

广西西大明山矿集区弄屯铅锌矿成矿特征及矿床成因探讨

冯洋洋¹, 付伟², 李根³, 万宏宇⁴

(1. 北部湾大学 资源与环境学院, 广西 钦州 535011; 2. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541006; 3. 北部湾大学 石油与化工学院, 广西 钦州 535011; 4. 重庆南江工程勘察设计集团有限公司, 重庆 401121)

摘要: 这是一篇地球科学领域的论文。西大明山多金属矿集区是广西矿产资源勘查重点关注地区, 在大规模找矿工作的推动下, 新发现了弄屯大型铅锌矿床, 目前对该矿床的成矿特征尤其矿床成因方面的认识仍停留在表象阶段。为了查明弄屯铅锌矿床的成矿机制, 本文在详细的野外地质调查和前人工作基础上, 系统总结了弄屯铅锌矿床的区域成矿地质背景、矿区和矿床地质特征, 分析矿床成因。研究表明: 弄屯铅锌矿床属于岩浆热液型矿床, 其成矿流体起源于岩浆流体, 后期混入大气降水, 流体在长距离运移途中萃取了地层中的 Pb、Zn 等矿质元素, 并与来自岩浆流体的 S 结合形成 [HS] 配位络合物, 在断裂带中汇聚并向浅部运移, 进而形成脉状铅锌矿体。鉴于此, 本文建立了弄屯铅锌矿床的成矿模式, 为今后的找矿勘查工作提供必要的思路和依据。

关键词: 地球科学; 地质特征; 矿床成因; 成矿模式; 弄屯铅锌矿床; 西大明山地区

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.01.006

中图分类号: P618.42; P618.43 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 01-0041-09

引用格式: 冯洋洋, 付伟, 李根, 等. 广西西大明山矿集区弄屯铅锌矿成矿特征及矿床成因探讨[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(1): 41-49.

FENG Yangyang, FU Wei, LI Gen, et al. Discussion on metallogenic characteristics and genesis of Nongtun lead-zinc deposit in Xidamingshan polymetallic ore concentration area, Guangxi[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(1): 41-49.

广西西大明山地区位于华南扬子板块与华夏板块结合带部位^[1-2], 区内矿产资源十分丰富, 以内生金属矿产为主。迄今为止, 研究区已发现的贵金属和有色金属矿种主要包括钨、铋、铅、锌、银、金等, 其中已探明大型矿床两处(凤凰山银矿、弄屯铅锌矿), 中型矿床两处(长屯铅锌矿、罗维钨铋矿), 小型矿床多处(淩井铅锌矿、平何银矿、德立铅锌矿、小明山铅锌矿等)。这种独特的大地构造位置及其丰富的矿产资源优势, 使其成为矿产勘查和理论研究的首选目标。

早在上世纪八九十年代, 前人就依据地球物

理信息推断西大明山地区存在隐伏花岗岩体。在 1:100 万重力资料中, 该地区出现了呈 NE-SW 走向的布格重力低缓异常, 指示发育大型隐伏花岗岩体^[3]。通过 1:20 万航磁测量工作, 在西大明山一带识别出两处大规模的磁异常区, 黄启勋^[4]将其解释为小明山隐伏岩体和西大明山隐伏岩体。1:5 万航磁工作识别出 8 处磁异常, 且出现了深部磁异常信息和浅部磁异常信息套合的现象, 推测深部磁性体为隐伏花岗岩体, 而浅部磁性体有规律地围绕深部磁性体顶部边缘分布, 其可能与隐伏花岗岩体周边的磁性硫化物发育有关^[5]。直至 2013 年, 广西壮族自治区第四地质队在西大明山

收稿日期: 2022-08-02

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY0429, 2021KY0430); 广西找矿突破战略行动地质矿产勘查项目(桂国土资函[2017]341); 北部湾大学高层次人才科研启动项目(2020KYQD10)

作者简介: 冯洋洋(1991-), 女, 博士, 讲师, 主要从事矿产勘查与预测研究。

东缘的罗维地区部署了千米深钻,首次证实了隐伏花岗岩体的存在,主要分布西大明山复式背斜的轴部,普遍埋深超过 1 km,浅部出现西大明山和小明山两个分支,深部相连,总体形态为马鞍状^[6],其侵位年龄为 100~92 Ma^[7]。

前人在西大明山地区开展的研究工作基本上是与随着矿产勘查工作的脚步,在铅锌矿床学研究方面,长屯和淶井矿发现较早,但由于矿床规模不大(长屯为中型,淶井为小型),早期研究关注不多,只开展过一些零零散散的工作^[8]。此后,随着 2013 年弄屯大型铅锌矿床的发现,对西大明山一带铅锌矿床的成矿理论研究开始逐渐受到重视,但该矿床的地勘工作起步晚,基础研究有限,有关矿床成因的认识仍较为模糊,亟需开展进一步的深化研究工作。本文在详细的野外地质调查基础上,结合近些年公开发表的资料,综合开展弄屯铅锌矿床的成矿地质特征和矿床成因研究,为今后的找矿勘查工作提供理论支撑。

1 区域地质背景

西大明山地区地处钦-杭缝合带的西南段(图 1a),该缝合带自广西钦州向北东方向延伸,蜿蜒穿过华南地区的中南部,一直延伸到浙江的杭州湾地区,全长约为 2 000 km,宽为 100~300 km,总体呈现出反“S”型的弧形展布特征^[1,9]。研究区构造活动强烈,主要经历了加里东、海西、印支、燕山及喜山五次构造运动,在长期的地史演化过程中,受到强烈的剥蚀和变质作用,使寒武系与上覆泥盆系呈角度不整合接触(图 1b)。其中,寒武系由小内冲组(C_x)和黄洞组(Ch)组成,岩性主要为灰色-灰绿色中厚层状长石石英砂岩、泥质粉砂岩、含泥粉砂岩、深灰色薄-中层状泥岩、含炭泥岩等;泥盆系发育较为齐全,上部以薄层至中厚层粉砂岩、页岩等为主,底部以灰色厚层至块状灰岩、白云岩及白云质灰岩为主。区域构造复杂,形成了以西大明山大型复式背斜为主的基底构造和以 NE 向、NW 向及 SN 向断裂为主的盖层构造格局。另外,岩石普遍发育微裂隙和断裂,为含矿热液的流动、循环和富集提供有利场所。研究区内岩浆岩出露稀少,只在西大明山复式背斜的核部和翼部有少量岩脉沿着断裂侵入。其中,以石英斑岩岩脉为主的酸性岩脉,形成时代为 104 Ma(未发表数据),主要分布西大明山主峰的北侧,走向为 NNE 向和近 EW 向,岩脉长度介于 15~50 m 之

间、宽度为 1~2 m,主要发育于寒武系小内冲组,常常伴有钨矿化。此外,基性岩脉出露规模不大,总面积最大可达 0.15 km²,分布在西大明山地区西侧的上姜和北侧的屏山一带,岩性主要为辉绿岩、辉长岩、橄榄辉绿岩、辉绿玢岩、弱蚀变的石英辉绿岩等。这些基性岩脉常常与围岩呈侵入接触关系,并且基性岩脉的周围蚀变现象并不明显,前人获得上姜辉长岩的成岩年龄为(94.8±4.4) Ma,属于燕山晚期^[10]。

2 矿区地质特征

弄屯铅锌矿地处西大明山地区的北西端。经估算,该地区共探获工业矿石量 1144.15 万 t, Pb 金属量为 58 930.15 t, Pb 品位为 0.52%; Zn 金属量为 515 245.29 t, Zn 品位为 4.50%,达到大型矿床规模。

2.1 地层特征

研究区主要由寒武系、泥盆系和第四系组成(图 1c)。根据地层出露的特征,从老到新,具体单元地质特征划分如下:

中-上寒武统边溪组(C_{2-3b})主要分布于矿区的中部,是主要的赋矿层位,岩性主要为灰白色、青灰色中厚层不等粒砂岩、砂岩和长石石英砂岩,夹少量灰黑、灰绿色页和泥岩等。

下泥盆统莲花山组(D_1l)可划分为上下两段,上段岩性为紫红、灰白色中细粒石英砂岩以及长石石英砂岩,层间夹灰黄色泥质岩和粉砂岩;下段主要为灰白色至灰黄色厚层状石英砂岩。该层与上寒武统边溪组(C_{2-3b})呈角度不整合接触,发现零星铅锌矿化现象。

下泥盆统那高岭组(D_1n)主要以灰绿色中层状砂质泥岩和页岩为主,其次为砂质页岩,中间夹有一层细粒灰岩和泥灰岩。

下泥盆统郁江组(D_1y)按岩性序列整体可分为四部分,下部以灰至灰黄色的中层状细砂岩、粉砂岩为主,层间夹薄层状砂质页岩和细砂岩;中部以黄绿、紫红色的薄层状含炭质泥岩、页岩以及粉砂质页岩为主;上部与中部岩性类似,主要由黄绿色薄层状粉砂岩和粉砂质泥岩组成;顶板主要为深灰色中层状泥质灰岩。

中泥盆统东岗岭组(D_2d)主要分布于矿区西部,岩性主要由下部(D_2d')灰、深灰色中厚层状白云岩(含浅灰-灰色白云质灰岩夹层)和上部(D_2d'')灰、浅灰色厚层块状灰岩(含白色白云质灰岩夹层)、钙质白云岩、深灰色中厚层状灰岩

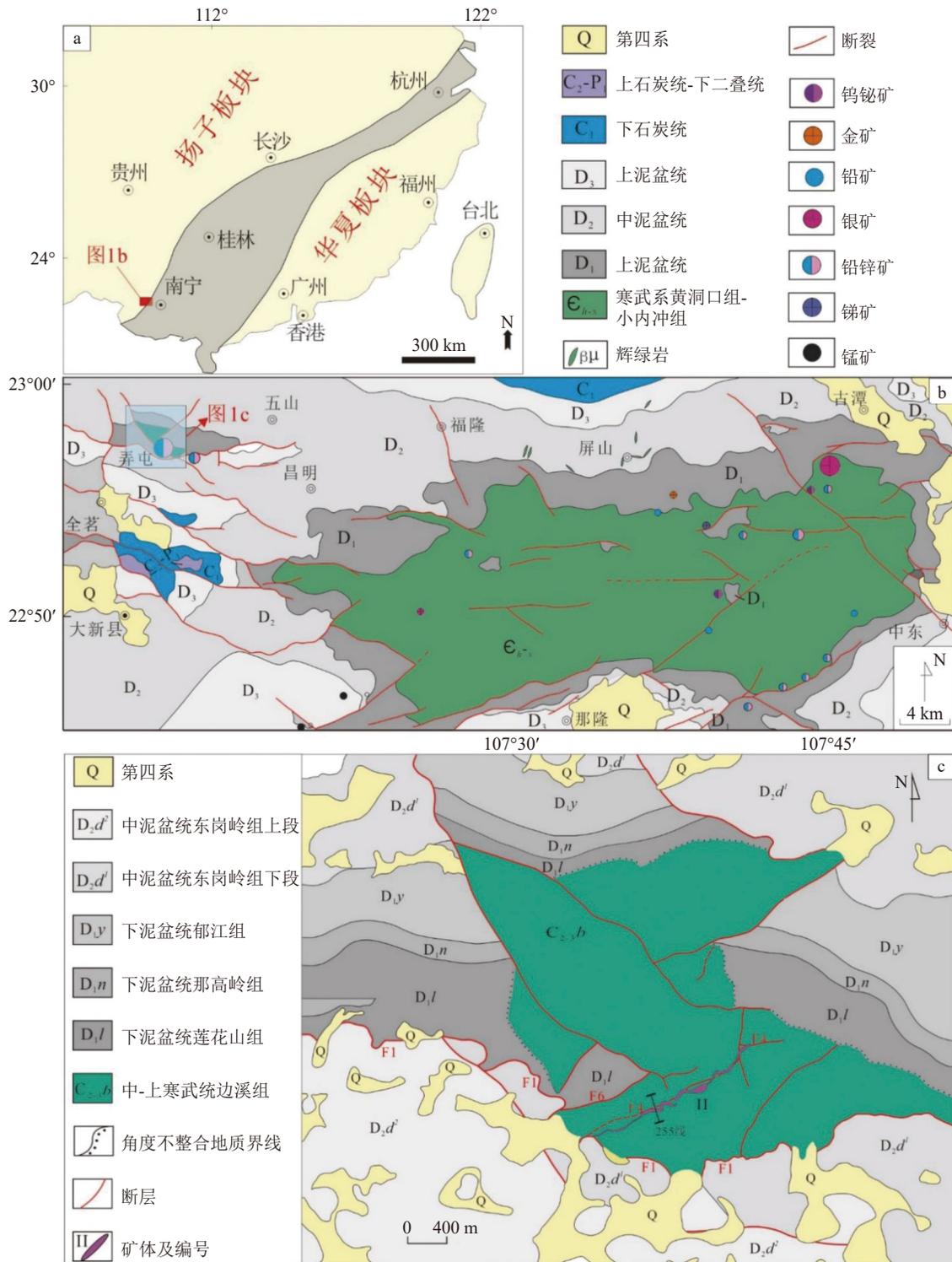


图1 (a) 西大明山地区大地构造位置图 (b) 西大明山区域地质图 (c) 弄屯铅锌矿区地质图^[3]
Fig.1 (a) Sketch map of plate tectonics of Xidamingshan; (b) Regional geologic map of the Xidamingshan; (c) Schematic geologic map of the Nongtun deposit

组成。

第四系(Q)主要由棕红色、红黄色粘土层组成。矿区分布的第四系残坡积层结构特征松散, 岩块易碎, 遇水粘性强, 主要由土黄色和浅灰色

粘土或亚粘土及部分碎屑岩碎块组成。

2.2 构造特征

弄屯矿区构造活动强烈, 褶皱、断裂构造十分发育。主要褶皱构造为古雾岭背斜, 轴向近

EW, 长约 10.5 km、宽 3~4 km, 核部位于古雾岭一带。断裂构造复杂, 共发现大大小小的断裂构造三十多条。按走向可分近 EW 向、NE 向、NW 向三组, 其中近 EW 向和 NE 向断裂为主要控矿构造。具体特征分述如下:

近 EW 向 F_1 断裂为矿区重要的导矿构造和容矿构造, 控制矿区 I 号矿化体的产出, 位于区域长屯-龙茗断裂带南东段, 在矿区南部蜿蜒穿过。 F_1 在区内呈 NEE、近 EW 至 NWW 向, 总体走向为近 EW 向, 倾向 S, 倾角相对平缓, 介于 5~25° 之间。破碎带宽 5~7 m, 主要由构造角砾岩和碎裂岩等组成, 破碎带中石英脉和方解石脉较为发育。断裂带上盘主要由中泥盆统东岗岭组白云质灰岩和白云岩组成, 下盘为上寒武统砂泥岩。

NE 向 F_4 和 F_6 分布于 F_1 断裂北侧, 并与之斜交。 F_4 和 F_6 断裂分别控制矿区 II、III 号矿(化)体的产出。其中, F_4 倾向 SE (150~163°), 倾角上缓下陡, 总体上在 15~70° 之间变化; F_6 近平行展布于 F_4 断裂北侧, 倾向 SE (140~150°), 倾角略陡, 变化于 46~52° 之间。破碎带内石英细脉和石英黄铁矿细脉较为发育, 主要由构造角砾岩、碎裂岩等组成, 带内岩石破碎强烈, 角砾大小不一, 棱角分明, 磨圆度较差, 排列杂乱。

3 矿床地质特征

3.1 矿体特征

矿区内主要发现四条铅锌矿化带, I、II、

III 号矿脉带都分布于矿区的南东部, IV 号矿脉分布于矿区的北东部。这些矿脉主要受到 NE 和 EW 向的两组主断裂的控制, 同时也受到近似平行排列分布的尾端多组级断裂的影响, 在矿体规模上也随着断裂带组合大小而变化。I 号矿脉带位于矿区南部东岗岭组与上寒武统边溪组 F_1 断层接触破碎带中; II 号矿脉带赋存于 F_4 断裂破碎带及其旁侧平行的多组断裂破碎带中; III 号矿脉带位于 II 号矿脉带北部, 与 II 号矿脉带大致平行, 相距 300~350 m, 赋存于 NE 向 F_6 断裂破碎带中; IV 号矿脉带赋存于上寒武统 NE 向 F_{12} 断裂破碎带中。四条矿脉带已揭露 74 个矿体, 包括 26 个铅锌矿体, 41 个锌矿体和 7 个铅矿体。其中, II-1 号矿体 (图 2) 规模最大, 受 NE 向断裂破碎带控制。地表可见氧化露头, 颜色呈灰黄、黄褐、灰白色, 多具空洞、蜂窝状构造, 一般宽为 10~30 m, 为硅化、褐铁矿化构造角砾岩、碎裂岩、碎裂砂泥岩。矿体呈脉状、似层状, 局部呈透镜状或薄脉状产出, 局部有分支复合或尖灭再现的现象。矿体总体倾向为 116~155°, 倾角总体较缓 (20~45°), 局部变陡为 (50~58°), 总体上呈现出南西部及中部的厚度相对较厚、品位相对较高, 而东西两端延伸则变薄变贫的规律。

3.2 矿石特征

弄屯铅锌矿床主要包括脉型和层状型两种矿石类型。其中, 脉状矿石结构构造较为复杂, 多呈脉状 (图 3a)、角砾状 (图 3b)、浸染状和团

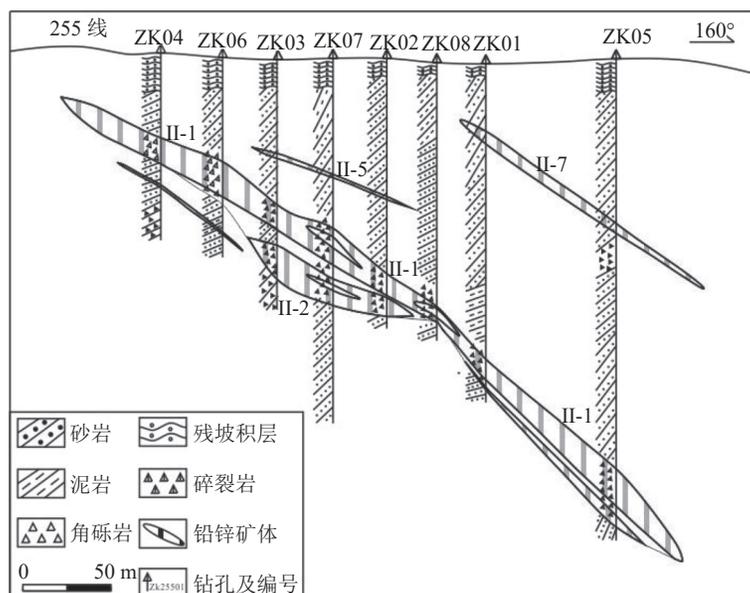
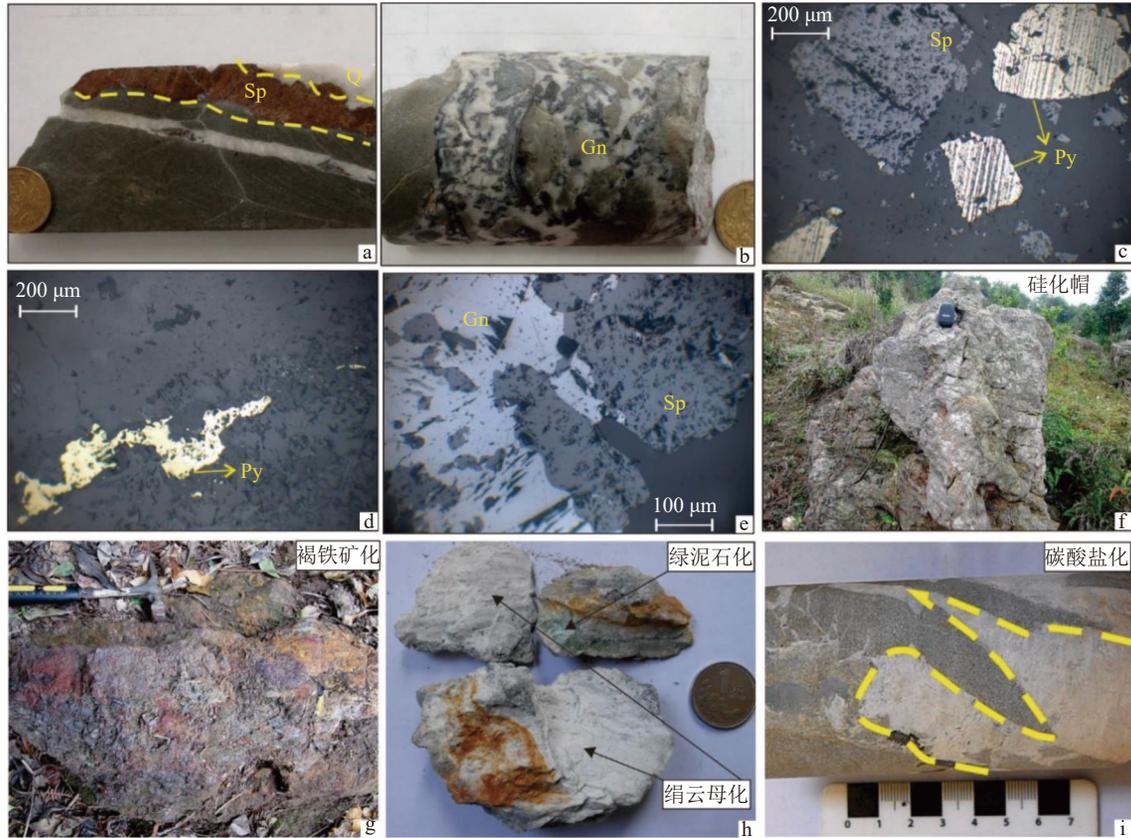


图 2 弄屯铅锌矿床 255 号勘探线剖面

Fig.2 Geological cross-section of the No. 255 exploration line from the Nongtun deposit

块状构造。矿石结构常常以包含结构和交代结构为主，其次为溶蚀结构和固溶体分离结构。层状

矿化体结构构造相对比较单一，主要为自形-半自形粒状和交代结构等，矿石构造以条带状构造为主。



(Sp—闪锌矿；Py—黄铁矿；Gn—方铅矿；Q—石英)

图3 弄屯铅锌矿床野外和室内显微照片

Fig.3 Field photographs and photomicrographs of the the Nongtun deposit

根据野外的观察及室内岩矿鉴定，矿石中金属矿物以闪锌矿为主，其次为黄铁矿，此外还有含有少量方铅矿和黄铜矿（图3a-e）。脉石矿物以石英、绢云母和方解石为主，少量白云石。断裂带内的砂岩、泥岩和角砾岩等岩石中见有闪锌矿、黄铁矿、方铅矿和石英等矿物分布其中。闪锌矿常呈浸染状或团块状、脉状、条带状等与黄铁矿、方铅矿共生，方铅矿常呈星点状、星散状与黄铁矿、闪锌矿共生，黄铁矿常呈斑点、斑团、团块状、脉状、条带状等与闪锌矿、方铅矿共生。偶见黄铜矿呈粒状、乳滴状与黄铁矿、闪锌矿共生。闪锌矿、黄铁矿、方铅矿与热液石英关系密切，常聚集和相互嵌布在一起。

3.3 围岩蚀变特征

弄屯铅锌矿的围岩发育硅化、褐铁矿化、绿泥石化、绢云母化以及碳酸盐化等蚀变，蚀变带宽为0.8~3.5 m，局部可达10 m以上，具体特征如下：

硅化：主要出现在地表蚀变露头 and 深部钻孔中，石英主要呈隐晶质分布于底板砂页岩之中。地表呈现出大范围的带状分布的灰白色“硅帽”（图3f），夹杂红褐色褐铁矿化蚀变（图3g），局部见有孔洞状和蜂窝状构造。

绿泥石化：在矿体中部和底板附近可见绿泥石化蚀变，其主要控制于矿体赋矿量的大小（图3h）。

绢云母化：寒武系岩石中绢云母化蚀变明显，其原因主要为长石被云母交代或绢云母熔蚀石英颗粒形成（图3h）。

黄铁矿化和碳酸盐化多出现于钻孔深部，黄铁矿呈浸染状、脉状或者条带状分布在砂、页岩中，与矿化关系极为密切，黄铁矿常与方铅矿、闪锌矿共生。野外调查发现，黄铁矿化与铅锌矿化关系密切，前者矿化愈强烈，在其附近或者深部地区易发育有较好的铅锌矿化。此外，钻孔深部主要发育碳酸盐化（图3i），分布于矿体内部

和周围的围岩偏向于形成方解石和石英的混合脉体或者黄铁矿脉，这些矿脉宽大致在 1~5 cm 之间，距离矿体较远的围岩一般形成厚层的方解石脉，宽度为 2~20 cm。

3.4 成矿阶段划分

依据野外的接触关系、各阶段矿物组合和脉体之间的穿插关系，将弄屯铅锌矿床的成矿过程从早到晚划分为以下 4 个阶段：石英-黄铁矿阶段，闪锌矿-黄铁矿阶段，多金属硫化物阶段，碳酸盐阶段，各阶段矿物共生组合见表 1。

表 1 弄屯铅锌矿床成矿阶段矿物共生组合
Table 1 Mineral paragenetic association in the metallogenic stage of Nongtun Pb-Zn deposit

矿物	石英-黄铁矿阶段	闪锌矿-黄铁矿阶段	多金属硫化物阶段	碳酸盐阶段
石英	—————			
方解石	—————			
白云石			—————	
绢云母			—————	
粒状黄铁矿	—————		—————	
脉状黄铁矿		—————	—————	
闪锌矿		—————	—————	
方铅矿			—————	
黄铜矿			—————	

①石英-黄铁矿阶段：该阶段矿物组合主要是由黄铁矿+石英+方解石组成，多呈脉状产出，其中黄铁矿多呈半自形-自形粒状集合体；

②闪锌矿-黄铁矿阶段：该阶段矿石矿物主要为闪锌矿和黄铁矿，脉石矿物为石英和方解石，矿石矿物与脉石矿物均呈条带状产出；

③多金属硫化物阶段：此阶段为主成矿阶段，该阶段形成大量的闪锌矿、黄铁矿、方铅矿和少量的黄铜矿，并伴有大量的石英、方解石和绢云母等，矿石多呈脉状、角砾状、团块状和浸染状，其中闪锌矿多与方铅矿密切共生，呈自形-半自形粒状，黄铜矿呈不规则粒状零星分布；

④碳酸盐阶段：主要矿物组合为方解石+石英，方解石脉或石英-方解石脉填充于矿脉晚期的构造裂隙中。

4 矿床成因

4.1 成矿流体

显微测温分析表明：石英-黄铁矿阶段流体包裹体均一温度为 276~342 ℃，对应盐度为 8.81%~15.07%；闪锌矿-黄铁矿阶段流体包裹体均一温度为 209~301 ℃，对应盐度为 5.26%~11.58%；多金属硫化物阶段流体包裹体均一温度为 140~212 ℃，对应盐度为 3.23%~9.98%；碳酸

盐阶段流体包裹体均一温度为 116~172 ℃，对应盐度为 0.88%~4.34%^[11]。由此可见，弄屯铅锌矿床属于低温低盐度的流体性质，流体包裹体均一温度和盐度从早成矿阶段至晚成矿阶段逐步降低，说明热液流体在上升的过程中不断的与围岩进行物质交换，从而使得成矿温度下降。此外，H、O 同位素特征显示成矿流体主要来源于深部岩浆，后期混入了天水。

4.2 成矿物质

弄屯铅锌矿床中 $\delta^{34}\text{S}$ 值较分散，集中分布在 -5‰~5‰之间，该范围与区域内涪井铅锌矿床的硫同位素组成较为一致^[12]，总体上显示幔源硫或岩浆硫的特性。前人研究认为，涪井铅锌矿床矿化剂硫主要为深部岩浆热液来源，这表明弄屯铅锌矿床的成矿物质可能与岩浆作用有关^[12-13]。值得提出的是：在弄屯矿床并无岩体出露，矿区周围仅有少量基性岩脉零星分布，但是来自系统的地球化学证据表明，矿床的成矿流体和成矿物质来源均与岩浆热液有关。在西大明山地区，这种现象并非仅出现在弄屯矿床，同样出现在凤凰山银矿床、涪井铅锌矿床，直至 2013 年底，广西地质四队在罗维矿区成功揭露深部隐伏岩体。就目前弄屯大型铅锌矿床成矿地质特征和矿床地球化学研究结果，本研究认为矿区或周围存在隐伏岩体。另外，矿床中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大，并且硫同位素组成明显分离出高、低值两个区间，即以黄铁矿为代表的重硫同位素组成显示成矿物质可能来源于沉积物，而以闪锌矿和方铅矿为代表的低 $\delta^{34}\text{S}$ 值同位素组成则指示了一部分成矿物质可能来源于深部岩浆，以上反映了弄屯铅锌矿床的硫源并不单一，具有复合性。

4.3 成矿时代

前人对区域内罗维隐伏花岗岩及其相关矿床开展了一系列的成岩成矿年代学研究，肖昌浩等^[7]测试了与成矿密切相关的隐伏二长花岗岩和黑云母花岗岩岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为 (92.92 ± 0.69) Ma 和 (92.5 ± 1.1) Ma，同时 Feng 等^[14]也获得隐伏花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 (99.84 ± 0.90) Ma 和 (98.03 ± 0.99) Ma，以上测试结果表明，西大明山地区与隐伏花岗岩及其浅层侵入体有关的岩浆活动时限为 100~92 Ma 之间。在成矿年代学方面，区域内罗维钨铋矿床的辉钨矿 Re-Os 年龄为 95 Ma 和云英岩蚀变带白云母 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄为 92 Ma，表明其成矿时代与该地区的隐伏花岗岩的侵位时间大致相同^[14]。此外，新获

得的弄屯矿床的闪锌矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 (95 ± 5) Ma (未发表数据), 说明了弄屯铅锌矿床的时代为燕山晚期成矿。通过成矿流体特征和矿质来源可以看出, 弄屯铅锌矿床的与隐伏岩体之间也存在密切的关系, 可能与罗维钨铋矿床同属于一个岩浆热液成矿系统。

4.4 矿床成因

前人在成矿条件分析、成矿流体测试、成矿构造解析等方面陆陆续续开展了一些工作。如陆建辉^[15]研究认为弄屯铅锌矿床属于中低温热液充填型, 导矿和容矿构造为长屯-龙茗区域性断裂, 成矿物质主要来源于上寒武统和下泥盆统, 深部热液可能提供部分成矿物质; 李赛赛等^[16]解析了弄屯铅锌矿床的控矿构造, 提出 NE 向和近 EW 向断裂构造是控制矿体发育的主要构造, 其成因可能与燕山晚期近 SN 挤压应用作用有关。

本文通过对弄屯铅锌矿床一系列研究分析, 对其成矿机制进行了总结, 概述如下:

弄屯铅锌矿床褶皱及断裂构造均十分发育, 但是矿区尚未发现有岩体出露, 仅在其东侧大新地区分布有少量辉绿岩脉。罗维隐伏花岗岩体与弄屯铅锌矿床距离较远 (直线距离约 55 km), 而可能存在的小明山隐伏岩体距离其较近 (直线距离约 25 km)。此外, 小明山隐伏岩体和罗维隐伏岩体可能属于同一岩浆房, 而小明山地区构造较为发育, 通常底侵作用沿构造薄弱部分进行, 因此岩浆也可能在此发生底侵作用, 同时岩浆的底劈作用也可以引起深部流体沿深大断裂运移。根据前人研究, 弄屯铅锌矿床南侧发育有近 EW 向的长屯-龙茗区域性深大断裂, 形成于加里东期, 而后受到多次运动叠加, 延伸方向靠近小明山地区, 并与矿区内 NEE 向 F_4 和 F_6 羽状断裂相连, 应该属于一套完整的导矿、配矿和容矿构造。弄屯铅锌矿床石英脉型矿化体主要赋存于 F_4 和 F_6 断裂中, 产状与断裂一致。矿床的硅化蚀变表现为多期, 深部发育的硅化蚀变可能属于早期热液流体交代形成。

弄屯热液脉型铅锌矿床成矿机制 (图 4): 形成铅锌矿床的成矿流体起源于岩浆流体, 但岩浆流体在盖层中经历了更大范围的迁移和扩散, 导致地层中的天水流体混入, 同时流体长距离运移途中萃取了寒武系小内冲组或边溪组中高背景含量的 Fe、Pb、Zn 等成矿元素, 与自岩浆流体的 S 结合, 形成 $[HS]^-$ 配位体络合物进行迁移。当富含铅锌的成矿流体在盖层中的断裂带 (主要是近

EW 向和 NE 向, 如弄屯矿区的 F_4 和 F_6 断裂) 汇聚并向浅部运移时, 由于与浅层天水流体的混合作用所产生降温减压作用, 导致了闪锌矿和方铅矿等金属硫化物与石英和方解石等矿物过饱和沉淀, 形成了充填于断裂中的脉状铅锌矿体。

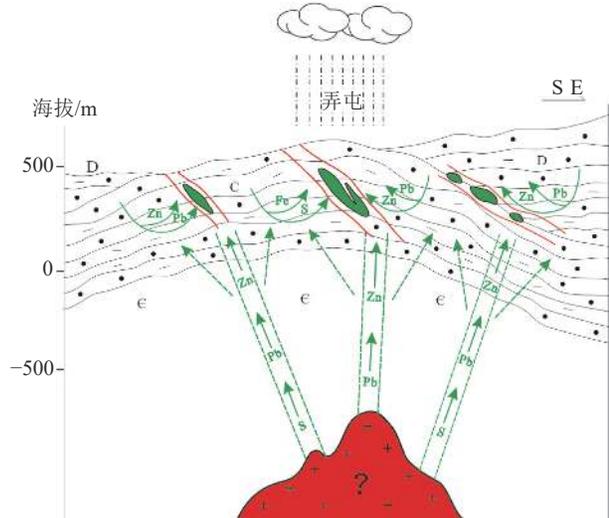


图 4 弄屯铅锌矿床成矿模式示意
Fig.4 Metallogenetic model of Nongtun Pb-Zn deposit

4.5 成矿背景

西大明山地区的晚燕山期隐伏花岗岩成岩成矿事件并非孤例, 它与区域上的很多矿床都同属一个发育时代, 如大明山钨矿床^[17], 大厂锡多金属矿床^[18], 龙头山金矿^[19] 和油麻坡钨矿床^[20] 等, 它们的成矿年龄都集中在 80~100 Ma 之间。据此可以推断, 区域上晚燕山期大规模花岗岩侵入及成矿作用爆发可能与当时华南特殊的构造背景有关。Lapierre 等^[21]通过对中国东南部中生代岩浆活动与地壳运动关系的研究认为, 在晚侏罗世-早白垩世期间, 中国东部岩浆活动与太平洋板块俯冲有关, 而晚白垩世开始逐渐转为陆内拉伸裂陷活动。Mao 等^[22]基于大量成岩、成矿年代学数据, 认为太平洋板块运动方向在 135 Ma 之后发生了调整, 由斜俯冲转变为近平行大陆边缘运动, 并导致中国大陆进入大规模岩石圈伸展时期, 诱发了 110~80 Ma 间华南地区发生了大规模多金属成矿事件。

5 找矿标志

根据本区矿床 (点) 的控矿条件及成矿规律, 结合弄屯矿床的成矿模式, 找矿标志有以下几个方面:

(1) 地层标志: 根据西大明山地区 1:5 万化

探成果统计, 寒武系中 Pb、Zn 含量分别为 63.7×10^{-6} 、 232.4×10^{-6} , 是地壳丰度值的 2 倍以上, 可为矿床提供物质来源。寒武系是本区的含矿层位, 铅锌矿床多产于寒武系与泥盆系的接触带附近, 对找矿有较好的指示作用。

(2) 构造标志: 区内铅锌主要受近 EW 向和 NE 向断裂控制, 这些断裂在成矿期主要表现为逆冲活动特征。近 EW 向断裂既是容矿构造, 也是导矿构造。寒武系与泥盆系的断层接触带是铅锌矿床的重要控矿断裂, 而且矿集区内一些中-大型的铅锌矿床多产于其中。

(3) 异常标志: Pb、Zn、Ag 等水系沉积物异常或土壤异常, 以及它们与物探异常等组合异常的叠加部位为主要找矿部位。

(4) 蚀变标志: 矿区内发育的黄铁矿化、硅化、方解石化、绿泥石化等围岩蚀变为重要的找矿标志, 其中硅化和黄铁矿化与成矿关系最为密切。因此, 在地表的铁帽是寻找铅锌的有利标志。

6 结 论

(1) 弄屯铅锌矿区赋矿地层为寒武系边溪组, 寒武系与泥盆系的断层接触带是铅锌矿床的重要控矿断裂, 围岩主要发育硅化、褐铁矿化、绿泥石化、绢云母化以及碳酸盐化等热液蚀变, 其中硅化和黄铁矿化是很好的找矿标志。

(2) 弄屯铅锌矿区主要有四个铅锌矿化带, 其中 II-1 号矿体规模最大, 主要受到 NE 向断裂控制, 呈脉状、似层状, 局部为透镜状或薄脉状产出, 矿石类型有脉型和层状型两种, 以闪锌矿为主, 次为黄铁矿, 以及少量方铅矿和微量的黄铜矿。

(3) 弄屯铅锌矿床为典型的岩浆热液型矿床, 成矿流体来自于深部岩浆, 后期混入大气降水, 成矿物质具有岩浆和地层混合来源特征, 成矿时代为燕山晚期, 可能与罗维钨铋矿床同属于一个岩浆热液成矿系统。

参考文献:

[1] 杨明桂, 王光辉. 华南陆区板块活动与构造体系的形成演化——纪念李四光先生诞辰 130 周年[J]. 地质学报, 2019, 93(3):528-544.
YANG M G, WANG G H. Formation and evolution of the plate activity and the structural system in the South China continental region[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3):528-544.

[2] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5):636-658.
MAO J W, CHEN M H, YUAN S D, et al. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5):636-658.

[3] 袁奎荣, 邹进福. 隐伏花岗岩预测及深部找矿的进展和展望[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1992, 12(3):227-234.
YUAN K R, ZOU J F. Extending progress in the prediction of hidden granites and the exploration of deep ore deposits and it's prospect[J]. Journal of Guilin College of Geology, 1992, 12(3):227-234.

[4] 黄启勋. 广西隐伏花岗岩及其找矿意义[J]. 物探与化探, 1994, 18(1):61-70.
HUANG Q X. Concealed granite bodies in Guangxi and their ore-prospecting significance[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1994, 18(1):61-70.

[5] 周永峰. 区域重力资料研究在广西深部地质和成矿预测中的应用[J]. 广西地质, 1993, 2:15-24.
ZHOU Y F. The application of regional gravity to the deep geology and mineralization prognosis in Guangxi[J]. Guangxi Geology, 1993, 2:15-24.

[6] 杨富强, 卢胜辉, 黎海龙, 等. 广西西大明山隐伏岩体空间形态研究. 矿产与地质, 2017, 31(6): 1133-1140.
YANG F Q, LU S H, LI H L, et al. On the spatial form of concealed rock mass in Xidamingshan area of Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(6): 1133-1140.

[7] 肖昌浩, 申玉科, 韦昌山, 等. 广西右江褶皱带东南缘西大明山矿集区燕山期酸性岩浆锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和 Ce(IV)/Ce(III) 特征[J]. 现代地质, 2018, 32(2):289-304.
XIAO C H, SHEN Y K, WEI C S, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Hf isotopic composition and Ce⁴⁺/Ce³⁺ characteristics of the Yanshanian acid magma in the Xidamingshan Cluster, Southeastern Margin of the Youjiang fold belt, Guangxi[J]. Geoscience, 2018, 32(2):289-304.

[8] 杨斌, 彭省临, 李水如, 等. 广西有色金属成矿系列与成矿区带[J]. 矿产与地质, 2007, 21(1):8-11.
YANG B, PENG S L, LI S R, et al. Metallogenic series and metallogenic belt of nonferrous metals in Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(1):8-11.

[9] 毕诗健, 杨振, 李巍, 等. 钦杭成矿带大瑶山地区晚白垩世斑岩型铜矿床: 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素制约[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(9):1458-1479.
BI S J, YANG Z, LI W, et al. Discovery of late cretaceous Baoshan porphyry copper deposit in Dayaoshan, Qinhang metallogenic belt: constraints from Zircon U-Pb age and Hf isotope[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(9):1458-1479.

[10] 李泽民, 冯佐海, 李赛赛, 等. 广西西大明山地区上姜辉长岩地球化学特征及其地质意义[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(1):26-35.

- LI Z M, FENG Z H, LI S S, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Shangjiang gabbro in Xidamingshan area, Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2020, 40(1):26-35.
- [11] 柴明春, 付伟, 冯佐海, 等. 广西西大明山弄屯铅锌矿床的成矿流体特征及矿床成因指示意义[J]. 矿床地质, 2015, 34(5):948-964.
- CHAI M C, FU W, FENG Z H, et al. Characteristics of ore-forming fluids of Nongtun Pb-Zn deposit in Xidaming Mountain of Guangxi and their implications for ore genesis[J]. Mineral Deposits, 2015, 34(5):948-964.
- [12] 涂伟. 广西罗维银铅锌矿床特征和成因[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- TU W. Characteristics and genesis of the Luowei silver-lead-zinc deposit in Guangxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [13] 雷英凭. 广西西大明山银多金属矿集区成矿预测[D]. 北京: 中国地质大学: 2012.
- LEI Y P. Mineral prediction of the Xidamingshan silver polymetallic ore district, Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [14] Feng Y Y, Fu W, Feng Z H, et al. Unraveling the nature and origin of deep hidden granite pluton underlying W-Zn-Pb-Ag ore concentrated region: a critical example from Xidamingshan area, South China[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 130:1-24.
- [15] 陆建辉. 广西大新县弄屯铅锌矿地质特征、成矿规律及找矿方向分析[J]. 矿产与地质, 2014, 28(4):487-491.
- LU J H. Geological characteristics, metallogenic regularities and prospecting direction of Nongtun Pb-Zn deposit in Daxin of Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2014, 28(4):487-491.
- [16] 李赛赛, 冯佐海, 单永磐, 等. 广西西大明山弄屯铅锌矿床断裂构造解析[J]. 矿床地质, 2017, 36(2):275-290.
- LI S S, FENG Z H, SHAN Y P, et al. Fracture structural analysis of Nongtun Pb-Zn deposit in Xidamingshan, Guangxi[J]. Mineral Deposits, 2017, 36(2):275-290.
- [17] 杨锋, 杨启军, 冯佐海, 等. 广西大明山钨多金属矿床地质特征及找矿预测[J]. 矿物学报, 2011(S1):893-894.
- YANG F, YANG Q J, FENG Z H, et al. Geological characteristics and prospecting prediction of Damingshan tungsten polymetallic deposit in Guangxi[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011(S1):893-894.
- [18] 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 等. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质论评, 2006, 52(3):409-414.
- CAI M H, HE L Q, LIU G Q, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the intrusive rocks in the Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi and Their Geological Significance[J]. Geological Review, 2006, 52(3):409-414.
- [19] 段瑞春, 凌文黎, 李青, 等. 华南燕山晚期构造-岩浆事件与成矿作用——来自广西大瑶山龙头山金矿床的地球化学约束[J]. 地质学报, 2011, 85(10):1644-1658.
- DUAN R C, LING W L, LI Q, et al. Correlations of the late Yanshanian tectonomagmatic Events with metallogenesis in South China: geochemical constraints from the Longtoushan gold ore deposit of the Dayaoshan area, Guangxi province[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(10):1644-1658.
- [20] 冯定素, 毛景文, 陈懋弘, 等. 广西油麻坡钨钼矿床成岩成矿年代学研究及其地质意义[J]. 矿床地质, 2016, 35(3):491-508.
- FENG D S, MAO J W, CHEN M H, et al. Geochronology of Youmapo W-Mo deposit in Guangxi and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2016, 35(3):491-508.
- [21] Lapiere H, Jahn B M, Charvet J, et al. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China[J]. Tectonophysics, 1997, 274(4):321-338.
- [22] Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. Mineralium Deposita, 2013, 48:267-294.

Discussion on Metallogenic Characteristics and Genesis of Nongtun Lead-Zinc Deposit in Xidamingshan Polymetallic Ore Concentration Area, Guangxi

FENG Yangyang¹, FU Wei², LI Gen³, WAN Hongyu⁴

(1.College of Resources and Environment, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, Guangxi, China; 2.College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China; 3.College of Petroleum and Chemical Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, Guangxi, China; 4.Chongqing Nanjiang Engineering Survey and Design Group Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: This is an article in the field of earth sciences. Xidamingshan polymetallic ore concentration area is critical mineral prospecting district in Guangxi. With the promotion of the large-scale mineral

(下转第 91 页)

extraction technology in salt lakes, and the establishment of an economic evaluation model for lithium extraction from geothermal water, the following achievements have been achieved: (1) The geothermal water lithium in Southern Xizang is mainly distributed on both sides of the Yarlung Zangbo River deep fault zone and its southern region, Lithium-rich granite wall rock leaching and magmatic hydrothermal solution, it provides rich lithium sources for the formation of lithium-rich geothermal water. (2) In accordance with the characteristics of low concentration and low magnesium/lithium ratio in geothermal water lithium, the extraction method and precipitation method are selected to extract and utilize lithium in geothermal water. (3) Take geothermal well in the Gudui geothermal field as an example, with a lithium concentration of 23.5 mg/L in geothermal water, and the extraction process is used to extract lithium, establishing an economic evaluation model, using cash flow method to evaluate the economy, and the economic evaluation results showed that when the price of lithium carbonate is not less than 250000 yuan/t, the extraction of lithium from geothermal water has good economic benefits.

Keywords: Earth sciences; High temperature geothermal water; Lithium resources; Extraction technology; Economic evaluation

////////////////////////////////////
(上接第 49 页)

breakthrough work, the Xidamingshan mineral exploration, the Nongtun large-scale Pb-Zn deposit has been newly discovered. However, the understanding of the metallogenic characteristics of the deposit, especially the genesis of the deposit, is still at the superficial stage. Based on detailed field geological investigations and previous work, this paper systematically summarizes the regional metallogenic geological background, mining area and geological characteristics, and analyzes the genesis of the Nongtun lead-zinc deposit to find out the metallogenic mechanism. The study shows the Nongtun Pb-Zn deposit is related-magmatic hydrothermal deposit, the ore-forming fluids originated from magmatic, and later mixed with meteoric water. The fluids extracted Pb and Zn ore-forming elements from the strata during long-distance transport, and combined with S of magmatic fluids to synthesize [HS]⁻ ligand that converged in the fracture zone and transported to the shallow part, thus forming Pb-Zn ore vein. The above research results have established the metallogenic model of the Nongtun Pb-Zn deposit, which provides a good guidance for prospecting prediction and exploration.

Keywords: Earth Sciences; Geological characteristics; Deposit genesis; Metallogenic model; Nongtun lead-zinc deposit; Xidamingshan area