

Au 的表生地球化学特征及其在异常评价中的意义

王瑞廷¹, 韩俊民¹, 王 涛¹, 代军治¹, 欧阳建平², 白山稳³

WANG Rui-ting¹, HAN Jun-min¹, WANG Tao¹, DAI Jun-zhi¹,
OUYANG Jian-ping², BAI Shan-wen³

1. 西北有色地质勘查局, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 3. 陕西省行政干部管理学院, 陕西 西安 710068

1. *Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals in Northwest China, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

2. *Faculty of Geosciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*

3. *Shaanxi Management College for Administrative Cadres, Xi'an 710068, Shaanxi, China*

摘要:地下水、地表水、土壤、水系沉积物等表生介质中, Au 主要以 6 种相态存在, 即水溶相、表面吸附相、有机相、自然金相、铁锰氧化物相和硫化物相。表生环境下 Au 更多地表现出亲铁性, 但也具有一定的亲硫性。研究表明, 不同景观区 Au 表生异常的形成机制和赋存层位不同。在表生异常实际评价过程中, 分析工作区的地质地理景观环境, 从研究异常地段表生环境参数(pH、Eh、Ec、温度、降雨量等)入手, 明确异常元素的表生地球化学特征, 分析成晕机制, 在综合地质因素的基础上对异常进行系统精细的评价。通过对黄家湾地区 Au 表生异常的研究评价, 认为在评价 Au 的表生异常时, 结合 Au 的表生迁移富集规律, 采用异常确证→相态分析→判断评序→检查评价→工作验证的方法程序, 能够取得较好的异常评价找矿效果。

关键词:金; 表生地球化学; 表生异常; 异常评价; 金矿床

中图分类号: P578.1⁺1; P595 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2010)09-1329-09

Wang R T, Han J M, Wang T, Dai J Z, Ouyang J P, Bai S W. Supergene geochemical feature of gold and its implications for anomaly evaluation. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(9):1329-1337

Abstract: The gold exists mostly in supergenic media including underground water, surface water, and stream sediments by six facies, such as soluble facies, surface adsorbing facies, organic facies, natural gold facies, iron and manganese oxides facies, and sulfide facies. The gold displays more siderophility, but has sulphophility under supergenic environment. In the process of practically evaluating supergenic anomaly, it should deeply analyze geological and geophysical landscape environment, and determine supergenic geochemical feature of anomalous elements by studying supergenic environment indexes (pH, Eh, Ec, temperature, rainfall, and so on) in anomaly location, and research anomaly-forming mechanism in order to systematically particularly evaluate anomaly on the basis of compositing geological factors. In fact, on the basis of understanding the law of gold supergenic transportation and enrichment, it can reach good anomaly evaluating exploration effect by using anomaly proving→elements facies analyzing→anomaly judgement and ordering→checking and estimating→validating work procedure during concretely evaluating gold supergenic anomaly, and illustrate by case in Huangjiawan region.

Key words: gold; supergenic geochemistry; supergenic anomaly; anomaly evaluating; gold deposit

地球化学方法在金矿勘查中占有十分重要的地位, 是寻找隐伏金矿的重要手段。随着地质找矿工作的不断深入和勘查深度的逐渐加大, 实际工作中遇

到了一系列关于异常评价、筛选和研发更有效的找矿方法、技术等问题, 诸如水系沉积物样品的代表性、不同类型金矿床地球化学异常发育特征的差异、

收稿日期: 2010-01-18; 修订日期: 2010-04-06

科技项目: “十一五”规划国家科技支撑计划课题(编号: 2006BAB01A11)资助

作者简介: 王瑞廷(1969-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事矿床地球化学、矿产地质勘查等综合研究。E-mail: wrtyf@163.com

不同表生条件下 Au 异常的查证方法和在厚覆盖区寻找隐伏盲矿等问题, 这些问题的解决都离不开对 Au 的表生地球化学性质、特征和 Au 异常形成机制的研究。著名的勘查地球化学家 P K Theobald 曾撰文论述了表生地球化学研究对于准确评价隐伏矿体引起的表生地球化学异常所具有的重大意义^[1]。因此, 近年来随着地球系统科学、全球表层系统、地球表层学、地球化学等在各个相关领域研究工作的深入^[2-4], 在勘查地球化学方面国内外普遍加强了对 Au 的表生作用地球化学这一基础理论问题的研究^[5-18], 以查明不同地质地理景观条件下 Au 及其伴生元素在表生地球化学过程中的迁移、富集规律, 确定表生因素对 Au 地球化学异常指标及其评价参数的影响程度, 从而为发展新的金矿勘查地球化学方法和评价其表生异常提供理论基础。

1 Au 的表生地球化学特征

地球表层处于汽-水-固 3 种物质状态的交界面上。该层(带)内生物地球化学循环生生不息, 物质运动形式复杂多样, 无论从物质存在状态、行为和环境物理化学条件等方面, 还是从物质演化及运动形式等方面, 表生地质系统都是内生地质系统无法比拟的。元素的存在/运动形式影响其活化、迁移、富集, 对地球化学异常的形成和评价是非常重要的。成矿元素在表生地质系统中的地球化学行为主要受温度、水、大气中的氧气和二氧化碳、有机质、酸-碱和氧化-还原反应、胶体及吸附作用等因素控制^[19-20]。对于 Au 而言, 这些因素都要通过 Au 的不同存在形式才能起作用, 因此研究 Au 的表生作用地球化学的一个基础问题是表生介质中 Au 的存在形式问题, 这是各类 Au 的表生地球化学异常评价、异常特征及异常形成机制研究的关键。目前, 根据国内外文献的报道^[8-9, 21-23], 金矿化地段地表疏松物中的表生 Au 具有多种多样的形式, 不同矿床类型或不同景观区疏松物中 Au 的主要存在形式各不相同。相态分析研究表明^[24], 土壤和水系沉积物中 Au 主要以下列 8 种赋存相态存在, 即水溶相——水溶性的金; 吸附相——被粘土矿物和铁锰氧化物表面吸附的金; 自然金相——游离态的自然金(游离相); 碳酸盐相——被碳酸盐矿物包裹的自然金; 有机相——与有机物结合的难溶的金; 铁锰氧化物相——被铁锰氧化物包裹的自然金; 硫化物相——分散在硫化物

中的自然金; 硅酸盐相——分散在石英和硅酸盐矿物中的微粒金。其中水溶相 Au 是表征 Au 的表生地球化学性质及特征的关键存在形式。一般在矿体上方 B 层土壤或水系沉积物样品中存在水溶相 Au; 湿润气候区有机相金所占比例普遍高于干旱气候区; 含金石英脉型金矿附近疏松物中的 Au 主要以游离相存在。一般认为表生介质中 Au 以多种形式存在, 但以 6 种存在方式为主, 即水溶相、表面吸附相、有机相、自然 Au 相、铁锰氧化物相、硫化物相。例如, 长江中下游湿润气候区的铁帽型金矿, 研究表明 Au 在硫化物矿石中以表面吸附相、自然 Au 相、硫化物相等形式存在。原生金以细粒—显微金(1~15 μm)、超显微金(0.5~0.005 μm)和不可见细分散金状态 3 种形式分布, 并以中等成色和含银高、变化范围大为特征, 细分散金占重要比例^[25-26]。原生金的粒度与成色是 Au 表生富集的重要因素, 它们是 Au 的表生活动性的前提条件。Au 在表生迁移过程中主要富集在溶液易于交替变化的地段中, 并且与溶液的侧向流动有关。Au 在矿源体中的赋存状态影响其被活化析出的难易程度, 制约着异常形成的强度和规模。

国外在对 Au 的表生作用地球化学研究中, 特别重视对偏提取技术的开发和应用, 藉此查明包含重要找矿信息的相态。如美国地质调查局采用偏提取技术、酶浸析法、地电化学法(CHIM)等非常规的方法手段评价已知异常, 寻找地下埋深几十米至几百米的金矿床。这方面国外学者已经取得了一系列重要成果和认识: ①通过景观地球化学与景观地球化学区划, 建立了勘查地球化学概念模型; ②以表生作用下元素矿物相和化学相(主要包括表生介质中被吸附的离子相、铁锰氧化物吸附相、原生硫化物相、有机物吸附相、粘土相和次生矿物相 6 种化学相态)的赋存形式为依据, 解释异常和选择地球化学勘查方法; ③深入研究表生作用下元素及其重矿物的性状是解释和评价表生异常的基础; ④在了解表生作用下元素分散行为和次生地球化学异常形成机理的基础上, 准确选择和使用找矿指示元素, 并以分散指数研究和衡量表生带 Au 及其指示元素的分散行为^①。20 世纪 90 年代中期以来, 偏提取技术(选择性提取技术)、地下气体测量(地球气法)、生物地球化学找矿等被称为“深穿透地球化学”方法。近年, 这套方法被称为非传统化探方法, 和其他方法一样, 偏提取技术和与之配套的分析测试手

段、数据处理、解释方法得到了较大的发展^[27-29]。

表生 Au 具有多种赋存状态、不同形态、复杂的表生结构和较单一的化学成分,其形貌十分特殊。表生 Au 形态多种多样,主要有粒状、叶片状、针状、棒状、树枝状、尖角状、纤维状、港湾状和浑圆状,还有相当数量的难以描述的形态。金的形状和大小与赋存部位有关,针状、片状、麦粒状、角粒状金粒多发育于狭窄的裂隙中。金在表生氧化过程中有 2 个明显的变化,一是自然金颗粒的增大,一是自然金矿物成色的提高。关广岳等^[29]研究认为,金粒增大是聚集结晶的“相变”过程,金的成色提高是“扩散相变”的结果。

Au 的表生活动性首先得益于含金硫化物的氧化作用。氧化作用发生不久就使金从含金矿物中析解出来,而且还产生各种有效络合剂,为金的溶解、迁移、富集提供了活动介质。在表生条件下,细菌加速了硫化物的氧化,细菌的生物活化作用促进了金的表生活动性^[29]。同样,有机质也是金表生富集的重要助推剂。在表生成矿作用中,细菌、有机质等是金溶解、迁移、沉淀的重要因素,且在有利的地质条件下有机质可以还原金。

研究表明,活动态形式的 Au 在表生条件下不仅作为离子或配合物的形式存在于各种表生载体中,而且还大量作为超微细(亚微米至纳米)颗粒以物理形式被可溶性盐类、土壤胶体、粘土矿物、铁锰氧化物和有机物所吸附或包裹^[24-25,30]。因此,只有提取金的活动态进行分析研究,对于异常检查、评价和指导找矿才最有效。

总之,Au 在从内生到外生的变化过程中,行为是复杂多样的,整体上 Au 的地球化学性质表现出以亲铁性为主,且具有一定的亲硫性。在表生环境下,硫化物的分解、金粒的不断长大和成色的提高,进一步表现出更强烈的亲铁性,亲硫性也未完全丧失。

2 Au 的表生地球化学特征在异常评价中的应用及意义

表生作用使得 Au 在表生带活化、迁移、富集,金矿床周围的土壤及水系沉积物中金的次生分散晕(包括矿床氧化带中的部分岩、矿石异常)就是在这过程中形成的。金矿床次生晕指示元素含量往往有所贫化,要注意了解风化前后金的贫化与富集情况。因此,Au 的表生地球化学特征对于快速、高效地评价 Au 的表生异常(水系沉积物和土壤地球化学

异常)具有重要的实践和理论意义。

元素活动态形式(水溶相、粘土吸附相、有机络合物相、铁锰吸附相等)是可以携带隐伏矿信息的间接找矿标志,但其成因复杂,需要结合元素总量、不同相态分量、元素相关关系、异常分布、异常区的成矿地质条件、景观环境等因素对异常进行综合分析和评价。根据这一思路对不同景观区 Au 的赋存相态及表生异常等进行了对比研究。

研究表明,在内蒙古高原干旱、寒冷的景观条件下,金矿床中金的赋存状态明显区别于景观条件不同的微细粒浸染型金矿。在山地景观条件下,微细粒浸染型金矿床中金的赋存形式通常有 3 种:显微—超显微自然金包体形式、类质同象固熔体形式和胶体吸附形式。在原生矿石中,载金矿物主要为毒砂,次为黄铁矿;在氧化矿石中,主要为粘土类矿物、炭质、褐铁矿等。据研究,内蒙古赛乌素金矿床原生矿石中的金主要以包裹体赋存于石英中,以裂隙金赋存于黄铁矿中,少量赋存于毒砂裂隙中,粒间金次之;在氧化矿中金主要与石英及针铁矿、赤铁矿有关。原生金粒以微细粒占绝对优势,其形貌基本上以微粒的粒态赋存;氧化带中以细粒金最多,并随金粒的长大出现不规则的形态,较多见的有枝杈状、姜状、多角状、马头状等。金在表生氧化过程中随氧化作用的加强在氧化带中富集,在不断富集的过程中,金颗粒长大并伴随着形态的复杂化。金粒的长大及形态变化是表生环境中金经溶解再沉淀过程的记录^[25]。金以自然金相为主。金的表生赋存矿物最主要的是褐铁矿,其他赋存矿物根据不同类型矿床的氧化情况,可分别是石英、铅矾或碳酸盐矿物。一般而言,金的表(次)生富集带多位于原生矿石和氧化矿石的界面上,在干旱气候区,pH 最低和 Eh 相对较高的矾类矿物亚带的下部及其邻近部位是金表生富集最有利的场所之一,故该部位和相关矿物应作为确定、评价金表生异常的主要对象。

在南秦岭湿润—半湿润中山丘陵的景观条件下,二台子金矿床近矿地段土壤中的金主要以自然金相(55.4%)、水溶相(13.6%)和硫化物相(7.8%)形式存在,这 3 相之和占金总量的 76.8%(表 1)。刘英俊等^[31]总结指出,在金矿床的上覆土壤中有 51%~89%的金以自然金颗粒形式存在,与以上结论完全一致。在土壤垂直剖面上,Au、Ag、As 相对富集于土壤的 A 层和 C 层,在 C 层中含量最高。A 层中腐殖

质对 Au 的固定作用、配位体对 Au 的胶体化学絮凝和聚沉作用、粘土矿物对 Au 的吸附沉淀作用等,使得 A 层金相对富集。而 C 层则由于含较多的基岩残块、原生矿物因风化淋滤而形成的残留体及其风化剥蚀而生成的表生矿物等, Au 含量最高,这也是一般情况下 Au 元素倾向于在土壤 C 层富集的主要原因。区内表生介质中金以水溶相、自然金相为主要存在形式,土壤环境偏碱性、土壤成熟度不高等条件有利于金在表生带的迁移富集,从而为其表生异常的发育提供了基础。表生地球化学作用中 Au、Cu 等元素具有一定的活动性,可以活化迁移形成表生异常,金的表生富集系数(土壤/岩石)为 4.74(表 2)就说明了这一点。在该区内开展以土壤为介质的地球化学找矿工作和表生异常检查、评价时,应以土壤 C 层为取样对象,并辅以成矿元素的相态分析研究,依据成矿元素在主要赋存相态中的含量圈定异常,提取成矿异常信息,以快速、高效地追踪矿(化)体。区内制约表生地球化学异常发育的主要因素包括地理景观、土壤环境的化学物理条件、地质背景、矿床类

型、成矿及其指示元素的表生地球化学性质等因素,在评价表生异常时要综合考虑。

在亚热带岩溶景观条件下,云南胜境关金矿床的金从基岩到上覆土壤残积层发生了明显的表生富集作用,这与岩溶景观条件有关。因为在区内的红土化过程中,含金基岩中的细分散金被溶解为络合物或胶体迁移,当遇到残积层中的还原障或吸附剂时金便沉淀下来。研究发现,矿区土壤中金主要以铁锰氧化物相(51.1%)、吸附相(13.8%)和水溶相(9.2%)形式存在,这 3 相之和占总量的 74.1%;表生矿石(土状氧化矿)中金主要以水溶相(27.0%)、自然金相(25.4%)及硅酸盐相(19.2%)形式存在,它们加起来占金总量的 71.6%,这可能是区内灰岩中的 Fe、Mn 类物质通过水解呈氢氧化物沉淀,使土壤中普遍含有较多铁、锰物质和铁、锰结核,从而与表生带更多的金发生吸附和化学反应(如铁锰氧化物与土壤溶液中的金发生共沉淀作用等),导致土壤中铁锰氧化物相、吸附相金比例增大。垂向上,矿区内 Au、Ag 在 A 层富集。Au 的表生富集系数(土壤/岩石)高达

表 1 金矿上覆土壤中金在不同相态中的平均含量及分配

Table 1 The average contents and distribution of gold in different existing forms in overlaid soil within gold deposit district

层位	水溶相 含量比例		吸附相 含量比例		自然金相 含量比例		碳酸盐相 含量比例		有机相 含量比例		铁锰氧化相 含量比例		硫化物相 含量比例		硅酸盐相 含量比例	
二台子																
(B)	40.4	13.6	22.0	7.4	165.0	55.4	12.4	4.2	13.8	4.6	9.8	3.3	23.2	7.8	11.0	3.7
胜境关																
(B)	2.8	9.2	4.2	13.8	2.0	6.6	0.4	1.3	1.5	4.6	15.6	51.1	1.5	4.9	2.5	8.2
英山																
(A)	56.6	5.4	31.2	3.5	435.5	49.2	28.4	3.2	59.6	6.7	17	1.9	18	2.0	25.0	2.8
(B)	427.3	39.4	29.9	2.7	568.8	47.3	22.8	1.8	62.9	5.9	5.4	0.5	9.6	0.9	16.8	1.6

注:含量单位为 $\times 10^{-9}$;比例表示金在每种相态中的含量占总量之百分数;A—腐殖层;B—淋积层

表 2 陕西省二台子金矿区成矿和指示元素表生富集系数

Table 2 The supergenic enriched coefficient of indicated elements in Ertai gold deposit district, Shaanxi Province

表生富集系数	Au	As	Hg	Sb	Ag	Cu	Zn	Pb
土壤/岩石	4.74	2.12	10.64	2.15	0.65	4.52	3.26	4.79
水系沉积物/岩石	0.39	0.40	0.87	0.92	0.44	1.80	2.97	7.48

注: Au 由中国地质大学测试中心用石墨炉原子吸收光谱法分析,其他元素为发射光谱法分析,下同

12.62~39.01(表 3、表 4)。因此,在岩溶景观区开展金的表生异常检查、评价时,应以土壤 A 层为取样对象,重点分析铁锰氧化物相、吸附相金,从而准确、快速地圈定和评价异常。

在高寒气候带矿化碳酸盐岩分布区,金在不同介质中的平均含量一般具有岩石>土壤>水系沉积物的分散规律;而在亚热带、热带的矿化碳酸盐岩、铝硅酸盐岩分布区,金在不同介质中的平均含量则普遍为土壤>水系沉积物>岩石,或土壤>岩石>水系沉积物的分布规律,即金在表生介质(尤其是风化土壤)中具有明显的富集特征。金在不同介质中的这种分布规律,导致同一矿化类型、同一矿化规模的金矿化区常常表现为热带、亚热带气候区金的背景值和异常强度(如贵州普安泥堡金异常区)明显高于高寒草甸区(如甘南大水、忠曲金异常区)^[32]。所以,在金的表生异常评价过程中,必须分析景观因素和异常形成机制,才能准确地判断、解释异常。

总之,表生环境中 Au 元素存在形式的多样性决定了其表生异常形成的复杂性。由于表生环境复杂多变,开放的表生地质系统不断演化,Au 在表生介质中的地球化学行为复杂多样,不同景观条件、不同矿化类型和不同的成矿地质背景下,Au 异常的形成机制是各不相同的^[33-37],因此在以异常形成机制分析为基础的系统评价思想评价异常时,应深入研究异常元素的表生地球化学特征,剖析查明异常的形成机制,以更好地识别、评价异常。在异常的评价方法上应同时体现针对性、多样性和可行性,因“地”

制宜,注重地质环境的对比分析。如上所述,景观和表生因素(如气候带、母岩岩性、残积层厚度等)对 Au 的表生地球化学异常强度有明显的影 响,如热带、亚热带地区,尤其是碳酸盐岩分布区,残积土壤中的金相对于基岩有明显的富集倾向。同时,由于残坡积土壤层结构受地形、气候、母岩性质、植被发育程度等因素的制约,表生异常的发育层位也各不相同。因而,不同景观区中同一矿化类型所产生的 Au 的表生地球化学异常强度,一般情况下为不可比地球化学标志,而景观、表生因素对 Cu 元素从基岩→表生介质的正常分散规律没有明显的影 响^[12,38]。

Au 异常区内表生介质中 Au 的各种存在形式均可作为有效的异常评价标志。依据 Au 的表生地球化学性质、行为及特征,在实际异常评价过程中笔者摸索出一套工作方法如下。

(1)在所查证异常的发育地段重新取样或取得原测试样品的副样,重新进行精确定量分析,确证异常存在。

(2)根据异常形态和地质条件作 1~2 条岩石控制剖面 and 2~3 条土壤垂向剖面,采集一定量的岩石样品,在土壤剖面一定的层位(A、B、C、D 层)和亚层中分别采取土壤样品 200~300g,共取样约 1000g,用以进行 Au 的相态分析。

(3)在野外现场分析各土壤样品的 pH、Ec 和 Eh 值,即将所测土样捣碎,过 40 目筛,称取 5g,溶于 25mL 的去离子水中,将溶液搅拌均匀,而后用仪器测定各参数值。

表 3 云南省胜境关金矿区成矿和指示元素表生富集系数

Table 3 The supergenic enriched coefficient of indicated elements in Shengjingguan gold deposit district, Yunnan Province

表生富集系数	Au	As	Hg	Sb	Ag	Cu	Pb	Zn
土壤/岩石	12.62	5.13	0.97	1.05	3.93	2.03	0.97	2.54
水系沉积物/岩石(矿区)	2.10	2.32	0.87	0.43	2.00	2.13	2.27	2.98
水系沉积物/岩石(区域)	0.30	0.92	0.52	0.31	0.96	1.11	5.18	2.45

表 4 云南省英山金矿区成矿和指示元素表生富集系数

Table 4 The supergenic enriched coefficient of indicated elements in Yingshan gold deposit district, Yunnan Province

表生富集系数	Au	As	Hg	Sb	Ag	Cu	Zn	Pb
土壤/岩石(近矿)	39.01	15.25	7.92	7.15	16.25	5.45	7.95	24.22
土壤/岩石(远矿)	12.18	5.55	3.83	9.13	2.9	6.38	9.87	12.00

(4)进行 Au 的水溶相、吸附相、自然金相、碳酸盐相、有机相、铁锰氧化物相、硫化物相和硅酸盐相 8 种相态分析,确定 Au 的富集相态。

(5)分析样品化学成分,包括 Au、Ag、As、Sb、Pb、Cu、Hg、Zn、Bi 等元素。

(6)对比岩石、土壤和水系沉积物中 Au 的含量变化趋势,分析 Au 在表生环境中的活动性及其在表生带地球化学障作用下的迁移富集规律,明确异常的形成机制。

(7)异常优选排序。在对异常的地球化学特征、控矿地质因素、物探和地质信息、异常形成机制等进行系统分析的基础上,确定异常评价指标并予以赋值,最后在计算机上进行评序优选。

(8)对优选出的异常在野外追踪异常源,并布置一定的地质地球化学剖面,最后研究给出异常综合评价报告,确定找矿靶区,以便进一步深入工作,验证异常评价结果。

根据这一异常评价思路,对镇安黄家湾地区的 1:10000 分散流异常进行了检查评价。镇安黄家湾地区距二台子金矿区约 80km,表生景观条件与二台子矿区基本相同,区内断裂构造以北西向为主。黄家湾断裂从异常区南部通过,褶皱构造主要有金线湾向斜等,其核部为奥陶系,翼部为寒武系,区内主要出露泥盆系九里坪组(D_{9j})、星红铺组(D_{9x})和古道岭组(D_{9g})。该区 1:20 万和 1:5 万水系沉积物测量均有 Au 的异常显示,随后对黄家湾庙沟北部地区进行了分散流加密(沟系次生晕),发现 1、2 号异常(图 1),并布置了地表槽探,但并未发现金矿(化)体,异常原因不明,为此在该区开展了表生地球化学研究工作,对区内 Au 的表生异常进行剖析。区内为中低山地形,水系较发育,植被较厚,土壤 pH 值在 7.50~9.05 之间,平均 8.40,土质呈碱性,土壤电导率值 Ec 在 20.6~78.4 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间,平均为 50.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$,盐度不大。土壤较发育,土层厚,异常范围内山坡上有耕地,多

为土壤覆盖区,露头有限。

区内 1 号异常(图 1)位于南沟南坡一带,为一椭圆状异常,轴向北西,异常面积 0.74km²,元素组合以 Au、Hg 为主,局部伴有 Ag、As、Zn 异常。Au 异常最高 257.04 $\times 10^{-9}$,平均 79.79 $\times 10^{-9}$;Hg 含量最高为 3.50 $\times 10^{-6}$,平均为 1.58 $\times 10^{-6}$;Ag 最高为 2.048 $\times 10^{-6}$ 。2 号异常位于 1 号异常东侧,总体呈北西向带状展布,元素组合与 1 号异常相同,Au 元素异常强度较弱。为了进一步解剖评价 1 号异常,在该异常内布设了一条土壤剖面及一条岩石剖面,并对部分岩石、土壤样进行了常量元素和相态分析。研究表明,区内岩石中 Au 的平均含量为 2.86 $\times 10^{-9}$,低于土壤中 Au 的平均含量(4.78 $\times 10^{-9}$),高于水系沉积物中 Au 的平均含量(1.50 $\times 10^{-9}$),Au 的土壤相对于岩石之表生富集系数为 1.67,水系沉积物相对于岩石的表生富集系数为 0.52,水系沉积物相对于土壤的表生富集系数为 0.31(表 5),且 Au 的赋存相态分布规律和二台子矿区基本类似,这说明 Au 从原生状态(岩石)进入残坡积土壤趋于富集,而从岩石和残坡积土壤中进入水系沉积物趋于分散,且分散程度较大。这与二台子金铜矿区 Au 的表生变化规律一致。但应指出的是,本次采集的土壤样品中 Au 的分析结果(石墨炉原子吸收光谱分析)与原 1:10000 分散流加密 Au 的分析结果(化学光谱分析)相差较大,这次土壤中 Au 的平均含量为 4.78 $\times 10^{-9}$,而原 1:10000 分散流 Au 异常平均含量高达 56.09 $\times 10^{-9}$ (39 件样品),如果分散流工作符合规范,则黄家湾地区 Au 从基岩(Au 平均含量为 2.86 $\times 10^{-9}$)进入水系沉积物发生强烈富集,与二台子矿区 Au 的表生聚散规律完全不同。看来,即使在同一地球化学景观区内,Au 的表生迁移富集规律也存在很大差异,进行表生异常评价时,对研究区的异常应进行具体分析。

在包括镇安黄家湾在内的柞水—镇安—山阳一带,李文亢等^[9]以 1:20 万区域化探异常为基础,结合

表 5 陕西省镇安县黄家湾地区成矿和指示元素表生富集系数

Table 5 The supergenic enriched coefficient of indicated elements in Huangjiawan area, Zhen'an County, Shaanxi Province

表生富集系数	Au	As	Hg	Sb	Ag	Cu	Zn	Pb
土壤/岩石	1.67	1.68	3.71	3.62	0.76	1.68	1.46	2.79
水系沉积物/岩石	0.52	1.00	3.96	4.21	0.65	1.36	1.30	0.70

注: Au 为中国地质大学测试中心石墨炉原子吸收光谱法分析,其他元素为发射光谱法分析

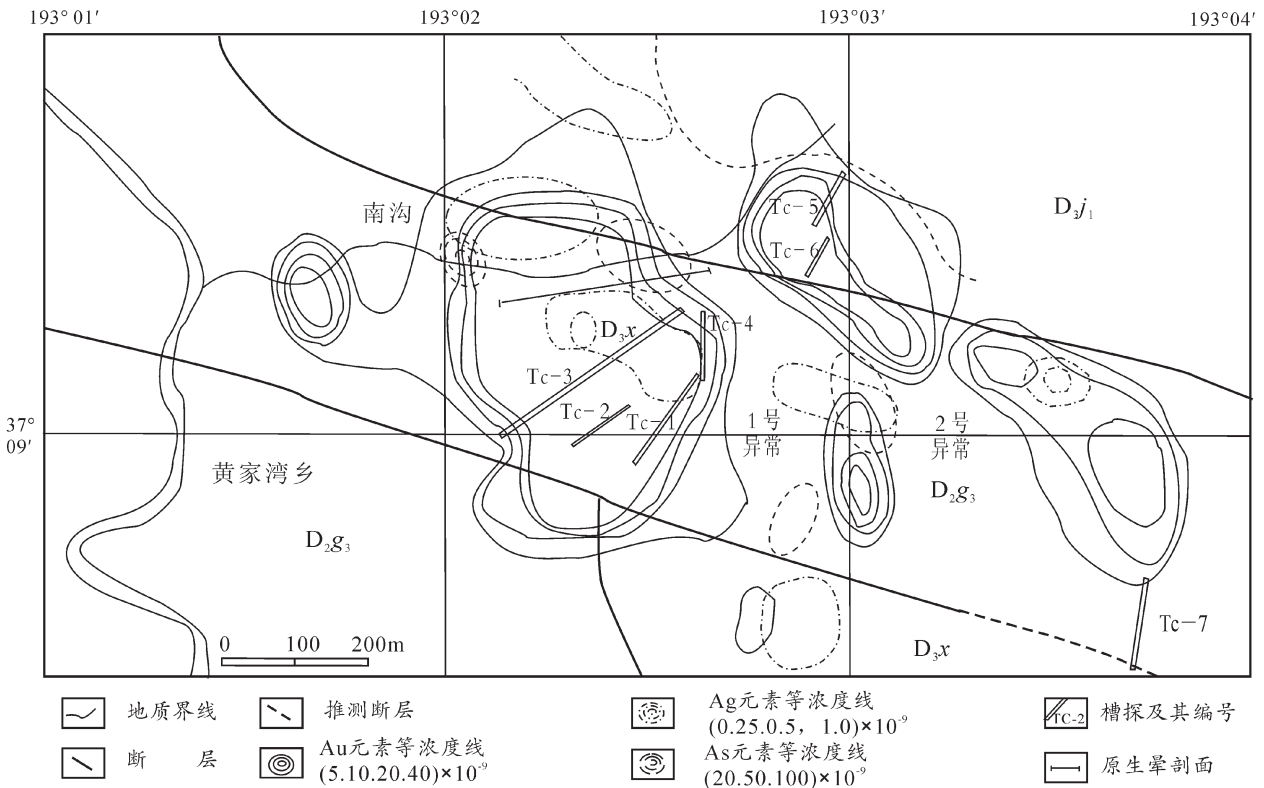


图 1 陕西省镇安县黄家湾地区 Au 地球化学异常图

Fig. 1 Gold geochemical anomaly map of Huangjiawan area, Zhen'an County, Shanxi Province

D₃j₁—九里坪组灰绿色钙质石英粉砂岩、钙质石英砂岩夹深绿色千枚岩、泥砂质灰岩、砂质板岩;D₃x—星红铺组千枚岩夹生物灰岩、泥质条带状灰岩、瘤状灰岩;D₃g₃—古道岭组上部灰色中厚层状灰岩或大理岩、结晶灰岩、板岩夹透镜状灰岩,底部砂砾岩

区域地质构造、地球化学演化,以及成矿、成晕作用等研究,分析了区域 Au 异常特征、分布规律及其与金矿化的关系,指出带内具一定规模的金矿床均位于以 2.9×10^{-9} 圈定的规模巨大的 Au 高背景值区内,金矿床无一例外地处于高背景值区内以 5.6×10^{-9} 圈定的局部异常中,而无高背景值的局部异常,即使强度较大,也未发现具一定规模的金矿化。由此,依据黄家湾地区水系沉积物相对于土壤的表生富集系数(0.31),反算出区内反映一定规模金矿床的 Au 土壤异常下限应为 9.35×10^{-9} ,指示金矿床具体位置的局部 Au 异常下限应为 18.06×10^{-9} (这与二台子金铜矿区土壤中 Au 平均含量为 18.17×10^{-9} 非常吻合)。而区内土壤中 Au 的异常平均含量仅为 4.78×10^{-9} ,仅有一单点异常(43.3×10^{-9}) 大于 9.35×10^{-9} 这一异常下限,因此判断区内根据异常指示矿化或矿体的可能性不大,找矿前景不太理想。这一结论在该区进一步的找矿和异常解剖中得到了验证。可见,在

研究相应景观区 Au 的表生迁移富集规律的基础上,按照异常确证→相态分析→判断评序→检查评价→工作验证的异常评价找矿思路开展工作,实际运用效果较好,对于快速判定 Au 异常、实现找矿突破具有重要意义。

另外,有的学者还提出对热液金矿床形成的 Au 的地球化学异常,可通过查明 Au 是呈集中状态存在,还是以分散状态存在来评价异常,区分矿(化)异常与非矿异常,并通过查明异常样品中石英包裹金的含量,判别原始热液中 Au 的浓度,进而推断是否具备富集成矿的物质基础,查明形成金矿床的地质背景条件^[40]。这也是通过对表生介质中的 Au 进行痕量相态分析、实现异常评价的方法之一。由于 Au 特殊的地球化学性质及其无明显的成矿专属性,对于 Au 表生异常的分析评价是金矿勘查的重要手段,选择性(偏)提取技术勘查深度可达数百米^[41-43],加强这方面的深入探索研究意义深远、必不可少。

近年,在凤(县)-太(白)铅锌多金属矿集区采用王水溶矿提取了土壤活动态 Cu、Pb、Zn、As 和 Sb,元素地球化学图表明,Cu、Pb 和 Zn 的地球化学异常位置与深部矿化信息有明显的对应关系,说明表生条件下元素活动态的含量异常具有明显的找矿指示意义。在资源勘查进入攻深找盲阶段并向第二找矿空间进军的过程中,仔细评价表生异常,提取示矿信息,发现矿化线索,是找矿评价的重要环节,有助于取得隐伏矿找矿的突破。

3 结论

表生地质系统是化学和生物学成分通过岩体或矿体串接起来的过程反映系统,该系统中 Au 的表生地球化学特征主要表现为活动性、畸变性、多相态等。通过研究得出下述结论。

(1)地下水、地表水、土壤、水系沉积物等表生介质中 Au 主要以 6 种相态存在,即水溶相、表面吸附相、有机相、自然金相、铁锰氧化物相和硫化物相。表生环境下 Au 更多地表现出亲铁性,但也具有一定的亲硫性。

(2)不同景观区 Au 表生异常的形成机制和赋存层位不同。在表生异常实际评价过程中,深入分析工作区的地质地理景观环境,从研究异常地段表生环境参数(pH、Eh、Ec、温度、降雨量等)入手,明确异常元素的表生地球化学特征,分析成晕机制,从而在综合地质因素的基础上对异常进行系统精细的评价。

(3)通过对黄家湾地区 Au 表生异常的研究评价,认为在具体评价 Au 的表生异常时,结合 Au 的表生迁移富集规律,采用异常确证→相态分析→判断评序→检查评价→工作验证的方法程序,能够取得较好的异常评价找矿效果。

致谢:在本文撰写过程中得到中国地质大学蒋敬业教授、朱有光教授等的帮助,评审专家提出了很好的修改建议,在此表示诚挚的感谢。

参考文献

[1]Theobald P K. One mans view of a research gap[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1981, 15(1):1-20.
 [2]翟裕生. 地球系统科学与成矿学研究[J]. 地学前缘,2004,11(1):1-10.
 [3]马宗晋,高祥林,杜品仁. 全球表层系统研究的思考[J]. 地学前缘,2006,13(6):96-101.

[4]陈骏,王鹤年. 地球化学[M]. 北京:科学出版社,2004:292-300.
 [5]Colin F, Vieillard P. Dissolution and translocation of residual gold particles under equatorial lateritic conditions[J]. Chemical Geology, 1990, 84:38-39.
 [6]Fletcher W R. Aspects of exproation geochemistry in southeast Asia: soils,sediments and potential for anthropogenic effects[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1996,57: 31-43.
 [7]Ledin M. Accumulation of metals by microorganisms—processes and importance for soil systems[J]. Earth—science Reviews, 2000, 51(1/4): 1-31.
 [8]Santosh M, Omana P K. Very high purity gold from lateritic weathering profile of Nilamber, Southern India[J]. Geology, 1991,19:746-749.
 [9]Boyle R W. The geochemistry of gold and its deposits[M]. Ottawa: Geological Survey of Canada, 1979: 1-280.
 [10]谢学锦. 战略性与战术性的深穿透地球化学方法[J]. 地学前缘, 1998,5(2):171-183.
 [11]王瑞廷. 秦岭造山带泥盆系(陕西段)主要金矿床地球物理地球化学异常特征及找矿标志[J]. 物探与化探,1999,23(1):14-20.
 [12]王瑞廷. 不同景观区金铜表生地球化学异常特征对比及其评价指标体系的研究[D].中国地质大学硕士学位论文,1999: 11-30.
 [13]王瑞廷,欧阳建平,方维萱. 不同景观区金的表生地球化学异常特征研究——以两类景观区对比研究为例[J]. 西北地质科学, 1999,20(2):76-83.
 [14]王瑞廷,欧阳建平,朱有光. 不同景观区表生介质中金的赋存相态对比研究及其找矿意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,2000,19(4):418-420.
 [15]王瑞廷,欧阳建平. 表生地球化学的研究现状及进展[J]. 矿产与地质,2001,15(6):121-125.
 [16]刘炳璋,陈治才,田中保. 表生地球化学异常形成机理及异常解释[J]. 四川地质学报,2007,(3):215-219.
 [17]赵琦. 川西高原草原地区的金矿成矿元素的表生地球化学特征[J]. 物探与化探,1999,23(5):381-387.
 [18]刘金海,蒋敬业. 甘南高寒草甸景观区金的表生地球化学特征[J]. 矿产与地质,1999,13(6):354-357.
 [19]张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础[M]. 兰州:兰州大学出版社,1997:34-37.
 [20]牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京:北京大学出版社,1999:56-61.
 [21]蒋敬业,谭大芳,柴红年,等. 水化学方法在区域化探异常评价中的应用研究[J]. 地质科技情报,1999,18(3):104-108.
 [22]王云,魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京:中国环境科学出版社,1995:108-116.
 [23]王继伦,李善芳,齐文秀,等. 中国金矿物探、化探方法技术的研究与应用[M]. 北京:地质出版社. 1997:229-251.
 [24]朱有光,蒋敬业. 金矿地球化学找矿[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1993:129-131.
 [25]关广岳,王恩德,李力,等. 中国金矿床表生地球化学[M]. 沈阳:东北大学出版社,1994:1-159.
 [26]韦永福,吕英杰,江雄新,等. 中国金矿床[M]. 北京:地震出版社, 1994:131-139.
 [27]唐金荣,崔熙琳,施俊法. 非传统化探方法研究的新进展[J]. 地质

- 通报, 2009, 28(2/3): 232-244.
- [28] 王学求, 谢学锦. 非传统金矿化探的理论与方法技术研究[J]. 地质学报, 1996, 70(1): 84-95.
- [29] 关广岳. 金属矿床氧化带微生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 33-56.
- [30] 谢学锦, 邵跃, 王学求. 走向 21 世纪矿产勘查地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 125-142.
- [31] 刘英俊, 马东升. 金的地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 132-312.
- [32] 朱有光, 蒋敬业, 李泽九, 等. 试论我国重要景观区中景观、表生因素对金、铜区域地球化学异常标志的影响[J]. 物探与化探, 2001, 25(6): 418-424.
- [33] 郭世源, 周书欣. 地表地球化学作用 Eh 和 pH 的作用[J]. 地质地球化学, 1988, (6): 55-58.
- [34] 周学粹. 金在表生条件下溶解、迁移和沉淀的探讨[J]. 矿物岩石, 1990, 10(3): 6-14.
- [35] 林宝增. 坪定砷金矿床氧化带的表生地球化学作用[J]. 甘肃地质学报, 1993, 2(2): 67-74.
- [36] 郑大中. 表生条件下金的迁移形式和富集机理[J]. 地质论评, 1994, 40(2): 70-75.
- [37] 郑大中, 郑若锋. 含金黄铁矿氧化过程中金溶解的探讨[J]. 地质论评, 1997, 43(1): 45-50.
- [38] 朱有光, 蒋敬业, 李泽九, 等. 试论中国重要景观区区域地球化学异常系统评价的量化模型[J]. 物探与化探, 2002, 26(1): 17-22.
- [39] 李文亢, 方永安, 石准立, 等. 秦岭东部微细金矿成矿条件[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 10-93.
- [40] 龚美菱. 相态分析与地质找矿[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 212-236.
- [41] 孙培基, 韦永福. 当代中国金矿地质[M]. 北京: 地震出版社, 1996: 292-315.
- [42] 伍宗华. 隐伏矿床的地球化学勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1-69.
- [43] 施俊法, 周平, 唐金荣, 等. 关于金属矿床深部找矿关键技术发展战略的思考[J]. 地质通报, 2009, 28(2/3): 198-207.
- ① 吴传璧, 等. 国外区域化探异常评价方法. 1994: 48-53.