第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)

引文格式：李旭，刘玥，种凯琳，等. 东秦岭二郎坪群马道铅锌银矿床地质特征及找矿模式[J]. 西北地质，2026，59(5)：288−302. DOI：10.12401/j.nwg.2025106

Citation：LI Xu，LIU Yue，ZHONG Kailin，et al. Geological Characteristics and Prospecting Model of Madao Lead-Zinc-Silver Deposit in Erlangping Group，East Qinling Mountains[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：288−302. DOI：10.12401/j.nwg.2025106

东秦岭二郎坪群马道铅锌银矿床地质特征及找矿模式

李旭[1,2]，刘玥[1,2]，种凯琳[1,2]，于超凡[1,2]，姚远[1,2]，刘喜[1,2]

（1. 河南省第三地质矿产调查院有限公司，河南 郑州 450000；2. 河南省自然资源科技创新中心/信息感知技术应用研究，河南 郑州 450000）

摘 要：马道铅锌银矿床位于泌阳县城东南约 18 km 的大别山北麓，处于东秦岭造山带之北秦岭褶皱带北翼刘山岩组中，矿体分为层状与网脉状。层状矿体顺层分布于以基性火山岩为底板的火山碎屑、热水沉积蚀变岩中，属溢流相；网脉状矿体分布于蚀变岩筒中，属火山颈相。两者在空间上形成“T”字型，空间上构成完整火山机构模型，属 VMS 矿床。勘查工作采用土壤地球化学测量及物探电法测量效果较好，矿区表生土壤 Au、Ag、Pb、Zn 呈强富集分布，深部矿体呈中高电阻率、高极化率分布的特征。通过总结矿床地物化特征，笔者建立了该类矿床的找矿模式，对区域上寻找类似矿床提供参考。

关键词：海相火山成因块状硫化物矿床；地球化学；激发极化法；马道铅锌银矿床；东秦岭

中图分类号：P612 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0288-15

Geological Characteristics and Prospecting Model of Madao Lead-Zinc-Silver Deposit in Erlangping Group, East Qinling Mountains

LI Xu[1,2], LIU Yue[1,2], ZHONG Kailin[1,2], YU Chaofan[1,2], YAO Yuan[1,2], LIU Xi[1,2]

（1. Henan Third Institute of Geology and Mineral Resources Survey Co. Ltd, Zhengzhou 450000, Henan, China；
2. Henan Science and Technology Innovation Center of Natural Resources /Application Research of Information Perception Technology, Zhengzhou 450000, Henan, China）

Abstract: The Madao lead-zinc-silver deposit is located in the northern foot of the Dabie Mountains, about 18 km southeast of the Biyang County. It is located in the Liushan rock formation on the north wing of the north Qinling fold belt of the East Qinling orogenic belt. The ore body is divided into layered and reticular. The layered ore body is distributed in the volcanic debris and hydrothermal sedimentary altered rock with the basic volcanic rock as the floor, which belongs to the overflow phase. The stockwork ore body is distributed in the altered rock tube, which belongs to the volcanic neck facies. Both of them form a 'T' shape in space and form a complete volcanic mechanism model in space, which belongs to the VMS deposit. The exploration work adopts soil geochemical survey and geophysical electrical method to measure the effect is good, the surface soil Au, Ag,

收稿日期：2024-02-20；**修回日期**：2025-06-09；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：河南省财政地质勘查项目(豫自然资发 [2019]22 号、豫自然资发 [2021]7 号)联合资助。

作者简介：李旭(1991−)，男，工程师，从事地质矿产勘查与综合研究。E−mail：412469153@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Pb and Zn in the mining area are strongly enriched and distributed, and the deep ore body is characterized by medium and high resistivity and high polarizability distribution. This paper summarizes the geophysical and geochemical characteristics of the deposit, establishes a prospecting model, and provides a reference for the search for similar deposits in the region.

Keywords: marine volcanic massive sulfide deposits; geochemistry; induced polarization method; madao lead-zinc-silver deposit; East Qinling

火山成因块状硫化物矿床(VMS 型矿床)是由海底火山活动产生成矿热液经物化环境改变沉淀形成的金属硫化物矿床, VMS 矿床分布广泛、规模大、品位高、易形成储量规模可观的矿田, 是世界上 Zn、Cu、Pb、Au 及 Ag 资源的主要来源(Green et al., 1981; Large, 1992; 叶天竺等, 2017)。国内外诸多学者对矿床成因及形成过程进行研究, 总结了矿床模型, 研究程度较高(Morton et al., 1987; Petersen et al., 2000; Chai et al., 2019)。

位于东秦岭造山带内早古生代二郎坪群是 VMS 型矿床产出地层, 自 20 世纪 70 年代首次发现刘山岩铜锌矿起, 陆续发现水洞岭铜锌矿、上庄坪铅锌银矿(燕长海等, 2008), 加之近年新发现的马道铅锌银矿, 在二郎坪群内已发现 4 座中型规模 VMS 型(铜)铅锌(银)矿床(彭翼等, 2005; 杨泽强等, 2021; 李旭等, 2022)。处于同一大地构造背景下不同时空产生的同类型矿床仍具不同特征。水洞岭铜锌矿与上庄坪铅锌银矿矿体呈似层状、透镜状平行或断续顺地层分布, 具多期次、裂隙式喷发沉积成矿特点; 刘山岩铜锌矿原多层平行矿体受朱庄背形隆起–堆叠改造呈雁行状排列; 马道铅锌矿目前发现的矿化带为一期火山热液活动产物, 矿床系统受地质构造破坏影响较小, 赋矿层连续稳定, 顶底板清晰, 火山机构保存完整。刘山岩铜锌矿以 Zn-Cu 型为主, 水洞岭铜锌矿以 Zn-Cu 型为主、以 Zn-Pb-Cu 为辅, 上庄坪铅锌银矿以 Zn-Pb-Cu 型为主, 3 处矿山矿体均具低阻、高极化率的物性特征(陈伟民, 1998; 彭翼等, 2005; 伏雄, 2013); 而马道铅锌矿以 Zn-Pb-Ag 型为主, 矿体总体呈现中阻、高极化率的物性特征。马道铅锌矿床在矿床主成矿元素、地物化特征等方面均有所不同。因此, 总结马道铅锌矿床地质特征及找矿模式可丰富地区地质资料, 对指导区域上寻找 VMS 型矿床意义重大。

1　地质背景

秦岭造山带是中国大陆的脊梁, 近 EW 向延伸约 1 200 km, 东连大别造山带, 并被郯庐断裂截切; 西接祁连和昆仑造山带, 北被阿尔金断裂所限制(图 1; 田智博等, 2025; 周彬等, 2025)。在前寒武纪地壳垂向加积增生的基础上, 由华北与华南地块及其间所夹持的秦岭地体在古生代—早中生代历经多阶段洋–陆俯冲与陆–陆碰撞构造作用, 奠定了秦岭造山带内部的地体拼合配置关系和岩石地层单元, 形成了横亘于中国大陆中部的中央造山系(张国伟等, 2001; Dong et al., 2016)。秦岭造山带自晚中生代进入陆内构造演化阶段, 在东亚陆缘多向汇聚的构造背景下, 东部太平洋板块不断俯冲后撤, 导致现存的中国东部高原岩石圈快速减薄而逐渐垮塌; 西部新特提斯大洋持续削减, 促使青藏高原不断生长, 造成中国西部地壳强烈增厚(Li et al., 2015; Ding et al., 2022)。东、西两侧活动陆缘远程效应的共同作用使得秦岭造山带从地表过程、地貌形态、现代地震活动到深部岩石圈结构在佛坪穹隆两侧存在明显差异, 因此秦岭造山带又分为东秦岭与西秦岭造山带(张逸鹏等, 2024; 杨涛等, 2026)。

东秦岭造山带西起佛坪穹隆与西秦岭造山带相连, 东至大别山脉受郯庐断裂控制, 北以商丹缝合带为界与华北陆块拼合, 南以勉略缝合带为界与扬子陆块接触。东秦岭造山受不同块体碰撞挤压及其之后陆内变形的控制, 在造山带边缘和内部形成了不同的盆山系统造山带(辛明宇等, 2025)。北部受华北陆块的弧陆碰撞及其之后的陆内变形作用, 形成了后陆逆冲与弧后前陆盆地系统。南缘随扬子陆块沿勉略缝合带自东向西的斜向俯冲和之后的陆内旋转挤压, 在扬子北缘形成了前陆逆冲与周缘前陆盆地系统。晚侏罗世末至白垩纪, 造山带挤压与伸展并存, 伸展自核部向边缘发展, 形成造山带伸展塌陷和近 EW 向裂谷盆地系统(刘少峰, 2008)。

东秦岭造山带以曹城断裂(松扒–龟梅断裂)为界北侧为北秦岭地层分区, 南侧为南秦岭地层分区。北秦岭地层分区自南向北划分为中元古界秦岭岩群、奥陶系二郎坪群、寒武系歪头山组和新元古界宽坪岩群。二郎坪群总体呈东窄西宽的巨大的透镜状近 EW 向



图1 秦岭造山带大地构造位置图

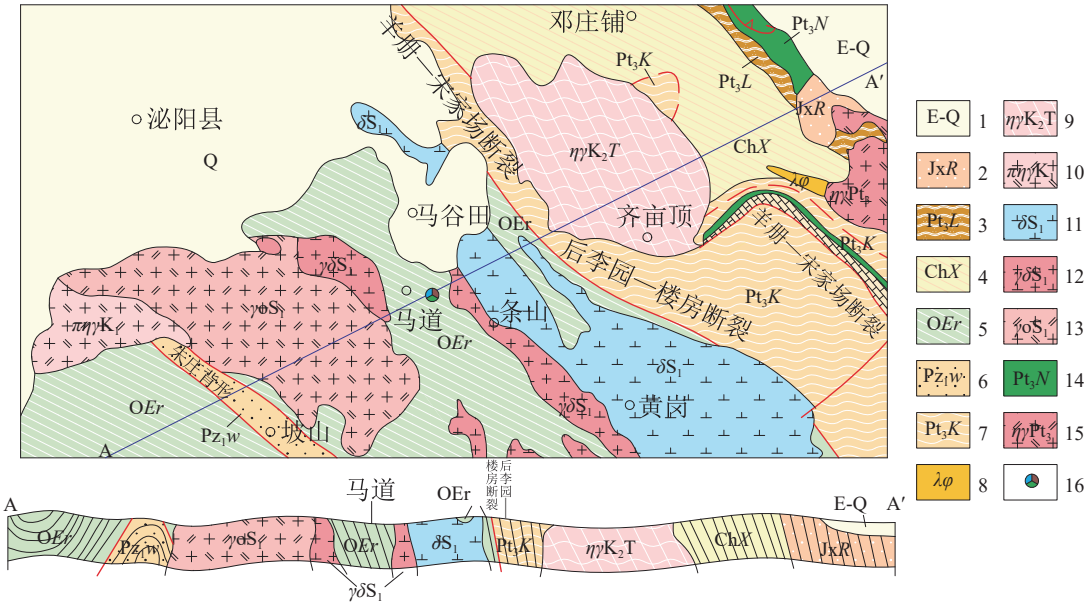
Fig. 1 Geotectonic location map of Qinling orogenic belt

展布(李亚林等, 1998), 受控于大河断裂(朱阳关–夏馆断裂)和邢集–小董庄断裂(瓦穴子–乔端断裂)(李法岭等, 2017)。二郎坪群主要为一套海相火山–沉积建造, 岩性主要为变基性火山岩、中酸性火山岩、变碎屑岩等, 变质程度为绿片岩–低角闪岩相。南阳断陷盆地将二郎坪群从中分割, 东部为东二郎坪群, 西部为西二郎坪群。西二郎坪群呈 SN 向两个互不连续的带, 分布于朱庄复式背斜南北两翼, 构造叠置于歪头山组之上。二郎坪群自下而上划分为大栗树组、张家大庄组和刘山岩组, 各组之间均为整合接触。刘山岩铜锌矿位于南带刘山岩组内, 马道铅锌银矿位于北带刘山岩组内(图 2)。

2 矿床地质特征

2.1 地层

马道铅锌银矿区地处朱庄背形北翼, 赋矿地层为上古生界奥陶系二郎坪群刘山岩组, 地层呈 NW–SE



1.中新生代沉积岩; 2.蓟县系汝阳群; 3.新元古界栾川群; 4.长城系熊耳群; 5.奥陶系二郎坪群; 6.下古生界歪头山组; 7.新元古界宽坪群; 8.石英钠长斑岩脉; 9.晚白垩世二长花岗岩(铜山岩体); 10.早白垩世似斑状二长花岗岩; 11.早志留世闪长岩; 12.早志留世花岗闪长岩; 13.早志留世奥长花岗岩; 14.新元古代变基性岩; 15.新元古代片麻状二长花岗岩; 16.马道铅锌银矿床

图2 马道铅锌银矿区域地质构造图

Fig. 2 Regional geological structure map of Madao lead-zinc-silver deposit

向展布, 总体倾向 NE, 倾角为 32°～73°, 出露宽约为 2 km。刘山岩组主要为一套细碧角斑岩系夹热水沉积蚀变岩、基性–中酸性凝灰质碎屑岩、陆源碎屑岩及碳酸盐火山–沉积建造, 各类岩石走向延伸尚稳定, 但倾向变化极大, 反映了裂隙式喷发或海沟发育的特点(彭翼等, 2005)。岩性以变细碧岩、变角斑岩及变石英角斑岩为主, 夹石英岩、大理岩、(含榴)变中–酸性凝灰岩、变长石石英砂岩等。

前人研究成果认为二郎坪群火山岩系属于大陆板块边缘拉张环境的弧后盆地火山活动的产物, 与岛弧或弧后火山活动有关(韦昌山等, 2004)。这套海相火山岩具多韵律、多旋回、多阶段的特点。喷发以酸性物质为开端, 基性物质为结尾, 随后进入火山宁静期; 火山喷发强度、周期性差异性较大, 长间歇期混杂有碳酸盐及陆源碎屑岩沉积建造; 海沟环境伴随裂隙式喷发, 多喷流口喷流物混杂、堆叠。在一个喷发旋回中出现薄层透镜状–条带状(碎屑)凝灰岩、化学沉积岩夹层, 在喷发旋回间隔期出现厚层陆源碎屑岩、化学沉积岩夹层。区域上大致将刘山岩组划分为 3 个喷发旋回, 每个旋回由 4～10 个喷发旋回韵律组成(陈建立, 2004)。马道铅锌银矿处于第 3 喷发旋回内, 第 3～4 喷发旋回韵律间(图 3)。

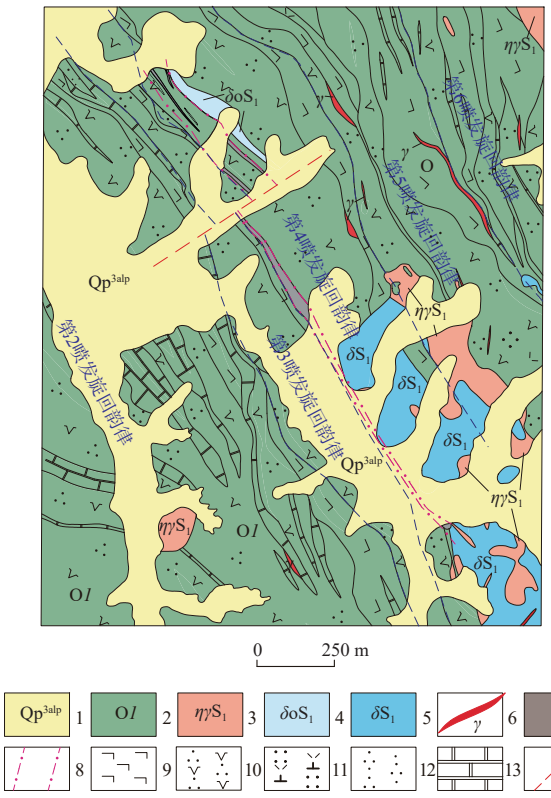
第 3 喷发旋回韵律出露于矿区中部, 自 NW 向 SE 呈不等厚带状分布, 向北延伸至第四系, 向南持续延伸; 区内出露长度约为 2.2 km, 宽度为 70～240 m。该旋回韵律与上层北部以大理岩为界, 中部–南部被第四系覆盖, 以厚层变石英角斑岩为底, 夹变细碧岩透镜体; 上部为薄层变细碧岩。

第 4 喷发旋回韵律出露于矿区中部, 自 NW 至 SE 向呈带状展布, 向北延伸至第四系, 南部被志留系岩体侵入或被第四系覆盖, 出露长度约为 2.3 km, 宽度为 290～410 m。与上旋回韵律以变细碧岩为界, 底部主要为变中–酸性凝灰岩夹黑云石英片岩、变石英角斑岩; 中部为厚层状变石英角斑岩; 上部为不均厚层状变细碧岩。

第 3 喷发旋回韵律末期至第 4 期初期为成矿期, 铅锌银矿化带赋存于以细碧岩或角斑岩为底板的变酸性凝灰岩、黑云石英片岩及变石英角斑岩中。

2.2　岩浆岩

区域岩浆岩活动活跃于整个造山期, 拉张岛弧环境下侵入的次火山岩体出露于矿区南部, 岩性为闪长玢岩, 岩石中裹挟大量细碧岩、玄武岩、闪长岩等基



1.第四系；2.奥陶系刘山岩组；3.早志留世二长花岗岩；4.早志留世花岗闪长岩；5.早志留世闪长岩；6.花岗岩脉；7.铅锌银矿体；8.矿化蚀变带；9.变细碧岩；10.变石英角斑岩；11.变中酸性火山碎屑岩；12.变长石石英砂岩；13.大理岩；14.推测断层

图3　马道铅锌银矿矿区地质图

Fig. 3　Geological map of Madao lead-zinc-silver mine area

底物质角砾。陆块俯冲碰撞环境下侵入的中酸性、基性岩浆岩主要出露于矿区中部至东南部一带, 岩性以二长花岗岩、花岗闪长岩及闪长岩为主, 分布形态大致与地层展布形态一致; 岩体间侵入界限明显, 中酸性岩体中可见闪长岩捕虏体, 靠近闪长岩一侧可见宽约 0.5 m 的烘烤蚀变带。陆内抬升造山阶段岩浆活动主要以岩脉为主, 花岗(斑)岩脉、石英脉等主要以 NW–SE 向顺地层层理产出, 少数切割地层或分布于岩体中, 宽度为 2～30 m, 长度为 50～400 m。

2.3　构造

刘山岩组在海沟环境下形成原始地层, 随着复合造山运动, 岩层不断受抬升、挤压、侵入等作用影响, 经历漫长的地质演变, 在地层中形成一系列褶皱、断裂构造。

早期基底发育大量与地层呈大夹角的火山同生裂隙, 岩浆热液通过裂隙进入洋底, 后期被次火山岩或热液物质填充, 沿裂隙带发育宽几厘米至十数米硅

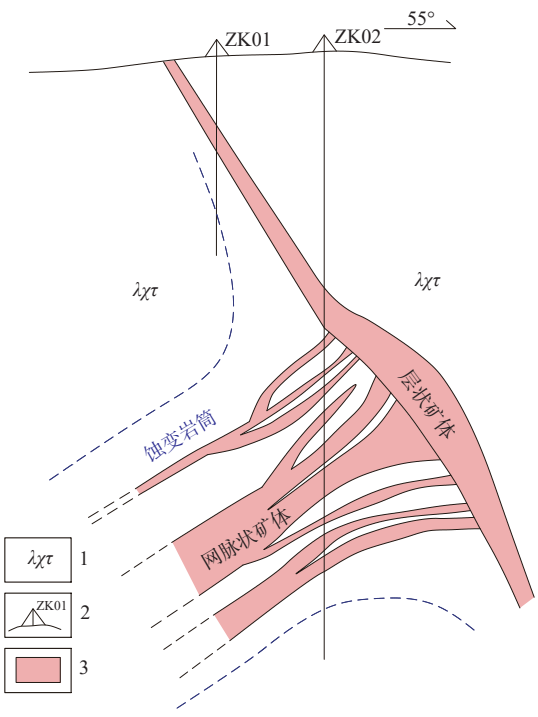
化、钾化蚀变带。

岩浆岩侵入对地层产生熔融挤压，在接触界线处形成连续的角砾岩化带，后期构造多继承该构造带，在带内形成角砾与碎基成分复杂的构造角砾岩，并有脉岩沿构造侵入。

在矿区中部偏 WN 的沟谷内推测有 1 条走向 NWW 剪切断层，向 EN 延伸断层闭合，沟谷两侧地层有 30～60 m 断距，矿化带在此处被错断。

2.4 矿体地质特征

马道铅锌矿属典型 VMS 型铅锌银矿床，在经历地层抬升、挤压等一系列区域运动改造后，火山机构仍能得到较好地保存，古地形对矿床形态控制清晰可辨。矿床成矿系统分为层状与筒状两个部分，层状部分长约为 2 km，厚为 1.2～38 m，沿地层层理分布于上部，呈核部较厚，向两侧延伸逐渐尖灭的梭形；筒状部分位于层状部分中心部位，呈上宽下窄筒状贯穿地层，宽度为 170～250 m，深部向下延伸超 300 m。层状与筒状矿化带垂直相连呈侧伏“T”字型，构成完整的火山机构（图 4）。



1.石英角斑岩；2.施工钻孔位置及编号；3.铅锌矿体

图4 火山机构剖面图

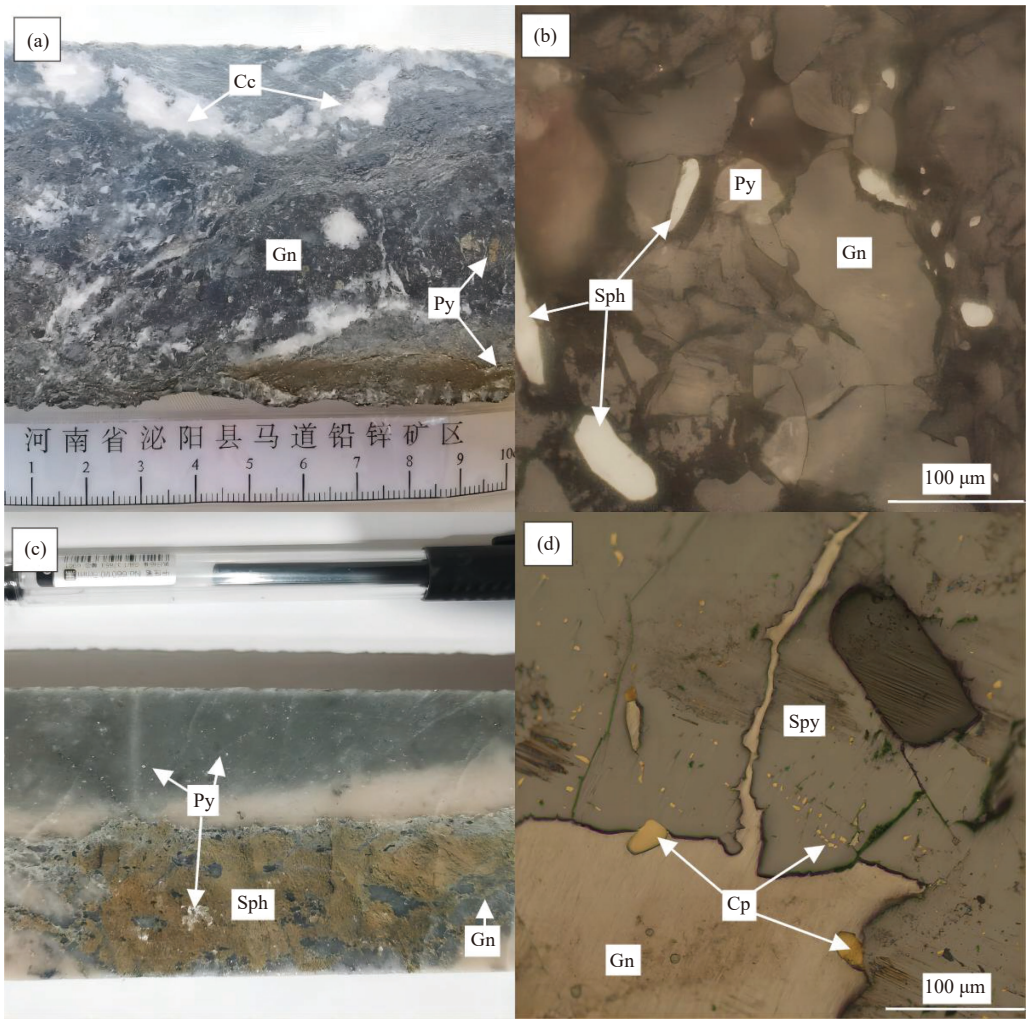
Fig. 4 Section of volcanic edifice

层状矿化带顺层展布于刘山岩组中，地层走向 NW–SE，倾向 NE。矿化带主要以中–基性火山岩为底板、酸性火山岩或火山碎屑岩为顶板，赋存于热水沉积蚀变岩、火山碎屑岩、陆源碎屑沉积岩及石英角斑岩中。层状矿化带内圈出 7 条铅锌银矿体，矿体呈不规则层状或透镜状上下叠生，长度为 100～1 300 m；厚度为 1.37～13.23 m；Pb 品位为 0.3%～5.92%、Zn 为 0.5%～18.32%、Ag 为 4.01×10^{-6}～403×10^{-6}。矿石矿物以方铅矿、闪锌矿及黄铁矿为主，含少量黄铜矿、自然银；脉石矿物以长英质矿物为主，含硬石膏、绿帘石、硅质、方解石等沉积、蚀变矿物。赋矿岩石片状及软质矿物含量较高，层间构造发育，多具碎裂结构，黄铁矿、方铅矿和闪锌矿主要呈半自形粒状产出，晶型不完整，部分具拉长及重结晶现象，矿物之间具分异、穿插、包裹等特征；偶见自然银呈包裹体，分布于其他金属硫化物中（图 5）。靠近核部矿石以条带状构造及浸染状构造为主，局部可见块状构造矿石，形成矿体厚大，品位较为集中；向两侧延伸逐渐变为浸染状构造及星点状构造，矿体厚度及品位随之下降。

筒状矿化带垂直贯穿刘山岩组与顶部层状矿化带相连，矿化带岩性复杂，有石英角斑岩、细碧岩、角斑岩、酸性火山碎屑岩等，均具硅化钾化蚀变。筒状矿化带内发育由中心向外围放射状延伸的网脉状裂隙，黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等金属矿物填充其中形成网脉状铅锌矿体。筒状矿化带内圈出 10 余条网脉状铅锌矿体，主要集中在筒状中心部位。矿体长度为 100～300 m；厚度为 0.58～31.75 m；Pb 含量为 0.12%～1.19%、Zn 含量为 0.51%～4.83%。矿石矿物以闪锌矿及黄铁矿为主，方铅矿次之，含少量黄铜矿；脉石矿物以石英、斜长石及钾长石为主，含少量白云母。赋矿岩石坚硬，无明显后期构造现象，黄铁矿、方铅矿和闪锌矿主要呈半自形粒状产出，晶型较为完整；矿物之间具分异、穿插、包裹等特征；黄铜矿多呈细小乳滴状分布于闪锌矿中，构成固溶体分离结构（图 5）。矿石以网脉状构造为主，局部具浸染状构造；向外围随着裂隙减少、变窄，逐渐转为尖灭网脉状构造或星点状构造。

2.5 矿石变质作用和围岩蚀变

矿石变质矿物组合为黑云母+绿泥石+绿帘石+铁铝榴石+石英、斜长石+黑云母+阳起石+石英。相属高绿片岩相铁铝榴石带。通过角闪石–斜长石地质温度计和石榴子石–角闪石地质温度计，测得刘山岩组的变质温压条件为 T=490～540 ℃、P=0.4～0.8 GPa，地温梯度为 15～25 ℃/km，属中温中压区域变质作用。



a.稠密浸染状铅锌银矿石；b.稠密浸染状铅锌银矿石光片；c.网脉状铅锌矿石；d.网脉状铅锌矿石光片；Cc.方解石；Gn.方铅矿；Sph.闪锌矿；Cp.黄铜矿；Py.黄铁矿

图5　马道矿区典型矿石特征

Fig. 5　Typical ore characteristics of Madao mining area

层状矿体围岩蚀变主要为绢云母化、碳酸盐化、青磐岩化、黄铁矿化; 网脉状矿体围岩蚀变主要为钾化、硅化、青磐岩化、黄铁矿化。

2.6　矿区地球化学特征

2.6.1　元素地球化学分布特征

矿区内土壤地球化学测量结果显示, Au、Ag、Pb、Zn 元素的 K_1 大于 2。其中, Au 的 K_1 值最大为 5.22, 呈强富集分布, 局部可形成矿化体或形成异常(表 1)。Co、W、Cu、Sb、Mo 的 K_1 值为 2～1.67, 呈富集态势; Ni、As 的 K_1 值分别为 1.45、1.27, 为高背景分布。Ag、W、Pb、Zn、Au 的变异系数分别为 8.39、4.09、3.27、2.72、2.13, 呈极强分异。Zn、Pb、Ag、Au 矿化系数分别为 187.65、152.74、137.25、36, 异常强度高; 元素叠加强度系数(D_I)为 1～2.54, 其中 Ag、Zn、Pb 分别为 2.54、1.67、1.49, 具后期叠加成矿作用。研究区内火山岩 Zn、Pb、Ag、Au 丰度均偏高(图 6、图 7), 为本区形成铅锌银矿床提供了有利的区域地球化学背景(刘淑文等, 2002)。

2.6.2　元素组合及相关性

针对矿区内土壤 11 种元素进行了“R”型相关性聚类分析(图 8)。在相关系数为 0.437 的水平上, 11 种元素分为 5 簇组合类型: ①As、Sb, ②Au、Ag、Pb、Zn、Cu, ③Co、Ni, ④W, ⑤Mo。

在 11 种元素相关矩阵的基础上截取特征值大于 1 的前 3 个因子作为主要因子, 对其作方差极大正交旋转(表 2、表 3)。各因子方差贡献不高, 第一主因子 F1 中 Au、Ag、Pb、Zn 占有较大载荷, 为主要成矿元素, 矿床受多期热液活动影响。

表 1 元素地球化学参数特征值表

Tab. 1 Characteristic value table of element geochemical parameters

元素	基本样品数	最小值	最大值	算术平均值	标准离差	背景值	X_1	K_1	D_1	CV_1
Au	2 066	0.9	360	4.4	9.5	3.7	0.85	5.22	1.19	2.13
Ag	2 066	0.01	54.9	0.18	1.51	0.071	0.06	3	2.54	8.39
Cu	2 066	2.5	534.5	33.2	30.6	26.8	17	1.95	1.24	0.92
Pb	2 066	14.5	4 582.3	48.5	158.5	32.6	19	2.55	1.49	3.27
Zn	2 066	13.9	9 382.3	149.9	407.3	89.6	68	2.2	1.67	2.72
Co	2 066	8.5	58.3	20	5.4	19.3	10	2	1.04	0.27
Ni	2 066	8	340.2	36.3	20.1	33.8	25	1.45	1.07	0.55
As	2 066	0.2	16.8	5.6	3.5	5.6	4.4	1.27	1	0.62
Sb	2 066	0.05	9.54	0.58	0.41	0.55	0.34	1.69	1.05	0.72
W	2 066	0.14	299.33	1.9	7.76	1.52	0.97	1.96	1.25	4.09
Mo	2 066	0.25	12.94	1.04	0.64	0.96	0.62	1.67	1.08	0.62

注：X_1为中国东部出露地壳丰度值。K_1为浓集比率，即：矿区元素算术平均值/该元素中国东部出露地壳丰度值。CV_1为变异系数，即：标准离差/算术平均值。D_1为叠加强度系数，即矿区元素算术平均值/矿区该元素背景值。Au含量为10^{-9}，B含量为10^{-6}。

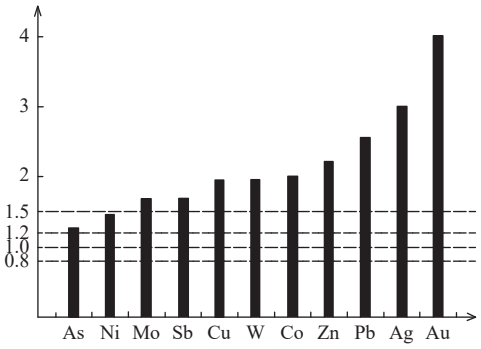


图6 矿区元素浓集比率排序图

Fig. 6 Sorting diagram of element concentration ratio in the mining area

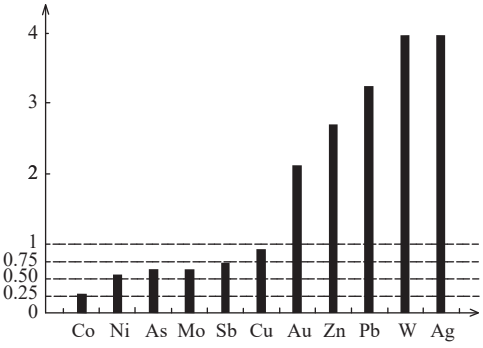


图7 矿区元素变异系数排序图

Fig. 7 Sorting diagram of element variation coefficient in the mining area

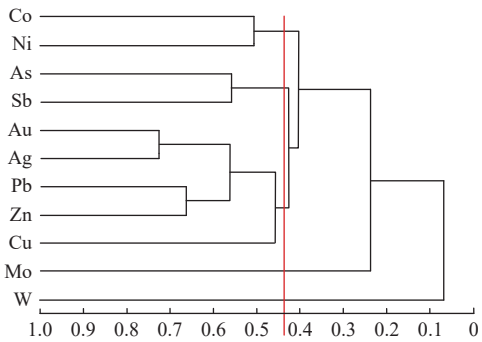


图8 矿区元素“R”型聚类分析谱系图

Fig. 8 The "R" type cluster analysis pedigree diagram of elements in the mining area

2.6.3 地球化学异常

HT3—甲$_2$为铅锌银矿床引起的矿致异常，异常展布形态与地层一致，面积为 0.72 km^2，长轴长约为 1.3 km，宽 510～700 m(表 4、图 9)。

主异常元素为 Pb、Ag、Zn、Au，伴有 W、Sb、Cu、Mo、As、Ni 异常。Ag、Pb、Zn、Au 异常面积大、强度高、分带清晰，具有外、中、内带，相互紧密套合。在异常浓集中心 Pb-2、Zn-4 部位施工的地表探矿工程均圈出铅锌银矿化带。

2.7 地球物理特征

矿区及周边区域岩石物性参数统计结果(表 5)显示，铅锌银矿石电阻率为 258～1 344 Ω·M，平均值为

表 2　矿区土壤元素因子分析初始特征值表

Tab. 2　Initial characteristic value table of soil element factor analysis in the mining area

因子	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
特征值	3.024 9	1.741 4	1.555 4	1.004 5	0.990 7	0.856 4	0.562 1	0.464 7	0.367 7	0.273 6	0.158 7
特征值方差百分比	27.498 9	15.830 5	14.139 7	9.131 9	9.006 4	7.785 5	5.109 6	4.224 2	3.343	2.487 5	1.442 9
累积百分比	27.498 9	43.329 4	57.469 1	66.601	75.607 4	83.392 9	88.502 5	92.726 7	96.069 7	98.557 1	100

表 3　矿区土壤元素正交旋转载荷矩阵

Tab. 3　Orthogonal rotation load matrix of soil elements in the mining area

元素	F1	F2	F3
Au	0.707 3	−0.127 8	0.115 9
Ag	0.760 4	−0.129 4	0.272
Cu	0.593 2	0.525 2	−0.190 8
Pb	0.838 1	0.020 9	0.099 3
Zn	0.749 2	0.094 1	−0.096 7
Co	0.045 3	0.875 3	−0.055 2
Ni	−0.031 1	0.768 8	0.205 4
As	−0.087 6	0.104	0.852 5
Sb	0.318 2	0.010 6	0.837 8
W	−0.004 3	0.008 3	0.031 3
Mo	0.357 4	−0.234 7	−0.153 2

1 008 Ω·M; 极化率为 2.87～22.31%, 平均值为 10.2%。矿石与围岩极化率与电阻率参数对比结果显示, 矿石与围岩电阻率差距不大, 极化率是围岩的 2～3 倍。矿石具中阻高极化物性特征, 通过激发极化法可以寻找激电异常区, 定位深部铅锌银矿体分布情况。

2.7.1　激电中梯面积测量异常特征

激电面积测量圈出的 DJ1 异常带与地层及铅锌银矿化带基本一致, 并与 HT_3 化探异常较为吻合(图 10)。异常控制长度约为 1.25 km, 异常面积为 0.54 km^2, 对应电阻率值为 550～1 150 Ω·m, 极化率值为 1.5%～2.6%, 属中阻中高极化异常。铅锌银矿化带连续沿高极化率异常点分布, 所对应电阻率 850～1 050 Ω·m, 异常特征与矿石物性基本吻合。

2.7.2　激电测深剖面测量异常特征

火山机构中心测得剖面激电异常特征(图 11)显示, 50 m 以浅表现为低阻低极化特征; 剖面 150 m 处深 100 m 以下, 出现倾向 NE“马鞍”状激电异常, 向两侧及深部延伸均未封闭; 极化率值一般在 1.8% 以上, 最高达 2.2%; 对应电阻率为 500～1 200 Ω.m, 属中阻中高极化异常体。

层状矿化带位于极化体上部, 倾向 NE 呈条带状向深部延伸, 在 100 m 以浅极化率小于 1.5%, 电阻率小于 400 Ω.m; 在 100 m 以深极化率为 1.7%～2.1%, 电阻率为 600～800 Ω.m, 总体表现为中阻中高极化特征。

筒状矿化带位于极化体中心, 异常呈面状向南西方向延伸, 与推测火山颈形态基本吻合, 对应极化率为 1.7%～2.2%, 电阻率为 720～1 100 Ω.m, 表现为中高阻高极化特征。

3　讨论

3.1　矿床成因

二郎坪群刘山岩组为拉张岛弧环境下海底火山–喷流沉积形成的一套变质火山岩系(韦昌山等, 2003)。已发现的溢流相铅锌银矿化带均以不均厚条带状–透镜状以变细碧岩或变角斑岩为底板, 顺层分布于黑云石英片岩、变(中)酸性凝灰岩、变石英角斑岩等岩性为主的火山(沉积)碎屑岩、热水沉积蚀变岩或酸性火山岩中, 含矿层底板岩石具中低温热液蚀变特征。火山颈相铅锌矿化带处于层状矿化带下部具硅化、钾化蚀变的酸性火山(碎屑)岩中, 空间上贯穿地层, 几乎垂直于层状矿化带。两者结合呈“T”字形, 组合完整的海底火山机构, 属典型的海相火山型块状硫化物矿床(VMS 型矿床)(图 12)。

3.2　成矿条件

矿化带底板火山岩的 Cu、Pb、Zn、Ag 等元素含量较区域未蚀变的岩石明显亏损, 指示底板火山岩中一部分金属元素已被淋滤出并参与成矿作用。

含矿热液在火山裂隙中沉淀–充填交代, 形成脉状、浸染状矿化, 金属硫化物主要为闪锌矿、黄铁矿; 在靠近洋底由于压力急剧释放引起沸腾形成的角砾状矿化。硫化物沉淀过程中伴随绢云母化、黏土矿化、钾化和硅化。喷入洋底含矿热液与海水混合, 迁入热

表 4 HT3 主要单元素异常特征值表

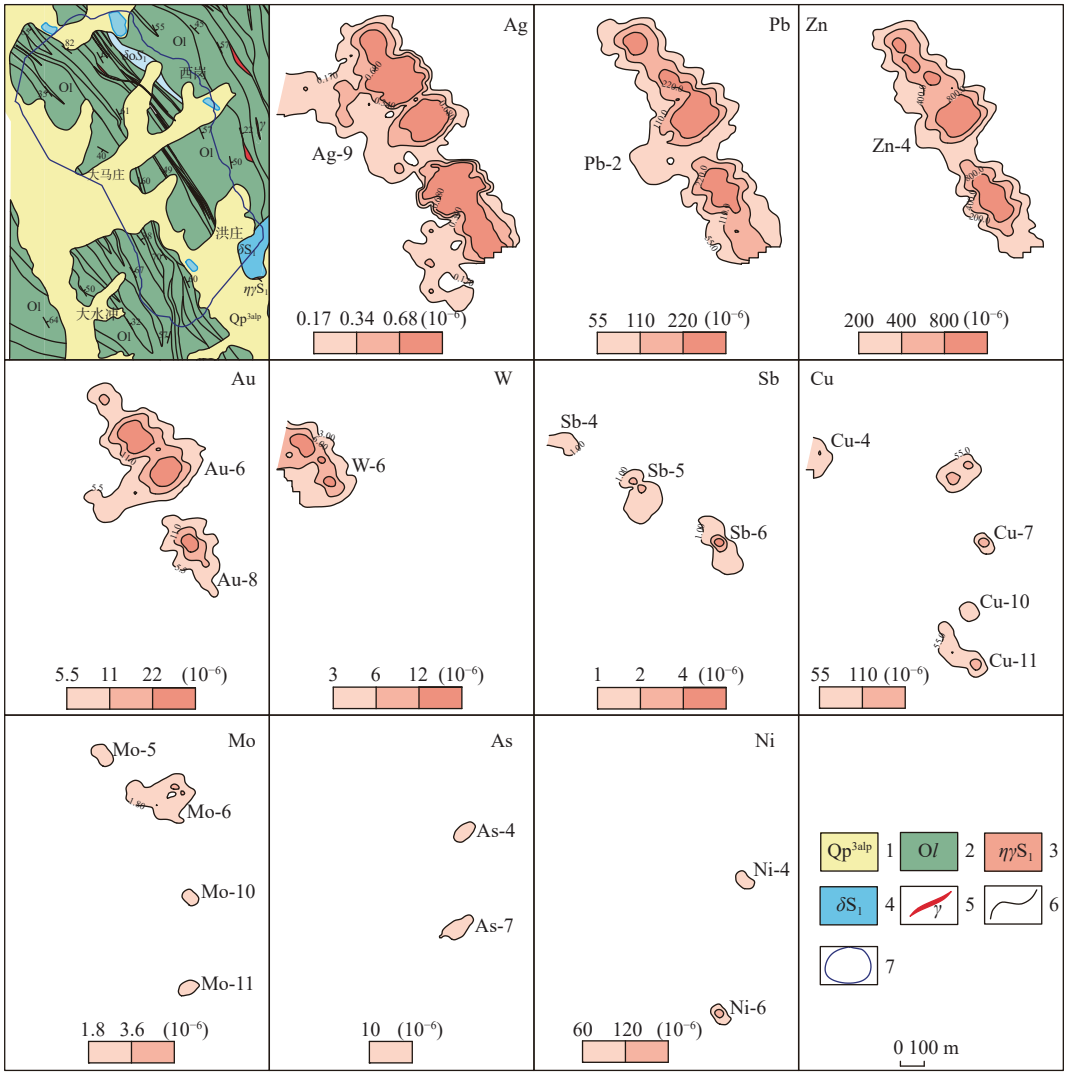
Tab. 4 HT3 main single element anomaly characteristic value table

元素异常编号	面积（km^2）	异常强度		衬度	NAP	异常下限	浓度分带	异常点数（个）
		最高值	平均值					
Ag-9	0.435 8	54.900	1.739	10.23	4.458 3	0.170	外、中、内	97
Pb-2	0.309 8	3 502.9	290.2	5.28	1.634 8	55.0	外、中、内	74
Zn-4	0.235 5	7 854.3	1 136.9	5.68	1.338 6	200.0	外、中、内	58
Au-6	0.144 0	360.0	26.1	4.74	0.681 8	5.5	外、中、内	37
Au-8	0.048 1	120.0	20.9	3.80	0.182 5	5.5	外、中、内	11
As-4	0.004 9	13.2	11.7	1.17	0.005 8	10.0	外	5
As-7	0.007 8	13.6	11.6	1.16	0.009 1	10.0	外	6
Cu-4	0.007 5	227.5	227.5	4.14	0.031 2	55.0	外、中	1
Cu-5	0.019 3	291.6	178.9	3.25	0.062 6	55.0	外、中	5
Cu-7	0.005 2	278.0	278.0	5.05	0.026 1	55.0	外、中	1
Cu-10	0.005 0	165.0	165.0	3.00	0.015 1	55.0	外	1
Cu-11	0.021 2	341.7	154.4	2.81	0.059 5	55.0	外、中	5
Mo-5	0.005 8	8.83	8.83	4.90	0.028 5	1.80	外	1
Mo-6	0.034 8	12.94	5.08	2.82	0.098 2	1.80	外、中	7
Mo-10	0.003 3	4.47	3.32	1.84	0.006 2	1.80	外	2
Mo-11	0.004 0	2.41	2.13	1.18	0.004 7	1.80	外	3
Ni-4	0.004 0	145.1	131.0	2.18	0.008 8	60.0	外	2
Ni-6	0.004 7	308.8	308.8	5.15	0.024 4	60.0	外、中	1
Sb-4	0.008 4	3.72	2.47	2.47	0.020 6	1.00	外	2
Sb-5	0.026 1	8.70	5.36	5.36	0.140 0	1.00	外、中	2
Sb-6	0.024 7	9.54	2.23	2.23	0.055 1	1.00	外、中、内	9
W-6	0.066 7	81.89	19.13	6.38	0.425 2	3.00	外、中、内	10

表 5 区域岩浆岩物性参数统计表

Tab. 5 Statistical table of physical parameters of magmatic rocks in the region

岩性分类	岩性名称	样品数量	电性				密度
			ρ（Ω·M）		η（%）		δ（10^3 kg/m^3）
			变化范围	平均值	变化范围	平均值	平均值
超基性岩	橄榄岩、辉石岩	16	101～624	236	0.21～38.94	8.84	2.13～3.12
基性岩类	辉长岩、角闪岩、细碧岩	35	190～1 450	660	3.29～13.26	4.48	2.73
中性岩	闪长岩、变安山岩、角斑岩	42	204～1 820	1 274	0.9～4.0	2.6	2.34～2.79
酸性岩	花岗岩、花岗斑岩、奥长花岗岩	27	767～2 857	2 143	0.74～4.03	1.87	2.48
碱性岩	正长岩	8	89～1 317	1 105	1.36～6.23	2.6	2.41
	铅锌银矿石	32	258～1 344	1 008	2.87～22.31	10.2	2.79



1.第四系； 2.刘山岩组； 3.二长花岗岩； 4.闪长岩； 5.花岗岩脉； 6.地质界线； 7.化探综合异常

图9　HT3 综合异常剖析图

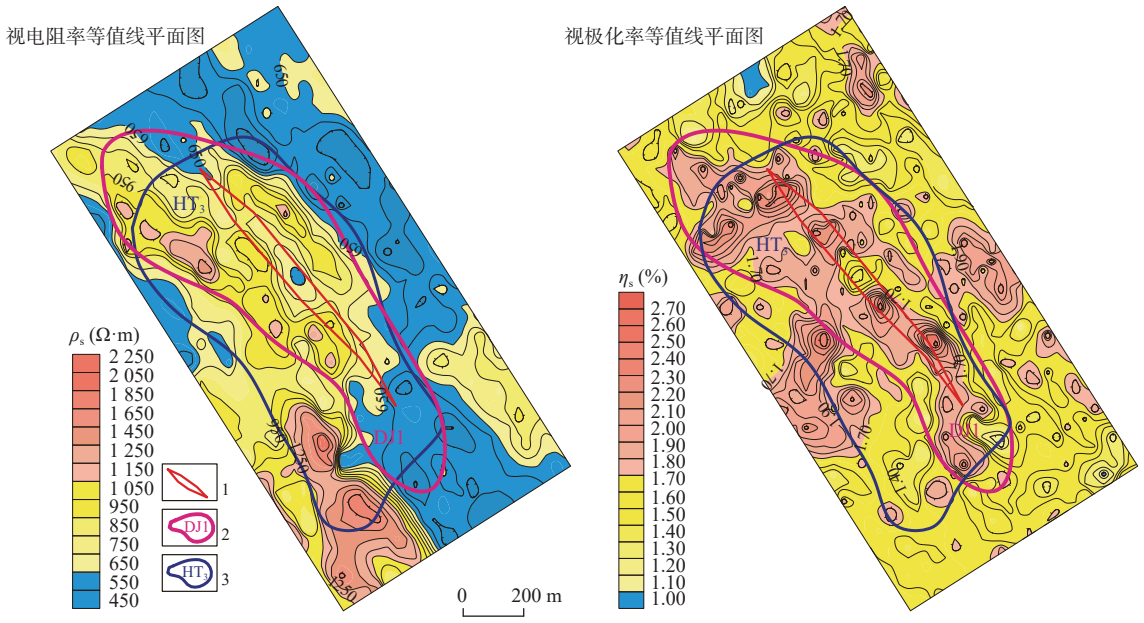
Fig. 9　HT3 comprehensive anomaly analysis diagram

卤水池冷凝沉淀形成层状矿化带。由于含矿热液的偏酸性和偏还原性质，在海水条件下水解质中硅达到饱和，伴生燧石沉淀；S^{2-}氧化成了 SO_4^{2-}，进而与海水中的 Ba^{2+}和 Ca^{2+}结合生成了重晶石和石膏，故矿化带中多含有硅质、石膏等夹层(Solomon et al., 1976; 刘青松等, 2017)。

富含以 Pb 为主的流体盐度、密度均较低；在海沟环境下进行较长距离迁移，主要以多硫络合物形式低温迁移至火山洼地；在相对封闭的还原条件下与碳酸盐一同沉淀，在矿化带边部形成层状铅矿体(叶天竺等, 2017)。

3.3　找矿模型

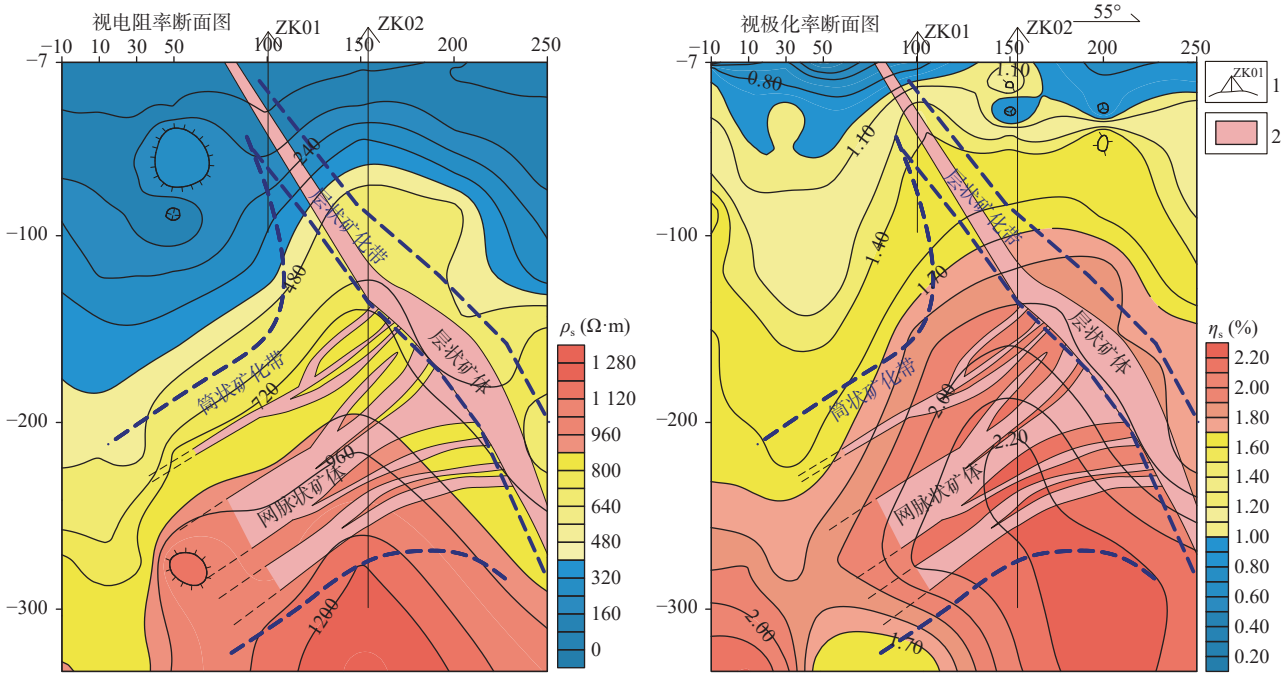
对比研究发现，选择地质结合物化探综合手段能有效发现马道铅锌银矿体并实现空间定位(图 13)。①激电中梯剖面显示，剖面地层极化率为 0.9%～1.8%，电阻率为 200～1 000 Ω·m，总体起伏不大。在剖面 200～300 m 处极化率出现小波峰，对应矿体部位呈高值区间，并沿矿体延深方向缓落；80～200 m 处，电阻率受矿层底板中性火山岩影响呈相对高值分布；在 200 m 后主要为含矿地层与酸性火山岩，电阻率为 600 Ω·m；②岩石地球化学测量剖面显示，地表岩石层受矿体影响形成宽泛的以 Pb、Zn、Ag、Au 元素为主的次生晕异常带，宽度可达 150 m；矿体部位岩石化探结果可达工业品位；③在激电中梯与岩石地球化学剖面测量圈出的异常带内施工槽探工程加以揭露，采用采样工程发现并控制铅锌银矿体。④在剖面 100～400 m



1.铅锌银矿化带； 2.DJ1 激电异常； 3.HT3 化探异常

图10　视电阻率、视极化率等值线平面图

Fig. 10　Apparent resistivity, apparent polarizability contour map



1.施工钻孔位置及编号； 2.铅锌银矿体

图11　火山机构激电测深视极化率、视电阻率断面图

Fig. 11　Sectional diagram of apparent polarizability and apparent resistivity of IP sounding in volcanic edifice

处布设激电测深测量，通视极化率断面图显示剖面 200～300 m 处出现自浅部向下垂直延伸的激电异常区，极化率值一般约为 2.0%，最高达 3%，对应电阻率小于 600 Ω·m，表现为低阻高极化特征，推测矿体向深部有延伸；⑤施工钻孔控制矿体 200 m 斜深，发现矿体深部延伸较好，铅锌品位增高，并伴生高品位金。由视极化率断面图可知，在沿矿体倾深部延深方向出现 1 处极化率为 2.5% 的异常区，与成矿规律吻合，推

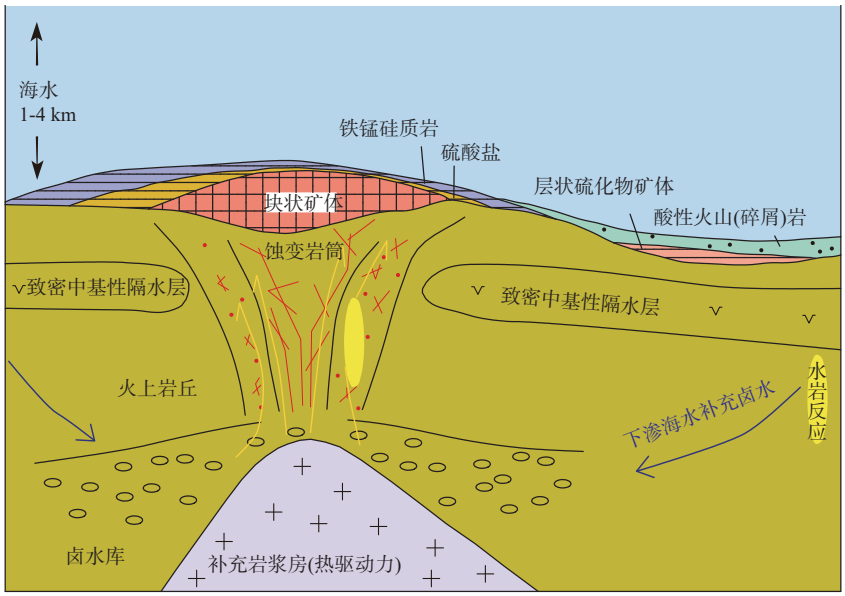


图12　VMS 矿床模式

Fig. 12　VMS deposit model

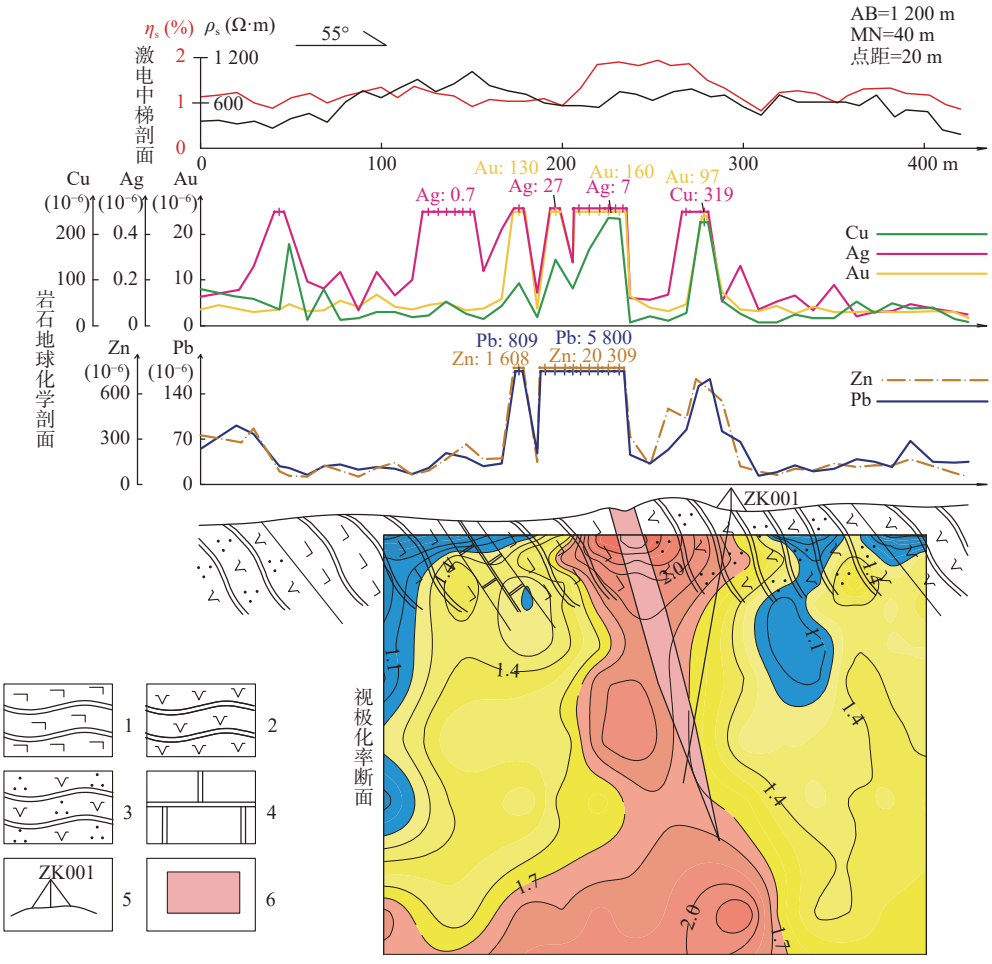


图13　马道铅锌银矿地物化综合剖面图

Fig. 13　Geophysical and chemical comprehensive profile of Madao lead-zinc-silver mine

测为矿致异常。勘查工作量有限,深部含矿性尚未进行验证。在成矿规律研究的基础上,笔者总结分析矿床地物化及勘查工程信息,建立了马道铅锌矿找矿模型信息表(表 6)。

表 6 马道铅锌矿找矿模型表

Tab. 6 Madao lead-zinc ore prospecting model table

找矿准则分类			信息显示
地质	成矿地质体	含矿地层	奥陶系二郎坪群刘山岩组
		地层时代	上古生界
		喷发韵律	第3喷发旋回内，第3～4喷发旋回韵律间
	岩性	赋矿岩性	热水沉积蚀变岩及酸性火山(碎屑)岩
		岩性组合	(含硬石膏)黑云母片、变石英角斑岩、变中(酸性)凝灰岩等
	成矿构造	古构造地理环境	陆源弧后盆地拉张幼年期海底裂陷槽
		早期成矿构造	海底火山中心式喷流沉积系统及火山同生断裂带
		晚期成矿构造	矿层软弱夹层内层间构造
	成矿结构面	岩性成矿结构面	变石英角斑岩、角斑岩、变细碧岩、变火山碎屑岩、碳酸盐接触处，靠近酸性及碎屑岩一侧
		晚期脆韧性断裂成矿结构面	晚期构造发育于矿层软弱岩层内，产生一系列小规模波状复式褶皱带及层间滑脱断层
	围岩蚀变	远矿围岩蚀变	重晶石化、磁铁矿化、碳酸盐化
		近矿围岩蚀变	硅化、钾化、硬石膏化、碳酸盐化、黄铁矿化
	风化露头		地表有具赤铁矿化、褐铁矿化铅锌银矿体露头
地球物理	物性标志		层状矿化带部分具中阻中高极化特征，筒状矿化带部分具高阻高极化特征
	地球物理异常特征		矿化带平面上呈现宽大中低阻高极化率异常带，剖面中极化体展布与矿化带相吻合
	磁场、重力场特征		含矿地层磁场强度为负，ΔT强度在−50左右；布格重力异常为 -20×10^{-5} m/s^2～-26×10^{-5} m/s^2
地球化学	土壤化探异常标志		以Pb、Ag、Zn、Au为主要元素异常，具面积大、强度高、分带清晰，有外、中、内带，相互紧密套合的异常区，有较好的找矿指示效果
遥感信息	卫星影像解译		赋矿地层在SPOT-5遥感影像图上呈红褐色及深蓝色，其中环状影像指示破古火山口，NW–SE向展布的连续线状影像指示古海底裂陷槽或后期构造带

4 结论

(1)马道铅锌银矿位于东秦岭造山带之朱庄背形北翼奥陶系二郎坪群刘山岩组内,是近些年来在二郎坪群中寻找 VMS 型矿床取得的新的突破。矿床规模大,成矿结构面及控矿构造稳定,元素分带及蚀变特征分带明显,火山机构保存完整,目前矿床已达中型规模。

(2)对区域刘山岩组火山岩喷发旋回划分,确定马道铅锌银矿主成矿期为第 3 喷发旋回内,第 3～4 喷发旋回韵律间火山宁静期。

(3)经土壤地球化学显示矿区中 Ag、W、Pb、Zn、Au 元素呈极强分异,Pb、Ag、Zn、Au 元素为主要异常元素;层状铅锌银矿化带具中阻中高极化电性特征,筒状矿化带具高阻高极化电性特征。

(4)东秦岭造山带内沟弧盆体系内二郎坪群海相火山岩系地层东西绵延超 700 km,其中已发现 4 处中型规模的 VMS 型矿床。以马道铅锌银矿床为例,总结找矿成功经验,建立了找矿模式,为区域上寻找类似矿床有一定参考价值。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

陈伟民. 河南水洞岭铜多金属矿床地球化学异常特征及找矿标志[J]. 矿产与地质, 1998, 12(6): 68−72.

CHEN Weimin. The geochemical anomaly characteristics and prospecting indicators of the Shuidongling copper polymetallic deposit in Henan Province[J]. Mineral Resources and Geology, 1998,12(6): 68−72.

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 Jianli. The Characteristics and Ore Exploration of Massive Sulfide Deposits in Er'langping Group Marine Volcanic Rocks[J]. Geology and Exploration, 2004,40(6): 38−41.

伏雄. 河南省水洞岭铜铅锌矿床地质特征、成因探讨及找矿方向[J]. 河南科学, 2013, 31(5): 643−651.

FU Xiong. Geological Characteristics, Genesis and ProspectingDirection of Shuidongling Cu-Pb-Zn Deposit in Henan[J]. Henan Science, 2013, 31(5): 643−651.

李亚林, 张国伟, 宋传中. 东秦岭二郎坪弧后盆地双向式俯冲特征[J]. 高校地质学报, 1998, 4(3): 47−54.

LI Yalin, ZHANG Guowei, SONG Chuanzhong. Characteristics of Bidirectional Subduction of Erlangping Backarc Basin in the East Qinling[J]. Geological Journal of China Universities, 1998,4(3): 47−54.

李法岭, 李运冬. 河南泌阳红石山一带二郎坪群地质地球化学特征及成矿认识[J]. 矿产与地质, 2017, 31(5): 908−916.

LI Faling, LI Yundong. Geological and geochemical features and meta logenic understandingof Erlangping Group in Hongshishan area of Biyang County, Henan Province[J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(5): 908−916.

李旭, 杨泽强, 袁德志, 等. 河南省泌阳县马道铅锌矿普查报告[R]. 河南: 河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院, 2022.

刘少峰, 张国伟. 东秦岭-大别山及邻区盆-山系统演化与动力学[J]. 地质通报, 2008, 27(12): 1943−1960.

LIU Shaofeng, ZHANG Guowei. Evolution and geodynamics of basin/mountain systems in East Qinling-Dabieshan and its adjacent regions[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(12): 1943−1960.

刘淑文, 魏宽义, 许拉平. 云南会泽铅锌矿田控矿构造体系及成矿预测[J]. 西北地质, 2002, 25(3): 84−89.

LIU Shuwen, WEI Kuanyi, XU Laping. The thrust nappe tectonics system and the metallogenicprediction of the Pb-Zn deposit in Huize, Yunnan[J]. Northwestern Geology, 2002,25(3): 84−89.

刘青松, 袁万明, 冯星, 等. 青海省祁连县山阴凹槽海相火山岩型锌铜矿床地球化学特征及其成因意义[J]. 西北地质, 2017, 50(4): 105−114.

LIU Qingsong, YUAN Wanming, FENG Xing, et al. Geochemistry and Genetic Significance of the Yin'aocao Marine Facies VolcanicType ZnCu Deposits in Qilian Mountains, Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(4): 105−114.

彭翼, 燕长海, 万守全, 等. 东秦岭刘山岩块状硫化物矿床地质地球化学特征[J]. 地质论评, 2005, 51(5): 550−557.

PENG Yi, YAN Changhai, WAN Shouquan, et al. Geological-Geochemical Characteristics of the Liushanyan Massive SulfideDeposit in the Eastern Qingling Mountains[J]. Geological Review, 2005, 51(5): 550−557.

田智博, 苟龙龙, 徐晓飞, 等. 秦岭造山带涝峪地区宽坪岩群变质作用温压条件及原位 Rb–Sr 年代学研究[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 1−26.

TIAN Zhibo, GOU Longlong, XU Xiaofei, et al. Metamorphic P–T Conditions and In–situ Rb–Sr Geochronology of the Kuanping Group in the Laoyu Area of the Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 1−26.

韦昌山, 杨振强, 付建明, 等. 河南桐柏刘山岩铜锌矿床成因及古大地构造环境[J]. 地质科技情报, 2004, 23(2): 25−30.

WEI Changshan, YANG Zhenqiang, FU Jianming, et al. Origin and Palaeotectonic Setting of Liushanyan Copper-Zinc Deposit in Tongbai, Henan Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2004,23(2): 25−30.

韦昌山, 杨振强, 付建明, 等. 河南刘山岩铜锌矿区细碧-石英角斑质含矿火山岩系的构造环境[J]. 华南地质与矿产, 2003(4): 31−38.

WEI Changshan, YANG Zhenqiang, FU Jianming, et al. Palaeotectonie setting of ore bearing spilite quartz keratophyreseries in Liushanyan copper-zinc mine, Henan[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2003(4): 31−38.

辛明宇, 刘丽, 盛渊明, 等. 东秦岭北岭金矿床黄铁矿标型特征及成矿指示意义[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 75−86.

XIN Mingyu, LIU Li, SHENG Yuanming, et al. Typomorphic Characteristics and Metallogenic Indicative Significance of Pyrite in Beiling Gold Deposit, East Qinling[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 75−86.

杨泽强, 袁德志, 李旭, 等. 河南省泌阳县马道铅锌矿预查报告[R]. 河南: 河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院, 2021.

杨涛, 朱赖民, 胡妍, 等. 西秦岭李坝金矿床成因探讨: 来自含金石英脉流体包裹体及锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 60−78.

YANG Tao, ZHU Laimin, HU Yan, et al. Genesis of the Liba Gold Deposit in West Qinling: Evidence from Fluid Inclusions and Zircon U-Pb Dating in Gold Bearing Quartz Vein[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 60−78.

燕长海, 徐勇航, 彭翼, 等. 东秦岭二郎坪群中火山成因块状硫化物矿床地质地球化学特征及其成因讨论[J]. 矿床地质, 2008, 27(1): 14−27.

YAN Changhai, XU Yonghang, PENG Yi, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis discussion of volcanic blocky sulfide deposits in the Erlangping Group of the Eastern Qinling Mountains[J]. Mineral Deposits, 2008,27(1): 14−27.

叶天竺, 韦昌, 王玉, 等. 勘查区找矿预测理论与方法·各论 [M]. 北京: 地质出版社, 2017.

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.

张逸鹏, 张培震, 王岳军, 等. 西秦岭造山带晚中生代-新生代陆内构造演化[J]. 科学通报, 2024, 69(18): 2568−2586.

ZHANG Yipeng, ZHANG Peizhen, WANG Yuejun, et al. The Late Mesozoic-Cenozoic intracontinental evolution of theWest Qinling Belt, Central China[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(18): 2568−2586.

周彬, 朱毓, 高沛, 等. 秦岭造山带凤县–山阳地区富钴–镍钠长角砾岩年代学研究及地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 174−196.

ZHOU Bin, ZHU Yu, GAO Pei, et al. Geochronology Study and Geological Significance of Cobalt-Nickel-Rich Albite Breccia in the Fengxian-Shanyang, Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 174−196.

Chai F, Zhang Z, Li W, et al. The early Paleozoic Huangtupo VMS Cu-Zn deposit in Kalatag, Eastern Tianshan: Implications from geochemistry and zircon U-Pb geochronology of volcanic host rocks[J]. Lithos, 2019, 342: 97−113.

Ding L, Kapp P, Cai F, et al. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10): 652−667.

Dong Y, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. Gondwana Research, 2016, 29(1): 1-40.

Green G R, Solomon M, Walshe J L. The formation of the volcanic-hosted massive sulfide ore deposit at Rosebery, Tasmania[J]. Economic Geology, 1981, 76(2): 304−338.

Large R R. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; features, styles, and genetic models[J]. Economic geology, 1992, 87(3): 471−510.

Li Y, Wang C, Dai J, et al. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan–Himalayan orogen: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 143: 36−61.

Morton R L, Franklin J M. Two-fold classification of Archean volcanic-associated massive sulfide deposits[J]. Economic Geology, 1987, 82(4): 1057−1063.

Petersen S, Herzig P M, Hannington M D. Third dimension of a presently forming VMS deposit: TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26 N[J]. Mineralium Deposita, 2000, 35: 233−259.

Solomon M, Wolf K H. “Volcanic” massive sulphide deposits and their host rocks—a review and an explanation[J]. Handbook of Stratabound and Stratiform Ore Deposits, 1976, 6: 21−54.