

# 干旱荒漠区隐伏金矿覆盖层中金的分布与迁移： 以新疆金窝子金矿田 210 金矿带为例

叶 荣<sup>1</sup>，张必敏<sup>2</sup>，王 勇<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘要:** 以新疆金窝子金矿田 210 金矿带为例, 实验研究了该区地气和土壤活动态测量等深穿透地球化学方法的效果。实验表明地气测量和土壤活动态测量可以有效地反映覆盖层下隐伏矿体。揭露矿体覆盖层的钻孔研究表明, 金活动态形式具有“C”型分布特征。采集矿体上方地表异常位置土壤孔隙中地气、土壤样品, 使用透射电子显微镜(TEM) 实测样品中微粒物质的粒径、形貌和成分, 在地气和土壤中观测到了 Au-Cu、Au-Bi 成矿元素纳米微粒, 此微粒是形成地表深穿透地球化学异常的物质, 来源于覆盖层下隐伏矿体。微粒到达地表, 可以形成地气和土壤活动态异常。纳米微粒具有可从土壤颗粒表面分离的性质, 在其向上迁移过程中, 可以从吸附固定状态解吸, 此性质可以用于解释活动态异常在钻孔垂直剖面上的“C”型分布。

**关键词:** 戈壁覆盖层; 隐伏金矿; 地气; 活动态; 纳米金属微粒; 金窝子 201 金矿带; 新疆

中图分类号: P632; P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2013)06-1265-10

## Distribution and Migration of Gold in Gobi-overlay of Arid Desert Terrain: Take the Jinwozi 210 Gold Belt in Xinjiang as an Example

YE Rong<sup>1</sup>, ZHANG Bi-min<sup>2</sup>, WANG Yong<sup>3</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000, China;

3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The deep-penetrating geochemistry methods for geogas and mobile elements survey were evaluated in Jinwozi 210 gold belt, Xinjiang. The experimental results in this paper confirm that these methods can effectively indicate the concealed ore bodies under the regolith cover. The drilling investigations revealed the “C-shape” distribution patterns of the mobile gold. The geogas and soil samples in surface anomalies were collected, in which the size, morphology and component of the particles were characterized by transmission electron microscope. Gold-copper and gold-bismuth nanoscale particles were observed in the geogas and soil samples. It is believed that the nanoscale particles sourced from the underlying concealed ore bodies are likely to cause the surface geochemical anomalies. The nanoscale particles could travel upwards to the surface, during which the geogas and soil anomalies were developed in pore space and soil. The dissociation and desorption of the nanoscale particles from soil particles' surface during their migration upwards probably created the “C-shape” distribution patterns of the mobile gold in vertical profiles in drilling holes.

**Key words:** gobi-overlay; concealed gold deposit; geogas; mobile form of element; nanoscale metal particles; Jinwozi 210 gold belt; Xinjiang

收稿日期: 2013-05-02; 改回日期: 2013-07-02; 责任编辑: 楼亚儿。

基金项目: 国土资源部行业专项“深部探测技术与实验研究”子课题“盆地深穿透地球化学探测技术”(Sino Probe-04-03-03); 国家自然科学基金项目(40473040, 41273063); 中国地质调查局国土资源大调查项目(1212011120206)。

作者简介: 叶 荣, 女, 教授, 1956 年出生, 地球化学专业, 主要从事勘查地球化学、矿床地球化学的研究工作。

Email: yerong@cugb.edu.cn。

## 0 引言

20 世纪 90 年代, 针对寻找隐伏矿, 勘查地球化学家提出并致力于深穿透地球化学, 形成了一系列地球化学方法, 包括以气体作为采样介质的地气类方法<sup>[1-14]</sup>和以土壤作为采样介质的选择性提取方法<sup>[15-19]</sup>。在地气测量技术方法上, 我国勘查地球化学形成了独具特色的地球化学技术<sup>[3-4, 6, 9, 11]</sup>, 取得了良好的找矿效果。以土壤为采样介质的选择性提取技术, 由于元素含量相对较高和在找矿实践中操作简单, 因而获得广泛应用, 并在覆盖区矿产勘查上取得一定成效。在深穿透地球化学勘查实践中, 勘查地球化学工作者一直在试图查明地气和土壤中可选择性提取的活动态异常物质是什么? 以及异常物质的存在形式以及迁移方式。有研究者推测地气以微气泡形式携带超微细金属颗粒或金属纳米微粒呈类气相直接迁移到达地表<sup>[4, 7, 20-23]</sup>, 并在实验中发现了地气物质中的纳米微粒<sup>[24-27]</sup>。也有研究者通过实验获得了纳米 Au 被上升气流携带迁移, 被土壤颗粒吸附的实验结果<sup>[22-23]</sup>。本文选择戈壁覆盖区新疆金窝子金矿田 210 金矿带这一典型隐伏金矿, 实测了成矿元素 Au、Cu、Pb 等地气、土壤活动态的空间分布, 研究土壤活动态 Au 与粘土矿物的关系。在研究中同时采集矿体上方地气和土壤样品, 使用透射电子显微镜, 对样品中微粒物质进行观察, 在地气和土壤中观测到了 Au-Cu、Au-Bi 纳米

微粒。地气和土壤纳米微粒成分、结构、形貌相似, 同为异常物质。矿床中成矿物质以纳米微粒形式存在和迁移。微粒随地气流迁移, 存在于土壤气体中可形成地气异常; 被覆盖层土壤地球化学障吸附滞留, 可以形成矿体上方的土壤异常。

## 1 矿区地质背景

金窝子金矿田位于甘肃与新疆交界的北山中带东段, 区域出露地层为上泥盆统金窝子组 ( $D_{3j}$ )。岩性为凝灰质砂岩、碳质板岩、钙质砂岩, 岩石中夹有少量碳酸盐岩、中酸性的火山岩及中基性火山岩。区域地层总体产状为走向  $310^\circ \sim 340^\circ$ , 倾角  $40^\circ \sim 45^\circ$ 。

金窝子金矿田空间上分为南北两个矿带, 北矿带为金窝子金矿带, 南矿带为 210 金矿带, 典型矿床为 210 金矿。两个矿带的矿床类型不同: 北部的金窝子金矿产于金窝子花岗岩岩体内及接触带附近, 属于石英脉型金矿, 为剥露矿。南矿带 210 金矿位于北带金窝子金矿以南  $2 \sim 2.5$  km 处的戈壁覆盖区, 矿区地表被第四系戈壁覆盖, 覆盖厚度从几米至十几米不等, 为隐伏型金矿床。

210 金矿床的矿体主要以构造蚀变岩型石英脉产出, 含金矿脉产于区域北东向构造剪切带中, 为构造剪切带型金矿床 (图 1)。金矿体以大脉型石英硫化物脉群的形式产于上泥盆统金窝子组的糜棱岩化碳质凝灰岩和凝灰角砾岩中, 含矿构造为剪切带型断裂, 方向为  $NE65^\circ$ , 与区域上的构

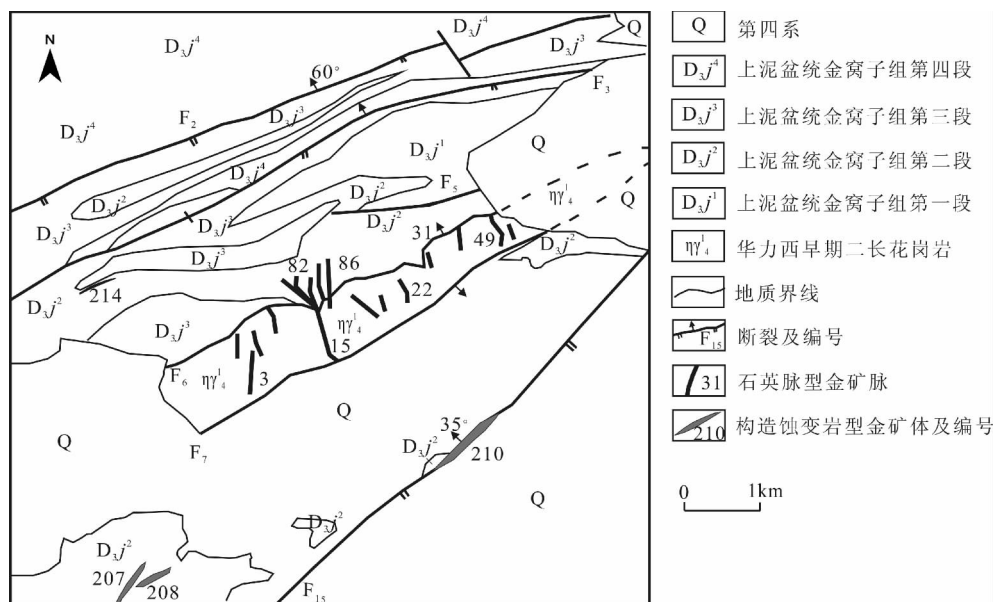


图 1 金窝子金矿田地质图<sup>[28]</sup>

Fig. 1 Geological map of Jinwozi Au minefield

造线方向一致。至今矿脉带已查明有 6 条工业矿体。1 号脉平均含金品位 4.87 g/t, 2 号脉金平均品位 17.63 g/t。已查明金总储量为 10 t<sup>[13 28-29]</sup>。

210 金矿床的矿石矿物主要为黄铁矿、方铅矿、黄铜矿等。黄铁矿为主要含金矿物, 金呈自然金、银金矿等以粒间金、裂隙金、包裹体金的形式产于黄铁矿中。脉石矿物为石英, 也有少量方解石、绢云母及绿泥石等。

## 2 金在覆盖层钻孔剖面的分布特征

地理学家早已注意到戈壁层的垂直分带现象, 描述了黑色砾幕、孔泡结皮, 以及以碳酸盐和石膏为主要成分的钙质层。在戈壁覆盖区找矿工作中, 勘查地球化学工作者进行了戈壁层的性质和成因以及它作为赋存和传递深部矿化信息的介质性质的研究<sup>[13 28]</sup>。

本项研究设计了一个位于 210 金矿体上穿透覆盖层的钻孔, 钻孔深度为 24 m。覆盖层总体具有分层结构, 覆盖层分层性质列于图 2。钻孔剖面取样方法是, 自地表取样, 每 1 m 进尺为一个样, 连续取样。从地表 1 m 到终孔 24 m, 取样 24 件。截取小于 120 目的细粒级样品, 分 2 份平行样品。一份采用活动态金属循序提取的分析方法<sup>[5]</sup>, 分析 Au 的以下相态: 水溶态、粘土态、铁锰氧化物态和残渣态。另一份分析 Au 活动态总量<sup>[5]</sup>。Au 的含量单位为 ng/g, 检出限 0.05 ng/g。结果列于表 1 和图 3。通过分析, 发现 Au 在矿体蚀变带上方覆盖层垂直剖面上有以下分布规律(表 1, 图 3)。

### 2.1 金在覆盖层各相态中的含量特征

表 1 列出的是矿体上方覆盖层钻孔中 Au 在各相态中的含量特征。在 3 种活动态中, Au 水溶态形式含量最高, 平均值为 0.63 ng/g, 铁锰氧化物态含量平均值 0.48 ng/g, 粘土态含量平均值为 0.28 ng/g。残渣态是 Au 的主要赋存形态, Au 平均含

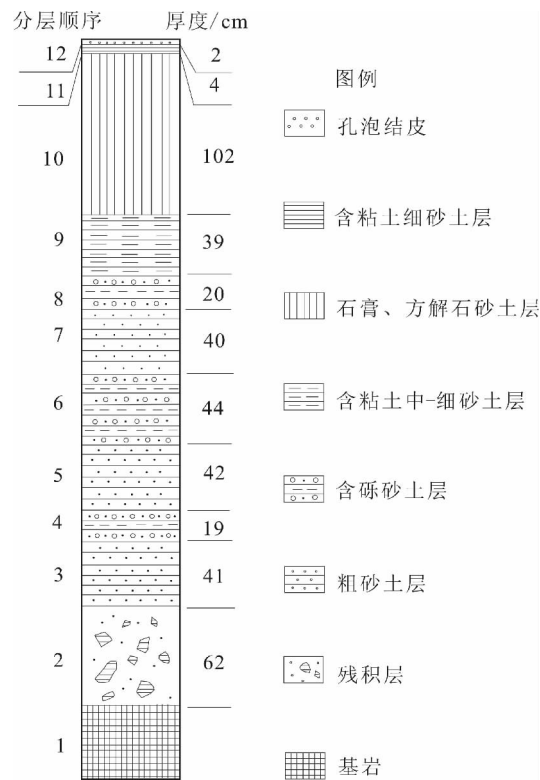


图 2 210 金矿体上方戈壁覆盖层分层结构

Fig. 2 The layer structure of the gobi regolith on 210 gold ore body

量为 7.19 ng/g。

### 2.2 金在矿体上方覆盖层中的分布特征

图 3 列出的是 Au 在覆盖层剖面中的分布特征。从图中可以看出, 3 种活动态形式的 Au 含量特征为: 覆盖层底部基岩层、残积层 Au 含量高, 中间层低, 近地表 Au 含量高, 呈“C”型; 覆盖层中活动态总量 Au 分布与活动态形式 Au 相似; 残渣态 Au 在覆盖层剖面分布与前两者不同, 高含量层在覆盖层底部残积层和基岩层。

Au 在各相态的空间分布形式与元素存在相态在表生覆盖层产物中活动性质有关。元素水溶态迁移机理为: 由于地下水的反复持续的蒸发作用,

表 1 矿体上方覆盖层钻孔中 Au 各相态的含量( $w_B/(ng/g)$ )

Table 1 Distribution of various forms of Au in drilling hole of regolith above orebody(ng/g)

金的相态	含量范围 (1~24 m)	平均值 (1~23 m)	层位			
			表层土壤(1 m)	中间层(2~20 m)	残积层(21~23 m)	基岩层(24 m)
水溶态	0.10~7.32	0.63	0.77	0.31	2.59	0.11
粘土态	0.08~1.05	0.28	0.60	0.24	0.49	0.13
残渣态	1.10~1 110.60	7.19	4.10	3.30	33.00	1 110.60
铁锰态	0.14~4.83	0.48	0.51	0.28	1.78	0.49
活动态总量	2.00~2 593.70	8.58	19.70	4.40	31.10	2 593.70

注: () 内标注数字为样品深度。

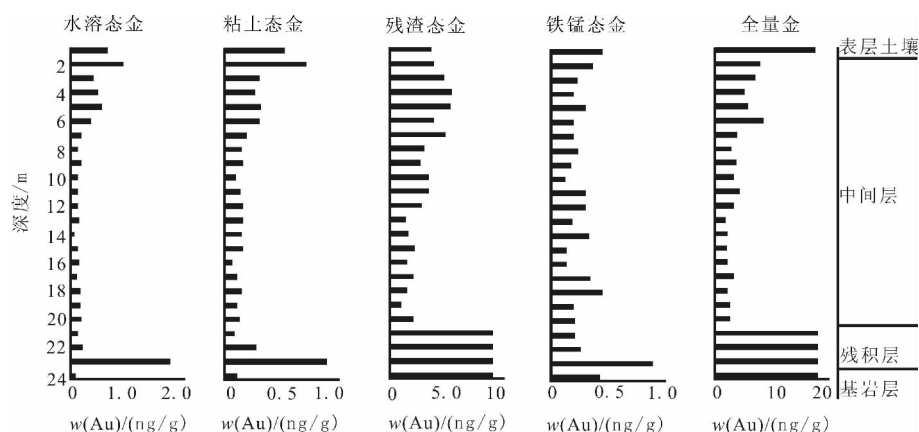


图3 Au在钻孔细粒级土壤样品不同相态中的分布

Fig. 3 Distribution of various forms of Au in fine-grained soil

在戈壁干旱景观条件下,蒸发量永远大于降水量,地下水在蒸发抽提下,有持续的上升能力。覆盖层土壤粘土相态是戈壁表生作用的产物。粘土矿物因其结构性质和比表面积大的特点,具有强吸附作用、离子交换作用和化学活性<sup>[23,30-31]</sup>,覆盖层土壤中粘土相态是元素活动态的重要富集相态。表2列出的是剖面24件样品中的粘土相与碎屑相含量比例。24件样品截取小于120目粒级,其组成确定采用X射线粉晶衍射方法。覆盖层矿物组成可分为碎屑相和粘土相。碎屑相包括石英、钾长石、斜长石、赤铁矿、角闪石,粘土相包括伊利石、高岭石和绿泥石。表2数据表明,覆盖层中活动态Au含量与剖面粘土发育呈正相关,Au在表层粘土相富集。此富集性质与Au存在形式的

两个分量有关: Au的活动态形式,为各种营力由下伏矿源区搬运带来的部分<sup>[14,21]</sup>;粘土形成过程中由残渣相释放的部分,这个分量在粘土形成后不再增长。粘土相对Au的富集的意义在于,粘土矿物相态具有离子交换、化学活性、吸附能力<sup>[23,30-31]</sup>、对活动态分量的持续累积的性质,表生粘土相是元素活动态富集相态。

残渣态中Au的高含量出现在钻孔揭露的矿化基岩层和残积层位置,含量在几十ng/g。在近地表及中间层残渣态中含量变化不大。残渣态Au主要为硅酸盐相态,与碎屑有关。

### 3 210 金矿床地气与活动态测量

#### 3.1 野外采样布局与取样方法

本次实验共安排4条垂直于210矿体走向的测线,横跨矿体,从东到西测线号分别为L2、L1、L3、L4。4条测线方向为NW30°,线距200m,点距50~100m,长度1400m,控制面积1.12km<sup>2</sup>(图4)。测区共设计采样点76个,样品每个测点分别取泡塑样品及液体样品。

本次地气采样工作采用王水溶液捕集和泡沫塑料捕集两种方法<sup>[6,9]</sup>。王水溶液捕集剂采用5%王水溶液,超纯的5%王水溶液在核工业北京地质研究院超纯实验室以蒸馏方法制取;泡沫塑料捕集介质在中国地质大学(北京)地球化学实验室制取,之后用10%王水预处理,超纯水清洗后用5%超纯王水浸泡。

王水溶液捕集法的抽气使用手提式采样器;泡沫塑料捕集法的抽气使用大气采样器。在每个采样点上,用钢钎打6个孔,孔深在0.5~0.8m。两种采样法各用3个孔,将螺旋采样器旋于孔中,

表2 钻孔土壤样品中碎屑相和粘土相的比例

Table 2 Proportion of clastic minerals and clays in regolith of drilling hole

野外 编号	采样 深度 /m	矿物含量/%		野外 编号	采样 深度 /m	矿物含量/%	
		碎屑相	粘土相			碎屑相	粘土相
Jwzks01C	1	65.8	34.2	Jwzks13C	13	78.1	21.9
Jwzks02C	2	68.3	31.7	Jwzks14C	14	76.7	23.3
Jwzks03C	3	74.2	25.8	Jwzks15C	15	79.9	20.1
Jwzks04C	4	74.2	25.7	Jwzks16C	16	79.4	20.6
Jwzks05C	5	71.6	28.5	Jwzks17C	17	81.7	18.3
Jwzks06C	6	78.5	21.5	Jwzks18C	18	80.3	19.7
Jwzks07C	7	72.1	27.9	Jwzks19C	19	78.9	21.1
Jwzks08C	8	74.2	25.8	Jwzks20C	20	78.3	21.7
Jwzks09C	9	73.8	26.2	Jwzks21C	21	80.7	19.3
Jwzks10C	10	74.5	25.5	Jwzks22C	22	78.4	21.6
Jwzks11C	11	76.9	23.1	Jwzks23C	23	77.0	23.0
Jwzks12C	12	78.4	21.6	Jwzks24C	24	72.5	27.5

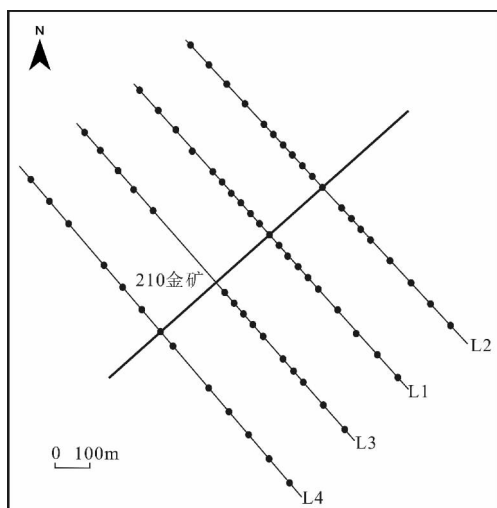


图4 地气和活动态采样点位图

Fig. 4 Sampling sites of the geogas and mobile forms of elements survey

拧紧使孔封闭,用硅胶管与安装微孔滤膜的过滤器和捕集装置连接。王水捕集法用抽气泵一次在3个孔中各抽取气体3 L,用U型瓶捕集地气。每个采样点U型瓶中王水捕集液体的体积为20 mL;泡塑捕集法用大气采样器在3个孔各采集气体2 min,气体流量控制在1.5 L/min。每个采样点上孔位之间的距离为1 m。

对野外所采样品在实验室内用ICP-MS方法,分析Au、Ag、Cu、Pb、Zn等元素(表3,表4)。

### 3.2 测量结果及讨论

本项研究进行了测区Au地气和活动态的地球化学测量。实测了成矿元素Au在地气和活动态的分布,测量结果列于表3—表5、图5—图7。表3和表4分别列出了泡塑和液体两种捕集介质Au和成矿元素的含量。图5给出了地气测量Au等值线,由图5看出,两种介质地气测量,在矿体剪切断裂带上方都出现了异常。泡塑的Au异常主要分布在矿体与覆盖层接触部位的垂直投影上,王水溶液的Au异常中心移向矿体的倾向方向。

表3 泡塑样品中Au及成矿元素含量( $m_B/ng$ )

Table 3 Contents of Au and mineralizing elements collected by polyurethane foam (ng)

泡塑样品	样品数	平均值	最大值	最小值
Au	76	5.67	61.05	1.61
Ag	76	0.88	20.86	0.20
Cu	76	576.15	13 076	110
Pb	76	3 972.30	8 210	1 098
Zn	76	1 215.28	4 276	666
Hg	76	0.64	2.11	0.36

表4 王水溶液样品中Au及成矿元素含量( $\rho_B/(ng/mL)$ )

Table 4 Contents of Au and mineralizing elements collected by aqua regia liquid (ng/mL)

液体样品	样品数	平均值	最大值	最小值
Au	76	0.003	0.007	0
Ag	76	0.36	3.15	0.01
Cu	76	103	3 581	1
Pb	76	60	2 158	1
Zn	76	1 207	15 237	89
Hg	76	0.08	0.57	0.01

表5 4线土壤活动态样品中Au、Ag、Hg元素含量

( $w_B/(ng/g)$ )

Table 5 Contents of Au, Ag, and Hg in mobile elements survey samples in line No. 4 (ng/g)

元素	样品数	平均值	最大值	最小值
Au	70	64	780	3
Ag	70	116	339	59
Hg	70	21	85	6

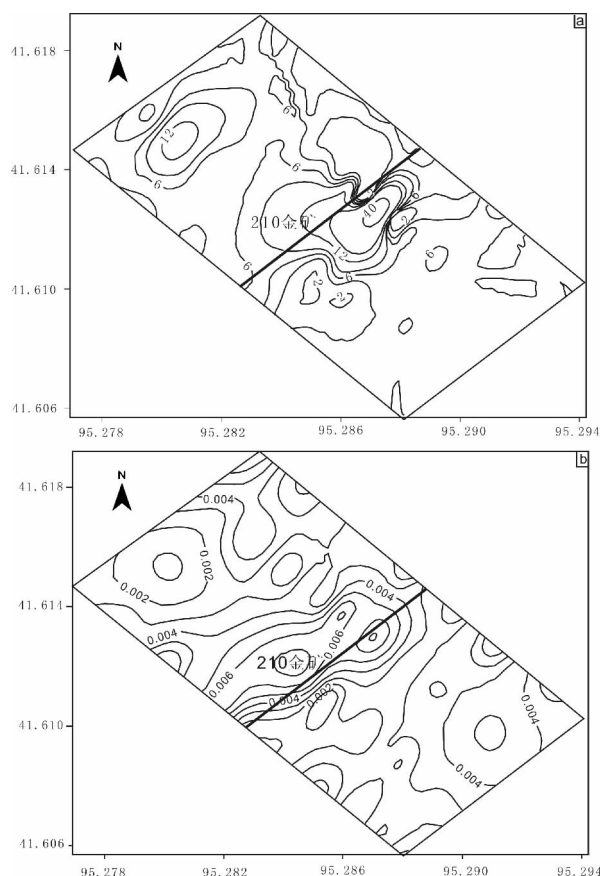


图5 地气测量Au等值线图

Fig. 5 The contour diagram of Au determined in geogas  
a. 泡塑样品地气等值线( $m_B/ng$ ); b. 王水溶液样品地气等值线( $\rho_B/(ng/mL)$ )

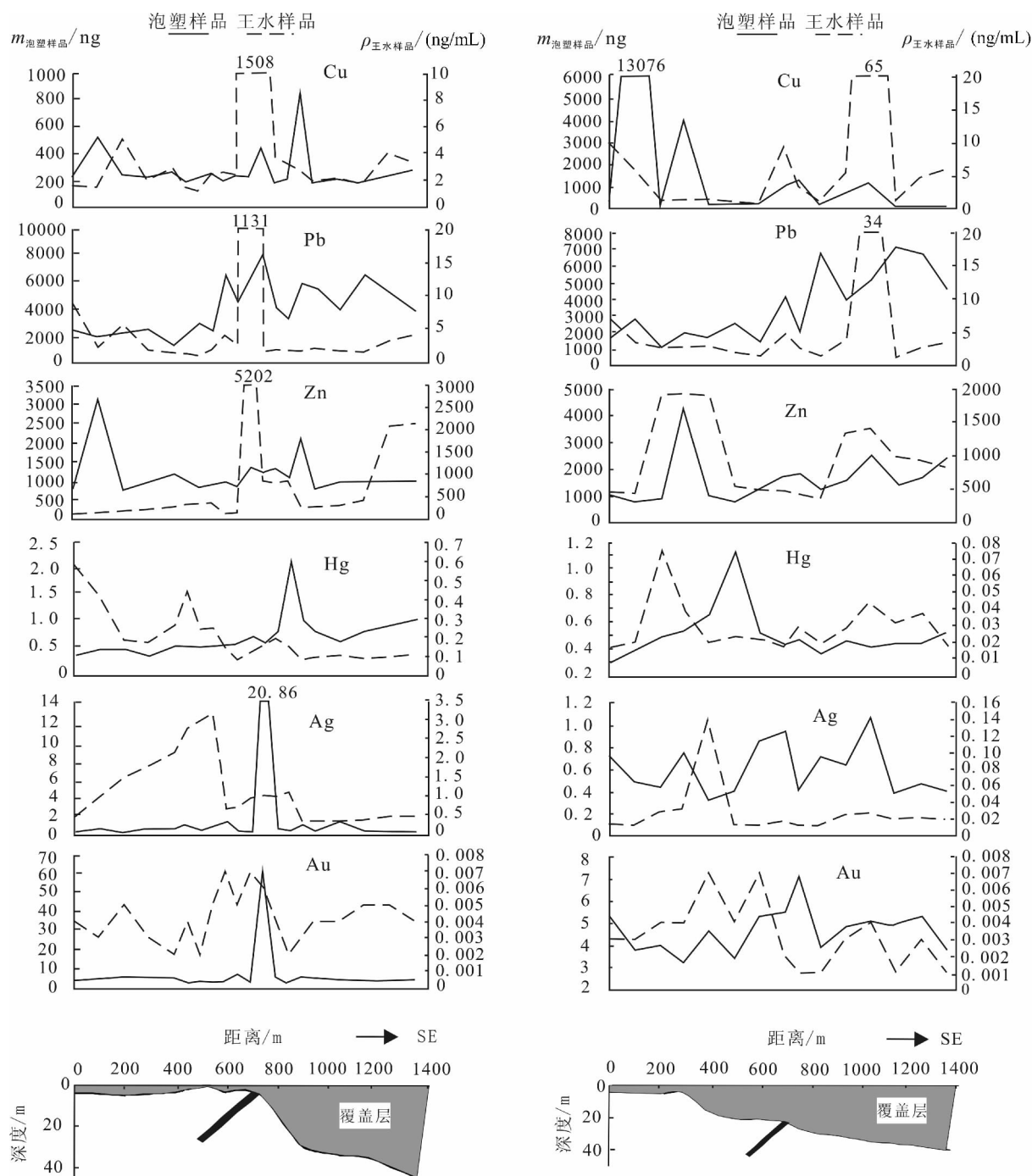


图6 1线和4线Cu、Pb、Zn、Hg、Ag、Au地气测量结果

Fig. 6 Contents of Cu, Pb, Zn, Hg, Ag, and Au in geogases survey in line No. 1 and No. 4

根据本次测量资料,选择测区覆盖层浅的1线和覆盖层深的4线,绘出成矿元素在水平剖面上的分布(图6)。两条测线均在矿体断裂蚀变带地表投影位置处出现Au和成矿伴生元素Ag、Hg、Cu、Pb、Zn多元素地球化学异常。4线北侧出现Cu、Zn的异常。测量所获得的地气异常空间分布,与矿化断裂蚀变带的产状和矿化断裂蚀变带抬升时形成的古地形有关。

通过对比,发现两种介质对元素捕集能力强弱有区别,对微粒的选择性吸收也有区别,表现在异常空间分布出现差异,泡塑介质所反映的矿化蚀变带Au、Ag、Hg、Cu、Pb、Zn元素异常位置,相对王水溶液介质,移向古盆地中心。

4线土壤活动态测量结果列于表5和图7。本研究活动态测量采用细粒级土壤测量(截取小于120目粒级测量),分析所得的Au含量为样品活

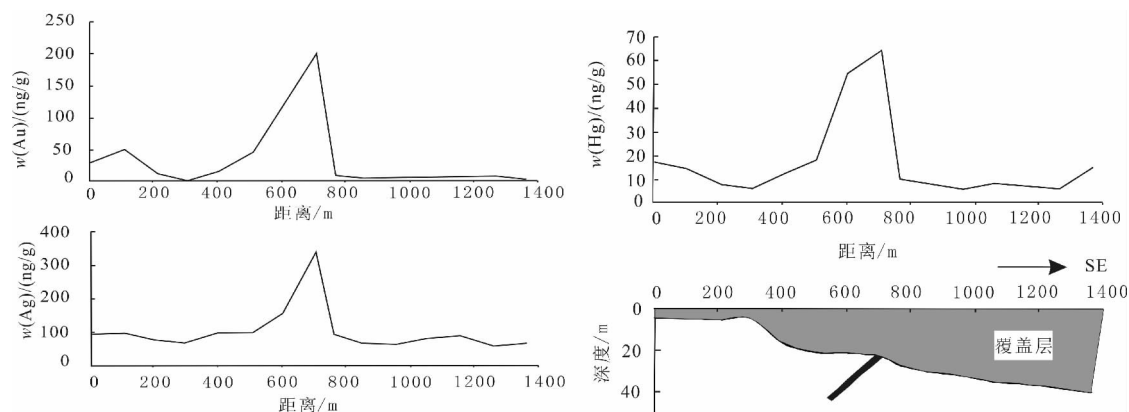


图7 4线土壤活动态Au、Ag、Hg的含量分布

Fig. 7 Contents of mobile Au, Ag, and Hg in soil in line No. 4

动态Au的全量,这部分Au在深穿透地球化学上将其作为活动态Au<sup>[5]</sup>。测量表明Au、Ag、Hg 3元素均在矿体上方出现了异常。

## 4 地气和土壤中金的存在形式

### 4.1 地气和土壤纳米微粒样品的采集与测试

本项研究在矿体上方同时采集了地气中纳米金属微粒和覆盖层土壤金属微粒。在地气和土壤中都观测到金和成矿元素的纳米金属微粒。

地气中金属微粒的采集,分别采用了主动抽气法和被动累积捕集法<sup>[6,9]</sup>。主动抽气法,捕获游离于土壤空隙气体中的纳米金属物质,用钢钎在覆盖层中打一80 cm深的抽气孔,将螺旋取样钻拧入孔中,连结手提式气体采样筒,抽取气体,让气体通过0.5 μm微孔滤膜后进入捕集器,捕集器内置有捕获微粒金属载体,载体材料基质不含成矿元素或预测目标元素<sup>[24-26]</sup>。微粒被阻挡和吸附在载体上,制成TEM观测样品。被动累积捕集法,在矿体上方距地表60 cm处安放捕集器,内装有吸附微粒载体,累积吸收地气微粒。本次观测的样品在野外放置时间为10个月。

覆盖层土壤金属微粒的采集与制备过程为:采集矿化带上方距地表40~60 cm深的土壤样品,在室温下干燥,筛取400目以下样品,采用电磁振荡微米筛使样品分散,分散时大气采样器抽取可扬起的微粒,通过捕集器吸附到载体上,制成TEM观测样品。

纳米微粒的观测使用北京大学透射电子显微镜,型号为日立公司生产的H9000NAR,点分辨率0.18 nm,晶格分辨率0.1 nm,最小束斑径0.8 nm。工作时的加速电压为300 kV,仪器配有X射

线能谱仪(EDS),探测仪具有超薄窗口,能鉴定从硼(原子序数为5)到铀(原子序数为92)的所有元素。本文微粒成分用能谱仪测定,仪器能谱无内标,对所测颗粒成分不能给出其质量分数。在本文观测中,仪器束斑径<0.2 μm。

### 4.2 纳米微粒测试结果与讨论

在矿体上方地气和土壤中同时观测到金与成矿元素形成的复合金属纳米微粒,列于图8、图9。地气和土壤中的纳米微粒在粒径、形貌、成分、结构上具有下列特点:(1)透射电镜(TEM)下单个金属微粒粒径主体在几十nm,也有个别小到几个nm;(2)单个金属微粒呈球形或椭球形或多边形,多个微粒聚集在一起,呈簇团状聚集(图8B,图9C);(3)透射电镜带有X射线能谱仪(EDS)进行微粒原位成分分析。微粒成分可分为:①金属复合成分Au-Zn, Au-Cu-Bi, Au-Cu-Fe-Ti, Fe-Co, Fe-Cu, Hg-Cu纳米微粒(图8A, B, C; 图9A, B, C);②含有Si、Na、K复杂成分的Cu-Fe-Co纳米微粒(图9C)。在地气和土壤中观测到金与成矿元素铜、铋的纳米微粒。图8A为地气中的Au-Cu-Bi纳米微粒,采用被动吸附法取样。图9A, B是覆盖层土壤中Au-Zn, Au-Cu-Fe-Ti纳米金微粒。

在隐伏矿地表覆盖层地气中和通过物理分散法从土壤样品中的纳米微粒,都具有圆球形、椭球形形貌性质,此形貌是地气流携带纳米微粒金属的常见形态和稳定形态。本次研究从覆盖层土壤中分离出含Au-Cu-Bi以及成矿元素Cu-Bi的纳米微粒,表明纳米微粒是以物理形式被吸附在土壤颗粒表面,在其迁移过程中被地球化学障所滞留。纳米金属微粒可由深部矿化形成<sup>[32-37]</sup>,

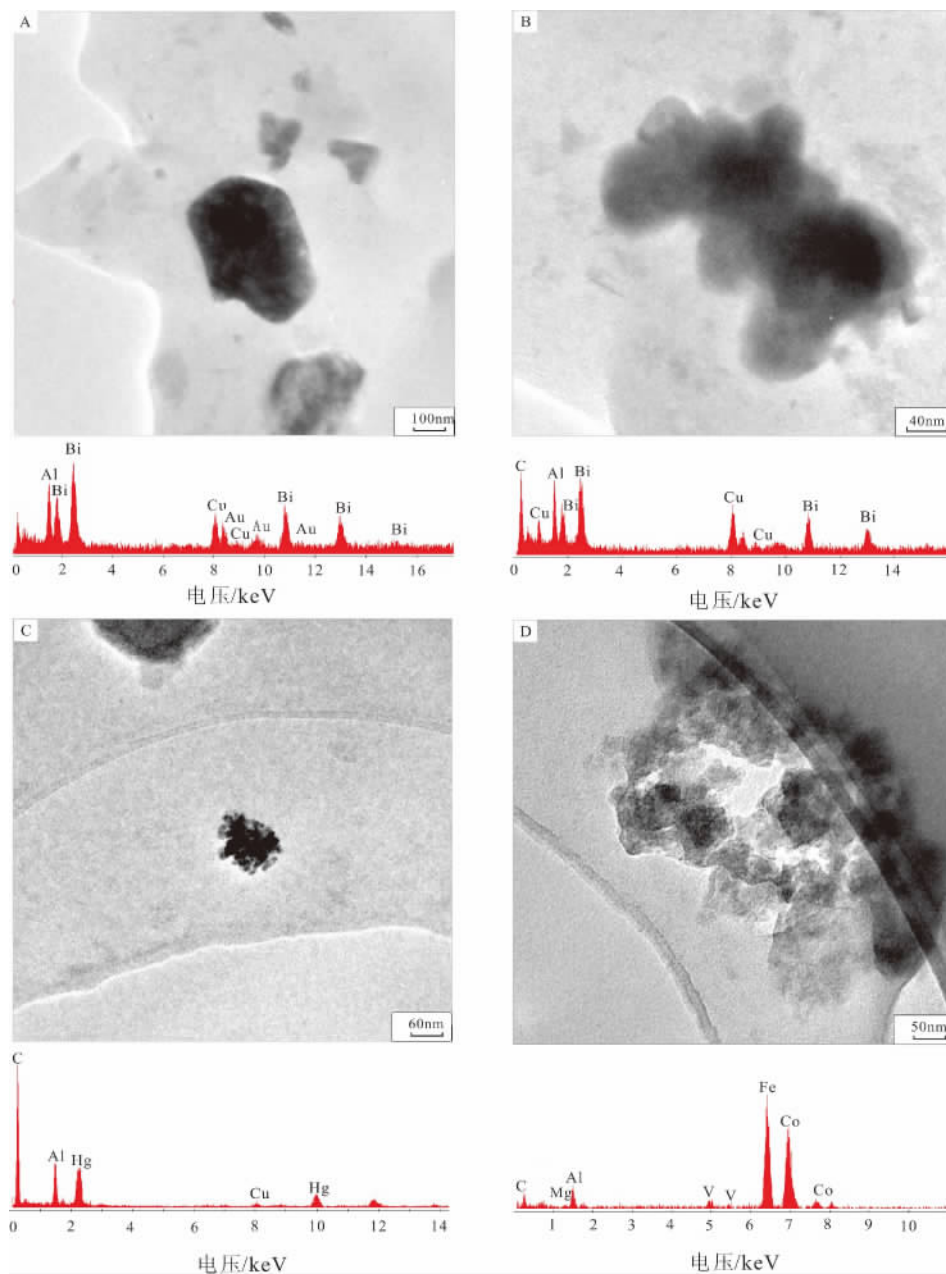


图8 210 金矿上方地气中的纳米微粒

Fig. 8 Nanoscale particles of geogases over 210 gold ore body

A. Au - Cu - Bi 纳米微粒( 被动累积采集) ; B. Cu - Bi 纳米微粒( 被动累积采集) ; C. Hg - Cu 纳米微粒( 被动累积采集) ; D. Fe - Co - V 纳米微粒( 主动抽气法采集)

由上升地气流携带迁移<sup>[14-21]</sup>。观察到的地气和土壤颗粒中的微粒为同源物质, 纳米微粒物质是深穿透地球化学物质迁移和存在形式。已有通过对地气、土壤和矿石中纳米微粒成分、结构、微观形貌同源性对比研究, 确定矿体上方覆盖层地气和土壤纳米微粒来自其下伏矿体的研究结果<sup>[26-27]</sup>, 本次研究没有采集到矿石中的成矿元素纳米微粒, 但所采集观测的地气和土壤样品, 取自矿体上方, 位于地表测量异常范围。含 Au、

Cu、Bi、Hg 成矿元素纳米微粒在其形貌、微观结构上, 可与已确定成因的纳米微粒对比<sup>[26-27]</sup>, 据此可以认为, 气体、土壤介质中纳米微粒来源应是覆盖层下伏矿体。纳米微粒在土壤气体介质中形成地气异常, 在土壤介质中形成土壤活动态异常。纳米微粒可从土壤颗粒表面分离的性质, 表明纳米微粒具有地球化学活性, 在其向上迁移过程中可从吸附固定状态解吸, 此性质可用于解释活动态异常在钻孔垂直剖面上的“C”型分布。



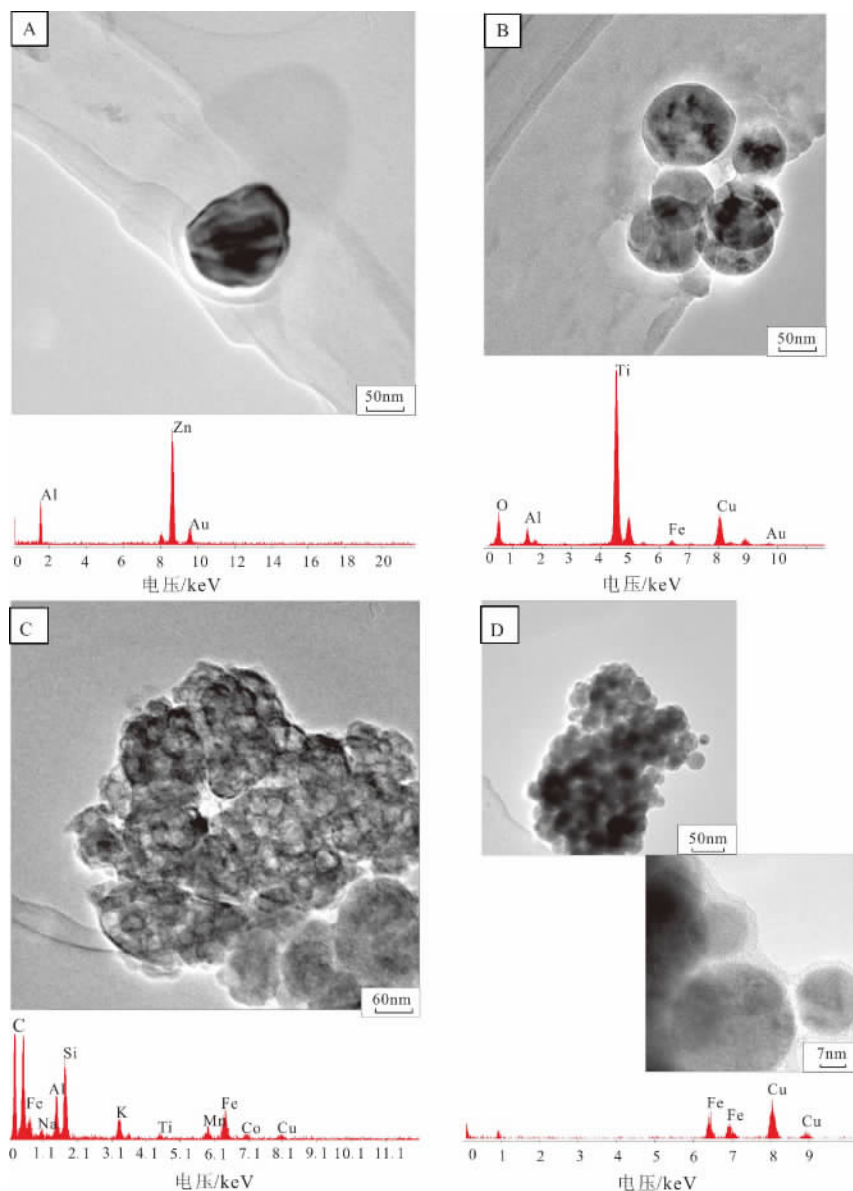


图9 210 金矿上方土壤中的纳米微粒

Fig.9 Nanoscale particles of soils over 210 gold ore body

A. Au-Zn 纳米微粒; B. Au-Cu-Fe-Ti 纳米微粒; C. 含 K、Na、Si 的 Cu-Fe-Co 纳米微粒; D. Cu-Fe 纳米微粒

## 5 结 论

(1) 对隐伏矿金窝子 210 金矿带的地气和土壤活动态测量实验表明, 地气测量和土壤活动态测量可以有效地反映覆盖层下隐伏矿体。

(2) 钻孔垂直剖面研究表明, 活动态形式 Au 在剖面上具有“C”型分布特征。

(3) 金在覆盖层土壤剖面的分布与粘土相一致, 表明粘土相是活动态 Au 的富集相态。粘土相态是表生作用的产物, 该相态所携带的金有两部分来源: 一部分为原生碎屑矿物继承源, 另一部分为粘土矿物所吸附活动态来源, 吸附态可以积

累, 其含量达到地球化学测量可识别的水平, 可以形成有意义的地球化学异常。

(4) 在戈壁干旱地区, 金的水溶态形式是元素向上迁移的方式之一。在戈壁干旱条件下, 蒸发量永远大于降水量, 在地下水的反复持续蒸发前提下, 随水溶态活动的金有持续的上升能力。

(5) 本文在 210 金矿带矿体上方地气和土壤中采集到的纳米金属微粒, 是异常物质, 异常微粒到达地表, 在覆盖层中形成地气异常和土壤活动态异常。纳米级金属微粒具有大的表面积, 通过与微气泡表面结合, 以地气流为载体向上迁移, 或因纳米微粒本身具有类气体性质, 自身像气体

一样向上迁移, 穿越覆盖层迁移到地表。到达地表后, 一部分纳米微粒可滞留在气体里, 另一部分被土壤地球化学障(粘土、铁锰氧化物)捕获。

(6) 纳米微粒具有从土壤颗粒表面分离的性质, 在其向上迁移的过程中可以从吸附的固定状态解吸, 此性质可以用于解释活动态异常在钻孔垂直剖面上的“C”型分布。

#### 参考文献:

- [1] Kristiansson K, Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of Rn in the ground and a new physical model for the transport [J]. *Geophysics*, 1982, 47(10): 1444–1452.
- [2] Malmqvist L, Kristiansson K. Physical mechanism for the release of free gases in the lithosphere [J]. *Geoexploration*, 1985, 23: 447–453.
- [3] 董纯菡, 李巨初, 葛良全, 等. 地气测量寻找深部隐伏金矿及其机理研究 [J]. *地球物理学报*, 1999, 42(1): 135–142.
- [4] Wang Xueqiu, Cheng Z Z, Lu Y X, et al. Nanoscale metals in earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant ore deposits in overburden terrains [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, 58(1): 63–72.
- [5] 王学求. 地球气纳微金属测量的概念、理论与方法 [M] // 谢学锦, 邵跃, 王学求. 走向 21 世纪矿产勘查地球化学. 北京: 地质出版社, 1999: 105–124.
- [6] 王学求, 谢学锦, 卢荫麻, 等. 地气动态提取技术的研制及其在寻找隐伏矿的初步试验 [J]. *物探与化探*, 1995, 19(3): 161–171.
- [7] 任天祥, 刘应汉, 汪明启, 等. 纳米科学与隐伏矿藏——一种寻找隐伏矿的新方法、新技术 [J]. *科技导报*, 1995(8): 18–19.
- [8] 王学求. 深穿透勘查地球化学 [J]. *物探与化探*, 1998, 22(3): 165–169.
- [9] 刘应汉, 孔牧, 孙忠军, 等. 纳米物质测量的液态捕集剂研究 [J]. *物探与化探*, 2003, 27(6): 455–457.
- [10] 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): 84–94.
- [11] 汪明启, 高玉岩, 张德恩, 等. 地气测量在北祁连盆地区找矿突破及其意义 [J]. *物探与化探*, 2006, 30(1): 7–12.
- [12] 曹建劲. 地气测量研究现状及其影响因素 [J]. *湖南地质*, 2001, 20(2): 154–156.
- [13] 叶荣, 王学求, 赵伦山, 等. 戈壁覆盖区金窝子矿带深穿透地球化学方法研究 [J]. *地质与勘探*, 2004, 40(6): 65–70.
- [14] 吴传壁, 施俊法. 上置晕与物质的“类气相”垂向迁移 [J]. *地学前缘*, 1998, 5(1/2): 185–194.
- [15] Wang X Q, Wen X Q, Ye R, et al. Vertical variations and dispersion of elements in arid desert regolith: A case study from the Jinwozi gold deposit, northwestern China [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2007, 7: 163–171.
- [16] Cameron E M, Hamilton S M H, Leybourne M I L, et al. Finding deeply-buried deposits using geochemistry [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, 4(1): 7–32.
- [17] Wang Xueqiu. Leaching of mobile forms of metals in overburden: Development and applications [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, 61: 39–55.
- [18] 谢学锦, 王学求. 深穿透地球化学新进展 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(1): 225–238.
- [19] 刘红艳, 王学求. 金属活动态提取技术在十红滩铀矿的应用 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2005, 37(4): 678–683.
- [20] 董纯菡, 李巨初, 葛良全, 等. 地气物质纳米微粒的实验观测及其意义 [J]. *中国科学: D 辑*, 1998, 28(2): 153–156.
- [21] 王学求. 深穿透地球化学迁移模型 [J]. *地质通报*, 2005, 24(10/11): 892–896.
- [22] Cao J J, HU X Y, Jiang Z T, et al. Experimental simulation of adsorption of geogas carried gold nanoparticles in alluvial cover of the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. *Geofluids*, 2010, 10(3): 438–446.
- [23] 曹建劲, 梁致荣, 刘可星, 等. 红层风化壳对地气纳米金微粒吸附的模拟实验研究 [J]. *自然科学进展*, 2004, 12(7): 826–829.
- [24] 王学求, 叶荣. 纳米微粒发现: 深穿透地球化学微观证据 [J]. *地球学报*, 2011, 32(1): 7–12.
- [25] 曹建劲. 隐伏矿床上升气流微粒特征、形成及迁移 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 113–119.
- [26] 叶荣, 张必敏, 姚文生, 等. 隐伏矿上方纳米铜颗粒存在形式与成因 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 120–129.
- [27] 王学求, 张必敏, 刘雪敏. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 101–112.
- [28] 王勇, 叶荣, 张必敏, 等. 地气测量在戈壁覆盖区 210 金矿的试验 [J]. *物探与化探*, 2012, 36(2): 263–266.
- [29] 王厚庭. 金窝子金矿床的控矿元素分析 [J]. *新疆有色金属*, 2009(增刊): 30–33.
- [30] 张必敏, 王学求, 迟清华, 等. 戈壁覆盖区景观演化与 Au 的分散迁移 [J]. *现代地质*, 2011, 25(3): 575–580.
- [31] 陈志和, 方红卫, 陈明洪. 泥沙颗粒表面吸附铜离子的分布特征和试验研究 [J]. *水利学报*, 2008, 39(5): 633–636.
- [32] 郑大中, 郑若锋. 自然铜、铜合金金属矿物及其矿床形成机制新探 [J]. *四川地质学报*, 2002, 22(2): 72–81.
- [33] 丁振华. 矿物学面临的困难与机遇——纳米科学对矿物学的启示 [J]. *矿物学报*, 1999, 19(3): 379–384.
- [34] 姜泽春. 地学领域里的纳米科学问题 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1995, 14(4): 262–266.
- [35] 丁振华. 微粒矿物的地球化学活性与生物活性 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1998, 17(4): 263–268.
- [36] 杜乐天, 戎嘉树, 陈安福, 等. 地幔岩中微粒合金与还原气体 [J]. *科学通报*, 1995, 40(19): 1788–1790.
- [37] 陈天虎, 岳书仓. 热液矿床中气相成矿作用 [J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2001, 24(4): 470–476.