

doi: 10.12029/gc20200214

张革利, 田涛, 王瑞廷, 高卫宏, 常宗东. 2020. 凤太矿集区东塘子铅锌矿床 S、Pb 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. 中国地质, 47(2): 472–484.

Zhang Geli, Tian Tao, Wang Ruiting, Gao Weihong, Chang Zongdong. 2020. S, Pb isotopic composition of the Dongtangzi Pb–Zn deposit in the Fengtai ore concentration area of Shaanxi Province for tracing sources of ore-forming materials[J]. Geology in China, 47(2): 472–484(in Chinese with English abstract).

凤太矿集区东塘子铅锌矿床 S、Pb 同位素组成对成矿物质来源的示踪

张革利¹, 田涛^{1,2}, 王瑞廷^{3,4}, 高卫宏¹, 常宗东¹

(1. 宝鸡西北有色七一七总队有限公司, 陕西 宝鸡 721015; 2. 陕西省环境科学研究院, 陕西 西安 710061; 3. 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054; 4. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:东塘子铅锌矿床是秦岭成矿带中典型的铅锌矿床之一, 前人对东塘子铅锌矿床成矿作用研究较多, 但受限于测试手段及认识的局限性, 多年来对其物质来源的认识仍未统一。本文在充分研究东塘子铅锌矿床地质特征的基础上, 开展了相关样品的 S、Pb 同位素分析, 分析对象包括了不同类型的铅锌矿石, 讨论了该铅锌矿床的成矿物质来源、区内岩浆岩与铅锌成矿的关系等。研究表明: 东塘子铅锌矿床矿石硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 1.8‰~12.5‰, 平均 7.50‰, 计算获得成矿流体中总硫 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 为 7.7‰, 显示海水硫酸盐(蒸发膏岩)与岩浆硫的混合来源特征。矿石铅同位素组成稳定, 铅源主要来自富 U–Th–Pb 的上地壳与深部, 可能与深部岩浆活动有关。研究结果表明, 东塘子铅锌矿床的成矿过程与南秦岭印支期大规模多阶段构造–岩浆–流体活动密切相关, 为下一阶段区内找矿工作提供了新的思路。

关键词:同位素组成; 成矿物质来源; 成矿机制; 东塘子铅锌矿床; 矿产勘查工程; 凤太矿集区; 陕西

中图分类号: P632 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2020)02–0472–13

S, Pb isotopic composition of the Dongtangzi Pb–Zn deposit in the Fengtai ore concentration area of Shaanxi Province for tracing sources of ore-forming materials

ZHANG Geli¹, TIAN Tao^{1,2}, WANG Ruiting^{3,4}, GAO Weihong¹, CHANG Zongdong¹

(1. Baoji 717 Corps Limited of Northwest Nonferrous Geological and Mining Group, Baoji 721000, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, Shaanxi, China 3. Northwest Nonferrous Geological and Mining Group Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;)

Abstract: The Dongtangzi Pb–Zn deposit is one of the typical Pb–Zn deposits in the Qinling metallogenic belt. Its mineralization

收稿日期: 2018–07–24; 改回日期: 2018–11–30

基金项目: 中国地质调查局项目(DD2016005213)和西北有色地矿集团科技项目(XD20190023)资助。

作者简介: 张革利, 男, 1971 年生, 高级工程师, 主要从事地质勘查工作; E-mail: 842073390@qq.com。

通讯作者: 田涛, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地球化学与矿产勘查工作; E-mail: tiantao8825@163.com。

has been studied by many researchers, but the study has been limited by the testing methods and the level of understanding. Its material source is still a problem of much controversy. Based on the study of the geological characteristics of the Dongtangzi Pb-Zn deposit, the authors carried out S and Pb isotope analysis of related samples. The analysis included different types of lead-zinc ore. The source of ore-forming materials of the lead-zinc deposit and the relationship between magmatic rocks and Pb-Zn mineralization in the study area were discussed. The results show that the $\delta^{34}\text{S}$ value of ore sulfides varies from 1.8‰ to 12.5‰ with an average of 7.50‰, whereas the $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ value in the ore-forming fluid is 7.7‰, which shows the characteristics of mixed sources of sulfate in sea water (evaporation paste rock) and magmatic sulfur. The Pb isotope composition of ores is stable in this deposit, which indicates that Pb sources were mainly derived from the upper crust with rich U-Th-Pb elements and deep surroundings, which might have been related to deep magmatic activity. The results show that the metallogenic process of the Dongtangzi Pb-Zn deposit was closely related to the large-scale multi-stage tectonic-magmatic-fluid activity in the Indosinian period, and this understanding provides a new idea for prospecting in the next stage.

Key words: isotope composition; sources of ore-forming materials; mineralization mechanism; Dongtangzi Pb-Zn deposit; mineral exploration engineering; Fengtai ore concentration area; Shaanxi Province

About the first author: ZHANG Geli, male, born in 1971, senior engineer, mainly engages in geological exploration; E-mail: 842073390@qq.com.

About the corresponding author: TIAN Tao, male, born in 1988, master, senior engineer, majors in the study of geochemistry and geological exploration; E-mail: tiantao8825@163.com.

Found support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD2016005213) and Science and Technology Project of Northwest Nonferrous Mining Group (No. XD20190023).

1 引言

东塘子铅锌矿床位于陕西凤太矿集区西部,大地构造位置处于南秦岭北部裂陷带之中(张国伟等,2001)。东塘子铅锌矿床是凤太矿集区铅锌矿床的典型代表之一。凤太矿集区内已经探明的铅锌金属储量超过了500万t,其中东塘子铅锌矿床的铅锌金属储量就达到了200万t(张革利等,2018)。前人已经对凤太矿集区内的铅锌矿做了大量研究工作(祁思敬等,1993;王集磊等,1996;方维萱,1998;王瑞廷等,2007,2011;王义天等,2009;李厚民等,2009;张帆,2010;张海等,2011;胡乔青等,2012,2013,2015;任鹏等,2014)。对铅锌矿床的成因认识经历了诸多阶段,由最开始基于矿体宏观特征认为的层控型矿床(祁思敬等,1993),到20世纪80年代认为区内的热水喷流沉积型矿床(Sedex)或类Sedex矿床(祁思敬等,1993;王集磊等,1996;方维萱,1998;张海等,2011),再到20世纪80年代之后的热水喷流沉积改造型(再造型)矿床(王瑞廷等,2007,2011),最近几年受岩浆成矿理论的启发,及测试分析水平的不断提高,许多学者又提出了后生热液型矿床的成因认识(王义天等,2009;张帆,

2010;胡乔青等,2012,2013,2015),目前对于本区铅锌矿床的成因认识仍存在较大分歧。采用S、Pb同位素示踪成矿物质来源是近年来研究矿床成因的重要手段,前人对区内铅锌矿床的研究侧重于矿床特征、矿物岩石学特征、成矿构造与找矿预测等方面(张振飞等,1989;宫同伦等,1990;方维萱,1999),限于以往的测试手段及精度的影响,本区关于铅锌矿床物质来源与矿床成因的分析与讨论仍显不足(王俊发等,1991;祁思敬等,1993;任鹏等,2014),很大程度上限制了凤太矿集区铅锌成矿机制的研究。本文选取区内的东塘子铅锌矿床为研究对象,对矿石的S、Pb同位素组成进行分析,并结合凤太矿集区内岩浆岩的S、Pb同位素数据,对铅锌矿床的成矿物质来源与成因进行讨论,以期对深入认识凤太矿集区铅锌矿床成矿机制提供新的参考。

2 区域地质背景

凤太矿集区东塘子铅锌矿床的大地构造位置位于华北板块与扬子板块的夹持部位,南秦岭晚古生代裂陷盆地,秦岭造山带泥盆系金—多金属矿带中部(胡乔青,2015)。北部以赵家庄—湘子河—都督门断裂 F_1 为界,南部以酒奠梁—江口断裂 F_2 为

界,位于上述两个大断裂之间,由对冲推覆构造形成,其内部以褶皱断裂组合形成近似菱形的构造块状体(图1),区内的主要构造呈NWW向。

区域内主要出露地层为泥盆系,为一套浅变质滨海浅海相沉积碎屑岩。自下而上有中泥盆统马槽沟组中厚层一块状变长石石英杂砂岩、石英杂砂岩、夹变质粉砂岩、薄层砂质灰岩;中泥盆统古道岭组深灰色中厚层一块状结晶灰岩、生物灰岩;上泥盆统星红铺组炭质千枚岩、钙质千枚岩、铁白云质千枚岩、绿泥石千枚岩、粉砂质千枚岩夹粉砂岩、薄层灰岩;上泥盆统九里坪组灰白色中厚层,厚层状变长石石英砂岩,中厚—中薄层变细砂岩,深灰色粉砂质板岩。中泥盆统古道岭组深灰岩与上泥盆统星红铺千枚岩的过渡层含炭部位是本区铅锌矿床的赋矿层位。

区内岩浆岩分布较广,区内东部和东北部,主要有印支期西坝花岗岩体(218~219 Ma)、花红树坪岩体(225 Ma)(张帆,2010;胡乔青,2015),岩性主要为二长花岗岩($\eta\gamma$)—花岗闪长岩($\gamma\delta$)。岩体与围岩接触带位置均发育较大规模的角岩化和矽卡岩化,其中花红树坪岩体北部接触带发育有黑钨矿化,花红树坪岩体西南部5 km范围内发育大量气液交代作用形成的方解石脉,脉体中可见一定规模的铅锌矿分布。区

内西部则主要以岩脉出现,NWW向以酸性的花岗斑岩($\gamma\pi$)为主,NE向以中性的闪长玢岩($\delta\mu$)为主,在本区的铅锌矿床、金矿床部位分布较为集中。

3 矿床地质特征

3.1 矿区与矿体特征

东塘子铅锌矿床由东部出露的铅铜山矿段和西部隐伏的东塘子矿段组成,矿区内的地层主要以中泥盆统古道岭组(D_{2g})与上泥盆统星红铺组(D_{3x})为主。含矿部位偏向于古道岭组一侧,以结晶灰岩、含生物碎屑微晶灰岩的岩性组合占主要部分。矿区没有出现大面积的岩浆岩,而岩浆脉体却较为发育,岩浆脉体主要是NW向花岗斑岩脉和NE向的闪长玢岩脉,花岗斑岩脉与主矿体产状基本一致,闪长玢岩脉则横穿了主矿体,铅锌矿体受铅铜山背斜控制,控矿背斜为一“M”型复式背斜,矿体主要赋存于背斜鞍部及两翼古道岭组和星红铺组硅钙岩性接触界面;矿区内发育多组断裂构造,其中近东西向断层规模较大(图2a)。

东塘子矿段与铅铜山矿段共有10个铅锌矿体构成,规模最大的是I-1、II-1号矿体,矿体产出形成主要有脉状(图3a)与层状(图3b),受背斜与两组地层接触的“硅钙面”控制(图2b)。其他矿体产

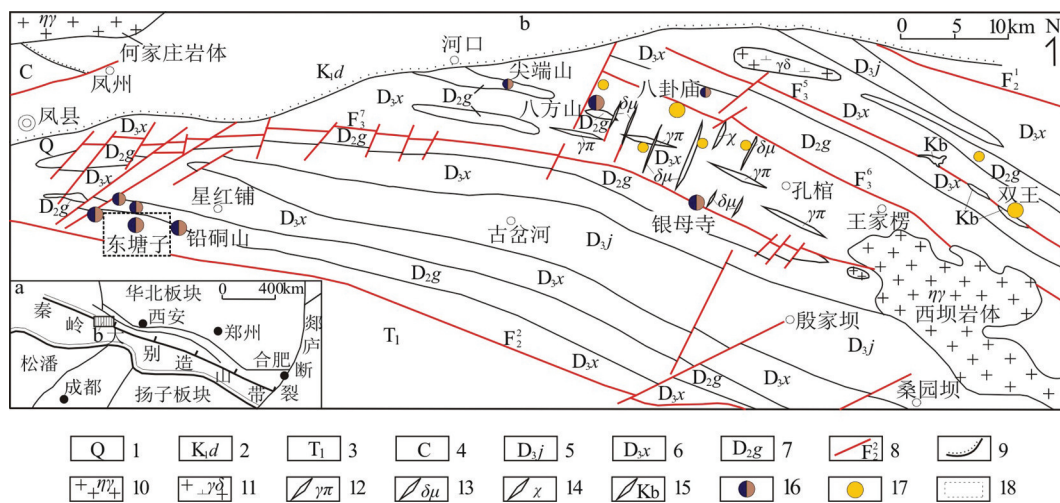


图1 凤太矿集区西部矿产地质简图

1—第四系;2—东河群;3—下三叠统;4—石炭系;5—九里坪组;6—星红铺组;7—古道岭组;8—断裂及编号;9—角度不整合;10—二长花岗岩;11—花岗闪长岩;12—花岗斑岩脉;13—闪长玢岩脉;14—煌斑岩脉;15—钠长角砾岩;16—铅锌矿床;17—金矿床;18—研究区

Fig.1 Geological and ore deposit map of western Fengxian-Taibai ore concentration area

1—Quaternary; 2—Donghe Group; 3—Lower Triassic; 4—Carboniferous; 5—Jiuliping Formation; 6—Xinghongpu Formation; 7—Gudaoling Formation; 8—Fracture and its serial number; 9—Angular unconformity; 10—Adamellite; 11—Granodiorite; 12—Granitic porphyry vein; 13—Diorite porphyry; 14—Lamprophyre; 15—Sodium-breccia; 16—Pb-Zn deposit; 17—Gold deposit; 18—Research area

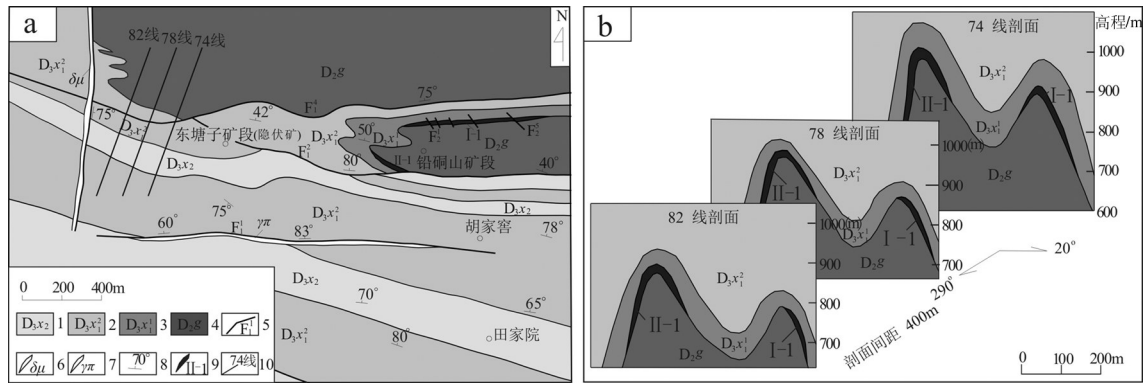


图2 东塘子铅锌矿床地质简图(a)与联合剖面图(b)

1—星红铺组第二岩性段; 2—星红铺组第一岩性段第二层; 3—上泥盆统星红铺组第一岩性段第一层; 4—古道岭组;
 5—断层及编号; 6—闪长玢岩脉; 7—花岗斑岩; 8—地层产状; 9—铅锌矿体及编号; 10—勘探线

Fig.2 Simplified geological map of the Dongtangzi Pb-Zn deposit (a) and combined profiles (b)

1- Second lithologic section, Xinghongpu Formation; 2- The second layer of the first lithologic section, Xinghongpu Formation;
 3- The first layer of the first lithologic section, Xinghongpu Formation; 4- Gudaoling Formation; 5- Fracture and its serial number;
 6- Diorite porphyry; 7- Granite porphyry; 8- Attitude; 9- Pb-Zn orebody and its serial number; 10- Exploration line

于灰岩内部断层破碎带、不规则张裂隙或产在千枚岩中层间裂隙, 规模较小, 多呈脉状与细脉状产出, 产状不稳定。I-1矿体的地表出露546 m, 已控制矿体总长度为1350 m, 斜向延深超过了450 m, 矿体走向90°~100°, 倾向0°~7°, 倾角为35°~39°, 矿体平均厚度为9.55 m, Pb+Zn平均品位为8.7%。II-1号

矿体地表出露长65 m, 深部已控制长1800 m, 倾斜埋深超过了800 m, 矿体走向115°~120°, 倾向205°~210°, 倾角为80°~85°, 矿体平均厚度为7.7 m, Pb+Zn平均品位为8.3%。东塘子铅锌矿床含矿背斜的北翼矿体薄, 在围岩中发育的片理化极为强烈, 背斜南翼具有厚大的矿体, 围岩片理化构造不强烈。

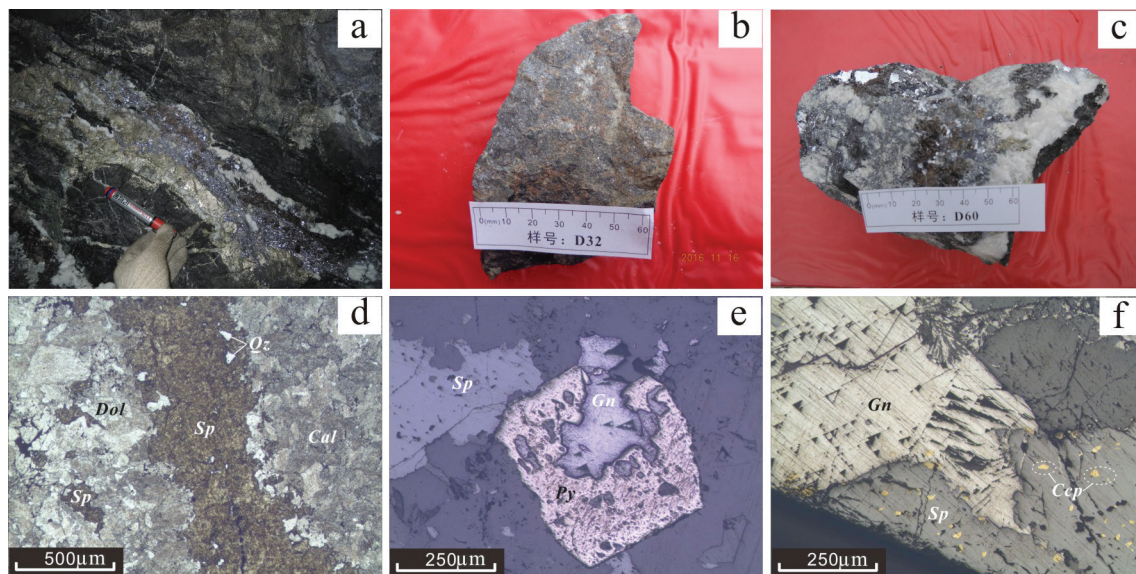


图3 东塘子铅锌矿床矿石及矿相显微照片

a—方铅矿、黄铁矿; b—闪锌矿; c—方铅矿、闪锌矿, 铅锌粒度较粗; d—产于热液脉中的闪锌矿细脉; e—黄铁矿被方铅矿交代形成的骸晶结构; f—闪锌矿中蠕虫状黄铜矿; Ga—方铅矿; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Cp—黄铜矿

Fig.3 Microphotograph of ore and ore phase of the Dongtangzi Pb-Zn deposit

a-Detritus-like galena and pyrite; b-Dense massive sphalerite ore; c-Detritus-like galena and sphalerite, with coarser grain sizes of lead and zinc;
 d-Sphalerite in hydrothermal veins; e-Pyrite replaced by galena, which produced skeleton crystal texture; f-Vermicular chalcocopyrite in sphalerite;
 Ga-Galena; Py-Pyrite; Sp-Sphalerite; Cp-Chalcocopyrite

3.2 矿石特征与成矿阶段

矿石结构以他形粒状为主(图3c、d),同时也常见交代溶蚀结构(图3e)及骸晶结构(图3e)等,显微镜下可见乳滴状黄铜矿产于闪锌矿中(图3f);矿石构造常见的是块状、条带状及细脉浸染状等,受后期构造变形应力的影响,矿石的局部呈破裂状,及重结晶后形成的斑杂状构造。矿石的金属矿物以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿为主,脉石矿物包含了石英、碳酸盐类矿物及绢云母、绿泥石等蚀变矿物。围岩发育强烈蚀变,与矿化密切相伴,可见围岩的硅化、碳酸盐化、黄铁矿化及绢云母化等。

通过野外观察东塘子铅锌矿床4个采矿中段(795、860、910、960)矿体产出特征、矿石类型及脉体与矿体间的穿插关系,划分出了4个成矿阶段(张革利等,2018):

I阶段:脉状硫化物-碳酸盐-石英,主要的矿物组合为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、碳酸盐、石英等,本阶段最为明显的特征是富黄铁矿、石英的铅锌矿脉,具有较小的矿化强度与规模。II阶段:块状硫化物-碳酸盐,主要的矿物组合为闪锌矿、黄铁矿、方铅矿、碳酸盐及少量石英,本阶段以闪锌矿、方铅矿富集产出为特征,局部富集黄铁矿,矿石产出特征为浸染块状。III阶段:方解石石英脉-贫硫化物,以NE向的方解石石英脉为主,切穿前两个成矿阶段,脉体中见少量黄铁矿、方铅矿。IV阶段:石英碳酸盐脉-贫硫化物,以厚大的石英碳酸盐脉为主,主要分布于矿体与底盘围岩间,脉体中见少量黄铁矿、方铅矿。

4 样品采集与分析方法

本次用于S、Pb同位素测试的样品均采自东塘子铅锌矿区坑道中,在主成矿阶段的块状矿体和脉状矿体中分别采样,所采样品新鲜,未受污染和风化。实验选取有代表性矿石,在矿石中分别选取闪锌矿、方铅矿和黄铁矿进行测试。首先将矿石测试样品人工初步破碎至60~80目,肉眼挑选闪锌矿、方铅矿和黄铁矿单矿物颗粒,将挑选后的单矿物样品置于双目镜下剔除杂质,使测试样品纯度达到99%以上。再用特制玛瑙碾钵粉碎至200目以下送实验室分析(陈欣彬等,2017;杨斌等,2018)。样品制备期间未受次生污染。矿石硫化物S、Pb同位素的分

析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行,测试仪器为MAT-253、ISOPROBE-T热电离子质谱仪。S测试误差范围在 $\pm 0.2\%$,Pb同位素测试精度为 2σ 。

5 测试结果

5.1 硫同位素

东塘子铅锌矿床的金属硫化物样品分析结果(表1)显示:黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $5.7\% \sim 9.0\%$,平均 8.2% ;闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $8.6\% \sim 12.5\%$,平均 9.6% ;方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.8\% \sim 6.3\%$,平均 4.4% ;硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.8\% \sim 12.5\%$,平均值为 7.08% 。东塘子矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值的特点是 $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$,硫同位素在硫化物间的分馏并未达到平衡,表明本矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值不能近似于成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$,而要明显低于成矿流体 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值(Ohmoto et al., 1979)。闪锌矿与方铅矿平衡状态(张理刚,1985;郑永飞等,2000),在矿石显微构造中普遍可见闪锌矿、方铅矿共生,且二者交代黄铁矿的现象。

5.2 铅同位素

铅同位素在讨论源区特征、构造环境方面应用较为广泛。东塘子铅锌矿床中的方铅矿Pb同位素测试结果(表2)显示:方铅矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 $18.083 \sim 18.234$,均值为 18.149 ,极差为 0.151 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 $15.66 \sim 15.801$,均值为 15.714 ,极差为 0.141 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 $38.317 \sim 38.781$,均值为 38.497 ,极差为 0.464 。方铅矿的同位素组成较为稳定,显示出较小极差,暗示着成矿物质来源单一或均一化程度高,属于正常铅。采用路远发(2004)的相关计算,得到方铅矿Pb同位素相关参数(表2),参数中的 μ 值范围为 $9.62 \sim 9.89$,均值为 9.72 ; ω 值范围为 $38.43 \sim 40.94$,平均值为 39.35 ; Th/U值范围为 $3.87 \sim 4.01$,均值为 3.92 ,除 μ 值偏高外, ω 和Th/U比值均在正常铅变化范围内(陈好寿,1978)。

6 讨论

6.1 S的来源

前人对凤太矿集区铅锌矿床矿石混合硫源的认识趋于统一,一般认为海水硫酸盐为主要矿石硫源,但对其他混合组分有不同的认识。有些学者认为铅锌矿床硫化物的硫不是单一的岩浆、生物或海水硫

表1 东塘子铅锌矿床硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotope composition of the Dongtangzi Pb-Zn deposit

矿石类型	样品号	岩性	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	矿石类型	样品号	岩性	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
脉状矿石	D54	黄铁矿	8.7	块状矿石	D13	黄铁矿	8.2
	D55	黄铁矿	8.8		D26	黄铁矿	8.4
	D58	黄铁矿	8.1		D32	黄铁矿	7.3
	D60	黄铁矿	8.8		D34	黄铁矿	5.7
	D62	黄铁矿	9		D44	黄铁矿	9
	D54	闪锌矿	9		D13	闪锌矿	8.8
	D55	闪锌矿	9.2		D26	闪锌矿	10.6
	D58	闪锌矿	9.1		D32	闪锌矿	10
	D60	闪锌矿	9.6		D34	闪锌矿	8.9
	D62	闪锌矿	8.6		D44	闪锌矿	12.5
	D54	方铅矿	4.6		D26	方铅矿	3.3
	D55	方铅矿	4.7		D32	方铅矿	3
	D58	方铅矿	4.4		D34	方铅矿	1.8
	D60	方铅矿	5.2		D44	方铅矿	6.3
	D62	方铅矿	6				

注:核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析测试,测试时间为2017.9.5。

表2 东塘子铅锌矿床铅同位素组成

Table 2 Pb isotopic composition of the Dongtangzi Pb-Zn deposit

样号	矿物	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	T_{CDT}/Ma	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	资料来源	
D21	方铅矿	38.595	15.744	18.172	506	9.78	39.94	3.95	86.97	29.21	52.44	本文	
D26	方铅矿	38.380	15.680	18.110	477	9.66	38.74	3.88	80.81	24.85	45.26		
D32	方铅矿	38.503	15.717	18.138	499	9.73	39.47	3.93	84.34	27.4	49.61		
D34	方铅矿	38.621	15.750	18.162	520	9.79	40.17	3.97	87.56	29.69	53.8		
D44	方铅矿	38.317	15.660	18.083	473	9.62	38.43	3.87	78.86	23.52	43.36		
D54	方铅矿	38.411	15.686	18.151	455	9.67	38.69	3.87	81.41	25.12	45.11		
D55	方铅矿	38.781	15.801	18.234	527	9.89	40.94	4.01	92.47	33.07	58.48		
D58	方铅矿	38.557	15.730	18.169	492	9.75	39.65	3.94	85.6	28.21	50.77		
D60	方铅矿	38.397	15.681	18.128	465	9.66	38.72	3.88	80.87	24.85	45.18		
D62	方铅矿	38.403	15.688	18.140	465	9.67	38.74	3.88	81.59	25.3	45.34		
Q052-2	方铅矿	38.000	15.568	18.083	365	9.44	36.2	3.71	69.96	16.92	29.9	祁思敬等, 1993	
Q072-2	方铅矿	38.099	15.567	18.025	406	9.44	36.94	3.79	69.84	17.07	34.43		
Q202-2	方铅矿	38.272	15.652	18.123	435	9.6	37.92	3.82	78.06	22.75	40.41		
Q511-2	方铅矿	37.985	15.553	17.978	423	9.42	36.59	3.76	68.47	16.27	32.08		
Q526-2	方铅矿	38.192	15.625	18.070	442	9.55	37.63	3.81	75.47	21.06	38.56		
Q615-2	方铅矿	38.192	15.625	18.070	442	9.55	37.63	3.81	75.47	21.06	38.56		
Q620-2	方铅矿	38.257	15.646	18.080	459	9.59	38.05	3.84	77.5	22.51	41.08		
Q724-2	方铅矿	38.293	15.660	18.093	465	9.62	38.26	3.85	78.81	23.44	42.34		
XJ-1	方铅矿	38.199	15.630	18.076	443	9.56	37.67	3.81	75.94	21.39	38.8		王俊发等, 1991
XJ-4	方铅矿	38.074	15.538	18.035	364	9.38	36.5	3.77	67.04	14.94	31.87		
XJ-5-2	方铅矿	38.140	15.603	18.050	430	9.51	37.31	3.8	73.32	19.55	36.61		

注:核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试.D21~D44为块状矿石,D54~D62为脉状矿石,测试时间为2017.9.5。

酸盐的来源,而可能是海水硫酸盐的还原硫与深部地层同生热液中的硫的混合源(吕仁生等,1990;祁思敬等,1993;王集磊等,1996;任鹏等,2013),王俊发(1991)认为矿石硫来源于海水硫酸盐和深部热液运移过程中淋滤基底硫源的互相混合。

本次S同位素测试结果表明,东塘子铅锌矿床主成矿期不同矿石类型硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素组成较为均匀,同位素范围相对较窄,为1.8‰~12.5‰,平均值为7.50‰,并呈现塔式分布(图4a),硫的来源较为稳定。前人获得的铅矾山—东塘子矿段矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为-1.5‰~10.5‰(王俊发等,1991;王集磊等,1996;胡乔青,2015),平均为6.88‰。与本次测试获得的不同阶段矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值测试数据基本一致,矿石略富集重硫。Ohmoto(1979)认为硫化物的S同位素组成与矿物沉淀时的物理化学条件息息相关。所以,简单的采用S同位素组成来讨论硫化物在成矿热液期的S同位素组成是不恰当的,更多的需要采用成矿热液总S同位素特征 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ES}}$ 来代表成矿流体的S同位素性质。计算总硫同位素最常用的方法是平克尼—拉夫特法(高温平衡外推法)(Doc et al., 1979)。选择平衡状态的9对闪锌矿—方铅矿共生矿物对,计算获得的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ES}}$ 为7.7‰(图4b)。前述的硫化物间的分馏并未达到平衡,表明实际硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值可能较7.7‰还要低。

一般来说,200℃时TSR反应可造成硫酸盐与还原硫之间发生10‰左右的硫同位素值分馏(Machel et al., 1995),中泥盆世—晚泥盆世海水硫同位素由约17‰增长到30‰左右(Claypool et al.,

1980),而东塘子矿床铅锌矿石硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 大多低于10‰,集中分布于4‰~10‰(图4a),尤其是方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为4.4‰,单一的海水蒸发硫酸盐(蒸发膏岩)TSR作用无法提供如此低的硫同位素组成,成矿过程中必然存在富集轻硫的硫源加入。岩浆硫成为最有可能的轻硫来源,在宏观尺度上,秦岭造山带在印支期处于板块碰撞后(晚期)拉张伸展阶段,此种构造环境下的岩浆活动与成矿作用十分强烈(王靖华等,2002;张复新等,2004;卢欣祥等,2008;陈衍景,2010)。

Sedex型铅锌矿床矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值组成往往具有较大的变化范围, $\delta^{34}\text{S}$ 值的区间多数位于20‰~30‰(祁思敬等,1993)。例如内蒙狼山地区霍各乞铅锌矿床的矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为3.6‰~23.5‰(蒋心明,1983),甲生盘铅锌矿床矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为17‰~31.4‰(付超等,2010);东升庙铅锌矿床矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为21.7‰~41.84‰(张明超等,2017),甘肃厂坝铅锌矿矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为11.4‰~27.81‰(王集磊等,1996)。而与岩浆活动有关的铅锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值普遍较小,且多变化于-5‰~10‰,如西藏洞中拉铅锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于2.2‰~4.8‰(刘婷婷等,2011),江苏栖霞山铅锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于-4.6‰~3.8‰(张明超等,2017)。东塘子铅锌矿硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较小(-1.5‰~12.5‰),且大多数小于10‰,与西成矿集区、高板河等典型Sedex型铅锌矿床($\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围大、多为正值、富集重硫)明显不同(图5),地质特征与岩浆作用相关铅锌矿床如洞中拉、栖霞山等具有相似之处(表3),证明了深部岩浆硫源的重要贡献。

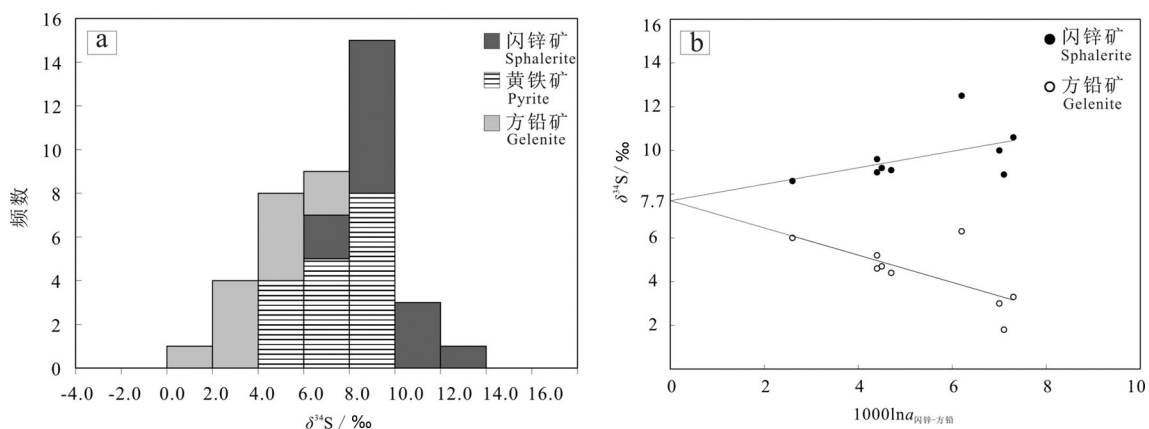


图4 东塘子铅锌矿床矿石硫同位素组成频率直方图(a)与总硫同位素组成(b)

Fig.4 Frequency histogram of $\delta^{34}\text{S}$ for ore sulfides (a) and total sulfur isotope composition (b) in the Dongtangzi Pb-Zn deposit

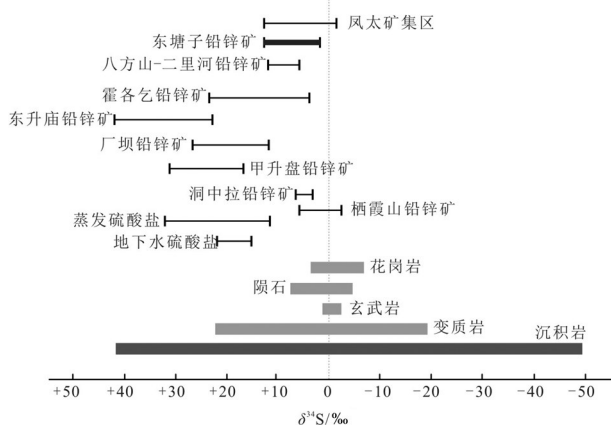


图5 不同来源S同位素特征图

Fig.5 Characteristic chart of S isotope compositions from different sources

6.2 Pb的来源

一般而言,铅同位素源区特征值是指示地质体经历地质作用的重要参数,从而反映铅的来源。Pb同位素特征值是判断铅来源的重要参数(谭洪旗, 2017;王文元, 2018),综合前人研究成果及本次测试结果,东塘子铅锌矿床的方铅矿 μ 值平均为9.72,比上地壳岩石 μ 值9.58略高(吴开兴等, 2002);方铅矿Th/U均值为3.85,略低于上地壳的全球均值3.88,但大于中国大陆上地壳平均值3.47(李龙等, 2001);其 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ (ω 值)平均为38.29,高于上地壳

的正常值(36.5),由此表明东塘子铅锌矿床矿石铅可能来自于富U-Th-Pb的上地壳。

在Doe and Zartman(1979)所提出的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上,东塘子铅锌矿床方铅矿数据位于造山带演化线附近,并且以线性分布为特征,反映铅源稳定(图6a);在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上,方铅矿数据主要位于上地壳线与造山带线间(图6b),也呈线性分布,结合印支期秦岭造山带碰撞造山地质过程,可以判定东塘子铅锌矿床的铅主要来源于上地壳以及造山过程中深源铅的加入。

在朱炳泉等(1998)提出的 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解可以较准确的追踪矿石铅的源区信息。东塘子铅锌矿床矿石铅主要分布于上地壳铅、上地壳与地幔混合的俯冲带铅(岩浆作用)的范围内(图7)。而本次测试数据与前人成果分别处于图中不同的成因范围,具有较大的差距,所以需要综合样品采样位置、样品特征进行分析。同一大型矿床不同位置矿体的铅同位素值存在一定差异(崔学军等, 2008),本研究收集的前人成果集中于本矿床开发的初期(20世纪90年代),采集的铅锌矿样品多来自出露于地表的铅洞山矿段,且样品位置多位于主矿体的翼部,本次所测试的样品来自隐伏于地表下的东塘子矿区,采样位置位于主矿体的鞍部厚大矿体中。同时本次测试数据与前人成果具有较为一致线型正相关关系,与

表3 东塘子铅锌矿床与洞中拉、栖霞山铅锌矿床特征对比

Table 3 The comparison between Dongtangzi, Dongzhongla and Qixiashan deposits

矿床	洞中拉铅锌矿床	栖霞山铅锌矿床	东塘子铅锌矿床
品位	Pb+Zn 平均 17.9%	Pb+Zn 平均 12.4%	Pb+Zn 平均 8.5%
规模	大型	大型	大型
赋矿层位	洛巴堆组灰岩与钙质板岩接触部位	主要分布于石炭系黄龙组灰岩与高丽山组砂岩接触界面	古道岭组深灰岩与星红铺千枚岩的过渡层
矿体埋深	大于 230 m	大于 700 m	倾斜埋深大于 800 m
构造背景	冈底斯-念青唐古拉板片之念青唐古拉中生代岛弧隆起带	扬子板块东段北缘与华北板块东段南缘相接地带	华北板块与扬子板块的夹持部位,南秦岭晚古生代裂陷盆地
控矿因素	受构造、地层、岩性控制	受构造、地层、岩性控制	受构造、地层、岩性控制
与岩浆活动的关系	与区内的花岗斑岩、灰绿玢岩有关	与区内白垩纪岩浆活动有关	与区内三叠纪岩浆活动有关
矿石结构构造	他形粒状结构、交代结构、共边结构、反应边结构及压碎结构;块状构造、浸染状构造、脉状构造	交代结构、粒状结构、镶嵌结构、压碎结构及骸晶结构;角砾状、块状、脉状、浸染状及网脉状构造	他形粒状结构、交代溶蚀、骸晶结构;块状、条带状、脉状、浸染状构造
矿物组合	矿石矿物:闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿。脉石矿物:石榴石、透辉石、石英、长石、方解石、绿泥石、绿帘石	矿石矿物:方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、菱锰矿、磁铁矿。脉石矿物:石英、方解石、白云石、铁白云石	矿石矿物:闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿。脉石矿物:石英、方解石、白云石、铁白云石、绢云母及绿泥石等
S同位素($\delta^{34}\text{S}$)	2.2‰~4.8‰	-4.6‰~3.8‰	-1.5‰~12.5‰,多数小于10‰
资料来源	费光春等, 2011	张明超等, 2017	本文

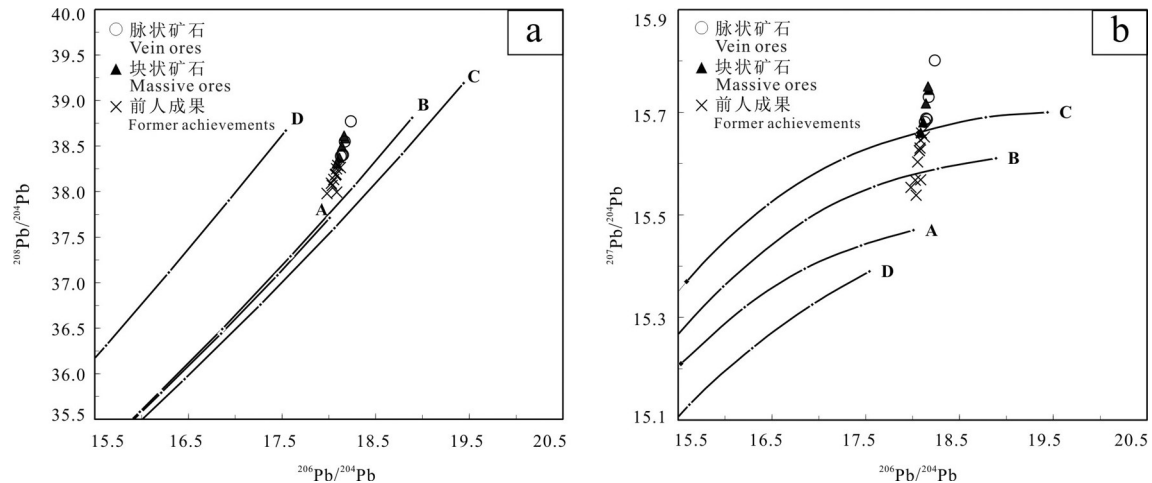


图6 东塘子铅锌矿床矿石铅同位素模式图(底图据Doe and Zartman,1979)

A—地幔;B—造山带;C—上地壳;D—下地壳

Fig.6 Pb isotopic composition model of the Dongtangzi Pb-Zn deposit (after Doe and Zartman,1979)

A—Mantle; B—Orogenic belt; C—Upper crust; D—Lower crust

铅同位素构造模式图(图6)中样品分布特征基本一致,表明东塘子铅锌矿床的铅主要来自上地壳与深部,深部岩浆活动可能提供铅源。

6.3 矿床成因与成矿作用机制

凤太矿集区铅锌矿床成因认识主要分歧在于成矿时代与成矿作用机制方面,前人将矿床成因定为热水喷流沉积(Sedex)型(王俊发等,1991;祁思敬等,1993;方维萱,1999),其年代学依据是方铅矿的单阶段模式年龄(400 Ma±),这个年龄正好与本区泥盆系地层形成时代相一致,符合了Sedex型矿床的同生沉积的特点。然而随着铅锌年代学测试技术的不断进步,近几年运用新测试手段获得的凤太矿集区内铅锌成矿时代多集中在226~198 Ma(Zhang et al., 2011;胡乔青等,2012,2015),胡乔青(2015)采用方铅矿Rb-Sr法获得东塘子铅锌矿床的成矿年龄为(211.6±6)Ma,说明了成矿时代为三叠纪而非泥盆纪。同时铅同位素单阶段模式年龄并不具有明确的成矿时代意义(费光春,2011)。因此从年代学意义上讲,凤太矿集区内的大中型铅锌矿床应该均为三叠纪成矿事件的产物。与230 Ma左右的大规模碰撞造山以及220~200 Ma的后碰撞阶段一致。

东塘子铅锌矿床作为凤太矿集区内最具代表性的矿床之一。从产出位置上看,东塘子铅锌矿床矿体受中泥盆统古道岭组灰岩与上泥盆统星红铺组千

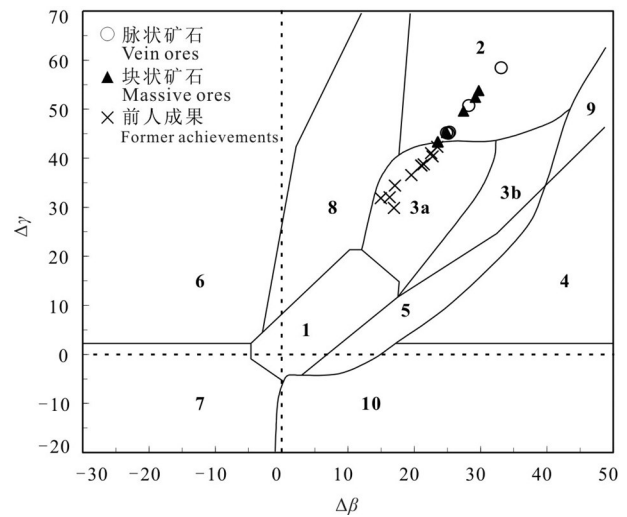


图7 东塘子铅锌矿床矿石铅 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因判别图解(据朱炳泉等,1998)

1—地幔源铅;2—上地壳铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用,3b—沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质铅

Fig. 7 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ genetic discriminate diagram of galena from the Dongtangzi Pb-Zn deposit (after Zhu Bingquan et al., 1998)
1—Lead sourced from mantle; 2—Lead sourced from upper crust; 3—Subducting lead sourced from upper crust and mantle (3a—magmatism; 3b—sedimentation); 4—Lead of chemical deposition; 5—Lead of submarine hot-water; 6—Mesometamorphism; 7—Lead of kata-metamorphism; 8—Lead of orogenic belt; 9—Lead of upper crust in ancient shale; 10—Lead of retrograde metamorphism

枚岩“硅钙面”控制,对矿石结构构造、矿石中黄铁矿电子探针分析、H-O同位素等研究(张革利等, 2018),均显示出了岩浆热液对成矿过程的贡献。加之本文对东塘子矿床矿石S、Pb同位素的研究,更进一步确定了三叠纪(印支期)岩浆活动在本区铅锌就位成矿中的重要地位。

南秦岭板块从晚二叠世到早三叠世进入闭合碰撞阶段,晚三叠世结束了主碰撞造山过程,进入造山后伸展演化阶段(陈浩,2016)。秦岭主造山期后,加厚的岩石圈具重力不稳定性,发生快速转换,导致岩石圈发生拆沉减薄并伴随地壳的快速隆升,从而使软流圈地幔基性岩浆上涌和深部物质上升,在此过程中地壳被加热并部分熔融形成中酸性岩浆。中酸性岩浆在其侵位过程中,富含挥发组分的流体以及少量Pb、Zn等金属元素在岩浆热动力的驱动下,沿着切穿基底的断裂上升,在此过程中活化萃取了基底地层中大量Pb、Zn、S等元素,并共同形成一种富含成矿物质的热液流体。含矿热液流体在热动力与构造减压机制的驱动下沿区内广泛发育的纵向断裂进行运移,当成矿流体运移至泥盆系古道岭组灰岩与星红铺组灰岩构成的“硅钙面”时,由于地层界面的物理化学性质显著差异,导致地球化学场中环境的骤然变化(张明超等,2017),金属矿物沉淀成矿。以上过程便是东塘子铅锌矿床的成矿作用机制。目前,虽然在矿区内并未控制到大规模岩浆岩体,但是在探矿坑道内广泛发育的NWW向花岗斑岩脉及NE向闪长玢岩脉,以及深部探矿工程控制到了斜厚约60 m的花岗斑岩脉,根据岩体与围岩的接触产状,目前推测真厚度30~40 m。暗示着东塘子矿床深部可能存在一定规模的隐伏岩体。随着探矿工作的进一步深入,将会为新的矿床成因认识提供更多证据。

7 结 论

(1)东塘子铅锌矿床硫同位素分析表明,矿石中的硫主要来源于海水硫酸盐(蒸发膏岩)热化学还原作用,印支期构造-岩浆活动产生的中酸性岩浆是矿石中硫的另一重要来源。

(2)矿石铅同位素组成稳定,经特征参数法判断为铅来自富铀-钍-铅的上地壳;通过Zartman R E铅构造环境演化图解和 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解分

析,认为矿石铅主要来自上地壳与深部。

(3)利用前人对矿石特征、成矿流体特征与本文S、Pb同位对成矿物质来源示踪的研究成果,结合区域构造成矿背景分析,认为东塘子铅锌矿床成因类型属于受中泥盆统古道岭组灰岩与上泥盆统星红铺组千枚岩“硅钙面”控制的热液型矿床,是印支期大规模多阶段构造-岩浆-流体活动的产物。

致谢:本文野外工作得到了宝鸡西北有色七一七总队有限公司地勘分院陆林军、王雷、李伟、代金龙、刘涛、李降印、马双宝、王欣等同志的热心帮助,成文过程中与成都理工大学地球科学学院倪志耀教授进行了有益探讨,审稿老师提出了有建设性的修改意见和建议。在此对以上同事、老师表示特别的感谢!

References

- Chen Hao. 2016. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution in the Northern Margin of South Qinling: Constraints from Geochronology and Isotopes[D]. Xi'an: Northwest University, 3-11(in Chinese with English abstract).
- Chen Haoshou. 1978. Theory and Method of determining ore age by lead isotopes[J]. Geology and Exploration, (7):11-22(in Chinese with English abstract).
- Chen Xingbin, Gao Jianguo, Liu Yan, Wang Wenyuan, Nong Yangxia. 2017. Characteristics of sulfur and lead isotopes in a Pre-Sinian lead-zinc deposit in Central Yunnan and their implications for origin of ore-forming material[J]. Geology and Exploration, 53(2):227-236(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China[J]. Geology in China, 37(4): 854-865(in Chinese with English abstract).
- Claypool G E, Holser W T, Kaplan I R, Sakai H, Zak I. 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation[J]. Cheyn. Geol., (28):199-260.
- Cui Xuejun, Li Zhonglan, Zhu Bingquan, Jiang Xiaowei, Wang Ran, Xu Lifeng. 2008. Application of Pb isotopes to evaluation of mineral resources: A case study of Yingzuishan gold deposit, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 27(1):88-100(in Chinese with English abstract).
- Doe B R, Zartman Z E. 1979. Plumbotectonics, the Phanerozoic[C]// Barnes H L(ed.). Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York: John Wiley, 22-70.
- Fang Weixuan.1998.The Analsys for the condition of continent kinetics of large and super large metal deposits in Qinling Orogcnic Zone[J]. Northwestern Geology, 19(3): 11-17(in Chinese with English abstract).
- Fang Weixuan. 1999. Research on mineral geochemistry of Qian-

- dongshan lead-zinc deposit, a large-sized deposit in fengxian county, shannxi[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 19(2): 198-205 (in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Duo Ji, Wen Chunqi, Yang Zhengxi, Long Xunrong, Zhou Xiong. 2011. S,Pb and Sr isotopic compositions for tracing sources of ore-forming materials in Dongzhongla lead-zinc deposit in Tibet[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(4):52-57(in Chinese with English abstract).
- Fu Chao, Wang Jianping, Peng Runmin, Liu Jiajun, Liu Zhenjiang, Liu Zheming. 2010. Features of sulfur isotope of the Jiashengpan lead-zinc-sulfur deposit in Inner Mongolia and its genesis significance[J]. *Geoscience*, 24(1):34-41(in Chinese with English abstract).
- Gong Tonglun, Yang Xingke.1990. Dynamic hydrothermal origin and prospecting guides of the Qiangongshan Pb-Zn deposite, Fengxian, Shaanxi[J]. *Geology and Exploration*, (10):7-13(in Chinese with English abstract).
- Hu Qiaoqing, Wang Yitian, Wang Ruiting, Li Jianhua, Dai Junzhi, Wang Shuangyan. 2012. Characteristics of ore-forming fluid in the Erlihe Pb-Zn deposit, Fengtai Mineral Cluster Region of Qinling Mountains[J].*Mineral Deposits*, 31 (s1):659-660(in Chinese with English abstract).
- Hu Qiaoqing, Wang Yitian, Wang Ruiting, Li Jianhua, Dai Junzhi, Wang Shuangyan, Wen Yaohui, Li Xia, Li Xuekai. 2013. Geological characteristics and genesis of the Bafang-shan- Erlihe Pb-Zn (-Cu) deposit in the Fengxian-Taibai Ore Concentration Area, West Qinling[J].*Geology and Exploration*, 49(1):99-112(in Chinese with English abstract).
- Hu Qiaoqing. 2015. The Mineralization Features, Mechanism and Metallogenic Regularity of the Fengtai Pb-Zn Polymetallic Ore Cluster in West Qinling, China[D]. *Chinese Academy of Geological Sciences*,1-157(in Chinese with English abstract).
- Jiang Xinming.1983. A discussion on the genesis and ore-forming mechanism of the Hogeqi Cu-Pb-Zn Deposit.[J].*Mineral Deposits*, 2(4):1-10(in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Wang Denghong, Zhang Changqing, Chen Yuchuan, Li Lixing. 2009. Characteristics of trace and rare earth elements in minerals from some typical lead-zinc deposits of Shaanxi Province[J].*Mineral Deposits*,28(4):434-448(in Chinese with English abstract).
- Li Long, Zheng Yongfei, Zhou Jianbo. 2001. Dynamic model for Pb isotope evolution in the continental crust of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1):61-68(in Chinese with English abstract).
- Liu Tingting, Tang Juxing, Liu Hongfei, Zhang Jinshu, Cui Xiaoliang, Gao Yiming. 2011. Sulfur and Lead Isotope Composition and Tracing for Sources of Ore-forming Materials in the Dongzhongla Pb-Zn Deposits in Mozhuogongka County, Tibet[J]. *Geoscience*, 25 (5):869-876(in Chinese with English abstract).
- Lu Rensheng, Wei Heming. 1990. The geological characteristics and genetic investigation of bafangshan stratabound polymetallic ores in shanxi Province[J]. *Journal of Xi'an college of Geology*,(4):10-17(in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Li Mingli, Wang Wei, Yu Zaiping, Shi Yongzhi. 2008. Indosinian movement and metallogenesis in Qinling orogenic belt [J]. *Mineral Deposits*, 27(6):762-773(in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit- A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 33(5):459-464(in Chinese with English abstract).
- Machel H G, Krouse H R, Sassen R. 1995. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction[J]. *Applied Geochemistry*, (10):373-389.
- Ohmoto H L, Rye R O.1979. Isotopes of sulfur and carbon[J]. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 509-567.
- Pinckney D M, Ralder T A. 1972. Fractionation of sulfur isotopes during ore-deposition in the upper Mississippi Valley Pb-Zn district[J]. *Economic geology*, 67(3): 311-328.
- Qi Sijing, Li Ying. 1993. Lead-Zinc Metallogenic Belt of Devonian System in Qinling Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House,1-239(in Chinese).
- Ren Peng, Liang Ting, Liu Kuolong, Niu Liang, Lu Lin, Zhang Wenjing. 2014. Geochemistry of sulfur and lead isotopic compositions of sedex lead-zinc deposits in Fengtai Mineral Cluster Region of Qinling Mountains[J].*Northwestern Geology*,47 (1):137-149(in Chinese with English abstract).
- Ren Peng, Liang Ting, Niu Liang, Lu Lin, Zhang Wenjing, Yang Zhao, Wang Chan, Cheng Yulong.2013.Geological characteristic and geodynamic process from Pb-Zn Deposit in Qinling of Shaanxi[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(1):34-47(in Chinese with English abstract).
- Tan Hongqi, Luo Liping, Xu Gang, Zhang Jiong, Hu Lin, Li Hai. 2017. Ore-forming material source of the Wuyi lead deposit in Sichuan Province: Constraints from geochemistry of sulfur, lead isotope and galena rare earth elements[J].*Geology and Exploration*, 53 (6):137-149(in Chinese with English abstract).
- Wang Jilei, He Bochi, Li Jianzhong. 1996. Qinling Type Lead and Zinc Mineral Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House,1-108(in Chinese with English abstract).
- Wang Jinghua, Zhang Fuxin, Yu Zaiping, Yu Lan. 2002. Minerogenetic series of metallic ore deposits in the Qinling Mountains and tectonodynamic background of the continental orogenic belts[J]. *Geology in China*, (2):192-196(in Chinese with English abstract).
- Wang Junfa, Zhang Fuxin, Yan Jincai, Chen Bei.1991.The Stratabound Metallic Ore Deposits in Qinling Devonian System[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press,1-98(in Chinese with English abstract).
- Wang Ruiting, Li Fanglin, Chen Erhu, Dai Junzhi, Wang Changan, Xu Xiaofeng. 2011. Geochemical characteristics and prospecting prediction of the Bafangshan-Erlihe large lead-zinc ore deposit,

- Feng County, Shaanxi Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3):779–793(in Chinese with English abstract).
- Wang Ruiting, Wang Tao, Gao Zhangjian, Chen Erhu, Liu Lixia. 2007. The main metal deposits metallogenic series and exploration direction in Feng– Tai Ore Cluster Region, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 40(2):77– 84(in Chinese with English abstract).
- Wang Wenyuan, Gao Jianguo, Liu Xinkai, Nong Yangxia, Chen Xinbin. 2018. Rb– Sr isotopic geochronology and C– O– S– Pb isotope geochemical characteristics of the Huangtian Pb– Zn deposit, Central Yunnan[J]. *Geology in China*, 45(3): 528– 543(in Chinese with English abstract).
- Wang Yitian, Wang Ruiting, Dai Junzhi, Li Jianhua, Wang Changan, Tian Minmin, Wen Bo. 2009. The strike– slip duplex and its significance of mineralization in Fengxian– Taibai ore cluster, western Qinling[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 188–189.
- Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, Tang Qunli. 2002. Ore lead isotopes as a tracer for ore– forming material sources: A review[J]. *Geology Geochemistry*, 30(3): 73– 81(in Chinese with English abstract).
- Yang Bin, Chen Zhengle, Zhang Qing, Zhou Zhenju, Han Fengbin, Zhang Wengao, Ma Ji, Zhang Tao. 2018. Geological characteristics and sulfur and lead isotopes of the Kanling lead–zinc deposit, Southern Tianshan Mountains[J]. *Geology in China*, 45(1): 155– 167(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fan, Liu Shuwen, Li Qiugen, Sun Yali, Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen. 2011. Re – Os and U – Pb geochronology of the Erlihe Pb – Zn Deposit, Qinling Orogenic Belt, Central China, and constraints on its deposit genesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 85(3):673–682.
- Zhang Fan. 2010. Magmatism and Mineralization of the Indosinian Period in the Fengtai Area, Qinling Mountains: Evidence of Geological Chronology and Geochemistry[D]. Beijing: Peking University, 1–33(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fuxin, Du Xiaohua, Wang Weitao, Qi Yalin. 2004. Mineralization responded to mesozoic geological evolution of the qinling orogen and its environs[J]. *Chinese Journal of Geology*, (4): 486–495(in Chinese with English abstract).
- Zhang Geli, Wang Ruiting, Tian Tao, Ding Kun, Gao Weihong, Guo Yongyong. 2018. Geological– geochemical characteristics and genesis of Dongtangzi Pb– Zn Deposit in Fengxian– Taibai ore concentration area of Shaanxi, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(5):520–534.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, Xiao Qinghui. 2001. Qinling Orogen and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1–855(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hai, He Mingyou, Li Fanglin, Wang Yuting, Tang Yao, Hou Chunqiu. 2011. Geological and geochemical evidence of the Erlihe SEDEX Pb– Zn Deposit in Fengxian, Shaanxi[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(1):64– 69(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology [M]. Xi’an: Shaanxi Science and Technology Press (in Chinese with English abstract), 1– 267(in Chinese with English abstract).
- Zhang Mingchao, Chen Renyi, Ye Tianzhu, Li Jingzhao, Lu Zhicheng, He Xi, Chen Hui, Yao Lei. 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 Zhenfei, Kui Heming. 1989. A Statistical Prediction of the Exploration Prospect of the Qiandongshan– Tanjiagou Pb– Zn Mining District, Shaanxi[J]. *Geology and Exploration*, 25(9): 31–36 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1–316(in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Mo, Chen Yuwei, Fan Sikun, Gui Xuntang, Wang Huifen. 1998. Theory and Application of Isotope System in Earth Science[M]. Beijing: Science Press, 1– 330(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈好寿. 1978. 铅同位素测定矿石年龄的理论与方法[J]. *地质与勘探*, (7): 11–22.
- 陈浩. 2016. 南秦岭北缘古生代及中生代构造演化的年代学和同位素制约[D]. 西安: 西北大学, 3–11.
- 陈欣彬, 高建国, 刘岩, 王文元, 依阳霞. 2017. 滇中前震旦纪地层内铅锌矿床硫、铅同位素特征及对成矿物质来源指示[J]. *地质与勘探*, 53(2):227–236.
- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. *中国地质*, 37(4): 854–865.
- 崔学军, 李中兰, 朱炳泉, 姜晓玮, 王冉, 徐力峰. 2008. 铅同位素在矿产资源评价中的应用——以甘肃省鹰嘴山金矿区为例[J]. *矿床地质*, 27(1):88–100.
- 方维萱. 1998. 秦岭造山带大型—超大型金属矿床形成大陆动力学条件分析[J]. *西北地质*, 19(3): 11–17.
- 方维萱. 1999. 陕西凤县铅铜山大型铅锌矿床矿物地球化学研究[J]. *矿物学报*, 19(2): 198–205.
- 费光春, 多吉, 温春齐, 阳正熙, 龙训荣, 周雄. 2011. 西藏洞中拉铅锌矿床S、Pb、Sr同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. *矿物岩石*, 31(4):52–57.
- 付超, 王建平, 彭润民, 刘家军, 柳振江, 刘哲铭. 2010. 内蒙古甲生盘铅锌矿床硫同位素特征及其成因意义[J]. *现代地质*, 24(1):34–41.
- 宫同伦, 杨兴科. 1990. 凤县铅铜山铅锌矿床动力热液成因标志与找矿方向[J]. *地质与勘探*, (10): 7–13.
- 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 李建华, 代军治, 王双彦, 文耀辉, 李霞, 李

- 雪凯. 2013. 西秦岭凤太矿集区八方山—二里河铅锌(铜)矿床成矿地质特征与矿床成因探讨[J]. 地质与勘探, 49(1): 99-112.
- 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 李建华, 代军治, 王双彦. 2012. 西秦岭凤太矿集区二里河铅锌矿床成矿流体特征[J]. 矿床地质, 2012, 31(s1): 659-660.
- 胡乔青. 2015. 西秦岭凤太矿集区铅锌多金属矿床成矿作用特征、机制与成矿规律[D]. 中国地质科学院, 1-157.
- 蒋心明. 1983. 内蒙霍各乞铜铅锌矿床成因及成矿机理[J]. 矿床地质, 2(4): 1-10.
- 李厚民, 王登红, 张长青, 陈毓川, 李立兴. 2009. 陕西几类重要铅锌矿床的矿物微量元素和稀土元素特征[J]. 矿床地质, 28(4): 434-448.
- 李龙, 郑永飞, 周建波. 2001. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. 岩石学报, 17(1): 61-68.
- 刘婷婷, 唐菊兴, 刘鸿飞, 张金树, 崔晓亮, 高一鸣. 2011. 西藏墨竹工卡县洞中拉铅锌矿床S、Pb同位素组成及成矿物质来源[J]. 现代地质, 25(5): 869-876.
- 卢欣祥, 李明立, 王卫, 于在平, 时永志. 2008. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 762-773.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459-464.
- 吕仁生, 隗合明. 1990. 八方山层控多金属矿床地质特征及成因探讨[J]. 西安地质学院学报, 12(4): 10-17.
- 祁思敬, 李英. 1993. 秦岭泥盆系铅锌成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1-239.
- 任鹏, 梁婷, 刘扩龙, 牛亮, 鲁麟, 张文璟. 2014. 秦岭凤太矿集区喷流沉积型铅锌矿床S、Pb同位素地球化学特征[J]. 西北地质, 47(1): 137-149.
- 任鹏, 梁婷, 牛亮, 鲁麟, 张文璟, 杨钊, 王婵, 程玉龙. 2013. 陕西秦岭铅锌矿床的地质特征及成矿动力学过程[J]. 地球科学与环境学报, 35(1): 34-47.
- 谭洪旗, 罗丽萍, 徐刚, 张迥, 胡林, 李海. 2017. 四川乌依铅矿床成矿物质来源: 硫、铅同位素和方铅矿稀土元素地球化学制约[J]. 地质与勘探, 53(6): 1051-1060.
- 王集磊, 何伯墀, 李建中. 1996. 中国秦岭型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1-108.
- 王靖华, 张复新, 于在平, 于岚. 2002. 秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J]. 中国地质, (2): 192-196.
- 王俊发, 张复新, 炎金才, 陈菩. 1991. 秦岭泥盆系层控金属矿床[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1-98.
- 王瑞廷, 李芳林, 陈二虎, 代军治, 王长安, 许小峰. 2011. 陕西凤县八方山—二里河大型铅锌矿床地球化学特征及找矿预测[J]. 岩石学报, 27(3): 779-793.
- 王瑞廷, 王涛, 高章鉴, 陈二虎, 刘莉霞. 2007. 凤太多金属矿集区主要金属矿床成矿系列与找矿方向[J]. 西北地质, 40(2): 77-84.
- 王文元, 高建国, 刘心开, 依阳霞, 陈欣彬. 2018. 滇中荒田铅锌矿床Rb-Sr同位素年代学与C-O-S-Pb同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 45(3): 528-543.
- 王义天, 王瑞廷, 代军治, 李建华, 王长安, 田民民, 汶博. 2009. 西秦岭凤太矿集区走滑双重构造及其控矿意义[J]. 矿物学报, 29(s1): 188-189.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 唐群力. 2002. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 30(3): 73-81.
- 杨斌, 陈正乐, 张青, 周振菊, 韩凤彬, 张文高, 马骥, 张涛. 2018. 南天山坎岭铅锌矿床地质特征及S、Pb同位素特征研究[J]. 中国地质, 45(1): 155-167.
- 张海, 何明友, 李方林, 王玉婷, 唐耀, 侯春秋. 2011. 陕西凤县二里河喷流沉积型铅锌矿床的地质地球化学证据[J]. 地球科学与环境学报, 33(1): 64-69.
- 张帆. 2010. 秦岭凤太地区印支期岩浆作用与成矿作用——地质年代学和地球化学的证据[D]. 北京: 北京大学, 1-33.
- 张复新, 杜孝华, 王伟涛, 齐亚林. 2004. 秦岭造山带及邻区中生代地质演化与成矿作用响应[J]. 地质科学, 39(4): 486-495.
- 张革利, 王瑞廷, 田涛, 丁坤, 高卫宏, 郭永永. 2018. 陕西凤太矿集区东塘子铅锌矿床地质-地球化学特征与成因[J]. 地球科学与环境学报, 40(5): 520-534.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1-855.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1-267.
- 张明超, 陈仁义, 叶天竺, 李景朝, 吕志成, 何希, 陈辉, 姚磊. 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.
- 张振飞, 隗合明. 1989. 凤太矿田铅铜山—谭家沟一带找矿远景统计预测[J]. 地质与勘探, 25(9): 31-36.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1-316.
- 朱炳泉, 李献华, 戴漠, 陈毓蔚, 范嗣昆, 桂训唐, 王慧芬. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1-330.