

新疆喀喇昆仑火烧云超大型铅锌矿床 矿物学、地球化学及成因

高永宝,李侃,滕家欣,赵辛敏,赵晓健,燕洲泉,金谋顺,赵慧博,李旭拓

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:近年来,青藏高原北缘喀喇昆仑铅锌找矿取得重大突破,新发现的火烧云超大型铅锌矿床已成为中国最大的铅锌矿床,矿石矿物以菱锌矿、白铅矿、水锌矿为主,也是世界第二大非硫化物铅锌矿床。矿体呈似层状产出,埋藏浅,主要为褐色块状矿石,Pb+Zn 平均品位近 30%。可分为 3 个成矿阶段。早期铅锌硫化物成矿阶段(方铅矿、闪锌矿、方解石)、中期铅锌非硫化物成矿阶段(菱锌矿、锰氧化物→菱锌矿、白铅矿、石膏)与晚期表生氧化阶段(水锌矿)。硫化物阶段方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-18.9\text{‰} \sim -4.2\text{‰}$,非硫化物阶段热液石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-20.6\text{‰} \sim -7.5\text{‰}$,继承了硫化物阶段矿物的硫同位素特征。Pb 同位素组成集中,具有地壳来源特征,二叠系—白垩系可能提供了金属成矿物质。方解石的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $0.6\text{‰} \sim 3.1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $15.3\text{‰} \sim 24.6\text{‰}$,菱锌矿的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-2.7\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $10.4\text{‰} \sim 26.1\text{‰}$,来源于碳酸盐岩的溶解作用;白铅矿的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-7.7\text{‰} \sim 4.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $9.3\text{‰} \sim 24.3\text{‰}$,同位素发生漂移,可能是与大气降水的混入有关。硫化物成矿阶段方解石中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.05 \sim 0.39 R/R_a$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 $296.2 \sim 428.9$,方铅矿中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.03 R/R_a$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 290.0 ,成矿流体可能为中温、低盐度、中低密度的还原性壳源流体;非硫化物成矿阶段菱锌矿中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.10 \sim 0.43 R/R_a$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 $290.6 \sim 295.3$;白铅矿中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.08 R/R_a$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 293.5 ,成矿流体可能为中低温、低盐度、中密度的壳源流体与大气降水混合流体。综上所述,火烧云超大型铅锌矿床是盆地边缘褶皱逆冲+构造流体+次生交代成矿系统的产物,硫化物成矿阶段为构造热液成因,非硫化物成矿阶段为围岩交代成因,后期发生叠加氧化作用,形成大量水锌矿。

关键词:矿物学;地球化学;硫化物;非硫化物;火烧云铅锌矿床;喀喇昆仑

中图分类号:P611;P597

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)04-0152-18

Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Giant Huoshaoyun Zn-Pb Deposit in Karakoram Area, Xinjiang, NW China

GAO Yongbao, LI Kan, TENG Jiaxin, ZHAO Xinmin, ZHAO Xiaojian, YAN Zhouquan,
JIN Moushun, ZHAO Huibo, LI Xutuo

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China
Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

收稿日期:2019-08-12;修回日期:2019-09-15

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM4030)、陕西省青年科技新星项目(2015KJXX-71)、第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0807-02)、中国地质调查局地质调查项目(DD20160004、DD20160346、DD20190143)、国家自然科学基金联合资助

作者简介:高永宝(1982-),男,博士,副研究员,主要从事矿床学及矿床地球化学研究。E-mail:gaoyongbao2006@126.com

Abstract: In recent years, a breakthrough has been made about the zinc and lead prospecting in Karakorum area of northern Qinghai-Tibet Plateau. The newly discovered giant Huoshaoyun zinc-lead deposit has become the largest zinc-lead deposit in China and the second largest nonsulfide zinc-lead deposit in the world. The ore bodies are layer-shaped, buried shallow with depth of 50 to 230 meters. The ores show brown color and massive structure, and the average grade of lead and zinc is nearly 30%. It can be divided into three metallogenic stages: early zinc-lead sulfide mineralization stage, intermediate zinc-lead nonsulfide mineralization stage and late oxidation stage. The first stage is characterized by galena, sphalerite and calcite; the second stage is represented by smithsonite, manganese oxide, cerussite, and gypsum; the last stage is characterized by hydrozincite. The $\delta^{34}\text{S}$ values of the galena in the first stage range from -18.9% to -4.2% . The $\delta^{34}\text{S}$ values of gypsum in the second stage vary from -20.6% to -7.5% , which inherits the sulfur isotope characteristics of minerals in the sulfide stage. The lead isotope compositions are concentrated and show a crustal source feature, and the Permian-Cretaceous sedimentary rocks may be the sources of metals. The $\delta^{18}\text{CPDB}$ and $\delta^{18}\text{OSMOW}$ values of calcite range from 0.6% to 3.1% and from 15.3% to 24.6% , respectively. The $\delta^{18}\text{CPDB}$ and $\delta^{18}\text{OSMOW}$ values of the smithsonite vary from -2.7% to 4.5% and from 10.4% to 26.1% , respectively. All these values indicate the dissolution of carbonate. The $\delta^{18}\text{CPDB}$ and $\delta^{18}\text{OSMOW}$ values of the cerussite range from -7.7% to 4.3% and from 9.3% to 24.3% , respectively, indicating the mixing of atmospheric precipitation. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios of the fluid inclusions in the calcite vary from 0.05 R/Ra to 0.39 R/Ra and from 296.2 to 428.9 , respectively; and the $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios of fluid inclusions in the galena are 0.03 R/Ra and 290.0 , respectively. Thus, the ore-forming fluid of the first sulfide metallogenic stage may be medium-temperature, low salinity, and medium-low density reducing fluid from the crust. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios of fluid inclusions in the nonsulfide metallogenic stage range from 0.10 R/Ra to 0.43 R/Ra and from 290.6 to 295.3 , respectively; the $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios of fluid inclusions in cerussite are 0.08 R/Ra and 293.5 , respectively. Thus, the ore-forming fluid of the nonsulfide metallogenic stage may be medium-low temperature, low salinity, and medium density fluid from crust mixed with atmospheric precipitation. In summary, the giant Huoshaoyun zinc-lead deposit is the product of basin fold thrust in the edge of a basin, with the activities of structure fluids and secondary replacement system. The sulfides are formed with the activities of structure fluids, and the nonsulfides are the result of wall rock replacement. At the last stage, the oxidation occurred and the hydrozincites formed.

Keywords: mineralogy; geochemistry; sulfide; nonsulfide; Huoshaoyun Zn-Pb deposit; Karakoram

世界上具有重要工业价值的铅锌矿床多以沉积岩为容矿岩石,占铅锌储量的80%左右。根据铅锌矿物类型可以划分为硫化物和非硫化物铅锌矿床,并将非硫化锌矿分为3类:碳酸锌矿(Calamine)、硅酸锌矿和铁帽型锌矿(LARGE,2001)。HITZMAN等(2003)将非硫化锌矿划分为表生和内生两大成因类型,且将其细分为2大类5亚类,表生成因非硫化锌矿(以菱锌矿为主)分为直接交代型、围岩交代型和残余-岩溶充填型;内生成因的非硫化物锌矿床(以硅锌矿为主)分为构造控制交代型和富锰喷流沉

积层状型。国内对非硫化物铅锌矿床的研究鲜见,仅对代家庄、麻坑矿床有相关报道(王松等,2008;杨永强等,2010)。

近年来,在青藏高原北缘喀喇昆仑地区新发现的火烧云超大型铅锌矿床,控制铅锌资源量已超过1800万吨,Zn平均品位为23.6%,Pb平均品位为5.6%(新疆地质矿产勘查开发局第八地质大队,2016),已超越金顶铅锌矿床,成为目前中国最大的铅锌矿床;同时矿石矿物以菱锌矿、白铅矿、水锌矿为主,仅次于伊朗的Mehdiabad非硫化物锌矿床

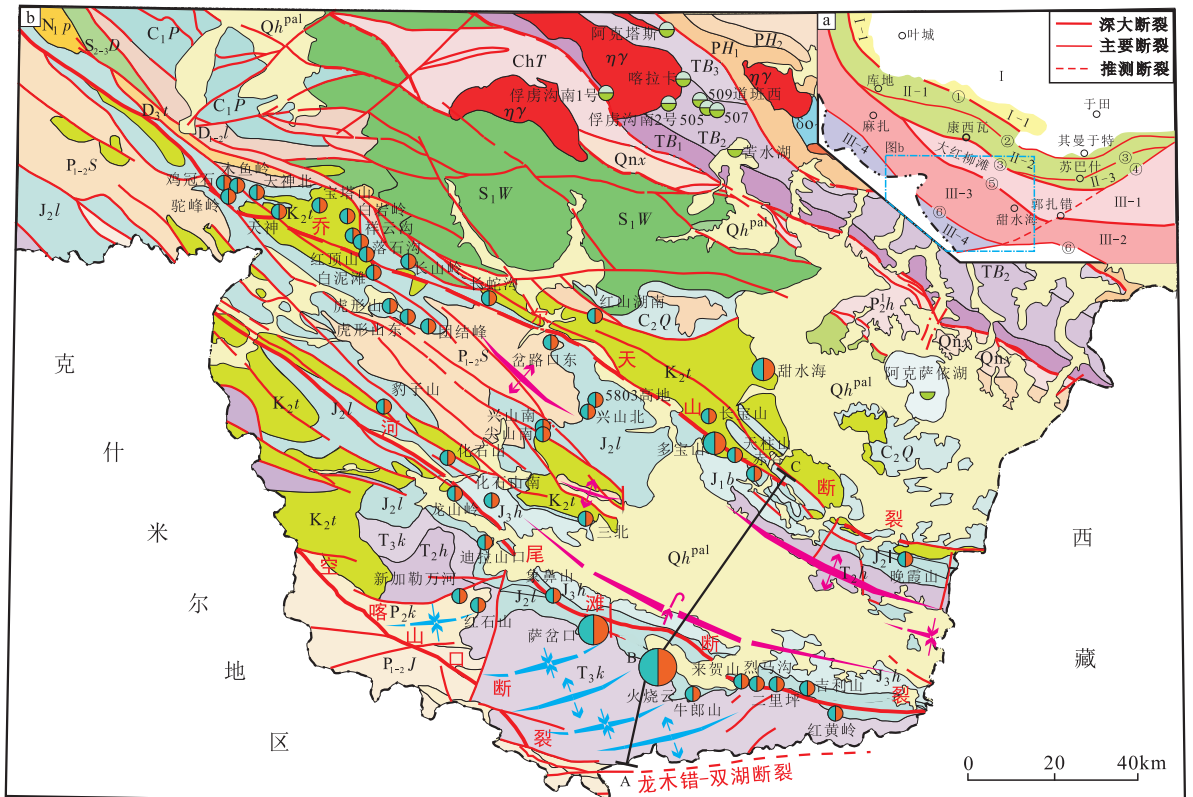
(铅锌资源量 2 071 万 t, Zn 品位为 7.2%, Pb 品位为 2.3%, Ag 品位为 51×10^{-6}), 为世界第二大非硫化物铅锌矿床。火烧云矿床由于发现较晚, 矿物学研究薄弱, 成矿物质来源、成矿流体性质、成矿过程等存在较大争议, 矿床成因存在喷流沉积成矿作用(董连慧等, 2015; 范廷宾等, 2017, 2018) 和热液-交代成矿作用(GAO, 2016; 高永宝等, 2017) 的分歧。笔者对该矿床地质特征进行了详细描述, 并结合矿物学以及 S、Pb、C-O、He-Ar 同位素研究, 对成矿物质来源、成矿流体性质以及矿床成因进行探讨, 以期成矿规律研究和区域找矿提供借鉴作用。

1 区域地质背景

火烧云铅锌矿床位于新疆和田县城南西 195° 方向的喀喇昆仑山区, 沿新藏公路 600 余 km 处向西 100 余 km 可到达矿区, 海拔 5 400~5 700 m。区域大地构造属西藏-三江造山系(I 级)、羌塘弧盆系(II 级), 以龙木错-双湖断裂为界, 该断裂南侧为南羌塘增生楔(III 级), 北侧为塔什库尔干-甜水海地块(III 级)。火烧云铅锌矿床赋存于塔什库尔干-甜水海地块的乔尔天山-红南山前陆盆地(IV 级)中(图 1)。区域地层主要有二叠纪神仙湾组、加温达坂组、空喀山口组, 三叠纪河尾滩组、克勒青河组, 侏罗纪龙山组、红其拉甫组, 白垩纪铁隆滩组等。二叠纪神仙湾组为一套深水相碎屑岩, 主要为灰-深灰色中-厚层状细粒变石英砂岩、变长石石英砂岩夹泥质粉砂质板岩, 局部夹少量硅质岩、玄武岩、火山角砾岩等; 加温达坂组为浅海陆棚-斜坡相沉积, 以碎屑岩为主夹多层泥晶灰岩, 岩性有泥岩、长石石英砂岩、泥晶灰岩、粉晶灰岩, 顶部见硅质岩; 喀山口组为浅海陆棚-斜坡相沉积, 为泥岩与微晶灰岩、泥岩与长石石英砂岩互层, 岩性为灰岩、砂质灰岩、角砾状灰岩、生物屑灰岩、泥灰岩与石英砂岩、碳质砂岩、硅质岩等。三叠纪河尾滩组为开阔台地相沉积, 为微晶灰岩、生物微晶灰岩、鲕粒灰岩、核形石微晶灰岩不等厚互层, 夹少量角砾状灰岩、长石石英砂岩、粉砂岩; 克勒青河组为斜坡、滨岸-台地相沉积, 主要为浅变质细粒砂岩、长石石英砂岩、粉砂岩、千枚岩化砂岩、板岩、页岩不均匀互层夹灰岩。侏罗纪龙山组为陆棚→台地→局限台地相沉积, 发育一套浅海相碳酸盐岩或碳酸盐岩夹碎屑岩, 局部夹火山岩、石膏层, 主要为灰岩、生物灰岩、泥质灰岩、杂色砂岩、砾

岩, 底与克勒青河组不整合接触; 红其拉甫组为滨岸→开阔台地相沉积, 下部发育砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩组合; 上部发育微晶灰岩、生物灰岩、鲕粒灰岩、核形灰岩及泥灰岩。白垩纪铁隆滩组下岩性段为砾岩、砂砾岩、砂岩、页岩夹多层石膏; 上岩性段为微晶灰岩、砂屑灰岩、砾屑-生物屑-鲕粒灰岩组合, 为一套海侵环境产物, 与下伏侏罗系及其他老地层不整合接触。萨盆口、化石山、兴山北、豹子山、团结峰等铅锌矿赋存于侏罗纪龙山组中, 但成矿特征与火烧云存在差异, 可见大量铅锌硫化物。多宝山、天柱山等铅锌矿赋存于白垩纪铁隆滩组中。新近在中三叠统河尾滩组破碎细晶灰岩中发现红石山铅锌矿。

区域铅锌矿床主要受构造控制, 乔尔天山断裂和河尾滩断裂两侧铅锌矿床最为发育, 其间断裂系也发育较多铅锌矿床, 其中火烧云、萨盆口等矿床沿河尾滩断裂分布(图 1)。区内断裂呈北西向、北东向、近南北向 3 组, 主要为龙木错-双湖断裂、乔尔天山断裂及其之间的断裂系。龙木错-双湖断裂为古特提斯冈瓦纳与欧亚大陆的分界线, 断裂东部断续出现的蓝片岩、蛇绿岩、构造混杂岩, 延伸大于 400 km; 断裂带附近未发现蛇绿岩组合及构造混杂岩, 但断裂两侧地层时代不连续, 构造透镜体、牵引褶皱及动力变质带发育。该断裂东从龙木错附近进入本区, 西从空喀山口附近延出国境, 多期活动特征明显, 最显著表现是早期逆冲、晚期脆性伸展, 其活动时限为古生代末-中生代初期。乔尔天山断裂是区内重要的区域性大断裂, 从龙木错附近向西经麻扎达拉可延至塔什库尔干断裂区被覆为止, 全长约 650 km。据大地电磁测深结果, 其走向由地表的北东东 80° 变到深部 50° , 断裂深度约 50 km。该断层在卫片上线状构造影像特征十分醒目, 地貌上显示一系列的凹陷及断层三角面, 断裂带宽 500~1 000 m, 倾向北东, 倾角 $50^\circ \sim 65^\circ$, 发育糜棱岩化砂岩、断层角砾岩、碎裂岩等。据构造岩变形特征分析, 该断层具有 2 期活动特征, 其早期主要表现为脆韧性剪切伸展-走滑性质, 晚期表现为脆性逆冲走滑特征。近期构造活动依然活跃, 在红山湖一岔路口一带有新生代火山岩沿此断裂成串分布, 可见清晰的破火山口及火山颈, 向东可与黑石北湖、羊湖等地新生代火山岩联成一条巨大的火山活动带。河尾滩断裂的走向约 300° , 倾角 30° , 早期为逆冲性质, 晚期明显叠加张性活动特征(图 1)。



ChT	1	Qnx	2	S ₁ W	3	S ₂₋₃ D	4	D ₁₋₂ l	5	D ₃ l	6	C ₁ P	7	C ₂ Q	8	P ₂ k	9	P ₋₂ S	10	P ₋₁ J	11	P ₁ h	12	PH ₁	13
PH ₂	14	PH ₃	15	T ₂ h	16	T ₃ k	17	TB ₁	18	TB ₂	19	TB ₃	20	J ₁ b	21	N ₁ p	22	J ₂ l	23	J ₃ h	24	K ₂ l	25	Qh ^{pal}	26
δσ _T	27	ηγ	28	γδ ₁	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38											

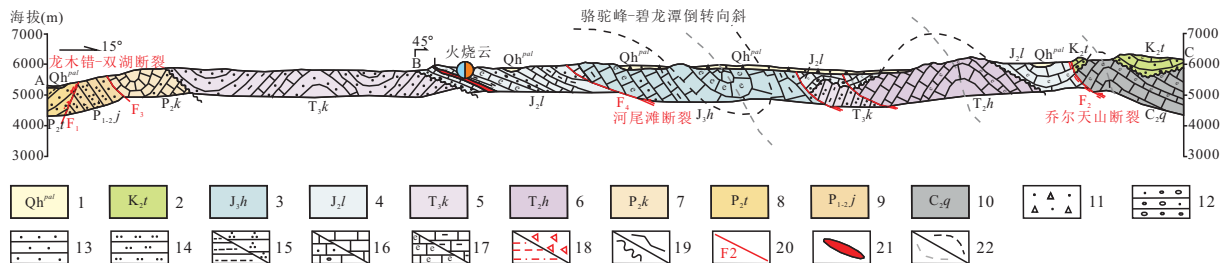
I. 塔里木陆块; I-1. 铁克里克断隆带; II-1. 北昆仑晚古生代岩浆弧带; II-2. 中昆仑微陆块; II-3. 南昆仑晚古生代残弧带; III-1. 可可西里-巴颜喀拉褶皱带; III-2. 北羌塘-唐古拉地块; III-3. 塔什库尔干-甜水海地块; III-4. 南羌塘地块; ①. 柯岗断裂; ②. 其曼于特-祁漫塔格古生代蛇绿构造混杂岩带; ③. 柳什塔格-岩碧山-向阳泉中昆仑断裂带; ④. 苏巴什-木孜塔格晚古生代蛇绿构造混杂岩带; ⑤. 郭扎错-西金乌兰湖-金沙江结合带; ⑥. 龙木错-双湖结合带; 1. 甜水海岩群; 2. 肖尔克谷地组; 3. 温泉沟群; 4. 达坂沟群; 5. 落石沟组; 6. 天神达坂组; 7. 帕斯群; 8. 恰提尔群; 9. 空喀山口群组; 10. 神仙湾群; 11. 加温达坂群; 12. 红山湖组; 13. 黄羊岭群下组; 14. 黄羊岭群中组; 15. 黄羊岭群上组; 16. 河尾滩组; 17. 克勒青河组; 18. 巴彦喀拉山群下组; 19. 巴彦喀拉山群中组; 20. 巴彦喀拉山群上组; 21. 巴工布兰萨组; 22. 帕长布拉克组; 23. 龙山组; 24. 红其拉甫组; 25. 铁隆滩组; 26. 第四系; 27. 黑云角闪石英英闪长岩; 28. 黑云母二长花岗岩; 29. 花岗闪长岩; 30. 印支期背斜褶皱; 31. 印支期向斜褶皱; 32. 燕山期背斜褶皱; 33. 燕山期向斜褶皱; 34. 燕山期倒转向斜褶皱; 35. 铅锌矿床/铅锌矿点; 36. 伟晶岩型锂矿床; 37. 盐湖型锂矿床; 38. 图 2A-C 剖面位置

图 1 新疆喀喇昆仑火烧云一带区域地质矿产图

Fig. 1 Regional geological map of the Huoshayun zinc and lead belt, Karakoram, Xinjiang

区域褶皱发育,主要有北东东向印支期褶皱、北西向燕山期褶皱(图 1)。印支期构造活动导致本区三叠系及其以下地层广泛形成北东东-东西向褶皱,区域上广泛存在的三叠系与侏罗系之间角度不整合就是印支运动的直接证据。区内燕山期以来逆冲推覆活动强烈,变形作用强烈。燕山期以脆韧性剪切-走滑为主,白垩系及以下地层卷入该期构造变形,主要表现为一系列的北西西-南东东向背、向斜构造,少量大型倒转向斜构造,同时发育北西-南东

向北倾逆冲断裂构造。火烧云铅锌矿北侧河尾滩断裂以及驼峰山-碧龙潭倒转向斜均是该期构造活动的产物(图 2)。晚燕山期还形成 2 组脆性次级断裂。一组为北东向左行平移断层,另一组为南北向脆性断层,右行为主。喜山期对于燕山期构造继承性非常明显,继燕山期之后经历了更加强烈的逆冲推覆和走滑断裂活动,最终形成现今地层构造格局及盆山面貌,也形成了较多的碳酸盐岩构造圈闭。



1. 第四系; 2. 铁隆滩组; 3. 红其拉甫组; 4. 龙山组; 5. 克勒青河组; 6. 河尾滩组; 7. 空喀山口组; 8. 吞龙共巴组; 9. 加温达坂组;
10. 恰提尔组; 11. 冲洪积; 12. 砂砾岩; 13. 砂岩; 14. 粉砂岩; 15. 石英砂岩/页岩; 16. 灰岩/砂屑灰岩; 17. 泥灰岩/生物碎屑灰岩;
18. 碎裂岩/糜棱岩; 19. 地质界线/不整合界线; 20. 断裂; 21. 火烧云铅锌矿床; 22. 推测褶皱痕迹线/推测褶皱轴线

图2 火烧云一带 A-C 剖面图

Fig. 2 A-C section map of the Huoshaoyun zinc and lead belt

区域岩浆活动极弱,仅在团结峰一带、萨岔口铅锌矿附近龙山组中见少量透镜状火山岩夹层,主要岩性为辉长玢岩、杏仁状玄武岩、粗玄岩、玄武质角砾熔岩。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

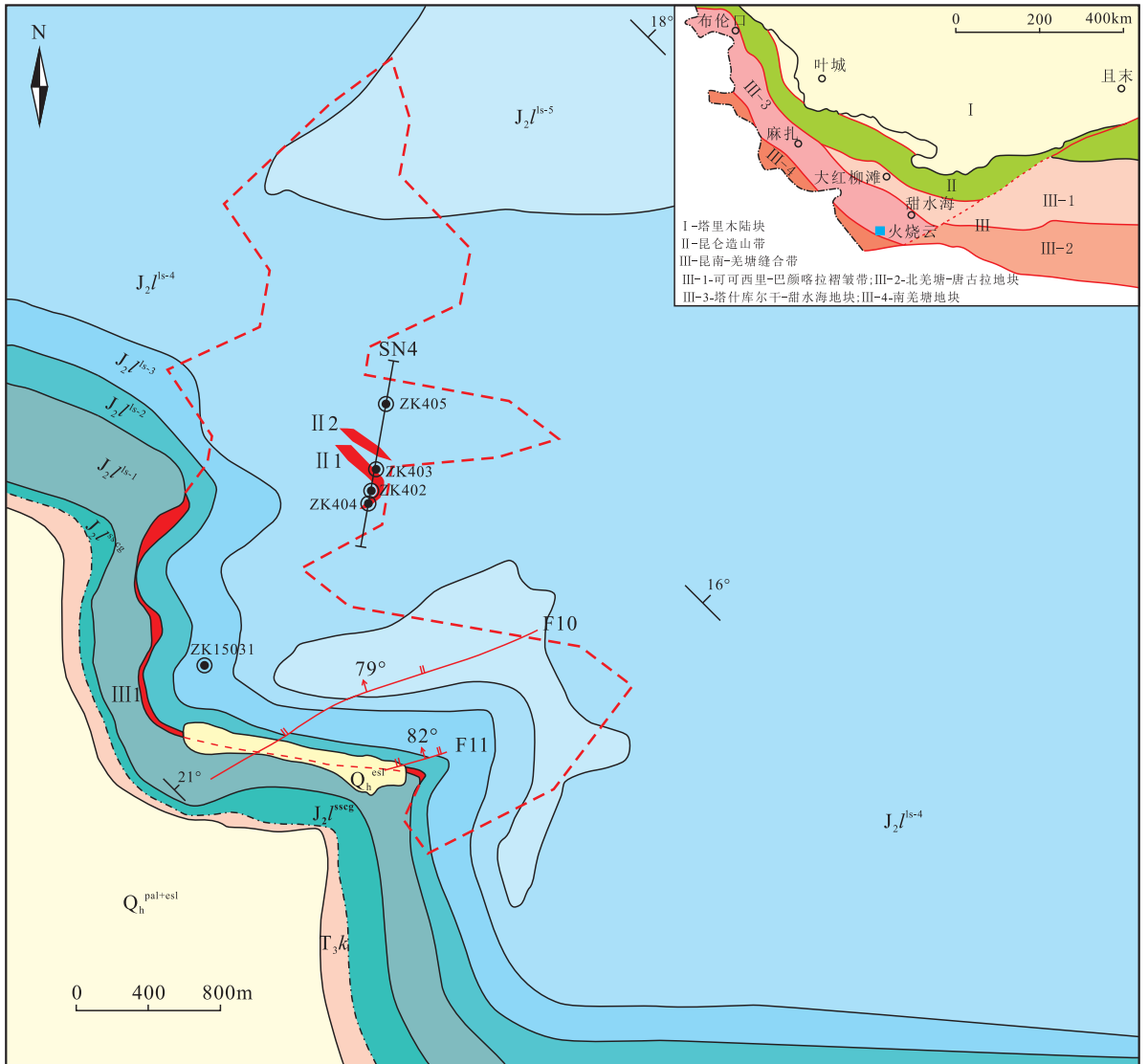
火烧云铅锌矿区出露上三叠统克勒青河组、中侏罗统龙山组及第四系(图3)。龙山组在矿区出露面积最大,约占总面积91%,地层倾向 $0^{\circ}\sim 25^{\circ}$,倾角 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$,与下伏克勒青河组角度不整合接触。据层位关系及岩性组合特征,又分下段(砂砾岩段)和上段(灰岩段)。下段即砂砾岩段,在矿区西南、紧邻克勒青河组北侧出露,为一套紫红色、红褐色砾岩、砂质细砾岩、石英细砂岩、铁质石英细砂岩、细-粉砂岩等,碎屑粒度由底至顶,由粗变细,地表宏观特征明显,常形成陡坎、陡崖地貌,与两侧岩石颜色差别较大,地层倾向 $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$,倾角 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$,厚度5~200 m。上段灰岩段为矿区主要地层,铅锌矿体产于该段下部;该段地层露头较差,被第四系残坡积覆盖较大,地层产状较缓,经地表观察及钻孔岩心资料,将其自下而上进一步分为5个岩性层,区域厚度大于2000 m。第一岩性层为细晶灰岩层,紧邻该组砂砾岩段北侧出露,以灰-深灰色粒屑灰岩、细晶灰岩、泥晶微晶灰岩为主,夹少量生物碎屑灰岩,部分岩石具白云石化。该岩性层为矿区Ⅲ₁主矿体底板,岩石均一完整,局部沿裂隙面有铁质浸染,顶部泥灰岩中见弱铅锌矿化,倾向 $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$,倾角 $3^{\circ}\sim 19^{\circ}$;第二岩性层为泥晶灰岩层,是矿区最重要的赋矿岩层,紧邻第一岩性层北侧分布,岩性主要为泥晶

灰岩,其次为生物碎屑泥晶灰岩等。该层岩石普遍呈碎裂状、压碎状,后又被方解石胶结,角砾形态不规则,粒径一般小于8 mm,分布均匀。该层底部Ⅲ₁富铅锌主矿体中、上部岩石多具断续强弱不等铅锌矿化,岩石褐铁矿化、碳酸盐化等蚀变较明显,裂隙及溶蚀孔洞发育。岩层倾向 $10^{\circ}\sim 45^{\circ}$,倾角 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$,钻孔控制厚度34~144 m;第三岩性层为泥灰岩、泥岩层,局部夹碎裂状微晶灰岩,呈灰-深灰色,泥质结构,多为薄层状构造。下部岩石较破碎,局部可见亮黄色微-细粒黄铁矿,呈星点状产出,含量为2%~5%。该层局部具弱铅锌矿化,沿破碎裂隙面见不均一弱褐铁矿化;第四岩性层为细晶灰岩层,以浅灰色细晶灰岩为主,次为亮晶内碎屑灰岩,夹生物碎屑灰岩、泥灰岩、泥岩,为Ⅱ号矿带的赋存层位;第五岩性层为生物碎屑灰岩层,主要为灰色-深灰色生物碎屑灰岩,由微-细晶方解石构成,局部可见少量内碎屑,沿裂隙充填网状方解石细脉(图3、图4)。

对矿区有重要影响的构造为驼峰山-碧龙潭倒转向斜、河尾滩断裂(图2)。驼峰山-碧龙潭倒转向斜轴迹呈北西-南东向,约 300° ,长约120 km,宽约30 km,北西端西延情况不详,南东端在八一达坂附近翘起,核部地层为上侏罗统红其拉甫组,两翼依次出露中侏罗统龙山组及三叠系。北翼红其拉甫组倒转,产状相对较陡,南翼地层正常,产状较缓。北翼地层倾角一般为 $25^{\circ}\sim 60^{\circ}$,南翼地层倾角一般为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。火烧云铅锌矿床赋存于该向斜南翼龙山组灰岩底部。河尾滩断裂分布于乱石达坂-红黄岭一线,平面上呈舒缓波状,走向约 300° ,西延情况不详,东被龙木错-双湖断裂所截,个别地段被南北向右行断裂错移,断裂两盘均为侏罗系。沿断裂带发育宽窄不一的断层破碎带,窄者仅5~15 m,宽者达

350 m,带内岩石强烈破碎蚀变,局部保留有早期的挤压构造面,具多期活动特征。断裂下盘地质体变

形较弱,地层产状稳定,上盘则表现为极强的变形特征。



- 1. 第四系洪积、残坡积物; 2. 第四系残坡积物; 3. 中侏罗统龙山组灰岩段第五岩性层: 灰色生物碎屑灰岩; 4. 中侏罗统龙山组灰岩段第四岩性层: 浅灰色细晶灰岩, 局部夹少量薄层状泥质灰岩压碎状泥晶灰岩; 5. 中侏罗统龙山组灰岩段第三岩性层: 深灰色泥岩、泥质灰岩; 6. 中侏罗统龙山组灰岩段第二岩性层: 浅灰色碎裂状细晶灰岩、压碎角砾状灰岩夹泥岩; 7. 中侏罗统龙山组灰岩段第一岩性层: 深灰色细晶灰岩, 局部含生物碎屑; 8. 中侏罗统龙山组砂岩、砾岩段: 紫红色砂岩、含砂砾岩; 9. 上三叠统克勒青河组灰绿色细砂岩、深灰色粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、长石石英砂岩、石英岩屑砂岩; 10. 整合地质界线; 11. 不整合地质界线; 12. 正断层及编号; 13. 矿体地表露头及编号; 14. 勘探线位置及编号; 15. 钻孔位置及编号; 16. 地层产状; 17. III₁ 矿体投影界线

图3 火烧云铅锌矿区地质图

Fig. 3 Geologic map of the Huoshayun zinc-lead deposit

矿区未见岩浆活动,变质作用较弱,大致可分区域变质和动力变质两类。前者仅在克勒青河组有所表现,砂岩、泥岩变质轻微,层理清晰完整,原岩结构基本保存;后者与矿区断裂活动密切相关,普遍遭受动力挤压,致使岩石和矿物破碎成大小不等的碎块或碎粒,沿断裂呈带状、线状产出,形成碎裂岩化岩石和断层角砾岩。

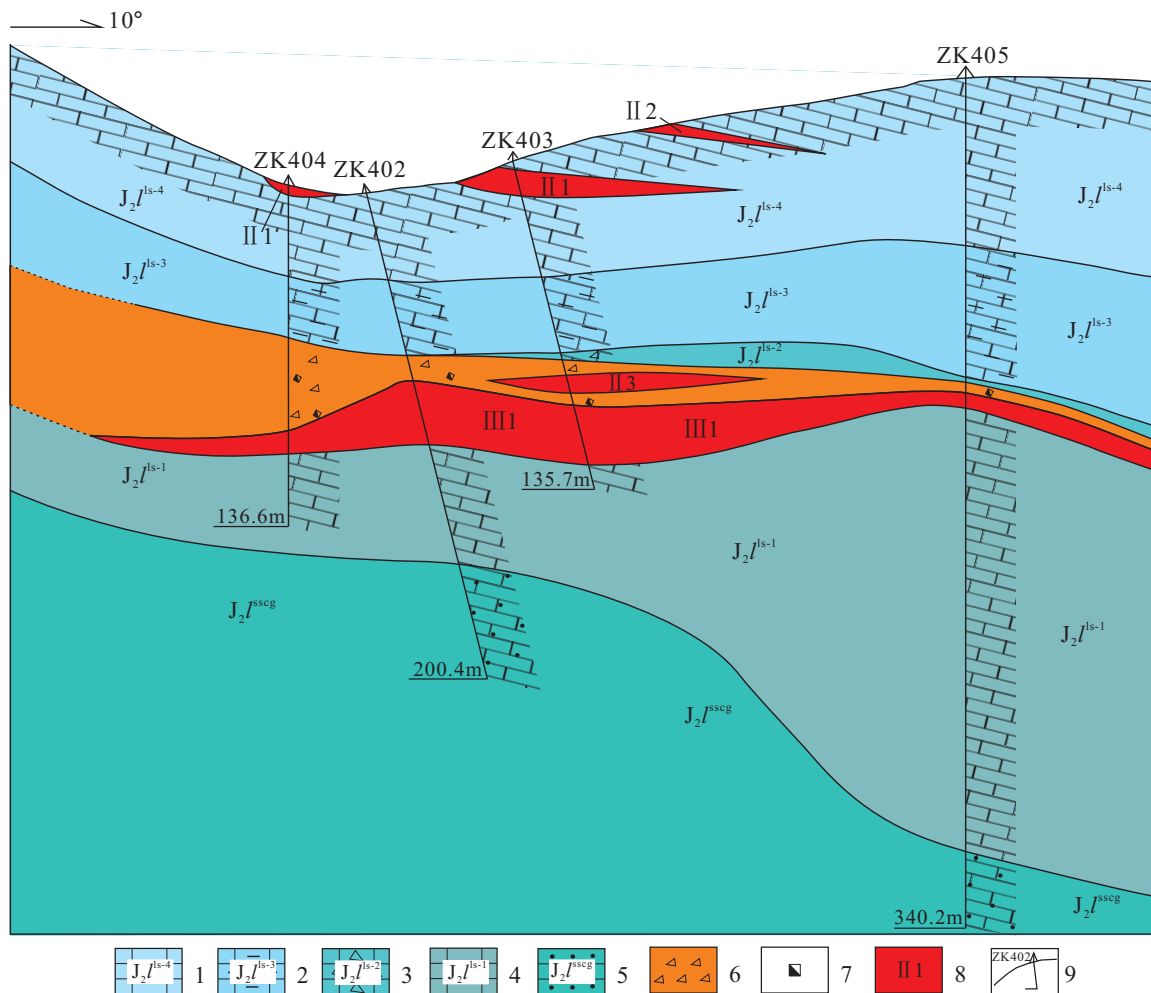
2.2 矿体特征

火烧云矿区铅锌矿体均分布于中侏罗统龙山组灰岩段内。目前,发现上、下2个铅锌矿化带(Ⅱ号、Ⅲ号),二者呈近平行的似层状、薄透镜状产出。Ⅱ号矿带位于Ⅲ号矿带之上,层间距约60~70 m,倾向北北东10°~30°,倾角1°~15°,总体形态呈缓倾、

略有起伏的似层状产出(图4)。

Ⅱ号矿带赋存层位为龙山组灰岩段第四岩性层中上部,以细晶灰岩为主,次为亮晶内碎屑灰岩,局部夹少量生物碎屑灰岩。南北长约260 m,东西宽约160 m,厚度约30~50 m,共圈定3个矿体,地表均见有露头,总体呈半剥蚀状态。

Ⅲ号矿带是矿区最重要的主矿带,赋存于龙山组上段第二岩性层中下部,主要岩性为泥晶灰岩,其次为含生物碎屑泥晶灰岩、内碎屑灰岩、微晶灰岩等。南北长2 280 m,东西宽约1 400 m,厚度一般为25~55 m,最厚可达90 m,共圈定9个矿体,已探明90%以上的铅锌资源赋存于该矿带中。



1. 中侏罗统龙山组灰岩段第四岩性层浅灰色细晶灰岩,局部夹少量薄层状泥质灰岩压碎状泥晶灰岩;2. 中侏罗统龙山组灰岩段第三岩性层深灰色泥岩、泥质灰岩;3. 中侏罗统龙山组灰岩段第二岩性层浅灰色碎裂状细晶灰岩、压碎角砾状灰岩夹泥岩;4. 中侏罗统龙山组灰岩段第一岩性层深灰色细晶灰岩,局部含生物碎屑;5. 中侏罗统龙山组砂岩、砾岩段紫红色砂岩、含砂砾岩;6. 矿化带;7. 褐铁矿化;8. 矿体及编号;9. 钻孔位置及编号

图4 火烧云铅锌矿床4号线剖面图

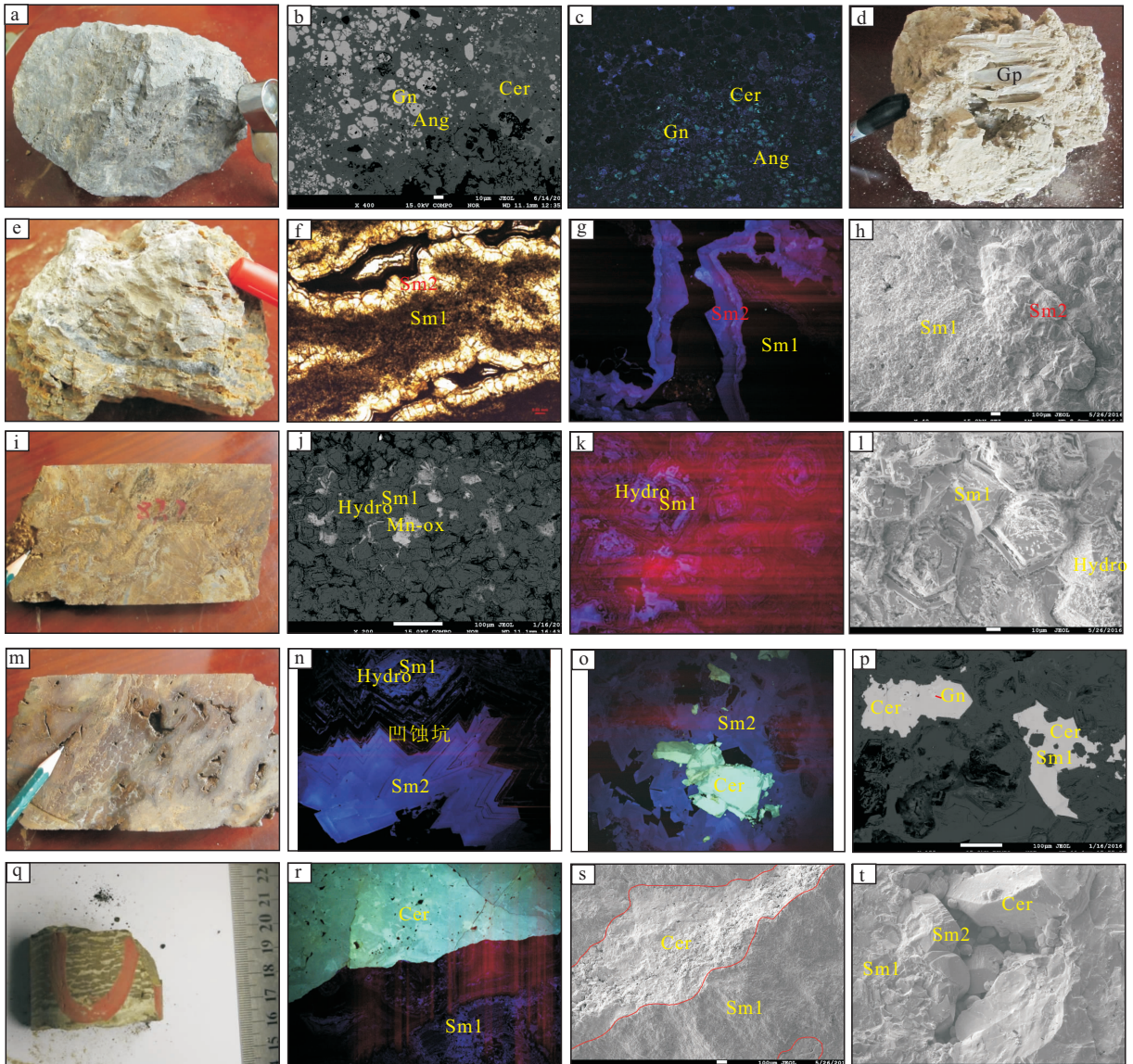
Fig. 4 No. 4 section of the Huoshayun zinc-lead deposit

2.3 矿石及矿物组合特征

火烧云矿区矿化类型主要为非硫化物铅锌矿, 矿石矿物以菱锌矿、白铅矿、水锌矿为主, 仅发育少量方铅矿; 脉石矿物主要为方解石和少量石英。菱锌矿是矿石中含量最多的矿物, 主矿体中含量一般为 60%~80%, 最高可达 90% 以上。主矿体 Zn 平均品位为 23.6%, Pb 平均品位为 5.6%。矿石结构主要有半自形-自形粒状结构、交代残余结构、鲕粒结构及葡萄状结构; 矿石构造主要有块状构造、纹层状构造、条带状构造、脉状构造及角砾状构造。矿体

围岩蚀变主要有褐铁矿化、硅化, 局部见白云岩化, 且多见碎裂岩化现象, 蚀变与矿体关系不大。

通过对火烧云矿床矿物学的研究发现: II 号矿带主要为脉状硫化物矿石(图 5a)和纹层状非硫化物矿石(图 5e), 与热液石膏密切共生(图 5d)。硫化物矿石主要由残余方铅矿、铅矾及白铅矿组成(图 5b), 阴极发光下方铅矿不发光, 铅矾为天蓝色荧光, 白铅矿为黄绿色荧光(图 5c), 显示了 PbS(方铅矿)→PbSO₄(铅矾)→PbCO₃(白铅矿)的形成过程, 同时共生硫镉矿; 层纹状矿石主要由 2 期菱锌矿 (Sm1



a-h. II 号矿带矿石及矿物; i-t. III 号矿带矿石及矿物; Cer. 白铅矿; Gn. 方铅矿; Ang. 铅矾; Gp. 石膏; Sm1. 第一期菱锌矿; Sm2. 第二期菱锌矿; Mn-Ox. 锰氧化物; Hydro. 水锌矿

图 5 火烧云矿区矿石及矿物照片

Fig. 5 Photos of mineralization feature of the Huoshaoyun zinc-lead deposit

和 Sm2) 组成, 结构、成分均存在较大差异, Sm1 呈褐色, CL 图像较暗, 细晶, FeO 含量较高; Sm2 位于 Sm1 边部, 呈肾状、皮壳状, CL 图像呈蓝色荧光, 晶形相对较大, 为纯净的菱锌矿(图 5f、图 5g、图 5h)。Ⅲ号矿带主要为块状矿石(图 5i)、角砾状矿石(图 5m)和条带状矿石(图 5q)。块状矿石呈黄褐色(图 5i), 主要由菱锌矿、水锌矿组成, 未被氧化成水锌矿的部分呈灰色, 形成水锌矿的部分呈褐色, CL 图像呈条带变化, 黑色部分为 Sm1, 蓝色荧光为水锌矿, 菱面体晶型完好, 环带发育, 表面粗糙, 与锰氧化物密切共生(图 5j、图 5k、图 5l)。角砾状矿石孔洞发育, 孔洞周边发育 Sm2, 晶型完好, Sm1 多被氧化形成水锌矿, Sm2 和水锌矿 CL 图像下均呈纯净蓝色, 白铅矿与 Sm2 紧密共生(图 5n、图 5o); 白铅矿中可见方铅矿残留, 显示硫化物交代改造的特征, 并包裹 Sm1, 表明 Sm1 形成略早于白铅矿(图 5p)。条带状矿石主要为菱锌矿与白铅矿互层, 菱锌矿颗粒较细, 结构致密, 而白铅矿颗粒较粗, 与 Sm2 密切共生(图 5r、图 5s、图 5t), 表明 Sm1 与白铅矿并非同时形成, 白铅矿应为晚阶段沿 Sm1 间裂隙充填而成。

2.4 成矿阶段划分

根据火烧云铅锌矿床的矿物共生顺序, 结合矿体赋存位置及其相互关系, 将矿床的铅锌矿化分为 3 个成矿阶段: 早期铅锌硫化物成矿阶段、中期铅锌非硫化物成矿阶段与晚期氧化阶段。表现出方铅矿、闪锌矿、方解石(早)→菱锌矿、锰氧化物(中)→菱锌矿、白铅矿、石膏(中)→水锌矿(晚)的矿物组合变化(表 1)。

表 1 火烧云矿区矿物共生组合及生成顺序表

Tab. 1 Mineral assemblage and formation sequence of the Huoshaoyun zinc-lead deposit

矿物	硫化物成矿阶段	非硫化物成矿阶段	
		菱锌矿-锰氧化物亚阶段	菱锌矿-白铅矿-石膏亚阶段
方铅矿	████████		
闪锌矿	████████		
方解石	████		
菱锌矿		████████	████
锰氧化物		██	
白铅矿			████████
石膏			██
水锌矿			████████

3 样品及分析方法

笔者主要采集了火烧云矿区铅锌矿石、热液石膏以及地层中的方解石、石膏等样品, HSY 系列样品是采集于Ⅱ号矿带地表露头的铅锌矿石和热液石膏, ZK 系列样品是采集于Ⅲ号矿带钻孔内的铅锌矿石, HSG 和 S 系列样品是采集于地层中的沉积石膏样品, 分别进行了 S、Pb、C-O 以及 He-Ar 同位素测试工作。

S 同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地球化学实验室完成。仪器设备为美国热电公司的 253plus、Flash EA 元素分析仪和 Conflo IV 多用途接口。将含有不超过 100 μg S 的样品和 3 倍于样品的 V_2O_5 包在一个小锡舟里, 自动进样系统每次投入燃烧反应器中一个锡舟, 通入 5mL 的纯氧气, 使样品在 1 020 $^{\circ}\text{C}$ 下燃烧, 产生的所有气体在氦载气流下带入并通过分层充填 WO_3 、CuO 和 Cu 丝的氧化还原反应器, 使所有气体充分氧化, 同时使生成的少量 SO_3 通过 Cu 丝层时还原为 SO_2 。气体通过一根色谱柱(美国热电)将 SO_2 和其他杂质气体分开后进入质谱仪测试, 采用 IAEA-SO-5、IAEA-SO-6 和 NBS 127 三种国际标准物质, 标样的分析精度可达到 0.2%。

Pb 同位素分析在核工业北京地质研究院实验测试中心完成。将矿石样品粉碎至 60 目, 经浮选等方法挑选出单颗粒矿物, 然后在双目镜下挑纯。Pb 同位素分析步骤如下: 首先用混合酸($\text{HF} + \text{HClO}_4$)溶样, 然后用树脂交换法分离出铅, 蒸干后用热表面电离质谱法进行铅同位素测试, 仪器为 Phoenix 热表面电离质谱仪, 对于 1 μg 的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 分析精度优于 0.005%。

C、O 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地球化学实验室完成。采用的是 GasBench II 连续流法, 质谱仪为 MAT253。称量约 100 μg 样品加入到 12 mL 反应瓶中, 每次最多测量样品数为 88 个, 其中 18 个为标准样品(分别为 GBW04416、GBW04417、GBW04405 和 GBW04406)。使用高纯氦气(99.999%, 流速 100 mL/min)进行 600s 的排空处理。排空后加入 5 滴 100% 无水磷酸后置于 72 $^{\circ}\text{C}$ 加热盘中反应并平衡(方解石反应及平衡时间大于 4 h)。样品与磷酸反应且平衡后的 CO_2

气体经过 70℃ 的熔硅毛细管柱 (规格为 Poraplot Q, 25 mm×0.32 mm) 而与其他杂质气体分离, 进入到 MAT253 质谱仪进行测定。一般 18 个标样的测试结果的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 测试精度均高于 0.1‰。PDB 与 SMOW 之间的转换采用以下公式:

$$\delta^{18}\text{O}_{(\text{V-PDB})} = (\delta^{18}\text{O}_{(\text{V-SMOW})} - 30.91) / 1.0309$$
(GONFIANTINI et al., 1995)。

He-Ar 同位素测试在自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。样品采用 Helix SFT 稀有气体质谱仪测试, 由压碎、纯化和质谱系统组成。测试在高真空下完成, 压碎和纯化系统真空在 $n \times 10^{-7}$ Pa, 质谱系统真空在 $n \times 10^{-8}$ Pa。质谱离子源采用 Nier, 灵敏度对 He 在 800 μA 阱电流时好于 2×10^{-4} amps/Torr, 对 Ar 在 200 μA 阱电流时好于 1×10^{-3} amps/Torr。⁴⁰Ar 静态上升率小于 1×10^{-12} cm³SPT/min, ³⁶Ar 本底小于 5×10^{-14} cm³SPT。法拉第杯分辨率 > 400, 离子计数器分辨率 > 700, 可将 ³He 与 ⁴He、HD+H₃ 与 ³He 峰完全分开。实验过程中首先将高纯度 40~60 目样品清洗、烘干, 取 0.5~1.0 g 装入不锈钢坩埚再移到压碎装置中, 密封并加热去气、抽真空。随后压碎样品, 多级纯化包裹体气, 分离出纯 He 和 Ar。He 模式下, ⁴He 信号用法拉第杯接收, ³He 用离子倍增器接收。离子源电压为 4.5 kV, 电流为 1 218 μA , trap 电压为 15.56 V, 电流为 450 μA 。Ar 模式下, ⁴⁰Ar 和 ³⁶Ar 用法拉第杯接收, ³⁸Ar 用倍增器接收。离子源电压为 4.5 kV, 电流为 454 μA , trap 电压为 15.02 V, 电流为 200 μA 。利用当天空气标准的测试结果和空气标准值校正样品测试结果。空气的 ³He/⁴He 标准值采用 1.4×10^{-6} , ⁴⁰Ar/³⁶Ar 和 ³⁶Ar/³⁸Ar 标准值采用 295.5 和 5.35。利用 0.1 mL 标准气 ⁴He (52.3×10^{-8} cm³SPT) 和 ⁴⁰Ar (4.472×10^{-8} cm³SPT) 含量、标准气和样品的同位素信号强度以及样品压碎后过筛 100 目以下的质量标定样品中 ⁴He 和 ⁴⁰Ar 含量。

4 分析结果

4.1 S 同位素

分析结果(表 2)表明, 火烧云矿区 3 件方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-18.9\text{‰} \sim -4.2\text{‰}$, 5 件热液石膏样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-20.6\text{‰} \sim -7.5\text{‰}$; 火烧云北龙山组灰岩中石膏层 2 件石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 14.5‰ ; 金鱼山

东龙山组砂砾岩中石膏矿 3 件石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $11.1\text{‰} \sim 12.6\text{‰}$ 。

表 2 火烧云铅锌矿床及外围硫同位素组成表

Tab. 2 Sulfur isotope compositions from the Huoshayun zinc-lead deposit and surrounding area

地点	样号	矿物	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$
火烧云矿区	Ⅲ号矿带	ZK15031-87.7	方铅矿 -18.9
		HSY15P-7	方铅矿 -6.9
		HSY15P-8	方铅矿 -4.2
		HSY16-1	热液石膏 -8.1
	Ⅱ号矿带	HSY16-2	热液石膏 -8.0
		HSY16-3	热液石膏 -7.5
		HSY16-4	热液石膏 -13.3
		HSY16-5	热液石膏 -20.6
	火烧云北龙山组	HSG-2	石膏 14.5
	灰岩中石膏层	HSG-3	石膏 14.5
金鱼山东龙山组砂砾岩中石膏矿	S-1	石膏 12.6	
	S-2	石膏 11.1	
	S-3	石膏 11.1	
	S-4	石膏 12.3	

4.2 Pb 同位素

火烧云矿区方铅矿、菱锌矿、白铅矿的 Pb 同位素组成表明(表 3), 方铅矿的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.532~18.563, 平均为 18.547, 极差为 0.031; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.673~15.710, 平均为 15.692, 极差为 0.037; ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 38.879~39.005, 平均为 38.939, 极差为 0.126。菱锌矿的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.568~18.646, 平均为 18.609, 极差为 0.078; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.730~15.798, 平均为 15.766, 极差为 0.068; ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 39.046~39.289, 平均为 38.177, 极差为 0.243。白铅矿的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.524~18.559, 平均为 18.539, 极差为 0.035; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.661~15.684, 平均为 15.672, 极差为 0.023; ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 38.843~38.993, 平均为 38.899, 极差为 0.15。

4.3 C、O 同位素

火烧云矿区 41 件样品 C、O 同位素测试结果见表 4。4 件方解石的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $0.6\text{‰} \sim 3.1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $15.3\text{‰} \sim 24.6\text{‰}$; 16 件菱锌矿的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-2.7\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $10.4\text{‰} \sim 26.1\text{‰}$; 21 件白铅矿的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-7.7\text{‰} \sim 4.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $9.3\text{‰} \sim 24.3\text{‰}$ 。董连慧等(2015)测试的 4 件方解石的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $1.9\text{‰} \sim 2.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $23.9\text{‰} \sim$

24.6‰; 6件菱锌矿的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-1.5\text{‰} \sim 3.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $10.4\text{‰} \sim 24.9\text{‰}$; 13件白铅矿的 $\delta^{18}\text{C}_{\text{PDB}}$

为 $-7.3\text{‰} \sim 1.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $10.8\text{‰} \sim 16.8\text{‰}$, 与笔者分析数据基本相近。

表3 火烧云铅锌矿床铅同位素组成表

Tab.3 Lead isotope compositions from the Huoshaoyun zinc-lead deposit

矿带	样号	名称	^{206}Pb / ^{204}Pb	^{207}Pb / ^{204}Pb	^{208}Pb / ^{204}Pb	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
II号矿带	15HSY08-2	方铅矿	18.534	15.677	38.887	9.60	38.40	3.87	81.15	23.09	45.36
	HSY15p-2-2	方铅矿	18.532	15.673	38.879	9.59	38.34	3.87	80.76	22.81	44.99
	HSY15p-7-2	方铅矿	18.560	15.707	38.983	9.66	38.93	3.90	84.10	25.13	48.74
	HSY15p-8-2	方铅矿	18.563	15.710	39.005	9.66	39.03	3.91	84.39	25.33	49.40
	15HSY08-1	菱锌矿	18.583	15.744	39.094	9.73	39.62	3.94	87.7	27.68	53
	HSY15p-2-1	菱锌矿	18.596	15.751	39.135	9.74	39.78	3.95	88.4	28.13	54.07
	HSY15p-7-1	菱锌矿	18.632	15.798	39.282	9.83	40.64	4.00	92.97	31.34	59.41
	HSY15p-8-1	菱锌矿	18.617	15.779	39.212	9.79	40.25	3.98	91.13	30.04	56.98
III号矿带	ZK15031-77.3-2	白铅矿	18.559	15.684	38.993	9.61	38.75	3.90	81.88	23.51	47.79
	ZK15031-82.1-2	白铅矿	18.533	15.661	38.843	9.57	38.07	3.85	79.60	21.96	43.33
	ZK403-1	白铅矿	18.524	15.672	38.861	9.59	38.30	3.87	80.64	22.77	44.70
	ZK15031-77.3-1	菱锌矿	18.646	15.792	39.289	9.82	40.53	3.99	92.43	30.87	58.84
	ZK15031-82.1-1	菱锌矿	18.625	15.775	39.196	9.78	40.10	3.97	90.76	29.73	56.08
	ZK15031-87.7	菱锌矿	18.602	15.759	39.158	9.76	39.92	3.96	89.18	28.68	54.93
	ZK402-13	菱锌矿	18.568	15.73	39.046	9.7	39.37	3.93	86.32	26.73	51.43

注: $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$; $\omega = ^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$. $\Delta\beta = 1000\beta/(\beta_{\text{M}} - 1)$, $\Delta\gamma = 1000\gamma/(\gamma_{\text{M}} - 1)$; β 、 γ 和 β_{M} 、 γ_{M} 分别为样品和地幔的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 。

4.4 He-Ar 同位素

方铅矿、菱锌矿、白铅矿是火烧云矿床最主要的矿石矿物,其中的流体包裹体可以在最大程度上反映成矿期成矿流体的原始信息。研究表明与黄铁矿具有很低的氦扩散系数相比,尽管其他矿物中流体包裹体中的氦在流体包裹体被圈闭后发生一定的丢失,但在扩散丢失过程中,氦同位素并未产生明显的分馏,对其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值一般影响不大。因此,在以 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(而不是基于 He 的丰度)讨论问题时,可以不考虑扩散丢失的影响(胡瑞忠等,1999)。而大多数矿物中流体包裹体对氩都有很好的保存能力(TRULL et al., 1991)。氦在大气中的含量极低,不足以对地壳流体中氦的丰度和同位素组成产生明显影响(STUART et al., 1995)。因此,测试矿物流体包裹体中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值及 Ar 同位素组成能够代表流体包裹体被捕获时成矿流体的初始值。

由表5可知,方解石中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.05 \sim 0.39 R/R_a$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 $296.2 \sim$

428.9 ; 方铅矿中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.03 R/R_a$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 290.0 ; 菱锌矿中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.10 \sim 0.43 R/R_a$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 $290.6 \sim 295.3$; 白铅矿中流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.08 R/R_a$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 293.5 。

5 讨论

5.1 成矿物质来源

5.1.1 S 同位素示踪

硫化物矿床中硫的来源是多种多样的,大致可以分为4类:①来自地幔和深部地壳,其S同位素平均组成与陨石S同位素组成接近,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 $\pm 3\text{‰}$ 。②来自海水硫酸盐,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般在 $+20\text{‰}$ 左右。③沉积物中的还原硫, $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围较大,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值以较大的负值为主。④混合硫, $\delta^{34}\text{S}$ 值常介于地幔硫和海水硫酸盐硫同位素组成之间(OHMOTO, 1972; OHMOTO et al., 1979; 郑永飞等, 2000)。

表 4 火烧云铅锌矿床碳、氧同位素测试结果表

Tab. 4 Carbon and oxygen isotope compositions from the Huoshaoyun zinc-lead deposit

矿带	样号	样品名称	d ¹³ C _{V-PDB} ‰	d ¹⁸ O _{V-SMOW} ‰	数据来源	矿带	样号	样品名称	d ¹³ C _{V-PDB} ‰	d ¹⁸ O _{V-SMOW} ‰	数据来源
II 号矿带	15HSY09	方解石	2.8	16.3		III 号矿带	ZK1101-165	菱锌矿	2.6	21.7	董连慧, 2015
	15HSY13	方解石	3.1	22.6			ZK1905-40	菱锌矿	1.1	22.7	
	15HSY08-1	菱锌矿	4.0	25.9			ZK1103-60	菱锌矿	-1.5	10.4	
	HSY15p-2-1	菱锌矿	4.2	25.9			ZK15031-72-2	白铅矿	-0.3	23.6	本文
	HSY15p-7-1	菱锌矿	4.4	25.1			ZK15031-75.1-2	白铅矿	-7.7	13.4	
	HSY15p-8-1	菱锌矿	3.9	23.5	本文		ZK15031-77.3-2	白铅矿	-0.1	24.3	
	15HSY04	白铅矿	0.0	18.0			ZK15031-80.6-2	白铅矿	-0.3	23.0	
	15HSY08-2	白铅矿	-4.4	11.6			ZK15031-82.1-2	白铅矿	0.7	23.5	
	HSY15p-2-2	白铅矿	-1.5	13.1			ZK15031-84.8-2	白铅矿	-1.4	18.3	
	HSY15p-7-2	白铅矿	0.8	18.0			ZK15031-87.7-2	白铅矿	-3.8	17.0	
HSY15p-8-2	白铅矿	0.0	15.9		ZK15031-91-2	白铅矿	-2.6	17.9			
ZK403-102	方解石	2.7	24.6		ZK402-2	白铅矿	-1.7	12.4			
ZK1103-106	方解石	1.9	24.1	董连慧, 2015	ZK402-7-2	白铅矿	-0.9	10.5			
ZK403-113	方解石	1.9	24.1		ZK402-9	白铅矿	-0.4	9.4			
ZK403-125.5	方解石	2.3	23.9		ZK402-10-2	白铅矿	-1.8	11.9			
ZK15031-68.5	方解石	0.6	15.3		ZK402-11-2	白铅矿	4.3	22.3			
ZK005-4	方解石	2.3	22.8		ZK403-1	白铅矿	-1.6	11.1	本文		
ZK15031-72-1	菱锌矿	1.8	25.2		ZK403-2	白铅矿	-1.3	9.3			
ZK15031-75.1-1	菱锌矿	0.3	26.1		ZK403-3	白铅矿	-0.1	9.9			
ZK15031-77.3-1	菱锌矿	1.1	25.6		ZK403-106	白铅矿	-0.8	12.3			
ZK15031-80.6-1	菱锌矿	1.3	25.6		ZK403-104	白铅矿	0.1	12.7			
ZK15031-82.1-1	菱锌矿	1.8	24.8	本文	ZK403-121.5	白铅矿	-1.2	12.6			
ZK15031-84.8-1	菱锌矿	2.1	23.3		ZK1901-43.5	白铅矿	-2.7	14.1			
ZK15031-87.7-1	菱锌矿	1.5	24.2		ZK1901-46.6	白铅矿	-5.2	15.2			
ZK15031-91-1	菱锌矿	2.0	23.0		ZK1103-62.5	白铅矿	-6.8	12.6	董连慧, 2015		
ZK402-7-1	菱锌矿	3.9	23.0		ZK2301-18.5	白铅矿	1.2	16.8			
ZK402-10-1	菱锌矿	4.5	22.7		ZK2301-25	白铅矿	0.4	14.1			
ZK402-11-1	菱锌矿	4.2	22.8		ZK310-134.5	白铅矿	-2.1	11.1			
ZK402-13	菱锌矿	-2.7	10.6		ZK005-115.5	白铅矿	-7.3	13.5			
ZK1901-43.5	菱锌矿	3.7	24.9	董连慧, 2015	ZK005-126.5	白铅矿	-3.1	11.5			
ZK1901-46.6	菱锌矿	0.8	22.6		ZK301-145.5	白铅矿	-7.3	11.8			
ZK1101-173	菱锌矿	2.5	22.4		ZK403-122.5	白铅矿	-0.9	10.8			

表 5 火烧云矿床流体包裹体 He、Ar 同位素组成表

Tab. 5 He and Ar isotopic compositions of fluid inclusions from the Huoshaoyun zinc-lead deposit

矿带	样品号	样品名称	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	误差	³⁶ Ar/ ³⁸ Ar	误差	³ He/ ⁴ He (10 ⁻⁷)	误差	⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸)	⁴ He (10 ⁻⁸)	R/Ra
II 号矿带	15HSY13	方解石	428.9	0.25	5.38	0.00	5.50	1.41	800.59	67.91	0.39
	15HSY02	方铅矿	290.0	0.14	5.36	0.00	0.45	0.40	139.48	16.70	0.03
	15HSY02	菱锌矿	293.7	0.08	5.37	0.01	2.29	3.12	43.69	2.10	0.16
	HSY15P-8	菱锌矿	290.9	0.30	5.37	0.01	1.36	0.96	86.46	3.88	0.10
III 号矿带	ZK15031-68.5	方解石	296.2	0.18	5.35	0.00	0.66	0.15	215.38	126.49	0.05
	ZK402-13-1	菱锌矿	291.6	0.12	5.35	0.00	1.73	2.91	71.68	1.27	0.12
	ZK15031-72-1	菱锌矿	293.1	0.11	5.36	0.00	1.47	1.25	289.57	6.18	0.10
	ZK15031-77.3-1	菱锌矿	290.6	0.08	5.36	0.00	6.00	3.15	497.82	2.03	0.43
	ZK15031-84.8-1	菱锌矿	295.3	0.20	5.34	0.01	1.84	1.85	91.27	2.18	0.13
	ZK402-13-2	白铅矿	293.5	0.17	5.35	0.00	1.13	0.56	162.51	3.73	0.08

注:R 为样品的 ³He/⁴He 值, Ra 为空气的 ³He/⁴He 值(1.4×10⁻⁶)。

火烧云北龙山组灰岩中石膏层和金鱼山东龙山组砂砾岩中石膏矿中石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 分别为 14.5‰ 和 11.1‰~12.6‰, 均具较大正值且分布范围很窄, 表明其硫源可能来源于海相硫酸盐。火烧云矿区方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -18.9‰~-4.2‰, 明显区别于岩浆硫和现代海水硫来源特征, 也低于 Sedex 型铅锌矿床中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 的变化范围(-5‰~15‰, SANGSTER, 1991), 而与沉积物中还原硫的特征较为相似, 表明硫化物成矿阶段的硫可能来源于海相硫酸盐的还原。与铅钒、菱锌矿等密切共生的热液石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -20.6‰~-7.5‰, 为较大负值且变化范围较宽(图 6), 与硫化物阶段方铅矿的硫同位素特征较为相似, 表明非硫化物成矿阶段可能发生了溶解交代作用, 并继承了硫化物阶段矿物的硫同位素特征。

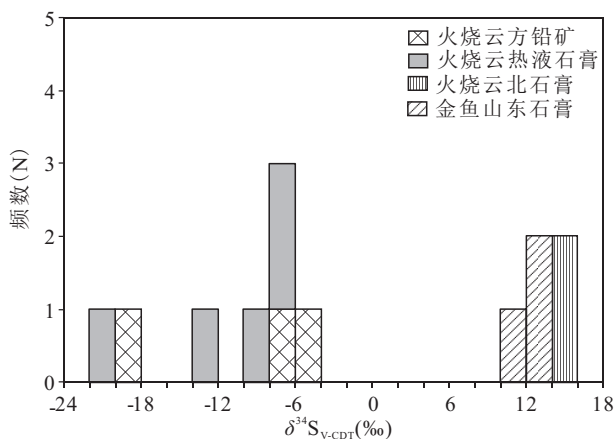
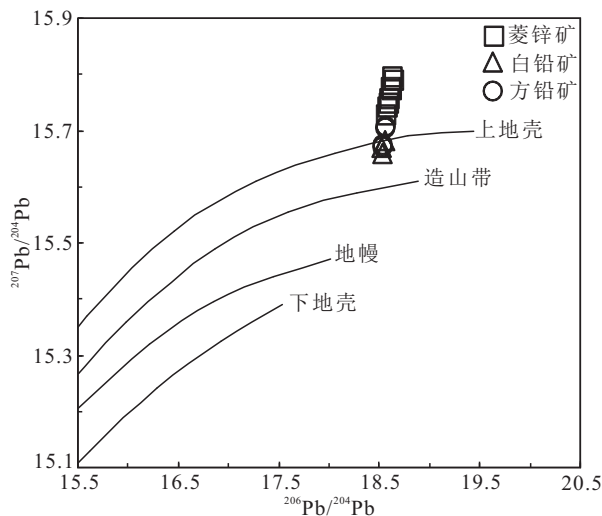


图 6 火烧云铅锌矿床硫同位素组成直方图

Fig. 6 Histogram for $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfides from the Huoshaoyun zinc-lead deposit



5.1.2 Pb 同位素示踪

通常认为铅同位素组成特征值(μ 值)的变化能提供地质体所经历地质过程信息, 反映成矿物质来源。研究表明, 具有高 μ 值(>9.58)的 Pb 常被认为是来自 U、Th 相对富集的上部地壳物质(ZARTMAN et al., 1981), μ 值相对低的 Pb 可能来自于下地壳或者上地幔。火烧云铅锌矿床硫化物成矿阶段方铅矿和非硫化物成矿阶段菱锌矿、白铅矿的 Pb 同位素均较为相似, Pb 同位素 μ 值为 9.57~9.83, 平均为 9.70, 除一件样品外, 其余样品 μ 值均高于 9.58, 显示主体具有上地壳源区物质特征, 而 Th/U 值为 3.85~4.00, 也与全球上地壳平均值 3.88 接近(TAYLOR et al., 1995)。据 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图 7), 不同阶段矿石矿物均位于上地壳及上地壳与造山带演化线之间, 表明 Pb 主要来源于上地壳物质。在 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解中(图 8)(朱炳泉等, 1998), 各阶段矿石矿物 Pb 同位素也均落于上地壳铅范围内。综上所述, 火烧云矿床硫化物成矿阶段和非硫化物成矿阶段成矿物质来源均主要为上地壳。

区域石炭系、泥盆系、志留系、奥陶系以及长城系中的 Pb 含量基本处于地壳克拉克值附近, 而二叠系—白垩系中 Pb、Zn 同时富集(赵晓健等, 2014)。其中二叠纪神仙湾组地层中 Pb 含量为 65×10^{-6} , Zn 含量为 163×10^{-6} ; 三叠纪上河尾滩组中 Pb 含量为 68×10^{-6} , Zn 含量为 149×10^{-6} ; 侏罗纪龙山组中 Pb 含量为 81×10^{-6} , Zn 含量为 149×10^{-6} ; 白垩纪铁龙滩组中 Pb 含量为 42×10^{-6} , Zn 含量为 103×10^{-6} , 均远远高于西昆仑地区 Pb、Zn

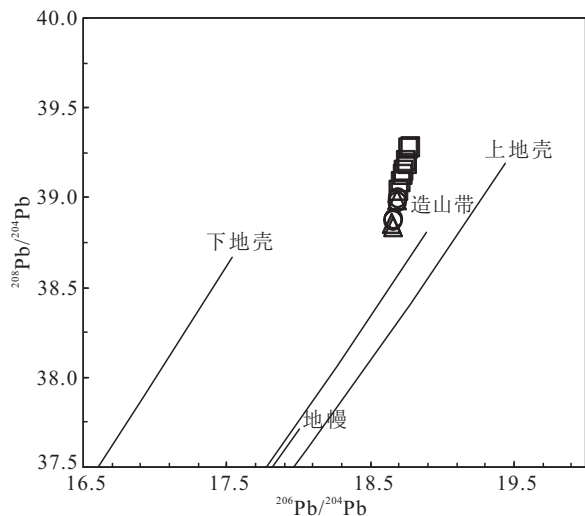
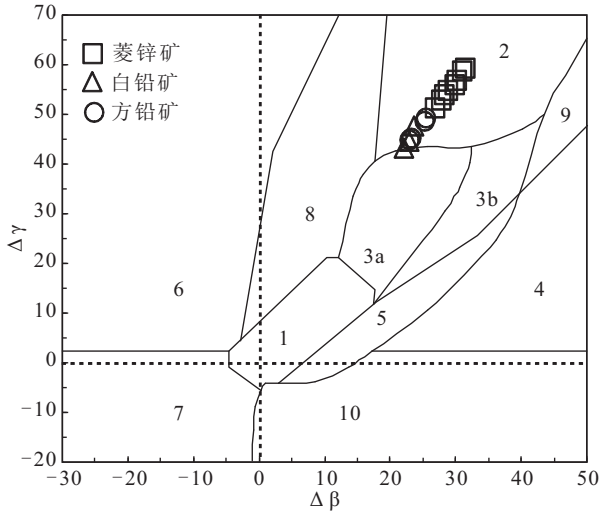


图 7 火烧云矿床矿石铅同位素构造模式图(底图据 ZARTMAN et al., 1981)

Fig. 7 Lead isotope tectonic discriminant diagram from the Huoshaoyun zinc-lead deposit

平均值 (Pb 为 20×10^{-6} , Zn 为 65×10^{-6})。因此, Pb、Zn 等成矿元素可能主要来源于二叠系—白垩系。



1. 上地幔铅; 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

图 8 火烧云矿床矿石铅同位素 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 图解 (底图据朱炳泉等, 1998)

Fig. 8 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ diagram for lead isotopes from the Huoshaoyun zinc-lead deposit

5.1.3 C、O 同位素示踪

通常认为成矿热液中碳的来源主要有 3 种: ①地幔射气或岩浆来源, 其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 $-5\text{‰} \sim -2\text{‰}$ 或 $-9\text{‰} \sim -3\text{‰}$ (TAYLOR, 1986)。②海相碳酸盐来源, 其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值多在零值附近, 为 $0 \pm 4\text{‰}$ (VEIZER et al., 1976)。③有机碳来源, $\delta^{13}C_{PDB}$ 值组成为 $-30\text{‰} \sim -15\text{‰}$, 平均为 -22‰ (HOEFS, 1987)。笔者测试硫化物成矿阶段的 4 件方解石 $\delta^{18}C_{PDB}$ 为 $0.6\text{‰} \sim 3.1\text{‰}$, 表明其来源于海相碳酸盐岩; 非硫化物成矿阶段的 16 件菱锌矿 $\delta^{18}C_{PDB}$ 有 14 件分布在 $0.3\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$, 表明其主要来源于海相碳酸盐岩; 21 件白铅矿 $\delta^{18}C_{PDB}$ 分布在 $-7.7\text{‰} \sim 4.3\text{‰}$, 表明存在海相碳酸盐岩之外其他流体的参与。在 $\delta^{13}C_{PDB} - \delta^{18}O_{SMOW}$ 图解中 (图 9), 方解石和菱锌矿基本均投点于海相碳酸盐岩中, 表明其 C、O 同位素来源于碳酸盐岩地层的溶解作用, 继承了围岩的同位素特征。II 号矿带白铅矿的 C、O 同位素漂移可能是与大气降水的混入有关, 而 III 号矿带白铅

矿的 C、O 同位素组成变化范围较大, 主体均产生同位素的漂移, 与大气降水的混入有关, 部分仍直接来源于碳酸盐岩的溶解作用。

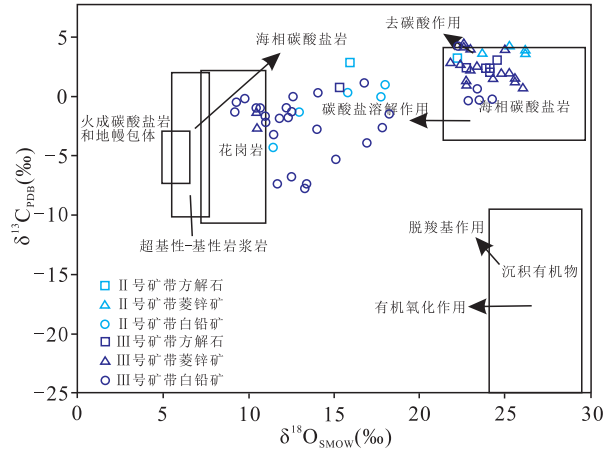


图 9 火烧云铅锌矿床 $\delta^{13}C_{PDB} - \delta^{18}O_{SMOW}$ 图解

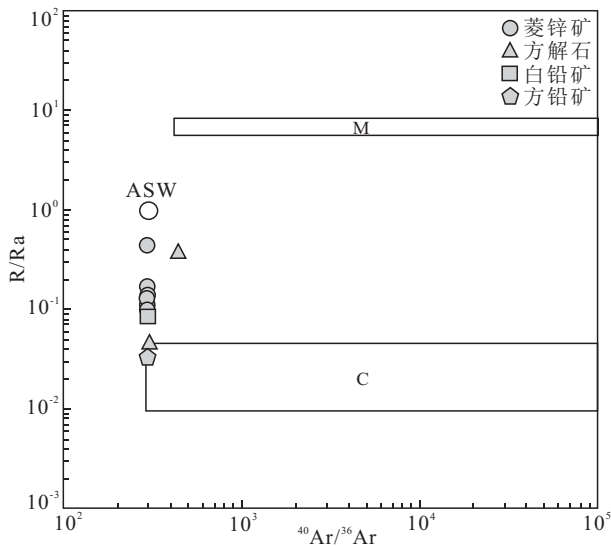
Fig. 9 $\delta^{13}C_{PDB}$ versus $\delta^{18}O_{SMOW}$ diagram of the Huoshaoyun zinc-lead deposit

5.2 成矿流体特征

据 BURNARD 等 (1999) 研究认为热液流体中的稀有气体有 4 种来源, 而且不同来源气体的氦、氩同位素组成及其特征比值具有显著差别。①大气饱和水 (ASW), 包括大气降水和海水, 其典型的同位素组成为 $^3He/^4He = 1 R/Ra$, $^{40}Ar/^36Ar = 295.5$ 。②地幔流体, 具有 3He 含量高的特征, $^3He/^4He$ 的特征值为 $6 \sim 9 R/Ra$, $^{40}Ar/^36Ar$ 值变化较大, Ar 以放射性成因 Ar 为主, $^{40}Ar/^36Ar$ 值一般大于 40 000。③壳源流体, $^3He/^4He$ 的特征值为 $0.01 \sim 0.05 R/Ra$, $^{40}Ar/^36Ar > 295.5$ 。④大气, 由于 He 含量很低, 不足以对地壳流体中的 He 同位素组成产生影响, 但是目前无法区别流体中是否有大气 Ar 的混入。

火烧云矿床硫化物成矿阶段方解石中流体包裹体的 $^3He/^4He$ 值为 $0.05 \sim 0.39 R/Ra$, $^{40}Ar/^36Ar$ 值为 $296.2 \sim 428.9$; 方铅矿中流体包裹体的 $^3He/^4He$ 值为 $0.03 R/Ra$, $^{40}Ar/^36Ar$ 值为 290.0 , 均明显区别于地幔流体, 而与壳源流体较为相似。非硫化物成矿阶段菱锌矿中流体包裹体的 $^3He/^4He$ 值为 $0.10 \sim 0.43 R/Ra$, $^{40}Ar/^36Ar$ 值为 $290.6 \sim 295.3$; 白铅矿中流体包裹体的 $^3He/^4He$ 值为 $0.08 R/Ra$, $^{40}Ar/^36Ar$ 值为 293.5 , 显示壳源流体与大气降水混合特征 (图 10)。

对流体包裹体研究显示,硫化物成矿阶段方解石中流体包裹体均一温度为 270~329℃,盐度为 0.13%~1.25% NaCl,密度 0.68~0.76 g/cm³,成分以 CO₂、CH₄ 为主;非硫化物成矿阶段白铅矿中流体包裹体均一温度为 126~185℃,盐度为 0.13%~1.68% NaCl,密度 0.89~0.95 g/cm³,成分以 CO₂、H₂S、CH₄ 为主。可见,火烧云矿床硫化物成矿阶段成矿流体可能为中温、低盐度、中低密度的还原性壳源流体,非硫化物成矿阶段成矿流体可能为中低温、低盐度、中密度的壳源流体与大气降水混合流体。



M. 地幔; C. 地壳; ASW. 大气饱和水

图 10 火烧云铅锌矿床⁴⁰Ar/³⁶Ar-R/Ra 图解
(底图据王旭东等, 2009)

Fig. 10 ⁴⁰Ar/³⁶Ar-R/Ra diagram of the
Huoshayun zinc-lead deposit

5.3 矿床成因

非硫化锌矿床可划分为表生和内生两大成因类型(HITZMAN et al., 2003)。表生成因非硫化锌矿以菱锌矿为主,细分为直接交代型、围岩交代型和残余-岩溶充填型,是原生锌硫化物(闪锌矿)表生氧化及次生交代富集而形成,形成规模取决于先存锌矿床的规模和锌矿物学特征、潜水面的垂直变化、地壳隆起所致的潜水面下降速率、气候条件、围岩的渗透性和中性水的沉淀环境等,且多认为其形成于低温条件下,形成温度不高于 50℃,流体以大气降水为主(BONI et al., 2003);内生成因的非硫化物锌矿床以硅锌矿为主,细分为 2 亚类:构造控制交代型和喷流沉积层状型,为还原的、低至中温(80~

200℃)富锌贫硫的流体与氧化的贫硫流体混合而形成。对于以菱锌矿为主的浅成非硫化物锌矿床,直接交代和围岩交代是其主要类型(BONI et al., 2015),直接交代型为硫化物矿体被原地氧化交代而成,以铁氧化物、异极矿、菱锌矿、水锌矿、白铅矿为主,Zn、Fe 含量较高,Zn>20%,Fe>7%,Pb、As 含量较高,同时残存方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等(REICHERT et al., 2008);围岩交代型为硫化物氧化运移与围岩交代而成,可能远离矿体几千米甚至更远(HITZMAN et al., 2003),主要由菱锌矿、水锌矿以及少量铁氧化物、白铅矿组成,Zn<40%,Fe<7%(REICHERT et al., 2008; BONI et al., 2015)。

综上所述,火烧云矿床埋藏浅(50~230 m),主要为褐色块状矿石,矿石矿物以菱锌矿为主,次为白铅矿(少量残余方铅矿)+锰氧化物、水锌矿等,与浅成非硫化物锌矿床特征较为相似(LARGE, 2001; HITZMAN et al., 2003; BONI et al., 2015),具有独特的成矿物理化学条件及成矿机制(图 11)。

(1) 二叠纪—白垩纪岔路口一带在前陆盆地环境下形成碎屑岩与碳酸盐岩沉积岩系,形成了富含 Pb、Zn 的矿源层。

(2) 晚白垩纪盆地边缘的韧性剪切走滑及新近纪大规模的脆性逆冲推覆,致使侏罗纪—白垩纪碳酸盐岩建造强烈变形,在先锋带乔尔天山断裂附近形成破碎带和层间滑脱带,在河尾滩等断裂系形成系列层间滑动带及有利的构造圈闭。持续挤压应力驱动盆地流体大规模侧向运移,淋滤地层中铅锌等元素。形成富含铅锌的中温还原性成矿流体。而多宝山等地区存在大气降水的混入,沿乔尔天山、河尾滩断裂等汇聚排泄,在碳酸盐岩变形构造圈闭形成地球化学障,地层中同时提供了充足的 S 源,最终卸载形成硫化物矿体。

(3) 随着区域构造应力由挤压转为伸展,区域上沿着断裂系形成大量的开放空间,大量大气降水下渗,同时由于 Zn 元素极易溶解迁移,先成的硫化物矿体被氧化从而形成富 Zn 的氧化性流体,而还原性地壳流体持续上升至地表,当混合流体进入层间构造带,与围岩发生交代作用,继而形成菱锌矿、热液石膏等。由于地表流体的持续加入,Pb 等元素也随之下渗,再次与围岩发生交代生成白铅矿等。而多宝山等矿床直接在硫化物矿体之上进行交代形成了混合矿体,同时,在地表会形成铅帽等。

火烧云非硫化物阶段成矿过程为:①闪锌矿氧化: $ZnS(\text{闪锌矿}) + O_2(4H_2O) \rightarrow Zn^{2+} + SO_4^{2-} + (8H^+ + 8e)$ 。②交代形成菱锌矿: $CaCO_3 + Zn^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow ZnCO_3(\text{菱锌矿}) + CaSO_4 \cdot 2H_2O(\text{石膏})$ 。③方铅矿氧化: $PbS(\text{方铅矿}) + O_2 \rightarrow Pb^{2+} + SO_4^{2-}$ 。④交代形成白铅矿: $CaCO_3 + Pb^{2+} +$

$SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow PbCO_3(\text{白铅矿}) + CaSO_4 \cdot 2H_2O(\text{石膏})$ 。

(4)随着青藏高原隆升,菱锌矿等发生叠加氧化作用,形成大量水锌矿,矿体受后期断裂破坏。

$5ZnCO_3 + 6H^+ + 3CO_3^{2-} \rightarrow Zn_5(CO_3)_2(OH)_6 + 6CO_2 \uparrow$

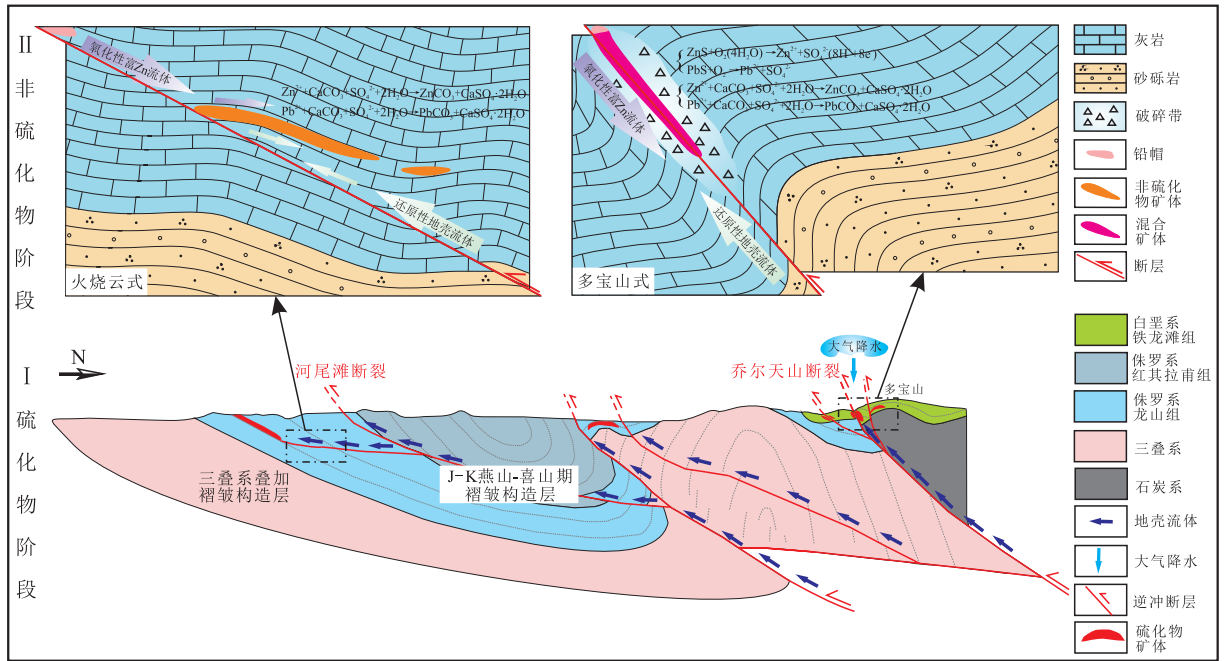


图 11 火烧云一带区域铅锌成矿模式图

Fig. 11 Metallogenic model of the Huoshaoyun zinc-lead belt

综上所述,火烧云矿床是盆地边缘褶皱逆冲+构造流体+次生交代成矿系统的产物。硫化物成矿阶段为构造热液成因,非硫化物成矿阶段为围岩交代成因,后期发生叠加氧化作用形成大量水锌矿。

6 结论

(1)火烧云铅锌矿床可分为 3 个成矿阶段:早期铅锌硫化物成矿阶段(方铅矿、闪锌矿、方解石)、中期铅锌非硫化物成矿阶段(菱锌矿、锰氧化物→菱锌矿、白铅矿、石膏)与晚期表生氧化阶段(水锌矿)。

(2)S 同位素研究显示硫化物阶段的 S 可能来自于海相硫酸盐的还原,非硫化物阶段热液石膏继承了硫化物阶段矿物的 S 同位素特征。Pb 同位

素组成集中,具有地壳来源特征,二叠系—白垩系可能提供了金属成矿物质。方解石和菱锌矿的 C、O 同位素直接来源于碳酸盐岩的溶解作用,白铅矿的 C、O 同位素发生漂移,可能与大气降水的混入有关。

(3)He-Ar 同位素组成及流体包裹体分析结果表明,火烧云矿床硫化物成矿阶段成矿流体可能为中温、低盐度、中低密度的还原性壳源流体,非硫化物成矿阶段成矿流体可能为中低温、低盐度、中密度的壳源流体与大气降水混合流体。

(4)火烧云超大型铅锌矿床是盆地边缘褶皱逆冲+构造流体+次生交代成矿系统的产物,硫化物成矿阶段为构造热液成因,非硫化物成矿阶段为围岩交代成因,后期发生叠加氧化作用形成大量水锌矿。

致谢:野外地质工作得到新疆地矿局第八地质

大队、新疆地矿局物化探大队、新疆地矿局第三地质大队、陕西地质调查中心的帮助,在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- 董连慧, 徐兴旺, 范廷宾, 等. 喀喇昆仑火烧云超大型喷流—沉积成因碳酸盐型 Pb-Zn 矿的发现及区域成矿学意义[J]. 新疆地质, 2015, 33(1): 41-50.
- DONG Lianhui, XU Xingwang, FAN Tingbin, et al. Discovery of the Huoshaoyun Super-Large Exhalative-Sedimentary Carbonate Pb-Zn Deposit in the Western Kunlun Area and its Great significance for Regional Metallogeny[J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(1): 41-50.
- 范廷宾, 余元军, 夏明毅, 等. 新疆和田县火烧云铅锌矿地质特征及其找矿[J]. 四川地质学报, 2017, 37(4): 578-582.
- FAN Tingbin, YU Yuanjun, XIA Mingyi, et al. Geological Features and Prospecting for the Huoshaoyun Pb-Zn Deposit in Hotan, Xinjiang [J]. Acta Geologica Sichuan, 2017, 37(4): 578-582.
- 范廷宾, 李昊, 徐兴旺, 等. 非硫化物型锌—铅矿床研究现状及其进展[J]. 西北地质, 2018, 51(2): 147-159.
- FAN Tingbin, LI Hao, XU Xingwang, et al. Research Status and Progress of Nonsulfide Zinc-Lead Deposit [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(2): 147-159.
- 高永宝, 滕家欣, 李侃. 喀喇昆仑火烧云超大型铅锌矿床成矿特征与成因[J]. 矿物学报, 2017, (增刊): 561-562.
- GAO Yongbao, TENG Jiixin, LI Kan. Metallogenic Characteristics and Genesis of Huoshaoyun Super-Large Lead-Zinc Deposit in Karakorum [J]. Journal of Minerals, 2017, (Suppl.): 561-562.
- 胡瑞忠, 毕献武, TURNER G, 等. 哀牢山金矿带成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1999, 29: 321-330.
- HU Ruizhong, BI Xianwu, TURNER G, et al. Geochemistry of He and Ar isotopes of Gold-Forming fluids in Ailaoshan Gold Belt [J]. Science In China (Series D): Geosciences, 1999, 29: 321-330.
- 王松, 丰成友, 余安全, 等. 粤东麻坑非硫化物型锌矿的赋存状态及成因讨论[J]. 地质学报, 2008, 82(11): 1547-1554.
- WANG Song, FENG Chengyou, SHE Hongquan, et al. Zinc Occurrence and Genesis of Makeng Nonsulfide Zinc Deposits in the Eastern Guangdong Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(11): 1547-1554.
- 王旭东, 倪培, 蒋少涌, 等. 江西漂塘钨矿成矿流体来源的 He 和 Ar 同位素证据[J]. 科学通报, 2009, 54(21): 3338-3344.
- WANG Xudong, NI Pei, JIANG Shaoyong, et al. Origin of ore-forming fluid in the Piaotang tungsten deposit in Jiangxi Province: Evidence from Helium and argon isotopes [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(21): 3338-3344.
- 新疆地质矿产勘查开发局第八地质大队. 新疆和田县火烧云矿区铅锌矿勘探报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质勘查基金项目管理中心地质勘查报告, 2016, 1-54.
- 杨永强, 李丽. 非硫化物型锌矿床的地质特征和成因机制[J]. 世界地质, 2010, 29(1): 56-59.
- YANG Yongqiang, LI Li. Geological characteristics and formation mechanism of nonsulfide zinc deposit [J]. Global Geology, 2010, 29(1): 56-59.
- 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-316.
- ZHENG Yongfei, CHEN Jiangfeng. Geochemistry of Stable isotope [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-316.
- 朱炳泉, 李献华. 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, 1998: 1-47.
- ZHU Bingquan, LI Xianhua. Isotopic systematic theory and application in Earth sciences: concurrently discussing crust-mantle evolution of Chinese continent [M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-47.
- 赵晓健, 伍跃中, 王泰山, 等. 西昆仑乔尔天山—岔路口地区铅锌矿成矿特征及找矿标志[J]. 西北地质, 2014, 47(4): 245-255.
- ZHAO Xiaojian, WU Yuezhong, WANG Taishan, et al. Metallogenic characteristics and Prospecting Criteria of Lead-zinc Deposits in Qiao'er Tianshan-Chalukou Region of west Kunlun [J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 245-255.
- BURNARD PG, HU R, TURNER G, et al. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits,

- Yunnan Province, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 1595-1604.
- BONI M and LARGE D. Nonsulfide Zinc Mineralization in Europe: An Overview [J]. *Economic Geology*, 2003, 98(4): 715-729.
- BONI M and MONDILLO N. The "Calamines" and the "Others": The Great Family of Supergene Nonsulfide Zinc Ores [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 67: 208-233.
- GONFIANTINI R, STICHLER W, ROZANSKI K. Standards and Intercomparison Materials Distributed by the International Atomic Energy Agency for Stable Isotope Measurements. In *Reference and Intercomparison Materials for Stable Isotopes of Light elements* [M], IAEA, Vienna, Austria; the Isotope Hydrology Section of the International Atomic Energy Agency. 1995, 13-29.
- GAO Yongbao. The Giant Huoshaoyun Nonsulfide Zinc Deposit in Karakorum, North Margin of Tibet Plateau [A]. In: *Abstract Volume to the Thematic Session at the 52nd CCOP Annual Session* [C]. 2016, 104.
- HITZMAN M W, Reynolds N A, Sangster D F, et al. Classification, Genesis, and Exploration Guides for Nonsulfide Zinc Deposits [J]. *Economic Geology*, 2003, 98(4): 685-714.
- HOEFS J. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. 3rd Edition. Berlin: Springer-Verlag. 1987, 241.
- LARGE D. The Geology of Nonsulphide Zinc Deposits-an Overview [J]. *Erzmetall*, 2001, 54: 264-276.
- OHMOTO H, RYE RO. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* [M]. 2nd Edition. New York: J. Wiley and Sons, Inc. 1979, 798.
- OHMOTO H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 1972, 67(5): 551-578.
- REICHERT J and BORG G. Numerical Simulation and Geochemical Model of Supergene Carbonate-hosted Nonsulphide Zinc Deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33(2): 134-151.
- STUART FM, BURNARD PG, TAYLOR RP, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids; He-Ar isotopes in fluid inclusions from Daehwa W-Mo mineralization, S. Korea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 4663-4673.
- SANGSTER D F. Mississippi Valley-type and Sedex Lead-zinc Deposits: a Comparative Examination [J]. *Transactions-Institution of Mining and Metallurgy (Sect. B: Applied Earth Sciences)*, 1990, 99: 21-42.
- TAYLOR HP. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. *Economic Geology*, 1986, 69: 843-883.
- TAYLOR SR and MCLENNAN SM. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 241-265.
- TRULL TW, KURZ MD, JENKINS W J. Diffusion of cosmogenic³He in olivine and quartz; Implications for surface exposure dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 103: 241-256.
- VEIZER J and HOEFS J. The nature of ¹⁸O/¹⁶O and ¹³C/¹²C secular trends in sedimentary carbonaterocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40: 1387-1395.
- ZARTMAN R E and DOE B R. Plumbotectonics-The model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75: 135-162.