

甘肃文县阳山金矿床葛条湾-安坝矿段原生晕地球化学特征及深部找矿远景评价*

王亮, 熊韬, 罗涛, 邓俊峰, 杨虎, 杨忠虎

(中国地质调查局应用地质研究中心, 四川成都 610036)

摘要 甘肃文县阳山金矿是产于勉略缝合带内的超大型卡林-类卡林型金矿床。为探讨矿区深部找矿潜力和成矿远景评价, 文章对葛条湾-安坝矿段 30 号勘探线剖面的成矿及伴生元素原生晕地球化学特征进行研究, 结果表明: 该矿段原生晕的轴(垂)向分带序列自上而下为: Pb—Co—Cu—Zn—Mn—Bi—Mo—Sb—Au—As—Ag。矿体中部原生晕具有反向分带特征, 原生晕出现前缘晕、尾晕叠加, 显示具有多阶段热液叠加成矿作用的特征。在深部 1400 m 标高, 前缘晕并未消失, 并向深部强度增大, 尾晕仅为弱异常。同时, 原生晕地球化学参数 $(As \times Sb)/(Mo \times Bi)$ 、 $(As+Sb)/(Mo+Bi)$ 比值发生转折并升高, 前缘晕因子得分在深部有很强的高值异常, 进一步证实深部具有盲矿体存在的可能性。综上表明, 阳山金矿矿区深部找矿前景较好。

关键词 地球化学; 原生晕; 深部找矿; 远景评价; 阳山金矿

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Geochemical characteristics of primary halo and evaluation of deep mineralization prospect of Yangshan gold deposit, Wenxian, Gansu Province

WANG Liang, XIONG Tao, LUO Tao, DENG JunFeng, YANG Hu and YANG ZhongHu

(Applied Geology Research Center of China Geological Survey, Chengdu 610036, Sichuan, China)

Abstract

The Yangshan gold deposit located along the Mian-Lue suture belt in the west of Qinling orogenic belt is a superlarge Carlin-Carlin-like deposit. This paper systematically analyzes the geochemical characteristics of primary halo of metallogenic and accompanying elements from the No. 30 exploration line section in Getiaowan—Anba ore block. This study exhibits a series of Pb—Co—Cu—Zn—Mn—Bi—Mo—Sb—Au—As—Ag in axial zonation sequence. And the primary halo in the middle of the orebody shows reverse zonation that the top and the tail of the primary halo coexist, which was probably caused by multiple phases of hydrothermal superposed mineralization. At the depth of 1400 m, the front halo does not disappear and becomes more strong toward the depth, but the tail halo shows weak anomaly. The geochemical parameters of $(As \times Sb)/(Mo \times Bi)$, $(As+Sb)/(Mo+Bi)$ are increasing in reverse, and factor score of the front halo shows quite strong high value area. These features suggest the presence of a blind orebody and prospecting potential in the deep area.

Key words: geochemistry, primary halo, deep prospecting, perspective evaluation, Yangshan gold deposit

阳山金矿为近二十多年来在西秦岭勉略缝合带内发现的超大型卡林-类卡林型金矿带。针对该矿床的矿床地质特征、矿床成因类型、成矿年代学、构造演化、成矿物质的赋存状态和微观矿物学研究等方面, 前

* 本文得到中国地质调查局应用地质研究中心《甘肃阳山金矿岩金普查》(编号: DD20191028)资助

第一作者简介 王亮, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为区域矿产勘查和矿床地球化学。Email: wll_liang@126.com

收稿日期 2020-6-23; 改回日期 2021-1-11。孟秋熠编辑。

人已经开展了大量的研究工作(齐金忠等,2003;2005;2006;杨贵才等,2008;陈衍景等,2004;2010;张莉等,2009;李楠等,2012;2019;李晶等,2007;2008;马倩,2016;雷时斌等,2010;杨荣生等,2006;2009;代堰镔等,2012;赵静等,2016;2017;梁金龙等,2015),随着勘探工程的推进,对矿区浅部金资源的控制日渐成熟,而深部金资源的前景评价显得日益重要,特别是深部盲矿体的识别,因此深部找矿勘探是下一步工作的重点。由于热液矿床原生晕的形成与成矿作用是一个统一的过程,国内外大量金属矿床原生晕研究表明(Eilu et al., 2001; Goldberg et al., 2003;李惠等, 2006;Schmid et al., 2009;Wang et al., 2013;Li et al., 2018;叶红刚等, 2018;张赞赞等,2020),原生晕方法是地球化学寻找金属矿床最有效的方法。应用原生晕方法能在矿床不同勘查阶段追踪盲矿体,确定矿体赋存部位(邵越,1997;刘崇明,2006;孙志明,2016)。因此,热液矿床原生晕组合分带序列的研究在寻找隐伏矿和深部矿产资源评价方面具有独特的优势。本次工作通过对阳山金矿带葛条湾-安坝矿段30号勘探线已有钻孔岩芯样品的矿体原生晕地球化学特征进行研究,建立了原生晕地球化学叠加模型,为矿山深部找矿提供相关的参考依据。

1 区域地质背景

甘肃文县阳山金矿带是目前西秦岭金成矿带内

规模最大的金矿床,大地构造位置上位于扬子板块、华北板块和松潘-甘孜造山带夹持的倒三角构造域北缘(图1),紧邻松潘-甘孜造山带与秦岭造山带结合部位,处于碧口地体北缘的勉略缝合带内的文县弧形构造带内(裴先治等,2002;张国伟等,2003;齐金忠等,2003)。

区域上主要出露地层单元有碧口群、古生界泥盆系、石炭系、二叠系以及中生界三叠系和下白垩统,同时,分布有大面积的第四系黄土、冲洪积物等(杜子图等,1998)。其中,前寒武系碧口群浅变质沉积-火山岩建造可能为阳山金矿提供成矿物质来源(张莉等,2009;李楠等,2012),区内勉略缝合带内出露一系列弧形断裂构造,主要断裂有松柏-梨坪断裂、汤卜沟-观音坝断裂、马家磨-魏家坝断裂、白马-临江断裂,其性质主要为挤压逆冲型断裂。在断裂之间还存在一系列褶皱,其中规模较大的有关家沟-何家坝复背斜、旧寨向斜、金子山向斜和天子坪梁向斜(阎凤增等,2010)。

区域上岩浆岩出露面积较少,总体有如下特点:

① 类型繁多,超基性、基性、中酸性火山岩和侵入岩均有出露;② 岩浆活动受控于区域构造演化,诱导岩浆侵位和喷发的构造机制主要为大型构造破碎带,系同构造岩浆活动;③ 岩浆活动具多期次性,根据构造-岩浆活动的旋回性划分为加里东-华力西期、印支期和燕山期3个构造岩浆事件;④ 空间分布广

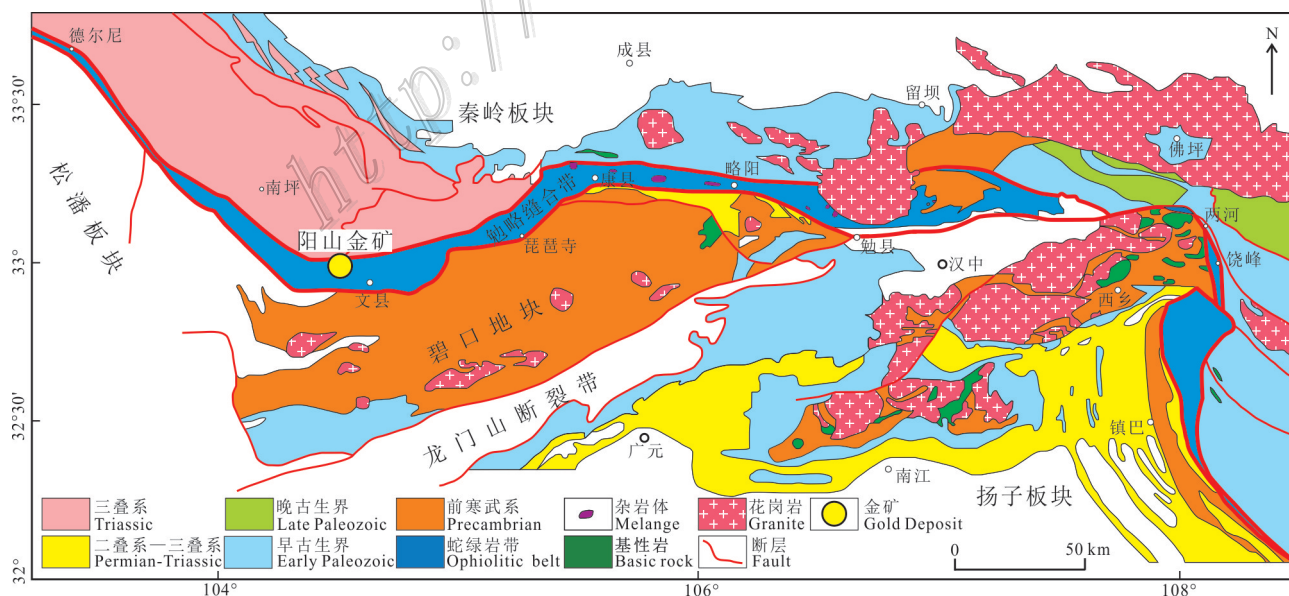


图1 阳山金矿带区域地质背景(据 Dong et al.,2011)

Fig. 1 Regional geological map of the Yangshan gold deposit (after Dong et al., 2011)

泛而零散;⑤规模一般较小,侵入岩多呈小岩株或岩脉产出(杜子图等,1998),但与金矿成矿多有密切成因联系,部分侵入体可能直接参与了金矿化。

2 矿床地质特征

阳山金矿带自西向东依次划分为泥山、葛条湾、安坝、高楼山、阳山(又称观音坝)、张家山6个金矿段,矿区南部为新元古代变质火山沉积岩。北部为二叠系板岩、灰岩和白垩纪砂岩。矿区中部中泥盆统三河口组第三、第四岩性段为主要赋矿层位,第三岩性段为千枚岩、砂岩、灰岩等,第四岩性段主要为灰岩、千枚岩及石英砂岩(图2)。矿区主要受控于NEE向安昌河-观音坝断裂及其次级断裂。区内发育一系列花岗斑岩脉,与矿体分布较为密切,通常矿体分布于斜长花岗斑岩的内外接触带中,部分斜长花岗斑岩脉体本身就是矿体(李建忠等,2011)。

矿石类型主要以黄铁矿化蚀变千枚岩和黄铁矿化蚀变斜长花岗斑岩型为主。矿石矿物除自然金外,主要有黄铁矿、褐铁矿、毒砂、辉锑矿,偶见方铅矿、闪锌矿,脉石矿物有石英、长石、云母、绿泥石等。围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、绿泥石化、高

岭土化、碳酸盐化。金主要以固溶体形式赋存于载金矿物黄铁矿和毒砂中(杨荣生等,2009;赵静等,2017)。

阳山金矿床按照成矿期次分为热液期和表生期,热液期进一步分为以下4个成矿阶段:①无矿石英阶段;②石英-黄铁矿阶段;③石英-黄铁矿-毒砂阶段;④石英-碳酸盐岩阶段,第②、③阶段为主要矿化阶段(齐金忠等,2003)。

本次研究选取阳山金矿安坝矿段-葛条湾矿段的30号勘探剖面(图3)。该矿段属于311号矿脉群的西沿部分,位于72~08号勘探线之间,已控制矿脉长度1600 m,走向70°~80°,倾向150°~175°,倾角多为55°~75°,最陡为75°,圈定1个工业矿体,共计估算(333+334)金资源量16 427 kg。矿体长度1193 m,最高见矿标高1928 m,最低见矿标高1408 m,控制矿体斜深227~521 m,最大斜深521 m,矿体厚度0.81~10.02 m,平均2.21 m,矿体呈似层状、长扁豆状、大透镜状,厚度较稳定,局部膨缩现象明显,向深部有厚度变薄的趋势;品位为 $(1.39\sim17.60)\times10^{-6}$,平均 4.29×10^{-6} ,矿化连续、金元素分布均匀,向深部品位有降低趋势,近地表浅部向东延伸矿化有减弱的趋势,而该段深处发现325号矿脉,规模较大,在

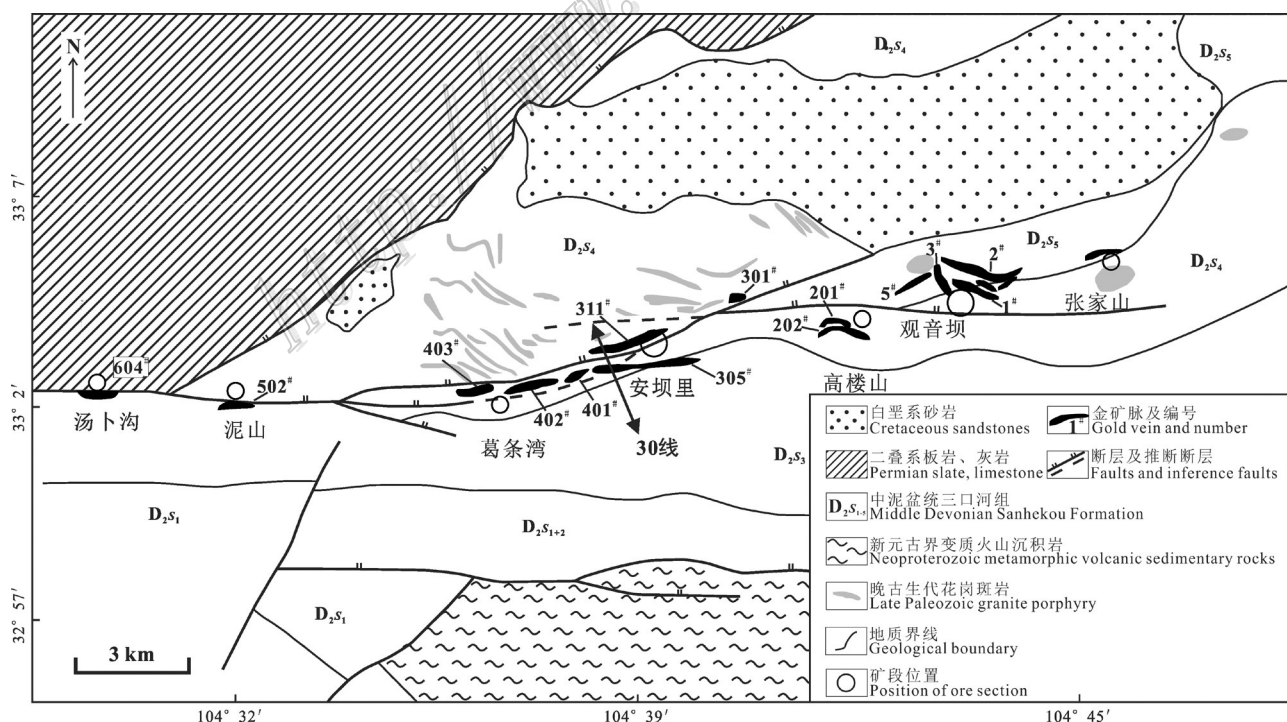


图2 阳山金矿矿区地质简图(据梁金龙等,2015)

Fig. 2 Simplified geological map of the Yangshan gold deposit (after Liang et al., 2015)

线中的311号和325号脉体进行研究。勘探线自西向东有4个钻孔,分别为ZK308、ZK3012、ZK3016、ZK3020,系统采集109件样品,每个钻孔的岩芯样品由上至下每隔约10 m采集一件样品,并贯穿整个钻孔。

共分析成矿元素和成矿指示元素(Au、Ag、As、Bi、Co、Cu、Zn、Mn、Mo、Pb、Sb)11种(表1)。所有元素的测试分析均在中国人民武装警察部队黄金第三总队第一地矿检测站完成。其中Au采用原子吸收分光光度计(Z-2000)进行测试(Au检出限为0.15 ng/g),Ag采用7200发光光谱仪分析测试(Ag检出限为0.030 $\mu\text{g/g}$),As、Sb使用AFS9800原子荧光仪测试(As检出限为1.0 $\mu\text{g/g}$;Sb检出限为0.20 $\mu\text{g/g}$),Bi使用AFS3100原子荧光仪测试(Bi检出限为0.10 $\mu\text{g/g}$),Co使用X2电感耦合等离子体质谱仪分析(Co检出限为1.0 $\mu\text{g/g}$),Cu、Mn、Pb、Zn使用ICP6300等离子体光谱仪测试(Cu检出限为1.5 $\mu\text{g/g}$;Mn检出限为30.0 $\mu\text{g/g}$;Pb检出限为5.0 $\mu\text{g/g}$;Zn检出限为15.0 $\mu\text{g/g}$)。Mo使用X2电感耦合等离子体质谱仪分析(Mo检出限为0.3 $\mu\text{g/g}$)。

4 矿床原生晕地球化学特征

4.1 矿床元素含量特征

结合地质剖面特征,对119件原生晕样品的各成矿成晕元素分布进行统计。由于热液成矿作用,导致成矿成晕元素组分带入,矿(化)体中成矿成晕元素Au、Ag、As、Sb平均含量明显高于未矿化围岩,矿(化)体中成矿成晕元素Bi、Co、Pb、Cu、Zn平均含量略高于围岩,围岩中的Mn、Mo平均含量略高于矿(化)体。主成矿元素Au主要富集在破碎蚀变千枚岩和斜长花岗斑岩金矿体中。在围岩和千枚岩中含量较低(约10 ng/g)。

4.2 原生晕组合特征

元素组合是元素地球化学亲和性在地质作用或

成矿作用过程中的表现,因此确定成矿元素组合特征是确定最佳地球化学标志元素组合的前提,特别是研究成矿元素与伴生元素的相互关系可以建立找矿预测的地球化学标志。目前主要应用多元统计学中的相关性分析、聚类分析、因子分析等方法进行成矿元素组合特征研究,下面通过元素的相关性分析和因子分析方法对阳山金矿床30线勘探线剖面的原生晕元素组合特征进行研究。

4.2.1 相关性分析

相关性分析是利用各元素对之间的相关系数来衡量元素间相关性的一种简单而又直接的方法。本次所采集的109件样品原生晕多金属元素相关系数如表2所示,可以看出Au与As的相关性最好(相关系数为0.76),表明Au主要富集在毒砂矿物中,与矿区元素Au主要以固溶体形式赋存在毒砂和含砷黄铁矿中一致。Au与Ag、Sb也具有较好的相关性(相关系数接近0.5),因此,元素As、Ag、Sb是较好的找矿指示元素,可以指示Au的富集方向。

Zn、Co、Cu、Bi的相关系数达到0.7以上,表现出较好的相关性,但与Au的相关性较低,而Pb、Mo、Mn之间也具有较好的相关性,相关系数接近0.5。但它们与Au的相关性较差,其中Mn与Au、As、Bi、Co、Cu、Sb呈弱负相关性。表明它们之间具有不同的地球化学行为。

4.2.2 因子分析

因子分析是一种数据降维分析过程,可以得到具有某种明确地质意义的因子。通常对于某一矿体来说,所测元素含量实际上是多次地质作用和成矿期次叠加的结果。因子分析不仅可以根据矿体中各种元素含量的相互关系来识别一个过程,还可以在多个叠加情况下来区分这些过程。并按不同的地质过程将元素总历史成因进行分解(赵鹏大等,1994;姚玉增等,2005)。

在本次研究中,通过SPSS软件利用最大方差旋

表1 研究区不同岩性样品中原生晕样品元素平均含量

Table 1 Average content of primary halo elements of samples from different lithologies in the study area

岩性	样品数量	平均 $w(\text{B})/10^{-6}$										
		Au*	Ag	As	Bi	Co	Cu	Mn	Mo	Pb	Sb	Zn
千枚岩	61	11.2	0.06	62.6	0.32	14.6	22.4	426	0.61	21	5.9	85
灰岩	21	10.2	0.06	43.8	0.22	10.5	14.3	427	0.57	18.2	5.5	62
破碎蚀变千枚岩	16	260	0.11	608	0.39	16.2	27	410	0.57	24	20	93
矿体	11	1777	0.37	1557	0.36	15.2	26	361	0.54	32	30	86

注: Au*含量单位为 10^{-9} 。

表2 原生晕多金属元素相关性系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of primary halo polymetallic elements

元素	Au	Ag	As	Bi	Co	Cu	Mn	Mo	Pb	Sb	Zn
Au	1	0.41	0.76	0.15	0.20	0.25	-0.07	-0.04	0.01	0.41	0.10
Ag		1.00	0.31	0.01	0.06	0.12	-0.01	0.14	0.11	0.58	-0.03
As			1.00	0.14	0.35	0.32	-0.07	-0.03	0.03	0.40	0.23
Bi				1.00	0.63	0.39	0.02	-0.23	0.17	0.17	0.73
Co					1.00	0.66	0.29	0.06	0.42	0.09	0.76
Cu						1.00	0.07	0.11	0.08	0.18	0.61
Mn							1.00	0.37	0.52	-0.16	0.18
Mo								1.00	0.45	0.10	-0.13
Pb									1.00	0.01	0.26
Sb										1.00	0.07
Zn											1.00

转主成分分析方法对所采集样品原生晕元素分析结果进行分析统计,KMO值(0.635)接近于1,Tartlett球形度检验Sig值为0,小于显著水平0.05,说明变量存在相关关系,可以进行因子分析,共提取3个主成分因子(表3,图4),F1、F2、F3因子的方差贡献率分别为27.68%、22.59%和18.14%,基本包含原始变量绝大多数信息。其中F1因子的主要载荷因子为Bi、Co、Cu、Zn元素,属于中温成矿元素组合,与Au的成矿作用不密切;F2因子的主要载荷因子为Au、Ag、As、Sb元素,为中低温成矿元素组合,表明Au的成矿作用与硫化物的关系密切,该组合代表了黄铁矿-毒砂阶段;F3因子的主要载荷因子为Pb、Mn、Mo元素,为中高温成矿元素组合,代表了可能与岩浆作用有关的高温成矿作用。

4.3 原生晕分带特征

原生晕研究样品的原始分析结果通过反复剔除

表3 阳山金矿葛条湾-安坝矿段原生晕因子分析正交旋转因子载荷矩阵

Table 3 Factor loading of R type factor analysis with orthogonal rotation in Getiaowan-Anba ore block in the Yangshan gold deposit

元素	因子		
	F1	F2	F3
Au	0.17	0.80	-0.09
Ag	-0.09	0.75	0.17
As	0.29	0.75	-0.08
Bi	0.83	0.03	-0.11
Co	0.88	0.13	0.28
Cu	0.71	0.24	0.08
Mn	0.15	-0.16	0.77
Mo	-0.20	0.13	0.79
Pb	0.25	0.02	0.80
Sb	0.04	0.77	-0.02
Zn	0.93	-0.01	0.05
方差贡献/%	27.68	22.59	18.14

特异值(大于平均值加3倍标准差或小于平均值减3倍标准差)后,使其基本服从正态或对数正态分布情况下,计算地球化学特征值,采用均值加1~2倍标准偏差作为异常下限值(Ca)。原生晕浓度分带以 $a^0\text{Ca} \sim a^1\text{Ca}$ 为外带, $a^1\text{Ca} \sim a^2\text{Ca}$ 为中带,大于 $a^2\text{Ca}$ 为内带。其中,a是系数,对于贵金属元素,a=3;其余元素,a=2(谢学锦,1979)。由于Au元素所计算异常下限值偏高,结合矿床主要矿种为金,故Au元素浓度分带参考《热液矿床岩石异常(原生晕)找矿》确定,其中,内带 $w(\text{Au})$ 元素为100 ng/g(工业品位的1/10),中带为25 ng/g(内带的1/2),外带为12 ng/g

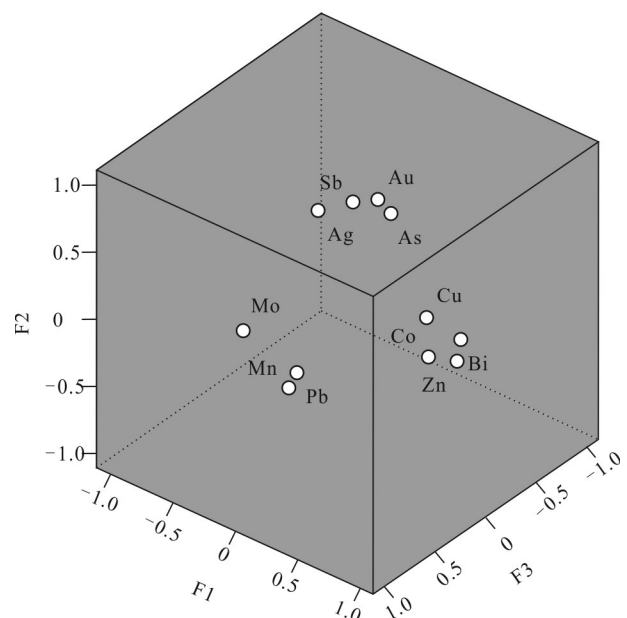


图4 阳山金矿30号勘探线成矿成晕元素F1、F2、F3因子元素分布图

Fig. 4 Distribution of F1, F2, F3 factors of primary geochemical halos along No.30 exploration line in the Yangshan gold deposit

(内带的1/4)。其余元素以Ca、2Ca、4Ca划分浓度分带,各成矿元素和伴生元素的异常分带界限值如表4所示。

从成矿成晕元素剖面异常浓度分带图(图5)可以看出,元素异常分布以条带状为主,与矿体的产出形态较为一致,基本上反映了成矿热液运移的趋势:

(1) 元素Au、As、Ag、Sb的浓度分带形态相似,发育较为完整的浓度分带,与金矿体的位置较为一致。在311号矿脉浅部(1900 m标高)附近,异常规模较小并向深部收缩,Au、As发育中带、外带和内带,Ag发育中带和外带,Sb以外带为主。浓集中心向矿脉上部延伸。在325号矿脉下部(1600 m标高以下),元素Au、Ag、As、Sb异常浓度分带与矿体较为一致,异常规模较大,发育外带、中带和内带,主要分布在325矿体及其上部,代表前缘晕元素组合,并具有向深部1300 m以下富集的趋势。

(2) 元素Co、Cu、Zn的异常在311号矿脉(1900 m标高)附近发育外带,且Cu具有中带和内带,Cu的异常浓集中心向矿脉上部延伸,向311号矿脉尾部逐渐消失;在325号矿脉中上部位(1600 m标高),元素Bi和Cu发育外带异常。同时,元素Bi、Co、Cu在1800 m标高的破碎带中亦发育外带异常。

(3) 元素Mo和Pb在浅部311号矿脉附近分带明显,Mo异常在325号矿脉上部(1600 m标高以上)也发育外带,Pb在325号脉体膨大处(1300 m标高以下)发育中带和外带,与金矿体向深部延伸的趋势一致。可能代表近矿晕元素,Mn主要以外带分布在325号矿脉的中上部(1600 m标高)附近和311号矿脉尾部。

由以上分析可初步认为As、Sb是矿体前缘晕元素,Ag、Pb是近矿或矿下晕元素,Bi、Co、Cu、Mo、Mn是尾晕元素。

5 葛条湾-安坝矿段深部找矿远景评价

5.1 原生晕分带序列

原生地球化学异常中元素的地球化学分带性在

评价矿体剥蚀深度、深部远景评价方面具有很大的实践意义(王长明等,2007;章永梅等,2010;孙莉等,2013;李遂民等,2016)。运用矿床原生晕特点及地质特征的模型化、数字化来进行统计分析已经成为金属矿床大比例尺定位、定量或统计预测的基础。目前原生晕轴向分带序列研究中常用的方法有分带指数法、分带性衬度系数法、重心法、比重指数法、概率值法、浓集指数法、金属量梯度法等(叶庆森,2014)。本次采用前苏联地球化学家C.B. 格里戈良分带指数法进行计算(Beus et al., 1977),将30号勘探线原生晕剖面自地表向下划分为6个中段:1900 m、1800 m、1700 m、1600 m、1500 m、1400 m,通过计算出各段元素的线金属量,然后进行标准化处理并相加,用各元素除以它们的和进而计算出分带指数(表5),每一元素分带指数的最大值所对应的高程即为该元素在元素分带序列中的位置。通过以上计算过程初步得出本次研究的原生晕剖面元素分带序列为:(Co+Cu+Pb)—Zn—(Bi+Mn)—(Mo+Sb)—(Ag+As+Au)。对于同一标高位置上出现多个元素分带指数最大值时,可根据变异性指数(G)和变异性指数梯度差(ΔG)原理可对同一中段的元素先后顺序进行确定,其中当2个以上元素的分带指数最大值同时位于剖面的最上截面或最下截面时,用变异性指数(G)来进一步确定它们的相对顺序位置,值大者排在相对靠前位置;当2个以上元素的分带指数最大值同时位于中部截面时,用变异性指数梯度差(ΔG)来确定相对顺序位置,值大者排在前面。通过以上方法进行进一步计算和划分,可以得出阳山金矿床30号勘探线原生晕轴向分带序列自上而下为:Pb—Co—Cu—Zn—Mn—Bi—Mo—Sb—Au—As—Ag。

中国不同类型、不同规模金矿床的轴向正向分带序列中,Hg、B、F、As、Sb、Ba等元素总是出现在矿体的前缘及矿体上部,Ag、Pb、Zn、Cu等元素总是与Au共同出现在矿体中部,Bi、Mo、Mn、Co、Ni等元素总是出现在矿体下部及尾晕(李惠等,1999)。可以看出,本次研究的原生晕剖面中具有反向分带序列:

表4 原生晕多金属元素浓度分带界限值

Table 4 Limit value of polymetallic element zonation of primary halo

含量分级	$w(\text{Au})/10^{-9}$	$w(\text{B})/10^{-6}$									
		Ag	As	Bi	Co	Cu	Mn	Mo	Pb	Sb	Zn
外带	12	0.1	111	0.5	20	30	600	1	30	20	114
中带	25	0.2	222	1.0	40	60	1200	2	60	40	228
内带	100	0.4	444	2.0	80	120	2400	4	120	80	456

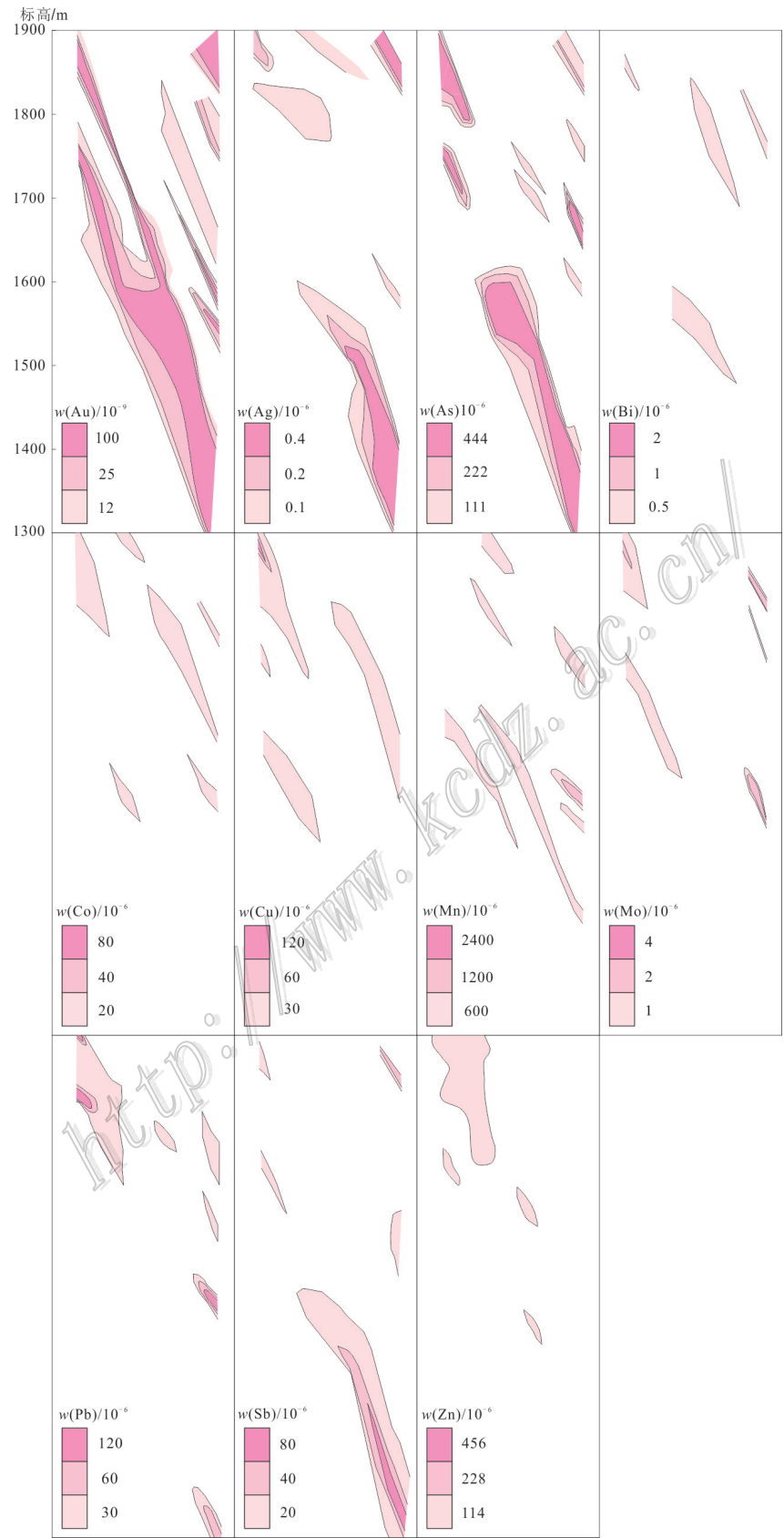


图5 阳山金矿30号勘探线成矿成晕元素异常浓度分带图
Fig. 5 Zonation map of primary geochemical halos along No.30 exploration line

表 5 30 号勘探线原生晕元素分带指数

Table 5 Zoning indexes of primary haloes along No. 30 exploration line

标高/m	Au	Ag	As	Bi	Co	Cu	Mn	Mo	Pb	Sb	Zn
1900	0.0032	0.0262	0.0140	0.0724	0.0814	0.1124	0.1776	0.2655	0.2119	0.0123	0.0230
1800	0.0035	0.0367	0.0113	0.1503	0.0705	0.1078	0.2305	0.2434	0.0909	0.0112	0.0438
1700	0.0013	0.0293	0.0263	0.1393	0.0583	0.0871	0.2009	0.2603	0.1291	0.0340	0.0340
1600	0.0234	0.0213	0.0482	0.1647	0.0674	0.1038	0.2699	0.1298	0.0951	0.0340	0.0424
1500	0.1085	0.0283	0.0321	0.1335	0.0465	0.0612	0.1556	0.2773	0.0851	0.0471	0.0248
1400	0.2752	0.0945	0.1594	0.0756	0.0363	0.0590	0.1099	0.0987	0.0288	0.0466	0.0158

1900 m 标高附近,311 号矿体以近矿晕和尾晕元素 Cu、Pb、Co 为主,前缘晕可能已被剥蚀,这与 311 号脉体在 1900 m 标高开始尖灭一致;1800 m 标高处,As 元素代表下部矿体 325 号矿脉的前缘晕;1700~1500 m 标高,Mn、Bi、Mo 元素代表矿体中下部,代表矿体尾晕;而 1400 m 标高,前缘晕元素 As 和近矿元素 Ag 出现在 Au 之后,表明深部又一次出现毒

砂-黄铁矿成矿阶段。同时也预示着 1400 m 标高以下具有一定的找矿潜力。通过以上分析,可以初步建立葛条湾-安坝矿段金矿床原生晕叠加理想模型图(图 6a)。

5.2 元素分带指数比值

以元素分带指数比值为基础,依据前缘晕元素组合的各元素分带指数累乘值与尾晕元素组合各

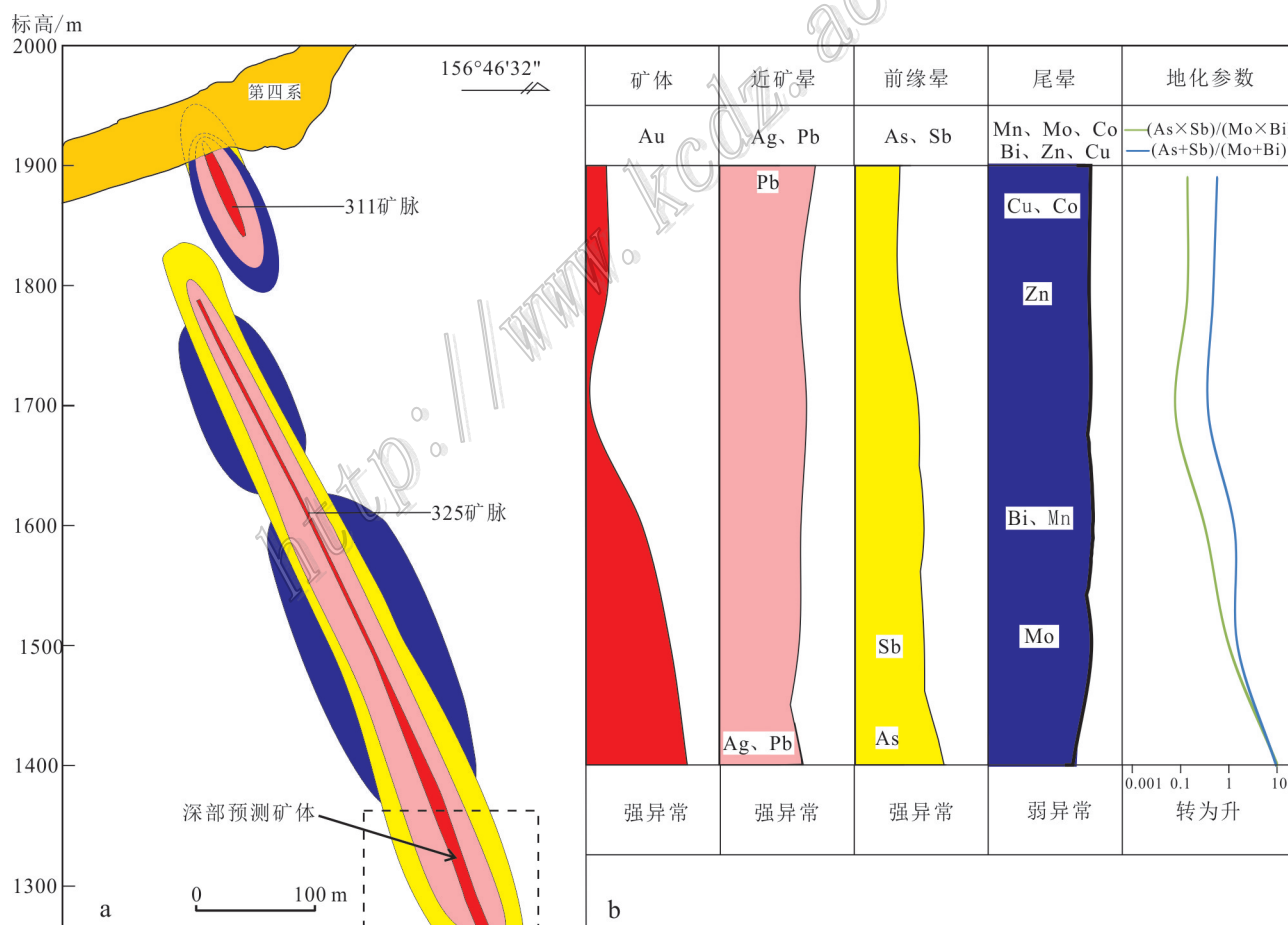


图 6 甘肃阳山金矿带葛条湾-安坝矿段原生晕叠加理想模式图(a)及元素组合分带指数和地化参数变化曲线图(b)

Fig. 6 Ideal zoning model of the primary dispersion halos(a) and Curve diagram of element combination zoning index and geochemical parameter (b) in Getiaowan-Anba ore block in the Yangshan gold deposit

元素分带指数累乘值之比,能够有效构建深部矿体资源潜力定量评价模型(刘崇明等,2010)。多元素比值方法是原生晕地球化学方法用来进行深部矿产预测的主要手段。

本次研究根据原生晕轴向分带序列,选择前缘晕特征元素(As、Sb)和尾晕特征元素(Mo、Bi)、应用元素分带指数累乘比值($As \times Sb / (Mo \times Bi)$)和累加比值($(As+Sb) / (Mo+Bi)$)值作为评价指

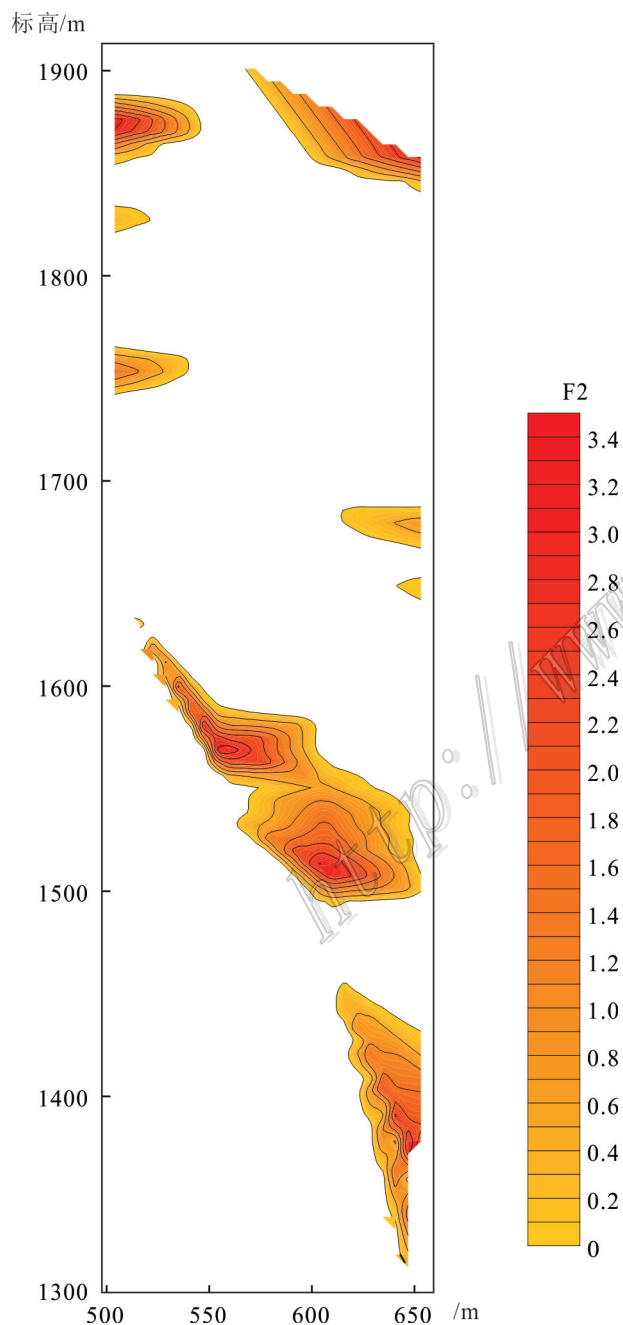


图7 F2因子得分等值线图

Fig. 7 Score contour diagram of Factor 2

标,该指标由浅入深表现为先降低-增高-降低-剧烈增高的震荡波动特征(图6b)。由于热液金矿床多由不同的成矿阶段叠加而来,这种不同成矿阶段会破坏单一阶段矿床原生晕参数在轴向上单一的升降规律,使其发生“转折”。大型金矿地化参数在轴向上往往有多个“转折”,如果元素对比值突然降低之后又突然升高,则在深部有发现新矿体的可能(李惠等,1999;陈永清等,2010),这种指标的突然升高,应是深部矿体前缘晕叠加其上部矿体的尾晕所致。元素分带指数在1400 m标高处的急剧升高,表明深部有良好的矿化前景。

5.3 因子得分分布特征

在因子分析中,因子得分是理想变量在各样品中的取值,其绝对值越高,说明该因子代表的地质过程在样品上的表现越强烈,F2因子代表Au、Ag、As、Sb元素组合,其得分高代表主要成矿地质作用的强弱程度。

由F2因子在剖面上的分布(图7)可以看出,在1400 m标高以下,F2因子的异常发育强烈,表明阳山金矿区葛条湾-安坝矿段深部Au有良好的找矿潜力。

6 结 论

(1) 通过对阳山金矿葛条湾-安坝矿段原生晕地球化学剖面的研究,该矿段As、Sb为前缘晕元素,Ag、Pb为近矿晕元素,Cu、Mo、Mn、Zn、Co、Bi为尾晕元素。金矿脉的原生晕具有反向原生晕分带序列特征:Mo—Co—Cu—Sb—Zn—Bi—Mn—Pb—Au—As—Ag。在1500 m标高附近,前缘晕与尾晕的共存可能是多期热液叠加的结果。

(2) 通过原生晕地球化学参数比值($As \times Sb / (Mo \times Bi)$)和($(As+Sb) / (Mo+Bi)$)和因子(F2)得分研究得出,该矿段深部有前缘晕和成矿元素在1400 m标高以下有进一步富集的趋势,表明矿体向深部延伸,或深部可能有盲矿体存在,表明阳山金矿区葛条湾-安坝矿段深部具有较好的找矿潜力。

致 谢 感谢中国地质调查局应用地质研究中心李建忠副总工程师对论文的写作提出的宝贵意见和建议。感谢审稿人提出中肯的修改意见和建议。

References

- Beus A A and Grigorian S V. 1977. Geochemical exploration methods for mineral deposit[M]. Illinois: Applied Publishing Ltd. 1-287.
- Chen Y J, Zhang J, Zhang F X, Franco P and Li C. 2004. Carlin and Carlin-like gold deposit in western Qinling Mountain and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. *Geological Review*, 50(2): 134-152(in Chinese with English abstract).
- Chen Y J. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, Central China[J]. *Geology in China*, 37(4): 854-865(in Chinese with English abstract).
- Chen Y Q, Han X L, Zhao H J, Cheng Z Z, Tang Y and Chen W. 2010. Characteristics of primary halo zonation and prediction pattern of deep orebody of the Huaobao Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 36(2): 236-246(in Chinese with English abstract).
- Dai Y P, Zhu Y D, Wang G h, Zhang L C, Tao H, Liu Y and Lü Y B. 2012. Microstructural characteristics of anchanghe-guanyinba fault zone in the yangshan gold deposit of Gansu Province and their geological significance[J]. *Geology in China*, 39(3): 729-739 (in Chinese with English abstract).
- Du Z T and Wu G G. 1988. Tectonic dynamics and tectonic-metallogenic dynamics of gold deposits in West Qinlin[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-145(in Chinese).
- Eilu P and Groves D I. 2001. Primary alteration and geochemical dispersion haloes of archaean orogenic gold deposits in the Yilgarn Craton: The pre-weathering scenario[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1(3): 183-200.
- Goldberg I S, Abranmson G Y A and Los V L. 2003. Depletion and enrichment of primary haloes: Their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3(3): 281-293.
- Li H, Zhang W H, Liu B L, Wang J C and Guo R D. 1999. 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*, 35(1): 32-35(in Chinese with English abstract).
- Li H, Zhang G Y and Yu B. 2006. Tectonic primary halo model and the prospecting effect during deep buried ore prospecting in gold deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 146(in Chinese with English abstract).
- Li Y Q, Zhang D H, Dai L, Yang N, Zhang T and Shi W Q. 2018. Primary geochemical haloes study of the possibly Carlin-like Dashui gold deposit for gold exploration in southern Gansu Province, Central China[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 19(1): 6-23.
- Liu C M. 2006. Progress in studies on primary halos of ore deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1528-1537(in Chinese with English abstract).
- Liu C M, Ma S M and Hu S Q. 2010. A study of primary halo exploration indexes for metallic ore deposits[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 34(6): 765-771(in Chinese with English abstract).
- Lei S B, Qi J Z and Han Y Y. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb ages of moderate-acid dykes and ore-forming epochs of Yangshan gold belt in Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 29(5): 869-880(in Chinese with English abstract).
- Liang J L, Sun W D, Nan Z L and Ding D J. 2015. Geology and geochemistry characteristics of Yangshan gold deposit and the occurrence of gold[M]. Beijing: Science Press. 1-93(in Chinese).
- Li J, Chen Y J, Li Q Z, Lai Y, Yang R Sm and Mao S D. 2007. Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan gold deposit, Gansu, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2144-2154 (in Chinese with English abstract).
- Li J, Chen Y J, Li Q Z, Mao S D, Qin Y, Guo J H, N Z L and Yang R S. 2008. The C-H-O isotope systematics of the Yangshan gold deposit, Gansu and its implication for the ore-fluid origin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 817-826(in Chinese with English abstract).
- Li N, Yang L Q, Zhang C, Zhang J, Lei S B, Wang H T, Wang H W and Gao X. 2012. Sulfur isotope characteristics of the Yangshan gold belt, West Qinling: Constraints on ore-forming environment and material source[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1577-1587 (in Chinese with English abstract).
- Li N, Deng J, Zhang Z C, Liu X W and Liu J. 2019. Gold occurrence in the Yangshan gold belt in the West Qinling Orogen and its implications for ore-forming processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(5): 84-95(in Chinese with English abstract).
- Li J Z, Yu J Y, Hu Q X, Nan Z L, Mao S D and Wang Y M. 2011. Exploration progress and prospecting potential of Yangshan gold belt, Gansu Province[J]. *Gold Science and Technology*, 9(6): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Li S M, Li Y C, Han Y C, Kong L H, Zhao S M, Wang J T and Wang J G. 2016. The characteristics of vertical primary halo zoning in the Louli gold deposit, Handan City, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 43(5): 1637-1644(in Chinese with English abstract).
- Ma Q. 2016. Characteristics of fluid inclusions and the mineralization process of the Anba gold deposit in the Yangshan gold-ore zone of the West Qinling[J]. *Geology and Exploration*, 52(4): 601-613(in Chinese with English abstract).
- Pei X Z, Zhang G W, Lai S C, Li Y, Chen L and Gao M. 2002. Main geological features of the Mianlue tectonic belt on the southern margin of the West Qinling[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8-9): 486-494 (in Chinese with English abstract).
- Qi J Z, Yuan S S, Li L, Sun B, Guo J H, Li Z H, Fan Y X, Liu W and Gao Q B. 2003. Geological features and ore-controlling factors of the Yangshan super large gold deposit, Gansu Province, China[J]. *Geological Review*, 49(1): 85-92(in Chinese with English abstract).
- Qi J Z, Li L, Yuan S S, Liu Z J, Liu D Y, Wang Y B and Li Z H. 2005. A SHRIMP U-Pb chronological study of zircons from quartz veins of Yangshan gold deposit, Gansu Province[J]. *Mineral De-*

- posits, 24(2) : 141-150(in Chinese with English abstract).
- Qi J Z, Yang G C, Li L, Fan Y X and Liu W. 2006. Isotope geochemical, chronology and genesis of the Yangshan gold deposit, Gansu[J]. *Geology in China*, 33(6): 1345-1353(in Chinese with English abstract).
- Shao Y. 1997. Lithogeochemical (primary halos) methods for Hydrothermal mineral deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-142(in Chinese).
- Schmid S and Taylor W R. 2009. Significance of carbonaceous shales and vanadium geochemical haloes in the exploration for rock phosphate deposits in the southern Georgina Basin, Central Australia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(1): 91-92.
- Sun L, Xiao K Y and Gao Y. 2013. Primary halos characteristics of Caixiashan Pb-Zn deposit and prediction for deep mineralization[J]. *Earth Science Edition*, 43(4): 1179-1189(in Chinese with English abstract).
- Sun Z M. 2016. Analysis on characteristics of geochemical anomaly in the primary halo of Kaqia gold deposit in Wushi County, Xinjiang[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 31(2): 259-264(in Chinese with English abstract).
- Wang C M, Deng J, Zhang S T, Huang S M and Li K H. 2007. Characteristic of primary halo and prediction of deep orebody in the Huanxiangwa gold deposit, Henan[J]. *Geology and Prospecting*, 43(1) : 58-63(in Chinese with English abstract).
- Wang C M, Carranza E J M, Zhang S T, Zhang J, Liu X J, Zhang D, Sun X and Duan C J. 2013. Characterization of primary geochemical haloes for gold exploration at the Huangxiangwa gold deposit, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 124: 40-58.
- Xie X J. 1979. Regional geochemical exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House. 146(in Chinese with English abstract).
- Yan F Z, Qi J Z and Guo J H. 2010. Geology and exploration of Yangshan gold deposit in Gansu Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-236(in Chinese).
- Yao Y Z, Gong E P, Liang J H and Yang H Y. 2005. Application of R-factor analysis in handing mixed samples of primary halo: A case study of Fengning silver deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 41(2): 51-55(in Chinese with English abstract).
- Yang G C and Qi J Z. 2008. Geological characteristics and ore forming material source of Yangshan gold deposit, Gansu[J]. *Gold Science and Technology*, 16(4): 20-24(in Chinese with English abstract).
- Yang R S, Chen Y J, Zhang F X, Li Z H, Mao S D, Liu H J and Zhao C H. 2006. Chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gansu Province and their geologic and metallogenic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2603-2610(in Chinese with English abstract).
- Yang R S, Chen Y J and Xie J L. 2009. X-ray photoelectron spectroscopic study on arsenian pyrite and arsenopyrite from the Yangshan gold deposit, Gansu Province(North China) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2791-2800(in Chinese with English abstract).
- Ye Q S. 2014. A review of the computing methods on vertical zoning sequence of indicator elements[J]. *Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(3): 335-341(in Chinese with English abstract).
- Ye H G, Zhang D H, Yu J P, Fan X X, Zhao J C, Zhang T and Feng Z D. 2018. Geochemical characteristics of primary halo and deep orebody prediction in the Yingzuishan gold deposit, North Qilian[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(6): 1163-1172(in Chinese with English abstract).
- Dong Y P, Zhang G W, Franz Neubauer, Liu X M, Johann, Christoph Genser Hauzenberger. 2011. Tectonic evolution of the Qinling Orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 213-237.
- Zhang L, Yang R S and Mao S D. 2009. Sr and Pb isotopic feature and ore-forming material source of the Yangshan gold deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11) : 2811-2822(in Chinese with English abstract).
- Zhao J, Liang, J L, Ni S J and Xiang Q R. 2016. In situ sulfur isotopic composition analysis of Au-bearing pyrites by using Nano-SIMS in Yangshan gold deposit, Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 35(4) : 653-662(in Chinese with English abstract).
- Zhao J, Liang J L and Han B. 2017. The component analyses of Au-bearing minerals and the occurrence of gold in Shuiyindong and Yangshan Carlin-type gold deposits, China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 33(1): 24-31(in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Dong Y P, Lai, S C, Guo A L, Meng Q R, Liu S F, Cheng S Y, Yao A P, Zhang Z Q, Pei X Z and Li S Z. 2003. Mian-lue tectonic zone and Mian-lue suture zone in the southern margin of the Dabie-Qin orogenic belt[J]. *Science in China (Series D)*, 33(12) : 1122-1135(in Chinese).
- Zhao P D, Hu W L and Li Z J. 1994. Statistics on deposits projecting[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House. 260-276(in Chinese).
- Zhang Y M, Gu X X, Cheng W B, Dong S Y, Jing L B, Wang L Q, Zhang Y, Sheng Y, Huang Z Q and Zhang X S. 2010. The geochemical features of primary halo and the evaluation of deep mineralization prospect of Liubagou gold deposit, Inner Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 209-221(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Z, Zhang S, Wu M A, Xie X, Lü B and Wei G H. 2020. Geological and primary geochemical halo prospecting model for Nihe porphyrite iron deposit in Luzong basin, Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 39(2): 305-325(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈衍景, 张静, 张复新, Franco P, 李超. 2004. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. *地质评论*, 50(2): 134-152.
- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. *中国地质*, 37(4): 854-865.
- 陈永清, 韩学林, 赵红娟. 2010. 内蒙花敖包特 Pb-Zn-Ag 多金属矿床

- 原生晕分带特征与深部矿体预测模型[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 36(2): 236-246.
- 代堰鎔, 朱玉娣, 王根厚, 张连昌, 陶宏, 刘洋, 吕亚博. 2012. 甘肃阳山金矿区安昌河-观音坝断裂带显微构造特征及地质意义[J]. 中国地质, 39(3): 729-739.
- 杜子图, 吴淦国. 1998. 西秦岭地区构造体系及金成矿构造动力学[M]. 北京: 地质出版社. 1-145.
- 刘崇明. 2006. 金属矿床原生晕研究进展[J]. 地质学报, 80(10): 1528-1537.
- 刘崇明, 马生明, 胡树起. 2010. 金属矿床原生晕勘查指标[J]. 物探与化探, 34(6): 765-771.
- 雷时斌, 齐金忠, 朝银银. 2010. 甘肃阳山金矿带中酸性岩脉成岩年龄与成矿时代[J]. 矿床地质, 29(5): 86-880.
- 梁金龙, 孙卫东, 南争路, 丁德建. 2015. 阳山金矿地质地球化学特征及金赋存状态[M]. 第一版. 北京: 科学出版社. 1-93.
- 李惠, 张文华, 刘宝林, 王敬臣, 郭瑞栋. 1999. 中国主要类型金矿床的原生晕轴向分带学列研究及其应用准则[J]. 地质与勘探, 35(1): 32-35.
- 李惠, 张国义, 禹斌. 2006. 金矿区深部盲矿预测的构造叠加晕模型及找矿效果[M]. 北京: 地质出版社. 146.
- 李晶, 陈衍景, 李强之, 赖勇, 杨荣生, 毛世东. 2007. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型[J]. 岩石学报, 23(9): 2144-2154.
- 李晶, 陈衍景, 李强之, 毛世东, 秦艳, 郭俊华, 南争路, 杨荣生. 2008. 甘肃阳山金矿碳氢氧同位素与成矿流体来源[J]. 岩石学报, 24(4): 817-826.
- 李楠, 杨立强, 张闯, 张静, 雷时斌, 王恒涛, 王宏伟, 高雪. 2012. 西秦岭阳山金矿带硫同位素特征: 成矿环境与物质来源约束[J]. 岩石学报, 28(5): 1577-1587.
- 李楠, 邓军, 张志超, 刘兴武, 刘基. 2019. 阳山金矿带金的赋存状态及其对成矿过程的指示意义[J]. 地学前缘, 26(5): 84-95.
- 李建忠, 余金元, 胡琴霞, 南争路, 毛世东, 王以明. 2011. 甘肃阳山金矿带地质勘查进展与找矿远景[J]. 黄金科学技术, 19(6): 1-6.
- 李随民, 李玉成, 韩玉丑, 孔令海, 赵淑梅, 王京涛, 王俊革. 2016. 邯郸类里金矿床原生晕垂向分带特征研究[J]. 中国地质, 43(5): 1637-1644.
- 马倩. 2016. 西秦岭阳山金矿带安坝金矿床流体包裹体特征及矿床成因[J]. 地质与勘探, 52(4): 601-613.
- 裴先治, 张国伟, 赖绍聪, 李勇, 陈亮, 高明. 2002. 西秦岭南缘勉略构造带主要地质特征[J]. 地质通报, 21(8-9): 486-494.
- 齐金忠, 袁士松, 李莉, 孙斌, 郭俊华, 李志宏, 范永香, 刘伟, 高秋斌. 2003. 甘肃省文县阳山特大型金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 地质评论, 49(1): 85-92.
- 齐金忠, 李莉, 袁士松, 刘志杰, 刘敦一, 王彦斌, 李志宏. 2005. 甘肃省阳山金矿带石英脉中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. 矿床地质, 24(2): 141-150.
- 齐金忠, 杨贵才, 李莉, 范永香, 刘伟. 2006. 甘肃省阳山金矿床稳定同位素地球化学和成矿年代学及矿床成因[J]. 中国地质, 33(6): 1345-1353.
- 邵越. 1997. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-142.
- 孙莉, 肖克炎, 高阳. 2013. 彩霞山铅锌矿原生晕地球化学特征及深部矿产评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1179-1189.
- 孙志明. 2016. 新疆乌什县卡恰金矿原生晕地球化学异常特征分析[J]. 地质找矿论丛, 31(2): 259-264.
- 王长明, 邓军, 张寿庭, 黄守民, 李克寒. 2007. 河南崔香洼金矿原生晕地球化学特征和深部找矿预测[J]. 地质与勘探, 43(1): 58-63.
- 谢学锦. 1979. 区域化探[M]. 北京: 地质出版社. 131-132.
- 阎凤增, 齐金忠, 郭俊华. 2010. 甘肃省阳山金矿地质与勘查[M]. 北京: 地质出版社. 1-236.
- 姚玉增, 巩恩普, 梁俊红, 杨洪英, 崔显德. 2005. R型因子分析在处理混杂原生晕样品中的应用: 以河北丰宁银矿为例[J]. 地质与勘探, 41(2): 51-55.
- 杨贵才, 齐金忠. 2008. 甘肃省文县阳山金矿床地质特征及成矿物质来源[J]. 黄金科学技术, 16(4): 20-24.
- 杨荣生, 陈衍景, 张复新, 李志宏, 毛世东, 刘红杰, 赵成海. 2006. 甘肃阳山金矿独居石 Th-U-Pb 化学年龄及其地质和成矿意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2603-2610.
- 杨荣生, 陈衍景, 谢景林. 2009. 甘肃阳山金矿床含砷黄铁矿及毒砂的 XPX 研究[J]. 岩石学报, 25(11): 2791-2800.
- 叶庆森. 2014. 指示元素垂向分带学列计算方法述评[J]. 物探化探计算技术, 36(3): 335-341.
- 叶红刚, 张德会, 余君鹏, 樊新祥, 赵吉昌, 张涛, 冯占东. 2018. 北祁连鹰嘴山金矿床原生晕地球化学特征及深部矿体预测[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(6): 1163-1172.
- 张莉, 杨荣生, 毛世东. 2009. 阳山金矿床锆铅同位素组成特征与成矿物质来源[J]. 岩石学报, 25(11): 2811-2822.
- 赵静, 梁金龙, 倪师军, 向启荣. 2016. 甘肃阳山金矿载金黄铁矿硫同位素 Nano-SIMS 原位分析[J]. 矿床地质, 35(4): 653-662.
- 赵静, 梁金龙, 韩波. 2017. 水银洞金矿与阳山金矿载金黄铁矿成分分析及金的赋存状态[J]. 科技通报, 33(1): 24-31.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少锋, 程顺友, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 2003. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学, 33(12): 1122-1135.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 1994. 矿床统计预测[M]. 北京: 地质出版社. 260-275.
- 章永梅, 顾雪祥, 程文斌, 董树义, 景亮兵, 王立强, 张岩, 沈阳, 黄志全, 张兴顺. 2010. 内蒙古柳坝沟金矿床原生晕地球化学特征及深部找矿远景评价[J]. 地学前缘, 17(2): 209-221.
- 张赞赞, 张舒, 吴明安, 写熹, 吕博, 魏国辉. 2020. 安徽庐枞盆地泥河玢岩型铁矿床地质-原生晕地球化学找矿模型[J]. 矿床地质, 39(2): 305-325.