review*, 34(1):88~92 (in Chinese with English abstract).
- Pu G P. 1993. Ore-model and exploration method in Maoniuping REE deposit[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 13(1):46~57 (in Chinese with English abstract).
- Pu G P. 1995. Metallogenic conditions in metallogenic belt of REE in west Mianning region[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 15(1):60~65 (in Chinese with English abstract).
- Pu G P. 2001. The evolution history of rare earth elements mineralization and major features of Himalayan REE deposits in the Panzhihua-Xichang area, Sichuan[A]. In: Chen Y C, Wang D L, eds. *Study on Himalayan endogenic mineralization[M]*. Beijing: Seismological Press, 104~116 (in Chinese with English abstract).
- Steiger R H and Jager E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo-cosmochronology[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36:359~362.
- Tang W Q, Chen Z L, Liu Y P, Zhang Q Z, Zhao J X, Burchfiel B C and King R W. 2005. Present-day tectonics activity in the intersection area of the Xianshuihe fault and Longmenshan fault on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(12):1169~1172 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Ding T P and Mao J W. 2003. Mantle fluids involved in the ore-forming process of the Maoniuping REE deposit, Sichuan: Evidence of C, H, O and S isotopes[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(6):543~547 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Zhang G L, Hou Z Q, Ding T P, Zou T R, Yuan Z X, Bai G and Xie Y L. 2005a. Geochemistry of carbonatites in the Lizhuang REE deposit, Sichuan Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(Sup.):151~155 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Zhang G L, Hou Z Q, Ding T P, Xie Y L, Yuan Z X, Bai G and Zou T R. 2005b. Stable isotope data from Muluozhai REE deposit in Mianning County, Sichuan Province, and their geological implication[J]. *Mineral Deposits*, 24(6):647~655 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H. 2005c. The Himalayan Mianxi REE belt on the eastern margin of the Tibetan plateau: Geology, geochemistry and geodynamics of the Mineralization[D]. Unpub. Ph.D dissertation, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing. 130p (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Hou Z Q, Yuan Z X, Chen W, Xie Y L, Fei H C, Yin S P, Yi L S and Zhou S. 2006a. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of rocks and ores from the Muluozhai REE deposit in Mianning County, Sichuan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10):2431~2436 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Hou Z Q, Yuan Z X, Xie Y L, Fei H C, Yin S P, Yi L S and Yang Z M. 2006b. Mantle source characteristics of magmatic carbonatites from the Himalayan collision zone in western Sichuan, SW China: Evidence of Pb-Sr-Nd isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3):669~677 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Ding T P and Yuan Z X. 2006c. Mantle fluids in the Maoniuping LREE deposit, Sichuan Province: Evidence of Pb-Sr-Nd, He-Ar isotopes and REE[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7):1035~1043 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Yuan Z X, Zhang G L, Hou Z Q, Ding T P, Bai G, Zou T R and Xie Y L. 2006d. A discussion on the mineralization-related granite in the Muluozhai REE ore deposit, Sichuan Province and its significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2):110~118 (in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Ding T P, Mao J W, Li Y H and Yuan Z X. 2006e. S, C, O, H isotope data and noble gas studies of the Maoniuping LREE deposit, Sichuan Province, China: A mantle connection for mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 80(4):540~549.
- Tian S H, Hou Z Q, Yang Z S, Yang Z M, Yuan Z X, Wang Y B, Xie Y L, Liu Y C and Li Z. 2008. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions and geological significance: A case study of carbonatite and nordmarkite from the Dalucao REE deposit, Sichuan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica* (in review).
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhang Y Q and Xie G H. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 88:145~176.
- Wang D H, Yang J M, Yan S H, Xu J, Chen Y C, Pu G P and Luo Y N. 2001. A special orogenic-type rare earth element deposit in Maoniuping, Sichuan, China: Geology and geochemistry[J]. *Resource Geology*, 51:177~188.
- Wang D H, Yu J J, Yang J M, Yan S H, Xue C J and Chen Y C. 2002a. Inert gas isotopic studies and dynamic background of Cenozoic ore-forming process in China[J]. *Mineral Deposits*, 21(2):179~186 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Yang J M, Yan S H, Chen Y C and Xu J. 2002b. Dynamics

- of the REE mineralization in Maoniuping area, Sichuan Province: Isotopic geochemistry of carbonatites [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(5): 539~544 (in Chinese with English abstract).
- Xu C, Huang Z L, Qi L, Xiao H Y, Li W B and Liu C Q. 2001. Source and evolution of ore-forming fluids of Maoniuping rare-earth deposit—Evidence from REE geochemistry of fluorites [J]. *Geology and Prospecting*, 37(5): 24~28 (in Chinese with English abstract).
- Xu C, Huang Z L, Qi L, Xiao H Y, Li W B and Liu C Q. 2002a. REE and isotopic geochemistry of fluorites in the Maoniuping rare-earth deposit, Sichuan Province [J]. *Geochimica*, 31(2): 180~190 (in Chinese with English abstract).
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, Qi L, Li W B and Guan T. 2002b. Geochemistry of carbonatites in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China [J]. *Science in China (Series D)*, 32(8): 635~643 (in Chinese).
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, Qi L, Li W B and Guan T. 2003. Indicator of fluorite Sr and Nd isotope to mantle-derived ore-forming fluids in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China [J]. *Earth Science*, 28(1): 41~46 (in Chinese with English abstract).
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, Yan Z F, Li W B and Guan T. 2004. Pb isotopic geochemistry of carbonatites in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 495~500 (in Chinese).
- Yang Z X, Williams-Jones A E and Pu G P. 2000. Geological features of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 20(2): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z X, Williams-Jones A E and Pu G P. 2001. A fluid inclusion study of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 21(2): 26~33 (in Chinese with English abstract).
- Ye Y L. 1992. The geochemical characteristic of rare earth elements in Maoniuping alkali complex massif and discussion on its genesis [J]. *Exploration of Geosciences*, 7: 120~127 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X, Bai G, Ding X S, Shi Z M and Li X Y. 1993. U-Pb isotopic age of zircon from the Maoniuping alkali granite, Sichuan Province and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 12(2): 189~192, 147 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X, Shi Z M, Bai G, Wu C Y, Chi R A and Li X Y. 1995. The Maoniuping rare earth ore deposit, Mianning County, Sichuan Province [M]. Beijing: Seismological Press. 1~150 (in Chinese).
- Yuan Z X and Bai G. 2001. Temporal and spatial distribution of endogenic rare and rare earth mineral deposits of China [J]. *Mineral Deposits*, 20(4): 347~354 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Chen W, Chen K L and Liu X Y. 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ³⁹Ar recoil loss: Examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province [J]. *Geological Review*, 52(4): 556~561 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q and Xie Y W. 1997. Geochronology of alkali-rich intrusions and Nd, Sr isotopic characteristics in Ailaoshan-Jinsha River [J]. *Science in China*, 27(4): 289~293 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈文, 张彦, 金贵善, 张岳桥. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据 [J]. *岩石学报*, 22(4): 867~872.
- 邓万明, 黄萱, 钟大赉. 1998. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因 [J]. *地质科学*, 33: 412~425.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用 [J]. *矿床地质*, 25(5): 521~543.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 尹淑苹, 费红彩, 邹天人, 李小渝, 杨志明. 2008. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型 [J]. *矿床地质*, 27(2): 145~176.
- 蒋明全. 1992. 牦牛坪轻 REE 矿床构造特征及其控矿意义 [J]. *矿床地质*, 11(4): 351~358.
- 李小渝. 2005. 四川德昌大陆槽 REE 矿床地质特征 [J]. *矿床地质*, 24(2): 151~160.
- 刘丛强, 黄智龙, 许成, 张鸿翔, 苏根利, 李和平, 漆亮. 2004. 地幔流体及其成矿作用——以四川冕宁 REE 矿床为例 [M]. 北京: 地质出版社. 1~229.
- 骆耀南, 俞如龙. 2001. 龙门山-锦屏山陆内造山带喜马拉雅期构造-岩浆作用主要特征及其动力学模式 [A]. 见: 陈毓川, 王登红, 主编. 喜马拉雅期内生成矿作用研究 [M]. 北京: 地震出版社. 88~96.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应 [J]. *地学前缘*, 10(3): 135~148.
- 牛贺才, 林传仙. 1994. 论四川冕宁 REE 矿床的成因 [J]. *矿床地质*, 13(4): 345~353.
- 牛贺才, 林传仙. 1995a. 萤石中流体-熔融包裹体的研究 [J]. *地质论评*, 41(1): 28~33.
- 牛贺才, 林传仙. 1995b. 四川冕宁 REE 矿床脉石矿物的微量及 REE 元素地球化学特征 [J]. *地球化学*, 24(3): 287~293.
- 牛贺才, 陈繁荣, 林茂青. 1996a. 岩浆成因重晶石、萤石的 REE 元素地球化学特征 [J]. *矿物学报*, 16(4): 382~388.
- 牛贺才, 单强, 林茂青. 1996b. 四川冕宁 REE 矿床包裹体研究 [J]. *地球化学*, 25(6): 559~567.
- 牛贺才, 单强, 陈培荣. 1997. 岩浆-热液过渡阶段流体性质的研究——以四川冕宁矿床为例 [J]. *南京大学学报*, 33: 21~27.
- 牛贺才, 单强, 陈小明, 张海洋. 2002. 攀西裂谷带轻 REE 矿床与地幔过程的关系 [J]. *中国科学(D辑)*, 32(增刊): 33~40.
- 蒲广平. 1988. 四川西南牦牛坪碱性伟晶岩-火成碳酸盐岩杂岩体的发现 [J]. *地质论评*, 34(1): 88~92.
- 蒲广平. 1993. 牦牛坪轻 REE 矿床成矿模式及找矿方向探讨 [J]. *四川地质学报*, 13(1): 46~57.

- 蒲广平. 1995. 冕西 REE 成矿带成矿条件探讨[J]. 四川地质学报, 15(1): 60~65.
- 蒲广平. 2001. 攀西地区 REE 成矿历史演化与喜马拉雅期成矿基本特征[A]. 见: 陈毓川, 王登红, 主编. 喜马拉雅期内生成矿作用研究[M]. 北京: 地震出版社. 104~116.
- 唐文清, 陈智梁, 刘宇平, 张清志, 赵济湘, Burchfiel BC, King RW. 2005. 青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交汇区现今的构造活动[J]. 地质通报, 24(12): 1169~1172.
- 田世洪, 丁梯平, 毛景文. 2003. 四川牦牛坪轻 REE 矿床地幔流体成矿的碳、氢、氧、硫同位素证据[J]. 地球学报, 24(6): 543~547.
- 田世洪, 张桂兰, 侯增谦, 丁梯平, 邹天人, 袁忠信, 白 鸽, 谢玉玲. 2005a. 四川里庄 REE 矿床岩浆碳酸岩的地球化学[J]. 地球学报, 26(增刊): 151~155.
- 田世洪, 张桂兰, 侯增谦, 丁梯平, 谢玉玲, 袁忠信, 白 鸽, 邹天人. 2005b. 四川木落寨 REE 矿床稳定同位素研究及其意义[J]. 矿床地质, 24(6): 647~655.
- 田世洪. 2005c. 青藏高原东缘喜马拉雅期冕西 REE 成矿带地质地球化学特征及其成矿动力学研究[D]. 中国地质科学院博士论文. 1~130.
- 田世洪, 侯增谦, 袁忠信, 陈 文, 谢玉玲, 费红彩, 尹淑苹, 衣龙升, 周 肃. 2006a. 四川冕宁木落寨 REE 矿床成岩成矿的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2431~2436.
- 田世洪, 侯增谦, 袁忠信, 谢玉玲, 费红彩, 尹淑苹, 衣龙升, 杨志明. 2006b. 川西喜马拉雅期碰撞造山带岩浆碳酸岩的地幔源区特征——Pb-Sr-Nd 同位素证据[J]. 岩石学报, 22(3): 669~677.
- 田世洪, 丁梯平, 袁忠信. 2006c. 四川牦牛坪轻 REE 矿床地幔流体特征——铅锶钨和氡同位素及 REE 元素证据[J]. 地质学报, 80(7): 1035~1043.
- 田世洪, 袁忠信, 张桂兰, 侯增谦, 丁梯平, 白 鸽, 邹天人, 谢玉玲. 2006d. 四川木落寨 REE 矿床与成矿有关的花岗岩问题及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(2): 110~118.
- 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 杨志明, 袁忠信, 王彦斌, 谢玉玲, 刘英超, 李 政. 2008. 四川大陆槽 REE 矿床碳酸岩-英碱正长岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义[J]. 岩石学报(评审中).
- 王登红, 余金杰, 杨建民, 闫升好, 薛春纪, 陈毓川. 2002a. 中国新生成成矿作用的惰性气体同位素研究与动力学背景[J]. 矿床地质, 21(2): 179~186.
- 王登红, 杨建民, 闫升好, 陈毓川, 徐 珏. 2002b. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学[J]. 成都理工学院学报, 29(5): 539~544.
- 许 成, 黄智龙, 漆 亮, 肖化云, 李文博, 刘丛强. 2001. 四川牦牛坪轻 REE 矿床成矿流体来源与演化初探——萤石 REE 地球化学的证据[J]. 地质与勘探, 37(5): 24~28.
- 许 成, 黄智龙, 漆 亮, 肖化云, 李文博, 刘丛强. 2002a. 四川牦牛坪轻 REE 矿床萤石 REE 元素、同位素地球化学[J]. 地球化学, 31(2): 180~190.
- 许 成, 黄智龙, 刘丛强, 漆 亮, 李文博, 管 涛. 2002b. 四川牦牛坪轻 REE 矿床碳酸岩地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 32(8): 635~643.
- 许 成, 黄智龙, 刘丛强, 漆 亮, 李文博, 管 涛. 2003. 四川牦牛坪轻 REE 矿床萤石 Sr、Nd 同位素对地幔成矿流体的指示意义[J]. 地球科学, 28(1): 41~46.
- 许 成, 黄智龙, 刘丛强, 严再飞, 李文博, 管 涛. 2004. 牦牛坪轻 REE 矿床碳酸岩 Pb 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 20(3): 495~500.
- 阳正熙, Williams-Jones A E, 蒲广平. 2000. 四川冕宁牦牛坪轻 REE 矿床地质特征[J]. 矿物岩石, 20(2): 28~34.
- 阳正熙, Williams-Jones A E, 蒲广平. 2001. 四川牦牛坪轻 REE 矿床矿流体包裹体研究[J]. 矿物岩石, 21(2): 26~33.
- 叶幼兰. 1992. 牦牛坪碱性杂岩体 REE 地球化学特征及成因探讨[J]. 地学探索, 7: 120~127.
- 袁忠信, 白 鸽, 丁孝石, 施泽民, 李小渝. 1993. 四川冕宁牦牛坪碱性花岗岩锆石铀-铅同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 12(2): 189~192, 147.
- 袁忠信, 施泽民, 白 鸽, 吴澄宇, 池汝安, 李小渝. 1995. 四川冕宁牦牛坪轻 REE 矿床[M]. 北京: 地震出版社. 1~150.
- 袁忠信, 白 鸽. 2001. 中国内生稀有 REE 矿床的时空分布[J]. 矿床地质, 20(4): 347~354.
- 张 彦, 陈 文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层(I/S)Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52(4): 556~561.
- 张玉泉, 谢应雯. 1997. 袁牢山-金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd, Sr 同位素特征[J]. 中国科学(D 辑), 27(4): 289~293.