

doi: 10.11720/wtyht.2021.1573
赵阳,汪明启,张鹤.土壤(土被)中后生异常与深穿透地球化学[J].物探与化探,2021,45(2):257-265.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1573
Zhao Y, Wang M Q, Zhang H. Epigenetic anomaly in soil or regolith and deep-penetrating geochemistry[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 257-265. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1573

土壤(土被)中后生异常与深穿透地球化学

赵阳,汪明启,张鹤

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083)

摘 要: 本文论述了土壤定义、土壤中同生组分和后生组分,重点论述了后生异常,特别是上置后生异常。提出深穿透化探技术设计原理是提取土壤中来自深部与矿化有关的后生组分,而尽可能不破坏或少破坏土壤基体(同生组分)。用实例说明同生异常和后生异常特征,为什么常规化探(全量)难以在运积物覆盖区隐伏矿勘查中发挥作用的原因。从提取土壤后生异常角度,分析了各种深穿透技术历史、现状和存在问题。

关键词: 土壤;同生组分;后生组分;上置后生异常;深穿透地球化学

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)02-0257-09

0 引言

矿产地球化学勘查(化探)是基于系统地测定天然物质的一种或数种化学性质的矿产勘查方法^[1],其采样介质包括岩石、土壤、地下水及地表水、植物和土壤中的气体,其中最常用、最有效的介质是岩石、土壤和水系沉积物。但由于地球表面大部分面积被土状物质覆盖,实际上,矿产地球化学勘查主要采样介质为土状松散物质(土壤、水系沉积物),因此,从野外工作方法上看,有人甚至将化探等同于“抓土”。但地表松散层类型多、成因复杂,除了风化残积层外,还有各种成因的沉积物,包括冲积物、风积物、冰积物、湖积物等。以次生介质为采样对象的常规化探能否成功应用的关键是识别这些介质并选择恰当的工作方法,而深穿透地球化学则是如何准确提取土壤中来自深部的弱矿化信息。

1 土壤和土被定义

土壤(soil)是指地球表面的一层疏松的物质,由各种颗粒状矿物质、有机物质、水分、空气和微生物等组成,能生长植物。从成因上说,土壤是由岩石

风化而成的矿物质、动植物、微生物残体腐解产生的有机质、土壤生物(固相物质)以及水分(液相物质)、空气(气相物质)、氧化的腐殖质等组成。

英语中“regolith”(土被)起源于希腊语,最早由 Merrill^[2]提出,是指覆盖在基岩上不同厚度的松散物质。后 Eggleton R.A.^[3]将土被定义为“由风化、侵蚀、搬运、沉积作用形成的覆盖在基岩面上未固结或次生再固结松散层,包括半风化基岩、腐殖土、土壤、有机堆积物、火山物质、冰川沉积物、坡积物、冲积物、蒸发沉积物、风积物等”,即从新鲜基岩面到地面的所有物质。

从定义上看,“土壤”与“土被”似乎比较接近,但还是存在较大差别。土被是指基岩上的松散层,范围更广,而土壤属于其中一部分,是能够支持植物生长的表层土被,其含有机质、水分和矿物质。另外,土壤只出现在地球上,而土被不仅出现在地球上,而且出现在宇宙其他星球上,如月球、火星和土星。因此,近年来国外勘查地球化学界更多地使用 regolith(土被)来替代 soil(土壤)。

矿产地球化学勘查主要在残坡积物分布区进行,采样对象主要为土状物质。在我国,西部很多地区土壤不发育,如干旱、半干旱荒漠区,这些地区没有土壤,化探采样介质称为“土被”(regolith)更

收稿日期: 2020-12-21
作者简介: 赵阳(1994-),男,在读硕士研究生,从事勘查地球化学方面的研究工作。Email:617071796@qq.com
通讯作者: 汪明启(1958-),男,博士,教授,长期从事勘查地球化学方法研究工作。

恰当。虽然土壤、土被概念存在较大差异,但为了简便起见,实际应用中化探界仍然将地表土状物统称为土壤。

2 土壤异常类型

土壤或土被中物质组分据其与赋存介质形成的相对时间关系可以分为同生组分(syngeneic component)和后生组分(epigenetic component),其形成的异常分别称为同生异常和后生异常。

2.1 同生异常

同生异常与其赋存介质同时形成。在基岩出露区,同生异常系岩(矿)石风化与成土过程中同时形成;在运积物覆盖区,同生异常是在各种自然营力(水、风、冰川)作用下搬运、沉积形成覆盖层过程中与土壤同时形成的。

常规土壤测量一般分析介质中元素总量或全量(total, T),为同生组分与后生组分之和,即

全量(T) = 同生组分($C_{同}$) + 后生组分($C_{后}$)。

一般情况下,土壤绝大部分组成为同生组分,后生组分含量甚微,因此,常规土壤测量(全量)主要用于发现矿化体或原生晕已遭剥蚀并被残坡积物覆盖的半露头矿,对于运积物覆盖条件下隐伏矿勘查,由于同生组分占比高,来自深部的矿化信息微弱,后生异常信息被掩盖,难以发挥作用。

2.2 后生异常

后生异常则是在所依附的介质形成之后外部引入形成,形成异常的物质通常已经在活动相(水溶液、气体、植物体及大气搬运的质点)中迁移了或远或近的距离,而在异常地点沉积下来。根据后生异常物质来源方向不同,可分为侧移水成异常和上移异常。

水和大气造成的土壤污染虽然也属于后生异常,但不属于本文讨论的内容,本文只涉及矿产勘查中土壤后生异常。

2.2.1 侧移水成异常

金属元素被地表或地下水溶解并随水体迁移很远的距离,在某种地球化学障上析出,形成的异常称为侧移水成异常。这种异常空间上与其源头脱节,真正的找矿目标却在上游的汇水区。在我国,侧移水成异常经常在有机质发育且低温的森林沼泽和高寒山区观察到。另外,在干旱、半干旱区,侧移异常也经常出现在地势相对较低的低洼地带。

由于这种后生异常与异常源的关系疏远,给异常解释增加了难度。在战略上(小比例尺),侧移水

成异常可以加大土壤测量的探测距离,但在战术上(大比例尺),这种脱节异常给化探异常追踪查证增加了难度。

侧移水成异常可据其仅出现在浅部土壤(无根),且元素相对简单(一般为化学性质相对活泼的元素)等特征来识别。

2.2.2 上移异常

来自隐伏矿的指示元素以纳米微粒、离子或分子等形式,通过毛细上升、植物根系吸收、气体携带、电化学、浓差扩散等作用向上运动,一部分呈“游离态”漂浮在土壤空气中,一部分被吸土壤颗粒吸持,在近地表土壤或土被(残坡积或运积)中形成地球化学异常。这种异常与下伏异常源空间位置对应,是各种深穿透地球化学技术设计依据。

3 深穿透技术原理

土被覆盖给矿产勘查带来极大的挑战,但土壤能够储存来自深部的矿化信息,为深穿透技术开发提供了物质基础,也给运积物覆盖区隐伏矿勘查带来了希望。

深穿透地球化学技术原理是提取土壤中来自深部与矿化有关的后生组分,而不破坏或少破坏土壤基体(同生组分)。以黄土覆盖区应用实例来说明深穿透技术设计原理(表1和图1)。从表1看,由于风成黄土介质比较均一,其基体Cu含量(同生组分)比较接近,平均值为 25.1×10^{-6} ,离差0.68,矿体上方无异常显示;弱酸提取的后生组分虽然含量低,占比不到同生组分的1%,在背景区变化不大,平均 198×10^{-9} ,其主要来自黄土风化产生的活动组分和提取剂空白,但在隐伏矿体上方却明显增高,最大衬值大于10;全量虽然由于后生组分叠加,在隐伏矿体上方稍有增高,但衬值最大仅1.11,异常非常弱,很难与分析误差引起的变化区别开。

为了更直观说明效果,根据表1数据做地球化学剖面图(图1)。可以看出,黄土Cu同生组分比较接近,其起伏变化主要与土壤均匀性和分析误差有关,在矿体上方无异常显示;弱酸提取的后生组分却在隐伏矿体上方出现清晰的异常,最大衬值大于10;全量虽然由于后生组分叠加,在隐伏矿体上方稍有增高,但异常强度非常弱,在未知的情况下,很难引起找矿人员关注。

从以上分析可以看出,在运积物覆盖地区,试图通过分析土壤中元素全量来勘查隐伏矿不仅缺乏理论依据,而且也没有实际意义。

表 1 黄土覆盖区某多金属矿土壤中 Cu 组分特征

Table 1 Characteristics of Cu components in the soil of a polymetallic mine in the loess covered area

样品号	共生组分/ 10^{-6}	后生组分/ 10^{-9}	全量/ 10^{-6}	备注
1	25.2	112	25.31	
2	25.5	213	25.71	
3	24.0	150	24.15	
4	24.8	223	24.92	
5	26.0	187	26.29	
6	25.1	174	25.27	
7	25.3	123	25.42	
8	25.1	178	25.28	
9	24.2	211	24.31	
10	25.3	413	25.71	
11	24.4	598	25.00	
12	25.6	502	26.10	矿化体上方
13	25.4	2210	27.61	矿化体上方
14	26.1	1796	27.90	矿化体上方
15	24.7	802	25.60	矿化体上方
16	25.2	401	25.60	
17	26.1	187	26.29	
18	24.3	212	24.51	
19	25.2	182	25.38	
20	25.5	201	25.70	
21	23.4	173	23.57	
22	25.1	166	25.27	
23	26.0	181	26.18	
24	25.2	221	25.42	
25	24.8	179	24.98	

注:后生组分为弱酸提取结果;共生组分为弱酸提取后,再用四
酸消解后测定的结果。

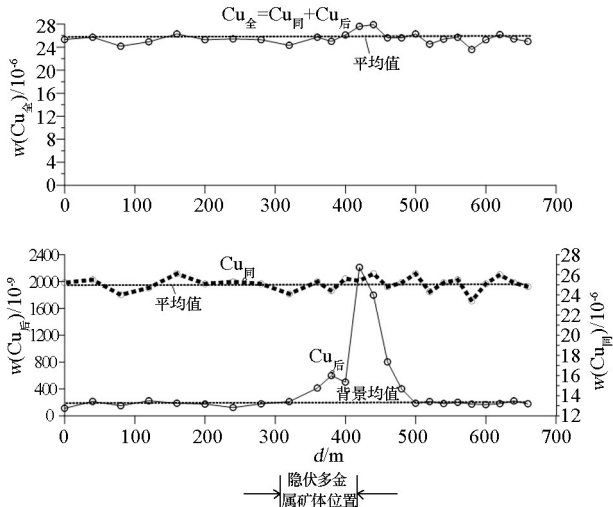


图 1 黄土覆盖区某多金属矿土壤 Cu 分布

Fig.1 Distribution of Cu in the soil of a polymetallic mine in the loess covered area

4 深穿透地球化学综述

20 世纪 90 年代初,随着澳大利亚 MMI 测量技术和美国土壤酶提取在产业界推出并不断应用于矿产勘查,科学界才引起重视。1998 年,由 E.M.Cameron 牵头,联合各国勘查地球化学界启动了一项“深穿透地球化学”计划(CAMIRO deep-penetrating geochemistry)^[4]。该计划由加拿大矿业研究会(CAMIRO)发起,26 个矿业和分析公司联合资助,目的是评价不同覆盖物中这种上置后生异常可信度和各种方法的可靠性。该计划共进行了两个阶段,成果已陆续发表。结论是在各种覆盖条件下,隐伏矿上方存在上置后生地球化学异常。

由于土壤后生金属组分主要以两种状态存在,即漂浮在土壤颗粒空隙间的“游离态”和被土壤矿物颗粒吸持的“吸附态”,两者处于某种动态平衡。因此,目前深穿透地球化学技术分为两种,即提取“游离态”金属组分的气体测量(地气法)和提取被吸土壤矿物颗粒吸持组分的组分的活动态金属测量。

4.1 地气法

地气异常系地气流由地球深部向地表迁移过程中,穿过矿体或矿带时,载入矿体或矿带周围的纳米级金属微粒(粒径一般在 $10^{-7} \sim 10^{-10} \text{m}$ 之间),在覆盖层和近地表的大气中形成的金属元素异常。

地气法是指通过各种技术手段捕集、分析测试覆盖层中由地气流带来的纳米金属微粒,并用来寻找隐伏矿的一种化探方法。由于土壤中同生“气态”金属含量很少,与其他深穿透技术相比,地气法优点是本底低,背景干扰少,衬值高。在我国,地气法又被称为纳米物质测量^[5]和地球气测量^[6-7]。地气(geogas)由瑞典科学家 K. Kristiansson 和 L. Malmqvist^[8]提出,但由于对理论认识分歧较大,加上观测手段所限,进入 20 世纪 90 年代后,西方国家基本停止了这方面的研究。

地气法于 20 世纪 80 年代末引入我国,原成都地质学院童纯茜^[9]最先开始这方面的研究,其使用方法与瑞典科学家基本相同:即使用聚苯乙烯薄膜捕集剂,采用被动法(埋置)富集,中子活化法测定指示元素。随后,童纯茜等采用地气方法进行找矿应用^[10-12];王学求等^[13-15]、刘应汉等^[16]、伍宗华等^[17-18]同时开展了这方面的实验研究。他们早期也采用被动法,泡沫塑料作为捕集剂,中子活化法或原子吸收作为分析方法,试验矿种包括金矿、多金

属、铜镍硫化物等。后来,王学求等^[13]对采样方法进行了改进,采用减压抽气法进行主动法采样。但这段时期由于捕集剂空白金属含量高且不均匀,导致结果受到很多人质疑。进入 21 世纪,随着液态捕集介质和 ICP-MS 的使用,我国主动法地气观测技术获得真正的突破^[19]。液体捕集剂由于空白可控,无需处理即可直接采用 ICP-MS 测定,大大提高了观测精度和准确度,使得壤中地气现象的存在得到确认。通过在金矿、多金属矿、钼矿、镍矿、铬铁矿等隐伏矿床方面的找矿实践,地气方法积累了大量数据,取得了一些成功经验^[20-24]。2009 年,受澳大利亚 Xstrata 铜矿公司邀请并资助,汪明启参加了在世界著名矿山——芒特艾萨(Mt. Isa)进行的深穿透方法对比实验(土壤全量、大样淋滤、MMI、有机气体——美国的 GORE 公司、地气),结果表明地气效果最佳。通过多年研究和应用,发现各种运积物覆盖条件下,不同类型矿床地气异常元素组合基本类似,主要为 Cu、Pb、Zn、Ni、Cd、Sb、Bi、Ag、Au 等指示元素,其中成矿元素 Cu、Pb、Zn、Ni 等亲铜元素含量最高,其他伴生元素等含量较低。

关于地气的形成机理,从方法提出的伊始就存在很大争议。人们对地球内部有地气流存在比较能够接受,但对于金属能不能以“气态”形式存在和迁移争议较大。任天祥等^[25]根据材料科学最新研究成果,提出地气金属可能以纳米微粒形式存在,该观点后来被国内多数学者接受。童纯菡等^[26-27]通过模拟实验和野外采样,采用电子显微镜观测到地气金属纳米微粒的存在,并对其形成机理进行了研究。目前,关于土壤中纳米微粒特征的研究方兴未艾^[28-29]。铅同位素示踪表明地气异常铅主要来自深部矿化体,地气异常的形成与隐伏矿床硫化物遭受氧化作用有关^[21]。

虽然我国地气测量技术取得了一定进展,但存在的问题也相当严重。在技术上,由于地气带有常规气体的某些特性,影响因素多,质量监控困难,造成异常重现性差,特别是气体补充需要相当时间,给地气异常查证工作带来难题;在数据解释上,随着应用范围扩大,发现地气金属元素异常不仅出现在金属矿床上,而且也出现在其他非矿地质体,如油田、断裂、含黄铁矿碳质板岩、单纯黄铁矿地质体等,导致技术特效性丧失。

4.2 活动态金属提取法

4.2.1 活动金属离子提取(MMI)

土壤活动金属离子(MMI, mobile metal ions)测量技术由 A. W. Mann 等通过 13 个研究案例提

出^[30],并进行了理论探索^[31]和方法完善^[32-33]。他们对“活动态金属离子”定义是指在风化带中向上迁移、刚被土壤颗粒表面吸持的活动金属离子。该技术推出后随即成立公司——MMI Technology Wamtech Pty. Ltd.,成功实行商业化运作。由于提取剂配方保密,开始阶段同时授权了澳大利亚 ALS CHEMEX 和加拿大 SGS Minerals 两家实验室提供分析服务。但 2008 年 2 月,澳大利亚 MMI 公司(Wamtech Pty. Ltd.)被 SGS 跨国集团公司购并垄断,成为其旗下的一个子公司。据公司网站公布资料,MMI 技术在全球各种景观条件下,完成了 100 多项技术服务,获得了较好的经济效益和一些成功的找矿案例。关于 MMI 的形成机理,Mann 博士早期认为金属以离子形式迁移,毛细上升作用是离子迁移的主要动力,离子垂直向上迁移至地表并被土壤吸持。

由于 MMI 异常直接位于矿体正上方,异常衬值高(矿体上方大于 5 能够准确确定钻孔位置,并且不受地表土壤组分影响,假异常概率较低,分析成本低(低于全量分析),从而受到整个西方矿业界注意,曾经认为是土壤地球化学测量方法的一次重大革命。MMI 提取思路明显不同于通常意义上的偏提取技术(如离子态、交换态、碳酸盐、有机质和铁锰氧化物结合态等地球化学相态),它借鉴农业上土壤有效态分析的思路,采用特殊的混合提取剂配方(商业秘密),针对不同元素、矿种、景观,采用不同配方,主要提取被土壤颗粒表面吸持的来自深部的微弱矿化信息,而少破坏土壤矿物本身的同生组分。

但近年来,随着 MMI 技术大量应用,也发现了不少问题,找矿效果没有想象的那么神奇。特别是澳大利亚 MMI 初创公司 Wamtech Pty. Ltd.被 SGS 公司收购后,MMI 技术发明人 A. W. Mann 不再应用 MMI 技术找矿,而是用来解决农业和考古问题^[34-35],C. Reimann, A. Mann 等则应用 MMI 分析结果研究欧洲土壤和农业问题^[36-37],说明 MMI 提取的不是 MMI 公司早先声称的来自深部矿化信息,而是多来源(土壤风化和水、大气等输入),因此技术失去特效性,结果解释复杂化,MMI 技术需要重新认识。

4.2.2 酶提取

酶提取技术由 J. R. Clark 稍早于 MMI 提出^[38],主要采用生物酶提取来自深部、被锰氧化物结合的后生金属元素。目前,酶提取方法由国际著名商业实验室 ACTLABS 掌控并被应用于商业勘查和科学研究^[39-42]。该技术商业化运作也比较成功(www.

enzyme leach.com),他们声称该方法不仅成功用于冰碛物覆盖区、干旱景观区、喀斯特景观区、强风化红壤景观区勘查金、块状硫化物、密西西比铅锌等金属矿床的矿产勘查,而且还用于石油勘查^[43],但由于只提取锰氧化物,限制了其应用范围,因此,其影响远不及 MMI 技术。

4.2.3 地电化学提取

地电化学方法是用电来提取土壤中活动组分。早在 20 世纪 60 年代就由前苏联列宁格勒大学 IO. 雷斯等推出,称之为“部分提取金属法”(CHIM),并在勘查找矿中进行了应用^[44]。20 世纪 70 年代初,该技术也引起了西方国家的注意^[45]。

我国最早开展地电化学找矿方法是南京地质学校的费锡铨^[46]。与此同时,桂林地质学院罗先熔等和地质矿产部物探所刘吉敏、刘占元等在全国各地不同的厚层覆盖区,不同类型矿床上开展了地电化学找矿的系列研究,取得了较好找矿效果^[47-50]。近年来,一些研究者在装置和方法上进行了一些改进^[49-52]。

关于地电的形成机理,早期认为在电场作用下,可以将地下几百米深矿体中的金属离子驱赶上来并捕获,前苏联还给出一系列公式进行证明。另外,认为金属主要呈阳离子迁移,只注意阴极提取,选择提取的全是带正电荷的元素。而事实上,很多金属元素都可形成负离子络合物,尤其是存在氯化物时,地表土壤中更易于形成金属元素的负离子络合物。

基于以上认识,因此,早期的地电化学测量采用大电流,使用功率较大的发电机或民用电,并使用长电线连接各测点的终点及在无穷远处布设正极,不仅使采样设备笨重,操作繁琐,而且成本高,效率低,推广困难。

随着研究的深入,康明、罗先熔^[49]认识到人为电场是不可能直接作用到几百米深部隐伏矿,使得离子迁移至地表,他们提出,地电化学异常是由于深部盲矿或隐伏矿经过电化学溶解、氧化溶解及其他复杂的地质作用,与成矿物质有关的成矿元素及伴生元素通过浓差扩散、地下水活动、大地电场、植物毛细作用、干旱地区的蒸发泵流作用、地球脱气作用等多种机制迁移至地表,并以多种形式赋存下来而形成的。在人工电场作用下,与矿有关的金属离子平衡发生了变化,其中的金属正离子在电场作用下向阴极移动并形成电解物,收集并分析电极上吸附的电解物,可发现与矿有关的金属离子异常,从而达到找矿和评价的目的。基于以上认识,他们对采样装置进行了改进,将无穷远极供电方式改为作用区

域供电方式,并采用直流低压(9V 干电池)作为提取电场,大大提高了方法的实用性和效率,观测精度也得到极大提高。

近年来,随着技术完善,我国地电化学法成为应用最广泛的深穿透地球化学技术之一,找矿实践方面文献快速增加,但其找矿效果有待检验,技术规范化和标准化急需加强。另外,地气和 MMI 结果多解性也同样是地电化学法面临的问题。

4.2.4 其他提取方法

我国于 20 世纪 90 年代末开展土壤活动态提取方法实验^[53-54]。提取方案一般采用赵俊田 20 世纪 80 年代总结的方法,即水溶态(去离子水)、黏土吸附态或交换态(弱酸、弱碱盐,如 5% 柠檬酸铵溶液)、碳酸盐结合态(酸性条件醋酸盐)、有机质络合态(0.1mol NaOH+0.1mol Na₄P₂O₇·H₂O 溶液, pH = 13)、铁锰氧化物等结合态(0.3mol 柠檬酸铵+0.1mol 盐酸羟氨, pH = 7)^[55]。一些学者对提取和分析方法进行研究,主要是提取及分离条件、试剂本底控制和测试仪器条件等方面进行优化^[56-58]。

在应用活动态测量勘查矿产方面,一般根据矿种和景观特征选择提取步骤,开展方法有效性试验,目前应用主要集中在金矿和铀矿上。在金矿方面,程志中等^[6]在黄土覆盖的张全庄金矿开展方法试验,发现水提取方法效果较好。李通国等^[59]在甘南草甸覆盖区应用活动态法找金,通过分析水提取金、有机结合金、自然金 3 种金含量,发现在已知矿体上方有异常显示,随后在试点区圈定了活动态金异常并发现了金矿化体。陈希泉等^[60]在内蒙古额尔古纳森林覆盖区虎拉林金矿区进行金属元素活动态测量法实验,提取和分析了水溶态、黏土吸附态、有机结合态和铁锰氧化物态金,认为活动态能够较好地指示矿化体。

Mann 等^[30]认为土壤中来自深部矿化体的活动态金属不是以某种单一相态存在,而是以一种多相态混合状态存在,据此开发出独特的 MMI 提取剂配方。借鉴 MMI 提取思路,汪明启等^[61]采用稀盐酸提取,在黄土覆盖的蛟龙掌多金属矿床上方(土壤全量无异常),观测到与壤中地气异常特征类似的土壤活动态清晰异常,初步证实覆盖区土壤中同时存在地气和活动态金属元素异常。

与其他矿种相比,活动态测量在铀矿勘查方面应用实例更多,但多集中在盆地砂岩铀矿上^[62-67]。提取方法主要针对水溶态、黏土交换态和有机结合态,分析元素除成矿元素 U 外,还包括其他伴生元素 Mo、V、Se 等。近年来,核工业系统学者将活动态

测量称之为分量化探^[68],提取剂配方申请了专利,初步应用效果良好。

虽然我国学者对活动态测量方法进行了一些研究,但在认识上未摆脱传统化学物相分析束缚,提取方法主要针对水溶态、黏土吸附态(或交换态)、有机质、铁锰氧化物等结合态,提取方法和质量监控缺乏标准,大部分成果为有效性实验,离走向工程化还有很长的路要走。

5 结论

1)土壤覆盖虽然给矿产勘查带来挑战,但土壤捕集深部矿化信息的能力却给覆盖区深穿透找矿技术开发带来了希望。上置后生异常信息提取是深穿透地球化学研究的核心任务。侧移水成异常一方面加大了土壤测量探测距离,另一方面却使异常解释复杂化。用土壤全量测量勘查隐伏矿缺乏科学依据。

2)深穿透地球化学技术设计原理是提取土壤中来自深部与矿化有关的后生组分,而尽可能不破坏或少破坏土壤基体(同生组分)。

3)针对土壤中上置后生金属组分的两种赋存状态,地球化学工作者开发出两种深穿透地球化学技术:气体(地气)测量和活动态金属测量。各种技术应用虽然取得了一定进展,但存在问题很多,深穿透地球化学研究征途依然艰辛漫长。

参考文献(References):

- [1] Hawkes H E, Webb J S. Geochemistry in mineral exploration[J]. Soil ence, 1962, 95(4):283.
- [2] Merrill G P. A treatise on rocks: Rock weathering and soils[M]. London: Macmillan, 1897:411.
- [3] Eggleton R A. Glossary of regolith surficial geology, soils and landscape[M]. Perth: CRC LEME Publication, 2001:144-169.
- [4] 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.
- [5] 刘应汉,任天祥,汪明启.应用于矿产勘查的地下纳米物质[J].矿物岩石地球化学通报,1997,16:250-253.
Liu Y H, Ren T X, Wang M Q. Application of underground nano size matter to mineral resources exploration[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16:250-253.
- [6] 程志中,王学求,喻劲松.深穿透地球化学方法在黄土覆盖区的应用——张全庄金矿试验实例[J].矿床地质,2002,21(S):1124-1127.
Cheng Z Z, Wang X Q, Yu J S. Application of deep-penetration geochemistry in loess terrain: A case of Zhangquanzhuang gold de-

- posit[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S):1124-1127.
- [7] 程志中,王学求,刘大文.地球气组分与隐伏岩体的关系初探[J].物探与化探,2002,30(2):90-93.
Cheng Z Z, Wang X Q, Liu D W. Preliminary study on the relationship between earth gas components and concealed rock mass[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 30(2):90-93.
- [8] Malmqvist L, Kristiansson K. Experimental evidence for an ascending microflow of geogas in the ground[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 70:407-416.
- [9] 童纯菡,梁兴中.核地球物理勘探新技术——地气法[J].地学进展,1989,1(13):10-12.
Tong C H, Liang X Z. New technology of nuclear geophysical exploration-Geo-gas[J]. Method Advances in Earth Science, 1989, 1(13):10-12.
- [10] 童纯菡,梁兴中,李巨初,等.隐伏金矿床上的地气异常[J].科学通报,1990,35(16):1280-1285.
Tong C H, Liang X Z, Li J C, et al. Abnormal geogas in hidden gold deposits[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(16):1280-1285.
- [11] 童纯菡,李巨初,梁兴中,等.某金矿床地气异常初步研究及其地质意义[J].成都地质学院学报,1991,18(3):116-121.
Tong C H, Li J C, Liang X Z, et al. A preliminary study of geogas anomaly on a gold deposit and its geological significance[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1991, 18(3):116-121.
- [12] 童纯菡,梁兴中,李巨初.地气测量研究及在东季金矿的试验[J].物探与化探,1992,16(6):445-451.
Tong C H, Liang X Z, Li J C, et al. The tentative geogas survey in the Dongji gold deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1992, 16(6):445-451.
- [13] 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 X. Dynamic collection of geogas and its preliminary application in search for concealed deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1995, 19(3):161-171.
- [14] Wang X Q, Liu D W, Cheng Z Z, et al. Wide-spaced geochemical mapping for giant ore deposits in concealed terrains[G]//Xie X J. Proceedings of 30th International Geological Congress (Geochemistry). Utrecht: International Science Publisher, 1997, 19:127-140.
- [15] Wang X Q, Xie X J, Cheng Z Z, et al. Delineation of regional geochemical anomalies penetrating through thick cover in concealed terrains: A case history from the Olympic Dam deposit, Australia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 66(1-2):85-97.
- [16] 刘应汉,任天祥,汪明启,等.隐伏矿区地气测量试验及效果[J].有色金属矿产与勘查,1995,4(6):355-360.
Liu Y H, Ren T X, Wang M Q, et al. Test results of geogas survey in hidden mining areas[J]. Mineral Exploration, 1995, 4(6):355-360.
- [17] 伍宗华.地气测量在叶县—邓县—南漳地学剖面研究中的应用[J].岩石学报,1995,11(3):333-342.
Wu Z H. A study of application of geogas survey in Yexian-Dengxian-Nanzhang geoscience profile [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(3):333-342.
- [18] 伍宗华,金仰芬,古平,等.地气测量的原理及其在地质勘查中

的应用[J].物探与化探,1996,20(4):259-264.

Wu Z H,Jin Y F,Gu P,et al.Principles of geogas survey and its application in geological exploration[J].Geophysical and Geochemical Exploration,1996,20(4):259-264

[19] 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.

Liu Y H,Kong M,Sun Z J,et al.The liquid collecting media for nanoscale material geochemical survey[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2003,27(6):455-457.

[20] 汪明启,高玉岩,张得恩,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.

Wang M Q,Gao Y Y,Zhang D E,et al.Breakthrough in mineral exploration using geogas survey in the basin area of northern Qilian region and its significance[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2006,30(1):7-12.

[21] 汪明启,高玉岩.利用铅同位素研究金属矿床地气物质来源:甘肃蛟龙掌铅锌矿床研究实例[J].地球化学,2007,36(4):391-399.

Wang M Q,Gao Y Y.Tracing source of geogas with lead isotopes: A case study in Jiaolongzhang Pb-Zn deposit, Gansu Province[J].Geochimica,2007,36(4):391-399.

[22] Wang M Q, Gao Y Y. Progress in the collection of Geogas in China[J].Geochemistry: Exploration Environment Analysis, 2008, 8(2): 183-190.

[23] 高玉岩,汪明启,夏修展,等.某些景观区隐伏金属矿地气法试验结果[J].物探与化探.2010, 34(2): 144-149.

Gao Y Y,Wang M Q,Xia X Z,et al.Geogas tests in the exploration of concealed metallic deposits in some landscape areas[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2010, 34(2): 144-149.

[24] 高玉岩,汪明启,夏修展,等.冲积平原区隐伏金属矿地气法试验研究[J].地质找矿论丛,2011,26(3):345-349.

Gao Y Y,Wang M M,Xia X Z,et al.Results of geogas test in exploring blind metallic deposits in alluvial plain[J].Contributions to Geology and Mineral Resources Research,2011,26(3):345-349.

[25] 任天祥,刘应汉,汪明启.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,1995,18(8):33-36.

Ren T X,Liu Y H,Wang M Q,Nanometre science and hidden mineral resources[J].Science & Technology Review,1995,18(8):33-36.

[26] 童纯茜,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,1998,28(2):153-155.

Tong C H,Li J C,Ge L Q,et al.Experimental observation and significance of nanoparticles of geo-gas materials[J].Science China Press,1998,28(2):153-155.

[27] 童纯茜,李巨初.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.

Tong C H,Li J C.Geogas prospecting and its mechanism in the search for deep-seated or concealed gold deposits[J].Chinese Journal of Geophysics,1999,42(1):135-142.

[28] 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,2004,14(7):826-829.

Cao J J,Liang Z R,Liu K X,et al.Simulation experimental study on the adsorption of earth gas nano-gold particles by the red weathering Crust[J].Progress in Natural Science,2004,14(7):826-829.

[29] 张必敏,王学求,叶荣,等.纳米金属微粒的采集观测及其对地球化学勘查的意义[J].物探化探计算技术,2014,36(6):708-714.

Zhang B M,Wang X Q,Ye R,et al.Collection and observation of nanoparticles and the significance for geochemical exploration[J].Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,2014.36(6):708-714.

[30] Mann A W,Birrell R D,Lawrance L M,et al.The new Mobile Metal Ion approach to detection of buried mineralisation[C]//An International Conference on Evolution, Crustal Metallogeny and Exploration of the Eastern Goldfields, Australian Geological Survey Organisation,1993.

[31] Mann A W,Gay L M,Birrell R D,et al.Mechanism of formation of mobile metal ion anomalies[J].Minerals and Energy Research Institute of Western Australia,1995,153:407.

[32] Mann A W,Birrell R D,Mann A T,et al.Application of the Mobile Metal Ion technique to routine geochemical exploration[J].Journal of Geochemical Exploration,1998,61(1-3):87-102.

[33] Wamtech Pty. Ltd..MMI manual for Mobile Metal Ion geochemical soil surveys[J].Galer MMI Survey,2004:31.

[34] Sylvester G C,Mann A W,Rate A W,et al.Application of high-resolution Mobile Metal Ion (MMI) soil geochemistry to archaeological investigations: An example from a Roman metal working site, Somerset, United Kingdom[J].Geoarchaeology,2012,32(5):563-574.

[35] Graham C S,Alan W M,Samantha R C,et al.MMI partial extraction geochemistry for the resolution of anthropogenic activities across the archaeological Roman town of Calleva Atrebatum[J].Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis,2017,18(1):58-74.

[36] Reimann C,Schilling J,Roberts D,et al.A regional-scale geochemical survey of soil O and C horizon samples in Nord-Trøndelag, Central Norway: Geology and mineral potential[J].Applied Geochemistry,2014,61:192-205.

[37] Mann A,Reimann C,Caritat P D,et al.Mobile Metal Ion analysis of European agricultural soils: Bioavailability, weathering, geogenic patterns and anthropogenic anomalies[J].Geochemistry-Exploration Environment Analysis,2015,15:99-112.

[38] Clark J R,Meier A L,Riddle G.Enzyme leaching of surficial geochemical samples for detecting hydromorphic trace-element anomalies associated with precious-metal mineralized bedrock beneath glacial overburden in northern Minnesota[J].Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center,1990,19:189-207.

[39] Clark J R.Detection of bedrock-related geochemical anomalies at the surface of transport overburden[J].Discover Our Resources,1992,76:4-11.

[40] Clark J R.Enzyme-induced leaching of B-horizon soils for mineral exploration in areas of glacial overburden[J].Applied Earth Science;Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section B,1993:19-29.

[41] Clark J R.Innovative enzyme leach provides cost-effective overbur-

- den penetration [C]//Townsville; Extended Abstracts, 17th IGES, 1995.
- [42] Clark J R. Unique significant enzyme leach anomaly patterns in areas of tropical-subtropical weathering [C]//Kingston; Queen's Univ. Conf. Proc., 1996.
- [43] Clark J R. Concepts and models for the interpretation of enzyme leach data for mineral and petroleum exploration [G]//Enzyme leach: Model, Sampling Protocol and Case Histories. Ontario; Activation Laboratories, 1997.
- [44] 雷斯 IO. 地电化学勘探法 [M]. 张肇元, 崔霖沛, 译. 北京: 地质出版社, 1986.
- Reis IO. Geoelectrochemical exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [45] Govett G J S. Soil conductive assessment of an electro-chemical technique [J]. J. Geochem. Explor., 1974, 14(1-3): 101-118.
- [46] 费锡铨. 电提取离子法在几个矿区的试验结果 [J]. 物探与化探, 1984, 8(3): 162-165.
- Fei X Q. The result of experiment with method of partial metal extraction in several mining areas [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1984, 8(3): 162-165.
- [47] 罗先熔, 杨晓. 地电化学测量找寻隐伏矿的研究及找矿预测地质与勘探 [J]. 地质与勘探, 1989, 25(12): 43-51.
- Luo X R, Yang X. Geoelectrochemical survey to find hidden ore research and prospecting prediction geology and prospecting [J]. Geology and Exploration, 1989, 25(12): 43-51.
- [48] 罗先熔, 王桂琴, 杜建波, 等. 铈矿地电化学异常特征、成晕机制及找矿预测 [J]. 地质与勘探, 2002, 38(2): 59-62.
- Luo X R, Wang G Q, Du J B, et al. The geoelectrochemical anomaly feature mechanism and finded ore extrapolate for stibium deposit [J]. Geology and Exploration, 2002, 38(2): 59-62.
- [49] 康明, 罗先熔. 地电化学方法的改进及应用效果 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 63-66.
- Kang M, Luo X R. Improvement and applied results of geoelectrical chemistry methods [J]. Geology and Exploration, 2003, 39(5): 63-66.
- [50] 康明, 岑况, 罗先熔. 低电压偶极子供电方式下的“偶极 CHIM”应用效果 [J]. 地质与勘探, 2006, 42(4): 81-85.
- Kang M, Cen K, Luo X R. Application of "dipole chim" electrified by low voltage dipole [J]. Geology and Exploration, 2006, 42(4): 81-85.
- [51] 孙彬彬, 刘占元, 周国华. 固体载体型元素提取器研制 [J]. 物探与化探, 2011, 35(3): 375-378.
- Sun B B, Liu Z Y, Zhou G H. The development of the solid carrier elements extractor [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(3): 375-378.
- [52] 孙彬彬, 刘占元, 周国华. 地电化学方法技术研究现状及发展趋势 [J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 16-21.
- Sun B B, Liu Z Y, Zhou G H. Research status and development trends for geoelectrochemical methods [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 16-21.
- [53] Wang X Q. Leaching of mobile form metals in overburden: Development and applications [J]. J. Geochem. Explor., 1998, 61: 39-55.
- [54] 卢荫麻, 白金峰. 元素活动态测量的分析方法 [J]. 物探与化探, 2000, 24(1): 28-33.
- Lu Y X, Bai J F. The analytical technique for determination of active state elements [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(1): 28-33.
- [55] Chao T T. Use of partial dissolution techniques in geochemical exploration [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1984, 20: 101-125.
- [56] 白金峰, 卢荫麻. 活动态测量中滤材的选择及其应用 [J]. 物探与化探, 2001, 25(4): 272-278.
- Bai J F, Lu Y X. Selection and application of filter material in the measurement of active state [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(4): 272-278.
- [57] 白金峰, 卢荫麻, 文雪琴. 金的活动态分析方法及其应用 [J]. 物探与化探, 2006, 30(5): 410-413.
- Bai J F, Lu Y X, Wen X Q. The analytical method for mobile forms of gold and its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(5): 410-413.
- [58] 徐进力, 邢夏, 张鹏鹏, 等. 元素活动态提取条件和分析方法的应用研究 [J]. 地质学报, 2020, 94(3): 982-990.
- Xu J L, Xin X, Zhang P P, et al. Application research on extraction conditions and analysis methods of active state elements [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 982-990.
- [59] 李通国, 朱永新, 李文胜, 等. 深穿透地球化学方法找金——以甘南草甸覆盖区为例 [J]. 地质与勘探, 2005, 41(1): 51-55.
- Li T G, Zhu Y X, Li W S, et al. The geochemical prospecting method of deep penetration in the southern Gansu area [J]. Geology and Exploration, 2005, 41(1): 51-55.
- [60] 陈希泉, 罗先熔, 文雪琴. 内蒙古额尔古纳虎拉林金矿区金属元素活动态测量法找矿试验 [J]. 矿产与地质, 2006, 20(4-5): 475-478.
- Chen X Q, Luo X R, Wen X Q. Experiment of applying active phase metal elements for ore prospecting in Hulalin gold ore field of [J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(4-5): 475-478.
- [61] Wang M Q, Wu H, Liao Y, et al. Pilot study of partial extraction geochemistry for base metal exploration in a thick loess-covered region [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 148: 231-240.
- [62] 王光辉, 尹金双. 铀元素活动态技术在寻找砂岩型铀矿中的应用 [J]. 物探与化探, 2000, 24(5): 358-362.
- Wang G H, Yin J S. The application of mobile-state uranium technique to the prospecting for sandstone type uranium deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(5): 358-362.
- [63] 叶庆森. 元素活动态测量法及其在铀矿勘查中的应用前景 [J]. 铀矿地质, 2001, 17(5): 289-294.
- Ye Q S. Determination of mobile forms of elements in overburden and its application prospect in uranium exploration [J]. Uranium Geology, 2001, 17(5): 289-294.
- [64] 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): 1008-1012.
- Ye Q S, Yang S H, Yang J X. Application of the method of determination of element mobile forms in exploration for sandstone-type u-

ranium deposits in the Ordos basin, China[J].Geological Bulletin of China,2005,24(10-11):1008-1012.

[65] 叶庆森,唐智源,肖噪,等. 活动态 U、MO 测量在 SHTL 地区砂岩型铀矿勘查中的应用[J].世界核地质科学,2006,23(2):114-117.

Ye Q S,Tang Z Y,Xiao S, et al.Application of determining U, Mo in mobile forms to exploration for sandstone-type uranium deposits, SHTL area, China[J].World Nuclear Geoscience,2006,23(2):114-117.

[66] 王学求,程志中,迟清华,等. 吐哈盆地砂岩性铀矿战略性地球化学调查与评价[J].地质与勘探,2002,3(10):148-157.

Wang X Q,Cheng Z Z,Chi Q H,et al.Geochemical exploration for sandstone-type uranium deposits in the Turpan-Hami basin[J].Geology and Exploration,2002,3(10):148-157.

[67] 张卫民.元素活动态测量技术在勘查层间氧化带砂岩型铀矿中的应用——以新疆准格尔盆地北部顶山地区为例[J].地质与勘探,2002,38(6):59-62.

Zhang W M.Technology in the oxidation zone sandstone-type uranium exploration between the layers of the element mobile:Xinjiang Jungar Basin, the northern top of the mountain area as an example [J].Geology and Exploration,2002,38(6):59-62.

[68] 葛祥坤,尹金双,范光,等.分量化探法在铀资源勘查中的应用[J].铀矿地质,2013,29(1):47-51.

Ge X K, Yin J S, Fan G, et al.Application of partial content geochemical survey method in uranium exploration[J].Uranium Geology,2013,29(1):47-51.

Epigenetic anomaly in soil or regolith and deep-penetrating geochemistry

ZHAO Yang,WANG Ming-qi,Zhang He

(School of Earth Sciences and Resources,China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083,China)

Abstract: Syngeneic and epigenetic components in soil or regolith were discussed from definition. Epigenetic anomalies were classified as lateral and top anomalies,and top epigenetic anomalies are the base for deep penetration technology design. The principle of deep penetrating geochemical exploration technology is to extract the epigenetic components related to deep mineralization without destroying or less destroying the soil matrix (syngeneic components). The authors use a case study to illustrate what the epigenetic anomalies are and why conventional geochemical exploration (total) cannot be used for mineral exploration in overburden areas. From the perspective of extracting epigenetic anomalies in soil, the history, updates and problems of various deep penetration technologies are analyzed.

Key words: soil; syngeneic component; epigenetic component; top epigenetic anomalies; deep-penetrating geochemistry

(本文编辑:蒋实)