

文章编号:0258-7106(2002)04-0356-10

# 陕西镇安二台子金铜矿床表生地球化学异常特征\*

王瑞廷<sup>1,2</sup> 方维萱<sup>3</sup> 欧阳建平<sup>4</sup>

(1 西北大学地质学系,陕西 西安 710069; 2 西北有色地质勘查局,陕西 西安 710054; 3 中国科学院地球化学研究所,贵州 贵阳 550002; 4 中国地质大学地球科学学院,湖北 武汉 430074)

**摘要** 为查明二台子金铜矿床的表生地球化学异常特征,采用土壤地球化学综合剖面的研究方法,对其进行详细的分析研究。结果表明,区域上二台子金铜矿床的表生地球化学异常元素组合为 Au-As-Sb-Hg-Cu,并表现出与原生异常在组合、含量等特征上的一致性。矿区内金、铜等成矿及指示元素在土壤中的不同层位产生了一定程度的富集。土壤和岩石样品的 Au, As, Hg, Cu 均密切相关。该矿床上覆的土壤及氧化矿石中的金主要以自然金相、水溶相和硫化物相形式存在,金的这种赋存相态特征可以作为寻找掩埋和隐伏金矿床的标志。

**关键词** 地球化学 金存在形式 次生晕异常 金铜矿床 二台子

**中图分类号**: P618.51; P612

**文献标识码**: A

矿床表生地球化学异常特征的研究是深入探讨一定地理景观条件下元素表生作用地球化学过程及其表生异常形成、迁移理论的基础,对于异常评价及研究表生异常形成机理和找矿方法具有十分重要的理论和实际意义。1981年,著名的勘查地球化学家 Theobald(1981)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。20世纪80年代中期以来,各国的勘查地球化学家对表生地球化学作用特征的详细研究工作越来越重视,发表了许多研究成果(Benedtti, et al., 1990; Grimm, et al., 1990; Colin, et al., 1990; Santosh, et al., 1991; Ledin, 2000),近年来我国在这方面也取得了不少进展(任天祥等, 1983; 周学粹, 1990; 林宝增, 1993; 郑大中, 1994; 郑大中等, 1997; 王学求, 2001)。目前,以景观地球化学理论和偏提取及相态分析技术为基础,对不同地质地理条件下成矿元素及其伴生元素表生地球化学迁移过程及其成晕机制的探索,是这一领域的研究热点。本文从表生地球化学异常特征方面,通过土壤地球化学综合剖面 and 金的相态分析研究,探讨陕西省镇安县二台子金铜矿床金、铜及其成矿指示元素在土壤中的

富集层位与成晕机制,并对其制约因素进行分析。

## 1 研究区地理景观特征及区域地质背景

### 1.1 地理景观特征

二台子金铜矿床位于陕西省镇安县北回龙乡二台子,距镇安县城约12 km。

研究区位于秦岭南坡,属湿润-半湿润低山丘陵景观区,中山地貌,地形起伏较大,山峰海拔多在1 000 m以上,最高可达1 615 m,相对高差500~700 m。水系较发育。区内为亚热带湿润季风气候,旱生落叶阔叶林与灌丛植被较发育,年平均气温12~14℃,年活动温度总和400~5 000℃。年降雨量400~900 mm,年蒸发量小于年降雨量,干燥度1.0~1.5,这些为区内表生地球化学作用提供了较好的水热条件。该区土壤不太发育,主要为褐土、山地棕壤,其剖面层次不明显,多由腐殖层、粘化层和残积层组成。土壤微偏碱性,pH值为6.68~9.03,平均为8.53;电导率 $E_c$ 值为48.3~313.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ,平均为90.97  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。

\* 本文得到原地质矿产部重点方法技术项目(96012002)和西北有色地质勘查局人才基金联合资助  
第一作者简介 王瑞廷,男,1969年生,博士研究生,主要从事矿床地球化学及矿产勘查方面的研究。  
收稿日期 2001-10-22; 改回日期 2002-07-05。李岩编辑。

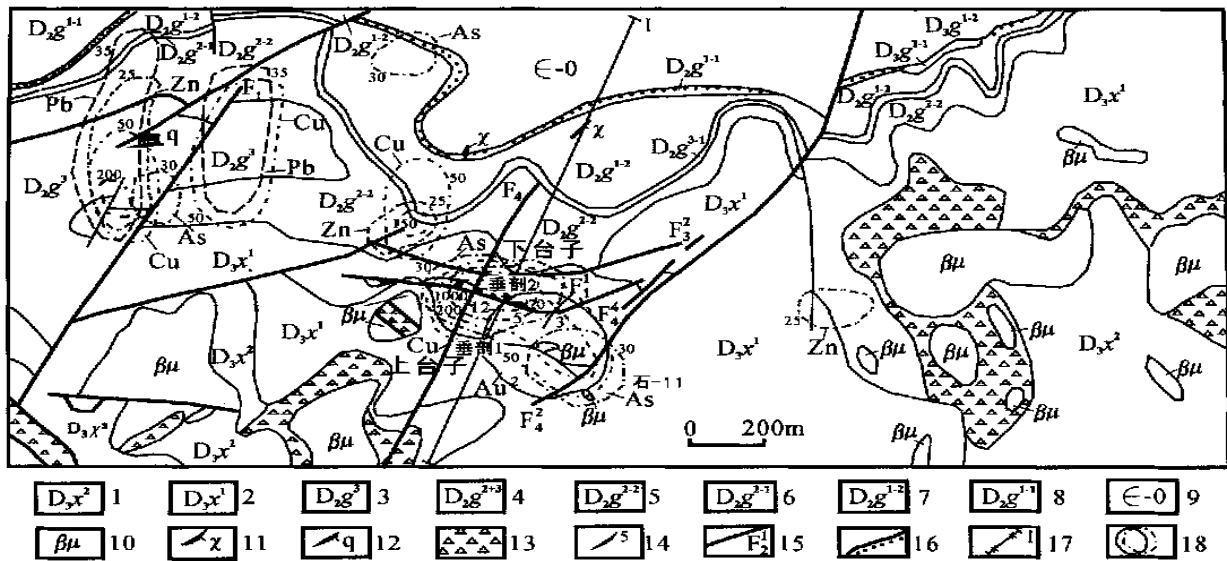


图 1 二台子金铜矿区地质及表生地球化学异常略图(据李文亢等,1993 修编)

1—星红铺组上段大理岩、含铁白云质砂岩、角砾岩、破碎状板岩及硅化大理岩;2—星红铺组下段灰绿色条带状板岩;3—古道岭组上段上部中厚层灰岩,下部含碳质板岩;4—古道岭组上段及中段薄层灰岩、泥灰岩;5—古道岭组中段含碳灰岩;6—古道岭组中段复成分角砾岩;7—古道岭组下段砂砾岩及砂质灰岩;8—古道岭组下段单成分砾岩;9—寒武-奥陶系厚层状碳质石灰岩;10—辉绿岩;11—煌斑岩脉;12—石英脉;13—角砾岩;14—金矿体及编号;15—断层;16—不整合界线;17—土壤水平剖面(直线)及垂直剖面(×)位置;18—表生异常等值线。各元素表生异常等值线取值分别为: Au 2, 5, 10 × 10<sup>-9</sup>; Cu 50, 200, 1 000 × 10<sup>-6</sup>; As 30, 70, 100 × 10<sup>-6</sup>; Ag 0.1, 0.2, 0.5 × 10<sup>-6</sup>; Pb 35, 100, 500 × 10<sup>-6</sup>; Zn 25, 150, 500 × 10<sup>-6</sup>

Fig.1 Sketch map showing geology and supergene geochemical anomalies in the Ertaizi gold copper orefield (modified after Li et al., 1993)

1—Upper Member of Xinghongpu Formation: marble, ferrous dolomite-bearing sandstone, breccia, shattered slate, and silicized marble; 2—Lower Member of Xinghongpu Formation: greyish green banded slate; 3—Upper Member of Gudaoling Formation: upper medium-thick layered limestone and lower carboniferous slate; 4—Upper and Middle Member of Gudaoling Formation: thin-layered limestone, marl; 5—Middle Member of Gudaoling Formation: carboniferous limestone; 6—Middle Member of Gudaoling Formation: complex breccia; 7—Lower Member of Gudaoling Formation: sand conglomerate and arenaceous limestone; 8—Lower Member of Gudaoling Formation: simple conglomerate; 9—Cambrian-Ordovician system: thick-layered carboniferous limestone; 10—Diabase; 11—Lamprophyre vein; 12—Quartz vein; 13—Breccia; 14—Gold orebody and its serial number; 15—Fault; 16—Unconformity; 17—Locations of horizontal and vertical sections; 18—Contour lines of metallogenic and indicator elements in supergene geochemical anomaly. The values of Contour Lines are: Au 2, 5, 10 × 10<sup>-9</sup>; Cu 50, 200, 1 000 × 10<sup>-6</sup>; As 30, 70, 100 × 10<sup>-6</sup>; Ag 0.1, 0.2, 0.5 × 10<sup>-6</sup>; Pb 35, 100, 500 × 10<sup>-6</sup>; Zn 25, 150, 500 × 10<sup>-6</sup>

### 1.2 区域地质背景及矿床地质特征

该区位于秦岭造山带凤县—镇安褶皱系之东端。区域上近东西向的凤镇—山阳同生深大断裂,对柞水—山阳成矿带内的地层、岩浆岩及矿产的分布起主要控制作用,为区内的控矿断裂。区内出露地层为一套以碳酸盐岩为主的碎屑-碳酸盐沉积建造,包括上泥盆统古道岭组(D<sub>3</sub>g)、星红铺组(D<sub>3</sub>x)及寒武系-奥陶系、奥陶系-志留系等前泥盆纪地层。矿区处于小磨岭复式背斜南翼的次级西干沟—东干沟背斜南翼,为一南倾的单斜,矿区地层较平缓,倾角以 15~45°为主。区内断裂构造发育,主要为相互交错的東西向和北东向断裂,如镇安—板岩镇断裂

等。沿断裂分布有角砾岩等。区内岩浆岩广泛发育,以印支期、燕山期酸性及中酸性岩浆活动最为强烈,分布最广,并有辉绿岩脉、煌斑岩脉等出露。

二台子金铜矿床产于上泥盆统星红铺组(D<sub>3</sub>x)中(图1)。矿区内东西向断裂控制了金矿体的产出,东西向与北东向断裂交错部位为成矿有利地段,后期岩浆热液活动可能为金的富集创造了条件。矿床具明显的层控特征,其矿源层是在泥盆系特定的局部沉积环境下形成的,前人已对矿源层的岩石学、成因矿物学、地质背景及矿床原生地球化学异常特征进行了研究(徐国凤等,1983;张复新,1984;李文亢等,1993;张复新等,1997;方维萱等,2000)。目前,

多数学者认为该矿床属卡林型金矿床(李文亢等,1993;杨蔚华等,1997;张复新,1998b;王瑞廷,1999)。

该矿床矿石类型有黄铁矿型角砾状金矿石、含铜黄铁矿型角砾状金矿石、富铜黄铁矿型块状铜金矿石等。矿物共生组合为黄铁矿-黝铜矿-石英-自然金。自然金成色 > 950,以显微金为主(粒径为 0.5 ~ 2 μm),矿石矿物中原生矿物有黄铁矿、自然金、自然银、砷黝铜矿、辰砂、闪锌矿、黄铜矿、辉铜矿等,表生矿物有褐铁矿、蓝铜矿、孔雀石等,脉石矿物有石英、方解石、铁白云石、重晶石、绢云母、钠长石等。金矿物除极少数呈独立状态存在外,绝大多数赋存于黄铁矿和含铁白云石中,在方解石、石英、钠长石中仅有少量分布。围岩蚀变为铁碳酸盐化、钠长石化、硅化等。

## 2 主要成矿元素区域地球化学背景及异常特征

### 2.1 主要成矿元素区域地球化学背景

矿床主成矿元素为 Au, Cu, 与其密切相关的有 Ag, As, Zn, Hg, Pb 等。这些元素在不同样品介质中的区域地球化学背景值见表 1。

区内 Au 在赋矿角砾岩中丰度最高为  $0.1 \times 10^{-6}$ , 比金的克拉克值高出约 26 倍, Cu 在赋矿角砾岩中丰度为  $64 \times 10^{-6}$ , 略高于克拉克值。二台子泥盆系含金岩系中钙质细砂岩、钙质粉砂岩、泥岩、薄层灰岩  $w_{Au}$  平均为  $14 \times 10^{-9}$ , 多为地壳金丰度的 3 ~ 5 倍(方维萱等, 2000)。

### 2.2 区域地球化学异常特征

矿区位于柞水—山阳成矿带西部 Au, Cu, Ag, Sb, Hg, As, Pb 地球化学分区。该分区内以 Cu, Ag, Au, As, Pb 高背景场及局部的高值异常为主体, 其北

部相对富集 Au, As, Cu, Ag, Pb, 二台子金铜矿床、青林沟金铜矿点等就产于其中;南部相对富集 Au, As。区域异常沿乾佑河两侧分布;受南北向同生沉积断裂控制,异常以 Cu, Au, As, Pb, Zn 为主。Au 异常规模大,浓度高;Cu 异常规模不大,但浓度较高。1:20 万水系沉积物异常元素组合为 Au-Sb-Cu-Hg-As-Ag 等,异常与断裂构造关系密切,空间上多分布于柞山、镇旬泥盆纪古沉积盆地的边缘斜坡地带,且异常多位于中、上泥盆统中。

据前人研究,区域上二台子—西干沟为 Au 的高背景场,其展布以东西、南北向为主。Cu 在柞水—镇安表现出高背景地球化学场,其展布方向仍以东西、南北向为主,在二台子出现高值地球化学异常 ( $w_{Cu} > 50 \times 10^{-6}$ )。指示二台子金矿的水系沉积物地球化学异常为石-11 号异常(图 1),其元素组合为 Au-Cu-Ag-Hg-Zn-Sb, Hg-Au 异常规模大, Au 异常面积约  $6.4 \text{ km}^2$ , 其  $w_{Au}$  最高达  $5 \times 10^{-9}$ , 平均为  $2.7 \times 10^{-9}$ , 异常下限为  $1 \times 10^{-9}$ ;  $w_{Cu}$  最高为  $1250 \times 10^{-6}$ , 平均为  $410 \times 10^{-6}$ , 异常下限为  $25 \times 10^{-6}$ 。平面上,在矿床产出部位 Au, Cu, As 有明显的浓集中心, Au, Cu 浓集区并不吻合,空间上有一定的位移,与 Au, Cu 矿体的产出特征有关;Hg, As 异常范围较广,包括了 Au, Cu 异常。从二台子矿床与表生异常的关系分析, As, Au, Cu 是该类矿床的有效指示元素。矿物地球化学研究表明含金黄铁矿及砷黝铜矿是引起 As-Au-Cu 组合异常的主要矿物(李文亢等, 1993)。

从原生地球化学异常特征来看,以 Au 为主, Ag, Ba, As, Mn, Mo 次之的组合异常是本区卡林型金矿(化)的原生异常特征;Cu, Au, Ag, As, Ba, Pb, Zn, Sb, Co, Ni, Mo, Mn 多元素组合异常为本区铜金矿(化)体的原生异常特征, Cu, Pb, Zn, Ag, Sb 异常在铜金矿体上尤为清晰。矿区内 Au, Ag, Cu, Ba, As,

表 1 不同样品介质中成矿及相关元素区域地球化学背景值

Table 1 Regional geochemical background values of ore-forming elements and related elements in different sample media

样品	$w_B/10^{-9}$			$w_B/10^{-6}$		
	Au	Ag	As	Cu	Zn	Pb
基岩	1.2	0.06	8.4	30	30	27
土壤	-	-	12	37	63	42
水系沉积物	1	< 0.1	20	25	53	2.3
地壳丰度	3.8	0.062	2.3	46	77	13

据张本仁等, 1989;李文亢等, 1993;王瑞廷, 1999 资料整理。“-”为低于检出限。

Mn 等元素异常呈条带状展布,与矿体走向一致,随着异常浓度自东向西递减,元素组合也变得简单。这些与其表生异常组合及强度特征基本一致,体现了两者之间一定程度上的统一性。

### 3 矿床表生地球化学异常特征

为研究区内表生环境中成矿元素的分散富集规律,对比同一地质背景条件下不同表生介质中异常元素的含量、组合及特征,在区内布置了 2 条垂直土壤剖面及一条长 1 800 m 的水平土壤剖面(见图 1)。据此及部分前人资料(张本仁等,1989;李文亢等,1993;张复新等,1997;王民良,1998;方维萱等,2000),对该矿床的表生地球化学异常特征论述如下。

#### 3.1 成矿元素在不同采样介质中的含量特征

表 2 列出了区内 Au, Ag, As, Hg, Sb, Cu, Zn 等成矿及指示元素在不同采样介质中的平均含量、标准离差及富集系数。区内岩石中  $w_{Au}$  平均值( $3.83 \times 10^{-9}$ )略高于包括该区域在内的色河铺—二峪河地区泥盆系古道岭组的  $w_{Au}$  平均值( $2.04 \times 10^{-9}$ ),

与地壳金克拉克值接近(李文亢等,1993),表明金经过多来源、多期次成矿作用的活化、迁移、富集才形成了该矿床,这对表生异常的形成有重要影响。该值高于水系沉积物中  $w_{Au}$  的平均值( $1.50 \times 10^{-9}$ ),而低于土壤中  $w_{Au}$  的平均值( $18.17 \times 10^{-9}$ ),说明区内金在表生条件下从基岩到土壤趋于富集,而从基岩进入水系沉积物则趋于分散。这与李文亢等(1993)的研究基本吻合。由表 2 可知,金的水系沉积物相对于岩石的表生富集系数为 0.14,其土壤相对于岩石的表生富集系数达 4.74,区内成矿及指示元素由于表生风化作用在土壤中产生了一定程度的富集。这一表生富集特征也体现在表生带氧化矿石与原生矿石的元素含量变化上。

由以上可知,表生带土壤、氧化矿石中成矿及指示元素均发生相对富集,水系沉积物中除 Cu, Pb, Zn 表生富集外,其他元素则发生表生分散。氧化矿石中金的富集有 2 种方式:①被动富集,即矿石中其他可溶性组分的淋失;②主动富集,即吸附作用、电化学作用等(林宝增,1993),这种富集有利于区内表生地球化学异常的发育,但对于表生异常的评价无疑

表 2 二台子金铜矿区成矿及指示元素的含量及富集系数

Table 2 Content and supergene enrichment coefficients of ore-forming elements and indicator elements in the Ertaiqi gold and copper orefield

样品(样品数)	Au		As		Hg		Cu	
	$w_b/10^{-9}$	离差	$w_b/10^{-6}$	离差	$w_b/10^{-9}$	离差	$w_b/10^{-6}$	离差
水系沉积物*	1.50	62.50	17.14	5.63	47.14	19.75	34.29	10.02
土壤(18)	18.17	18.00	78.64	81.59	587.12	1245.93	85.92	135.07
岩石(11)	3.83	4.17	37.06	38.38	54.45	51.0	19.01	13.09
氧化矿石(2)	4510		1500		8099		1098.25	
原生矿石(3)	3060		800		779		42.3	
	富 集 系 数							
氧化/原生矿石	1.47		1.88		10.78		25.96	
水系沉积物/岩石	0.39		0.40		0.87		1.80	
土壤/岩石	4.74		2.12		10.64		4.52	
样品(样品数)	Zn		Sb		Ag		Pb	
	$w_b/10^{-6}$	离差	$w_b/10^{-6}$	离差	$w_b/10^{-9}$	离差	$w_b/10^{-9}$	离差
水系沉积物*	69.33	29.50	1.43	56.25	68.57	25.03	28.59	7.5
土壤(18)	76.13	23.48	3.34	3.95	101.0	116.00	18.30	7.84
岩石(11)	23.36	10.41	1.55	2.01	155	57	3.82	5.53
氧化矿石(2)	160.75		59.42		950		23	
原生矿石(3)	21.6		5.95		280		<3	
	富 集 系 数							
氧化/原生矿石	7.44		9.99		2.11		>8	
水系沉积物/岩石	2.97		0.92		0.44		7.48	
土壤/岩石	3.26		2.15		0.65		4.79	

\* 研究区所在 1:20 万图幅内所有样品;Au 采用石墨炉原子吸收光谱分析,测试精度:10.2%,由中国地质大学(武汉)测试中心完成;其他元素采用火焰原子吸收或发射光谱分析,测试精度:8.8%,由中国地质大学(武汉)地球化学研究所完成。

也会产生一定的干扰。

### 3.2 成矿元素表生分散成晕特征

区内1:5万水系沉积物地球化学异常明显,Au,Cu,As有明显的浓集中心,Au,Cu异常不完全吻合,Hg,As异常范围较广,并覆盖了Au,Cu异常(图1),二台子金铜矿床就是通过Au-Cu-As-Hg水系沉积物地球化学异常发现的。矿区内土壤地球化学异常强度较大,矿体附近土壤中 $w_{Au}$ 最高达 $0.87 \times 10^{-6}$ , $w_{Cu}$ 最高达 $1.019.25 \times 10^{-6}$ , $w_{Hg}$ 最高达 $13.386 \times 10^{-6}$ , $w_{As}$ 最高达 $340 \times 10^{-6}$ ,土壤水平剖面上这些元素的平均含量( $w_B$ )分别为: Au: $115.08 \times 10^{-9}$ , Cu: $161.21 \times 10^{-6}$ , Hg: $1327.70 \times 10^{-9}$ , As: $121.90 \times 10^{-6}$ 。这些说明,成矿及指示元素在区内的景观地球化学条件下具有较强的表生富集成晕能力。当含金岩石受到构造隆起剥蚀和河流下蚀切割时,部分金被释放进入表生迁移过程。由于区内土壤偏碱性,土壤中 $Fe_2O_3$ , $Al_2O_3$ ,粘土矿物及有机质含量相对较高,加之地理景观因素有利于化学风化作用的进行,使得这部分金因吸附作用、共沉淀作用、有机质作用等在土壤中富集,从而形成较强的分散晕,特别是矿体附近 $w_{Au}$ 从背景区的平均 $6.57 \times 10^{-9}$ 急增至平均 $307.33 \times 10^{-9}$ ,反映了成壤母岩金含量高,相应地分散到土壤中的金也出现异常,形成直接与矿化(体)有关的指示异常。成矿元素铜也表现出类似的性质,而且土壤中铜异常的出现与金异常是同步的。总之,区内成矿元素在风化剥蚀成壤过程中,其表生富集成晕特征明显。这一特征从基岩-土壤垂直剖面上成矿元素的含量变化中(表3)也可表现出来。

另外,从成矿及指示元素表生分散的组合特征上来看,指示该矿床的1:1万水系沉积物地球化学

异常元素组合为 Au-Cu-Hg-As,从区内所采土壤、岩石样品中有关元素的聚类分析结果可看出,土壤中(图2a) Au,As密切相关,其距离系数为1.6,其次为Cu,Hg,其距离系数为1.8,总体上土壤中仍表现出Au,As,Cu,Hg密切相关的异常元素组合特征,与水系沉积物一致,而且也继承了原生晕异常中Au,As密切相关的特征。岩石样品中(图2b) Cu,Hg,Au,As密切相关,其距离系数为0.4,与土壤中的相关元素有很好的对应性。

### 3.3 金的存在形式特征

表生介质中金的存在形式是各类次生地球化学异常特征及异常形成机制研究的关键。本次金的存在形式分析采用顺序提取不同相态的方案(朱有光等,1993)进行了8种赋存状态的研究,即依次为水溶相金(水溶性)、吸附相金(被粘土矿物和铁锰氧化物表面吸附)、自然金相金(游离态的自然金)、碳酸盐相金(被碳酸盐矿物包裹的自然金)、有机相金(与有机物结合的难溶金)、铁锰氧化物相金(被铁锰氧化物包裹的自然金)、硫化物相金(分散在硫化物中的自然金)和硅酸盐相金(分散在石英和硅酸盐矿物中的微粒金)。

区内土壤(矿体上方及附近)与氧化矿石中金在上述各种相态中的分配比例见图3。由图3可知,土壤中金主要以自然金相(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%。刘英俊等(1990)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,本次研究结果与该结论完全一致。区内由于以化学风化为主,土壤中存在众多溶剂和有机质等,如 $(S_2O_3)^{2-}$ , $CN^-$ ,富里酸等,使得金可以形成胶体、可溶络合物等,从而使水溶相金含量也相对增高。氧

表3 二台子金铜矿区成矿及指示元素在基岩及其上覆土壤残积层中的含量

Table 3 Content of ore-forming elements and indicator elements in bed rocks and overlying soil eluvia of the Ertaiizi gold and copper orefield

剖面号	样号	样品名称	取样位置	$w_B/10^{-9}$	$w_B/10^{-6}$						
				Au	Cu	As	Sb	Hg	Pb	Zn	Ag
垂剖1	ZT-1	上覆土壤残积层	近矿	12.8	32.9	49.5	1.75	199	21	55.4	0.2
	ZR-4	基岩(碳酸盐角砾岩)	近矿	1.7	8.5	23.3	0.32	52.2	<2.5	21.6	0.19
垂剖2	ZT-11	上覆土壤残积层	矿化体	481	76.1	376	5.05	653	<2.5	37.7	0.14
	ZR-10	基岩(钠长角砾岩)	矿化体	12.7	21	150	1.52	189	<2.5	23.1	0.15

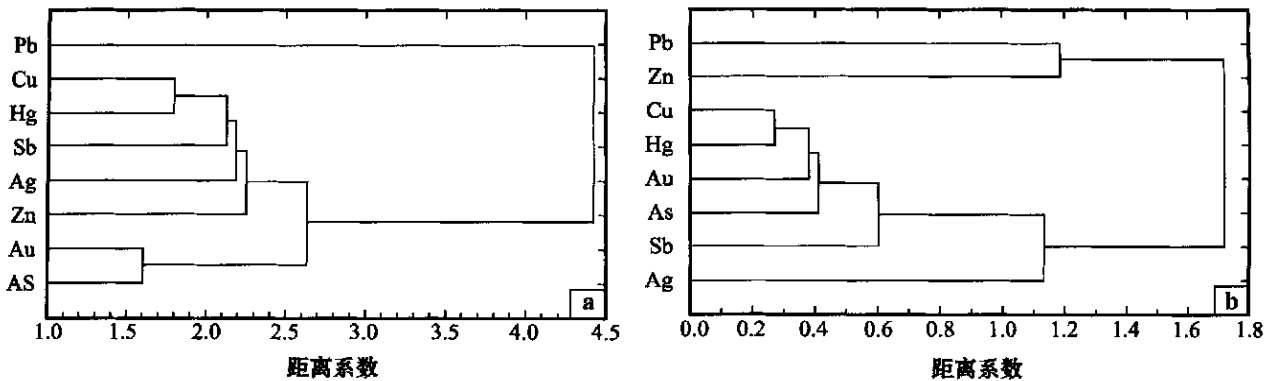


图 2 二台子金铜矿区主要成矿元素 R 型聚类分析谱系图

a. 土壤样品(18 件); b. 岩石样品(11 件)。元素含量见表 2

Fig. 2 R-cluster analyses of main ore-forming elements in the Ertaizi gold and copper orefield

a. Soil (18 samples); b. Rocks (11 samples)

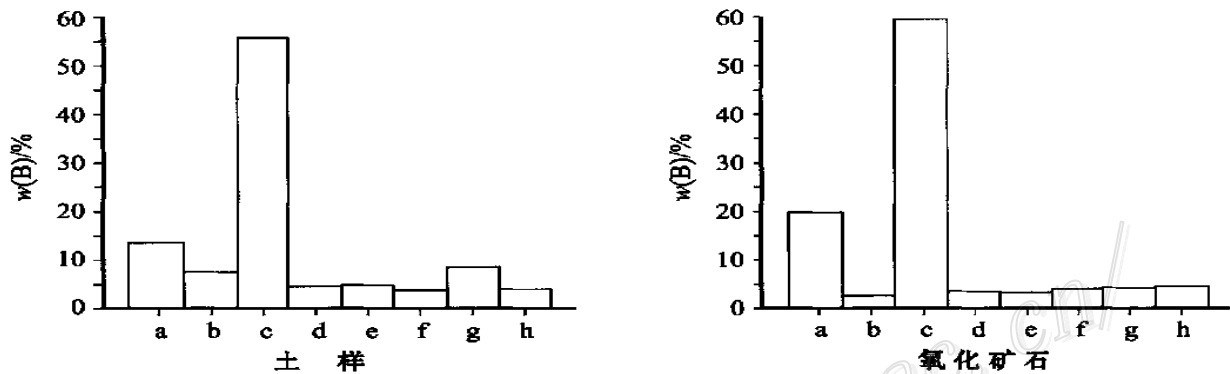


图 3 二台子金铜矿区金的相态分布直方图

a—水溶相;b—吸附相;c—自然金相;d—碳酸盐相;e—有机相;f—铁锰氧化物相;g—硫化物相;h—硅酸盐相

Fig. 3 Histogram showing modes of occurrence of gold in the Ertaizi gold and copper orefield

Left: soil; Right: Oxidation ore. a—Soluble form; b—Adsorption form; c—Native gold form; d—Carbonate form; e—Organic form; f—Manganese form; g—Sulfide form; h—Silicate form

化矿石中金也以自然金相(  $w_{Au} = 59.2\%$  )和水溶相(  $w_{Au} = 19.3\%$  )为主,以这两种形式存在的金占了金总量的 78.5%,这与上述土壤中不同相态金的分布规律是非常吻合的,很好地说明了表生带中土壤和氧化矿石之间金存在形式的对应关系。另外,这也证明了该矿床原生矿石中金主要以自然金形式存在,并是原生金矿物在表生环境中可被溶解的有力佐证。同时,利用土壤中水溶相金的这种含量特征也可进行异常评价和找矿(刘英俊等,1990;朱有光等,1993;龚美菱,1994;王学求等,1996;谢学锦,1998;王学求,1998;2001),其含量及相对比例对于分析表生条件下金的溶解再沉淀机制具有重要意义。

### 3.4 表生带成矿及指示元素的空间变化规律

区内土壤中 Au, Cu, As, Sb, Hg 等成矿及指示元素在水平剖面上的变化规律明显,即在矿体附近或矿化地段,这些元素均表现出异常,且在矿体上方 Au, Cu, As, Sb, Hg 含量均达到最大值,这与水系沉积物地球化学异常的元素组合是一致的。

区内土壤层较薄,一些组分被风化淋滤,在垂直剖面上,成矿及指示元素的分布规律不明显。总体上,Au, Ag, As 相对富集于土壤的 A 层和 C 层,在 C 层中含量最高;Cu 相对富集于 B 层和 C 层;Hg, Sb 相对富集于 C 层,而 Pb 和 Zn 分别在 A 层和 B 层中相对富集。由于 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及粘土矿

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和原生矿物因风化淋滤而形成的残留体及由其风化剥蚀而生成的表生矿物等,而使该层 Au 含量最高,这也是一般情况下金元素倾向于在土壤 C 层富集的主要原因。对于铜则是因为在土壤下部(B 和 C 层)由于矿床中原生硫化物氧化形成较多次生含铜矿物,如蓝铜矿等,从而产生铜的相对富集;而在 A 层由于腐殖质酸的存在,它们与铜结合,使铜的迁移能力显著增强,故导致铜在该层贫化。

### 3.5 表生异常与成矿的关系

区内在形成金矿的同时,岩石中部分金通过构造应力压溶及表生作用等进入表生介质中,通过逐步富集在土壤中形成一定的分散晕。在矿体就位之后,主要通过水-岩反应、水致断裂作用及地下水、地表水循环,矿石遭受溶解、淋滤和萃取,使得区内金、铜等元素含量急增,形成大面积、较高强度的分散晕异常,且空间上异常中心位置一般直接指示矿体,体现了表生异常、原生异常与成矿作用过程之间一定的耦合性,也为该区利用表生异常寻找与预测金铜矿体提供了依据。

## 4 二台子金铜矿区表生地球化学异常发育的制约因素分析

### 4.1 地理景观因素

如前所述,该区为亚热带湿润气候,地表切割强烈,植被较发育,因而大部分碱金属及碱土金属从基岩中淋失,土壤中相对富集 Au, Hg, As, Ag, Sb, Pb, Cu 等。从而使其中的表生异常强化,对地球化学找矿有利。

### 4.2 土壤环境的物理化学条件

区内土壤 pH 值平均为 8.53,属于碱性土壤,电导率  $E_c$  值平均为 90.97  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。在这种碱性环境下,金的酸性络合物水解及可溶性锰盐的存在等均导致金发生沉淀,有利于金在土壤中富集成晕而显示异常,在垂向上,这些土壤环境的改变,也会对元素在不同层位间的相对富集或贫化产生影响。可以看出,土壤环境的物理化学条件影响着成晕元素的溶解度、迁移能力、价态变化和共生组合等,制约着表生异常的发育。同时,土壤 pH 值、 $E_h$  值和其中的吸附剂也会干扰元素的地球化学背景,为识别异常

带来困难。

### 4.3 地质因素

包括构造、岩性、地层等方面。秦岭地区不同类型和具有不同产出特点的金矿常隶属于不同的构造带,二台子金铜矿床即属于凤县—镇安构造带。由于这些构造带在地质发展中所处的地质背景、地球化学环境、岩相建造、岩浆活动、变质作用及构造变动等方面的不同而导致成矿作用的差异,同时也影响了表生异常的发育。

区内 1:5 万水系沉积物地球化学异常主要分布于凤镇—山阳断裂、乾佑河同生沉积断裂及其次级断裂附近,与断裂构造关系密切,这是因为这些断裂作为区域上的控矿构造是成矿物质的运输通道,有利于成晕元素的活化、迁移,且构造破碎带、角砾岩带与区内 Au, Cu 异常带基本一致。该区泥盆系中、上统金异常发育,这与泥盆系中、上统是区内的赋矿地层有关。也可以说该地层制约了金异常的分布及发育。

### 4.4 矿床类型

区内二台子金铜矿床为层控卡林型矿床(杨蔚华等,1997),与钠长石碳酸角砾岩关系密切,具沉积改造特征,具有稳定而显著的 Au-As-Sb-Hg 元素异常组合,Au, As 一般呈正相关,次要指示元素有 Cu, Pb, Ba, Ag, 区内岩石地球化学异常、水系沉积物地球化学异常及土壤地球化学异常的元素组合上均明显地反映了这一特征,这一点也体现了原生异常与表生异常之间一定的继承性和耦合性(王瑞廷等,1999)。该矿床金颗粒细小,多数小于 0.2  $\mu\text{m}$ ,这种次显微金在水溶液中易以胶体或悬浮体的形式进行迁移,这可能是区内水系沉积物中 Au 相对贫化的原因。因此,矿床类型及其地球化学特征也制约着区内表生地球化学异常的发育。这对于异常评价指标的选择具有一定意义。

### 4.5 成矿及其指示元素的表生地球化学性质

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。土壤水平剖面上金的异常与矿体在空间上有较好的对应性,说明该地理景观条件下金的表生富集没有发生空间移位,这可能是由于矿体倾角较大( $\sim 60^\circ$ ),金以自然金、可溶络合物形式迁移的距离有限所致。

## 5 结 论

(1) 区域上, 二台子金铜矿床的表生地球化学异常元素组合为 Au-As-Sb-Hg-Cu, 并表现出与原生异常在组合、含量等特征上的对应性。

(2) 该区内金、铜等成矿及指示元素在表生带通过表生地球化学作用在土壤中产生了一定程度的富集, Au, Ag, As 相对富集于土壤的 A 层和 C 层, 在 C 层含量最高; Cu 相对富集于 B 层和 C 层, 在这两层中含量差别不大; Hg, Sb 相对富集于 C 层。且土壤和岩石样品的 Au, As, Hg, Cu 均密切相关。

(3) 矿区土壤及氧化矿石中金主要以自然金相、水溶相和硫化物相形式存在, 金的这种赋存相态特征可以作为寻找掩埋和隐伏金矿床的标志, 并有望通过进一步的工作在金的异常评价、异常形成机制研究和矿床勘查方面取得实质性进展。

(4) 表生地球化学作用中金、铜等元素具有一定的活动性, 可以活化迁移形成表生异常。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、土壤环境的物理化学条件、地质背景、矿床类型及其指示元素的表生地球化学性质等因素。

(5) 在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, 依据成矿元素在其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。

## References

- Benedetti M, Boulegue J and Verhague I. 1990. Transfer and deposition of gold in the Congo watershed [J]. *Chem. Geol.*, 84: 162 ~ 163.
- Colin F and Vieillard P. 1990. Dissolution and translocation of residual gold particles under equatorial lateritic conditions [J]. *Chem. Geol.*, 84: 38 ~ 39.
- Fang W X, Zhang G W, Hu R Z, et al. 2000. Analysis on tectonic background of formation and characteristics of albite carbonate brecciaite from Ertai Zi Cu-Au deposits in the Qinling orogen [J]. *Acta Petrological Sinica*, 16(3): 392 ~ 400 (in Chinese with English abstract).
- Fletcher W R. 1996. Aspects of exploration geochemistry in southeast Asia: soils, sediments and potential for anthropogenic effects [J]. *J. Geochem. Explor.*, 57: 31 ~ 43.
- Gong M L. 1994. Existing forms analysis and geological prospecting [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 104 ~ 232 (in Chinese).
- Grimm B and Friedrich G. 1990. Weathering effects on supergene gold in soils of a semi-arid environment Geotio do ouro, Brazil [J]. *Chem. Geol.*, 84: 70 ~ 73.
- Ledin M. 2000. Accumulation of metals by microorganisms: processes and importance for soil systems [J]. *Earth-Science Rev.*, 51(1/4): 1 ~ 31.
- Li B Z. 1993. Supergenic geochemical process of oxidic belt of arsenic-gold ore deposit in Pingding, Gansu Province [J]. *Acta Geol. Gansu*, 2(2): 67 ~ 74 (in Chinese).
- Li W K, Fang Y A, Shi Z L, et al. 1993. Metallogenic condition of fine dissemination gold deposits in the East Qinling [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 10 ~ 93 (in Chinese).
- Liu Y J and Ma D S. 1990. The geochemistry of gold [M]. Beijing: Sci. Press. 132 ~ 150 (in Chinese).
- Ren T X, Li M X, Xu Y X, et al. 1983. A preliminary study of hypergene geochemistry and regional geochemical exploration techniques in high-cold mountainous regions [J]. *Geol. Rev.*, 29(5): 428 ~ 436 (in Chinese with English abstract).
- Santosh M and Omana P K. 1991. Very high purity gold from lateritic weathering profile of Nilambur, Southern India [J]. *Geol.*, 19: 746 ~ 749.
- Theobald P K. 1981. One man's view of a research gap [J]. *J. Geochem. Explor.*, 15(1): 1 ~ 20.
- Wang M L. 1998. The metallogenetic and ore-searching criteria of the gold deposits hosted in Devonian, Qinling (Shaanxi) [J]. *Geol. Explor. for Non-ferrous Metals*, 7(6): 363 ~ 368 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T. 1999. The study on characteristics contrast of gold and copper's supergenic geochemical anomalies and its evaluating index system [D] [Dissertation]. Wuhan: China Univ. of Geosci. 30 ~ 48 (in Chinese with English abstract).
- Wang X Q and Xie X J. 1996. Unconventional geochemical exploration for gold [J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 84 ~ 95 (in Chinese with English abstract).
- Wang X Q. 1998. Deep-penetration prospective geochemistry [J]. *Geophy. and Geochem. Explor.*, 22(3): 166 ~ 169 (in Chinese with English abstract).
- Wang X Q. 2001. Geochemical patterns and their geneses [J]. *Mineral Deposits*, 20(3): 216 ~ 222 (in Chinese with English abstract).
- Xie X J. 1998. Tactical and strategic deep-penetration geochemical surveys [J]. *Earth Sci. Frontiers*, 5(2): 171 ~ 183 (in Chinese with English abstract).
- Xu G F, Shao J L, Feng S Z, et al. 1983. The study on tennantite of Carlin-type gold deposit in Shaanxi Province [J]. *Acta Mineralogical Sinica*, 3(3): 175 ~ 182 (in Chinese with English abstract).
- Yang W H and Liu Y M. 1997. Geochemistry of sediment-hosted gold deposits and their prospecting in China [J]. *Geochimica*, 26(1): 13 ~ 23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B R, Chen D X, Li Z J, et al. 1989. Regional geochemistry of the Zashui-Shanyang metallogenic belt in Shaanxi Province [M]. Wuhan: China Univ. of Geosciences Press. 162 ~ 171 (in Chinese with English abstract).



- Zhang F X. 1984. Evolution feature and genetic implication of pyrite of Ertai gold deposit in shaanxi Province[ J ]. Minerals and Rocks , 4 ( 1 ) : 25 ~ 28 ( in Chinese with English abstract ) .
- Zhang F X and Ma J Q. 1997. Analyzing ore-forming condition and ore-finding prospect of fine disseminated-type stibium-gold deposits in Zhen-Xun region, Qinling[ J ]. Mineral Resources and Geol. , 11 ( 6 ) : 388 ~ 396 ( in Chinese with English abstract ) .
- Zhang F X. 1998. Studying on carrying-gold minerals of fine disseminated-type gold deposit in Qinling Devonian[ J ]. Acta Mineralogical Sinica, 18( 2 ) : 179 ~ 184 ( in Chinese with English abstract ) .
- Zheng D Z. 1994. The form of migration and mechanism of enrichment of gold at the supergene condition[ J ]. Geol. Rev. , 40( 2 ) : 70 ~ 75 ( in Chinese with English abstract ) .
- Zheng D Z and Zheng R F. 1997. Mechanism of gold dissolution in the process of oxidation of gold-bearing pyrite[ J ]. Geol. Rev. , 43( 1 ) : 45 ~ 50 ( in Chinese with English abstract ) .
- Zhou X C. 1990. Discuss on solution, migration, and deposition of gold under the supergene condition[ J ]. Minerals and Rocks , 10( 3 ) : 6 ~ 14 ( in Chinese with English abstract ) .
- Zhu Y G and Jiang J Y. 1993. Geochemical exploration of gold deposits [ M ]. Wuhan: China Univ. of Geosciences Press. 129 ~ 131 ( in Chinese ) .
- 任天祥, 李明喜, 徐耀先, 等. 1983. 高寒山区表生作用地球化学特征及区域化探方法的初步研究[ J ]. 地质论评, 29( 5 ) : 428 ~ 436 .
- 王民良. 1998. 陕西秦岭泥盆系金矿控矿条件及找矿标志分析[ J ]. 有色金属矿产与勘查, 7( 6 ) : 363 ~ 368 .
- 王瑞廷. 1999. 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 ]. 导师: 欧阳建平. 武汉: 中国地质大学研究生院. 30 ~ 48 .
- 王学求, 谢学锦. 1996. 非传统金矿化探的理论与方法技术研究[ J ]. 地质学报, 70( 1 ) : 84 ~ 95 .
- 王学求. 1998. 深穿透勘查地球化学[ J ]. 物探与化探, 22( 3 ) : 166 ~ 169 .
- 王学求. 2001. 地球化学模式及成因初探[ J ]. 矿床地质, 20( 3 ) : 216 ~ 222 .
- 谢学锦. 1998. 战略性与战术性的深穿透地球化学方法[ J ]. 地学前缘, 5( 2 ) : 171 ~ 183 .
- 徐国风, 邵洁莲, 丰淑庄, 等. 1983. 陕西卡林型金矿床砷黝铜矿研究[ J ]. 矿物学报, 3( 3 ) : 175 ~ 182 .
- 杨蔚华, 刘友梅. 1997. 中国沉积岩型金矿床地球化学及找矿方向[ J ]. 地球化学, 26( 1 ) : 13 ~ 23 .
- 张本仁, 陈德兴, 李泽九, 等. 1989. 陕西柞水—山阳成矿带区域地球化学[ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社. 162 ~ 171 .
- 张复新. 1984. 陕西二台子金矿床黄铁矿的演化特征及其成因意义[ J ]. 矿物岩石, 4( 1 ) : 25 ~ 28 .
- 张复新, 马建素. 1997. 秦岭镇—旬地区微细浸染型锑金矿床成矿条件及找矿前景分析[ J ]. 矿产与地质, 11( 6 ) : 388 ~ 396 .
- 张复新. 1998. 秦岭泥盆系卡林型金矿床载金矿物研究[ J ]. 矿物学报, 18( 2 ) : 179 ~ 184 .
- 郑大中. 1994. 表生条件下金的迁移形式和富集机理[ J ]. 地质论评, 40( 2 ) : 70 ~ 75 .
- 郑大中, 郑若锋. 1997. 含金黄铁矿氧化过程中金溶解的探讨[ J ]. 地质论评, 43( 1 ) : 45 ~ 50 .
- 周学粹. 1990. 金在表生条件下溶解、迁移和沉淀的探讨[ J ]. 矿物岩石, 10( 3 ) : 6 ~ 14 .
- 朱有光, 蒋敬业. 1993. 金矿地球化学找矿[ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社. 129 ~ 131 .

#### 附中文参考文献

- 方维萱, 张国伟, 胡瑞忠, 等. 2000. 陕西二台子铜金矿床钠长石碳酸(角砾)岩类特征及形成构造背景分析[ J ]. 岩石学报, 16( 3 ) : 392 ~ 400 .
- 龚美菱. 1994. 相态分析与地质找矿[ M ]. 北京: 地质出版社. 104 ~ 232 .
- 李文亢, 方永安, 石准立, 等. 1993. 秦岭东部微细金矿成矿条件[ M ]. 北京: 地质出版社. 10 ~ 93 .
- 林宝增. 1993. 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, 2( 2 ) : 67 ~ 74 .
- 刘英俊, 马东升. 1990. 金的地球化学[ M ]. 北京: 科学出版社. 132 ~ 150 .

## Characteristics of Supergene Geochemical Anomalies in Ertai Gold-Copper Orefield, Zhen'an, Shaanxi Province

Wang Ruiting<sup>1,2</sup>, Fang Weixuan<sup>3</sup> and Ouyang Jianping<sup>4</sup>

(1 Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2 Northwest Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 4 Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

#### Abstract

By means of comprehensive geochemical soil cross section, the authors studied in detail characteristics of su-

pergene geochemical anomalies in the Ertaizi gold-copper orefield. The results show that the supergene geochemical anomalies in the gold orefield have the element association of Au-As-Sb-Hg-Cu, consistent with characteristics of the primary anomalies. The ore-forming elements and indicator elements are concentrated to some extent in different soil layers in this area: Au, As and Ag are relatively abundant in the C layer of soil, Cu in the B and C layers, and Sb, Hg also in the C layer. Furthermore, Au, As, Hg and Cu in soil are closely related to their content in rocks, as shown by R-cluster analysis. The main modes of occurrence of gold in overlying soil of the ore deposit and the oxidized ore are native gold, soluble gold and sulphide phase of gold. The modes of occurrence of gold can be regarded as indicators for exploring buried and concealed gold deposits. It can be concluded that the factors controlling the development of supergene geochemical anomalies include geographical landscape, chemical and physical environments of soil, geological background, types of ore deposits, and geochemical characteristics of ore-forming and indicator elements.

**Key words:** geochemistry, Ertaizi, gold-copper ore deposit, mode of occurrence, supergene anomaly

## 青藏高原东南缘斑岩铜矿成岩成矿研究取得新进展

国家重点基础研究项目课题组(G1999043203)通过对青藏高原东南缘新生代沿金沙江—红河走滑断裂分布的近 30 个高钾岩体和藏南林芝-波密一带变质岩的锆石年龄精确测定以及系统的岩石主成分和微量元素分析,初步取得了下列创新性成果:

1. 沿金沙江—红河左行走滑断裂分布的富钾岩体形成于 34~36 Ma 之间,表明该走滑断裂在 36 Ma 左右开始活动。

2. 精确测定了玉龙铜矿田 5 个赋矿斑岩体中的 300 多颗锆石年龄,获得玉龙斑岩体年龄为(40.9±0.1) Ma,扎拉尕岩体(38.5±0.2) Ma,莽总岩体(37.6±0.2) Ma,多霞松多岩体(37.5±0.2) Ma,马位松多岩体(37.1±0.2) Ma。玉龙矿田经历了 4 期热液活动,多期热液活动有利于超大型矿床形成。

3. 据玉龙矿田晚期岩体含早期岩体继承锆石及区内岩体形成年龄与岩体 MgO 具正相关性而与 SiO<sub>2</sub> 具负相关性,提出这些不同时期形成的岩体来自深部同一演化的岩浆房,与玉龙超大型矿床形成有关的岩浆房寿命大于 3.8 Ma。目前智利亦发现与超大型斑岩铜矿床有关的岩浆房寿命在 5.5~8 Ma 之间,因此,初步提出长寿命演化岩浆房有利于超大型矿床形成的认识。

4. 测定林芝—波密一带变质岩中 70 多颗长条状锆石(长/宽比>4)的年龄,主群年龄(40.8±0.4) Ma,这表明印度板块与欧亚板块碰撞带东段年龄大于或等于 40.8 Ma,证实东段碰撞时代小于西段碰撞时代。变质岩中锆石年龄和玉龙含矿岩体年龄[(40.9±0.1) Ma]基本相同,表明玉龙铜矿含矿岩体与板块碰撞有直接联系。

5. 马厂箐岩体角闪正长岩[w(MgO) 2.1%, w(SiO<sub>2</sub>) 65.4%]锆石年龄(35.6±0.4) Ma,锆石 Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup> = 93.5;马厂箐二长花岗岩[w(MgO) 1.1%, w(SiO<sub>2</sub>) 67.8%]锆石年龄(35.0±0.2) Ma,锆石 Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup> = 228。前者氧化性弱,无矿化;后者氧化性强,与铜矿化关系密切。氧化性强的岩体有利于铜矿床形成,这项研究可为今后的找矿工作提供指标参数,有助于圈定含矿岩体。马厂箐岩体由早至晚酸性增强,氧化性增强,结晶分异作用不可能使岩体氧化性增强,因此,岩体向酸性增强方向演化主要不是结晶分异作用的结果,而是岩浆房和其顶部氧化围岩反应的结果,岩浆和氧化性围岩反应使岩浆氧化增强,有利于铜(金)矿床形成。

(中国科学院广州地球化学研究所 梁华英供稿)