

白云金矿床 60 号脉带原生晕分带特征 及深部含矿性评价*

王伟¹, 刘福兴¹, 郭强^{1**}, 刘阳¹, 谢常君¹, 崔添淇¹, 杨小达¹, 邱金柱¹, 李太阳²

(1 辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司, 辽宁 丹东 118000; 2 辽宁招金白云黄金矿业股份有限公司, 辽宁 丹东 118000)

摘要 白云金矿床产于华北地台东端辽东-吉南裂谷带内, 是古元古代变质岩地层中的代表性矿床, 60 号脉带是现有埋藏最深、规模最大的矿脉群, 矿体赋存在黑云母片岩、黑云母变粒岩与大理岩接触界面附近, 主要受近东西向层间滑脱构造控制, 最大延长 1240 m, 倾斜延深 600 m, 平均品位 3.82×10^{-6} 。为了评价 60 号脉的深部找矿潜力, 进而指导深部找矿方向, 本次工作采集了 60 号脉带坑道和钻孔原生晕样品, 研究其地球化学分带特征, 进一步评价其深部含矿性及找矿方向。原生晕分带特征研究表明, 白云金矿的前缘晕主要元素为 Hg、Sb、As; 近矿晕元素为 Au、Cu、Pb、Zn; 尾晕元素为 Co、Mn、Mo。运用重心法确定白云金矿垂向分带为(由上到下): Cr-Mn-Ni-F-B-Sn-As—W-Au-Mo-Hg-Cu-Sb-Pb—Ag-Co-Zn-Bi, 结合元素分带特征, 构建了白云金矿床 60 号脉带原生晕模式, 并建立了前缘晕与尾晕累加比值的地球化学参数。在矿区浅部, 出现前、尾晕叠加, 对应现已控制的矿体; 在深部, 再一次出现前、尾晕叠加, 且前缘晕元素异常较强的现象, 预示着深部存在盲矿体。通过原生晕分带特征研究, 预测了 4 个深部找矿靶区, 分别在 056 勘探线与 064 勘探线之间的 -400 m 标高、-800 m 标高、-1000 m 标高、-1200 m 标高范围内。

关键词 地质学; 原生晕; 前缘晕; 含矿性评价; 靶区预测; 白云金矿床

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Characteristics of primary halo and evaluation of deep mineralization along No. 60 vein zone of Baiyun gold deposit

WANG Wei¹, LIU FuXing¹, GUO Qiang¹, LIU Yang¹, XIE ChangJun¹, CUI TianQi¹, YANG XiaoDa¹, QIU JinZhu¹ and LI TaiYang²

(1 No. 103 Branch Non-ferrous Geological of Liaoning Province Co., Ltd., Dandong 118000, Liaoning, China; 2 Liaoning Zhaojin Baiyun Gold Mining Co., Ltd., Dandong 118000, Liaoning, China)

Abstract

The Baiyun gold deposit occurs in the Liaodong-Jinnan rift zone at the eastern end of the North China platform, being a representative deposit in the Paleoproterozoic metamorphic strata in eastern Liaoning area. The No. 60 vein zone is the buried largest orebody in this area. It occurs near the contact interface between biotite schist, biotite granulite and marble, and is mainly controlled by the nearly EW-trending interlayer sliding structure. The maximum extension is 1240 m, the dip extension is 600 m, and the average grade is 3.82×10^{-6} . In order

* 本文得到国家重点研发计划“辽东胶东矿集区深部矿产勘查与增储示范”(编号:2018YFC0603805)、中国地质调查局项目“辽宁省青城子矿集区找矿预测”(编号:DD2016005201)、“辽宁省白云地区深部资源调查”(编号:DD2016005236)、“辽宁省白云矿集区深部找矿预测”(编号:DD2019057001)、辽宁省自然资源科技创新项目 2019(11)、辽宁省本级地质勘查项目“辽宁省凤城市白云金矿外围金矿预查”共同资助

第一作者简介 王伟,男,1981年,硕士,正高级工程师,主要从事矿产勘查、评价及找矿预测研究工作。Email:13887933@qq.com

** 通讯作者 郭强,男,1986年,学士,工程师,主要从事化探勘查工作。Email:122708247@qq.com

收稿日期 2020-06-08; 改回日期 2020-11-11。张绮玲编辑。

to evaluate the deep ore-prospecting potential of No. 60 vein and guide deep ore-prospecting, the authors collected primary halo samples along the tunnel and drill hole of No. 60 vein to study its geochemical zoning characteristics and further evaluate its deep ore-bearing property and ore-prospecting direction. The study of the characteristics of the primary halos shows that the main elements of the leading halos in the Baiyun gold deposit are Hg, Sb and As, the near-halo elements are Au, Cu, Pb and Zn, and the rear halo elements are Co, Mn and Mo. The center of the gravity method was used to determine the vertical zoning of The Baiyun gold deposit, which is in downward order of CR-Mn-Ni-F-B-SN-AS-W-Au-Mo-Cu-SB-PB-AG-Co-Zn-BI, the primary halo model of the 60 pulse zone of the Baiyun gold deposit was constructed in combination with the zonal characteristics of elements, and the geochemical parameters of the accumulated ratio of the leading and trailing halos were established. In the shallow part of the mining area, the front and tail halos are superimposed upon each other, corresponding to the orebodies that are now under control. In the depth, the superposition of the fore and rear halos and the strong anomaly of elements in the leading halos appear again, indicating the existence of blind orebodies in the depth. Through the study of the characteristics of the primary halo zoning, four deep prospecting target areas were delineated, which are within the range of -400m elevation, -800 m elevation, -1000 m elevation and -1200 m elevation respectively between No. 056 and No.064 exploration lines.

Keywords: geology, primary halo, leading edge halo, evaluation of mineralization, target prediction, Baiyun gold deposit

白云金矿床产在华北地台东端辽东-吉南裂谷带青城子矿集区内,是古元古代变质岩地层中的代表性矿床,是青城子矿集区最大的金矿床,矿体主要赋存于辽河群盖县组片岩与大理岩接触部位片岩内。该矿床目前已发现矿体76条,已探获金资源量超过36 t。专家学者提出白云金矿床东部及西部找矿空间巨大(魏军等,2019;王伟等,2020)。

20世纪50年代以来,在辽东-吉南成矿带西端的青城子铅锌矿区运用原生晕方法指导找矿探获新盲矿体,60年代在长江中下游砂卡岩型矿床应用该方法取得了较好效果。刘崇民(2006)统计原生晕预测深部盲矿体的成功率达84%以上。李惠等(2010)在白云金矿利用构造叠加晕方法预测1号、2号矿脉,提出预测靶区9个,预测金金属量13.31 t,经后期钻孔验证的靶区有5个,均取得了较好的成果,探获金金属量10.92 t。吴二等(2017)利用烃类组分与原生晕的结合,建立白云矿床1号、2号脉的原生晕分带序列,为矿区及外围提供了找矿方法。虽然预测成功率较高,但1号脉、2号脉埋深均在400 m以浅,而白云金矿床开采深度已达500 m。白云金矿床勘查深度在800 m左右,800 m以浅勘查程度相对较高,成矿预测仅以钻孔见矿效果、蚀变标志为手段,预测手段较为单一。为进一步寻找深部矿体,本文通过开展地球化学原生晕测量和分带研究,进一步细化该矿床的原生晕分带特征,对深部矿体开展成矿预测工作,辅

以2000 m钻孔验证进行再预测,构建深部地球化学特征分带模型,并对深部含矿性予以评价。

1 地质概况

1.1 区域地质概况

白云金矿床为大型蚀变岩+石英脉型金矿床(魏军等,2019;王伟,2015),矿床位于华北克拉通东北部辽吉古元古造山带(辽吉裂谷)内。辽吉裂谷北缘以辽阳-通化断裂为界,与龙岗地块(太古宙克拉通基底)相接,南部由庄河附近向南经石城岛、长山岛与胶东古元古代地层相连或与狼林地块(太古宙克拉通基底)相接,在该带内发育大型、超大型多金属矿床(王玉往等,2017)。

区域上出露古元古界辽河岩群变质岩系,主要为辽河群浪子山岩组、里尔峪岩组、高家峪岩组、大石桥岩组和盖县岩组,属于一套火山喷发的优地槽相陆间裂谷沉积建造,位于该套变质岩系层位产出大中型铅锌矿、金银矿、铁矿以及非金属菱镁矿、硼矿、石墨矿等。在南北向挤压应力作用下,区域内形成一系列近东西向复式褶皱,线性构造主要有与近东西向褶皱同向的断裂,以及NE向和NW向构造区内构造。岩浆岩主要为古元古代侵入岩、三叠纪侵入岩、侏罗纪侵入岩和早白垩侵入岩(Yu et al., 2009;王玉往等,2017)。

1.2 矿床地质特征

白云金矿床主要产在辽河岩群盖县岩组及大石桥岩组的碎屑岩建造与碳酸盐岩建造接触界面附近。矿区内构造较为复杂,主要发育NWW向系列褶皱和韧-脆性推覆构造(李德东,2019),北西走向韧-脆性推覆构造控制着矿体的产出,北西走向断裂为成矿后构造。岩浆岩不发育,主要以煌斑岩、石英斑岩、闪长岩、花岗斑岩等脉岩产出

(图1)。

1.2.1 矿体地质特征

矿区内主矿体有1号、2号、10号、11-4号以及60号脉带。绝大部分矿体走向近东西,南倾,倾角30°~50°,向西侧伏,侧伏角35°~70°,延长100~1240 m,斜深100~570 m,厚0.5~12.48 m,品位 1.0×10^{-6} ~ 9.77×10^{-6} 。大部分发育在“硅钙面”,即盖县组片岩、变粒岩与大理岩接触界面附近,在056~064线“硅钙面”

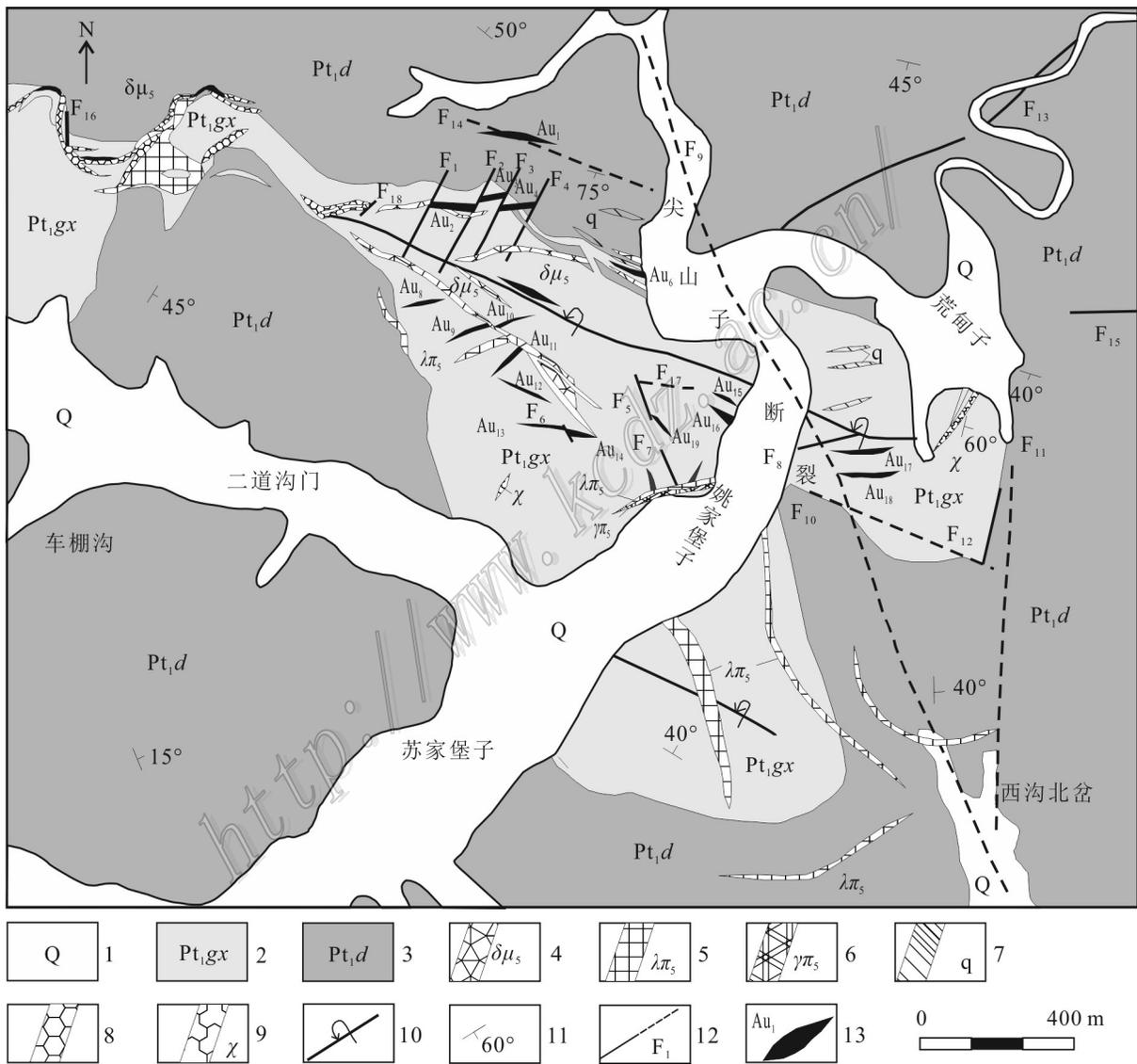


图1 白云金矿地质简图(据王伟等,2018修改)

1—第四系;2—辽河群盖县组;3—辽河群大石桥组;4—闪长玢岩;5—石英斑岩;6—花岗斑岩;7—石英脉;8—钾化带;9—煌斑岩;10—倒转向斜轴;11—片理产状;12—断裂及编号;13—石英脉型矿体及编号

Fig. 1 Geological map of the Baiyun gold deposit (modified after Wang et al., 2018)

1—Quaternary; 2—Gaixian Formation of Liaohe Group; 3—Dashiqiao Formation of Liaohe Group; 4—Diorite porphyrite; 5—Quartz porphyry; 6—Granite-porphry; 7—Quartz vein; 8—Potassic zone; 9—Lamprophyre; 10—Reversed syncline axis; 11—Schistosity attitude; 12—Fracture and its serial number; 13—Quartz-vein type orebody and its serial number

厚度大,延深稳定。

60号脉带是白云金矿埋藏最深、规模最大的矿脉群,产出于盖县组片岩、变粒岩与大理岩互层带中硅钾蚀变带内,由10条矿体组成,包括3条主脉,分别为60-1、60-2、60-3。在区内它们集中分布于048~076线之间,赋存于+200 m~400 m标高之内,脉带走向近东西,南倾,倾角 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$,延长1240 m,斜深500 m,向西南侧伏,侧伏角 70° ,斜延深仍有地段未封闭。

白云金矿在垂向上已有2个赋矿空间,上部在200 m~600 m之间(1号、2号、10号、11-4号等矿体);下部在+200 m~400 m之间(60号脉带矿体)(图6)。

1.2.2 蚀变特征

白云矿床围岩蚀变类型主要有硅化、钾长石化、黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化、褪色化等(王伟,2015)。蚀变具有分带特征,平面上北部为强硅化、黄铁矿化、绢云母化;南部钾长石化较强,中心为钾长石化和硅化、黄铁矿化,边部为绢云母化、绿泥石化和褪色化。在垂向上,上部为弱钾长石化、强硅化和黄铁矿化,下部为钾长石化、黄铁矿化和弱硅化。

1.2.3 矿物组合特征

矿石矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、自然金、银金矿、自然银、自然铋、磁铁矿、斑铜矿、黝铜矿、辉铜矿、辉钼矿、针铁矿、锡石、毒砂等;脉石矿物主要有石英、钾长石、正长石、方解石等。地表氧化矿石主要金属矿物为褐铁矿、银金矿,脉石矿物为石英、长石等。

金矿物赋存状态,主要以包裹金、间隙金、裂隙金形式分布,主要载体金属矿物为黄铁矿。晶隙金占23.5%;裂隙金占17.7%;游离金占53%;包裹金占5.8%。

1.2.4 成矿阶段划分

根据穿插关系和矿物组合特征,可以将白云金矿成矿阶段从早到晚划分3个阶段,分别为钾长石-黄铁矿-石英阶段(I阶段)、石英-硫化物-自然金阶段(II阶段)和石英-方解石阶段(III阶段)。不同成矿阶段具有不同的蚀变矿物组合。

钾长石-黄铁矿-石英阶段:蚀变矿物组合有钾长石、石英和黄铁矿。钾长石与石英在空间上不完全重合,钾长石呈现灰白色、红色。石英呈现灰白色,粒度较大,黄铁矿多为立方体自形或半自形晶,晶面平整,粒度变化不大,多呈稀疏浸染状分布。

石英-硫化物-自然金阶段:为成矿主要阶段,主

要蚀变矿物组合是绢云母-白云母-石英-黄铁矿等,还可见少量黄铜矿、闪锌矿等硫化物。此阶段的黄铁矿粒度变细,多呈他形粒状,自形程度更差,较大者常破碎。石英呈烟灰色,该阶段石英与硫化物呈脉状、细脉-网脉状分布,叠加在早阶段钾长石化蚀变岩或围岩中,形成硅钾蚀变岩。

石英-方解石阶段:成矿晚阶段矿物组合为石英、方解石和黄铁矿,可见石英-方解石脉切穿硅钾蚀变岩和围岩,大量碳酸盐矿物出现,硫化物仅见少量黄铁矿。

2 原生晕地球化学特征

2.1 样品采集与分析

样品主要采自白云荒甸子矿段160 m、100 m、40 m、-20 m、-80 m中段以及钻孔ZK056-5、ZK056-6、ZK056-7、ZK056-8、ZK056-9、ZK064-3、ZK064-4、ZK064-5、ZK064-6、ZK072-2、ZK072-4以及2000 m深孔ZK062-15。坑道按1~5 m以连续拣块法采集组合样品,钻孔围岩按5~20 m连续拣块法采集组合样品,矿体按1~3 m或更短距离以连续拣块法采集组合样品,共计采集2111件。在分析中国典型金矿床以及白云金矿床原生晕组合特征的基础之上(刘崇民,2010;李惠等,2005;吴二等,2017),确定分析元素为Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Bi、Mo、Co、Ni、Cr、W、Sn、B、Hg、Mn、F、Sb共18个元素。

本次样品测试工作是在辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司实验室完成,其中Au元素采用泡沫塑料富集-石墨炉原子吸收光谱法;Ag、Sn、B元素采用交流电弧-发射光谱法;Hg元素采用蒸气发生-冷原子荧光光谱法;As、Bi、Sb采用氢化物发生-原子荧光光谱法;F元素采用离子选择电极法;W、Mo元素采用碱熔-催化波极谱法;Cu、Pb、Zn、Co、Ni、Mn、Cr元素采用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定。测试的18种元素分析方法的准确度、精密度均达到要求。

2.2 元素组合特征

2.2.1 最佳指示元素组合

李惠等(2010)认为白云金矿床的最佳指示元素组合为Au、Ag、Pb、As、Sb、Hg、B、W、Mo、Co、Mn,本次研究将矿体、大理岩、硅化带、煌斑岩、矽线石云母片岩中的元素含量进行了统计(表1),根据60号脉带各元素含量分析结果,确定最佳指示元素组合为Au、Ag、Pb、As、Bi、Hg、Sb、Co、Mn、Mo。

表1 地质体元素含量统计表

Table 1 Statistic table of element content in geological body

地质体	元素	样品数/个	平均值(X)	中位数(M)	标准离差(S)	变化系数(Cv)	偏度(γ)	最大值	最小值
矿体	Au	45	1235	340	1680	1	0.2	5000	1
	Bi	45	0.55	0.34	1.06	1.91	0.3	7.08	0.15
	Hg	45	0.05	0.04	0.01	0.28	0.1	0.08	0.03
	As	45	24	6	42	2	4	162	2
	Co	45	12	11	6	1	0.6	41	6
	Cr	45	70.5	68.2	9.75	0.14	0.3	92.7	58.8
	Cu	45	67	26	157	2	0.3	1022	7
	Mn	45	285	261	140	0	0.9	782	101
	Ni	45	39.87	35.7	10.08	0.25	0.2	67.4	30.1
	Pb	45	25	15	41	2	1.1	267	5
	Zn	45	70.78	49.6	91.94	1.3	0.9	631	22.2
	Sn	45	4.07	4.03	0.65	0.16	0.9	5.32	3.07
	Mo	45	2.43	2.38	0.96	0.39	1	7.5	1.49
	Ag	45	2.37	0.53	4.35	1.84	1.2	19.05	0.07
	B	45	84	64	58	1	0.5	210	16
	F	45	720	672	254	0	0.3	1755	315
W	45	8	6	5	1	0.1	22	1	
Sb	45	3.11	0.67	8.4	2.71	0.4	50	0.31	
大理岩	Au	148	6.63	1.07	27.36	4.13	5.8	23.8	309
	Bi	148	0.24	0.19	0.12	0.51	0.2	0.1	1.15
	Hg	148	0.04	0.04	0.01	0.3	0.3	0.1	0.08
	As	148	13.96	3.66	32.38	2.32	5.5	12.8	200
	Co	148	9.27	8.66	4.55	0.49	0.8	0.4	29.5
	Cr	148	76.52	72.75	19.68	0.26	0.6	0.2	210
	Cu	148	19.29	16.9	8.91	0.46	0.3	0.1	46.5
	Mn	148	392	226	437	1	1.8	2.1	2654
	Ni	148	43	38	14	0	0.1	0	95
	Pb	148	13	12	5	0	0.9	0.4	38
	Zn	148	47	45	26	1	1.1	0.6	265
	Sn	148	8	5	9	1	7.1	7.5	42
	Mo	148	3	3	3	1	3.1	2.6	23
	Ag	148	0.7	0.2	2.2	3.2	2.3	7.3	20
	B	148	76	47	93	1	0.3	0.3	872
	F	148	1135	982	534	0	0.5	0.2	3409
W	148	2	1	3	1	3.5	4.8	19	
Sb	148	1.2	0.3	4.6	3.9	10.2	39.3	50	
硅化带	Au	92	31.16	6.09	71.63	2.3	3.8	8.7	500
	Bi	92	0.31	0.21	0.22	0.7	0.8	0.6	1.28
	Hg	92	0.05	0.04	0.01	0.29	1.1	0.3	0.08
	As	92	30.67	5.25	55.72	1.82	2.3	4.2	200
	Co	92	10.96	10.5	6.07	0.55	0.6	0.3	38.2
	Cr	92	82.17	75.65	36.18	0.44	0.5	0.2	354
	Cu	92	21.63	16.65	15.51	0.72	0.7	0.5	95.5
	Mn	92	359	264	268	1	0.5	0.4	1452
	Ni	92	43	40	14	0	0.6	0.2	88

注:平均值、中位数、最大值、最小值元素单位:Au为 10^{-9} 、其他元素 10^{-6} 。

续表 1

Continued Table 1

地质体	元素	样品数/个	平均值(X)	中位数(M)	标准离差(S)	变化系数(Cv)	偏度(γ)	最大值	最小值
硅化带	Pb	92	48	16	190	4	0.04	0.2	1402
	Zn	92	112	55	384	3	0.5	1.7	3612
	Sn	92	5	4	6	1	0.6	0.7	43
	Mo	92	2.74	2.39	1.31	0.48	0.03	0	9.87
	Ag	92	1	0.24	2.57	2.58	2.2	5.7	18.69
	B	92	79	69	60	1	0.6	0.5	276
	F	92	744	766	296	0	0.5	0.2	1826
	W	92	3.92	2.12	4.34	1.11	0.9	1	27.2
	Sb	92	2.11	0.46	7.45	3.54	2.6	9.2	50
煌斑岩	Au	21	2.8	0.98	4.07	1.46	1.3	1.9	16.5
	Bi	21	0.25	0.19	0.16	0.63	2.1	1.3	0.82
	Hg	21	0.04	0.04	0.01	0.22	0.1	0	0.06
	As	21	4.16	2.41	5.03	1.21	0.7	0.8	25.4
	Co	21	19.65	16.7	11.23	0.57	0.2	0.1	46.2
	Cr	21	132	98	76	1	0.2	0.1	310
	Cu	21	29	29	13	0	0.7	0.3	48
	Mn	21	410	294	215	1	0.7	0.4	765
	Ni	21	78	56	48	1	0.9	0.6	216
	Pb	21	16	13	10	1	0.3	0.2	46
	Zn	21	61.71	61.9	15.58	0.25	0.05	0	92.6
	Sn	21	5.1	4.2	4.7	0.92	0.5	0.5	25.39
	Mo	21	2.46	2.12	1.15	0.47	0.4	0.2	6.94
	Ag	21	0.2	0.15	0.14	0.71	0.02	0	0.57
	B	21	119	70	208	2	0.3	0.5	1000
	F	21	1316	1291	509	0	0.3	0.1	2477
	W	21	2.13	1.38	1.55	0.73	0.2	0.1	6.41
Sb	21	0.53	0.31	0.79	1.5	0.5	0.8	3.92	
矽线石云母片岩	Au	526	83	5	421	5.1	18.1	91.6	5000
	Bi	526	0.37	0.32	0.23	0.6	0.7	0.4	2.21
	Hg	526	0.04	0.04	0.01	0.3	0.1	0	0.08
	As	526	17	3	42	2.4	15.9	38.5	200
	Co	526	15.07	14.2	5.99	0.4	0.005	0	46.1
	Cr	526	83	79	31	0.4	1	0.4	576
	Cu	526	33	28	25	0.7	0.1	0.1	356
	Mn	526	318	266	188	0.6	0.6	0.4	2564
	Ni	526	46	41	19	0.4	0.2	0.1	315
	Pb	526	23	17	58	2.6	0.5	1.3	1254
	Zn	526	79	68	95	1.2	0.9	1.1	1889
	Sn	526	4.16	4.09	1.49	0.4	2.7	1	33.3
	Mo	526	2.5	2.33	1.22	0.5	2	1	20.84
	Ag	526	0.59	0.17	1.91	3.2	8.3	26.6	20
	B	526	77	52	84	1.1	0.9	1	1000
	F	526	836	801	245	0.3	0.4	0.1	2189
	W	526	4	2	13	3.5	1.4	4.9	299
Sb	526	1.05	0.38	3.37	3.2	11.1	35.5	50	

从表1可以看出,在金矿体中Au、As、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、B、F元素的标准离差较高,Au、Bi、As、Co、Cu、Pb、Ag、Sb元素的变化系数较高,说明在矿体中Au、As、Cu、Pb元素相对不稳定,变化波动较大、较频繁。Ag、Sb元素变化系数较高,变化频率较大。

大理岩中Au、As、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、Sn、B、F元素的标准离差较高,Au、As、Ag、Sb元素的变化系数较高,说明在白云地区大理岩中Au、As元素相对不稳定,变化波动较大、较频繁。Ag、Sb元素变化系数较高,变化频率较大。

硅化带中Au、As、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、B、F元素的标准离差较高,Au、As、Pb、Zn、Ag、Sb元素的变化系数较高,说明在硅化带中Au、As、Pb、Zn元素相对不稳定,变化波动较大、较频繁。Ag、Sb元素变化系数较高,变化频率较大。

煌斑岩中Au、As、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、B、F元素的标准离差较高,Au、As、B元素的变化系数较高,说明在煌斑岩中Au、As元素相对不稳定,变化波动较大较频繁。Ag、Sb元素变化系数较高,变化频率较大。

在矽线石云母片岩中Au、As、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、B、F元素的标准离差较高,Au、As、Pb、Ag、W、Sb元素的变化系数较高(表1),说明在矽线石云母片岩中Au、As、Pb元素相对不稳定,变化波动较大较大。

从元素的平均值可以看出,Sn、Mo主要分布在大理岩中,Au、Bi、Cu、Ag、W、Sb在矿体中较高,As、Pb、Zn元素在硅化带中分布较高,Co、Cr、Mn、Ni、B、F在煌斑岩中分布较高,Co、Cu、W元素在大理岩中最低,Mn、Sn、Mo元素在矿体中分布最低。

2.2.2 R型聚类分析

R型聚类分析是从统计学角度,根据元素在成矿过程中地球化学行为相似程度,划分不同级别的类或群,通过R型聚类分析研究,可以分析元素相关性,划分元素组合并分析其特征,有助于划分远程指示元素、近矿元素和尾晕元素。根据白云金矿床岩、矿石成矿成晕元素分析结果,对全区18个元素进行R型聚类分析(图2),横轴为元素相关系数 γ ,在 $\gamma=0.231$ 的相似水平上,元素明显分为5个群组(图2),即①Cr、Ni、Co、Mn、F;②Au、Bi;③As、Ag、Cu、Pb、Zn、Sb;④W;⑤Sn、B、Mo。

5个群组元素相关性较好,在空间分布上有较好

的联系:①组元素分布吻合,主要为亲铁元素,属中高温阶段元素,代表了热液活动的惰性组合,可能代表了一组与矿区内的基性或超基性岩有关的元素组合;②组元素为热液金矿床近矿元素,Au与黄铁矿关系较为密切,Bi主要以络阴离子形式与阳离子结合形成硫盐,两种元素均与硫离子有一定关系;③组元素主要都以硫化物形式沉淀富集,是硫化物成矿阶段的产物,多产生于矿体附近;④组W元素为高温热液元素,与Au的相关系数为0.062,与成矿后岩浆热液活动有关;⑤组元素离成矿元素较远,属中高温元素,Sn、Mo以硫化物形式沉淀富集,是另一硫化物形成阶段的产物,应为矿体外围元素。在 $\gamma=0.531$ 的相似水平上,As、Ag、Cu、Pb、Zn、Sb之间的亲缘关系反映出Au的成矿是伴随着多金属硫化物的形成而富集。

3 原生晕元素分带研究

3.1 原生晕浓度分带

异常是各种元素组合而成,相同矿床类型具有不同的矿床元素组合,而在不同元素组合的同时,每一种元素作为单独的个体又有着各自的异常存在特征。一般而言,矿体周围不同指示元素原生晕强度、范围在空间上会有较规律的变化(Ross et al., 1998)。这种现象成为原生晕的组分分带,这是原生晕的主要特征之一(孙莉等, 2013)。浓度分带指同一组分(元素)的含量自矿化中心或异常中心由内向外有规律变化(降低)的现象。一般将元素浓度分为外、中、内3个带,分别以元素的1倍异常(C_A)、2倍异常($2C_A$)、4倍异常($4C_A$)为异常下限。本次通过对元素异常的整理,对各元素的背景值(C_0)、标准离差(S)进行计算,然后再根据公式:

$$\text{异常下限}(C_A)=\text{背景值}(C_0)\pm 2\times\text{标准离差}(S)$$

利用迭代剔除法,反复剔除不在数据范围内的数据,直到所有数据都在范围之内,最后确定异常下限,见表2。

依据异常浓度分带制作元素异常剖面图(图3),该图显示以下特征:

(1) As、Sb元素在矿体头部浓度分带清晰,具有外、中和内3个带,分带结构明晰,表明As、Sb元素在矿体头部异常强度高,Hg元素在矿体头部,但仅有外带。在中下部以及尾部的矿体异常规模变小,表

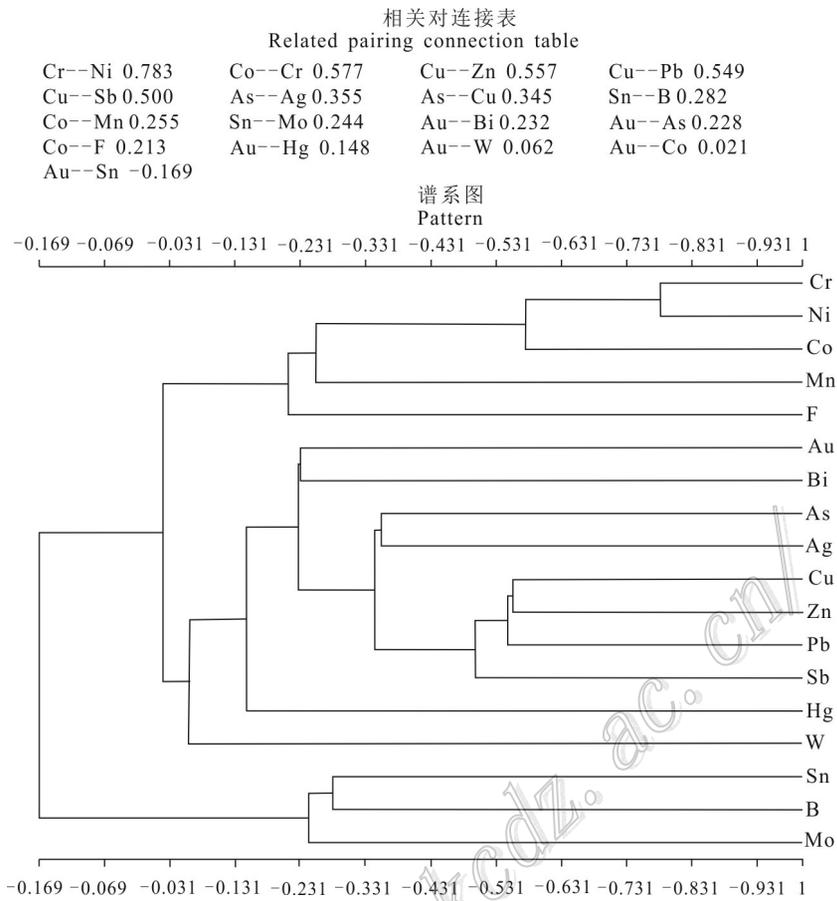


图2 R型聚类分析图
Fig. 2 R-type cluster analysis diagram

表2 元素浓度分带一览表
Table 2 List of elemental concentration zoning

异常下限	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg	Co	Cr	Ni	Cu+Pb+Zn	As+Sb+Hg	Co+Cr+Ni
C _A	40	25	80	10	5	0.05	18	100	60	0.4	0.3	0.6
2C _A	80	50	160	20	10	0.1	36	200	120	0.8	0.6	1.2
4C _A	160	100	320	40	20	0.2	72	400	240	1.6	1.2	2.4
异常下限	Au	Ag	W	F	Mo	Mn	Sn	Bi	B			
C _A	25	0.5	5	1100	3	600	5	0.5	120			
2C _A	50	1	10	2200	6	1200	10	1	240			
4C _A	100	2	20	4400	12	2400	20	2	480			

注: Au的单位为10⁻⁹, 其余元素为10⁻⁶。

现为原生晕异常内带变窄或无内带, 且较为分散, 这些元素可视为头晕元素;

(2) Au、Ag、Pb元素在矿体上、中、下均有强异常, 其中Au和Ag元素浓度分带结构完整, 且异常内带发育。Pb元素异常在矿体中、下部出现, 异常强度随矿体深度的增加呈减少趋势;

(3) Mn、Co、Mo元素在矿体中下部和尾部有异

常。Mo元素在矿体上、中、下部均有异常, 但在下部及尾部异常出现内带异常且异常规模大, Co、Mn元素仅在矿体中、下部有异常, 异常强度及规模较弱, 仅出现中、外带异常无内带异常。根据上述分析, 结合原生晕分布特征及其与矿体的关系, 定性确立前缘元素为As、Hg、Sb, 近矿晕元素为Au、Ag、Pb, 尾晕元素为Mn、Co、Mo;

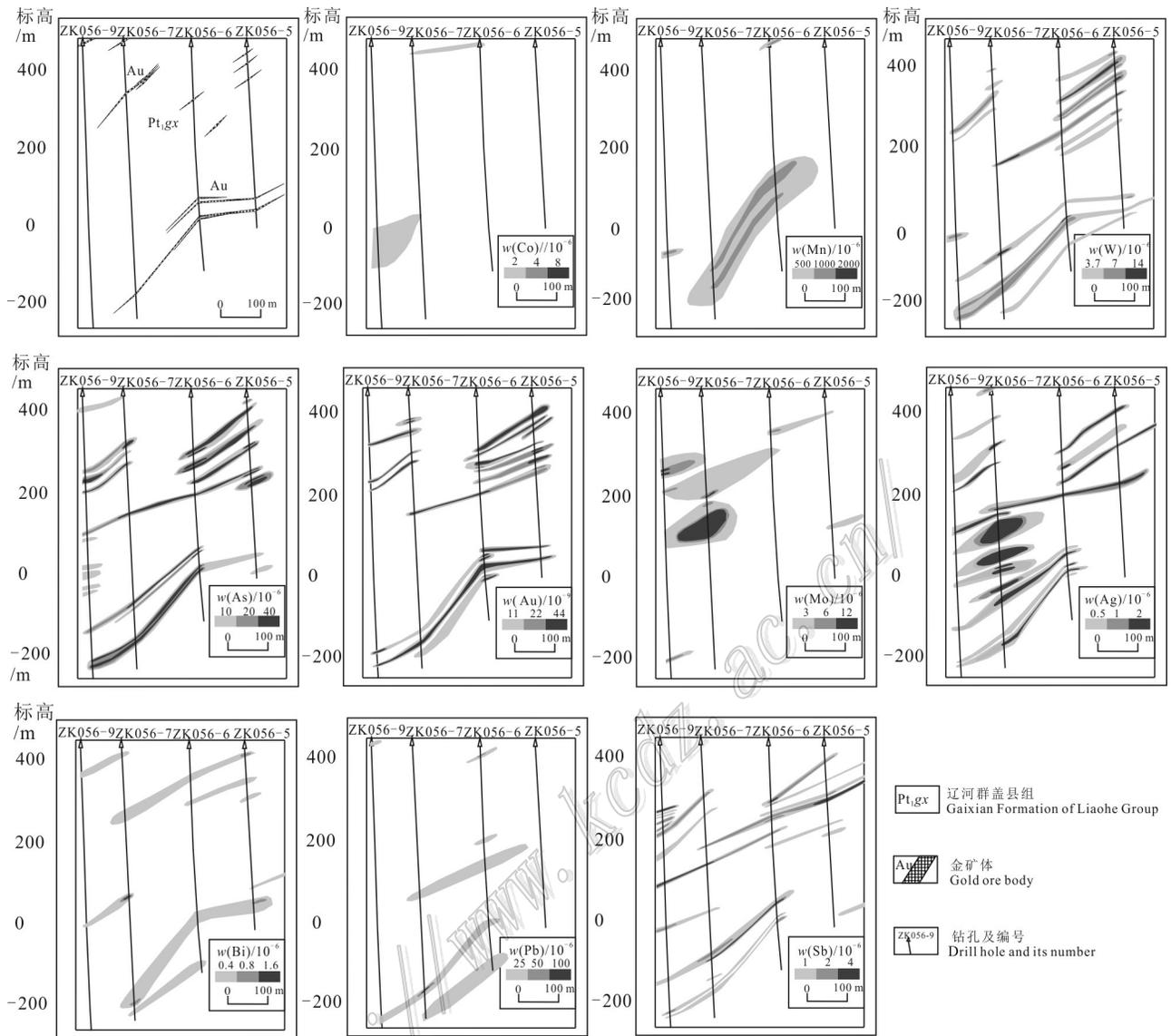


图3 056号勘探线成矿成晕元素浓度分带

Fig. 3 Zonation of primary halo from the geological section along No. 056 exploration line

(4) 对前缘晕、近矿晕、尾晕元素分别进行累加,结果显示前缘晕元素主要为中内带异常,主要分布于矿体尾部,近矿晕元素为中、内带异常,主要分布在矿体中,尾晕元素累加为外带异常,分布于矿体尾部。对前缘晕元素与尾晕元素进行累加比得到异常为中内带异常,分布于矿体尾部,说明矿体尾部以前缘晕元素分布较明显。上述元素能够不同程度的指示盲矿体的存在 (Beaudoin et al., 1987)。

3.2 原生晕垂向分带序列

原生晕分带性是矿床原生晕的最重要特性之一 (Grigoryan, 1974),原生晕轴向分带序列的确定是原

生晕分带研究的重要内容(朴寿成等,1994)。C·B·戈里格良提出分带指数确定分带序列,取得到了一定效果(晁会霞等,2006;Chen et al., 1998;杨怀辉等,2007)。朴寿成等(1994)提出分带指数计算方法,利用元素含量或元素含量在一个中段中所占的百分比的最大值来确定元素在分带序列中的基本位置,并推出重心法确定垂向分带序列。重心法得到了广泛应用并取得了较好的找矿效果(代力,2016;欧阳平宇等,2019)。

李惠等(2010)对白云金矿床1号脉、2号脉进行分析研究,得出白云金矿床垂向分带从上至下为: Hg、Sb (B、F、I、Ba)、As→Pb→Zn、Ag→Au、Cu→

Mo、Bi、Mn、Co、Ni、Sn。本次研究根据白云金矿床160 m、100 m、40 m、-20 m、-80 m中段中191个坑道样品计算出各个中段的线金属量(表3),并计算每个元素在空间上的异常浓集重心,以浓集重心的高低(远近)排出分带序列。

重心法计算公式为:

$$H_j = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ij} \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n M_{ij}}$$

式中, M_{ij} 为第*i*中段、第*j*元素的线金属量, h_i 为第*i*中段的标高, H_j 为第*j*元素的异常浓度重心。由 H_j 大小得出分带序列。得出最终的分带结果为:Cr-Mn-Ni-F-B-Sn-As—W-Au-Mo-Hg-Cu-Sb-Pb—Ag-Co-Zn-Bi,结果显示具有“反分带”的特征。“反分带”的特征一般很难用一次成矿或一个主成矿作用形成的原生晕来解释,因此,李惠等(2006)通过研究大量热液型金矿床,提出了原生晕叠加晕和构造叠加晕。其头部为Cr-Mn-Ni-F-B-Sn-As,既有Mn尾晕元素,也有As等前缘晕元素,这是上、下相邻的2个矿体的头部与尾部的反映。中部元素W-Au-Mo-Hg-Cu-Pb,既有近矿晕Cu、Pb元素,亦有Hg、Sb前缘晕元素,也有尾晕Mo元素,近矿元素与前缘元素、尾晕的叠合,说明本矿床为多期次成矿;尾部元素为Ag-Co-Zn-Bi,既有近矿晕Ag、Zn、Bi元素,也有尾晕元素

Co,在尾部存在近矿晕、尾晕元素,说明矿床为多期次成矿。

3.3 原生晕成矿成晕模式

白云金矿床60号脉带严格受层间硅钾破碎蚀变带的控制,具有多期多阶段成矿特征,根据上文分析的地球化学特征和矿床地质特征,结合前人的研究成果,建立了白云金矿原生晕地球化学模型(图4)。空间上60号脉带呈现串珠状,60号脉带内每个矿体有自己的前缘晕(Hg、Sb、As)、近矿晕(Au、Ag、Cu、Pb、Zn)和尾晕(Co、Mn、Mo)。同时,又组成了60号脉带的总体前缘晕和尾晕,每个矿体原生晕规模都小于总体前、尾晕,下部矿体前缘晕与上部矿体的尾晕叠加或者叠加一部分,前、尾晕共存是对深部进行盲矿预测的重要依据。近矿晕:近矿晕元素为Au、Cu、Pb、Zn,在矿体的中部出现中、内带异常,向两侧逐渐减弱;前缘晕:主要元素为Hg、Sb、As,在矿体的头尾显示强烈,为中、内带异常;尾晕:矿体尾晕元素主要为Co、Mn、Mo元素,分布在矿体头尾两侧,多为外带异常;轴向地化参数为 $(As+Hg+Sb)/(Co+Mn+Mo)$ 元素累加比值,矿体前缘该比值较大,后逐渐减小,然后又增大(表4)。

60号脉带地球化学参数值从上到下,有几个标高连续下降或上升,突然反转,符合李惠等(1999)研究的轴向地化参数变化模式,指示深部还有盲矿体,向下延伸较大。

表3 各中段元素线金属量

Table 3 Elemental metal content at each level

标高/m	Au	Bi	Hg	As	Co	Cr	Cu	Mn	Ni
160	94609.0	0.8	0.02	149.2	69.5	1906.5	1167.8	6736.3	753.1
100	12930.0	11.4	0.09	2694.4	14.5	937.9	675.9	8477.5	482.7
40	34401.0	1.4	0.07	3758.7	49.7	141.3	9545.3	3167.6	559.6
-20	40270.0	15.0	0.27	2615.0	110.8	74.7	636.7	541.0	145.7
-80	108329.2	42.3	0.06	789.2	221.0	140.3	5826.4	1865.0	176.1
标高/m	Pb	Zn	Sn	Mo	Ag	B	F	W	Sb
160	198.1	449.0	26.3	0.5	72.2	125.3	7054.2	90.0	63.2
100	254.7	143.2	488.9	204.8	55.5	1823.4	5922.2	4.7	210.7
40	13871.2	9374.3	81.7	38.3	123.0	75.0	4815.2	37.2	825.9
-20	3528.6	5654.0	508.0	376.0	346.8	1600.0	5845.4	53.3	739.9
-80	8900.4	11312	52.3	56.8	280.5	53.9	4231.6	85.2	487.6

注: Au单位为 10^{-9} ,其余元素为 10^{-6} 。

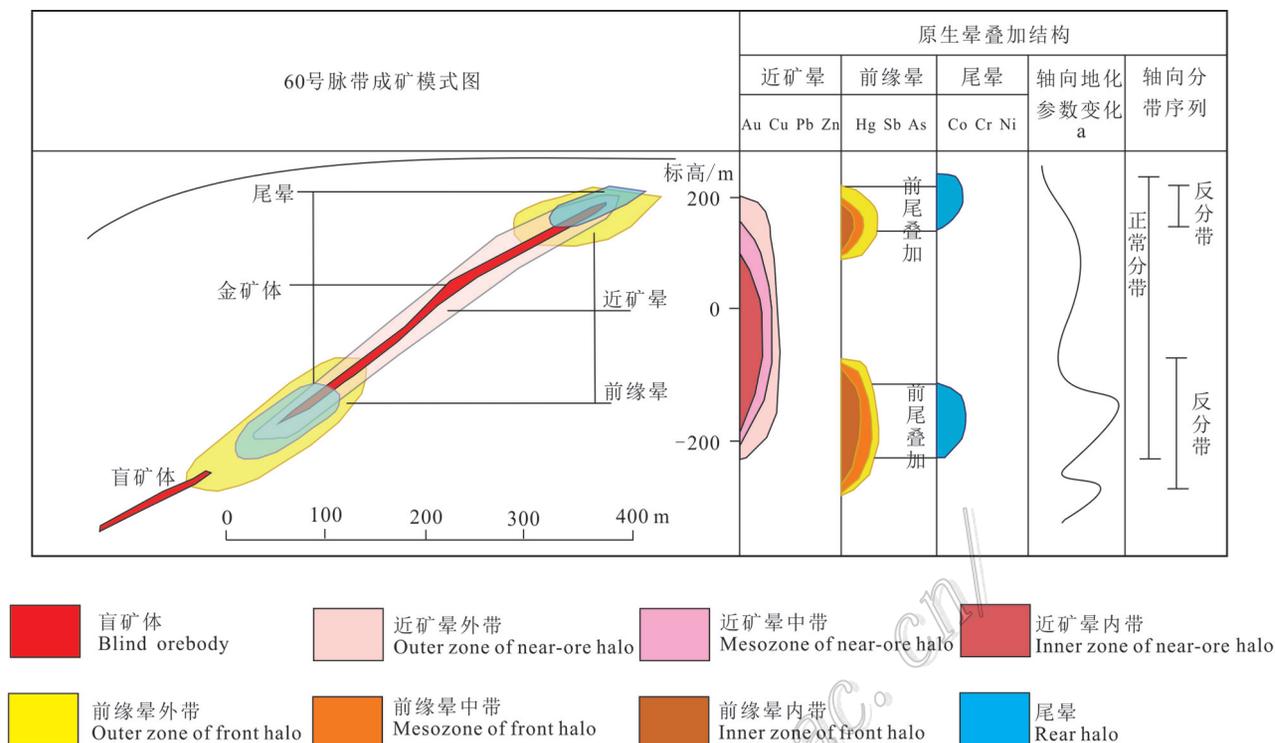


图4 白云金矿床成矿成晕模式图

Fig. 4 Model of metallogenic and halo formation in the Baiyun gold deposit

表4 前缘晕/尾晕元素累加比值表

Table 4 Element accumulation ratios of front halo/rear halo

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
标高/m	142.1	118.4	93.3	72.6	60.3	50.6	2.3	-97.8	-111	-132.6	-151.2	-161.4	-171.4	-181.4	-218.1	-223.2
(As+Sb+Hg)/ (Co+Mn+Mo)比值	0.5	1.09	1.05	2.57	2.16	1.02	1.57	0.35	0.6	0.53	2.08	7.36	1.81	1	4.2	1.64

4 矿床深部含矿性评价与靶区预测

4.1 深部含矿性评价

判定深部异常的含矿性主要有元素浓度梯度、元素对比值和元素的活动性等参数(谢学锦,1979;邵跃,1997),可得出以下几点指示:

(1) 在矿体头部出现As、Sb中内带异常,在矿体中Au、Pb、Cu等近矿元素为中内带异常,在矿体尾部尾晕元素Co、Cr、Ni又出现明显显示,说明该部位的元素分布完全符合原生晕的元素排列,而在矿体尾部又出现了As、Sb元素的内中带异常,说明矿体深部具有盲矿体的存在,而且距该矿体不远;

(2) 在该矿体的头部As、Sb头晕元素及Hg前缘

晕元素显示明显,同时又出现尾晕元素Co、Cr、Ni与其叠加,随后产生矿体,而在矿体尾部又产生头晕、尾晕元素相叠加现象,并且Au元素出现高值,表示与深部隐伏矿体的距离非常近;

(3) 邵跃(1997)采用了元素的累加指数或累乘指数来评价异常,取得了较好效果。Nigel(1999)在Ni-Cu-PGE硫化物矿区应用 $[(Ni / Cr) \times (Cu / Zn)]$ 元素比值进行评价,从背景向矿化增加了相当大的规模。对前缘元素As、Hg、Sb与尾晕元素Co、Mn、Mo进行累加比计算,图5中 $(As+Hg+B)/(Co+Mn+Mo)$ 比值,可表示前缘晕元素比较尾晕元素浓集程度,该值越大,深部存在矿体的可能性越大,反之深部矿体存在的可能性越小(孙华山等,2008;张传昱等,2013)。从矿头→矿中→矿尾→尾晕的分布规律是高→中→高→中,发生转折指示叠加,指示深部

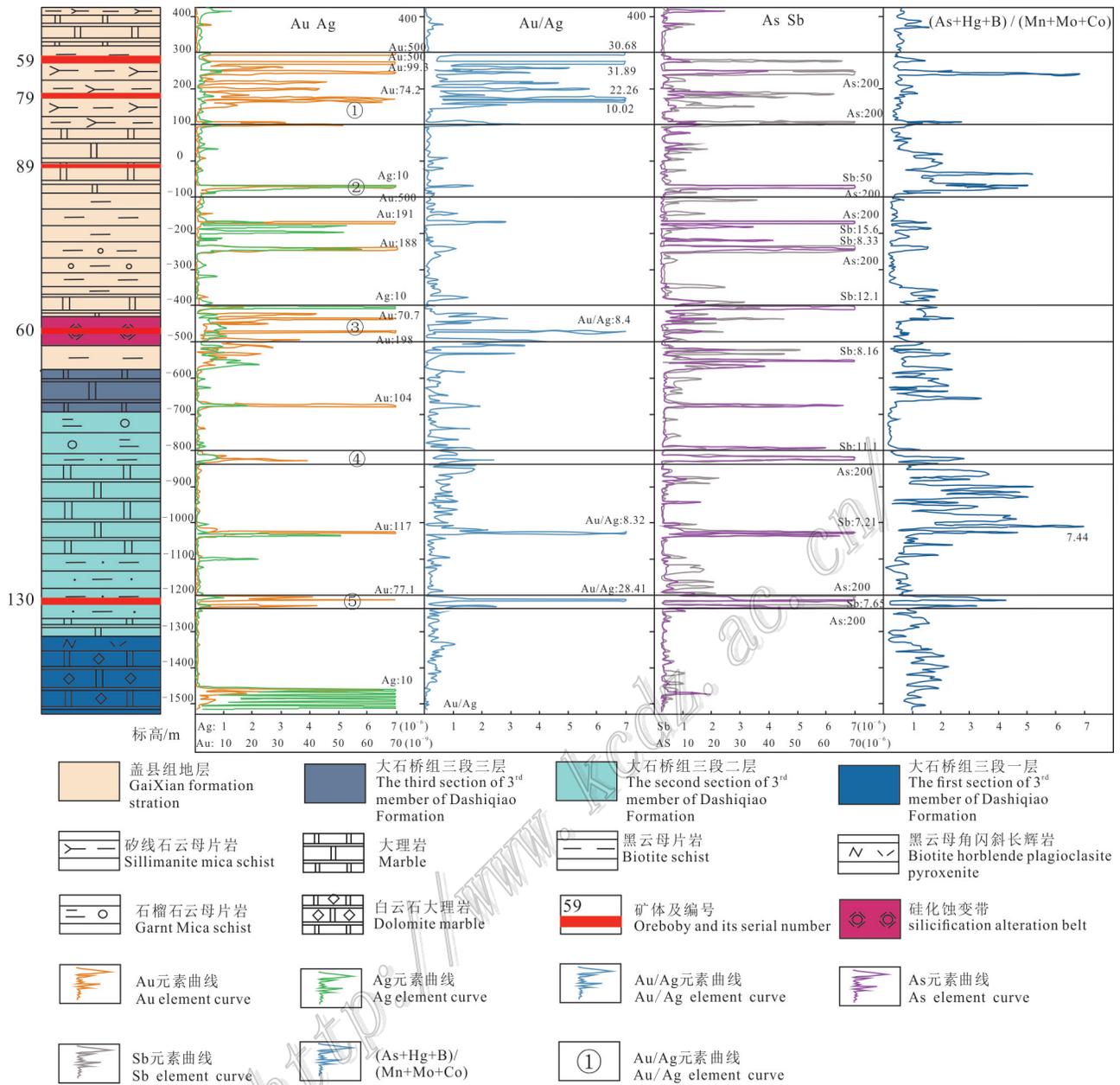


图5 ZK062-5号钻孔原生晕含量变化曲线图

Fig. 5 Contour map of the original halo of ZK062-5 drill hole

有盲矿体存在。

4.2 靶区预测

4.2.1 1000 m以浅靶区选取

“硅钙面”(黑云片岩、变粒岩与大理岩接触界面)发育厚大且稳定的056~068线为最佳地段,60号脉带在062线矿体未封闭,且硅钾蚀变带在深部未有减弱趋势;Au元素在056线及064线均具有内中外带,显示矿化强度较大;056线原生晕轴向分带呈现“反向”分带(头部晕元素出现在底部),前缘晕、尾

晕元素比 $(As+Hg+B)/(Co+Mn+Mo)$ 较大,预示深部有盲矿体。选定056线~062线标高为-300 m~-400 m为浅部找矿靶区(图6)。

4.2.2 靶区预测与验证

依据上述靶区,选择062线ZK062-5孔进行验证,单孔钻进2002 m,并采集原生晕样品440件,统计分析后对数据处理,制作ZK062-5垂向元素分布等值线图,将前缘晕元素As、Sb,近矿晕元素Au、Ag和Au/Ag、前缘元素及尾晕元素累加比的垂向等值

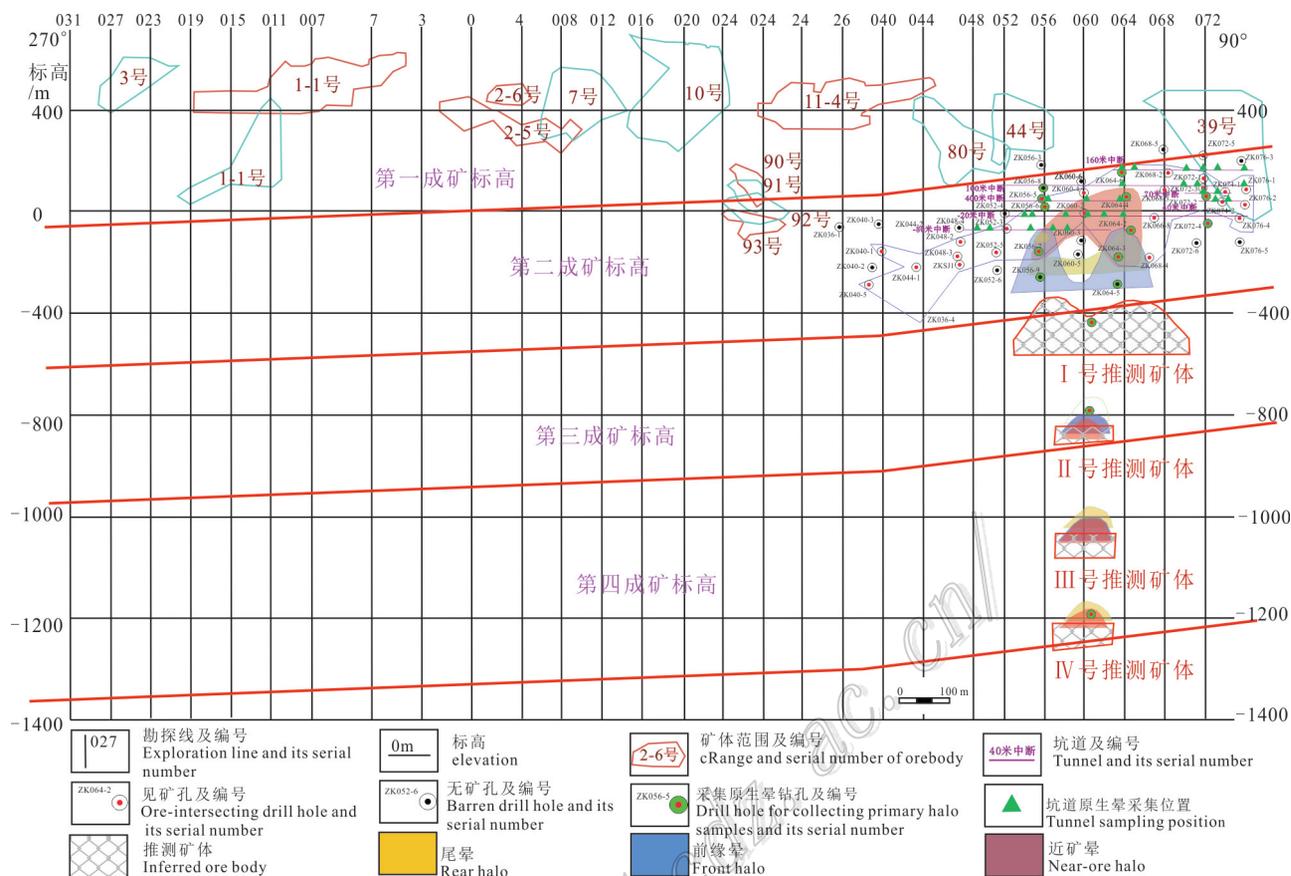


图6 白云金矿床成矿成晕预测图

Fig. 6 Prediction diagram of metallogenic and halo formation of the Baiyun gold deposit

线图结合成图(图5),Au元素有多处高峰区段,其中有5处发现矿体、矿化体。5处矿体分别为:59号矿体,Au品位 2.11×10^{-6} ,矿体厚度0.99 m;79号矿体,Au品位 1.21×10^{-6} ,矿体厚度0.8 m;89号矿体,Au品位 1.27×10^{-6} ,矿体厚度0.8 m;60号矿体,Au品位 0.47×10^{-6} ,矿体厚度3.7 m;130号矿体,Au品位 1.18×10^{-6} ,矿体厚度0.92 m。

Au元素高峰区段以①、③、⑤处最富、最大、最强烈(图5),证明成矿成晕及找矿标志的准确性。具有如下特征:①号矿化区发现2条矿脉及矿化体,并在附近钻孔中同样发现矿脉,该阶段Au元素异常反映强烈,As、Sb前缘元素异常同样强烈,而前缘元素与尾晕元素的累加比值也同样出现峰值,说明该阶段为矿体头部,矿体在后部应该还有延伸;③号矿化区位于白云金矿60号脉带后部,该区段发现有Au矿化体,区段中Au元素有2个峰值,Ag元素有一个峰值,在区段前部Sb元素有一个峰值,区段中As也出现高值,说明该区段前缘晕、近矿晕

反映较强烈,而在前缘元素与尾晕元素的累加比值中无较强变化,说明尾晕元素在此处同样出现强烈异常反映,综上所述,该处应为前缘晕、近矿晕、尾晕异常叠加处并且异常强烈,说明区段后部应该存在盲矿体;⑤号矿化区位于标高-1250~-1200 m处,该处发现一条矿脉及矿化体,在这一区段Au元素及前缘晕元素As、Sb元素都出现峰值,而此处尾晕元素异常较弱,表现出来的元素组合及元素波动与③号矿体即60号矿脉一致,据此推断该处矿化体与60号脉带形成期次相近,后期成矿可能性极大,说明矿体连续性较好,有很大的延深,规模与60号脉带相当。白云金矿床存在标高-1250~-1200 m的矿化体。

根据2002 m的钻孔成果,又重新提出了4个盲矿靶位(图6)。60号脉带依然未封闭,深部仍有盲矿体。综合判定,白云金矿床有4个成矿标高:第一成矿标高在+600 m~+200 m;第二成矿标高在+200~-400 m;第三成矿标高在-200~-600

m;第四成矿标高在-800~-1300 m,白云金矿床深部成矿前景较大。

5 结论

(1) 确定白云金矿床60号脉带垂向分带序列为(从上至下):Cr-Mn-Ni-F-B-Sn-As—W-Au-Mo-Hg-Cu-Sb-Pb—Ag-Co-Zn-Bi。

(2) 根据元素共生组合及其空间关系,确定近矿晕元素为Au、Cu、Pb、Zn;前缘晕主要元素为Hg、Sb、As;尾晕元素主要为Co、Mn、Mo。构建了深部矿体预测模型,其预测评价指标 $(As+Hg+B)/(Co+Mn+Mo)$ 在矿体头部为0.5,矿体中上部为1.05~2.57,矿体中下部为0.53~7.36,矿体尾部为1.64;这表明该指标经常反转,且随深度的增加有规律增加,是预测深部矿体资源潜力的有效指标。 $(As+Hg+B)/(Co+Mn+Mo)$ 指标在深部大于1且经常反转,则有效指导深部找矿。

(3) 结合深部钻孔及其原生晕特征,认为白云金矿深部找矿潜力较大,平面预测位置在052勘探线与072勘探线之间,深部主要在056勘探线与064勘探线之间的-400 m标高、-800 m标高、-1000 m标高、-1200 m标高范围内。

(4) 白云金矿床原生晕垂向分带的变化特征及矿区原生晕垂向分带稳定,可用来指导矿区深部矿体的预测。通过元素的空间分布及与岩体的关系,元素的聚合与矿体关系,发现白云金矿床在深部具有较大的找矿空间,前缘晕与尾晕的反复叠加,推测白云金矿床的多期成矿特性,也证明了前缘晕与尾晕叠加在该矿床可作为深部找矿预测的重要依据,建立了该区找矿模型;利用元素的相关性及浓度分带充分了解了该区热液的活动规律及与之相关的元素分布。

致谢 本文撰写得到中国地质调查局发展研究中心程志中研究员、姚晓峰高工、林成贵工程师、沈阳地质调查中心杨中柱教授的帮助,野外采样期间得到白云金矿总工贾巧遇及地质科同仁的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

References

Beaudoin A, Perrault G and Bouchard M. 1987. Distribution of gold, arsenic, antimony and tungsten around the Destor orebody, Noranda

district, Abitibi, Quebec[J]. Journal of Geochemical Exploration, 28(1-3): 41-70. doi: 10.1016/0357-6742(87)90039-2.

Chao H X, Yang X K, Wang L, Liang G L, Sun J D and Ma L C. 2006. Primary halo and deep prediction of Wunan gold deposit, Xinjiang[J]. Geology and Prospecting, 42(1): 72-76(in Chinese with English abstract).

Chen Y Q and Zhao P D. 1998. Zonation in primary halos and geochemical prospecting pattern for the Guilaizhuang gold deposit, eastern China[J]. Natural Resources Research, 7(1): 37-44.

Dai L. 2016. Gravity method application on primary halo zoning sequence in Xiasai deposit[J]. Yunnan Metallurgy, 45(5): 1-5(in Chinese with English abstract).

Grigoryan S V. 1974. Primary geochemical halos in prospecting and exploration of hydrothermal deposits[J]. International Geology Review, 16(1): 12-25.

Li D D, Wang Y W, Zhang Z C, Tian Y, Zhou G C and Shi Y. 2019. Characteristics of metallogenesis and ore-forming structural plane in Baiyun gold deposit, Liaoning[J]. Journal of Geomechanics, 25(S1): 10-20(in Chinese with English abstract).

Li H, Zhang W H, Yu B, Qu Y F and Zuo H Y. 1999. The standards of opposite direction zoning of primary halo and 'The Turning Points' of geochemical parameters in the direction of the axis in the Blind gold deposit[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 19(2): 114-117(in Chinese with English abstract).

Li H, Zhang G Y, Yu B, Zhang L F, Wang Z N, Li D L and Wang Z Y. 2005. Method of structural overprinting geochemical halo, a new and effective approach to prospecting for succeeding resources in gold deposits with resources crisis[J]. Mineral Resources and Geology, (6): 683-687(in Chinese with English abstract).

Li H, Zhang G Y and Yu B. 2006. Structural superposition halo model and prospecting effect of blind ore prediction in deep gold area[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

Li H, Li D L, Yu B, Wei J, Zhao J X, He R H, Zhou C Q, Liu H G, Chen H, Lang F Q, Du H C and Qi E B. 2010. Structural overprint halo model of the predicted blind ore bodies of Baiyun gold deposit, Fengcheng County, Liaoning Province and the prediction result[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 25(2): 153-156(in Chinese with English abstract).

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

Liu X L and Chen J P. 2010. A case study of r-factor analysis for metallogenic prognosis applied to Zhiduo-Zaduo area of Qinghai Province[J]. Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 32(3): 332-337(in Chinese with English abstract).

Nigel W B. 1999. Element ratios in nickel sulphide exploration: Vectoring towards ore environments[J]. Geochemistry Exploration, 67(1): 145-165.

Ouyang P N, Shen C, Wang Q L, Jiang H A and Li K. 2019. Geochemi-

- cal characteristics of tectonic primary halo and vertical zoning sequence in Xiucaidong area, Hunan Province[J]. Mineral Exploration, 10(8): 1940-1946.
- Piao S C and Lian C Y. 1994. A new kind of method for determining zoning sequence of primary halo-the method of barycenter[J]. Geology and Prospecting, (1): 63-65(in Chinese with English abstract).
- Ross R L and Peter J M. 1998. Litho-geochemical halos and geochemical vectors to stratiform sediment hosted Zn-Pb-Ag deposits, 1. Lady Loretta deposit, Queensland[J]. Journal of Geochemical Exploration, (63): 37-56.
- Shao Y. 1997. Litho-geochemical (primary halo) methods for hydrothermal mineral deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Sun H S, Sun L and Cao X Z. 2008. Axial/vertical zoning characteristics of primary halos and geochemical exploration indicators for deep ore body prognosis in Shangzhuang gold deposit, northwest Jiaodong peninsula, Shandong Province[J]. Mineral Deposits, 27(1): 64-70(in Chinese with English abstract).
- Sun L, Xiao K Y and Gao Y. 2013. Primary halos characteristics of Caixiashan Pb-Zn deposit and prediction for deep mineralization[J]. Journal of Jilin University, 43(4): 1179-1189(in Chinese with English abstract).
- Wang W. 2015. Metallogenic-geological characteristics and prospecting prediction of gold mineralization zone in southwestern part of Liaoning-Jilin rift[D]. Shenyang: Northeastern University. 1-58(in Chinese).
- Wang W, Liu F X, Qiu J Z, Liu J L, Liu Y, Guo Q, Lian C C, Yang X D, Hong M W and Meng F D. 2018. A report on the investigation of deep resources in Baiyun area, Liaoning Province[R]. Internal report of 103 team of Liaoning Provincial Bureau of Nonferrous Geology(in Chinese).
- Wang W, Li D D, Qiu J Z, Liu J L, Yang Y P, Liu Y, Yang X D, Yang Y S and Li F. 2020. Metallogenic geological model geological model and potential analysis of Baiyun gold deposit in Liaoning Province[J]. Mineral Exploration, 11(8): 1592-1602(in Chinese with English abstract).
- Wang Y W, Xie H J, Li D D, Shi Y, Liu F X, Sun G Q, Sun Q M and Zhou G C. 2017. Prospecting prediction of ore concentration area exemplified by Qingchengzi Pb-Zn-Au-Ag ore concentration area, eastern Liaoning Province[J]. Mineral Deposits, 36(1): 1-24(in Chinese with English abstract).
- Wei J, Wang E D, Liu F X and Wang W. 2019. Geological characteristics, ore genesis and prospecting direction of Baiyun gold belt in Fengcheng City, Liaoning Province[J]. Metal Mine, 48(8): 120-130(in Chinese with English abstract).
- Wen H J, Xiao H Y and Yu G J. 1999. Weijiagou gold deposit in Shandong: Application of tectonic geochemistry to prospecting[J]. Geology and Prospecting, 35(3): 32(in Chinese with English abstract).
- Wu E, Chen Y R, Liu Y Z, Lan N L and Feng L. 2017. Geochemical anomaly zoning model and prospecting criteria for Baiyun gold deposit in Liaoning Province[J]. Gold Science and Technology, 25(1): 27-34(in Chinese with English abstract).
- Xie X J. 1979. Regional geochemical exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Yang H H, Yang Z J and Cui L Y. 2007. Geology and geochemical features of primary halo of the Dongwan Au deposit in Songxian County, West Henan[J]. Acta Geologica Sichuan, 27(2): 107-111 (in Chinese with English abstract).
- Yu G, Chen J F, Xue C J, Chen Y C, Chen F K and Du X Y. 2009. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the qingchengzi Pb-Zn-Ag-Au orefield, northeastern China[J]. Ore Geology Reviews, 35(3-4): 367-382.
- Zhang C Y, Zhang J, Li W T, Wang J and Liu A L. 2013. Characteristics of primary halos and prediction of the orebody No. 3 in the Shangcheng gold deposit, Anhui, China[J]. Geological Science and Technology Information, (3): 159-165(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 晁会霞, 杨兴科, 王磊, 梁广林, 孙继东, 马立成. 2006. 新疆梧南金矿床原生晕特征与深部预测[J]. 地质与勘探, 42(1): 72-76.
- 代力. 2016. 重心法在夏塞矿床原生晕分带序列研究中的应用[J]. 云南冶金, 45(5): 1-5.
- 李德东, 王玉往, 张志超, 田野, 周国超, 石煜. 2019. 辽宁白云金矿床成矿构造与成矿结构面特征浅析[J]. 地质力学学报, 25(S1): 10-20.
- 李惠, 张文华, 常凤池, 曲媛菲, 左宏伟. 1999. 金矿盲矿预测的原生晕轴向“反(向)分带”和地化参数轴向“转折”准则[J]. 桂林工学院学报, 19(2): 114-117.
- 李惠, 张国义, 禹斌, 张连发, 王支农, 李德亮, 王志远. 2005. 构造叠加晕法是危机金矿山寻找接替资源的有效新方法[J]. 矿产与地质, (6): 683-687.
- 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.
- 李惠, 李德亮, 禹斌, 魏江, 赵佳祥, 贺容华, 周传勤, 刘恒刚, 陈贺, 郎福全, 杜汉纯, 齐恩波. 2010. 辽宁凤城白云金矿床深部盲矿预测的构造叠加晕模型及预测效果[J]. 地质找矿论丛, 25(2): 153-156.
- 刘崇民. 2006. 金属矿床原生晕研究进展[J]. 地质学报, 80(10): 1528-1538.
- 欧阳平宁, 沈川, 王前林, 蒋红安, 李鲲. 2019. 湖南省秀才洞地区构造原生晕地球化学特征及垂向分带序列研究[J]. 云南冶金, 10(8): 1940-1946.
- 朴寿成, 连长云. 1994. 一种确定原生晕分带序列的新方法—重心法[J].

- 地质与勘探,(1): 63-65.
- 邵跃. 1997. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 孙华山, 孙林, 曹新志, 王超, 谭俊, 刘福江, 杨开春. 2008. 胶西北上庄金矿床原生晕轴315-322(垂)向分带特征及深部矿体预测的勘查地球化学标志[J]. 矿床地质, 27(1): 64-70.
- 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, 43(4): 1179-1189.
- 王伟. 2015. 辽吉裂谷西南段金矿化集中区成矿地质特征及找矿预测(学位论文)[D]. 导师: 巩恩善. 沈阳: 东北大学. 1-58.
- 王伟, 刘福兴, 邱金柱, 刘俊利, 刘阳, 郭强, 连传成, 杨小达, 洪名伟, 孟繁迪. 2018. 辽宁省白云地区深部资源调查成果报告[R]. 辽宁省有色地质局一〇三队内部报告.
- 王伟, 李德东, 邱金柱, 刘俊利, 杨云鹏, 刘阳, 杨小达, 杨宇山, 李飞. 2020. 辽宁白云金矿床成矿地质模型及潜力分析[J]. 矿产勘查, 11(8): 1592-1602.
- 王玉往, 解洪晶, 李德东, 石煜, 刘福兴, 孙国强, 孙启明, 周国超. 2017. 矿集区找矿预测——以青城子金-银-铅-锌矿集区为例[J]. 矿床地质, 36(1): 1-24.
- 魏军, 王恩德, 刘福兴, 王伟. 2019. 辽宁凤城白云金矿带地质特征、矿床成因、找矿方向[J]. 金属矿山, 518(8): 120-130.
- 吴二, 陈远荣, 刘奕志, 蓝妮拉, 冯莉. 2017. 辽宁白云金矿床地球化学异常分带模型与找矿预测标志[J]. 黄金科学技术, 25(1): 27-34.
- 谢学锦. 1979. 区域化探[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨怀辉, 杨振京, 崔来运. 2007. 豫西嵩县东湾金矿床地质及原生晕地球化学特征[J]. 四川地质学报, 27(2): 107-111.
- 张传昱, 张均, 李婉婷, 王健, 刘安璐. 2013. 安徽上成金矿床Ⅲ号矿体原生晕特征及深部预测[J]. 地质科技情报, (3): 159-165.

<http://www.kcdz.ac.cn/>