

doi: 10.11720/wtyht.2023.2695

张洋洋, 陈岳龙, 李大鹏, 等. 冀北隐伏火山热液型铀矿地表地球化学异常[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 300-308. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.2695>

Zhang Y Y, Chen Y L, Li D P, et al. Surface geochemical anomalies of concealed volcanic hydrothermal uranium deposit in northern Hebei[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 300-308. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.2695>

冀北隐伏火山热液型铀矿地表地球化学异常

张洋洋^{1,2}, 陈岳龙¹, 李大鹏¹, 康欢³, 房明亮⁴, 徐云亮⁵

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安 710018; 3. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 4. 金川集团股份有限公司, 甘肃金川 737100; 5. 中勘天成(北京)科技有限公司, 北京 100089)

摘要:为研究华北地区火山热液型铀矿地表地球化学异常特征与深部铀矿体的关系, 选取冀北覆盖区典型的隐伏火山热液型铀矿——大官厂铀矿床为研究对象, 在大官厂矿区布置了土壤调查采样, 并在有矿钻孔和矿化钻孔上方采集了土壤样, 进行土壤瞬时氦、活动态铀及²¹⁰Po 测试分析, 探讨这 3 种地球化学特征与深部铀矿体的关系。结果显示: 高品位钻孔附近的土壤瞬时氦明显高于矿化孔, 同时, 土壤面积样中瞬时氦的高值与深部铀矿体对应较好; 高品位铀矿钻孔中²¹⁰Po 略高, 但面积性分布的土壤样中²¹⁰Po 的离散度小, 分布较均匀, 在矿区和无矿区的数值无差别; 高品位孔中的活动态铀无明显异常, 在土壤面积样中, 活动态铀的最大值位于已知的无矿区。由此获得初步认识, 在大比例尺上探测深埋藏铀矿体时, 土壤瞬时氦浓度异常可以指示深部隐伏铀矿体的异常, 而活动态铀与²¹⁰Po 异常不及瞬时氦灵敏。

关键词: 隐伏火山热液型铀矿; 活动态铀; ²¹⁰Po; 土壤瞬时氦; 大官厂铀矿床

中图分类号: P619.14; P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)02-0300-09

0 引言

大官厂火山热液型铀矿床属于沽源—红山子铀成矿带, 该成矿带南起冀北沽源, 北至内蒙古中部红山子, 是我国重要的火山岩型铀钼多金属成矿带, 该成矿带上发育有众多规模不等的铀钼矿床(点)^[1], 但大多为隐伏型矿床, 矿体上方具有较厚的覆盖层, 对铀矿勘查造成困难。为解决深部找矿难题, 前人提出了金属活动态法^[2]、 γ 能谱测量^[3]、氦(Rn)及其子体(²¹⁰Po)放射性活度测量^[4-5]等方法。

氦气测量是一种常用的找矿方法, 地表土壤氦气异常可以很好地反映深部铀矿体的存在^[5-6]。由于氦气受季节变化影响较大, 前人提出了用 Rn 的子体金属放射性元素²¹⁰Po 进行累计氦的测量^[7]。然而, 由于矿体覆盖层的性质差异、隐伏断裂构造及

地表地形特征等多因素的影响, 对于²¹⁰Po 实验在铀矿勘探中的效果还存在争议。李建飞等^[8]对赣南硬岩型铀矿的研究发现, 土壤样品中²¹⁰Po 可以较好地反映深部铀矿体的位置; 罗强^[9]在相山火山岩铀矿中也有类似的发现; 而康欢等^[10]研究认为²¹⁰Po 对深部砂岩型铀矿体的示踪还存在很多不确定性。

金属活动态法属于一种深穿透地球化学方法^[11], 其理论原理认为是地球内部上升的地气流经过矿体时携带成矿元素一起迁移至地表形成异常^[12]。该方法已在某些隐伏型金、铜、铀等矿床开展了试验研究, 发现金、银等络合物或纳米级单质易于在矿体上方形成金属活动态异常; 铀在近地表土壤中以铀酰络阳离子形式与黏土矿物等结合, 形成金属活动态铀异常^[13]。金属活动态铀异常与深部铀矿体的对应关系及异常成因机理目前争议较多, 刘红艳等^[14]在十红滩铀矿中发现, 活动态 U、Mo 组

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-07-07

基金项目: 科技部国家重点研发项目“穿透性地球化学勘查技术”(2016YFC0600604)

第一作者: 张洋洋(1992-), 女, 博士研究生, 主要从事区域地球化学研究工作。Email: scean11@163.com

通讯作者: 陈岳龙(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事区域地球化学研究工作。Email: chyl@cugb.edu.cn

合异常是砂岩型铀矿的最显著指示标志;谈成龙^[15]研究认为,活动态铀方法在铀矿勘查中的试验结果模棱两可,效果欠佳。

冀北地区发育有大面积的中生代火山岩,早白垩世张家口组分布广泛,铀背景值较高,为火山热液型铀矿的形成提供了有利条件。本文以冀北大官厂隐伏火山热液型铀矿为研究对象,开展了小面积大比例尺的土壤样调查,并采集了含矿钻孔和无矿孔上方土壤样,测定了土壤瞬时氡、活动态铀及²¹⁰Po 浓度,据此探讨大比例尺范围内,地表土壤地球化学特征与深部铀矿体的关系。

1 研究区概况

大官厂铀矿床所属的沽源—红山子铀多金属成矿带^[1]是我国华北地区重要的中生代火山岩型铀

多金属成矿带,大地构造位置位于华北克拉通北缘中段,北部与巨型中亚造山带东段的兴蒙造山带相邻(图 1a)。区域上火山盆地发育,地层具有明显的“二层”结构,由基底和盖层组成。基底岩石主要为新太古代红旗营子群变质岩;盆地盖层主要是早白垩世巨厚的火山岩建造及部分碎屑岩建造。火山碎屑岩盖层从下往上依次划分为白旗组、张家口组、西瓜园组及花吉营组,以张家口组分布最广,沿 NE 向展布^[16]。区域内产出 1 个大型铀矿床(张麻井)、1 个中型铀矿床(大官厂)及多个铀矿(化)点。

大官厂矿区内地层简单(图 1b),主要有张家口组二段顶部的粗面岩(K_1z^2)和三段的酸性火山岩(K_1z^3)。张家口组三段地层自下而上有凝灰质砂岩、粉砂岩(K_1z^{3-1})、流纹质晶屑凝灰岩、流纹质溶解凝灰岩、晶玻屑凝灰岩(K_1z^{3-2})、钾长流纹岩(K_1z^{3-3})、晶玻屑凝灰岩、沉凝灰岩(K_1z^{3-4})和凝灰

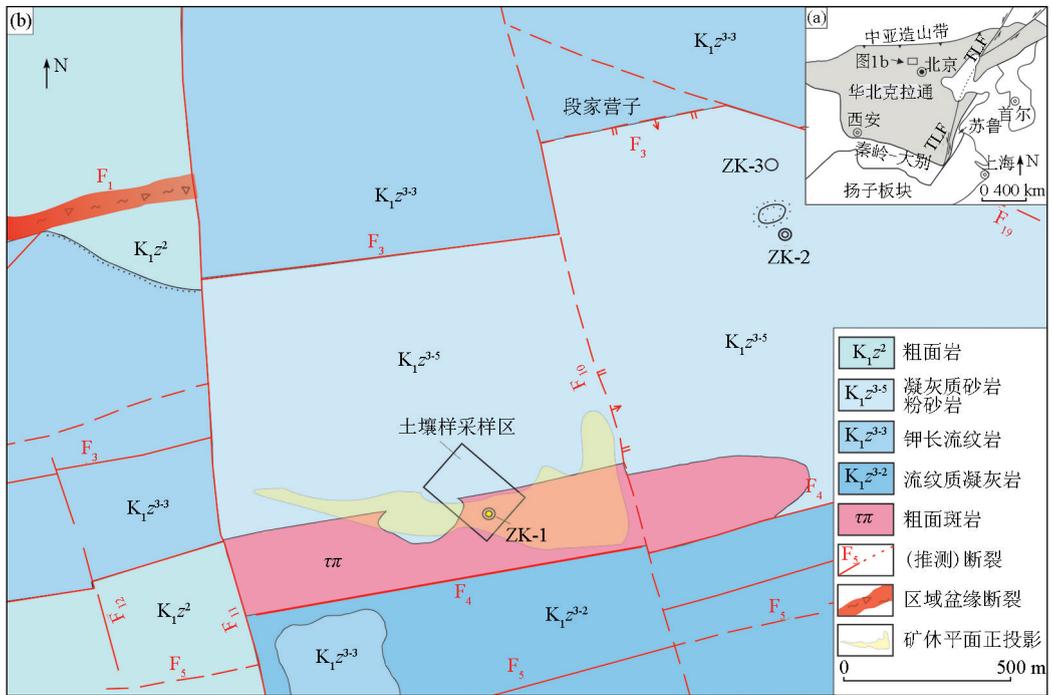


图 1 大官厂矿区大地构造位置 (a) 及地质简图 (b) (据参考文献^[17]修改)

Fig.1 Geotectonic location (a) and geological sketch (b) of the Daguanchang uranium deposit (modified from reference^[17])

质砂岩、粉砂岩(K_1z^{3-5}),其中研究区内的钾长流纹岩(K_1z^{3-3})为富矿岩层。矿区内断裂构造发育,主要有 NEE 向、NNW 向和 SN 向 3 组。大官厂铀矿床位于 NEE 向(F_4)和 SN 向深断裂带(F_{11})的交汇处,受 F_4 构造控制^[16]。

冀北地区属中温带半干旱大陆性气候,是典型的半干旱荒漠草原景观区。矿区内地表大部分被第四系风积、冲积和坡积物覆盖,地形平坦,属坝上丘陵区。此次采样点属于垦殖草地。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

通过资料汇总及野外调查,在研究区进行了地表土壤样采集工作,共采集 B 层土壤样品 43 个。其中 8 件样品为矿化孔(ZK-2)和无矿孔(ZK-3)东、南、西、北 4 个方向 10 m 以内的土壤样;在 200 m×300 m 的面积性调查区,以样点间隔为 50 m 网格状布设并

采集了表层土壤样 35 件,该调查区覆盖了钻探工程已揭露的高品位钻孔(ZK-1)和无矿区,所有样品均在地表以下 30 cm 处采集。

黏土类矿物颗粒粒径一般小于 0.004 mm,赋存于 160 目以下粒级的土壤中,对重金属微粒具有极强的吸附作用,前人研究表明活动态铀以细粒级黏土吸附态为主^[18]。在野外采样时,进行现场筛分,保留 160 目以下细粒级土壤样,送实验室分析。

2.2 样品分析

土壤瞬时氡数据是通过主动泵吸式氡测量仪(FD216 环境氡测量仪)在野外现场获取,测量时间为 2017 年 7 月。该仪器由核工业北京地质研究院仪器开发研究所研制,以闪烁室法为基础,将抽吸的气体过滤之后送入闪烁室。在闪烁室内,氡及其子体衰变产生的 α 粒子使得 ZnS(Ag) 涂层发光,再将光信号转换为电脉冲,以确定氡浓度。

野外具体操作流程如下:①打孔,用直径 2 cm、长 1 m 的钢钎在土壤中打 80~100 cm 的深孔;②抽气,用抽气杆快速替换钢钎,并用土密封深孔顶部,避免空气混入,然后开始抽气;③测量,抽气结束后,断开测量仪与抽气管的连接,记录仪器表盘数字。

土壤²¹⁰Po 测定在湖南省核工业中心实验室完成。样品经过前处理溶解,加入套有浮圈的铜片进行样品源制备,具体制备流程参考文献[10]。将制备好的样品源在室温下放置 9 h 后,放入双路低本底 α 、 β 测量仪(BH1216 III)上测量 α 计数,对相应样品的²¹⁰Po 含量进行分析。

土壤活动态铀分析在河南省岩石矿物测试中心完成。首先称取 10.0 g 土壤样品于 250 mL 聚乙烯烧杯中,用新配制的活动态提取剂对土壤样

品进行处理,活动态提取剂的成分为(10 g/L 草酸铵+25 g/L 柠檬酸铵+0.372 2 g/L 乙二胺四乙酸钠+0.393 4 g/L 二乙基三胺五乙酸+0.191 1 g/L 氨基三乙酸 + 1.492 g/L 三乙醇胺)。之后用慢速定量滤纸负压过滤,分取滤液并用 3% 的硝酸稀释,混匀后,通过 Thermo X-Series2 型电感耦合等离子体质谱仪测定铀含量。

2.3 分析质量

由于²¹⁰Po 和活动态铀测定目前没有标准样品用于质量监控,因此本文采用密码平行样的方法对分析结果进行质量监控。任选 3 件样品,分成两份,随机编号插入同一批样品中,利用相对双差(E_r)检测所测试结果是否合格有效,其中 $E_r = 2 \times |A_1 - A_2| / |A_1 + A_2| \times 100\%$, A_1 和 A_2 分别表示重复采样的样品分析值, $E_r \leq 33\%$ 表示测试结果合格,并且合格率应不低于 85%^[19]。本文共采集 43 件样品,插入 3 件密码平行样,合格率统计结果见表 1,从表中可以看出,所有样品测试结果的相对双差均小于 33.3%。

3 测量结果与数据分析

无矿孔(ZK-3)和矿化孔(ZK-2)地表土壤瞬时氡、²¹⁰Po 及活动态铀的分析结果见表 2。矿化孔地表的土壤瞬时氡为 5 881.5 Bq/m³,远高于无矿孔的测试结果 300.0 Bq/m³;钻孔上方活动态铀测试结果与土壤瞬时氡类似,ZK-2 中土壤活动态铀含量均大于 0.2×10^{-6} ,ZK-3 附近 4 个方向土壤中活动态铀含量均小于 0.2×10^{-6} 。但²¹⁰Po 与以上两项测试结果相反,ZK-3 附近地表土壤中²¹⁰Po 值比 ZK-2 附近土壤高了近 3 倍。

表 1 平行样合格率统计

Table 1 Statistics of repeat sample qualification rate

平行样编号	²¹⁰ Po			活动态铀		
	含量/(Bq · g ⁻¹)	相对双差/%	合格率/%	含量/10 ⁻⁶	相对双差/%	合格率/%
GY-5	0.024	0	100	0.084	6.90	100
GY-36(GY-5-1)	0.024			0.090		
GY-12	0.009	11.76	100	0.066	1.53	100
GY-37(GY-12-1)	0.008			0.065		
GY-21	0.022	20.00	100	0.072	10.22	100
GY-38(GY-21-1)	0.018			0.065		

表 2 钻孔附近土壤瞬时氡、²¹⁰Po 及活动态铀分析结果

Table 2 Assay results of surface soil gas Rn, ²¹⁰Po and mobile-state uranium around borehole

参数	ZK-2				ZK-3			
	ZK-2A	ZK-2B	ZK-2C	ZK-2D	ZK-3A	ZK-3B	ZK-3C	ZK-3D
Rn 含量/(Bq · m ⁻³)	5881.5				300.0			
²¹⁰ Po 含量/(Bq · g ⁻¹)	0.009				0.027			
活动态铀含量/10 ⁻⁶	0.280	0.240	0.250	0.250	0.140	0.130	0.140	0.140

面积样调查区土壤瞬时氡、²¹⁰Po 和活动态铀分析结果统计见表 3。土壤瞬时氡的变化系数 1.06、峰度 12.67 和偏度 3.15 均比较大,表现出强烈的分异性特征和浓集特点;土壤²¹⁰Po 的变化系数 0.38、峰度-0.54 和偏度 0.33 均较小,表现出较弱的分异性特点;活动态铀的结果与²¹⁰Po 类似,变化系数 0.50,偏度 1.04,峰度 0.70,分异性较弱。通过 SPSS 22.0 进行正态分布检验表明土壤瞬时氡原始测量值呈单峰正偏态分布,但其对数值服从正态分布^[20](图 2),土壤²¹⁰Po 和活动态铀值均服从正态分布(图 3)。

使用 MapGIS 软件对土壤面积样中瞬时氡、²¹⁰Po 和活动态铀数据进行网格化处理(克里格法),绘制浓度等值线图;根据钻孔坐标、矿化信息

表 3 面积样调查区土壤瞬时氡、²¹⁰Po 及活动态铀统计结果 (n=35)

Table 3 Statistical parameters of soil radon gas, ²¹⁰Po and mobile-state uranium analytical results in soil area samples (n=35)

统计量(特征参数)		Rn (Bq·m ⁻³)	²¹⁰ Po (Bq·g ⁻¹)	活动态铀 10 ⁻⁶
整体代表性特征参数	最小值	176.9	0.007	0.023
	最大值	13 027.2	0.036	0.180
	平均值	2 225.1	0.019	0.080
	中位数	1 538.9	0.018	0.070
离散性特征参数	极差	12 850.3	0.029	0.157
	均方差	2 365.5	0.007	0.039
	变化系数	1.06	0.38	0.50
分布型式检验	偏度	3.15	0.33	1.04
	峰度	12.67	-0.54	0.70

注:n 为样本数;土壤瞬时氡(Rn)数据来源于 Zhang, et al. ^[20]

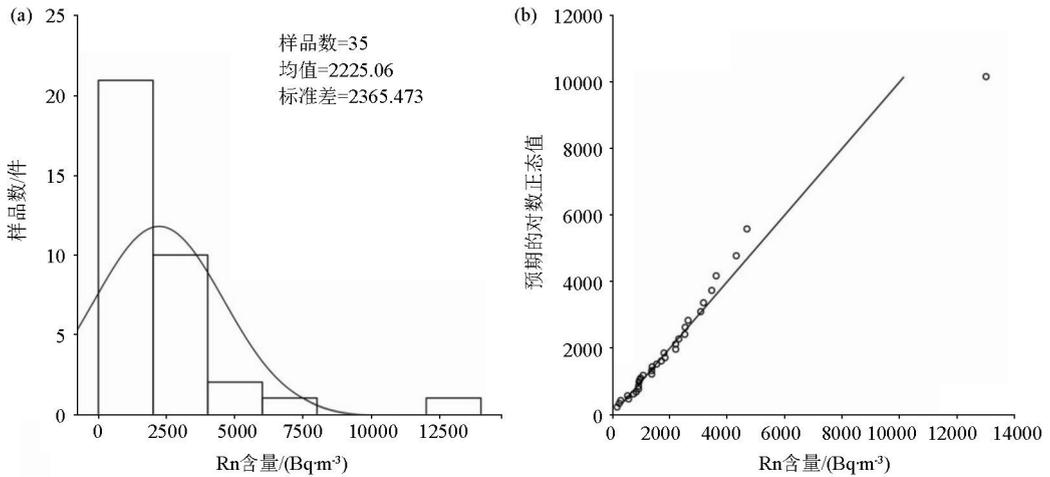


图 2 土壤瞬时氡分布直方图(a)及 Q-Q 图(b) (据文献[20]修改)

Fig. 2 Histogram(a) and Quantile-Quantile plot(b) of soil gas Rn content (modified from reference [20])

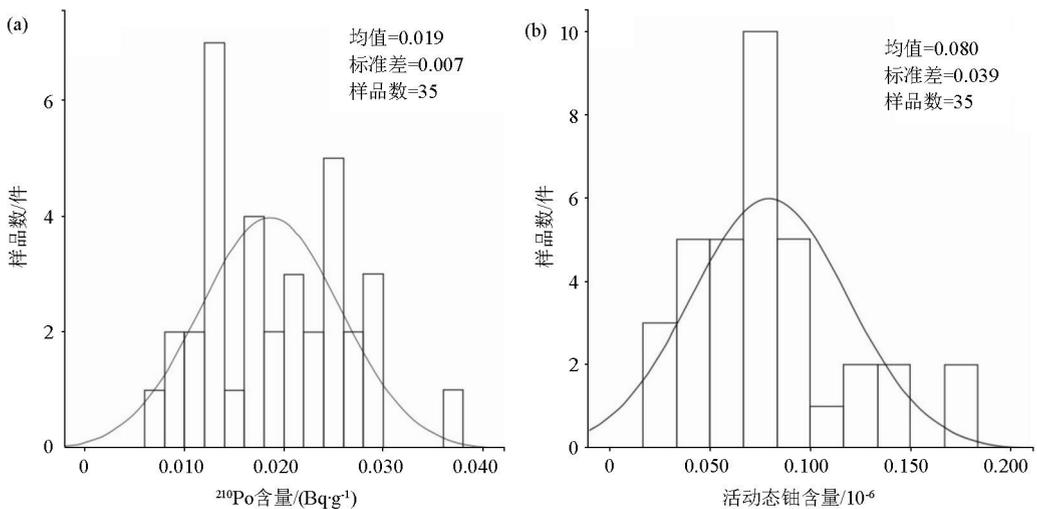


图 3 土壤²¹⁰Po (a) 及活动态铀含量(b) 分布直方图

Fig. 3 Histogram of ²¹⁰Po (a) and mobile-state uranium content(b) distribution

及勘探线位置,确定矿体边界拐点,绘制矿体水平投影图,合并于浓度等值线图中(图 4)。从图 4 可以

看出,瞬时氡的高值区与深部铀矿体水平投影图相吻合;而活动态铀和²¹⁰Po 的高值区集中于西北方向,

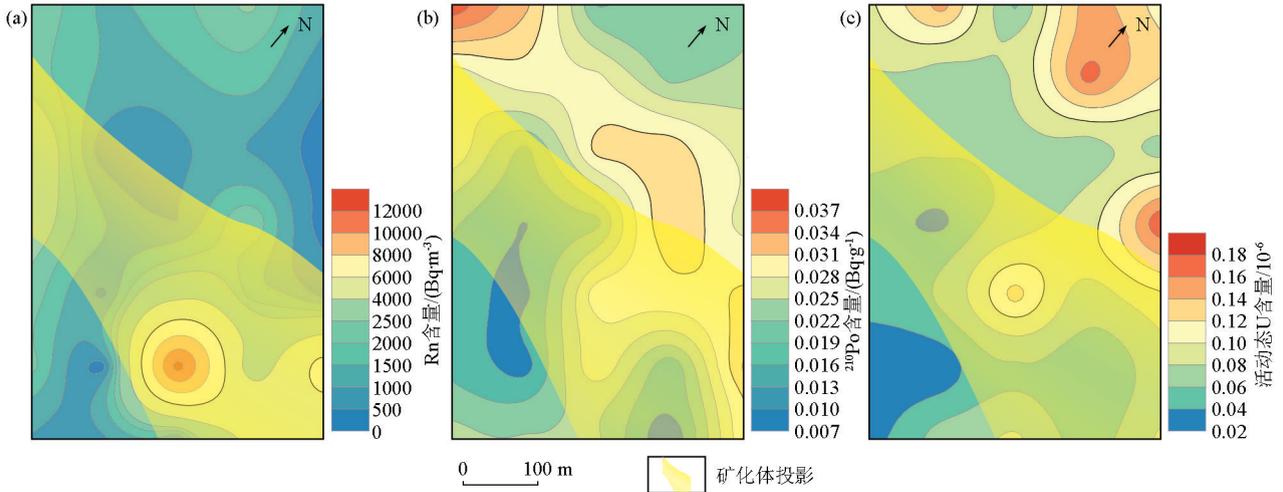


图4 土壤瞬时氡(a) ²¹⁰Po 含量(b) 及活动态铀含量(c) 等值线分布

Fig. 4 Contour map of soil gas Rn (a) ²¹⁰Po concentration (b) and mobile-state uranium concentration (c)

高品位孔附近未显示出高的异常特征,这两种元素的高值区与已知的矿体投影图吻合度较低。

4 讨论

4.1 土壤瞬时氡地球化学特征

氡是铀系衰变链中唯一的具有放射性的气体子体,具有多个同位素,其中²²²Rn 的半衰期最长(3.825 d),可以作为测试对象。对比不同品位钻孔上方土壤瞬时氡浓度值,发现土壤瞬时氡浓度高低与钻孔品位成正相关;矿化孔(5 881.5 Bq/m³) > 无矿孔(300.0 Bq/m³)。土壤面积样中,瞬时氡数据均方差(2 365.5)较大,说明该数据离散程度较大,波动较大,表现出强烈的分异性特征和浓集特点。等值线(图4a)展示出东南高、北部低的特征,瞬时氡的高异常区位于已知深部铀矿化体地表投影区内。典型的土壤剖面(图5)中,高品位孔附近的土

壤瞬时氡值存在异常高值。

土壤中氡气异常来源主要有两种,一种是土壤中的铀及其子体发生衰变产生大量的氡异常,另一种是沉积物吸附外来的氡,如深部铀矿石衰变产生的大量的氡气。铀-238 的半衰期为 4.468×10⁹ a,远大于该地区土壤沉积物的年龄(0.9~1.4 ka)^[21-22];同时,该地区土壤中全量铀含量变化较小((1.09~2.37)×10⁻⁶);如此微量的全量铀在1 000 年左右的时间中,通过衰变很难产生大量的氡气。综上所述,我们认为研究区内,土壤瞬时氡的异常高值是深部铀矿衰变的产物。结合前人研究成果表明^[17, 23],土壤瞬时氡可以作为异常源示踪剂在覆盖区探寻深部铀矿体的存在。

4.2 土壤中²¹⁰Po 地球化学特征

从不同含矿钻孔附近土壤²¹⁰Po 测试结果可以看出,²¹⁰Po 值与钻孔含矿性关系不一致,无矿孔的值远远高于矿化孔和高品位孔。土壤面积样浓度等值线(图4b)展现出南北两边低、中间高的形态,已知的无矿区与有矿区的²¹⁰Po 值相差不大。土壤剖面(图5)同时也展现出差异性较小,在含矿钻孔附近并未发现²¹⁰Po 的异常。因此在该研究区内,通过²¹⁰Po 数据的高低来划分有矿区和无矿区结果并不十分显著。

均方差是反映一组数据离散程度最常用的一种量化形式。表3中²¹⁰Po 的均方差为0.007,相对较小,说明该组数据离散程度较低,波动较小。从数据分析的角度也说明,在该研究区,土壤中的²¹⁰Po 数值变化小,分异弱,浓集性差。

土壤中²¹⁰Po 测量是一种累计氡测量方法。运用 SPSS 20.0 对瞬时氡与²¹⁰Po 进行相关性分析,结

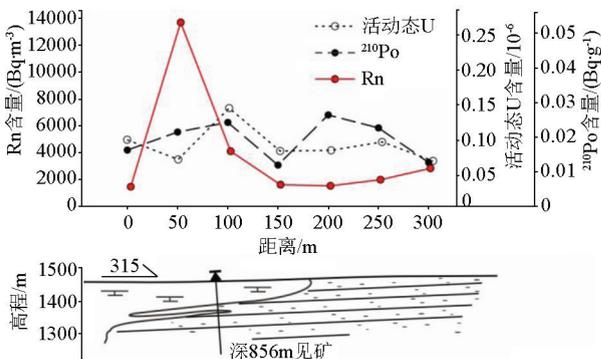


图5 大官厂火山热液型铀矿床土壤剖面瞬时氡、²¹⁰Po 及活动态铀折线

Fig. 5 Line chart of soil gas Rn, ²¹⁰Po concentration and mobile-state uranium concentration in soil profile

果显示瞬时氡与 ^{210}Po 的 Person 相关系数为 0.151, 显著性水平为 0.386, 相关性不显著。采用配对样本 T 检验判断土壤瞬时氡和 ^{210}Po 之间是否存在衰变的关系, 表 4 显示在 0.01 显著水平下两者呈现显著差异, 表明在该研究区土壤中瞬时氡和 ^{210}Po 之间相互独立, 衰变关系较弱。前文研究表明, 土壤瞬时氡与深部铀矿体之间存在对应关系, 因此, 可以说明 ^{210}Po 与深部铀矿体关系存在不确定性。

表 4 土壤瞬时氡、 ^{210}Po 及活动态铀 T 检验

Table 4 Student's T test of soil gas Rn, ^{210}Po and mobile-state uranium

参数	t	自由度	显著性(双尾)
瞬时氡- ^{210}Po	5.565	34	0.000
活动态 U-瞬时氡	5.565	34	0.000
活动态 U- ^{210}Po	-9.707	34	0.000

关于土壤 ^{210}Po 指示铀矿体的研究已开展较多, 并取得较好成果。如王浩锋等^[24]在艾勒格庙地区(铀矿体埋深约 250 m)盆缘碎裂带中探测到 ^{210}Po 回归差正异常, 指示深部存在铀矿体。但土壤中 ^{210}Po 来源受土壤中氡的衰变、平面上 ^{210}Po 的迁移、深部铀矿体规模及埋深等多种因素的影响。土壤中的氡气逃逸到大气中, 在大气对流作用下, 迅速混合并均匀分布, 其衰变产物 ^{210}Po 则以固体形式沉降到地表, 致使土壤表层 ^{210}Po 浓度增加。Charbonneau 等^[25]观察到, 在短暂的大暴雨期间和之后, 地面上的 ^{214}Bi (^{210}Po 的衰变母体)活度增加了 20 倍以上。Dyck^[7]在加拿大某铀矿区的测试结果表明, 无论近土壤中伽马射线或者氡气含量高低, 近地表土壤中 ^{210}Po 均保持不变, 只有在母质层中才展现出明显的 ^{210}Po 差异。夏定良^[26]研究表明当矿体埋深为 15~60 m, 含砾砂岩厚度小于 25 m 时, 矿体正上方 ^{210}Po 异常显著; 当矿体埋深大于 60 m, 含砾砂岩厚度大于 25 m 时, 表层覆盖物中无 ^{210}Po 异常。康欢等^[10]研究表明在砂岩型铀矿中用 ^{210}Po 浓度对深部铀矿体进行异常源示踪还存在很多不确定性。本文研究表明, 土壤 ^{210}Po 对火山热液型铀矿地区深埋矿体(距离地表 856 m)的探测效果较差, 而土壤中的氡气可以很好地示踪深部铀矿体。

理论上, ^{222}Rn (半衰期 3.825 d)通过几个短半衰期子体的衰变之后形成拥有相对较长半衰期的 ^{210}Pb (22 a), 然后再通过 β 衰变形成 ^{210}Po (138 d), 铀矿体中的铀衰变产生的 ^{222}Rn 与其子体 ^{210}Po 具有同源性。但相对于 ^{222}Rn , ^{210}Pb 和 ^{210}Po 较长的半衰期确保了土壤气体中 ^{222}Rn 通量的变化(易受到昼夜和环境扰动)不会在 ^{210}Pb 的衰变产物 ^{210}Po 的浓度中

观察到。同时, Pb 和 Po 更容易吸附于土壤中, 在漫长的衰变过程中, 这些同位素缓慢积累, 使得土壤中的 ^{222}Rn 与 ^{210}Po 达到平衡^[27], 但对于深埋藏铀矿体而言, 由于二者迁移速率和迁移能力不同、储存形式和保持时间不同及在土壤中富集状态差异, 使得深部铀矿体产生的 ^{210}Po 相对于氡气难以迁移到地表并富集在土壤中, 因此地表 ^{210}Po 对深部铀矿体的指示效果不如氡气灵敏。

4.3 活动态铀地球化学特征

部分学者研究表明, 深部矿体或围岩中的成矿(伴生)元素在地气流的作用下, 从深部迁移至地表, 被土壤中的黏土矿物、土壤胶体或有机质等包裹吸附形成金属活动态异常^[28]。对比该研究区不同品位钻孔附近土壤中的活动态铀发现, 矿化孔活动态铀最高, 高品位孔与无矿孔比较接近, 高品位孔附近土壤中活动态铀无明显的异常。200 m×300 m 面积性测量区土壤中活动态铀浓度等值线(图 4c)整体展现出北高南低的趋势, 已知的无矿区活动态铀明显高于有矿区。在土壤剖折线图(图 5)中也观察到, 活动态铀的波动较小, 整个剖面中无太大异常。

表 3 的数据统计分析表明, 研究区活动态铀的异常分化较弱。氡是铀的衰变产物, 封闭体系中, 氡与铀存在衰变关系。但在研究区土壤中, 地表瞬时氡与活动态铀的关系如何? 我们通过配对样本 T 检验分析发现, 土壤瞬时氡和活动态铀数据在 0.01 显著水平下呈现显著差异, 表明在该研究区土壤中瞬时氡和活动态铀相互独立, 不存在衰变关系。

利用活动态铀示踪隐伏铀矿体的研究已有许多, 有成功也有失败的案例。如赵玉岩等^[29]在钱家店砂岩型铀矿床进行活动态铀测量, 结果显示矿区土壤中活动态铀的含量是区内背景值的 47 倍; 葛玮等^[30]研究沙子江花岗岩型铀矿床发现, 富矿体上方土壤中的活动态铀异常具有连续性强、异常强度高的特点, 异常衬度可达 15; 谈成龙等^[31]对砂岩型铀矿土壤中的活动态铀进行分析, 发现活动态铀含量明显不足, 仅占样品总铀量的 10% 不到, 难以验证地下铀矿存在; 康欢等^[10]利用活动态铀对二连盆地哈达图隐伏铀矿体进行示踪, 显示无矿区活动态铀平均值高于有矿区, 认为利用活动态铀示踪隐伏铀矿体存在不确定性。

活动态提取技术是采用某种提取剂提取地表土壤介质中与深部隐伏矿体有关的成矿元素的方法。影响土壤中活动态铀异常的因素包括铀的赋存状态、测试提取方法、采样对象、地形因素及铀矿上覆地层的连通性。①活动态铀赋存状态和提取方法的

影响。活动态铀在土壤中的赋存状态包括水溶态、黏土吸附态、有机结合态和铁锰氧化物态这 4 种类型,不同土壤中活动态铀赋存状态不同,不同赋存状态的活动态铀有不同的提取方法^[15]。②采样对象的影响。不同区域土壤的成分和粒径存在差异,如干旱地区土壤中的有机质和水含量较湿润地区少,细粒土壤中的黏土矿物含量较粗粒的高^[18],从而影响活动态铀的存在形式。③地形因素的影响。师淑娟等^[18]和叶庆森等^[32]曾分别在火山岩型隐伏铀矿和砂岩型铀矿中进行活动态铀分析,发现活动态铀的最大峰值与已知的铀矿体存在偏差,活动态铀受地形影响向下坡方向偏移,需要对活动态铀异常进行地形校正。④覆盖层的连通性影响。金属活动态测量提出的理论基础是地气携带的超微细颗粒在土壤表面形成的各种存在形式,因此隐伏铀矿体上覆地层的连通性会影响活动态铀的迁移速率、迁移方式及能够到达地表的含量,从而影响其异常的形成和分布^[33-34]。

本次研究所采集的土壤样品粒径均小于 160 目,属于细粒级土壤样。研究区地形为南西高、北东低,受地形影响,可能会造成矿区异常高的活动态铀向下坡迁移,形成土壤面积样中活动态铀浓度北高南低的趋势。同时活动态铀由深部向近地表迁移过程中受构造裂隙、岩石孔隙、地下水运动及蒸发等影响^[10],致使矿体上方覆盖层中活动态铀异常变弱。因此,在用地表土壤活动态铀含量或异常分布特征追踪深部铀矿体时,应综合考虑地形、土壤理化性质及矿体埋深等多方面的因素。而在本研究区大比例尺的土壤面积样品调查中,活动态铀对覆盖厚、埋藏深的火山热液型铀矿异常源示踪效果不如土壤瞬时氡直观。

4.4 表层覆盖物地球化学与深部铀矿体的关系

综上所述,通过在大官厂隐伏火山热液型铀矿床中的土壤地球化学调查,我们初步认识到:在小范围内,受地形、构造裂隙、矿体埋深等多种因素的影响,深埋矿体产生的活动态铀不能直接达到地表,²¹⁰Po 作为氡的衰变子体,其浓度不及氡气反应灵敏,对火山热液型铀矿地区深埋矿体(距离地表 856 m)的探测效果较差,而土壤中的氡气可以很好地示踪深部铀矿体。类似的现象,康欢等^[10]在二连砂岩型铀矿中也有发现。因此,在大比例尺上探测深埋藏铀矿体时,²¹⁰Po 及活动态铀与深部铀矿体的关系存在不确定性,还需要更多的实验制约及实践检验;而土壤瞬时氡与深部隐伏铀矿体对应关系较好,地表的瞬时氡异常可以很好地指示深部隐伏铀

矿体的存在。

5 结论

1) 不同品位钻孔附近土壤²¹⁰Po 值与钻孔含矿性关系不一致,无矿孔的值远远高于矿化孔和高品位孔。土壤面积调查区²¹⁰Po 浓度等值线图展现出南北低、中间高的形态,已知的无矿区与有矿区的²¹⁰Po 值相差不大,表明土壤²¹⁰Po 对深部铀矿体指示不灵敏。

2) 矿化孔附近活动态铀最高,而高品位孔附近土壤中活动态铀无明显的异常。200 m × 300 m 面积样的活动态铀浓度等值线图整体展现出北高南低的趋势,已知的无矿区异常特征明显高于有矿区。

3) 土壤瞬时氡等值线图展示出东南高、北部低的特征,与已知深部矿化体的水平投影位置相对应。

4) 在小范围大比例尺的地球化学调查中,土壤瞬时氡浓度异常可以指示深部隐伏铀矿体的异常,而活动态铀与²¹⁰Po 异常不及瞬时氡灵敏。

致谢: 感谢核工业二四三大队勘查一处牛子良等人为野外工作提供便利条件。

参考文献(References):

- [1] 纪宏伟. 内蒙古克什克腾旗红山子铀钼矿床成矿作用研究[D]. 北京:核工业北京地质研究院,2015.
Ji H W. Study on mineralization of Hongshanzi uranium molybdenum deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2015.
- [2] Wang X Q, Cheng Z H, Lu Y X, et al. Nanoscale metals in earth gas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 58(1): 63-72.
- [3] 勒夫布格 L. 用于地面铀矿普查的 γ 能谱法的未来发展[J]. 世界核地质科学, 1974(6): 38-43.
Lofburger L. Future development of γ -spectrometry for surface uranium prospecting[J]. World Nuclear Geoscience, 1974(6): 38-43.
- [4] 邹家衡, 张在作, 张金泉, 等. α 卡片法在铀矿普查中的初步试验效果[J]. 放射性地质, 1981(5): 435-442, 453.
Zou J H, Zhang Z Z, Zhang J Q, et al. Preliminary test results of α -method in uranium prospecting[J]. Uranium Geology, 1981(5): 435-442, 453.
- [5] Gingrich J E. Radon as a geochemical exploration tool[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1984, 21(1-3): 19-39.
- [6] 杨亚新, 刘庆成, 龙期华, 等. 氡气测量在下庄铀矿田扩大矿床范围中的应用[J]. 物探与化探, 2003, 27(3): 184-186.
Yang Y X, Liu Q C, Long Q H, et al. The application of radon gas survey to the expansion of the Xiazhuang uranium ore field[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(3): 184-186.

- [7] Dyck W. Evaluation of the ^{210}Po method at the midwest uranium deposit, Northern Saskatchewan, Canada[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1984(20):85-92.
- [8] 李建飞,付锦,范洪海,等. 硬岩铀矿放射性物化探综合勘查技术[J]. *南华大学学报:自然科学版*, 2007, 21(4):42-47.
Li J F, Fu J, Fan H H, et al. The integrated geophysical and geochemical exploration techniques of hard rock uranium ore radioactivity[J]. *Journal of University of South China: Science and Technology*, 2007, 21(4):42-47.
- [9] 罗强. 沙洲铀矿区综合地球物理找矿标识及找矿前景分析[D]. 南昌:东华理工大学, 2013.
Luo Q. The geophysical prospecting logo and prospecting potential in the Shazhou uranium mine[D]. Nanchang: East China Institute of Technology, 2013.
- [10] 康欢,陈岳龙,李大鹏,等. 二连盆地哈达图铀矿床覆盖区地球化学异常源示踪与判别[J]. *铀矿地质*, 2019, 35(6):351-358.
Kang H, Chen Y L, Li D P, et al. Study on tracing and distinguishing of geochemical anomalous sources in coverage area of Hadatu uranium deposit of Erlian basin [J]. *Uranium Geology*, 2019, 35(6):351-358.
- [11] Xie X J, Wang X Q, Xu L, et al. Orientation study of strategic deep penetration geochemical methods in the central Kyzylkum desert terrain, Uzbekistan[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 66(1/2):135-143.
- [12] 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.
Xie X J, Wang X Q. Recent developments on deep-penetrating geochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1):225-238.
- [13] 张必敏,王学求,徐善法,等. 盆地金属矿穿透性地球化学勘查模型与案例[J]. *中国地质*, 2016, 43(5):1697-1709.
Zhang B M, Wang X Q, Xu S F, et al. Models and case history studies of deep-penetrating geochemical exploration for concealed deposits in basins [J]. *Geology in China*, 2016, 43(5):1697-1709.
- [14] 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*, 2006, 36(2):183-186.
Liu H Y, Wang X Q. Application of selective leaching of mobile metal forms on the exploration for sandstone-type uranium deposit in Shihongtan, Xinjiang, China [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2006, 36(2):183-186.
- [15] 谈成龙. 金属活动态测量方法在层间氧化带砂岩型铀矿勘查中的初步试验[J]. *世界核地质科学*, 2005, 22(4):231-235.
Tan C L. Preliminary experiment on measuring technique for mobile forms of metals in overburdens in the exploration of interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2005, 22(4):231-235.
- [16] 李耀崧. 冀北沽源盆地中生代火山岩的同位素年龄及成因[J]. *资源调查与环境*, 1988, 9(4):47-60.
Li Y S. Isotope age and genesis on mesozoic volcanic rocks in Guyuan basin, Northern Hebei[J]. *Resources Survey and Environment*, 1988, 9(4):47-60.
- [17] 赵丹,王南萍,周觅,等. 活性炭测氡及分量化探在河北省沽源县大官厂研究区铀矿勘查中的应用研究[J]. *铀矿地质*, 2018, 34(1):39-45.
Zhao D, Wang N P, Zhou M, et al. Application of radon survey by activated carbon and partial extraction geochemical prospecting methods for uranium exploration in Daguanchang of Guyuan, Hebei [J]. *Uranium Geology*, 2018, 34(1):39-45.
- [18] 师淑娟,代永刚,陈军威,等. 冀北地区火山岩型隐伏铀矿地球化学勘查方法试验研究[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(2):103-108.
Shi S J, Dai Y G, Chen J W, et al. Experimental study of geochemical exploration methods for volcanic-type concealed uranium deposit in Northern Hebei[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(2):103-108.
- [19] 迟清华,鄯明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京:地质出版社, 2007:113-118.
Chi Q H, Yan M C. Applied geochemical element abundance data manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:113-118.
- [20] Zhang Y Y, Chen Y L, Li D P, et al. Deeply buried volcanic-related hydrothermal uranium deposit: The Daguanchang deposit, Northern Hebei Province, North China Craton [J/OL]. *Journal of Earth Science*; 1-25. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1788.P.20211214.1514.002.html>.
- [21] 阳小兰,张茹春,张振,等. 安固里淖湖近 5000 年来环境变化的孢粉及地球化学沉积记录[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(1):130-142.
Yang X L, Zhang R C, Zhang Z, et al. Environmental change since 5000 cal. a B. P. in the Angulinuor lake area based on palynological and geochemical records [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(1):130-142.
- [22] 范佳伟,肖举乐,温锐林,等. 内蒙古达里湖沉积记录的中晚全新世干旱事件[J]. *第四纪研究*, 2019, 39(3):701-716.
Fan J W, Xiao J L, Wen R L, et al. Middle to late Holocene drought events recorded by the sediments from Dali Lake, Inner Mongolia [J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(3):701-716.
- [23] 刘行,曲凯,尹青青,等. 活性炭吸附测氡法在北秦岭柳树湾铀矿床勘查中的应用[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(3):190-198.
Liu X, Qu K, Yin Q Q, et al. Application of activated charcoal radon survey method in the exploration of Liushuwan uranium deposit in north Qinling Orogen, China [J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(3):190-198.
- [24] 王浩锋,刘波,陈霜,等. 相关分析在二连盆地艾勒格庙地区 ^{210}Po 异常解释中的应用[J]. *物探与化探*, 2018, 42(6):1162-1172.
Wang H F, Liu B, Chen S, et al. The application of correlation analysis to the ^{210}Po anomaly interpretation in Ailegemiao area of Erlian Basin [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(6):1162-1172.
- [25] Charbonneau B W, Darnley A G. Radioactive precipitation and its significance to high-sensitivity gamma-ray spectrometer surveys [J]. *Geological Survey of Canada*, 1970, 70(1):32-36.
- [26] 夏定良. Po 法找矿的初步成果[J]. *放射性地质*, 1981(1):69-75.
Xia D L. Preliminary results of Po prospecting [J]. *Uranium Geology*

- gy, 1981(1):67-73.
- [27] 巢小林. 钻孔岩心剖面²¹⁰Po测定及其找矿意义[J]. 铀矿地质, 2007, 23(5):305-309, 315.
Chao X L. ²¹⁰Po measurement of borehole core and significance for uranium exploration [J]. Uranium Geology, 2007, 23(5):305-309, 315.
- [28] Lu M, Ye R, Wang Z K, et al. Geogas prospecting for buried deposits under loess overburden: Taking Shenjiayao gold deposit as an example[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 197: 122-129.
- [29] 赵玉岩, 孙文, 韩江涛, 等. 浸取分离与电感耦合等离子体质谱联用测定壤中活动态铀[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(30): 140-144.
Zhao Y Y, Sun W, Han J T, et al. Determination of mobile uranium in soil with leaching separation and inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30):140-144.
- [30] 葛玮, 朱姝, 张鑫. 层析法提取土壤样品中活动态铀及其找矿意义[J]. 铀矿地质, 2009, 25(1):45-54.
Ge W, Zhu S, Zhang X. Chromatography method to extract uranium in mobile forms from soil samples and its significance for uranium ore prospecting[J]. Uranium Geology, 2009, 25(1):45-54.
- [31] 谈成龙, 谢海宁, 汤三星. 七种放射性测量方法在砂岩型铀矿找矿中的试验[J]. 世界核地质科学, 2007, 24(3):172-177.
Tan C L, Xie H N, Tang S X. The experiment of seven radioactive methods in the exploration of sandstone-type uranium deposits[J]. World Nuclear Geoscience, 2007, 24(3):172-177.
- [32] 叶庆森, 杨尚海, 杨建新. 元素活动态测量法在鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查中的应用[J]. 地质通报, 2005, 24(10/11): 1007-1012.
Ye Q S, Yang S H, Yang J X. Application of the method of determination of element mobile forms in exploration for sandstone-type uranium deposits in the Ordos basin, China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(10/11):1007-1012.
- [33] 王学求, 谢学锦, 卢荫麻. 地气动态提取技术的研制及在寻找隐伏矿上的初步试验[J]. 物探与化探, 1995, 19(3):161-171.
Wang X Q, Xie X J, Lu Y M. Dynamic collection of geogas and its preliminary application in search for concealed deposits[J]. Geophysical and Geochemical exploration, 1995, 19(3):161-171.
- [34] 姚文生, 王学求, 张必敏, 等. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿深穿透地球化学勘查方法实验[J]. 地学前缘, 2012, 19(3):167-176.
Yao W S, Wang X Q, Zhang B M, et al. Pilot study of deep-penetrating geochemical exploration for sandstone-type uranium deposit, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3):167-176.

Surface geochemical anomalies of concealed volcanic hydrothermal uranium deposit in northern Hebei

ZHANG Yang-Yang^{1,2}, CHEN Yue-Long¹, LI Da-Peng¹, KANG Huan³, FANG Ming-Liang⁴, XU Yun-Liang⁵

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Petroleum Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China; 3. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 4. Jinchuan Group Company Limited, Jinchuan 737100, China; 5. China-Explo TianCheng (Beijing) Technology Company Limited, Beijing 100089, China)

Abstract: The Daguanchang uranium deposit, a typical concealed volcanic hydrothermal uranium deposit, was selected to investigate the relationship between surface geochemical characteristics and deep uranium ore bodies of volcanic hydrothermal uranium deposits in North China. The samples for soil survey were collected in the Daguanchang mining area. They were taken from the soil in the upper part of boreholes revealing deposits and mineralization for the analyses of the instantaneous radon (Rn) concentration, mobile-state uranium, and ²¹⁰Po of soil. Then, this study explored the relationships between these geochemical characteristics and deep uranium ore bodies. The results are as follows. The soil in the upper part of boreholes revealing high-grade deposits (also referred to as high-grade boreholes) had significantly higher instantaneous Rn concentration than that in the upper part of boreholes revealing mineralization (also referred to as mineralization boreholes). The high instantaneous Rn concentration in the soil samples collected from a large area corresponded well to the deep uranium ore bodies. The high-grade boreholes had slightly high ²¹⁰Po. However, the ²¹⁰Po in the surface soil samples showed small dispersion and relatively uniform distribution and did not exhibit differences between the barren and mining areas. Mobile-state uranium in high-grade boreholes did not exhibit significant anomalies. The maximum anomaly value of mobile-state uranium in soil samples collected from a large area occurred in the known barren areas. Therefore, it can be preliminarily concluded that, for the exploration of deeply buried uranium ore bodies on a large scale, the anomalies of instantaneous Rn concentration in the soil can indicate the anomalies of deeply buried uranium ore bodies, while the mobile-state uranium and ²¹⁰Po in soil are less sensitive than instantaneous Rn.

Key words: concealed volcanic hydrothermal uranium deposit; mobile-state uranium; ²¹⁰Po; instantaneous Rn concentration; Daguanchang uranium deposit