

四川牦牛坪稀土矿床地幔流体成矿的 碳、氢、氧、硫同位素证据

田世洪^{1,2)} 丁悌平^{1,2)} 毛景文¹⁾

(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开放重点实验室, 北京, 100037)

P61 A

摘要 选取2种主要矿石类型——碳酸岩伟晶岩型矿石和重晶石伟晶岩型矿石进行了成矿流体的C、H、O、S同位素测试, 获得 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-3.0\text{‰} \sim -5.6\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-57\text{‰} \sim -88\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-VSMOW}}$ 值为 $8.0\text{‰} \sim 13.3\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $3.3\text{‰} \sim 5.9\text{‰}$, 以及方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 -6.9‰ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $7.3\text{‰} \sim 7.4\text{‰}$ 。所有这些数据表明, 四川牦牛坪稀土矿床在成矿过程中有大量地幔物质参与。

关键词 稀土矿床 四川牦牛坪 地幔流体 C、H、O、S同位素

Mantle Fluids Involved in the Ore-forming Process of the Maoniuping REE Deposit, Sichuan: Evidence of C, H, O and S Isotopes

TIAN Shihong^{1,2)} DING Tiping^{1,2)} MAO Jingwen¹⁾

(1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) Open Key Research Laboratory on Isotope and Geology, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100037)

Abstract The two most important types of ores, i. e., barite pegmatite ores and carbonatite pegmatite ores, were chosen to analyze the carbon, hydrogen, oxygen and sulfur isotopic components of the ore-forming fluids. $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ ratios are $-3.0\text{‰} \sim -5.6\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ ratios are $-57\text{‰} \sim -88\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-VSMOW}}$ ratios are $8.0\text{‰} \sim 13.3\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ ratios are $3.3\text{‰} \sim 5.9\text{‰}$, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ ratios of calcite are -6.9‰ and $7.3\text{‰} \sim 7.4\text{‰}$, respectively. The data obtained suggest that large quantities of mantle fluids were involved in the ore-forming process of the Maoniuping REE deposit.

Key words rare earth element deposit Maoniuping in Sichuan Province mantle fluids C-H-O-S isotope

四川牦牛坪稀土矿床系近年来发现的、仅次于中国白云鄂博和美国芒特帕斯矿床的世界第三大稀土矿床(阳正熙等, 2000, 2001)。该矿床类型独特, 其矿石易采易选, 而且含有多种伴生有用组分, 具有重要的理论和实际研究意义。自从1986年报道以来, 在矿床地质、矿物学、地球化学和成矿作用等方面做了大量的研究工作(阳正熙等, 2000, 2001; 蒲广平, 1988, 1993, 2001; 牛贺才等, 1994, 1995, 1996; 许成等, 2001, 2002, 2003; 王登红等, 2002; 袁忠信等, 1993, 1995, 2001; 叶幼兰, 1992; 李钟发等, 1992; 蒋明全, 1992; 杨光明等, 1990, 1991, 1992; Wang Denghong等, 2001; Yuan Zhongxin等, 2000)。关于

成矿流体的来源迄今为止分歧较大, 有人认为源于残余碳酸岩岩浆的高温气液流体(阳正熙等, 2000, 2001), 有的认为源于上地幔(蒲广平, 2001; 牛贺才等, 1994, 1995, 1996)。近几年来, 越来越多的资料显示出深部流体参与了成矿过程(许成等, 2001, 2002, 2003; 王登红等, 2002), 本文从稳定同位素研究入手探讨地幔流体与成矿的关系。

1 地质背景

牦牛坪矿区位于攀西裂谷中段(图1), 冕西花岗岩体在该区大面积出露, 花岗岩体南北长约90 km, 东西宽6~14 km, 面积约700 km²。根据四川

本文由国家重点基础研究项目(G1999043211)和国土资源部重点科技项目(20010209)资助。

责任编辑: 官月萱。

第一作者: 田世洪, 男, 1973年生, 助理研究员, 在职博士生, 主要从事矿床学和同位素地球化学研究。

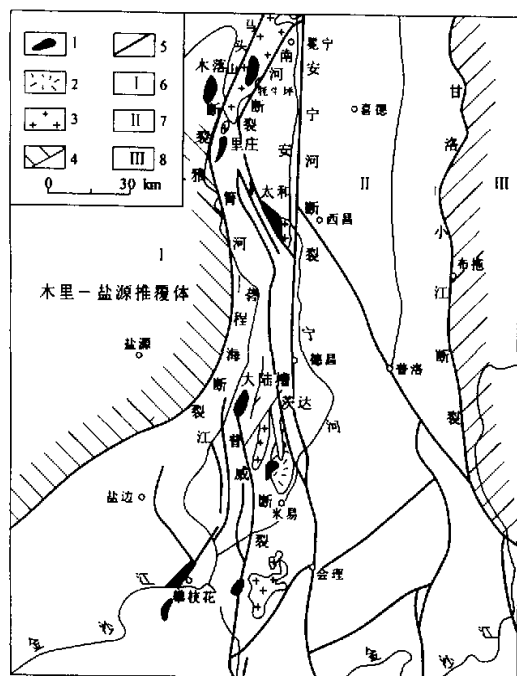


图1 攀西裂谷稀土矿带地质构造位置略图
(据袁忠信等,1995 修改)

Fig.1 Geological and structural sketch map of REE ore belt in the Panxi rift (modified after Yuan,1995)

- 1-富稀土英碱正长岩和碱性花岗岩;2-正长岩;3-富碱花岗岩;
- 4-河流;5-基底断裂;6-陆缘海相中生界分布区;
- 7-前震旦系古陆分布区;8-古生界及陆相中生界分布区
- 1-REE-rich nordmarkite and alkali granite;2-syenite;
- 3-alkali-rich granite;4-river;5-basement fracture;
- 6-area of the Mesozoic marine group;7-area of the Presinian old land;
- 8-area of the Palaeozoic group and Mesozoic continental group

省地质矿产局攀西地质大队裂谷研究队资料^①,该岩体属燕山期,全岩 K-Ar 同位素年龄为 78~134 Ma。出露的地层仅有泥盆纪(D₂)的泥砂碎屑岩、碳酸盐岩和第四纪(Q)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。矿床的矿石类型主要为重晶石伟晶岩型、碳酸岩伟晶岩型,少量为细脉型,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(许成等,2003;袁忠信等,1995;蒲广平,1988)。重晶石伟晶岩型矿石产状以走向 NNE 为主,倾向 290°~330°,倾角 65°~80°,矿脉结构以自形、半自形伟晶结构为主,矿脉构造以条纹状、条带状和斑杂状构造为主;碳酸岩伟晶岩型矿石主要

见于光头山地段,呈半隐伏状脉体,倾向 NW,倾角 70°~80°,矿脉结构以自形、半自形伟晶结构为主,矿脉构造以块状、斑杂状构造为主。通过对重晶石伟晶岩型矿石和碳酸岩伟晶岩型矿石中的镁钠铁闪石 K-Ar 法放射性同位素年龄测定,二者的年龄基本一致(分别为 31.8 Ma 和 31.7 Ma;袁忠信等,1995),说明两类矿石大致同时形成。此外,通过对英碱正长岩中锆石 U-Pb 法和矿石中黑云母、镁钠铁闪石 K-Ar 放射性同位素年龄测定(袁忠信等,1995),获得牦牛坪矿床的成矿作用大致发生在 12.2~40.3 Ma,表明成矿作用发生于喜马拉雅期。

2 样品及分析方法

此次工作分析了牦牛坪矿区碳酸岩型矿石和重晶石型矿石的代表性样品的 C、H、O 和 S 同位素组成。样品由国土资源部同位素地质开放重点实验室分析,利用 MAT-251EM 型质谱计。硫酸盐矿物先经艾氏卡试剂熔样提纯为纯净的 BaSO₄,再用 V₂O₅ 氧化剂制备 SO₂ 样品,分析精度为 ±0.2‰,相对标准 V-CDT;碳酸盐样品采用 McCrea (1950) 描述过的正磷酸方法,将不同碳酸盐矿物与 100% 的 H₃PO₄ 在不同的温度下反应产生 H₂O 和 CO₂ 气,并通过恒温震荡使之达到 O 同位素平衡,收集 CO₂ 气体,分析精度均为 ±0.2‰,C 和 O 相对标准分别为 V-PDB 和 V-SMOW;选取 40~60 目的纯净石英、方解石、萤石和氟碳铈矿样品,在 150℃ 低温下真空去气 4 h 以上,以彻底除去表面吸附水和次生包裹体水,然后在 400℃ 高温下爆裂提取水,并与金属锌反应生成 H₂,分析精度为 ±2‰,相对标准 V-SMOW;而对于萤石流体包裹体中 H₂O,首先需要爆裂提取水,同 H 同位素取水方法一样,采用常规的 BrF₅ 分析方法(Clinton 等,1963),用 BrF₅ 与 H₂O 在真空和高温条件下反应提取氧,并与灼热石墨棒反应转化成 CO₂ 气体,分析精度为 ±0.2‰,相对标准 V-SMOW;对于石英、萤石流体包裹体中的 CO₂,是在热爆法取水分析 H 同位素的同时分离、提取的,分析精度为 ±0.2‰,相对标准 V-PDB。

3 分析结果及讨论

牦牛坪稀土矿床矿石矿物和脉石矿物中的流体包裹体的 C、H 和 O 同位素测试结果一并列于表 1

① 四川省地质矿产局攀西地质大队裂谷研究队,1986。“攀西裂谷带主要地质构造、地球物理特征及对矿产的控制”火成岩专题研究报告:攀西裂谷火成岩岩石组合,169。

中。共测试样品 19 件,其中方解石 2 件,石英 7 件,萤石 6 件,氟碳铈矿 4 件。5 件石英的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-3.0\text{‰} \sim -5.6\text{‰}$,平均为 -3.8‰ ,4 件萤石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-3.4\text{‰} \sim -5.1\text{‰}$,平均为 -4.0‰ ,二者均与地幔来源 C 同位素值(正常值为 $-2\text{‰} \sim -10\text{‰}$,集中分布在 -5‰ 附近;储雪蕾,1996;王先彬等,2000;张铭杰等,2000;Nadeau 等,1990;Pineau 等,1990)相当接近,甚至重合。2 件方解石的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-66\text{‰} \sim -77\text{‰}$,平均为 -72‰ ,6 件石英的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-69\text{‰} \sim -88\text{‰}$,平均为 -81‰ ;6 件萤石的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-63\text{‰} \sim -81\text{‰}$,平均为 -74‰ ;4 件氟碳铈矿的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-57\text{‰} \sim -85\text{‰}$,平均为 -75‰ ,均与金伯利岩中的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值($-60\text{‰} \sim -80\text{‰}$)(Kuroda,1975;池际尚,1988)一致。3 件萤石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-VSMOW}}$ 值为 $8.0\text{‰} \sim 13.3\text{‰}$,平均为 10.8‰ 。

表 1 牦牛坪稀土矿床矿石矿物和脉石矿物中的流体包裹体的 C、H、O 同位素组成

Table 1 The carbon, hydrogen and oxygen isotope compositions of fluid inclusions in the ore minerals and gangue minerals in Maoniuping REE deposit, Sichuan province

矿石类型		样号	矿物名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-VSMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$
碳酸岩型矿石	MNP-1	方解石	—	—	-66	
			石英	-3.0	—	-69
		石英	-3.6	—	—	
			无色萤石	-3.4	11.2	-70
		浅绿色萤石	-3.6	—	-73	
	MNP-6	方解石	—	—	-77	
		石英	—	—	-86	
		紫色萤石	-4.0	13.3	-63	
		石英	-3.0	—	-83	
		石英	-3.8	—	-75	
重晶石型矿石	MNP-14	无色萤石	—	—	-79	
		浅绿色萤石	—	8.0	-77	
		紫色萤石	-5.1	—	-81	
		石英	-5.6	—	-88	
	MN-3	氟碳铈矿	—	—	-80	
		氟碳铈矿	—	—	-77	
		氟碳铈矿	—	—	-85	
		石英	—	—	-83	
		氟碳铈矿	—	—	-57	
		氟碳铈矿	—	—	-57	

此次研究工作只分析了碳酸岩型矿石中的 2 件方解石样品(表 2)。其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值均为 -6.9‰ ,与 Faure (1986) 界定的地幔来源 C 同位素值(-7.0‰)相当接近。而且其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $7.3\text{‰} \sim 7.4\text{‰}$,极差为 0.1‰ ,落在“初始火成碳酸岩”的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ ($6\text{‰} \sim 10\text{‰}$;Keller 等,1995)之内。

表 2 牦牛坪稀土矿床碳酸盐矿物 C、O 同位素组成

Table 2 Carbon and oxygen isotope compositions of carbonate rocks of the Maoniuping REE deposit, Sichuan province

矿石类型	样号	矿物名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$
碳酸岩	MNP-1	方解石	-6.9	-22.8	7.3
型矿石	MNP-6	方解石	-6.9	-22.7	7.4

注:换算 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 时,采用 Friedman 等(1977)的公式:
 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 1.03086 \delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} + 30.86$

表 3 牦牛坪稀土矿床的 S 同位素组成

Table 3 The S isotope compositions of Maoniuping REE deposit, Sichuan province

矿石类型	样号	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$
碳酸岩型	MNP-1	重晶石	5.1
	MN-10	重晶石	5.0
重晶石型	MNP-14	重晶石	5.9
	MN-4	重晶石	3.3
	MN-16	重晶石	4.3
	MNP-16	重晶石	4.8
		重晶石	4.8

6 件 S 同位素分析结果见表 3。其 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $3.3\text{‰} \sim 5.9\text{‰}$,平均为 4.7‰ ,组成相当均一,显示出成矿流体中的 S 具单一岩浆来源的特点(胡瑞忠等,1997;李新俊等,2002)。

牦牛坪稀土矿床成矿流体的 C、H、O、S 同位素特征反映成矿作用与地幔流体活动的内在联系。这一结论可以较好地与成矿地球化学及其他同位素资料相印证。牛贺才等(1994)报道,牦牛坪稀土矿床成矿杂岩体及矿脉的稀土配分型式向右陡倾,与金伯利岩和钾镁煌斑岩相似,碳酸盐型矿石中方解石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ 变化范围为 $0.70593 \sim 0.70598$;许成等(2003)报道,重晶石型矿石和碳酸盐型矿石中萤石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ 变化范围为 $0.706031 \sim 0.706237$,同样证明成矿流体来自岩浆或深部。S 同位素研究表明(蒲广平,2001),早期重晶石和天青石中 S($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $2.5\text{‰} \sim 6.9\text{‰}$)以岩浆来源为主;后期硫化物(黄铁矿、方铅矿、辉钼矿等)中的 S($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $-2.1\text{‰} \sim -10.9\text{‰}$)可能来源于地壳中富 ^{32}S 的沉积物或大气降水下渗循环的地下水;英碱正长岩全岩 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 2.0‰ ,接近陨石硫或上地幔 S 同位素组成,应视为幔源。笔者最近在对牦牛坪稀土矿床包裹体进行显微测温 and 单个包裹体激光拉曼光谱研究时发现,包裹体以高度富 CO_2 为特征,这一结论与矿石中大量出现碳酸盐矿物组合相吻合。其实,一些研究已经证明富含 CO_2 的流体本身就是地幔流体的最好证据(Groves 等,1988)。所有这些资料与 C、H、O、S 同位素资料一

致,清楚地表明,牦牛坪稀土矿床的成矿流体和部分成矿物质主要来自地幔,而且与地壳物质交换的程度不十分强烈。

根据前人的研究成果(蒲广平,2001),攀西裂谷孕育于早古生代末,发育于晚古生代—中生代,消亡起因于印度板块与欧亚板块碰撞所产生的强大的侧压力。随着攀西裂谷的萎缩,木里-盐源推覆构造达到发育高峰,因其向牦牛坪地区的强力推挤,原有的通道封闭,深源乃至上升到一定高度的深源物质均难以成岩成矿。到了喜马拉雅期,随着该推覆构造定形就位,区域释压,区内岩石圈断裂及其次级断裂带张开(如南河断裂、马头山断裂、普威断裂等),为幔源物质包括热流体、能量和地幔岩浆上升提供了通道。矿区英碱正长岩和各种矿脉在深断裂次一级的断裂破碎带定位。这些破碎带是良好的控矿构造。从深部来源的地幔射气和流体在此聚集成矿。

致谢 在野外工作期间,四川省地质矿产局骆耀南总工程师、傅德明高级工程师,四川省地质矿产局 109 地质队蒲广平总工程师、余波高级工程师等给予了大量的支持和帮助;室内工作期间,中国地质科学院矿产资源研究所袁忠信研究员、白鸽研究员、陈文明研究员、李延河研究员和王登红研究员等曾就有关问题给予了热情的指导帮助,在此一并表示衷心谢忱!

参考文献

- 池际尚. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~268.
- 储雪雷. 1996. 地幔的碳同位素. 地球科学进展, 11(5): 446~451.
- 胡瑞忠, 毕献武等. 1997. 马厂箐铜矿床黄铁矿包裹体 He-Ar 同位素体系. 中国科学(D辑), 27(6): 503~508.
- 蒋明全. 1992. 牦牛坪稀土矿床构造特征及其控矿意义. 矿床地质, 11(4): 351~358.
- 李新俊, 刘伟. 2002. 东天山马庄山金矿床流体包裹体和同位素地球化学研究及其对矿床成因的制约. 岩石学报, 18(4): 551~558.
- 李钟发, 蒋明全等. 1992. 四川冕西稀土成矿区的地质特征及其远景探讨. 地质科技情报, 11(3): 51~58.
- 牛贺才, 陈繁荣等. 1996. 岩浆成因重晶石、萤石的稀土元素地球化学特征. 矿物学报, 16(4): 382~388.
- 牛贺才, 单强等. 1996. 四川冕宁稀土矿床包裹体研究. 地球化学, 25(6): 559~567.
- 牛贺才, 林传仙. 1994. 论四川冕宁稀土矿床的成因. 矿床地质, 13(4): 345~353.
- 牛贺才, 林传仙. 1995. 萤石中流体-熔融包裹体的研究. 地质论评, 41(1): 28~33.
- 牛贺才, 林传仙. 1995. 四川冕宁稀土矿床脉石矿物的微量及稀土元素地球化学特征. 地球化学, 24(3): 287~293.
- 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. 地质论评, 34(1): 88~92.
- 蒲广平. 1993. 牦牛坪稀土矿床成矿模式及找矿方向探讨. 四川地质

学报, 13(1): 46~57.

- 蒲广平. 2001. 攀西地区稀土成矿历史演化与喜马拉雅期成矿基本特征. 北京: 地震出版社, 104~116.
- 王登红, 杨建民等. 2002. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学. 成都理工学院学报, 29(5): 539~544.
- 王先彬, 吴茂炳等. 2000. 地幔流体的稳定同位素地球化学综述. 地质地球化学, 28(3): 69~74.
- 许成, 黄智龙等. 2001. 四川牦牛坪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. 地质与勘探, 37(5): 24~28.
- 许成, 黄智龙等. 2002. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩地球化学. 中国科学(D辑), 32(8): 635~643.
- 许成, 黄智龙等. 2002. 四川牦牛坪稀土矿床萤石稀土元素、同位素地球化学. 地球化学, 31(2): 180~190.
- 许成, 黄智龙等. 2003. 四川牦牛坪稀土矿床萤石 Sr、Nd 同位素对地幔成矿流体的指示意义. 地球科学, 28(1): 41~46.
- 阳正熙, Anthony E. Williams-Jones 等. 2000. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床地质特征. 矿物岩石, 20(2): 28~34.
- 阳正熙, Anthony E. Williams-Jones 等. 2001. 四川牦牛坪稀土矿床矿物流体包裹体研究. 矿物岩石, 21(2): 26~33.
- 杨光明, 潘兆椿. 1990. 四川昌北 M 稀土矿若干问题的探讨. 地质科技情报, 9(3): 67~71.
- 杨光明, 吴秀玲, 潘兆椿. 1992. 氟碳钙铈矿中 6R 和 3R 多型微双晶结构的透射电镜研究. 地球科学, 17(4): 449~454.
- 杨光明, 严春杰. 1991. 四川冕宁冕石碱长花岗岩中的贝塔石. 矿物岩石, 11(1): 9~13.
- 叶幼兰. 1992. 牦牛坪碱性杂岩体 REE 地球化学特征及成因探讨. 地球学报, 13(7): 120~127.
- 袁忠信, 白鸽. 2001. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布. 矿床地质, 20(4): 347~354.
- 袁忠信, 白鸽等. 1993. 四川冕宁牦牛坪碱性花岗岩岩体锆石-铀-钍-铅同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 12(2): 189~192, 147.
- 袁忠信, 施泽民等. 1995. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床. 北京: 地震出版社, 1~150.
- 张铭杰, 王先彬等. 2000. 地幔流体组成. 地学前缘, 7(2): 401~412.

References

- Chi Jishang. 1988. A study on Cenozoic basalt and upper mantle in the eastern China. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences, 1~268 (in Chinese).
- Chu Xuelei. 1996. Carbon isotopes in mantle. Advance in Earth Sciences, 11(5): 446~451 (in Chinese with English abstract).
- Clayton R N, Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. Geochim. et Cosmochim. Acta, 27: 43~52.
- Faure G. 1986. Principles of isotope geology, 2nd edition. New York: Wiley and Sons, 497~507.
- Friedman I, O'Neil J R. 1977. Compilation of stable isotope fractionation fraction factors of geochemical interest. In: Fleischer M, ed. Data of geochemistry-Sixth Edition. Geology Survey Professional Paper, 117.
- Groves D I, Golding S D et al. 1988. Archaean carbon reservoirs and their significance to the fluids source for gold deposits. Nature, 331: 254~257.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu et al. 1997. Helium and argon isotopic components of fluid inclusions of pyrite in the Machangqing copper deposit of Yunnan Province. Science in China (Series D), 27(6): 503~

- 508 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Mingquan. 1992. The geological and structural feature of the Maoniuping REE deposit and its ore-controlling significance. *Mineral Deposits*, 11(4): 351~358 (in Chinese).
- Keller J, Hoefs J. 1995. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatites from Oldoinyo Lengai. In: Bell K, ed. *Carbonatites volcanism: Oldoinyo Lengai and Petrogenesis of Natrocarbonatites*. Lavici Proceeding in Volcanology. Lavici, 113~123.
- Kuroda Y. 1975. D/H ratios of the coexisting phlogopite and richterite from mica nodules and a peridotite in South Africa kimberlites. *Contrib. Mineral Petrol*, 52: 315~318.
- Li Xinjun, Liu Wei. 2002. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of the Mazhuangshan gold deposit, eastern Tianshan Mountains of China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 551~558 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhongfa, Jiang Mingquan et al. 1992. A newly discovered rare-earth metallogenic region and its prospect. *Geological Science and Technology Information*, 11(3): 51~58 (in Chinese).
- McCrea J M. 1950. On the isotope chemistry of carbonates and a paleo-temperature scale. *Jour. Chem. Phys.*, 18: 849~857.
- Nadeau S, Pineau F et al. 1990. Carbon concentrations and isotopic ratios in fluid-inclusion-bearing upper-mantle xenoliths among the northwestern margin of North America. *Chemical Geology*, 81: 271~297.
- Niu Hecai, Lin Chuanxian. 1995. Geochemical characteristics of trace elements in major minerals of mianning REE deposit, Sichuan province. *Geochimica*, 24(3): 287~293 (in Chinese with English abstract).
- Niu Hecai, Chen Fanrong et al. 1996. REE geochemistry of magmatogenic barite and fluorite. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(4): 382~388 (in Chinese with English abstract).
- Niu Hecai, Lin Chuanxian. 1994. The genesis of the mianning REE deposit, Sichuan province. *Mineral Deposits*, 13(4): 345~353 (in Chinese).
- Niu Hecai, Lin Chuanxian. 1995. Study on the fluid-melt inclusions in fluorite. *Geological Review*, 41(1): 28~33 (in Chinese with English abstract).
- Niu Hecai, Shan Qiang et al. 1996. A study on inclusions in minerals from mianning REE deposit in Sichuan Province. *Geochimica*, 25(6): 559~567 (in Chinese with English abstract).
- Pineau F, Methez E A. 1990. Carbon isotopes in xenoliths from the Hualalai volcano, Hawaii, and the generation of isotopic variability. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 54: 2117~2127.
- Pu Guangping. 1988. Discovery of an alkali pegmatite-carbonatite complex zone in Maoniuping, southwestern Sichuan Province. *Geological Review*, 34(1): 88~92 (in Chinese).
- Pu Guangping. 1993. A discussion on metallogenetic model and prospecting targets for Maoniuping ore deposit of rare-earth elements. *Acta Geologica Sichuan*, 13(1): 46~57 (in Chinese).
- Pu Guangping. 2001. The evolution history of rare earth elements mineralization and major feature of Himalayan REE deposits in the Panzhihua-Xichang area, Sichuan. Beijing: Seismic Publishing House, 104~116 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Yang Jianmin et al. 2001. A special orogenic-type rare earth element deposit in Maoniuping, Sichuan, China; *Geology and Geochemistry*. *Resource Geology*, 15(3): 177~188.
- Wang Denghong, Yang Jianmin et al. 2002. Dynamics of the REE mineralization in Maoniuping area, Sichuan Province: Isotopic geochemistry of carbonatites. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(5): 539~544 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xianbin, Wu Maobing et al. 2000. Stable isotope geochemistry of mantle fluids. *Geology-Geochemistry*, 28(3): 69~74 (in Chinese with English abstract).
- Xu Cheng, Huang Zhilong et al. 2001. Source and evolution of ore-forming fluids of Maoniuping rare-earth deposit—evidence from REE geochemistry of fluorites. *Geology and Prospecting*, 37(5): 24~28 (in Chinese with English abstract).
- Xu Cheng, Huang Zhilong et al. 2002. Geochemistry of carbonatites of Maoniuping rare-earth deposit. *Science in China (Series D)*, 32(8): 635~643 (in Chinese with English abstract).
- Xu Cheng, Huang Zhilong et al. 2002. REE and isotopic geochemistry of fluorites in the Maoniuping rare-earth deposit, Sichuan province. *Geochimica*, 31(2): 180~190 (in Chinese with English abstract).
- Xu Cheng, Huang Zhilong et al. 2003. Indicator of fluorite Sr and Nd isotope to mantle-derived ore-forming fluids in Maoniuping REE deposit, Sichuan province, China. *Earth Science*, 28(1): 41~46 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guangming, Pan Zhaolu. 1990. Some problems of Changbei M rare earth deposit in south western Sichuan Province. *Geological Science and Technology Information*, 9(3): 67~71 (in Chinese).
- Yang Guangming, Wu Xiuling et al. 1992. A study of the microtwin structures of coexisting 6R and 3R polytypes in parsite using transmission electron microscopy. *Earth Sciences*, 17(4): 449~454 (in Chinese).
- Yang Guangming, Yan Chunjie. 1991. Betafite in aegirine alkali-feldspar granite massif, Mianning County, Sichuan province, China. *Mineralogy and Petrology*, 11(1): 9~13 (in Chinese).
- Yang Zhengxi, Anthony E Williams-Jones et al. 2000. Geological features of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China. *Journal of Mineral Petrol.*, 20(2): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhengxi, Anthony E Williams-Jones et al. 2001. A fluid inclusion study of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China. *Journal of Mineral Petrol.*, 21(2): 26~33 (in Chinese with English abstract).
- Ye Youlan. 1992. The geochemical characteristics of rare earth elements in Maoniuping alkali complex massif and discussion on its genesis. *Exploration of Geosciences*, 7: 120~127 (in Chinese).
- Yuan Zhongxin, Bai Ge et al. 2000. Trachytic rock and associated fenitization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China: Evidence for magmatic-hydrothermal mineralization related to a carbonatitic complex. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 148~153.
- Yuan Zhongxin, Bai Ge et al. 1993. U-Pb isotopic age of zircon from the Maoniuping alkali granite, Sichuan province and its geological significance. *Mineral Deposits*, 12(2): 189~192, 147 (in Chinese).
- Yuan Zhongxin, Bai Ge. 2001. Temporal and spatial distribution of endogenic rare and rare earth mineral deposits of China. *Mineral Deposits*, 20(4): 347~354 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhongxin, Shi Zemin et al. 1995. The Maoniuping rare earth ore deposit, Mianning county, Sichuan province. Beijing: Seismic Publishing House, 1~150 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mingjie, Wang Xianbin et al. 2000. Composition of mantle fluid. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 401~412 (in Chinese with English abstract).