

# 中国主要类型铅锌矿床 S、Pb、C-H-O 同位素特征及其成因意义

刘榆, 江彪\*, 王登红, 王岩, 宋学信, 张长青, 黄凡

中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

**摘要:** 铅、锌是重要的矿产资源, 在工业生产中发挥着至关重要的作用。S、Pb、C-H-O 同位素地球化学可以用来解释成矿物质来源、成矿流体来源及矿床成因等地质问题。对铅锌矿床的稳定同位素研究自 20 世纪 80 年代至今已取得丰硕成果, 为从单矿种角度进行全国性的总结奠定了良好基础。本文基于全国重要铅锌矿床的相关硫、铅、氢、氧、碳同位素近万条数据进行分析, 结果显示, 中国铅锌矿床的 S、Pb 同位素特征揭示其成矿物质来源复杂, 主要为深源岩浆和赋矿地层(海水沉积物), H-O、C-O 同位素特征表明中国铅锌矿床的成矿流体中的水主要为岩浆水和大气降水, 而成矿流体中的碳主要来源于岩浆和海相碳酸盐岩。S 同位素的空间分布特征显示, 从我国西部到东部地区, 北部到南部地区, 铅锌矿床的  $^{32}\text{S}$  趋于富集, 表明我国东部和南部铅锌矿床有更多壳源物质参与成矿。C-H-O 同位素特征显示相较于西北部地区, 我国东南部地区的铅锌矿床有更多大气降水或盆地卤水参与成矿。

**关键词:** 铅锌矿; S 同位素; Pb 同位素; C-H-O 同位素; 地球化学

中图分类号: P612 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.121111

## Isotopic Characteristics of S, Pb, and C-H-O in Major Lead-zinc Deposits in China and Their Genetic Significance

LIU Yu, JIANG Biao\*, WANG Denghong, WANG Yan, SONG Xuexin,  
ZHANG Changqing, HUANG Fan

MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,  
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

**Abstract:** As significant mineral resources, lead and zinc play a vital role in industrial production. The S, Pb, C-H-O isotopic geochemistry can be employed to explain geological issues such as the material sources of rocks and ores, ore-forming fluids, and their genesis. Extensive research on the stable isotopes of lead-zinc deposits since the 1980s has yielded fruitful results, laying a good foundation for a national summary from the perspective of a single mineral species. This paper synthesizes 10 000 datasets of S, Pb, H, O and C isotopes related to important Pb-Zn deposits in China, and the results show that the S and Pb isotopic characteristics of China's lead-zinc deposits indicate a complex source of ore-forming materials, primarily deep-source magma and host strata (marine sediments). The H-O and C-O isotopic characteristics suggest that the water in the ore-forming fluids of China's lead-zinc deposits mainly originates from magmatic water and meteoric water, while the C in these fluids mainly stems from magma and marine carbonate rocks. The spatial distribution patterns of S and Pb isotopes reveal that from west to east and north to south in China, lead-zinc deposits are richer in  $^{32}\text{S}$ , indicating a greater involvement of crustal materials in the mineralization processes of deposits in the eastern and southern

本文由中国地质调查局“中国矿产地质志”项目(编号: DD20221695; DD20190379; DD20160346)、省科技创新项目(编号: 2023CX10)和基本科研业务费项目(编号: JKYZD202313)联合资助。

收稿日期: 2024-09-15; 改回日期: 2024-11-20; 网络首发日期: 2024-12-13。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 刘榆, 女, 1999 年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: liuyu201801050205@163.com。

\*通信作者: 江彪, 男, 1986 年生。博士, 副研究员, 硕士生导师。主要从事银多金属矿床成矿作用及区域成矿规律研究。

E-mail: jiangbiao334223@163.com。

regions. The C-H-O isotopic characteristics suggest that, compared to the northwestern regions, the lead-zinc deposits in southeastern China have more atmospheric precipitation or basin brines participating in mineralization.

**Key words:** lead-zinc ore; S isotope; Pb isotope; C-H-O isotope; geochemistry

铅、锌作为不可或缺的重要战略资源,在工业生产中发挥着至关重要的作用。根据美国地质调查局(USGS)2023年公布的数据,全球铅锌储量为 $2.96 \times 10^8$  t,中国铅锌矿资源储量为 $4\ 300 \times 10^4$  t,位居世界第二。我国拥有丰富的铅锌矿资源,矿床类型齐全,分布地域广泛,并且伴生有贵金属、稀有金属和分散元素,综合利用价值高(赵一鸣等,2004),但多数铅锌矿床规模小,品位低,综合利用难度大。分布也极不均匀,主要分布在云南、湖南、内蒙古、四川、西藏等地,整体呈现出东多西少,南多北少的分布特征(图1)。

由于中国铅锌矿床成矿作用复杂多样,矿床分类原则和侧重点各异,因此中国铅锌矿床的分类到目前为止仍是百家争鸣,分类方案繁多(涂光炽等,1989;赵一鸣等,2004;戴自希等,2005;张长青等,2014;宋学信,2024)。我国目前主要的铅锌矿床类型为喷流沉积型(SEDEX型)、密西西比河谷型(MVT型)、块状硫化物型(VHMS型)、矽卡岩型、岩浆热液型、陆相火山岩型、复合型(系指同一成矿

系统中,在不同成矿阶段形成、在不同赋矿地质体内就位的一组矿床;宋学信,2024)和叠生型,其代表性矿床见表1。从区域分布上看,我国西部中型以上铅锌矿床较少,主要矿床类型为SEDEX型、MVT型和岩浆热液型,尤其是发育全球仅有的火烧云式特殊喷流沉积型非硫化物(碳酸盐)世界级铅锌矿床(宋学信,2024);东北部地区中型以上铅锌矿床以陆相火山岩型、矽卡岩型、岩浆热液型为主,少量海相火山岩型(VHMS型)、斑岩型、MVT型和叠生型矿床;西南部地区,尤其是云贵川、广西一带大量发育MVT型矿床,此外陆相火山岩型、叠生型、岩浆热液型、斑岩型也有发育,但数量和规模相对较小;东南部及沿海一带主要发育岩浆热液型、叠生型和复合型矿床,少量陆相火山岩型、斑岩型和矽卡岩型矿床发育。在我国目前尚未发现典型的砂岩铅矿床。值得注意的是,SEDEX型、MVT型、矽卡岩型,岩浆热液型、复合型、叠生型为中国铅锌矿的优势类型(图1)。中国地处特提斯成矿域、环太平洋成矿域和中亚成矿域交界位置,

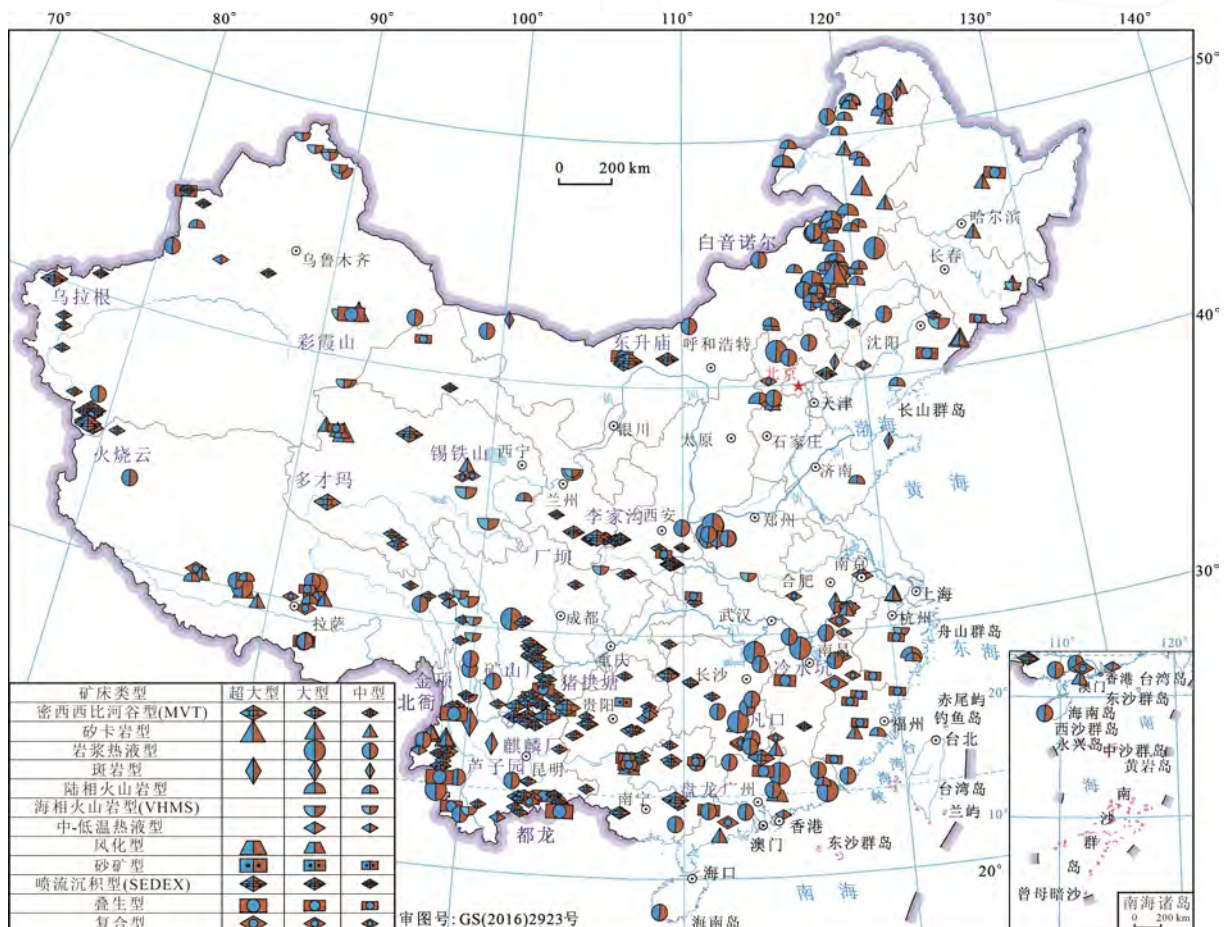


图1 中国中型以上主要类型铅锌矿床分布图

Fig. 1 Distribution of major types of above medium-sized lead-zinc deposits in China

表 1 中国主要铅锌矿床类型及其矿床实例(据张长青等, 2014; 宋学信, 2024)

Table 1 Main types of lead-zinc deposits and their examples in China (from ZHANG et al., 2014; SONG, 2024)

矿床类型	矿床实例
喷流沉积(SEDEX)型	东升庙、桐木沟、盘龙、火烧云、锡铁山、厂坝—李家沟、乌拉根
碳酸盐岩(后生)(MVT)型	凡口、李梅、马元、会泽、毛坪, 大梁子、天宝山、多才玛、东莫扎抓、栖霞山、金顶
海相火山岩型(VHMS 或 VMS)	红透山、可可塔勒、阿舍勒、白银厂、铁木尔特
矽卡岩型	白音诺尔、查干敖包、水口山、核桃坪、蒙亚啊
岩浆热液型	蔡家营、西灶沟、桃林、厚婆坳、冷水坑、冷水北沟、都龙、花牛山
陆相火山岩型	甲乌拉、五部
复合型	姚家岭、甲玛、查个勒、翠宏山、八家子、黄沙坪
叠生型	青城子、彩霞山、扎西康、峰岩、澜沧老厂、芦子园、荒沟山、茂租

形成的不同成矿带成矿地质背景并不相同, 发育的铅锌矿床类型也就存在很大差异, 必然会导致不同地区铅锌矿的成矿流体来源和成矿物质来源存在较大差异, 因此对同位素地球化学特征总结并结合成矿地质背景, 有助于查明全国不同成矿带之间发育不同类型铅锌矿床的根本原因。

硫、铅、碳、氢、氧等同位素广泛应用于研究矿床成因及其物质来源、岩浆成因、地壳演化等(魏菊英等, 1988)。我国自 20 世纪 80 年代开展对铅锌矿床的同位素地球化学研究, 目前已积累了丰富的资料, 但尚未有人对不同类型、不同成矿带铅锌矿进行全国性的系统总结。因此, 本文对全国重要铅锌矿床的相关硫、铅、氢、氧、碳同位素数据进行收集, 对不同类型、成矿区带铅锌矿床的 S、Pb、C-H-O 同位素进行整理归纳, 在充分尊重原始数据和客观记录的前提下便于读者进一步理解中国铅锌矿床整体的成矿规律, 并对全国铅锌矿产成矿规律有进一步认识。

## 1 我国主要类型铅锌矿床 S、Pb、C-H-O 同位素特征

### 1.1 S 同位素特征

本文共搜集了 8 种类型 42 个典型铅锌矿床的矿石硫化物和硫酸盐硫同位素数据 3 377 条, 列于表 2。中国铅锌矿矿石硫化物的硫同位素组成变化大,  $\delta^{34}\text{S}$  值在  $-30\%$  ~  $+41.1\%$  之间, 极差达 71.1%。硫酸盐矿物常见于大型-超大型铅锌矿, 主要矿物为重晶石、石膏、天青石,  $\delta^{34}\text{S}$  值多为较大的正值。从表 2 和图 2 中可以看出, SEDEX 型铅锌矿床的  $\delta^{34}\text{S}$  值呈离散状广泛分布, 绝大部分数据大于 0, 均值在  $-10\%$  ~  $25.7\%$  之间变化, 表明硫源主要为海水硫酸盐和深源岩浆, 个别矿床如乌拉根矿床硫同位素变化较大(极差值大于 20%), 这并不一定表明矿源的多源性, 也可能是不同成矿阶段中矿物在不同条件下依次沉淀的结果(高荣臻, 2018); MVT 型

铅锌矿的  $\delta^{34}\text{S}$  均值在  $-12.14\%$  ~  $30.83\%$  之间, 主体  $\delta^{34}\text{S}$  值集中在  $10\%$  ~  $25\%$  之间, 表现出富集重硫的特征, 表明硫的主要来源是海相碳酸盐的还原作用; VHMS 型、矽卡岩型、岩浆热液型、陆相火山岩型矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值主体在  $-5\%$  ~  $5\%$  之间, 具有“塔式”分布特征, 反映硫源单一, 符合这类矿床的成矿机制, 均与岩浆岩或火山岩有着直接或间接的成因联系, 其中 VHMS 型矿床同时表现出一定的双峰式分布特征, 反映出硫可能有多种来源, 主要来自深源岩浆或火山岩, 同时还有一些沉积物中的还原硫。叠生型铅锌矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值总体变化范围较大, 具有明显的“双峰式”乃至“三峰式”特征, 反映出硫源的多源性, 是对可能存在多期不同成矿作用的间接反映。复合型铅锌矿床中各矿床的  $\delta^{34}\text{S}$  值在  $-19.1\%$  ~  $18\%$  之间, 但数据主体及均值在  $-5\%$  ~  $5\%$  之间, 呈明显的“塔式”分布特征, 表明矿床中硫主要来自深源岩浆, 可能伴随有地层硫的混入等。大部分矿床  $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ , 符合平衡条件下  $^{34}\text{S}$  的富集顺序。部分矿床, 尤以 MVT 型和叠生型矿床居多, 不符合平衡条件下的  $^{34}\text{S}$  富集顺序, 硫同位素分馏可能没有达到热力学平衡, 也就是说硫化物可能形成于不同的成矿阶段, 此外, 还极有可能是一些硫酸盐还原机制导致的, 比如硫酸盐细菌还原作用(BSR)、硫酸盐热化学还原作用(TSR)。

### 1.2 Pb 同位素特征

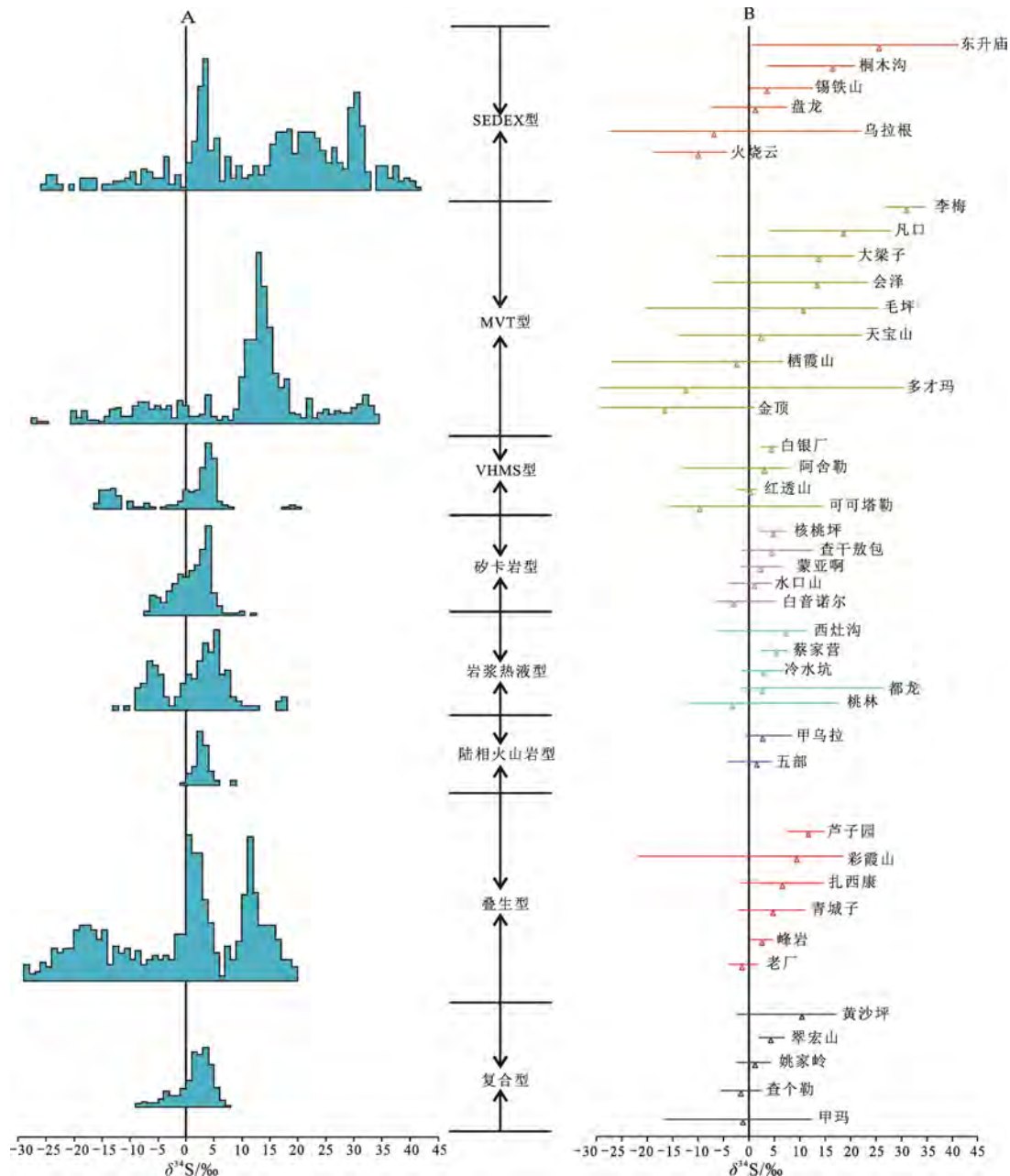
铅同位素作为一种非常有意义的地球化学示踪体系, 不仅能指示地壳演化, 而且可以指示成矿物质的来源和矿床的成因。本次工作共搜集 40 个矿床的矿石硫化物铅同位素数据 4 314 条。从图 3 可以看出, 大部分铅锌矿矿石铅同位素具有线性分布特点, 各构成一条相关性很好的直线, 代表了在相同或相似的构造背景下的铅锌矿床铅同位素具有同源性或者经历了相同的演化历史, 这也证明了铅同位素对于示踪物质来源具有稳定性和较高的可靠性, 且  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  极差小于 1 的矿床



续表 2

序号	矿床名称	矿床类型	成矿时代	硫化物类		硫酸盐类		黄铁矿	闪锌矿	方铅矿	磁黄铁矿	黄铜矿	参考文献
				变化范围(极差)	均值(样数)	均值(样数)	均值(样数)						
27	桃林	V	K <sub>1</sub>	-12.1 ~ +17.7(29.8)	-4.0(50)	+17.0(5)		-5.7(20)	-7.4(21)				Ding et al., 1984
28	都龙	V	Є <sub>2</sub> +K <sub>1</sub>	-1.3 ~ +25.8(27.1)	+2.7(139)		+6.1(29)	+1.6(51)	+3.0(7)	+1.7(25)			何芳等, 2014
29	冷水坑	V	J <sub>3</sub> -K <sub>1</sub>	-1.4 ~ +6.9(8.3)	+3.0(39)		+2.9(11)	+4.6(15)	+1.2(13)				王长明等, 2011
30	甲乌拉	VI	J <sub>3</sub> -K <sub>1</sub>	-0.4 ~ +8.4(8.8)	+2.9(64)		+3.6(16)	+3.2(20)	+2.0(20)	+1.5(2)			翟德高等, 2013; Li et al., 2015
31	五部	VI	K <sub>2</sub>	-4.0 ~ +4.5(8.5)	+1.6(32)		+0.8 ~ +2.0(13)	-4.0 ~ +4.0(7)	-1.1 ~ +1.5(4)				朱安庆, 2009
32	扎西康	VII	J <sub>1</sub> +N <sub>1</sub>	-1.9 ~ +14.8(16.7)	+6.4(69)		+6.2(31)	+8.6(14)	+5.6(12)	+0.8(3)			张建芳, 2010
33	芦子园	VII	Є <sub>3</sub> +K <sub>1</sub>	+7.5 ~ +14.8(7.3)	+11.5(94)	+17.0(3)		+11.8(37)	+11.0(27)	+11.4(27)			徐荣, 2016, 2021
34	老厂	VII	C+E	-4.0 ~ +1.8(5.8)	-1.3(9)		+0.4(2)	-2.2(2)	-2.4(1)				赵晓勇等, 2012
35	峰岩	VII	Pt <sub>2-3</sub> +J <sub>3</sub>	+0.4 ~ +4.6(4.2)	+2.4(26)		+0.9(3)	+3.4(10)	+2.3(9)	+1.5(4)			张达等, 2009
36	青城子	VII	Pt <sub>1</sub> +T <sub>3</sub>	-2.0 ~ +11.0(13)	4.9(94)		+6.6(38)	+5.2(22)	+3.0(29)	+2.5(5)			董存杰等, 2010
37	彩霞山	VII	Pt <sub>2</sub> +C <sub>1</sub>	-21.1 ~ +19.1(40.2)	+9.8(27)		+7.3(8)	+13.0(9)	+10.3(7)	+5.5(3)			曹晓峰等, 2013
38	翠宏山	VIII	J <sub>1</sub>	+2.0 ~ +6.9(4.9)	+4.4(38)		+4.4(3)	+4.9(8)	+4.7(16)	+4.5(3)			陈贤等, 2017
39	甲玛	VIII	N <sub>1</sub>	-16.8 ~ +12.5(29.3)	-1.1(75)	+1.1(3)		-0.2(3)	-2.8(19)	-0.7(4)			周云, 2010; 应立娟等, 2012
40	查个勒	VIII	E <sub>1</sub>	-5.6 ~ +2.6(8.2)	-1.7(11)		+1.4(2)	-1.7(2)	+4.5(5)				张永超等, 2018
41	黄沙坪	VIII	J <sub>3</sub> -K <sub>1</sub>	-2.2 ~ +17.2(19.4)	+10.4(146)		+10.2(43)	+11.7(50)	+9.8(44)	+7.0(3)	+4.5(4)		息朝庄等, 2009
42	姚家岭	VIII	K <sub>1</sub>	-2.6 ~ +4.5(7.1)	+1.0(21)		+0.2(10)	+2.0(8)	+3.7(1)		-0.8(2)		刘政, 2019

注: I代表 SEDEX 型矿床; II代表 MVT 矿床; III代表 VHMS 型矿床; IV代表砂卡岩型矿床; V代表岩浆热液型矿床; VI代表陆相火山岩型矿床; VII代表叠生型矿床; VIII代表复合型矿床。



A—中国主要类型铅锌矿床硫同位素直方图; B—中国主要类型不同铅锌矿床硫同位素对比图, B图中“—”表示硫同位素变化范围, “ $\Delta$ ”表示各矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 均值, 同一类型铅锌矿床按照平均值由小到大排序。

A—histogram of sulfur isotope of major lead-zinc deposits in China; B—sulfur isotope correlation map of different main types of lead-zinc deposits in China. In Fig. B, “—” represents the variation range of sulfur isotopes, “ $\Delta$ ” represents the mean value of  $\delta^{34}\text{S}$  in each deposit, and the same type of lead-zinc deposits are sorted in ascending order of their mean values.

图2 中国主要类型铅锌矿中矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成特征图

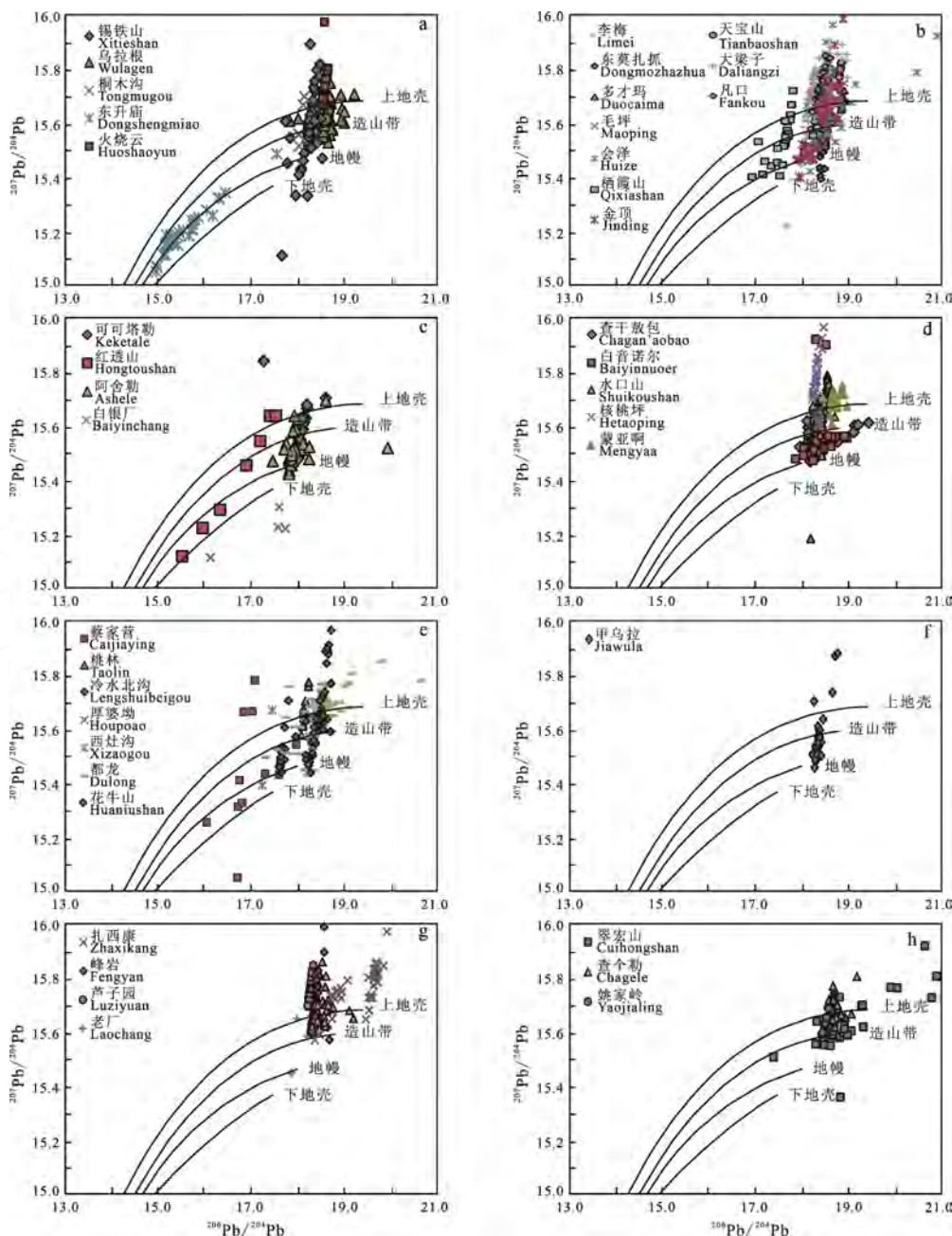
Fig. 2 Composition characteristics of  $\delta^{34}\text{S}$  of ore sulfide in main types of lead-zinc deposits in China

分别占 72.5%、84.6%，反映中国铅锌矿床矿石铅以正常铅为主。与岩浆作用和火山作用有关的 VHMS 型、矽卡岩型、岩浆热液型和陆相火山岩型铅锌矿床数据投点落在地幔到上地壳演化线之间，显示出成矿物质来源以深源为主，具有壳幔混源特征。SEDEX 型和 MVT 型矿床  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解中表现出的线性关系最好(图 3a, b)，运用铅同位素示踪物质来源可靠性更高。叠生型和复合型铅锌矿床  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  线性相关性相对较差(图 3g, h)，且数据点主要落在造山带演化线到上地壳

演化线之间，表明矿床成矿物质主要为上地壳和造山带混合来源，显示出成矿物质来源的多源性，同样具有壳幔混合特征。

### 1.3 C-H-O 同位素特征

本次工作共搜集 36 个矿床的氢氧同位素数据共计 1 220 条，并绘制图 4。从该图可以看出，各类型铅锌矿床(除会泽铅锌矿以外)的氢氧同位素数据基本都落在岩浆水和大气降水之间，表明中国铅锌矿床的成矿流体来源以原生岩浆水与大气降水为主。MVT 型矿床  $\delta\text{D}$  值在  $-137\text{‰}$ ~ $-15\text{‰}$  之间，



a—SEDEX 型; b—MVT 型; c—VHMS 型; d—矽卡岩型; e—岩浆热液型; f—陆相火山岩型; g—叠生型; h—复合型。

数据来源: 锡铁山—孙景, 2018; 乌拉根—Gao et al., 2019; 桐木沟—王清廉, 1987; 马国良, 1993; 东升庙—高兆富, 2017; 火烧云—高永宝等, 2019; 李梅—胡太平等, 2017; 东莫扎抓—田世洪等, 2011; 多才玛—贾文彬等, 2018; 毛坪—谈树成等, 2019; 会泽—李文博等, 2006;

天宝山—李发源, 2003; 大梁子—李发源, 2003; 凡口—韩英, 2013; 栖霞山—张明超等, 2017; 可可塔勒—徐文圻等, 2012; 红透山—张森等, 2007; 阿舍勒—王登红, 1996; 白银厂—王兴安, 1999; 查干敖包—张万益, 2008; 白音诺尔—Zeng et al., 2009; 江思宏等, 2011; 水口山—路睿, 2013; 核桃坪—高伟等, 2011; 蔡家营—胡小蝶等, 2005; 桃林—Ding et al., 1984; 冷水北沟—段士刚等, 2010; 厚婆坳—汪东波等, 1988; 梁硬干, 1993; 西灶沟—李莉等, 1999; 岳山—葛宁洁等, 1989; 甲乌拉—韩世清, 2006; 李铁刚, 2016; 花牛山—杜泽忠等, 2021; 蒙亚啊—王立强等, 2010; 扎西康—李关清, 2015; 金顶—徐晓雪, 2019; 芦子园—徐荣, 2021; 老厂—赵晓勇等, 2012; 都龙—何芳等, 2014; 峰岩—张达等, 2009; 翠宏山—陈贤等, 2017; 查个勒—张永超等, 2018; 姚家岭—刘绍锋, 2012。

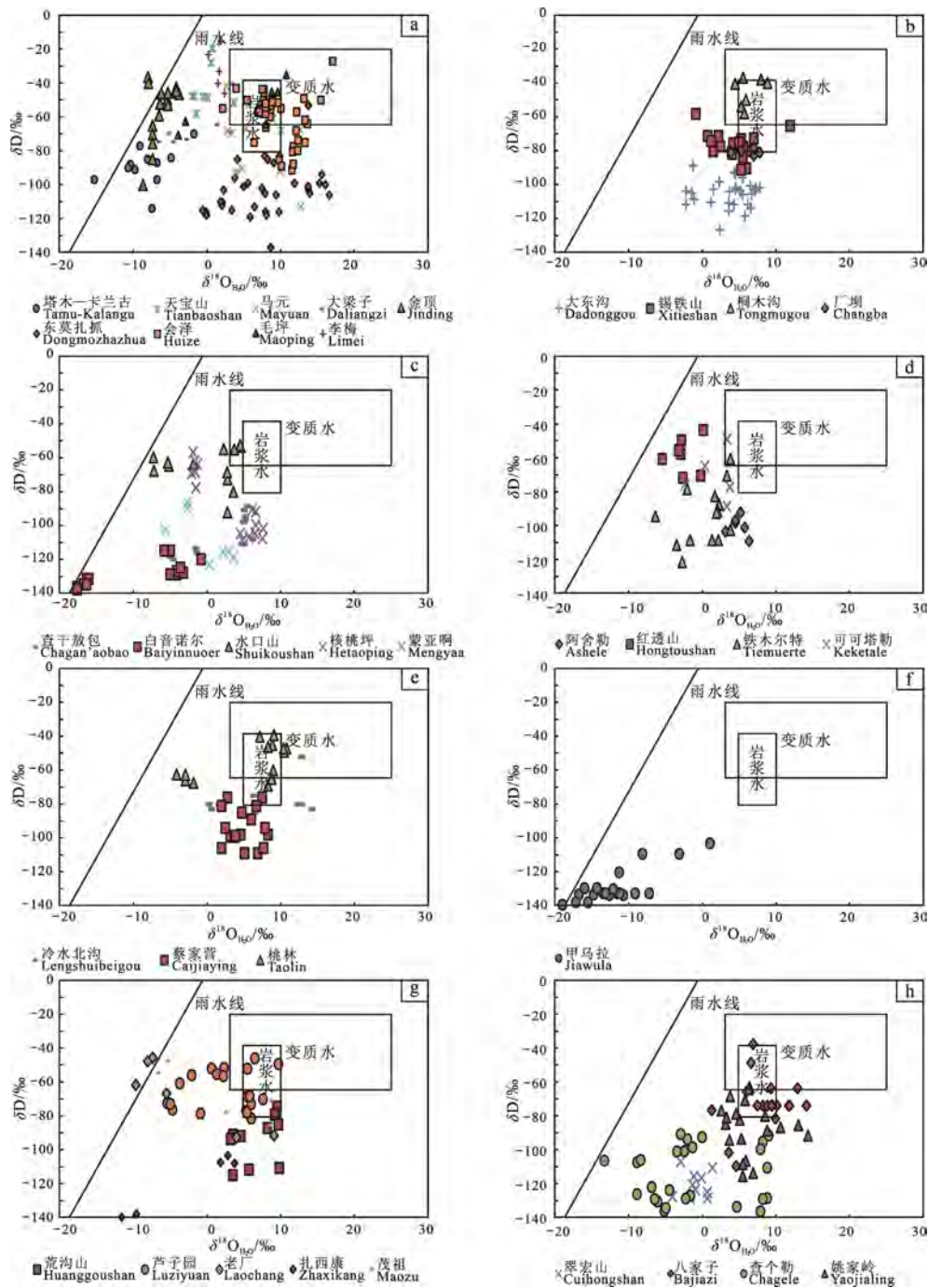
a—SEDEX type; b—MVT type; c—VHMS type; d—skarn type; e—magmatic hydrothermal type; f—continental volcanic rock type; g—superimposed type; h—composite type.

Data sources: Xitieshan—SUN, 2018; Wulagen—Gao et al., 2019; Tongmugou—WANG, 1987; MA, 1993; Dongshengmiao—GAO, 2017; Huoshayun—GAO et al., 2019; Limei—HU et al., 2017; Dongmozhazhua—TIAN et al., 2011; Duocaima—JIA et al., 2018; Maoping—TAN et al., 2019; Huize—LI et al., 2006; Tianbaoshan—LI, 2003; Daliangzi—LI, 2003; Fankou—HAN, 2013; Qixiashan—ZHANG et al., 2017;

Keketale—XU et al., 2012; Hongtoushan—ZHANG et al., 2007; Ashele—WANG, 1996; Baiyinnuoer—Zeng et al., 2009; Chagan'aobao—ZHANG, 2008; Baiyinnuoer—Zeng et al., 2009; JIANG et al., 2011; Shuikoushan—LU, 2013; Hetaoping—GAO et al., 2011; Caijiaying—HU et al., 2005; Taolin—Ding et al., 1984; Lengshuibeiyou—DUAN et al., 2010; Houpoao—WANG et al., 1988; LIANG, 1993; Xizaogou—LI et al., 1999; Yueshan—GE et al., 1989; Jiawula—HAN, 2006; LI, 2016; Huaniushan—DU et al., 2021; Mengyaa—WANG et al., 2010; Zhaxikang—LI, 2015; Jinding—XU, 2019; Luziyuan—XU, 2021; Laochang—ZHAO et al., 2012; Dulong—HE et al., 2014; Fengyan—ZHANG et al., 2009; Cuihongshan—CHEN et al., 2017; Chagele—ZHANG et al., 2018; Yaojialing—LIU, 2012.

图 3 中国主要类型铅锌矿的铅同位素构造演化图(底图据 Zartman et al., 1981)

Fig. 3 The Pb isotope tectonic evolution diagram of main types of lead-zinc deposits in China (base map from Zartman et al., 1981)



a—MVT型; b—SEDEX型; c—砷卡岩型; d—VHMS型; e—岩浆热液型; f—陆相火山岩型; g—叠生型; h—复合型。

数据来源: 岩浆水—Sheppard, 1986; 变质水—Taylor, 1974; 塔木—卡兰古—王书来等, 2002; 天宝山—王健等, 2018; 马元—宋志娟等, 2018; 大梁子—王海等, 2018; 东莫扎抓—刘英超等, 2009; 会泽—崔中良等, 2018; 毛坪—韩润生等, 2007; 李梅—周云等, 2018; 大东沟—刘敏等, 2008; 锡铁山—王莉娟等, 2009; 桐木沟—耿艳光, 2018; 厂坝—魏然, 2022; 查干敖包—王瑞良, 2019; 白音诺尔—Wang et al., 2018; 水口山—路睿, 2013; 核桃坪—高伟等, 2011; 阿舍勒—边春静, 2018; 红透山—张森, 2007; 铁木尔特—耿新霞等, 2010; 可可塔勒—王书来等, 2007; 冷水北沟—付治国等, 2010; 蔡家营—胡小蝶等, 2005; 桃林—Ding et al., 1984; 甲乌拉—Li et al., 2015; 荒沟山—田力丹等, 2017; 蒙亚啊—王立强等, 2010; 扎西康—Xie et al., 2017; 金顶—徐晓雪, 2019; 芦子园—徐荣, 2021; 老厂—赵晓勇等, 2012; 茂祖—杨清等, 2017; 翠宏山—赵华雷, 2014; 八家子—蒋小涌等, 1991; 查个勒—张永超等, 2018; 姚家岭—刘绍锋, 2012。

a—MVT type; b—SEDEX type; c—skarn type; d—VHMS type; e—magmatic hydrothermal type; f—continental volcanic rock type; g—superimposed type; h—composite type.

Data sources: magmatic water—Sheppard, 1986; metamorphic water—Taylor, 1974; Tamu—Kalangu—WANG et al., 2002; Tianbaoshan—WANG et al., 2018; Mayuan—SONG et al., 2018; Daliangzi—WANG et al., 2018; Dongmohazhua—LIU et al., 2009; Huize—CUI et al., 2018; Maoping—HAN et al., 2007; Limei—ZHOU et al., 2018; Dadonggou—LIU et al., 2008; Xitieshan—WANG et al., 2009; Tongmugou—GENG, 2018; Changba—WEI, 2022; Chaganaobao—WANG, 2019; Baiyinnuoer—Wang et al., 2018; Shuikoushan—LU, 2013; Hetaoping—GAO et al., 2011; Ashele—BIAN, 2018; Hongtoushan—ZHANG, 2007; Tiemuerte—GENG et al., 2010; Keketale—WANG et al., 2007; Lengshuibeiou—FU et al., 2010; Caijiaying—HU et al., 2005; Taolin—Ding et al., 1984; Jiawula—Li et al., 2015; Huanggoushan—TIAN et al., 2017; Mengyaa—WANG et al., 2010; Zhaxikang—Xie et al., 2017; Jinding—XU, 2019; Lu ziyuan—XU, 2021; Laochang—ZHAO et al., 2012; Maozu—YANG et al., 2017; Cuihongshan—ZHAO, 2014; Bajiazi—JIANG et al., 1991; Chagale—ZHANG et al., 2018; Yaojialing—LIU, 2012.

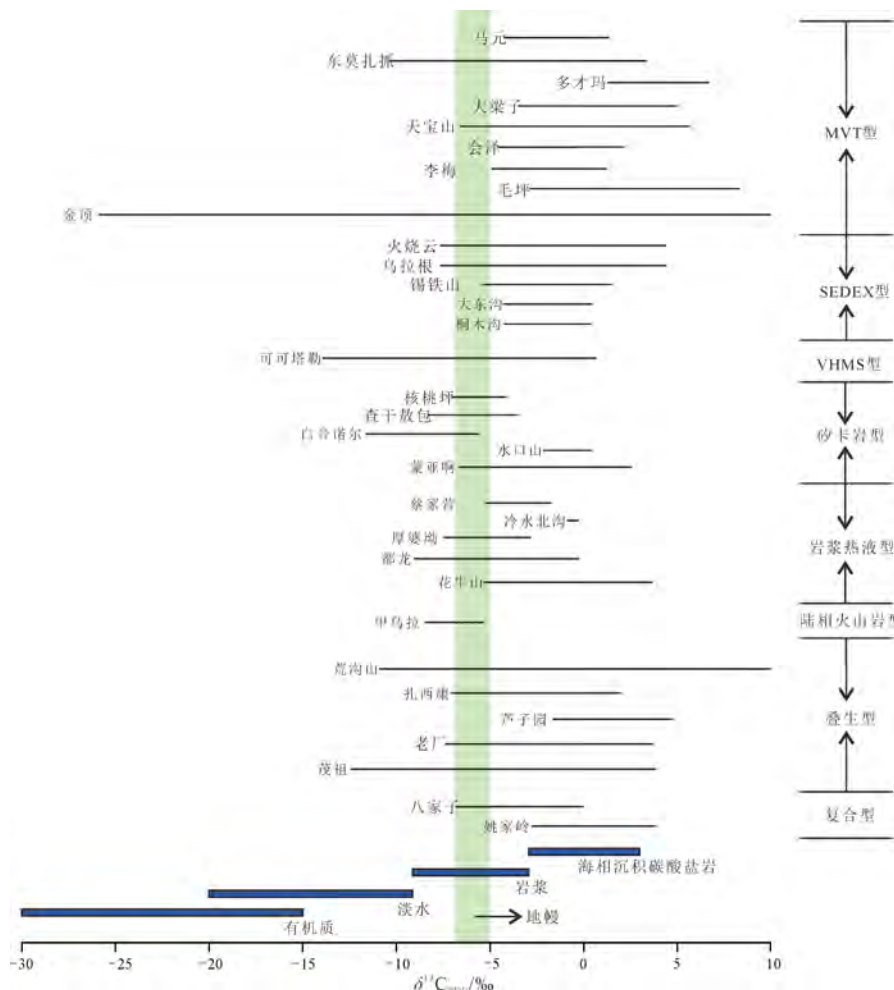
图4 中国主要类型铅锌矿的氢氧同位素组成图解(底图据 Taylor, 1979)

Fig. 4 H-O isotope composition diagram of main types of lead-zinc deposits in China (base map from Taylor, 1979)



$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 $-15.2\text{‰} \sim +17.1\text{‰}$ 之间, 主要落在岩浆水与大气降水之间, 同时与雨水线斜交, 表明在成矿过程中有大气降水和盆地卤水参与, 少部分铅锌矿落在变质水范围内(如云南会泽铅锌矿床), 表明成矿流体来源可能还与变质水有关。SEDEX 型矿床相较于 MVT 型矿床氢氧同位素数据更靠近岩浆水范围,  $\delta\text{D}$  值在 $-127\text{‰} \sim -37\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 $-2.2\text{‰} \sim +11.9\text{‰}$ 之间, 表明成矿流体以岩浆水和大气降水为主。矽卡岩型矿床,  $\delta\text{D}$  值在 $-150.6\text{‰} \sim -34.6\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 $-17.6\text{‰} \sim +16.4\text{‰}$ 之间, VHMS 型矿床,  $\delta\text{D}$  值在 $-122\text{‰} \sim -44\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 $-5.8\text{‰} \sim +7.4\text{‰}$ 之间, 氢氧同位素数据主要落在岩浆水和大气降水线之间, 与 MVT 型矿床相比, 氧同位素值偏小, 整体数据投点更靠近岩浆水, 表明在成矿早期有大量岩浆水的参与, 由图 4c、图 6d 可知, 矽卡岩型矿床的 H-O 同位素图解存在向雨水线“氧漂移”的趋势, 同时数据投点存在两个集中区, 表明存在两期成矿流体, 早期以岩浆水为主,

晚期以大气降水为主。岩浆热液型矿床  $\delta\text{D}$  值在 $-115.9\text{‰} \sim -31\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 $-4.1\text{‰} \sim +14.3\text{‰}$ 之间, 较为集中的分布在岩浆水范围附近, 表明成矿过程中主要是岩浆水的参与。叠生型矿床多为早期喷流沉积型矿床叠加后期成矿作用, 氢氧同位素  $\delta\text{D}$  值在 $-165\text{‰} \sim -14\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 $-13.7\text{‰} \sim +17.3\text{‰}$ 之间, 数据特征表现出成矿流体以岩浆水为主、岩浆水与大气降水等混合和以大气降水为主多种形式, 而复合型矿床往往是一个岩浆成矿系统中不同成矿部位的复合,  $\delta\text{D}$  值在 $-189\text{‰} \sim -38\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值在 $-13.2\text{‰} \sim +14.1\text{‰}$ 之间, 氢氧同位素特征显示出成矿流体以岩浆水为主, 其他成矿流体为辅。矽卡岩型矿床(水口山)、岩浆热液型矿床(桃林)和叠生型矿床(芦子园)大部分数据落在原生岩浆水范围内, 但随着晚期大气降水的加入, 发生明显的“氧漂移”, 靠近雨水线, 表明随着成矿的进行成矿流体与围岩的水岩反应加剧。MVT 型矿床金顶数据点基本都靠近大气降水线, 并未落在岩浆水



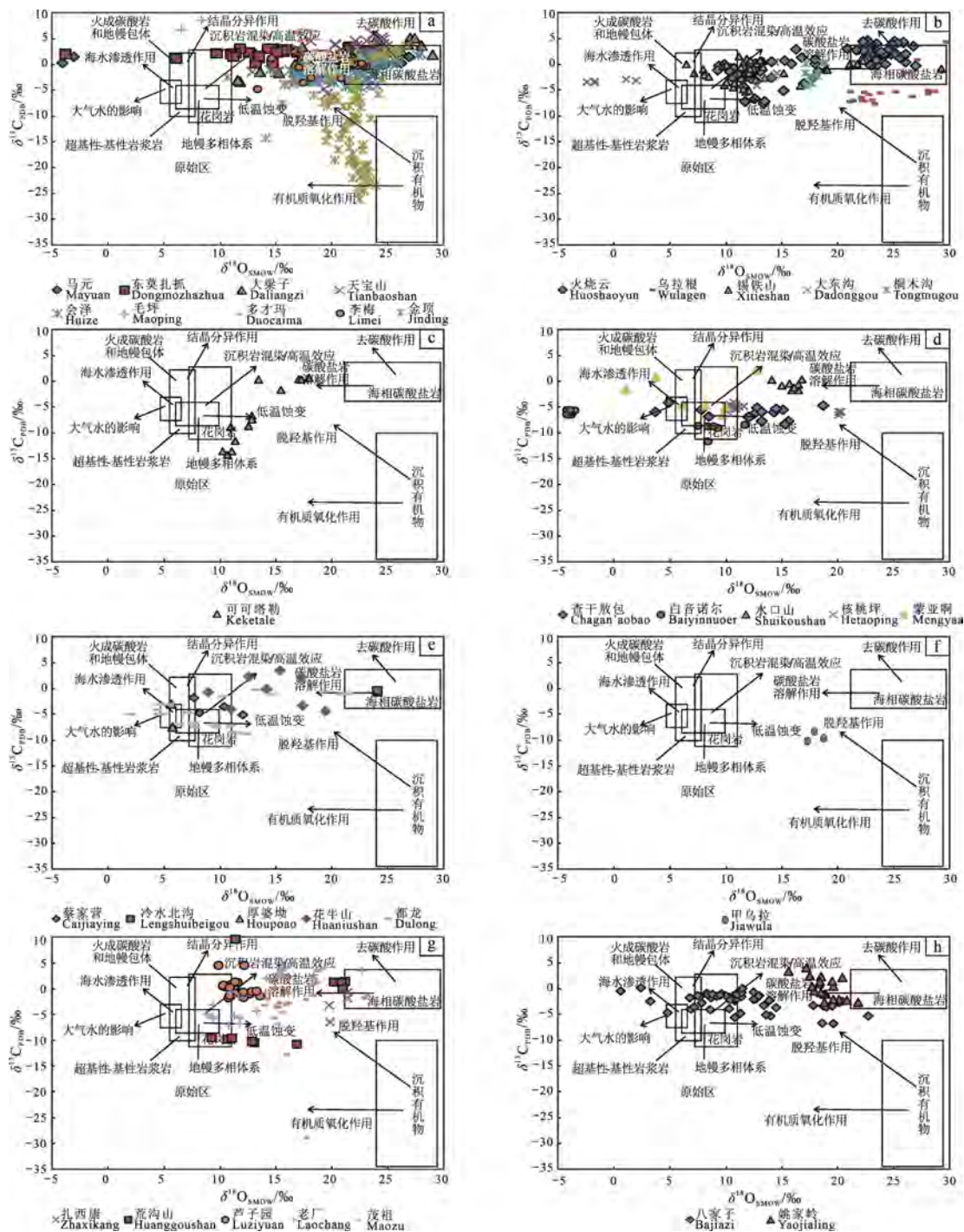
碳储库 C 同位素范围数据来源: 岩浆来源—Taylor et al., 1985; 地幔来源—Hoefs, 2009;

海相沉积碳酸盐岩来源—Ohmoto, 1979, 1986; 淡水来源—Hoefs, 1997; 有机质来源—Ohmoto, 1972。

The C isotope range data sources include magmatic sources—Taylor, et al., 1985; mantle sources—Hoefs, 2009; marine sedimentary carbonate sources—Ohmoto, 1979, 1986; freshwater sources—Hoefs, 1997; organic sources—Ohmoto, 1972.

图 5 中国主要类型铅锌矿与各碳储库的碳同位素对比图

Fig. 5 C isotope comparison diagram between main types of lead-zinc deposits in China and various carbon reservoirs



a—MVT 型; b—SEDEX 型; c—VHMS 型; d—矽卡岩型; e—岩浆热液型; f—陆相火山岩型; g—叠生型; h—复合型。

数据来源: 马元—李厚民等, 2007; 东莫扎抓—刘英超等, 2009; 大梁子—王海等, 2018; 天宝山—高永宝等, 2020; 会泽—崔中良等, 2018; 王健等, 2018; 毛坪—Han et al., 2007; 多才玛—刘长征等, 2015; 李梅—周云等, 2018; 火烧云—高永宝等, 2019; 乌拉根—高荣臻, 2018; 锡铁山—王莉娟等, 2009; 大东沟—刘敏等, 2008; 桐木沟—马国良等, 1993; 可可塔勒—王书来等, 2007; 查干敖包—王瑞良, 2019; 白音诺尔—Wang et al., 2018; 水口山—路睿, 2013; 核桃坪—高伟等, 2011; 蔡家营—黄典豪等, 1997; 冷水北沟—付治国等, 2010; 厚婆坳—汪东波等, 1988; 甲乌拉—翟德高等, 2013; 花牛山—代文军, 2010; 荒沟山—张耀奎等, 1983; 芦子园—徐荣, 2021; 金顶—徐晓雪, 2019; 老厂—龙汉生等, 2009; 扎西康—李关清, 2015; 蒙亚啊—王立强等, 2010; 茂祖—杨清等, 2017; 都龙—何芳等, 2014; 八家子—蒋少涌等, 1991; 姚家岭—刘绍锋, 2012。

a—MVT type; b—SEDEX type; c—VHMS type; d—skarn type; e—magmatic hydrothermal type; f—continental volcanic rock type; g—superimposed type; h—composite type.

Data sources: Mayuan—LI et al., 2007; Dongmohazhua—LIU et al., 2009; Daliangzi—WANG et al., 2018; Tianbaoshan—GAO et al., 2020; Huizhe—CUI et al., 2018; WANG et al., 2018; Maoping—Han et al., 2007; Duocaima—LIU et al., 2015; Limei—ZHOU et al., 2018; Huoshaoyun—GAO et al., 2019; Wulagen—GAO, 2018; Xitieshan—WANG et al., 2009; Dadonggou—LIU et al., 2008; Tongmugou—MA et al., 1993; Keketale—WANG et al., 2007; Chagan'aobao—WANG, 2019; Baiyinnuoer—Wang et al., 2018; Shuikoushan—LU, 2013; Hetaoping—GAO et al., 2011; Caijiaying—HUANG et al., 1997; Lengshuibei—FU et al., 2010; Houpao—WANG et al., 1988; Jiawula—ZHAI et al., 2013; Huanishan—DAI, 2010; Huanggoushan—ZHANG et al., 1983; Luziyuan—XU, 2021; Jinding—XU, 2019; Laochang—LONG et al., 2009; Zhaxikang—LI, 2015; Mengyaa—WANG et al., 2010; Maozu—YANG et al., 2017; Dulong—HE et al., 2014; Bajiazi—JIANG et al., 1991; Yaojialing—LIU, 2012.

图 6 中国主要类型铅锌矿碳氧同位素组成图解(底图参考刘建明等, 1997)

Fig. 6 C-O isotope composition diagram of main types of lead-zinc deposits in China (base map from LIU et al., 1997)

及变质水范围内, 数据点显示明显的向右漂移现象, 表明大气降水与周围岩层发生水岩作用, 具有盆地卤水特点(徐晓雪, 2019)。

本文共搜集 33 个矿床的碳氧同位素数据 2 146 条。通过各类型铅锌矿碳氧同位素组成范围与各碳储库进行对比以及  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  数据投图(图 5, 图 6), 总结研究发现: MVT 型铅锌矿床的碳、氧同位素组成变化范围较大,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值在  $-10.4\text{‰}\sim+18\text{‰}$  之间,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值在  $-18.9\text{‰}\sim+31.7\text{‰}$  之间。图 5 和图 6a 也反映 MVT 型铅锌矿床碳来源相对复杂, 一部分来源于岩浆或地幔(如东莫扎抓、天宝山), 另一部分与海相碳酸盐岩地层有一定程度的成因联系(如马元、多才玛、大梁子、会泽、李梅、毛坪); SEDEX 型铅锌矿的碳、氧同位素组成变化范围也较大,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值在  $-7.7\text{‰}\sim+4.5\text{‰}$  之间,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值在  $-2.4\text{‰}\sim+31.9\text{‰}$  之间。图 5 和图 6b 同样反映出碳来源相对复杂, 碳同位素主要落在岩浆-地幔(如火烧云、锡铁山)到海相碳酸盐岩范围(如乌拉根、桐木沟、大东沟)内; VHMS 型铅锌矿床的碳同位素范围主要落在岩浆和沉积碳酸盐岩范围内, 由图 6c 可以看出, 碳来源主要与岩浆和海水碳酸盐岩有关。大多数矽卡岩型铅锌矿的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值与岩浆来源碳同位素范围基本一致,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  图解中数据位于深部碳源区, 因此碳的主要来源为岩浆和海水碳酸盐岩。岩浆热液型铅锌矿床的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值变化范围在岩浆来源到海相沉积碳酸盐岩来源之间, 与图 6e 数据投点表现出的结果一致, 即成矿流体主要来源于岩浆和海相碳酸盐岩。陆相火山岩型矿床的碳同位素范围与岩浆-地幔来源碳同位素范围基本重合, 如图 6f, 甲乌拉矿床的成矿流体为岩浆来源。叠生型和复合型矿床的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值变化范围与岩浆和海相碳酸盐岩的变化范围相一致(图 5, 图 6g, h), 表明碳来自自岩浆与海相碳酸盐岩。

## 2 我国主要类型铅锌矿床 S、Pb、C-H-O 同位素空间分布特征

从空间上看, 矿床 S 同位素与其所在空间位置, 即成矿地质背景, 存在一定的关联性。在全国范围内, 西北地区、华北—东北地区、西南地区、中南地区、华东地区的铅锌矿床 S 同位素变化特征如图 7 所示。从图 7 中可以明显看出, 总体上, 从我国西部到东部地区, 铅锌矿床更富集  $^{32}\text{S}$ , 表明东部地区铅锌矿床有更多壳源物质参与成矿。从南部地区到北部地区, 铅锌矿床中的  $^{34}\text{S}$  富集程度同样有所增加, 表明深源硫和海水硫酸盐中的硫更多的参与成矿。在铅同位素方面, 由图 8 可以看出, 总体来看, 西部地区相较东部而言, 有更多地幔物质的

参与, 由北向南地幔物质的参与逐渐减少。我国铅锌矿床的 S、Pb 同位素在空间分布上的特征表现出一致性, 西北地区相较东南地区而言, 铅锌矿床成矿有更多幔源物质的参与。

本文将从西北到东南典型铅锌矿床的 C-H-O 同位素数据列于表 3。总体来看, 铅锌矿床中的 H-O 同位素从中国西部向东部有逐步降低的趋势, 表明东部铅锌矿床在成矿过程中成矿流体可能有更多大气降水的混入, 同样从中国北部到中国南部, 铅锌矿床的 H 同位素有所增加, 但 O 同位素仍在逐步下降, 即成矿流体中大气降水的参与比例有所升高(图 9)。C-O 同位素数据表明, 相较于中国西部地区的铅锌矿床, 中国东部铅锌矿床的 C、O 同位素值均有所上升, 表明中国东部铅锌矿床的碳来源于围岩地层的比例有所增加, 来源于岩浆, 即深源的成分有所下降。与中国北部铅锌矿床相比, 中国南部铅锌矿床的 C、O 同位素值同样有所增大, 即中国东部铅锌矿床成矿流体中有更多的碳来源于围岩地层。同时多数矿床有“氧漂移”趋势, 表明在成矿过程中成矿流体中大气降水或盆地卤水有所增加, 推测可能早期以岩浆水为主, 流体演化过程中混入了一定量的大气降水或盆地卤水, 在成矿作用的晚期流体组成主要以大气降水为主。C-O 同位素数据投点主体落在花岗岩到海相碳酸盐岩范围内(图 10), 极少数落在大气降水范围内, 表明成矿流体碳源均以岩浆和海相碳酸盐岩为主, 个别矿床可能还受到雨水的影响, 部分矿床还经历了低温蚀变过程或有机质脱羟基过程, 但不具有普遍性。

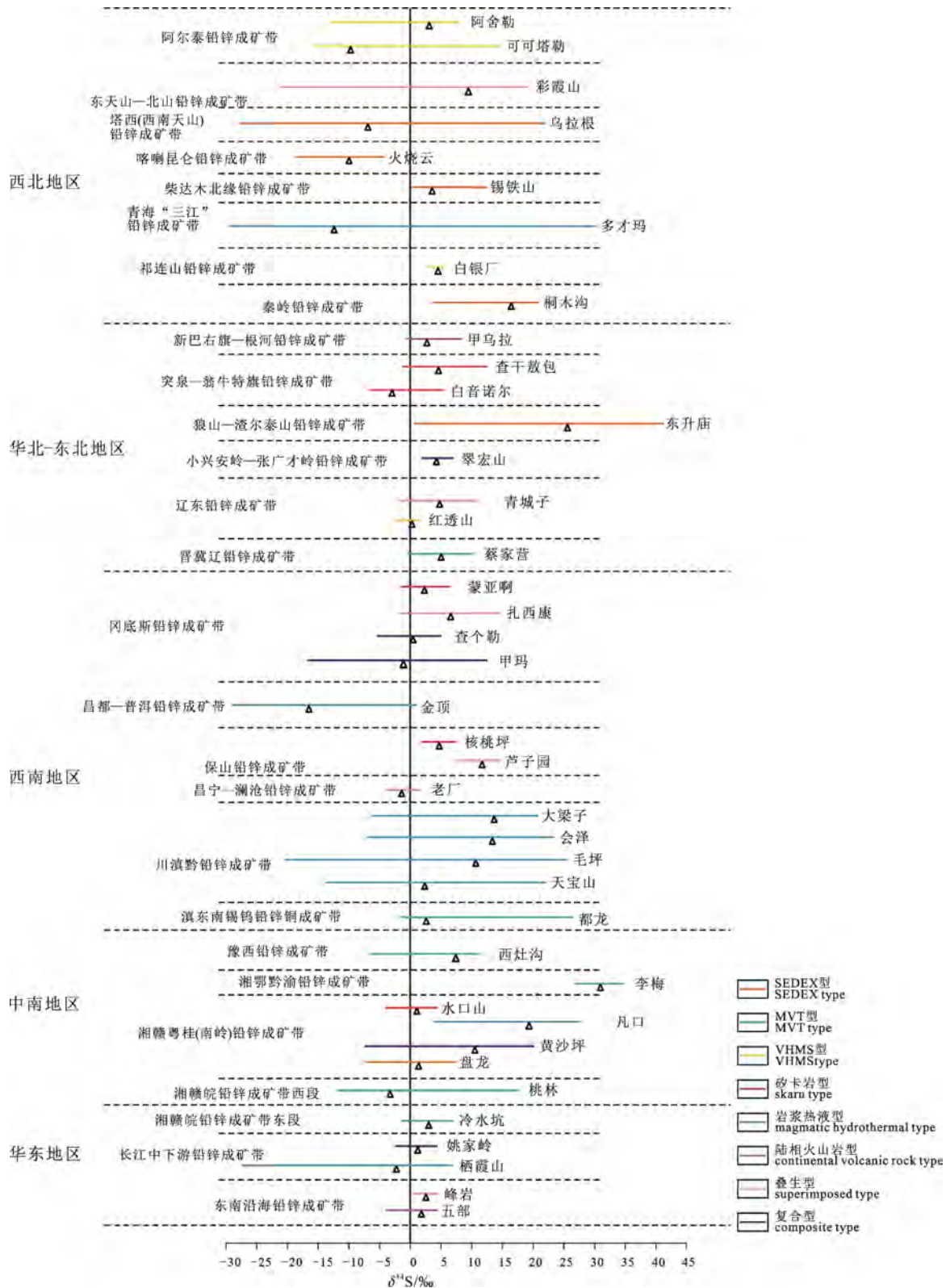
## 3 物质来源、矿床成因及找矿启示

### 3.1 成矿物质来源、成矿流体特征与矿床成因

通常对于一个矿床的成因判别涉及矿床特征、成矿温压条件、成矿深度、成矿地质背景、成矿物质来源、成矿流体演化等多方面因素, 仅依靠某一参数难以对矿床成因进行准确的判断。而 S、Pb 同位素指示成矿物质来源, C-H-O 同位素示踪成矿流体演化特征往往对矿床成因的判别起到一定的指示作用。尤其是硫同位素具有显著的分馏效应, 所以, 利用硫同位素的组成来研究热液成矿作用是厘定矿床成因的重要途径。MVT 铅锌矿床中金属硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值与同时代硫酸盐  $\delta^{34}\text{S}$  值接近, 一般  $\delta^{34}\text{S}<20\text{‰}$ , 但有些矿床  $\delta^{34}\text{S}>20\text{‰}$ (韩润生等, 2023)。全球 MVT 铅锌矿床 S 同位素值变化较大, 但总体表现出壳源特征(Leach et al., 2005)。中国 MVT 型铅锌矿床 S 同位素主要集中在  $5\text{‰}\sim25\text{‰}$  之间, 蒸发岩是硫的重要来源, TSR 和 BSR 作用参与了矿床还原硫的产

生。SEDEX 型铅锌矿床中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  主要集中在中硫之间(Sangster, 1990)。海水硫酸盐是 SEDEX 型铅锌矿床的重要硫源, 通常矿床中的  $\delta^{34}\text{S}$  比同期海水硫酸盐中的  $\delta^{34}\text{S}$  低 15‰左右(肖新建等, 2000), 单个矿床中硫同位素变化范围较大, 如加拿大

Sullivan 铅锌矿床  $\delta^{34}\text{S}$  为-9.9‰~6.8‰(Taylor, 2004), 中国多数 SEDEX 型铅锌矿床  $\delta^{34}\text{S}$  集中分布在 0 值到 20‰左右的正值附近, 单个矿床的  $\delta^{34}\text{S}$  变化范围也较大(表 1)。矽卡岩型矿床中的  $\delta^{34}\text{S}$  值多变化于 0~5‰(Ohmoto et al., 1997)。中国矽卡岩型、岩浆



图中“—”表示硫同位素变化范围; “Δ”表示各矿床  $\delta^{34}\text{S}$  均值。

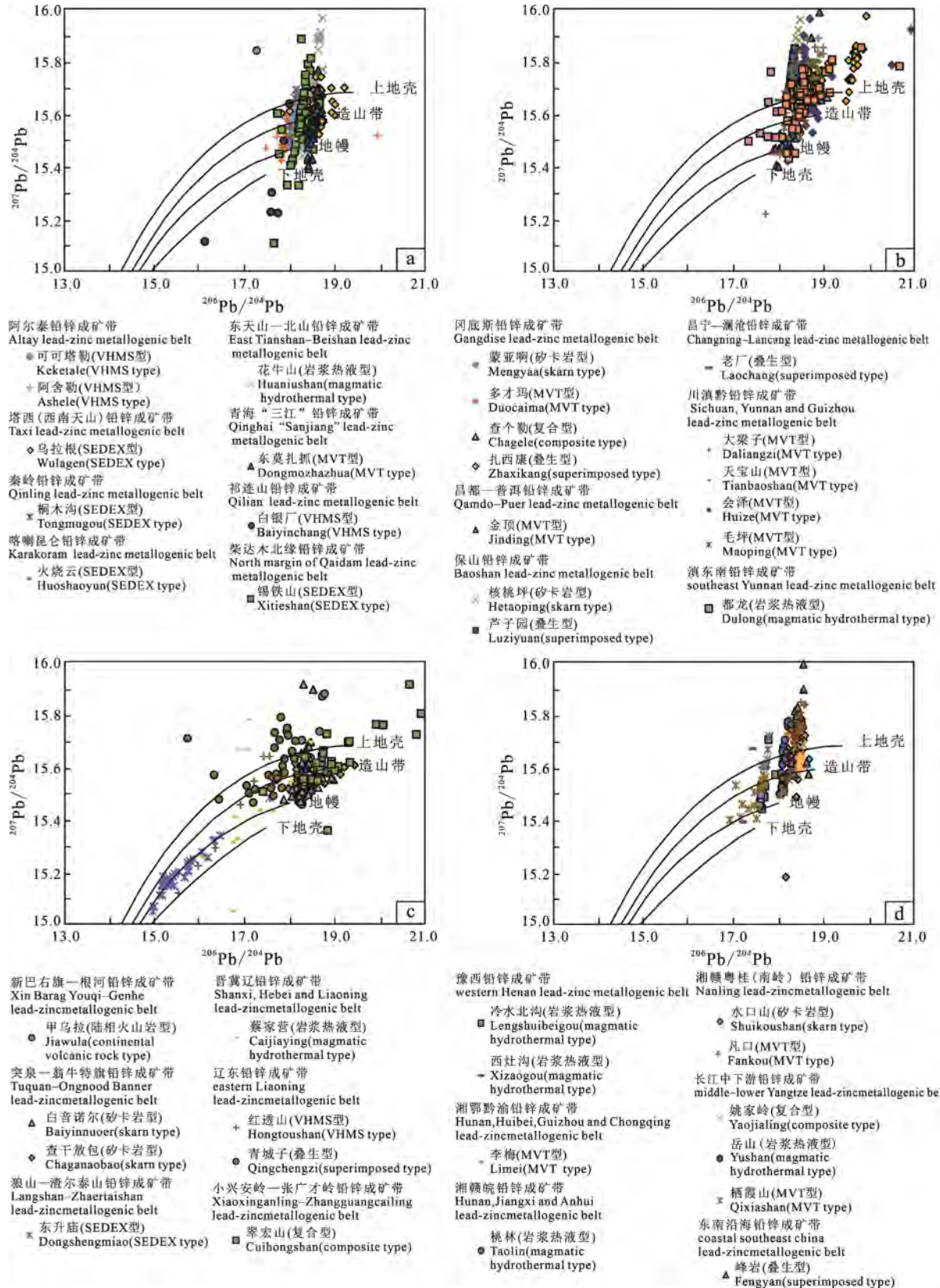
“—” represents the variation range of sulfur isotopes; “Δ” represents the mean value of  $\delta^{34}\text{S}$  in each deposit.

图 7 中国主要地区铅锌矿床硫同位素组成

Fig. 7 S isotope composition of major lead-zinc metallogenic belts in China

热液型、VHMS 型和陆相火山岩型铅锌矿床  $\delta^{34}\text{S}$  均集中在  $-5\text{‰}$ ~ $5\text{‰}$  之间, 表明成矿物质与深源物质关系密切。

C-H-O 同位素能够有效示踪热液矿床中成矿流体来源(Spangenberg et al., 1996; 郑永飞, 2000; Pirajno, 2009), 常用于刻画成矿流体演化



a—西北地区; b—西南地区; c—华北—东北地区; d—中南—华东地区。

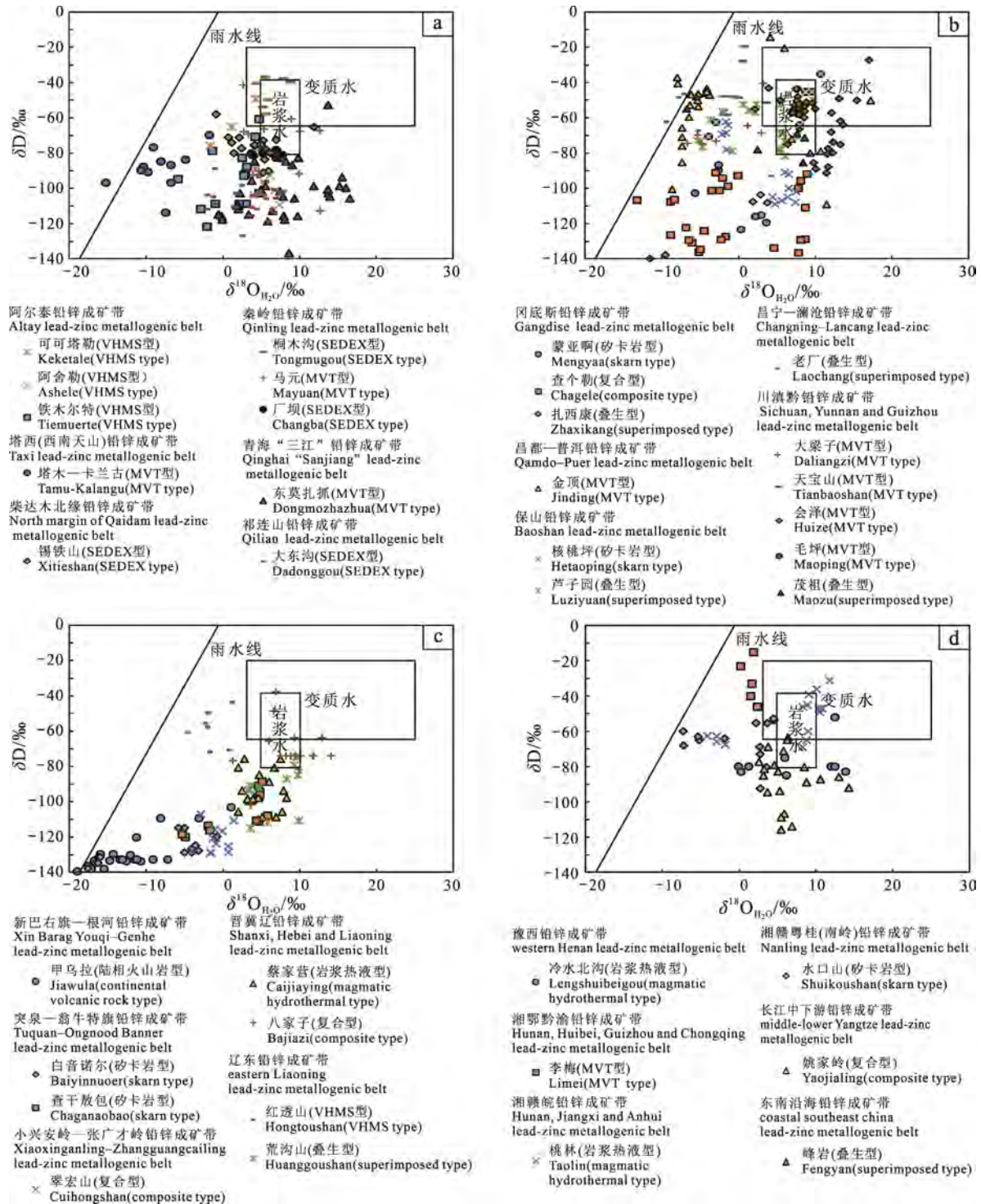
a–Northwest China region; b–Southwest China region; c–North–Northeast China region; d–South Central–East China region.

图 8 中国主要地区铅锌矿床铅同位素组成(底图据 Zartman et al., 1981)

Fig. 8 Pb isotope composition of major lead-zinc metallogenic belts in China (base map from Zartman et al., 1981)

过程(Hoefs, 2009; Barker et al., 2013)。中国不同类型矿床的碳源主要以岩浆来源和海相沉积碳酸盐岩为主。本文收集到的三十多个矿床的 H-O 同位素显示, 中国铅锌矿床的成矿流体来源以原生岩浆水与大气降水为主。中国主要 MVT 型矿床  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  变化范围主体集中为  $-4.6\text{‰} \sim 6.7\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  变化范围主体集中为  $11.6\text{‰} \sim 27.9\text{‰}$ , 同时其流体包裹体均一温度

集中分布在  $100 \sim 250^\circ\text{C}$ , 盐度( $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )集中分布在  $4\% \sim 14\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$  之间, 显示出成矿流体温度较低, 盐度较低, 表明成矿流体中的 C、O 主要来源于围岩地层的海相碳酸盐岩溶解作用, 与岩浆作用关系不大; 中国主要 SEDEX 型矿床  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  变化范围主体集中为  $-7.7\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  变化范围主体集中为  $6.5\text{‰} \sim 29.3\text{‰}$ , 流体包裹体均一温度集中

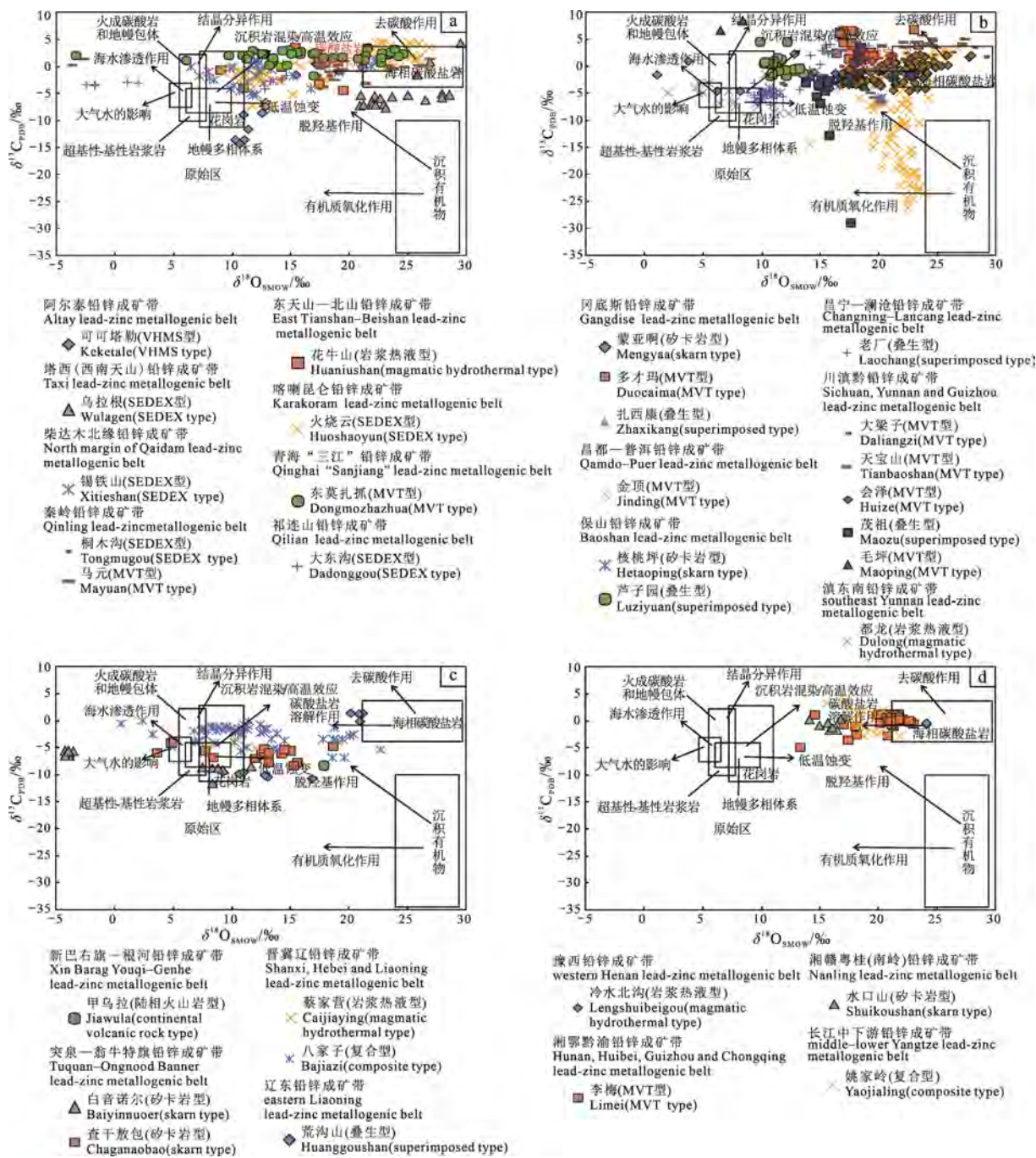


a—西北地区; b—西南地区; c—华北—东北地区; d—中南—华东地区。

a—Northwest China region; b—Southwest China region; c—North—Northeast China region; d—South Central—East China region.

图9 中国主要地区铅锌矿床氢氧同位素组成(底图据 Taylor, 1979)

Fig. 9 Hydrogen and oxygen isotope composition of lead-zinc deposits in major areas of China (base map from Taylor, 1979)



a—西北地区; b—西南地区; c—华北—东北地区; d—中南—华东地区。

a—Northwest China region; b—Southwest China region; c—North-Northeast China region; d—South Central-East China region.

图 10 中国主要地区铅锌矿床碳氧同位素组成(底图参考刘建明等, 1997)

Fig. 10 C-O isotope composition diagram of lead-zinc deposits in major areas of China (base map from LIU et al., 1997)

表 3 中国不同地区典型铅锌矿床 C-H-O 同位素组成

Table 3 C-H-O isotope composition of typical lead-zinc deposits in different metallogenic belts in China

区域	矿床名称	矿床类型	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^8O_{H_2O}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{13}C/\text{‰}$	参考文献
西北	可可塔勒	VHMS 型	-89.1 ~ -49.5	-1.6 ~ 4.7	10.3 ~ 18.0	-14.3 ~ 0.6	王书来等, 2007
	锡铁山	SEDEX 型	-91.3 ~ -58.2	-0.8 ~ 11.9	6.5 ~ 29.3	-5.4 ~ 1.5	王莉娟等, 2009
华北—东北	甲乌拉	陆相火山岩型	-166.0 ~ -103.4	-19.0 ~ 1.1	17.9 ~ 32.1	-8.4 ~ 5.2	翟德高等, 2013
	蔡家营	岩浆热液型	-109.0 ~ -76.0	2.0 ~ 8.4	7.7 ~ 12.1	-5.1 ~ -1.8	黄典豪等, 1997
西南	大梁子	MVT 型	-74.6 ~ -40.3	-6.6 ~ 3.3	11.6 ~ 31.7	-3.5 ~ 5.0	王海等, 2018
	天宝山	MVT 型	-58.1 ~ -19.3	-1.9 ~ 3.7	12.9 ~ 27.1	-6.5 ~ 5.7	王健等, 2018
中南—华东	李梅	MVT 型	-46.0 ~ -15.0	-0.3 ~ 2.4	13.4 ~ 23.1	-4.9 ~ 1.2	周云等, 2018
	姚家岭	复合型	-115.9 ~ -63.4	2.6 ~ 14.3	15.6 ~ 21.8	-2.8 ~ 3.9	刘绍锋, 2012

分布在 200~350°C 之间, 盐度( $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )主要集中于 0%~20% $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$  之间, 显示出中高温, 中低盐度特征, 表明成矿流体中的 C、O 主要来源于围岩地层的海相碳酸盐岩溶解作用, 还有一部分岩浆来源。矽卡岩型矿床  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  变化范围主体集中为 -11.7‰~5.6‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  变化范围主体集中为 3.7‰~18.7‰, 流体包裹体均一温度主要集中分布在 200~400°C 之间, 盐度( $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )主要集中于 0%~15% $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$  之间, 显示出中高温, 中低盐度特征, 表明成矿流体中的 C、O 主要来源于岩浆作用, 同时可能受到大气降水的影响。中国叠生型矿床的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  变化范围主体集中为 -10.8‰~4.5‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  变化范围主体集中为 1.1‰~26.7‰, 叠生型铅锌矿床流体包裹体均一温度变化范围较大, 在 90~420 °C 之间均有出现, 盐度变化范围也较大, 为 0.2%~46.7% $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ , 表明其成矿过程复杂, 可能存在多种成矿流体的复合成矿特征, 因此成矿流体中的 C、O 来源复杂, 可能与地层海相碳酸盐岩溶解作用、岩浆作用和大气降水均有关。

### 3.2 稳定同位素对铅锌成矿与找矿的启示

通过总结发现, 部分铅锌矿床目前的成因分类认识仍然有待进一步深化。例如内蒙古东升庙矿床的硫同位素变化范围很大(极差值大于 20‰), 且大部分硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  较大, 因此认为矿床硫主要来源于岩浆作用的可能性不大, 但铅同位素图解(图 3a)中数据投点均落在地幔演化线上, 这并不表明该矿床矿源一定具有多源性, 可能是不同时代的矿物在不同条件下依次沉淀的结果, 包括同生沉积-喷流过程和后期的变质、热液活动过程, 后期的热液流体同样为东升庙矿床提供了成矿物质, 尽管同生沉积成矿过程仍为矿床的主要成矿阶段, 但也印证了 Pb 同位素显示出地幔来源特征, 而并非作用不大(夏学惠, 1992), 因此东升庙矿床似乎并不能被认为是一个典型的 SEDEX 型矿床, 将其归入叠生型铅锌矿床也许更为合理。再如, 云南金顶铅锌矿床, 硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 -29‰~1.1‰ 之间, 均值为 -16.39‰, 表现出典型的细菌还原硫特征, 与细菌硫酸盐还原作用(BSR)有关, Pb 同位素表明金顶矿床成矿物质主要来自地壳浅部, 基本无地幔物质参与, H-O 同位素图解也表明, 成矿流体有大量盆地卤水的参与, 碳来源广泛, 主要还是与沉积有机物和海相碳酸盐岩有关, 从稳定同位素角度来看, 与 MVT 型铅锌矿床特征基本吻合, 但与部分地质特征显示出其叠加成矿可能不符, 因此金顶矿床成因仍然存在争议。此外, 对于湖南桃林铅锌矿床, 前人普遍认为其为岩浆热液型矿床, 但其硫化物  $\delta^{34}\text{S}$

值在 -12.1‰~17.7‰ 之间, 均值为 -3.99‰, 整体变化范围较大, 并不符合典型的岩浆热液型矿床特征, 铅同位素显示出, 桃林铅锌矿床的硫化物主体来自壳源, 幔源物质较少, 表明桃林矿床在形成过程中混入了较多的地层硫源, 而 H-O 同位素特征也显示出桃林矿床存在多期成矿作用, 早期以岩浆热液为主, 晚期大气降水发挥主要作用。因此, 本文认为桃林铅锌矿床并非典型的岩浆热液矿床, 而是岩浆热液与非岩浆成因热液共同作用形成。上述矿床的成因问题还有待研究和探讨, 而矿床成因的明确无疑将会带来找矿方向上的调整, 如, 东升庙矿床除了顺层找矿外, 还应重视断层、裂隙等其他找矿空间。

区域上, 我国西北地区 S 同位素变化范围总体较大, 但均值多为负值, 或在 0 值附近, 从成矿背景来看, 赋矿的围岩多为灰岩、膏盐层(蒸发盐岩)、以及碎屑岩(高荣臻等, 2018), 对硫酸盐封闭而对  $\text{H}_2\text{S}$  开放, 更有利于 BSR 还原作用, 灰岩、碎屑岩等富含有机质的沉积岩, 为成矿提供了有利条件, 因此较有利于形成 SEDEX 型和 MVT 型铅锌矿床。同时大部分矿床都存在 S 同位素的较小正值, 因此也考虑到成矿过程中可能有深源岩浆硫的参与。华北—东北地区各铅锌成矿带中矿床的 S 同位素均值多数位于 0 值附近, 且整体变化范围较小, 在区域地质背景上, 大兴安岭地区与华北地台地区的铅锌矿床与岩浆热液有较为密切的成因联系, 区内岩浆活动强烈, 以造山后伸展背景下的侏罗—白垩世岩浆活动影响最为广泛(Xiao et al., 2003), 因此硫源主要为岩浆硫, 所以岩浆热液型、矽卡岩型、陆相火山岩型以及海相火山岩型矿床在区内尤为发育, 是该地区的重要铅锌矿床类型, 也是下一步找矿的重要方向。西南地区各成矿带 S 同位素数据差异较大, 冈底斯铅锌成矿带、保山铅锌成矿带处于欧亚板块、印度板块和太平洋板块的碰撞相连部位(Zhu et al., 2019), 区内岩浆活动频繁, 因此成矿与深部岩浆关系密切; 川滇黔铅锌成矿带大部分铅锌矿床的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 9.0‰~28.6‰ 之间, 与震旦系—二叠系地层中白云岩、白云质灰岩和灰岩, 其海水硫酸盐的  $\delta^{34}\text{S}$  值(+8.0‰到+38.7‰)相似(孔志岗等, 2018), 暗示该区铅锌矿床硫化物中的 S 主要来源于赋矿地层中海水硫酸盐。白云岩内  $\text{Mg}^{2+}$  利于矿质沉淀, 且多发育裂隙, 为矿质运移和沉淀提供了良好的通道和空间, 从而成为了良好的容矿层(吴越, 2014), 因此在川滇黔及广西一带 MVT 型铅锌矿床极为发育, 这类矿床与岩浆活动无直接关系, 但也是我国铅锌矿床最重要的类型之一。昌宁—澜



沧成矿带位于晚古生代海盆地区, 区内海西期中-基性火山喷发作用强烈, 并伴有强烈的构造运动和大规模花岗岩类侵入, 侵入活动一直延续到燕山期, 因此在区内形成了以老厂为代表的叠生型铅锌矿床(张长青等, 2014)。华南地区在大地构造背景上处于华北板块、扬子板块、华南板块构造活动部位, 成矿主要与燕山期花岗岩有关, 除李梅外, 主体为较小的正值且 S 同位素数值变化范围较小, 表明成矿物质来源与深源岩浆硫密切相关, 在此成矿背景下, 岩浆热液型、陆相火山岩型和复合型矿床等与岩浆活动密切相关的矿床广泛发育。主要发育在中国东部的陆相火山岩型铅锌矿床虽然目前在我国发现的数目和规模都还有限, 但其进一步找矿前景较好, 值得重视。

## 4 结论

中国不同类型铅锌矿床的 S、Pb、C-O、H-O 同位素地球化学特征对矿床的成矿物质来源和成矿流体特征具有一定的指示意义。

(1) 中国铅锌矿床主要的矿床类型为 SEDEX 型、MVT 型、VHMS 型、叠生型等, S、Pb 同位素特征显示出的成矿物质来源复杂, 主要为深源岩浆和赋矿地层(海水沉积物), H-O、C-O 同位素特征表明中国铅锌矿床的成矿流体中水主要为岩浆水和大气降水, 而成矿流体中的碳主要来源于岩浆和海相碳酸盐岩溶解。

(2) SEDEX 型铅锌矿床的  $\delta^{34}\text{S}$  均值在  $-10\text{‰}$ ~ $25.7\text{‰}$  之间变化, 表明硫源主要为海水硫酸盐和深源岩浆, MVT 型铅锌矿主体  $\delta^{34}\text{S}$  值集中在  $10\text{‰}$ ~ $25\text{‰}$  之间, 具有重硫富集特征, 即硫主要来源于海相硫酸盐的还原作用; VHMS 型、矽卡岩型、岩浆热液型、陆相火山岩型和复合型矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值主体在  $-5\text{‰}$ ~ $5\text{‰}$  之间, 具有“塔式”分布特征, 反映硫源单一, 均与岩浆岩或火山岩有着直接或间接的成因联系, 叠生型铅锌矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值反映出硫源的多源性。

(3) 由 S、Pb 同位素空间分布特征可知, 从我国西部到东部地区, 北部到南部地区, 铅锌矿床更富集  $^{32}\text{S}$ , 表明我国东部和南部铅锌矿床有更多壳源物质参与成矿。C-H-O 同位素特征显示相较于西北部地区, 我国东南部地区的铅锌矿床有大气降水或盆地卤水参与成矿。

(4) 不同成因类型的铅锌矿床在我国具有空间分布特征。西北地区膏盐层(蒸发盐岩)以及碎屑岩地层更有利于 BSR 还原作用, 因此形成大量 SEDEX 型和 MVT 型铅锌矿床, 华北—东北地区, 区内岩浆活动强烈, 矿床硫同位素特征受岩浆活动影响明显, 岩

浆热液型、陆相火山岩型和 VHMS 型矿床广泛发育, 西南地区同样受到强烈构造岩浆活动影响, 同时与区内广泛分布的碳酸盐岩地层息息相关, 有利于 MVT 型铅锌矿床形成。不同地区的主要矿床类型有所不同, 找矿思路和方向也应有所侧重。对于矿床成因类型有待商榷的重要矿床, 应进一步研究, 并注意及时调整或完善找矿勘查部署方案。

**致谢:** 在陈毓川院士九十华诞来临之际, 仅以此文向陈院士表达崇高的敬意! 同时感谢审稿人对本文提出的建设性修改意见!

## Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20221695, DD20190379, and DD20160346), Provincial Science and Technology Innovation Project (No. 2023CX10), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JKYZD202313).

## 参考文献:

- 边春静, 2018. 新疆阿舍勒铜锌矿床及周边 VMS 矿床的叠加成矿作用[D]. 北京: 北京科技大学.
- 曹晓峰, 吕新彪, 张平, 等, 2013. 新疆中天山东部彩霞山铅锌矿床稳定同位素特征及成因探讨[J]. 中南大学学报(自然科学版), 44(2): 662-672.
- 曾庆栋, 刘建明, 贾长顺, 等, 2007. 内蒙古赤峰市白音诺尔铅锌矿沉积喷流成因: 地质和硫同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(4): 659-667.
- 陈贤, 刘家军, 张德会, 等, 2017. 黑龙江翠宏山铁多金属矿床辉钼矿 Re-Os 定年及 S-Pb 同位素特征研究[J]. 岩石学报, 33(2): 529-544.
- 崔中良, 刘祥云, 何森, 等, 2018. 会泽超大型铅锌矿田成矿物质及流体来源探讨——H、O、S、C 同位素地球化学证据[J]. 河北地质大学学报, 41(1): 45-52.
- 代文军, 2010. 甘肃北山花牛山金银铅锌矿床成因探讨[J]. 华南地质与矿产, 26(3): 25-34.
- 戴自希, 盛继福, 白冶, 等, 2005. 世界铅锌资源的分布与潜力[M]. 北京: 地震出版社.
- 翟德高, 刘家军, 王建平, 等, 2013. 内蒙古甲乌拉大型 Pb-Zn-Ag 矿床稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘, 20(2): 213-225.
- 董存杰, 张洪涛, 张宝琛, 2010. 青城子铅锌矿床成因分析[J]. 地质与勘探, 46(1): 59-69.
- 杜泽忠, 于晓飞, 孙海瑞, 等, 2021. 甘肃花牛山铅锌银矿床成因: 来自原位 S、Pb 同位素及微量元素的约束[J]. 岩石学报, 37(6): 1813-1829.
- 段士刚, 薛春纪, 刘国印, 等, 2010. 河南栾川地区铅锌矿床地质和硫同位素地球化学[J]. 地学前缘, 17(2): 375-384.
- 付治国, 瓮纪昌, 燕长海, 等, 2010. 东秦岭冷水北沟铅锌银矿床同位素地球化学特征[J]. 物探与化探, 34(1): 34-39.
- 高荣臻, 2018. 新疆西南天山中—新生界砂岩容矿铅锌成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 高伟, 叶霖, 程增涛, 等, 2011. 云南保山核桃坪铅锌矿床同位素地球化学特征[J]. 矿物学报, 31(3): 578-586.
- 高永宝, 李侃, 滕家欣, 等, 2019. 新疆喀喇崑仑火烧云超大型铅锌矿床矿物学、地球化学及成因[J]. 西北地质, 52(4):

- 152-169.
- 高永宝, 赵辛敏, 赵晓健, 等, 2020. 新疆喀喇昆仑多宝山铅锌矿床矿物学、地球化学及成因[J]. 西北地质, 53(1): 122-137.
- 高兆富, 2017. 内蒙古东升庙矿床 S-Pb-Fe-Zn 同位素空间演化及其对矿床成因的指示[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 葛宁洁, 李平, 黄宪安, 等, 1989. 安徽庐江岳山银铅锌矿的成矿物质来源及物理化学条件探讨[J]. 中国科学技术大学学报, 19(3): 365-374.
- 耿新霞, 杨富全, 杨建民, 等, 2010. 新疆阿尔泰铁木尔特铅锌矿床流体包裹体研究及地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 695-706.
- 耿艳光, 2018. 中条山南河沟、桐木沟铜矿钠长岩和矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 韩润生, 邹海俊, 胡彬, 等, 2007. 云南毛坪铅锌(银、锗)矿床流体包裹体特征及成矿流体来源[J]. 岩石学报, 23(9): 2109-2118.
- 韩润生, 张艳, 叶天竺, 等, 2023. MVT 铅锌矿床成矿规律与找矿预测地质模型[J]. 大地构造与成矿学, 47(5): 915-932.
- 韩世清, 2006. 内蒙古甲乌拉银铅锌矿床地质特征及成矿预测[D]. 长春: 吉林大学.
- 韩英, 2013. 广东凡口铅锌矿床成矿机制与成矿模式[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 何芳, 张乾, 王大鹏, 等, 2014. 云南都龙 Sn-Zn 多金属矿床成矿物质来源——硫、碳、氧稳定同位素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(6): 900-907.
- 胡太平, 王敏芳, 丁振举, 等, 2017. 湘西花垣李梅铅锌矿床 C、O、S、Pb 同位素特征及成矿物质来源[J]. 矿床地质, 36(3): 623-642.
- 胡小蝶, 沈保丰, 毛德宝, 等, 2005. 冀北蔡家营铅锌矿床成因探讨[J]. 地质调查与研究, 28(4): 221-227.
- 黄典豪, 吴澄宇, 张长江, 1997. 蔡家营铅-锌-银矿床的稳定同位素地球化学研究[J]. 地球化学, 26(4): 24-25.
- 贾文彬, 李永胜, 严光生, 等, 2018. 青海沱沱河地区多才玛铅锌矿床成因: 原位 S 和 Pb 同位素证据[J]. 岩石学报, 34(5): 1285-1298.
- 江思宏, 聂凤军, 白大明, 等, 2010. 内蒙古白音诺尔铅锌矿——印支期成矿? [J]. 矿床地质, 29(S1): 199-200.
- 蒋少涌, 丁悌平, 万德芳, 等, 1991. 八家子铅锌矿床氢、氧、碳和硅稳定同位素研究[J]. 矿床地质, 10(2): 143-151.
- 孔志岗, 吴越, 张锋, 等, 2018. 川滇黔地区典型铅锌矿床成矿物质来源分析: 来自 S-Pb 同位素证据[J]. 地学前缘, 25(1): 125-137.
- 李发源, 2003. MVT 铅锌矿床中分散元素赋存状态和富集机理研究——以四川天宝山、大梁子铅锌矿床为例[D]. 成都: 成都理工大学.
- 李关清, 2015. 西藏扎西康锑硫盐多金属矿床成矿机制与区域成矿潜力评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李厚民, 陈毓川, 王登红, 等, 2007. 陕西南郑地区马元锌矿的地球化学特征及成矿时代[J]. 地质通报, 26(5): 546-552.
- 李莹, 段其发, 赵少瑞, 等, 2017. 湖南花垣铅锌矿床成矿物质来源与成矿机制——来自 S、Pb、Sr 同位素的证据[J]. 地质通报, 36(5): 811-822.
- 李莉, 卿敏, 陈祥, 1999. 河南外方山地区金矿稳定同位素地球化学特征[J]. 黄金地质, 5(2): 55-59.
- 李铁刚, 2016. 内蒙古甲乌拉一查干布根铅锌银矿田成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李文博, 黄智龙, 张冠, 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约[J]. 岩石学报, 22(10): 2567-2580.
- 李毅, 2007. 广西热水沉积矿床成矿规律及找矿方向研究[D]. 长沙: 中南大学.
- 梁硬干, 1993. 广东厚婆坳银锡铅锌矿床地球化学特征[J]. 广东有色金属地质, (2): 21-29.
- 刘建明, 刘家军, 顾雪祥, 1997. 沉积盆地中的流体活动及其成矿作用[J]. 岩石矿物学杂志, 16(4): 341-352.
- 刘敏, 张作衡, 王永强, 等, 2008. 新疆阿尔泰大东沟铅锌矿床地质特征及稳定同位素地球化学研究[J]. 地质学报, 82(11): 1504-1513.
- 刘绍锋, 2012. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 刘英超, 杨竹森, 侯增谦, 等, 2009. 青海玉树东莫扎铅锌矿床地质特征及碳氢氧同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 28(6): 770-784.
- 刘长征, 李世金, 高永旺, 等, 2015. 三江多才玛超大型铅锌矿床同位素地球化学及矿源研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 54(1): 136-144.
- 刘政, 2019. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成矿作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- 龙汉生, 罗泰义, 黄智龙, 等, 2009. 云南澜沧老厂大型银多金属矿床碳、氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 28(5): 687-695.
- 路睿, 2013. 湖南省常宁市水口山铅锌矿床地质特征及成因机制探讨[D]. 南京: 南京大学.
- 马国良, 1993. 桐木沟热水沉积铅锌矿床同位素地球化学特征[J]. 长安大学学报(地球科学版), 15(4): 103-107.
- 聂凤军, 许东青, 江思宏, 等, 2008. 内蒙古苏莫查干敖包特大型萤石矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质, 27(1): 1-13.
- 宋学信, 2024. 论中国铅锌矿床的主岩+成因综合分类[J]. 地质论评, 70(3): 813-822.
- 宋志娇, 陈翠华, 张燕, 等, 2018. 陕西马元地区楠木树铅锌矿床成矿物质来源——来自氢、氧同位素和微量元素的制约[J]. 矿床地质, 37(5): 985-1000.
- 孙景, 2018. 青海锡铁山铅锌矿床成因与成矿预测[D]. 长春: 吉林大学.
- 谈树成, 周家喜, 罗开, 等, 2019. 云南毛坪大型铅锌矿床成矿物质来源: 原位 S 和 Pb 同位素制约[J]. 岩石学报, 35(11): 3461-3476.
- 田力丹, 孙丰月, 王力, 等, 2017. 吉林临江荒沟山铅锌矿床流体包裹体特征及矿床成因[J]. 世界地质, 36(3): 836-849.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等, 2011. 青海玉树东莫扎铅锌矿床 S、Pb、Sr-Nd 同位素组成: 对成矿物质来源的指示[J]. 岩石学报, 27(7): 2173-2183.
- 涂光炽, 1989. 中国铅锌矿床[M]//中国矿床编辑委员会: 中国矿床(上册). 北京: 地质出版社.
- 汪东波, 董国仪, 1988. 广东省潮安厚婆坳锡矿床的地球化学特征[J]. 地质找矿论丛, 3(1): 76-84.
- 王登红, 1996. 新疆阿舍勒火山岩型块状硫化物铜矿、铅同位素地球化学[J]. 地球化学, 25(6): 582-590.
- 王海, 王京彬, 祝新友, 等, 2018. 扬子地台西缘大梁子铅锌矿床成因: 流体包裹体及同位素地球化学约束[J]. 大地构造与成矿学, 42(4): 681-698.
- 王健, 张均, 仲文斌, 等, 2018. 川滇黔地区天宝山、会泽铅锌矿床成矿流体来源初探: 来自流体包裹体及氩同位素的证据[J]. 地球科学, 43(6): 2076-2099.
- 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 等, 2010. 西藏蒙亚啊铅锌矿床 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. 现代地质, 24(1): 52-58.
- 王莉娟, 彭志刚, 祝新友, 等, 2009. 青海省锡铁山 Sedex 型铅锌矿床成矿流体来源及演化: 流体包裹体及同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 25(11): 3007-3015.
- 王清廉, 1987. 陕西山阳桐木沟矿床地质特征及矿床成因[J].

- 地质找矿论丛, 2(2): 54-64.
- 王瑞良, 2019. 大兴安岭南段敖包吐铅锌矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王书来, 陈克强, 康吉昌, 等, 2007. 新疆阿尔泰山南缘产于麦兹泥盆纪火山-沉积盆地铅锌矿床稳定同位素特征[J]. 地质与勘探, 43(6): 25-31.
- 王书来, 汪东波, 祝新友, 等, 2002. 新疆塔木—卡兰古铅锌矿床成矿流体地球化学特征[J]. 地质地球化学, 30(4): 34-39.
- 王兴安, 1999. 甘肃白银厂铜矿田硫铅同位素地球化学研究[J]. 西北地质, 32(1): 18-23.
- 王长明, 徐贻赣, 吴淦国, 等, 2011. 江西冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田碳、氧、硫、铅同位素特征及成矿物质来源[J]. 地学前缘, 18(1): 179-193.
- 魏菊英, 王关玉, 1988. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 魏然, 2022. 西秦岭厂坝-李家沟超大型铅锌矿床成矿作用特征与成矿机制研究[D]. 西安: 长安大学.
- 息朝庄, 戴塔根, 刘悟辉, 2009. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床铅、硫同位素地球化学特征[J]. 地球学报, 30(1): 89-94.
- 夏学惠, 1992. 内蒙狼山成矿带东升庙多金属硫铁矿床成矿特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 11(4): 374-383.
- 肖新建, 倪培, 2000. 论喷流沉积(SEDEX)成矿与沉积-改造成矿之对比[J]. 地质找矿论丛, 15(3): 238-245.
- 徐荣, 2021. 西南三江保山地块芦子园 Zn-Pb 多金属矿床成因: 矿物化学与同位素地球化学约束[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 徐文炘, 李衡, 陈民扬, 2012. 新疆可可塔勒铅锌矿床形成硫铅同位素地球化学证据[J]. 矿产与地质, 26(6): 511-515.
- 徐晓雪, 2019. 西南三江地区金顶超大型铅锌矿床研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 杨清, 张均, 王健, 等, 2017. 滇东北茂租大型铅锌矿床成矿流体地球化学研究[J]. 矿产与地质, 31(5): 854-863.
- 叶会寿, 毛景文, 何春芬, 等, 2010. 河南付店矿集区斑岩铜矿和脉状铅锌矿地质特征与成矿时代[J]. 矿床地质, 29(S1): 537-538.
- 应立娟, 郑文宝, 王崴平, 等, 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 33(4): 519-527.
- 张达, 吴淦国, 狄永军, 等, 2009. 闽中梅仙峰岩铅锌矿床地球化学特征及其古构造环境[J]. 地质力学学报, 15(1): 20-35.
- 张建芳, 2010. 北喜马拉雅扎西康铅锌锑银矿床成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 张明超, 陈仁义, 叶天竺, 等, 2017. 江苏栖霞山铅锌多金属矿床成因探讨: 流体包裹体及氢-氧-硫-铅同位素证据[J]. 岩石学报, 33(11): 3453-3470.
- 张森, 赵东方, 吕广俊, 等, 2007. 辽宁红透山铜矿床地质特征及成因浅析[J]. 地质与资源, 16(3): 173-182.
- 张万益, 2008. 内蒙古东乌珠穆沁旗岩浆活动与金属成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 张耀奎, 1983. 荒沟山铅锌矿床及珍珠门组硫、氧、碳和铅同位素地质特征[J]. 吉林地质, 2(1): 53-59.
- 张永超, 郑有业, 高顺宝, 等, 2018. 西藏查个勒铅锌铜矿床 H-O-S-Pb 同位素特征及成矿指示——兼与念青唐古拉成矿带中-东段铅锌(铜)矿床对比[J]. 大地构造与成矿学, 42(3): 467-479.
- 张长青, 吴越, 王登红, 等, 2014. 中国铅锌矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2252-2268.
- 赵华雷, 2014. 吉黑东部钨矿成因及成矿地球动力学背景[D]. 长春: 吉林大学.
- 赵晓勇, 李峰, 杨帆, 2012. 云南澜沧老厂深部斑岩(铜)矿成矿物质来源的同位素地球化学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 31(5): 712-722.
- 赵一鸣, 2004. 中国主要金属矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 郑永飞, 陈江峰, 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 周刚, 韩东南, 邓吉牛, 1998. 新疆可可塔勒铅锌矿床同位素地球化学研究[J]. 矿产与地质, 12(1): 33-38.
- 周云, 段其发, 曹亮, 等, 2018. 湘西花垣地区铅锌矿床流体包裹体显微测温与特征元素测定[J]. 地球科学, 43(7): 2465-2483.
- 朱安庆, 2009. 浙江省金属非金属矿床成矿系列和成矿区带研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 祝新友, 王莉娟, 朱谷昌, 等, 2010. 青海锡铁山铅锌矿床硫同位素地球化学研究——深源与海水硫的混合[J]. 岩石学报, 26(3): 657-666.

## References:

- BARKER S L L, DIPPLE G M, HICKEY K A, et al., 2013. Applying stable isotopes to mineral exploration: Teaching an old dog new tricks[J]. *Economic Geology*, 108(1): 1-9.
- BIAN Chunjing, 2018. Superimposed Mineralization Process on the Ashele Copper-Zinc and Adjacent VMS Deposits, Xinjiang[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing(in Chinese with English abstract).
- CAO Xiaofeng, LÜ Xinbiao, ZHANG Ping, et al., 2013. Stable isotope geochemistry and ore genesis of Caixiashan Pb-Zn deposit at eastern Middle Tianshan, Xinjiang[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(2): 662-672(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xian, LIU Jiajun, ZHANG Dehui, et al., 2017. Re-Os dating of molybdenites and S-Pb isotopic characteristics of the Cuihongshan iron polymetallic deposit, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 529-544(in Chinese with English abstract).
- CUI Zhongliang, LIU Xiangyun, HE Sen, et al., 2018. Discussion on sources of metallogenic materials and fluids of the Huize superlarge lead-zinc ore field: Evidence from H, O, S and C isotopes[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 41(1): 45-52(in Chinese with English abstract).
- DAI Wenjun, 2010. Metallogenic study of Huaniushan Au-Ag-Pb-Zn deposit, Beishan area, Gansu Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 26(3): 25-34(in Chinese with English abstract).
- DAI Zixi, SHENG Jifu, BAI Ye, 2005. Distribution and potential of lead and zinc resources in the world[M]. Beijing: Earthquake Press(in Chinese).
- DING T, REES C E, 1984. The sulphur isotope systematics of the Taolin lead-zinc ore deposit, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(11): 2381-2392.
- DONG Chuanqi, HU Yuzhao, REN Tao, et al., 2017. Geochemical characteristics of sulfur isotope of uragen Pb-Zn ore deposit in the western Tarim Basin[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(5): 653-660(in Chinese with English abstract).
- DONG Cunjie, ZHANG Hongtao, ZHANG Baochen, 2010. Analysis of the metallogenesis of qingchengzi Pb-Zn ore deposit[J]. *Geology and Exploration*, 46(1): 59-69(in Chinese with English abstract).
- DU Zezhong, YU Xiaofei, SUN Hairui, et al., 2021. Genesis of the Huaniushan Pb-Zn-Ag deposit in Gansu: Constraints from in situ S, Pb isotopes and trace elements[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(6): 1813-1829(in Chinese with English abstract).
- DUAN Shigang, XUE Chunji, LIU Guoyin, et al., 2010. Geology and sulfur isotope geochemistry of lead-zinc deposits in

- Luanchuan district, Henan Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 375-384(in Chinese with English abstract).
- FU Zhiguo, WENG Jichang, YAN Changhai, et al., 2010. Isotope geochemical characteristics of the Lengshuibeiyou lead-zinc-silver ore district in east Qinling[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(1): 34-39(in Chinese with English abstract).
- GAO Rongzhen, 2018. Mineralization of Mesozoic-Cenozoic sandstone-hosted Zn-Pb deposits in the Southwestern Tianshan, Xinjiang, NW China: Ex amplified by the Urogen Zn-Pb deposit[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- GAO Rongzhen, XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, et al., 2019. Source and possible leaching process of ore metals in the Urogen sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Xinjiang, China: Constraints from lead isotopes and rare earth elements geochemistry[J]. *Ore Geology Reviews*, 106: 56-78.
- GAO Wei, YE Lin, CHENG Zengtao, et al., 2011. Characteristics of isotope geochemistry of hetaoping Pb-Zn ore in Baoshan, Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 578-586(in Chinese with English abstract).
- GAO Yongbao, LI Kan, TENG Jiaxin, et al., 2019. Mineralogy, geochemistry and genesis of giant Huoshaoyun Zn-Pb deposit in karakoram area, Xinjiang, NW China[J]. *Northwestern Geology*, 52(4): 152-169(in Chinese with English abstract).
- GAO Yongbao, ZHAO Xinmin, ZHAO Xiaojian, et al., 2020. Mineralogy, geochemistry and genesis of Duobaoshan Zn-Pb deposit, in karakoram, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 53(1): 122-137(in Chinese with English abstract).
- GAO Yongbao, ZHAO Xinmin, ZHAO Xiaojian, et al., 2020. Mineralogy, geochemistry and genesis of Duobaoshan Zn-Pb deposit, in karakoram, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 53(1): 122-137(in Chinese with English abstract).
- GE Ningjie, LI Ping, HUANG Xianan, et al., 1989. Research on Physical chemistry condition and materials source of mineralization of Ag-Pb-Zn ore deposit in Yueshan[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 19(3): 365-374 (in Chinese with English abstract).
- GENG Xinxia, YANG Fuquan, YANG Jianmin, et al., 2010. Characteristics of fluid inclusions in the Tiemurte Pb-Zn deposit, Altay, Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 695-706(in Chinese with English abstract).
- GENG Yanguan, 2018. Study on the genesis of albite rock and deposits in Nanhegou and Tongmugou copper deposits in Zhongtiao Mountain[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- HAN Runsheng, ZHANG Yan, YE Tianzhu, et al., 2023. An overview of the metallogeny and geological prospecting model of Mississippi valley type(MVT) lead and zinc deposits[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 47(5): 915-932(in Chinese with English abstract).
- HAN Runsheng, ZOU Haijun, HU Bin, et al., 2007. Features of fluid inclusions and sources of ore-forming fluid in the Maoping carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag-Ge) deposit, Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2109-2118.
- HAN Shiqing, 2006. Geological Characteristics and Metallogenic Prognosis of Jiawula Ag-Pb-Zn Deposits in Inner Mongolia[D]. Jilin: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- HAN Ying, 2013. Ore-forming mechanism and metallogenetic model of Fankou Lead-zinc deposit in Guangdong province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- HE Fang, ZHANG Qian, WANG Dapeng, et al., 2014. Ore-forming materials sources of the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit, Yunnan, evidences from S-C-O stable isotopes[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(6): 900-907(in Chinese with English abstract).
- HOEFS J, 1997. *Stable isotope geochemistry*[M]. Berlin: Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- HOEFS J, 2009. *Stable isotope geochemistry*[M]. Berlin: Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
- HU Taiping, WANG Minfang, DING Zhanju, et al., 2017. C, O, S and Pb isotopic characteristics and sources of metallogenic materials of Limei Pb-Zn deposit in Huayuan County, western Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 36(3): 623-642(in Chinese with English abstract).
- HU Xiaodie, SHEN Baofeng, MAO Debao, et al., 2005. On metallogeny of the caijiaying Pb-Zn deposit[J]. *Geological Survey and Research*, 28(4): 221-227(in Chinese with English abstract).
- HUANG Dianhao, WU Chengyu, ZHANG Changjiang, 1997. Study on stable isotopic geochemistry of Caijiaying Pb-Zn-Ag deposit, Hebei Province, China[J]. *Geochimica*, (4): 24-35(in Chinese with English abstract).
- JIA Wenbin, LI Yongsheng, YAN Guangsheng, et al., 2018. Ore genesis of the Duocaima Pb-Zn deposit, Tuotuohe area, Qinghai Province, China: Evidences from in situ S and Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5): 1285-1298(in Chinese with English abstract).
- JIANG Shaoyong, DING Tiping, WAN Defang, et al., 1991. Hydrogen, oxygen, carbon and silicon stable isotope studies of the Bajiazi lead-zinc deposit[J]. *Mineral Deposits*, 10(2): 143-151(in Chinese with English abstract).
- JIANG Sihong, NIE Fengjun, BAI Daming, et al., 2011. Study on the lead isotopic features of the baiyinnuoer Pb-Zn deposit in Inner Mongolia[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(3): 230-236(in Chinese with English abstract).
- KONG Zhigang, WU Yue, ZHANG Feng, et al., 2018. Sources of ore-forming material of typical Pb-Zn deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou metallogenic province: Constraints from the S-Pb isotopic compositions[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(1): 125-137(in Chinese with English abstract).
- LEACH D, SANGSTER D, KELLEY K, et al., 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective[J]. *Economic Geology*, 100: 561-607.
- LI Fayuan, 2003. Study on occurrence state and enrichment mechanism of dispersed elements in MVT deposits—A case study for the Tianbaoshan and Daliangzi Pb-Zn deposits in Sichuan province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- LI Guanqing, 2015. Metallogenic mechanism and regional metallogenic potential evaluation of zhaxikang antimony sulfate polymetallic deposit in Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- LI Hao, XU Xingwang, BORG G, et al., 2019. Geology and Geochemistry of the giant Huoshaoyun zinc-lead deposit, Karakorum Range, northwestern Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 106: 251-272.

- LI Houmin, CHEN Yuchuan, WANG Denghong, et al., 2007. Geochemistry and mineralization age of the Mayuan zinc deposit, Nanzheng, southern Shaanxi, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(5): 546-552(in Chinese with English abstract).
- LI Kun, DUAN Qifa, ZHAO Shaorui, et al., 2017. Material sources and ore-forming mechanism of the Huayuan Pb-Zn ore deposit in Hunan Province: Evidence from S, Pb, Sr isotopes of sulfides[J]. Geological Bulletin of China, 36(5): 811-822(in Chinese with English abstract).
- LI Li, QIN Min, CHEN Xiang, 1999. Geochemical characteristics of stable isotopes in Waifangshan gold deposit, Henan[J]. Gold Geology, 5(2): 55-59(in Chinese with English abstract).
- LI Tiegang, 2016. Metallogenesis of the Jiawula-Chaganbulagen Pb-Zn-Ag orefield, Inner Mongolia, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- LI Tiegang, WU Guang, LIU Jun, et al., 2015. Fluid inclusions and isotopic characteristics of the Jiawula Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 103: 305-320.
- LI Wenbo, HUANG Zhilong, ZHANG Guan, 2006. Sources of the ore metals of the Huize ore field in Yunnan province: Constraints from Pb, S, C, H, O and Sr isotope geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2567-2580(in Chinese with English abstract).
- LI Yi, 2007. Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Hotwater Sedimentary Deposits, Guangxi, China[D]. Changsha: Central South University(in Chinese with English abstract).
- LIANG Yinggan, 1993. Geochemical characteristics of the Houpo'ao silver-tin Pb-Zn deposit in Guangdong Province[J]. Geology of nonferrous metals in Guangdong Province, (2): 21-29(in Chinese).
- LIU Changzheng, LI Shijin, GAO Yongwang, et al., 2015. Isotopic geochemistry and origin of the Duocaima lead-zinc deposit in the northern Sanjiang area[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 54(1): 136-144(in Chinese with English abstract).
- LIU Jianming, LIU Jiajun, GU Xuexiang, 1997. Fluid activity and mineralization in sedimentary basins[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 16(4): 341-352(in Chinese).
- LIU Min, ZHANG Zuoheng, WANG Yongqiang, et al., 2008. Geology and stable isotope geochemistry of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit, Altay, Xinjiang, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 82(11): 1504-1513(in Chinese with English abstract).
- LIU Shaofeng, 2012. The metallogenesis research of Yaojialing Zn-Au polymetallic deposit in Tongling, Anhui Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- LIU Yingchao, YANG Zhusen, HOU Zengqian, et al., 2009. Geology and hydrogen, oxygen and carbon isotope geochemistry of Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit, Yushu area, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 28(6): 770-784(in Chinese with English abstract).
- LIU Zheng, 2019. The Petrogenesis and metallogenesis of the Yaojialing polymetallic Zn-Au deposit in Tongling City, Anhui Province[D]. Hefei: Hefei University of Technology(in Chinese with English abstract).
- LONG Hansheng, LUO Taiyi, HUANG Zhilong, et al., 2009. Carbon and oxygen isotopic geochemistry of Laochang large-sized Ag polymetallic deposit in Lancang, Yunnan Province and its significance[J]. Mineral Deposits, 28(5): 687-695(in Chinese with English abstract).
- LU Rui, 2013. Geologic characteristic and genesis mechanism of the Shuikoushan Pb-Zn deposit in Changning City, Hunan Province[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese with English abstract).
- MA Guoliang, 1993. Isotopic geochemical characteristics of tongmugou hot water sedimentary Pb-Zn deposit in east Qinling[J]. Journal of Chang'an University Earth Science Edition, 15(4): 103-107(in Chinese with English abstract).
- NIE Fengjun, XU Dongqing, JIANG Sihong, et al., 2008. Geological features and origin of Sumoqagan Obo superlarge independent fluorite deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 27(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- OHMOTO H, 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 16: 491-559.
- OHMOTO H, GOLDBERGER M B, 1997. Sulfur and carbon isotopes[C]//BARNES H L, Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 3rd edition. New York: Wiley: 517-611.
- OHMOTO H, RAY R O, 1979. Sulfur and carbon isotopes[C]//BARNES H L, Geochemistry of hydrothermal ore deposits (2nd). New York: John Wiley & Sons: 509-567.
- OHMOTO H, 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Econ. Geol., 67: 551-578.
- OHMOTO H, 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 16: 491-559.
- PIRAJNO F, 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems[M]. Dordrecht: Springer Netherlands.
- SANGSTER D F, 1990. Mississippi Valley-type and Sedex Lead-zinc Deposits: a Comparative Examination[J]. Transaction Institution of Mining and Metallurgy (Sect. B: Applied Earth Sciences), 99: 21-42.
- SHEPPARD S M F, 1986. Chapter 6. characterization and isotopic variations in natural waters[M]//Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes. Boston: De Gruyter: 165-184.
- SONG Xuexin, 2024. On the comprehensive host rock-genesis classification of lead-zinc deposits in China[J]. Geological Review, 70(3): 813-822(in Chinese with English abstract).
- SONG Zhijiao, CHEN Cuihua, ZHANG Yan, et al., 2018. Metallogenic sources of Nanmushu Pb-Zn deposit in Mayuan area, Shaanxi Province: Constraint from hydrogen and oxygen isotopes and trace elements[J]. Mineral Deposits, 37(5): 985-1000(in Chinese with English abstract).
- SPANGENBERG J, FONTBOTÉ L, SHARP Z D, et al., 1996. Carbon and oxygen isotope study of hydrothermal carbonates in the zinc-lead deposits of the San Vicente district, central Peru: A quantitative modeling on mixing processes and CO<sub>2</sub> degassing[J]. Chemical Geology, 133(1-4): 289-315.
- SUN Jing, 2018. The origin and metallogenic prediction of the Xitieshan lead-zinc mine in Qinghai[D]. Jilin: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- TAN Shucheng, ZHOU Jiayi, LUO Kai, et al., 2019. The sources of ore-forming elements of the Maoping large-scale Pb-Zn deposit, Yunnan Province: Constraints from in situ S and Pb isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3461-3476(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR B E, 2004. Biogenic and thermogenic sulfate reduction in the Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia (Canada): Evidence from micro-isotopic analysis of carbonate and

- sulfide in bedded ores[J]. *Chemical Geology*, 204(3/4): 215-236.
- TAYLOR H P, 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 69(6): 843-883.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M, 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[J]. *Geological Magazine*, 122(6): 312.
- TIAN Lidan, SUN Fengyue, WANG Li, et al., 2017. Characteristics of fluid inclusions and genesis of Huanggoushan Pb-Zn deposit in Linjiang area, Jilin[J]. *Global Geology*, 36(3): 836-849(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shihong, HOU Zengqian, YANG Zhusen, et al., 2011. Sulfur, lead, strontium and neodymium isotope compositions of the Mohailaheng lead-zinc ore deposit in the Yushu area, southern Qinghai: Implications for the sources of ore-forming material in the deposit and comparison with those of Dongmohazhua lead-zinc ore[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2709-2720(in Chinese with English abstract).
- TU Guangzhi, 1989. Lead-zinc deposits in China[M]//China Mineral Deposit Editorial Committee: *Mineral Deposits in China (Volume 1)*. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Changming, XU Yigan, WU Ganguo, et al., 2011. C, O, S and Pb isotopes characteristics and sources of the ore metals of the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field, Jiangxi[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 179-193(in Chinese with English abstract).
- WANG Chengyang, LI Jianfeng, WANG Keyong, et al., 2018. Geology, fluid inclusion, and stable isotope study of the skarn-related Pb-Zn (Cu-Fe-Sn) polymetallic deposits in the southern Great Xing'an Range, China: Implications for deposit type and metallogenesis[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(5): 88.
- WANG Denghong, 1996. Sulfur and lead isotopic geochemistry of the Ashele volcanogenic massive sulfide deposit, Xinjiang, China[J]. *Geochimica*, 582-590(in Chinese with English abstract).
- WANG Dongbo, DONG Guoyi, 1988. The study on geochemistry and metallogeny of houpoao tin deposit in Chaoan county, Guang Dong province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 3(1): 76-84(in Chinese with English abstract).
- WANG Hai, WANG Jingbin, ZHU Xinyou, et al., 2018. Genesis of the dalingzi Pb-Zn deposit in the western margin of Yangtze plate: Constraints from fluid inclusions and isotopic evidence[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(4): 681-698(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian, ZHANG Jun, ZHONG Wenbin, et al., 2018. Sources of ore-forming fluids from Tianbaoshan and Huize Pb-Zn deposits in Yunnan-Sichuan-Guizhou Region, Southwest China: Evidence from fluid inclusions and He-Ar isotopes[J]. *Earth Science*, 43(6): 2076-2099(in Chinese with English abstract).
- WANG Lijuan, PENG Zhigang, ZHU Xinyou, et al., 2009. Source and evolution of ore-fluid of the Xitieshan sedimentary-exhalative lead-zinc system, Qinghai province; Evidence from fluid inclusion and isotope geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3007-3015(in Chinese with English abstract).
- WANG Liqiang, GU Xuexiang, CHENG Wenbin, et al., 2010. Sulfur and lead isotope composition and tracing for the sources of ore-forming materials in the mengya'a Pb-Zn deposit, Tibet[J]. *Geoscience*, 24(1): 52-58(in Chinese with English abstract).
- WANG Qinglian, 1987. The geological features and genesis of Tongmugou Zinc deposit in Shanyang county, Shenyang Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, (2): 54-64 (in Chinese with English abstract).
- WANG Ruiliang, 2019. Genesis of the Aobotu Lead-Zinc Deposit in the South Section of the Daxing'anling Mountains[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- WANG Shulai, CHEN Keqiang, KANG Jichang, et al., 2007. Stable isotope of pb-zn deposits occurred in the maizi Devonian volcanic sedimentary basin in the south margin of Altay mountain, Xinjiang[J]. *Geology and Prospecting*, 43(6): 25-31(in Chinese with English abstract).
- WANG Shulai, WANG Dongbo, ZHU Xinyou, et al., 2002. Ore-fluid geochemistry of tamu-kala Pb-Zn deposit in Xinjiang[J]. *Geology-geochemistry*, 30(4): 34-39(in Chinese with English abstract).
- WANG Xing'an, 1999. Geochemical study of sulfur and lead isotopes in Baiyin Chang copper field, Gansu Province[J]. *Northwestern Geology*, 32(1): 18-23(in Chinese with English abstract).
- WEI Chen, YE Lin, LI Zhenli, et al., 2020. Metal sources and ore genesis of the Wusihe Pb Zn deposit in Sichuan, China: New evidence from in situ S and Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(12): 3783-3796(in Chinese with English abstract).
- WEI Juying, WANG Guanyu, 1988. *Isotope geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WEI Ran, 2022. Study on geological characteristics and metallogenic mechanism of Changba-Lijiagou Superlarge lead-zinc deposit in West Qinling[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- XI Chaozhuang, DAI Tegen, LIU Wuhui, 2009. Lead and sulfur isotope geochemistry of the huangshaping lead-zinc deposit, Hunan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(1): 89-94(in Chinese with English abstract).
- XIA Xuehui, 1992. Ore-forming characteristics and genetic discussion of the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposits in the Langshan metallogenic belt, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 11(4): 374-383(in Chinese with English abstract).
- XIAO Wenjiao, WINDLEY BF, HAO J et al., 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1069.
- XIAO Xinjian, NI Pei, 2000. Discussion of comparison of metallogeny for sedex and sedimentary-rework base metal deposits[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 15(3): 238-245(in Chinese with English abstract).
- XIE Yuling, LI Lamei, WANG Bogong, et al., 2017. Genesis of the Zhaxikang epithermal Pb-Zn-Sb deposit in southern Tibet, China: Evidence for a magmatic link[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 891-909.
- XU Rong, 2021. Ore genesis of the Luziyuan Zn-Pb polymetallic deposit in the southern Baoshan block, Sanjiang region (SW China): Constraints from mineral chemistry and isotope geochemistry[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- XU Wenxin, LI Heng, CHEN Minyang, 2012. Geochemical

- evidence for formation of sulfur and lead isotope in Keketale Pb-Zn deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 26(6): 511-515(in Chinese with English abstract).
- XU Xiaoxue, 2019. Study on the Jinding Super-large Lead-zinc Deposit in Sanjiang Area, Southwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- YANG Qing, ZHANG Jun, WANG Jian, et al., 2017. Study of ore-forming fluid geochemistry of Maozu large-scale lead-zinc deposit in northeast Yunnan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 31(5): 854-863(in Chinese with English abstract).
- YE Huishou, MAO Jingwen, HE Chunfen, et al., 2010. Geology of porphyry molybdenum deposit and vein lead-zinc deposit in Fudian ore concentration area, Henan Province Characteristics and metallogenic age[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 537-538(in Chinese with English abstract).
- YING Lijuan, ZHENG Wenbao, WANG Weiping, et al., 2012. Stable isotopes geochemistry of the Jiama(gyama) copper polymetallic deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 519-527(in Chinese with English abstract).
- ZARTMAN R E, DOE B R, 1981. Plumbotectonics-the mode[J]. *Tectonophysics*, 175(1/2): 135-162.
- ZENG Qingdong, LIU Jianming, JIA Changshun, et al., 2007. Sedimentary exhalative origin of the baiyinnuoer zinc-lead deposit, Chifeng, Inner Mongolia: Geological and sulfur isotope evidence[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(4): 659-667(in Chinese with English abstract).
- ZENG Qingdong, LIU Jianming, ZHANG Zuolun, et al., 2009. Geology and lead-isotope study of the baiyinnuoer Zn-Pb-Ag deposit, south segment of the Da Hinggan Mountains, Northeastern China[J]. *Resource Geology*, 59(2): 170-180.
- ZHAI Degao, LIU Jiajun, WANG Jianping, et al., 2013. A study of stable isotope geochemistry of the Jiawula large Pb-Zn-Ag ore deposit, Inner Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 213-225(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Changqing, WU Yue, WANG Denghong, et al., 2014. Brief introduction on metallogeny of Pb-Zn deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2252-2268(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Da, WU Ganguo, DI Yongjun, et al., 2009. Geochemistry and paleo-tectonic environment of Fengyan Pb-Zn ore deposit in Meixian, central Fujian province[J]. *Journal of Geomechanics*, 15(1): 20-35(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jianfang, 2010. The Genesis study of Zhaxikang lead zinc antimony silver deposit, North Himalayan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Mingchao, CHEN Renyi, YE Tianzhu, et al., 2017. Genetic study on the Qixiashan Pb-Zn polymetallic deposit in Jiangsu Province: Evidence from fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3453-3470(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Sen, ZHAO Dongfang, LÜ Guangjun, et al., 2007. Geology and genesis of the Hongtoushan copper-zinc deposit in Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 16(3): 173-182 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wanyi, 2008. Magmatic Activity and Metallogeny of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yaokui, 1983. Geological characteristics of sulfur, oxygen, carbon and lead isotopes in Henggoushan lead-zinc deposit and Zhenmen Formation[J]. *Jilin Geology*, 2(1): 53-59(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yongchao, ZHENG Youye, GAO Shunbao, et al., 2018. H-O-S-Pb isotopic compositions of the chagele Pb-Zn-Cu-Mo deposit, Tibet: Implications for the ore-forming processes and comparison with Pb-Zn(Cu-Mo) deposits in middle-east segment of the nyainqentanglha metallogenic belt[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(3): 467-479(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Hualei, 2014. Ore Genesis and Geodynamic Settings of Tungsten Deposits in Eastern Jilin and Heilongjiang Provinces[D]. Jilin: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Xiaoyong, LI Feng, YANG Fan, 2012. Isotopic geochemical evidence of the sources of ore-forming materials for the Laochang deep porphyry Mo(Cu) deposit in Lancang, Yunnan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 712-722(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yiming, 2004. Metallogenic regularity of major metal deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHENG Yongfei, CHEN Jiangfeng, 2000. Isotopic geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHOU Gang, HAN Dongnan, DENG Jiniu, 1998. Study of isotope geochemistry on the Keketale lead-zinc deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 12(1): 34-39(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yun, DUAN Qifa, CAO Liang, et al., 2018. Microthermometry and characteristic elements determination of the fluid inclusions of the Huayuan lead-zinc deposit in western Hunan[J]. *Earth Science*, 43(7): 2465-2483(in Chinese with English abstract).
- ZHU Anqin, ZHANG Yongshan, LU Zuda, et al., 2009. Study on metallogenic series and metallogenic zone of metallic sub-metallic deposit in Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHU Dicheng, WANG Qing, CHUNG S L, et al., 2019. Gangdese magmatism in southern Tibet and India-Asia convergence since 120 Ma[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 483(1): 583-604.
- ZHU Xinyou, WANG Lijuan, ZHU Guchang, et al., 2010. Characteristics of sulfur isotope geochemistry of Xitieshan lead-zinc deposit Qinghai: Mixing of sulfurs from hydrothermal and seawater[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 657-666(in Chinese with English abstract).