

doi: 10.12029/gc20191211003

陶琴, 韩润生, 赵冻, 吴鹏, 田旭峰, 赵大成, 杨航, 宗志宏, 邓安平. 2023. 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]. 中国地质, 50(2): 586-604.

Tao Qin, Han Runsheng, Zhao Dong, Wu Peng, Tian Xufeng, Zhao Taicheng, Yang Hang, Zong Zhihong, Deng Anping. 2023. The mineralization and alteration zoning model related to the concealed granite porphyry of the Huangshaping Cu-Sn polymetallic deposit, Southern Hunan Province[J]. Geology in China, 50(2): 586-604(in Chinese with English abstract).

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

陶琴^{1,2}, 韩润生^{1,2}, 赵冻^{1,2}, 吴鹏^{1,2}, 田旭峰³, 赵大成⁴, 杨航^{1,2}, 宗志宏⁴, 邓安平⁴

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 有色金属矿产地质调查中心西南地质调查所, 云南 昆明 650093;
3. 湖南省湘南地质勘察院, 湖南 郴州 423000; 4. 湖南有色黄沙坪矿业有限公司, 湖南 郴州 424421)

摘要:【研究目的】黄沙坪铜锡多金属矿床是湘南地区岩浆热液成矿系统的典型矿床之一。为了深化研究该矿床成矿成矿机制、高效指导深部找矿勘查, 需要揭示与隐伏花岗斑岩有关的多金属矿化-蚀变分带规律, 构建深部矿化-蚀变空间分带模式。【研究方法】应用热液矿床的大比例尺蚀变岩相定位找矿预测方法, 开展矿区内-136 m、-176 m、-256 m 中段典型穿脉剖面的矿化蚀变测量和矿物岩石地球化学研究, 剖析了矿化-蚀变的强弱变化、矿物共生组合及其空间分带特征, 探讨了成矿元素、元素组合及其元素比值变化规律。【研究结果】构建了矿化-蚀变空间分带模式: 从花岗斑岩体(内带)→接触带→围岩(外带), 依次为钨钼(黄铁)矿化-硅化-绢云母化花岗斑岩带(I)→磁铁矿(钨锡)矿化石榴石砂卡岩带(II-1)→钨钼-磁黄铁矿化石榴石砂卡岩带(II-2)→铅锌矿化结晶灰岩带(III)→强方解石化灰岩带(IV)的分带规律, 各带对应的主要矿物组合为: 石英+(黄铁矿+绢云母)→磁铁矿+透辉石+硅灰石+绿帘石+绿泥石+(白钨矿+锡石+黄铁矿+石榴石)→白钨矿+辉钨矿+磁黄铁矿+(锡石+黄铜矿+黄铁矿+闪锌矿+方铅矿)+石榴石+符山石+透辉石+角闪石+萤石+绿帘石+绿泥石+(石英+方解石)→方铅矿+闪锌矿+(黄铁矿)+方解石+石英→方解石+石英。进一步揭示了各蚀变带矿化元素分布规律: W、Mo→Fe、W、Sn(Bi、Mo)→W、Sn、Bi、Mo(Cu)→Pb、Zn(W、Sn、Cu)→Pb、Zn、Ag 的水平分带规律。【结论】黄沙坪铜锡多金属矿床以岩体为中心至两侧围岩矿化-蚀变分带规律明显, 各带内特征矿物组合和矿化指示元素的变化规律对矿体的赋存空间具有明显的指示作用。

关键词: 矿化-蚀变空间分带; 岩浆热液成矿系统; 元素空间变化规律; 黄沙坪铜锡多金属矿床; 矿产勘查工程; 湘南地区

创 新 点: 以黄沙坪铜锡多金属矿床与隐伏花岗斑岩有关的矿化-蚀变分带及元素、元素组合空间变化为指标, 研究并构建了矿床深部矿化蚀变分带模式, 为深部找矿提供了依据。

中图分类号: P575.2; P577 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)02-0586-19

The mineralization and alteration zoning model related to the concealed granite porphyry of the Huangshaping Cu-Sn polymetallic deposit, Southern Hunan Province

收稿日期: 2019-12-11; 改回日期: 2020-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目“控矿构造体系与深部矿赋存规律(2018YFC0603902)”、云岭学者资助项目(2014)、云南省矿产资源预测评价工程实验室(2010)项目和云南省地质过程与矿产资源省创新团队项目(2012)联合资助。

作者简介: 陶琴, 女, 1993年生, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: 894474134@qq.com。

通讯作者: 韩润生, 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事构造动力学及隐伏矿预测、矿床学研究; E-mail: 554670042@qq.com。

TAO Qin^{1,2}, HAN Runsheng^{1,2}, ZHAO Dong^{1,2}, WU Peng^{1,2}, TIAN Xufeng³, ZHAO Taicheng⁴,
YANG Hang^{1,2}, ZONG Zhihong⁴, DENG Anping⁴

(1. Kunming University of Science and Technology, College of Land and Resources Engineering, Kunming 650093, Yunnan, China;
2. Southwest Institute of Geological Survey, Geological Survey Center for Non-ferrous Mineral Resources, Kunming 650093,
Yunnan, China; 3. Southern Hunan Institute of Geology Survey, Chenzhou 423000, Hunan, China; 4. Hunan Nonferrous
Huangshaping Mining Co. Ltd, Chenzhou 424421, Hunan, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The Huangshaping Cu-Sn polymetallic deposit is one of the typical representatives of the magmatic hydrothermal metallogenic system in southern Hunan, China. In order to deepen the diagenetic and metallogenic mechanism of the deposit and efficiently guide the exploration of deep prospecting, it is necessary to reveal the polymetallic mineralization-alteration zone rule related to the concealed granite porphyry, and construct the deep mineralization-alteration spatial zoning model. **[Methods]** Applying the large-scale altered lithofacies location prospecting and prediction method for hydrothermal deposits, and the geochemical analysis of rock and mineral for tunnel sections in the typical levels of -136 m, -176 m and -256 m, the intensity change of mineralization-alteration, mineral paragenetic association and its spatial zoning characteristics were analyzed, and the transformation rules of ore-forming elements, element associations and element ratios were discussed. **[Results]** The current study constructed mineralization-alteration zoning model: from porphyry (internal zone) to contact zone to surrounding rock (outer zone) with scheelite-molybdenite (pyrite) mineralized-silicified-sericitized granite porphyry zone (I) → magnetization (scheelite-cassiterite) mineralized garnet skarn zone (II-1) → scheelite-molybdenite-pyrrhotite mineralized garnet skarn zone (II-2) → lead-zinc mineralized crystalline limestone zone (III) → strong calcitization limestone zone (IV). The main mineral assemblages of in the corresponding zones are: Quartz + (Pyrite + Sericite) → Magnetite + Diopside + Wollastonite + Epidote + Chlorite + (Scheelite + Cassiterite + Pyrite + Garnet) → Scheelite + Molybdenite + Pyrrhotite + (Cassiterite + Chalcocopyrite + Pyrite + Sphalerite + Galena) + Garnet + Vesuvianite + Diopside + Hornblende + Fluorite + Epidote + Chlorite + (Quartz + Calcite) → Galena + Sphalerite + (Pyrite) + Calcite + Quartz → Calcite + Quartz. The distribution rule of mineralized elements in each alteration zone was revealed: W, Mo → Fe, W, Sn (Bi, Mo) → W, Sn, Bi, Mo (Cu) → Pb, Zn (W, Sn, Cu) → Pb, Zn, Ag. **[Conclusions]** The mineralization-alteration zoning rule of the deposit was obvious from the rock mass as the center to the surrounding rock on both sides. The transformation rules of characteristic mineral assemblage and mineralization indicator elements in each zone have an obvious indication of the occurrence position of the ore body.

Key words: mineralization-alteration spatial zoning; magmatic hydrothermal metallogenic system; spatial variation rule of elements; Huangshaping Cu-Sn polymetallic deposit; mineral exploration engineering; Southern Hunan Province

Highlights: Taking the mineralization-alteration zoning, spatial transformation of elements and element associations related to concealed granite porphyry in Huangshaping Cu-Sn Polymetallic deposit as indicators, the deep mineralization-alteration zoning model of the deposit is studied and constructed, which provides a basis for deep prospecting.

About the first author: TAO Qin, female, born in 1993, master, majors in mineralogy, petrology, mineral deposit geology; E-mail: 894474134@qq.com.

About the corresponding author: HAN Runsheng, male, born in 1964, professor, supervisor of doctor candidates, engaged in the dynamics of tectonic ore-forming processes and prognosis of concealed deposit; E-mail: 554670042@qq.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program (No.2018YFC0603902), the projects of Yunling Scholars (2014), Yunnan engineering laboratory of mineral resources prediction and evaluation (2010), and geological process and mineral resources innovation team (2012).

1 引 言

岩浆热液成矿系统因其富含 W、Sn、Mo、Cu、

Pb、Zn、Ag 等多金属矿床而备受学者们的普遍关注 (Cooke et al., 2005; Sillitoe, 2010; Large et al., 2018), 该类矿床受控于同一构造-岩浆-热力学体

系,围绕多期中—酸性岩体侵位并发育具有成因上、时空上密切相关的一系列共生矿床组合(芮宗瑶等,1984;Sillitoe,2010),且具有典型的矿化—蚀变空间分带规律(毛德宝等,2003)。李建平等(2019)认为有关热液蚀变系统的矿物组合、地球化学特征及元素迁移行为、不同蚀变带中元素变化规律的深入研究,有利于提高成矿作用的认识。矿化及蚀变矿物组合分带是找矿的直接标志,能指示矿床的大致空间位置,在寻找隐伏矿床(体)、判断矿床规模等方面起着重要作用(池三川,1994)。矿化及蚀变矿物组合分带特征作为一种深部找矿预测的重要手段发挥着显著的作用(于森等,2013;金小燕等,2013)。

黄沙坪钨锡铜铅锌多金属矿床位于钦杭成矿带和南岭成矿带的交汇部位,同时发育与石英斑岩有关的Cu—Pb—Zn成矿系统和与隐伏花岗斑岩相关的W—Sn—Cu—Pb—Zn多金属成矿系统,是湘南地区岩浆热液成矿系统的典型代表(原垭斌等,2018;韩润生和赵冻,2022;Zhao et al., 2022)。何厚强等(2010)、龚述清等(2011)、汪林峰等(2013)围绕黄沙坪钨锡铜铅锌多金属矿床矿化—蚀变分带开展研究,认为该矿床以岩体为中心向外呈现出斑岩体(石英斑岩、花岗斑岩)→蚀变斑岩体→矽卡岩→矽卡岩化大理岩→大理岩化灰岩→灰岩的分带规律,并具中高温矽卡岩型Fe、W、Sn、Bi、Mo、Cu矿→中温矽卡岩型Cu、Pb、Zn矿→中低温热液充填交代型Pb—Zn—Ag矿的正向水平分带特征。但是,不同矿化—蚀变带中特征矿物组合及其变化规律如何?成矿指示元素及其比值在平面和垂向上的变化规律如何?这些问题的研究不够深入,影响到深部找矿预测勘查和成矿理论的深化。本文应用热液矿床的大比例尺蚀变岩相定位找矿预测方法(韩润生,2014),通过野外地质观察、坑道编录及微观分析,总结各带内矿物组合特征,详细划分矿床矿化—蚀变分带,并结合元素地球化学总结矿化元素分带特征,进一步建立了该矿床矿化—蚀变空间分带模式,该研究对该区深部隐伏岩体的追索、隐伏矿体预测及斑岩矿床成矿理论的深化研究具有重要意义。

2 矿床地质概况

2.1 成矿地质背景

湘南地区处于扬子板块与华夏板块拼合带,属钦

杭成矿带和南岭成矿带叠合部位,其特殊的大地构造背景及经历多期次的构造岩浆活动,促使岩浆沿构造有利部位上侵,并伴随大规模岩浆—热液—成矿事件,形成了湘南钨锡多金属矿集区(毛景文等,2007;刘晓菲等,2012;Yuan et al., 2015;杜云等,2022;沈宏飞等,2022)。黄沙坪矿床处于耒阳—临武南北向构造带和郴州—临武断裂带的交汇部位(图1a),是湘南钨锡多金属矿集区的重要组成部分,因其构造岩浆活动频繁而强烈,造成了区内复杂多样的地质构造及矿化—蚀变分带特征(黄革非,1999)。

出露地层以上泥盆统和下石炭统为主,包括余田桥组(D_{3s})、锡矿山组(D_{3x})、陡岭坳组(C_{1d})、石磴子组(C_{1s})、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。其中,石磴子组灰岩是本区最有利的赋矿层位。矿区发育一系列复式褶皱和斜冲断层(图1b),以宝岭—观音打座复式倒转背斜和近SN—NEE向的F₁、F₂、F₃走向斜冲断层为主,并配以NWW向F₀、F₆、F₉断层,构成了矿区总的构造格架,控制着矿区岩体的产出,进而控制了区内矿体类型及分布。区内岩浆岩主要为石英斑岩和花岗斑岩,一般呈岩枝状产出,为本区主要的成矿地质体。石英斑岩分布于宝岭—观音打座一带,而花岗斑岩为隐伏岩体,分布于矿区东南部,均与矿化关系密切。空间上,石英斑岩和花岗斑岩分别控制着斑岩型Cu—Pb—Zn矿化体、矽卡岩型Cu矿化体和矽卡岩型W—Sn—Bi—Mo矿化体的产出。

2.2 矿床地质特征

该矿床矿化类型齐全,发育一套斑岩型(Cu—Pb—Zn)—矽卡岩型(W—Sn—Bi—Mo)—热液脉型(Pb—Zn—Ag)多金属矿床组成的岩浆热液成矿系统。矿体类型和数目众多,现已圈定磁铁钨钼和铅锌铜矿体共计500余个。其中磁铁钨钼矿体的分布与隐伏花岗斑岩有关,主要产于接触带矽卡岩中。矿区南部W216矿体群,为区内最大的W—Sn—Bi—Mo矿体,属于超大矽卡岩型W—Sn—Bi—Mo多金属矿体,矿体群宽60~430 m,矿体平均品位:WO₃(0.260%)、Mo(0.072%)、Bi(0.046%)、Sn(0.181%)、TFE(14.73%~23.42%),呈不规则的环带状围绕花岗斑岩分布(龚述清等,2015)。单矿体呈似层状、透镜状、不规则状等产出。热液充填交代型铅锌多金属矿体主要产于岩体外接触带的重结晶(大理岩

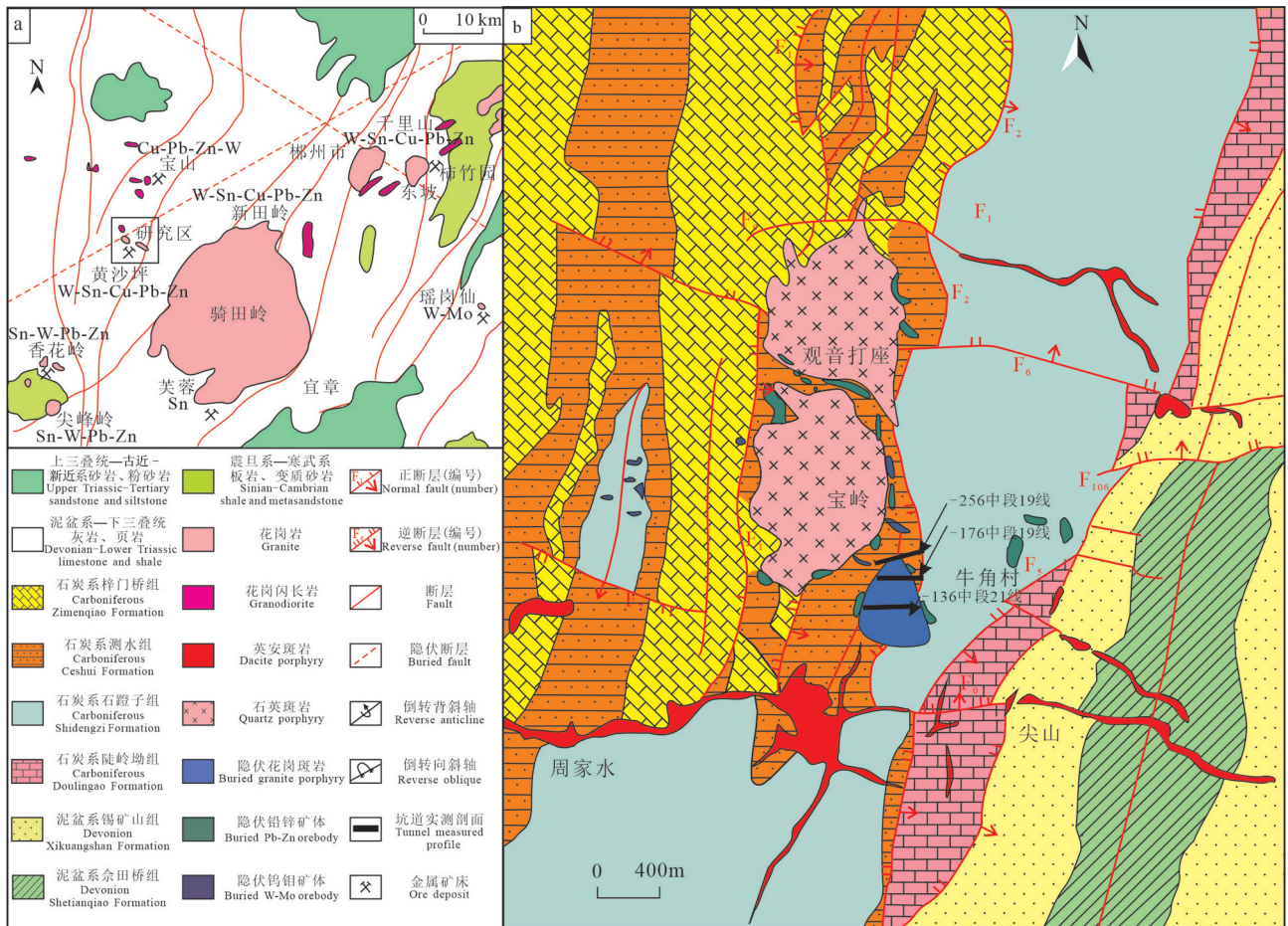


图1 湘南地区区域图和黄沙坪矿区地质图(a据 Peng et al., 2006; b据雷泽恒等, 2010)

Fig.1 Regional map of Southern Hunan and geological map of the Huangshaping deposit(a after Peng et al., 2006; b after Lei Zeheng et al., 2010)

化)灰岩中,单矿体呈脉状、似层状、透镜状、不规则状产出。矿石具块状、团块状、浸染状、细脉状、网脉状构造,主要矿石矿物为磁铁矿、磁黄铁矿、白钨矿、辉钼矿、锡石、辉铋矿,其次为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿等(图2),呈自形—半自形、半自形—他形、交代残余、碎裂结构。

根据矿脉穿插关系、矿物共生组合、生成顺序及矿石组构等特征,将该矿床成矿过程划分为5个阶段:①干砂卡岩阶段:主要生成石榴石、透辉石、硅灰石等干砂卡岩矿物,及少量的长石和石英,矿石矿物以磁铁矿、白钨矿为主,含少量锡石;②含水砂卡岩阶段:形成大量符山石、角闪石、绿帘石、绿泥石等含水砂卡岩矿物,且交代早期砂卡岩矿物,矿石矿物以磁铁矿、白钨矿、辉钼矿、辉铋矿、锡石为主,脉石矿物主要为长石和萤石;③中高温硫化

物阶段:脉石矿物主要为石英、绿泥石、萤石,矿石矿物以磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿为主,还有少量的辉铋矿、辉钼矿、方铅矿和闪锌矿;④中温硫化物阶段:主要生成大量的方铅矿和闪锌矿,少量的黄铁矿、黄铜矿,脉石矿物主要为石英和方解石;⑤中低温碳酸盐阶段:形成充填交代型方解石—铅锌矿体,矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿及少量黄铁矿,脉石矿物为方解石(表1)。

3 矿化-蚀变分带规律

3.1 主要蚀变类型

黄沙坪矿区岩浆热液活动强烈,岩体与围岩的接触带发育强烈的蚀变作用,表现为:①岩浆期后气液接触交代作用形成强烈的砂卡岩化;②岩浆侵入热变质作用形成大理岩、重结晶灰岩等;同时,两

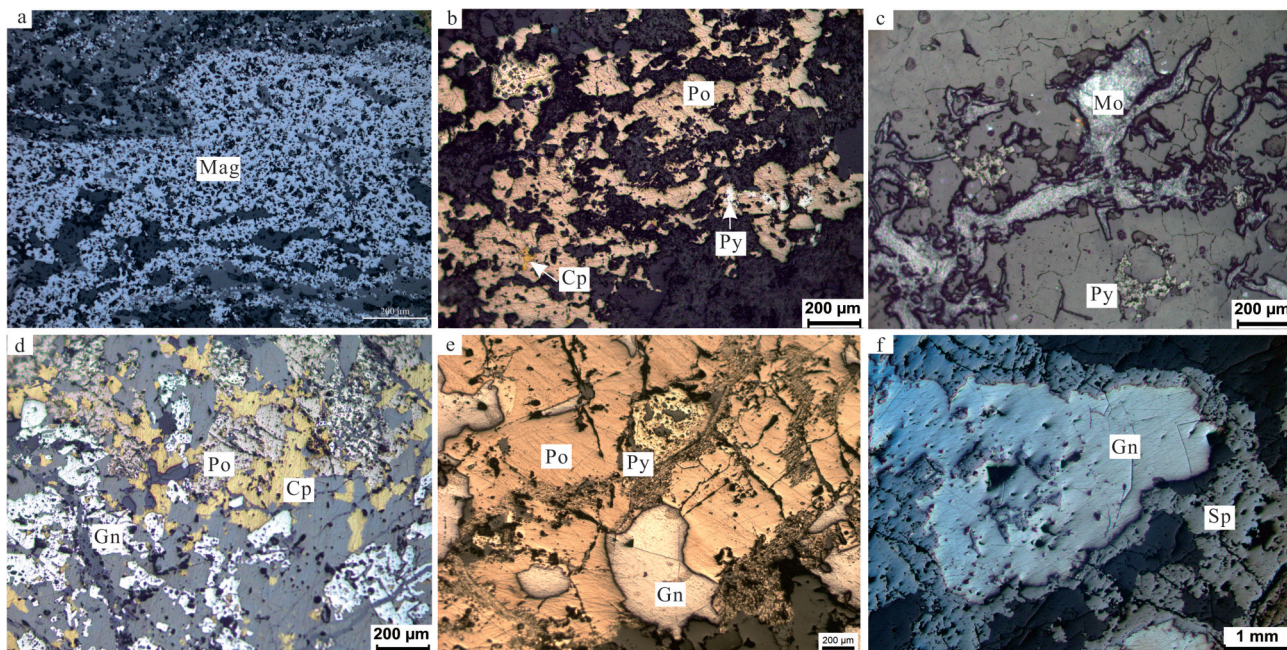


图2 黄沙坪矿区典型矿石组构显微镜下照片

a—自形—半自形粒状磁铁矿；b—他形粒状磁黄铁矿集合体交代他形粒状黄铜矿与黄铁矿集合体；c—浸染状辉钼矿与溶蚀状黄铁矿；d—他形粒状磁黄铁矿被他形粒状黄铜矿和方铅矿交代；e—他形粒状磁黄铁矿集合体被方铅矿交代，方铅矿呈自形晶集合体，溶蚀状黄铁矿；f—闪锌矿包裹溶蚀方铅矿；Mag—磁铁矿；Po—磁黄铁矿；Py—黄铁矿；Cp—黄铜矿；Mo—辉钼矿；Gn—方铅矿；Sp—闪锌矿

Fig.2 Micrographs showing typical textures of ores in the Huangshaping deposit

a—Euhedral-subhedral shapes granular magnetite; b—Hypautomorphic granular pyrrhotite aggregate metasomatic chalcopyrite and pyrite aggregate; c—Disseminated molybdenite and dissolution pyrite; d—Metamorphic pyrrhotite was replaced by metamorphic chalcopyrite and galena; e—Hypautomorphic granular pyrrhotite was metasomatic by galena, galena is an hypautomorphic granular, and dissolution pyrite; f—Sphalerite encapsulated and dissolution galena; Mag—Magnetite; Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite; Cp—Chalcopyrite; Mo—Molybdenite; Gn—Galena; Sp—Sphalerite

者都伴随了大规模的多阶段多金属成矿作用。其中，接触带内发育矽卡岩化、硅化、绢云母化；灰岩中见有大理岩化、硅化等蚀变；外接触带灰岩中仅见较弱的方解石化(图3)。

矿区斑岩具明显的蚀变作用，长石斑晶和黑云母均不同程度的蚀变为绿泥石(图4e)和碳酸盐，常呈鳞片状集合体、粒状、板柱状产出，为岩体自蚀变产物，同时，后期碳酸盐脉、石英脉穿切交代斑岩且伴有黄铁矿等金属矿物的生成。矽卡岩化为本区最重要的一种蚀变类型，主要发生在矿区东南部隐伏花岗斑岩体的顶部或两侧与碳酸盐岩接触带部位，尤其是在顶部和两侧凹陷处最为发育，它控制了矽卡岩型磁铁钨钼(锡、铋)矿体的产出；硅化在岩体、矽卡岩和热液脉型铅锌矿体内均有分布，近岩体部位蚀变较强烈，多呈团斑状产出(图4d)或脉(细脉—网脉)状穿切花岗斑岩(图4a、d、g)，在矽卡岩中常形成硅灰石脉(图4g)穿切矽卡岩；黄铁矿化分布广泛，多成细粒半自形—他形晶，常呈星点状、

浸染状和脉状分布于斑岩体、矽卡岩及矽卡岩型矿体、热液脉型矿体中及灰岩与方解石接触部位；萤石化发育于矽卡岩、热液脉型铅锌(银)矿体中，颜色常呈浅紫—浅绿—白—无色，自形—他形粒状结构，脉状、团块状产出；绿泥石化主要见于矽卡岩中，在蚀变斑岩中也见少量绿泥石化，矽卡岩内常见绿泥石呈细脉状穿插交代早期矿石矿物及矽卡岩矿物(石榴石、钙铁辉石、透辉石等)；碳酸盐化以方解石化为主，较为普遍，在灰岩中分布最广，常呈团块状、脉状产出。此外，矿区内还发育有钾长石化、绢云母化、大理岩化和灰岩重结晶作用等。但与矿化关系密切的主要有矽卡岩化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化等。

3.2 分带规律

本文以-136 m中段21号、-176 m中段19号、-256 m中段19号(图3)典型穿脉作为研究对象，通过大比例尺坑道剖面精细测量(韩润生, 2014)，结合不同蚀变矿物类型、矿物共生组合、矿物相对含

表1 黄沙坪多金属矿床矿物生成顺序

Table 1 Paragenetic sequence of minerals in the Huangshaping polymetallic deposit

成矿期次	矽卡岩期		石英-硫化物期		
	干矽卡岩阶段	湿矽卡岩阶段	中高温硫化物阶段	中温硫化物阶段	中低温碳酸盐阶段
石榴子石	—————				
透辉石	—————				
硅灰石	—————				
符山石		—————			
角闪石		—————			
绿帘石		—————			
绿泥石		—————	—————		
磁铁矿		—————			
白钨矿		—————			
辉钼矿		—————			
辉铋矿		—————			
锡石		—————			
磁黄铁矿			—————		
黄铁矿			—————		—————
黄铜矿			—————		
闪锌矿			—————		—————
方铅矿			—————		—————
云母			—————		
长石	—————				
石英	—————		—————		
萤石		—————	—————		
方解石				—————	—————
矿物共生组合	Grt+Di+Wo+Fsp+Qtz	Ves+Hbl+Ep+Chl+Fl+Fsp Mag+Sh+Mo+Bi+Cst+Po	Fl+Qtz+Chl+Cal Po+Py+Cp+Gn+Sp	Cal+Chl+Fl+Qtz Po+Py+Cp+Gn+Sp	Cal+Qtz+Py+Gn+Sp
典型组构	—	自形—半自形结构 脉状、浸染状、 块状—团块状构造	自形—半自形—他形晶、 包含、交代结构 块状—团块状、脉状、 溶蚀状构造	自形—半自形—他形晶、 包含、交代结构 块状—团块状、脉状、 溶蚀状构造	自形—半自形、 包含、交代结构 脉状、条带状、 溶蚀状构造

——— 矿物含量较多
————— 矿物含量较少
注:Grt-石榴石;Di-透辉石;Wo-硅灰石;Fsp-长石;Qtz-石英;Ves-符山石;Hbl-角闪石;Ep-绿帘石;Chl-绿泥石;Fl-萤石;Cal-方解石;Mag-磁铁矿;Sh-白钨矿;Po-磁黄铁矿;Mo-辉钼矿;Bi-辉铋矿;Cst-锡石;Py-黄铁矿;Cp-黄铜矿;Gn-方铅矿;Sp-闪锌矿。

量等特征和显微鉴定(表2),对空间上该矿床的矿化-蚀变进行深入剖析。由此,将该矿床矿化-蚀变划分为五个带:钨钼(黄铁)矿化-硅化-绢云母化花岗斑岩带(I)→磁铁(钨锡)矿化石榴石矽卡岩带(II-1)→钨钼-磁黄铁矿化石榴石矽卡岩带(II-2)→铅锌矿化结晶灰岩带(III)→强方解石化灰岩带(IV)(图3)。

3.2.1 钨钼(黄铁)矿化-硅化-绢云母化花岗斑岩带(I)

该带见于岩体边缘相,与矽卡岩接触部位,具

较弱的矽卡岩化,沿岩体的节理脉内充填细脉浸染状钨钼矿化。带内主要蚀变类型为硅化、绢云母化和少量晚阶段黄铁矿化、铅锌矿化和碳酸盐化(局部偶见晚期细粒方解石交代花岗斑岩)。石英常呈团斑状、脉状穿切花岗斑岩体(图4a、d、g)。因蚀变类型和强度不同,花岗斑岩颜色呈现出差异性,表现为浅灰—灰绿—浅肉红色(图4a、d、g),斑状结构、细粒花岗结构等,块状构造。岩体中斑晶含量为15%~25%,以石英、钾长石为主,少量斜长石和黑云母,基质一般呈细晶结构,成分与斑晶类似。石英斑晶呈半自形—

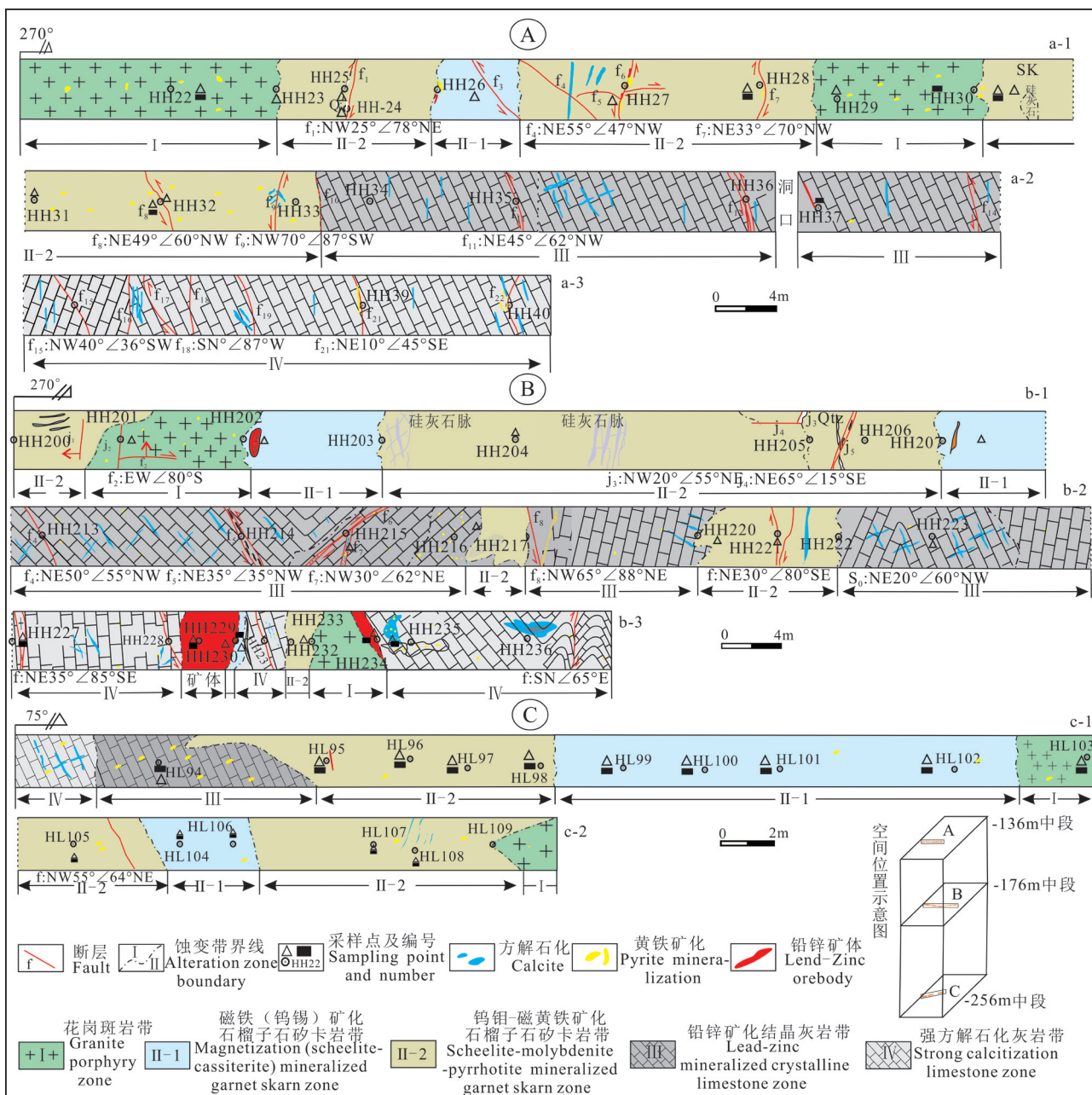


图3 黄沙坪矿区坑道编录剖面图

A—-136 m中段21号穿脉;B—-176 m中段19号穿脉;C—-256 m中段19号穿脉

Fig.3 Mine geological record of the Huangshaping deposit

A--136 m middle level 21 transverse drift; B--176 m middle level 19 transverse drift; C--256 m middle level 19 transverse drift

他形粒状(粒径大小约2 mm)结构,呈浑圆状或港湾状;钾长石呈自形一半自形条状,局部发生绢云母化(图4b),当蚀变强烈时使斜长石完全蚀变为绢云母,绢云母呈鳞片状(图4c、f);岩体中斑晶或基质中云母也可蚀变为绿泥石(图4e)。

3.2.2 多金属矿化矽卡岩带(II)

见于花岗斑岩体与围岩接触带,该带蚀变强、

厚度大,常形成矽卡岩型铁钨锡钼钨多金属矿体,矿体一般独立产出,见于岩体的顶部及凹陷部位,呈透镜状、似层状产出,磁铁矿体规模小且分布零散,钨钼矿体规模大而连续。根据其矿物组合可划分为两个亚带。

(1)磁铁(钨-锡)矿化石榴石矽卡岩带(II-1)

常见于岩体接触带靠近斑岩一侧,为磁铁矿化

表2 黄沙坪多金属矿床各蚀变带蚀变、矿物、结构及矿化特征

Table 2 Alteration, mineral, structural and mineralization characteristics of different altered zone in the Huangshaping polymetallic deposit

矿化-蚀变分带	钨钼(黄铁)矿化-硅化-绢云母化花岗斑岩带(I)	磁铁(钨锡)矿化石榴石矽卡岩带(II-1)	钨钼-磁黄铁矿化石榴石矽卡岩带(II-2)	铅锌矿化结晶灰岩带(III)	强方解石化灰岩带(V)
矿化-蚀变类型	钨钼矿化+黄铁矿化+硅化+绢云母化+碳酸盐化	磁铁矿化+钨锡矿化+黄铁矿化+绿帘石化	磁黄铁矿化+辉钼矿化+(铅锌矿化)+绿帘石化+石榴石化+符山石化+萤石化	方铅矿化+闪锌矿化+黄铁矿化+方解石化+硅化	方解石化+黄铁矿化+硅化
主要矿物	石英、长石	磁铁矿、透辉石、硅灰石、绿帘石	白钨矿、辉钼矿、磁黄铁矿(方铅矿、闪锌矿)、石榴石、符山石、透辉石、角闪石、萤石、绿帘石、绿泥石	方铅矿、闪锌矿、方解石	方解石
次要矿物	黄铁矿、绢云母	白钨矿、锡石、黄铁矿、石榴石	锡石、黄铁矿、黄铜矿、石英、方解石	黄铁矿、石英	黄铁矿、石英
矿石结构	自形一半自形粒状结构,浸染状构造	自形一半自形-他形粒状结构,团块状、浸染状构造	半自形-他形、交代、包含结构,浸染状、脉状构造	交代结构脉状构造	自形一半自形粒状结构,脉状构造
蚀变强度	较强	强	强	较强	较弱
石英/%	50~85	3~5	3~5	少量	少量
方解石/%	微量	5~8	5~8	10~15	15~25
石榴石/%	无	5~10	15~20	无	无
磁铁矿/%	无	15~20	3~5	无	无

矽卡岩的主要产出部位,常形成矽卡岩型磁铁、钨锡多金属矿体,带内蚀变类型主要为透辉石化、绿帘石化、绿泥石化、硅化。岩石呈灰绿色—灰黑色(图5a、d、g),强磁性,具半金属光泽,块状构造。矿石矿物主要为磁铁矿,并含有白钨矿、锡石及少量辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿。磁铁矿呈细脉浸染状穿切辉石绿帘石矽卡岩(图5a、b),镜下呈灰色,呈半自形—他形粒状结构(图5e);晚期闪锌矿呈棕褐色产于矽卡岩中(图5c);黄铁矿呈细脉状穿切矽卡岩(图5b)。脉石矿物主要为透辉石、硅灰石、绿帘石和石榴石,晚世代的硅灰石呈脉状—网脉状(脉宽1~8 cm、密度9~12条/m)穿切磁铁矿化矽卡岩;透辉石呈无色—黄绿色自形粒状集合体被晚期绿帘石、磁铁矿和闪锌矿所交代(图5c);石榴石则多呈半自形—他形产出。

(2)钨钼-磁黄铁矿化石榴石矽卡岩带(II-2)

产于斑岩与结晶灰岩接触带,靠近灰岩一侧,是钨锡铋钼(铜)多金属矿体主要富集部位。蚀变类型为符山石化、绿帘石化、透辉石化、石榴石化、萤石化和晚期绿泥石化、方解石化等。带内岩石呈浅红褐色—红棕色—灰绿色(图6a、d、g、j),块状构造。矿石矿物主要为锡石、白钨矿、辉钼矿、磁黄铁矿、辉铋矿、方铅矿、闪锌矿,并含有少量磁铁矿、黄

铁矿、黄铜矿等。辉钼矿呈细脉状、稀疏浸染状穿切石英及矽卡岩(图6i);磁黄铁矿呈稠密浸染状分布于灰绿色矽卡岩内;方铅矿呈铅灰色粒状集合体、闪锌矿呈棕褐色稠密浸染状分布于灰绿色矽卡岩中,偶见星点状辉钼矿化(图6j)。带内矽卡岩矿物种类复杂,主要包括石榴石、符山石、辉石、角闪石、绿帘石、萤石,含少量方解石、石英。石榴石粒度大小不一(粒径0.1~0.5 cm),呈自形一半自形粒状(图6a)被晚阶段萤石、符山石、角闪石所交代;透辉石为深绿色,可见明显的柱状晶体;符山石呈放射状集合体,自形程度较高(图6a),表面见绿帘石化;萤石呈紫色,油脂光泽,解理较为发育,呈团块状产出(图6j),与角闪石相互包裹(图6f),为同期产物;方解石呈团斑状、脉状(细脉状—网脉状,脉宽0.1~0.5 cm)穿切交代石榴石矽卡岩。石英呈脉状,溶蚀交代矽卡岩,石英、方解石与矽卡岩接触部位见明显的溶蚀边结构。镜下磁黄铁矿呈黄白色、黄褐色稠密浸染状产出(图6e、h);辉钼矿呈细脉浸染状(图6i);黄铁矿呈铜黄色,含量小于5%,自形一半自形粒状(图6k)、溶蚀状结构(图6i);方铅矿与闪锌矿共生(图6k);单偏光镜下石榴石为无色—土黄色,切面形状多为菱形和六边形;符山石呈放射状集合体(图6c);辉石呈无色或黄褐色,多为短柱状、

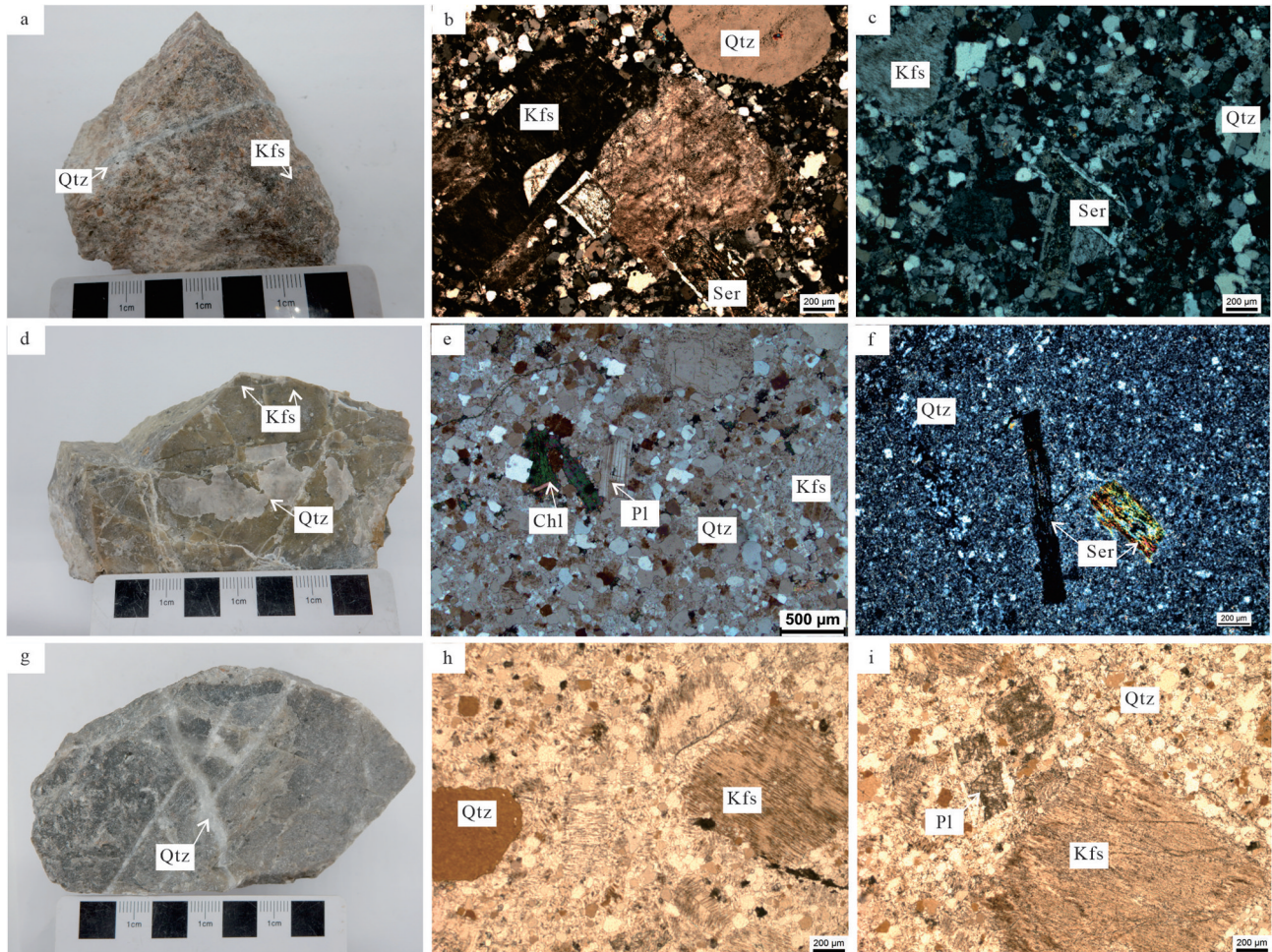


图4 黄沙坪多金属矿床斑岩体内典型矿化蚀变现象镜下特征

a—花岗斑岩,石英呈脉状穿切花岗斑岩;b,c—斑状结构、基质交织结构,斑晶主要为石英、钾长石,石英斑晶(粒径约2~3 mm)呈淡黄褐—灰白色,多呈基质产出,钾长石斑晶呈棕色自形板状、板柱状产出,长石微晶均发生蚀变,绢云母化强烈;d—灰绿色硅化、绿帘石化花岗斑岩;e—斑晶为斜长石,蚀变较弱,可见典型的聚片双晶,基质为显微细粒状石英、钾长石微晶,可见岩石中斑晶或基质中黑云母蚀变为绿泥石;f—钾长石斑晶蚀变成绢云母,仅残留长石假象;g—灰白色花岗斑岩,两期石英脉穿切花岗斑岩;h,i—斑晶为石英、钾长石,钾长石蚀变较强,基质为显微细粒状石英、钾长石微晶;Qtz—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Ser—绢云母;Chl—绿泥石

Fig.4 Micrographs showing mineralization and alteration of porphyry bodies in the Huangshaping polymetallic deposit
a—Granite-porphry, quartz vein cut through granite-porphry; b, c—Porphyritic texture, matrix interwoven structure, phenocrysts are mainly quartz and K-feldspar, and quartz phenocryst (particle size about 2~3 mm) is pale yellow-pale, mostly as matrix. The K-feldspar phenocryst is brown euhedral tabular and plate-column shaped, and K-feldspar microcrystals are altered, and the sericitization is strong; d—Gray-green silicified, epidotization granite porphyry; e—The phenocryst is plagioclase, with weak alteration, and typical polysynthetic twin are visible. The matrix are micro-fine-grained quartz and K-feldspar microcrystals. Phenocrysts in the rock or biotite in the matrix is changed into chlorite; f—K-feldspar phenocryst altered into sericite, leaving only feldspar pseudomorph; g—Gray-white granite porphyry, two-phase quartz vein cut through granite porphyry; h, i—Phenocrysts are quartz and K-feldspar, and K-feldspar has strong alteration, and the matrix is micro-fine-grained quartz and K-feldspar; Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Ser—Sericite; Chl—Chlorite

粒状;角闪石呈黄绿色,横截面为菱形,常蚀变为绿泥石、绿帘石(图6c)。

3.2.3 铅锌矿化结晶灰岩带(III)

为热液蚀变的外带,产于结晶灰岩中,呈浅灰色—灰黑色,块状构造。沿节理等小构造或层间断裂带常形成充填交代型Pb—Zn—Ag矿体,多呈脉

状、透镜状及不规则状,并伴有硅化、碳酸盐化,硅化呈自形—半自形粒状、脉状产出;碳酸盐化以方解石化为主,方解石呈脉状(脉宽0.5~2.5 cm)、团块状(直径约3.5 cm)交代灰岩(图7),脉内可见星点状黄铁矿化。

3.2.4 强方解石化灰岩带(IV)

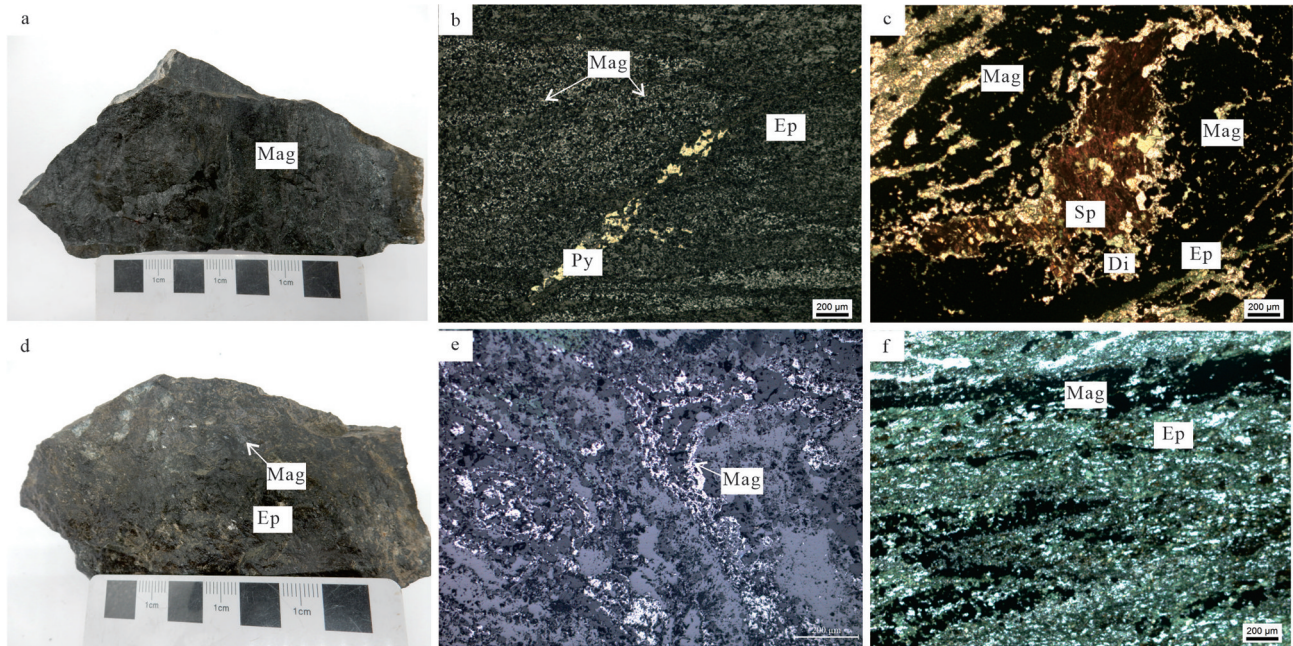


图5 黄沙坪多金属矿床磁铁矿化矽卡岩典型矿化蚀变现象镜下特征

a—灰绿色磁铁矿化矽卡岩; b—磁铁矿呈细脉浸染状、黄铁矿呈脉状产出,绿帘石化发育; c—微量闪锌矿和浸染状磁铁矿; d—灰绿色磁铁矿化矽卡岩; e—自形—他形粒状磁铁矿; f—磁铁矿呈细脉浸染状,绿帘石化发育; Ep—绿帘石; Di—透辉石; Mag—磁铁矿; Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿

Fig.5 Micrographs showing mineralization and alteration of magnetite skarn in the Huangshaping polymetallic deposit

a—Gray-green magnetized skarn; b—Magnetite is in the form of veinlet disseminated, and pyrite is produced in veins, epidotization development; c—Trace sphalerite and disseminated magnetite; d—Gray-green magnetized skarn; e—Automorphic-xenomorphous granular magnetite aggregate; f—Magnetite is in the form of veinlet disseminated and epidotization development; Ep—Epidote; Di—Diopside; Mag—Magnetite; Sp—Sphalerite; Py—Pyrite

此带无矿体产出,岩石呈浅灰色,块状构造。灰岩重结晶作用不明显,蚀变主要为方解石化、白云石化和黄铁矿化。脉石矿物主要为方解石,呈脉状-网脉状、局部斑团状穿切、交代灰岩,内可见大小不一的灰岩角砾被溶蚀包裹。黄铁矿呈细粒稀疏浸染状产出,局部被方解石包裹,且方解石与灰岩相接触部位发育围绕方解石产出的细脉状黄铁矿。与方解石接触的灰岩见明显的重结晶作用(图8a,b),向围岩逐渐过渡为正常灰岩。

可以看出,从斑岩体至围岩,呈现出明显的矿化-蚀变分带规律:由岩体内硅化、绢云母化过渡为接触带的符山石化、绿帘石化、透辉石化、石榴石化、萤石化等,以及晚期的绿泥石化,至围岩中碳酸盐化等,晚期矿物对早期矿物的穿插、交代作用明显,使各带内矿物组合更为复杂。相应矿化也呈现出斑岩体内钨钼矿化→矽卡岩型磁铁矿化-钨锡矿化→矽卡岩型钨锡铋钼(铜)矿化→矽卡岩型含钨锡铜铅锌化→热液交代充填型铅锌银矿化的分

带。矿石组构总体上也呈现一定的变化规律(表2):自形—半自形—他形粒状结构(图2a)→自形—半自形粒状、交代、包含结构(图2c、d、e),浸染状—团块状构造→浸染状—团块状、脉状构造。矿化-蚀变分带特征能反映流体演化、围岩成分、温度变化、及氧化还原环境等特征(彭惠娟等,2012)。根据该区矿化-蚀变分带、蚀变矿物组合特征讨论所形成的化学过程和条件,能进一步解释组分的分异与蚀变分带的形成。在矽卡岩化早期阶段,热液具有氧化性,导致岩浆与围岩发生氧化作用,且伴随大量磁铁矿的生成;晚期自生蚀变矿物黄铁矿反映出流体环境为还原条件,显示了流体从氧化→还原的变化过程。矿化从早期高温钨锡铋钼→中温铅锌铜→中低温铅锌银的变化规律显示随着流体演化的温度逐渐降低。黄沙坪矿区不同阶段特征矿物中流体包裹体研究表明:早期矽卡岩阶段的石榴石中包裹体加热到600℃并未达到均一;晚矽卡岩阶段白钨矿中包裹体温度为400~460℃,紫色萤石

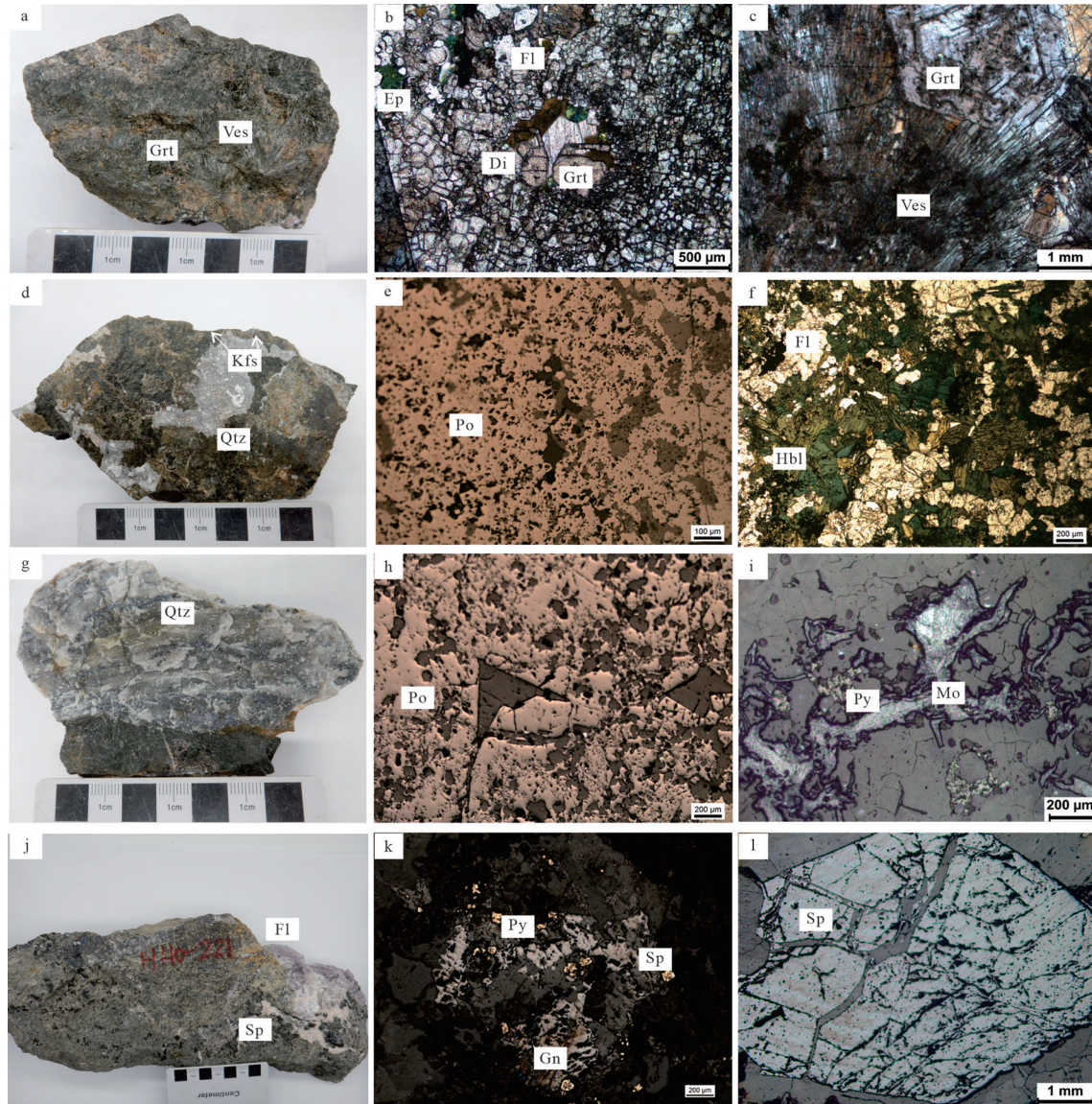


图6 黄沙坪多金属矿床磁黄铁-钼矿化石榴石矽卡岩典型矿化蚀变特征

a—灰绿色石榴石符山石矽卡岩；b—辉石交代石榴石，萤石呈粒状，绿帘石化发育；c—符山石与石榴石；d—灰绿色磁黄铁矿化矽卡岩；e—稠密浸染状磁黄铁矿；f—黄褐、蓝绿色辉石、黄绿色角闪石和部分转变为绿帘石与绿泥石被萤石交代；g—灰绿—灰白色辉钼矿化矽卡岩；h—稠密浸染状磁黄铁矿；i—辉钼矿和溶蚀状黄铁矿；j—灰色铅锌矿化萤石化矽卡岩；k—方铅矿与闪锌矿共生，较早形成的自形一半自形粒状黄铁矿被较晚形成的方铅矿、闪锌矿交代，并包裹于方铅矿、闪锌矿中；l—自形闪锌矿，呈碎裂状；Qtz—石英；Kfs—钾长石；Ep—绿帘石；Hbl—角闪石；Di—透辉石；Grt—石榴石；Ves—符山石；Fl—萤石；Po—磁黄铁矿；Mo—辉钼矿；Gn—方铅矿；Sp—闪锌矿；Py—黄铁矿

Fig.6 Micrographs showing mineralization and alteration of pyrrhotite-zinc mineralization garnet skarn in the Huangshaping polymetallic deposit

a—Grey-green garnet vesuvianite skarn; b—Pyroxene replaced garnet, fluorite is grainy, and epidotization is developed; c—Idocrase and garnet; d—Grayish green pyrrhotite skarn; e—Densely disseminated pyrrhotite; f—Yellow-brown, blue-green pyroxene, yellow-green amphibole, and partial conversion to chlorite and chlorite are replaced by fluorite; g—Gray-green-off-white molybdenum mineralized skarn; h—Densely disseminated pyrrhotite; i—Molybdenite and dissolution pyrite; j—Gray lead-zinc mineralized fluorite skarn; k—Galena and sphalerite are symbiotic, and the earlier-formed and euhedral-subhedral granular pyrite was replaced by later-formed galena and sphalerite and wrapped in galena and sphalerite; l—Euhedral sphalerite, fragmented; Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Ep—Epidote; Hbl—Hornblende; Di—Diopside; Grt—Garnet; Ves—Vesuvianite; Fl—Fluorite; Po—Pyrrhotite; Mo—Molybdenite; Gn—Galena; Sp—Sphalerite; Py—Pyrite

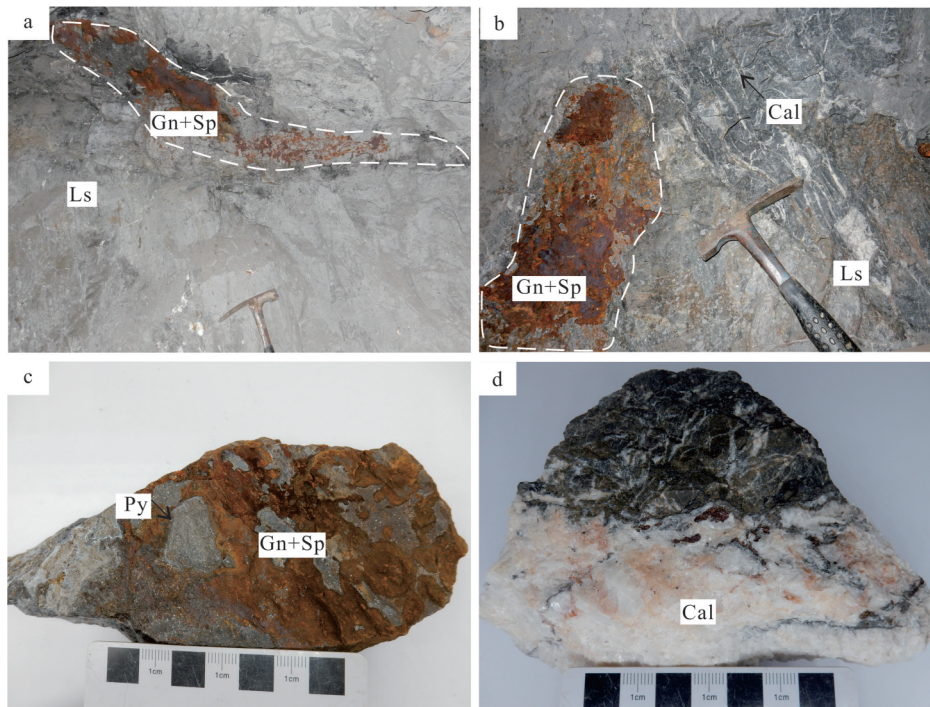


图7 黄沙坪多金属矿床结晶灰岩典型矿化蚀变现象特征

a, b—不规则状充填交代型铅锌矿体; c—杂色块状铅锌矿石; d—重结晶灰岩, 白色—米黄色方解石呈脉状—网脉状穿切灰岩, 灰岩与方解石接触部位可见黄铁矿化; Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿; Ls—灰岩; Cal—方解石

Fig. 7 Photos showing mineralization and alteration of crystalline limestone in the Huangshaping polymetallic deposit
a, b—Irregular filling replacement lead-zinc ore body; c—Variegated massive lead-zinc ore; d—Recrystallized limestone, white-beige calcite is vein-reticulate cutting limestone, and pyritization can be seen at the contact part between limestone and calcite; Gn—Galena; Sp—Sphalerite; Py—Pyrite; Ls—Limestone; Cal—Calcite

中包裹体温度介于250~303℃; 硫化物期与铅锌矿化有关的萤石温度集中在240~160℃(黄诚等, 2013), 也显示出成矿流体温度逐渐降低。

4 矿化元素及其比值空间分布规律

4.1 测试方法及分析结果

各蚀变带内典型样品的微量元素测试在中国科学院地球化学研究所完成, 强矿化和矿石样品的元素采用化学法分析, 其他元素采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定, 检测限为 1×10^{-5} (Pt)~159 (Cl) ng/mL, 分析速度>20个/h, 分析误差小于5%。

样品矿化元素测试结果详见表3。从表可知: 花岗斑岩中W、Mo元素含量较高, W含量变化于 104×10^{-6} ~ 2927×10^{-6} (平均 1332.5×10^{-6}); Mo含量变化于 28×10^{-6} ~ 1387×10^{-6} (平均 458×10^{-6}); 磁铁矿化矽卡岩中W含量介于 40.1×10^{-6} ~ 3010×10^{-6} (平均 1034×10^{-6}); Sn含量变化于 99×10^{-6} ~ 7117×10^{-6} (平均 1697.9×10^{-6}); Bi和Mo平均含量分别为 862×10^{-6} 、

767×10^{-6} ; 石榴石矽卡岩中W含量变化于 42.6×10^{-6} ~ 2690×10^{-6} (平均 750.5×10^{-6}); Sn含量则相对较高(平均 1222×10^{-6}); 铅锌矿化石榴石矽卡岩中Pb、Zn、Cu等含量相对较高, Zn平均含量高达 38190×10^{-6} , Pb平均含量为 17864×10^{-6} , Cu含量最高可达 1633.5×10^{-6} , W含量平均为 632×10^{-6} ; 结晶灰岩中Pb、Zn含量较高。

4.2 矿化元素和元素比值的空间变化规律

通过对单一成矿元素、成矿元素组合及元素比值指示指标的研究, 可揭示矿化指示元素在剖面上不同蚀变带中的变化规律, 进而建立定性与定量相结合的元素异常评价指标, 为隐伏矿体预测提供依据。

4.2.1 元素和元素比值平面分带特征

元素平面分带特征能直观反映矿化元素在不同蚀变带中的富集及变化规律, 本文以黄沙坪矿区-136 m、-176 m、-256 m实测剖面为例进行了系统分析, 选取各蚀变带典型样品进行了矿化元素Cu、Zn、Mo、Ag、Sn、W、Pb和Bi的分析, 由剖面图(图3)可见, 矿化或矿体赋存于岩体内部、接触带及

表3 黄沙坪多金属矿床矿化元素含量(除部分样品元素单位为%外,其他为 $\times 10^{-6}$)Table 3 Mineralization element contents of the Huangshaping polymetallic deposit (Except that some of the sample elements units are %, others $\times 10^{-6}$)

样品号	采样位置	岩性	矿化元素							
			Cu	Zn	Mo	Ag	Sn	W	Pb	Bi
HHc23		钨钼矿化花岗斑岩	7.8	55.5	376	0.2	10.3	0.2%	79.4	239.0
HHc25		矽卡岩化花岗斑岩	5.6	383.0	28.0	0.3	37.9	278.0	152.0	35.2
HHc26		磁铁矿化矽卡岩	5.8	284.0	106.0	0.3	712.0	775.0	11.7	663.0
HHc27	-136 m中段 21号穿脉	磁铁-钨锡矿化矽卡岩	15.3	242.0	141.0	0.4	0.2%	0.1%	43.9	126.0
HHc30-2		辉钼矿石榴石矽卡岩	4.7	124.0	0.2%	1.2	0.4%	558.0	22.5	16.6
HHc33-1		磁铁矿化矽卡岩	4.9	262.0	97.4	0.2	826.0	979.0	13.3	306.0
HHc33-2		方解石化细晶灰岩	14.1	432.0	15.8	0.7	71.6	117.0	169.0	90.7
HHc37		铅锌矿化灰岩	185.0	2.0%	41.8	1.1	210.0	87.8	86.0	34.2
HHc40		黄铁矿化灰岩	15.8	331.0	2.1	0.1	162.0	9.9	22.3	1.9
HH202-1		钨钼矿化花岗斑岩	6.0	462.0	0.1%	1.2	124.0	0.3%	111.0	0.2%
HH202-2		磁铁矿化矽卡岩	5.0	320.0	162.0	0.7	482.0	0.2%	68.8	0.1%
HHC205		萤石化石榴石绿帘石矽卡岩	5.6	180.0	169.0	0.8	0.2%	0.3%	23.0	638.0
HH206		磁铁矿化辉钼矿化矽卡岩	5.9	120.0	0.4%	4.3	147.0	742.0	181.0	0.3%
HH208-2	-176 m中段 19号穿脉	磁铁矿化矽卡岩	6.5	428.0	44.9	0.7	738.0	447.0	227.0	94.4
HH214		石榴石矽卡岩	8.3	281.0	294.0	0.2	278.0	726.0	23.3	202.0
HHC216		铅锌矿化石榴石矽卡岩	78.6	2.0%	65.1	9.5	886.0	138.0	0.7%	18.8
HHc221-2		铅锌矿化绿帘石化矽卡岩	38.1	1.3%	207.0	122.0	471.0	0.2%	4.0%	448.0
HHc221-3		方铅矿化铅锌矿化绿帘石矽卡岩	108.0	3.0%	0.1%	64.7	877.0	0.1%	5.6%	94.5
HHc230		黄铜矿-闪锌矿矿石	0.6%	14.0%	1.1	26.9	86.9	83.9	775.0	132.0
HHc232		铅锌-铜矿化灰岩	0.3%	0.9%	0.9	12.2	183.0	25.8	982.0	94.3
HLc111		花岗斑岩	5.3	63.3	41.0	1.9	105.0	104.0	37.9	31.8
HLc108		透辉石矽卡岩	9.9	340.0	4.8	0.7	766.0	160.0	24.3	29.1
HLc106		磁铁矿化绿帘石化透闪石矽卡岩	8.2	431.0	5.5	0.6	99.0	45.9	82.1	65.4
HLc105		磁铁矿化矽卡岩	13.6	138.0	32.9	0.5	58.4	47.0	23.6	47.3
HLc102		磁铁矿化绿帘石化矽卡岩	5.8	355.0	8.7	1.9	447.0	40.1	51.3	0.1%
HLc101	-256 m中段 19号穿脉	磁铁-钨锡矿化矽卡岩	10.9	707.0	534.0	1.5	0.2%	0.3%	79.9	755.0
HLc100		绿帘石化矽卡岩	8.8	231.0	996.0	0.5	0.7%	307.0	56.7	48.3
HLc99		磁铁矿化矽卡岩	11.8	396.0	272.0	2.0	0.3%	0.1%	449.0	683.0
HLc98		方解石化细晶灰岩	14.1	242.0	147.0	0.9	112.0	425.0	25.8	3.2
HLc97		透辉石矽卡岩	15.5	462.0	78.5	0.5	723.0	402.0	23.9	4.8
HLc96		绿帘石化矽卡岩	16.7	356.0	10.8	1.7	879.0	42.6	718.0	40.2
HLc95		锌矿化绿帘石化石榴石矽卡岩	145.0	2.0%	9.6	2.1	792.0	51.5	132.0	25.3
HLc94		方解石化结晶灰岩	157.0	81.5	16.2	0.2	7.6	17.9	17.6	8.9

结晶灰岩中。成矿元素丰度分析表明(表3,图9), W、Sn、Bi、Mo含量明显高于Cu、Ag、W、Sn、Bi、Mo是矽卡岩型磁铁钨钼矿体的指示元素,W、Mo在岩体内含量较高,在磁铁(钨锡)矿化石榴石矽卡岩带(Ⅱ-1)和钨钼-磁黄铁矿化石榴石矽卡岩带(Ⅱ-2)中含量达到峰值,到Ⅲ带含量降低;Cu元素含量在靠围岩一侧的矽卡岩中含量较高;Pb、Zn含量在靠围岩一侧的矽卡岩中(Ⅱ-2)及结晶灰岩中(Ⅲ)

含量较高。

因此,从岩体→矽卡岩→围岩,W、Sn、Bi、Mo含量先逐渐增高至Ⅲ带再逐渐降低,Cu含量在铅锌矿化矽卡岩中含量高,Pb、Zn含量在Ⅲ带达到峰值,Ag含量基本无变化。成矿元素组合从高温W、Sn、Bi、Mo→中高温Cu、Pb、Zn→中低温Pb、Zn、Ag的变化规律,反映出元素组合在平面上呈现出高温至低温的变化过程,这一变化规律与蚀变-矿化带现象

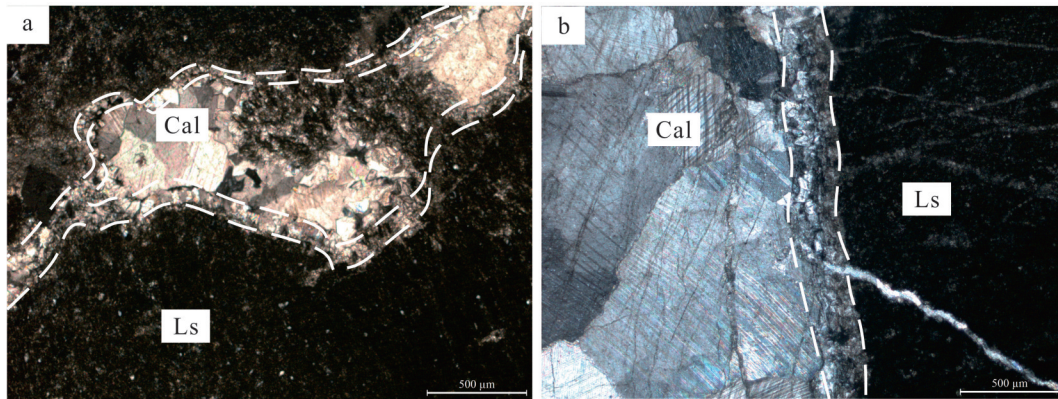


图8 黄沙坪多金属矿床灰岩带典型现象特征

Ls—灰岩;Cal—方解石

Fig.8 Typical phenomena of limestone zone in the Huangshaping polymetallic deposit

Ls—Limestone; Cal—Calcite

相符。

元素比值作为一项异常评价指标,在地球化学异常评价中起着重要的作用,通常选择高温元素(组合)与低温元素(组合)的比值作为元素异常评价指标。 W 、 Sn 、 Bi 、 Mo 为高温元素的典型代表, Pb 、 Zn 、 Ag 为低温元素的代表,通过高温元素(组合)与低温元素(组合)的比值,可降低因热液脉型金属的穿插对高温矽卡岩型钨锡钼成矿阶段的干扰,且可进一步强化矿化元素在不同蚀变带中的富集及变化规律,对指导隐伏花岗斑岩钨锡钼多金属找矿作用显著。本文通过选择 W/Zn 、 Mo/Zn 、 $Cu/(Pb+Zn)$ 、 $(W+Sn+Bi+Mo)/(Pb+Zn+Ag)$ 作为元素异常评价指标。由图10可知, W/Zn 、 Mo/Zn 高值区表示高温元素组合的分布范围,主要分布在岩体和靠近岩体一侧的矽卡岩中(II-1、II-2,图10a、b),花岗斑岩体中 W/Zn 、 Mo/Zn 比值较高,是由于岩体内发育钨钼矿化所引起的,到II-2带达到峰值,III带急剧下降; $Cu/(Pb+Zn)$ 比值分带图(图10c)可知 Pb 、 Zn 主要分布于结晶灰岩(III)中; $(W+Sn+Bi+Mo)/(Pb+Zn+Ag)$ 总体趋势呈现出先增加(至II-2带达到峰值)后减小的趋势(图10d),也表明了高温元素 W 、 Sn 、 Bi 、 Mo 总体上在I、II-1、II-2带中富集。根据 W/Zn 、 Mo/Zn 、 $(W+Sn+Bi+Mo)/(Pb+Zn+Ag)$ 比值特点表明钨锡钼钨硫化物更加靠近接触带及隐伏岩体,可根据其比值高低来追索隐伏岩体。

可以看出,无论是单元素的分带特征,还是元素比值分带特征都与成矿元素的平面分带相对应。从

斑岩体到围岩,表现为 W 、 $Mo \rightarrow Fe$ 、 W 、 Sn (Bi 、 Mo) $\rightarrow W$ 、 Sn 、 Bi 、 Mo (Cu) $\rightarrow Pb$ 、 Zn (W 、 Sn 、 Cu) $\rightarrow Pb$ 、 Zn 、 Ag ,即矿化类型依次为岩体内钨钼矿化 \rightarrow 矽卡岩型磁铁钨钼矿化 \rightarrow 矽卡岩型钨钼铜矿化 \rightarrow 矽卡岩型含锡铅锌矿化 \rightarrow 充填交代型铅锌银矿化,构成一个完整的与岩浆作用有关的斑岩成矿系统元素和矿物分带特征。指示由岩体向外带存在高温至低温的元素分布、矿物组合序列,反映了热液从高温到低温的演化规律以及流体的运移方向。

金属元素分带性主要是受成矿温度及地球化学因素影响(赵伦山和张本仁,1988),元素平面分带特征表现出以斑岩体为中心向围岩,具有高温至低温元素分布规律,反映了热液从高温至低温的演化规律及流体的运移方向。 W 、 Sn 等元素属于亲石元素, Sn 在氧化环境中易形成锡石,亲石元素易溶于硅酸盐熔融体中,只有在岩浆演化晚期才可以形成一定程度的富集,在F等挥发分的参与下发生两相不混溶(牟保磊,1999),导致 W 、 Sn 元素在II、III带中富集;而 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Ag 等金属元素属于亲硫元素,亲硫元素趋向于进入岩浆期后热液流体中,形成金属硫化物矿化。亲硫元素主要倾向于与极化变形较强的硫等元素相结合。在岩浆演化晚期,金属硫化物和硅酸盐形成互不相溶的二元不混溶相(牟保磊,1999),导致 Pb 、 Zn 元素在IV带中富集,另 Cu 的稳定性小于 Pb 、 Zn 、 Ag ,它的络合物最不稳定(唐菊兴等,2009),因此迁移距离受到限制,分布于矿化蚀变带的中部。

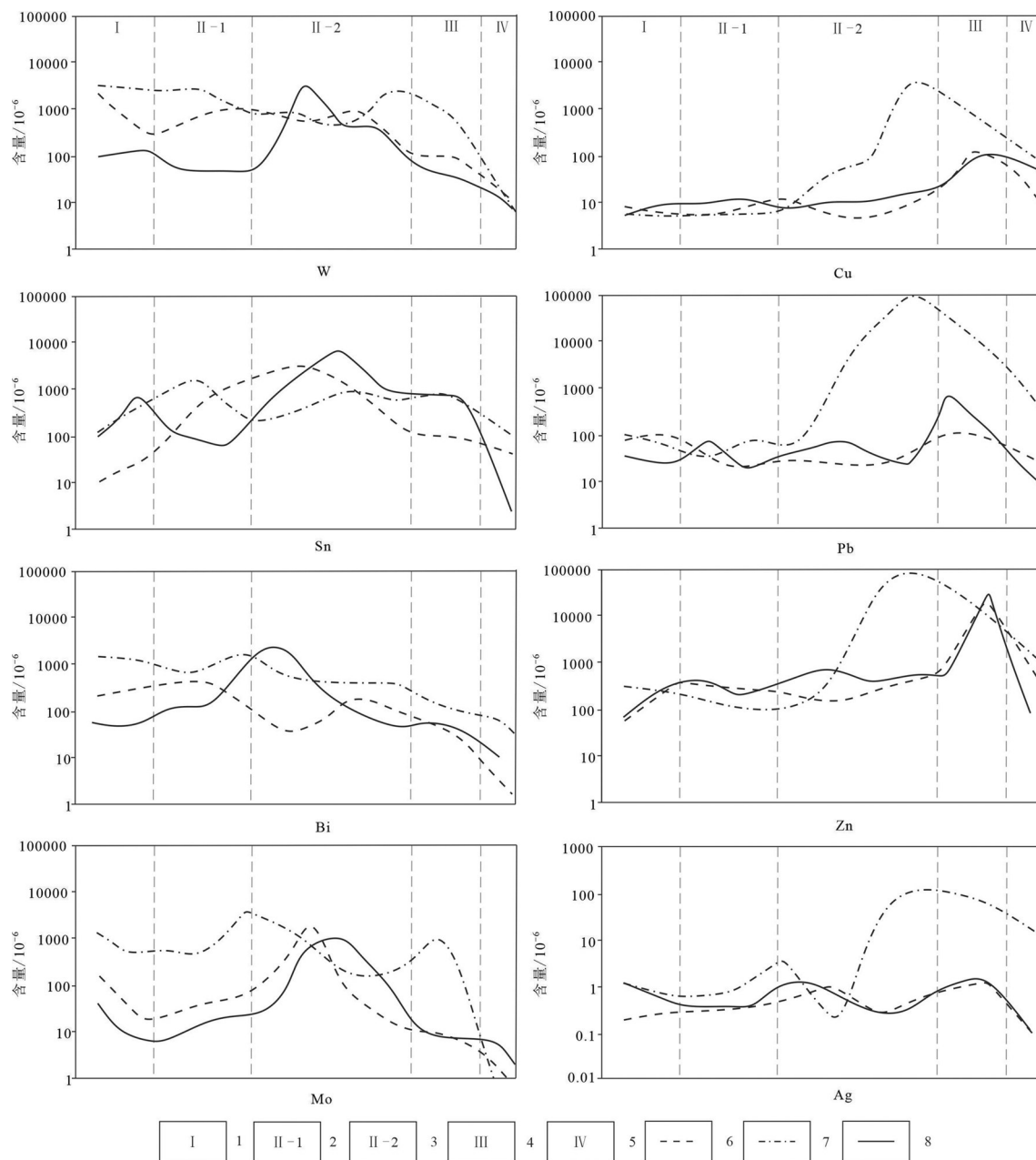


图9 黄沙坪多金属矿床矿化元素分带图

1—钨钼(黄铁)矿化-硅化-绢云母化花岗斑岩带;2—磁铁(钨锡)矿化石榴石矽卡岩带;3—钨钼-磁黄铁矿化石榴石矽卡岩带;4—铅锌矿化结晶灰岩带;5—强方解石化灰岩带;6—136 m中段21穿元素变化;7—176 m中段19穿元素变化;8—256 m中段19穿元素变化

Fig.9 Mineralized element zoning diagram of the Huangshaping polymetallic deposit

1—Scheelite-molybdenite (pyrite) mineralized-silicified-sericitized granite porphyry zone; 2—Magnetization (scheelite-cassiterite) mineralized garnet skarn zone; 3—Scheelite-molybdenite-pyrrhotite mineralized garnet skarn zone; 4—Lead-zinc mineralized crystalline limestone zone; 5—Strong calcilization limestone zone; 6--136 m middle level 21 transverse drift element change; 7--176 m middle level 19 transverse drift element change; 8--256 m middle level 19 transverse drift element change

4.2.2 元素垂向变化特征

不同平面上蚀变分带的宽度、类型、完整性和矿化元素的富集程度与岩体的侵入范围、岩体形态及岩体与围岩相互交代的程度等因素有关。黄沙

坪多金属矿床花岗斑岩体在空间上表现为连续的膨大-缩小特征,中部(-100~-400 m标高)主要为矽卡岩型磁铁、钨钼矿体,矿体一般呈独立产出,磁铁矿体规模小且分布零散,钨钼矿体规模大而连

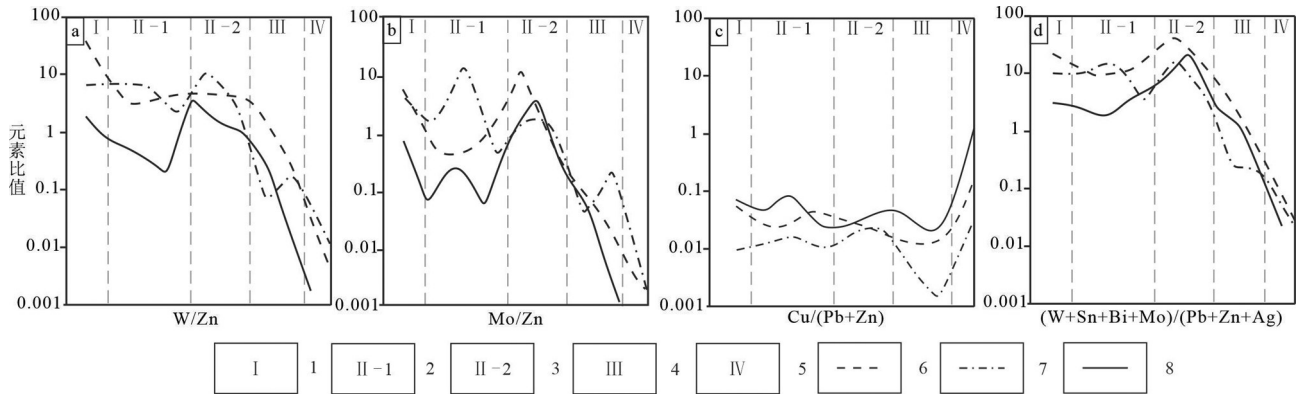


图10 黄沙坪多金属矿床矿化元素比值分带图

1—钨钼(黄铁)矿化-硅化-绢云母化花岗斑岩带;2—磁铁(钨锡)矿化石榴石砂卡岩带;3—钨钼-磁黄铁矿化石榴石砂卡岩带;4—铅锌矿化结晶灰岩带;5—强方解石化灰岩带;6—136 m中段21穿元素变化;7—176 m中段19穿元素变化;8—256 m中段19穿元素变化

Fig.10 Mineralized element ratio zoning diagram of the Huangshaping polymetallic deposit

1—Scheelite-molybdenite (pyrite) mineralized-silicified-sericitized granite porphyry zone; 2—Magnetization (scheelite-cassiterite) mineralized garnet skarn zone; 3—Scheelite-molybdenite-pyrrhotite mineralized garnet skarn zone; 4—Lead-zinc mineralized crystalline limestone zone; 5—Strong calcilization limestone zone; 6—136 m middle level 21 transverse drift element change; 7—176 m middle level 19 transverse drift element change; 8—256 m middle level 19 transverse drift element change

续。通过对比不同中段矿化元素变化特征表明:不同中段平面上不同蚀变带中矿化元素的变化趋势是一致的,但不同中段矿化元素含量变化较大,由图9知-176 m中段矿化元素整体较-136 m、-256 m中段高。成矿元素来自岩浆热液,岩体越大,含有用组分越多,岩浆分异越好,成矿性就越好,则能富集的成矿元素也愈多。且岩浆期后发生热液蚀变作用也使成矿元素发生富集。通过野外实测剖面可看出:-176 m中段岩体的大小、蚀变带的完整性、各蚀变带的宽度和蚀变强度都相对较强,矿体规模和矿化强度在垂向上总体呈现出由-136 m至-256 m中段先增后递减的特征。因此,-176 m中段矿化元素含量高于-136 m、-256 m中段。

该区整个矿化-蚀变过程,反映了一套在成因上互相联系、矿物组合和化学组分上渐变的岩浆热液成矿系统的形成过程。据黄沙坪矿区硫、铅同位素组成研究表明,成矿物质硫主要来自岩体,也有部分地层硫的加入(祝新友等,2012)。深部高温熔融岩浆沿着有利的构造部位上侵,经分异、演化、冷却形成斑岩体并伴随岩浆-热液成矿作用。当岩浆与围岩在接触带发生接触变质时,岩浆热液交代碳酸盐岩,岩浆岩中Si、Al、Na、K等元素向围岩迁移,而围岩中的Ca、Mg等元素向岩浆岩迁移,当气化-热液或流体交代作用达到平衡时,交代形成了石榴石、

符山石、辉石等早期砂卡岩矿物组合;随着温度、压力等环境的改变,金属元素沉淀成矿,并形成了磁铁矿、白钨矿、辉钼矿等矿化;岩浆期后,由于构造及热液活动的持续,温度降低和H₂S在热液中溶解度增加,导致多种硫化物的富集沉淀,使早期的砂卡岩被交代,形成晚期复杂砂卡岩,并伴随了钨、钼、铜、铅、锌等矿化;未固结岩浆进一步演化,含矿残余热液接触交代围岩,Cu、Zn、Fe等形成硫化物叠加于早期砂卡岩之上,并形成了砂卡岩型铜铅锌矿体;温度进一步降低,富含Cu、Pb、Zn、Ag的溶液沿断裂充填交代,形成了充填交代型铅锌银矿体。上述过程造成了本区特殊而复杂的矿物组合分带特征。

5 矿化-蚀变分带模式

湘南地区岩浆-热液活动强烈,发育了大量的岩浆热液型多金属矿床,矿床受岩浆岩、构造、地层岩性联合控制,围绕成矿岩体呈现明显的矿化蚀变分带特征。黄沙坪多金属矿床岩控性明显,其形成与区内花岗质岩浆侵入作用具有明显的时、空依存关系。根据蚀变强度、矿化-蚀变类型、矿物组合(图11b)和元素含量变化(图11c、d)等特征的变化规律,表明该矿床矿化-蚀变分带大体上以斑岩体为中心呈不规则环带状分布(图11a),且不同的蚀变带与不同的矿化类型对应关系明显:钨钼(黄铁)矿化-硅化-绢云母化

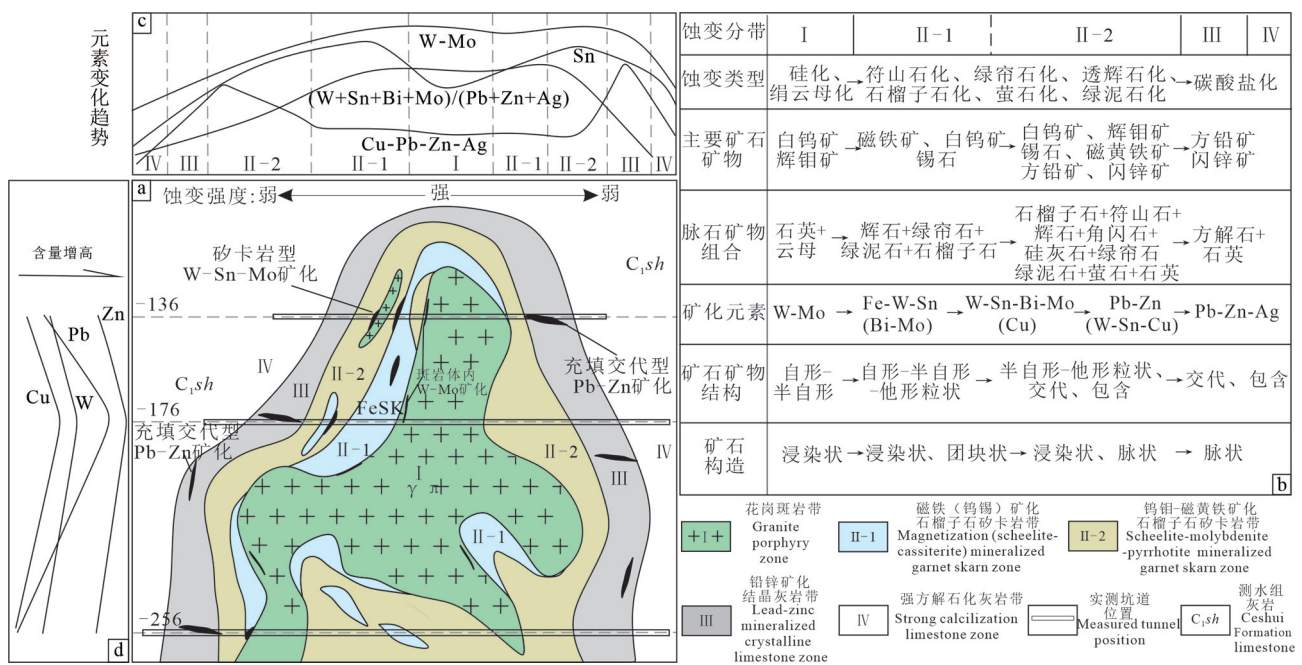


图 11 黄沙坪多金属矿床矿化-蚀变空间分带模式图

Fig. 11 Mineralization-alteration zoning of the Huangshaping polymetallic deposit

花岗斑岩带 (I) 矿化较弱, 以斑岩体内 W-Mo 矿化为主, 钨钼矿化呈细脉浸染状产于岩体节理脉内, 且见少量自形一半自形粒状黄铁矿; 磁铁(钨锡)矿化石榴石矽卡岩带 (II-1) 以 Fe-W-Sn(Bi-Mo) 为主, 赋存大量磁铁矿, 矿体呈透镜状-似层状-豆荚状; 钨钼-磁黄铁矿化石榴石矽卡岩带 (II-2) 以 W-Sn-Bi-Mo(Cu) 以及晚阶段 Pb-Zn 矿化为主, 矿化强, 钨钼锡多金属矿体呈致密块状、浸染状、脉状; 铅锌矿化结晶灰岩带 (III) 以充填交代型 Pb-Zn-Ag 为主, 矿体多呈脉状、透镜状及不规则状; 强方解石化灰岩带 (IV) 中无矿体产出。而且, 自斑岩体→围岩, 蚀变强度也呈现依次减弱的变化规律, 矽卡岩化、硅化、黄铁矿化与 Fe、Cu、Mo、Sn、W、Bi 矿化紧密相关, 碳酸盐化、黄铁矿化等与 Pb、Zn、Ag 矿化关系密切。该分带规律反映出蚀变对矿化类型的控制作用。因此, 不同蚀变带的矿物组合及其特征对矿体的空间赋存具有重要的指示意义。

6 结 论

(1) 黄沙坪铜锡多金属矿床从隐伏花岗斑岩体→围岩具有钨钼(黄铁)矿化-硅化-绢云母化花岗斑岩带 (I)→磁铁(钨锡)矿化石榴石矽卡岩带 (II-1)→钨钼-磁黄铁矿化石榴石矽卡岩带 (II-

2)→铅锌矿化结晶灰岩带 (III)→强方解石化灰岩带 (IV) 的分带规律, 且蚀变强度呈现出依次减弱的变化规律。

(2) 以花岗斑岩体为中心至两侧围岩, 伴随成矿流体从高温向低温的演化, 矿化指示元素具有从 W、Mo→Fe、W、Sn (Bi、Mo)→W、Sn、Bi、Mo (Cu)→Pb、Zn (W、Sn、Cu)→Pb、Zn、Ag 的分带规律, 据此建立了矿化-蚀变空间分带模式, 各带内特征矿物组合、矿化指示元素变化规律对矿体的赋存部位具有明显的指示作用。

Reference

- Chi Sanchuang. 1994. New theories and advances of contemporary metallogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 1(3): 83-89 (in Chinese with English abstract).
- Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. 2005. Giant porphyry deposits. Characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. Economic Geology, 100(5): 801-818.
- Du Yun, Tian Lei, Zheng Zhengfu, Chen Jianfeng, Zhang Xiaoqiang, Wang Jingyuan, Zhou Litong, Fan Hui, Li Chao. 2022. Sm-Nd dating of scheelite in Luojiachong W-Sn deposit, Miaoershan area, southwestern Hunan Province: Implications for polycyclic tectonic-magmatic activities and metallogenesis in South China[J]. Geological Bulletin of China, 41(5): 886-902 (in Chinese with English abstract).

- Gong Shuqing, Liao Xingjue, She Deqiu. 2011. Alteration-mineralization district subdivision and prospecting potential analysis of Huangshaping deposit, Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 27(2): 105–110 (in Chinese with English abstract).
- Gong Shuqing, Xu Yiming, Zhang Yijun. 2015. Metallogenic Regularity and Prospecting of Deep Ore—Prospecting in Huangshaping Lead—Zinc Polymetallic Deposit, Hunan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 61–66 (in Chinese).
- Han Runsheng. 2014–8–13. A method of large-scale alteration lithofacies prediction for hydrothermal deposits[P]. China: 103967007.
- Han Runsheng, Zhao Dong. 2022. Research methods for the deep extension pattern of rock/ore-controlling structures of magmatic-hydrothermal ore deposits—A preliminary study[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(5): 420–437 (in Chinese with English abstract).
- He Houqiang, Wang Jingchun, Jiang Yuancheng. 2010. Preliminary analysis of the geological characteristics of the iron-tungsten-molybdenum-bismuth (tin) polymetallic deposit in the south of the Huangshaping lead-zinc mine, Hunan Province[J]. *Mineral Exploration*, 1(4): 323–333 (in Chinese with English abstract).
- Huang Cheng, Li Xiaofeng, Wang Lifa, Liu Fengping. 2013. Fluid inclusion study of the Huangshaping polymetallic deposit, Hunan Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4232–4244 (in Chinese with English abstract).
- Huang Gefei. 1999. Geological characteristics and seeking mineral orientation of Huangshaping style Pb-Zn deposit in Southern Hunan[J]. *Hunan Geology*, (Z1): 84–90 (in Chinese with English abstract).
- Jin Xiaoyan, Lei Zeheng, Cao Zhijun, Xu Yiming, Tian Xufeng. 2013. Geological characteristics and significance of the Gaoabei tungsten-molybdenum deposit in Rucheng, Hunan[J]. *Geology and Exploration*, 49(3): 453–457 (in Chinese with English abstract).
- Large S J E, Quadt A V, Wotzlaw J F, Guillong M, Heinrich C A. 2018. Magma evolution leading to porphyry Au-Cu mineralization at the Ok Tedi deposit, Papua New Guinea: Trace element geochemistry and high-precision geochronology of igneous zircon[J]. *Economic Geology*, 113(1): 39–61.
- Lei Zeheng, Chen Fuwen, Chen Zhenghui, Xu Yiming, Gong Shuqing, Li Huaqin, Mei Yuping, Qu Wenjun, Wang Denghong. 2010. Petrogenetic and metallogenic age determination of the Huangshaping Lead-Zinc polymetallic deposit and its geological significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 532–540 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianping, Chen Huayong, Su Long, Xiao Bing, Wang Yunfeng. 2019. Experimental study of high to intermediate temperature alteration in porphyry copper systems and geological implications[J]. *Science China: Geoscience*, 49(4): 5–28 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaofei, Yuan Shunda, Wu Shenghua. 2012. Re-Os dating of the molybdenite from the Jinchuantang tin-bismuth deposit in Hunan Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 39–51 (in Chinese with English abstract).
- Mao Debao, Zhao Gengxin, Xi Zhong, Zhong Changting, Chen Zhihong, Hu Xiaodie. 2003. Geological characteristics of Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Au metallogenic systems and their exploration significance[J]. *Geological Survey and Research*, 26(4): 213–220 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jinwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Chen Yuchuan. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338 (in Chinese with English abstract).
- Mou Baolei. 1999. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Peking University Press, 92–100 (in Chinese).
- Peng Huijuan, Zhang Changqing, Zhou Yunman, Tian Guang, Li Jianxing, Luo Yuezhong, Ren Junsheng, Long Fei. 2012. Geological and geochemical characteristics of the Hongniu copper deposit in Zhongdian area, northeastern Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 39(6): 1743–1758 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jiantang, Zhou Meitu, Hu Ruizhong, Shen Nengping, Yuan Shunda, Bi Xianwu, Du Andao, Qu Wenjun. 2006. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China[J]. *Mineralium Deposita*, 41(7): 661–669.
- Rui Zongyao, Huang Chongke, Qi Guoming, Xu Jue, Zhang Hongtao. 1984. *China Porphyry Copper (Molybdenum) Deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 18–24 (in Chinese).
- Shen Hongfei, Li Lixing, Li Houmin, Li Xiaosai, Sun Xinyu, Wen Yizhuo, Li Wenchao, Meng Yuhong. 2022. Control of the large-sized Mesozoic W-Sn mineralization in southern Hunan: Insights from zircon geochronology and trace element geochemistry[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(2/3): 461–485 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper system[J]. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Tang Juxing, Huang Yong, Li Zhijun, Deng Qi, Lang Xinghai, Chen Yuan, Zhang Li. 2009. Element geochemical characteristics of Xiongcu Cu-Au deposit in Xaitongmoin County, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 28(1): 15–28 (in Chinese with English abstract).
- Wang Linfeng, Wang Lifa, Liu Fengping, Zong Zhihong, Zhao Taocheng, Lei Yawei. 2013. Geological characteristics and new prospecting progress of Huangshaping lead-zinc polymetallic deposit in Hunan Province[J]. *Resources Survey and Environment*,

- 34(3): 193–198 (in Chinese with English abstract).
- Yu Miao, Feng Chenyou, Bao Guangying, Liu Hongchuan, Zhao Yiming, Li Daxin, Xiao Ye, Liu Jiannan. 2013. Characteristics and zonation of skarn minerals in Galinge iron deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 32(1): 55–76 (in Chinese with English abstract).
- Yuan S D, Mao J W, Cook N J, Wang X D, Liu X F, Yuan Y B. 2015. A Late Cretaceous tin metallogenic event in Nanling W–Sn metallogenic province: Constraints from U–Pb, Ar–Ar geochronology at the Jiepailing Sn–Be–F deposit, Hunan, China[J]. Ore Geology Reviews, 65: 283–293.
- Yuan Yabin, Yuan Shunda, Zhao Panlao, Zhang Dongliang. 2018. Properties and evolution of granitic magma in the Huangshaping polymetallic deposit, southern Hunan: Their constraints to mineralization differences[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(9): 67–82 (in Chinese with English abstract).
- Zhao D, Han R S, Liu F, Fu Y X, Zhang X P, Qiu W L, Tao Q. 2022. Constructing the deep–spreading pattern of tectono–geochemical anomalies and its implications on the Huangshaping W–Sn–Pb–Zn polymetallic deposit in southern Hunan, China[J]. Ore Geology Reviews, 148: 105040.
- Zhao Lunshan, Zhang Benren. 1988. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 202–210(in Chinese).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, Cheng Xiyin, Fu Qibin. 2012. Sulfur and lead isotope constraints on ore formation of the Huangshaping W–Mo–Bi–Pb–Zn polymetallic ore deposit, Hunan Province, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(12): 3809–3822 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 池三川. 1994. 现代成矿理论的某些进展[J]. 地学前缘, 1(3): 83–89.
- 杜云, 田磊, 郑正福, 陈剑锋, 张小强, 王敬元, 周立同, 樊晖, 李超. 2022. 湘西南落家冲钨锡矿床加里东期成岩成矿年龄的测定: 对华南多旋回构造-岩浆活动与成矿作用的启示[J]. 地质通报, 41(5): 886–902.
- 龚述清, 廖兴钰, 余德球. 2011. 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, 27(2): 105–110.
- 龚述清, 许以明, 张怡君. 2015. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床成矿规律及深部找矿远景研究[M]. 北京: 地质出版社, 61–66.
- 韩润生. 2014–8–13. 一种热液矿床的大比例尺蚀变岩相定位预测方法[P]. 中国: 10396700.7.
- 韩润生, 赵东. 2022. 初论岩浆热液成矿系统控岩控矿构造深延格局研究方法[J]. 地学前缘, 29(5): 420–437.
- 何厚强, 王静纯, 江元成. 2010. 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, 1(4): 323–333.
- 黄诚, 李晓峰, 王立发, 刘凤平. 2013. 湖南黄沙坪多金属矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 29(12): 4232–4244.
- 黄革非. 1999. 湘南地区“黄沙坪式”铅锌矿床地质特征及找矿方向[J]. 湖南地质, (Z1): 84–90.
- 金小燕, 雷泽恒, 曹志军, 许以明, 田旭峰. 2013. 湖南汝城高坳背钨钼矿地质特征及地质意义[J]. 地质与勘探, 49(3): 453–457.
- 雷泽恒, 陈富文, 陈郑辉, 许以明, 龚述清, 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 王登红. 2010. 黄沙坪铅锌多金属矿成矿年龄测定及地质意义[J]. 地球学报, 31(4): 532–540.
- 李建平, 陈华勇, 苏龙, 肖兵, 王云峰. 2019. 斑岩型铜矿床高-中温蚀变过程实验研究及其地质意义[J]. 中国科学:地球科学, 49(4): 5–28.
- 刘晓菲, 袁顺达, 吴胜华. 2012. 湖南金船塘钨铋矿床辉钼矿 Re–Os 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 39–51.
- 毛德宝, 赵更新, 席忠, 钟长汀, 陈志宏, 胡小蝶. 2003. Cu–Mo–Pb–Zn–Ag–Au 成矿系统的地质特征及其研究意义[J]. 地质调查与研究, 26(4): 213–220.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 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, 23(10): 2329–2338.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 92–100.
- 彭惠娟, 张长青, 周云满, 田广, 李建新, 罗跃中, 任俊生, 龙飞. 2012. 云南省中甸红牛铜矿床地质地球化学特征[J]. 中国地质, 39(6): 1743–1758.
- 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 徐珏, 张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社, 18–24.
- 沈宏飞, 李立兴, 李厚民, 李小赛, 孙欣宇, 文一卓, 李文朝, 孟雨红. 2022. 湘南中生代钨锡大规模成矿控制因素: 锆石年龄和微量元素的启示[J]. 地质通报, 41(2/3): 461–485.
- 唐菊兴, 黄勇, 李志军, 邓起, 郎兴海, 陈渊, 张丽. 2009. 西藏谢通门县雄村铜金矿床元素地球化学特征[J]. 矿床地质, 28(1): 15–28.
- 汪林峰, 王立发, 刘凤平, 宗志宏, 赵大成, 雷亚伟. 2013. 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, 34(3): 193–198.
- 于森, 丰成友, 保广英, 刘洪川, 赵一鸣, 李大新, 肖晔, 刘建楠. 2013. 青海尕斯库勒铁矿床矽卡岩矿物学及蚀变分带[J]. 矿床地质, 32(1): 55–76.
- 原垭斌, 袁顺达, 赵盼盼, 张东亮. 2018. 湘南黄沙坪多金属矿床花岗岩浆性质及演化对成矿差异的约束[J]. 岩石学报, 34(9): 67–82.
- 赵伦山, 张本仁. 1988. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 202–210.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 程细音, 傅其斌. 2012. 湖南黄沙坪 W–Mo–Bi–Pb–Zn 多金属矿床硫铅同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 28(12): 3809–3822.