

doi: 10.12029/gc20160513

李随民, 李玉成, 韩玉丑, 等. 邯鄹娄里金矿床原生晕垂向分带特征研究[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1637–1644.

Li Suimin, Li Yucheng, Han Yuchou, et al. The characteristics of vertical primary halo zoning in the Louli gold deposit, Handan City, Hebei Province[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1637–1644(in Chinese with English abstract).

邯鄹娄里金矿床原生晕垂向分带特征研究

李随民¹ 李玉成² 韩玉丑³ 孔令海² 赵淑梅² 王京涛² 王俊革²

(1. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省地矿局第一地质大队, 河北 邯鄹 075000;

3. 河北省地矿局, 河北 石家庄 050081)

摘要: 娄里金矿位于邯鄹洪山杂岩体北侧的火山凝灰岩中。该类型金矿在太行山南段为首次发现, 其成矿规律和深部成矿潜力的研究对圈定成矿远景区及增加矿山资源量有重要的指导意义。据此系统采集了矿区 ZK11-2 和 ZK16-1 钻孔岩心样品, 在分析区域成矿地质规律和矿床地质特征的基础上, 采用格里戈良分带指数法和广义衬值法两种方法计算了元素垂向分带序列, 结果显示不同方法虽在元素排列顺序上存在一定差异, 但在反映热液活动期次及元素空间叠加模式上基本相同。两个钻孔中均出现了明显的“前尾晕共存”及“反向分带”现象。在此基础上结合微量元素垂向变化规律, 分析了区内金矿体形成的热液活动过程。研究表明两个钻孔的垂向分带都由两个完整的小循环组成, 说明区内金矿体的形成至少经历了两次热液活动叠加。

关键词: 原生晕; 垂向分带; 金矿; 娄里

中图分类号: P632⁺.2; P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)05-1637-08

The characteristics of vertical primary halo zoning in the Louli gold deposit, Handan City, Hebei Province

LI Sui-min¹, LI Yu-cheng², HAN Yu-chou³, KONG Ling-hai², ZHAO Shu-mei²,
WANG Jing-tao², WANG Jun-ge²

(1. Hebei Geological University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. No. 1 Geological Party, Hebei Geological Exploration Bureau, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 3. Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Shijiazhuang 050081, Hebei, China)

Abstract: The Louli gold deposit is located on the northern side of Hongshan alkalic complex, and the host rock of the orebody is the volcanic tufa. This is the first ore deposit of such type found in volcanic tufa in the southern segment of the Taihang Mountain, and its metallogenic regularity and deep metallogenic prospect evaluation are of guiding significance for delineating potential prospective areas and increasing mineral resources. Based on the regional mineralization regularity and geological characteristics, the authors systematically collected rock samples in 2 drill holes, and used Gregorians zonality index method and generalized

收稿日期: 2016-04-21; 改回日期: 2016-08-08

基金项目: 河北省国土资源厅基金项目(2012055548 和 2013045650)联合资助。

作者简介: 李随民, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要矿床学方面的教学和研究工作; E-mail: sml71@163.com。

contrast value method to compute and determine vertical zoning sequence of indicator elements. The results show that different calculation methods may produce somewhat different element orders, but the active stages of hydrothermal fluid and spatial superposition mode of halos are identical. The computed result of two drill holes shows the obvious coexistence of frontal halo and tail halo and axial zoning characteristics. The active process of hydrothermal fluid was analyzed based on the trace elements geochemical parameter axial variation. The results obtained show that the vertical zoning of two drill holes are made up of two stage hydrothermal circulation, suggesting that the formation of gold deposit is of multi-stage characteristics.

Key words: primary halo; vertical zoning; gold deposit; Louli

About the first author: LI Sui-min, born in 1971, doctor and professor, mainly engages in the study of deposit geology and deposit geochemistry; E-mail: smli71@163.com.

Fund depport: Supported by Research Projects of Bureau of Land and Resources of Hebei Province (No. 201205548; No. 2013045650).

娄里金矿位于邯郸永年洪山碱性杂岩体北侧火山凝灰岩及凝灰熔岩中。目前已在4条含金矿化蚀变带中圈出12个矿体。李惠等通过对胶东、豫陕小秦岭和燕辽等中国主要金矿集中区典型金矿成矿作用的研究,将金矿床的形成归纳为4个阶段,分别为黄铁矿-石英阶段、金-石英-黄铁矿阶段、金-石英-多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段^[1]。已有的研究结果显示,娄里金矿床形成温度为150℃左右,成矿深度在59~191 m,平均为92 m。金矿成因属浅成低温热液矿床,矿床为多期热液活动叠加的结果^①。其中,金-石英-黄铁矿阶段为娄里金矿的主要成矿阶段,金-石英-多金属硫化物阶段不发育。矿床原生晕理论研究表明,热液中的成矿物质在溶解、迁移、沉淀过程中,由于内部和外界物理化学条件的变化,导致成矿指示元素及其组合的空间分布,形成规律性分带,每个矿体有其特定的前缘晕、近矿晕和尾晕元素组合。研究热液矿床的原生叠加晕特征,即研究识别每一期次形成的矿体-晕的轴向分带及不同期次形成的矿体-晕在空间上的叠加结构。矿化在空间上表现为成矿晕的叠加、再组合。可通过矿床成矿晕的空间组合变化规律,判断金矿体剥蚀程度、分析深部矿化富集情况,据此推测深部矿化特征^[2-7]。因此矿区元素轴向分带性的研究具有重要的理论和实际意义。本次分别挑选了娄里金矿区北侧ZK16-1和南侧ZK11-2两个钻孔,按10 m间隔采取岩心样品,分析有关指示元素的轴向变化规律,为矿区找矿勘查提供理论依据。

1 区域地质

研究区位于华北地台山西断隆与华北断拗两

个Ⅱ级构造单元结合部位的武安凹断束中,地壳运动频繁,岩浆活动十分强烈,形成一系列北东向褶皱和断裂及十分复杂且规模巨大的构造岩浆岩带(图1)。研究区火山喷发作用强烈,火山机构受区域性构造所控制分布在邯郸深大断裂与鼓山—紫山大断裂之间的北北东向构造岩浆岩带内。

与金矿成因关系密切的洪山碱性杂岩体沿紫山—鼓山断裂侵入,且分布于断裂两侧。陈斌等^[8]对洪山正长岩中的锆石采用SHRIMP方法测年,确定其侵位年代为(135±2.7) Ma,黑云母Rb-Sr同位素等时年龄为(120.3±2.4) Ma。测年结果显示,洪山岩体的形成时代为白垩纪。杂岩体岩性较为复杂,以正长岩为主。岩体北侧火山凝灰岩发育,野外实测地质剖面显示,岩体北侧娄里组火山活动的性质表现为6个完整的火山爆发相—岩浆喷溢相的演化序列。含矿热液受特定旋回的岩性岩相控制,金矿化主要赋存于娄里组二段的火山凝灰岩中。受洪山岩体火山机构的影响,矿区范围内多数断裂带方向常在NW至NNE之间变化,平面上具弧形变化特点。

2 矿床地质特征

目前已在洪山火山机构北部娄里一带初步圈出4条含金矿化蚀变带。蚀变带主要发育于白垩系娄里组二段(K₁L²)火山碎屑岩地层中,岩性以粗面质含角砾凝灰岩或粗面质角砾凝灰熔岩为主。蚀变带中岩石较破碎、片理发育,蚀变带受构造控制明显。4条蚀变带总体上呈现出以洪山火山机构为南部交汇点,向北呈NWW、SN、NEE放射状分布态势(图2)。矿体产在矿化蚀变带中,受蚀变带控制,以Ⅱ号矿化蚀变带矿体规模最大。4条矿化蚀变带

①河北省地矿局地质一队. 河北省邯郸市洪山岩体及外围金矿成矿规律研究报告[R]. 2015.

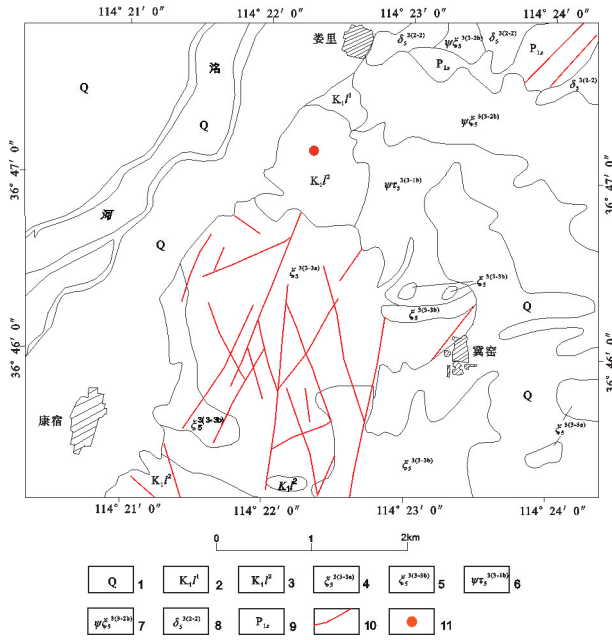


图1 研究区地质简图

- 1—第四系;2—娄里组一段;3—娄里组二段;4—正长岩;
- 5—巨斑状正长岩;6—黑云辉石粗面斑岩;7—粗粒黑云辉石正长岩;8—闪长岩;9—下石盒子组;10—断层;
- 11—金矿床(点)

Fig. 1 Simplified geological map of the study area

- 1—Quaternary; 2—First member of Louli Formation; 3—Second member of Louli Formation; 4—Syenite; 5—Large porphyritic syenite; 6—Biotite-pyroxene trachy porphyry; 7—Coarse-grained biotite-pyroxene trachy porphyry; 8—Diorite; 9—Shihezi Formation of Lower Permian; 10—Fault; 11—Gold deposit

均呈陡倾斜, 倾角多在70°以上(图3)。4个矿化蚀变带矿化类型均为破碎带蚀变岩型, 矿脉主要由劈理、片理发育的碎裂蚀变凝灰熔岩组成。主要矿化蚀变为黄铁矿化, 地表多已褐铁矿化, 其次为硅化, 多表现为微细石英脉呈条纹状分布。金矿化严格受限于构造热液蚀变范围, 矿体多呈细脉或两向延长薄饼状产出, 形态较为复杂。水平和剖面上均呈舒缓波状弯曲, 与矿化蚀变带一致。4条矿化蚀变带中12个矿体统计结果显示长度在80~308 m, 厚度在1.09~9.4 m, 品位在 1.02×10^{-6} ~ 4.8×10^{-6} , 平均品位 2.49×10^{-6} 。

矿石物质组成较为简单。金属矿物主要为自然金, 含银自然金, 银金矿、黄铁矿、磁铁矿等。脉石矿物主要为长石、石英, 绢云母。其中长石以钾钠长石、透长石、微斜长石、钠长石、中长石等偏碱性长石为主。矿石中常见晶粒结构(包括自形晶结

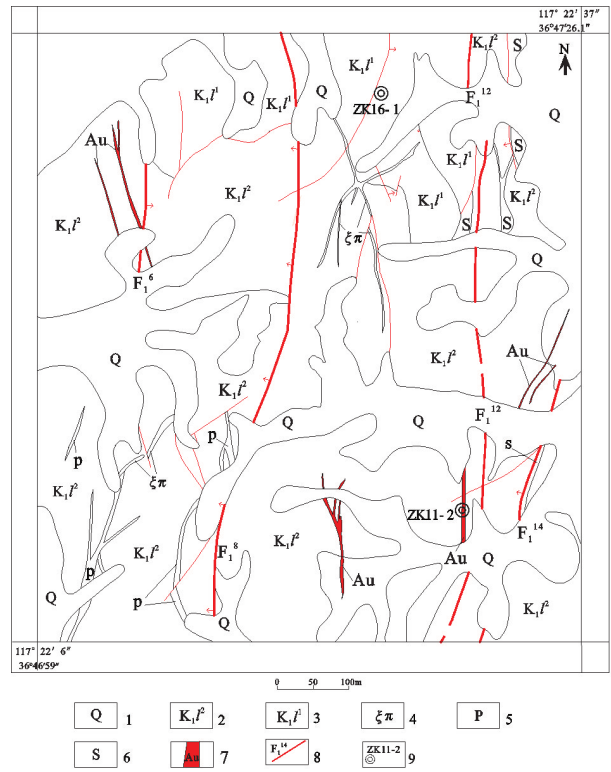


图2 娄里矿区地质简图

- 1—第四系;2—白垩系娄里组二段;3—白垩系娄里组一段;
- 4—正长斑岩脉;5—破碎带;6—蚀变岩;7—金矿体;
- 8—断层及编号;9—钻孔位置及编号

Fig. 2 Simplified geological map of the Louli gold ore district

- 1—Quaternary; 2—Second member of Cretaceous Louli Formation; 3—First member of Cretaceous Louli Formation; 4— Syenite porphyry vein; 5—Fracture zone; 6—Altered rocks; 7—Gold orebody; 8—Fault and its serial number ; 9—Drill hole and its serial number

构、半自形晶结构、他形晶结构)、碎裂结构、交代结构、包含结构等。矿石中常见的构造有块状构造、细脉浸染状构造等。

3 原生晕垂向分带特征

3.1 元素垂向分带序列

元素地球化学活动性的差异使得不同指示元素的原生晕在空间上呈现序次分布。在20世纪70年代前苏联学者格里戈良提出指示元素垂向分带指数算法的基础上, 国内化探界学者先后提出了广义衬值法、浓集重心法、浓集指数法、比重指数法、含量梯度法等多种计算方法^[9-12]。对上述计算元素垂向分带法的优缺点我国学者也进行探讨和对比分析^[13-15]。如对目前应用较多的格里戈良分带指

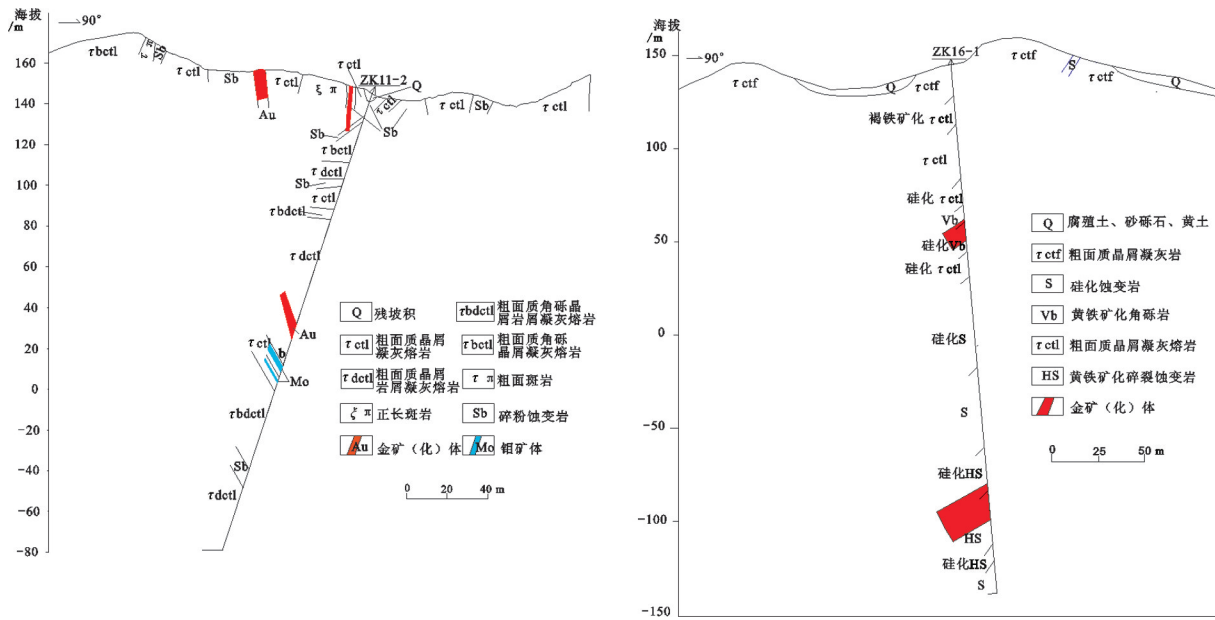


图3 矿区11和16号勘探线地质剖面略图
Fig. 3 Geological cross-section along No.11 and No.16 exploration line in the Louli ore district

数法, 叶庆森等认为该方法存在某截面无异常时, 其分带指数梯度值 ΔG 无法直接计算而影响排序, 此外元素在分带序列中的位置会因参与计算的指示元素不同或多寡而改变等缺陷^[13]。为便于对比分析和验证结果, 本次采用格里戈良分带指数法和广义衬值法两种方法计算了元素垂向分带序列。所谓广义衬值法分带指数法是从衬值或衬度(异常含量 C_a 与背景值 C_b 之比)的概念扩展而来。叶庆森认为广义衬值法不仅克服了上述衬值法的缺陷, 而且可揭示各指示元素在各截面的富集程度, 从而能更客观地反映指示元素分带现象^[13]。叶庆森等通过数个具体矿床实例证明, 该法更能反映客观规律。两种计算方法均需要指示元素在矿区范围内的背景值。本次根据娄里矿区地表386件岩石样品的分析结果, 在反复剔除特异值(大于平均值加3倍标准差)后, 使数据基本服从正态或对数正态分布情况

表1 娄里金矿区指示元素背景值

Table 1 Elements abundance values of the Louli ore district

元素	Hg	Sb	As	Cd	Ba	Mn	Cu	Pb	Zn
含量	11	0.60	4.47	0.118	646	404.3	128.5	25	59
元素	W	Sn	Mo	Bi	Cr	Co	Ni	Au	Ag
含量	4.12	2.12	3.61	0.60	13.74	4.85	6.13	25.99	0.29

单位: Au、Hg元素为 10^{-9} , 其余元素为 10^{-6} 。

下, 确定了相关指示元素的背景值(表1)。

从表中可以看出, 矿区金元素背景值为 25.99×10^{-9} , 远高于中国碱性正长岩(0.9×10^{-9})、华北地台正长岩(0.61×10^{-9})和大陆地壳(1.21×10^{-9})^[16]。洪山杂岩体及其附近各类岩石中Au元素本底含量测试结果表明, 娄里矿区容矿围岩(粗面凝灰熔岩)及其他岩性段(尤其是黑云辉石粗面斑岩)Au成矿元素含量较高, 这种成矿元素高背景特征是本区金矿是成矿的物质基础。

3.1.1 ZK11-2 钻孔元素垂向分带

ZK11-2 钻孔采用格里戈良分带指数法计算的元素分带序列为:

Pb-As-Cd-Zn-Mo-W-Sb-Co-Au-Ag-Mn-Bi-Ba-Ni-Sn-Cr-Cu

根据广义衬值计算法得到ZK11-2 钻孔元素垂向分带序列为:

Pb-As-Bi-Cd-Zn-Co-Mo-Cu-W-Sb-Mn-Au-Ag-Sn-Ni-Ba-Cr

对比两种计算方法所得分带序列可以看出, 两种方法虽在所得的元素排列顺序上存在一定差异, 但在反映热液活动期次及不同温度元素在空间叠加模式上基本相同。均能显示出钻孔上部主要为低温元素(As、Cd)组成的前缘晕和中温元素(Pb、Zn)组成的近矿晕, 钻孔中部为高温元素组成的尾

晕元素(W、Co、Mo)。上述元素组合反映了一次较为完整的热液活动过程。钻孔中下部又出现一次以矿前晕(低温元素组合)开始到高温元素结束的热液活动。两种分带序列计算结果均显示,ZK11-2孔由2次热液活动元素叠加而成。钻孔ZK11-2测试数据中Au、Ag矿化与As元素关系密切,相关系数分别为 $r_{Au-As}=0.748$, $r_{Ag-As}=0.88$ 。这与已有的研究认为矿床属浅成低温热液成因相吻合。

3.1.2 ZK16-1 钻孔元素垂向分带

ZK16-1 钻孔采用格里戈良分带指数法计算的元素分带序列为:

Ba-Cu-Zn-Mn-Bi-Sn-Mo-Cd-Pb-Co-Cr-Ni-W-Au-Hg-Sb-As-Ag

根据广义衬值计算法得到ZK16-1 钻孔元素垂向分带序列为:

Cu-Zn-Bi-Sn-Mo-Sb-Cd-Pb-Cr-Co-Ni-W-Au-Hg-As-Ag-Mn-Ba

两种方法计算所得的元素分带序列基本一致,钻孔中上部及中下部出现2处高温元素(Bi-Sn-Mo和Cr-Co-Ni-W)组合,反映了至少存在两次热液活动过程。与ZK11-2 钻孔不同的是钻孔顶部未出现与金矿化关系密切的低温元素,这是由于矿区含矿地层为娄里组二段(K₂l₂),而ZK16-1 钻孔上部岩层为娄里组一段(K₁l₁),其上部的金矿体含矿层位已风化剥蚀。钻孔深部虽出现低温元素组合,根据成矿条件推测出现金矿化的可能性较小。

3.2 指示元素含量垂向变化规律

3.2.1 ZK11-2 钻孔指示元素垂向变化

娄里金矿区ZK11-2 钻孔元素垂向变化规律图

(图4)显示,地表附近低温元素(As、Sb、Hg)含量较高,部分中温元素如Pb发育,高温元素(W、Sn、Mo)含量较低。钻孔中金元素含量较高区域与低温元素关系密切,而与高温元素关系较差。这与矿床成矿温度较低的现象相吻合。

ZK11-2 全孔岩性以粗面质晶屑凝灰熔岩为主(图3),全孔采样分析显示,该钻孔分别在距地下27 m和100 m左右处有2处较强的金矿化。其中距地表27 m左右的金矿化,前缘低温元素含量较高,尾晕元素含量低。低-高温元素比值(HgAsSb/W Sn Mo)的地化参数突出反映了这一现象,该地段也是金矿化的主要富集地段。对比钻孔高-中-低温元素轴向分布可发现,从该处向下,中温元素(Cu-Pb-Zn)、高温元素(W-Sn-Mo)含量依次升高。反映了一个较为完整的热液活动过程。

在距地表100 m(标高50 m处)左右地段,低温元素含量较高,中高温元素含量较低,高温元素不仅含量较高,范围也较宽。表明第二次热液活动时,前缘低温元素与第一次热液活动时形成的尾晕(高温)元素叠加。该期热液活动强度较高,金矿化可达0.84 g/t。随后钻孔中显示第二次热液活动的前缘晕低温元素含量降低,而近矿晕中温元素含量相对升高。反映了第二次较为完整的热液活动过程。

第二次矿化后,钻孔向下近100 m范围(标高20 m到-90 m)内未出现高含量的前缘元素。表明钻孔已穿透含矿层,深部出现金矿化的可能性较小。这也与矿床属浅成低温热液的认识相吻合。

3.2.2 ZK16-1 钻孔元素垂向分带

ZK16-1 钻孔岩性以硅化晶屑凝灰岩为主(见

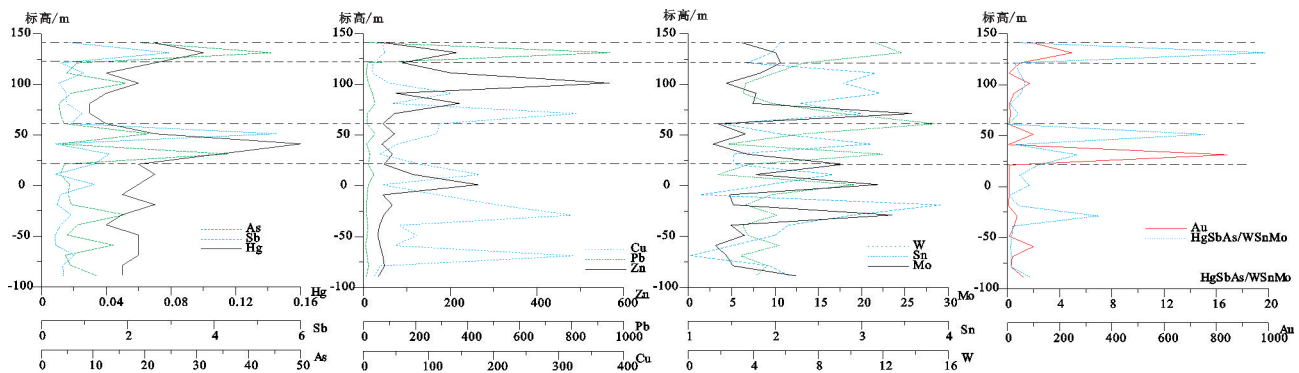


图4 娄里金矿区ZK11-2 钻孔元素轴向变化规律图

单位: Au、Hg 为 10^{-9} ; 其余为 10^{-6}

Fig.4 Axial changing regularities of indicative elements of drill hole. ZK11-2

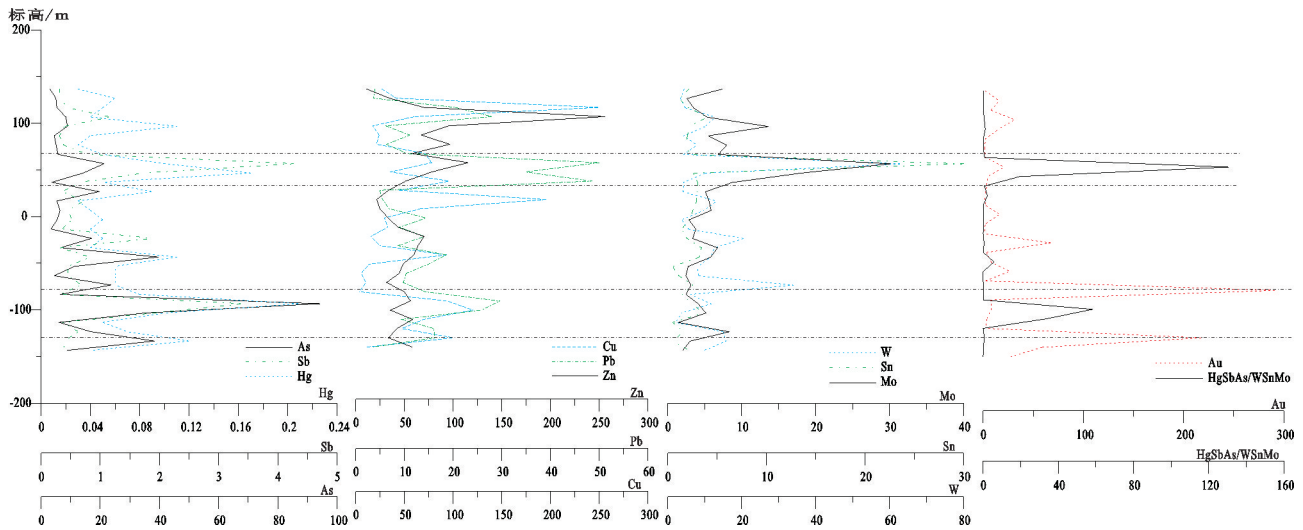


图5 娄里金矿区 ZK16-1 钻孔元素轴向变化规律图

单位: Au, Hg 为 10^{-9} ; 其余为 10^{-6}

Fig.5 Axial changing regularities of indicative elements of drill hole. ZK16-1

图3)。该钻孔取样分析结果显示(图5), 第一次热液活动形成的前缘晕元素在地表附近(标高 130 m 附近)含量较低, 而近矿晕的中温元素含量相对较高。暗示着第一次金矿化作用形成的矿体可能已受剥蚀。这与钻孔所处位置为娄里组一段地层, 上覆金矿体赋存层位(娄里组二段)已风化剥蚀的事实相吻合。

在钻孔深部 80 m 处(标高 50 m), 高-中-低温元素分布区间相吻合, 结合元素轴向分带序列, 说明第二次热液活动的前缘晕元素叠加在第一次热液活动的尾晕元素上, 但热液含矿性较差。从标高 -100 m 开始向深部, 矿前晕低温元素、近矿晕中温元素和尾晕高温元素含量依次降低, 反映了完整的第三次热液活动过程, 该期矿化作用也相对较强。根据钻孔中元素轴向分布规律的变化趋势, 标高 -150 m 以下, 中-高温元素含量将会依次升高。而区内金矿化与低温元素关系密切, 深部出现金矿化体的可能性不大。结合区域地质资料分析, 深部应注意(正长)斑岩型铜钼矿化发生。

3.3 矿床原生叠加晕模型

用两种不同计算方法均得出元素分带序列存在明显的“前尾晕共存”现象, 即由低温元素组成的前缘元素不仅出现在矿体前缘, 而且在矿体中部或尾部也有出现。李惠等在研究原生晕垂向分带模型时发现很多矿床, 尤其是金矿床原生晕垂向分带

多具有反分带现象^[1-2]。若用热液床一次成矿作用形成的原生晕垂向分带理论是无法解释的, 并根据热液矿床成矿晕严格受构造控制, 热液矿床具有多期多阶段叠加成矿成晕特点, 创造性地提出了原生叠加晕理论及其技术方法。该理论认为热液矿床每次成矿作用都有自己的前缘晕、近矿晕和尾晕。不同期次成矿形成的原生晕在空间上互相叠加。据此不仅要研究每次成矿形成的原生晕垂向分带特征, 而且还要研究与识别不同成矿阶段形成的原生晕在空间上叠加呈现的结构形态, 建立矿床垂向分带的原生叠加晕模型。

根据娄里金矿区 ZK11-2 和 ZK16-1 两个钻孔垂向元素分带序列及相关元素分布规律, 绘制了娄里金矿体原生叠加晕模型示意图(图6)。其中地化参数的计算采用前缘晕(HgSbAs)元素含量标准化累乘 / 尾晕(WsMo)元素含量标准化累乘。

4 结论

(1) 采用分带指数法与广义衬值法对钻孔数据的指示元素垂向分带序列计算结果显示, 不同方法虽在元素排列顺序上存在一定差异, 但在反映热液活动期次及元素空间叠加模式上基本相同。

(2) 钻孔元素分带序列存在明显的前尾晕共存现象, 表明矿体的形成非一次热液活动所致。两个钻孔的垂向分带都由两个完整的小循环(前缘晕、

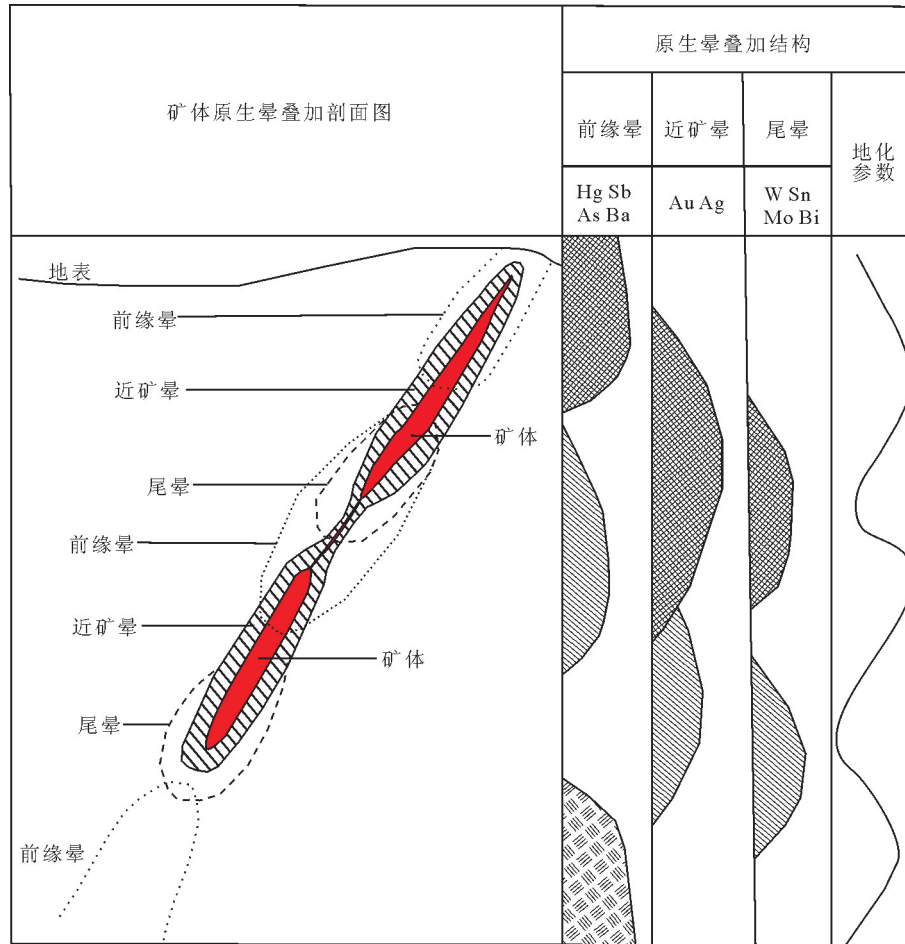


图6 娄里金矿体原生叠加晕模式示意图

Fig.6 Schematic diagram of primary superimposed halo model of the Louli gold deposit

近矿晕和尾晕的元素都存在)组成,说明金矿体的形成至少经历了两次热液活动叠加。

(3)原生晕轴向分带序列的确定及深部成矿潜力的预测应建立在全面正确理解和掌握区域成矿条件和控矿因素基础上。结合区域成矿条件,推断ZK11-2钻孔已穿透含矿层,且深部出现金矿化的可能性较小。ZK16-1钻孔顶部矿体已风化剥蚀,根据钻孔元素分布趋势,推测钻孔深部(标高-150 m以下)中-高温元素含量会依次升高,出现金矿化体可能性不大,但应注意(正长)斑岩型铜钼矿化的发生。

参考文献(References):

[1] 李惠,禹斌,李德亮. 构造叠加晕找盲矿新方法及找矿效[M]. 北京:地质出版社, 2011.

Li Hui, Yu Bing, Li Deliang. The New Method of Structural Superimposed Halo for Blind Ore Body and the Prediction Result[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011(in Chinese).

[2] 李惠,张文华,常凤池.大型、特大型金矿盲矿预测的原生叠加晕模型[M].北京:冶金工业出版社, 1998.

Li Hui, Zhang Wenhua, Chang Fengchi. The Model of Primary Superimposed Halo for Gold Blind Ore in Large Type- Gold Mine[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998(in Chinese).

[3] 贾福聚,高建国,周家喜,等.青海果洛龙洼金矿床地球化学垂向分带研究[J].地质与勘探, 2013, 49(5): 907-913.

Jia Fujun, Gao Jianguo, Zhou Jiayi, et al. Geochemical vertical zonation in the Guoluolongwa gold deposit, Qinghai Province[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(5): 907-913(in Chinese with English abstract).

[4] 邵跃.热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M].北京:地质出版社, 1997.

Shao Yue. Rock Measurements (Primary Halo Method)in the

- Hydrothermal Deposits Prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997(in Chinese).
- [5] 黄良伟, 曹新志, 张旺生, 等. 山东招远界河金矿床矿化垂向变化特征研究[J]. 地质科技情报, 2013, 32(2):84-90.
Huang Liangwei, Cao Xinzhi, Zhang Wangshen, et al. Vertical variation of the mineralization in Jiehe gold deposit, Zhaoyuan City, Shandong Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(2): 84-90(in Chinese with English abstract).
- [6] 王启, 蒋永建, 于海涛, 等. 浙西南南弄铅锌多金属矿床原生晕特征与隐伏矿预测[J]. 物探与化探, 2011, 35(2): 170-175.
Wang Qi, Jiang Yongjian, Yu Haitao, et al. Primary halo characteristics and concealed ore body prognosis in the Nannong lead-zinc polymetallic deposit, southwestern Zhejiang Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(2): 170-175 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘雪敏, 陈岳龙, 李大鹏, 等. 内蒙古霍各乞铜多金属矿床原生晕地球化学特征及深部成矿远景评价[J]. 物探与化探, 2012, 36(1): 1-7.
Liu Xuemin, Chen Yuelong, Li Dapeng, et al. Primary halo geochemical characteristics and deep metallogenic prospect evaluation of the Huoqeqi copper-polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(1):1-7(in Chinese with English abstract).
- [8] 陈斌, 翟明国, 田伟, 等. 太行山南段中生代杂岩体的岩石成因:元素和Nd-Sr-Pb同位素地球化学证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(2):93-102.
Chen Bin, Zhai Mingguo, Tian Wei, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the Southern Taihang orogen, North China craton: Elemental and Sr- Nd- Pb Isotopic constraints[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(2): 93- 102(in Chinese with English abstract).
- [9] 朴寿成, 连长云. 一种确定原生晕分带序列的新方法——重心法[J]. 地质与勘探, 1994, 30(1): 63-65.
Piao Shoucheng, Lian Changyun. A new kind of method for determinating zoning sequence of primary halo—the method of barycenter[J]. Geology and Prospecting, 1994, 30(1): 63- 65(in Chinese with English abstract).
- [10] 叶庆森, 方适宜, 欧阳平宁, 等. 原生晕垂向分带模型找矿法及其在铀矿勘查中的应用[J]. 铀矿地质, 2014, 30(2): 116-121.
Ye Qingsen, Fang Shiyi, Ouyang Pingyu, et al. Vertical zoning model of primary halos and its application to uranium exploration[J]. Uranium Geology, 2014, 30(2): 116- 121(in Chinese with English abstract).
- [11] 王建新, 藏兴运, 郭秀峰, 等. 格里戈良分带指数法的改良[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(5): 884-888.
Wang Jianxin, Zang Xingyun, Guo Xiufeng, et al. The improved Gregorian's Zoning Index calculating method[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(5): 884- 888(in Chinese with English abstract).
- [12] 赵琦. 原生晕垂直分带的元素比重指数计算法[J]. 物探与化探. 1989, 13(2):157-159.
Zhao Qi. The application of calculating elemental specific gravity index zoning vertical sequence of primary halo[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1989, 13(2):157- 159(in Chinese with English abstract).
- [13] 叶庆森. 指示元素垂向分带序列计算方法述评[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(3):335-341.
Ye Qingsen. A review of the computing methods on vertical zoning sequence of indicator elements[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(3):335-341 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李扬, 邱德同, 李峻峰. 确定金矿床元素分带序列的新方法[J]. 地质与勘探, 1993(12):47-48.
Li Yang, Qiu Detong, Li Junfeng. A new method in determinating zoning sequence of element in gold deposit[J]. Geology and Prospecting, 1993(12): 47-48(in Chinese with English abstract).
- [15] 朴寿成, 杨永强, 连长云. 原生晕分带序列研究方法综述[J]. 世界地质, 1996, 15(1): 44-48.
Piao Shoucheng, Yang Yongqiang, Lian Changyun. A summary of studying methods in primary halo zoning sequence[J]. Global Geology, 1996, 15(1): 44-48(in Chinese with English abstract).
- [16] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Chi Qinghua, Yan Mingcai. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007 (in Chinese).