

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2017.03.002

青海果洛龙洼金矿床矿化元素组合特征及找矿意义

贾福聚¹,高建国¹,周家喜²,郭跃进³

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093;2. 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002;
3. 云南华联矿产勘探有限责任公司,云南 曲靖 655000)

摘要: 青海果洛龙洼金矿床位于东昆仑造山带东段沟里地区,具有多元素共生特征,这些共生元素不仅具有综合利用价值,也是重要的找矿指示元素。文章依据工作中系统采集的81件样品的11种元素(Au、Hg、V、Mo、Ni、Cu、As、Co、Ag、W、Pb)测试数据,进行了元素的相关分析、聚类分析和因子分析,并分块段将各因子得分与矿体Au品位进行了对比研究,结合矿区地质情况进行了解译。结果表明,主成矿元素Au与Ag、Pb、Cu、Mo显著正相关,与Hg、W、As弱正相关。伴生元素中As与Hg、Pb与Ag为强正相关,Pb与Cu、Cu与Ag、W与Mo为正相关,Ni、Co与V元素呈弱正相关。因子分析结果显示,11种元素可分为四个因子组Au-Cu-Ag-Pb(F1)、W-Mo(F2)、Hg-As(F3)和Ni-Co-V(F4)。F1因子为中温多金属硫化物元素组合,在矿床主成矿阶段形成,该因子得分情况在矿区西部区域与矿体Au品位变化规律完全一致,因此,Au-Cu-Ag-Pb组合异常对矿区西部区域找矿具有指示意义。F2因子属高温岩浆热液元素组合,该因子上Au有一定载荷,推测矿区华力西-印支期花岗岩闪长岩对Au成矿具有重要意义。F3为低温热液元素组合,矿区自西向东分段统计结果显示,该因子得分变化情况与矿体Au品位变化规律具一致性,可运用As-Hg组合异常进行成矿预测。F4因子与地层中的基性火山组分有关,与其它元素具有不同的地球化学演化过程。因子得分统计结果显示,矿区中部是与Au相关多元素富集中心,该区段为多种成矿因素复合叠加的中心,应加强该处的勘查工作。

关键词: 果洛龙洼金矿床;地质统计学;矿化元素;元素组合特征;找矿方向;青海省
中图分类号: P618.51;P628.1 **文献标识码:** A

0 引言

有关果洛龙洼金矿床成因及其成矿作用前人已做了多方面研究,并取得了较为可靠的认识^[1-7]。目前该矿床成因类型倾向于造山带型金矿,其成矿作用过程为:矿床所处的东昆仑造山带于华力西-印支期发生强烈的造山运动,同时诱发了中酸性岩浆活动;由动力变质作用形成的变质热液从围岩中萃取出成矿物质,并与含矿岩浆热液共同组成了成矿流体,沿断裂系统运移,在张性裂隙中形成石英脉型金矿

体,在韧性剪切部位形成蚀变岩型金矿体。

不同期次地质作用对成矿相关元素空间分布的影响,以及不同元素组合规律的研究,对地球化学找矿具有重要指示意义。近些年对金矿床的研究显示,采用地质统计学方法进行深、边部找矿预测可行^[8-11]。本文将充分利用果洛龙洼金矿床现有探、采矿工程,进行矿床三维空间系统取样测试,并运用相关分析确认各金矿化指示元素之间的关系,运用R型聚类分析探讨元素组合特征,运用因子分析优化元素组合并统计各组因子在不同空间位置的得分情况,结合矿体Au品位分布特征和地质背景进行地质解译,为矿区深、边部找矿工作提供建议。

收稿日期: 2016-04-28; 责任编辑: 王传泰

作者简介: 贾福聚(1980—),男,工程师,博士,主要从事地质学与成矿预测方面的教学及科研工作。通信地址:云南省昆明市一二一大街文昌巷68号,昆明理工大学国土资源工程学院;邮政编码:650093; E-mail:jiafujv@163.com

1 矿区地质概述

果洛龙洼金矿床地处秦祁昆晚加里东造山系—东昆仑造山带东段,区内地质构造复杂,断裂发育、岩浆活动频繁。区内出露地层为中-新元古界万保沟群($Pt_{2-3}W$),其走向为近 EW 向,是一套原岩以中基性—中酸性火山岩、砂泥质沉积岩、碳酸盐岩为主的区域浅变质岩系^[1-2]。区内断裂构造发育,以近 EW 向断裂为主,次为 NW 向、NE 向和近 SN 向断裂(图 1);EW 向断裂规模大、延伸远,与矿体关系密切,矿体受其控制或产于其中。侵入岩多分布于矿区中部及周边,以华力西期基性—中酸性侵入岩和脉岩为主,呈小岩株、岩脉状产出,多 EW 向展布,岩性主要为闪长岩,少量辉石岩;其中闪长岩与金矿化关系密切,可成为金的矿化富集体。

矿区内有 7 条矿带呈近 EW 向产出,矿体向南倾斜,倾角陡—缓变化大,一般在 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间,产状与地层近一致(图 2)。矿带出露范围东西长约 5.0 km,南北宽约 1.0 km,矿体形态简单,以脉状为主,部分呈透镜状、囊状或串珠状。矿体沿走向连续性相对较好,尖灭再现特征不是太突出;矿体沿倾向膨大收缩、尖灭再现特征比较明显,单工程揭示矿体平均金品位 $w(Au)=1.03\times 10^{-6}\sim 15.56\times 10^{-6}$ 。矿石类型根据容矿岩石不同可分为石英脉型、破碎蚀变岩型两类,以石英脉型为主,约占矿石总量的 90% 以上。矿石中金属矿物主要有银金矿、自然金、黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、方铅矿、闪锌矿、孔雀石、褐铁矿等,矿物生成顺序:自然金→黄铁矿→

黄铜矿→铜蓝→褐铁矿、孔雀石。脉石矿物主要为石英,少量白云母及方解石。

2 样品测试及数据预处理

本次测试分析的矿石样品采集自 3 960 m—3 580 m 高程,包括 6 个采矿中段及部分钻探样品,共计采样 81 件;对与金成矿密切相关的 Ag、Cu、Pb、Zn 等 11 种微量元素含量进行了测试与分析。测试数据由中国科学院贵阳地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室采用 ICP-MS 分析给出,测试数据经内检及外检(云南省地质矿产开发局测试中心),其平均误差小于 3%,可满足各项地球化学统计分析要求。

根据地质统计学原理^[12-13],全部测试数据直接参与计算,往往会得到不正确的结果。本次研究首先对原始数据作正态分布检验,若不服从标准分布,则将测试值中大于 3 倍均值加 3 倍均方差的数据删除,然后再重新计算,直至保留数据服从正态分布为止。

3 统计分析与地质解译

3.1 相关分析

相关分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度,所有样品 11 种元素相关分析结果见表 1 所述。从表 1 可知,Au 与 Ag、Pb、Cu、Mo 显著正相关,Au 与 Hg、W、As 弱正相关。伴生元素中 As 与

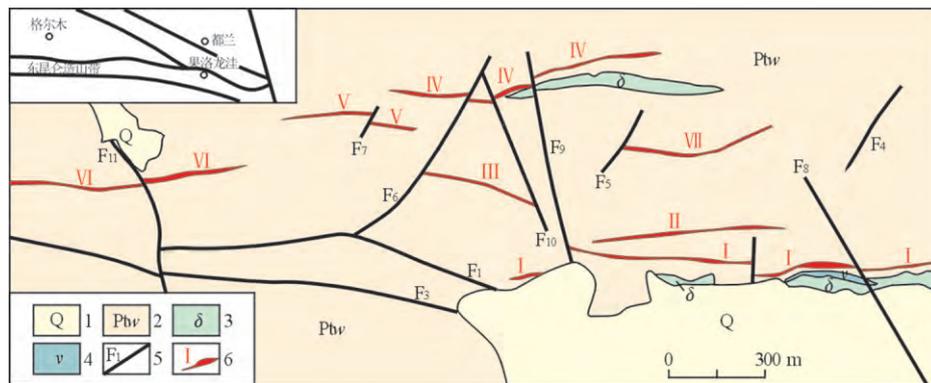


图 1 果洛龙洼矿区地质略图

Fig. 1 Geological Sketch of the Guoluolongwa Gold Deposit

1. 第四系; 2. 中-新元古界万保沟群; 3. 闪长岩; 4. 辉石岩; 5. 断层及编号; 6. 矿带及编号

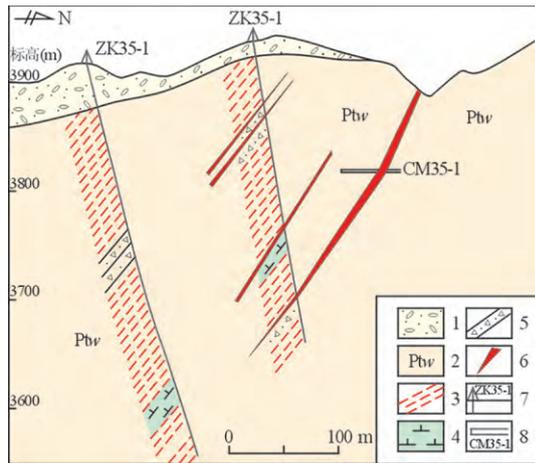


图2 果洛龙洼矿区I矿带35线剖面图

Fig.2 Cross section along line 35 at ore belt I of Guoluolongwa gold deposit

1. 第四系残坡积物; 2. 中-新元古界万保沟群;
3. 绢云母千糜岩; 4. 华力西期闪长岩;
5. 断层破碎带; 6. 矿体; 7. 钻孔及编号; 8. 巷道及编号

Hg、Pb与Ag显著强正相关,Pb与Cu、Cu与Ag、W与Mo为正相关,Ni、Co与V元素呈弱正相关。

3.2 聚类分析

聚类分析是根据样本自身的属性,用数学方法按照某些相似性指标,定量地确定样本之间的亲疏关系,并按这种亲疏关系对样本进行聚类^[14-15]。

通过对11种元素进行R型聚类分析,生成的聚类分析谱系图如图3所示。从图3可知,以距离系数15为界,全部元素聚类结果总计可划归为四大类,即Au-Cu-Pb-Ag、W-Mo、As-Hg、Ni-Co-V元素组合,其中Au-Cu-Pb-Ag组合与W-Mo组合相关性最好,与As-Hg组合次之,与Ni-Co-V组合相关性最差。

3.3 因子分析

因子分析是以各种变量原始数据的相关关系为基础,通过数学方法将许多彼此间具有错综复杂关系的现象归结为几个因子,以较少的几个因子反映原资料的大部分信息。因子分析能归纳和提炼元素组合,并可以通过元素组合特征推算、解释成矿过程和成矿元素的迁移、富集变化,划分成矿阶段,确定成矿物质来源。

本次研究对81件样品测试数据(服从正态分布的数据)运用SPSS软件作因子分析,以累计方差贡献80.430%为界,可得四个因子(表2)。根据各元素在4个因子中的载荷不同,可以判断该元素的因子归属,如Au载荷F1为0.524、F2为0.212、F3为0.103、F4为-0.059,F1载荷最大,因此Au属于第一因子F1,而Hg属于第三因子F3。由正交因子旋转后得到因子载荷图(图4),同样可以看出,各元素剩余异常按四个不同的主要因子分离聚集明显。第一因子F1由Au、Cu、Ag、Pb四个元素组成,方差贡献率为26.296%;第二因子F2由W和Mo两种元素组成,方差贡献率为23.229%;第三因子F3由Hg和As两种元素组成,方差贡献率为17.890%;第四因子F4由Ni、Co和V三种元素组成,方差贡献率为13.015%。F1、F2、F3和F4这四个因子的累计方差贡献率大于80%,说明信息提取良好。

3.4 地质解译

F1因子的Au、Cu、Ag、Pb这四种元素在聚类分析中亦被归为一类,相关分析中Au与Cu、Ag和Pb呈显著的正相关,说明F1为主成矿阶段元素组合。Pb、Cu在中温热液阶段易于与S结合,Ag易于在方铅矿中富集,说明中温多金属硫化物成矿作用

表1 矿石微量元素相关系数表

Table 1 Correlation coefficients of trace elements in ore

	Au	Hg	V	Mo	Ni	Cu	As	Co	Ag	W	Pb
Au	1										
Hg	0.196	1									
V	-0.294	-0.243	1								
Mo	0.311	0.196	-0.742	1							
Ni	-0.051	0.008	0.415	-0.213	1						
Cu	0.322	0.225	-0.336	0.405	0.011	1					
As	0.125	0.953	-0.175	0.084	-0.018	0.126	1				
Co	-0.097	-0.099	0.241	-0.111	0.403	-0.116	-0.077	1			
Ag	0.466	0.19	-0.261	0.258	0.002	0.694	0.117	-0.084	1		
W	0.159	0.095	-0.735	0.782	-0.37	0.251	0.032	-0.164	0.081	1	
Pb	0.34	0.278	-0.255	0.231	0.063	0.743	0.182	-0.061	0.919	0.107	1

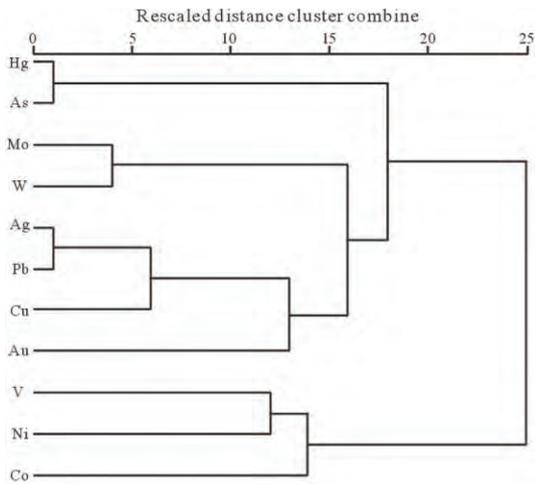


图 3 样品 R 型聚类分析谱系图

Fig. 3 R type cluster analysis pedigree chart

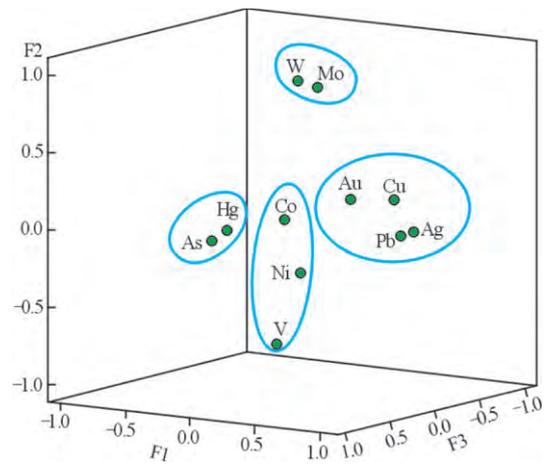


图 4 元素正交因子旋转后因子载荷图

Fig. 4 Factor loading map after Orthogonal rotation of the factor

表 2 R 型因子分析正交旋转因子载荷表

Table 2 Orthogonal rotation factor load of R type factor analysis

	F1	F2	F3	F4
Au	0.524	0.212	0.103	-0.059
Hg	0.168	0.102	0.97	-0.012
V	-0.218	-0.833	-0.136	0.251
Mo	0.239	0.897	0.056	0.002
Ni	0.09	-0.325	0.038	0.765
Cu	0.824	0.226	0.057	0.008
As	0.070	0.027	0.985	-0.031
Co	-0.110	-0.008	-0.068	0.870
Ag	0.951	0.034	0.034	-0.031
W	0.045	0.917	-0.011	-0.139
Pb	0.935	0.029	0.115	0.024
方差贡献/%	26.296	23.229	17.89	13.015
累计方差贡献/%	26.296	49.525	67.415	80.430

对矿床 Au 的富集和成矿至关重要,结合矿区地质情况,推测矿床的形成与华力西-印支期动力变质作用形成的变质热液,或与之伴随的花岗闪长岩岩浆热液活动有关。

F2 因子的 W 和 Mo 元素相关系数呈显著正相关,在聚类分析中也被归为一类,这两元素为典型的高温热液共生元素组合,推测与矿区华力西-印支期花岗闪长岩体侵位有关。相关分析结果显示 Mo 元素与 Au 呈显著正相关关系,由表 2 可知 Au 元素在 F2 因子上有一定载荷,反映了花岗闪长岩热液对 Au 成矿具有很大贡献。

F3 因子由 Hg 和 As 两种元素组成,两元素地球化学活动性较强,为低温热液阶段矿物组合,由表 2 可知 Au 元素在 F3 因子上有少量载荷,F3 也可作

为矿区 Au 的找矿指示因子。

F4 因子由 Ni、Co 和 V 三种元素组成,属基性元素组合,推测与矿区地层中的基性火山成分有关,属中-新元古代海底火山喷流作用的产物。相关分析中 Ni、Co 和 V 这 3 种元素与其它元素大多呈负相关关系,由表 2 可知 Ni、Co 和 V 三元素在其它因子上载荷多为负值,说明在后期地球化学分异及 Au 的矿化富集过程中,其它因子与 F4 具有不同的地球化学演化过程。

4 金品位与因子得分空间分布关系

由果洛龙洼金矿各探矿工程化验得到的矿体 Au 品位数据,在水平面上作 Au 品位等值线,可以沿矿体走向自西往东划分为 5 个高值区(H₁、H₂、H₃、H₄、H₅)和对应的 5 个低值区(L₁、L₂、L₃、L₄、L₅),如图 5 所示。通过因子载荷矩阵计算因子得分系数,根据因子得分系数和原始变量的标准化计算每个样本的因子得分,即可统计不同区段各因子得分之和,见表 3 所述。由表 3、图 6 可知,自西往东沿矿体走向,矿体 Au 品位在 $w(Au)=4 \times 10^{-6}$ 附近呈波状起伏变化,验证了高值-低值交互出现的块段划分方案。

F1 因子总体趋势在 H₃ 区间达到较大值(H₁除外),H₃ 区间往东西两侧呈递减趋势,说明 H₃ 处是一个 Au、Ag、Cu、Pb 多金属矿化富集中心。H₃ 以西各个块段 F1 因子得分增减情况与矿体 Au 品位增减变化特征一致,H₃ 以东各区段则没有该规律。因此,H₃ 以西可以运用 Au、Ag、Cu、Pb 多金属

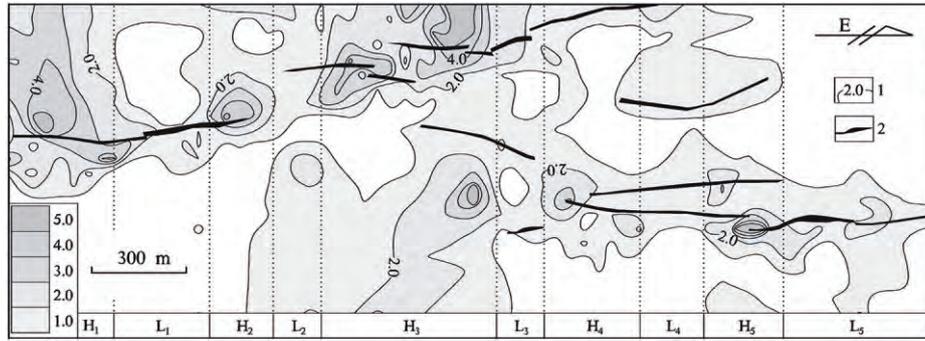


图5 Au矿化等值线及块段划分图

Fig. 5 Au mineralization contour and block division

1. Au品位等值线; 2. 矿体露头

表3 矿体分段 Au 平均品位及因子得分表

Table 3 Au average grades and factor scores of each block

	H ₁	L ₁	H ₂	L ₂	H ₃	L ₃	H ₄	L ₄	H ₅	L ₅
矿体 Au 平均品位/ 10^{-6}	4.872	3.301	4.377	2.831	4.464	3.563	3.953	2.776	6.330	5.263
件数	72	46	20	20	245	60	55	21	109	55
F1 (Au-Ag-Cu-Pb)得分	3.951	-1.715	-0.258	-0.265	2.516	0.157	-2.208	0.350	-1.357	-1.170
F2 (W-Mo)得分	-5.810	1.312	-1.972	-1.502	8.899	-0.329	-1.753	2.892	-1.538	-0.200
F3 (As-Hg)得分	-3.481	-1.365	-0.558	0.064	7.125	0.299	1.117	-1.662	-1.190	-0.350
F4 (Ni-Co-V)得分	-2.832	12.395	-0.333	1.313	-6.071	0.472	-6.175	-0.984	3.313	-1.098
件数	15	7	2	2	18	4	17	6	6	4

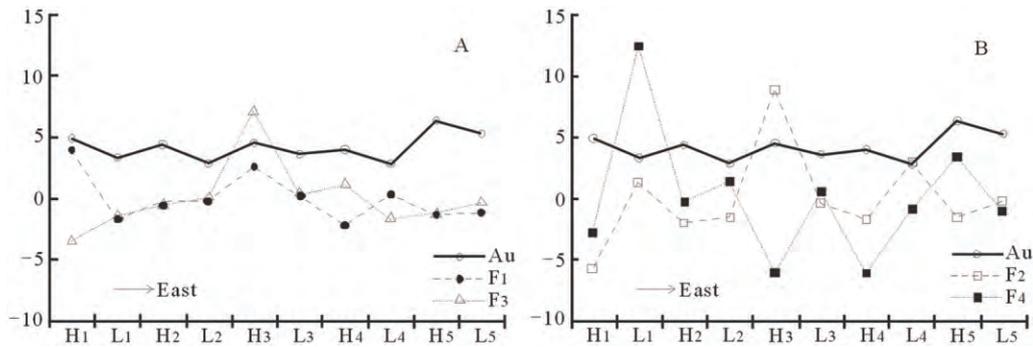


图6 沿西至东各块段矿体 Au 平均品位与因子得分变化关系图

Fig. 6 Variation curves between Au average grade and factor scores in each block from West to East

Au. 矿体 Au 平均品位/ 10^{-6} ; F1. 区间内 F1(Au-Ag-Cu-Pb)因子得分之和;

F2. 区间内 F2(W-Mo)因子得分之和;

F3. 区间内 F3(As-Hg)因子得分之和; F4. 区间内 F4(Ni-Co-V)因子得分之和

综合异常特征圈定 Au 的找矿靶区。

F3 因子总体趋势在 H₃ 区间达到最大值,往东西两侧呈递减趋势,且其不同区段的增减情况与矿体 Au 品位近乎一致,说明 As、Hg 两元素综合异常可作为找 Au 依据。

F2 因子与 F1 和 F3 类似,在 H₃ 区间具有最大值,说明 H₃ 处矿床受花岗闪长岩体高温热液影响

强烈。但 F2 因子得分在其它区间的增减情况大多与矿体 Au 品位变化相反,说明高温岩浆热液为 Au 成矿提供了热动力驱动, F2 因子的高温热液元素为 W 和 Mo; 其与 F1 和 F3 的中-低温热液元素 Au、Ag、Cu、Pb、As 和 Hg, 在成矿过程中发生了分异, 可形成了各自的富集空间。

在 H₁—L₄ 这 8 个区段, F4 的因子得分变化情

况都与 Au 的品位变化呈负相关关系,印证了相关分析中 Au 元素与 Ni、Co、V 的负相关关系;果洛龙洼金矿区基性组分 Ni、Co、V 相对富集的区域,矿体金品位不高。

5 结论

(1) Au、Cu、Ag 和 Pb 元素组合为主成矿阶段元素组合,富硫的中温热液是矿床形成的关键因素,推测与华力西-印支期动力变质作用及与之伴随的花岗闪长岩侵位有关;W 和 Mo 代表华力西-印支期花岗闪长岩体侵位形成的高温元素组合,该组合与 Au 相关性好,反映了矿区花岗闪长岩热液对 Au 成矿具有较大贡献,花岗闪长岩体及接触带具有重要找矿价值;Au 在低温热液元素 As 和 Hg 组合因子上有一定载荷,因此该组合可作为矿区 Au 的找矿指示因子。Ni、Co 和 V 为典型的深源物质代表元素,与地层中的基性火山成分有关,其地球化学分异特征显著,构成独立的因子而与其它元素组合相区别。

(2) 沿西至东矿体走向方向,在 H₃ 部位,与 Au 相关性较好的各元素均表现为强烈的正异常特征,因此推测该部位为多种成矿因素复合叠加的中心,在该区矿体南北旁侧应加强地质勘探工作,将有望找到与主矿体平行的金矿体。

(3) 在矿区西部各块段,Au、Ag、Cu、Pb 元素组合增减特征与 Au 品位变化规律一致,因此矿区西部可以运用这四种元素综合异常圈定 Au 的找矿靶区。As 和 Hg 元素组合因子得分情况,在自西往东不同区段的增减规律与矿体 Au 品位变化规律近乎

一致,两元素综合异常可作为找 Au 依据。

参考文献:

- [1] 文雪峰,王怀超. 青海省都兰县果洛龙洼金矿床地质特征及成因探讨[J]. 黄金科学技术, 2006, 14(5): 27-29.
- [2] 杨宝荣,杨小斌. 青海都兰果洛龙洼金矿床地质特征及控矿因素浅析[J]. 黄金科学技术, 2007, 15(1): 26-30.
- [3] 胡荣国,赖健清,张绍宁,等. 青海省都兰县果洛龙洼金矿床地质地球化学特征[J]. 地质与勘探, 2010, 46(5): 931-941.
- [4] 邹定喜,杨小斌,芦文泉. 青海果洛龙洼金矿床同位素特征及成因[J]. 黄金科学技术, 2011, 19(2): 26-30.
- [5] 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.
- [6] 岳维好,高建国,周家喜. 青海果洛龙洼金矿基性岩脉锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2013, 33(3): 93-102.
- [7] 刘心开,高建国,周家喜. 青海东昆仑果洛龙洼金矿床东区 I 矿体群稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 2013, 42(2): 131-142.
- [8] 郭涛,邓军,吕古贤,等. 焦家金矿化元素因子分析[J]. 地质找矿论丛, 2008, 22(2): 106-112.
- [9] 贾三石,王恩德,付建飞,等. 辽西排山楼金矿床微量元素地球化学特征及深部找矿预测研究[J]. 地球化学, 2011, 40(3): 266-279.
- [10] 康亚龙,刘继顺,曹勇华. 青海同仁德合龙洼铜金矿床成矿预测[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(3): 378-386.
- [11] 张素荣,赵更新,杨俊泉,等. 基于地球化学组合求异的津巴布韦奇马尼马尼地区成矿预测[J]. 地质找矿论丛, 2015 (S1): 172-180.
- [12] 於崇文. 数学地质的方法与应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 1980.
- [13] 赵鹏大,胡旺亮,李紫金. 矿床统计预测[M]. 北京:地质出版社, 1993.
- [14] 胡以铿. 地球化学中的多元分析[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1991.
- [15] 阳正熙. 地学数据分析教程[M]. 北京:科学出版社, 2008.

Characteristics of ore elements association and the prospecting significance in Guoluolongwa gold deposit, Qinghai province

JIA Fujun¹, GAO Jianguo¹, ZHOU Jiayi², GUO Yuejin³

(1. Department of Earth Sciences, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

3. Yunnan Hualian Mine Exploration Company, Yunnan, Qujing 655000, China)

Abstract: Guoluolongwa gold deposit is located at Gouli area in Eastern Kunlun orogenic belt, Qinghai province and is characterized by symbiosis of multi-elements. The associated elements are not only valuable for comprehensive utilization but also the important prospecting indicators. 81 samples were collected and 11 elements (Au, Hg, V, Mo, Ni, Cu, As, Co, Ag, W and Pb) were analyzed. The correlation analysis, cluster analysis and factor analysis were carried out on the results. The sampling area is divided into blocks. Factor scores of each block are comparatively studied with Au grade distribution of ore bodies and relation between the elements are interpreted based on the local geology. Au is strongly correlated with Ag, Pb, Cu, Mo, and weakly with Hg, W, As. Among the elements As and Hg, Pb and Ag is strongly correlated, Pb and Cu, Cu and Ag, W and Mo positively correlated, Ni, Co weakly with V. Factor analysis results show that 11 elements can be divided into four associations, Au-Cu-Ag-Pb(F1), W-Mo (F2), Hg-As (F3) and Ni-Co-V(F4). Factor F1 is a association of mesothermal metal sulfides representing the main mineralization stage. variation of the factor score in the western of the mining area is consistent with the change of the Au grade of the ore body thus the association Au-Cu-Ag-Pb anomaly in the western region of the mining area could be indicator for Au prospecting of the region. F2 represents high temperature magmatic hydrothermal metal element association with a few factor loads of Au indicating that Variscan-Indosinian granitic diorite is of significance to the ore-forming process. F3 represents low temperature metal association with the factor score range in consistent with the change of the Au grade of the ore body in the mining area and As-Hg association anomaly can be used to ore prediction. F4 group represents mafic volcanic rocks in the strata and its element association differs from other element association in geochemical evolution. Factor score statistics shows that the central region of the mining area is the enrichment center of multi elements correlated with Au and multiple metallogenic factors overprinted here thus the exploration work should be strengthened.

Key Words: guoluolongwa gold deposit geological statistics; ore element; characteristics of element association; prospecting direction; Qinghai province