

doi: 10.11720/wtyht.2021.1134

袁兆宪,侯振广,任志栋,等.金属元素形成原生晕能力定量评价——以青海省扎家同哪金矿为例[J].物探与化探,2021,45(2):292–300.
http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1134

Yuan Z X, Hou Z G, Ren Z D, et al. Quantitative evaluation of the ability of elements in forming primary halos: A case study of the Zhajiatongna gold deposit, Qinghai Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 292–300. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1134>

金属元素形成原生晕能力定量评价 ——以青海省扎家同哪金矿为例

袁兆宪¹, 侯振广², 任志栋³, 刘永乐⁴, 张大明⁴, 张建平⁴

(1. 河北地质大学 资源与环境工程研究所, 河北 石家庄 050031; 2. 青海省第五地质矿产勘查院, 青海 西宁 810008; 3. 中国建筑材料工业地质勘查中心青海总队, 青海 西宁 810008; 4. 青海省第三地质矿产勘查院, 青海 西宁 810029)

摘要: 在进行原生晕元素分带研究时, 所选元素多未进行筛选, 不利于正确认识分带规律及指导矿产预测。本文基于扎家同哪金矿 2 779 个钻孔样品数据, 拟通过定量评价不同金属元素在围岩、矿化围岩、矿石等中的富集程度, 研究不同元素在矿化过程中形成原生晕的能力差异。研究发现, 扎家同哪金矿 Au、As、Sb、Hg、W、Ag 在围岩、矿化围岩和矿石中富集程度递增, 易形成原生晕, Zn 仅在矿石中富集, 成晕规模有限, Mo、Cu、Pb、Sn 富集微弱或表现为亏损, 较难形成原生晕; 扎家同哪金矿不同位置与成矿有关的富集元素为 Au、As、Sb(围岩)—Au、As、Sb、W、Hg(Ag)(矿化围岩)—Au、As、Ag、Sb、W、Hg、Zn(矿石), 成矿过程中元素在矿化围岩中富集的权重由大至小为 As、Hg、Au、Sb、W、Mo、Sn、Pb、Zn、Cu、Ag, 进入围岩能力总体表现为低—高一—中温元素递减的趋势。对于扎家同哪金矿, 在研究原生晕分带特征、指导进一步找矿时, 宜优先选用 As、Hg、Au、Sb 和 W 等元素。

关键词: 原生晕; 富集程度; 成晕能力; 定量评价; 扎家同哪金矿

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)02-0292-09

0 引言

我国自 20 世纪 50 年代起就开展了原生晕找矿的研究工作, 针对不同类型的多种金属矿床进行了原生晕研究, 在理论、方法、技术等方面都取得了一系列成果, 对一大批新矿产尤其是隐伏矿的发现起到了关键作用, 并在大量实践的基础上, 建立了一批典型矿田、矿床和矿体的原生晕地球化学异常模式和找矿模型^[1-4]。

组分分带性是原生晕最重要的特征之一, 也是矿床元素分带序列研究和深部矿产资源潜力评价的基础。国内外学者提出了多种元素分带序列模型, 并先后提出了组合指数法、线金属量衬度系数法、线

金属量梯度法、格里戈良分带指数法等计算分带序列的方法^[5], 其中格里戈良分带指数法是应用最为广泛的方法之一。原生晕垂向分带序列计算为深部成矿预测提供了定量工具。利用特征元素的累乘晕、累加晕或矿体前缘晕元素累加(乘)值与尾晕元素累加(乘)值之比, 可以构建深部矿体定量评价模型^[6], 从而将深部矿产预测研究推向定量化阶段, 并在评价矿体剥蚀程度、预测深部隐伏矿体等方面取得了良好效果^[4,7-11]。

由于测试元素不统一, 加之不同类型矿床的物质来源和元素组合不同, 学者对各类型及不同规模矿床统计的元素及得出的分带序列中元素也不尽相同^[12]。目前多是依据经验选取指示元素进行原生晕研究, 而对元素形成原生晕能力的评价较少开展,

收稿日期: 2020-03-21; 修回日期: 2020-09-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600501)、国家自然科学基金项目(41602338)

作者简介: 袁兆宪(1986-), 男, 助理研究员, 主要从事资源定量预测与评价研究工作。Email: sdyzx86@126.com

通讯作者: 侯振广(1985-), 男, 工程师, 主要从事矿产勘查研究工作。Email: up.hzg@126.com

加之不同矿床成矿过程中发生富集的元素种类和富集程度都存在差异,若成矿过程中未带入和富集的元素参与分带序列等研究,会对分带计算结果和原生晕规律认识产生一定的干扰。利用土壤、水系沉积物化探数据圈定异常和靶区时,选择指示元素也多依靠经验或空间分布特征,而次生晕和分散流是对原生晕的继承,开展金属元素形成原生晕差异的研究,可以使指示元素的选取更为有效、合理。本文的目的是以青海省扎家同哪金矿为例,使用统计方法,通过对比元素在矿床围岩、矿化围岩和矿石中的富集程度,从成矿元素供给的角度,评价其形成原生晕的能力差异,从而为原生晕分带序列研究、选取找矿指示元素等提供依据。

1 矿床地质概括

扎家同哪金矿位于东昆仑地区玉树州麻多乡境内,处于大场金矿田的东端,矿床类型为低硫型浅成低温热液矿床,成矿作用与含矿热液沿构造破碎带充填有关^[13]。矿区大地构造位置处于东昆仑巴颜喀拉山构造带中部,北邻阿尼玛卿晚古生代—早古生代缝合带,南以可可西里—金沙江断裂为界,与唐古拉—羌唐地块相邻。区域内主要赋矿地层为三叠系地层,分布广泛,为一套砂泥质复理石—类复理石沉积,地层中金含量丰度值较高, $w(\text{Au})$ 一般在 $31.5\times10^{-9}\sim90\times10^{-9}$,高者可达 367.5×10^{-9} 。区域断裂构造发育,以NW向为主,NE向次之,NW向断裂形成时间较早,多为印支晚期产物,断裂规模大,沿断裂带构造岩发育,并有大量脉岩贯入,具多期次活动之特点,有明显的控岩、控矿作用。岩浆活动较弱,侵入岩多沿区域性大断裂出露,火山岩仅在石炭纪—中二叠世布青山群中局部发育。

矿区出露地层相对单一,主要为下一中三叠统昌马河组($T_{1-2}c$)地层,广泛分布于矿区南部,地层走向总体为NW向,主要岩性为灰色中细粒长石砂岩、岩屑长石砂岩及灰—深灰色粉砂质板岩、泥质板岩。矿区主体构造为甘德—玛多区域性深大断裂,发育两组次级断裂,褶皱构造以轴向延伸不远的复式背

向斜构造为主,沿背斜轴部往往发育断裂构造破碎带,叠加部位往往是主要含矿区带。矿区内侵入岩不发育,火山岩少量分布。岩石变质程度较低,以低绿片岩相为主。

矿体严格受含矿破碎带控制,含矿破碎带的规模框定着矿体的规模,矿化蚀变宽度越大,矿体宽度越大。矿体围岩岩性为变砂岩、粉砂质板岩、碎裂岩化粉砂质板岩、砂岩等。截至2014年,矿区共圈出规模不等的金矿体138条,其中74条出露地表,呈NW-SE向近平行展布,矿体走向 $105^{\circ}\sim150^{\circ}$,倾向SW,倾角 $25^{\circ}\sim65^{\circ}$,长度 $44\sim1\,135\text{ m}$ 不等,厚度 $0.79\sim9.19\text{ m}$,矿体呈似层状、透镜体状,沿走向及倾向具有明显的膨大缩小、分枝复合、尖灭再现的特征;深部由钻探工程控制矿体64条,矿体规模较小,长度 $40\sim160\text{ m}$,厚度 $0.82\sim6.74\text{ m}$,多呈透镜体状。矿石构造主要为角砾状构造,是金的主要赋存构造,还可见浸染状构造,矿石结构主要有粒状结构、碎裂板状结构和包含结构。矿石矿物组合简单,主要硫化物为毒砂和黄铁矿,矿石矿物主要有自然金、银金矿、黄铁矿、毒砂、石墨以及微量的含铜矿物,脉石矿物主要为石英、长石、方解石、绢云母、绿泥石、高岭石等。围岩蚀变主要沿破碎带及其两侧或矿(化)体上下盘发育,蚀变类型有硅化、绢云母化、碳酸盐化等。

2 样品和方法

2.1 样品采集

本次研究共收集扎家同哪金矿床钻孔岩心地球化学数据2779个。所用样品来自31个钻孔,为全孔连续采集的原生晕样品,样长 $1\sim5\text{ m}$,送自然资源部西宁矿产资源监督检测中心测试。样品经粗碎、中碎、细碎至200目,测定Ag、As、Au、Cu、Hg、Mo、Pb、Sb、Sn、Zn等10个元素的含量,检测方法及检出限见表1。抽取内检样品计算相对误差,Ag、As、Sb、Cu、Mo合格率达100%,其他元素合格率大于97%,样品测试结果符合质控要求,并可以满足本文定量计算要求。

表 1 各元素使用的检测方法和检出限

Table 1 Analytical methods and the limits of detection for the elements

元素	Ag	As	Au	Cu	Hg	Mo	Pb	Sb	Sn	Zn
方法	ES	AF	ICP-MS	ICP-MS	AF	ICP-MS	ICP-MS	AF	ES	ICP-MS
检出限	20	0.33	0.25	1	0.5	0.15	0.85	0.046	0.85	4

注:ES为发射光谱法,AF为原子荧光法,ICP-MS为电感耦合等离子体质谱法;Ag、Au、Hg含量单位为 10^{-9} ,其余元素为 10^{-6} 。

2.2 分析方法

2.2.1 样品类型分类

根据编录资料,样品岩性主要包括粉砂质板岩、泥质板岩、长石砂岩、石英脉、碎裂岩、金矿石、含黄铁矿化粉砂质板岩、含黄铁矿化碎裂岩化粉砂质板岩、含黄铁矿化毒砂矿化粉砂质板岩、含黄铁矿化泥质板岩、含黄铁矿化碎裂岩化泥质板岩、含黄铁矿化毒砂矿化泥质板岩、含黄铁矿化长石砂岩、含黄铁矿化碎裂岩化长石砂岩、含黄铁矿化毒砂矿化长石砂岩、含黄铁矿化毒砂矿化碎裂岩化长石砂岩等。

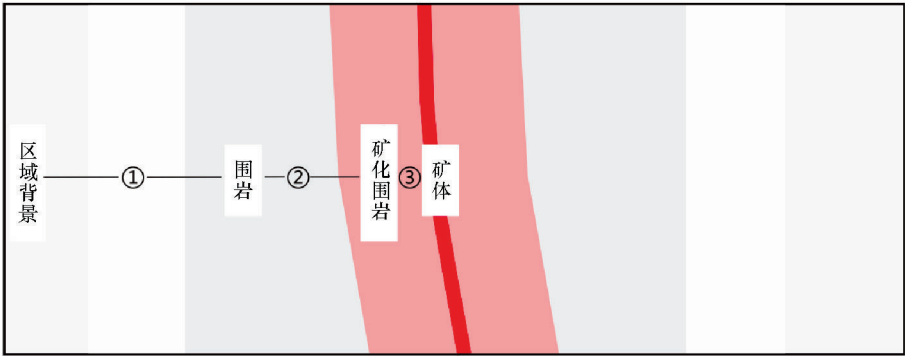
黄铁矿和毒砂是金的最主要的载体矿物,也是矿床主要的矿石矿物。参考编录资料,基于岩性特征、矿化特征和揭露规模等,将样品分为 3 类:围岩、矿化围岩和矿石。围岩为未见矿化的粉砂质板岩、泥质板岩和长石砂岩,矿化围岩为含黄铁矿、毒砂的围岩,见自然金或黄铁矿、毒砂特别发育的归为矿石。

关于样品分类方法,使用化学分析结果,根据 Au 的含量进行分类似乎更为合理,因为通过肉眼鉴别含

不含矿化及其矿化程度都不可避免地会存在偏差。而本文采用基于矿物特征进行岩性分类,主要是基于以下考虑:① 此矿床矿石矿物组合简单,黄铁矿和毒砂也是最主要的载金矿物,黄铁矿和毒砂的发育程度与金的矿化程度存在明显的正相关关系;② 使用两种不同的分类方法所得到的(后文)处理结果没有明显差异;③ 化学分析结果具有滞后性,而基于矿物特征的分类与野外工作联系更为紧密。

2.2.2 富集过程分解

原生晕具有从矿体向围岩成矿相关元素浓度不断降低的特征,亦即从外围围岩向矿化中心元素存在不断富集的趋势。因此,从围岩到矿化围岩,再到矿体(矿石),其成矿元素浓度不断升高。为了定量评价矿化过程对围岩中矿化元素浓度的改变,这里将元素富集分为 3 个部分(图 1):① 围岩富集,即矿床围岩相对于区域背景的元素富集;② 矿化富集,即矿化围岩相对于矿床围岩的元素富集;③ 矿石富集,即矿石相对于矿化围岩的元素富集。



①—围岩富集;②—矿化富集;③—矿石富集

①—elemental enrichment in the wall rocks;②—elemental enrichment in the mineralized wall rocks;③—elemental enrichment in the orebodies

图 1 围岩、矿化围岩和矿体中元素富集示意

Fig.1 Sketch of element enrichment in the wall rocks, mineralized wall rocks and orebodies

2.2.3 富集程度评价

定义富集系数:

$$q = C_1 / C_2, \tag{1}$$

式中: q 为富集系数; C_1 为矿石、矿化围岩和围岩的元素含量;对应地, C_2 为矿化围岩、围岩和区域背景的元素含量;则 $q_{\text{背景富集系数}} = C_{\text{围岩}} / C_{\text{区域背景}}$, $q_{\text{矿化富集系数}} = C_{\text{矿化围岩}} / C_{\text{围岩}}$, $q_{\text{矿石富集系数}} = C_{\text{矿石}} / C_{\text{矿化围岩}}$ 。

3 结果与讨论

3.1 金属元素总体特征

3.1.1 均值和变异系数

基于矿床 2 779 个原生晕样品数据,统计了金

属元素的均值和变异系数(C_v)(表 2)。与北巴彦喀拉山地区元素背景含量^[14]相比,矿床原生晕样品中 Au 富集了 28 倍,As 富集超过 6 倍,Sb、Cu、W、Zn 超过 1.5 倍,反映了矿化活动导致了这些元素的显著带人,同时不排除个别元素在矿床围岩中高背景含量的原因。变异系数是标准差与均值之比,可以反映不同样品中元素含量的差异情况,其值越小表示含量越均匀,反之则含量变化越大。Au 和 As 的变异系数远远大于其他元素,既说明这两个元素在样品中的含量差异明显,局部富集程度最大,同时也反映 Au 矿化过程中 As 作为伴生元素与之联系最为紧密。W、Mo、Sb 的变异系数次之,在不同样品中的含量差异较大,指示其受矿化活动影响较为明显。

表 2 扎家同哪金矿 2 779 个原生晕样品金属元素含量特征

Table 2 Characteristics of metal element contents of 2 779 samples from the Zhajiatongna deposit

参数	Au	As	W	Mo	Sb	Pb	Ag	Hg	Cu	Zn	Sn
平均值	40.34	93.77	2.59	0.62	3.75	23.36	71.79	20.61	38.18	90.53	2.82
C_v	6.61	4.04	1.59	1.37	1.24	0.85	0.52	0.43	0.38	0.26	0.16
富集系数	28.01	6.75	1.93	1.41	3.68	1.41	1.33	0.53	2.06	1.63	1.19

注: Au 含量单位为 10^{-9} , 其他元素为 10^{-6} 。

3.1.2 总体富集趋势

以北巴颜喀拉地区元素背景平均值为参考, 分别计算围岩、矿化围岩和矿石的元素富集系数(图 2)。总体上元素的富集程度排序为 $Au>As>Sb>W>Ag>Cu>Zn>Pb>Mo>Sn>Hg$, 其中 Au 最高富集了 1 453 倍, As 最高富集 190 倍, Sb、W、Ag 富集 2~16 倍, 其余元素富集小于 2 倍。根据在矿化围岩和矿石中的富集特征, 可以将元素分为两类: Au、As、Sb、W、Ag 和 Hg, 由

围岩至矿化围岩再至矿石, 元素不断富集, 而 Cu、Zn、Pb、Mo 和 Sn 则出现亏损或富集不明显。可见矿化活动对不同金属元素的影响具有明显差异, 这种差异反映了成矿过程导致的金属元素聚集量相对大小的不同, 同时也反映了金属元素对矿床围岩的影响程度的不同。下面将通过不同阶段(围岩富集、矿化富集、矿石富集)的元素富集程度来研究元素在成矿过程中对围岩的影响程度的差异。

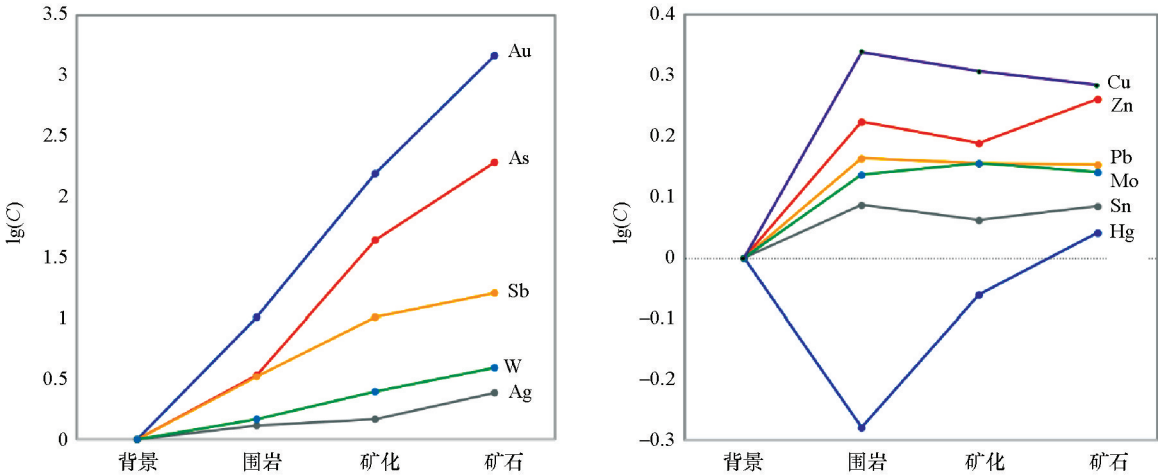


图 2 金属元素在围岩、矿化围岩和矿石中的富集系数变化趋势

Fig.2 Trends of elemental enrichment factors changing in the wall rocks,the mineralized wall rocks and the orebodies

3.2 富集程度差异

3.2.1 围岩富集

围岩富集为矿床围岩中元素含量相对于北巴颜喀拉地区元素背景含量的富集程度。从结果可以看出(图 3), 扎家同哪矿床围岩中除了 Hg 外的金属元素含量相对于区域背景值全部表现为富集, 总体上富集程度从大至小为 $Au>As>Sb>Cu>Zn>W>Pb>Mo>Ag>Sn>Hg$ 。3 种围岩(粉砂质板岩、泥质板岩和长石砂岩)中金属元素富集特征基本一致, 只有泥质板岩中 Au 和 As 的富集程度显著小于其他两种岩性。由于 Au 和 As 是主要的成矿金属, 其在围岩中的含量可以代表矿化影响强度, 而粉砂质板岩和长石砂岩的孔隙度相比泥质板岩更高, 说明矿化活动对于矿床中孔隙度大的围岩的影响高于对孔隙度小的围岩。

Hg 在围岩中的含量低于背景值, 然而 Hg 在矿化围岩和矿石中的含量是逐渐升高的, 说明 Hg 主要作为伴生元素随成矿过程在围岩中分散、富集。因此, 在扎家同哪矿床, Hg 可以作为直接的矿化指示元素, 其含量的变化可以指示矿化的强弱, 并对矿化的空间位置具有潜在指示作用。

3.2.2 矿化富集

使用矿化围岩与未矿化围岩中金属元素含量之比评价矿化富集程度(图 4)。总体上富集程度为 $Au>As>Sb>W>Hg>Ag>Mo>Pb>Sn>Cu>Zn$, 与上文围岩富集结果相比, 既有相似之处也有不同之处。Au、As、Sb 依然富集程度最高, W 富集程度增大, Hg 由亏损变为富集, Pb、Sn、Cu、Zn 富集程度减小明显, 且都为亏损。同前文变异系数结果一致, As 的富集程度接近于 Au, 远远大于其他元素, 说明 Au 的

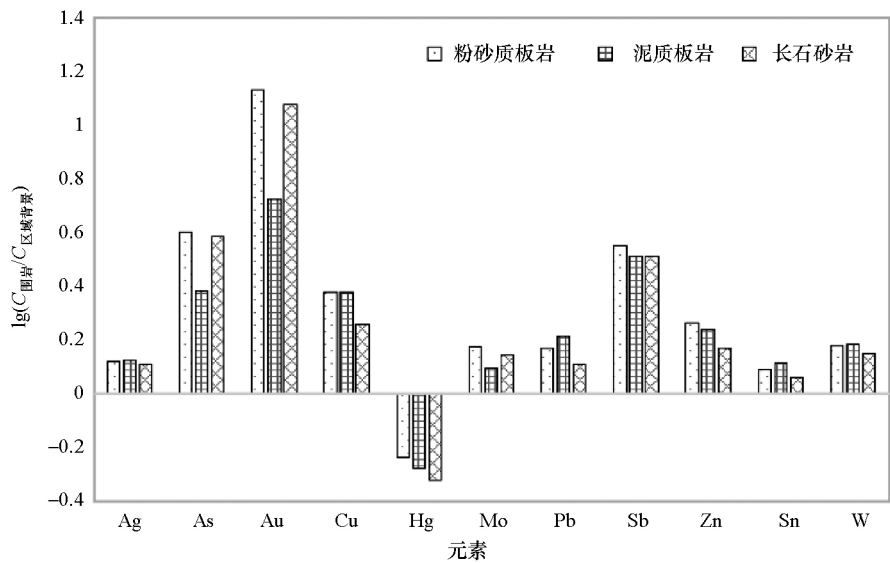


图 3 金属元素的围岩富集系数及在三种围岩中的差异

Fig.3 Enrichment factors of wall rock and the differences among rock types

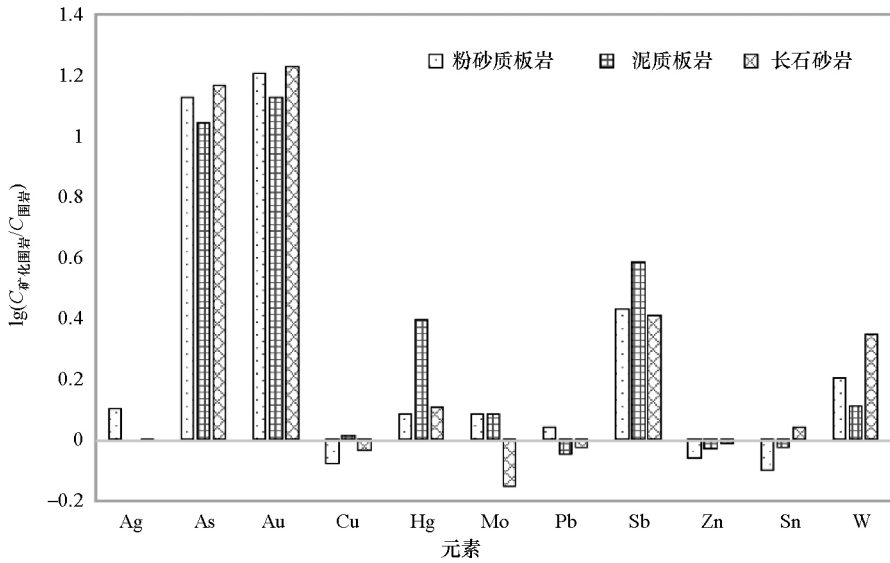


图 4 金属元素的矿化富集系数及在三种围岩中的差异

Fig.4 Enrichment factors of mineralized wall rock and the differences among rock types

矿化过程明显导致围岩中 As 含量的同步增加。As 与 Au 之间存在的良好相关性,缘自 As 在扎家同哪矿床主要以毒砂形式产出,而毒砂是 Au 的主要载体矿物。Sb、Hg 也是低温热液矿化常见的指示元素,其在围岩中的富集说明矿化活动显著地带入了这两种元素。元素 W 是典型的高温成矿元素,但很早就被发现其会在低温热液矿床中出现、与金伴生^[15],而扎家同哪金矿是浅成低温热液矿床,W 在矿化围岩中发生了较为显著的富集,由于无元素赋存形态等相关证据,推测可能发生了 Au-W、Au-Sb-Hg 等多期矿化。W 的富集说明其对于低温热液 Au 矿化也具有较好的指示意义。

由上文可知 Au、As 等在围岩中已表现为富集,

而矿化富集的计算是以围岩中元素含量为基础的,因此,其结果可能或多或少受到矿化的影响而对计算产生干扰,但依然存在一定的岩性差异特征。Au、As 继续在粉砂质板岩和长石砂岩中富集且程度高于泥质板岩。对于富集程度较高的几种元素,Au、As、W 和 Hg、Sb 表现出分异特征,前者为泥质板岩中富集程度低,后者表现为在泥质板岩中富集程度高。由于 Hg、Sb 的围岩富集系数在各岩性中基本一致,因此其在泥质板岩中的富集主要为矿化所致。Hg、Sb 为前缘晕元素,Au、As、W 为近矿晕、尾晕元素,因此,这种分异可能为元素活性和温度主导、同时表现为一定的岩性控制的活动差异。

3.2.3 矿石富集

矿石富集系数采用矿石与矿化围岩中元素含量之比获得,由于矿石数据不分岩性,所以矿石富集系数计算结果虽然也按岩性列出(图5),但由公式可知其结果与矿化富集结果呈反比,即不同岩性差异的特征与图4是相反的,因此,这里只观察富集系数的大小差异。

矿石富集系数大小总体排序为: Au>As>Ag>Sb>W>Hg>Zn>Sn>Pb>Mo>Cu,其中 Mo、Cu、Pb 总体

为亏损,其余元素为富集。矿石相对于矿化围岩, Au、As、Ag、Sb、W、Hg 的富集系数大于 1.25,其中 Au、As 大于 4.35,和前两个阶段相同,是富集程度最大的两个元素。Ag 在此阶段富集程度排序提升最为显著,说明 Au 成矿伴有 Ag 的带入,只是在其余两个阶段 Ag 未发生明显富集,即 Ag 进入围岩的程度相比于 Au、As、Sb、Hg 等要弱很多,基本未进入围岩。

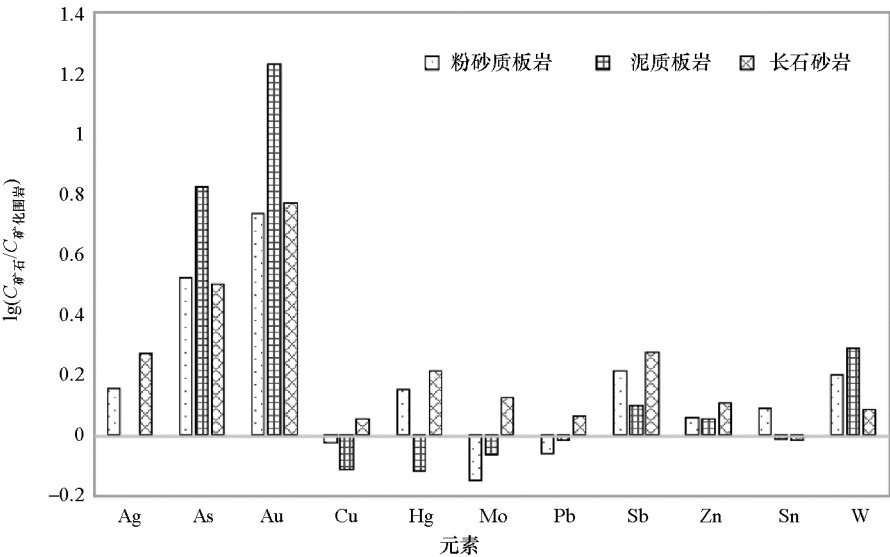


图5 金属元素的矿石富集系数
Fig.5 Elemental enrichment factors of orebody

3.2.4 富集差异量化

由于受元素活性差异、温压条件等影响,金属元素在成矿过程中富集的程度和空间位置存在差异性,这也是原生晕形成的主要内在机制。矿化围岩中元素富集程度可以代表元素在矿化过程中的活性差异,反映元素从矿化中心进入围岩、形成原生晕的能力和概率。设 C_1 为矿石中元素含量, C_2 为区域背景元素含量(这里使用北巴颜喀拉地区元素背景值),则:

$$C_1 = C_2 \times q_1 \times q_2 \times q_3, \tag{2}$$

式中: q_1 为矿床围岩相对于区域背景的元素富集系数; q_2 为矿化围岩相对围岩的富集系数; q_3 为矿石相对于矿化围岩的富集系数。进一步,矿化围岩中元素富集权重:

$$W = q_2 / (q_1 + q_2 + q_3). \tag{3}$$

将矿化围岩元素富集权重 W 按倒序排列,结果见图6。矿化围岩中元素富集权重由高至低为: As>Hg>Au>Sb>W>Mo>Sn>Pb>Zn>Cu>Ag,即从 As 至 Ag,元素在成矿过程中进入围岩的能力不断降低。

从元素排序可以看出,此排序与上文富集系数计算结果具有相似之处, Au、As、Sb 等都靠前,不同之处是这里 As、Hg 处在 Au 的前面,说明在 As 和 Hg 在矿化围岩中的富集占比更大,在矿化活动中更多地进入围岩中。同时,按权重从高至低,整体表现为低温成矿元素 (As、Hg、Au、Sb)>高温成矿元素 (W、Mo、Sn)>中温成矿元素 (Pb、Zn、Cu、Ag),即低温成矿元素更多地进入围岩中,高温成矿元素次之,而中温成矿元素进入围岩的比例最小。

3.3 富集程度差异与原生晕形成能力

原生晕的分带是成矿热液在运移过程中的逐渐演变和矿质先后沉淀所导致,成矿后不同元素的浓度在空间上的分布特征可以反映这个过程,而表现为前缘晕—近矿晕—尾晕等元素的分带。围岩、矿化围岩和矿体的分类,是从成矿元素富集程度的角度,对原生晕的空间划分。两者的不同是,前者是根据不同元素的富集位置差异而进行的空间划分和排序,后者是以成矿元素的富集差异为依据进行空间划分,并评价成矿相关元素在不同空间上的富集程

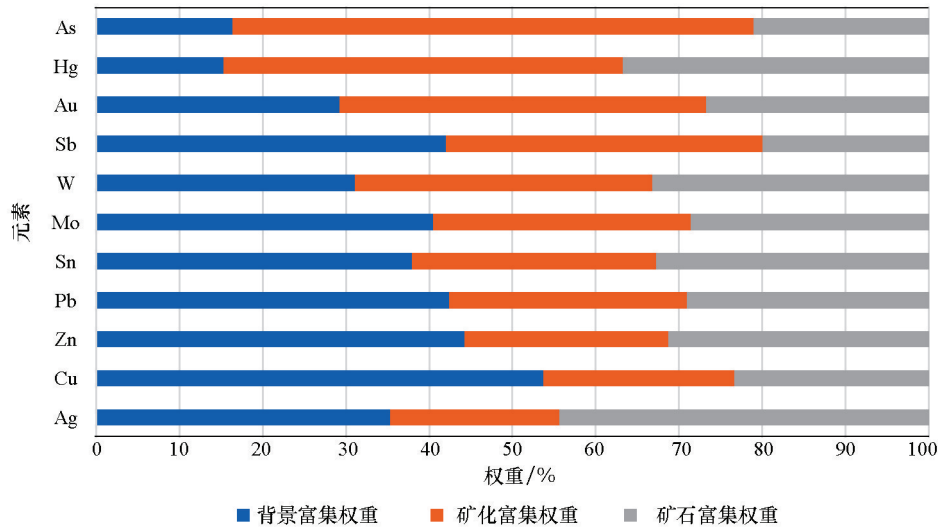


图 6 金属元素在围岩、矿化围岩和矿石中的富集权重分布

Fig.6 Weights of elemental enrichment in the three mediums

度差异。

热液矿床的形成离不开 3 个要素:水源、热液和矿源^[16]。不同矿床的元素分带往往表现为总体的相似性和局部的差异性,热液性质的改变和矿质先后沉淀可以解释原生晕的元素分带的规律性,而其差异性可能与成矿的叠加和不同元素的供给差异有关。基于围岩、矿化围岩和矿体的划分,可以从元素供给即“矿源”的角度对不同元素的成晕能力进行评价。

矿化围岩和矿石位置不同元素所表现出的富集特征可以反映矿化过程对其目前含量的贡献的差异。由表 3 可知,矿化围岩、矿石相比围岩发生富集的元素包括 Au、As、Sb、W、Ag、Hg (Mo),除了 Mo 外,这些元素还表现为在矿石中的富集程度大于矿化围岩,表现为由矿化中心向围岩递减的趋势,是在矿床中形成原生晕的元素。Mo 虽然也表现为富集,但在矿石中的富集系数低于矿化围岩,且两者富集系数都不超过 1.05,故总体上 Mo 的分布受矿化的影响较弱,可以认为在矿床中难形成原生晕。Zn 表现为在矿化围岩中含量低于围岩,但在矿石中含量高于围岩,意味着其在矿化中心位置产生了富集,但进入围岩较少,即 Zn 的原生晕范围有限。Pb、Cu、Sn 在矿化围岩和矿石中的含量都低于围岩,表现为亏损或负异常。地球化学元素的负异常通常与矿体的空间位置具有一定联系,并可指示有利的成矿地质环境^[17-18]。此 3 种元素的负异常特征及与矿体的空间关系有待进一步的异常结构研究,但其从统计上变现出来的亏损,可以说明总体上矿化活动未导致它们的富集,也未对围岩中含量产生影响,可以

表 3 元素富集特征与形成原生晕潜力

Table 3 Enrichment or depletion of element versus the ability of forming a primary halo

矿化	矿石	元素	原生晕
+	+	Au、As、Sb、W、Ag、Hg、(Mo)	✓
+	-		
-	+	Zn	✓
-	-	Pb、Cu、Sn	×

注:“+”表示富集,“-”表示亏损。

认为它们不能形成明显的原生晕。

矿化围岩是原生晕的重要载体,元素在矿化围岩中的富集程度可以反映其形成原生晕的能力和潜力大小。由元素在矿化围岩中的富集权重,元素在矿化围岩中富集比例由大至小为 As>Hg>Au>Sb>W>Mo>Sn>Pb>Zn>Cu>Ag,则在矿化过程中,相比于 Ag、Cu、Zn、Pb、Sn 等,更多的 As、Hg、Au、Sb、W 等进入围岩中,验证了它们更容易在距离矿化中心更远的位置形成原生晕。此排序表现出来的低温成矿元素>高温成矿元素>中温成矿元素的总体趋势,同其与矿体的空间距离远近相吻合。根据中国金矿主要类型及不同规模矿床地球化学分带序列统计规律^[12],As、Hg、Sb 等低温元素一般出现在矿体前缘及上部,Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等中温元素出现在矿体中部,而 W、Mo 等高温元素分布在矿体下部及尾晕。以矿体为起点,低温元素的分布范围和与矿体的距离>>高温元素>中温元素,进而其在与矿体相邻的矿化围岩中的相对富集程度也有相同的排序。此排序也表明,在扎家同哪矿床中,低温成矿元素更容易形成原生晕,高温成矿元素次之,而中温成矿元素则较难形成规模较大的原生晕。成晕规模大的元

素更易于被探测到,尤其是在遭受剥蚀、风化等情况下,其更容易产生对应的次生晕和分散流异常,因此,在研究原生晕特征、指导进一步找矿时,应重点

关注 As、Hg、Au、Sb 和 W 等元素。扎家同哪金矿成矿相关元素空间分布特征可由图 7 示意。

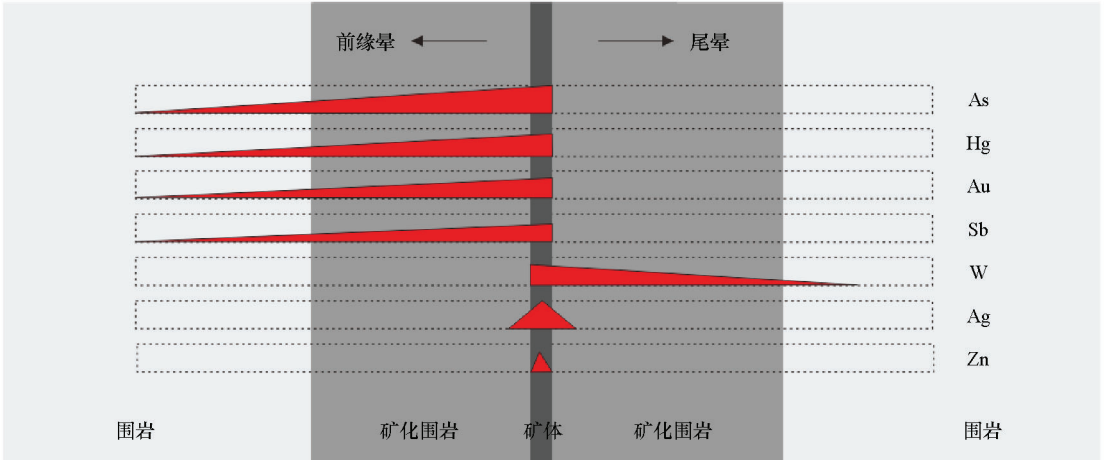


图 7 扎家同哪金矿成矿富集元素空间分布示意

Fig.7 Spatial patterns of elemental enrichment in the Zhajiatongna deposit

4 结论

使用扎家同哪金矿 2 279 个钻孔原生晕样品化学分析数据,通过定量评价不同元素在围岩、矿化围岩和矿石中的富集程度,对元素形成原生晕的能力进行评价,形成以下认识:

扎家同哪金矿 Au、As、Sb、Hg、W、Ag 在矿化围岩和矿石中比围岩中显著富集,且矿石比矿化围岩的富集程度大,这些元素具有较大的形成原生晕的能力;Zn 仅在矿石中表现为富集,成晕规模有限;Mo 仅在矿化围岩中弱富集,成晕潜力小;Cu、Pb、Sn 富集微弱或表现为亏损,较难形成原生晕;扎家同哪金矿不同位置与成矿有关的富集元素为: Au、As、Sb (围岩)—Au、As、Sb、W、Hg (Ag) (矿化围岩)—Au、As、Ag、Sb、W、Hg (Zn) (矿石);成矿过程中元素在矿化围岩中富集的权重由大至小为 As、Hg、Au、Sb、W、Mo、Sn、Pb、Zn、Cu、Ag,进入围岩能力总体表现为低—高—中温元素递减的趋势。研究表明,对于扎家同哪金矿,Au、As、Sb、Hg、W、Ag 是进行原生晕分带研究、指导找矿等的首选成矿相关元素。本文的工作对于区域化探工作中指示元素的确定也具有参考意义。

参考文献 (References):

[1] 欧阳宗圻,李惠,刘汉忠.典型有色金属矿床地球化学异常模式[M].北京:科学出版社,1990.

Ouyang Z X, Li H, Liu H Z. Geochemical anomaly models for typical nonferrous metal deposits[M]. Beijing: Science Press, 1990.

[2] 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 Y. Rock prospecting of hydrothermal deposit (primary halo method)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.

[3] 刘崇民.金属矿床原生晕研究进展[J].地质学报,2006,80(10):1528-1538.

Liu C M. Progress in studies on primary halos of ore deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(10):1528-1538.

[4] 李惠,禹斌,李德亮,等.化探深部预测新方法综述[J].矿产勘查,2010,1(2):156-160.

Li H, Yu B, Li D L, et al. Summary of new methods on deep prediction of geochemical exploration[J]. Mineral Exploration, 2010, 1(2):156-160.

[5] 黄薰德,郁彦.地球化学找矿[M].北京:地质出版社,1985.

Huang X D, Yu Y. Geochemical Prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.

[6] Beus A A, Grigorian S V. Geochemical exploration methods for mineral deposits[M]. Wilmette: Applied Publishing Ltd., 1977.

[7] Zhou Y. Geochemical exploration for deeply hidden ore in south-eastern Hubei Province[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1989, 33(1):135-144.

[8] Konstantinov M M, Strujkov S F. Application of indicator halos (signs of ore remobilization) in exploration for blind gold and silver deposits[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1995, 54(1):1-17.

[9] 黄转莹,路润安.陕西省凤县铅铜山大型铅锌矿床原生异常分带及分带指数[J].地质与勘探,2003,39(3):39-44.

Huang Z Y, Lu R A. Zoning characteristics and index of primary geochemical anomalies in Qiandongshan Pb-Zn deposit, Shaanxi Province, China[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(3):39

- 44.

- [10] Liu L, Peng S. Prediction of hidden ore bodies by synthesis of geological, geophysical and geochemical information based on dynamic model in Fenghuangshan ore field, Tongling district, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2004, 81(1): 81-98.
- [11] Ghavami-Riabi R, Theart H F, De Jager C. Detection of concealed Cu-Zn massive sulfide mineralization below eolian sand and a calcrete cover in the eastern part of the Namaqua Metamorphic Province, South Africa [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, 97(2-3): 83-101.
- [12] 李惠, 张文华, 刘宝林, 等. 中国主要类型金矿床的原生晕轴向分带序列研究及其应用准则 [J]. 地质与勘探, 1999, 35(1): 32-35.
- Li H, Zhang W H, Liu B L, et al. The study on axial zonality sequence of primary halo and some criteria for the application of this sequence for major types of gold deposits in China [J]. Geology and Prospecting, 1999, 35(1): 32-35.
- [13] 王文, 李鹏, 夏有清, 等. 东昆仑大场金矿田扎家同哪矿床地质特征及找矿方向 [J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2012, 30(5): 60-68.
- Wang W, Li P, Xia Y Q, et al. Geological features and prospecting orientation of Zhajiatongna deposit in Dachang golden orefield of Eastern Kunlun mountain [J]. Journal of Qinghai University: Nature Science Edition, 2012, 30(5): 60-68.
- [14] 高永旺, 王福德, 李琳业, 等. 青海省曲麻莱县大场金矿床 165-60 线勘探报告 [R]. 西宁: 青海省第五地质矿产勘查院, 2011.
- Gao Y W, Wang F D, Li L Y, et al. Report on the prospecting line 165-60 in the Dachang gold deposit, Qumalai county, Qinghai province, China [R]. Xining: No. 5 Institute of Geology and Mineral Exploration, Qinghai Bureau of Geological Exploration and Development, 2011.
- [15] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, et al. Element geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [16] 季克俭, 吴学汉, 张国柄. 热液矿床的矿源、水源和热源及矿床的分布规律 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989.
- Ji K J, Wu X H, Zhang G B. Distribution regularity of source, water, heat and deposits about hydrothermal deposits [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1989.
- [17] 朴寿成, 刘树田, 连长云, 等. 地球化学负异常及其找矿意义 [J]. 地质与勘探, 1996, 32(2): 46-50.
- Piao S C, Liu S T, Lian C Y, et al. Geochemical negative anomaly and its prospecting significances [J]. Geology and Prospecting, 1996, 32(2): 46-50.
- [18] 马生明, 朱立新, 刘海良, 等. 甘肃北山辉铜山铜矿地球化学异常结构研究 [J]. 地球学报, 2011, 32(4): 405-412.
- Ma S M, Zhu L X, Liu H L, et al. A study of geochemical anomaly structure of the Huitongshan copper deposit in Beishan area, Gansu Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(4): 405-412.

Quantitative evaluation of the ability of elements in forming primary halos: A case study of the Zhajiatongna gold deposit, Qinghai Province

YUAN Zhao-Xian¹, HOU Zhen-Guang², REN Zhi-Dong³, LIU Yong-Le⁴,
ZHANG Da-Ming⁴, ZHANG Jian-Ping⁴

(1. Institute of Resource and Environmental Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. No.5 Institute of Geology and Mineral Exploration, Qinghai Bureau of Geological Exploration and Development, Xining 810008, China; 3. Qinghai Branch of China Building Material Industry Geological Survey Center, Xining 810008, China; 4. No.3 Institute of Geology and Mineral Exploration, Qinghai Bureau of Geological Exploration and Development, Xining 810029, China)

Abstract: A procedure to screen the elements used in the research on the elemental zonation in a primary halo is rarely conducted, which is not conducive to the acquisition of an accurate understanding of the rules of elemental zonation. In this paper, the authors chose the Zhajiatongna gold deposit in Qinghai Province as a study case and aimed to study the difference between ore-forming metallic elements in the ability of forming a primary halo through comparing the elemental enrichment degrees in the wall rocks, mineralized wall rocks, and orebodies and on the basis of 2 779 samples from the drill cores of the deposit. It is found that the concentrations of Au, As, Sb, Hg, W, and Ag progressively increase from the wall rocks through mineralized wall rocks to orebodies, indicating a greater possibility of forming a primary halo for these elements. Zinc is enriched only in the orebodies, with less possibility of forming a large-scale primary halo. Elements of Mo, Cu, Pb, and Sn show insignificant enrichment or even show depletion, indicating a less possibility of forming a primary halo. A trend of enrichment zonation of ore-forming elements was recognized: Au, As, Sb in the wall rocks, Au, As, Sb, W, Hg (Ag) in the mineralized wall rocks, and Au, As, Ag, Sb, W, Hg and Zn in the orebodies. Elements show a decreasing weight of enrichment in the mineralized wall rocks in order of As, Hg, Au, Sb, W, Mo, Sn, Pb, Zn, Cu, and Ag, suggesting the progressively decreasing ability of entering into the wall rocks from the orebodies in order of low-temperature metallogenic elements through medium-temperature metallogenic elements to high-temperature metallogenic elements. Therefore, in the Zhajiatongna gold deposit, elements such as As, Hg, Au, Sb and W are optimal for researches on elemental zonation and mineral prediction.

Key words: primary halo; enrichment degree; ability of forming a primary halo; quantitative evaluation; Zhajiatongna gold deposit