

云南省勐腊县曼洒菱铁矿床 Fe 同位素特征 及其地质意义

坚润堂, 杨帆, 赵献昆

(中国有色金属工业昆明勘察设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 首次研究了云南省勐腊县曼洒菱铁矿床碳酸盐岩层中菱铁矿的 Fe 同位素组成特征, 并利用菱铁矿 Fe 同位素对矿床成因及成矿环境进行了制约。曼洒矿区菱铁矿 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化范围为 $-0.337\text{‰} \sim -0.201\text{‰}$, 平均值为 -0.261‰ ; $\delta^{57}\text{Fe}$ 范围为 $-0.518\text{‰} \sim -0.289\text{‰}$, 平均值为 -0.380‰ 。菱铁矿样品 Fe 同位素组成非常均一, 富集铁的轻同位素。通过大量对比分析, 提出曼洒铁矿床的成矿作用与海底热液活动有关, 为含矿热水溶液喷溢出海底后快速堆积成矿, 矿床形成于局限深水洼地的还原性环境。

关键词: 曼洒矿床; 菱铁矿; Fe 同位素; 矿床成因; 成矿环境

中图分类号: P597+.2; P618.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)03-0389-13

The Fe isotope characteristics of the Mansa siderite deposit in Mengla County of Yunnan Province and their geological significance

JIAN Run-tang, YANG Fan and ZHAO Xian-kun

(Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry, Kunming 650051, China)

Abstract: Iron isotopic compositions of siderite minerals from the carbonate rocks in the Mansa siderite deposit of Mengla County in Yunnan Province were studied for the first time in order to discuss the genesis and ore-forming environment of the deposit. Fe isotopes of siderite from the Mansa deposit show a relatively small negative range: $\delta^{56}\text{Fe}$ values of siderite range from -0.337‰ to -0.201‰ (averagely -0.261‰), whereas $\delta^{57}\text{Fe}$ values from -0.518‰ to -0.289‰ (averagely -0.380‰), implying that the Fe isotopic compositions are rather homogeneous and enriched in light iron isotope. Detailed Fe isotope studies of the Mansa siderite deposit show a close relationship between metallogenesis and hydrothermal process, and hence the deposit was formed in a partial submarine environment with rapid accumulation after the effusion of the ore-bearing hydrothermal solution.

Key words: Mansa deposit; siderite; iron isotope; metallogenesis; ore-forming environment

Fund support: Science and Technology Benefiting the People Project, Yunnan Province (2013CA019); Outwards Scientific Cooperation Project, Yunnan Province (2014IB001); Key Scientific Project of Yunnan Copper (Group)Co., Ltd., (20140101, 20150103)

Fe 是地壳中含量仅次于 Al 的过渡族金属元素, 它们的丰度分别为 5.85%、91.75%、2.12% 和在自然界中有 ^{54}Fe 、 ^{56}Fe 、 ^{57}Fe 和 ^{58}Fe 共 4 种同位素, 0.28%, 因为 $\delta^{58}\text{Fe}$ 的丰度极低而很少应用于同位素

收稿日期: 2016-08-23; 接受日期: 2017-02-10

基金项目: 云南省科技惠民计划项目(2013CA019); 云南省对外科技合作计划(2014IB001); 云南铜业(集团)公司重点科技计划项目(20140101, 20150103)

作者简介: 坚润堂(1973-), 男, 汉族, 高级工程师, 博士研究生, 区域构造与成矿预测方向, E-mail: 529549698@qq.com。

研究,故一般报道中多采用 ^{54}Fe 、 ^{56}Fe 和 ^{57}Fe 这3种同位素。

在成矿作用研究中,C、H、O、S等元素一般不是直接成矿元素,基于这些元素的稳定同位素来研究成矿过程和成矿物质来源,难免带有一定的推断性和不确定性,因为主要指示的是这些元素本身的物质来源。 Fe 不仅是重要的造岩元素,而且常是直接成矿元素,可为矿床成因问题提供重要证据,因此 Fe 同位素在示踪成矿物质来源和研究成矿机理方面具有显著的优越性(何德锋等,2007;孙剑等,2010,2011,2012;马思根等,2013)。前人已在各类球粒陨石、地幔包体、火成岩、 Fe-Mn 结壳、黑色页岩、现代海洋和河流以及黄土、风化物 and 土壤等不同储库的 Fe 同位素特征值方面取得一些研究成果(Zhu *et al.*, 2000; Rouxel *et al.*, 2004; Clark *et al.*, 2005; Schoenberg and von Blanckenburg, 2006; Ingri *et al.*, 2006; Bergquist and Boyle, 2006; Frost *et al.*, 2007; 李志红等,2008; 刘铁庚等,2012; 王跃等,2012),同时在变质作用、热液作用、风化作用、氧化-还原作用等各类地质作用对 Fe 同位素分馏的影响方面也开展了大量卓有成效的研究工作(Zhu *et al.*, 2001, 2002; Johnson *et al.*, 2002, 2003, 2008; Beard *et al.*, 2003; Dauphas *et al.*, 2004, 2007, 2009; Clark *et al.*, 2005; Dauphas and Rouel, 2006; 李志红等,2008)。尤其是近年来随着同位素测试技术的飞速发展,非传统稳定同位素(Fe 、 Cu 、 Zn 、 Mo 、 Mg 等)分析技术和测试精度大幅提高,极大地拓展了 Fe 等稳定同位素的研究领域(Beard and Johnson, 1999; Zhu *et al.*, 2000, 2001, 2002; Beard *et al.*, 2003; Rouxel *et al.*, 2003, 2005; Johnson *et al.*, 2003, 2008; Dauphas *et al.*, 2004, 2007, 2009; Clark *et al.*, 2005; Dauphas and Rouel, 2006; Archer and Vance, 2006; Whitehouse and Fedo, 2007; 何学贤等,2008; 唐索寒等,2008; 朱祥坤等,2008; 李志红等,2008, 2012; Zhao *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; 李津等,2012; 王世霞等,2013),并逐渐成为国际地学领域一个新的研究热点。截至目前,国内外众多学者已针对不同类型的矿床开展了 Fe 同位素的相关研究工作,包括太古宙科马提岩中的镍矿床(Bekker *et al.*, 2009)、太古宙底砾岩型金矿床(Hofmann *et al.*, 2009)、元古宙沉积型铁矿床(李志红等,2012)、早前寒武纪BIF型铁矿床(Johnson *et al.*, 2003; Dauphas *et al.*,

2004; Whitehouse and Fedo, 2007; 李志红等,2008, 2010; 闫斌等,2010; Heimann *et al.*, 2010; Li Weiqiang *et al.*, 2013)、层状硫化物矿床(朱祥坤等,2008a)、斑岩-矽卡岩型矿床等与岩浆热液活动有关的铜多金属矿床(Graham *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2011; 王跃等,2013; Christine *et al.*, 2015)、岩浆型铁矿床(王世霞等,2012; Chen *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; 王跃等,2014; Kirsten *et al.*, 2014)、表生热液铁矿床(Markl *et al.*, 2006)以及现代洋底热液系统(Sharma *et al.*, 2001; Rouxel *et al.*, 2004, 2008)等等,彰显出 Fe 同位素在示踪成矿物质来源、成矿机理以及流体演化等方面的巨大潜力(Sharma *et al.*, 2001; Johnson *et al.*, 2003; Dauphas *et al.*, 2004; Rouxel *et al.*, 2004; Graham *et al.*, 2004; 唐索寒等,2006; 朱祥坤等,2008a, 2008b; 李志红等,2008, 2012; Bekker *et al.*, 2009; Hofmann *et al.*, 2009; 闫斌等,2010)。

赵一鸣等(2004)将我国铁矿床划分为岩浆型、火山岩型、矽卡岩型、热液型、沉积型、沉积变质型、风化淋滤型以及成因不明型等8大类型,又将火山岩型细分为海相火山岩型和陆相火山岩型。Dill(2010)将世界范围内的铁矿床划分为岩浆型铁矿、和构造有关的铁矿、沉积型铁矿和变质岩型铁矿4大类14个亚类及若干次亚类。张招崇等(2014)通过对国内外和岩浆岩有关的铁矿地质特征的深入研究,进一步将与岩浆岩有关的铁矿床划分为与基性-超基性岩有关的铁矿、与中性岩有关的铁矿、与酸性岩有关的铁矿和与碱性岩有关的铁矿4个亚类7个次亚类,并进一步总结了各类铁矿床的地质特征。曼洒菱铁矿床赋存在上三叠统良子寨组(T_3l)碳酸盐岩地层中,矿床特征与Dill(2010)分类中的沉积型铁矿床大类→碳酸盐型(交代)矿床亚类→多金属菱铁矿和菱镁矿矿床次亚类相似,但该矿床又兼具自身特殊性。矿区菱铁矿矿体以层状、似层状产出,“层-脉”矿化结构较为发育,矿石矿物在浅表以粗晶结构为主,深部则过渡为细晶结构,既发育纹层状构造又见块状构造,热水沉积、热液改造及表生淋滤等组构特征在矿区均有表现,明显具有后期改造或多成因特征,很难简单归入某种矿床类型,所以目前国内外对相似类型的矿床研究很少(Zhang Zhaochong *et al.*, 2014)。那么,该矿床是如何形成的?为了约束其成矿物质来源和成矿环境,本文拟通过铁同位

素的研究,示踪成矿的古地理环境和成矿作用过程。

1 区域地质概况

滇西兰坪-思茅中生代盆地位于我国西南“三江”造山带的最南端(图1),在大地构造上处于冈瓦纳与欧亚两大构造域的过渡地带,是我国西南“三江”中生代“盆山”系统的重要组成部分(杨鑫等,2011)。金沙江-哀牢山断裂带、兰坪-思茅断裂带(亦称中轴断裂带)和澜沧江断裂带3条近SN向巨型构造带纵贯全区,控制了中生代以来的盆地演化和成矿作用。大致以北纬 $24^{\circ}40'$ 的景东为界,可将兰坪-思茅盆地划分为北部兰坪盆地和南部思茅盆地。兰坪盆地现已发现有价值的矿床(点)200多处,如金顶超大型铅锌矿床,白秧坪、白洋厂、金满等

大型铜铅锌多金属矿床,奠定了该盆地作为我国西南地区铅锌铜巨型矿集区的重要地位。思茅盆地因巨厚的中生代红层覆盖而找矿难度较大,至今除大平掌铜多金属矿床达到大型规模以外,其它均为中小型矿床或矿化点,但已揭露的矿化信息显示该区地下深部蕴藏有丰富的矿产资源,找矿潜力巨大,极有可能成为我国西南地区又一重要矿产资源勘查基地。

盆地内部主要发育中、新生界,自下而上分别为三叠系、侏罗系、白垩系和古近系,沉积厚度超过18 000 m,古生界仅在盆地边缘少量出露。三叠系仅见中、上统,在盆地中部思茅-勐腊一带以发育碳酸盐岩和碎屑岩互层为特征,在盆地东、西两侧靠近红河断裂带和澜沧江断裂带则逐渐过渡为火山岩和火山碎屑岩建造。侏罗系在盆地内广泛分布,是云

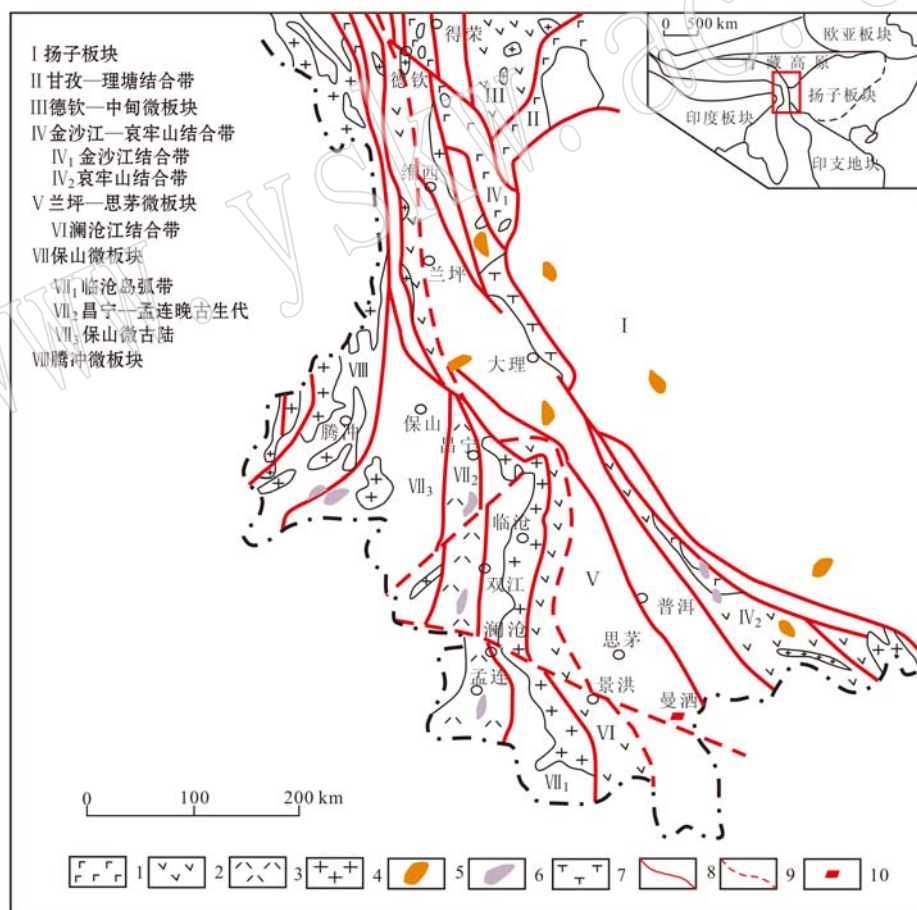


图1 滇西地区大地构造略图(据李峰等,2012)

1—大洋玄武岩带;2—岛弧火山岩带;3—Pz大陆裂谷火山岩带;4—花岗岩;5—碱性岩;6—超镁铁质岩类;7—粗面岩类火山岩;
8—断层;9—推测断层;10—曼洒铁矿床

Fig. 1 Geological sketch map of Dianxi area (after Li Feng *et al.*, 2012)

1—oceanic basalt belt; 2— island arc volcanic rock belt; 3—continental rift volcanic of Pz; 4—granite; 5—alkaline rock; 6—ultramafic rock;
7—trachyte volcanic rock; 8—fault; 9—inferred fault; 10—Mansa iron deposit

南省著名的“西南红层”的重要组成部分,沉积厚度逾万米,包括上部的红色岩组、中部杂色岩组和下部的红色岩组3套特征明显的地层,分别归属于上侏罗统、中侏罗统和下侏罗统。白垩系仅存下统,但分布十分广泛,且厚度巨大,以陆相砂泥岩沉积为主。古近系主要分布于思茅盆地西部地区,主要为一套以棕红色、褐红色钙质泥岩、钙质粉砂岩为主的陆相砂泥岩建造。

兰坪-思茅中生代盆地是滇西特提斯构造演化的产物。晚古生代,随着古特提斯洋的开启,本区成为西南“三江”多岛洋格局的重要组成部分,古特提斯洋于晚二叠世关闭。伴随着中、新特提斯构造演化,位于扬子地块西缘的滇西地区发生开合构造运动,兰坪-思茅盆地原型得以形成(廖宗廷等, 2005),经历陆内裂陷盆地(T_2-J_1)、拗陷盆地(J_2-J_3)、前陆盆地(K)和走滑拉分盆地(E-Q)4个发展演变阶段(付修根, 2005)。其中,陆内裂陷盆地演化阶段是盆地热水沉积成矿的重要时期,勐腊曼洒、新山、普洱思普、维西楚格咱等含铜(多金属)菱铁矿床均在此阶段形成,这些矿床严格受地层层位及岩性控制,矿体产于晚三叠世三合洞组(T_{3s})、大路边组(T_{3d})或良子寨组(T_{3l})碳酸盐岩地层中,矿石以层纹状、条带状、角砾状和浸染状为主,“层-脉”矿化结构明显,矿石矿物及与之共生的硅质岩显示热水沉积岩的地球化学及矿物学特征(张峰等, 2010; 坚润堂等, 2014);拗陷盆地和前陆盆地阶段形成本区重要的砂岩型铜矿床,如勐腊南坡铜矿床、景谷登海山铜矿床等;走滑拉分盆地阶段主要形成本区特有的充填型大脉状富铜矿床,如勐腊铁匠寨、景谷民乐、白龙厂等脉状铜矿床。

云南省勐腊县曼洒含铜(多金属)菱铁矿床地处兰坪-思茅中生代裂陷盆地景谷-普洱-景洪拗陷带的东南缘(图1),已探明菱铁矿石资源量达中型规模,并伴生铜、钴等有用元素。

2 矿区及矿体地质

曼洒铁多金属矿区位于云南省西双版纳州勐腊县345°方向,行政区划隶属于勐腊县易武乡所辖,地理坐标:东经 $101^{\circ}23'00''\sim 101^{\circ}30'30''$,北纬 $22^{\circ}02'00''\sim 22^{\circ}09'00''$,矿区面积 82.806 km^2 。

矿区出露地层主要为上三叠统大路边组(T_{3d})浅海相碳酸盐岩、砂泥质岩夹薄层中性火山碎屑岩;

上三叠统良子寨组(T_{3l})浅海至滨海相砂泥质岩、碳酸盐岩、火山碎屑岩;中侏罗统小红桥组(J_{2x})红色泥岩建造、中侏罗统和平乡组(J_{2h})三角洲相砂泥岩夹碳酸盐岩建造,下白垩统景星组砂岩建造和第四系洪、冲积物。区内构造较为简单,主要发育3组断裂构造,南北向区域断裂是重要的控矿构造;北东向断裂为主要容矿和储矿构造,矿区内所有铁(铜)矿(化)体均沿该方向断裂产出;北西向断裂为晚期破矿构造,主要错断南北向及北东向断裂以及早期形成的矿(化)体,造成矿(化)体在空间上的不连续(图2)。

曼洒菱铁矿(化)体主要产于上三叠统良子寨组(T_{3l})灰岩、泥灰岩及粉砂质泥岩中,呈层状、似层状和透镜体状产出,层控特征明显(图3),现已查明铁矿石资源储量超过1000万吨,主要由浅表的褐铁矿石和深部的菱铁矿石组成,深部仍有较大找矿潜力。矿区目前已发现的4个铁矿(化)体(V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4)中,以 V_1 矿体规模最大,单个矿体走向延伸500多米,倾向延深100~150 m,浅部连为一体,向深部矿体变薄并出现分支复合现象。矿体走向北东,受断裂构造影响,在地表倾向南东,往深部则转向南西,层控特征明显,矿体倾角较陡,约 $70^{\circ}\sim 83^{\circ}$,有向北东方向侧伏的趋势(图3)。

V_1 铁矿体主要产于三叠系上统良子寨组碳酸盐岩地层中,直接赋矿围岩为铁白云岩、泥晶粉晶白云岩、白云质灰岩和泥晶灰岩等,矿化受直接围岩地层岩性变化的影响较大,以铁白云岩、白云岩中矿化最好,白云质灰岩及泥晶灰岩中矿化较弱,泥岩、泥质灰岩、泥质粉砂岩和粉砂岩中基本未见矿化(可见网脉状碳酸盐化及石膏化蚀变),富矿体基本赋存在白云岩和泥灰岩的过渡部位,说明矿体的就位对围岩岩性有明显的选择性。矿体下盘多为灰岩,上盘则为泥灰岩。矿化在平面具有明显的分带性,基本可划分出菱铁矿→铁白云岩→白云岩(白云质灰岩)→灰岩的分带现象,垂向上有网脉状矿(化)→层(块)状矿(化)体分带特征。矿区围岩蚀变较弱,主要表现为碳酸盐化(菱铁矿化、铁白云石化、白云石化、铁方解石化)和硅化以及绿泥石化、石膏化等。

3 样品采集及分析测试

本次工作共采集10件菱铁矿矿石样品,对矿石样品进行了单矿物分选,选出菱铁矿单矿物进行Fe

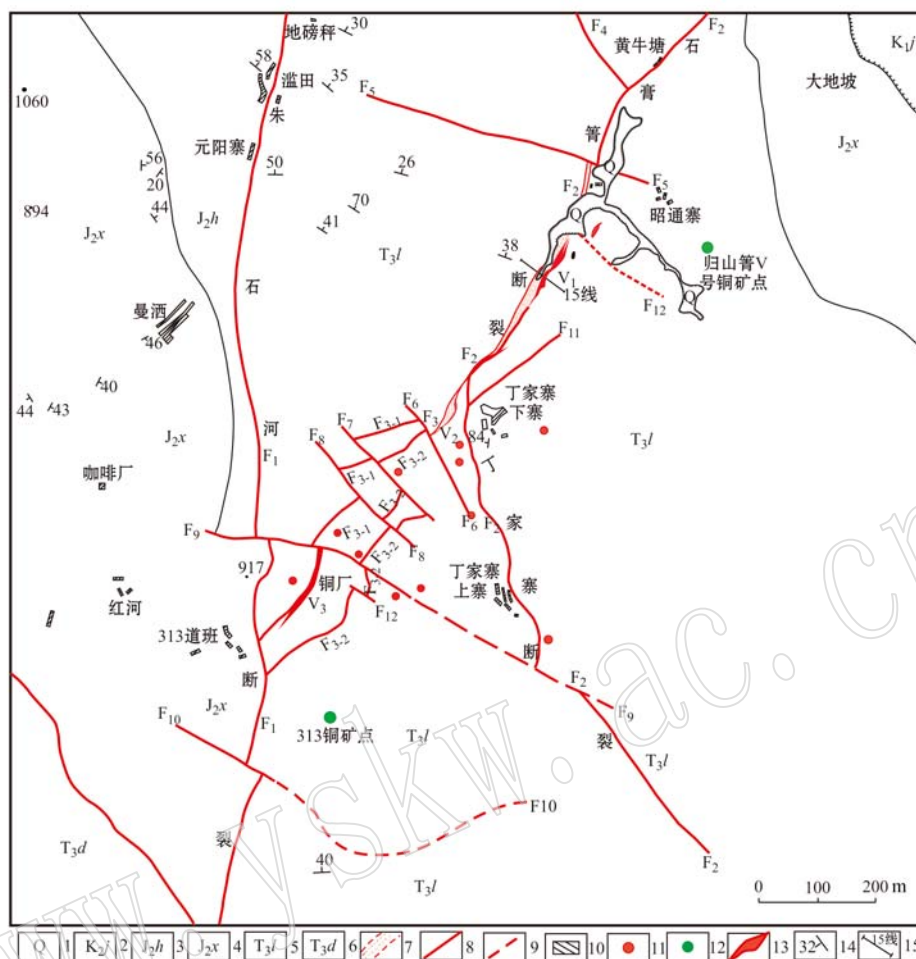


图2 曼洒铁矿区地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the Mansa iron deposit

1—第四系；2—上白垩统景星组；3—中侏罗统和平乡组；4—中侏罗统小红桥组；5—上三叠统良子寨组；6—上三叠统大路边组；7—破碎带；8—断层；9—推测断层；10—村庄及房屋；11—铁矿(化)点；12—铜矿(化)点；13—铁矿体；14—地层产状；15—勘探线
1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous Jinxing Formation; 3—Middle Jurassic Hepingxiang Formation; 4—Middle Jurassic Xiaohongqiao Formation; 5—Upper Trissic Liangzizhai Formation; 6—Upper Trissic Dalubian Formation; 7—fracture zone; 8—fault; 9—inferred fault; 10—village and buildings; 11—iron ore spot; 12—copper ore spot; 13—iron orebody; 14—attitude of strata; 15—exploration line

同位素测试。样品测试工作在瑞典的 ALS Scandinavia AB 公司实验室完成,仪器为 Thermo Scientific NEPTUNE MC-ICP-MS, Fe 同位素分析结果用相对于国际标准物质 IRMM-014 的千分偏差 $\delta^x\text{Fe}$ 表示,即: $\delta^{56}\text{Fe} = [({}^{56}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{样品}}/({}^{56}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{IRMM-014}} - 10] \times 10^3$, $\delta^{57}\text{Fe} = [({}^{57}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{样品}}/({}^{57}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{IRMM-014}} - 10] \times 10^3$ 。

4 Fe 同位素组成特征

菱铁矿样品的 Fe 同位素分析结果见表 1。样品 $\delta^{56}\text{Fe}$ 总体变化范围在 $-0.337\text{‰} \sim -0.201\text{‰}$ 之间,

平均值为 -0.261‰ ; $\delta^{57}\text{Fe}$ 的变化范围为 $-0.518\text{‰} \sim -0.289\text{‰}$, 平均值 -0.378‰ 。已有统计显示,地球物质的铁同位素 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值分布总体在 $-3.5\text{‰} \sim 3.1\text{‰}$ 范围之间变化,平均值约为 -0.23‰ , $\delta^{57}\text{Fe}$ 值分布范围为 $-5.18\text{‰} \sim 4.65\text{‰}$, 平均值为 -0.34‰ (Johnson *et al.*, 2003; Dauphas *et al.*, 2004, 2007; Rouxel *et al.*, 2005; Whitehouse and Fedo, 2007; 李志红等, 2008; 赵新苗等, 2008; 王跃, 2012)。从全岩尺度看,地幔包体、火成岩、变质岩、沉积岩、页岩、黄土和风尘、现代沉积物以及洋底和海水均具较小的 Fe 同位素组成变化范围, $\delta^{57}\text{Fe}$ 值在 0.00‰ 附近,均一性特征非常明显 (Beard and Johnson, 1999; Zhu

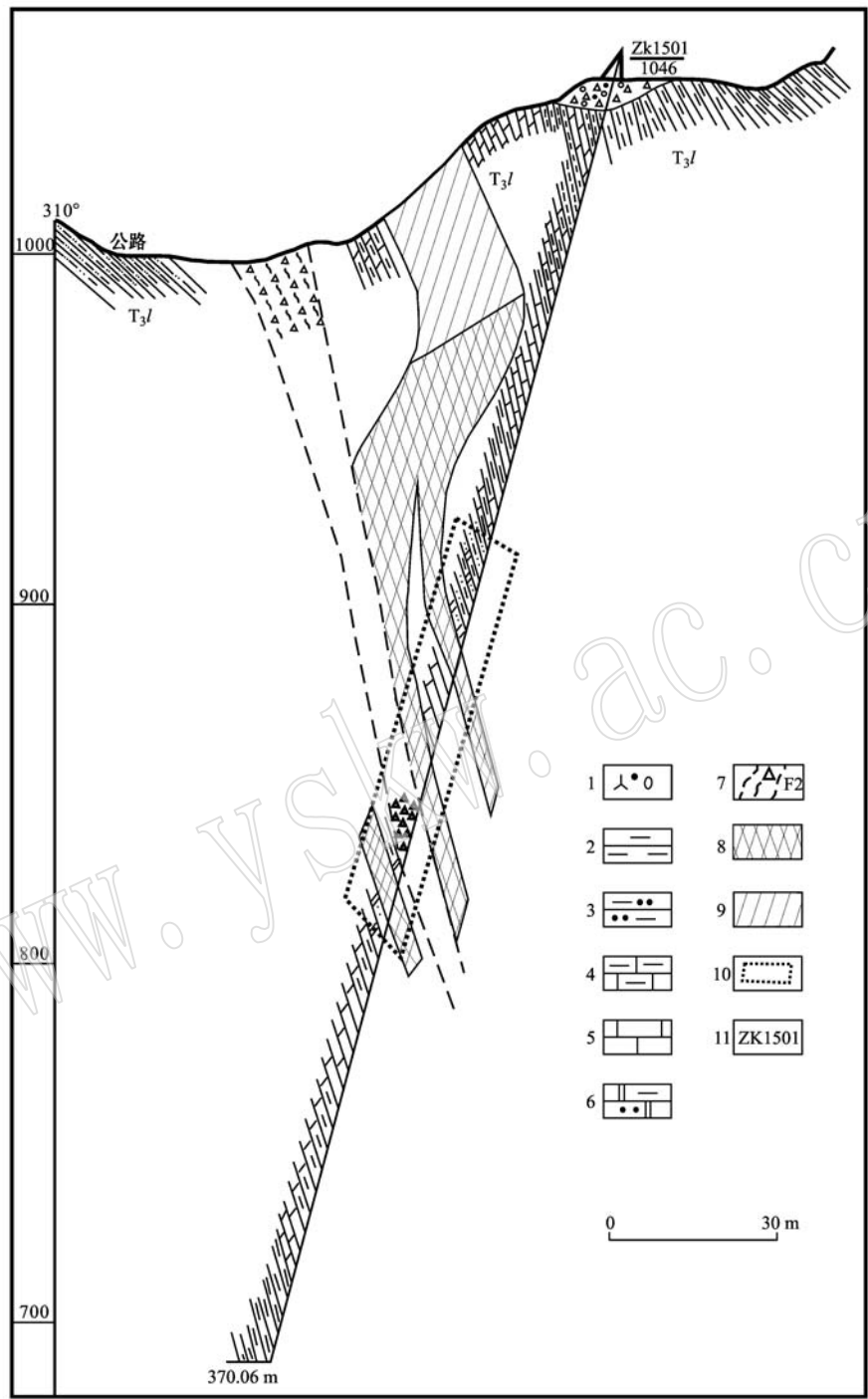


图 3 曼洒铁矿区 15 号勘探线剖面图

Fig. 3 Geological section along 15 exploration line of the Mansa iron deposit

1—堆积物; 2—泥岩; 3—砂质泥岩; 4—泥灰岩; 5—灰岩; 6—微晶白云岩; 7—构造破碎带; 8—菱铁矿; 9—褐铁矿; 10—石膏化;
11—钻孔及编号
1—accumulation; 2—mudstone; 3—sandy mudstone; 4—marls; 5—limestone; 6—dolomiticrite; 7—fracture zone; 8—siderite; 9—limonite;
10—gypsification; 11—drill hole and its serial number

et al., 2001, 2002; Beard *et al.*, 2003; 唐索寒等, 2008; 赵新苗等 2008; 王世霞等, 2011; 王跃等, 2012); 而河水和条带状铁建造的铁同位素组成变化范围很大, 其中条带状铁建造(BIF)中的铁氧化物部

分(赤铁矿和磁铁矿)总体表现出 Fe 的重同位素富集特征($\delta^{57}\text{Fe} > 0.0\text{‰}$),并且变化范围很大(Johnson *et al.*, 2003, 2008; Dauphas *et al.*, 2004, 2007; 李志红等, 2008, 2009, 2011, 2012);碳酸岩、铁锰结核、菱铁矿、洋中脊热液流体、海水及河水等则普遍显示出富集铁的轻同位素的特征。海底热液多富集 Fe 的轻同位素且变化范围较小($\delta^{57}\text{Fe}$ 值介于 -1.0‰ ~ -0.0‰ 之间,平均约为 -0.3‰)(图 4)。和硅酸盐地球 Fe 同位素组成平均值相比,曼洒矿区菱铁矿的

Fe 同位素组成变化范围很窄,呈现出较为明显的 Fe 的轻同位素富集特征, $\delta^{57}\text{Fe}$ 值落入海底热液范围狭窄的小区间内(图 4), $\delta^{56}\text{Fe}$ 值则与全球典型碳酸盐岩的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 范围基本一致(Johnson *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2013),但分布范围更加集中(图 5)。与国内不同类型铁矿床相比较,曼洒铁多金属矿床 Fe 同位素组成更接近热液型铁矿床的 Fe 同位素组成,但均一化程度更高(表 1、图 5)。

表 1 曼洒铁多金属矿床 Fe 同位素表

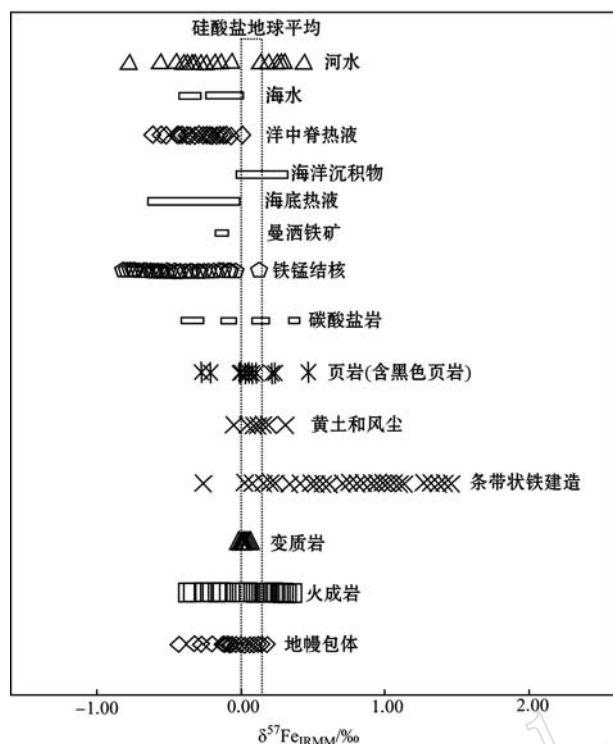
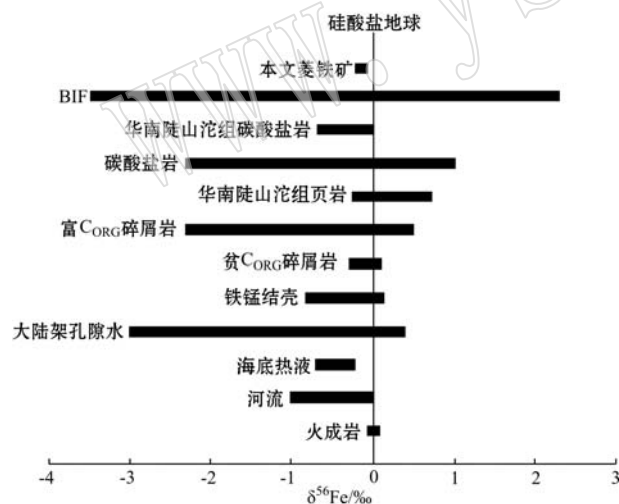
Table 1 Fe isotope composition of the Mansa Fe-polymetallic ore deposit

样品编号	样品名称	$\delta^{56}\text{Fe}/\text{‰}$	$\delta^{57}\text{Fe}/\text{‰}$	数据来源
DJZ-01	菱铁矿	-0.271	-0.407	本次研究
DJZ-02	菱铁矿	-0.201	-0.307	本次研究
ZK1501-6	菱铁矿	-0.216	-0.289	本次研究
ZK1501-7	菱铁矿	-0.247	-0.333	本次研究
ZK1501-9	菱铁矿	-0.222	-0.326	本次研究
ZK1501-10	菱铁矿	-0.321	-0.438	本次研究
ZK1501-11	菱铁矿	-0.237	-0.352	本次研究
ZK2301-1	菱铁矿	-0.337	-0.518	本次研究
ZK2301-2	菱铁矿	-0.237	-0.369	本次研究
ZK2301-4	菱铁矿	-0.316	-0.458	本次研究
平均值		-0.261	-0.380	本次研究
热液脉型矿床	菱铁矿		-2.01~1.04, 平均 -1.34	Markl 等(2006)
宣龙式铁矿床(沉积型)	菱铁矿		-9.77~10.62, 平均 -10.30	李志红等(2011)
安徽新桥铁矿床(热液型)	菱铁矿		-1.04~0.14, 平均 -0.61	王跃等(2013)
安徽姑山铁矿床(岩浆型)	赤铁矿	0.03~0.53	0.05~0.79	王跃等(2014)
BIF 型铁矿床	菱铁矿		-29.4~15.3, 平均 -9.0	李志红等(2009)

5 讨论

东太平洋洋隆(EPR)、Juan de Fuca 洋中脊、大西洋中脊的 Lucky Strike、Rainbow、Logatchev 以及 5°S 热液场的热液流体和颗粒物质(黄铁矿、黄铜矿以及铁的氢氧化物)Fe 同位素的测定结果显示(Sharam *et al.*, 2001; Beard *et al.*, 2003; Severmann *et al.*, 2004; Rouxel *et al.*, 2004, 2008; Bennett *et al.*, 2009),海底热液流体的整体铁同位素组成的变化范围为 $\delta^{57}\text{Fe} = -1.00\text{‰} \sim -0.06\text{‰}$, 平均 $\delta^{57}\text{Fe}$ 为 -0.39‰ ; $\delta^{56}\text{Fe}$ 值介于 $-0.9\text{‰} \sim -0.1\text{‰}$ 之间,平均值为 -0.32‰ 。并且热流体的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值与 Fe 含量呈正相关关系(Johnson *et al.*, 2008)。Yamaguchi 等(2005)和 Johnson 等(2008)提出,地球早期的海底热液流体 Fe 同位素组成整体接近 0,且略微偏负,推测与地球早期的热液活动比现在强烈、

热液释放的 Fe^{2+} 量高于现代热液有关。现代各类构造背景下的火成岩具有几乎相同的 Fe 同位素组成,均在 0 值附近(Zhu *et al.*, 2002; Beard *et al.*, 2003; Anbar and Rouxel, 2007; 王跃等, 2012)。曼洒铁矿区样品的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值介于 $-0.518\text{‰} \sim -0.289\text{‰}$ 之间, $\delta^{56}\text{Fe}$ 值分布在 $-0.337\text{‰} \sim -0.201\text{‰}$ 之间,与海底热液流体的 Fe 同位素平均值接近,而与火成岩的平均值($\delta^{56}\text{Fe} = 0.09\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$, $\delta^{57}\text{Fe} = 0.18 \pm 0.00\text{‰}$)(Beard *et al.*, 2003; Beard and Johnson, 2004; Dauphas *et al.*, 2004; Poitrasson *et al.*, 2004; Heimann *et al.*, 2008; Schuessler *et al.*, 2009)明显不同,说明成矿与海底热液活动有关。矿区普遍存在的英安质晶屑凝灰岩以及菱铁矿 Fe 同位素组成与碳酸盐岩 Fe 同位素组成的差异也可佐证曼洒菱铁矿床的形成和海底热液活动关系密切,至少海底火山活动之后的残余岩浆热液起到了重要作用。

图4 不同地质储库的 ^{57}Fe 同位素变化(王跃等, 2012)Fig. 4 Variation of ^{57}Fe composition in different reservoirs (after Wang Yue *et al.*, 2012)图5 不同地质储库的 ^{56}Fe 同位素组成(闫斌, 2009)Fig. 5 ^{56}Fe composition in different reservoirs (after Yan Bin, 2009)

依据质量平衡原理,热液流体中所含 Fe 的同位素成分会随着铁质沉淀的进行而逐渐变轻,从而使后期沉淀的铁比早期沉淀的铁具有较轻的同位素组成。也就是说,与海底热液有关矿床的 Fe 同位素组成受沉淀速度的控制,沉淀速度越慢,沉淀物中的 Fe 同位素组成越轻,意味着不同阶段沉淀出的铁矿物会发生明显的铁同位素分馏效应。由表 1 可见,曼

洒矿区菱铁矿的铁同位素组成非常均一,孙剑等(2010)认为较为均一的 Fe 同位素组成有两种可能:一是源区的 Fe 同位素组成就比较均一,之后的地质作用也没有对 Fe 同位素造成很大的分馏作用;二是源区的 Fe 同位素值组成不均一,变化范围大,后期地质作用使得矿物中 Fe 同位素发生了均一化。已有研究表明,变质作用、风化作用不会使全岩的 Fe 同位素组成发生明显的分馏。曼洒铁矿区风化作用很弱,也没有发生变质作用,故可基本排除后期 Fe 同位素的均一化过程。热液作用会使 Fe 同位素发生明显的分馏作用,Fe 同位素值的分布范围趋于变大,如德国 Schwarzwald 地区热液矿床中铁矿样品的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化范围在 $-2.3\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$ 之间(Markl *et al.*, 2006),Grasberg Igneous Complex 斑岩型矿床中黄铁矿和黄铜矿的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值在 $-1.8\text{‰} \sim 1\text{‰}$ 之间(Graham *et al.*, 2004)。而曼洒菱铁矿除地表部分原生菱铁矿氧化为褐铁矿外,基本未发生后期变化(未见后期变化形成的磁铁矿、赤铁矿等),因此,也可以排除后期地质作用使曼洒铁矿床的 Fe 同位素发生均一性的可能。据此可以推断,曼洒矿区菱铁矿的 Fe 在形成时期就具有较为均一的 Fe 同位素组成,再结合曼洒矿床实际地质特征及菱铁矿形成的物理化学条件约束,我们认为本区菱铁矿为富含铁质等成矿物质的热水溶液喷溢出海底后未经长距离搬运即在局限洼地快速堆积成矿的结果。

此外,Fe 对其所在环境的氧化还原条件非常敏感,氧化还原反应是控制 Fe 同位素分馏的一个重要条件(孙剑,2013; Sun Jian *et al.*, 2013),由于在氧化沉淀过程中 Fe 同位素才会发生较明显的质量分馏,在 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化为 $\text{Fe}(\text{III})$ 的过程中可以发生较大的同位素分馏,重同位素可在 $\text{Fe}(\text{III})$ 中富集(Bullen *et al.*, 2001; Balci *et al.*, 2006)。曼洒矿区主要含铁矿物为二价铁的碳酸盐-菱铁矿,从矿床碳酸盐岩相分析,含矿岩系为泥晶微晶灰岩和粉晶白云岩,并含少量燧石条带,生物化石稀少,反映出成矿期为海水较浅、稳静、相对闭塞的低能环境,说明曼洒铁矿床形成时的古地理环境为相对缺氧的还原环境,并且矿床形成之后并未经历明显的改造作用。

6 结论

(1) 云南省勐腊县曼洒铁矿床菱铁矿 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值总体变化范围在 $-0.337\text{‰} \sim -0.201\text{‰}$ 之间,平均

值为 -0.261% ； $\delta^{57}\text{Fe}$ 值的变化范围为 -0.518% ~ -0.289% ，平均值 -0.378% ，显示其 Fe 同位素组成与海底热液 Fe 同位素组成分布范围一致，表明本矿床的形成与海底热液有一定成因联系。虽然目前尚未有直接的火山成因证据，但成矿明显受到火山期后残余岩浆热能引发的热水活动影响，再结合菱铁矿形成温度相对较低的特点，认为曼洒菱铁矿可能与海底热水活动具有直接成因联系。

(2) 曼洒矿区菱铁矿 Fe 同位素组成非常均一，结合曼洒矿床地质实际和菱铁矿形成的物理化学条件，认为本区菱铁矿为富含铁质等成矿物质的热水溶液喷溢出海底后未经长距离搬运，即在喷口附近的局限洼地迅速堆积成矿。

(3) 矿区菱铁矿 Fe 同位素变化范围很窄，基本未发生铁同位素分馏效应，结合矿区含矿围岩主要为碳酸盐岩、生物化石稀少等地质特征，推测成矿水体环境氧逸度较低，矿床形成于局部深水洼地相对封闭的还原环境。

References

- Anbar A D and Rouxel O. 2007. Metal stable isotope in paleoceanography[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 35: 717~746.
- Archer C and Vance D. 2006. Coupled Fe and S isotope evidence for Archean microbial Fe(III) and sulfate reduction[J]. *Geology*, 34(3): 153~156.
- Balci N, Thomas D B, Kerstin W L, *et al.* 2006. Iron isotope fractionation during microbially stimulated Fe(II) oxidation and Fe(III) precipitation[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70: 622~639.
- Beard B L and Johnson C M. 1999. High-precision iron isotope measurements of terrestrial and lunar materials[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 1653~1660.
- Beard B L and Johnson C M. 2004. Fe isotope variations in the modern and ancient earth and other planetary bodies[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 55(1): 319~357.
- Beard B L, Johnson C M, Skulan J L, *et al.* 2003. Application of Fe isotopes to tracing the geochemical and biological cycling of Fe[J]. *Chem. Geol.*, 195(1~4): 87~117.
- Bekker A, Barley M E, Fiorentini M L, *et al.* 2009. Atmospheric Sulfur in Archean Komattite-Housted Nickel deposit[J]. *Science*, 326: 1086~1089.
- Bennett S A, Rouxel O, Schmidt K, *et al.* 2009. Iron isotope fractionation in a buoyant hydrothermal plume, 5°S Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(19): 5619~5634.
- Bergquist B A and Boyle E A. 2006. Iron isotope in the Amazon River system: Weathering and transport signatures[J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 248(1~2): 54~68.
- Bullen T D, White A F, Childs C W, *et al.* 2001. Demonstration of significant abiotic iron isotope fractionation[J]. *Geology*, 29: 699~702.
- Chen Liemeng, Song Xieyan, Zhu Xiangkun, *et al.* 2014. Iron isotope fractionation during crystallization and sub-solidus re-equilibration: Constrains from the Baima mafic layered intrusion, SW China[J]. *Chemical Geology*, 4: 20.
- Christine M W and John D F. 2015. Fe-isotope fractionation in magmatic-hydrothermal mineral deposits: A case study from the Renison Sn-W deposit, Tasmania[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 150: 285~298.
- Dauphas N, Craddock P R, Asimow P D, *et al.* 2009. Iron isotopes may reveal the redox conditions of mantle melting from Archean to Present[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 288: 255~267.
- Dauphas N and Rouel O. 2006. Mass spectrometry and natural variations of iron isotopes[J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 25: 515~550.
- Dauphas N, Zuilen V M, Busigny V, *et al.* 2007. Iron isotope, major and trace element characterization of early Archean supracrustal rocks from SW Greenland: Protolith identification and metamorphic overprint[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 4745~4770.
- Dauphas N, Zuilen V M, Wadawa M, *et al.* 2004. Clues from Fe isotope variations on the origin of early Archean BIFs from Greenland[J]. *Science*, 292: 2077~2080.
- Dill H G. 2010. The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium[J]. *Earth Science Reviews*, 100(1~4): 1~420.
- Frost C D, Blanckenburg F V, Schoenberg R, *et al.* 2007. Preservation of Fe isotope heterogeneities during diagenesis and metamorphism of banded iron formation[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153: 211~235.
- Fu Xiugen. 2005. Evolution of Lanping Basin and formation of relevant metal deposits[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 27(2): 26~32(in Chinese).
- Graham S, Pearson S, Jackson S, *et al.* 2004. Tracing Cu and Fe from source to porphyry: In Situ determination of Cu and Fe isotope ratios in sulfides from the Grasberg Cu-Au deposit[J]. *Chem. Geol.*

- 207: 147~169.
- He Defeng, Zhong Hong and Zhu Weiguang. 2007. The copper isotope fractional mechanism and its application to ore deposit study[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(4): 345~350(in Chinese with English abstract).
- He Xuexian, Zhu Xiangkun, Li Shizhen, *et al.* 2008. High-precision measurement of magnesium isotopes using MC-ICPMS[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(5): 441~448(in Chinese).
- Heimann A, Beard B L and Johnson C M. 2008. The role of volatile exsolution and sub-solidus fluid/rock interactions in producing high $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ ratios in siliceous igneous rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(17): 4379~4396.
- Heimann A, Johnson C M, Beard B L, *et al.* 2010. Fe, C, and O isotope compositions of banded iron formation carbonates demonstrate a major role for dissimilatory iron in ~2.5 Ga marine environments [J]. *Earth and Planetary Science letters*, 294: 8~18.
- Hofmann A, Bekker A, Rouxel O, *et al.* 2009. Multiple Sulphur and iron isotope composition of detrital pyrite in Archaean sedimentary Rocks: A new tool for provenance analysis[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 286: 436~445.
- Ingri J, Malinovsky D, Rodushkin I, *et al.* 2006. Iron isotope fractionation in river colloidal matter[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 245: 792~798.
- Jian Runtang, Ji Lina and Zhao Xiankun. 2014. Geological characteristics and genetic types of the Mansa iron deposit, Yunnan Province [J]. *Science Technology and Engineering*, 14(24): 179~182(in Chinese).
- Johnson C M, Beard B L, Beukes N J, *et al.* 2003. Ancient geochemical cycling in the Earth as inferred from Fe isotope studies of banded iron formations from the Transvaal Craton[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144(5): 523~547.
- Johnson C M, Beard B L, Klein C, *et al.* 2008. Iron isotopes constrain biologic and abiologic processes in banded iron formation genesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1): 151~169.
- Johnson C M, Eric E, *et al.* 2005. Experimental constraints on Fe isotope fractionation during magnetite and Fe carbonate formation coupled to dissimilatory hydrous ferric oxide reduction[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(4): 963~993.
- Johnson C M, Ludois J M, Beard B L, *et al.* 2013. Iron formation carbonates: Paleooceanographic proxy or recorder of microbial diagenesis? [J]. *Geology*, 41: 1147~1150.
- Johnson C M, Skulan J L, Beard B L, *et al.* 2002. Isotopic fractionation between Fe(III) and Fe(II) in aqueous solutions. [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 195: 141~153.
- Kirsten M, Ronny S, Tor G, *et al.* 2014. Comparison of iron isotope variations in modern and Ordovician siliceous Fe oxyhydroxide deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 126: 422~440.
- Li Feng, Ru Shanshan and Wu Jing. 2012. Regional tectonic and Cu-polymetallic metallogenic evolution in Lanping-Simaoguo basin [J]. *Journal of Yunnan University(Nature Science)*, 34(S2): 134~142 (in Chinese).
- Li Jin, Zhu Xiangkun and Tang Suohan. 2012. Equilibrium fractionation of Fe isotopes during Fe hydrolysis[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(6): 891~896(in Chinese with English abstract).
- Li Weiqiang, Huberty J M, Beard B L, *et al.* 2013. Contrasting behavior of oxygen and iron isotope in banded iron formations revealed by in situ isotopic analysis[J]. *Earth and Planetary Science letters*, 384: 132~143.
- Li Zhihong and Zhu Xiangkun. 2009. Fe isotopic characteristic of banded iron formation[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(Sup): 91(in Chinese).
- Li Zhihong and Zhu Xiangkun. 2011. Fe isotope characteristics and its implications of Xuanlong iron deposit in North of Hebei Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31: 613(in Chinese).
- Li Zhihong and Zhu Xiangkun. 2012. Geochemical Features of Xuanlong Type Iron Ore Deposit in Hebei Province and Their Geological Significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2903~2911 (in Chinese).
- Li Zhihong, Zhu Xiangkun and Tang Suohan. 2008. Characters of Fe isotopes and rare earth elements of banded iron formations from Anshan-Benxi area: implications for Fe source[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(4): 285~290 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhihong, Zhu Xiangkun, Tang Suohan, *et al.* 2010. Characteristics of rare earth elements and geological significations of BIFs from Jidong, Wutai and Lüliang area[J]. *Geoscience*, 24(5): 840~846 (in Chinese).
- Liao Zongting and Chen Yuekun. 2005. Nature and Evolution of Lanping-Simaoguo basin prototype[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 33(11): 1527~1531(in Chinese).
- Liu P P, Zhou M F, Luais B, *et al.* 2014. Disequilibrium iron isotopic fractionation during the high-temperature magmatic differentiation of the Baima Fe-Ti oxide-bearing mafic intrusion, SW China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 399: 21~29.

- Liu Tiegeng, Zhang Zhengwei, Ye Lin, *et al.* 2012. Geological and geochemical characteristics and genesis of "Dolomite" at Bayan Obo, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(5): 723~734(in Chinese).
- Ma Sigen and He Mingqing. 2013. The Cu and Fe isotope compositions and its geological implication of Congjiang Dihou Cu/Au polymetallic deposit, Guizhou Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(supplement): 315~316(in Chinese).
- Markl G, Von Blanckenburg F and Wagner T. 2006. Iron isotope fractionation during hydrothermal ore deposition and alteration[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70: 3 011~3 030.
- Poitrasson F, Halliday A N, Lee D C, *et al.* 2004. Iron isotope differences between Earth, Moon, Mars and Vesta as possible records of contrasted accretion mechanisms[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(3~4): 253~266.
- Rouxel O J, Bekker A and Edwards K J. 2005. Iron isotope constraints on the Archean and Paleoproterozoic ocean redox state[J]. *Science*, 307(5712): 1 088~1 091.
- Rouxel O, Fouquet Y and Ludden J N. 2004. Subsurface processes at the lucky strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: Evidence from sulfur, selenium, and iron isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(10): 2 295~2 311.
- Rouxel O J, Dobbek N, Ludden J, *et al.* 2003. Iron isotope fractionation during oceanic crust alteration[J]. *Chemical Geology*, 202: 155~182.
- Rouxel O J, Shanks W C, Bach W, *et al.* 2008. Integrated Fe and S isotope study of seafloor hydrothermal vents at East Pacific rise 9~10 degrees N[J]. *Chem. Geol.*, 252(3~4): 214~227.
- Schoenberg R and von Blanckenburg F. 2006. Modes of planetary-scale Fe isotope fractionation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(3~4): 342~359.
- Schussler J A, Schoenberg R and Sigmrsson O. 2009. Iron and lithium isotope systematics of the Hekla volcano, Iceland: Evidence for Fe isotope fractionation during magma differentiation[J]. *Chemical Geology*, 258(1~2): 78~91.
- Severmann S, Johnson C M, Beard B L, *et al.* 2004. The effect of plume processes on the Fe isotope composition of hydrothermally derived Fe in the deep ocean as inferred from the Rainbow vent site, Mid-Atlantic Ridge, 36°14'N[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 225(1~2): 63~76.
- Sharam M, Polizzotto M and Anbar A D. 2001. Iron isotope in hot springs along the Juan de Fuca Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 194(1~2): 39~51.
- Sun Jian. 2013. The Origin of Bayan Obo Ore Deposit, Inner Mongolia, China: The Iron and Magnesium Isotope Constrains[D]. China University of Geosciences(Beijing), A dissertation submitted to China university of geosciences for doctoral degree(in Chinese).
- Sun Jian, Zhu Xiangkun, Chen Yuelong, *et al.* 2010. Preliminary Fe isotope study of Bayan Obo ore deposit[J]. *Mineral Deposits*, 29(supp.): 837~838(in Chinese).
- Sun Jian, Zhu Xiangkun, Chen Yuelong, *et al.* 2011. Fe isotope research on Bayan Obo ore deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (supp.): 1 016~1 017(in Chinese).
- Sun Jian, Zhu Xiangkun, Chen Yuelong, *et al.* 2012. Fe isotope compositions of related geological formation in Bayan Obo area and their constraints on the genesis of Bayan Obo ore deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(5): 819~828(in Chinese).
- Sun Jian, Zhu Xiangkun, Chen Yuelong, *et al.* 2013. Iron isotopic constraints on the genesis of Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Precambrian Research*, 235: 88~106.
- Tang Suohan, Zhu Xiangkun, Cai Junjun, *et al.* 2006. Chromatographic separation of Cu, Fe and Zn using AG MP-1 anion exchange resin for isotope determination by MC-ICPMS[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 25(1): 5~8(in Chinese).
- Tang Suohan, Zhu Xiangkun, Li Jin, *et al.* 2008. Preparation of reference material for Cu, Fe and Zn isotope measurements of geological samples[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(4): 279~284(in Chinese with English abstract).
- Wang Shixia and Zhu Xiangkun. 2013. Iron isotope study of basalt weathering crust from the Huguangyandistrict, Zhanjiang, Guangdong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1 461~1 468(in Chinese).
- Wang Shixia, Zhu Xiangkun and Song Xieyan. 2011. Fe isotopic characteristics and the genetic implications of Panzhihua V-Ti magnetite deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 1 020~1 021(in Chinese).
- Wang Shixia, Zhu Xiangkun, Song Xieyan, *et al.* 2012. Fe isotopic characteristics of V-Ti magnetite deposit in panzhihua area of Sichuan Province and their genetic implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 995~1 004(in Chinese).
- Wang Yue and Zhu Xiangkun. 2012. Fe isotope systematics and its implications in ore deposit geology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3 638~3 654(in Chinese).
- Wang Yue, Zhu Xiangkun, Cheng Yanbo, *et al.* 2013. Ore microscopy & Fe isotope of the Xinqiao deposit and their constraints on the ore

- genesis[J]. Journal of Jilin University(Earth Science edition), 43(6): 1 787~1 798(in Chinese).
- Wang Yue, Zhu Xiangkun, Mao Jingwen, *et al.* 2011. Iron isotope fractionation during skarn-type metallogeny: A case study of Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Middle-Lower Yangtze valley[J]. Ore Geology Reviews, 43: 194~202(in Chinese).
- Wang Yue, Zhu Xiangkun, Mao Jingwen, *et al.* 2014. Preliminary Fe isotopic study of Gushan ore magma deposit in Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 33(4): 689~696(in Chinese).
- Whitehouse M J and Fedo C M. 2007. Microscale heterogeneity of Fe isotope in >3.71 Ga banded formation from the Isua Greenstone Belt, Southwest Greenland[J]. Geology, 35: 719~722.
- Yamaguchi K E, Johnson C M, Beard B L, *et al.* 2005. Biogeochemical cycling of iron in the Archean-Paleoproterozoic Earth: Constraints from iron isotope variations in sedimentary rocks from the Kaapvaal and Pilbara Cratons[J]. Chemical Geology, 214(1~2): 135~169.
- Yan Bin. 2009. Fe isotope features of Cap Carbonates and Black Shales in Doushantuo Formation: Implications for Paleo-oceanography[D]. A Dissertation Submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for a Master Degree(in Chinese).
- Yan Bin, Zhu Xiangkun, Tang Suohan, *et al.* 2010. Fe Isotopic Characteristics of the Neoproterozoic BIF in Guangxi Province and Its Implications[J]. Acta Geologica Sinica, 84(7): 1 080~1 086(in Chinese).
- Yang Xin, Zheng Jianjing, Liu Xingwang, *et al.* 2011. Dynamic basin-orogen coupling and sequence response process: Taking Lanping-Simaog basin, western Yunnan as a case[J]. Geoscience, 25(3): 447~455(in Chinese).
- Zhang Feng, Tang Juxing, Chen Hongde, *et al.* 2010. Evolution of Lanping basin and the characteristics of minerogenic fluid in Lanping basin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 30(2): 223~229(in Chinese).
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houmin, *et al.* 2014. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(5): 1 189~1 204(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Santosh M, *et al.* 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview[J]. Ore Geology Reviews, 57: 247~263.
- Zhao Xinmiao, Zhang Hongfu, Zhu Xiangkun, *et al.* 2010. Iron isotope variations in spinel peridotite xenoliths from North China Craton: implications for mantle metasomatism[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160: 1~14.
- Zhao Xinmiao, Zhu Xiangkun, Zhang Hongfu, *et al.* 2008. Applications of Fe isotope to tracing mantle processes[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(5): 435~440(in Chinese).
- Zhao Yiming, Wu Liangshi, Bai Ge, *et al.* 2004. Metallogenic Regularity of Major Metallic Ore Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 13~62(in Chinese).
- Zhu Xiangkun, Guo Y L, O'Nions R K, *et al.* 2000. Secular variation of iron isotopes in north Atlantic Deep Water[J]. Science, 287(5460): 2 000~2 002.
- Zhu Xiangkun, Guo Y L, O'Nions R K, *et al.* 2001. Isotopic homogeneity of iron in early solar nebula[J]. Nature, 412: 311~313.
- Zhu Xiangkun, Guo Y L, Williams R J P, *et al.* 2002. Mass fractionation process of transition metal isotopes[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 200: 47~62.
- Zhu Xiangkun, Li Zhihong, Tang Suohan, *et al.* 2008b. Fe isotope characteristics of Early Precambrian pyrite deposits and their geological significance: Examples from Shandong and Hebei Provinces[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(5): 429~434 (in Chinese).
- Zhu Xiangkun, Li Zhihong, Zhao Xinmiao, *et al.* 2008a. High-precision measurements of Fe isotopes using MC-ICP-MS and Fe isotope compositions of geological reference materials[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(4): 263~272(in Chinese).

附中文参考文献

- 付修根. 2005. 兰坪陆相盆地演化与金属矿床的形成[J]. 地球科学与环境学报, 27(2): 26~32.
- 何德锋, 钟宏, 朱维光. 2007. 铜同位素的分馏机制及其在矿床学研究中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 26(4): 345~350.
- 何学贤, 朱祥坤, 李世珍, 等. 2008. 多接收器等义子体质谱(MC-ICP-MS)测定 Mg 同位素方法研究[J]. 岩石矿物学杂志, 27(5): 441~448.
- 坚润堂, 姬丽娜, 赵献昆. 2014. 云南勐腊县曼酒铁矿床成矿地质特征及成因类型[J]. 科学技术与工程, 14(24): 179~182.
- 李峰, 汝珊珊, 吴静. 2012. 兰坪-思茅盆地区域构造及铜多金属成矿演化[J]. 云南大学学报(自然科学版), 34(S2): 134~142.
- 李津, 朱祥坤, 唐索寒. 2012. Fe 水解过程中的 Fe 同位素分馏研究[J]. 岩石矿物学杂志, 31(6): 891~896.
- 李志红, 朱祥坤. 2009. 条带状铁建造型铁矿的 Fe 同位素分布特征

- [J]. 矿物岩石地球化学通报, 28(增刊): 91.
- 李志红, 朱祥坤. 2011. 冀北宣龙式铁矿的 Fe 同位素特征及其地质意义[J]. 矿物学报, 31: 613.
- 李志红, 朱祥坤. 2012. 河北省宣龙式铁矿的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(9): 2 903~2 911.
- 李志红, 朱祥坤, 唐索寒. 2008. 鞍山-本溪地区条带状铁建造的铁同位素与稀土元素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 27(4): 285~290.
- 李志红, 朱祥坤, 唐索寒, 等. 2010. 冀北、五台和吕梁地区条带状铁矿的稀土元素特征及其地质意义[J]. 现代地质, 24(5): 840~846.
- 廖宗廷, 陈跃昆. 2005. 兰坪-思茅盆地原型的性质及演化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(11): 1 527~1 531.
- 刘铁庚, 张正伟, 叶霖, 等. 2012. 白云鄂博“白云岩”地质地球化学特征及成因讨论[J]. 地质学报, 86(5): 723~734.
- 马思根, 何明勤. 2013. 贵州从江地虎铜金多金属矿床铜和铁同位素特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 19(增刊): 315~316.
- 孙剑. 2013. 白云鄂博矿床成因再研究-铁镁同位素制约[D]. 中国地质大学(北京), 博士学位论文.
- 孙剑, 朱祥坤, 陈岳龙, 等. 2010. 白云鄂博多金属矿床铁同位素初步研究[J]. 矿床地质, 29(增刊): 837~838.
- 孙剑, 朱祥坤, 陈岳龙, 等. 2011. 白云鄂博多金属矿床铁同位素研究[J]. 矿物学报, (增刊): 1 016~1 017.
- 孙剑, 朱祥坤, 陈岳龙, 等. 2012. 白云鄂博地区相关地质单元的铁同位素特征及其对白云鄂博矿床成因的制约[J]. 地质学报, 86(5): 819~828.
- 唐索寒, 朱祥坤, 蔡俊军, 等. 2006. 用于多接收器等离子体质谱铜铁锌同位素测定的离子交换分离方法[M]. 岩矿测试, 25(1): 5~8.
- 唐索寒, 朱祥坤, 李津, 等. 2008. 地质样品铜、铁、锌同位素标准物质的研制[J]. 岩石矿物学杂志, 27(4): 279~284.
- 王世霞, 朱祥坤. 2013. 广东湛江湖光岩地区玄武岩风化壳 Fe 同位素研究[J]. 地质学报, 87(9): 1 461~1 468.
- 王世霞, 朱祥坤, 宋谢炎. 2011. 攀枝花钒钛磁铁矿 Fe 同位素分布特征及其意义[J]. 矿物学报, 31(S1): 1 020~1 021.
- 王世霞, 朱祥坤, 宋谢炎, 等. 2012. 四川攀枝花钒钛磁铁矿床 Fe 同位素特征及其成因指示意义[J]. 地球学报, 33(6): 995~1 004.
- 王跃, 朱祥坤. 2012. 铁同位素体系及其在矿床学中的应用[J]. 岩石学报, 28(11): 3 638~3 654.
- 王跃, 朱祥坤, 程彦博, 等. 2013. 安徽新桥矿床矿相学与 Fe 同位素特征及其对矿床成因的制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(6): 1 787~1 798.
- 王跃, 朱祥坤, 毛景文, 等. 2014. 安徽姑山矿浆型铁矿床 Fe 同位素初步研究[J]. 矿床地质, 33(4): 689~696.
- 闫斌. 2009. 陡山沱组盖帽白云岩和黑色页岩的铁同位素特征及古海洋意义[D]. 中国地质科学院硕士学位论文.
- 闫斌, 朱祥坤, 唐索寒, 等. 2010. 广西新元古代 BIF 的 Fe 同位素特征及其地质意义[J]. 地质学报, 84(7): 1 080~1 086.
- 杨鑫, 郑建京, 刘兴旺, 等. 2011. 动态“盆山”耦合关系及其层序响应过程: 以滇西兰坪-思茅盆地为例[J]. 现代地质, 25(3): 447~455.
- 张峰, 唐菊兴, 陈洪德, 等. 2010. 兰坪盆地演化与盆地内成矿流体特征[J]. 矿物学报, 30(2): 223~229.
- 张招崇, 侯通, 李厚民, 等. 2014. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 30(5): 1 189~1 204.
- 赵新苗, 朱祥坤, 张宏福, 等. 2008. Fe 同位素在地幔地球化学研究中的应用及进展[J]. 岩石矿物学杂志, 27(5): 435~440.
- 赵一鸣, 吴良士, 白鸽, 等. 2004. 中国主要金属矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 13~62.
- 朱祥坤, 李志红, 唐索寒, 等. 2008b. 早前寒武纪硫铁矿床 Fe 同位素特征及其地质意义: 以山东石河庄和河北大川为例[J]. 岩石矿物学杂志, 27(5): 429~434.
- 朱祥坤, 李志红, 赵新苗, 等. 2008a. 铁同位素的 MC-ICP-MS 测定方法与地质标准物质的铁同位素组成[J]. 岩石矿物学杂志, 27(4): 263~272.