



湘南黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段 构造地球化学特征及找矿预测

雷 镇¹, 陶思源^{1,2}, 李 波¹, 王新富¹, 向佐朋¹, 楚翔凯^{1,3}, 刘凤平⁴,
邓安平⁴, 宗志宏⁴, 钱勇敢⁴

- (1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;
2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
4. 湖南有色黄沙坪矿业分公司, 郴州 424421)

摘 要: 黄沙坪铜多金属矿床位于湘南坪宝矿集区的南部, 其深部的脉状、不规则状矽卡岩型铜多金属矿体明显受岩浆侵入接触构造的控制。随着矿山的持续开发, 黄沙坪铜多金属矿床深部的保有资源日趋减少, 亟待查明进一步找矿方向。为此, 本文对黄沙坪铜多金属矿床深部的-256 m中段进行构造地球化学填图, 通过聚类分析、因子分析讨论了地球化学元素的组合特征, 绘制了构造地球化学因子异常图, 判断了成矿流体运移方向, 并进行找矿预测。研究表明: 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段的矿体呈脉带状、不规则状分布, 其产出位置及形态严格受岩浆侵入接触构造及断裂的控制。19#石门可划分为弱方解石化灰岩带(I)、大理岩带(II)、方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)、透辉石石榴石矽卡岩化带(V)、花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)。Pb、Zn、Ag、Au、W、Mo、Sn等成矿元素均在透辉石石榴石矽卡岩化带(V)、花岗斑岩带(VI)中富集, 微量元素在透辉石石榴石矽卡岩化带(V)中含量较高, 指示矽卡岩化为区内重要的找矿标志。黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造岩样品的微量元素大致可分为高温成矿元素组合、中-低温成矿元素组合、岩体微量元素组合、围岩微量元素组合; 其中高温成矿元素组合进一步细分为与Au有关的高温成矿元素组合、与Mo有关的高温成矿元素组合。构造地球化学异常的空间展布特征进一步佐证, 黄沙坪铜多金属矿床存在Au-Cu-Pb-Zn、W-Sn-Mo-Bi两套成矿系统, -256 m中段中部以石英斑岩体为中心, 成矿流体向南南东、北西、南东方向运移; 而南部以花岗斑岩体为中心, 成矿流体向北东、南西、北西三个方向运移。依据构造地球化学异常, 本文圈定了2处重点找矿靶区。

关键词: 找矿预测; 构造地球化学; -256m中段; 黄沙坪铜多金属矿床; 湘南

文章编号: 1004-0609(2022)-09-2835-21

中图分类号: P612; P595

文献标志码: A

引文格式: 雷 镇, 陶思源, 李 波, 等. 湘南黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造地球化学特征及找矿预测[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(9): 2835-2855. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42673

LEI Zhen, TAO Si-yuan, LI Bo, et al. Tectono-geochemistry characteristics and prospecting prediction of -256 m level tunnel of Huangshaping copper polymetallic deposit in Southern Hunan[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(9): 2835-2855. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42673

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0603903); 国家自然科学基金资助项目(41862007); 云南省万人计划青年拔尖人才资助项目(YNWR-QNBJ-2018-093); 昆明理工大学重点学科建设资助项目(14078384)

收稿日期: 2021-11-16; **修订日期:** 2021-12-17

通信作者: 李 波, 教授, 博士; 电话: 15987187981; E-mail: libo8105@qq.com

黄沙坪铜多金属矿床地处南岭成矿带和钦杭成矿带的交汇部位,发育有石英斑岩和隐伏花岗斑岩,属典型的岩浆热液成矿系统^[1],其中,石英斑岩与Au-Cu-Pb-Zn矿体有关,而隐伏花岗斑岩与W-Sn-Mo-Bi多金属矿体有关^[2-3]。前人对黄沙坪铜多金属矿床的地质特征^[1,4-5]、成岩作用年代学^[6-8]、矿床成因^[9]及找矿预测等^[4-5,10]开展了大量研究;在最近的钻探工作中,发现了在空间上与深部铜矿体相关的一种新类型花岗岩,即黑云母正长花岗岩,不仅参与了铜成矿作用,而且诱导了后期W-Sn多金属矿床的形成^[11]。矿区内石英斑岩侵位深度较浅,具有相对较高的氧逸度和较低的形成温度,这是石英斑岩成铜矿的重要原因^[3]。随着矿山的持续开发,其深部保有资源日趋减少。

构造地球化学是一门介于构造地质学和地球化学之间的边缘学科,它研究元素在各种构造活动过程中的活化、迁移、富集或贫化规律,并指导找矿勘探和隐伏矿的定位预测^[12-13]。构造地球化学找矿就是运用构造地球化学的思路和方法,结合其他找矿方法进行找矿研究的一种方法^[14],与传统化探方法相比,其具有采样对象较为简单、采样量少、找矿信息显著等特点^[15-17]。随着国家对危机矿山接替资源找矿和深部探矿的重视,构造地球化学找矿技术得到了迅猛发展。近几十年来,研究者将构造地球化学应用到金矿找矿预测研究^[18-20]、外围找矿^[17,21]、隐伏矿定位预测^[22-24]等领域,取得了良好的效果,显示了其广阔的应用空间^[25]。

黄沙坪铜多金属矿床形成及空间形态特征明显受岩浆侵入接触构造控制,断裂构造中蕴藏着丰富的成矿信息。为确定黄沙坪铜多金属矿床的深部找矿方向,本文应用构造地球化学方法,选择该矿床中明显受岩浆侵入接触构造控制的-256m中段,进行了构造地球化学填图,重点分析该中段的构造地球化学异常特征,并进行深部找矿预测,为构造地球化学勘查技术在该类矿床中深部找盲矿提供借鉴。

1 区域地质与矿床地质

湘南地区处于扬子地块与华夏地块拼合带上(见图1(a)),其大地构造位于华南加里东-印支褶皱带中的湘桂粤褶皱带;经历了加里东、印支、燕山

等运动的强烈岩浆活动,形成了众多铜多金属矿产^[26]。区内地层除志留系外,从元古界冷家溪群至新生界第四系均有出露,主要由泥盆系至三叠系组成,岩性以碳酸盐岩为主,夹碎屑岩(见图1(b));区内构造在平面上为一系列南北向-北北东向-北东向的紧密线状褶皱和逆冲断裂,以及向北撒开、向南收敛、北宽南窄、向北西微凸的弧形褶皱带^[27-28]。区内岩浆岩主要为石英斑岩和花岗斑岩,少数花岗闪长斑岩;岩体成群成带展布,岩体的排列组合、产出形态、展布方向及岩性差异均受不同级别构造的控制和影响^[29]。

黄沙坪铜多金属矿床出露地层以上泥盆统和下石炭统为主,包括泥盆系余田桥组(D_3s)、锡矿山组(D_3x)、石炭系陡岭坳组(C_1d)、石磴子组(C_1sh)、测水组(C_1c)和梓门桥组(C_1z),为一套晚古生代浅海相沉积岩,铅锌矿体主要赋存于石磴子组(C_1sh)灰岩和测水组(C_1c)砂页岩中,梓门桥组(C_1z)白云岩中也有些小矿体或矿化,钨、锡、钼矿体则赋存于矽卡岩中^[30-32]。

黄沙坪铜多金属矿床发育一系列复式褶皱和斜冲断层,以宝岭-观音打座复式倒转背斜和近SN向的 F_1 、 F_2 、 F_3 走向斜冲断裂为主,并配以东西-北西西向 F_0 、 F_6 、 F_9 断裂,构成了黄沙坪铜多金属矿床“井字型”构造格架(见图2(a)),它控制着黄沙坪铜多金属矿床的岩体产出形态、类型及空间分布^[2,6]。

区内岩浆岩主要为燕山早期的石英斑岩和花岗斑岩,石英斑岩岩枝群出露地表,分布于宝岭-观音打座一带;花岗斑岩隐伏于矿床南部100 m标高以下,且延深较深,在岩体的内、外接触带上常见铅、锌、铜、钨、钼等多金属矿化体,为深部找矿的有利地段。矽卡岩型W-Sn-Mo-Bi矿体的成矿年龄(159.4~153.8 Ma)^[26,33-34]与石英斑岩^[35-36]、花岗斑岩^[37](165~162 Ma)的成岩年龄较为接近,表明两者具有密切的成因联系^[38]。

W216矿体环绕在301#花岗斑岩及其矽卡岩接触带中,产状与矽卡岩基本一致,呈大透镜体状、细脉状产出(见图2(b)),矿体规模、倾斜延深较大,其钨钼铋锡资源量约占该矿床资源总量的88.53%。矿体主要赋存在100~-500 m标高间,最深在-760 m标高见矿,矿体平均品位:WO₃ 0.252%、Mo 0.055%、Bi 0.071%、Sn 0.182%、TFe 19.60%。从

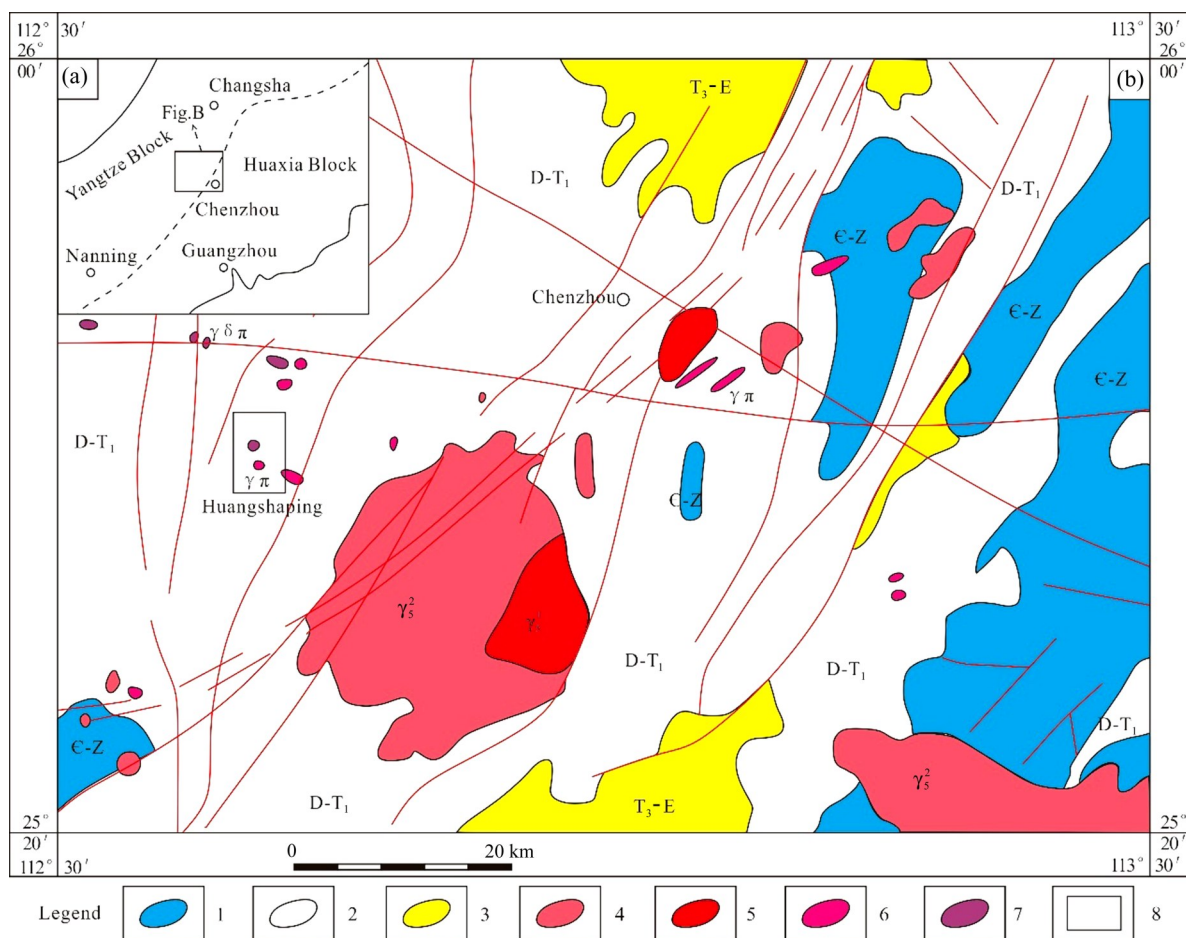


图1 黄沙坪铜多金属矿床区域构造简图^[29]:(a) 华南构造简图;(b) 黄沙坪铜多金属矿床构造位置略图;1—寒武系-震旦系;2—泥盆系-三叠系下统;3—三叠系上统-第三系;4—燕山早期花岗岩;5—印支期花岗岩;6—花岗斑岩;7—花岗闪长斑岩;8—研究区

Fig. 1 Simplified structures map of Huangshaping copper polymetallic deposit: (a) Structural sketch of south China; (b) A sketch of tectonic position of Huangshaping copper polymetallic deposit; 1—Cambrian-Sinian system; 2—Devonian-lower Triassic system; 3—Upper Triassic-Tertiary; 4—Early Yanshanian period granite; 5—Indosinian granite; 6—Granite porphyry; 7—Granite diorite porphyry; 8—Study area

走向上看, 矿体中部109~113线中有益组分 WO_3 、Mo含量较高; 111线厚度较大, 向两侧逐渐降低; 往北到129线钨钼含量低于边界品位了, 厚度也变小; 往南到101线钨钼多金属矿体尖灭。垂向上, 该含矿矽卡岩体往地表或往深部都存在逐渐变薄的趋势, 在剖面上呈“海螺”形展布。580[#]矿脉分布于17~20勘探线间, 位于304[#]石英斑岩与灰岩接触带的矽卡岩或硅化灰岩中, 由3个铅锌(铜)矿体和5个铜矿体组成, 走向近南北, 总体倾向东, 走向长度大于900 m, 从矿区中部标高-56 m至深部-890 m。矿体常呈脉状、新月状、透镜状、扁豆状, 平均厚度4.64 m, Cu平均品位0.84%; 矿体往深部延伸, 品位逐渐降低^[29]。黄沙坪铜多金属矿床围岩蚀

变主要有矽卡岩化、方解石化、硅化、萤石化、绿泥石化、黄铁矿化等, 其中, 矽卡岩化与成矿关系最为密切^[1, 39-40]。

2 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段地质特征

2.1 控矿构造

黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段仅出露下石炭统石磴子组(C_1sh)灰岩, 岩浆岩主要为花岗斑岩(301[#])和石英斑岩(304[#]); 301[#]岩体主要分布在12[#]勘探线以南, 呈岩枝、岩脉产出; 304[#]岩体分布于20[#]勘探线以北, F_1 、 F_3 断裂切穿该岩体(见图3);

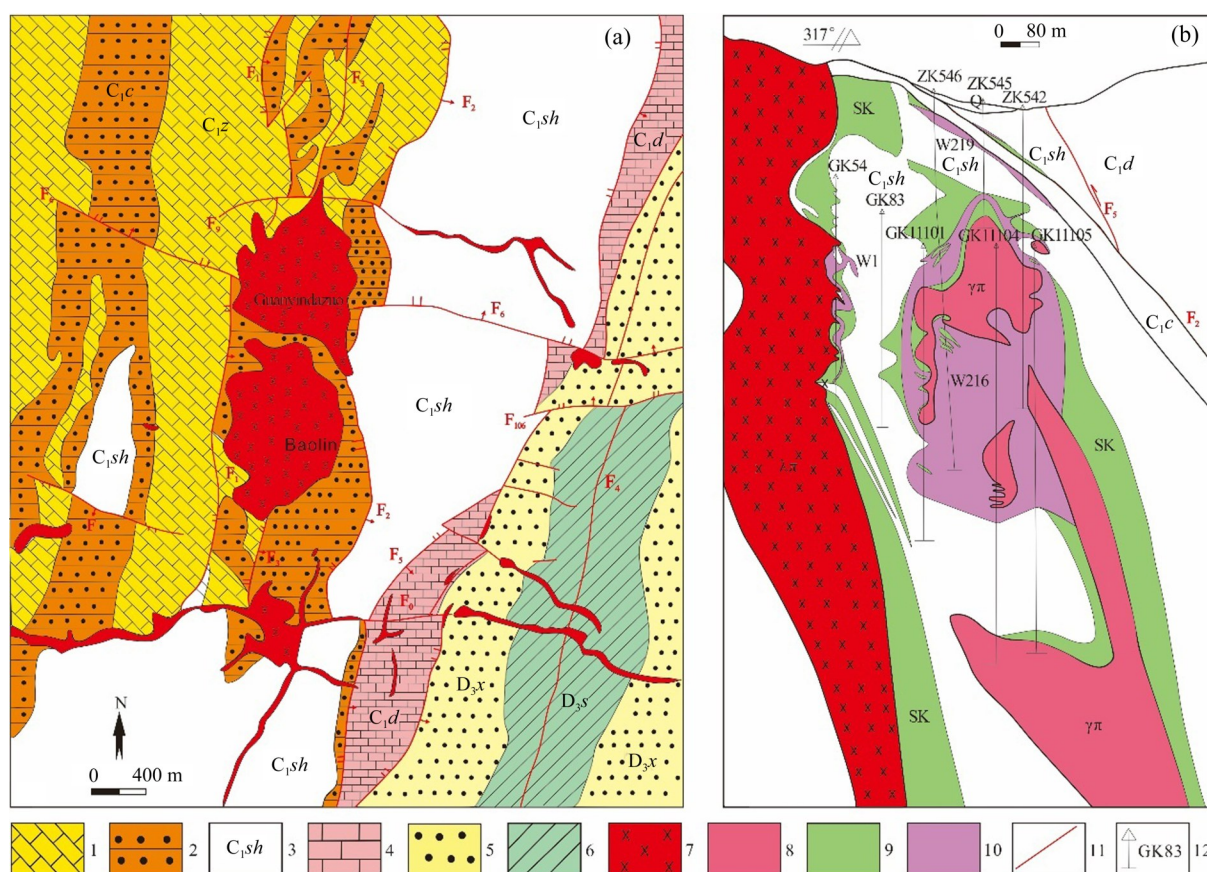


图2 黄沙坪铜多金属矿床地质简图(a)^[36]和黄沙坪铜多金属矿床111#勘探线剖面图(b)^[29]: 1—石炭系梓门桥组; 2—石炭系测水组; 3—石炭系石磴子组; 4—石炭系陡岭坳组; 5—泥盆系锡矿山组; 6—泥盆系余田桥组; 7—石英斑岩; 8—花岗斑岩; 9—矽卡岩; 10—钨矿体; 11—断层; 12—钻孔及编号

Fig. 2 Geological map of Huangshaping copper polymetallic deposit (a) and sketch map of 111# exploration line in Huangshaping copper polymetallic deposit (b): 1—Carboniferous Zimenqiao formation; 2—Carboniferous Ceshui formation; 3—Carboniferous Shidengzi formation; 4—Carboniferous Doulingao formation; 5—Devonian Xikuangshan formation; 6—Devonian Shetianqiao formation; 7—Quartz porphyry; 8—Granite porphyry; 9—Skarn; 10—Tungsten ore body; 11—Fault; 12—Drilling and number

301[#]、304[#]岩体与成矿关系密切, 301[#]岩体为黄沙坪铜多金属矿床最重要的成矿母岩之一^[29, 41]。岩浆侵入接触构造是-256 m中段最为发育的构造, 大致沿岩体与围岩的界线处分布(见图3), 呈不规则飘带状、港湾状、不规则锯齿状产出。该中段的断裂对成岩成矿有重要控制作用, 其中围岩的层间断裂、裂隙直接控制了热液脉型铅锌银矿体^[2, 42-43], 坑道内断裂主要为北东向和北西向。典型岩浆侵入接触构造和断裂描述如下(见图4)。

HL200: 为发育于灰岩内的多条断裂, f_1 裂面紧闭, 呈舒缓波状、平直状, 该断层为层间压扭性断裂; f_2 为左行扭压性断层; f_3 裂面紧闭, 呈平直状, 指示该断层为层间压扭性断裂。该处可见方解

石呈脉状、网脉状、团斑状发育, 方解石脉内可见黄铁矿、灰岩角砾, 角砾棱角明显(见图4(a))。

HL210: 围岩为灰色弱方解石化灰岩, 方解石呈脉状、团块状, 顺层方解石脉形成较早, 切层方解石脉为成矿期, 含黄铁矿化。切层断裂 f 为成矿期断裂, 裂面总体为平直状, 局部缓波状, 断裂裂宽0~0.05 cm, 断裂内为灰黑色泥质, 发育近水平擦痕和阶步, 显示断裂为右行扭性(见图4(b))。

HL124: 为典型的接触带构造, 花岗斑岩从围岩下部向上侵入, 岩枝与围岩的界线呈港湾状, 在界线附近可见少量石榴石、透辉石等矽卡岩矿物。花岗斑岩呈浅肉红色, 斑晶主要为黑云母和钾长石, 局部包裹围岩角砾。围岩为灰黑色块状灰岩,

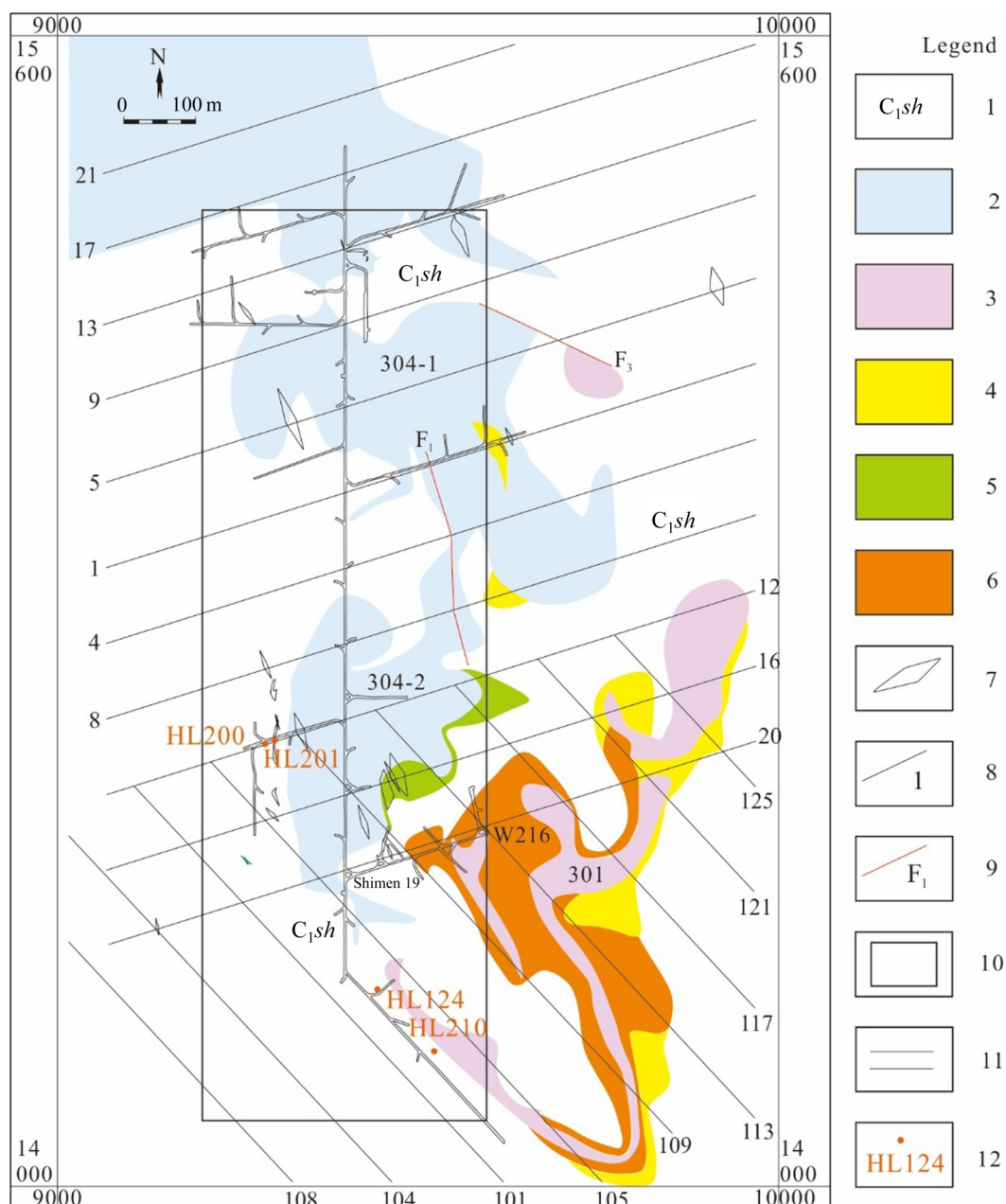


图3 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段地质图:1—石炭系石磴子组;2—石英斑岩;3—花岗斑岩;4—矽卡岩;5—黄铁矿化矽卡岩;6—钨钼矿体;7—铅锌矿体;8—勘探线及编号;9—断裂及编号;10—化探范围;11—坑道;12—地质点及编号

Fig. 3 Geological map of -256 m level tunnel in Huangshaping copper polymetallic deposit: 1—Carboniferous Shidengzi formation; 2—Quartz porphyry; 3—Granite porphyry; 4—Skarn; 5—Pyritization skarn; 6—Tungsten molybdenum ore body; 7—Lead zinc ore body; 8—Exploration line and number; 9—Fracture and number; 10—Geochemical exploration range; 11—Tunnel; 12—Geological point and number

强方解石化, 方解石呈团块状、脉状(见图4(c))。

HL201: 花岗斑岩自东向西侵入至灰岩中, 岩浆岩与围岩发生强烈交代作用, 形成岩体-矽卡岩-大理岩-灰岩的分带现象, 界线清晰明显。灰岩具自形粒状结构, 自形程度较高, 发育强方解

石化蚀变：矽卡岩中的主要矿物为透辉石和石榴子石，发育星点状磁铁矿、黄铁矿；花岗斑岩具斑状结构，斑晶主要为石英，发育黏土化、绿泥石化；大理岩重结晶程度较高，方解石化发育(见图4(d))。

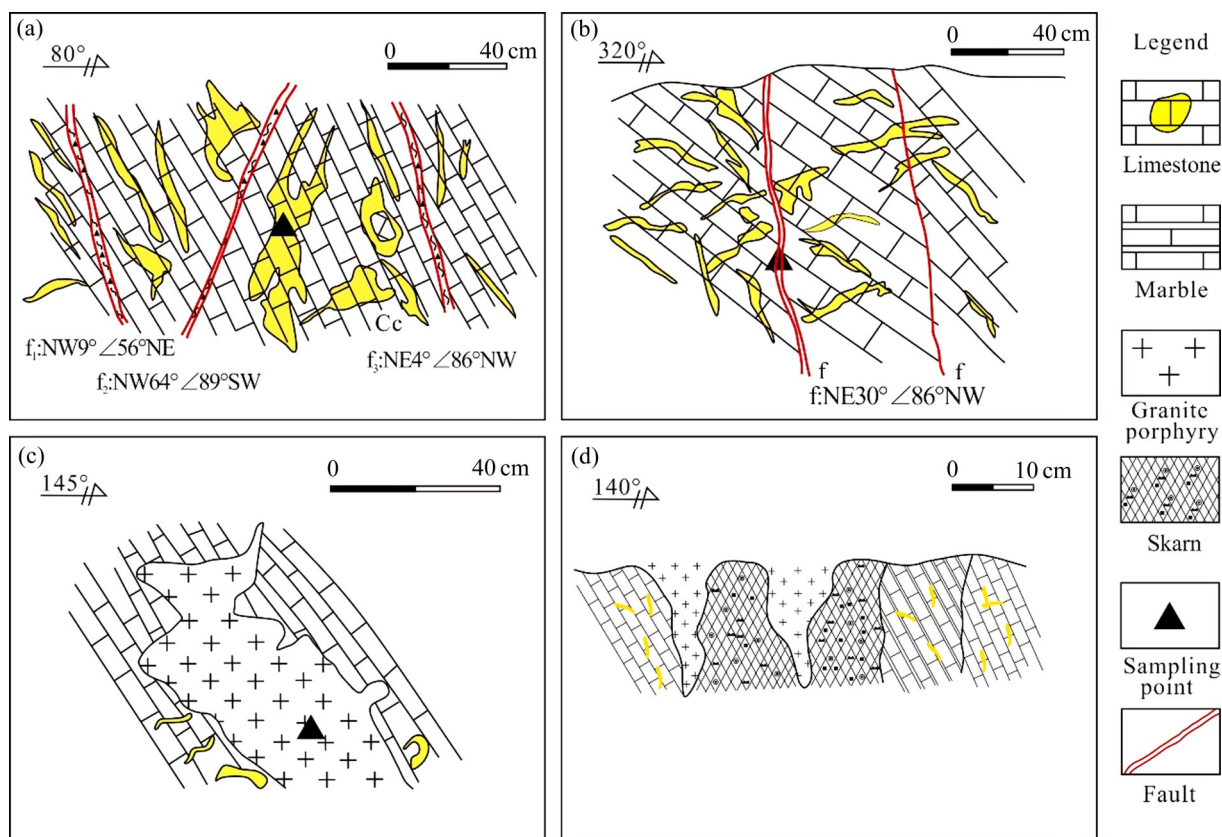


图4 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段岩浆侵入接触构造和断裂素描图:(a) HL200地质点素描;(b) HL210地质点素描;(c) HL124地质点素描;(d) HL201地质点素描

Fig. 4 Magmatic intrusive contact structure and fault sketch map of -256 m level tunnel of Huangshaping copper polymetallic deposit: (a) HL200 geological point sketch; (b) HL210 geological point sketch; (c) HL124 geological point sketch; (d) HL201 geological point sketch

2.2 矿体特征

黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段揭露的矿体主要为钨钼矿体(W216), 分布于南东部103[#]~125[#]勘探线间, 环绕在301[#]隐伏花岗斑岩接触带和含铁钨钼矿化矽卡岩中(见图3); 其产状、形态与矽卡岩基本一致, 总体倾向南东; 矿体呈飘带状、不规则状, 常见尖灭侧现、分支复合、膨大缩小现象, 彼此相互连接; 矿化体走向长800~1000 m, 宽60~400 m, 倾斜延伸大于1000 m; 单工程见矿厚度12~336.05 m, 厚度变化较大, 变化系数达162.16%; 往上逐渐变贫, -237 m中段单工程平均品位已低于工业品位^[29]。

2.3 矿石特征

黄沙坪铜多金属矿床矿物成分复杂(见图5), 矿石矿物以方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿为

主, 斑铜矿、磁黄铁矿较少; 脉石矿物主要为透辉石、钙铝榴石、阳起石、绿帘石等矽卡岩矿物以及方解石、石英等。矿石结构有自形-半自形晶粒状结构、他形晶粒状结构、包含结构、溶蚀结构、交代结构、交代残余结构、乳滴状结构、脉状结构、骸晶结构、固溶体分离结构等, 矿石构造有块状构造、团块状构造、浸染状构造、角砾状构造、细脉状或网脉状构造等(见图5)。

3 剖面地球化学

3.1 矿化蚀变分带

本文选择黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段19[#]石门进行“构造-蚀变-岩性”坑道编录(见图6), 自西向东, 可依次划分为弱方解石化灰岩带(I)、大理岩带(II)、方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)、

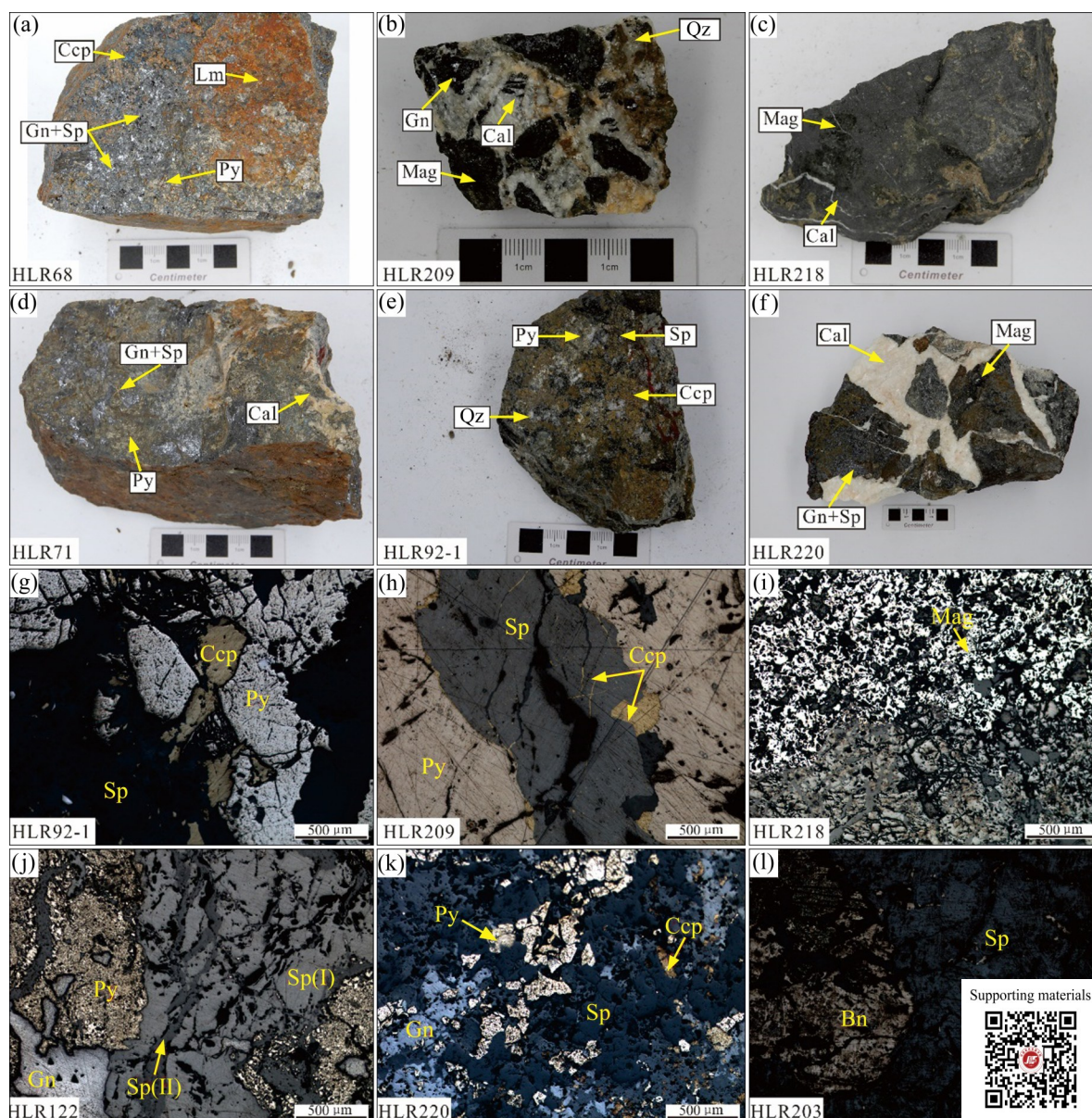


图5 黄沙坪铜多金属矿床典型手标本及显微照片:(a) 灰褐色块状铅锌矿石,矿石矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、褐铁矿;(b) 杂色致密块状铅锌铜铁矿石,矿石矿物为方铅矿、磁铁矿,同时可见浅白色不规则小团块状方解石、石英;(c) 灰黑色块状磁铁矿矿石,多条方解石细脉穿切矿石;Gn—方铅矿;Sp—闪锌矿;Ccp—黄铜矿;Py—黄铁矿;Lm—褐铁矿;Mag—磁铁矿;Cal—方解石;Qz—石英;Bn—斑铜矿

Fig. 5 Typical hand specimens and microscopic photos of Huangshaping copper polymetallic deposit: (a) Gray brown block lead-zinc ore, ore minerals are galena, sphalerite, chalcopyrite, pyrite and limonite; (b) Discolored dense block-shaped lead-zinc-copper-iron ore, ore minerals are galena and magnetite, and visible light white irregular small blocks of calcite and quartz; (c) Grey black massive magnetite ore, multiple calcite veins cut ore; Gn—Galena; Sp—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Lm—Limonite; Mag—Magnetite; Cal—Calcite; Qz—Quartz; Bn—Bornite

透辉石石榴石矽卡岩化带(V)、花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII),各构造-蚀变-岩性带特征如下。

弱方解石化灰岩带(I):带内发育弱方解石化,方解石呈网脉状。构造活动明显,发育多条断裂,其中HL88地质点为弱方解石化灰岩中的复合断裂, f_1 断裂带内充填方解石细脉,方解石脉上发育擦痕,被晚期 f_4 断裂错断,显示该断裂经历两期活

动。5 m处可见黄铁矿矿体,黄铁矿呈稠密浸染状产出。

大理岩带(II):带内发育方解石化,42 m处发育一压扭性正断层,裂面平直,带宽约1 m,带内充填黄褐色断层泥和构造角砾。断层两侧发育黄铁矿矿体,矿体被断层错断,矿体的矿石矿物主要为黄铁矿和黄铜矿,呈稠密浸染状产出。

方解石化灰岩带(III):带内为方解石化灰岩,方解石呈脉状、细脉状、团块状产出。

大理岩带(IV):大理岩呈粗粒状,发育方解石化和星点状黄铁矿化,方解石呈脉状、细脉状产出。

透辉石石榴石矽卡岩化带(V):带内发育灰绿色矽卡岩,肉眼可见粗粒状透辉石和石榴子石,并具磁铁矿化,磁铁矿呈星点状、稀疏浸染状产出。90 m处发育有压扭性断裂,裂面平直紧闭。

花岗斑岩带(VI):带内为灰白色花岗斑岩,斑晶主要为黑云母、钾长石。

透辉石矽卡岩带(VII):带内为灰绿色矽卡岩,肉眼可见粗粒状透辉石,157 m处发育一断裂,断裂带内可见黄褐色断层泥,裂面平直紧闭,显示为压扭性质。

磁铁矿矿体带(VIII):磁铁矿呈黑褐色块状、稠密浸染状产出,矿体表面被氧化淋滤而呈红褐色。

透辉石矽卡岩带(IX):带内为灰绿色透辉石矽卡岩,发育方解石和石英,石英和方解石均呈脉状、细脉状产出,且可见方解石脉被石英脉切穿,显示方解石的形成早于石英。

花岗斑岩带(X):花岗斑岩斑晶主要为黑云母和石英,带内多处发育断裂,其中173 m、187 m处各发育一组产状近平行的断裂,断裂带内充填黄褐色断层泥及构造角砾岩,两处断裂面均紧闭、平直,显示为压扭性质。

弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI):带内为弱矽卡岩化花岗斑岩,肉眼可见透辉石、石榴子石呈浸染状分布,花岗斑岩的斑晶主要为黑云母和石英。在189 m处发育一压扭性断裂,裂面紧闭平直,带内充填黄色断层泥。

矽卡岩带(XII):带内为灰绿色矽卡岩,矽卡岩

矿物主要为透辉石,局部可见黄铁矿化,黄铁矿呈星点状、稀疏浸染状产出。

本文系统采集了黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段19#石门的构造地球化学样品,按点距20~30 m采集样品,每件样品质量为200~300 g,构造较为发育的地段可加密取样,构造不发育地段采集矿化蚀变样品;共采集构造地球化学样品30件,样品经过加工缩分处理,加工至74 μm ,由北京科荟测试技术有限公司采用ICP-MS法进行微量元素测试。按照样品总数的3%送密码样,检测数据的准确性,主要指示元素的平均误差小于5%,分析方法、仪器均达到精度要求,微量元素数据测试结果见表1。

3.2 剖面中的元素分布规律

本文基于微量元素绘制了黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段19#石门构造地球化学剖面图(见图6),可以看出:

1) W、Mo、Sn、Ti在弱方解石化灰岩带(I)、大理岩带(II)、方解石化灰岩带(III)中轻微波动;在透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)与花岗斑岩带(VI)接触部位的元素含量较高,波动明显,其中W和Sn的含量在此处达到极大值;在花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)中波动不明显,元素含量较低。

2) Rb、Sr、Cd、Bi、Sb整体上变化不明显,在方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)、透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)中轻微波动;Cu在弱方解石化灰岩带(I)中含量较高,达到极大值。

3) V、Cr、Zr、Cs、Ba、 ΣREE 在弱方解石化灰岩带(I)、大理岩带(II)、方解石化灰岩带(III)、透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)中振动幅度较大, ΣREE 在大理岩带(II)中含量达到极大值;在大理岩带(IV)、花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)中含量较稳定,波动幅度较小。

4) Th、Ag、Au整体变化含量较大,Ag在弱方解石化灰岩带(I)西段含量较高,达到极大值;Th

表 1 黄沙坪铜多金属矿床-256 m 中段 19[#]石门构造地球化学样品微量元素含量统计表

Table 1 Trace element contents statistical table of tectonic geochemical samples in 19[#] exploration line in -256 m level tunnel of Huangshaping copper polymetallic deposit

Sample No.	Mass fraction/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)										
	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Zr	Nb
HLC88	0.68	2.93	24.31	22.35	3.09	20.43	26.69	77.71	3.18	12.87	1.63
HLC89	0.74	1.36	22.87	14.49	3.52	18.80	178.47	2866.08	2.16	5.69	1.44
HLC90	1.36	1.81	26.50	19.13	2.80	18.89	21.88	47.73	2.52	8.66	1.29
HLC91	0.46	4.12	38.63	102.02	5.79	53.12	203.06	58.33	5.78	25.04	2.73
HLC92	0.51	0.85	10.78	11.00	12.60	12.81	4998.86	74.72	3.44	4.15	0.95
HLC93	0.27	0.83	7.36	15.42	1.84	11.85	5.12	43.69	0.58	1.67	0.29
HLC94	2.55	1.97	18.82	13.70	2.38	13.64	173.69	92.74	1.57	9.92	1.08
HLC95	92.50	0.74	8.47	6.27	1.71	4.41	152.61	18290.78	17.71	4.71	0.90
HLC96	17.06	3.97	28.93	8.74	3.30	9.55	17.36	426.41	17.95	109.71	16.06
HLC97	17.11	4.67	20.63	6.49	3.71	9.51	16.05	536.24	12.98	140.72	14.35
HLC98	14.30	4.48	28.26	5.34	1.96	4.25	13.20	269.51	20.35	184.79	36.15
HLC99	5.77	1.24	11.84	7.36	4.24	9.40	12.02	466.78	17.20	3.67	4.25
HLC100	30.50	1.29	14.34	5.11	6.57	6.41	9.51	251.18	25.37	4.86	6.07
HLC101	23.97	2.14	21.80	4.52	2.83	6.91	11.03	824.56	13.54	22.02	4.71
HLC102	25.98	2.37	21.76	11.10	4.28	7.74	5.15	397.36	15.41	9.43	4.53
HLC103	9.15	2.81	10.48	4.06	8.71	1.46	10.20	2238.31	22.97	93.52	73.18
HLC104	29.39	3.06	11.81	7.47	2.32	9.13	11.31	417.27	16.05	5.67	9.15
HLC105	6.47	2.49	7.19	3.03	5.73	4.58	14.94	144.78	18.15	1.10	11.11
HLC106	40.99	1.38	9.08	5.59	2.37	5.16	8.39	479.97	22.90	3.40	6.37
HLC107	5.12	3.81	12.88	4.45	2.16	5.79	19.06	511.28	43.39	3.63	16.23
HLC108	18.16	1.65	9.57	3.89	2.24	3.03	7.60	315.24	19.46	3.41	22.85
HLC109	6.14	2.38	3.53	4.63	5.64	2.22	19.13	263.25	19.16	81.38	107.89
HLC110	7.44	1.57	4.47	2.99	7.05	1.59	10.53	109.90	18.13	67.09	60.07
HLC111	4.08	1.69	12.73	3.86	8.62	1.97	4.76	63.88	19.76	80.59	79.86
HLC112	3.15	1.45	7.51	8.78	11.88	5.14	7.19	158.53	17.00	93.04	67.81
HLC113	3.49	1.47	4.62	10.31	10.46	6.77	15.45	309.27	20.29	83.59	77.92
HLC114	5.03	2.75	7.09	5.66	11.80	3.03	59.95	1345.45	22.95	Supporting materials 	
HLC115	4.18	1.15	11.40	16.68	14.02	11.74	9.45	119.63	19.48		
HLC116	7.74	2.11	5.55	6.55	10.08	4.39	80.29	801.90	20.06		
HLC117	3.19	1.12	11.95	8.24	10.45	5.52	44.05	1824.90	16.08		

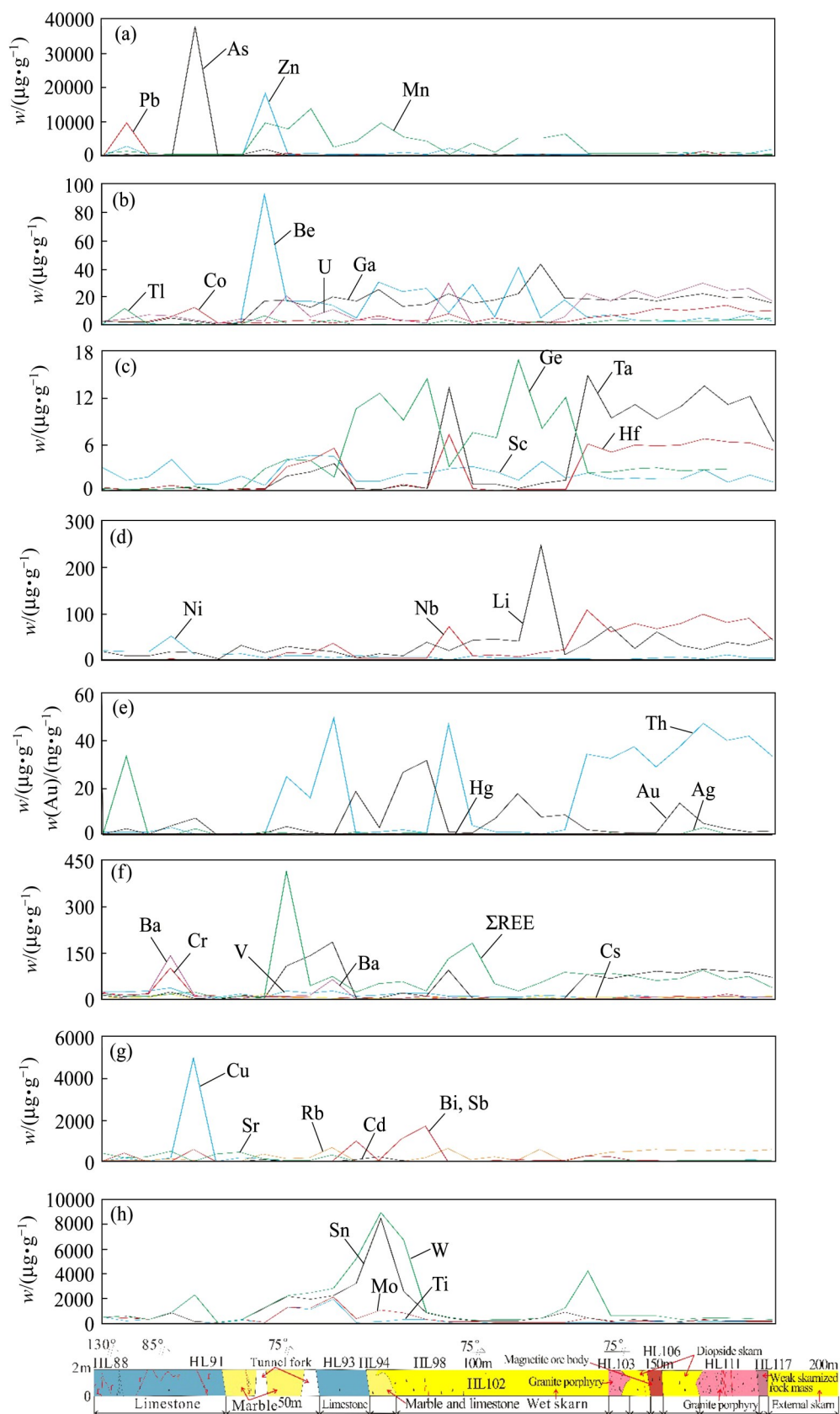


图6 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段19#石门构造地球化学剖面图

Fig. 6 Tectono-geochemistry profile map of 19# exploration line in -256 m level tunnel of Huangshaping copper polymetallic deposit

在方解石化灰岩带(III)、透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)、花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)中含量较高,波动范围较大;Au在方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)、透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)、透辉石矽卡岩带(IX)中振动幅度较大,在其他带中波动较小;Hg在整个带中含量较低,波动不明显。

5) Li和Nb在弱方解石化灰岩带(I)、大理岩带(II)、方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)中含量较低,波动不明显;在透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)、花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)中含量较高,波动幅度大,Li含量在透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)中达到极大值;Ni在弱方解石化灰岩带(I)中有轻微波动,其他带中含量较低,波动不明显。

6) Sc、Hf、Ta、Ge在弱方解石化灰岩带(I)、大理岩带(II)中轻微波动;在方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)、透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)、花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)中含量较高,变化范围大。

7) Be、Co、Ga、Tl、U整体上含量变化幅度不大,在大理岩带(II)、方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)、透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)中呈波峰波谷交替出现,其中,Be在大理岩带(II)中含量较高,波动幅度最大,达到极大值;在花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)中含量较稳定,波动幅度不大。

8) Pb、Zn、As、Mn在弱方解石化灰岩带(I)、大理岩带(II)、方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)、透辉石石榴石湿矽卡岩化带(V)中含量较高,波动幅度较大;在花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩

带(VII)、磁铁矿矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)中含量较低。

4 构造地球化学

4.1 元素组合特征

本文在黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段采集构造地球化学样品117件,包含19#石门30件构造地球化学样品,全部样品经过加工缩分处理,加工至74 μm ,送至北京科荟测试技术有限公司,用ICP-MS法测试微量元素含量,构造岩采样方法及测试方法见韩润生^[13]、胡彬等^[44]和李波^[45]的研究成果。为研究元素之间的亲缘性,本文选取117件样品的Be、Ti、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Zr、Nb、Mo、Cd、In、Sn、Cs、Ba、 Σ REE、Hf、Ta、W、Tl、Pb、Bi、Th、U、As、Hg、Sb、Ge、Au、Ag等33个微量元素,利用Statistica软件进行R型聚类分析和Q型因子分析,分别得到R型聚类分析谱系图(见图7)和因子载荷矩阵表(见表2)。

聚类分析结果表明,当距离系数等于0.7时,黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造岩样品的微量元素可分为五组元素组合(见图7):① Be、Ga、Ge、W、Mo、In、Sn、Bi、Au;② Cu、As、Zn、Cd、Pb、Ag、Sb;③ Tl、Hg;④ Sc、Cs、Ba、Co、Rb、Nb、Th、Zr、Hf、 Σ REE、Ta、U;⑤ V、Cr、Ni。其中,第①组元素组合为高温成矿元素组合,第②组元素组合为中温成矿元素组合,第③组元素组合为低温成矿元素组合,第④组元素组合为花岗斑岩、石英斑岩等岩体的微量元素组合,第⑤组元素组合为围岩灰岩中的微量元素组合。

当累计方差达到77.77%时,黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造地球化学样品的微量元素可得出6个主因子元素组合(见表2)。

F_{a1} 因子: Th、Hf、Zr、Nb、Rb、Ta、 Σ REE、U、Co、Ga、Cs、Sc、W、Be、Ge、Tl、Ba;

F_{a2} 因子: Ag、Pb、Sb、Zn、Hg、Cu、As、

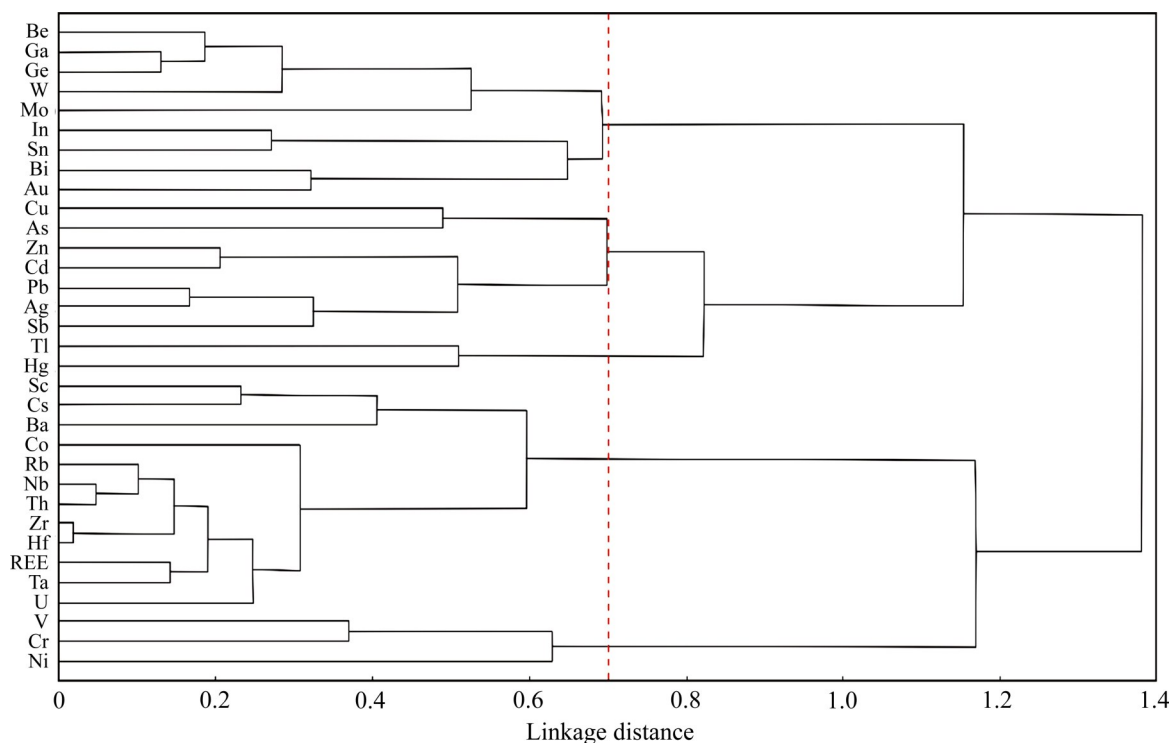


图7 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造地球化学样品R型聚类分析谱系图

Fig. 7 R-type cluster analysis pedigree of tectono-geochemistry samples from -256 m level tunnel in Huangshaping copper polymetallic deposit

Tl²、Cd;

F_{a3} 因子: In、Sn、Cd²、Be²、Ge²、Bi、(Ga²、

Mo);

F_{a4} 因子: V、Cr、Ni、Sc²、(Cs²);

F_{a5} 因子: Au、Bi²;

F_{a6} 因子: Mo²。

结合实际地质情况及因子分析结果, 本文认为 F_{a1} 因子的元素主要为碱土元素组合, 代表花岗斑岩、石英斑岩等岩体的微量元素组合, F_{a2} 因子的元素代表中-低温成矿元素组合, F_{a3} 因子的元素代表高温成矿元素组合, F_{a4} 因子的元素为 V、Cr、Ni, 推测为围岩灰岩中的成矿元素组合, F_{a5} 因子的元素中含有 Au, 代表与 Au 有关的高温成矿元素组合, F_{a6} 因子组合中仅有 Mo 元素, 代表与 Mo 有关的高温成矿元素组合。

4.2 构造地球化学异常

根据因子得分值, 本文利用 Mapgis 软件绘制了黄沙坪铜多金属矿床-256 m 中段的因子得分异

常图(见图 8), 结合构造控矿规律, 分析其地球化学场的空间变化特征。

F_{a1} 因子为 Th、Hf、Zr、Nb、Rb、Ta、 Σ REE、U、Co、Ga、Cs、Sc、W、Be、Ge、Tl、Ba 元素, 代表花岗斑岩、石英斑岩等岩体的微量元素组合, 可圈出 3 个异常区(见图 8(a))。I、II 异常区分别与 304-1[#]、304-2[#] 石英斑岩的空间分布大体一致, III 异常区位于-236 m 中段南东角, 与 301[#] 花岗斑岩枝(脉)的空间分布一致。

F_{a2} 因子为 Ag、Pb、Sb、Zn、Hg、Cu、As、Tl²、Cd 元素, 代表中-低温成矿元素组合, 可圈出 5 个异常区(见图 8(b))。I 异常区位于-256 m 中段北东角的 13[#] 勘探线附近, 处于 304-1[#] 石英斑岩体东侧的灰岩内, 对应一处铅锌矿体。II 异常区位于-256 m 中段北部的 4[#]~13[#] 勘探线之间, 处于 304-1[#] 石英斑岩体的西侧边部, 由三处异常中心组成, 分别对应三处铅锌矿体。III 异常区位于-256 m 中段中部 12[#] 与 109[#] 勘探线的交汇处, 异常中心紧贴 304-2[#] 石英斑岩体的西侧, 对应着该处灰岩中的铅

表2 黄沙坪铜多金属矿床-256 m 中段构造地球化学样品的方差极大旋转因子载荷矩阵

Table 2 Maximum variance rotation factor loading matrix of tectono-geochemistry samples from -256 m level tunnel in Huangshaping copper polymetallic deposit

Element	Factor					
	F_{a1}	F_{a2}	F_{a3}	F_{a4}	F_{a5}	F_{a6}
Be	0.609329	-0.147859	0.664380	0.032568	0.039278	0.110486
Sc	0.707632	-0.184135	0.133389	0.551490	-0.020085	0.031789
V	0.156981	0.028142	-0.005448	0.776210	-0.016671	-0.002485
Cr	0.099049	0.078149	-0.230326	0.738505	0.064721	-0.127570
Co	0.825987	0.082893	-0.062048	0.216293	0.201516	0.000111
Ni	-0.162787	-0.229700	-0.027453	0.566785	-0.012523	0.224769
Cu	0.202910	0.677357	-0.074307	0.007725	0.372133	-0.316190
Zn	-0.171414	0.738646	0.357375	-0.257656	-0.044550	-0.225193
Ga	0.807588	0.084100	0.474437	0.087241	0.153229	-0.013567
Rb	0.922990	-0.043772	0.131674	0.069088	0.006168	-0.027817
Zr	0.959117	0.032747	-0.050213	0.136893	-0.034992	-0.068530
Nb	0.952372	-0.052851	0.200197	-0.053125	0.080415	0.096993
Mo	0.318513	-0.024165	0.467528	0.106647	0.077206	0.561909
Cd	-0.104783	0.535640	0.696878	-0.203443	-0.033897	-0.086889
In	-0.019959	0.153724	0.848533	-0.120940	0.152074	-0.112240
Sn	0.081032	0.347825	0.789501	-0.070643	-0.019513	0.232706
Cs	0.752742	0.015060	-0.005500	0.419853	0.050275	-0.011041
Ba	0.601204	-0.151328	-0.253259	0.332644	-0.010095	-0.238014
REE	0.892667	-0.127914	0.210814	-0.039209	0.166701	-0.003515
Hf	0.982821	0.014619	-0.001386	0.047038	-0.016047	0.004940
Ta	0.907053	-0.106504	0.084845	-0.198692	0.020995	0.178751
W	0.632851	0.039070	0.448723	-0.035421	0.233941	0.372295
Tl	0.602908	0.559249	-0.002746	0.128378	-0.065271	0.088362
Pb	-0.004491	0.829529	0.034733	-0.209444	-0.177742	0.148462
Bi	0.125291	0.178917	0.595875	-0.048253	0.514027	0.262759
Th	0.986402	-0.010557	0.042851	-0.035120	0.010954	-0.001657
U	0.861809	0.033217	0.034684	-0.056460	0.077953	0.208300
As	-0.248106	0.616592	0.145168	0.096623	0.214468	-0.101791
Hg	0.016389	0.702224	0.017812	0.211433	-0.012086	-0.003030
Sb	-0.081974	0.816126	0.125021	-0.024199	0.016735	0.137319
Ge	0.606272	-0.081760	0.641076	-0.077459	0.205854	0.163749
Au	0.291839	0.164456	0.383956	0.063952	0.652958	0.012470
Ag	0.024059	0.873116	0.139070	-0.144943	0.179207	0.006362
Explained variance	11.667091	4.993776	4.273931	2.478126	1.188857	1.061695
Total percentage/%	0.353548	0.151327	0.129513	0.075095	0.036026	0.032173

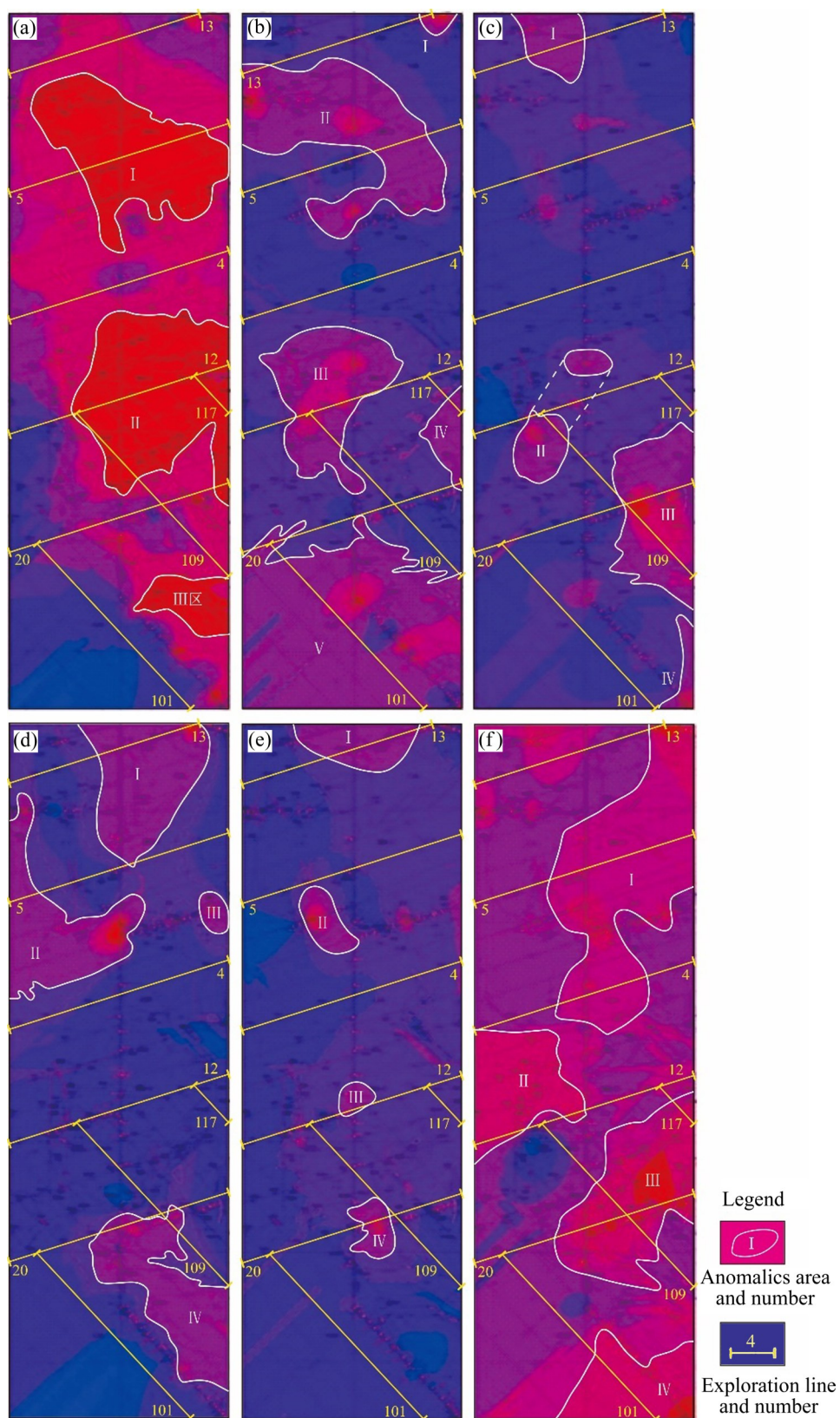


图8 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造地球化学因子异常图:(a) F_{a1} 因子异常图;(b) F_{a2} 因子异常图;(c) F_{a3} 因子异常图;(d) F_{a4} 因子异常图;(e) F_{a5} 因子异常图;(f) F_{a6} 因子异常图

Fig. 8 Tectono-geochemistry factor anomaly maps of -256 m level tunnel in Huangshaping copper polymetallic deposit: (a) F_{a1} factor anomaly map; (b) F_{a2} factor anomaly map; (c) F_{a3} factor anomaly map; (d) F_{a4} factor anomaly map; (e) F_{a5} factor anomaly map; (f) F_{a6} factor anomaly map

锌矿体。IV异常区位于-256 m中段东部的12[#]~20[#]勘探线之间,为304-2[#]石英斑岩与301[#]花岗斑岩所夹持的石磴子组灰岩,该处南侧为矽卡岩型钨矿体,反映成矿流体自SSW向NNE运移。V异常区位于-256 m中段南部101[#]勘探线附近,两处异常中心均位于围岩与304-2[#]石英斑岩、301[#]花岗斑岩体接触界线的产状转折部位。

F_{a3} 因子为In、Sn、Cd²、Be²、Ge²、Bi、(Ga²、Mo)元素,代表高温成矿元素组合,可圈出4个异常区(见图8(c))。I异常区位于-256 m中段北部的13[#]勘探线附近,对应于304-1[#]石英斑岩体,其东、西两侧存在两个中-低温成矿元素异常。II异常区位于-256 m中段中部12[#]勘探线与109[#]勘探线交汇处,往304-2[#]石英斑岩体的西侧边部异常加强。III异常区位于-256 m中段南部20[#]与109[#]勘探线交汇处的东侧,对应于301[#]花岗斑岩体及其附近的矽卡岩、矽卡岩型钨矿体,该异常区的南、北两侧存在两个中-低温成矿元素异常。IV异常区位于-256 m中段南东角的101[#]勘探线北东侧,为301[#]花岗斑岩的分布范围,异常未封闭、规模较小,该异常区NW侧为中-低温成矿元素异常,推测成矿流体向NW运移。

F_{a4} 因子为V、Cr、Ni元素,代表围岩石磴子组(C_{1sh})灰岩的微量元素组合,可圈出4个异常区(见图8(d)),I异常区位于5[#]~13[#]勘探线之间的东部,与304-1[#]石英斑岩体北东侧的灰岩分布范围一致;II异常区位于4[#]~5[#]勘探线之间的西部,与304-1[#]石英斑岩体南西侧的灰岩分布范围一致;III异常区位于4[#]~5[#]勘探线之间的东部,与304-1[#]石英斑岩体东侧的灰岩分布范围一致;IV异常区位于20[#]勘探线与109[#]勘探线交汇处的南西侧,为304-2[#]石英斑岩与301[#]花岗斑岩所夹持的石磴子组(C_{1sh})灰岩分布区域。

F_{a5} 因子为Au、Bi²元素,代表与Au相关的高温成矿元素组合,可圈出4个异常区(见图8(e))。I、II、III、IV异常区分别位于13[#]、4[#]~5[#]勘探线之间、12[#]、20[#]勘探线与主巷道的交汇处,呈南北向串珠状分布,与304-1[#]、304-2[#]石英斑岩的分布范围高度一致,而301[#]花岗斑岩内并无 F_{a5} 因子异常,反映了石英斑岩与Au相关高温成矿元素的成矿专

属性。

F_{a6} 因子为Mo²元素,代表与Mo有关的高温成矿元素组合,可圈出4个异常区(见图8(f))。I异常区位于-256 m中段东部的13[#]~4[#]勘探线之间,II异常区位于-256 m中段西部的4[#]~12[#]勘探线之间,III异常区位于-256 m中段东部的12[#]~20[#]勘探线之间,IV异常区位于-256 m中段南东角的101[#]勘探线附近。III、IV异常区强度相对较强,其异常中心与301[#]花岗斑岩分布范围基本一致,显示花岗斑岩的Mo成矿专属性。I、II异常区分布范围大,但异常强度较弱,异常分布地段仅出露细小花岗斑岩脉,推测深部可能存在隐伏花岗斑岩岩体。

5 找矿预测

黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造地球化学异常显示,中-低温成矿元素异常多分布于岩体的西侧、南西侧,高温成矿元素异常大体位于岩体中心部位(见图9)。通过中-低温成矿元素异常与高温成矿元素异常的空间相对位置,可以大致判断出成矿流体的运移方向,即以石英斑岩岩体(304-1[#]、304-2[#])为中心,成矿流体分别向南南东、北西、南东方向运移;以花岗斑岩岩体(301[#])为中心,成矿流体向北东、南西、北西方向运移。-256 m中段的中-低温成矿元素异常与高温成矿元素异常的空间相对位置位移并不大,反映铅锌矿体、钨锡矿体的产状较陡,仍具深部延伸的趋势,深部有较好的找矿潜力。

-256 m中段 F_{a2} 、 F_{a3} 因子异常在石英斑岩、花岗斑岩分布区均有分布(见图8(b)和(c)),仅与Au有关的高温成矿元素异常(F_{a5})与石英斑岩分布范围一致,与Mo有关的高温成矿元素异常(F_{a6})与花岗斑岩分布范围大体一致(见图8(e)和(f)),推测与两期岩体的叠加作用有关,即晚期花岗斑岩叠加在早期石英斑岩之上。

-256 m中段构造地球化学异常指示2个重点找矿靶区(见图9),即-256 m中段304-2[#]石英斑岩北西侧的深部是寻找铜金铅锌矿体的有利靶区(12[#]~4[#]勘探线之间);南东侧301[#]花岗斑岩的深部是寻找钨锡钼矿体的有利部位(111[#]勘探线

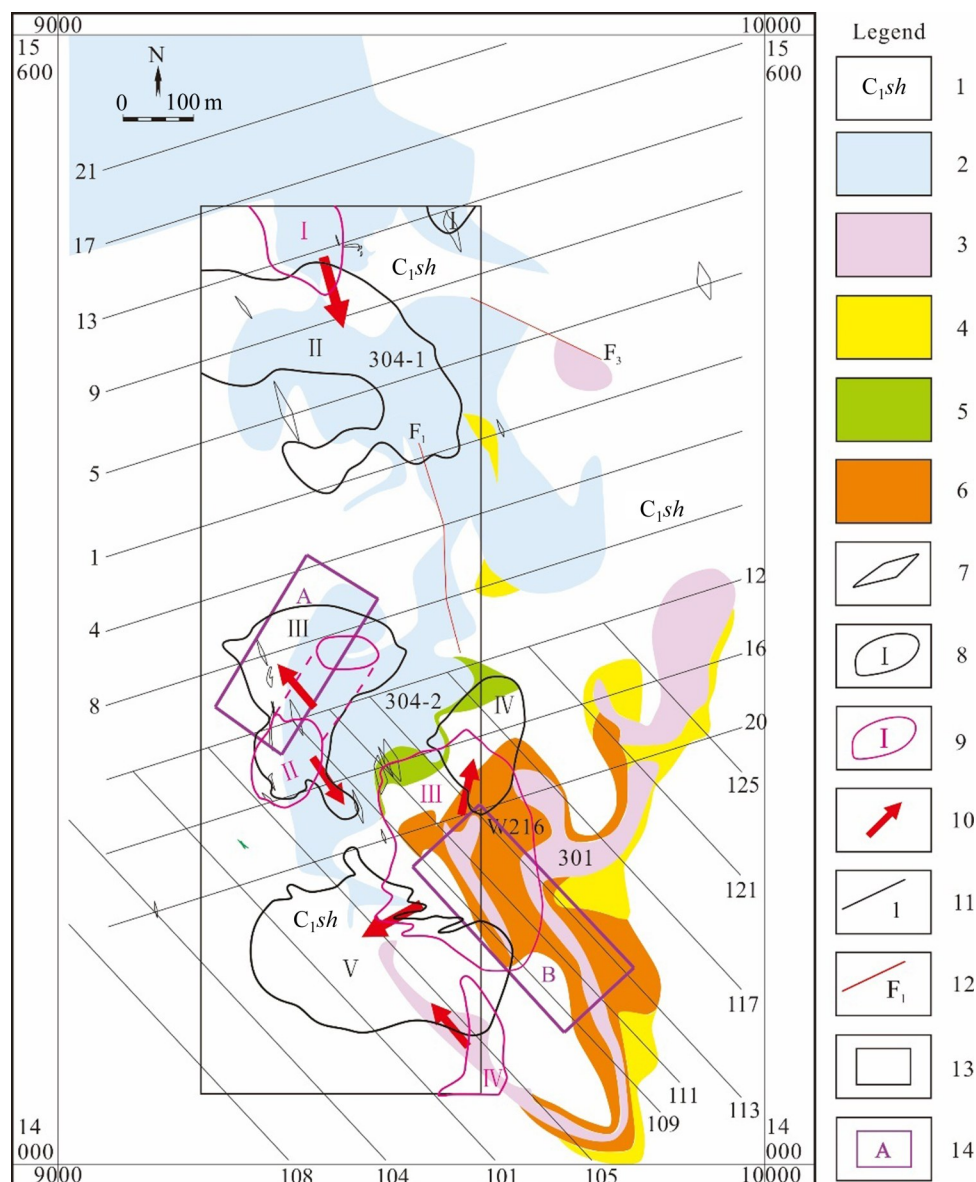


图9 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段成矿流体运移及找矿靶区示意图:1—石炭系石磴子组;2—石英斑岩;3—花岗斑岩;4—矽卡岩;5—黄铁矿化矽卡岩;6—钨钼矿体;7—铅锌矿体;8—中低温成矿元素组合异常区及编号;9—高温成矿元素组合异常区及编号;10—成矿流体运移方向;11—勘探线及编号;12—断裂及编号;13—化探范围;14—预测靶区

Fig. 9 Schematic diagram of ore-forming fluid migration and prospecting target area from -256 m level tunnel in Huangshaping copper polymetallic deposit: 1—Carboniferous Shidengzi formation; 2—Quartz porphyry; 3—Granite porphyry; 4—Skarn; 5—Pyritization skarn; 6—Tungsten molybdenum ore body; 7—Lead zinc ore body; 8—Middle-low temperature ore-forming element assemblage anomaly area and number; 9—High temperature metallogenic element combination anomaly area and number; 10—Migration directions of ore-forming fluid; 11—Exploration line and number; 12—Fracture and number; 13—Range of geochemical exploration; 14—Target prediction

附近)。

6 结论

1) 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段仅出露下石炭统石磴子组(C_1sh)灰岩, 岩浆侵入接触构造控

制着该中段岩体的形态与空间分布, 岩浆岩主要为石英斑岩和花岗斑岩, 花岗斑岩为黄沙坪铜多金属矿床最重要的成矿母岩, 而环绕在花岗斑岩和矽卡岩接触带可见钨矿化体, 表明该中段矿体与岩体具有密切的成因联系。

2) “构造-蚀变-岩性”坑道编录显示, 黄沙

坪铜多金属矿床-256 m中段19#石门可划分为弱方解石化灰岩带(I)、大理岩带(II)、方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)、透辉石石榴石矽卡岩化带(V)、花岗斑岩带(VI)、透辉石矽卡岩带(VII)、磁铁矿体带(VIII)、透辉石矽卡岩带(IX)、花岗斑岩带(X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII),微量元素(W、Sn、Bi、 Σ REE、Zr、Th、Au、Li、Ge、Hf、Ta)在透辉石石榴石矽卡岩化带(V)明显富集,指示矽卡岩化为区内重要的找矿标志;Pb、Zn元素在大理岩带(IV)至透辉石矽卡岩化带(V)中含量高,变化范围大,W、Mo在透辉石石榴石矽卡岩化带(V)明显富集,Au、Ag在透辉石石榴石矽卡岩化带(V)、花岗斑岩带(VI、X)、弱矽卡岩化花岗斑岩带(XI)、矽卡岩带(XII)相对富集,Cu元素在方解石化灰岩带(III)、大理岩带(IV)中含量较高。

3) 聚类分析和因子分析表明,黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造岩样品的微量元素大致可分为高温成矿元素组合、中-低温成矿元素组合、岩体微量元素组合、围岩微量元素组合;其中高温成矿元素组合进一步细分为与Au有关的高温成矿元素组合、与Mo有关的高温成矿元素组合。

4) 黄沙坪铜多金属矿床-256 m中段构造地球化学异常显示,以石英斑岩岩体(304-1[#]、304-2[#])为中心,成矿流体分别向南南东、北西、南东方向运移;以花岗斑岩岩体(301[#])为中心,成矿流体向北东、南西、北西方向运移。依据成矿地质条件和构造地球化学异常,本文圈定了2个重点找矿靶区,304-2[#]石英斑岩北西侧的深部、南东侧301[#]花岗斑岩深部分别为寻找铜金铅锌矿体和钨锡钼矿体的有利地段。

致谢:

野外工作得到了昆明理工大学韩润生教授、吴鹏教授、邱文龙博士、赵冻博士、刘飞博士及查志辉、胡迁等本科生的大力支持和帮助,两位审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

REFERENCES

[1] 陶 琴,韩润生,赵 冻,等.湘南黄沙坪铜锡多金属矿床与

隐伏花岗斑岩有关的矿化-蚀变分带模式[J/OL]. 中国地质: 1-24[2021-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200415.1611.004.html>.

TAO Qin, HAN Run-sheng, ZHAO Dong, et al. The mineralization and alteration zoning related to the buried granite porphyry of the Huangshaping Cu-Sn polymetallic deposit, Southern Hunan[J/OL]. *Geology in China*: 1-24 [2021-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200415.1611.004.html>.

[2] 韩润生,赵 冻,吴 鹏,等.湘南黄沙坪铜锡多金属矿床构造控岩控矿机制及深部找矿勘查启示[J]. *地学前缘*, 2020, 27(4): 199-218.

HAN Run-sheng, ZHAO Dong, WU Peng, et al. Mechanisms of rock-and ore-controlling structures and the implications for deep prospecting in the Huangshaping Cu-Sn polymetallic deposit, southern Hunan Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(4): 199-218.

[3] 原斌达,袁顺达,赵盼捞,等.湘南黄沙坪多金属矿床花岗质岩浆性质及演化对成矿差异的约束[J]. *岩石学报*, 2018, 34(9): 2565-2580.

YUAN Ya-bin, YUAN Shun-da, ZHAO Pan-lao, et al. Properties and evolution of granitic magma in the Huangshaping polymetallic deposit, southern Hunan: Their constraints to mineralization differences[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(9): 2565-2580.

[4] 曾志雄.黄沙坪矿田铜矿地质特征及成因分析[J]. *湖南有色金属*, 2001, 17(3): 8-9, 43.

ZENG Zhi-xiong. Geological characteristics and genesis of the copper edposit of the Huangshaping ore field[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2001, 17(3): 8-9, 43.

[5] 汪林峰,江元成,王立发,等.湖南黄沙坪矿区铜矿地质特征及找矿方向[J]. *矿产勘查*, 2011, 2(3): 226-231.

WANG Lin-feng, JIANG Yuan-cheng, WANG Li-fa, et al. Geological characteristics and prospecting direction of the copper deposit of the Huangshaping ore field in Hunan[J]. *Mineral Exploration*, 2011, 2(3): 226-231.

[6] 钟正春.黄沙坪矿区岩浆岩及其控矿特征[J]. *矿产与地质*, 1996, 10(6): 41-46.ZHONG Zheng-chun. Magma rocks and their ore controlling characteristics in the Huangshaping mining area[J]. *Mineral Resources and Geology*, 1996, 10(6): 400-405.

[7] 姚军明,华仁民,林锦富.湘东南黄沙坪花岗岩LA-ICPMS 锆石U-Pb定年及岩石地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 688-696.

YAO Jun-ming, HUA Ren-min, LIN Jin-fu. Zircon LA-

- ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics of Huangshaping granite in southeast Hunan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 688–696.
- [8] 全铁军, 孔 华, 王 高, 等. 黄沙坪矿区花岗岩岩石地球化学、U-Pb年代学及Hf同位素制约[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(4): 597–606.
- QUAN Tie-jun, KONG Hua, WANG Gao, et al. Petrogenesis of the granites in the Huangshaping area: Constraints from petrochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(4): 597–606.
- [9] LI H, PALINKAŠ L A, EVANS N J, et al. Genesis of the Huangshaping W-Mo-Cu-Pb-Zn deposit, South China: Role of magmatic water, metasomatized fluids, and basinal brines during intra - continental extension[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(2): 1409–1430.
- [10] 游先军. 湘南成矿预测和靶区优选[D]. 长沙: 中南大学, 2005. YOU Xian-jun. Mineralization prediction and target area optimization in Southern Hunan[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [11] JIANG Wei-cheng, LI Huan, WU Jing-hua, et al. A newly found biotite syenogranite in the Huangshaping polymetallic deposit, South China: Insights into Cu mineralization[J]. *Journal of Earth Science*, 2018, 29(3): 537–555.
- [12] 钱建平. 构造地球化学浅议[J]. *地质地球化学*, 1999, 27(3): 94–101.
- QIAN Jian-ping. Tectono-geochemistry-a brief discussion[J]. *Geology-Geochemistry*, 1999, 27(3): 94–101.
- [13] 韩润生. 构造成矿动力学及隐伏矿定位预测[M]. 北京: 科学出版社, 2006. HAN Run-sheng. Dynamics of tectonic ore-forming processes and localization-prognosis of concealed orebodies[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [14] 钱建平. 构造地球化学找矿方法及其在微细浸染型金矿中的应用[J]. *地质与勘探*, 2009, 45(2): 60–67.
- QIAN Jian-ping. Tectono-geochemical prospecting method and its application in searching for sediment-hosted disseminated gold deposits[J]. *Geology and Exploration*, 2009, 45(2): 60–67.
- [15] 赵祚永, 李念凤, 华曙光. 构造地球化学测量在找金中的应用[J]. *黄金地质*, 1998(4): 25–29.
- ZHAO Zuo-yong, LI Nian-feng, HUA Shu-guang. The application of the tectono-geochemistry in gold exploration [J]. *Gold Geology*, 1998(4): 25–29.
- [16] 温汉捷, 肖化云, 俞广钧. 构造地球化学探矿方法的应用——以山东招远魏家沟金矿床为例[J]. *地质与勘探*, 1999, 35(3): 32–35, 45.
- WEN Han-jie, XIAO Hua-yun, YU Guang-jun. Weijiagou gold deposit in Shangdong: Application of tectonic geochemistry to prospecting[J]. *Geology and Prospecting*, 1999, 35(3): 32–35, 45.
- [17] 王明志, 韩润生, 王 雷, 等. 滇西北北衙金矿床万洞山—笔架山矿段构造地球化学特征[J]. *中国地质*, 2016, 43(1): 238–248.
- WANG Ming-zhi, HAN Run-sheng, WANG Lei, et al. Tectono-geochemical characteristics of Wandongshan-Bijashan ore block in the Beiya Au-polymetallic deposit, northwestern Yunnan[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 238–248.
- [18] 刘继顺, 高珍权, 舒广龙. 李坝金矿田构造地球化学特征及其找矿意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2001, 25(1): 87–94.
- LIU Ji-shun, GAO Zhen-quan, SHU Guang-long. Tectonic geochemistry of the Liba gold orefield and applications for prospecting[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2001, 25(1): 87–94.
- [19] 毛 铁, 叶 春, 杜定全. 贵州烂泥沟金矿控矿断层构造地球化学研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(1): 98–107.
- MAO Tie, YE Chun, DU Ding-quan. Tectonogeochemistry characteristics of the gold controlling fault in the Lannigou gold deposit, Guizhou, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(1): 98–107.
- [20] 李松涛, 夏 勇, 刘建中. 构造地球化学在黔西南微细粒浸染型金矿中的找矿预测研究[C]//中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集. [S. l.]: 中国矿物岩石地球化学学会, 2019.
- LI Song-tao, XIA Yong, LIU Jian-zhong. Prospecting prediction of tectono-geochemical in sediment hosted disseminated gold deposits in southwestern Guizhou[C]//Summary of Papers of the 17th Annual Conference of the Chinese Society of Mineral Geochemistry. [S. l.]: The Chinese Society of Mineral Geochemistry, 2019.
- [21] 武俊德. 个旧锡矿东区外围构造地球化学勘查与靶区优选[J]. *矿产与地质*, 2003, 17(S1): 467–471.
- WU Jun-de. Structure geochemical exploration and target selection outside eastern district of Gejiu tin field[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2003, 17(S1): 467–471.
- [22] 韩润生, 陈 进, 高德荣, 等. 构造地球化学在隐伏矿定位预测中的应用[J]. *地质与勘探*, 2003, 39(6): 25–28.
- HAN Run-sheng, CHEN Jin, GAO De-rong, et al. Application of tectono-geochemical ore-finding method in orientation prognosis of concealed ores[J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(6): 25–28.

- [23] HAN Run-sheng, CHEN Jin, WANG Feng, et al. Analysis of metal-element association halos within fault zones for the exploration of concealed ore-bodies—A case study of the Qilinchang Zn-Pb- (Ag-Ge) deposit in the Huize mine district, northeastern Yunnan, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015.
- [24] ZHAO Jiang-nan, ZUO Ren-guang, CHEN Shou-yu, et al. Application of the tectono-geochemistry method to mineral prospectivity mapping: A case study of the Gaosong tin-polymetallic deposit, Gejiu district, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 71: 719–734.
- [25] 宋威方, 刘建中, 李松涛, 等. 构造地球化学在贵州金矿找矿中的应用研究[C]//第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集. [S. l. : s. n.], 2019.
- SONG Wei-fang, LIU Jian-zhong, LI Song-tao, et al. Application of tectono-geochemical in gold prospecting in Guizhou[C]//Summary of papers from the Ninth National Symposium on Mineralization Theory and Prospecting Methods. [S. l. : s. n.], 2019.
- [26] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2329–2338.
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, GUO Chun-li, et al. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2329–2338.
- [27] 刘悟辉. 黄沙坪铅锌多金属矿床成矿机理及其预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- LIU Wu-hui. A study on metallogenic mechanism and prediction of Huangshaping lead-zinc polymetallic deposit[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [28] 付 旭. 湖南黄沙坪铅锌矿成岩成矿深度估算[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- FU Xu. A study on diagenetic and metallogenic depths of the Huangshaping lead-zinc deposit in Hunan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012.
- [29] 龚述清. 湖南省桂阳县黄沙坪铅锌矿接替资源勘查(详查)地质报告[R]. 长沙: 湖南省湘南地质勘察院, 2011.
- GONG Shu-qing. Geological report of replacement resources exploration (detailed investigation) in Huangshaping lead-zinc mine, Guiyang County, Hunan Province[R]. Changsha: Hunan Xiangnan Geological Survey Institute, 2011.
- [30] 齐钊宇, 张 志, 祝新友, 等. 湖南黄沙坪钨钼多金属矿床矽卡岩地球化学特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 338–348.
- QI Fan-yu, ZHANG Zhi, ZHU Xin-you, et al. Skarn geochemistry of the Huangshaping W-Mo polymetallic deposit in Hunan and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 338–348.
- [31] 赵 飞. 湖南黄沙坪钨钼多金属矿床地质特征及成矿过程探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- ZHAO Fei. Geological characteristics and the mineralization process from Huangshaping W-Mo polymetallic deposit in Hunan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [32] LI Deng-feng, TAN Chu-yan, MIAO Feng-yu, et al. Initiation of Zn-Pb mineralization in the Pingbao Pb-Zn skarn district, South China: Constraints from U-Pb dating of grossular-rich garnet[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 107: 587–599.
- [33] 马丽艳, 路远发, 屈文俊, 等. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2007, 26(4): 425–431.
- MA Li-yan, LU Yuan-fa, QU Wen-jun, et al. Re-Os isotopic chronology of molybdenites in Huangshaping lead-zinc deposit, southeast Hunan, and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(4): 425–431.
- [34] 姚军民, 华仁民, 屈文俊, 等. 湖南黄沙坪铅锌钨钼多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2007, 37(4): 471–477.
- YAO Jun-ming, HUA Ren-min, QU Wen-jun, et al. Re-Os isotopic dating and its significance in Huangshaping lead-zinc-tungsten-molybdenum polymetallic deposit, southeast Hunan[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(4): 471–477.
- [35] 童潜明. 湘南黄沙坪铅-锌矿床的成矿作用特征[J]. *地质论评*, 1986, 32(6): 565–577.
- TONG Qian-ming. The characteristics of metallogeny of the Huangshaping lead-zinc ore deposit of southern Huann[J]. *Geological Review*, 1986, 32(6): 565–577.
- [36] 雷泽恒, 陈富文, 陈郑辉, 等. 黄沙坪铅锌多金属矿成岩成矿年龄测定及地质意义[J]. *地球学报*, 2010, 31(4): 532–540.
- LEI Ze-heng, CHEN Fu-wen, CHEN Zheng-hui, et al. Petrogenetic and metallogenic age determination of the Huangshaping lead-zinc polymetallic deposit and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2010, 31(4): 532–540.
- [37] 姚军民, 华仁民, 林锦富. 湘东南黄沙坪花岗岩 LA-ICPMS

- 铅石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 688–696.
- YAO Jun-ming, HUA Ren-min, LIN Jin-fu. Zircon LAICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics of Huan shaping granite in southeast Hunan Province, China[J]. Acta Petrological Sinica, 2005, 21(3): 688–696.
- [38] YAO Jun-ming, HUA Ren-min, QU Wen-jun, et al. Re-Os isotope dating of molybdenites in the Huangshaping Pb-Zn-W-Mo polymetallic deposit, Hunan Province, South China and its geological significance[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 50(4): 519–526.
- [39] 乔玉生, 龚述清, 廖兴钰, 等. 湖南黄沙坪铅锌矿蚀变-矿化区的划分及找矿远景浅析[J]. 华南地质与矿产, 2011, 27(2): 105–110.
- QIAO Yu-sheng, GONG Shu-qing, LIAO Xing-yu, et al. Alteration-mineralization district subdivision and prospecting potential analysis of Huangshaping deposit, Hunan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2011, 27(2): 105–110.
- [40] 刘悟辉, 刘忠法, 郑明泓, 等. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床同位素地球化学特征[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 320–321.
- LIU Wu-hui, LIU Zhong-fa, ZHENG Ming-hong, et al. Isotope geochemical characteristics of Huangshaping lead-zinc polymetallic deposit, Hunan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(S1): 320–321.
- [41] 潘卓. 湖南黄沙坪矿区南部钨钼多金属矿床地质特征、控矿因素及矿床成因[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- PAN Zhuo. The geological characteristics, ore-controlling factors and deposit of the W-Mo polymetallic deposit in the south of Huangshaping mine, Hunan Province[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [42] 何厚强, 王静纯, 江元成. 湖南黄沙坪铅锌矿区南部铁钨钼(锡)多金属矿床成矿地质特征初析[J]. 矿产勘查, 2010, 1(4): 323–333.
- HE Hou-qiang, WANG Jing-chun, JIANG Yuan-cheng. Preliminary analysis on the geological characteristics and genesis of Fe-W-Mo-Bi(-Sn) polymetallic deposit in the southern Huangshaping lead-zinc mine district, Hunan[J]. Mineral Exploration, 2010, 1(4): 323–333.
- [43] 汪林峰, 王立发, 刘凤平, 等. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床地质特征及找矿新进展[J]. 资源调查与环境, 2013, 34(3): 193–198.
- WANG Lin-feng, WANG Li-fa, LIU Feng-ping, et al. Geological characteristics and new prospecting progress of Huangshaping lead-zinc polymetallic deposit in Hunan Province[J]. Resources Survey & Environment, 2013, 34(3): 193–198.
- [44] 胡彬, 韩润生, 马德云, 等. 云南毛坪铅锌矿区I号矿体分布区断裂构造岩稀土元素地球化学特征及找矿意义[J]. 地质地球化学, 2003, 31(4): 22–28.
- HU Bin, HAN Run-sheng, MA De-yun, et al. Rec geochemical features of ne-trending fault tectonites and their ore finding significance in the Maoping Pb-Zn deposit, Yunnan, China[J]. Earth and Environment, 2003, 31(4): 22–28.
- [45] 李波. 云南巧家松梁铅锌矿床地质特征及构造地球化学异常模式[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- LI Bo. Geological characteristics and structural geochemical anomaly model of Songliang lead-zinc deposit in Qiaojia, Yunnan Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.

Tectono-geochemistry characteristics and prospecting prediction of –256 m level tunnel of Huangshaping copper polymetallic deposit in Southern Hunan

LEI Zhen¹, TAO Si-yuan^{1,2}, LI Bo¹, WANG Xin-fu¹, XIANG Zuo-peng¹, CHU Xiang-kai^{1,3}, LIU Feng-ping⁴,
DENG An-ping⁴, ZONG Zhi-hong⁴, QIAN Yong-gan⁴

(1. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

4. Hunan Nonferrous Huangshaping Mining Branch, Chenzhou 424421, China)

Abstract: The Huangshaping copper polymetallic deposit is located in the southern part of the Pingbao ore concentration area in Southern Hunan, China. Its deep veined and irregular skarn-type copper polymetallic ore bodies are obviously controlled by magmatic intrusive contact structures. Due to continuous development, the remaining resources in the deep part of Huangshaping copper polymetallic deposit are decreasing, and it is urgent to identify further prospecting directions. In this paper, the tectono-geochemistry mapping was carried out in the -256 m level tunnel of Huangshaping copper polymetallic deposit. The combination characteristics of geochemical elements were discussed by cluster analysis and factor analysis. The anomaly map of tectono-geochemistry factors was drawn. The migration direction of ore-forming fluid was judged and the prospecting prediction was made. The results show that the ore bodies in the -256 m level tunnel of the Huangshaping copper polymetallic deposit are distributed in a banded and irregular shape, and their occurrence location and shape are strictly controlled by magmatic intrusion contact structures and faults. The 19[#] exploration line of -256 m level tunnel can be divided into weak calcite limestone belt (I), marble belt (II), calcite limestone belt (III), marble belt (IV), diopside garnet skarn belt (V), granite porphyry belt (VI), diopside skarn belt (VII), magnetite ore body belt (VIII), diopside skarn belt (IX), granite porphyry belt (X), weak skarn granite porphyry belt (XI), and skarn belt (XII). Pb, Zn, Ag, Au, W, Mo, Sn and other ore-forming elements are enriched in diopside garnet skarn belt (V) and granite porphyry belt (VI). The contents of trace elements in diopside garnet skarn zone (V) are high, indicating important prospecting indicators in the area. The trace elements of tectonite samples in the -256 m level tunnel of Huangshaping copper polymetallic deposit can be roughly divided into high temperature metallogenic element combination, medium-low temperature metallogenic element combination, rock trace element combination and surrounding rock trace element combination. Among them, the high-temperature metallogenic element combination is further subdivided into the high-temperature metallogenic element combination related to Au and the high-temperature metallogenic element combination related to Mo. The spatial distribution characteristics of tectonogeochemical anomalies further support the existence of Au-Cu-Pb-Zn and W-Sn-Mo-Bi metallogenic systems in the Huangshaping copper polymetallic deposit. The -256 m level tunnel is centered on quartz porphyry, and the ore-forming fluid migrates to NW and SE. In the south, the granite porphyry as the center, the ore-forming fluid migrates to three directions of NE, SW, NW. Based on the tectonic geochemical anomalies, two key prospecting targets were delineated in this paper.

Key words: mineralization forecast; tectono-geochemistry; -256 m level tunnel; Huangshaping copper polymetallic deposit; Southern Hunan

Foundation item: Project(2018YFC0603903) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(41862007) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(YNWR-QNBJ-2018-093) supported by the Yunnan Ten Thousand Talents Plan Young and Elite Talents Project, China; Project(14078384) supported by the Key Disciplines Construction of Kunming University of Science and Technology, China

Received date: 2021-11-16; **Accepted date:** 2021-12-17

Corresponding author: LI Bo; Tel: +86-15987187981; E-mail: libo8105@qq.com

(编辑 何学锋)