

深穿透气体地球化学勘查技术在隐伏矿找矿中的应用进展

沙培哲

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年8月10日; 发布日期: 2026年8月18日

摘 要

气体地球化学测量作为深穿透地球化学探测的重要手段,在隐伏矿产资源勘查中发挥着日益关键的作用。本文系统梳理了气体地球化学测量技术的基本概念、工作原理及分类,重点论述了烃类气体、Hg气、Rn气及土壤热释CO₂等测量技术在深部找矿中的最新应用进展。结合国内外研究现状与实际勘查案例,剖析了该技术在不同地质背景下的应用效果与局限性,并深入探讨了当前地气测量及深穿透机制研究中面临的主要挑战。最后,对纳米级金属微粒探测及深穿透地球化学机理的未来研究方向进行了展望。本文旨在为深部矿产资源的高效勘探提供理论参考与科学依据。

关键词

气体地球化学, 深穿透地球化学, 隐伏矿勘查, 地气测量, 找矿预测

Advances in the Application of Deep-Penetrating Gas Geochemical Exploration Technology in Concealed Mineral Prospecting

Peizhe Sha

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: July 6, 2026; accepted: August 10, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

As a crucial method within deep-penetrating geochemical exploration, gas geochemical surveys play an increasingly vital role in the prospecting of concealed mineral resources. This paper

systematically reviews the fundamental concepts, working principles, and classifications of gas geochemical survey technologies. It highlights recent advancements in the application of hydrocarbon gases, mercury (Hg) vapor, radon (Rn), and soil thermally released CO₂ in deep mineral exploration. By analyzing current domestic and international research alongside practical exploration cases, this study evaluates the application efficacy and limitations of these technologies across diverse geological backgrounds. Furthermore, it discusses the primary challenges currently faced in geogas measurement and the study of deep-penetration mechanisms. Finally, the paper prospects future research directions, particularly regarding nanoscale metal particle detection and the mechanisms of deep-penetrating geochemistry. This review aims to provide theoretical references and scientific support for the efficient exploration of deep mineral resources.

Keywords

Gas Geochemistry, Deep-Penetrating Geochemistry, Concealed Mineral Exploration, Geogas Survey, Prospecting Prediction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国工业化与现代化的持续推进，对关键矿产资源的需求长期保持高位。然而，经过长期的开采，我国浅部及地表易识别的矿产资源日益枯竭，矿产勘查工作已全面迈入“攻深找盲”的新阶段[1]。研究表明，地下深部空间蕴藏着巨大的资源潜力，若我国在固体矿产勘探方面能深入至 2000 米，已探明资源量有望实现倍增[2]。在此背景下，传统的地球化学勘查方法在应对厚覆盖区和深部隐伏矿时面临极大局限，迫切需要推进多维度、大深度的深穿透探测技术体系的发展。

气体地球化学找矿是通过系统测量大气或土壤中的气体成分特征，发现异常进行找矿。这种方法基于地下矿产资源与地表气体成分之间的相关性，通过测量和分析大气及土壤中的气体成分，可以推断地下矿产资源的存在和分布。由于气体穿透力强、扩散迅速，反应深度大，人们一直寄希望于用它来找深部盲矿和隐伏矿。特别是在厚层覆盖区，其它方法受到限制时，气体地球化学方法就更被重视[3]。随着科学技术的不断进步，气体地球化学测量技术在现代找矿中的作用日益凸显，它不仅能够提供地下矿产资源的直接信息，还能辅助其他地球物理和地质方法，提高找矿的效率和准确性。

本研究旨在探讨气体地球化学测量技术的基本概念、原理、方法及其在现代找矿中的应用，分析技术进展，并提出未来研究方向。研究内容包括气体地球化学测量技术的定义、原理、主要类型、新进展、应用案例分析、面临的挑战与解决方案，以及技术的未来发展。

2. 气体地球化学测量技术概述

2.1. 技术定义与应用领域

地球化学勘探中，以大气与地表土壤中的气体作为采样来源的技术被称为气体地球化学探测。根据气体的化学特性，该探测方法可以分为三个主要类别：放射性气体、有机气体和无机气体的地球化学探测。无机气体涵盖了土壤中的 SO₂、O₂、H₂S、CO₂、CO、Hg 气以及地气等。有机气体主要指的是烷烃和烯烃类气体。而放射性气体则包括 Rn、 γ 、 α 以及 ²¹⁰Po 等[4]。

这些探测手段基本上都是在野外直接进行的，它们具备强大的穿透能力、较长的迁移距离，并且操作简便、检测迅速[4]。在矿产资源勘探领域，该技术主要用于在被覆盖区域追踪断层构造，并与其他技

术相结合,以评估这些断层构造的矿化潜力,进而探索隐藏的矿体[5]。在实际工作中,既可以运用单一的探测技术,也可以实施多种技术的联合探测,也就是所谓的综合气体勘查方法。相比于单一技术的应用,多技术联合探测能提供更加丰富的信息,并且能够提高探测结果的准确性和可信度。

2.2. 技术原理

Kristiansson 和 Malmgivist(1982)发现,Rn 原子是通过微气泡气体流持续不断地呈加速向上运动而被带到地表。从而认为通过矿体的微气泡流能将矿体中微量组分带到地表即地气流迁移模型[6]。

关于深部气体及成矿物质的垂向迁移机制,目前主要围绕“驱动力”与“运移通道”两个核心要素展开。在驱动力方面,学术界系统提出了多种理论假说,主要包括:

(1) 气压泵与地震泵假说:该假说认为地壳应力变化及地震活动产生的脉冲式压力差是气体快速释放的驱动力,其支持证据主要来自活动断裂带及地震前后的气体成分突变现象;然而,反对意见指出该假说难以完全解释非构造活跃区及稳定地块中持续、平稳的气体逸散现象。

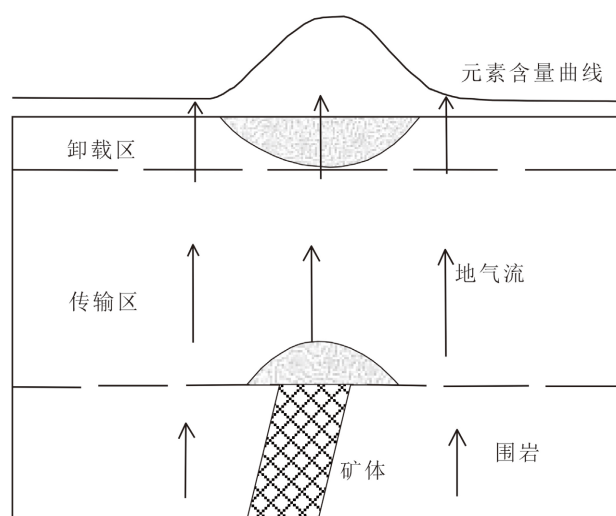


Figure 1. Anomaly model of geogas flow migration [7]

图 1. 地气流迁移异常模型[7]

(2) 地温梯度与热流体驱动:该假说强调深部热源及地壳正常的温度梯度会导致气体热膨胀,进而产生向上的浮力。其支持证据在于地热田及近代火山活跃区上方显著的气体异常脱气带;但针对该理论的质疑在于,当流体上升至浅部浅温地层时,其热驱动力会迅速衰减,难以维持长距离的穿透。

(3) 微气泡浮力运移机制(地气流模型):这是目前解释深穿透地球化学机制最为广泛接受的假说之一[6][7]。该假说认为深部地下水或热液在沿断裂上升时,因压力骤降会出溶形成大量微气泡(通常以 Ar、甲烷、N₂ 等惰性或还原性气体为载体)。这些微气泡在浮力作用下沿微裂隙上升,并在气液界面的表面张力作用下高效捕获深部的纳米级金属微粒(如 Au、Cu、Zn 等矿化物质)形成气溶胶,最终源源不断地运移至地表(见图 1)。物理模拟与高分辨电镜对纳米级微粒的原位表征为该理论提供了坚实的证据支撑。

在运移通道方面,除了宏观尺度的断裂带和节理面,岩石内部广泛连通的纳米级-微米级孔隙与微裂隙网络构成了微气泡克服毛细管阻力并持续上升的必要通道。综合来看,未来的研究最需要通过高温高压反应釜模拟实验及原位同位素示踪技术,定量阐明复杂流体中微气泡的成核与脱气机制,以实现深穿透科学从定性假说向定量模型的关键突破。

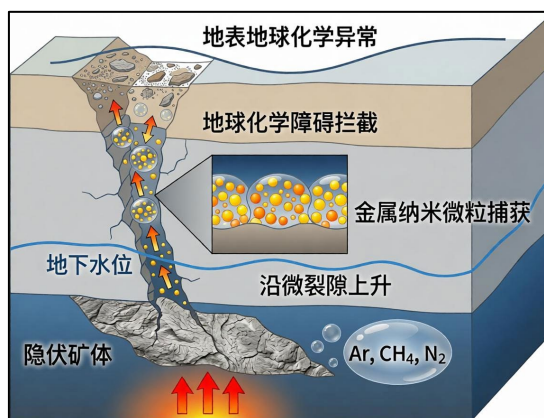


Figure 2. Conceptual model of geogas micro-bubble migration and metal nanoparticle capture mechanism

图 2. 地气微气泡运移机制及金属纳米微粒捕获概念图

在地气迁移模型中,当气流上升穿过矿体时,会携带矿化元素及其相关的活动态成分(如离子、胶体、超细颗粒以及纳米级颗粒)至地表。在地表,这些携带的金属元素会遇到地球化学障碍物(包括可溶性盐类、粘土矿物、氧化物、有机物质和胶体等),导致金属元素沉积,形成地表的地球化学异常(见图 2)。这些地表异常现象通常对应于矿体顶部的位置[7]。

关于地气流的特征与成因,现有研究表明其气体成分主要包括 Ar、甲烷以及少量的其他烃类气体和 CO;除了深部成矿流体外,其来源还可能与大气成分、当地土壤释放、矿体风化产物以及地幔排气有关。在地气流的形成与迁移机制方面,目前学术界提出了气压泵、冬季呼气作用、地震泵以及地气流迁移等多种动力学假说。

2.3. 工作方法

2.3.1. 采样方法

从采集技术的角度来看,气体检测可以被划分为主动采样和被动采样两种方式。主动采样依赖于人为操作抽取气体样本(例如土壤气体),这种方式允许控制采集的气体体积,是广泛采用的一种技术。然而,由于土壤中气体的浓度通常较低,直接采样和分析存在挑战,因此通常需要采用富集技术,例如使用金箔管来富集汞蒸气。这种方法的主要缺点是容易受到外部因素(如气候、植被、覆盖层特性等)的影响,导致测量结果的一致性较差[8]。

被动采样则涉及到使用特定的设备让气体与收集剂长时间接触,随后通过特定的技术(如加热释放气体)来测量捕获的气体总量。被动采样的不足之处在于无法控制采集的气体体积、容易受到污染、需要进行两次野外作业,并且回收率不能得到保证[8]。

实际上,自然界中广泛分布着天然的气体吸附介质(如土壤中的多种粘土矿物和有机物质等),它们都能有效地捕集气体。因此,被动式气体测量可以通过收集这些天然吸附剂(如土壤),并分析其吸附的气体来完成。这种方法不仅简化了采样过程,而且允许进行重复采样和分析,显著提高了结果的可重复性,是当前广泛使用的一种技术[8]。

2.3.2. 分析方法

地球化学气体样本的分析工作需要依赖于专业的、高精确度的设备,而当前常用的分析工具与方法,包括标准的测量指标,详细列于表 1 中。

Table 1. Common measurement methods for gas geochemical indicators [8]
表 1. 常用的气体地球化学指标测量手段[8]

指标	仪器	常用方法
Hg	原子吸收测汞仪	土壤热解或金丝管预富集
Rn	测氡仪	主动法现场测定
CO ₂	CO ₂ 分析仪	主动法现场测定或土壤热解
碳氢化合物	GC-MS 质谱仪	土壤热解

2.4. 气体异常特点

气体地球化学异常因其独特属性而具有以下特征：

- (1) 强大的穿透力。由于地下深处的压力和温度作用，各种气体能够在覆盖的岩石和松散物质中流动和扩散，这种能力非常强大。例如，汞、氡和烃类气体能够穿透数百米甚至数千米深的覆盖层到达地表。这种出色的渗透和扩散能力构成了利用气体测量探测深部矿产资源的物理基础[8]。
- (2) 气体浓度稀薄，异常值低。例如，土壤中气体汞的强烈异常峰值可能仅为 $n \times 10^{-9} \text{ g/m}^3$ 。其他一些气体，如氧气和二氧化碳，异常值非常小，有时仅比正常值高出 1 到 2 倍。这就要求气体测量设备必须具备高灵敏度或精确度，并且在操作过程中必须采取严格的防污染措施[8]。
- (3) 定位能力。由于气体主要沿垂直方向迁移，气体异常的水平位移通常较小，这有助于确定深部矿体的大致空间位置[8]。

2.5. 主要类型与特点

- (1) 在无机组分的气体探测技术中，土壤中的 SO₂、O₂、H₂S、CO₂、CO、Hg 气等的测量，尤其是土壤中汞的定量分析，已发展成为一套成熟的气体地球化学勘探手段，其应用范围广泛，并且在矿产勘探中成效显著[9]-[18]。地气探测技术最初是由瑞典科研人员[6] [19]提出的一种用于探测金属矿产的方法，该技术在 20 世纪 80 年代末期被引入中国。童纯菡等人自 1990 年起便着手进行相关领域的实验研究，历经数十年的发展，该领域已取得了显著的进展[20]。由于采用的富集介质和方法技术的不同，衍生出了多样的技术手段，例如气溶胶探测[21] [22]、纳米级物质分析[23] [24]以及地球气体微量元素测定[25] [26]等，这些都属于地气探测的范畴。地气探测的有效性已经得到了验证[20] [23]-[28]，并且在覆盖区域的隐伏矿藏勘探中实现了重要的发现[21] [22] [24]。
 - (2) 有机气体探测通常包括现场气体抽取和酸性解吸烃类两种技术路径，而目前更普遍采用的是酸性解吸烃类气体的探测手段。在有机气体中，主要是烷烃类，其次是烯烃类。采样对象可以是土壤或岩石(包括矿坑和钻孔)。自 1997 年起，李生郁和徐丰孚便着手进行轻烃及硫化物气体探测以寻找多金属隐伏矿藏的实验。经过多年的探索，有机气体探测已成为在覆盖区域勘探矿产资源的有效技术手段[29]-[31]。并且已经获得了实际的地质勘探成果[32]-[34]。
 - (3) 包含 ²¹⁰Po、 γ 、 α 和 Rn 在内的放射性气体均为铀(U)的衰变产物。放射性气体探测不仅用于探测放射性矿藏，在探测覆盖区域的多金属矿床方面也证实为一种有效的技术手段[6] [35]-[37]。
- 实践表明，综合气体探测技术，例如氡与汞的联合测定方法，能够相互补充优势，从而在覆盖区的地质勘探中取得更佳的找矿效果[11] [16] [17] [29]。
- (4) 中国地质调查局发展研究中心的王强等人(2024)认为气体地球化学测量技术可以根据测试对象细分为两个主要类别：① 传统气体地球化学勘探，其探测目标是气体成分；② 地气探测技术，其探测对象是气体中的纳米级金属成分。本文聚焦于覆盖区和深层隐蔽矿床的传统气体地球化学勘探，特别是

含硫气体异常在硫化物隐蔽矿勘探中的应用进展[38]。

3. 气体地球化学测量技术的最新进展

3.1. 烃类组分测量

最初, 烃类成分分析主要用于油气藏的勘探, 然而在地质学家的实际研究和工作中, 发现许多金属矿床及成矿流体中普遍含有有机物和烃类成分。随着科技的发展, 通过先进的分析测试技术, 人们从微观层面对有机物在金属成矿中的作用有了更深入的理解。自 90 年代起, 陈远荣教授等人的研究发现特定的烃类异常与金属矿床存在紧密联系, 这表明有机界与无机界之间可能存在某种联系, 因此开始尝试将烃气测量技术应用于金属矿床的勘探, 并取得了一定的成果。众多研究指出, 有机物在金属成矿中扮演着重要角色, 大多数富含金属成矿物质的矿源层的形成都涉及到有机物的参与, 例如层控矿床、改造矿床、沉积变质混合岩型矿床、沉积岩浆气液叠加型矿床、热水淋滤型矿床、海底喷流沉积型矿床以及与地壳源有关的重熔岩浆热液型矿床等, 它们的形成都与有机物有直接或间接的成因联系。有机络合物是金属元素的重要载体之一, 从矿质的初始富集到活化迁移、富集成矿, 直至矿体形成后的变质改造, 整个成矿过程中, 烃类气体都是一种重要的伴生气体组分。烃类气体因其低沸点、小分子直径、强挥发性、能穿越巨厚覆盖层、长距离迁移以及反映更大深度等特点而备受关注[30][32][39]-[41]。在烃类成分分析领域, 涉及的组分包括甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、乙烯、丙烯等一系列物质。这些组分共享一些特性, 比如高蒸气压、低沸点、强挥发性以及长距离迁移能力, 但也存在差异, 比如分子的有效直径不同, 形成机制也有所区别(例如甲烷既可以通过生物作用下的细菌活动产生, 也可以由有机物质在热催化裂解过程中形成, 而其他烃类组分主要来源于有机物质的热催化裂解)。这些差异导致它们在空间分布上往往表现出分带现象。烃类组分的群体特征和成因上的独特性, 使得它们在探测深部隐伏矿床方面具有其他传统地球化学方法难以比拟的优势[42]。

例如, 广西大厂矿区是全球最丰富的锡多金属矿区之一, 但随着持续的开采, 矿区内的有色金属储量正在逐渐减少, 迫切需要寻找更深层的隐伏矿体。通过对现有矿体的典型剖面进行烃类组分分析, 发现烃类组分与该区域矿床的形成有着密切的联系。通过构建烃类组分异常模型和归纳找矿标志, 对大厂矿区西矿带的高峰-铜坑矿区深部及其东部周边进行了勘探预测。研究结果显示, 铜坑矿区新发现的 94 号铜锌矿体与烃类异常相吻合, 并指出在大厂西矿带东侧大约 800 至 1200 米范围内可能存在一个新的隐伏矿化带, 这表明该矿区深层仍具有很大的勘探潜力。再如, 在辽宁本溪瓦家堡铅锌矿区, 通过烃气测量技术进行勘探预测后, 推测该区东部 NE 向构造发育区的烃类异常与深部成矿流体有关, 显示出该区域具有较大的勘探潜力。后续的钻探工程验证了这一点, 成功发现了一个新的中型铅锌矿床[42]。

3.2. 汞气测量

在气体探测领域, Hg 气探测的研究起步较早且较为成熟, 已成为探测深层及隐蔽矿床的有效工具之一。由于 Hg 气的渗透力极强, 能够穿越厚重的覆盖层(例如冰层、冻土层等), 并通过地表深处的构造裂缝向地表扩散, 使得 Hg 不仅能够矿床周围及其上方的土壤中富集, 还能逸散到大气中。这些特性使得 Hg 成为一种理想的远程勘探指示元素[43][44]。当前应用最广泛的是土壤吸附汞探测技术, 这项技术起源于 20 世纪 80 年代初, 由桂林矿产地质研究院和廊坊物化探所等机构共同研发。与早期直接在野外采集土壤中 Hg 气的方法相比, 土壤吸附汞探测技术通过将野外采集的土壤样本带回实验室进行处理, 以捕获土壤中吸附的汞。这种方法有效避免了现场直接从土壤中抽取 Hg 气时可能遇到的多种干扰, 从而提升了测量的准确性。随着技术的不断进步, 近年来, 该技术已在国内得到广泛推广, 不仅在金属矿床勘探中表现出色, 也在油气勘探领域取得了积极成果。然而, 该技术也存在局限性, 如指标较为单一、

受多种因素干扰、真假异常难以区分，因此在矿产勘查实践中，常常与其他地球化学勘探方法结合使用，以提高勘探的准确性和效率[42]。

3.3. 氦气测量

近年来，氦气探测成为了备受关注的气体探测技术之一。作为自然界放射性元素铀衰变系列中的一个气态放射性同位素，氦气在地壳中的存在和分布与放射性气体的释放密切相关。当放射性元素以气态形式从岩石或矿物中释放出来时，部分气体会进入岩石的孔隙、裂缝以及土壤中，另一部分则通过扩散作用进入水体或溶解在各类有机溶剂里。经过长时间的积累，这些气体形成了放射性元素的气态晕圈，为放射性矿物的勘探提供了理论依据[45]。氦气探测技术主要应用于油气和铀矿床的勘探，同时，通过探测金矿体中伴随的铀、镭衰变产生的氦气，也可用于金矿的寻找。目前，由于氦气探测对样本采集的环境条件有较高要求，且对检测设备的精确度有严格的标准，这项技术仍然处于实验和研究的发展阶段[42]。

3.4. 土壤热释 CO₂

土壤释放 CO₂ 勘探技术是一种被广泛看好的新兴方法。众多研究证实，在矿床形成过程中，CO₂ 扮演着关键角色，它不仅作为矿物元素的载体，还充当某些矿物的溶解和沉积过程中的催化剂。异常的形成是因为在矿化作用中释放的 CO₂ 通过地质裂缝上浮至地表，部分被土壤捕获，部分在水的参与下与矿体上方的金属离子结合生成碳酸盐。这些土壤吸附的 CO₂ 以及碳酸盐和重碳酸盐在受热时能够释放 CO₂，在矿体上方形成异常区域。尽管土壤释放 CO₂ 勘探技术在部分地区的试验中显示出积极效果，但由于 CO₂ 来源的复杂性和异常成因的不确定性，该技术的广泛应用仍面临挑战[42]。

3.5. 主流气体地球化学探测技术对比与评价

为了更加系统性地评估不同气体测量技术在复杂覆盖区隐伏矿勘查中的适用性及优势，表 2 从探测深度、分辨率、主要干扰因素、适用地球化学环境及成本效益等多个关键维度，对烃类、Hg、Rn、CO₂ 等四项主流探测技术进行了系统的横向对比。

Table 2. Comprehensive comparison of mainstream gas geochemical exploration technologies
表 2. 主流气体地球化学探测技术综合对比

探测技术	探测深度	分辨率	主要干扰因素	适用地球化学环境	成本效益	最佳适用场景与技术组合策略
烃类气体	极大 (>1000 m)	中 - 高	生物成气、地表有机质降解、源岩热成熟度	还原环境为主，有机质丰富的含矿地层	中等	沉积型多金属矿床、深部盲矿体定位；建议与热释 CO ₂ 、含硫气体联合应用以剔除假异常
汞气 (Hg)	大(>500 m)	高	气候温度变化、土壤含水量、大气工业污染	氧化/还原条件皆可，构造及热液活跃区尤佳	较高(前处理及仪器要求高)	断裂构造追踪、隐伏热液活动中心精确定位；建议与 Rn 气组合以锁定深部导矿构造网络
氦气 (Rn)	中 - 大	高	浅表层 U/Th 背景值波动、地下水运移、气压剧变	孔隙度大、渗透性较好的第四系覆盖区及断裂带	中等	铀矿专项勘查、多金属伴生放射性元素隐伏矿追踪；与 Hg 组合互补优势
土壤热释 CO ₂	中等	中	背景碳酸盐岩风化、土壤根系微生物呼吸、植被覆盖	强氧化环境及厚层石灰岩/碳酸盐岩区需谨慎使用	低 - 中	深部含碳流体强烈排气区、硫化物隐伏矿；强烈建议结合碳同位素示踪排除表生碳源干扰

在实际的深部勘查找矿实践中,单一气体指标常常受限于地表浅层的复杂环境干扰(如生物成气、有机质降解、第四系含水层遮挡等)而产生大量伪异常。因此,最佳的勘查策略是采用“优势互补的多气体联测”以及“气-固界面微粒协同探测”的技术组合。例如,在断裂构造极为发育的区域,强烈推荐采用Rn气与Hg气组合,能够快速、高效地锁定深部构造格架及热液活动的中心枢纽;而在硫化物型隐伏多金属矿区,则更适宜采用烃类气体、土壤热释CO₂与含硫气体(如SO₂、H₂S)的联合测量策略,这能够最大限度地消除地表碳库带来的背景假异常,大幅提高深部矿床靶区定位的精准度。

4. 气体地球化学数据处理与异常识别关键技术

随着高精度分析测试仪器(如便携式质谱仪、高精度光敏传感器等)在野外现场的广泛应用,气体地球化学数据正呈现出多变量、高维度、强非线性和高背景噪声的典型特征。如何利用现代数据科学手段,从海量复杂的背景数据中精准剥离出微弱的深部矿致异常,已成为显著提升该技术实用性与前沿性的核心问题。

4.1. 背景与异常的精细划分方法

传统统计学方法(如均值加减标准差或中位数法)通常假设地球化学背景数据严格服从正态或对数正态分布。然而,在复杂覆盖区经历多期叠加成矿及表生风化作用后,数据极易呈现偏态分布,导致传统阈值划分失效。近年来,基于分形几何理论的新方法取得了突破性应用,尤其是含量-面积(C-A)分形模型[46]与能谱-面积(S-A)分形滤波技术[47]。这些技术利用元素及气体浓度的空间自相似性与多标度分形特征,在双对数坐标图中通过识别斜率拐点或在频域中设计非线性滤波器,能够客观地将受控于不同地质过程(如深部成矿热液活动与地表风化淋滤系统)的地球化学群体进行分离,在剔除局部高地背景噪声、提取隐伏矿致弱异常方面展现出无可替代的优势[48]。

4.2. 多变量统计与空间数据分析

在“多气体联合测量”体系中,为了深度挖掘不同气体成分间的协同演化规律,因子分析(Factor Analysis, FA)和聚类分析(Cluster Analysis, CA)等降维技术被常态化应用[49]。通过对Hg、Rn、CO₂及多组分烃类气体的协方差矩阵进行分解,能够提取出代表深部专属成矿流体活动的“特征共生因子”。这不仅有效规避了地表浅层生物活动或大气污染引起的单一气体伪异常干扰,更能通过因子得分等值线直观地映射出深部热液活动中心的立体空间分布规律。

4.3. 机器学习与多源信息融合在弱异常提取中的应用

深部成矿流体信息在穿越巨厚覆盖层向地表运移的过程中,必然发生强烈的信号弥散与指数级衰减。为提取这种极其微弱的矿致痕迹,支持向量机(SVM)、随机森林(Random Forest)及深度神经网络等机器学习前沿算法,凭借其卓越的非线性拟合能力与抗噪鲁棒性,在多源地学数据融合提取弱异常方面展现出了极大的潜力[50](流程详见图3)。例如,在西班牙南部等复杂地质演化区,针对隐伏金矿床的找矿预测,研究人员高效利用机器学习模型,将区域地球化学勘查数据与断裂构造、岩性等多源空间信息进行大维度的深度融合[51]。而在国内复杂覆盖区,研究人员通过建立深度学习弱异常提取模型,将微弱的深穿透地球化学信号与高精度重力、航空磁测等多源数据深度互补[50]。通过依托已知矿点或典型剖面训练出多特征组合分类器,该方法有效克服了复杂表生背景条件下的数据非线性与噪声干扰难题,使得未知区域深部盲矿体的定位准确率和靶区预测的科学性实现了质的飞跃。



Figure 3. Flowchart of gas geochemical multi-source data fusion and anomaly recognition based on machine learning
图 3. 基于机器学习的气体地球化学多源数据融合与异常识别流程图

5. 气体地球化学测量技术面临的挑战与展望

5.1. 气体地球化学测量技术面临的挑战

尽管该技术在隐伏矿勘探中展现出巨大潜力，但目前仍有以下关键科学问题亟待解决：(1) 纳米颗粒的表征与活动性：目前对于不同成矿阶段流体中纳米金属颗粒的微观表征及其在岩石中的活动性仍缺乏系统的理论认识。(2) 成矿物质的迁移机制：成矿物质及微粒的深部迁移方式仍需通过高温高压模拟实验进一步证实，特别是不同类型岩石及深部地层中是否存在连通的纳米级通道，目前尚存争议。(3) 气体组分与金属成矿的耦合规律：H₂S、SO₂、CO₂等无机气体异常以及有机质与金属成矿之间的内在成因联系尚不明确，其异常形成与赋存规律需进一步厘清[52]。

5.2. 气体地球化学测量技术的未来展望

5.2.1. 关于地气测量技术

纳米科技作为当下的研究热点和学术前沿，其研究范围覆盖了材料科学、物理学、化学等多个学科，地质学领域亦不例外。纳米粒子因其巨大的表面积比、强大的吸附力和快速的扩散速率，使得纳米级固态物质能够进行远距离的传输。基于此，通过分析矿化区域上方与成矿作用相关的纳米粒子，可以辅助探测隐藏的矿床。在当前，地气测量技术是最为成熟且广泛应用的地球化学勘探方法之一，专门用于检测与纳米微粒相关的信号[42]。

地球气体中纳米级金属的采集技术(Collection of Nanoscale Metals in Earthgas, NAMEG)是一项存在争议但具有潜在发展前景的穿透性地球化学探测手段[25][53]。为了验证地表捕获的纳米颗粒与隐藏矿体之间的成因联系，全球的研究人员通过实地考察、实验室模拟和理论分析等方法进行了长期的研究。童纯

茵等人[54]运用扫描电子显微镜、透射电子显微镜和原子力显微镜对隐伏矿床上方的地气样本进行分析,从而确认地气样本中确实含有纳米级颗粒。王学求[55]提出了一个科学假设,即地气可能以微小气泡的形式携带着超细金属颗粒或纳米级金属颗粒上升到地表。在到达地面后,部分颗粒可能仍然保留在土壤气中,而另一部分则在释放后被土壤中的地球化学障所吸附。Zhou 等人[56]利用物理和数学模型通过计算机模拟验证了来自深层的纳米级颗粒能够附着于微小气泡上,并在地气流的作用下被输送至地表。汪明启等人[57]利用铅同位素追踪技术证实了地气中存在来自深部矿石成分的信号。成都理工大学的童纯茵和周四春所带领的研究团队在地气中纳米物质的迁移机制以及地气异常对隐藏矿体指示性的研究上做出了显著贡献[58]-[60]。曹建劲所领导的中山大学研究小组对地气中纳米颗粒的形成原理及其特性进行了深入探究,涵盖了颗粒的类型、大小、形态、构造、化学组成、浓度以及它们之间的聚合状态等多个方面[61]-[63]。王学求等人[64]和叶荣等人[65]的研究团队在隐伏矿体及其室内模拟迁移实验中,同时在地气和土壤这两种介质里发现了具有晶体结构的纳米级金属颗粒。这些研究成果为精确理解矿区地气中纳米金属颗粒的存在性和来源提供了充分的证据;然而,关于背景区域地气中纳米金属颗粒的分布情况,以及它们与矿区纳米金属颗粒的差异性,目前的研究还相对较少[66]。为了将 NAMEG 技术更有效地应用于覆盖区的矿产勘探,必须进一步辨别矿区和背景区收集到的纳米颗粒。同时,地气测量技术在稳定性和重现性方面仍面临挑战。朱剑等人[67]和王昀颀[68]对地气采集和样品处理技术进行了优化,增加了地气抽取量和捕集剂量,并延长了地气与捕集剂接触的时间,从而提升了捕集效率。

5.2.2. 关于深穿透性地球化学测量技术

勘探技术的成本效益考量。在选择勘探方法时,既要考虑勘探效果,也要考虑成本投入。正如谢学锦院士所强调的,“测量元素的总量是首要考虑的因素,因为这些数据最具有可重复性,并且与从矿产勘探到地质调查再到基础地质研究的目标相吻合。”因此,只有在那些元素总量测量效果不佳的区域,才会考虑使用选择性提取或活性态金属测量技术。同样,由于一些穿透性地球化学勘探技术的成本较高,限制了它们的广泛应用。未来,需要致力于简化采样和分析流程,提升方法技术的稳定性,以实现更高效、经济的覆盖区矿产勘探工作[52]。

深穿透地球化学勘探技术在应对更复杂的覆盖层类型和更大的覆盖厚度的隐伏矿勘探挑战时,其发展的主要限制因素依然是其机理问题,包括异常的来源、元素迁移机制、元素卸载过程以及地表地球化学作用。机理研究需要结合宏观现象和微观证据。目前,宏观层面的异常研究较为充分,而微观层面的证据尚显不足,因此,加强微观层面的观测显得尤为重要。同时,还有许多问题亟待深入研究,例如,尽管有报道称某些方法技术的探测深度已达到千米级别,但成矿及伴生元素如何向地表迁移的问题尚未得到有效解释;在存在地下水的地区,成矿元素如何在与地下水的相互作用中穿过地下水层并迁移至地表,这也是一个值得探讨的问题;此外,鉴于当前严重的空气污染问题,大气中包含多种金属污染物,大气与地表土壤之间的动态交换是否会影响土壤中的活动态金属或地气物质,这也是需要进一步研究的问题;在地气测量中,纳米金属颗粒的来源问题也值得关注,成矿过程中是否能够形成可迁移的纳米物质,这一问题可以通过两个途径来解决:一是通过采集矿石样本,观察其气液包裹体中是否存在纳米金属物质;二是利用高温高压反应釜模拟成矿过程,观察矿物晶体生长过程中是否会产生纳米物质[52]。

各种技术手段在不同矿种和多样地貌环境下的适用性差异。一方面,需要深入分析现有的资料;另一方面,还应基于技术方法的理论根基,从机制层面探究其适用性[52]。

近 5~10 年来,国际地球化学勘查领域(如 Journal of Geochemical Exploration、Ore Geology Reviews 等主流期刊)在深穿透勘查的新技术应用、迁移机制理论以及大型勘查项目实践中取得了前瞻性成果。在分析测试与微观表征方面,国际学者广泛采用高分辨率透射电子显微镜(HR-TEM)与高精度质谱(HR-ICP-

MS)等前沿技术,实现了对地表覆盖物及气溶胶中纳米级成矿微粒的原位观测与超痕量定量分析,为成矿物质以“气-固”复合态形式实现垂向深穿透提供了坚实的微观物理证据[69]。在机制理论探索方面,当前研究依托澳大利亚 UNCOVER 等大型国家级深部找矿战略计划,系统整合了深部流体动力学、隐伏断裂格架与覆盖层地球化学障,提出了适用于巨厚搬运覆盖区的综合地化异常演化模型[69]。此外,随着现代数据科学的爆发式发展,最新国际研究成果强烈表明:将高精度的多源地球化学探测数据与人工智能(AI)、机器学习等先进数据挖掘算法深度融合,已成为有效剥离复杂地表(如第四系覆盖区)背景噪声干扰、实现区域尺度深部盲矿靶区精准圈定的核心发展趋势[50] [70]。

此外,在深穿透地球化学勘查的未来发展中,还应重视以下几个方面:① 探索新的数据分析方法,如机器学习和人工智能算法,以更准确地识别和解释气体地球化学数据中的异常信号;② 加强地质学、地球物理学、化学和计算机科学等领域的跨学科合作,以实现数据的全面理解和应用;③ 深入研究环境因素对气体地球化学测量的影响,以制定有效的数据校正方法。

6. 结论

气体地球化学测量技术作为一种前沿的深穿透勘探工具,在现代深部及隐伏矿床找矿活动中发挥着日益重要的作用。本文系统梳理了烃类、汞气、氦气及热释 CO₂ 等主流气体测量技术的原理与应用进展。研究表明,通过精确分析地表及大气中的微弱气体异常,结合地气纳米微粒探测,能够有效揭示地下深部矿产资源的分布规律。尽管该技术在异常成因机制解释、成矿物质迁移微观证据及抗干扰能力等方面仍面临一定挑战,但随着纳米科技、多学科交叉融合及数据处理算法的不断进步,其勘查精度和适用范围将得到显著提升。气体地球化学勘查技术的持续完善,必将为突破厚覆盖区找矿瓶颈、实现深部资源的高效勘探提供更为坚实的理论与技术支撑。

参考文献

- [1] 许勇, 侯增谦. 深地找矿是保障我国资源安全的重大战略[N]. 中国黄金报, 2024-08-23(001).
- [2] 施俊法, 唐金荣, 周平, 等. 隐伏矿勘查经验与启示——从《信息找矿战略与勘查百例》谈起[J]. 地质通报, 2008(4): 433-450.
- [3] 孙跃, 张振宇, 冯斌, 等. 覆盖区矿产资源地球化学勘查方法技术研究新进展[J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1387-1399.
- [4] 史长义, 王惠艳. 深部矿产资源立体地球化学勘查方法技术体系[J]. 地质学报, 2022, 96(11): 3705-3721.
- [5] Klusman, R. W. (1993) Soil Gas and Related Methods for Natural Resource Exploration. John Wiley & Sons, Chichester.
- [6] Kristiansson, K. and Malmqvist, L. (1982) Evidence for Nondiffusive Transport of 22286 Rn in the Ground and a New Physical Model for the Transport. *Geophysics*, 47, 1444-1452. <https://doi.org/10.1190/1.1441293>
- [7] 王学求. 深穿透地球化学迁移模型[J]. 地质通报, 2005(Z1): 18-22.
- [8] 崔熙琳, 汪明启, 唐金荣. 金属矿气体地球化学测量技术新进展[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 135-139.
- [9] McCarthy, J.H. (1972) Mercury Vapor and Other Volatile Components in the Air as Guides to Ore Deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 1, 143-162. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(72\)90012-x](https://doi.org/10.1016/0375-6742(72)90012-x)
- [10] 伍宗华, 金仰芬, 古平. 汞的勘查地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [11] 陈国梁, 熊先祥, 刘汉彬, 等. 壤中氧测量在找矿中的意义[J]. 铀矿地质, 1996(6): 353-356.
- [12] 曾志方. 应用壤中气汞量测量找金的效果——以湖南青京寨、三德堂金矿为例[J]. 黄金地质, 2001(4): 56-59.
- [13] 王国华, 蒋敬业, 董勇. 利用壤中汞气测量在西天山高寒山区寻找隐伏矿的研究[J]. 物探与化探, 2002(5): 372-375.
- [14] 朴星海, 卿敏, 张景海, 等. 黑龙江金厂金矿床土壤汞气地球化学测量及其找矿标志[J]. 黄金, 2010, 31(12): 20-23.
- [15] 高长亮, 苏道强, 刘鹏磊, 等. 邹平火山岩盆地隐伏岩(矿)体区土壤汞气测量效果探讨[J]. 山东国土资源, 2014,

- 30(8): 67-72.
- [16] 韩伟, 刘华忠, 王成文, 等. 沙泉子铜镍矿壤中汞气和二氧化硫气体地球化学测量[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1077-1081.
 - [17] 张洁, 程志中, 伦知颖, 等. 土壤中 CO₂、SO₂ 和 H₂S 气体测量: 一种适用于覆盖区找矿的化探方法[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 12-17.
 - [18] 万卫, 陈振亚, 程志中, 等. CO₂ 气体测量方法在低山丘陵区隐伏矿勘查的试验研究[J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 70-76.
 - [19] Malmqvist, L. and Kristiansson, K. (1984) Experimental Evidence for an Ascending Microflow of Geogas in the Ground. *Earth and Planetary Science Letters*, **70**, 407-416. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(84\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0012-821x(84)90024-4)
 - [20] 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.
 - [21] 伍宗华, 金仰芬, 古平. 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(4): 259-264.
 - [22] 尹冰川, 伍宗华, 金仰芬. 地气溶胶测量——一种寻找隐伏矿床、研究深部构造地质的新方法、新技术[J]. 地质地球化学, 1997(3): 25-30.
 - [23] 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(8): 18-19.
 - [24] 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(4): 42-45.
 - [25] Wang, X., Cheng, Z., Lu, Y., Xu, L. and Xie, X. (1997) Nanoscale Metals in Earthgas and Mobile Forms of Metals in Overburden in Wide-Spaced Regional Exploration for Giant Deposits in Overburden Terrains. *Journal of Geochemical Exploration*, **58**, 63-72. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(96\)00052-0](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(96)00052-0)
 - [26] Xie, X., Wang, X., Xu, L., Kremenetsky, A.A. and Kheffets, V.K. (1999) Orientation Study of Strategic Deep Penetration Geochemical Methods in the Central Kyzylkum Desert Terrain, Uzbekistan. *Journal of Geochemical Exploration*, **66**, 135-143. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(99\)00024-2](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(99)00024-2)
 - [27] 史长义, 张金华, 刘应汉, 等. 地气测量在内蒙古老羊壕金矿区的某些试验成果[J]. 物探与化探, 1997(4): 247-253.
 - [28] 赵吉海, 欧阳辉. 地气测量在月形铜矿中的应用研究[J]. 西部探矿工程, 2017, 29(5): 161-164.
 - [29] 李生郁, 徐丰孚. 轻烃及硫化物气体测量找寻多金属隐伏矿方法试验[J]. 物探与化探, 1997(2): 127-138.
 - [30] 陈远荣, 贾国相, 徐庆鸿. 气体集成快速定位预测隐伏矿的新技术研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
 - [31] 王永华, 龚敏, 龚鹏, 等. 江西九江城门山铜多金属矿床土壤轻烃找矿试验[J]. 地质通报, 2010, 29(7): 1056-1061.
 - [32] 陈远荣, 邵世才, 徐庆鸿, 等. 马鞍山金矿的有机烃气结合原生晕测量找矿预测[J]. 物探与化探, 2003(6): 465-468.
 - [33] 张苗苗, 陈远荣, 张志伟, 等. 气态烃在铀厂沟金矿找矿中的应用[J]. 中国地质, 2008(4): 738-745.
 - [34] 谢桃园, 陈远荣, 张璟, 等. 烃气测量法在黑龙江乌拉嘎金矿区找矿预测评价中的应用[J]. 地质与勘探, 2010, 46(3): 506-514.
 - [35] 吴少武. 氢射气浓度和汞量测量技术的现状与应用[J]. 地球科学进展, 1989(4): 16-20.
 - [36] 王可伏. 海南岛土外山金矿地质特征及隐伏矿体预测与勘探验证[J]. 大地构造与成矿学, 1992(3): 275-284.
 - [37] 于万里, 张基敏, 罗德传, 等. 氢气测量在崧耳崖金矿的应用效果[J]. 地质与勘探, 1993(5): 50-52.
 - [38] 王强, 程志中, 颜廷杰, 等. 富硫化物隐伏矿地球化学勘查技术: 含硫气体地球化学测量[J]. 地学前缘, 2025, 32(1): 302-321.
 - [39] 陈远荣. 有机烃气新方法寻找有色、贵金属矿床的研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2001.
 - [40] 陈远荣, 戴塔根, 等. 有机烃气法在个旧锡矿松树脚矿田中的应用[J]. 物探与化探, 2001(3): 180-184.
 - [41] 陈远荣, 戴塔根, 庄晓蕊, 等. 烃、汞等气体组分垂向运移的主要控制因素[J]. 中国地质, 2001(8): 28-32.
 - [42] 刘草, 陈远荣, 鲁富兰, 等. 基于深地勘探的化探新方法发展现状分析[J]. 矿产与地质, 2016, 30(3): 446-450.
 - [43] 栾继琛, 赵友方. 壤中吸附相态汞测量方法及其找矿效果[J]. 矿产与地质, 1984(1): 62-71.
 - [44] 贾国相, 黄书俊, 栾继琛. 无机与有机地球化学勘查技术方法研究与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
 - [45] 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(3): 116-121.
 - [46] Cheng, Q.M., Agterberg, F.P. and Ballantyne, S.B. (1994) The Separation of Geochemical Anomalies from Background by Fractal Methods. *Journal of Geochemical Exploration*, **51**, 109-130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2)

- [47] Cheng, Q.M. (1999) Spatial and Scaling Modelling for Geochemical Anomaly Separation. *Journal of Geochemical Exploration*, **65**, 175-194. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(99\)00028-x](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(99)00028-x)
- [48] 成秋明. 非线性成矿预测理论: 多重分形奇异性-广义自相似性-分形谱系模型与方法[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2006, 31(3): 337-348.
- [49] Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett, R.G. (2002) Factor Analysis Applied to Regional Geochemical Data: Problems and Possibilities. *Applied Geochemistry*, **17**, 185-206. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(01\)00066-x](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(01)00066-x)
- [50] Zuo, R.G., Xiong, Y.H., Wang, J. and Carranza, E.J.M. (2019) Deep Learning and Its Application in Geochemical Mapping. *Earth-Science Reviews*, **192**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.023>
- [51] Rodriguez-Galiano, V., Sanchez-Castillo, M., Chica-Olmo, M. and Chica-Rivas, M. (2015) Machine Learning Predictive Models for Mineral Prospectivity: An Evaluation of Neural Networks, Random Forest, Regression Trees and Support Vector Machines. *Ore Geology Reviews*, **71**, 804-818. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.001>
- [52] 韩志轩, 廖建国, 张聿隆, 等. 穿透性地球化学勘查技术综述与展望[J]. 地球科学进展, 2017, 32(8): 828-838.
- [53] Xueqiu, W. (1998) Leaching of Mobile Forms of Metals in Overburden: Development and Application. *Journal of Geochemical Exploration*, **61**, 39-55. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(97\)00039-3](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(97)00039-3)
- [54] 童纯菡, 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: 地球科学), 1998(2): 153-156.
- [55] 王学求. 地球气纳微金属测量的概念、理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [56] Zhou, Z., Tao, S., Xu, F. and Dawson, R. (2003) A Physical-Mathematical Model for the Transport of Heavy Metals and Toxic Matter from Point Sources by Geogas Microbubbles. *Ecological Modelling*, **161**, 139-149. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(02\)00322-8](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(02)00322-8)
- [57] 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(4): 391-399.
- [58] 童纯菡, 李巨初, 葛良全, 等. 地壳内上升气流对物质的迁移及地气测量原理[J]. 矿物岩石, 1997(3): 84-89.
- [59] 杨凤根, 童纯菡. 宣汉气田的地气测量及其机理研究[J]. 地球科学, 2000, 25(1): 103-106.
- [60] 刘斌, 周四春, 葛良全, 等. 湘南千里山-骑田岭矿集区黄沙坪型铅锌矿地气异常特征及找矿意义[J]. 地球学报, 2011, 32(4): 413-418.
- [61] Cao, J., Hu, R., Liu, S. and Xie, G. (2005) Simulation Test on Migration of Geogas-Carrying Gold Nanoparticles in Slope Sediments. In: *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Springer Berlin Heidelberg, 897-900. https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_228
- [62] Cao, J., Hu, R., Liang, Z. and Peng, Z. (2009) TEM Observation of Geogas-Carried Particles from the Changkeng Concealed Gold Deposit, Guangdong Province, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, **101**, 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.09.001>
- [63] Cao, J.J., Hu, X.Y., Jiang, Z.T., Li, H.W. and Zou, X.Z. (2010) Simulation of Adsorption of Gold Nanoparticles Carried by Gas Ascending from the Earth's Interior in Alluvial Cover of the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. *Geofluids*, **10**, 438-446. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00287.x>
- [64] 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.
- [65] 叶荣, 张必敏, 姚文生, 等. 隐伏矿床上方纳米铜颗粒存在形式与成因[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 120-129.
- [66] 刘雪敏, 陈岳龙, 王学求. 深穿透地球化学异常源同位素识别研究: 以新疆金窝子金矿床、内蒙古拜仁达坝-维拉斯托多金属矿床为例[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 1104-1116.
- [67] 朱剑, 周四春, 刘俊, 等. 影响地气测量结果有关因素的讨论[J]. 现代矿业, 2014, 30(1): 62-64, 96.
- [68] 王昀昀. 提高地气测量捕集效率方法综述[J]. 世界有色金属, 2016(13): 179-180.
- [69] Australian Academy of Science. (2012) Searching the Deep Earth: A Vision for Exploration Geoscience in Australia. Australian Academy of Science.
- [70] Grunsky, E.C. and Caritat, P.D. (2019) State-of-the-Art Analysis of Geochemical Data for Mineral Exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **20**, 217-232. <https://doi.org/10.1144/geochem2019-031>