

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.04.007

甘肃省寨上金矿床原生地球化学晕特征及其地质意义

郝迪,孙彪,孟菲蓉

(中国地质调查局西安矿产资源调查中心,陕西 西安 710100)

摘要:运用数学地质、地球化学等理论与方法,对甘肃寨上超大型、类卡林型金矿床元素分布和原生晕特征等进行研究后认为:南、北矿带 Au、As、Sb 元素异常与成矿关系密切,组合异常可作为寨上金矿床的直接找矿标志;以 As、Sb 为前缘晕指示元素,Au、Ag、Pb、Zn 为近矿晕指示元素,W、Mo 为尾晕指示元素,各勘探线分带特征显示,矿脉中存在 2 期成矿作用形成的矿体 A 和矿体 B,在轴向上存在复杂的叠加和分离形态,走向上也存在尖灭再现。建立北矿带 10 号脉、南矿带 32 号脉的原生叠加晕理想模型:10 号矿脉在 2 650~2 350 m 中段 A 矿体尾部与 B 矿体头部或中部叠加,矿体在 2 350 m 以下仍有较大延伸;32 号脉在 2 650~2 300 m 中段 A 矿体与 B 矿体中部及尾部叠加,2 300 m 中段接近矿体底部。根据原生叠加晕找矿预测“前尾共存”及“参数反转”准则,圈定 3 个找矿靶区。

关键词:数学地质分析;原生叠加晕理想找矿模型;原生晕找矿准则;寨上金矿;甘肃

中图分类号:P618.51;P632

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)04-0088-12

The Primary Halo Research of Zhaishang Gold Deposit in Gansu Province

HAO Di, SUN Biao, MENG Feirong

(Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: On the basis of geo-mathematic method and geochemical theories, this paper studied the elements distribution and the primary halo of the Zhaishang ultra-large carlin-like type gold deposit. It was held that the anomalies of Au, As, Sb were related to ore-forming process of gold and could be direct prospecting criteria for gold deposit. The front halo elements were Sb, As; the near-ore halo elements were Au, Ag, Pb, Zn; the rear halo elements were W, Mo. Two ore bodies of the ore veins in stage II mineralization superposed in different exploration lines and altitudes. The ideal model of the primary superimposed halo of the northern No. 10 ore vein and the southern No. 32 ore vein was built. In the No. 10 ore vein from the 2 650 m down to the 2 350 m, the tail of ore body A was superposed upon the top of ore body B, even extending deep down in 2 350 m. In the middle of No. 32 ore vein from the 2 650 m down to the 2 300 m, ore body A and B were superposed in the middle and the tail, extending to the bottom of the ore body in 2 350 m. Three prospecting target areas were delineated depending on the primary halo prospecting principles.

收稿日期:2020-07-10;**修回日期:**2021-01-13

基金项目:中国地质调查局“甘肃寨上金矿岩金普查”项目(DD20191018)。

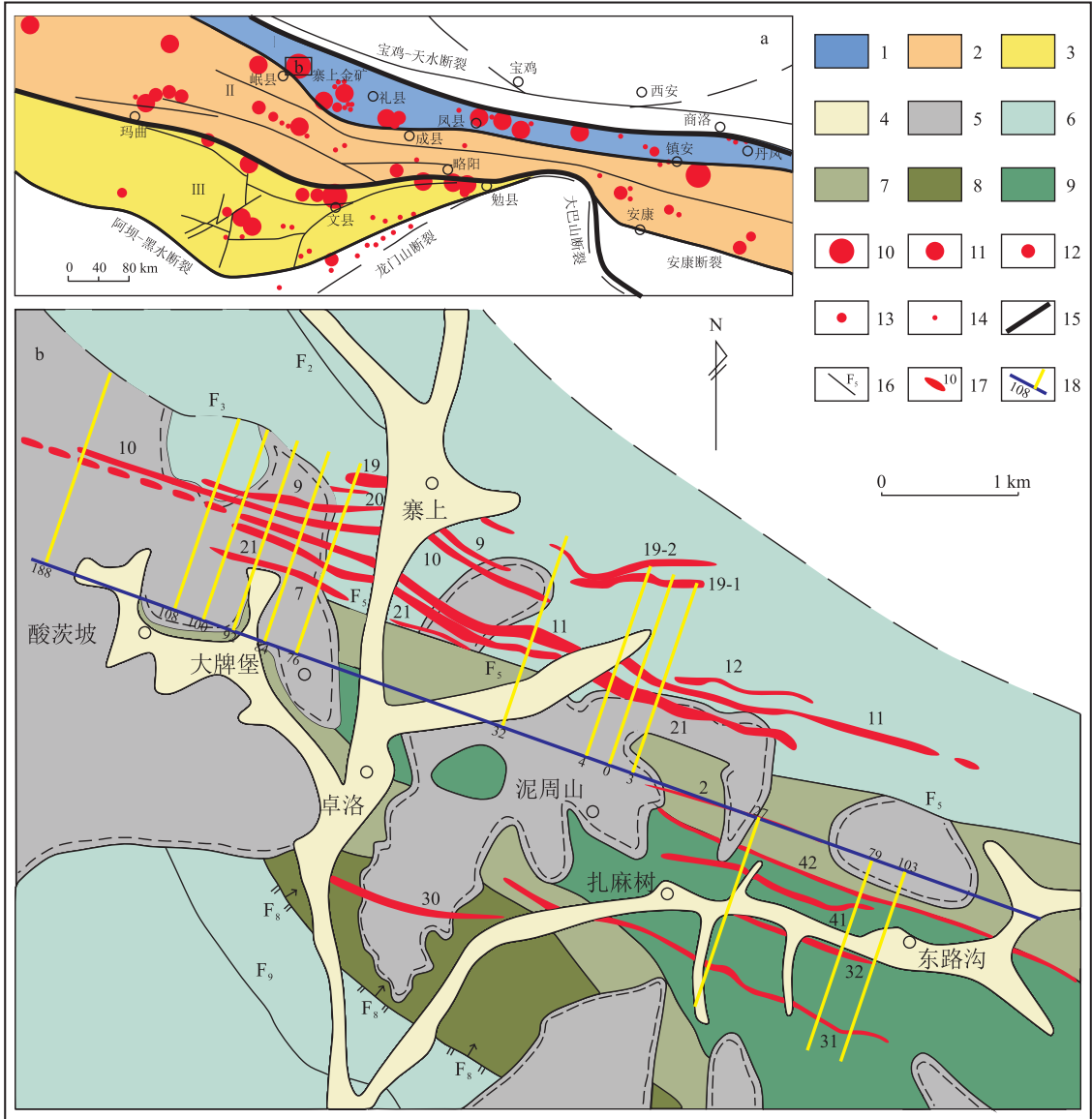
作者简介:郝迪(1989-),男,硕士研究生,助理工程师,地质工程专业,主要从事矿床学及矿床地球化学研究。E-mail: hd56998@aliyun.com。

Keywords: geo-mathematic analysis; ideal zoning model of primary halo; primary halo prospecting principle; Zhaishang gold deposit; Gansu province

攻深找盲是近年来国内金矿山增加储量、扩大规模的主要研究方向和工作手段(代西武等,2000)。随着矿床原生地球化学晕分带特征研究不断深入,野外一线地质工作者和部分院校研究人员共同梳理总结出许多具有普适性的分带规律和指示意义,在

地球化学异常体的剥蚀程度判别以及矿区深部找矿预测等方面得到推广应用(邢利琦等,2011)。

寨上金矿位于甘肃岷县禾驼乡,属西秦岭岷(县)-礼(县)金矿带(图 1a),是原武警黄金部队在该地区发现的一个类卡林型金矿床,具有明显的多



1. 北成矿亚带;2. 中成矿亚带;3. 南成矿亚带;4. 第四系;5. 新近系块状砾岩;6. 下二叠统十里墩组含碳质板岩;7. 中泥盆统黄家沟组含石英砂岩粉砂质板岩;8. 上泥盆统大草滩组粉砂质板岩;9. 中泥盆统安家岔组灰岩、灰质板岩;10. >100 t 的金矿;11. 20~100 t 的金矿;12. 5~20 t 的金矿;13. 1~5 t 的金矿;14. <1 t 的金矿;15. 板块缝合带主断裂;16. 断层及编号;17. 矿体及编号;18. 基线及勘探线 a. 西秦岭部分金矿床分布图(据刘家军等,2010a 修改);b. 寨上金矿地质简图

图 1 西秦岭部分金矿床分布图和寨上金矿地质简图

Fig. 1 Distribution of main gold deposits of western Qinling mountains and simplified geologic map of Zhaishang gold deposit

期次、多阶段叠加成矿的特征。前人对北矿带元素剖面浓度分带特征进行了总结,而对元素组合异常特征研究、南北矿带原生晕特征对比研究以及相关找矿预测工作较少。笔者根据金矿原生叠加晕理论和观点,对寨上矿区大量钻探样品进行地球化学分析测试,开展数学地质分析,系统研究其原生晕分带特征(刘冲昊等,2012),探讨原生晕叠加对成矿多阶段多期次的响应,分别提出了北矿带 10 号矿脉和南矿带 32 号矿脉原生晕叠加理想模型,据此预测深部找矿远景。

1 寨上金矿地质概况

西秦岭地区通常以深大断裂为界划分出北、中、南 3 个成矿带(陈国忠等,2017)。寨上金矿位于西秦岭成矿带中部,属于西成-凤太-镇旬拉张裂陷盆地沉积环境,具体位于岷-礼多金属成矿带西部,成矿带走向总体呈北-西西向,东部向南凸呈弧形。西秦岭造山带北亚带南北两侧分别以岷县-宕昌断裂、漳县-武山断裂与南亚带及北秦岭造山带相隔,上述 2 个超壳断裂之间的次级断裂礼县-罗坝-锁龙口断裂和礼县-洮坪断裂是矿区最重要的控矿断裂构造。区域上地层以泥盆系、二叠系为主,石炭系零星出露,且受构造运动影响多浅变质为板岩、片岩类。泥盆系广泛分布,是岷礼成矿带金矿床主要的赋矿围岩,亦可能为金矿源层。

寨上金矿矿脉受卓洛-国营牛场倒转背斜及后期脆韧性断裂控制(图 1b)。矿区范围内背斜两翼地层均向北倾,倾角为 $45^{\circ}\sim 70^{\circ}$,南翼倾角普遍较北翼大,部分地段地表可见 $80^{\circ}\sim 88^{\circ}$ 陡立。经过近 20 年勘查工作,寨上金矿累计发现金矿体超过 30 个,按照空间分布特征与背斜的关系以及工作习惯,划属南、北 2 个矿带,均近北西西走向展布,整个矿带边界尚未越过主构造带边界,矿脉常产出于其间的破碎带中,矿体呈层状、似层状,深部见透镜状,主要根据化学分析结果对边界进行限定(刘家军等,2010a)。矿区勘探线走向为 5° ,间距 100 m,0 线位于纳纳牧场以东,向东为单数 3,7,11 线...,向西为双数 4,8,16 线...。目前,矿区探矿基本上以 200 m 为间距布置工程控制已知矿脉,第一排孔设计在地表矿化比较好的矿脉上盘。

北矿带南北宽约为 1 km,东西两侧延伸超过 7 km,矿脉赋存于下二叠统十里墩组,主要岩性为砂质板岩、含碳板岩、钙质板岩及粉砂岩。该带累计发现矿脉约 20 条,北倾 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 近平行展布,地表和深部均有工程控制的矿体有 7、9、10、11、12、19、21 号等。其中,10 号脉位于 9 号脉南侧(32~188 线),地表由 5 个工程以 50~550 m 间距控制,深部以 38 个钻孔以 $(100\sim 400)\text{ m}\times(40\sim 480)\text{ m}$ 网度控制,30 个工程见矿,长为 3 300 m,厚为 8~30 m,产状为 $350^{\circ}\angle 47^{\circ}\sim 61^{\circ}$;Au 品位在 $0.80\times 10^{-6}\sim 6.79\times 10^{-6}$ 。

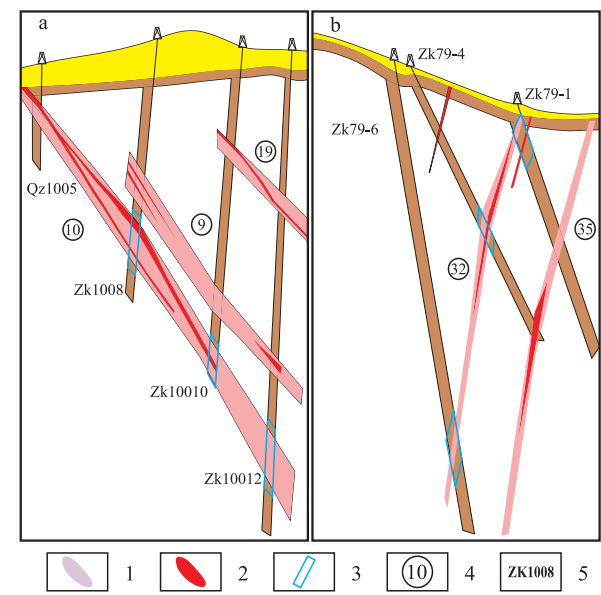
南矿带总体走向为 $280^{\circ}\sim 290^{\circ}$,沿走向延伸超过 4 km,南北控制宽度超过 1 km,由 6 条近平行分布的主要矿脉组成,围岩以中泥盆统安家岔组灰岩、灰质板岩、粉砂质板岩为主,按网度地表地下均有控制的有 31、32、41、42 号等矿体。其中,32 号矿脉位于南矿带(27~103 线),浅部由 5 个探槽和 2 个浅钻以 90~300 m 间距控制,深部由 16 个钻孔以 $(200\sim 400)\text{ m}\times(90\sim 407)\text{ m}$ 网度控制,长为 1 400 m,厚为 1.2~7.0 m,产状为 $200^{\circ}\sim 230^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 90^{\circ}$;Au 品位一般为 $1.0\times 10^{-6}\sim 3.0\times 10^{-6}$ 。

2 样品采集及测试

寨上矿区坑道工程施工难度大,矿脉主要由地表的槽探、剥土以及深部的钻孔进行控制。分别选取南矿带 32 号脉 79 号勘探线、北矿带 10 号矿脉 108~76 勘探线加密控制段进行元素分布、原生晕特征研究及对比。10 号脉 108~76 勘探线、32 号脉 79 勘探线钻孔控制程度高,有 3 排及以上钻孔控制(84 勘探线由 2 个钻孔控制),在这些钻孔岩心中进行多元素取样分析,根据控制标高近似划分 2 650 m、2 500 m、2 350 m 三个中段,具体采样钻孔及位置见表 1、图 2。采样方法:在钻孔对矿脉的控制范围,每 5 m 多点组合采样,单个样品重量小于 300 g。测试由中国地质调查局西安矿产资源调查中心实验室完成,Au 由原子吸收光谱法(AAS)测定,Ag 使用发射光谱法(ES)测定,As、Sb、Bi 采用原子荧光光谱法(AFS)测定,Cu、Pb、Zn、W、Mo 采用等离子质谱法(ICP-MS)测定。

表 1 采样钻孔及中段划分表
Tab. 1 The sampling drills and middles

划分中段	勘 探 线 剖 面											
	108		100		92		84		76		79	
1	ZK1084	2 610 m	ZK1008	2 660 m	ZK922	2 680 m	—	—	ZK766	2 680 m	ZK79-1	2 650 m
2	ZK1086	2 480 m	ZK10010	2 510 m	ZK926	2 550 m	ZK848	2 480 m	ZK768	2 520 m	ZK79-4	2 550 m
3	ZK10808	2 360 m	ZK10012	2 400 m	ZK9208	2 300 m	ZK8410	2 350 m	ZK7610	2 370 m	ZK79-6	2 350 m



1. 矿脉;2. 矿体;3. 采样位置;4. 矿脉编号;5. 钻孔编号
a. 北矿带 100 线采样位置示意;b. 南矿带 79 线采样位置示意

图 2 勘探线剖面及采样位置示意图

Fig. 2 Sketch map of exploration line profile

3 元素特征值分析

指示元素是找矿线索的关键指示化学元素。大量研究表明,相同成因类型的矿床常常受地质背景不尽相同的影响,指示元素也显示出一定的差异性(闫汝珍等,1989)。元素特征值分析及指示元素选择是原生晕特征研究的基础,只有选择恰当的指示元素以及背景值,才能准确分析元素的分带特征,进而进行找矿预测。

微量元素在不同区域、不同岩石类型中背景值的选取是异常解译及评价的基础(陈化奇,2008)。笔者收集寨上矿区 2008~2013 年施工的 44 个未见矿钻孔(其中北矿带 32 个,南矿带 12 个)多元素分析样品测试结果 2 744 组,剔除掉 Au 含量高于 300×10^{-6} 的数据 69 组进行元素背景值计算。为确保样品数据符合正态分布,对分析结果中极大值、极小值等离群点进行迭代处理至完全剔除(章永梅等,2010),剩余样品含量的平均值即背景值。将前人寨上矿区微量元素含量的数据与笔者计算结果进行对比(表 2)。

表 2 矿区及区域微量元素背景值
Tab. 2 Elements background values of the region and mining area

元素	Au	Ag	As	Sb	Bi	Cu	Pb	Zn	W	Mo	样数
水系沉积物 ¹	2.30	0.12	16.00	4.10	0.70	27.10	32.60	102.00	2.30	0.40	—
区域地层 ²	1.62	—	35.2	0.75	—	34	44	132	—	—	479
矿区地层 ³	6.84	—	16.41	43.89	1.17	62.6	223	59	—	—	13
岩浆岩	41.28	0.25	40.05	5.74	0.42	18.08	17.20	42.08	16.20	0.83	4
北矿带围岩	1.64	0.09	20.06	4.60	0.32	18.72	25.32	61.70	10.05	0.90	1 834
北矿带矿脉	120.88	0.35	125.49	17.85	0.31	16.80	141.33	201.48	13.97	0.97	152
南矿带围岩	1.88	0.07	8.86	7.29	0.35	23.87	15.63	77.79	9.35	0.50	842
南矿带矿脉	77.61	0.18	95.75	13.83	0.33	22.76	24.48	67.80	9.73	0.93	36
矿区综合	1.71	0.08	16.01	5.56	0.33	20.57	22.66	67.42	9.98	0.81	2 744

注: Au 含量为 10^{-9} , 其他元素含量为 10^{-6} ; 1. 1:20 万岷县幅水系沉积物测量; 2. 刘继顺, 2001; 3. 陈勇敢, 2004。

对比南、北矿带矿脉与围岩含量值发现,As 在矿脉中高度富集,说明 As 元素与寨上矿区金矿化过程密切相关。Sb 元素含量南矿带围岩中高于北矿带,矿脉中略低于北矿带,并且高于区域内 Sb 含量,Sb 在北矿带矿脉中可形成更强的异常。寨上金矿床发育辉锑矿物,南矿带地表可见辉锑矿氧化成锑华。Bi 含量平均值南、北矿带差异很小,含量稳定。Cu、Pb、Zn 等元素围岩含量远低于水系沉积物测量结果,与热液成矿期这些元素在矿脉中沉淀富集有关。南矿带 Cu、Zn 元素含量的降低可能与矿石绢云母化及剥蚀造成的 Cu、Zn 元素带出有关(李惠,2010),石英-方解石脉中大量的黄铜矿、黝铜矿受表生氧化作用形成的蓝铜矿、孔雀石等遭到剥蚀。Mo、W 元素同样在矿脉中发生富集,Mo 元素南矿带比北矿带矿脉中富集度高,Mo 元素以类质同象代换的方式进入钨矿物。

表 3 元素离散程度表
Tab. 3 Measures of dispersion of elements

元素	Au	Ag	As	Sb	Bi	Cu	Pb	Zn	W	Mo
均值	112.59	0.32	119.79	17.08	0.32	17.94	118.96	175.88	13.16	0.97
标准差	127.42	0.52	140.34	28.92	0.1	6.52	230.16	582.64	9.68	0.39
衬值	65.84	3.95	7.48	3.07	0.96	0.87	5.25	2.61	1.32	1.19
变异系数	113.17	165.95	117.15	169.32	31.1	36.31	193.48	331.27	73.58	40.34

注:变异系数 $C \cdot V = (\text{标准偏差 SD} / \text{平均值 Mean}) \times 100\%$ 。

4 数学地质分析

为研究在空间上既有随机性也存在结构性的地质现象,笔者选取了数学地质最常用的多元统计方法和参数(侯景儒等,1982)。因子分析是通过研究数据组间的相关性,以期获取隐藏在海量分析数据中的共生关系甚至成因联系(姚玉增等,2005;张玉恒等,2012)。R 型因子分析常用于挖掘化探数据中变量之间的关系,除了总结元素间的组合关系,可进一步用于探索分析不同元素携带的地球化学信息与成矿事件的关联(董庆吉等,2008;刘晓玲等,2010;刘冲昊等,2012)。笔者使用 SPSS 软件进行因子分析,提取特征值大于 1 的主因子($\lambda_{F4} = 0.991$),得到 2 条矿脉元素相关系数(表 4、表 5)、样品数据解释总方差(表 6、表 7)及极大方差旋转正交因子解(表 8)。

诸方法求得背景值只能作为大致水平参考,不能完全机械的采用这些数值,是否合乎客观实际情况、能否解决找矿地质问题才是检验背景值合理性的唯一标准(闫汝珍等,1989)。分析认为计算值基本反映了寨上金矿床的地质实际,可靠性较高。进一步对矿区各元素的离散程度进行计算(表 3)。以衬度值(矿脉/围岩)大于 1 为标准,矿脉(体)元素异常组合为: Au、Ag、As、Sb、Pb、Zn、Mo、W。数值分析中,变异系数常用于对比总体均值不等的数据组离散程度,离散系数较大的其分布情况差异也大(王文森,2007)。由表 3 可知, Au、Ag、As、Sb、Pb、Zn 等离散程度很高, W、Mo 离散程度不大,而 Cu、Bi 的变异系数小于 40%,在矿脉不同部位的含量差异小。结合上述 Cu、Bi 在围岩与矿脉中的含量差异也较小,可能元素分带特征不明显,故选取剩余 8 种元素作为指示元素进一步研究。

表 4 10 号矿脉元素相关系数表
Tab. 4 Correlation coefficients of metal elements of 10th ore vein

项目	Au	Ag	As	Sb	Pb	Zn	W	Mo
Au	1.00							
Ag	0.34	1.00						
As	0.69	0.46	1.00					
Sb	0.28	0.56	0.31	1.00				
Pb	0.26	0.87	0.43	0.54	1.00			
Zn	0.12	0.42	0.29	0.23	0.49	1.00		
W	0.07	0.03	0.19	0.08	0.09	0.12	1.00	
Mo	0.07	0.00	-0.03	-0.02	0.05	0.14	-0.01	1.00

10 号脉、32 号脉的样品数分别为 152 件和 36 件,选取置信度 $\rho = 5\%$,查阅相关系数临界值表获取 2 条矿脉的临界相关系数 α 分别为 0.19 和 0.32(章永梅等,2010)。10 号矿脉中与 Au 呈正相关($r \geq 0.19$)的元素有 Ag、As、Sb、Pb;32 号矿脉中与

Au 呈正相关($r \geq 0.32$)的元素有 Ag、As、Sb、Mo;其中 Ag、As、Sb 三种元素在 2 条矿脉中均与 Au 呈正相关,这些元素的组合异常可以在很大程度上反映金矿化,而 As 在 2 条矿脉中均与 Au 呈强正相关,与金矿化关系最密切。

表 5 32 号矿脉元素相关系数表

Tab. 5 Correlation coefficients of metal elements of 32nd ore vein

项目	Au	Ag	As	Sb	Pb	Zn	W	Mo
Au	1.00							
Ag	0.39	1.00						
As	0.84	0.44	1.00					
Sb	0.47	0.66	0.50	1.00				
Pb	-0.01	0.48	0.01	0.22	1.00			
Zn	-0.28	0.47	-0.23	0.24	0.53	1.00		
W	0.21	0.28	0.26	0.20	0.08	0.05	1.00	
Mo	0.59	0.03	0.44	0.22	0.13	-0.18	-0.15	1.00

由表 6、表 7 可知,2 组数据 KMO 度量分别为 0.704 和 0.671,Bartlett’s 检验的 sig. 小于 0.05,适合进行因子分析。主因子分别反映出 10 号矿脉元素变量的 80.11%、32 号矿脉 78.01% 的地球化学信息,可以认为包含了原始变量绝大部分的信息。根据元素地球化学特征,结合寨上金矿床矿物特征与成矿作用认为:F1 主要因子载荷 Ag、Sb、Pb、Zn 代表典型的硫化物矿化与成晕。寨上金矿床发育大量黄铁矿、毒砂、辉锑矿、方铅矿、闪

锌矿等金属硫化物,矿石中可见辉锑铅矿与闪锌矿、辉锑矿连生,集合体呈放射状或团块状(刘家军等,2010b)。Ag 在许多情况下可与 Pb、Zn 元素发生类质同象替换,流体中 Ag 浓度非常高时,可与 Pb、Zn 共同进入方铅矿中完成迁移。因此,F1 主因子可以解释为多金属硫化物-白钨矿-石英-碳酸盐主阶段。

F2 为矿化因子,Au - As 共生组合关系是卡林型-类卡林型金矿的典型特征,在该类型金矿床中,不可见金、纳米级超细粒金是金的 2 种重要存在形式(Hofstra, et al., 2000),其中金可以一价离子形式进入含砷黄铁矿的结构中形成固溶体金(刘家军等,2010b)。因此,F2 因子可以解释为热液成矿期含砷黄铁矿-毒砂-石英主阶段。

F3、F4 因子主要载荷分别为 Mo 和 W。W 属于第三过渡系列元素,亲铁元素,自然界中钨表现出强烈的亲氧性,几乎不形成硫化物。卡林型-类卡林型金矿床中,Au 与 W 发生共同富集的矿床实例相当罕见,寨上金矿床矿石中白钨矿以浸染状、细脉状产出于碳质板岩型金-锑矿石和石英-硫化物细脉中,W、Sb、Au 均以杂多酸络合物为载体一起进入热液地球化学体系发生迁移,最终共同沉淀形成富集(刘家军等,2010b)。Mo 属亲铁性、亲石性的元素,在高温条件下,在热液中随氧逸度、硫逸度变化可类质同象替代 W^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 进入钨矿物、铁镁矿物和副矿物中。

表 6 10 号脉样品数据解释总方差表(%)

Tab. 6 Total variance explained of 10th ore vein (%)

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差百分比	累积百分比	合计	方差百分比	累积百分比	合计	方差百分比	累积百分比
1	3.189	39.86	39.86	3.189	39.860	39.86	2.597	32.468	32.468
2	1.178	14.728	54.588	1.178	14.728	54.588	1.701	21.269	53.737
3	1.051	13.132	67.72	1.051	13.132	67.72	1.067	13.335	67.071
4	0.991	12.393	80.113	0.991	12.393	80.113	1.043	13.042	80.113
5	0.724	9.055	89.168	取样足够度 KMO 度量				0.704	KMO 和 Bartlett 的检验
6	0.478	5.978	95.146	Bartlett’s 球形度检验			近似卡方	459.352	
7	0.264	3.306	98.452				df	28	
8	0.124	1.548	100				Sig.	0	

注:KMO=BB/(AA+BB),AA. 所有变量直接两两的偏相关系数的平方和;BB. 所有变量直接两两的相关系数的平方和;KMO 值越接近 1,意味着变量间的相关性越强,原有变量越适合做因子分析。

表 7 32 号脉样品数据解释总方差表(%)
Tab. 7 Total variance explained of of 32nd ore vein(%)

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差百分比	累积百分比	合计	方差百分比	累积百分比	合计	方差百分比	累积百分比
1	3. 033	37. 917	37. 917	3. 033	37. 917	37. 917	2. 820	35. 252	35. 252
2	2. 074	25. 922	63. 84	2. 074	25. 922	63. 84	2. 153	26. 913	62. 165
3	1. 133	14. 165	78. 005	1. 133	14. 165	78. 005	1. 267	15. 840	78. 005
4	0. 701	8. 763	86. 768						
5	0. 408	5. 094	91. 862	取样足够度的 KMO 度量				0. 671	KMO 和 Bartlett 的检验
6	0. 331	4. 138	96. 000	Bartlett's 球形度检验			近似卡方	129. 092	
7	0. 191	2. 389	98. 389				df	28	
8	0. 129	1. 611	100				Sig.	0	

表 8 极大方差旋转正交因子解表
Tab. 8 Varimax rotation orthogonal factors of elements in rock samples

项目	成 分						
	1	2	3	4	5	6	7
Au	0. 13	0. 93	0. 06	−0. 03	0. 94	−0. 06	0. 07
Ag	0. 89	0. 25	−0. 02	−0. 05	0. 42	0. 72	0. 35
As	0. 32	0. 83	−0. 02	0. 17	0. 90	−0. 02	0. 20
Sb	0. 69	0. 21	−0. 15	−0. 02	0. 59	0. 49	0. 24
Pb	0. 91	0. 16	0. 05	0. 04	0. 04	0. 81	−0. 13
Zn	0. 62	−0. 02	0. 37	0. 26	−0. 28	0. 85	0. 06
W	0. 02	0. 09	−0. 03	0. 97	0. 17	0. 04	0. 85
Mo	−0. 02	0. 04	0. 95	−0. 05	0. 70	−0. 001	−0. 55
旋转成分矩阵 a				旋转成分矩阵 b			

F5 矿化因子主要载荷为 Au、As、Sb、Mo,含砷黄铁矿和毒砂是寨上金矿重要的载金矿物,而 Sb 与 Au 以杂多酸络合物的形式共同迁移,因此同样解释为含砷黄铁矿-毒砂-石英主阶段。F6 与 F1 因子载荷元素相同,代表硫化物矿化与成晕因子,解释为多金属硫化物-白钨矿-石英-碳酸盐主阶段。F7 与 F4 相同,结合相关性分析与矿床实际,认为 W 的成矿(晕)与 Au 既密切相关,也具有独立性(刘家军等,2010b)。尽管 Au、Sb、W 都富集于金矿石中,尚未在镜下观察到二者连生现象,仅见部分白钨矿与闪锌矿、辉锑矿紧密连生,而在硫化物-石英脉裂隙中观察到自然金和银金矿,Au 含量最高的部位 W 并不一定最富集。

根据因子分析得到了 2 条矿脉的 Au 元素因子模型如下。

10 号矿脉 $Au = 0.93F2 + 0.13F1 - 0.05F4 - 0.02F3$;

32 号矿脉 $Au = 0.94F5 + 0.07F7 - 0.06F6$ 。

可以看出,2 条矿脉金矿化与成晕近似,均是主要受以 As 元素为主要载荷的因子影响;F2、F5 与含砷黄铁矿-毒砂-石英主阶段吻合,F1、F6 与多金属硫化物-白钨矿-石英-碳酸盐阶段吻合,矿区具有多期多阶段矿化成晕特征,因子模型暗示金矿化主要受这 2 期热液成矿叠加作用影响;此外,以高温元素 W、Mo 为主要载荷元素的 F3、F4、F7 因子常暗示与岩浆作用有关的成矿过程,但寨上矿区地表无岩浆岩出露,且根据最新 1:25 万、1:5 万航磁成果推断下延 3 km 范围内无隐伏岩体,故暂未找到岩体与成矿作用有关的直接证据,构造热效应和地热梯度可能是驱动流体活化迁移的主要因素。

5 原生晕轴向分带序列

剖析矿床原生地球化学晕的分带特征,有助于还原成矿以及成晕元素成矿作用过程中的迁移和集聚过程。通过元素地球化学特征梳理,厘定出矿床原生晕分带序列,总结其分带规律,不仅有助于判断矿床剥蚀深度、分析勘查潜力,对深部矿产预测和靶区圈定也具有很强的指导性和实用价值(李惠等,1999;邢利琦等,2011)。笔者采用格里戈良分带指数法的改良,首先计算异常含量,数据通过标准化后求取分带指数,而后根据变化度、系统分析,厘定具体的原生晕分带序列(表 9)。其中变化度是格里戈良法中变化梯度的倒数,变化度越小,元素越向浅部富集,这样可以避免部分钻孔(中段)元素异常非常弱甚至负异常时,传统计算公式中分母为零而无法计算的情况(王建新等,2007)。

表 9 原生晕轴向分带序列表
Tab. 9 Primary halo axial zoning sequences

勘探线	分带序列	
108	Zn - As - Pb - Sb, Ag, Au - W - Mo	
100	Ag - As, Au, W - Sb - Pb - Mo - Zn	
92	W - As - Zn, Mo, Au - Pb - Ag - Sb	10 [#] 矿脉
84	As - Sb - Au - Ag - Pb - Zn - Mo, W	
76	W - Zn - As, Ag - Sb - Pb - Au, Mo	
79	Zn - Ag - Sb, As - Mo - Au - Pb, W	32 [#] 矿脉

中国金矿床原生晕轴向(垂直)分带序列,从上到下为:B-I-As-Hg-F-Sb-Ba(前缘晕)-Pb-Ag-Au-Zn-Cu(近矿晕)-W-Bi-Mo-Mn-Ni-Cd-Co-V-Ti(尾晕)(李惠等,1999)。金矿床受多期次、多阶段叠加成矿作用的影响,往往形成原生叠加晕。具有正向分带特征时通常认为是对单阶段成矿或多阶段同位成矿作用过程的重要指示,而“逆向分带”或“反分带”特征常形成于多阶段成矿成晕作用在空间上的异位叠加的过程,据此可以进行深部找矿预测(李惠等,1999;王建新等,2007)。根据寨上金矿实际情况,综合数学分析和轴向分带序列计算结果,选择 As 和 Sb 为前缘晕指示元素,Au、Ag、Pb、Zn 为近矿晕指示元素,W、Mo 为尾晕指示元素。不同勘探线原生晕轴向分带趋势如下。

108 勘探线:(前缘晕+近矿晕)→近矿晕→(近矿晕+尾晕);

100 勘探线:(前缘晕+近矿晕)→近矿晕→(前缘晕+近矿晕+尾晕);

92 勘探线:(前缘晕+近矿晕+尾晕)→尾晕→(前缘晕+近矿晕);

84 勘探线:(前缘晕+近矿晕+尾晕)→尾晕;

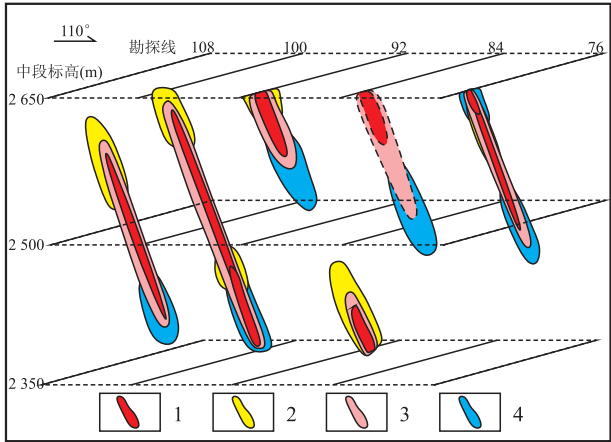
76 勘探线:(前缘晕+近矿晕+尾晕)→(前缘晕+近矿晕)→尾晕;

79 勘探线:(前缘晕+近矿晕)→(前缘晕+近矿晕+尾晕)→尾晕。

10 号矿脉在 108 勘探线原生晕分带符合正向分带特征,矿体可能为单阶段形成,也可能是 2 个阶段形成的矿体发生同位叠加;100 勘探线原生晕分带特征显示,至少存在 2 个阶段形成矿体的叠加,由于前缘晕元素往往可以在矿体上部几十米范围形成异常,所以在底部中段仍有明显的前缘晕,说明矿体向深部仍有延伸,或在深部存在盲矿体;92 勘探线原生晕分带特征显示存在上下 2 个矿体,矿体未发生叠加,且下部矿体仅出现前缘晕与近矿晕,说明矿体在深部仍有较大的延伸;84 勘探线矿体仅有深部 2 个钻孔控制,因此直接对比指示元素异常含量确定分带序列,该剖面数据仅作参考。前缘晕元素与近矿晕元素在中部富集,底部仅出现尾晕元素异常,说明深部存在矿体的可能性不大;76 勘探线原生晕分带显示 2 个矿体叠加的特征,但底部中段仅尾晕元素异常,深部找矿潜力不大;32 号脉在 79 勘探线原生晕分带特征显示前缘晕与尾晕的叠加,为上、下 2 矿体在中部中段成矿(晕)叠加。

综上所述,笔者认为 10 号矿脉中存在 2 期成矿作用形成的矿体 A 和矿体 B,不同勘探线矿体展布状态差异比较大,在轴向上存在复杂的叠加和分离形态,走向上也存在尖灭再现(图 3)。As 元素异常主要出现在上部,而 Ag、Sb、Pb、Zn 等元素异常在各个中段均存在,推测上部矿体为含砷黄铁矿-毒砂-石英主阶段形成的矿体,而下部矿体为多金属硫化物-白钨矿-石英-碳酸盐主阶段形成的矿体,后期形成的矿体在矿脉的不同位置与早期形成的矿体发生了同位叠加、首尾叠加或者分离。从 32 号脉 79 勘探线原生晕分带特征来看(图 4),32 号脉中同样发生 2 个主成矿期矿体的叠加作用,Sb、Ag、Zn 等元素在顶部中段异常程度高,说明南矿带多金属硫化

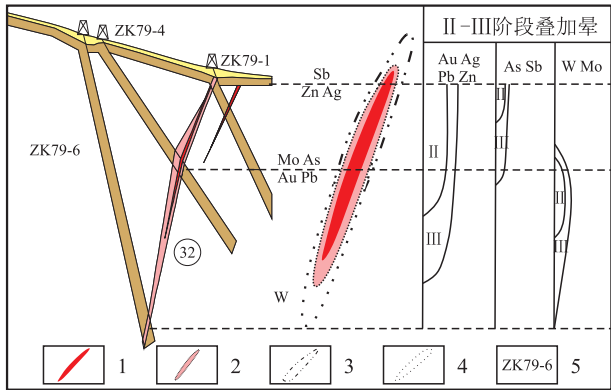
物-白钨矿-石英-碳酸盐主阶段成矿作用非常强烈,成矿元素在较浅的部位发生沉淀,矿体完全叠加在早期形成的矿体之上,与矿脉处于背斜构造的核部可能也有关系。



1. 矿体;2. 前缘晕;3. 近矿晕;4. 尾晕

图 3 北矿带 10 号矿脉 108-76 勘探线原生晕特征图

Fig. 3 Characters of the primary dispersion halos of 10th ore vein



1. 矿体;2. 矿脉及近矿晕;3. 前缘晕;4. 尾晕;5. 钻孔及编号

图 4 南矿带 32 号矿脉 79 勘探线原生晕特征图

Fig. 4 Characters of the primary dispersion halos of 32nd ore vein

6 地球化学参数变化规律

基于原生晕的分带理论,找矿工作中研究者常常使用前缘/尾晕元素比,即低温与高温元素比值来分析地质地球化学问题(邵跃,1997)。特别是矿体轴向地球化学参数的变化规律分析是利用已知元素分布规律进行深部找矿前景分析的重要手段。如前缘晕与尾晕元素的比值、累加比、累成比等不同指标

的拐点出现具有重要意义,往往暗示深部空间有尚未控制的矿体存在(李惠,2006)。

利用 SPSS 软件,计算前缘晕元素 As、Sb 与尾晕元素 W、Mo 含量累乘比,对计算结果做对数变换并作图。由图 5 可知,各勘探线均存在较大波动。108 勘探线在 2 500 m 附近由降转升,在深部 2 350 m 附近转折呈上扬趋势;100 线在 2 550 m 和 2 400 m 附近由降转升;92 勘探线在 2 450 m 附近开始保持上升趋势;84 勘探线在中下 2 个中段都有由升转降的趋势;76 勘探线在 2 500 m 附近达到峰值后呈下降趋势,根据“参数反转”准则(李惠,2006),108、100、92 勘探线深部找矿潜力较大。

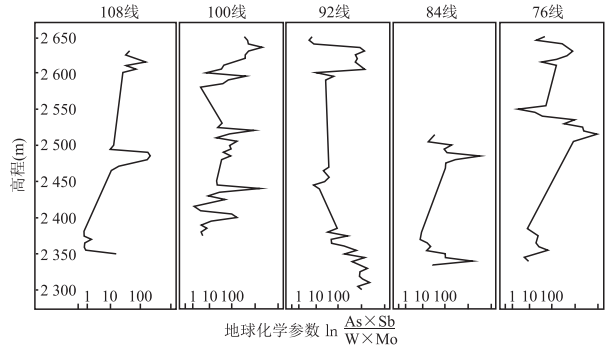


图 5 北矿带 10 号脉 108-76 勘探线地球化学参数轴向变化图

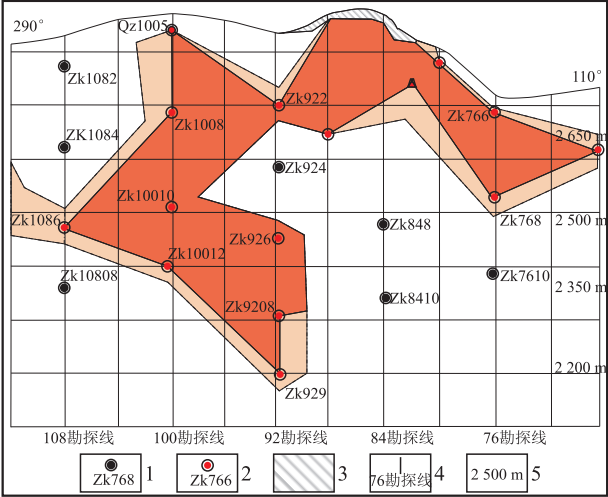
Fig. 5 Contrast halo zoning of 10th ore vein in Zhaishang gold deposit

对照 10 号脉矿体垂直纵投影图可知(图 6),原生晕特征分析的矿体叠加形态与实际情况较吻合,92 勘探线控制 10 号矿脉中部矿化情况的 ZK924 并未见到有价值的工业矿体,而 ZK929 在深部控制到了下部矿体的延伸,说明使用该方法对矿体深部找矿远景进行预测可靠性比较高。

7 矿体原生叠加晕模型

综合寨上金矿 10 号、32 号矿脉的指示元素空间分布规律、数学地质分析及原生晕分带特征研究,建立了 2 条矿脉原生晕叠加的理想模型。

10 号矿脉原生晕叠加理想模型(图 7):原生晕轴向分带以上部前缘晕与近矿晕叠加、中部近矿晕叠加、底部强近矿晕与弱尾晕叠加为特征,即 2 650~2 350 m 中段存在 A 矿体尾部与 B 矿体头部或中部叠加,矿体在 2 350 m 以下仍有较大延伸。



1. 未见矿钻孔及编号;2. 见矿钻孔及编号;3. 采空区;4. 勘探线位置及编号;5. 标高

图 6 北矿带 10 号脉矿体垂直纵投影略图

Fig. 6 Vertical longitudinal projection sketch of 10th ore vein

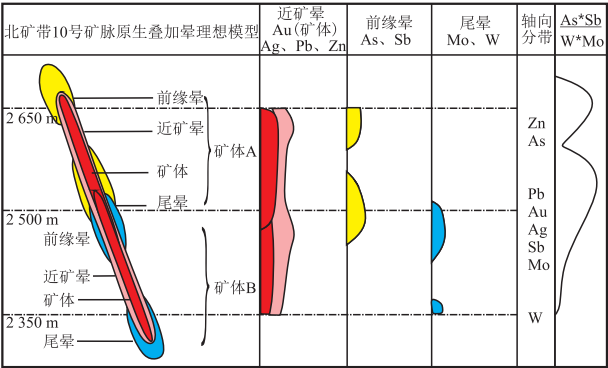


图 7 北矿带 10 号脉原生晕叠加理想模型图

Fig. 7 Ideal zoning model of the primary superimposed halos of 10th ore vein

32 号矿脉原生晕叠加理想模型(图 8):原生晕轴向分带以中上部前缘晕与近矿晕叠加、底部近矿晕与尾晕叠加为特征,即 2 650~2 300 m 中段存在 A 矿体与 B 矿体中部及尾部叠加,2 300 m 中段接近矿体底部。

8 结论

笔者在野外地质工作的基础上,分别对北矿带 10 号矿脉、南矿带 32 号矿脉进行元素分布特征、数学地质分析和原生晕分带特征的讨论,建立了原生叠加晕理想模型,得到以下结论。

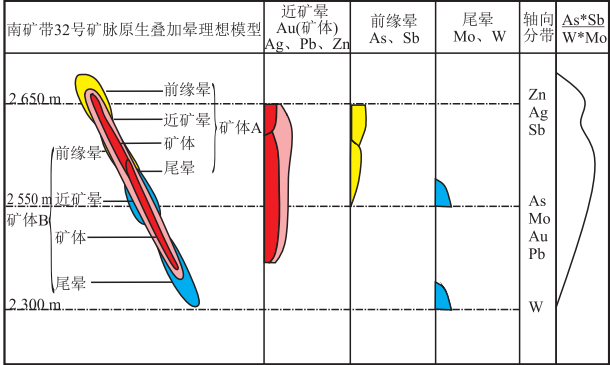


图 8 南矿带 32 号矿脉原生晕叠加理想模型图

Fig. 8 Ideal zoning model of the primary superimposed halos of 32nd ore vein

(1)指示元素找矿标志。南、北矿带 Au、As、Sb 元素异常与成矿关系密切,元素组合异常可作为寨上金矿床的直接找矿标志。10 号矿脉、32 号矿脉 Au 元素因子模型显示:南、北矿带矿体中的 Au 主要受热液成矿期 2 个主阶段影响,As、Sb、Ag、Pb、Zn 等伴生元素在不同部位沉淀。

(2)原生晕分带特征。以 As、Sb 为前缘晕指示元素,Au、Ag、Pb、Zn 为近矿晕指示元素,W、Mo 为尾晕指示元素,各勘探线分带特征显示,矿脉中存在 2 期成矿作用形成的矿体 A 和矿体 B,推测矿体 A 形成于含砷黄铁矿-毒砂-石英主阶段,下部矿体 B 形成于多金属硫化物-白钨矿-石英-碳酸盐主阶段,原生晕在空间上发生复杂叠加。

(3)原生叠加晕理想模型与找矿预测。10 号矿脉在 2 650~2 350 m 中段存在 A 矿体尾部与 B 矿体头部或中部叠加,矿体在 2 350 m 以下仍有较大延伸;32 号脉在 2 650~2 300 m 中段存在 A 矿体与 B 矿体中部及尾部叠加,2 300 m 中段接近矿体底部。根据原生叠加晕找矿预测“前尾共存”及“参数反转”准则,对矿脉深部进行找矿预测,圈定 3 个找矿靶区:10 号矿脉在 100 勘探线 2 350 m 标高以下矿体有延伸,可作为扩大资源量的重点区域;108 勘探线 2 300 m 中段可能存在 Au 的第二富集段,可设计后排深孔验证深部隐伏情况;32 号矿脉在 2 550 m 标高以下矿体有较大延伸,2 300 m 可能已经到达底部。

致谢:本文在写作过程中得到了刘家军教授和刘冲昊博士的指导和建议,在此表示衷心地感谢!

参考文献(References):

- 陈国忠,龚全胜,梁志录,等. 西秦岭甘肃段特大型金矿的地质地球化学特征及其成岩成矿年龄[J]. 西北地质, 2017,50(4):91-104.
- CHEN Guozhong, GONG Quansheng, LIANG Zhilu, et al. Geological, Geochemical Characteristics and Diagenetic Age of the Super-large Gold Deposits in Western Qinling, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(4):91-104.
- 陈化奇. 多元素衬值累加晕在化探异常评价中的应用[J]. 甘肃地质, 2008,17(4):90-93.
- CHEN Huaqi. Application of Multi-element Contrast Accumulative Halo in Evaluating Geochemical Anomalies [J]. Gansu Geology, 2008,17(4):90-93.
- 董庆吉,陈建平,唐宇. R型因子分析在矿床成矿预测中的应用—以山东黄埠岭金矿为例[J]. 地质与勘探, 2008, 44(4):64-68.
- DONG Qingji, CHEN Jianping, TANG Yu. Application of R Type Factor Analyses in Mineralization Prognosis: by an Example of Huangbuling Gold Deposit, Shandong Province [J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(4): 64-68.
- 代西武,杨建民,张成玉,等. 利用矿床原生晕进行深部隐伏矿体预测—以山东埠上金矿为例[J]. 矿床地质, 2000, 19(3): 245-256.
- DAI Xiwu, YANG Jianmin, ZHANG Chengyu, et al. The Application of primary haloes of the ore deposit to the prognosis of deep concealed orebodies—Exemplified by the Bushang gold deposit in Shandong Province[J]. Mineral Deposits, 2000,19(3):245-256.
- 侯景儒,黄竞先. 地质统计学及其在矿产储量计算中的应用[M]. 北京:地质出版社,1982.
- HOU Jingru, HUANG Jingxian. Geostatistics and its application in the calculation of mineral reserves[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.
- 何希杰,劳学苏. 回归分析中临界相关系数的求值方法[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 1993,(2):12-19.
- HE Xijie, LAO Xuesu. The Method for Regression Analysis Critical of Related Coefficient [J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 1993, (2):12-19.
- 刘冲昊,刘家军,王建平,等. 陕西省略阳县铍厂沟金矿北矿带地球化学原生晕特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2012,39(5):1397-1405.
- LIU Chonghao, LIU Jiajun, WANG Jianping, et al. Primary Halo Characteristics of the North Ore Zone in the Huachanggou Gold Deposit, Lueyang County, Shaanxi Province [J]. Geology in China, 2012, 39(5):1397-1405.
- 李惠. 甘肃李坝金矿床定位预测的叠加晕模式[J]. 黄金地质, 2010,6(4):33-38.
- LI Hui. The Model of Superimposed Halos for Blind Ore Locating Prediction in Liba Gold Deposit, Gansu [J]. Gold Geology, 2010,6(4):33-38.
- 李惠,张国义,禹斌,等. 金矿区深部盲矿预测的构造叠加晕模型及其找矿效果[M]. 北京:地质出版社,2006.
- LI Hui, ZHANG Guoyi, YU Bin, et al. Structural Superimposed Halo Model for Blind Ore Prediction in Deep Gold Mining Area and Its Prospecting Effect [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- 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 Hui, ZHANG Wenhua, LIU Baolin, 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.
- 刘家军,毛光剑,吴胜华,等. 甘肃寨上金矿床成矿特征与形成机理[J]. 矿床地质, 2010a, 29(1): 85-100.
- LIU Jiajun, MAO Guangjian, WU Shenghua, et al. Metallogenic Characteristics and Formation Mechanism of Zhaishang Gold Deposit, Southern Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2010a, 29(1): 85-100.
- 刘家军,毛光剑,吴胜华,等. 甘肃寨上金矿床矿物组成特征与矿质沉淀机理[J]. 中国地质, 2010b, 37(2):453-462.
- LIU Jiajun, MAO Guangjian, WU Shenghua, et al. Characteristics of Mineral Association and Mechanism of Au Precipitation in the Zhaishang Gold Deposit, Southern Gansu [J]. Geology in China, 2010b, 37(2):453-462.
- 刘晓玲,陈建平. R型因子分析在青海省治多杂多地区成矿

- 预测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(3): 332-336.
- LIU Xiaoling, CHEN Jianping. A Case Study of R - Factor Analysis for Metallogenic Prognosis Applied to Zhiduo - Zaiduo Area of Qinghai Province [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(3): 332-336.
- 邢利琦, 刘炳璋. 矿床原生地球化学晕分带性研究[J]. 四川地质学报, 2011, 31(4): 489-495.
- XING Liqi, LIU Bingzhang. Study of Zonation of Primary Halo of Hydrothermal Deposits[J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(4): 489-495.
- 严汝珍, 王文华. 钻孔原生晕组分分带及圈定异常方法[J]. 四川地质学报, 1989, 9(2): 64-70.
- YAN Ruzhen, WANG Wenhua. The Zoning and Anomaly Delineation Method of the Primary Halo in Borehole [J]. Acta Geologica Sichuan, 1989, 9(2): 64-70.
- 姚玉增, 金成洙, 肖向军. 因子分析在辽南卧龙泉地区化探次生晕异常优选中的应用[J]. 物探与化探, 2005, 29(1): 10-12.
- YAO Yuzeng, JIN Chengzhu, XIAO Xiangjun. The Application of Factor Analysis to the Optimization of Geochemical Secondary Halos: A Case Study of Wolongquan Area, Southern Liaoning Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(1): 10-12.
- 张玉恒, 刘应平, 张海. 因子分析在化探上的应用——以四川九龙县李伍预测区为例[J]. 四川地质学报, 2012, 32(1): 112-115.
- ZHANG Yuheng, LIU Yingping, ZHANG Hai. The Application of Factor Analysis to Geochemical Prospecting——By the Example of the Liwu Ore District [J]. Acta Geologica Sichuan, 2012, 32(1): 112-115.
- 章永梅, 顾雪祥, 程文斌, 等. 内蒙古柳坝沟金矿床原生晕地球化学特征及深部成矿远景评价[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 209-221.
- ZHANG Yongmei, GU Xuexiang, CHENG Wenbin, et al. The Geochemical Features of Primary Halo and the Evaluation of Deep Mineralization Prospect of Liubagou Gold Deposit, Inner Mongolia [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 209-221.
- 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.
- 王建新, 臧兴运, 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.
- 王文森. 变异系数——一个衡量离散程度简单而有用的统计指标[J]. 中国统计, 2007, (6): 41-42.
- WANG Wensen. Coefficient of Variation—A Simple and Useful Statistical Measure of Dispersion [J]. China Statistics, 2007, (6): 41-42.
- Hofstra A H, Cline J S. Characteristics and Models for Carlin-type Gold Deposits [J] // Hagemann S G, Brown P E (eds.), Gold in 2000. Reviews in Economic Geology, 2000, 13: 163-220.