

doi: 10.11720/wtyht.2022.1444

侯振广,袁兆宪.原生晕中元素及元素组合空间变化性研究——以青海省扎家同哪金矿为例[J].物探与化探,2022,46(4):798–807. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1444>

doi: 10.11720/wtyht.2022.1444

Hou Z G, Yuan Z X. The spatial variations of elements and element associations in the primary geochemical halos: A case study of the Zhajiatongna gold deposit in Qinghai province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 798–807. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1444>

原生晕中元素及元素组合空间变化性研究 ——以青海省扎家同哪金矿为例

侯振广¹, 袁兆宪²

(1. 青海省第五地质勘查院, 青海 西宁 810008; 2. 河北地质大学 资源与环境工程研究所, 河北 石家庄 050031)

摘 要: 原生晕普遍存在于各种矿床尤其是热液矿床中, 是深部找矿必不可少的地球化学标志。目前对于原生晕中元素的富集贫化及组分分带研究较多, 而对于元素及组合元素的空间变化性关注较少。本文基于青海省扎家同哪金矿 2 279 个钻孔原生晕样品地球化学数据, 拟使用元素富集系数计算和多元统计分析的方法, 研究矿床不同空间位置的元素和元素组合的变化特征。结果显示, 从围岩样品、矿化围岩样品、矿石样品和全体样品中都提取出了代表围岩组分和矿化组分的元素组合, 反映了矿床形成过程的本质是矿化组分叠加于围岩组分。在矿石样品中, 还提取出了中高温元素组合和中低温元素组合, 而在矿化围岩样品中, 提取出了高温成矿元素组合和中低温成矿元素组合, 反映了矿质沉淀机制以及沉淀时间和空间的差异。研究揭示, 在扎家同哪金矿原生晕中, 从外围向矿化中心, 从定量的角度, 成矿相关元素总体上表现为富集程度递增及富集元素数量增多的趋势, 而从定性的角度, 表现为围岩—矿化元素组合叠加中高温—中低温和高温—中低温成矿元素组合。

关键词: 原生晕; 富集系数; 因子分析; 元素组合; 扎家同哪金矿

中图分类号: P **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)04-0798-10

0 引言

基于地质及地球化学特征的内生矿床原生晕法在寻找隐伏矿床方面具有自身优势, 被广泛应用于寻找贵金属和有色金属矿床, 并取得了巨大成功^[1-2]。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]。

元素含量分带和组分分带是原生晕最重要的特征, 也是矿床元素分带序列研究和深部矿体预测的基础。成矿相关元素乃至主量元素等在空间上的变

化趋势可以指示矿体。除了传统的正异常, 元素的负异常也开始受到重视^[5-9], 并被尝试建立其与矿体空间位置和规模的关系^[7, 10]。元素垂向分带序列计算为深部矿体资源潜力评价提供了定量工具。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^[11], 从而将深部矿产预测和矿体剥蚀程度等研究推向定量化阶段^[12-18]。此外, 针对多期次、多阶段成矿导致的原生晕叠加现象, 李惠等^[19-20]提出了构造叠加晕找矿法, 在实践中取得了很好的找矿效果。

成矿热液在运移过程中的逐渐演变和矿质先后沉淀是原生晕中元素的含量分带和组分分带产生的内在机制, 而成矿后不同元素的含量在空间上的分布特征可以反映这个过程, 比如通过元素富集位置

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2022-01-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2900100); 国家自然科学基金项目(41602338); 河北省自然科学基金项目(D2021403050)

第一作者: 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

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

的差异可以将相关元素分为前缘晕、近矿晕和尾晕元素。组分分带序列研究是基于不同方向上样品中元素浓度的变化及其相对高值的空间位置,其结果对于总结组分分带规律、指导找矿具有重要意义。矿床中不同位置随着距离矿化中心远近的不同,其元素存在的分带特征已成为原生晕研究的重要基础和内容,然而,相应的元素组合具有什么特征、是否存在分带性等尚不得而知。统计的方法可以基于大数据量获取原生晕不同空间位置的元素组合特征,通过寻找共性规律,获得对原生晕特征新的认识。本文将 以青海省扎家同哪金矿为例,利用富集系数

计算和多元统计分析方法,对比矿石、矿化围岩和围岩中元素富集差异,研究矿床不同位置元素组合的变化特征,以期深化对矿床原生晕和成矿规律的认识。

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。矿体围岩岩性为变砂岩、粉砂质板岩、碎

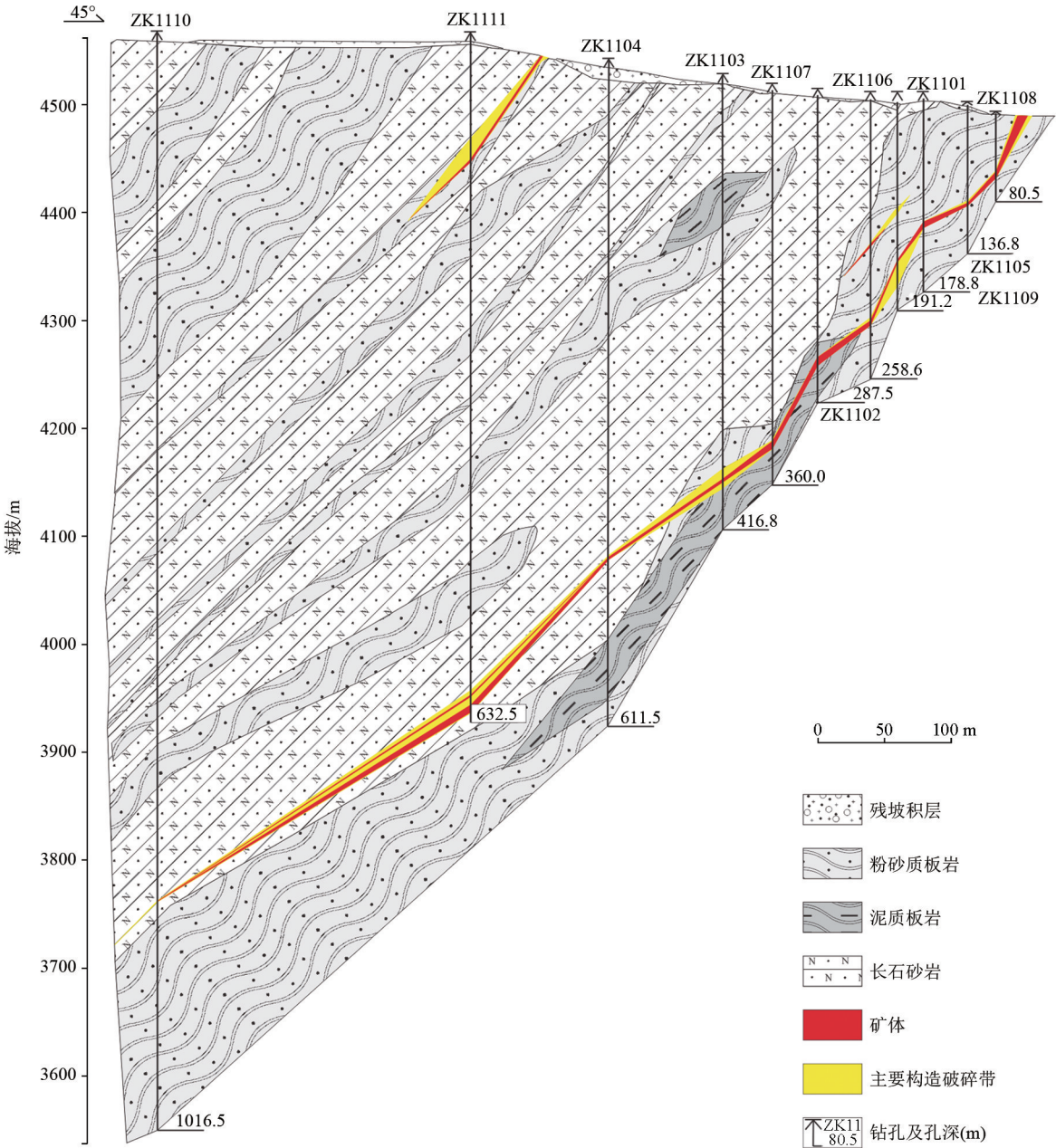


图 1 扎家同哪金矿 11 号勘探线剖面

Fig. 1 Sketches of gold orebodies and wall rocks in the profile of No. 11 prospecting line

裂岩化粉砂质板岩、砂岩等(图1)。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、高岭土等。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。详细地质特征可见王文等^[21]。

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	W	Zn
方法	ES	AF	ICP-MS	ICP-MS	AF	ICP-MS	ICP-MS	AF	ES	ICP-MS	ICP-MS
检出限	20	0.33	0.25	1	0.5	0.15	0.85	0.046	0.85	0.3	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 方法

2.2.1 数据分类

为了方便计算和对比,根据样品岩性将数据分为 4 类:矿石数据、矿化围岩数据、围岩数据和全体数据。这里矿石矿物主要为黄铁矿和毒砂,它们也是金的最主要的载体矿物,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(表 2)。划分围岩和矿化围岩的方法与文献^[22]相同,本文不再赘述。

表 2 扎家同哪矿床原生晕样品主要岩性

Table 2 Lithological classification of the primary halo samples from the Zhajiatongna deposit

围岩	矿化围岩	矿石
粉砂质板岩	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	金矿石
泥质板岩	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	
长石砂岩	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	

2.2.2 富集系数计算

分别计算围岩、矿化围岩和矿石数据的均值,以代表元素在 3 个位置的浓度。前期工作发现,Au 和 As 在围岩和矿化围岩中的富集程度都显示为粉砂质板岩和长石砂岩显著大于泥质板岩,即矿化活动对于矿床中孔隙度大的围岩的影响总体上高于对孔隙度小的围岩^[22]。考虑到围岩中成矿金属含量与矿化围岩的较大差异性(如 Au 含量:泥质板岩 7.6×

2 数据与方法

2.1 数据来源

本次研究共收集扎家同哪金矿床钻孔岩心地球化学数据 2 779 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 1~5 m,送自然资源部西宁矿产资源监督检测中心测试,测定 Ag、As、Au、Cu、Hg、Mo、Pb、Sb、Sn、W、Zn 等 11 个元素的含量,检测方法及检出限等见表 1。

10⁻⁹,长石砂岩 17.1×10⁻⁹,粉砂质板岩 19.4×10⁻⁹;矿化泥质板岩 100.2×10⁻⁹,矿化长石砂岩 285.5×10⁻⁹,矿化粉砂质板岩 309.7×10⁻⁹),本文对 3 种岩性合并,分别计算算术平均值获得围岩和矿化围岩结果。笔者^[22]以区域背景为基准讨论了扎家同哪金矿床的围岩、矿化围岩和矿石中的元素富集、贫化特征,为了消除部分元素高背景对结果的干扰,这里以围岩为基准进行计算。定义富集系数:

q = C₁/C₂

式中:q 为富集系数;C₁ 为矿化围岩或矿石中的元素含量;C₂ 为围岩中的元素含量,分别计算矿化围岩和矿石中元素浓度相对于围岩中浓度的富集系数。

2.2.3 因子分析

因子分析是一种常用的多变量降维的方法,其通过获取比原始变量数目更少的、相互独立的变量,也就是因子,从而实现降维。基于变量的载荷特征,因子可以理解为物理或化学的过程,对于矿床地球化学元素变量,其获取的因子可以反映岩性、蚀变、矿化等。变量的载荷表示变量和因子之间的相关系数,反映了变量在因子上的相对重要性,因此,载荷越大,变量和因子之间的关联性越强。因子分析是确定元素组合的主要方法之一,被广泛应用于地质、勘查、环境等领域的相关应用中。

因子分析的总体步骤为:①删除数据,由于部分样品选测元素不全,不宜采用替换法,故删除含空值数据;②标准化处理,使数据尽可能服从正态分布;③求解相关系数矩阵,获取特征根、特征向量和因子载荷矩阵;④提取原始因子;⑤方差最大正交旋转。最终确定的因子数量是基于因子对变量进行解释所

需要的最少数量,即额外的因子对变量的解释基本不提供帮助。

本研究使用 SPSS 软件完成因子分析。对扎家同哪金矿原生晕样品的围岩数据、矿化围岩数据、矿石数据以及全体数据分别进行因子分析,提取可反映岩性、矿化等特征的元素组合,并对不同空间位置的元素组合特征进行对比。

3 结果和讨论

3.1 元素的空间变化

本文讨论的元素和元素组合的“空间变化”不是指基于实际取样位置的二维或三维空间分布趋势,而是指基于矿化程度差异的不同空间位置的变化趋势。矿化围岩和矿石相对于未矿化围岩的元素富集系数计算结果见图 2。

由元素变化趋势可以将扎家同哪金矿床金属元素分为 3 类:①单调递增元素,从围岩到矿石,即从矿化外围到中心元素浓度不断增加,包括 Au、As、

Sb、W、Hg 和 Ag,其中 Au 和 As 富集程度远远高于其他元素;②单调递减元素,包括 Cu 和 Pb,其在围岩中含量最高,在矿化围岩和矿石中含量不断降低;③复杂变化元素,包括先增后减的 Mo 和先减后增的 Zn、Sn。可见,基于元素空间上的分布趋势,矿化活动带来的金属元素主要为 Au、As、Sb、W、Hg、Ag,且从矿化中心向外富集程度递减;基本无带入的有 Pb 和 Cu,其与金矿化强度呈反比,在围岩中含量最高,矿石中最低;Mo 在矿化围岩中发生了富集;Zn、Sn 在矿石中有一定富集,但基本未进入矿化围岩,即在矿化过程中从矿化中心向外围迁移能力较弱。因此,总体上,扎家同哪金矿围岩中主要富集 Au、As、Sb,矿化围岩中富集 Au、As、Sb、W、Hg、Ag,矿石中富集 Au、As、Ag、Sb、W、Hg、Zn。

通常 As、Sb、Hg 等为前缘晕元素,W 为尾晕元素,而矿化围岩既包含前缘晕样品,又包含尾晕样品,所以呈现的结果显示它们在矿化围岩中都有富集。前缘晕、尾晕与近矿晕之间的界线不是截然的,而是有部分交集,所以矿石中这些元素也会有富集。

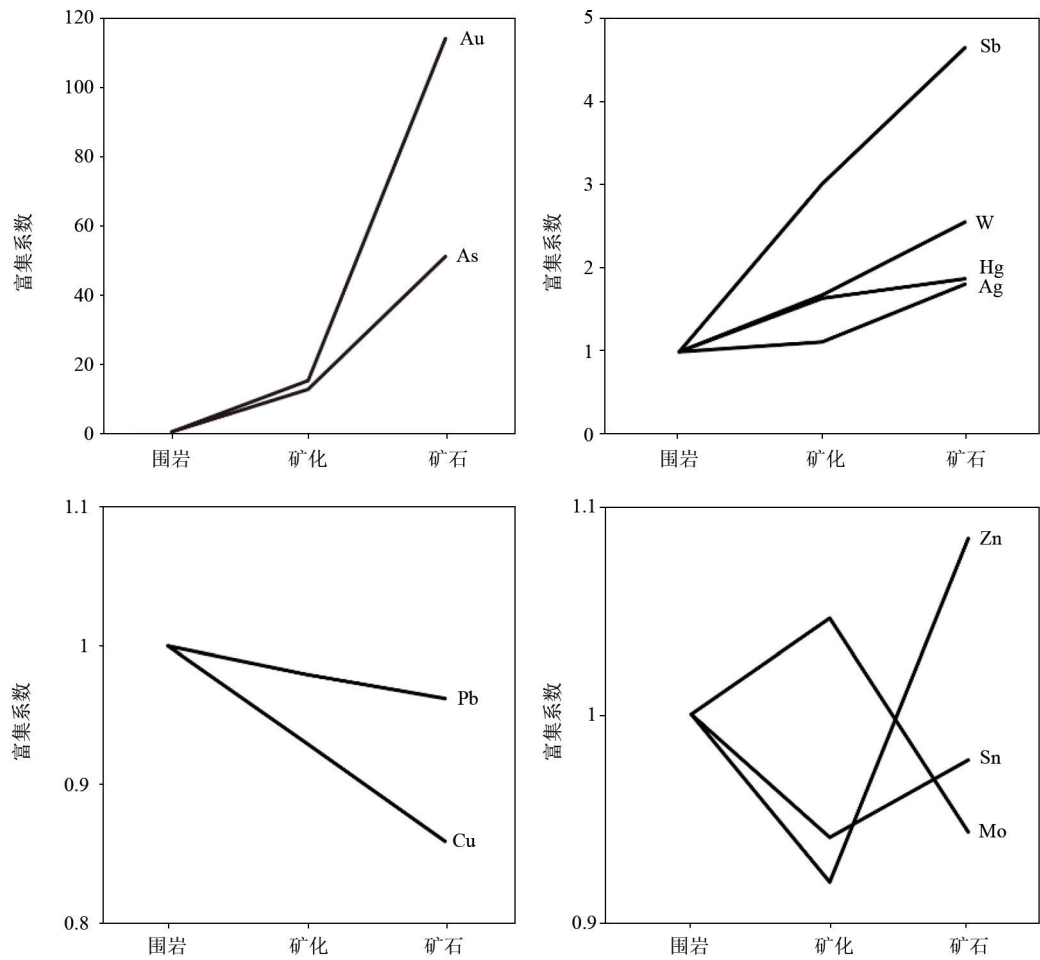


图 2 矿化围岩和矿石相对于围岩的元素富集趋势

Fig. 2 Variations in elemental enrichment factor of mineralized wall rock and ore relative to unmineralized wall rock

至于在矿石中的富集程度高于矿化围岩,一方面与这些元素与 Au 矿化的关系紧密、在矿石中共伴生有关,另一方面与矿化围岩均值计算时前缘晕、尾晕样品同时参与导致元素被稀释有关。

Cu、Pb、Zn、Sn、Mo 等在矿化围岩或矿石中出现富集系数小于 1 的现象,反映了目标样品中的含量低于参考样品。富集系数计算结果尽管不能直接反映物质迁移,但富集特别强烈或趋势性良好时可以指示极大概率存在迁入。Cu、Pb、Zn、Sn 在矿化围岩和矿石中的富集系数都介于 0.9~1.1,远远小于 Au、As 等,因此判断它们受成矿过程影响小,主要反映了围岩。Zn 和 Sn 在矿化围岩中亏损,在矿石中富集,说明在矿化围岩中含量低,矿石中含量高,因此认为 Zn 和 Sn 在成矿过程中发生了带入,但基本未进入围岩中。Mo 和 Zn、Sn 的趋势相反,在矿化围岩中富集,在矿石中亏损,这与 Mo 通常富集在尾晕中相吻合。

将元素现有的含量分为围岩固有含量和成矿带入含量,则 Au、As、Ag、Sb、W、Hg、Zn 明显受到成矿活动影响而发生带入,其中 Zn 主要在矿石中。Cu、Pb、Sn、Zn 在矿化围岩和矿石中的含量都低于围岩(矿石中的 Zn 除外),说明矿化活动未导致它们发生明显带入,它们的含量主要来自围岩固有含量。进而,根据矿化活动对元素的影响差异,可以将明显带入的 Au、As、Ag、Sb、W、Hg 视为矿化元素,而 Cu、Pb、Sn(Zn)为代表围岩的围岩元素。

3.2 元素组合的空间变化

3.2.1 元素组合特征

分别对围岩数据、矿化围岩数据、矿石数据和全体数据进行因子分析,结果见表 3 和图 3。由于所处理变量都为金属元素,其形成背景和演化过程往往不如金属元素和成岩元素之间差异大,因此,为了便于讨论,在主要成矿元素信息提取程度较大的情况下,本文将只关注方差占比最大的前两个因子。

全体数据所获取的前两个最大因子中,因子 1 中元素按载荷大小排序为 As、Au、Sb、Hg、W、Pb、Mo、Zn、Cu、Sn,因子 2 中元素按载荷大小排序为 Zn、Cu、Sn、Pb、Hg、Mo、Sb、W、As、Au。载荷的正负和相对大小代表元素和因子之间的相关关系的方向和强弱,因子 1 中载荷大的元素以成矿相关元素为主,载荷小的元素以围岩组分为主,且从 Pb 开始载荷陡然降低,故因子 1 为矿化因子(以大载荷计),As、Au、Sb、Hg、W 为反映矿化的元素组合。因子 2 与因子 1 相反,载荷大的元素以围岩组分为主,载荷小的以矿化元素为主,故因子 2 为围岩因子,Zn、

Cu、Sn、Pb 为反映围岩的元素组合。需要指出的是,因子 1 和因子 2 中都包含围岩和矿化组分,若以负载荷计,则因子 1 和因子 2 可分别为围岩因子和矿化因子。在载荷图上(图 3),可见围岩组分 Zn、Cu、Sn、Pb 和矿化组分 As、Au、Sb、Hg、W、Mo 散布在不同的方向,区别明显,泾渭分明。因此,全体数据获得的因子 1 和因子 2 为矿化—围岩因子。

围岩数据所获取的前两个最大因子中,因子 1 中元素按载荷大小排序为 Zn、Cu、Sn、Pb、Hg、W、Mo、Sb、Au、As,因子 2 中元素按载荷大小排序为 As、Au、W、Sb、Hg、Mo、Cu、Pb、Zn、Sn。此结果和全体数据所得结果基本一致,且围岩组分和矿化元素的载荷差别、聚集更为明显。因此,围岩数据的两因子都为矿化—围岩因子,Zn、Cu、Sn、Pb 为反映围岩的元素组合,As、Au、W、Sb、Hg、Mo 为反映矿化的元素组合。

矿化围岩数据所获取的前两个最大因子中,因子 1 中元素按载荷大小排序为 Zn、Cu、Hg、Pb、Sn、Sb、Mo、W、Au、As,因子 2 中元素按载荷大小排序为 Sb、Pb、Hg、As、Zn、Cu、Au、W、Sn、Mo(后三个是负)。因子 1 中大载荷元素以围岩组分为主,即 Zn、Cu、Hg、Pb、Sn,小载荷以矿化组分为主,即 As、Au、W、Mo、Sb。因子 2 与前述结果不同,负载荷的 W、Sn、Mo 为高温热液成矿元素,正载荷的其他元素为中低温热液成矿元素,故因子 2 为反映成矿温度差异的因子。

矿石数据所获取的前两个最大因子中,因子 1 中元素按载荷大小排序为 Au、W、As、Hg、Sb、Zn、Cu、Pb、Sn,因子 2 中元素按载荷大小排序为 Sb、Zn、Hg、Cu、Pb、W、Au、Sn、As。因子 1 中 Au、W、As 的载荷远远大于其他元素,且为主要的矿化元素,负载荷元素为围岩因子,因此因子 1 为矿化—围岩因子。因子 2 与矿化围岩数据所得因子 2 相似,负载荷元素 As、Sn、Au、W 为中高温成矿元素,其他为中低温成矿元素。

3.2.2 元素组合空间变化

通过因子分析,全体数据和细分的围岩、矿化围岩及矿石数据都提取出了反映围岩和矿化的元素组合,其中,全体数据和围岩数据的前两个最大因子都为矿化—围岩因子。矿化围岩数据和矿石数据的最大因子为矿化—围岩因子,其第二大因子不再是矿化—围岩因子,而是成矿元素呈现分化的因子,其中,矿化围岩数据为高温成矿元素和中低温成矿元素,矿石数据为中高温成矿元素和中低温成矿元素。

表 3 不同位置数据因子分析前两个最大因子中的元素载荷

Table 3 Loadings of elements in the two biggest factors of the four sets of data

元素	全体数据		围岩数据		矿化围岩数据		矿石数据	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
As	0.86	-0.06	-0.11	0.86	-0.84	0.38	0.79	-0.33
Au	0.78	-0.07	-0.11	0.81	-0.84	0.07	0.84	-0.10
Cu	-0.06	0.74	0.75	0.01	0.90	0.15	-0.20	0.55
Hg	0.49	0.33	0.38	0.30	0.79	0.43	0.20	0.67
Mo	0.05	0.20	0.21	0.12	-0.02	-0.71		
Pb	0.08	0.43	0.59	0.00	0.66	0.46	-0.31	0.39
Sb	0.56	0.10	0.09	0.43	0.21	0.88	-0.01	0.69
Sn	-0.09	0.67	0.65	-0.02	0.66	-0.54	-0.46	-0.11
W	0.42	-0.02	0.26	0.68	-0.48	-0.11	0.83	-0.01
Zn	0.01	0.81	0.80	-0.01	0.90	0.27	-0.04	0.69

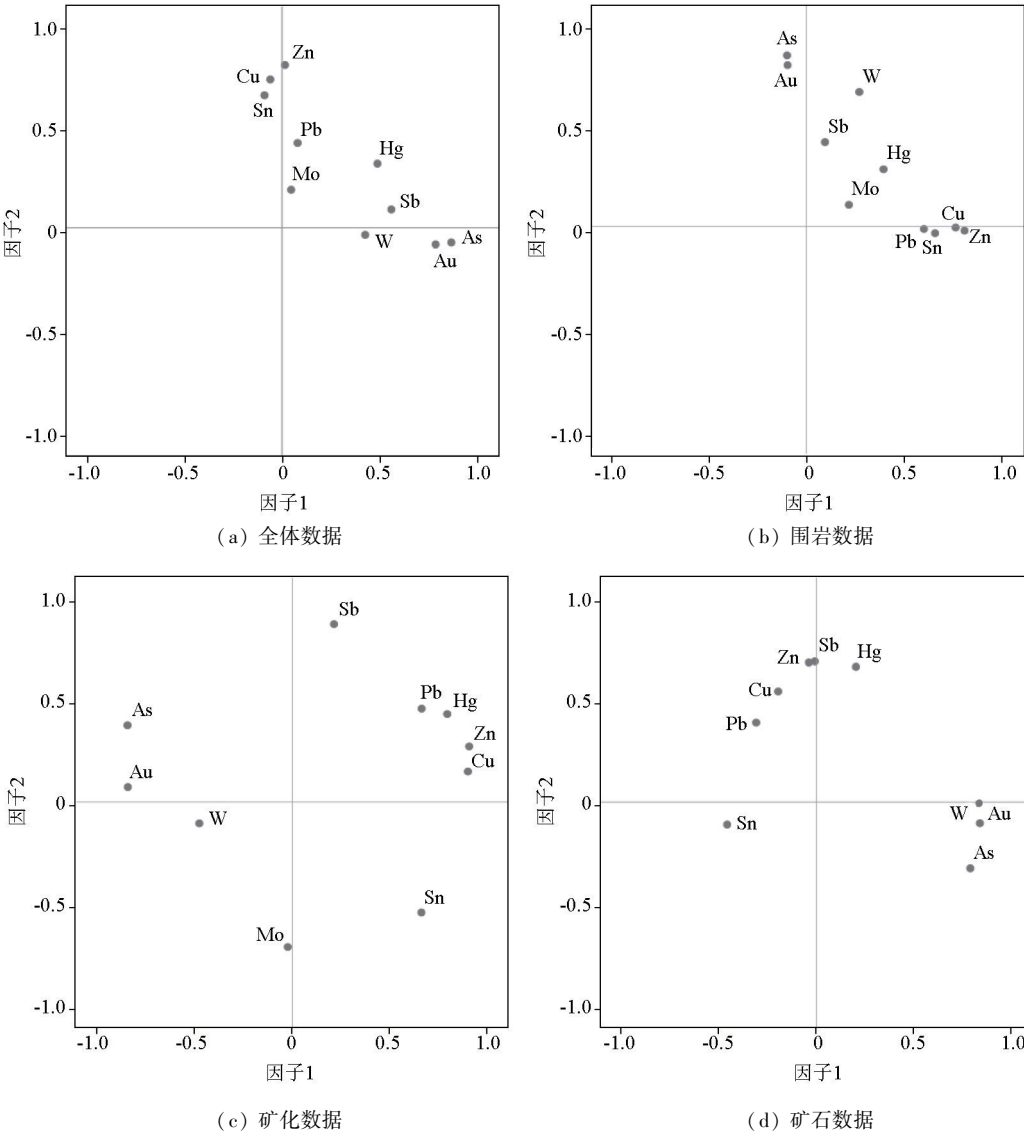


图 3 前两个最大因子的因子载荷

Fig. 3 The loading plots of the two biggest factors of the four sets of data

全体数据、围岩数据、矿化围岩数据和矿石数据的最大因子都是围岩—矿化因子,反映了矿化活动对矿床内不同位置和矿化程度的岩石都产生了影响。从矿化中心到围岩,成矿金属的带入量是递减的,反映为元素富集分带,而因子分析从定性的角度区分出固有组分和带入组分,带入组分在不同的位

置呈现出差异而表现为空间上元素组合的分带。在成矿金属带入量更大的矿化围岩和矿石中,除了围岩组分和矿化组分的差异,矿化组分之间也表现出了差异。

矿石数据提取出了 As、Sn、Au、W 和 Sb、Zn、Hg、Cu、Pb 两个元素组合,前者为中高温成矿元素,后者为中低温成矿元素。扎家同哪金矿为浅成低温热液矿床^[21],因此矿石中富集的 W 同样应为(中)低温成因。高温成矿元素在中低温环境中产出早已受到关注。W 很早就被发现其会在低温热液矿床中出现、与金伴生^[23],国外发现的与钨矿床共生的金矿床大都以 Au-Bi-W-As 组合为特征^[24],此外还常见 W-Sb-Au-(As)、W-Sb-Hg 等成矿元素共生组合^[25-26]。前人研究表明,在中低温热液中 W 主要呈各种杂多酸络合物的形式存在,当物理化学条件发生变化时,杂多酸络合物变得不稳定而发生分解,从而导致 W 这一高温成矿元素与 Au、Sb、As、Hg 等低温成矿元素在一些中低温热液矿床中稳定共生在一起^[25]。同时,Au 还会以硫—金络合物、硫—砷络合物、硫—锑络合物等形式进行迁移^[27-28],由于不同络合物的稳定性差异,这些金属元素从热液中沉淀出来的时间和空间位置也存在差异。扎家同哪金矿紧邻的大场金矿流体包裹体研究显示,金—石英—硫化物碎裂岩型矿石均一温度为 220~280℃,金—石英—辉锑矿型矿石和明金—石英脉型矿石的均一温度为 160~220℃^[29]。因此,矿石样品中富集 Au、As、Ag、Sb、W、Hg、Zn,但由于矿质沉淀的时间和位置差异,导致不同矿石样品中富集的元素不尽相同,这是矿石数据中这些成矿元素之间发生分化的内在机制。

矿化围岩数据提取出了 W、Sn、Mo 和 Sb、Pb、Hg、As、Zn、Cu、Au 两个元素组合,显然,两者分别为高温和中低温热液成矿元素组合。此结果与矿石数据结果相似,出现了与元素运移形式和沉淀差异有关的成矿元素分化。此外,此结果受样品差异影响更为明显,通常,高温成矿元素 W、Sn、Mo 的富集出现在尾晕位置,中低温成矿元素 Sb、Hg、As、Au、Zn 等出现在近矿晕和前缘晕位置,而矿化围岩样品中既有尾晕样品,也有近矿晕和前缘晕样品,故因子分析的结果反映了成矿元素在空间上的分布特征。理论上,如果样品密度足够的话,因子得分的变化应能与晕的变化较好地吻合,从而根据构造叠加晕的理论^[19],因子得分是预测深部矿体的潜在有效指标。

3.3 元素和元素组合分带模型

与传统的基于剖面上元素空间分布特征研究原

生晕规律不同,本研究将样品按照围岩、矿化围岩和矿石进行分类统计,侧重于研究不同元素随距离矿化中心远近而表现出来的特征和差异。由上文可知,扎家同哪金矿矿石、矿化围岩和围岩中分别富集 Au-As-Ag-Sb-W-Hg-Zn、Au-As-Sb-W-Hg-Ag 和 Au-As-Sb,而 Cu、Pb、Sn、Zn 主要来自围岩固有含量。可见,扎家同哪金矿中不同矿化程度的位置,富集的元素既有共性也有差异,Au、As、Sb 在所有的位 置 都 发 送 了 明 显 富 集,随 矿 化 程 度 增 大,在 矿 化 围 岩 中 新 增 W、Hg、Ag 发 生 明 显 富 集,而 在 矿 石 中,又 新 增 Zn 明 显 富 集,即 随 着 矿 化 程 度 变 化,成 矿 元 素 的 富 集 存 在 分 带 现 象。

因子分析可以基于各元素含量数据结构特征和其之间的相关关系给出具有不同地质意义的分组结果。元素富集分带是基于均值的统计结果,因此因子分析的结果与之稍有差异,两者分别从整体水平和结构特征两个方面表现元素含量数据,其反映的地质内涵也不同。因子分析提取出了围岩和矿化组分,且对矿化组分进行了分类。

矿体前缘晕、近矿晕、尾晕分带和元素轴向分带序列是原生晕分带研究和应用中最常用、效果最好的两种方法^[20]。通常,两种方法的结果具有紧密联系,即晕的分带和元素的分带序列往往具有对应性。基于 150 多个金及有色金属矿原生晕的轴向分带序列,得出的中国热液型金及有色金属矿床原生晕理想轴向分带序列中,I-Hg-F-As-Sb-B-Ba、Sc-Li(W、Sn 矿)出现在矿体前缘及上部,Ag-Pb-Au-Cu-Zn-Sb(Sb 矿)、W-Sn(矿)出现在矿体中部,W-Bi-Mo-Mn-Co-Ni-V-Ti-Sn 出现在矿体下部及尾晕^[20]。虽然不同矿床的元素分带序列或不同晕的特征元素存在细微差别,但这种由热液活动中元素性质差异导致的指示元素在空间上的分布特征具有普遍规律性。

从矿化中心向外围,成矿相关元素的含量会呈现规律变化,不同元素的高值位置存在差异,从而表现为空间上的元素分带现象。由于元素之间存在或强或弱的相关关系,且相同两个元素之间的关系随空间位置的不同也会发生变化,因此,从矿化中心向外围,元素组合也会存在某种规律性的变化。图 4 为使用两种方法获取的扎家同哪金矿元素组合空间分布变化特征。图 4a 为基于元素富集程度计算获取的元素组合特征,富集程度越大说明随矿化活动带入的比例越大。空间上,从围岩至矿化围岩和矿石,成矿元素富集的程度递增,富集的元素数量递增,富集元素组合分别为 Au-As-Sb、Au-As-Sb-W

-Hg-Ag 和 Au-As-Ag-Sb-W-Hg-Zn,而基本未发生富集的 Cu-Pb-Sn-Zn 以围岩固有含量为主。图 4b 为因子分析提取的元素组合,其与根据元素富集程度获得的结果不同,更侧重于从定性的角度揭示地质过程。从所有的分带中都获得了最大因子:围岩—矿化因子,Cu-Pb-Sn-Zn 为围岩组分,As-Au-Sb-Hg-W-Mo 为矿化组分,反映了矿床的地质过程的基本框架是围岩发生矿化。在矿石中,因子分析提取出了中高温成矿元素组合 As-Sn-Au-W 和中低温成矿元素组合 Sb-Zn-Hg-Cu-Pb,在矿化围岩

中,提取出了高温成矿元素组合 W-Sn-Mo 和中低温成矿元素组合 Sb-Pb-Hg-As-Zn-Cu-Au,而在围岩中,成矿元素无此分化。成矿元素在富集程度更高的位置发生的分化,反映了其矿质沉淀机制和矿质沉淀时空的差异。因此,从外围向矿化中心,从定量的角度,成矿相关元素表现为富集元素的数量递增和富集程度递增的趋势,而从定性的角度,表现为围岩—矿化元素组合叠加中高温—中低温和高温—中低温成矿元素组合。

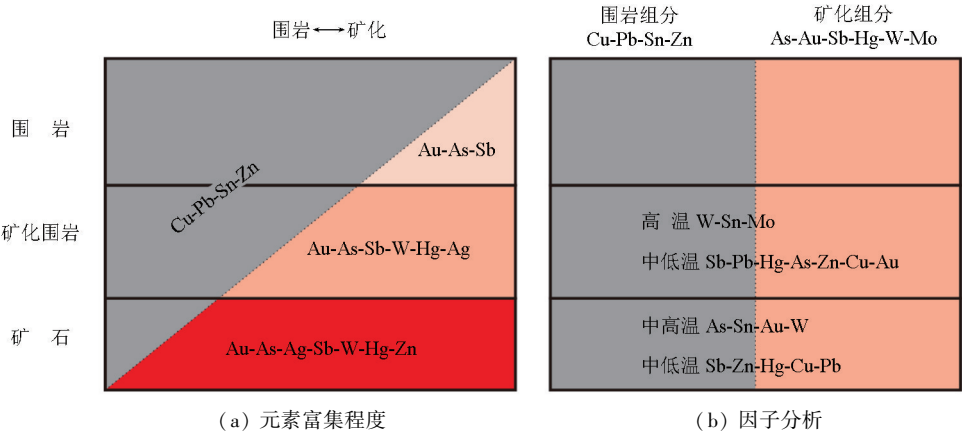


图 4 扎家同哪金矿原生晕中元素和元素组合空间分带示意

Fig. 4 Sketch map of zonation of elements and element associations in the primary halo of the Zhajiatongna deposit

4 结论

为研究原生晕中不同元素及元素组合的空间变化特征,基于青海省扎家同哪金矿 2 279 个钻孔原生晕样品地球化学数据,在元素富集系数计算、对比的基础上,使用因子分析对不同空间位置的样品数据进行处理,得出以下结论和认识:

- 1) 基于元素富集系数空间变化特征,扎家同哪金矿围岩中主要富集 Au、As、Sb,矿化围岩中富集 Au、As、Sb、W、Hg、Ag,矿石中富集 Au、As、Ag、Sb、W、Hg、Zn。
- 2) 使用因子分析方法从围岩样品、矿化围岩样品、矿石样品和全体样品中都提取出了代表围岩组分 (Zn、Cu、Sn、Pb) 和矿化组分 (As、Au、Sb、Hg、W、Mo) 的元素组合,反映了矿床形成过程的本质是矿化组分叠加于围岩组分。
- 3) 在矿石样品中,还提取出了中高温成矿元素组合 (As、Sn、Au、W) 和中低温成矿元素组合 (Sb、Zn、Hg、Cu、Pb),而在矿化围岩样品中,提取出了高温成矿元素组合 (W、Sn、Mo) 和中低温成矿元素组合 (Sb、Pb、Hg、As、Zn、Cu、Au),反映了矿质沉淀机

- 制和沉淀时间、空间的差异。
- 4) 从外围向矿化中心,从定量的角度,成矿相关元素表现为富集元素的数量递增和富集程度递增的趋势,而从定性的角度,表现为围岩—矿化元素组合叠加中高温—中低温和高温—中低温成矿元素组合。

参考文献 (References) :

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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 Q, Li H, Liu H Z. Geochemical anomaly models for typi-

- cal nonferrous metal deposits[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [5] 史长义, 汪彩芳. 区域次生地球化学负异常模型及其意义[J]. 物探与化探, 1995, 19(2): 104–113.
Shi C Y, Wang C F. The regional secondary geochemical negative anomaly model and its significance[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1995, 19(2): 104–113.
 - [6] 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.
 - [7] Goldberg I S, Abramson G Y, Los V L. Depletion and enrichment of primary haloes: Their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2003, 3(3): 281–293.
 - [8] 徐明钻, 朱立新, 马生明, 等. 多重分形模型在区域地球化学异常分析中的应用探讨[J]. 地球学报, 2010, 31(4): 611–618.
Xu M Z, Zhu L X, Ma S M, et al. A tentative discussion on the application of multi-fractal models to the analysis of regional geochemical anomalies[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(4): 611–618.
 - [9] 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.
 - [10] Goldberg I S, Abramson G Y, Haslam C O, et al. Depletion and enrichment zones in the Bendigo gold field: A possible source of gold and implications for exploration[J]. Economic Geology, 2007, 102(4): 745–753.
 - [11] Beus A A, Grigorian S V. Geochemical exploration methods for mineral deposits[M]. Wilmette: Applied Publishing Ltd, 1977.
 - [12] Yate Z. Geochemical exploration for deeply hidden ore in south-eastern Hubei Province[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1989, 33(1): 135–144.
 - [13] 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.
 - [14] 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.
 - [15] Liu L M, Peng S L. 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.
 - [16] 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.
 - [17] Wang C M, Carranza E J, Zhang S T, et al. Characterization of primary geochemical haloes for gold exploration at the Huanxiangwa gold deposit, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 24: 40–58.
 - [18] Zheng C J, Luo X R, Wen M L, et al. Axial primary halo characterization and deep orebody prediction in the Ashele copper-zinc deposit, Xinjiang, NW China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 213: 106509.
 - [19] 李惠, 张国义, 王支农, 等. 构造叠加晕法在预测金矿区深部盲矿中的应用效果[J]. 物探与化探, 2003, 27(6): 438–440.
Li H, Zhang G Y, Wang Z N, et al. The effect of applying structural superimposed halos to the prognosis of deep blind orebodies in the gold ore district [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(6): 438–440.
 - [20] 李惠, 禹斌, 李永才, 等. 热液型矿床深部盲矿预测的构造叠加晕实用理想模型及其意义[J]. 地质与勘探, 2020, 56(5): 889–897.
Li H, Yu B, Li Y C, et al. A new practical ideal model of structural superimposed halos for prediction of deep blind hydrothermal deposits and its significance[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(5): 889–897.
 - [21] 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.
 - [22] 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(1): 292–300.
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.
 - [23] 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.
 - [24] Thompson J F, Sillitoe R H, Baker T, et al. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34(4): 323–334.
 - [25] 刘建明, 周渝峰, 付仁平, 等. 杂多酸络合物及其与热液成矿元素组合的关系[J]. 矿物岩石, 1994, 4(4): 76–84.
Liu J M, Zhou Y F, Fu R P, et al. Heteropolyacide complexes in relationship to hydrothermal paragenesis of ore elements[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1994, 4(4): 76–84.
 - [26] 刘家军, 刘光智, 廖延福, 等. 甘肃寨上金矿床中白钨矿矿体的发现及其特征[J]. 中国地质, 2008, 35(6): 1113–1120.
Liu J J, Liu G Z, Liao Y F, et al. Discovery and significance of scheelite orebodies in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu

[J]. *Geology in China*, 2008, 35(6): 1113–1120.

[27] Grigoryeva T A, Sukneva L S. Effects of sulfur and of antimony and arsenic sulfide on the solubility of gold[J]. *Geochimica et Cosmochimica*, 1981, 18: 153–158.

[28] Akhmedzhanova G M, Nekrasov I Y, Tikhomirova V I, et al. Solubility of gold in sulfide-arsenide solutions at 200 ~ 300 °C [J]. *Earth Science Sections*, 1998, 300(3): 189–191.

[29] 丁清峰, 王冠, 孙丰月, 等. 青海省曲麻莱县大场金矿床成矿流体演化: 来自流体包裹体研究和毒砂地温计的证据[J]. *岩石学报*, 2020, 26(12): 3709–3719.

Ding Q F, Wang G, Sun F Y, et al. Ore-forming fluid evolution of Dachang gold deposit in Qumalai County, Qinghai Province: Evidence from fluid inclusion study and arsenopyrite geothermometer [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(12): 3709–3719.

The spatial variations of elements and element associations in the primary geochemical halos: A case study of the Zhajiatongna gold deposit in Qinghai province

HOU Zhen-Guang¹, YUAN Zhao-Xian²

(1. No. 5 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Qinghai Bureau of Geological Exploration and Mineral Development, Xining 810008, China; 2. Institute of Resource and Environmental Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The primary geochemical halos, which exist in nearly all types of deposits, especially in hydrothermal deposits, serve as an essential geochemical indicator for deep prospecting. Many studies have been presently carried out on the elemental enrichment/depletion and component zoning in primary geochemical halos. However, there is a lack of reports on the spatial variations of elements and associated elements. This study collected geochemical data from 2,279 samples of the boreholes in the Zhajiatongna gold deposit and then calculated the enrichment factors and conducted a multivariate analysis to characterize the spatial variations of elements and element associations of the deposit. The element associations representing the components of surrounding rocks and mineralized components were extracted from all samples including surrounding rock samples, mineralized surrounding rock samples, and ore samples. They reflect that the deposit was formed by the superposition of mineralized components on the components of surrounding rocks in essence. Moreover, high-medium- and medium-low-temperature element associations were extracted from the ore samples, and high- and medium-low-temperature metallogenic element associations were extracted from the mineralized surrounding rock samples, indicating mineral precipitation mechanisms and the differences in the precipitation time and space. As suggested by the results, the primary geochemical halos of the Zhajiatongna deposit show the following variations from the periphery to the mineralization center: the mineralization-related elements generally exhibit an increasing trend in terms of enrichment degree and the number of enriched element types quantitatively, and the high-medium-temperature-medium-low-temperature and high-temperature-medium-low-temperature metallogenic element associations are superimposed on the surrounding rocks - mineralized element associations.

Key words: primary geochemical halo; enrichment factor; factor analysis; element association; Zhajiatongna gold deposit

(本文编辑:蒋实)