

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.08.011

滇东北会泽麒麟厂铅锌矿床矿化-蚀变指数定量分析及深部找矿意义

张小培^{1,2}, 韩润生^{1*}, 赵冻¹, 张艳¹, 邱文龙¹, 贺皎皎¹, 崔峻豪¹ZHANG Xiaopei^{1,2}, HAN Runsheng^{1*}, ZHAO Dong¹, ZHANG Yan¹, QIU Wenlong¹, HE Jiaojiao¹, CUI Junhao¹

1.昆明理工大学,有色金属矿产地质调查中心西南地质调查所,云南 昆明 650093;

2.中国冶金地质总局昆明地质勘查院,云南 昆明 650024

1.Kunming University of Science and Technology, Southwest Institute of Geological Survey, Geological Survey Center for Nonferrous Metals Resources, Kunming 650093, Yunnan, China;

2.Kunming Geological Prospecting Institute, China Metallurgical Geological Bureau, Kunming 650024, Yunnan, China

摘要:会泽超大型铅锌矿是滇东北铅锌多金属矿集区最具代表性的矿床之一。为了有效地提取和区分不同矿化-蚀变分带内铅锌矿化、黄铁矿化、白云石化等矿化-蚀变信息,以麒麟厂1249 m中段典型剖面为例,应用大比例尺蚀变岩相学填图方法,基于矿化-蚀变岩的热液蚀变指数与迁入元素增长指数的定量分析,对比和剖析了矿化蚀变类型与各矿化-蚀变带的岩石组成、结构构造等特征。结果表明,该矿床主要的蚀变类型为白云石化、方解石化和黄铁矿化,主要矿化为闪锌矿化、方铅矿化。以矿体为中心,从矿体下盘围岩→矿体→矿体上盘围岩,矿化-蚀变分带呈现出远矿浅灰色粗晶白云岩带(Ⅰ)→针孔状白云岩带(Ⅱ)→米黄色粗晶白云岩带(Ⅲ)→近矿灰白色粗晶白云岩带(Ⅳ)→铅锌矿化带(Ⅴ)→近矿灰白色粗晶白云岩带(Ⅳ)的变化规律。TFe、CaO、MgO、Pb、Zn在不同的矿化蚀变分带内均保持迁入富集状态,其中TFe、Pb和Zn迁入富集明显;矿化-蚀变指数值和迁入元素增长指数与矿化蚀变分带在空间上具有一致性,V带呈现的矿化蚀变指数值(AI 、 AI_{TFe} 及 AI_{Pb+Zn})最高,而 AI_{MgO} 值最低,明显区别于其他蚀变带;从Ⅰ带至Ⅴ带,迁入元素增长指数(Z_{Zn} 、 Z_{Pb} 及 Z_{TFe})总体呈增长趋势,且Ⅴ带的 Z_{TFe} 、 Z_{Pb} 及 Z_{Zn} 值明显高于围岩。矿化蚀变指数研究揭示了热液蚀变作用与成矿的关系,亦证实了空间上矿化蚀变分带的规律性,对于同类矿床深部勘探具有指导意义。

关键词:矿化-蚀变分带;蚀变岩地球化学;深部找矿;会泽超大型铅锌矿床;滇东北矿集区

中图分类号:P614;P618.42;P618.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)08-1445-17

Zhang X P, Han R S, Zhao D, Zhang Y, Qiu W L, He J J, Cui J H. Quantitative analysis of mineralization-alteration index and deep prospecting significance of Qilinchang Pb-Zn deposit in Huize, northeastern Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(8): 1445-1461

Abstract: The giant Huize Pb-Zn deposit is the most representative deposit of Pb-Zn polymetallic ore concentration area in northeastern Yunnan. In order to effectively extract and distinguish the mineralization-alteration information such as lead-zinc

收稿日期:2020-04-01;修订日期:2022-07-16

资助项目:国家自然科学基金项目《黔西北富银铅锌矿集区冲断褶皱构造系统的成矿机制及找矿潜力分析》(批准号:41572060)、《滇东北地区富锗铅锌矿床成矿机理研究及靶区优选》(批准号:U1133602)、云岭学者项目(2014)、中国地质调查局项目《滇东北矿集区找矿预测项目》(编号:12120115036001)、云南省矿产资源预测与评价重点实验室(2011)、昆明理工大学创新团队项目(2009)、云南省地质过程与矿产资源省创新团队(2012)

作者简介:张小培(1991-),女,硕士,构造地质学专业。E-mail:zxp011992@126.com

* **通信作者:**韩润生(1964-),男,研究员,博士生导师,从事矿床学、构造成矿动力学及隐伏矿床预测研究。E-mail:554670042@qq.com

mineralization, pyritization and dolomitization in different mineralization-alteration zones, using large scale alteration petrographical mapping method, taking the typical levels of 1249 m as an example, to analyze the levels' mineralization-alteration types, altered rock composition, structure and other characteristics base on quantitative analysis of hydrothermal alteration index and growth index of element transfer-in. The results show that the main alteration types are dolomitization, calcitization and pyritization. Mineralization mainly are sphalerite and galena. Taking the ore body as the center, from footwall rock of ore body to ore body to hanging wall rock of ore body, the mineralization-alteration zoning shows that grayish white coarse-grained crystalline dolomite which is far from the orebody (I), coarse-grained dolomite with pinholes (II), beige coarse-grained crystalline dolomite (III), grayish white coarse-grained crystalline dolomite which is closed to the orebody (IV), orebody (V) and grayish white coarse-grained crystalline dolomite which is closed to the orebody (IV). The element TFe, CaO, MgO, Pb, and Zn in the different mineralization alteration zones almost keep transfer-in. Among them, the element TFe, Pb and Zn are the most obvious. Moreover, the quantitative calculation results of the mineralized alteration rocks' mineralization alteration index and the growth index of the elements transfer-in are consistent with the mineralization alteration zone in space. The values of alteration index (AI), TFe's alteration index (AI_{TFe}), and (Pb+Zn)'s alteration index (AI_{Pb+Zn}) are the highest in the V zone while the value of MgO's alteration index (AI_{MgO}) is the lowest, clearly distinguished from other alteration zones; The values of Zn, Pb and TFe's growth index of element transfer-in (Z_{Zn} , Z_{Pb} and Z_{TFe}) are generally increasing from I zone to V zone, and the values of Z_{Zn} , Z_{Pb} and Z_{TFe} are significantly higher than those in surrounding rock. The study of mineralization alteration index reveals the relationship between hydrothermal alteration and mineralization, and also proves the rationality of spatial mineralization alteration zoning, which has guiding significance for deep exploration of similar deposits.

Key words: mineralization alteration zoning; geochemistry of hydrothermal altered rock; deep prospecting; super-large Huize Pb-Zn deposit; ore concentration area in northeastern Yunnan

会泽超大型铅锌矿是滇东北矿集区内规模最大、铅锌品位最高、成矿作用最具代表性的矿床之一,其矿化-蚀变具有明显的分带性。前人主要从矿床成因^[1-8]、区域成矿规律^[9]、成矿物质来源^[5-8]、构造地球化学^[10]和成矿动力学及找矿模型^[11-14]、成矿时代^[4, 12, 15-17]方面开展了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果。针对该区矿床成因方面存在 MVT^[3, 15]和 HZT^[11-12]争议。不少学者研究认为热液蚀变矿物组合分带规律、地球化学特征、元素迁移变化规律、蚀变指数等在探讨成矿作用、寻找隐伏矿床(体)、判断矿床规模等方面具有明显的指示意义^[18-24]。韩润生等^[25-26]、Han 等^[27]基于构造地球化学精细勘查技术和构造-蚀变岩相找矿方法,通过会泽矿区内广泛发育的蚀变岩分带规律与构造地球化学异常研究,在矿区深部及外围取得找矿突破。文德潇等^[28]研究认为,该矿床具有肉红色中粗晶白云岩带→米黄色针孔状粗晶白云岩带→灰白色孔洞状粗晶白云岩带→铅锌矿石带的分带规律。但是,对于矿床深部的矿化-蚀变分带和矿物组合特征,还缺乏元素地球化学分带证据,尤其是蚀变指数定量分析方面的证据,表现在:①不同蚀变带内、不同元素的迁入迁出量的多寡及蚀变指数 (AI_{TFe} 、 AI_{Pb} 和 AI_{Zn}) 与矿化-蚀变分带之间是否存

在一致性;②矿化-蚀变岩相对于未蚀变岩各迁移组分的增长指数的确定及其对找矿勘查的指导意义。这些问题未解决,制约了 HZT 铅锌矿床成矿模型的进一步深化。故本文通过蚀变分带性及其与矿体时空分布关系的研究,定量分析不同矿化-蚀变带中的元素迁入-迁出量和矿化-蚀变指数,进而揭示矿化-蚀变分带的地球化学元素变化规律,为矿床模型深化与深部找矿预测提供理论依据。

1 矿床地质概况

滇东北矿集区是扬子地块西南缘之川滇黔铅锌多金属成矿区的重要组成部分,处于小江深断裂东侧滇东北拗陷盆地南部,位于 SN 向小江深断裂带、NW 向紫云-垭都深断裂带及 NE 向弥勒-师宗深断裂带三大断裂所围成的“三角区”内^[9, 11-12],隶属上扬子成矿带内^[13]。小江深断裂带和曲靖-昭通隐伏断裂带为成矿提供了十分有利的构造地质背景,控制了滇东北铅锌多金属矿集区的分布,其中滇东北“多字型”构造控制了 NE 向斜列展布的铅锌(银、锗)成矿带^[14]。

会泽是滇东北矿集区“多层位”碳酸盐岩赋矿的后生热液型铅-锌-锗矿床的典型代表,地处滇东

北矿集区中南部,由矿山厂、麒麟厂和银厂坡矿床组成。矿区出露地层有上古生界(发育较完整),下古生界下寒武统筇竹寺组,缺失中—上寒武统、奥陶系、志留系和下泥盆统,上震旦统灯影组,中—上泥盆统仅在局部地段出露。下石炭统摆佐组(C_1b)在矿区广泛出露,是矿区最主要的赋矿地层,与下伏大塘组(C_1d)和上覆威宁组(C_2w)呈整合接触。其次,上震旦统灯影组也是该矿床的赋矿地层,与上覆的下寒武统筇竹寺组(ϵ_{1q})呈假整合接触关系。矿山厂、麒麟厂、银厂坡 3 条 NE 向压扭性断层为矿区的主干断裂,3 条断裂之间由近 SN 向的东头逆断层连通,并与派生的 NE 向背斜(矿山厂背斜、麒麟厂背斜、澜银厂背斜等)及其 NW 向羽状横断层组成斜冲走滑—断褶皱构造^[14](图 1)。呈灰绿

色—绿黑色的致密块状玄武岩、杏仁状玄武岩分布于矿山厂断裂西北部和矿区西南部及外围地区(图 1)。目前已发现铅锌矿体 70 余个(其中工业矿体 20 多个),Pb+Zn 平均品位大于 25%。矿体基本沿层间断裂带产出,走向 NE,倾向 SE,倾角 $50^\circ \sim 55^\circ$ 。矿体延长最大约 400 m,垂向延深超过 1500 m,呈似层状、囊状、透镜状产出。从深部至浅部,矿石由硫化矿逐渐过渡为氧化矿。矿石矿物为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿及少量黄铜矿等,脉石矿物为白云石、方解石,其次为石英、重晶石、石膏、伊利石等。矿石构造以致密块状构造为主,可见少量的脉状、不规则条带状、网脉状、溶洞状(氧化矿石)构造等,矿石结构以他形—自形晶粒状、溶蚀结构为主,见共边、填隙、揉皱、压碎、包含等结构。

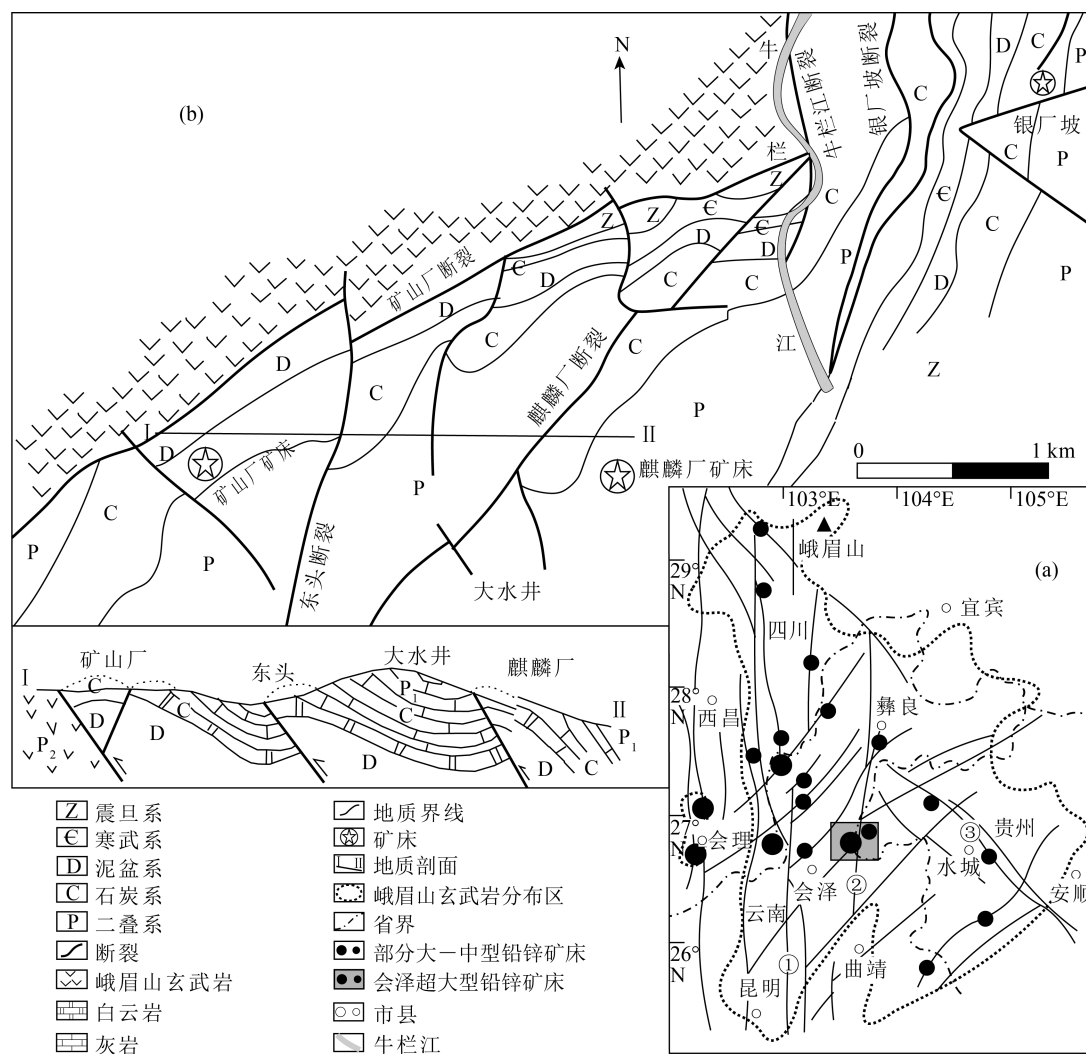


图 1 会泽铅锌矿区地质简图^[14]

Fig. 1 Geological map of the Huize lead-zinc deposits

2 矿化-蚀变分带特征

2.1 蚀变特征

该矿床主要蚀变类型为白云石化、黄铁矿化、方解石化、硅化、重晶石化等。

(1) 白云石化

矿区内最普遍的蚀变类型,以粗晶白云石化为主。该类蚀变发育且强烈,蚀变岩颜色变化多样,呈灰白色、白色、肉红色及米黄色,以(团)块状、脉状、斑状构造为主,常见半自形粒状结构(图版I-a),局部重结晶呈自形中—细粒状结构(图版I-b~d)。按产状将其划分为2种类型:①呈白色、乳白色,斑状、团块状构造、自形—半自形粒状结构,见于矿体和近矿围岩中,局部见闪锌矿和黄铁矿被包裹;②呈米黄色或肉红色,块状、半自形粒状,粒径较粗(>0.5 mm),重结晶作用明显,溶蚀孔洞发育,白云石晶内及晶间裂隙可见星点状自形黄铁矿(图版I-e、f),偶见蚀变残余灰岩呈团块状分布于白云岩中。白云石化随着矿体的埋藏深度增加、厚度增大、规模增加及矿石品位增高而增强,预示该蚀变与铅锌成矿具有紧密的成生联系。

(2) 方解石化

主要呈粗晶粒状、团块状、脉状及网脉状,常见于矿体、白云岩及NW向断裂带带中,或呈细脉状分布于方铅矿中。

(3) 黄铁矿化

较普遍的蚀变类型之一,具多期特征^[16]。多呈(网)脉状、团块状的黄铁矿产于矿体中,表面较光滑,自形—半自形粒状,粒径相对白云岩中的黄铁矿较大,常沿方铅矿、闪锌矿裂隙充填或与闪锌矿呈共边结构,或呈自形晶粒状包含于方铅矿或闪锌矿内;部分黄铁矿产于米黄色粗晶白云岩的微细溶蚀孔洞内,呈五角十二面体分布,粒径0.2~0.5 mm,表面光滑(图版I-e、f);另见少量细粒集合体状的黄铁矿产于围岩裂隙内,晶粒较小。自围岩至矿体,黄铁矿化的蚀变强度由弱逐渐变强,即距矿体愈近,黄铁矿化愈强烈,反之则愈弱。

2.2 典型中段矿化-蚀变岩相分带特征

以会泽麒麟厂矿区深部1249中段3号出矿道(图2)为典型剖面,通过大比例尺构造-蚀变岩相填图,发现其矿化蚀变具有代表性和典型性,在水平

方向上表现出一定的分带特征。在各个剖面不同蚀变矿物类型、共生组合特征和蚀变强度差异的基础上,结合矿物共生关系、岩石组构等特征,将深部的矿化-蚀变分带划分为远矿浅灰色粗晶白云岩带(I)→针孔状白云岩带(II)→米黄色粗晶白云岩带(III)→近矿灰白色粗晶白云岩带(IV)→铅锌矿化带(V)(图2)。各带特征如下。

2.2.1 远矿浅灰色中粗晶白云岩带(I)

浅灰色—灰白色白云岩呈中粗晶粒状,显微镜下可见不规则晶边、细小双晶纹及晶内裂隙(图版I-a、b)。受热液蚀变作用影响,岩石内发育少量溶蚀孔洞,其内可见呈细小晶簇状的方解石及自形粒状黄铁矿。岩石中裂隙较发育,常见方解石、黄铁矿及褐铁矿(黄铁矿氧化形成)沿裂隙充填形成脉状围岩蚀变。脉状、透镜状或不规则团块状的蚀变残余灰岩发育其中是该带的典型特征之一,与灰白色中粗晶白云岩呈溶蚀包裹关系,未见铅锌矿化。该带外围为灰黑色细晶白云岩,呈细晶粒状结构和块状构造,无明显的热液蚀变现象。

2.2.2 灰白色针孔状粗晶白云岩带(II)

灰白色白云岩局部受褐铁矿化影响呈浅肉红色,粗晶粒状(图版I-c)。该带内容蚀孔洞相对远矿浅灰色粗晶白云岩带增多,其内亦见方解石及少量黄铁矿充填,方解石呈柱状集合体,黄铁矿呈五角十二面体,粒径较大。沿节理、溶蚀裂隙形成网脉状、脉状、团块状白云石,白云石脉内偶见星点状闪锌矿。围岩重结晶明显,或对围岩强烈溶蚀切割及包裹,形成角砾状白云岩。未见铅锌矿化。

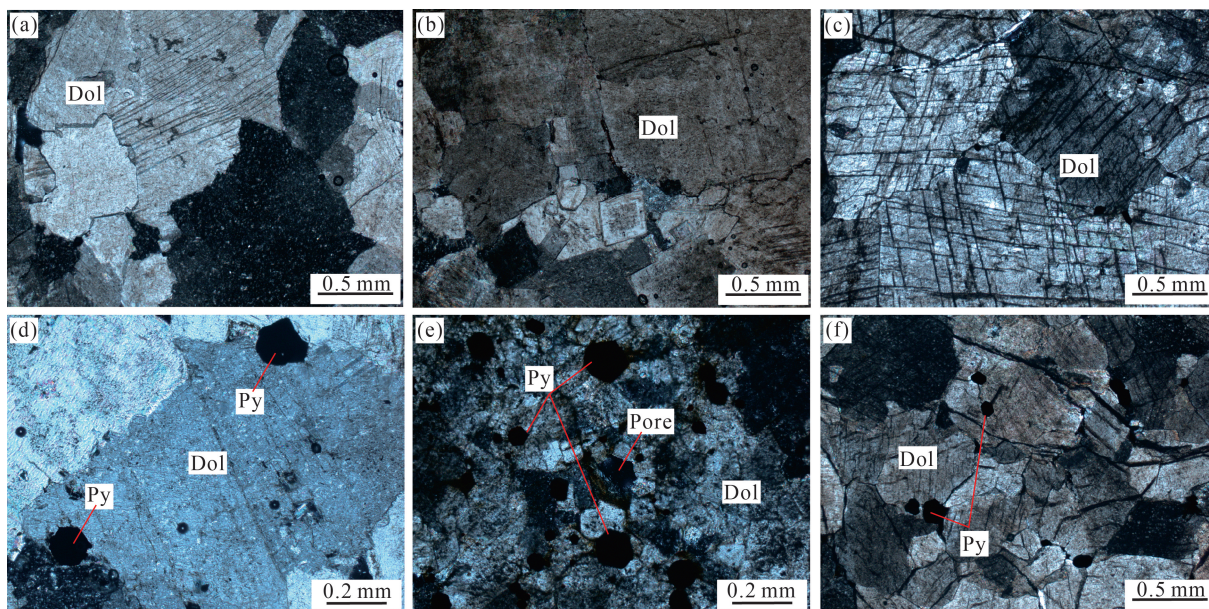
2.2.3 米黄色针孔状粗晶白云岩带(III)

受热液的强烈改造作用,重结晶作用明显,形成细密针孔状溶蚀孔洞的同时发生粗晶白云石化。该带内蚀变矿物共生组合为白云石+方解石+黄铁矿+石英+方铅矿和闪锌矿(微量)。方解石呈不规则团块状,其内发育自形—半自形粗晶粒状、五角十二面体、立方体假象结构或交代残留骸晶结构的黄铁矿(图版I-d、e)。围岩裂隙发育,沿裂隙常见脉状方解石化、硅化及黄铁矿化,该带蚀变相对前2个蚀变带明显增强,局部可见浸染状、团斑状、细脉状铅锌矿沿围岩裂隙充填。

2.2.4 近矿灰白色粗晶白云岩带(IV)

重结晶作用很明显,溶蚀孔洞明显增多、增大,

图版 I Plate I



a. 远矿浅灰色粗晶白云岩带(样品号 3-3),白云石发育不规则晶边、细小双晶纹且发育短小而密集的晶内裂隙;b. 远矿浅灰色粗晶白云岩带(样品号 3-4):局部重结晶呈自形细粒状白云石;c. 针孔状白云岩带(样品号 3-14),靠近断裂的白云石发育密集穿晶裂隙及晶内裂隙,裂隙内充填粉晶黄铁矿(0.02 mm);d. 米黄色粗晶白云岩带(样品号 3-17):白云石发育不规则晶边和短小的晶内裂隙,黄铁矿呈五角十二面体(约 0.1 mm)分布于白云石的晶间裂隙;e. 米黄色粗晶白云岩带(样品号 3-19),黄铁矿呈五角十二面体、立方体假象与交代残留骸晶结构(0.01~0.15 mm);f. 近矿灰白色粗晶白云岩(样品号 3-23),白云石内发育密集的穿晶裂隙及短小的晶内裂隙,黄铁矿呈五角十二面体沿裂隙分布。Py—黄铁矿;Dol—白云石;Pore—溶蚀孔洞

其内常见重结晶的方解石、黄铁矿及白云石(图版 I-f),多呈自形粗粒状,晶体表面光滑。该带内蚀变矿物共生组合为白云石+方解石+黄铁矿+石英+方铅矿和闪锌矿(少量)。方解石和石英呈团块状、微细脉状沿围岩裂隙或次级断裂产出。黄铁矿呈稠密浸染状沿节理面、裂隙面分布,近铅锌矿化带可见稠密浸染状、细脉状、团斑状黄铁矿及白云石化,其蚀变明显增强。与前述蚀变带相比,可见浸染状、脉状铅锌矿化。

2.2.5 铅锌矿化带(V)

该带的矿物共生组合为黄铁矿+方铅矿+闪锌矿+白云石+方解石。白云岩重结晶明显,呈灰色—灰白色,具粗晶粒状,块状产出,其内见脉状、团块状闪锌矿、方铅矿等,交代结构发育。硅化呈自形粒状结构,脉状构造。该带内黄铁矿化增强,呈稠密浸染状、透镜体状、块状。主要矿石矿物闪锌矿的产出状态多种多样:主要呈团块状产出,构成以闪锌矿为主的块状铅锌矿石;或呈脉状与黄铁矿脉、方铅矿脉交互出现,构成不规则“条带状”铅锌矿石,是成矿热液沿层间断裂裂隙充填交代的产物;或呈浸染状、不规则团块状及不规则细脉状充

填于黄铁矿之间;或为中—粗粒自形晶,呈团块状、细脉状、星散浸染状分布于脉石矿物及其节理、裂隙中。依据铅锌矿化和黄铁矿化的强弱,该矿化—蚀变带可细分为黄铁矿为主+少量闪锌矿、方铅矿矿体→闪锌矿、方铅矿为主+少量黄铁矿矿体+少量方解石团块、白云石团块→黄铁矿为主+少量方铅矿和闪锌矿矿体。

综上所述,矿床深部矿化—蚀变分带从远矿到近矿的主要变化规律:①黄铁矿粒度逐渐增大,晶形多为五角十二面体→五角十二面体、立方体假象与交代残留骸晶结构→五角十二面体,矿化逐渐增强。②围岩溶蚀孔洞逐渐从小变大,从疏变密,反映了热液对围岩的热溶作用从弱逐渐增强。③铅锌矿化逐渐增强,黄铁矿化、方解石化及白云石化从强变弱。

3 矿化—蚀变指数的定量分析

3.1 样品采集及测试

本次系统采集了不同矿化—蚀变带内具有代表性的矿化—蚀变样品(图 2)。在室内对样品进行岩矿鉴定,选取代表性的矿化—蚀变样品开展主量元

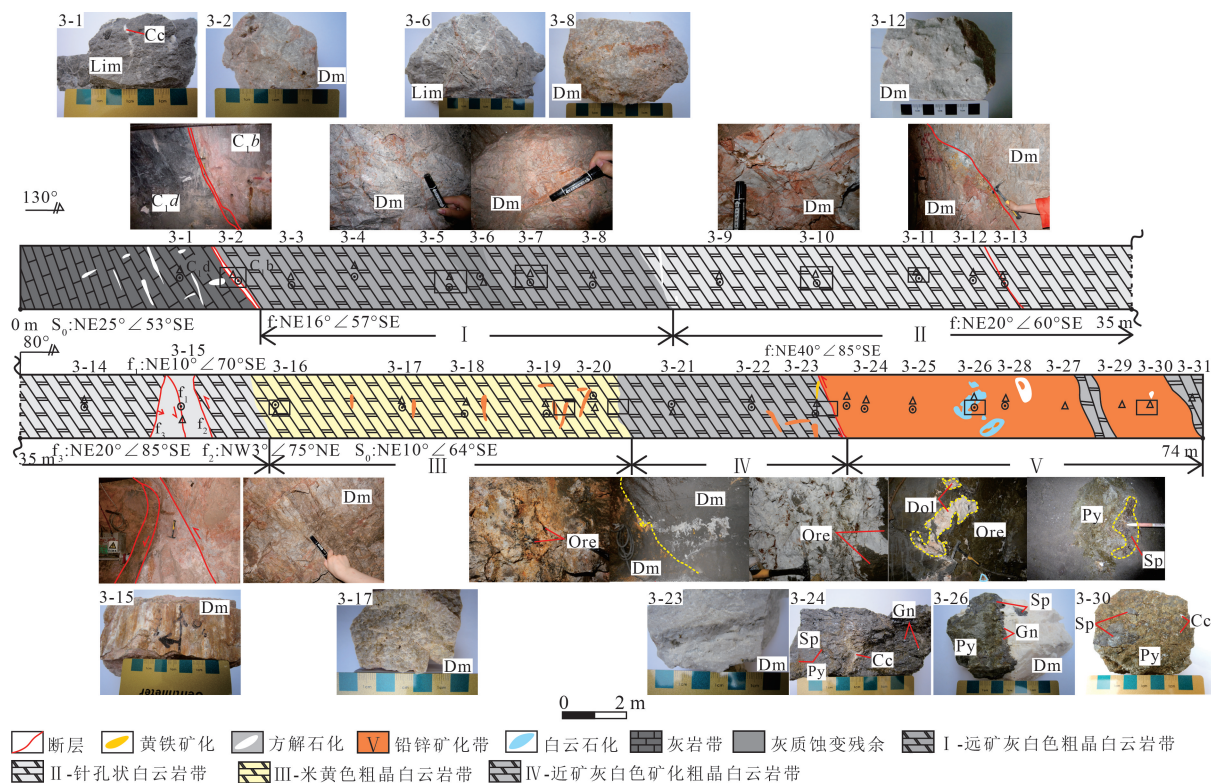


图2 会泽麒麟厂铅锌矿区 1249 m 中段 3 号出矿道剖面编录图

Fig. 2 Mine geological record of the No.3 withdrawal tunnel in 1249 m level adit of the Huize Pb-Zn deposit

Lim—灰岩; Dm—白云岩; Cc—方解石; Ore—矿石; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Py—黄铁矿; Dol—白云石

素及 Pb-Zn 含量测定。在矿区外围采集摆佐组 (C_1b) 的未蚀变白云岩, 与矿化-蚀变岩进行对比研究。样品测试在西北有色地质研究院测试中心完成, 主量元素组分采用氧化物化学分析法测试, Pb、Zn 采用等离子质谱仪 (ICP-MS) 分析, 数据经平行样检验, 符合精度要求 (表 1)。

3.2 蚀变组分迁移特征

由于岩石经受蚀变作用后可能存在质量和体积上的变化, 因此不能通过直接比较蚀变前后岩石的元素质量分数得出蚀变岩的物质得失量, 需要进行质量平衡计算^[29]。为了体现矿化-蚀变岩带相对弱蚀变岩的迁移组分变化, 本文以 Gresens^[30] 的假设为前提, 以矿区外围未蚀变样品的主量元素和 Pb、Zn 含量作为下限值 (表 1), 矿化-蚀变样品 SiO_2 、 Al_2O_3 、TFe 等元素作为研究对象。尽管惰性元素组分可能因为其他元素的质量净增加或减少而显得亏损或富集, 但它们在蚀变体系中的绝对丰度是恒量。前人研究表明, TiO_2 是蚀变过程中最常见的保守元素, 因此以 TiO_2 作为不活动组分^[31]。

采用公式 (1)^[30] 对 1249 m 中段各蚀变带的主要组分及 Pb、Zn 质量迁移进行定量分析, 结果详见表 2 和图 3。

$$T_i = \left(\omega_{id} \times \left(\frac{\omega_{ip}}{\omega_{jd}} \right) \right) - \omega_{ip} \quad (1)$$

式中: 原岩总质量假设为 1, T_i 为成分 i 在原岩遭受蚀变形成蚀变岩后迁入或迁出的量 (g 或 mol), ω_{id} 、 ω_{ip} 为蚀变岩和原岩成分 i 的质量分数; ω_{jd} 、 ω_{jp} 为不活动组分 j 在蚀变岩和原岩中的质量分数。

3.3 矿化-蚀变指数

引入矿化-蚀变指数 (AI) 计算 1249 m 中段矿化-蚀变岩石在蚀变过程中元素带入带出量的多少, 其计算采用公式 (2)。

$$AI = \frac{\sum_{A=Pb, Zn, MgO, TFe} \omega_A}{\sum_{B=Pb, Zn, MgO, TFe, Al_2O_3, CaO} \omega_B} \times 100 \quad (2)$$

式中: ω_A 为迁入元素的质量分数; ω_B 为迁入和迁出元素的质量分数。

表 1 会泽麒麟厂 1249 m 中段 3 号出矿道主量元素及 Pb、Zn 含量
Table 1 The results of major element and Pb-Zn element of No.3 withdrawal tunnel in the 1249 m level adit of the Huize deposit

样品编号	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	TFe ₂ O ₃ /%	CaO/%	MgO/%	K ₂ O/%	Na ₂ O/%	MnO/%	P ₂ O ₅ /%	TiO ₂ /%	烧失量/%	总计/%	Zn/10 ⁻⁶	Pb/10 ⁻⁶	蚀变分带
未蚀变(6)	1.87	0.38	0.55	29.87	20.65	0.13	0.06	0.02	0.04	0.02	46.13	99.72	37.38	8.46	VI
3-3	0.81	0.30	0.25	30.65	20.84	0.06	0.07	0.02	0.04	0.01	46.55	99.60	2.80	53.64	I
3-4	0.57	0.22	0.32	30.98	20.63	0.05	0.07	0.03	0.04	0.01	47.03	99.95	92.10	34.26	
3-5	0.67	0.43	0.44	35.18	16.74	0.08	0.06	0.04	0.03	0.01	46.06	99.74	222.30	98.50	
3-7	1.35	0.96	0.93	29.86	20.29	0.19	0.09	0.07	0.04	0.02	45.78	99.58	3000.00	390.20	
3-8	0.43	0.12	0.56	30.08	21.22	0.05	0.06	0.04	0.03	0.01	46.98	99.58	399.35	192.45	
3-9	0.38	0.07	0.40	30.50	21.11	0.05	0.06	0.02	0.04	0.01	47.19	99.83	85.80	53.23	II
3-10	0.55	0.17	0.36	30.86	20.90	0.05	0.07	0.02	0.04	0.01	47.24	100.27	64.90	29.48	
3-11	1.03	0.58	0.64	30.63	20.23	0.10	0.07	0.02	0.04	0.03	46.32	99.69	200.20	108.40	
3-12	1.12	0.25	0.46	30.30	20.98	0.07	0.06	0.02	0.04	0.01	46.89	100.20	61.00	5.00	
3-14	0.30	0.16	0.64	30.56	20.78	0.05	0.06	0.05	0.04	0.01	46.87	99.52	137.70	62.10	
3-16	0.15	0.05	0.69	30.09	21.41	0.05	0.06	0.03	0.03	0.06	47.19	99.81	109.80	75.11	III
3-17	0.31	0.11	0.89	29.97	21.39	0.05	0.05	0.05	0.03	0.01	46.82	99.68	236.60	80.00	
3-18	0.30	0.14	1.63	29.59	21.24	0.05	0.06	0.04	0.04	0.01	46.60	99.70	409.85	242.00	
3-19	1.23	0.77	3.33	25.79	21.49	0.14	0.06	0.11	0.03	0.04	43.78	96.77	5300.00	26300.00	
3-20	2.70	2.25	2.84	27.82	19.79	0.46	0.09	0.08	0.03	0.06	43.62	99.74	2000.00	1800.00	
3-21	0.28	0.14	0.88	29.85	21.27	0.05	0.06	0.04	0.03	0.01	46.85	99.46	1000.00	374.30	IV
3-22	0.60	0.36	2.05	28.84	21.34	0.05	0.07	0.06	0.04	0.01	46.13	99.55	1300.00	635.20	
3-23	0.61	0.35	1.55	29.36	21.18	0.05	0.07	0.05	0.03	0.02	46.37	99.64	1500.00	367.60	
3-29	1.74	1.37	1.48	29.95	19.41	0.27	0.06	0.06	0.04	0.04	44.89	99.31	2800.00	881.60	

注:样品分析在西北有色金属地研测试中心进行;表中“(6)”为样品数;VI—未蚀变白云岩;I—远矿浅灰色粗晶白云岩带;II—针孔状白云岩带;III—米黄色粗晶白云岩带;IV—近矿灰白色粗晶白云岩带;在铅锌含量两列中,超过 0.5% 的样品含量,已换算成 10⁻⁶

前已述及,白云石化、黄铁矿化、铅锌矿化和方解石化是较普遍的蚀变类型,考虑到这些蚀变对铅锌矿化的影响,可将 $\sum_{A=Pb} \omega_A$ 、 $\sum_{A=Zn} \omega_A$ 、 $\sum_{A=MgO} \omega_A$ 和 $\sum_{A=TFe} \omega_A$ 分别代入公式(2)中标示铅矿化指数(AI_{Pb})、锌矿化指数(AI_{Zn})、白云石化蚀变指数(AI_{MgO})及黄铁矿化蚀变指数(AI_{TFe})。 AI 值越大代表蚀变程度越强,反之越弱。

3.4 迁入元素增长指数

岩石在流体的交代蚀变作用下,其物质成分会发生一定的改变,主要体现在岩石元素的迁入和迁出,由公式(1)可计算出蚀变岩石中各元素的迁移量。但是,张可清等^[29]研究认为,单独的元素质量分数变化不能直接用来计算元素的变化量。为了计算矿化-蚀变岩石相对于未蚀变岩石各组分的增长指数,在此基础上,本文将断裂构造岩、矿化-蚀变岩及未蚀变岩石的主量元素、Pb 及 Zn 含量进行对比。其计算过程如下:

$$\omega_i = \frac{M_i}{M} \quad (3)$$

式中: ω_i 为样品中元素*i*的质量分数; M_i 为样品中元素*i*的质量或物质的量(g或mol); M 为样品的总质量或物质的量(g或mol)。

$$Z = \frac{M_{id}}{M_{ip}} \quad (4)$$

式中: Z 为蚀变前后元素增长的倍数, Z 值越大,矿化-蚀变岩石迁入成分越多; M_{ip} 为元素*i*在未蚀变岩石中的总质量; M_{id} 为元素*i*在蚀变岩石中的总质量。

一般来说,将未蚀变岩石的总质量 M_p 假设为 1,假定岩石在物质变化中存在不活动元素 j ,不活动元素的迁移量为零,据此可得:

$$M_d = \frac{\omega_{jp}}{\omega_{jd}} \quad (5)$$

将公式(3)、(4)和(5)互相代入,最终可得:

$$Z = \frac{\omega_{id} \times \omega_{jp}}{\omega_{ip} \times \omega_{jd}} \quad (6)$$

4 结 果

麒麟厂 1249 m 中段各蚀变带 CaO 和 MgO 含量普遍较高,总量大于 45% (表 1), SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 含量均比较低。其中,未蚀变岩($n=6$)中 CaO 和 MgO 的平均值分别为 29.87% 和

20.65%; I 带粗晶白云岩的 CaO 含量为 29.86% ~ 35.18% (平均 31.35%), MgO 含量介于 16.74% ~ 21.22% 之间(平均 19.94%); II 带针孔状白云岩的 CaO 含量为 30.3% ~ 30.86% (平均 30.57%), MgO 含量介于 20.23% ~ 21.11% 之间(平均 20.80%); III 带粗晶白云岩的 CaO 含量为 25.79% ~ 30.09% (平均 28.65%), MgO 含量介于 19.79% ~ 21.49% (平均 21.06%) 之间; IV 带白云岩的 CaO 含量为 28.84% ~ 29.95% (平均 29.50%), MgO 含量介于 19.41% ~ 21.34% 之间(平均 20.80%)。各带白云岩的 CaO/MgO 值介于 1.20~2.10 之间(均值 1.46), 钙镁含量及比值都接近纯白云岩的理论值(CaO = 30.4%, MgO = 21.8%, CaO/MgO = 1.39)。

主要元素的迁移量(Ti)计算结果详见表 2。从未蚀变白云岩→远矿浅灰色粗晶白云岩,除 SiO_2 、 K_2O 为负值外,其余元素的 Ti 值均为正值,且 Pb (1032.38) 和 Zn (212.90) 的值最大;远矿浅灰色粗晶白云岩→针孔状粗晶白云岩中的各元素 Ti 值表现为负值,介于 -649.40~0 之间;针孔状粗晶白云岩→米黄色粗晶白云岩中,除 Al_2O_3 、TFe、MnO、Pb 和 Zn 外,其余 Ti 值均为负值,介于 -29.23~-0.01 之间;米黄色粗晶白云岩→近矿灰白色粗晶白云岩, T_{Pb} 为 -4607.22,其余元素的 Ti 值介于 0.04~1580.21 之间。

矿化-蚀变指数计算结果详见表 3,灰白色粗晶白云岩的 AI 值为 32.32~41.52 (均值 38.91), AI_{Pb} 、 AI_{Zn} 、 AI_{MgO} 和 AI_{TFe} 值分别为 31.43~40.35、0.49~1.75、0.01~0.07、0~0.56。灰色-浅灰白色针孔状粗晶白云岩的 AI 值为 39.63~41.01 (均值 40.50), AI_{Pb} 、 AI_{Zn} 、 AI_{MgO} 和 AI_{TFe} 值分别为 38.35~40.22、0.69~1.22、0~0.02、0.01~0.04。米黄色粗晶白云岩的 AI 值范围为 41.93~43.01 (均值 43.07), AI_{Pb} 、 AI_{Zn} 、 AI_{MgO} 和 AI_{TFe} 值分别为 38.92~40.02、1.65~3.74、0.01~4.54、0.08~0.28。矿石的 AI 值范围为 55.12~77.65 (均值 63.20), AI_{Pb} 、 AI_{Zn} 、 AI_{MgO} 和 AI_{TFe} 值分别为 1.89~8.02、11.37~39.77、3.70~11.56、5.35~52.77。 AI 值总体呈递增特征。

迁入元素增长指数计算结果详见表 4,不同蚀变带的粗晶白云岩的 Z_{TFe} 、 Z_{CaO} 、 Z_{MgO} 、 Z_{Zn} 、 Z_{Pb} 值范围分别为 0.72~6.24、0.27~1.91、0.28~1.76、0.12~77.10、2.42~1415.91 之间。矿石的 Z_{TFe} 、 Z_{CaO} 、 Z_{MgO} 、 Z_{Zn} 、 Z_{Pb} 值分别为 21.64~67.19、0.04~1.15、

0.05~0.48、895.35~17195.20、2409.02~13908.88 之间。

5 讨论

5.1 矿化蚀变带组分迁移的多寡

蚀变指数可用于定量化表示蚀变岩元素迁移的强弱^[32]。会泽矿床矿化蚀变较普遍,从围岩至矿体,未蚀变白云岩→远矿浅灰色粗晶白云岩带阶段(A), SiO_2 和 K_2O 的迁移占原岩的百分比分别为-41.9%和-6.12%,为迁出状态; Al_2O_3 、 TFe 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 、烧失量、Pb和Zn呈迁入富集状态;远矿浅灰色粗晶白云岩带→针孔状粗晶白云岩带阶段(B), SiO_2 、 K_2O 、 Al_2O_3 、 TFe 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 、烧失量、Pb和Zn均呈迁出状态;针孔状粗晶白云岩带→米黄色粗晶白云岩带阶段(C), Al_2O_3 、 TFe 、Pb和Zn为迁入富集状态, SiO_2 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 、烧失量为迁出状态;米黄色粗晶白云岩带→近矿灰白色粗晶白云岩带阶段(D),除Pb外的其他组分均呈迁入富集状态(图3)。总体而言, TFe 在各阶段相对保持迁入富集状态,且随着Pb-Zn矿化的增强而递增; CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 和烧失量,在A、D阶段表现为迁入富集状态,在B、C阶段表现为弱迁出状态。Pb和Zn,在A、C阶段保持大量迁入富集状态,在B阶段有少量迁出。而在D阶段,Zn保持迁入,Pb保持迁出。此外,米黄色粗晶白云岩

带→近矿灰白色粗晶白云岩带阶段是各元素最主要的富集阶段,表明在成矿流体中可能富含Pb、Zn等成矿元素。

5.2 矿化-蚀变指数变化规律与矿化-蚀变分带规律的一致性

由灰岩(C_1d)→远矿浅灰色粗晶白云岩带(C_1b)→针孔状白云岩带→米黄色粗晶白云岩带→近矿灰白色粗晶白云岩带→铅锌矿化带, AI 值总体呈递增趋势。前人研究表明, AI 值越大,蚀变约强烈^[32],在诸多矿床已经得到证实^[24,33]。对比该矿床各蚀变带数据可以看出(表3;图4):①铅锌矿化带的 AI 、 AI_{Pb} 、 AI_{Zn} 及 AI_{TFe} 值总体高于其余各蚀变带。②相对铅锌矿化带,其余各带 AI_{MgO} 值都较高。③与蚀变白云岩相比,断裂构造岩样品的 AI_{MgO} 值较低, AI_{TFe} 、 AI_{Pb} 及 AI_{Zn} 值较高。由此可见, AI_{MgO} 值的变化与白云石化关系密切,白云石化越强烈,其 AI_{MgO} 值越高,而 AI_{Pb} 和 AI_{Zn} 越低,反之亦然。

结合该矿床地质特征矿化蚀变主要为白云石化、黄铁矿化,它们与铅锌矿体呈正相关关系,矿化越强烈,黄铁矿化蚀变和白云石化越强烈,自粗晶白云岩→团块状黄铁矿具少量浸染状的铅锌矿化→块状铅锌矿体的矿物分带规律与蚀变指数的计算基本吻合, AI_{Pb} 及 AI_{Zn} 值表现为同步增长的特征, AI_{TFe} 值则与之相反,暗示它们可能为成矿流体分异的结果^[34],加之铅锌成矿时对白云岩的强烈溶蚀和

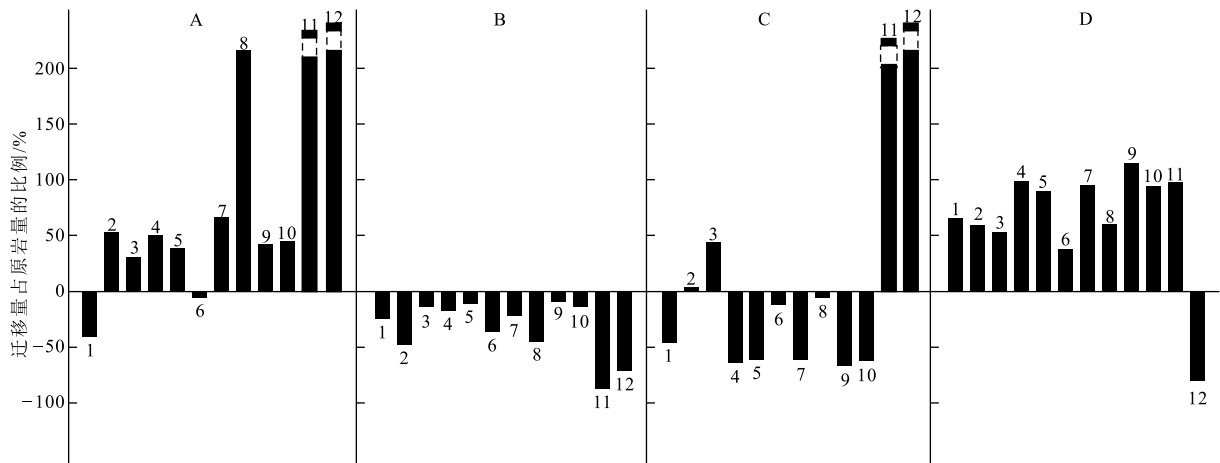


图3 会泽麒麟厂铅锌矿1249 m中段3号出矿道各蚀变带化学成分迁移图

Fig. 3 Migration of element of the No.3 withdrawal tunnel in the 1249 m level adit in the Huize Pb-Zn deposit

A—未蚀变白云岩→远矿浅灰色粗晶白云岩带;B—远矿浅灰色粗晶白云岩带→针孔状白云岩带;

C—针孔状白云岩带→米黄色粗晶白云岩带;D—米黄色粗晶白云岩带→近矿灰白色粗晶白云岩带;1— SiO_2 ;2— Al_2O_3 ;3— TFe ;4— CaO ;

5— MgO ;6— K_2O ;7— Na_2O ;8— MnO ;9— P_2O_5 ;10—烧失量;11—Zn;12—Pb

表 3 会泽麒麟厂 1249 m 中段 3 号出矿道岩石矿化-蚀变指数

Table 3 The results of alteration index of the No.3 withdrawal tunnel in the 1249 m level adit in the Huize deposit

样品号	岩(矿)石	AI	AI_{MgO}	AI_{TFe}	AI_{Pb}	AI_{Zn}	AI 均值	矿化-蚀变带
3-1	灰岩	6.02	4.90	1.12	0.00	0.00	6.02	/
3-3		40.34	39.84	0.49	0.01	0.00		
3-4		39.93	39.31	0.60	0.01	0.02		
3-5	灰白色粗晶白云岩	32.32	31.43	0.83	0.02	0.04	38.91	远矿浅灰色粗晶白云岩带
3-7		40.45	38.06	1.75	0.07	0.56		
3-8		41.52	40.35	1.06	0.04	0.08		
3-9		41.01	40.22	0.76	0.01	0.02		
3-10		40.40	39.69	0.69	0.01	0.01		
3-11	灰色—浅灰白色针孔状粗晶白云岩	39.63	38.35	1.22	0.02	0.04	40.50	针孔状粗晶白云岩带
3-12		40.89	40.00	0.88	0.00	0.01		
3-14		40.60	39.36	1.21	0.01	0.03		
3-16		41.77	40.44	1.30	0.01	0.02		
3-17		41.87	40.15	1.67	0.02	0.04		
3-18	米黄色粗晶白云岩	42.24	39.12	3.00	0.04	0.08	43.07	米黄色粗晶白云岩带
3-19		48.35	37.13	5.75	4.54	0.92		
3-20		41.14	35.38	5.08	0.32	0.36		
3-21		41.93	40.02	1.65	0.07	0.19		
3-22		43.01	38.92	3.74	0.12	0.24	42.34	近矿灰白色粗晶白云岩带
3-23	灰白色粗晶白云岩	42.30	39.10	2.86	0.07	0.28		
3-31		42.12	39.39	2.61	0.04	0.08		
3-24		77.65	3.63	12.55	8.70	52.77		
3-25		52.89	4.07	39.77	3.70	5.35		
3-26		55.12	8.02	16.86	4.38	25.86	63.20	铅锌矿化带
3-28	矿石	63.16	7.57	11.37	4.35	38.33		
3-27		70.31	2.29	25.34	9.13	35.08		
3-30		60.06	1.89	36.25	11.56	10.36		
3-2	断层泥	21.91	18.33	3.49	0.02	0.08	21.91	/
3-13	断层泥	38.97	34.00	4.82	0.06	0.09	38.97	/
3-15	碎粒(斑)岩	49.69	36.93	4.50	2.82	5.44	49.69	/

交代,使围岩被铅锌矿石替代,故 AI_{MgO} 值较低。此外,构造岩的白云石化相对较弱,而黄铁矿化和铅锌矿化较强,推断这些断裂可能为导矿构造,是 NE 构造带的重要组成部分^[34-35]。中—高温成矿流体^[36]沿 NE 向断裂发生运移,热液烘烤作用引起上、下盘的白云岩重结晶,形成粗晶白云岩化蚀变,白云岩内节理、裂隙等发育较少,未见矿体的大规模富集,导致铅锌矿化带的 AI_{MgO} 值较低,而 AI_{TFe} 、 AI_{Pb} 及 AI_{Zn} 值高于其他矿化蚀变带。

5.3 迁入元素增长指数的指示意义

李孜腾等^[37]认为,矿化结构具典型的成矿构造-蚀变白云岩-铅锌矿体变化规律。但该结构中主要迁移元素的强弱未作量化研究。因此,通过观察 TFe、CaO、MgO、Pb 和 Zn 的增长指数得到如下规律(图 5):①从远矿浅灰色粗晶白云岩带→针孔状白云岩带→米黄色粗晶白云岩带→近矿灰白色粗晶白云岩带→铅锌矿化带, Z_{TFe} 、 Z_{Pb} 及 Z_{Zn} 总体呈增长趋势,其中,矿体的 Z_{TFe} 、 Z_{Pb} 及 Z_{Zn} 值明显高于

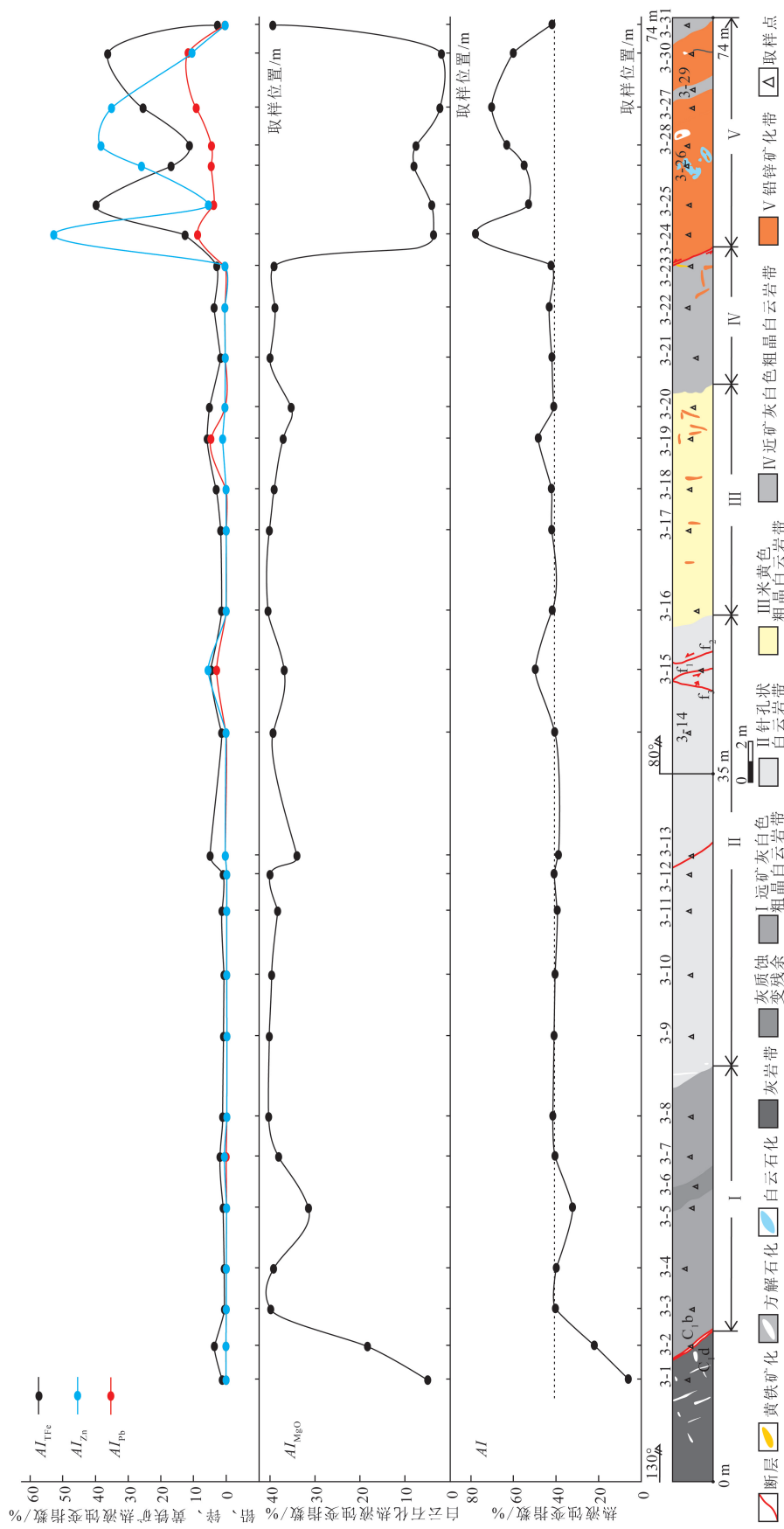


图 4 会泽麒麟厂 1249 m 中段 3 号出矿道岩石矿化-蚀变指数图
Fig. 4 The wall rocks alteration index of the No. 3 withdrawal tunnel in the 1249 m level adit in the Huize deposit

表 4 会泽麒麟厂矿区 1249 中段 3 号出矿道迁入元素的增长指数
Table 4 The values of growth index of element transfer-in of the No.3 withdrawal tunnel
in the 1249 m level adit in the Huize deposit

样品号	岩(矿)石	Z_{TFe}	Z_{CaO}	Z_{MgO}	Z_{Zn}	Z_{Pb}	矿化蚀变带
3-1	灰岩	0.22	0.33	0.03	0.10	0.52	/
3-3		0.76	1.68	1.65	0.12	10.40	
3-4		0.95	1.71	1.64	4.05	6.66	
3-5	灰白色粗晶白云岩	1.30	1.91	1.31	9.64	18.88	远矿浅灰色粗晶白云岩带
3-7		1.63	0.96	0.94	77.10	44.31	
3-8		1.69	1.68	1.72	17.83	37.98	
3-9		1.21	1.70	1.70	3.81	10.45	
3-10		1.10	1.72	1.68	2.88	5.79	
3-11	灰-浅灰白色针孔状粗晶白云岩	0.73	0.64	0.61	3.34	8.00	针孔状粗晶白云岩带
3-12		1.27	1.53	1.53	2.46	0.89	
3-14		1.94	1.71	1.68	6.15	12.25	
3-16		0.34	0.27	0.28	0.80	2.42	
3-17		2.75	1.71	1.76	10.78	16.10	
3-18	米黄色粗晶白云岩	5.05	1.69	1.75	18.67	48.71	米黄色粗晶白云岩带
3-19		2.76	0.39	0.47	64.57	1415.91	
3-20		1.50	0.27	0.28	15.48	61.56	
3-21		2.67	1.67	1.72	44.66	73.86	
3-22	灰白色粗晶白云岩	6.24	1.61	1.72	58.05	125.35	近矿灰白色粗晶白云岩带
3-23		2.92	1.02	1.06	41.54	44.98	
3-31		4.35	1.69	1.74	19.55	41.42	
3-24		27.84	0.39	0.21	17195.20	12520.01	
3-25		45.32	0.14	0.12	895.35	2739.16	
3-26	矿石	38.33	1.15	0.48	8636.32	6461.29	铅锌矿化带
3-28		24.01	0.97	0.43	10881.94	12520.01	
3-27		21.64	0.04	0.05	4806.53	2409.02	
3-30		67.19	0.12	0.09	2819.56	13908.88	
3-2	断层泥	0.06	0.01	0.01	0.20	0.24	/
3-13	断层泥	0.26	0.03	0.05	0.73	1.97	/
3-15	碎粒(斑)岩	7.98	1.47	1.74	1416.61	3240.71	/

围岩, Z_{Pb} 和 Z_{Zn} 值同步增长, Z_{TFe} , Z_{TFe} 则与铅锌相反。② Z_{MgO} 与 Z_{CaO} 总体呈振荡分布, 两者呈正相关关系, 铅锌矿化带的 Z_{MgO} 与 Z_{CaO} 值总体偏低。部分样品的 Z_{CaO} 值高于 Z_{MgO} 值, 可能与蚀变白云岩灰岩蚀变残余及矿石中包裹的方解石和白云石有关(图 2)。 Z_{MgO} 与 Z_{CaO} 呈振荡分布, 是由于热液流体中白云石、方解石始终处于溶解-平衡和沉淀-平衡的交换中。③断裂构造样品和蚀变带分界线样品

的 Z_{MgO} 与 Z_{CaO} 均较低。

与 AI_{Pb} 、 AI_{Zn} 及 AI_{TFe} 蚀变指数值对比可以看出, Z_{TFe} 、 Z_{Pb} 及 Z_{Zn} 增长指数的变化规律基本保持一致, 进一步验证了从远矿浅灰色粗晶白云岩带→针孔状白云岩带→米黄色粗晶白云岩带→近矿灰白色粗晶白云岩带→铅锌矿化带, 随着铅锌矿化逐渐增强, 黄铁矿化、方解石化及白云石化由强变弱的规律^[28, 37]。前已讨论断裂构造为该区的主要导矿断

裂, Z_{MgO} 与 Z_{CaO} 低于围岩, 可能是因为流体在断裂中运移速度相对较快, 成矿流体与围岩的接触不充分, 水岩反应相对较弱, 未见明显的白云石化和方解石化; 同时, 流体的运移将白云岩内的 MgO 和 CaO 带出, 亦是导致 Z_{MgO} 与 Z_{CaO} 较低的原因。此外, 成矿流体在围岩中主要通过渗滤的方式进行扩散, 其作用时间长、范围广, 因此水岩反应强烈, 形成了较大规模的矿化蚀变, 尤其是白云石化蚀变。通过增长指数的计算可以明显地指示矿体所在的空间位置, 对深部及外围的找矿勘查具指示作用。

5.4 矿化-蚀变指数分带模式及其找矿意义

基于地质背景、成矿条件和控矿因素, 原生晕异常、大深度物理探测等在深部找矿预测中具有明显的意义^[38-39], 而针对热液蚀变与深部找矿多为定性描述, 缺乏半定量-定量化评价。通过以上分析, 构建该类矿床矿化-蚀变指数分带模式(图 6)。前人认为 NE 向构造控制了各蚀变带的空间展布^[34-35]。各带蚀变强弱与矿化类型具有明显的对

应性, 铅锌矿化带内以铅锌为主, 伴随黄铁矿化、碳酸盐化等热液蚀变, 自矿体向外侧围岩的演化过程中, 铅锌矿化逐渐减弱, 而碳酸盐化逐步增强, 对应各带的矿化蚀变指数亦具有铅锌矿化带较高, 外侧围岩蚀变指数较低的特征(图 6)。由此可以看出, 成矿热液在有利的构造背景下发生沉淀, 铅锌矿化带 Pb、Zn 越来越富集, 但贫 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} , 但外侧围岩与之相反, 贫 Pb、Zn, 富集 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} , 表明成矿流体自矿化中心向外侧围岩运移(图 6)。基于不同平面中段联合剖面蚀变模型可知, 由浅部至深部, 矿体两侧的蚀变白云岩的矿化蚀变指数(约 40%)变化稳定, 而 Pb-Zn 矿化带矿化蚀变指数可达 80%, 远高于前者。该模式不仅反映了该矿床的矿化-蚀变分带规律, 而且矿化蚀变指数的计算可有效地提取不同矿化-蚀变分带内铅锌矿化-蚀变信息, 减少了碳酸盐化和黄铁矿化蚀变对铅锌蚀变指数提取的影响。该模式对明确和圈定成矿地质体的分布范围、进一步预测有利的找矿区段、指导该类矿床

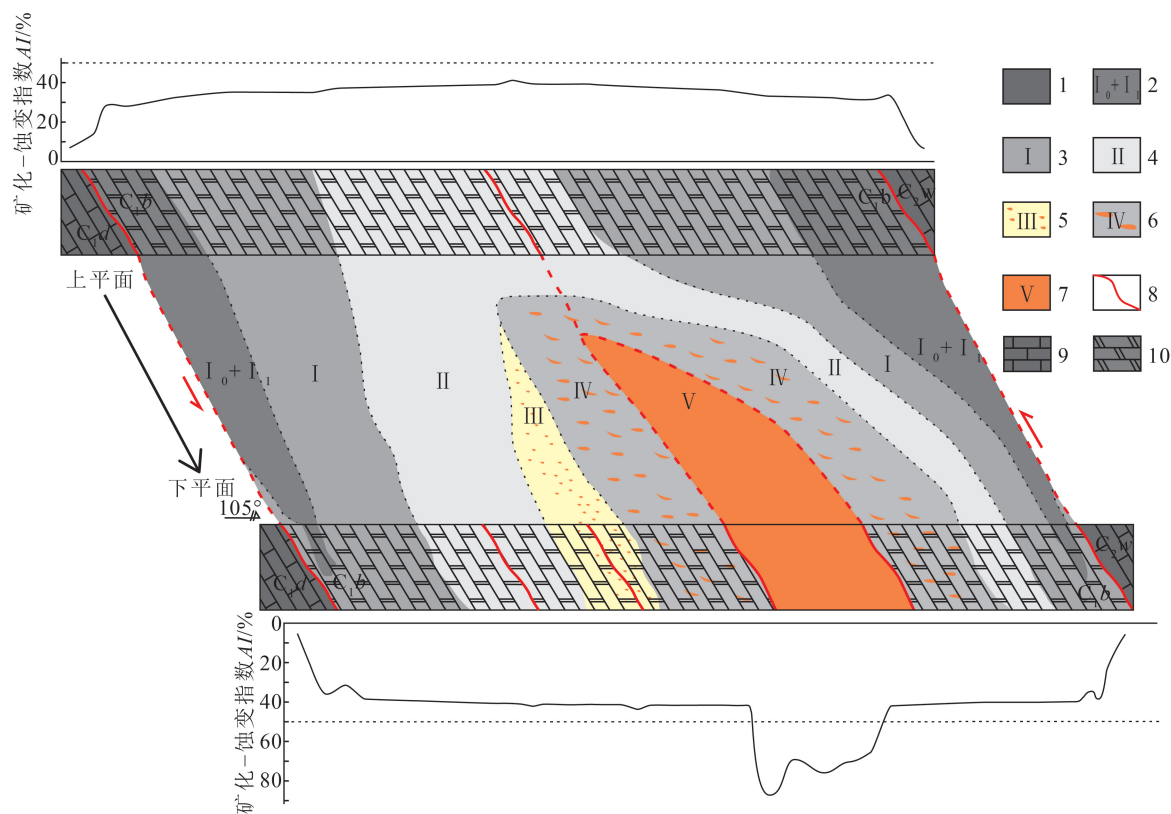


图 6 会泽铅锌矿区深部矿化-蚀变分带模式示意图

Fig. 6 Schematic diagram of mineralization-alteration zoning model in deep part of the Huize Pb-Zn deposit

1—结晶灰岩带;2—灰色-浅灰色灰质白云岩+中细晶白云岩;3—灰白色粗晶白云岩带;4—针孔状粗晶白云岩带;5—米黄色粗晶白云岩带;6—灰白色矿化粗晶白云岩带;7—铅锌矿化;8—断层;9—下石炭统灰岩;10—下石炭统白云岩

深边部找矿勘查具有实际意义。而且对深化 HZT 铅锌矿床模型^[11]也有重要的理论意义。

6 结 论

(1)在未蚀变白云岩→远矿浅灰色中粗晶白云岩带、远矿浅灰色粗晶白云岩带→针孔状粗晶白云岩带、针孔状粗晶白云岩带→米黄色粗晶白云岩带和米黄色粗晶白云岩带→近矿灰白色粗晶白云岩带中, TFe 、 CaO 、 MgO 、 Pb 、 Zn 和烧失量总体保持迁入富集状态,而 TFe 、 Pb 和 Zn 的迁入富集最明显。其中,米黄色粗晶白云岩带→近矿灰白色粗晶白云岩带阶段是各元素的主要富集蚀变阶段。

(2) AI 、 AI_{TFe} 及 AI_{Pb+Zn} 随着离矿体距离的减小而增大,而 AI_{MgO} 值在近矿蚀变岩部位高、矿体部位低,可以反映围岩经受过强烈的白云石化。

(3)从远矿到近矿,矿化-蚀变岩的 Z_{TFe} 、 Z_{Pb} 及 Z_{Zn} 总体呈增长趋势,而 Z_{MgO} 与 Z_{CaO} 值呈振荡分布。其中,矿体的 Z_{TFe} 、 Z_{Pb} 及 Z_{Zn} 值明显高于蚀变围岩,而 Z_{MgO} 与 Z_{CaO} 值低于围岩。这一变化规律与矿化蚀变分带规律一致。

(4)构建了会泽铅锌矿床矿化-蚀变指数分带模式,该模式为查明深部成矿地质体的时空分布范围奠定了理论基础,亦对深化 HZT 铅锌矿床蚀变模型和预测有利的找矿区段提供了证据。

致谢:审稿专家在论文评审过程中提出了诸多宝贵意见与建议,云南驰宏锌锗股份有限公司会泽矿业分公司地质人员为本研究野外工作提供了诸多帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1] 韩润生,刘丛强,黄智龙,等.论云南会泽富铅锌矿床成矿模式[J].矿物学报,2001,21(4): 674-680.
- [2] 黄智龙,李文博,张振亮,等.云南会泽超大型铅锌矿床成因研究中的几个问题[J].矿物学报,2004,24(2): 105-111.
- [3] Zhou C, Zhou C. The Source of Metals in the Qilinchang Zn-Pb Deposit, Northeastern Yunnan, China: Pb-Sr Isotope Constraints [J]. Economic Geology, 2001, 96(3): 583-598.
- [4] 黄智龙,陈进,刘丛强,等.峨眉山玄武岩与铅锌矿床成矿关系初探——以云南会泽铅锌矿床为例[J].矿物学报,2001,21(4): 681-688.
- [5] 黄智龙,李文博,陈进,等.云南会泽超大型铅锌矿床构造带方解石稀土元素地球化学[J].矿床地质,2003,22(2): 199-207.
- [6] 黄智龙,李文博,陈进,等.云南会泽超大型铅锌矿床 C、O 同位素地球化学[J].大地构造与成矿学,2004,28(1): 53-59.

- [7] Zhao D, Han R, Wang L, et al. Genesis of the Leihong large zinc-lead deposit in northeastern Yunnan, China: Evidences from geological characteristics and C-H-O-S-Pb isotopic compositions [J]. Ore Geology Reviews, 2021, 135: 104219.
- [8] Zhao D, Han R, Ren T, et al. Geology, C-O-S-Pb isotopes, and their implications for the ore genesis of the Xiaohu carbonate-hosted Zn-Pb deposit in northeastern Yunnan, China [J]. Applied Geochemistry, 2022, 142: 105306.
- [9] 柳贺昌,林文达.滇东北铅锌银矿床规律研究[M].昆明: 云南大学出版社,1999.
- [10] 韩润生,邹海俊,刘鸿.构造地球化学、勘查地球化学——滇东北铅锌银矿床成矿规律及构造地球化学找矿[J].云南地质,2006,25(4): 382-384.
- [11] 韩润生,胡煜昭,王学琨,等.滇东北富锗银铅锌多金属矿集区矿床模型[J].地质学报,2012,86(2): 280-294.
- [12] 韩润生,王峰,胡煜昭,等.会泽型(HZT)富锗银铅锌矿床成矿构造动力学研究及年代学约束[J].大地构造与成矿学,2014(4): 758-771.
- [13] 于晓飞,吕志成,孙海瑞,等.全国整装勘查区成矿系统研究与矿产勘查新进展[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(5): 1261-1288.
- [14] 韩润生.构造成矿动力学及隐伏矿定位预测:以云南会泽超大型铅锌(银、锗)矿床为例[M].北京: 科学出版社,2006.
- [15] 王炎臻,李朝阳,李泽琴,等.川滇地区密西西比河谷型铅锌矿床成矿地质背景及成因探讨[J].地球与环境,2001,29(2): 41-45.
- [16] 张长青.中国川滇黔交界地区密西西比型(MVT)铅锌矿床成矿模型[D].中国地质科学院博士学位论文,2008.
- [17] 李文博,黄智龙,陈进,等.会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究[J].矿物学报,2004,24(2): 112-116.
- [18] 张长青,毛景文,刘峰,等.云南会泽铅锌矿床粘土矿物 K-Ar 测年及其地质意义[J].矿床地质,2005,24(3): 317-324.
- [19] 赵冻,韩润生,王加昇,等.滇东北矿集区小河铅锌矿床构造解析及其控矿模式[J].地质力学学报,2020,26(3): 345-362.
- [20] 田光礼,陈守余,董凯,等.甘肃白银厂折腰山 VMS 矿床蚀变带元素迁移及定量计算[J].矿床地质,2019,38(1): 80-100.
- [21] 艾金彪,马生明,朱立新,等.安徽马头斑岩型铜矿床蚀变带微量元素迁移规律及其定量计算[J].矿床地质,2013,32(6): 1262-1274.
- [22] 吴德海,夏菲,潘家永,等.粤北棉花坑钨矿床热液蚀变与物质迁移研究[J].岩石学报,2019,35(9): 2745-2764.
- [23] 赵冻,韩润生,任涛,等.滇东北大型矿集区乐红大型铅锌矿床矿化蚀变分带模式[J].矿物岩石地球化学通报,2016,35(6): 1258-1269.
- [24] 陈随海,韩润生,申屠良义,等.滇东北矿集区昭通铅锌矿区蚀变岩分带及元素迁移特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(3): 711-721.
- [25] 韩润生,王雷,方维萱,等.初论云南易门地区凤山铜矿床刺穿构造岩-岩相分带模式[J].地质通报,2011,30(4): 495-504.
- [26] 韩润生,陈进,李元,等.云南会泽麒麟厂铅锌矿床构造地球化学及定位预测[J].矿物学报,2001,21(4): 667-673.
- [27] Han R S, Chen J, Wang F, 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, 159(11): 62-78.
- [28] 文德潇, 韩润生, 吴鹏, 等. 云南会泽 HZT 型铅锌矿床蚀变白云岩特征及岩石-地球化学找矿标志[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 235-245.
- [29] 张可清, 杨勇. 蚀变岩质量平衡计算方法介绍[J]. 地质科技情报, 2002, 21(3): 104-107.
- [30] Gresens R. L. Composition-volume relationships of metasomatism[J]. Chemical Geology, 1967, 2(67): 47-65.
- [31] 周永章, 涂光炽, Chown E H, 等. 热液围岩蚀变过程中数学不变量的寻找及元素迁移的定量估计——以广东河台金矿田为例[J]. 科学通报, 1994, 39(11): 1026-1028.
- [32] Haeussinger H, Okrusch M, Scheepers D. Geochemistry of premetamorphic hydrothermal alteration of metasedimentary rocks associated with the Gorob massive sulfide prospect, Damara Orogen, Namibia [J]. Economic Geology, 1993, 88(1): 72-90.
- [33] 王雷, 韩润生, 黄建国, 等. 云南易门凤山铜矿床 59[#]矿体分布区断裂构造地球化学特征及成矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(2): 233-238.
- [34] 韩润生, 吴鹏, 张艳, 等. 西南特提斯川滇黔成矿区富锗铅锌矿床成矿理论研究新进展[J]. 地质学报, 2022, 96(2): 554-573.
- [35] 王明志, 韩润生, 张艳. 成矿构造体系对铅锌成矿系统的控制作用——以会泽富锗铅锌矿床为例[J]. 地质学报, 2020, 94(10): 3008-3023.
- [36] 韩润生, 李波, 倪培, 等. 闪锌矿流体包裹体显微红外测温及其矿床成因意义——以云南会泽超大型富锗银铅锌矿床为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 91-104.
- [37] 李孜腾, 韩润生, 闫庆文. 会泽超大型富锗银铅锌矿床矿化-蚀变分带规律及构造的控制作用[J]. 中国地质, 2017, 44(02): 316-330.
- [38] 林成贵, 程志中, 吕志成, 等. 甘肃省早子沟金矿原生晕分带特征及深部找矿预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(1): 70-84.
- [39] 刘建民, 赵国春, 徐刚, 等. 辽东半岛金矿成矿作用与深部资源勘查[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1613-1635.