



河南省南召县南庄铅锌矿床地质特征与成因分析

李俊锋^{1,2}, 吕 斌¹, 胡 伟¹, 杨贺杰¹

1. 河南省有色金属地质矿产局第三地质大队, 河南 郑州 450016;

2. 河南省有色金属矿产探测工程技术研究中心, 河南 郑州 450016

摘 要: 南庄铅锌矿床的矿体大多呈隐伏型, 产于下古生界二郎坪群火神庙组石英角斑凝灰岩中. 通过对矿床地质特征、矿石稀土元素和微量元素特征、同位素地球化学特征的综合分析研究, 发现矿床具热水沉积特征和海水硫与幔源硫混合特性, 成矿物质主要来源于上地幔, 并混有造山带和上地壳的特征. 基本确定该矿床属于弱变质作用改造的海底火山喷流型块状硫化物型矿床, 建立了地层-岩性-蚀变-物探找矿标志.

关键词: 铅锌矿床; 矿床成因; 火神庙组; 块状硫化物型; 找矿标志; 河南省

GEOLOGY AND GENESIS OF NANZHUANG LEAD-ZINC DEPOSIT IN NANZHAO COUNTY, HENAN PROVINCE

LI Jun-feng^{1,2}, LYU Bin¹, HU Wei¹, YANG He-jie¹

1. No.3 Geological Brigade, Henan Bureau of Nonferrous Metal Geology and Mineral Resources, Zhengzhou 450016, China;

2. Henan Research Center for Nonferrous Metal Mineral Exploration Engineering Technology, Zhengzhou 450016, China

Abstract: The orebodies in Nanzhuang lead-zinc deposit, mostly concealed, are occurred in the quartz-keratophyre tuff of Huoshenmiao Formation, Erlangping Group, Lower Paleozoic. Through comprehensive analysis on the geological features of deposit, characteristics of trace and rare earth elements in ores, and isotopic geochemistry, it is found that the deposit is characterized by hydrothermal deposition and mixing of seawater sulfur and mantle-derived sulfur, with the ore-forming materials mainly derived from the upper mantle, mixed with the characteristics of orogenic belt and upper crust. It is basically determined that the deposit belongs to submarine volcanic exhalation massive sulfide type reformed by weak metamorphism, and the strata-lithology-alteration-geophysical prospecting indicators are established based on the above.

Key words: lead-zinc deposit; deposit genesis; Huoshenmiao Formation; massive sulfide type; prospecting indicator; Henan Province

南庄铅锌矿床位于河南省南召县城西南约 25 km, 矿体主要为隐伏型. 笔者于 2019—2020 年对该区发

现的 5 条含矿构造蚀变带(II_D、III_D、V_D、I_N、II_C)中的两条(I_N、II_D)进行深部工程验证, 圈定了 3 个工业铅锌矿体

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-10. 编辑: 张哲.

基金项目: 河南省财政地勘项目“河南省南召县水洞岭矿区外围铜锌矿预查”(豫自然资发[2019]22 号).

作者简介: 李俊锋(1984—), 男, 工程师, 主要从事有色金属地质勘查工作, 通信地址 河南省郑州市郑东新区金水东路 16 号鑫地大厦 1413 室, E-mail//541985932@qq.com

(I_N-1、I_N-2、II_N)。本文旨在通过对已发现矿体的地质特征和矿床成因的研究,为下一步找矿工作提供理论支撑,以期获得更大的找矿突破。

1 区域地质

研究区所处大地构造位置为北秦岭褶皱带东段二郎坪地体东端^[1],隶属洞街-白石尖-水洞岭铜铅锌多金属成矿带。区域上位于瓦穴子-乔端断裂和朱阳关-夏馆断裂之间呈北西西向展布的褶皱带内,地层主要为下古生界二郎坪群。二郎坪群是一套形成于早古生代华北地台南缘裂陷槽内厚度巨大的海相火山沉积岩系^[2-3],后经多期改造形成了乔端-白土岗火山

隆起和河口-水洞岭火山洼地。矿区位于河口-水洞岭火山洼地中,有利于铅锌矿床的形成^[4-5]。区内岩浆活动频繁,侵入岩主要有加里东期板山坪闪长岩体、川心垛花岗岩体,火山岩主要为二郎坪群变质火山-侵入杂岩^[6-7]。

2 矿区地质

2.1 地层

矿区出露地层主要为二郎坪群火神庙组海相火山岩系(见图1),包括火山熔岩类、火山碎屑岩类及变质岩类。石英角斑凝灰岩为矿体的主要赋矿围岩,与成矿关系最密切。本区火山岩相对富碱和富钠,Na₂O+

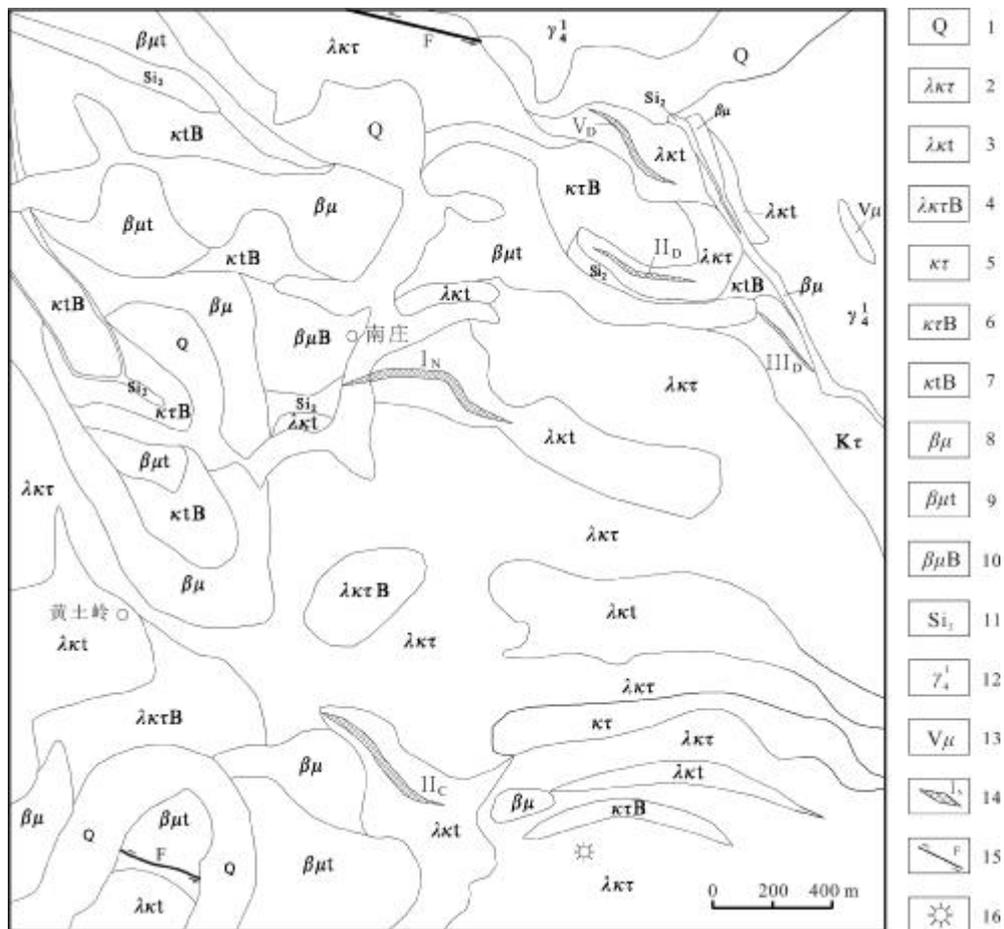


图1 南庄铅锌矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Nanzhuang Pb-Zn orefield

- 1—第四系 (Quaternary);
- 2—石英角斑岩 (quartz keratophyre);
- 3—石英角斑凝灰岩 (quartz-keratophyre tuff);
- 4—含火山角砾石英角斑岩 (volcanic breccia-bearing quartz keratophyre);
- 5—角斑岩 (keratophyre);
- 6—含火山角砾角斑岩 (volcanic breccia-bearing keratophyre);
- 7—含火山角砾角斑凝灰岩 (volcanic breccia-bearing keratophyre tuff);
- 8—细碧岩 (spilite);
- 9—细碧凝灰岩 (spilite tuff);
- 10—含火山角砾细碧岩 (volcanic breccia-bearing spilite);
- 11—碳硅质板岩 (carbonaceous siliceous slate);
- 12—花岗岩 (granite);
- 13—辉绿玢岩 (diabase porphyrite);
- 14—矿体与蚀变带 (orebody and alteration zone);
- 15—断裂构造 (fault);
- 16—火山口 (crater)

K₂O 含量为 3.4%~6.4% ,Na₂O/K₂O 均大于 1, 集中在 2.0~5.0 之间,多数为钠质系列,少数为钾质系列. 火山岩分布具有一定的规律性,由边部到矿区中心,岩性从基性—中酸性—酸性,分异作用明显.

2.2 构造

矿区构造比较复杂,与成矿有关的构造主要有 3 类. 第一类为古火山构造,第二类为控矿的紧闭倒转褶皱构造,第三类为成矿期后破坏矿体连续性的各类断裂构造. 加里东期,区内出现大量古火山活动中心及古火山构造,在其附近常易于形成海底火山热液沉积矿床^[8-9]. 由于受印支期近南北向强烈挤压作用的改造,区内出现两翼近于直立的紧闭倒转褶皱构造. 成矿期后的一些层间断裂常破坏矿体的连续性,但规模一般不大.

2.3 岩浆岩

研究区出露的岩浆岩主要为分布于古火山活动中心附近的次火山岩及浅成侵入岩,常见海西期黑云母花岗岩,偶见辉绿玢岩.

3 矿床地质

3.1 矿体特征

通过工程勘查圈出了 3 条铅锌矿体: I_N-1、I_N-2、II_N,其中 I_N-2 和 II_N 呈隐伏状. 矿体位于南庄东坡 I_N 蚀变带中,I_N-1 和 I_N-2 矿体分别位于蚀变带的西段和东段,II_N 矿体位于 I_N-1 矿体上部约 80 m 处. 赋矿围岩均为火神庙组石英角斑凝灰岩,产状(348~10)°∠(61~75)°. 矿体基本顺层产出,呈层状、似层状(见图 2),整体上呈向北东凸起的弯月状,为蚀变岩型. 矿体地质特征详见表 1.

3.2 矿石特征

3.2.1 矿物成分

金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿,少量的铜蓝、自然银及微量的斑铜矿、黝铜矿等;非金

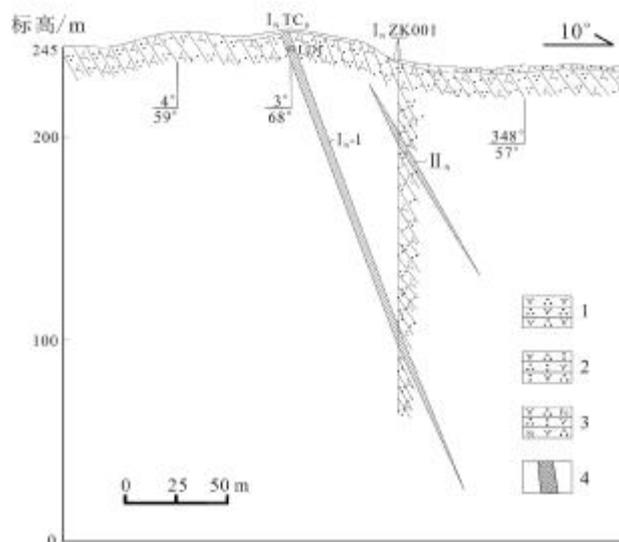


图 2 南庄铅锌矿 N0 勘查线剖面图
Fig. 2 Profile of Nanzhuang Pb-Zn orebody along N0 exploratory line

1—石英角斑岩 (quartz keratophyre); 2—石英角斑凝灰岩 (quartz-keratophyre tuff); 3—蚀变带 (alteration zone); 4—铅锌矿体 (Pb-Zn orebody)

属矿物主要有石英、斜长石、重晶石及少量的绢云母等;次生矿物为褐铁矿、绿泥石等. 闪锌矿呈他形粒状,粒径 0.01~2.37 mm,常见被方铅矿和黄铜矿交代,晶体中见乳滴状黄铜矿固溶体分解物. 方铅矿呈他形粒状,粒径 0.02~1.25 mm,常见被黝铜矿交代.

3.2.2 化学成分

矿石中 Si、Al、Ba 含量比较高,其次为 K、Na、Fe、S,矿石的主要有益成分是 Zn、Pb,其次是 Ag、Cu. 结合组合分析结果确定 Ag、Cu、Ga 作为伴生有益组分,S 作为伴生有害组分.

3.2.3 结构构造

矿石常见他形晶粒状结构、交代残余结构,少量半自形晶粒结构、乳浊状结构等. 他形晶粒状结构为本区主要矿石结构类型. 矿石构造主要为块状构造、稀

表 1 南庄铅锌矿区矿体特征表

Table 1 Characteristics of orebodies in Nanzhuang Pb-Zn deposit

矿体编号	形态	标高/m	埋深/m	延深/m	长度/m	厚度/m	倾向/(°)	倾角/(°)	Zn 品位/%	Pb 品位/%
I _N -1	层状	32-252	0-203	165	260	2.65	3	66	0.71-1.52	0.53-2.43
I _N -2	层状、似层状	113-244	48-170	128	240	2.83	12	69	0.81-2.26	0.33-0.47
II _N	似层状	132-222	23-102	68	160	1.50	3	60	0.76-3.56	0.62-1.27

疏浸染状构造,少量角砾状构造、细脉状构造和星点状构造。块状构造和稀疏浸染状构造矿石构成本区主要的工业矿体。

3.2.4 矿石类型

矿石矿物共生组合常见类型:方铅矿-闪锌矿-黄铁矿-重晶石;闪锌矿-方铅矿-黄铜矿-重晶石;闪锌矿-黄铁矿-石英-绢云母;闪锌矿-方铅矿-黄铁矿-石英-绢云母。根据矿石中不同金属矿物之间的交代、溶蚀、穿插及共生组合关系,大致确定本区矿石中金属矿物的生成顺序为:黄铁矿→黄铁矿-黄铜矿→黄铜矿→闪锌矿-方铅矿→黄铁矿。

自然类型主要为多金属硫化物矿石,细分为细脉浸染状矿石和致密团块状矿石,少量角砾状矿石。工业类型主要有氧化矿石和原生硫化物矿石两种。

4 矿床成因

4.1 矿石稀土元素特征

从表2可得,矿床浸染状结构矿石 Σ REE值最高,角砾状结构矿石 Σ REE值相对最低,平均 Σ REE含量 36.3×10^{-6} ;LREE/HREE比值基本相当,平均约为5.04,块状结构矿石相对比值最高; $(La/Yb)_N$ 比值平均为5.09,块状矿石和角砾状矿石比值比较接近。从表2中可以看出LREE较富集, δCe 小于1,平均值0.81,显示弱的Ce负异常; δEu 大于1,平均2.61,具显著的Eu正异常(见图3),并且与大西洋TAG区热液沉积铅锌矿石球粒陨石标准化稀土元素^[10-11]配分曲线特征十分相似,表明本区矿石具热水沉积特征^[12-13]。

4.2 矿石微量元素特征

从表2可知,矿区矿石以Zn、Pb、S元素为主,Ag、Ba、Cu相对较富集,为典型的Zn-Pb型。Zn与Cd有较高的相关性($r=0.71$),Pb与Ag具密切的正相关性($r=0.79$)。矿石中重晶石含量10.2%~56.8%,含量较高,CaO、TiO₂等组分含量较低,这与国内典型的热热水成因型新晃贡溪-天柱大河边重晶石矿床元素特征^[14]非常相似,揭示了矿石具热水沉积的成因特征。本矿床与典型的日本黑矿^[15]相比,具有相似的Pb-Zn组成特征及相似的Au/Ag比值(约为0.02),但本区Cu富集度不高。

4.3 同位素地球化学特征

4.3.1 硫同位素

通过硫同位素的分析判断成矿物质的来源^[16-17],可为矿床成因提供重要依据。从表3可以看出, $\delta^{34}S$ 值黄铁矿为3.8‰~6.7‰,平均5.9‰;黄铜矿为6.1‰~10.1‰,平均8.3‰;闪锌矿为6.5‰~9.5‰,平均7.7‰。矿区硫化物的 $\delta^{34}S$ 值变化不大,主要集中在4.4‰~7.6‰范围内,平均6.8‰。据目前认知,块状硫化物矿床的硫主要来源于被还原的海水硫酸盐和岩浆。当总硫同位素值接近0时,矿床成因与花岗岩侵入体有关,硫源为地幔硫;当总硫同位素值接近20‰时,硫来源于大洋水和海水蒸发岩;而介于前两种之间时,硫来源则相对复杂。该区硫酸盐中 $\delta^{34}S$ 为18.4‰,接近同期海水中硫酸盐(20‰)^[18]。通过计算,矿区的总硫同位素值约为4.47‰,可见矿区的硫具有海水硫与幔源硫的混合特性^[19]。

表2 南庄铅锌矿床矿石微量元素含量分析数据表

Table 2 Trace element contents in ores from Nanzhuang Pb-Zn deposit

元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	LREE/HREE
浸染状矿石	10.3	23.0	3.24	10.8	3.02	1.52	2.92	0.56	3.79	0.68	2.04	0.30	2.02	0.34	16.0	64.5	4.41
块状矿石	6.43	13.1	1.32	5.62	0.77	1.56	1.38	0.24	1.55	0.29	0.74	0.11	0.80	0.12	6.66	34.0	5.51
角砾状矿石	3.19	4.04	0.48	0.60	0.18	0.19	0.33	0.17	0.41	0.11	0.20	0.03	0.40	0.02	0.90	10.4	5.20
元素	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	As	Sb	Ba	W	Mo	Co	Cd	Sr	S	δCe	δEu	$(La/Yb)_N$
浸染状矿石	0.09	0.51	1.12	0.19	36.4	3.46	7.64	32.1	1.47	14.2	17.4	177	353	5.71	0.97	1.56	3.66
块状矿石	0.12	0.68	1.94	0.23	54.3	3.33	8.92	46.8	2.57	62.5	22.0	1000	202	17.3	0.71	4.63	5.77
角砾状矿石	0.05	0.39	0.82	0.13	21.6	2.70	16.9	21.7	1.14	51.1	20.6	83.0	649	5.9	0.76	1.63	5.83

测试单位:南京大学地科系中心实验室。含量单位:比值及 δ 值为1;Cu、Pb、Zn、Ba、S为%;其余为 10^{-6} 。

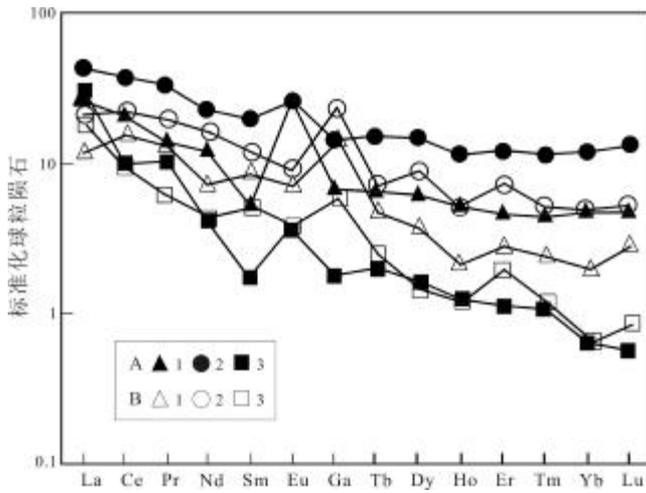


图 3 南庄铅锌矿床及典型热液沉积铅锌矿床矿石球粒陨石标准化 REE 配分模式图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of ores from Nanzhuang Pb-Zn deposit and typical hydrothermal sedimentary Pb-Zn deposits A—南庄铅锌矿床 (Nanzhuang Pb-Zn deposit); B—典型热液沉积铅锌矿床 (typical hydrothermal sedimentary Pb-Zn deposit); 1—块状矿石 (massive ore); 2—浸染状矿石 (disseminated ore); 3—角砾状矿石 (brecciated ore)

表 3 硫同位素统计表

Table 3 Statistics of sulfur isotope data

矿石类型	测定对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$
块状矿石	闪锌矿	9.5
块状矿石	黄铜矿	10.1
块状矿石	黄铁矿	5.2
矿脉	闪锌矿	8.1
矿脉	黄铜矿	8.8
矿脉	黄铁矿	6.7
石英角斑凝灰岩	闪锌矿	6.5
石英角斑凝灰岩	黄铜矿	6.1
石英角斑凝灰岩	黄铁矿	3.8
石英角斑凝灰岩	黄铁矿	5.4
重晶石岩	闪锌矿	6.5
含火山角砾石英角斑岩	黄铁矿	6.7

数据来源:据文献[20].

4.3.2 铅同位素

通过铅同位素测量得出本区的铅同位素数据分布

较集中,变化也比较小. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.810~17.997,极差 0.187,平均值 17.877; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.474~15.687,极差 0.213,平均值 15.554; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.714~38.412,极差 0.698,平均值 37.923. 用 Holmes-Houlermans 演化法^[21]得出多数铅为正常铅(正值),异常铅的存在说明矿石混合有上地壳的物质,即在成矿过程中有陆源碎屑物质的加入. 通过 Zartman^[22]铅同位素构造环境图(见图 4),得出铅主要来源于上地幔,并混有造山带和上地壳铅的特征,主要是来源于火山作用.

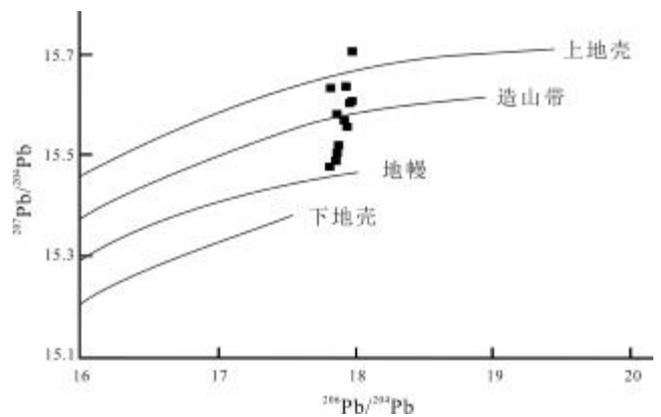


图 4 铅同位素构造模式图 (据文献[20])

Fig. 4 Tectonic model of lead isotope (From Reference [20])

4.4 控矿条件

(1)地层控矿:区域上已发现的二郎坪群海底火山喷流型硫化物矿体多出现在酸性火山熔岩-火山碎屑岩为主的地层中. 本区矿体均产于该群火神庙组石英角斑凝灰岩中,层控特性明显.

(2)古火山控矿:加里东期弧后盆地演化过程中,由于区域构造运动,海底断裂构造发育,从而使海底火山中心附近火山热液活动强烈,大量含矿热液涌入海底于有利的构造部位沉积,形成块状硫化物铅锌矿床. 遥感影像显示本矿床位于西沟古火山环形构造的附近,成矿过程受古火山构造的影响.

(3)褶皱控矿:紧闭倒转褶皱使原始矿层被拉断,随地层一起褶皱变形,在构造的翼部及转折端存在流变褶皱构造,形成的虚脱空间有利于富矿形成. 本区轴向北西向褶皱对控矿的影响不容忽视.

(4)岩浆岩控矿:与早古生代火神庙组细碧角斑岩系海底火山活动相伴,发育一套与之同源的大规模岩

浆侵入活动,沿古老基底断裂形成北西西向的杂岩带,微量元素组合 Au、Ag、Pb、Zn、Cu 等与火神庙组含量非常接近,且富集 Ag、Zn、Pb。岩浆影响了矿体重要金属元素的组成和富集。

5 找矿标志

(1)地层标志:所发现的矿体均赋存于下古生界二郎坪群火神庙组地层中,火神庙组地层是找矿的宏观标志。

(2)岩性标志:区内出露的长英岩、硅质岩也是找矿的良好标志;火山喷发中心附近的重晶石层、重晶石化石英角斑凝灰岩和重晶石化石英角斑岩,是找矿的直接标志。

(3)蚀变标志:远矿蚀变为碳酸盐化、绿泥石化、绢云母化;近矿蚀变为黄铁矿化、重晶石化、硅化及方铅矿化、闪锌矿化为主的多金属矿化。多金属矿化和重晶石化为区内重要的蚀变找矿标志。

(4)物探标志:高极化率、低电阻率的物探异常区与矿化蚀变带、重晶石化石英角斑凝灰岩相重合的部位,是找矿的重要地段,也是重要的间接找矿标志。

6 结语

通过对南庄铅锌矿床地质特征、矿石稀土元素和微量元素特征、同位素地球化学特征的综合分析研究,发现矿床具热水沉积特征和海水硫与幔源硫混合特性,成矿物质主要来源于上地幔,并混有造山带和上地壳的特征。该矿床属于弱变质作用改造的海底火山喷流型块状硫化物型矿床,重晶石化的石英角斑凝灰岩是本区最重要最直接的找矿标志。

参考文献(References):

- [1]张国伟,张本仁,袁学诚,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社,2001:706-714.
Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 706-714.
- [2]张国伟,张本仁,袁学诚.秦岭造山带造山过程和岩石圈三维结构图丛[M].北京:科学出版社,1996:11-67.
Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C. Book of orogenic process and lithosphere three dimension framework in Qinling orogenic belt[M]. Beijing: Science Press, 1996: 11-67. (in Chinese)

- [3]冯胜斌,周洪瑞,燕长海,等.东秦岭(河南段)二郎坪群铜多金属成矿环境及成矿效应[J].矿产与地质,2006,20(6):598-607.
Feng S B, Zhou H R, Yan C H, et al. Metallogenic environment of copper polymetallic deposit in Erlangping Group of East Qinling and its metallogeny[J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(6): 598-607.
- [4]宋峰,刘铁,王铭生,等.东秦岭二郎坪群蛇绿岩中的火山成因硫化物矿床[J].中国区域地质,1999,18(1):80-85.
Song F, Liu T, Wang M S, et al. Volcanogenic massive sulfide deposits in the ophiolite of the Erlangping Group in the eastern Qinling[J]. Regional Geology of China, 1999, 18(1): 80-85.
- [5]陈建立.二郎坪群海相火山岩中块状硫化物矿床地质特征及其找矿方向[J].地质与勘探,2004,40(6):38-41.
Chen J L. The characteristics and ore exploration of massive sulfide deposits in Erlangping Group marine volcanic rocks[J]. Geology and Prospecting, 2004, 40(6): 38-41.
- [6]金守文.二郎坪群两点商榷[J].河南地质,1994,12(1):36-40.
Jin S W. Discussions on Erlangping Group[J]. Henan Geology, 1994, 12(1): 36-40.
- [7]江少卿,徐毅,孙尚信,等.全球铅锌矿资源分布[J].地质与资源,2020,29(3):224-232.
Jiang S Q, Xu Y, Sun S X, et al. Global distribution of lead-zinc resources[J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 224-232.
- [8]Finlow-Bates T. The chemical and physical controls on the genesis of submarine exhalative orebodies and their implications for formulating exploration concepts: A review[J]. Geologisches Jahrbuch, 1980, 40: 131-168.
- [9]侯增谦,韩法,夏林圻,等.现代与古代海底热水成矿作用——以若干火山成因块状硫化物矿床为例[M].北京:地质出版社,2003:35-180.
Hou Z Q, Han F, Xia L Q, et al. Hydrothermal systems and metallogeny on the modern and ancient sea-floor[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 35-180.
- [10]Mills R A, Elderfield H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3511-3524.
- [11]Michard A, Albarède F. The REE content of some hydrothermal fluids[J]. Chemical Geology, 1986, 55(1/2): 51-60.
- [12]丁振举,刘丛强,姚书振,等.海底热液沉积物稀土元素组成及其意义[J].地质科技情报,2000,19(1):27-30,34.
Ding Z J, Liu C Q, Yao S Z, et al. REE composition and implication of hydrothermal sedimentation of sea-floor[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(1): 27-30, 34.
- [13]Michard A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(3): 745-750.

(下转第 622 页/Continued on Page 622)

- Wang C H, Cui L J, Ma M Y, et al. Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5337-5344.
- [32]王小平, 陈先刚. 湿地退化的人为因子研究进展[J]. *科技创新与应用*, 2019(3): 147-148.
- Wang X P, Chen X G. Research progress on human factors of wetland degradation[J]. *Technology Innovation and Application*, 2019(3): 147-148. (in Chinese)
- [33]李团结, 马玉, 王迪, 等. 珠江口滨海湿地退化现状、原因及保护对策[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(4): 77-84.
- Li T J, Ma Y, Wang D, et al. Status, degradation causes, and protection measures of the Pearl River estuary seashore wetland[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(4): 77-84.
- [34]刘玉龙, 胡鹏. 基于帕累托最优的新安江流域生态补偿标准[J]. *水利学报*, 2009, 40(6): 703-708.
- Liu Y L, Hu P. Ecological compensation standard for Xinanjiang River basin based on Pareto optimization[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(6): 703-708.
- [35]罗冰. 浅论代际外部性[J]. *福建质量管理*, 2020(4): 249.
- Luo B. On intergenerational externality[J]. *Fujian Quality Management*, 2020(4): 249. (in Chinese)
- [36]邝奕轩. 湿地利用转型研究: 基于发展经济学的视角[J]. *农村经济*, 2013(9): 21-25.
- Kuang Y X. Study on wetland utilization transition: based on development economics[J]. *Rural Economy*, 2013(9): 21-25. (in Chinese)
- [37]严有龙, 王军, 王金满, 等. 湿地生态补偿研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(5): 618-625.
- Yan Y L, Wang J, Wang J M, et al. Study of wetland ecological compensation: A review[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(5): 618-625.
- [38]段艺璇, 林田苗, 赵晓迪, 等. 湿地生态补偿标准与模式研究进展[J]. *林业经济*, 2018, 40(7): 76-81.
- Duan Y X, Lin T M, Zhao X D, et al. Research progress on standards and models of wetland ecological compensation[J]. *Forestry Economics*, 2018, 40(7): 76-81.
- [39]全世文, 秦光远, 王昌海. 北京市城市湿地价值评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(7): 54-64.
- Quan S W, Qin G Y, Wang C H. Valuation of urban wetlands in Beijing[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(7): 54-64.

(上接第 560 页/Continued from Page 560)

- [14]吴朝东, 杨承运, 陈其英. 新晃贡溪-天柱大河边重晶石矿床热水沉积成因探讨[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(6): 774-785.
- Wu C D, Yang C Y, Chen Q Y. The hydrothermal sedimentary genesis of barite deposits in West Hunan and East Guizhou[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1999, 35(6): 774-785.
- [15]Ohmoto H. Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: The Kuroko perspective[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 10(3): 135-177.
- [16]魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- Wei J Y, Wang G Y. Isotope geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. (in Chinese)
- [17]张革利, 田涛, 王瑞廷, 等. 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*, 2020, 47(2): 472-484.
- Zhang G L, Tian T, Wang R T, et al. 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*, 2020, 47(2): 472-484.
- [18]杨荣勇, 徐兆文, 任启江, 等. 河南南召水洞岭铜矿床的类型及成矿条件[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1996, 35(4): 95-100.
- Yang R Y, Xu Z W, Ren Q J, et al. The type and metallogenic conditions of Shuidongling zinc copper deposit in Nanzhao, Henan Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1996, 35(4): 95-100.
- [19]Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67(5): 551-578.
- [20]葛军. 水洞岭铜锌矿床硫、铅同位素地球化学特征及成矿机理探讨[J]. *化工矿产地质*, 2003, 25(4): 213-218.
- Ge J. Sulfur and lead isotopic geochemistry of Shuidongling copper-zinc deposit and ore-forming mechanism[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2003, 25(4): 213-218.
- [21]吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石同位素示踪成矿物质来源综述[J]. *地质地球化学*, 2002, 30(3): 73-81.
- Wu K X, Hu R Z, Bi X W, et al. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review[J]. *Geology-Geochemistry*, 2002, 30(3): 73-81.
- [22]Zartman R E, Doe B R. Plate tectonics: The model[J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135-162.