

引用格式:罗 阳, 伍 静, 农仕华, 等. 广西天峨坪金矿区金银次生晕异常分布地质意义与金银表生地球化学性质差异分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 27-33

Luo Yang, Wu Jing, Nong Shihua, et al. Different distribution of silver and gold secondary halo in the Tian'eping gold ore field, Guangxi and the different geochemical features of gold and silver in supergene setting[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(19): 27-33

广西天峨坪金矿区金银次生晕异常分布地质意义与金银表生地球化学性质差异分析

罗 阳¹ 伍 静^{1*} 农仕华¹ 苑金涛¹ 梁华英²

(广西大学资源环境与材料学院¹, 南宁 530004; 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室², 广州 510640)

摘 要 广西天峨坪金矿区多被土壤覆盖,区内局部出露轻变质粉砂岩及碳酸盐岩。为了圈定深部金矿体及了解金银表生地球化学行为,系统分析了区内土壤、原生晕及半风化原生晕金银元素含量。天峨坪金矿异常区金银次生晕异常分离,银次生晕异常中心分布于矿区中北部地势较高地区,而金次生晕异常中心却分布于矿区中南部较低洼地区,Au/Ag比从原生晕、半风化原生晕至全风化土壤逐渐降低。根据金银在不同风化程度岩石中的比值变化,结合金银在碳酸盐岩出露区地表流体中金比银更易形成金硫络合物迁移,提出在碳酸盐岩出露区地表中至弱碱性流体中金比银更易发生迁移,银次生晕异常中心指示深部金矿体。后经工程验证发现Ag的次生晕异常中心对应深部金矿体,而金异常中心偏离深部矿体。成果表明,碳酸盐岩出露区金银表生地球化学行为有差异,热带亚热带植被覆盖区次生晕找金过程中,不但要注意金的次生晕异常,也要注意银的次生晕异常。

关键词 金银 表生地球化学性质 金银次生晕异常 金矿找矿 广西容县
中图分类号 P595; **文献标志码** A

利用元素地球化学组合及分布特性找矿一直以来是成矿预测的主要方法之一,多年来在找矿预测中发挥了重大作用,而金银表生地球化学行为近年来引起人们的广泛关注^[1-3],深入了解金银表生地球化学性质,无论对深入分析次生金矿成因、化探找矿及矿山环境治理等都有着重要的意义。现多数观点认为金和银在表生较强酸性氧化环境下,主要以氯络合物形式迁移^[1,3,4]。由于银氯络合物溶解度较大,因而金氯络合物还原形成的次生金颗粒金的纯度很高^[5]。碳酸盐岩出露地区,地表流体多为中至弱碱性^[6];中至弱碱性地表流体中金和银都主要以硫络合物形式迁移^[6]。对金和银在碳酸盐岩出露区地表流体中地球化学性质异同研究的相关工作相对较少,目前多认为两元素表生地球化学性质相似,在表生过程中不易发生分离^[6,7]。一些低硫化物型金矿床中次生银金矿 Au/Ag 比远远大于原生银金矿的比值,表明金和银的表生地球化学性质存

在一定差异^[8]。过去在金矿次生晕探找矿过程中,均比较重视金的次生晕异常^[9-12],而对银的次生晕异常关注不多,未见根据银次生晕异常定位深部金矿体的报道。

本文分析了广西天峨坪金矿区未风化原生晕、半风化原生晕样品及次生晕土壤样品 Au/Ag 比值变化与金及银次生晕异常分布差异特征,探讨金银表生地球化学行为差异及论证银的次生晕异常指示深部矿体,成功定位深部金矿体。研究成果对指导中国华南植被覆盖区金矿找矿实践及深入了解金银表生地球化学性质差异具有重要意义。基于上述因素考虑,在研究天峨坪金矿金银成矿元素表生地球化学作用下各自迁移行为与能力的基础上,对矿区进行找矿预测,取得了理想的找矿效果。

1 区域及矿区地质

容县天峨坪金矿位于容县县城 181°方向、直距 23.5 km 处,行政隶属容县灵山镇六泉村管辖。天峨坪金矿床区域上位于博白-岑溪断裂带中段(图 1)。区域上出露地层为中晚元古宙-奥陶世轻变质岩^[13],主要岩性为千枚岩、片岩、变粒岩及大理岩等。变质岩呈 NEE 向带状展布,变质岩原岩为地槽型浅海相碎屑岩及少量碳酸盐、硅质岩^[13]。区域岩浆作用强

2019年1月3日收到 国家自然科学基金(41772065、41372084)和广西大学科研基金(XGZ150264)资助
第一作者简介:罗 阳(1992—),男,汉族,四川彭州人,硕士研究生。E-mail:779619236@qq.com。
* 通信作者简介:伍 静(1978—),男,汉族,广西南宁人,博士,副教授。E-mail:417534291@qq.com。

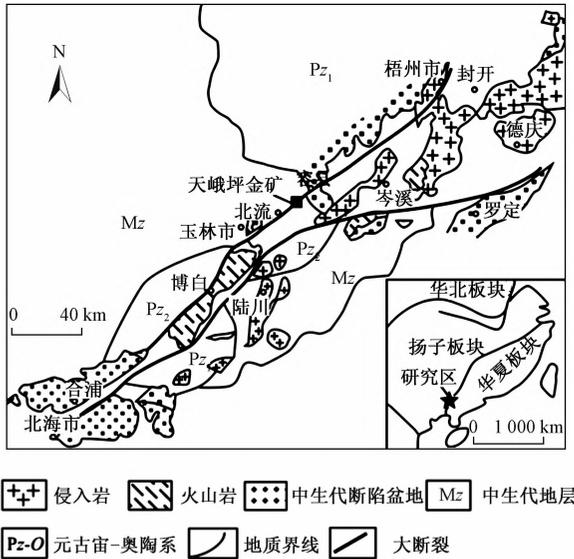


图1 天峨坪金矿区域地质图(据文献[17]修改)
Fig.1 Regional geological map of the Tian'eping gold deposit (molified from Ref. [17])

烈,出露主要岩体有加里东期二长花岗岩、花岗片麻岩及燕山期花岗闪长岩。区内矿床(点)发育,多产于基底地层中,主要有金、铜及铅锌等矿床(点)。

天峨坪矿区位于博白-岑溪断裂的次级断裂带F1内(图2),多被植被覆盖,风化盖层厚度一般在0.5~10 m。矿区内出露地层为奥陶系片岩、石英绢云千枚岩、碎屑岩及碳酸盐岩等。天峨坪金矿区地形北高南低,坡度一般为10°~20°,分布于整条F1破碎带内,地表氧化矿分布面积大于2 km²,过去一直小规模零星开采,深部找矿工作进展不大。

用次生晕法异常及结合不同风化程度钻孔、槽探样品 Au/Ag 比分析,圈定了异常,预测深部矿体,后经工程验证成功发现深部矿体。目前已在0.4 km²面积范围内探明金属量超过5 t,矿体沿走向及倾向尚未完全控制。

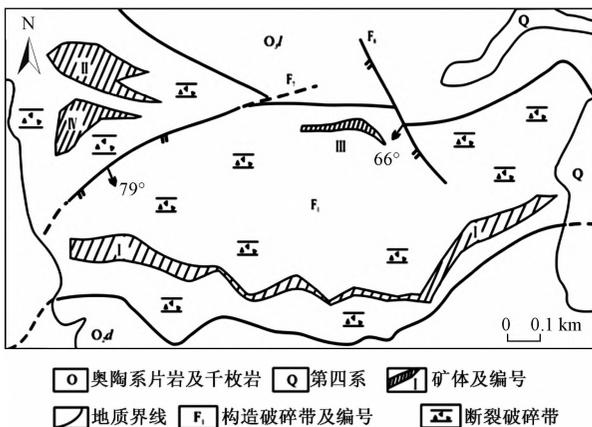


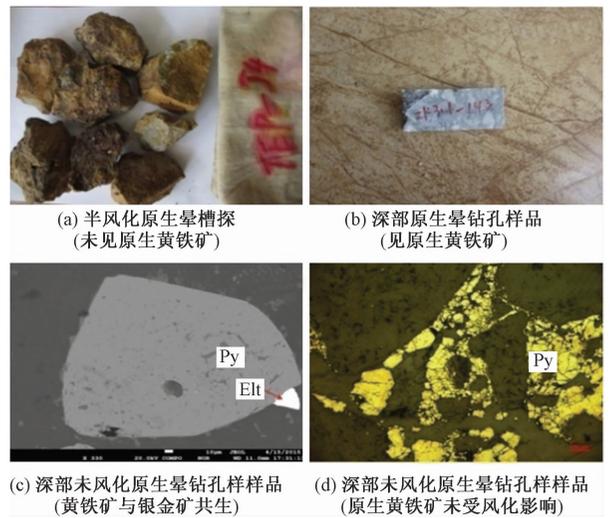
图2 天峨坪金矿区地质简图
Fig.2 Geological map of the Tian'eping gold deposit

矿体主要产于F1断裂带中,已发现4条矿体(脉),其中II号矿体(隐伏矿体)规模最大,长大于80 m,厚5~50 m,走向近东西,倾向南,倾角30°~45°,倾向斜深未完全控制。矿体金品位0.5~40 g/t,普遍含银,银含量在3~36 g/t之间。研究区矿物组合简单,有用元素主要为金,伴生银,未见金银明显分带现象。

2 样品采集及分析结果

2.1 样品采集

为了研究金银元素在植被覆盖区表生地球化学行为异常及深入分析金银异常找矿意义,选择深部未风化的钻孔样品、近地表半风化的槽探样品及全风化的次生土壤样品作为研究对象,各样品特征见图3,分别为:①半风化原生晕槽探,未见原生黄铁矿;②深部原生晕钻孔样品见原生黄铁矿;③深部未风化原生晕钻孔样品黄铁矿与银金矿共生;④深部未风化原生晕钻孔样品原生黄铁矿未受风化影响。



Py 为黄铁矿;Elt 为银金矿

图3 未风化、半风化样品特征

Fig.3 The character of primary and semi-weathering samples

(1)原生晕样品。未风化53件样品采于前人施工钻孔中离地表100 m以下的矿(化)体。主要为矿化角砾蚀变岩,硅化较强(主要以低温玉髓状石英为主),见原生黄铁矿及银金矿[图3(c)],未受表生作用影响。

(2)半风化样品。半风化样品采自矿化区内多个探槽,主要为半风化矿化蚀变岩,为黄褐色黏土化、硅化蚀变岩[图3(a)],共采集半风化原生样品57件。

(3)次生晕样品。次生晕样品采自矿区风化土壤B层土,为了避免采矿对B层土壤污染,样品主

要采自采矿区外围。在 0.3 km^2 范围内按 $100 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 网度采样,共计 186 件样品。

2.2 分析方法及结果

样品采集加工后,未风化钻孔样品及半风化槽探样品送至国土资源部南宁矿产资源监督检测中心分析,分析方法为原子吸收,分析仪器为日立 Z-2310,分析精度为 $0.01 \mu\text{g/g}$;地表全风化次生晕土壤样品送至桂林矿产地质研究院测试中心分析,用 WSP-1 型光谱仪法分析 Ag 含量,其分析误差小于 2%;用海绵吸附发射光谱法分析 Au 含量,其分析误差小于 2%,各分析结果见表 1。原生晕金含量在 $1.02 \sim 10.41 \text{ g/t}$,银含量在 $0 \sim 21.27 \text{ g/t}$,Au/Ag 比在 $0.16 \sim 7$;槽探半风化样品金含量在 $0 \sim 1.22 \text{ g/t}$,银含量在 $0.2 \sim 15.4 \text{ g/t}$,Au/Ag 比在 $0.01 \sim 0.78$;次生晕样品金含量在 $1.18 \sim 226.52 \text{ mg/t}$,银含量在 $0.019 \sim 0.679 \text{ g/t}$,Au/Ag 比在 $0.01 \sim 1.52$ 。

3 讨论

3.1 金银次生晕异常分布差异

首先对次生晕分析结果(数据)进行分布形态分析,剔除不符合正态分布的数据(如特高值及绝对低值),让所有数据符合正态分布(该过程采用迭代法进行数据处理,分析过程参考数理统计迭代法),对数据整理后计算次生晕样品的平均值(背景值)、异常下限及标准偏差。在确定次生晕样品背景值、标准偏差及异常下限后,根据伍静等^[14]的处理方法圈定金银次生晕异常等值线图,具体见图 4、图 5。

由图 4 可知,银金异常中心并未重叠套合(套合的仅为异常外带)。银的异常浓集中心有 4 个,编号分别为 Ag-1、Ag-2、Ag-3、Ag-4(图 4)。其中 Ag-1 异常规模最大,异常展布受 F1 断裂带控制。金异常等值线图共圈定 2 个金异常区,编号为 Au-1、Au-2(图 5),金异常外带分布面积较大,呈面片状分布,

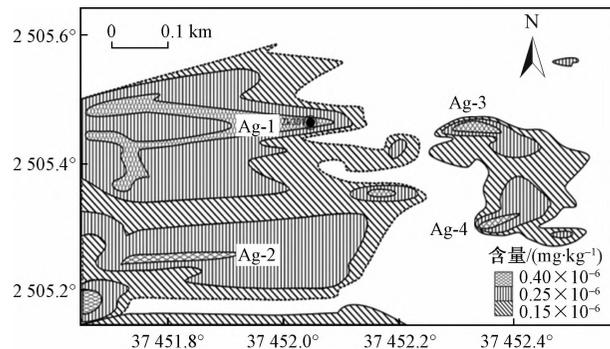


图 4 天峨坪金矿银异常等值线异常图

Fig.4 Contour map of showing distribution of Ag abnormality of the Tian'eping gold deposit

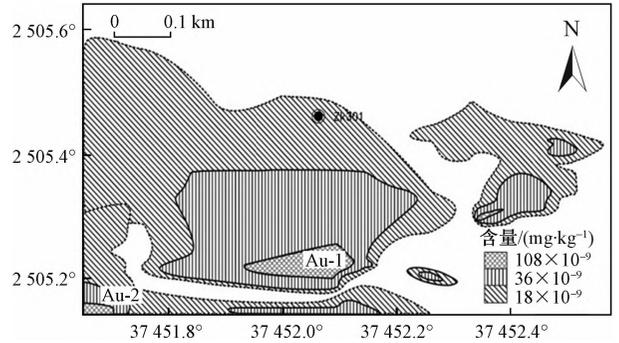


图 5 天峨坪金矿金异常等值线异常图

Fig.5 Contour map of showing distribution of Au abnormality of the Tian'eping gold deposit

异常中心(内带)规模小,明显呈被分散的趋势;其中 Au-1 异常规模最大,其形态也为近东西向,同样显示受控于 F1 断裂破碎带。

银异常主要分布于地形较高的北部地区,金异常则分布于地形较低的南部地区。

3.2 银次生晕异常指示矿体及金银表生地球化学性质差异分析

天峨坪金矿区金银次生晕异常存在明显分离现象,哪个元素异常指示深部矿体? Wester^[6]提出,金和银在中至弱碱性的表生环境中基本不发生分离。因此,人们在次生晕化探找矿中多据金异常分析深部盲矿体。

为了深入了解金和银异常分布差异的地质意义,分析了原生晕、半风化原生晕及土壤样品的金银元素含量及比值变化。天峨坪金矿区原生晕、半风化原生晕及次生晕样品 Au/Ag 逐渐降低(表 1、表 2、表 3 及图 6),其均值从原生晕的 0.51,半风化原生晕的 0.19,降至次生晕的 0.05。这种金银比值变化特征可能主要由下述两种原因所致,一为成矿分带所致,即金在较深部位沉淀析出,银在较浅部位沉淀析出;另一为金银成矿元素在表生作用下不同的移迁能力所致。本区为金矿体,银没有明显的富集地段,所有样品成矿(金银)元素没有表现为一高一低迭代出现,未表现分带性;所有原生样品金银具正相关性,相关系数约 0.45,不支持矿化分带;此外,该矿床发育较多银金矿[图 3(c)],也表明金银同时析出。上述特征表明该矿床原生晕、半风化晕及次生晕金银比值变化主要是金和银在风化作用过程中活化迁移能力不同所致,金在一定条件下更易被溶解迁移。天峨坪矿区金次生晕异常区主要分布于矿区南部地形相对较低地区,可能和金比银更易活化迁移有关,因此,推测银的次生晕异常和深部盲矿体空间关系更密切。据此推测,在银异常中心 Ag-1 的 16 号勘查线附近,布置钻孔 ZK301 进行验证

表1 原生晕样品分析金、银含量

Table 1 Ag and Au concentration of the unweathered samples from the Tian'eping gold ore field

样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)			样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)			样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)		
	Ag	Au	Au/Ag		Ag	Au	Au/Ag		Ag	Au	Au/Ag
ZK1403-H63	1.69	1.17	0.69	ZK1403-H144	16.08	3.27	0.2	ZK1801-H131	0.5	1.96	3.95
ZK1403-H74	3.58	1.08	0.3	ZK1403-H148	0.97	2.85	2.95	ZK1801-H134	0.39	2.29	5.94
ZK1403-H101	4.32	1.54	0.36	ZK1403-H159	9.06	1.38	0.15	ZK1801-H139	0.6	2.11	3.52
ZK1403-H102	12.99	2.06	0.16	ZK1403-H160	21.27	6.27	0.29	ZK1801-H143	8.2	1.89	0.23
ZK1403-H103	10.37	2.29	0.22	ZK1403-H162	3.19	8.04	2.52	ZK1801-H171	2	2.3	1.15
ZK1403-H111	0.2	1.42	7	ZK1403-H163	0.8	1.28	1.61	ZK1801-H172	7.6	2.36	0.31
ZK1403-H112	0.76	1.53	2.01	ZK1801-H8	4.32	1.04	0.24	ZK1801-H173	1.06	1.26	1.19
ZK1403-H128	8.64	1.44	0.17	ZK1801-H11	5.8	10.41	1.79	ZK1801-H176	2.7	1.15	0.43
ZK1403-H129	4.56	4.16	0.91	ZK1801-H89	7.19	4.05	0.56	ZK1801-H178	4.05	1.48	0.37
ZK1403-H133	5.63	3.02	0.54	ZK1801-H90	4.39	2.39	0.54	ZK1801-H179	0.94	1.06	1.13
ZK1403-H134	5.83	1.08	0.19	ZK1801-H91	13.74	1.02	0.07	ZK1801-H181	1.72	2.68	1.56
ZK1403-H135	2.31	1.24	0.54	ZK1801-H92	5.98	1.18	0.2	ZK1801-H182	1.27	1.48	1.16
ZK1403-H136	1.77	1.39	0.78	ZK1801-H104	4.43	1.77	0.4	ZK1801-H183	1.74	1.27	0.73
ZK1403-H137	0.91	3.4	3.74	ZK1801-H119	3.06	1.32	0.43	ZK1801-H191	1.35	3.03	2.25
ZK1403-H138	3.53	1.63	0.46	ZK1801-H120	3.59	2.94	0.82	ZK1801-H193	3.44	1.24	0.36
ZK1403-H139	2.45	2.47	1.01	ZK1801-H121	1.66	3.62	2.18	ZK1801-H217	6.83	1.11	0.16
ZK1403-H143	8.2	1.73	0.21	ZK1801-H123	3.51	1.15	0.33				

表2 半风化样品分析金、银含量

Table 2 Ag and Au concentration of the semi-weathered samples from the Tian'eping gold ore field

样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)			样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)			样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)		
	Ag	Au	Au/Ag		Ag	Au	Au/Ag		Ag	Au	Au/Ag
HTC03-1	0.4	0.35	0.88	HTC03-19	0.4	0.05	0.13	HTC04-4	0.7	0.26	0.37
HTC03-2	0.4	0.44	1.1	HTC03-20	0.4	0.06	0.15	HTC04-5	0.7	0.11	0.16
HTC03-3	2.6	0.28	0.11	HTC03-21	0.8	0.1	0.13	HTC04-6	0.9	0.11	0.12
HTC03-4	0.7	0.7	1	HTC03-22	0.2	0.11	0.55	HTC04-7	1.3	0.32	0.25
HTC03-5	0.7	0.13	0.19	HTC03-23	1.4	1.22	0.87	HTC04-8	1.1	0.38	0.35
HTC03-6	2.9	0.89	0.31	HTC03-24	0.6	0.06	0.1	HTC04-9	1.6	0.32	0.2
HTC03-7	2	0.76	0.38	HTC03-27	0.7	0.03	0.04	HTC04-10	1	0.28	0.28
HTC03-8	1.8	0.84	0.47	HTC00-2	0.4	0.03	0.08	HTC12-1	1.4	0.58	0.41
HTC03-9	5.3	0.3	0.06	HTC00-3	4.2	0.04	0.01	HTC12-2	1	0.12	0.12
HTC03-10	0.9	0.37	0.41	HTC00-5	0.7	0.07	0.1	HTC12-3	1.4	0.12	0.09
HTC03-11	2.8	0.54	0.19	HTC00-6	1.2	0.06	0.05	HTC12-4	2.1	0.24	0.11
HTC03-12	3.2	0.28	0.09	HTC00-7	0.6	0.05	0.08	HTC12-5	1.7	180	0.11
HTC03-13	6	0.39	0.07	HTC00-8	0.5	0.11	0.22	HTC12-6	1.5	170	0.11
HTC03-14	15.4	1	0.06	HTC00-9	0.8	0.08	0.1	HTC12-7	3.3	70	0.02
HTC03-15	0.7	0.18	0.26	HTC04-1	0.6	0.27	0.45	HTC12-8	1	60	0.06
HTC03-16	2.3	0.05	0.02	HTC04-2	0.4	0.25	0.63	HTC12-9	3.4	60	0.02
HTC03-17	0.9	0.1	0.11	HTC04-3	0.6	0.15	0.25	HTC12-10	0.8	62	0.78
HTC03-18	0.9	0.35	0.39								

(GPS坐标:374 520 85,250 546 3)。在137 m处发现平均金品位达5 g/t,真厚度达30 m的金矿体。首次证实了Ag-1次生晕化探异常更靠近矿体。后期勘查过程中,金次生晕异常中心(Au-1)深部未发现矿体。

天峨坪金矿床银次生晕异常指示深部金矿体,而金的次生晕异常却偏离深部矿体,证实金和银两元素表生地球化学性质不完全相似。天峨坪金矿床金和银次生晕异常发生分离的主要控制因素是什么?

前人工作表明,金和银在表生条件下主要以氯络合物、硫代硫酸盐、有机酸盐或胶体形式迁移^[6,15]。高氧化酸性条件下金和银分别主要以AuCl₄⁻和AgCl₄³⁻、AgCl₃²⁻形式迁移^[6]。天峨坪金矿区域地层及赋矿构造破碎带中见碳酸盐岩,含碳酸盐岩地区地表流体主要为中性至弱碱性流体^[6]。天峨坪金矿区地表硫化物不多,主要为少量浸染状细粒黄铁矿,因此,矿区地表流体中硫的总浓度不大。在总硫活度小于0.1的中至弱碱性流体中,金主要以Au(S₂O₃)₂³⁻[氧逸度f(O₂)>-60]及

表 3 次生晕样品分析金、银含量

Table 3 Ag and Au concentration of soil samples from the Tian'epin gold ore field

样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)			样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)			样号	含量/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹)		
	Ag	Au	Au/Ag		Ag	Au	Au/Ag		Ag	Au	Au/Ag
10-320	0.43	4.46	0.01	11-240	0.05	4.35	0.09	14-60	0.13	6.1	0.05
10-340	0.26	2.24	0.01	11-260	0.25	13.7	0.06	14-80	0.1	9.76	0.09
10-360	0.07	1.86	0.03	11-280	0.33	12.35	0.04	14-100	0.13	10.28	0.08
10-380	0.08	2.33	0.03	11-300	0.03	3.97	0.12	14-120	0.05	4.13	0.08
10-400	0.07	3.03	0.05	11-320	0.05	1.33	0.03	14-140	0.09	3.92	0.05
10-420	0.16	6.1	0.04	11-340	0.07	3.13	0.04	14-160	0.18	3.81	0.02
10-440	0.11	3.33	0.03	11-360	0.06	3.33	0.06	14-180	0.4	70.06	0.17
10-460	0.08	9.03	0.11	11-380	0.11	2	0.02	14-260	0.24	24.98	0.1
11-80	0.04	2.93	0.08	11-400	0.13	1.4	0.01	14-280	0.41	34.16	0.08
11-200	0.23	69.17	0.3	11-420	0.13	3.13	0.02	14-300	0.3	32.43	0.11
0-0	0.15	226.52	1.52	11-440	0.13	2.93	0.02	14-320	0.03	2.63	0.09
0-20	0.47	62.39	0.13	11-460	0.07	3.43	0.05	14-340	0.08	2.33	0.03
0-40	0.5	45.53	0.09	11-480	0.03	2.43	0.07	14-360	0.04	1.72	0.05
0-60	0.38	26.32	0.07	11-500	0.07	2.24	0.03	14-380	0.13	1.47	0.01
0-80	0.17	40.55	0.24	43089	0.05	10.84	0.2	14-400	0.03	1.88	0.07
0-100	0.22	22.5	0.1	12-40	0.05	5.5	0.11	14-420	0.13	1.49	0.01
0-120	0.14	19.75	0.14	12-60	0.14	52.71	0.38	14-440	0.03	1.67	0.06
0-140	0.21	15.61	0.07	12-80	0.04	8.35	0.2	14-460	0.04	1.4	0.03
0-160	0.39	19.24	0.05	12-180	0.06	29.99	0.49	14-480	0.08	1.58	0.02
0-180	0.26	14.82	0.06	12-200	0.15	22.5	0.15	14-500	0.02	1.4	0.07
0-200	0.2	11.12	0.05	12-220	0.08	6.6	0.08	15-20	0.15	8.13	0.05
0-220	0.2	12.35	0.06	12-240	0.05	4.35	0.09	15-40	0.13	4.23	0.03
0-240	0.25	5.79	0.02	12-260	0.1	2.83	0.03	15-60	0.09	5.94	0.07
0-260	0.18	8.13	0.05	12-280	0.19	18.74	0.1	15-80	0.12	4.23	0.04
0-280	0.34	12.67	0.04	12-300	0.1	31.59	0.31	15-100	0.25	6.77	0.03
0-300	0.42	7.14	0.02	12-320	0.05	4.95	0.1	15-120	0.15	6.95	0.05
0-320	0.38	8.57	0.02	12-340	0.08	2.43	0.03	15-140	0.3	4.35	0.01
0-340	0.5	6.1	0.01	12-360	0.04	2.43	0.06	15-160	0.05	10.28	0.2
0-360	0.29	6.26	0.02	12-380	0.08	2.43	0.03	15-180	0.1	4.7	0.05
2-0	0.26	19.75	0.08	12-400	0.14	1.76	0.01	15-200	0.2	23.1	0.11
42786	0.14	25.64	0.18	12-420	0.06	1.84	0.03	15-220	0.15	23.71	0.16
2-40	0.12	18.26	0.15	12-440	0.11	2.14	0.02	15-240	0.19	16.03	0.09
2-60	0.23	16.89	0.07	12-460	0.09	2.14	0.02	15-260	0.22	45.53	0.21
2-80	0.17	15.61	0.09	12-480	0.07	2.05	0.03	15-280	0.16	36.95	0.24
2-100	0.45	10.84	0.02	12-500	0.05	2.05	0.05	15-300	0.07	8.79	0.13
2-120	0.28	20.81	0.08	13-0	0.05	4.23	0.08	15-320	0.05	2.43	0.05
2-140	0.3	20.27	0.07	13-20	0.12	3.13	0.03	15-340	0.03	1.81	0.07
2-160	0.34	26.32	0.08	13-40	0.02	15.21	0.66	15-360	0.05	1.72	0.03
2-180	0.16	17.79	0.11	13-60	0.05	9.51	0.18	15-420	0.17	1.64	0.01
2-200	0.26	14.44	0.06	13-80	0.05	14.07	0.31	15-460	0.06	2.17	0.04
2-220	0.54	17.79	0.03	13-100	0.15	7.52	0.05	15-480	0.11	4.82	0.04
2-240	0.42	8.13	0.02	13-120	0.08	6.43	0.08	15-500	0.09	3.33	0.04
2-260	0.43	14.07	0.03	13-140	0.05	9.26	0.21	16-0	0.16	9.76	0.06
2-280	0.41	17.79	0.04	13-160	0.52	82.85	0.16	16-20	0.11	3.03	0.03
2-300	0.43	10.02	0.02	13-180	0.1	11.72	0.11	16-40	0.09	4.13	0.05
2-320	0.33	15.21	0.05	13-200	0.05	3.92	0.08	16-60	0.12	6.77	0.06
2-340	0.39	10.84	0.03	13-220	0.12	5.5	0.05	16-80	0.11	29.21	0.26
2-360	0.44	15.61	0.04	13-240	0.08	4.13	0.05	16-100	0.1	9.51	0.1
10-0	0.26	51.42	0.2	13-260	0.2	42.1	0.21	16-160	0.07	3.43	0.05
43028	0.05	4.82	0.09	13-280	0.17	22.5	0.13	16-260	0.07	5.36	0.08
10-40	0.08	5.5	0.07	13-300	0.16	8.79	0.05	16-280	0.1	14.07	0.14
10-60	0.14	42.1	0.29	13-320	0.68	31.59	0.05	16-300	0.11	4.46	0.04
10-80	0.39	189.1	0.48	13-340	0.11	19.75	0.19	16-320	0.08	2.33	0.03
10-100	0.3	153.85	0.52	13-360	0.11	8.35	0.08	16-340	0.04	2.14	0.06
10-120	0.39	89.52	0.23	13-380	0.08	2.33	0.03	16-360	0.04	1.48	0.04
10-200	0.19	104.5	0.54	13-400	0.06	2.63	0.04	16-380	0.04	2.19	0.05
10-220	0.21	115.85	0.55	13-420	0.05	1.86	0.04	16-400	0.06	2.1	0.04
10-240	0.14	13.01	0.1	13-440	0.04	10.02	0.23	16-420	0.11	1.31	0.01
10-260	0.12	3.62	0.03	13-460	0.05	1.8	0.04	16-440	0.11	1.18	0.01
10-280	0.23	2.93	0.01	13-480	0.09	3.43	0.04	16-460	0.04	1.63	0.04
10-300	0.06	3.13	0.05	13-500	0.05	2.83	0.06	16-480	0.05	4.58	0.09
11-220	0.52	32.43	0.06	14-40	0.04	14.82	0.35	16-500	0.05	1.75	0.04

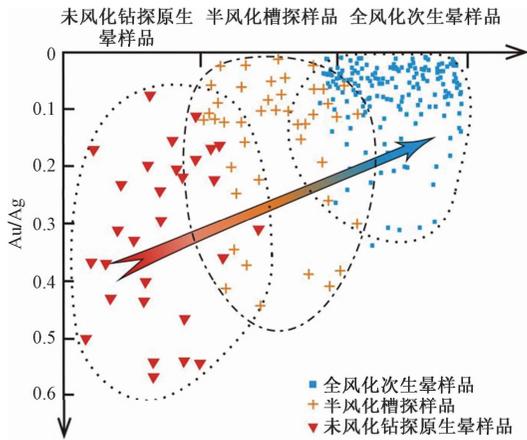
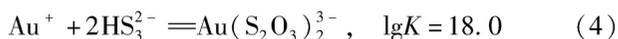
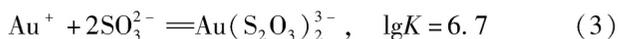
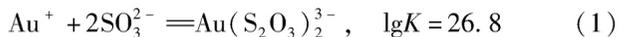


图6 天峨坪金矿未风化钻孔样品、半风化地表槽探样品、土壤样品金银比值变化趋势

Fig. 6 The variation of Au/Ag ratios of the unweathered samples from drill hole, semi-weathered samples from trench and the soil samples in the Tianéping gold deposit

$\text{Au}(\text{HS})_2^-$ [氧逸度 $f(\text{O}_2) < -60$] 形式迁移, 银主要以 $\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ [氧逸度 $f(\text{O}_2) > -60$]、 AgHS 及 $\text{Ag}(\text{HS})_2^-$ [氧逸度 $f(\text{O}_2) < -65$] 迁移^[6]。在 $\text{Au}(\text{Ag})\text{-S-O}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系统中 25 °C 条件下, 金和银主要络合物反应方程的平衡系数有明显的差异^[6,16], 各差异表现如下:



这表明在总硫活度较低的中至弱碱性流体中, 金比银更易形成硫代硫酸根络合物或硫氢络合物, 增加金在地表流体中的活动性。Webster^[6] 实验表明, 银金矿有利于金在 0.1 mol/L $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液中的溶解, 金的溶解度略大于银的溶解度; 天峨坪金矿床中含较多银金矿 (Au: 64% ~ 69%, Ag: 29% ~ 36%)^[17], 这也可能会增强天峨坪金矿中金在地表流体中的活动性。此外, 在低硫含量地表流体中, 当 $f(\text{O}_2) < -50$ 时, 流体中的银会和还原硫结合, 形成辉银矿^[6], 会导致银在地表流体中溶解度较低, 迁移能力较金的弱。

综上所述, 金和银虽然地球化学性质相近, 在内生条件下多形成金银矿床, 但两元素在中至弱碱性地表流体中的地球化学性质有一定的差异, 金比银更易发生溶解及迁移。这会导致金和银次生晕发生分离, 而天峨坪金矿床金和银次生晕成功找矿实践也表明金和银表生地球化学性质有一定的差异。

3.3 找矿意义

金矿找矿中多注意金的次生晕异常, 而对银的次生晕异常关注不多。在天峨坪金矿床次生晕化探找矿中, 发现金和银次生晕异常分离。根据金和银两元素在中至弱碱性流体中地球化学性质差异性, 首次提出银异常指示深部盲矿体, 金次生晕异常偏离金矿体。根据这一认识, 开展工程验证, 首次成功据银的次生晕异常发现深部金矿体。这一成功找矿实践对热带亚热带植被覆盖区金矿找矿实践有着重要意义。这表明在热带亚热带植被覆盖区金矿找矿中, 不但要注意金次生晕异常, 也要注意银的次生晕异常。

过去多认为金和银在表生地球化学性质相近, 不发生分离, 银相对金活泼性更强。但天峨坪金矿床金银次生晕异常分离表明, 金和银表生地球化学性质有一定的差异, 在一定条件下金相对银更易溶解迁移, 深入了解不同元素表生地球化学行为对指导次生晕找矿实践有着重要意义。

4 结论

通过上述讨论, 得出下述结论。

(1) 天峨坪金矿床金和银次生晕发生分离, 银次生晕异常指示深部金矿体, 金次生晕异常偏离深部矿体。

(2) 金和银表生地球化学性质在中至弱碱性条件下有一定的差异, 金比银更易溶解迁移。

(3) 热带亚热带植被覆盖区次生晕找金矿过程中, 不但要注意金的次生晕异常, 也要注意银的次生晕异常。

致谢: 广西昌鑫矿业有限责任公司在野外工作中提供了帮助, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 Usher A, McPhail D C, Brugger J. A spectrophotometric study of aqueous Au (III) halide-hydroxide complexes at 25 ~ 80 °C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73 (11) : 3359-3380
- 2 Reith F, Stewart L, Wakelin S A. Supergene gold transformation: secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand [J]. *Chemical Geology*, 2012, 320: 32-45.
- 3 Yeates L, Aiglsperger T, Saez R, et al. Gold behavior in supergene profiles under changing redox conditions: the example of the Las Cruces deposit, Iberian pyrite belt [J]. *Economic Geology*, 2015, 110 (8) : 2019-2026
- 4 Manna A W. Mobility of gold and silver in laterite weathering profiles: some observations from western Australia [J]. *Economic Geology*, 1984, 79 : 38-49
- 5 MacKay R A. The purity of native gold as a criterion in secondary enrichment [J]. *Economic Geology*, 1944, 39 : 56-68

- 6 Webster J G. The solubility of gold and silver in the system Au-Ag-S-O₂-H₂O at 25 °C and 1 atm[J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(9) : 1837-1845
- 7 Craw D, MacKenzie D, Grieve P. Supergene gold mobility in orogenic gold deposits, Otago Schist, New Zealand[J]. *Journal of Geology and Geophysics*, 2015, 58 (2) : 123-136
- 8 Greffie C, Bailly L, Milesi J. Supergene alteration of primary ore assemblages from low-sulfidation Au-Ag epithermal deposits at Pongkor, Indonesia and Nazareno, Peru [J]. *Economic Geology*, 2002, 97 (3), 561-571
- 9 朱喜臣. 辽东地区金次生晕异常特征及找矿效果[J]. *地质与勘探*, 1980(8) : 58-61
Zhu Xichen. The feature of gold secondary halo anomaly and exploration effect in east Liaoning[J]. *Geology and Exploration*, 1980(8) : 58-61
- 10 张 冠. 河南省桐柏县银洞坡金矿床(西段)地球化学找矿标志及预测评价[J]. *物探与化探*, 2005, 29(4) : 304-307
Zhang Guan. Geochemical prospecting indicators and ore prognosis in the western part of the Yindongpo gold deposit, Tongbai county, Henan province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005, 29(4) : 304-307
- 11 刘传权, 赵建敏, 刘振宏, 等. 西藏丁青县扎格来金矿的发现及地球化学找矿效果[J]. *华南地质与矿产*, 2006(1) : 22-27
Liu Chuanquan, Zhao Jianmin, Liu Zhenhong, et al. The discovery of Zhagela gold deposit in Dingqing county, Tibet and its effects for the geochemical prospecting[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2006(1) : 22-27
- 12 于成涛, 龙建军. 永丰县三坊地区成矿地质条件及金地球化学研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 34 (1) : 67-74
Yu Chengtao, Long Junjun. Mineralization geological conditions and gold geochemical research in Sanfang, Yongfeng county[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 2011, 34 (1) : 67-74
- 13 广西矿产勘查开发局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1985
Guangxi Bureau of Geology and Mineral Prospecting and Exploration. *Regional geology annals of Guangxi* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985
- 14 伍 静, 梁华英, 姜 峰, 等. 常规次生晕法在广西资源县云头界钨钼矿找矿中的成果及意义[J]. *矿床地质*, 2010, 4 (2) : 301-307
Wu Jing, Liang Huaying, Lou Feng, et al. Result of applying routine secondary halo method to tungsten-molybdenum prospecting work in Yuntoujie area of Ziyuan county, Guangxi, and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 4 (2) : 301-307
- 15 Hough R M, Noble R R P, Reich M. Natural gold nanoparticles [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 42 : 55-61
- 16 Baranova N N, Ryzhenko B N. Computer simulation of the Au-Cl-S-Na-H₂O system in relation to the transport and deposition of gold in hydrothermal processes [J]. *Geochemistry International* 1981, 18 (4) : 46-60
- 17 罗 璋. 广西博白-岑溪断裂带地质特征与构造演化[J]. *广西地质*, 1990(1) : 25-34
Luo Zhang. The geological features and tectonic evolution in Bobai-Cenxi deep fault zone, Guangxi[J]. *Guangxi Deposits*, 1990(1) : 25-34

Different Distribution of Silver and Gold Secondary Halo in the Tian'eping Gold Ore Field, Guangxi and the Different Geochemical Features of Gold and Silver in Supergene Setting

LUO Yang¹, WU Jing^{1*}, NONG Shi-hua¹, YUAN Jin-tao¹, LIANG Hua-ying²

(College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University¹, Nanning 530004, China; Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences², Guangzhou 510640, China)

[Abstract] Most area of the Tian'eping gold ore field was covered by soil and vegetation, metamorphic siltstone and some carbonate outcrop locally. Gold and silver concentration of primary halo, semi-weathering primary halo and soil was analyzed. It is found surprisingly that secondary halo anomalies of gold and silver are separated from each other, the centers of gold secondary halo anomaly occurs at the low-lying area in the south of the Tian'eping gold ore field and the silver's at the higher ground in the north of the Tian'eping gold ore field and that the Au/Ag ratios decrease progressively from primary halo, semi-weathering primary halo, and to soil. Based on the Au/Ag ratios decreasing with the weathering intensity, together with that gold more easy to form sulfur complex compound than silver in the neutral to weakly alkaline weathering fluids which formed in an area where carbonate outcrop, it is proposed that gold is more easy to be dissolved and mobilized than silver in weakly alkaline weathering fluids and that the center of silver secondary halo anomaly should locate blind gold ore bodies. The conclusion was confirmed by drilling, which a gold ore body of about 30 m in thickness was met underlying directly the center of silver secondary halo anomaly. The results suggest that gold and silver is characterized by slightly different geochemical features in supergene environment where carbonate outcrop and more attention must be paid to silver second halo anomaly in gold ore prospecting in an area where carbonate out crop.

[Key words] gold and silver geochemical features in supergene environment gold and silver secondary halo anomaly gold ore prospecting Rong county Guangxi