

doi: 10.12029/gc20180113

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.

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).

南天山坎岭铅锌矿矿床地质特征 及 S、Pb 同位素特征研究

杨斌^{1,2,3} 陈正乐^{1,2} 张青² 周振菊² 韩凤彬² 张文高² 马骥¹ 张涛¹

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队, 江西 赣州 341000)

摘要:坎岭铅锌矿床是中国新疆南天山造山带内典型的铅锌矿床之一, 矿床产于塔里木盆地西北缘柯坪隆起带内。通过野外地质调查和同位素研究发现: 矿床具有后生成矿特征, 赋矿围岩主要为上寒武统一奥陶系碳酸盐岩, 矿体主要受构造和围岩控制, 矿体形态以脉状、似层状和透镜状为主, 矿石矿物组合简单, 主要金属矿物为方铅矿和闪锌矿, 围岩蚀变较弱。矿石 S 同位素组成分布较宽 ($\delta^{34}\text{S} = -1\text{‰} \sim 12.2\text{‰}$), 硫主要来源于深部地幔及沉积地层; 矿石 Pb 同位素组成较为均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 17.262~17.269, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.571~15.675, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 38.062~38.396, 通过对比矿石与主要赋矿围岩的 Pb 同位素特征, 发现二者存在亲缘性, 说明成矿金属主要由沉积地层供给。综合矿床地质、地球化学特征, 初步认为坎岭铅锌矿床为赋存于台地碳酸盐岩中的 MVT 矿床。

关键词:矿床地质; S、Pb 同位素; 铅锌矿床; 南天山造山带

中图分类号: P618.42~43; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)01-0155-13

Geological characteristics and sulfur and lead isotopes of the Kanling lead–zinc deposit, Southern Tianshan Mountains

YANG Bin^{1,2,3}, CHEN Zhengle^{1,2}, ZHANG Qing², ZHOU Zhenju², HAN Fengbin²,
ZHANG Wengao², MA Ji¹, ZHANG Tao¹

(1. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. South Jiangxi Geological Survey Party of JBEDGMR, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: The Kanling lead–zinc deposit is one of the typical lead–zinc deposits in south Tianshan orogen, Xinjiang. It is located in the Kalpin uplift belt on the northwestern margin of the Tarim plate. Geological survey and isotope studies show that the host rocks of the deposit with epigenetic genesis are Upper Cambrian—Ordovician carbonate rocks, and the orebodies exhibit veined, stratoid and lenticular forms, mainly controlled by the fault and strata. Galena and sphalerite are the main ore minerals, with weak wall rock

收稿日期: 2016-11-06; 改回日期: 2017-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1403292)、国家科技支撑计划项目(2015BAB05B04)联合资助。

作者简介: 杨斌, 男, 1990 年生, 硕士生, 地质学专业, 构造地质学研究方向; E-mail: jxgzyb@163.com。

通讯作者: 陈正乐, 男, 1967 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿田构造方面的研究工作; E-mail: chenzhengle@263.net。

alteration. The characteristics of the sulfur isotope (in the range of -1% – 12.2%) imply that the sources of sulfur was mainly derived from the deep mantle and sedimentary strata, the Pb isotopic composition of the ore is more homogeneous, and the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios range from 17.262 to 17.269, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ from 15.571 to 15.675, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ from 38.062 to 38.396; the ore-forming metals were mainly derived from the sedimentary strata as compared with the Pb isotopic characteristics of the ore and the host rocks. Geological and geochemical characteristics of the deposit indicate that the Kanling lead–zinc deposit is a MVT deposit, which is hosted in the platform carbonate rocks.

Key words: deposit geology; sulfur and lead isotope; lead–zinc deposit; South Tianshan orogen

About the first author: YANG Bin, male, born in 1990, master candidate, majors in the study of geology; E-mail: jxgzyb@163.com.

About the corresponding author: CHEN Zhengle, male, born in 1967, professor, mainly engages in the study of orefield structure; E-mail: chenzhengle@263.net.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1403292) and National Science and Technology Support Program (No. 2015BAB05B04).

1 引 言

南天山造山带是中国重要的铅锌成矿带之一,具有良好的铅锌成矿背景(叶庆同等,1999;李博泉等,2006;张长青等,2014)。目前,在该成矿带上发现有诸如乌拉根铅锌矿床、沙里塔什铅锌矿床、霍什布拉克铅锌矿床和坎岭铅锌矿床等一系列大、中型铅锌矿床。

坎岭铅锌矿床是中国新疆南天山典型的铅锌矿床之一。矿床地理位置处于新疆乌什县东南约 58 km 处。矿床发现史较早,早在古代已有开采和冶炼,20 世纪 40 年代初期进行过初步调查,50 年代末和 70 年代初新疆地质局第八地质大队先后对其进行普查与详查,大致查明了矿床基本地质特征。最新勘查结果显示,坎岭铅锌矿床保有铅锌矿石资源量约为 3.7×10^8 kg, 达中型矿床规模,总体资源量不大。尽管如此,坎岭铅锌矿床在区域上具有典型性,是南天山众多铅锌矿床(点)的代表。前人研究显示,南天山内主要铅锌矿床的形成多与盆地内热卤水相关,如乌拉根铅锌矿床(祝新友等,2010;韩凤彬等,2012;李志丹等,2013)、沙里塔什铅锌矿床(张舒,2010)和霍什布拉克铅锌矿床(李志丹等,2010),而坎岭铅锌矿床的产出主要受断裂构造的控制,成矿作用与岩浆热液活动有关(叶庆同等,1999)。通过对坎岭铅锌矿床的解剖和成因分析,不仅有助于该矿床本身的找矿勘查,同时对区域成矿规律和找矿预测的研究都具有重要的指导意义。

前人研究多停留在矿床基本地质特征上,而对矿床成矿物质来源方面则没有涉及,特别是因缺乏

稳定同位素资料的支撑,尚无法准确判断成矿物质的来源,这在一定程度上制约了对该矿床成因的认识。本文在野外地质调查基础上,通过选取具代表性的矿石硫化物样品进行 S、Pb 同位素测试分析,结合矿床地质特征,分析其成矿物质来源,初步探讨矿床成因,以期为坎岭铅锌矿床下一步研究和勘查工作提供指导。

2 区域地质背景

坎岭铅锌矿床大地构造位置处于塔里木盆地西北缘柯坪隆起地块南部断褶区东南部位,分别夹于哈萨克斯坦—准噶尔板块和塔里木板块之间(图 1a)。

区内出露地层主要为古生界(包括寒武系上统、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系上统、二叠系)和新生界(含新近系与第四系),缺失中生界。其中,古生界以碳酸盐岩(含白云岩和灰岩)和砂岩为主,新生界主要由砂砾岩组成。区域上总体表现为一大型单斜构造(坎岭塔格大单斜),是东西向大背斜出露地表的其中一翼,其南翼褶皱轴部因被断层破坏而下陷,被新生代沉积盆地覆盖。此外,区域上还分布着印干背斜和印干向斜,二者均被印干断裂所破坏。近东西向的库如克玉祖木大断裂为区域上的主干断裂,该断裂分布于工作区以北,具有长期活动迹象;近南北向的印干大断裂伴随着区域性近东西向库如克玉祖木大断裂活动同样具有多期次构造活动。区域内南北向派生断层极为发育,且规模巨大,以坎岭断层和坎岭西断层为代表。其中,坎岭断层为坎岭铅锌矿床的主要控矿和容矿构造。区内岩浆岩不甚发育,仅在南部印干一带发

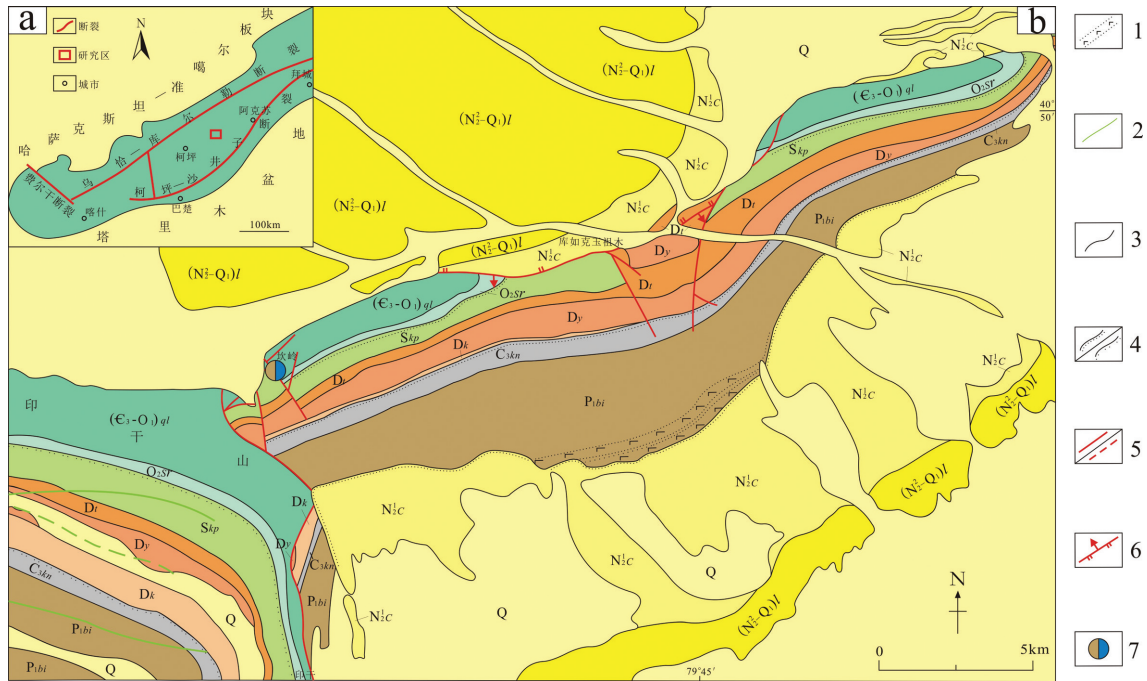


图1 坎岭地区大地构造位置图(a)(据张志斌,2007修改)和区域地质图(b)
(据新疆地质局区域地质测量大队,1961修改)

Q—第四系;(N₂-Q₁)l—新近系砾岩组;N_{1c}—新近系苍棕色组;P_{1bi}—下二叠统比尤列堤群;C_{3kn}—上石炭统康克林群;D(Dk,Dy,Dt)—泥盆系(克兹尔塔格组,衣木干他乌组,塔塔埃尔塔格组);Skp—志留统柯坪塔格群;O_{2sr}—中奥陶统萨尔干群;(C₃-O₁)ql—上寒武统一下奥陶统丘里塔格群;1—基性岩盖、岩床;2—基性岩墙;3—地质界线;4—角度不整合/平行不整合;5—实测/推测断层;6—逆断层;7—坎岭铅锌矿床

Fig.1 Tectonic location and regional geological map of Kanling area

Q—Quaternary;(N₂-Q₁)l—Neogene conglomerate Formation; N_{1c}—Neogene Cangzongse Formation; P_{1bi}—Lower Permian Biyoulieti Group; C_{3kn}—The upper Carboniferous Conklin Group; D (Dk,Dy,Dt)—Devonian (Keziertager Formation, Yimugantawu Formation, Tattaeltager Formation); Skp—Silurian Kalpintager Formation; O_{2sr}—The Middle Ordovician Saergan Group;

(C₃-O₁)ql—The upper Cambrian and lower Ordovician Qiulitag Group; 1—Basic laccolite, bedrock; 2—Mafic dyke; 3—Geological boundary; 4—Angle unconformity/parallel unconformity; 5—Measured/inferred fault; 6—Thrust fault; 7—Kanling lead-zinc deposit

育。其中,喷出岩以玄武岩熔岩为主,总体呈层状,具有间隔式喷发现象;侵入岩为辉绿岩,多沿断层侵入呈岩墙状与地层斜交,二者接触界线清晰(图1b)。

3 矿床地质特征

矿区内主要出露地层由老至新依次为上寒武统阿瓦塔格群(C_{3aw})、下奥陶统丘里塔格组(O_{1q})、中奥陶统萨尔干组(O_{2s})、上奥陶统印干组(O_{3y})、下志留统柯坪塔格组(S_{1k})、中上志留统吉布代布拉克群(S_{2-3jg})、泥盆系塔塔埃尔塔格组(Dt)、新近系—第四系砾岩组(N₂-Q₁)l和第四系(Q)(图2)。其中,上寒武统和奥陶系为主要赋矿地层。上寒武统分布于矿区北东部,岩性以白云岩为主,夹少量硅质条带,地层产状较缓,出露厚度达数百米;奥陶系在矿区内广泛出露,主要分布于矿区中部和东部,岩

性以灰岩为主,夹少量泥岩和页岩。

区内构造发育,表现为褶皱和断裂相叠加。坎岭倒转背斜分布于矿区北东侧,属坎岭塔格大单斜中的次级褶皱,其核部地层为下寒武统阿瓦塔格群(C_{3aw}),轴向为NEE。背斜北西翼被区域性大断裂(库如克玉祖木断裂)破坏而发生倒转;南翼地层依次由老至新为正常沉积。此外,在矿区中部西侧还发育有NE向小背斜,背斜核部地层为上奥陶统印干组(O_{3y}),向两侧地层逐步变新。背斜北东端被断层破坏而终止,南东翼产状平缓。矿区内除褶皱构造之外,还分布有纵横交错的断裂构造,近SN向的坎岭断层及其派生断层分布于矿区中央并控制着矿体的产出形态,与区域上库如克玉祖木大断裂的交汇处是矿体产出的重要部位。

值得指出的是,矿区内受断裂构造的作用,仅见有方解石脉沿断层面分布,围岩蚀变较弱,主要

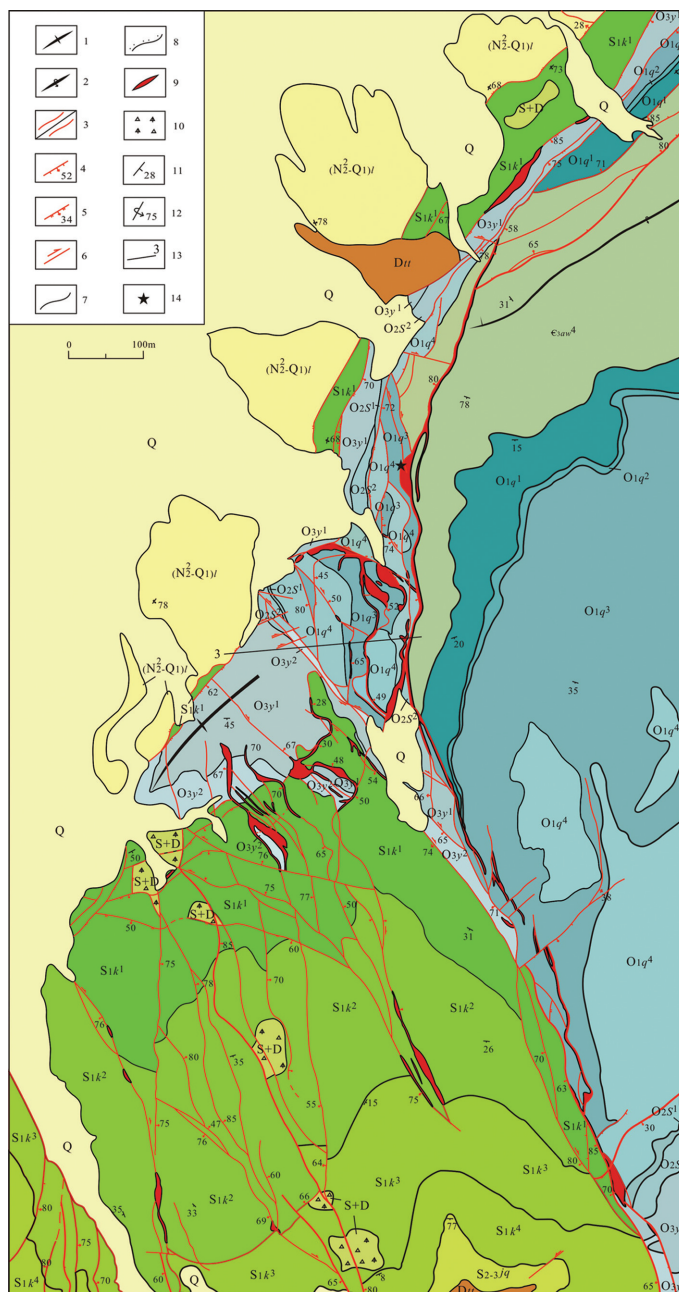


图2 坎岭铅锌矿床地质图(据新疆地矿局第八地质大队,2005修改)

Q—第四系;(N₂-Q₁)l—新近系—第四系砾岩组;Dr—塔塔埃塔克组;S+D—志留和泥盆系;S_{2-jg}—中上志留统;S_{1k}—下志留统柯坪塔格组(第一段、第二段、第三段、第四段);O_{3y}—上奥陶统印干组(第一段、第二段);O_{2s}—中奥陶统萨萨尔组(第一段、第二段);O_{1q}—下奥陶统丘里塔格组(第一段、第二段、第三段、第四段);C_{3aw}—上寒武统阿瓦塔格群(第四段);1—背斜轴;2—倒转背斜轴;3—实测/推测断层;4—张性正断层;5—压性逆断层;6—平移断层;7—地质界线;8—平行不整合;9—铅锌矿体;10—碎裂角砾岩;11—正常岩层产状;12—倒转岩层产状;13—3号地质剖面;14—采样位置

Fig.2 Geological map of the Kanling lead-zinc deposit

Q—Quaternary; (N₂-Q₁)l—Neogene—Quaternary Conglomerate Formation; Dr—Tattaeltager Formation; S+D—Silurian and Devonian; S_{2-jg}—Upper-Medium Silurian; S_{1k}—Lower Silurian Kalpintage Formation (the first section, second section, third section, fourth section); O_{3y}—Upper Ordovician Yingan Formation (the first and second stage); O_{2s}—Middle Ordovician Saergan (the first and second section); O_{1q}—Lower Ordovician Qiulitag Formation (the first section, second section, third section, fourth section); C_{3aw}—Upper Cambrian Avartag Group (the fourth section); 1—Anticline axis; 2—Overtaken anticline axis; 3—Measured/inferred fault; 4—Tensile normal fault; 5—Pressure thrust fault; 6—Strike slip fault; 7—Geological boundary; 8—Parallel unconformity; 9—Lead-zinc orebody; 10—Cataclastic breccia; 11—Stratigraphic attitude; 12—Overtaken stratigraphic attitude; 13—No. 3 geological section; 14—Sampling location

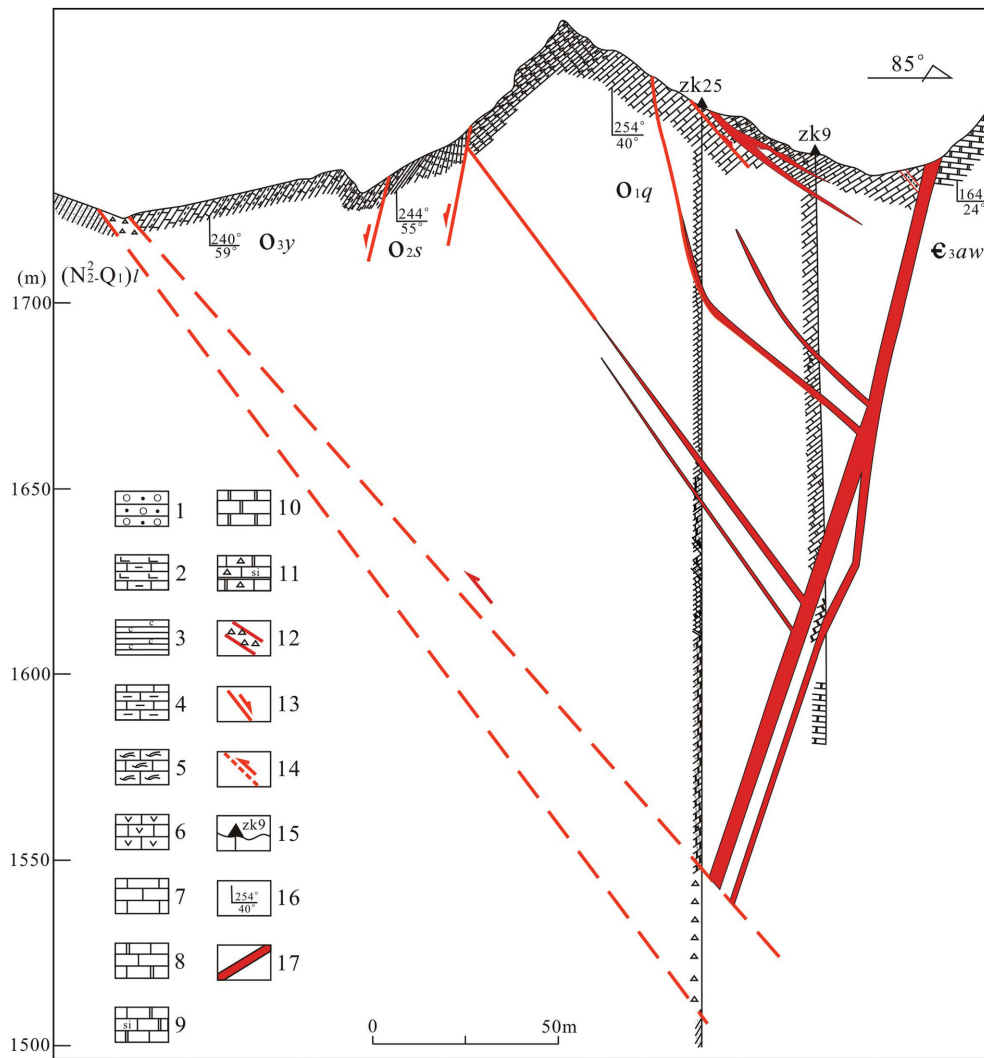


图3 坎岭铅锌矿床3号地质剖面图(据新疆地矿局第八地质大队,2005修改)

(N_2-Q_1) l —新近系砾岩组; O_{3y} —上奥陶统印干组; O_{2s} —中奥陶统萨尔干组; O_{1q} —下奥陶统丘里塔格组; C_{3aw} —上寒武统阿瓦塔格群;
 1—砾岩; 2—灰绿色薄层钙质泥岩与泥质灰岩互层; 3—黑色炭质页岩; 4—灰褐色薄层泥质灰岩; 5—灰色薄层燧石条带灰岩;
 6—灰色薄层海绿石灰岩; 7—浅灰色厚层灰岩; 8—浅灰色中厚层(含)白云质灰岩; 9—浅灰色中厚层含白云质硅质灰岩;
 10—暗灰色中厚层白云岩; 11—碎裂含白云质硅质灰岩; 12—构造破碎带; 13—正断层; 14—推测逆断层;
 15—钻孔及编号; 16—地层产状; 17—矿体

Fig.3 No. 3 geological section in the Kanling lead-zinc deposit

(N_2-Q_1) l —Neogene Conglomerate Formation; O_{3y} —Upper Ordovician Yingan Formation; O_{2s} —Middle Ordovician Saergan Formation;
 O_{1q} —Lower Ordovician Qiulitag Formation; C_{3aw} —Upper Cambrian Avartag Group; 1—Conglomerate; 2—Grayish green thin layer calcareous mudstone interbedded with muddy limestone; 3—Black carbonaceous shale; 4—Taupe thin layer muddy limestone; 5—Grayish thin layer limestone aschert bands; 6—Gray thin layer globulitic limestone; 7—Grayish and thick limestone; 8—Grayish middle-thick layer dolomitic limestone;
 9—Grayish middle-thick layer dolomitic siliceous limestone; 10—Dark gray middle-thick layer dolomite;
 11—Cataclastic dolomitic siliceous limestone; 12—Structural fracture zone; 13—Normal fault; 14—Inferred reverse fault;
 15—Drill hole and its serial number; 16—Strata attitude; 17—Orebody

为碳酸岩化,区内未见有岩浆岩出露(图2)。

坎岭铅锌矿床矿体主要受断裂构造和围岩性质控制。矿体总体分布于近南北向的坎岭断层及其派生断层中,赋矿围岩主要为上寒武统(C_{3aw})和奥陶系(O)碳酸盐岩(图2、图3)。通常石灰岩、白

云岩中容易形成富大块状矿石,而泥灰岩、砂岩中则形成浸染状矿石,矿体多沿断层呈脉状侵入围岩中(图4a),二者接触界线明显,具热液充填成矿特征。因矿体多沿断层分布,二者具有相同的产状。因此,受断层构造影响,矿体总体产状较陡,剖面上

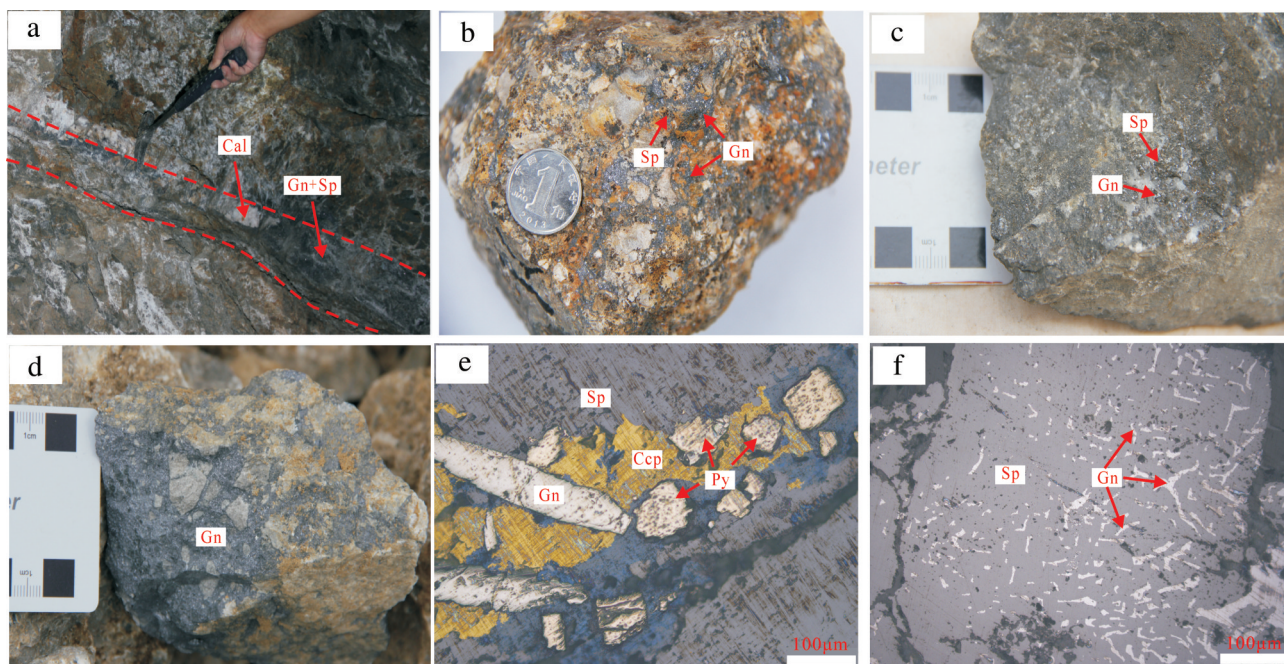


图4 坎岭铅锌矿床矿体、矿石特征

Gn—方铅矿;Sp—闪锌矿;Ccp—黄铜矿;Py—黄铁矿;Cal—方解石;

a—矿体沿断层产出;b—网脉状矿石,方铅矿呈网脉状交代闪锌矿;c—浸染状矿石;d—角砾状矿石(方铅矿呈胶状胶结围岩角砾);

e—矿石金属矿物组合;f—闪锌矿中方铅矿呈蠕虫状出融

Fig.4 Orebody and texture of the Kanling lead-zinc deposit

Gn—Galena;Sp—Sphalerite;Ccp—Chalcopyrite;Py—Pyrite;Cal—Calcite;

a—Orebody attitude along fault;b—Stockwork ore;galena was stockwork metasomatized sphalerite;c—Disseminated ore;d—Brecciated ore, galena is gelatinous rubbery breccia;e—Metallic mineral assemblage of the ore;f—Galena as vermicular out of the sphalerite

主矿体与其分支矿体常形成“Y”字型构造(图3)。单个矿体呈脉状、似层状、透镜状、囊状和不规则状产出,局部可见分支再现或尖灭现象。矿床为铅、锌多金属矿床,除方铅矿和闪锌矿外,还伴有铜矿化,二者具垂直分带现象,通常铅、锌矿体产于铜矿化之下,而铜矿化多出露于浅地表。

坎岭铅锌矿床矿体产于以灰岩为主的碳酸盐岩和泥灰岩、砂岩中,矿石类型主要有:(1)角砾岩型网脉状矿石,矿脉为胶状方铅矿,多呈网脉状沿灰岩(图4d)或是先成矿物闪锌矿(图4b)构造裂隙中充填,形成角砾状构造,成矿流体沿围岩裂隙充填并胶结脆性碎裂的碳酸盐岩角砾,显示出后生成矿特征;(2)碎屑岩型浸染状矿石(图4c),矿石结构以中—细粒为主,浸染状构造,金属硫化物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿和黄铁矿,呈浸染状均匀散布于碎屑岩中。

通过野外矿床地质特征和矿石手标本及镜下特征可以得知,坎岭铅锌矿床存在热液成矿期和表

生氧化成矿期两个期次。其中,热液成矿期形成的矿石矿物组合简单,主要金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿等(图4e),非金属矿物主要为方解石和石英,矿石具有粒状、交代溶蚀和包含结构等,块状、网脉状、浸染状和角砾状构造;表生氧化成矿期常形成孔雀石、蓝铜矿、辉铜矿、菱锌矿和石膏等,矿石主要以土状和皮壳状构造为主。

镜下闪锌矿可见环带结构,其中常见放射状、乳滴状、蠕虫状方铅矿(图4f)和乳滴状黄铜矿出融形成固熔体分离结构;方铅矿形态多样,主要呈胶状形式产出,常穿插、交代先形成的闪锌矿形成包含结构,也有半自形—自形粒状或不规则棱角状产出于闪锌矿中,方铅矿三组节理切割常形成黑三角脱落孔隙;黄铜矿呈不规则粒状、集合体呈团块状产于闪锌矿中,有时见黄铜矿呈胶状沿闪锌矿裂隙分布;黄铁矿受后期构造—热液影响,晶形多被破坏,常呈半自形、不规则状产出,亦可见胶状交代方铅矿产出。矿石中见成矿晚期乳白色方解石呈细脉状、网脉状及

表1 坎岭铅锌矿床S同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic composition of the Kanling lead-zinc deposit

序号	样品特征	样品号	测定对象	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	测定对象	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	脉状矿石	U1524-1B	方铅矿	0.2	闪锌矿	1.0
2	块状矿石	U1527-1A	方铅矿	1.5	闪锌矿	0.6
3	块状矿石	U1527-1B	方铅矿	1.8	闪锌矿	1.0
4	块状矿石	U1527-1C	方铅矿	2.3	闪锌矿	0.6
5	块状矿石	U1527-1D	方铅矿	2.0	闪锌矿	-0.1
6	块状矿石	U1527-1E	方铅矿	-0.7	闪锌矿	-0.3
7	块状矿石	U1527-1F	方铅矿	-0.4	闪锌矿	-0.3
8	脉状矿石	U1527-2A	方铅矿	0.8	闪锌矿	2.7
9	脉状矿石	U1527-2C	方铅矿	-0.6	闪锌矿	0.2
10	脉状矿石	U1527-2D	方铅矿	0.1	闪锌矿	1.7
11	脉状矿石	U1527-2E	方铅矿	-1.0	闪锌矿	1.7
12	块状矿石	U1527-2F	方铅矿	0.1	闪锌矿	1.2
13	脉状矿石	U1527-3A	方铅矿	12.2		
14	脉状矿石	U1527-3D	方铅矿	8.6		
15	脉状矿石	U1527-4A	方铅矿	5.0		
16	角砾状矿石	U1527-4B	方铅矿	10.5		
17	灰岩	K16102-2	全岩	21.1		
18	灰岩	K16102-4	全岩	23.3		
19	灰岩	K16103-2	全岩	18.5		
20	砂岩	K16104-1A	全岩	16.3		
21	砂岩	K16104-1C	全岩	28.6		

注:矿石S同位素组成在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,全岩S同位素组成在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

不规则状穿插于先成矿物或围岩之中。

4 样品及其分析方法和结果

本次用于S、Pb同位素测试的样品均采自坎岭铅锌矿区坑道中,所采样品新鲜,基本未受次生污染和风化。实验分别选取矿石硫化物及主要赋矿围岩进行,其中,矿石硫化物中分别选取闪锌矿和方铅矿进行,赋矿围岩则分别选取灰岩和砂岩进行测试。

首先将矿石测试样品人工初步破碎至60~80目,肉眼挑选闪锌矿和方铅矿单矿物颗粒,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。同样,将围岩(灰岩、砂岩)测试样品人工初步破碎至60~80目,再用特制玛瑙碾钵粉碎至200目。上述样品制备期间,分别用纯净水和酒精进行反复清洗,保证样品未受次生污染。矿石硫化物S同位素组成在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室采用MAT-253气体稳定同位素质谱仪测定,全岩S同位素组成在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,测定数据以国际硫同位

素V-CDT为标准,测试误差范围在 $\pm 0.2\text{‰}$,测试结果见表1;矿石硫化物和全岩Pb同位素组成在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,仪器型号为Phoenix热表面电离质谱仪,测试精度为 2σ ,Pb同位素组成分析结果见表2。

4.1 硫同位素

由表1数据可知,坎岭铅锌矿床矿石硫化物S同位素组成变化范围较大($\delta^{34}\text{S}=-1\text{‰}\sim 12.2\text{‰}$),极差达13.2‰,且明显富集重硫。其中,除U1527-3A、U1527-3D、U1527-4A和U1527-4B四个样品外,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化不大,主要集中于 $-1\text{‰}\sim 2\text{‰}$,其中方铅矿 $\delta^{34}\text{S}=-1\text{‰}\sim 2.3\text{‰}$,平均值为 0.5‰ ;闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}=-0.3\text{‰}\sim 2.7\text{‰}$,平均值为 0.8‰ 。由此可见,矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体具有 $\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿 $<$ $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌矿的特征,但部分样品存在同一样品中的 $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌矿 $<$ $\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿的现象,表明坎岭铅锌矿床主要金属硫化物从成矿流体中沉淀出来时硫同位素分馏并未达到平衡(郑永飞等,2000;韩吟文等,2003;陕亮等,2009)。主要赋矿围岩(灰岩和砂岩)的S同位素组成为 $16.3\text{‰}\sim 28.6\text{‰}$,平均值为 21.6‰ ,总体 $\delta^{34}\text{S}$ 值较大。

4.2 铅同位素

由表2数据可知,坎岭铅锌矿床24件矿石硫化物样品的Pb同位素组成相对均一,且同一矿石样品中方铅矿和闪锌矿Pb同位素组成变化较小。矿石硫化物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为17.262~17.779,平均为17.698, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.571~15.675,平均为15.620, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.062~38.396,平均为38.229。其中,方铅矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别为17.262~17.779,15.571~15.675,38.062~38.396,平均值分别为17.677,15.629,38.257;闪锌矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别为17.704~17.752,15.578~15.637,38.090~38.284,平均值分别为17.728,15.608,38.189。5件围岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为17.735~19.450,平均为18.319, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.557~15.638,平均为15.602, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.009~38.371,平均为38.164。

5 讨论

5.1 成矿物质来源

硫同位素在自然界中分布广泛,分馏效应明

表2 坎岭铅锌矿床Pb同位素组成
Table 2 Lead isotopic compositions of the Kanling lead-zinc deposit

序号	样品号	名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
1	U1524? 1B	方铅矿 ⁺	17.746	15.631	38.268	9.61	22.95	51.3
2	U1527? 1A	方铅矿 ⁺	17.74	15.623	38.24	9.6	22.4	50.32
3	U1527? 1B	方铅矿 ⁺	17.746	15.63	38.267	9.61	22.88	51.22
4	U1527? 1C	方铅矿 ⁺	17.317	15.655	38.338	9.75	27.24	68.38
5	U1527? 1D	方铅矿 ⁺	17.748	15.635	38.281	9.62	23.24	51.8
6	U1527? 1E	方铅矿 ⁺	17.748	15.652	38.34	9.66	24.49	54.29
7	U1527? 1F	方铅矿 ⁺	17.748	15.635	38.282	9.62	23.24	51.83
8	U1527? 2A	方铅矿 ⁺	17.697	15.571	38.062	9.5	18.8	44.16
9	U1527? 2E	方铅矿 ⁺	17.74	15.626	38.241	9.6	22.62	50.5
10	U1527? 2F	方铅矿 ⁺	17.75	15.634	38.279	9.62	23.15	51.63
11	U1527? 3A	方铅矿 ⁺	17.262	15.636	38.277	9.72	26.17	67.55
12	U1527? 3D	方铅矿 ⁺	17.736	15.609	38.193	9.57	21.39	48.44
13	U1527? 4A	方铅矿 ⁺	17.725	15.59	38.137	9.53	20.05	46.29
14	U1527? 4B	方铅矿 ⁺	17.779	15.675	38.396	9.7	26.02	55.99
15	U1527? 1A1	闪锌矿 ⁺	17.741	15.628	38.249	9.61	22.76	50.79
16	U1527? 1B1	闪锌矿 ⁺	17.722	15.601	38.167	9.56	20.87	47.77
17	U1527? 1C1	闪锌矿 ⁺	17.707	15.581	38.099	9.52	19.48	45.37
18	U1527? 1D1	闪锌矿 ⁺	17.752	15.637	38.284	9.63	23.36	51.85
19	U1527? 1E1	闪锌矿 ⁺	17.739	15.622	38.236	9.6	22.33	50.19
20	U1527? 1F1	闪锌矿 ⁺	17.718	15.596	38.149	9.55	20.53	47.15
21	U1527? 2A1	闪锌矿 ⁺	17.72	15.599	38.167	9.55	20.74	47.74
22	U1527? 2C1	闪锌矿 ⁺	17.735	15.62	38.226	9.59	22.2	49.95
23	U1527? 2E1	闪锌矿 ⁺	17.737	15.618	38.221	9.59	22.04	49.64
24	U1527? 2F1	闪锌矿 ⁺	17.704	15.578	38.09	9.51	19.28	45.06
25	K16102? 2	灰岩	17.739	15.587	38.121	9.52	19.76	45.24
26	K16102? 4	灰岩	18.923	15.638	38.371	9.49	19.85	24.03
27	K16103? 2	灰岩	19.45	15.635	38.154	9.45	19.65	18.24
28	K16104? 1A	砂岩	17.747	15.594	38.167	9.54	20.24	46.61
29	K16104? 1C	砂岩	17.735	15.557	38.009	9.46	17.59	40.76

注:Pb同位素组成在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

显,在热液成矿研究中发挥着重要作用。前人(Chaussidonetal.,1990;陕亮等,2009;温春齐等,2009)研究发现,硫化物矿床中S的来源主要有三种:(1)地幔或岩浆硫,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值在0附近,变化范围较小,与陨石硫类似;(2)地壳硫,在沉积、变质和岩浆作用过程中,地壳物质的硫同位素具有很大的变化范围,通常海水或海相硫酸盐的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 为正值,而生物成因的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 为负值;(3)混合硫,岩浆自地幔上升侵位过程中混染了周围地壳物质,具有多种不同硫源的混合特征。因此,通过测定硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 的值能够有效地示踪成矿物质来源、成矿流体搬运及成矿机制等,进而预测矿床成因。

坎岭铅锌矿床矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围较宽,且多数显示为正值,具有相对富集重硫的特征。由图5可知,矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值集中在

-1‰~3‰,只少数样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值较大,偏离主体范围,总体表现出具有岩浆硫特征,表明矿石中的S主要来源于深部地幔。由于矿床附近未见岩浆岩出露,结合区域上库如克玉祖木大断裂及印干断裂具有长期活动迹象,且矿床内坎岭断层及其分支呈高角度纵贯全区,据此推测矿石中的S可能为深部流体经去气作用后 SO_2 等气体沿断裂上升至浅部的结果。此外,由表1可知,坎岭铅锌矿床主要赋矿围岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值较大,分布在16.3~28.6,平均值为21.56,加之矿床附近的中寒武统阿瓦塔格组具有膏盐层分布(张臣等,2001;吕修祥等,2014),这些均可为铅锌成矿提供潜在的硫源,据此推测矿石的S源还可能由地层硫的加入。综上可知,坎岭铅锌矿床矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围较宽,S源主要由深部地幔供给,同时混有少量地层硫的加入(图6)。

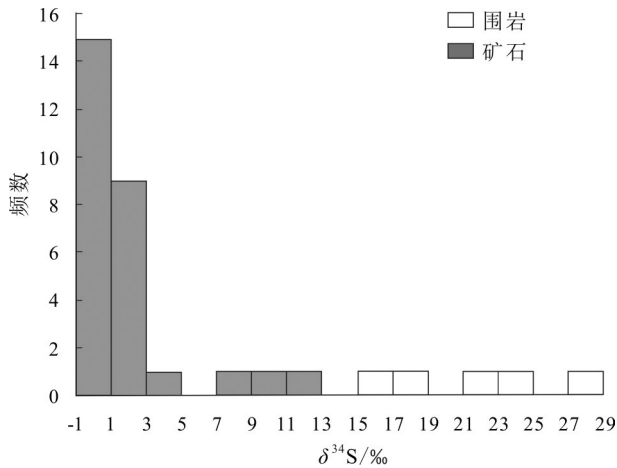


图5 坎岭铅锌矿床S同位素组成频率直方图
Fig.5 Histogram of sulfur isotopic compositions in the Kanling lead-zinc deposit

矿石Pb同位素组成能够准确提供矿床成矿物质来源信息(Zartmanetal.,1981;吴开兴等,2002;张长青等,2006),进而为探讨矿床成因提供依据。这对Pb同位素的研究尤为重要,并在矿床研究中得以广泛应用。坎岭铅锌矿床Pb同位素比值变化范围较小,说明矿床成矿物质Pb的来源单一或为混合来源,但在沉淀成矿时已达均一状态(李文博等,2006)。将坎岭铅锌矿床29件矿石硫化物和围岩样品的Pb同位素组成投入铅构造模式图中(图7),图解显示,除U1527-1C和U1527-3A两个样品外,其

余矿石硫化物样品投点之间具有明显的一致性,且与围岩Pb同位素组成存在大斜率线性关系,这种线性变化趋势可以解释为矿石Pb具有混合来源(CanalsAetal.,1997;蒋少涌等,2006;马圣钡等,2012;任鹏等,2014)。此外,围岩样品中除K16102-4和K16103-2的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值较大,与其余样品偏离较大,导致这种现象的原因可能是样品中含有较多的放射性成因铅,其余样品铅同位素组成十分均一,总体落入造山带与上地壳附近和造山带与下地壳演化线之间(图7),表现出矿石硫化物与围岩铅同位素组成具有一致性,且二者存在良好的线性关系,暗示两者之间具有亲缘性,围岩地层提供了较多的Pb源。

一般认为,铅同位素源区特征值μ值能够提供地质体经历地质作用的信息,反映铅的来源(刘婷婷,2011)。高μ值(大于9.58)的铅通常被解释为来源于上地壳(吴开兴,2002)。从表2可知,矿石铅同位素特征值μ值介于9.50~9.75,平均值为9.60,且大部分μ值高于9.58,显示矿石铅源具有上地壳物质特征,但也存在少数样品μ值小于9.58,反映矿石Pb主要来源于上地壳,同时具有深源Pb混入。

朱炳泉等通过搜集不同地方、不同时代的Pb同位素组成资料发现,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb的比值变化能够很好的反映成矿物质Pb的源区特征,并以此构建了矿石铅同位素的Δβ-Δγ图解,为矿床成因分

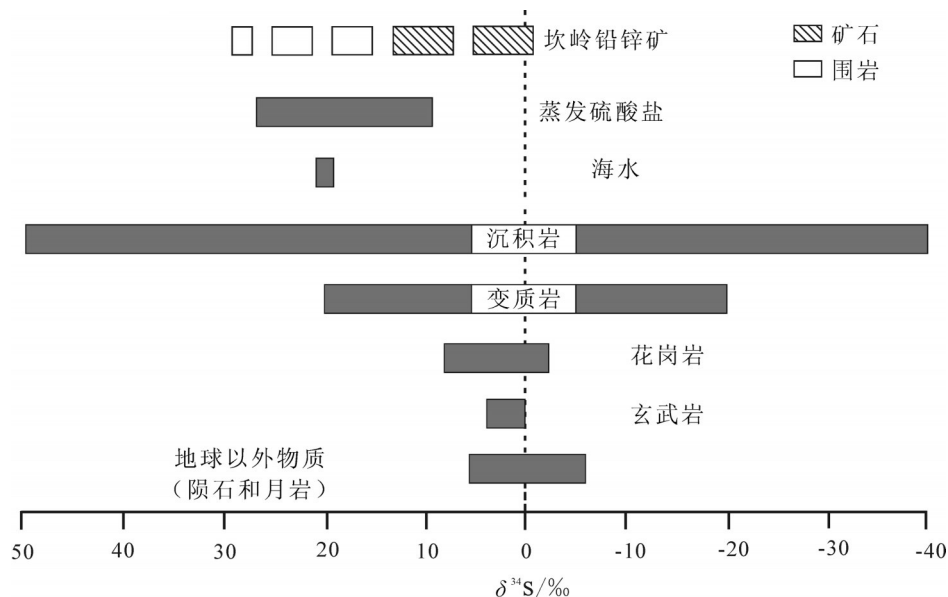


图6 坎岭铅锌矿床S同位素组成(底图据Hoefs,1980)
Fig.6 Sulfur isotopic compositions of the Kanling lead-zinc deposit(after Hoefs, 1980)

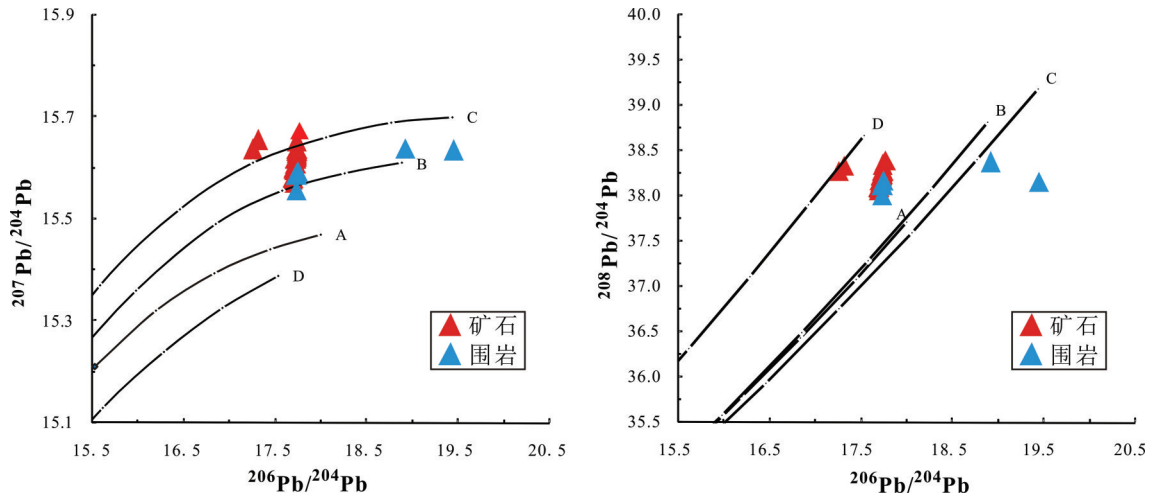


图7 坎岭铅锌矿床矿石铅同位素构造模式图(据 Zartman et al., 1981)

A—地幔;B—造山带;C—上地壳;D—下地壳

Fig.7 Pb isotopic tectonic model for the Kanling lead-zinc deposit(after Zartman et al., 1981)

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

类提供了方便可行的划分方案(朱炳泉等,1998)。从坎岭铅锌矿床矿石Pb同位素组成 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解(图8)中可见:24件矿石硫化物样品全部落在上地壳铅范围内,且靠近造山带铅和上地壳与地幔混合的俯冲带铅附近,表明坎岭铅锌矿床矿石Pb主要来源于上地壳,同时可能混有部分地幔铅来源。

通常认为硫化物中基本不含U、Th等放射性成因铅的母体放射性元素(张乾等,2000;李随民等,2016),硫化物一旦结晶形成,其铅同位素比值基本保持不变,因此矿石铅同位素比值的高低主要取决于成矿流体系统,即取决于提供成矿流体的铅源、参与水岩相互作用的赋矿围岩和流体运移通道。综上所述,坎岭铅锌矿床矿石Pb同位素特征指示金属物质Pb具有混合来源特征,矿石与围岩Pb同位素特征显示二者之间存在亲缘性,说明成矿金属元素主要来源于具有高Pb、Zn背景值的古生代沉积地层。

5.2 矿床成因

前人对坎岭铅锌矿床的研究多停留在矿床基本地质特征上,而对成矿流体的性质和成矿物质来源缺乏研究,尚无法确定矿床成因。叶庆同等根据矿体多沿断层面分布,呈脉状穿切围岩地层,具有后生成矿特征,加之矿区南部15 km处的下二叠统比尤列提群中见基性火山岩出露,据此认为矿床受断裂构造控制明显,地层层位影响不大,推测矿床成矿作用与岩浆热液活动有关,为岩浆热液型矿床

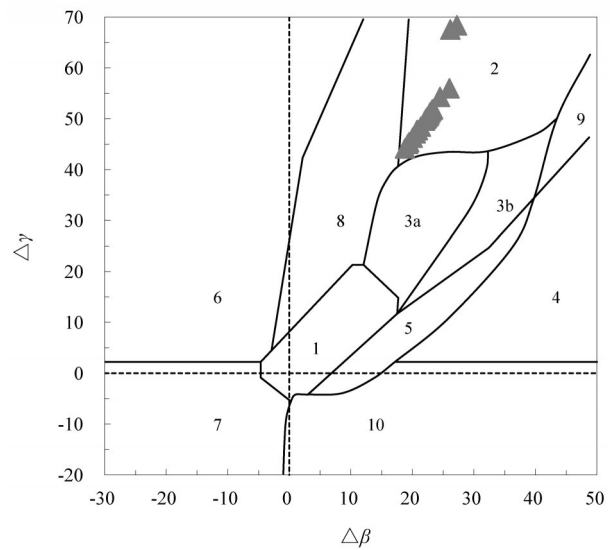


图8 坎岭铅锌矿床铅同位素 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解(据朱炳泉等,1998)

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.8 Plot of $\Delta\beta-\Delta\gamma$ of Pb isotope of ores from the Kanling lead-zinc deposit (after Zhu et al., 1998)

1—Lead of the mantle source; 2—Lead of the upper crust; 3—Lead of the mixed upper crust-mantle subduction (3a—Magmatism; 3b—Sedimentation); 4—Lead of chemical deposition; 5—Lead of hydrothermal sedimentation; 6—Lead of medium-deep metamorphism; 7—Lead of deep metamorphic crust; 8—Lead of orogenic belt; 9—Lead of oldest crust shale; 10—Lead of degeneration

表3 坎岭铅锌矿床与密西西比河谷型(MVT)型和沉积喷流型(SEDEX)铅锌矿床基本地质特征对比
Table 3 Basic characteristics of the Kanling lead-zinc deposit in comparison with MVT and SEDEX deposit

矿床类型	SEDEX型	MVT型	坎岭铅锌矿床
构造背景	克拉通内部裂谷或被动大陆边缘裂陷盆地	造山带内侧的前陆盆地和前陆逆冲褶皱带内	南天山晚古生代前陆逆冲推覆带
与岩浆活动关系	基本无关	无关	基本无关
成矿方式	同生成矿	后生成矿	后生成矿
矿体形态	层状、似层状、网脉状	似层状、透镜状、筒状、脉状	脉状、透镜状、网脉状
赋矿围岩	碎屑岩为主, 碳酸盐岩	碳酸盐岩为主, 次为碎屑岩	主要为碳酸盐岩, 其次为砂岩
矿石矿物组合	黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、毒砂	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿
矿石构造	条带状、纹层状、角砾状	块状、浸染状、胶状、角砾状	块状、胶状、角砾状、浸染状
围岩蚀变	白云岩化、云英岩化、绿泥石化、绢云母化	碳酸盐化、有机质化; 少量硅化; 偶见粘土化、云母化	碳酸盐化、硅化、重晶石化及泥化
S同位素特征	分布范围较广, 主要来源于海相硫酸盐	主要来源于沉积地层中的蒸发岩及海水中的硫酸盐	主要来源于深部地幔, 以及沉积地层
Pb同位素特征	来源多样, 主要来源于地壳	主要来自于(地壳)沉积地层中	来源多样, 主要来源于沉积地层

注: MVT和SEDEX型铅锌矿床基本地质特征据参考文献(Leach et al., 1993, 2005, 韩发等, 1999)。

(叶庆同等, 1999)。也有人根据矿床分布于沉积岩中, 周围无岩浆活动迹象, 未发现岩浆岩出露, 认为矿床形成与岩浆活动无关, 据此将坎岭铅锌矿床划归为沉积-改造型层控铅锌矿床(彭守晋等, 1985)。

坎岭铅锌矿床是南天山造山带内赋存于沉积岩中的典型矿床之一。矿床成矿方式为后生充填交代成矿, 围岩蚀变较弱, 矿体严格受断裂构造控制, 多呈脉状、透镜状和网脉状产出, 且对围岩具有一定的选择性, 矿石矿物组合简单, 以方铅矿、闪锌矿为主, 少量黄铜矿和黄铁矿, 矿石构造主要有胶状、块状、角砾状和浸染状, 围岩交代蚀变较弱。

Leach等根据赋矿围岩、成矿元素组合、成矿流体性质的不同以及成矿作用过程的差异, 将产于沉积岩中的铅锌矿床分为密西西比河谷型(MVT)型和沉积喷流型(SEDEX)两种类型(Leach et al., 2005)。坎岭铅锌矿床与密西西比河谷型(MVT)型和沉积喷流型(SEDEX)铅锌矿床基本地质特征对比见表3。

由表3可知, 坎岭铅锌矿床在构造背景、成矿方式、矿体形态、赋矿围岩、矿石矿物组合、矿石组构以及围岩蚀变等基本地质特征上均显示与密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床基本一致, 而与沉积喷流型(SEDEX)铅锌矿床相差较大。S、Pb同位素地球化学特征显示矿床成矿物质主要来源于赋矿围岩, 地幔深部流体经去气作用SO₂等气体沿断裂上升为成矿所需的S提供了主要来源, 成矿作用与岩浆活动基本无关。此外, 前人(吕修祥等, 2014)对柯坪地区油气勘探前景评价显示, 区域内具有良好的生油、储油条件, 柯坪冲断带青松采石场奥陶系可见

油苗渗流, 据此推测成矿流体可能与热卤水有关, 热卤水参与了成矿作用。因此, 综合矿床地质、地球化学特征, 初步认为坎岭为密西西比型(MVT)铅锌矿床。

6 结 论

坎岭铅锌矿床是南天山造山带内赋存于沉积岩中的典型矿床之一。矿床具有后生充填交代成矿, 矿体严格受断裂构造控制, 对围岩具有一定的选择性, 主要产于碳酸盐岩地层中, 矿石矿物组合简单, 以及围岩蚀变较弱等特征。矿石S同位素特征指示矿石中的S主要来源于深部地幔以及地层硫的加入; 矿石Pb同位素特征指示金属物质Pb具有混合来源特征, 但主要来源于上地壳, 矿石与围岩Pb同位素特征显示二者之间存在亲缘性, 说明成矿金属元素主要由具有高Pb、Zn背景值的围岩地层的供给。综合矿床地质、地球化学特征, 初步认为坎岭铅锌矿床是南天山造山带内赋存于台地碳酸盐岩中, 成矿物质主要来源于赋矿围岩, 矿床成因与岩浆活动基本无关而与盆地热卤水密切相关的浅成后生脉状MVT铅锌矿床。

致谢: 本文在写作过程中得到东华理工大学潘家永教授的悉心指导, 审稿专家及责任编辑对本文提出了宝贵的意见, 在此特致谢意!

References

Canals A, Carrlloch E. 1997. Ore lead and sulfur isotopic pattern from the low temperature veins of the catalonian coastal range, NE

- Spain [J]. *Mineralium Deposit*, 32(3): 243–249.
- Chaussidon M, Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel herzolite massifs from Ariege (North– Eastern Pyrenees, France): Anion microprobe study [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10): 2835–2846.
- Han Fa, Sun Haitian. 1999. Metallogenic system of sedex type ore deposit[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(1): 139–153 (in Chinese with English abstract).
- Han Fengbin, Chen Zhengle, Liu Zengren, Chen Bailin, Cui Lingling, Ding Wenjun, Jiang Rongbao, Li li, Zhou Yonggui, Wang Yong. 2012. Sulfur– lead isotopic composition of the Wulagen Pb– Zn deposit in the northwestern margin of the Tarim Basin, Wuqia area, Xinjiang and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(5): 783–793 (in Chinese with English abstract).
- Han Yinwen, Ma Zhengdong, Zhang Hongfei, Zhang Benren. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hoefs J. 1980. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Herdelberg: Springer–Verlag.
- Jiang Shaoyong, Yang Tao, Li Liang, Zhao Kuidong, Lin Hongfei. 2006. Lead and sulfur isotopic compositions of sulfides from the TAG hydrothermal field, Mid– Atlantic Ridge[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2597–2602 (in Chinese with English abstract).
- Leach D L and Sangster D F. 1993. Mississippi Vallay–type lead–zinc deposits[J]. *Geological Association of Canada Special Paper*, 40: 89–314.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D. 2005. Sediment–hosted lead–Zinc deposits: A global perspective[J]. *Economic Geology*, 100(3): 561–607.
- Li Boquan, Wang Jingbin. 2006. *Xinjiang Lead Zinc Deposit, China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1– 171 (in Chinese).
- Li Suimin, Han Yuchou, Wei Minghui, Chen shuqing, Li Sengwen, Li Yuhong. 2016. Characteristics of isotopic compositions and genesis of the Lianjiagou polymetallic ore deposit in Chichen County, Zhangjiakou[J]. *Geology in China*, 43(6): 2154–2162 (in Chinese with English abstract).
- 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 Zhidan, Xue Chunji, Zhang Shu, Zhang Zhaochong, Shi haigang, Wang Sicheng. 2010. Isotope geochemistry and genesis of Huoshibulake lead– zinc deposits in Southwest Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 29(supp.): 468–469 (in Chinese).
- Li Zhidan, Xue Chunji, Dong Xinfeng, Liu Zengren, Zhong Tianzhi, Qi Shuji. 2013. Ore geology, S– and Pb– isotopic compositions of the Wulagen Zn– Pb deposit, Wuqia County, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 40–54 (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 Mozhugongka County, Tibet[J]. *Geoscience*, 25(5): 869–876 (in Chinese with English abstract).
- Lü Xiuxiang, Bai Zhongkai, Xie Yuquan, Yang Xianmao. 2014. Reconsideration on petroleum exploration prospects in the Kalpin thrust belt of northwestern Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(4): 766–775 (in Chinese with English abstract).
- Ma Shengchao, Feng Chengyou, Li Guocheng, Shu Xiaofeng. 2012. Sulfur and lead isotope compositions of the Hutouya copper–lead–zinc polymetallic deposit in Qinghai Povince and their genetic significance[J]. *Geology and Exploration*, 48(2): 321– 331 (in Chinese with English abstract).
- Peng Shoujin, Zhang Xixuan, Zhou Zicheng. 1985. The lead–zinc ore types, ore forming law and direction of prospecting, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 3(3): 86–91 (in Chinese with English abstract).
- Ren Peng, Lianu 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).
- Shan Liang, Zheng Youye, Xu Rongke, Cao Liang, Zhang Yulian, Lian Yonglao, Li Yanhua. 2009. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis[J]. *Geology and Resources*, 18(3): 197–203 (in Chinese with English abstract).
- Wen Chunqi, Duo Ji. 2009. *Research Method of Deposit*[M]. Sichuan: Sichuan Science and Technology Press (in Chinese).
- 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).
- Ye Qingtong, Wu Yiping, Fu Xuji, Zhuang Daoze. 1999. *Metallogenic Conditions and Metallogenic Prognosis of Gold and Nonferrous Metal Deposits in Southwest Tianshan Mountains*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–201 (in Chinese).
- Zartman R E Doe B R. 1981. Plumbotectonics– the model[J]. *Tectonophysics*, 75(1/2): 135–162.
- Zhang Chen, Zheng Duoming, Li Jianghai. 2001. Attribute of paleozoic structures and its evolution characteristics in Keping fault–uplift[J]. *Oil and Gas Geology*, 22(4): 314– 318 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changqing, Li Houmin, Dai Junzhi, Yang Xingchao, Li li, Mao Jingwen, Yu Jinjie, Lou Debo. 2006. Lead isotope research on lead– zinc deposits[J]. *Mineral deposits*, 25(supp.): 213– 216 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changqing, Wu Yue, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Rui Zongyao, Lou Debo, Chen Zhenghui. 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 Qian, Pan Jiayong, Shao Shuxun. 2000. An interpretation of ore lead sources from lead isotopic compositions of some ore deposits in China[J]. *Geochemica*, 29(3): 231–238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shu. The Geology, Geochemistry and Metallagenesis of the Typical Lead–zinc Deposits, Southern Tianshan Orogeny[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhibin. 2007. The Geologic, Geochemical Characteristics and Metallogeny of the Main Pb–Zn Deposits in South Tianshan Orogenic Belt[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhu Bingquan, Li Xianhua. 1998. The Theory and Application of Isotopic System in Earth Science–Crust Mantle Evolution in China[M]. Beijing: Science Press, 216–235 (in Chinese).
- Zhu Xinyou, Wang Jinbin, Liu Zengren, Fang Tonghui. 2010. Geologic characteristics and the genesis of the Wulagen Lead–zinc deposit, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(5): 694–702 (in Chinese with English abstract).
- 霍什布拉克铅锌矿床同位素地球化学及成因[J]. *矿床地质*, 29(增刊): 468–469.
- 李志丹, 薛春纪, 董新丰, 刘增仁, 钟天智, 漆树基. 2013. 新疆乌恰县乌拉根铅锌矿床地质特征和S–Pb同位素组成[J]. *地质前缘*, 20(1): 40–54.
- 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.
- 吕修祥, 白忠凯, 谢玉权, 杨先茂. 2014. 塔里木盆地西北缘柯坪地区油气勘探前景再认识[J]. *沉积学报*, 32(4): 766–775.
- 马圣钊, 丰成友, 李国臣, 舒晓峰. 2012. 青海虎头崖铜铅锌多金属矿床硫、铅同位素组成及成因意义[J]. *地质与勘探*, 48(2): 321–331.
- 彭守晋, 张希宣, 周自成. 1985. 新疆铅锌矿类型、成矿规律及找矿方向[J]. *新疆地质*, 3(3): 86–91.
- 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.
- 陕亮, 郑有业, 许荣科, 曹亮, 张雨莲, 连永牢, 李闫华. 2009. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究[J]. *地质与资源*, 18(3): 197–203.
- 温春齐, 多吉. 2009. 矿床研究力法[M]. 四川: 四川科学技术出版社.
- 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.
- 叶庆同, 吴一平, 傅旭杰, 庄道泽. 1999. 西南天山金和有色金属矿床成矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1–201.
- 张臣, 郑多明, 李江海. 2001. 柯坪断隆古生代的构造属性及其演化特征[J]. *石油与天然气地质*, 22(4): 314–318.
- 张长青, 李厚民, 代军治, 杨兴朝, 李莉, 毛景文, 余金杰, 娄德波. 2006. 铅锌矿床中矿石铅同位素研究[J]. *矿床地质*, 25(增刊): 213–216.
- 张长青, 吴越, 王登红, 陈毓川, 芮宗瑶, 娄德波, 陈郑辉. 2014. 中国铅锌矿床成矿规律概要[J]. *地质学报*, 88(12): 2252–2268.
- 张乾, 家永, 邵树勋. 2000. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. *地球化学*, 29(3): 231–238.
- 张舒. 2010. 南天山典型铅锌矿床地质–地球化学特征及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 张志斌. 2007. 南天山造山带主要铅锌矿床的地质、地球化学特征及成矿作用研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 朱炳泉, 李献华. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 216–235.
- 祝新友, 王京彬, 刘增仁, 方同辉. 2010. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因[J]. *地质学报*, 84(5): 694–702.

附中文参考文献

- 韩发, 孙海田. 1999. Sedex型矿床成矿系统[J]. *地质前缘*, 6(1): 139–153.
- 韩凤彬, 陈正乐, 刘增仁, 陈柏林, 崔玲玲, 丁文君, 蒋荣宝, 李丽, 周永贵, 王永. 2012. 塔里木盆地西北缘乌恰地区乌拉根铅锌矿床S–Pb同位素特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 31(5): 783–793.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 蒋少涌, 杨涛, 李亮, 赵葵东, 凌洪飞. 2006. 大西洋洋中脊TAG热液区硫化物铅和硫同位素研究[J]. *岩石学报*, 22(10): 2597–2602.
- 李博泉, 王京彬. 2006. 中国新疆铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1–171.
- 李随民, 韩玉丑, 魏明辉, 陈树清, 李森文, 李玉红. 2016. 张家口梁家沟铅锌银多金属矿床同位素特征及矿床成因[J]. *中国地质*, 43(6): 2154–2162.
- 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.
- 李志丹, 薛春纪, 张舒, 张招崇, 石海岗, 王思程. 2010. 新疆西南天山