

doi: 10.11720/wtyht.2019.0291

汪明启,叶荣.面向未来资源勘查的应用地球化学——第 28 届 IAGS 会议综述[J].物探与化探,2019,43(4):679-691.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0291>

Wang M Q, Ye R. Applied geochemistry for future resource exploration—Summary of the 28<sup>th</sup> IAGS conference[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 679-691. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0291>

# 面向未来资源勘查的应用地球化学 ——第 28 届 IAGS 会议综述

汪明启, 叶荣

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘 要:** 作为“未来资源大会 2018”(RFG 2018)合作方,国际应用地球化学家协会(AAG)于 2018 年 6 月 16 日至 6 月 22 日在加拿大温哥华会议中心组织了第 28 届应用地球化学学术会议(IAGS 2018)。未来资源大会 2018 共设能源、矿产、水和地球四大主题。应用地球化学会议(IAGS 2018)在矿产和水两个主题中设 10 个报告专题,宣读论文 113 篇,全面交流了 3 年来国际应用地球化学进展。

**关键词:** 应用地球化学;矿产;水;资源勘查

**中图分类号:** P632

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2019)04-0679-13

## 0 引言

2018 年 6 月 16 日至 6 月 22 日,由国际地质科学联合会、加拿大地球科学联合会、加拿大采矿冶金和石油研究所、加拿大地质协会、加拿大矿物学协会共同举办的“未来资源大会 2018”(the resources for future generations conference, RFG 2018)在加拿大温哥华会议中心召开。会议包括 6 大主题:教育与知识、能源、矿产、资源与社会、地球、水。

作为会议协办方和第 28 届应用地球化学学术会议(IAGS 2018)组织者,国际应用地球化学家协会(AAG)组织了一系列学术交流活动,包括 Gala 晚会和授奖仪式,其中 2016 年国际应用地球化学突出成就奖金奖授予芬兰人 Reijo Salminen,2017 年金奖授予 Stu Averil,银奖授予澳大利亚人 David Cohen。在会议交流部分,应用地球化学会议在矿产和水两个主题中共设 10 个报告专题,宣读论文 113 篇(表 1)。

从表 1 可看出,从 2015 年第 27 届应用地球化学会议后的 3 年内,虽然近年来国内由于矿产勘查

明显萎缩,勘查地球化学方法研究受到的冲击最大,科研活动几乎停滞,但国际应用地球化学研究依然活跃,主力军在大学、科研机构 and 矿业公司,主战场仍然在金属矿产勘查方向,内容涉及覆盖区地球化学勘查、同位素应用、生物地球化学、水化学、分析技术和大数据等方面。笔者就本次会议各专题宣读论文情况做简单介绍,供国内同行参考。

## 1 同位素应用

现代分析技术进步大大降低了同位素分析成本,使得同位素越来越多的被用来解决矿产勘查和环境问题。同位素用于解决勘查地球化学问题作为应用地球化学会议专题尚属首次,标志着同位素地球化学勘查技术正在走向实际应用。宣读的 10 篇论文中涉及的同位素主要为碳、氧(6 篇)和锌(2 篇),其他同位素如铜、硫各 1 篇。

空腔增强激光吸收光谱法技术进步使得快速测定碳、氧同位素成为可能。碳、氧同位素被用于描述卡林型金矿、矽卡岩矿床、层控型(芒特艾萨铜矿)和浅成热液 Au-Ag 矿等热液系统的蚀变晕和成矿

收稿日期: 2019-05-27

作者简介: 汪明启(1958-),男,博士,教授,长期从事勘察地球化学方法研究工作。

表 1 第 28 届国际应用地球化学学术会议宣读论文数

Table 1 Number of papers presented at the 28<sup>th</sup> International Conference on Applied Geochemistry

RFG2018 主题	第 28 届 IAGS 专题	宣读论文数
矿产	稳定和放射性同位素体系:在勘探和环境中的应用	10
	勘查案例研究——创新的概念,方法和实践	14
	走向大数据:数据分析在地球化学中的应用	14
	巨型矿床指纹——发现矿体的矿物、光谱和地球化学矢量	13
	从微观到宏观——生物地球化学:勘探、加工、修复和环境	11
	覆盖区勘查——手段、技术和战略	17
	极端环境下矿产勘查	6
	探测金属和非金属矿产的碳氢化合物	5
	寻找矿产的分析技术:由实验室—野外现场分析	9
水	水化学:环境与勘查	14

温度变化(Gregory Dipple 等;Shaun Barker 等;Samuel Cantor 等;Christopher Herron,等;Benjamin Andrew 等;John Mering 等报告)。研究发现,在碳酸盐交代矿床和矽卡岩型矿床周围存在大范围<sup>18</sup>O 晕,特别是美国内华达州卡林型金矿<sup>18</sup>O 晕大于 3.5 km,而探途元素蚀变晕只有 2 km,反映矿化蚀变带的<sup>18</sup>O 强异常宽 1 km,深度 0.6 km。这些同位素特征可用于判断热液通道和预测找矿靶区。

Zn 同位素在矿产勘查中应用刚刚起步,澳大利亚 Spinks 等对 Zn 同位素在表生介质地球化学勘查中的应用理论依据和潜力进行了评述;Spinks 和 Reid 研究小组通过分析 Prairie and Wolf 铅锌矿床附近草本植物三齿稈中的 Zn、Pb 同位素,发现背景区和异常区样品 Zn、Pb 同位素组成存在较大差异,矿化区三齿稈中更富集相对轻的 Zn 同位素。

硫化物矿床氧化过程中,溶解相中更富集重铜<sup>65</sup>Cu,而残留物中更富集轻铜<sup>63</sup>Cu。因此,如果铜从硫化物矿床迁移到地表,表生介质中则出现<sup>65</sup>Cu 正异常。加拿大 Amina 等选择 2 个斑岩铜矿和 1 个 VMS 矿床周围背景区和异常区的 B 层冰碛物土壤样品,分别采用 4 酸消解(全量)和 0.3N HNO<sub>3</sub>(部分)提取,由多接收等离子质谱测定铜同位素,结果显示全量和部分提取铜同位素变化范围没有差别,<sup>65</sup>Cu 在 0 ~ -1 ‰之间变化,只是部分提取更富集<sup>65</sup>Cu,可能在提取过程中同位素发生了分馏。铜同位素特征没有提供 Cu 从矿化体向地表迁移的证据。

Zhang 等通过分析美国密执根盆地多孔水和含硫酸盐矿物<sup>34</sup>S,评价了该盆地作为布鲁斯核电站核废料储藏地的可行性。

2 勘查案例:奇妙的概念、方法及应用

本专题主要展示矿产勘查中应用创新概念、模

式和方法所取得的成功经验及在降低风险和成本方面做出的努力。共安排 14 个报告,其中 8 个与勘查地球化学有关,其他 6 个为矿床、遥感和管理方面的内容。

英美资源集团 John C Barr 和 FPX Nickel 公司 Peter Bradshaw 解密了航空地球化学调查方法。航空化探起源于 20 世纪 70 年代,是一种安装在飞机(固定翼或旋转翼)上采集空气悬浮颗粒的系统,测量时飞机飞行高度 100 m,飞行速度为 60~80 km/h。该系统按几秒间隔收集足够质量的颗粒样品。研究表明,大于 10 μm 的颗粒被热力带入空中,这些颗粒在大气中的停留时间很短,在 100 m 左右的高度其迁移距离有限,更靠近它们的来源地。在飞行过程中,同时记录颗粒数、颗粒载荷、进气口温度,当使用固定翼飞机采样时,还需记录飞机的垂直加速度以及飞机下方温度。将收集到的颗粒真空冲击到特制的塑料带上,这种塑料带由三层组成,底层为柔软的聚脂薄膜粘合剂(样品层),中间为带有微孔的稍厚样托,顶部为 Teflon 塑料。采样器放在有机玻璃盒里,以连续通氮气保持洁净。采样后的塑料带送到实验室采用激光烧蚀—电感耦合等离子体发射光谱(LA-ICP-ES)进行多元素分析(最多达 34 个元素)。作者展示了南非和纳米比亚各种矿床试验区的结果。

澳大利亚 Nathan Reid 等开发了一套浅钻实时水文地球化学分析系统。该系统使用各种传感器来获取现场钻井液和地下水的化学数据,目的是提供钻井液的实时分析手段,监控钻探过程,利用 12 个传感器每 30 s 读数一次。目前该系统的金刚石钻探最大测试深度接近 2 500 m。通过获取流体参数实时数据,使得钻探活动更科学,可降低钻井成本并提高地质体(矿床)的勘探进度。

David Heberlein 和 Colin Dunn 尝试用植物分泌

物和雪勘查隐伏矿。在威廉姆斯湖东北 65 km 处的 Woodjam Cu 斑岩矿区,从叶子样品中浸出的蜡在矿化体上方富含 Cu、Mo 和 Zn。而从白云杉树干采集的凝结汁液的分析结果看, Cu、Mo 及其他与下伏矿化有关的几种探途元素在矿化体上方出现异常。在不列颠哥伦比亚省乔治王子城以西 160 km 的 Endako Mo 矿周围,从树木中新渗出的分泌物中 Mo、Re、Bi、U、REE、Th、K、Rb、P、Na、Mn、Cs、Ag 和 Sr 出现明显异常。在 Woodjam,他们还将塑料袋放在树枝和树叶上一天,来收集通过白云杉叶子的气孔蒸发的流体,结果发现矿区附近这些流体中 Cu、Mo、As、Tl 和 S 的浓度显著高于背景部位。同时,4 月份在 Woodjam 矿区,通过测定不同地点、不同高度雪堆中雪的元素含量,发现雪堆中 Br 和 I 含量自下而上降低,表明存在由地面向上的物质迁移。

内蒙古阿荣旗太平沟钼矿区由于地处森林沼泽景观,地形平缓,Mo 等元素出现水成脱节异常,使得大比例尺土壤测量不能有效指示矿化部位,物探 IP 测量由于存在干扰而效果不佳。汪明启等采用土壤金属气体测量方法(MSG)成功确定钼矿化体位置,对该矿床的发现起到了关键作用。

澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的 Nathan Reid 等报告了信息化给地球化学野外调查方式带来的改变,笔和纸等传统的野外工具变成电子设备。他们开发了一套地球化学取样应用软件,可以在 Android 平板电脑和手机上应用。该软件基于开放的 FAIMS 移动平台,满足对水文地球化学、生物地球化学、土壤和岩石样品的采集要求。FAIMS 允许使用内置或外部 GPS 来定位采样点,不仅可以记录数据,还可以记录照片和草图。该软件可以节省大量时间,提高效率。他们团队的 Ryan Noble 等还报告了如何快速进行区域地表地球化学取样和分析工作,在南澳偏远的 Nullarbor 平原区,利用直升机、平板电脑、移动服务器及 FAIMS 平台,7 天时间完成近 4 000 km<sup>2</sup>(4 km 的采样间隔)的土壤和岩石的区域地球化学和矿物填图。现场配备便携式样品制备(粗碎、研磨和压片)和 pXRF、ASD 等现场分析仪器,每 3 人 1 组,每个点的采样时间为 5~6 min,收集 5 个介质样品,每个样品的分析准备和处理时间为 4 min。

Barry Warren Smee 试图打开 40 年前的黑匣子——Govett and Bolviken 的电化学迁移理论。作者的实验结果证明:①离子穿过外来覆盖物的电化学传输理论是有效的;②对冰碛物黏土覆盖的 VMS 矿床试点研究,发现受土壤 pH 值变化的影响,一些

元素分布也发生变化,如 Ca(Sr)、Mn 和 Fe 等,它们在矿床上方形成双峰或单峰异常;③弱浸出 Ca 与热酸提取 Ca 的比值在 H<sup>+</sup> 异常的边缘出现正异常,表明再活化的钙矿物与已有的钙矿物不同;④土壤有机碳对 VMS 矿化有反映,推测土壤微生物在元素分布中起重要作用。作者认为对埋藏矿床进行大面积采样详查是不经济的,未来发展方向是寻找可以远程探测细菌、矿物和植被变化的方法。

Agnico Eagle 勘查公司 Olivier Cote-Mantha 等报告了加拿大努纳武特已知矿外围发现 Amaruq 矿床的案例。Amaruq 卫星矿位于加拿大努勒维特 Kivalliq 地区 Agnico Eagle 的 Meadowbank 矿区西北 50 km 处,截至 2016 年底,金储量为 2.1 百万盎司。从初级勘查靶区迅速成为可供开采的矿床,系统的冰碛物采样+便携式 XRF 现场分析金伴生元素(如 As)发挥了重要作用,使得快速确定靶区成为可能。

Eldorado 黄金公司 Timothy Baker 和 Sean McKinley 用 aiSIRIS<sup>®</sup>(第三代人工智能光谱红外解释系统)处理的光谱数据来探寻斑岩—浅成低温热液系统和进行矿山资源评价。与传统遥感数据处理靠用户选择的方法不同,aiSIRIS<sup>®</sup>是通过基于云的引擎和专家评价系统提供光谱数据解释模型。

矿床模式找矿一直是矿产勘查的重要手段。Charles Walter Funk 在索诺拉州,通过对比已知矿床与紧邻古地表下方的低中间硫化金矿的地球化学和蚀变特征,在地表不含石英脉深部获得了新发现。

Belcarra 集团公司 Ben Whiting 等介绍了通过重新研究废弃矿山资料,发现新的银矿资源案例。加拿大不列颠哥伦比亚省多莉瓦登高品位银铅锌矿曾由 Dolly Varden(1919~1921 年)和 Torbrit(1949~1959 年)开采,因资源枯竭废弃。矿体赋存在侏罗纪黑泽尔顿集团火山碎屑岩中,受断层控制。2017 年,通过分析资料,认为控矿断层为同生逆断层,据此认识对 Torbrit 北部断层下盘进行钻探验证,获得重要找矿突破。

De Beers 集团服务部 Sojen Joy 等报告了东达尔瓦克拉通火山岩相金伯利岩的发现过程。

### 3 地球化学大数据分析

在信息化时代,勘探公司、地质调查机构和采矿公司通常拥有千兆字节到数百万兆字节的地球化学信息及其相关属性,如何使用先进技术(包括 Hyper-cube 等)处理数据集,从区域—详查区—矿山范围数据集中提取出最大价值信息,成为地球化学工

作者面临的重要课题。

David Lawie 做了“从噪声中分辨有用信号——地球科学中的分析”主题发言,认为在大数据和机器学习分析时代,理解数据的本质是至关重要的。成功的机器学习和人工智能方法需要建立用于“发现”和“预测”的训练集。

Britt Bluemel 介绍了来自加拿大不列颠哥伦比亚中部地球化学数据处理结果,通过采用多元回归分析来了解元素表生作用,采用二阶导数对异常进行排序,确定找矿远景区。

Corescan 公司 Sam Scher 等与 Geosolutions 公司 Brenton Crawford 等提出大数据时代如何将高光谱矿物学与地球化学相结合的问题。过去十年来,高光谱岩芯成像技术的发展已经使得矿产勘查中对矿物学的大规模解译成为可能,随着应用案例的积累,矿物解译将更加精准。他们利用高光谱矿物解释结果与地球化学数据结合,对智利中部一个铜矿构建了 3D 模型,结果认为该矿仍然有很大的勘探潜力。

Clinton Smyth 等报告了勘探与冶金中的人工智能应用,强调人类知识转化和术语标准化问题。

澳大利亚 Alan William Mann 等利用王水 (AR) 部分消解和动态金属离子法 (MMI) 对土壤样品进行部分提取,获得区域 (或矿区) 50 种元素分析结果,计算基于 Spearman 相关性的元素地球化学相似度,结果可以成功将长英质和镁铁质岩性、沉积碳酸盐岩区域与风化钙结层、Sedex 矿床与 IOGC Cu 矿床以及 Coolgardie 与 Ballarat 型金矿区分开。

加拿大王后大学 Jennifer McKinley 报告了利用区域地球化学进行环境监测和风险评估实例。为了克服使用经典单组分变量确定基线值的缺陷,他将区域水系沉积物和土壤地球化学数据集与健康数据相结合,提出了一种替代方法,利用对数比值法,通过成分分析进行环境监测和人类健康风险评估。

中国地质调查局刘荣梅等报告了中国土地质量地球化学信息系统。中国地质调查发展研究中心开发的中国土地质量地球化学信息系统内容包括:数据输入子系统、数据管理子系统、数据分析子系统、数据发布子系统和数据服务 App。目前,该系统被广泛用于地球化学数据库建设、地球化学数据分析与制图、地球化学与环境数据整合和数据处理。

#### 4 覆盖区勘查——方法、技术和策略

随着露头矿减少,矿产勘查不得不转向困难地

区,如松散层覆盖区和年轻地层覆盖区。因此,研究覆盖区地球化学勘查技术一直是应用地球化学的研究热点。本专题安排报告数最多,达 17 篇,主要涉及北美和北欧冰碛物覆盖、澳洲深风化物覆盖等地区的矿产勘查地球化学问题。

在冰碛物覆盖区开展地球化学勘查,成果解释遇到较大挑战,加拿大学者一直强调地球化学测量技术与景观演化研究相结合的重要性。不列颠哥伦比亚大学 Cayer 等将地表地球化学测量结果与景观演化史相结合,直接用于探测 DO-18 号岩金伯利岩。研究区冰碛物覆盖厚度 5~20 m,土壤详查样品在野外先采用便携式 X 射线荧光初步分析,然后回实验室采用 4 酸和王水消解,ICP-MS 进行多元素分析。结果显示 Cr、Mg、Nb 和 Ni 异常从北部的金伯利岩正上方向下方发散。通过对覆土厚度、土壤类型、地形变化和植被填图,确定冰川运移方向及地貌演化过程,科学解释了异常。同样来自不列颠哥伦比亚大学的另一团队 Wickham 等也在 Kelvin 地区应用土壤测量技术勘查隐伏金伯利岩时,研究了冰川演化史和景观过程。

来自丹麦的 Shane Rich 和加拿大的 Peter Winterburn 报告了 Deerhorn 斑岩铜金矿床地球化学填图成果。该 Cu-Au 矿床被 60 m 未扰动的冰碛物覆盖,填图结合土壤样品王水、去离子水提取及循序提取和分析、物理化学参数和碳氢化合物测定,来确定地球化学方法对埋藏矿化的指示效果。结果表明土壤元素分布与土壤性质相关,尤其是在富含有机物的区域;为了最大限度地减少背景噪声和更有效地设计采样,在土壤测量前应开展土壤填图;对 B 层-180  $\mu\text{m}$  土壤中 As、Cs、Cu、Mo、Tl、U 和 W 数据,根据有机碳含量进行归一化处理,以消除有机物质对元素富集作用的影响,获得了较好效果,上述 6 种元素在矿化周围形成环状异常,轻烃在矿化体上方出现明显低值带;对选定的异常 Cu 样品进行连续浸出表明,王水提取是异常 Cu 检测的最佳首选。作者认为冰碛物异常的形成系冰川搬运、 $\text{H}^+$  离子迁移、植物吸收和表生分散综合作用的结果。

加拿大艾大略省地质调查局 Stewart Hamilton 更新了其关于深穿透异常成因的电化学还原理论。还原圈出现在正在氧化的埋藏地质体及矿床上方,是地球物质内电化学势异常,多数与地下大的导体 (如石墨或块状硫化物) 的电极化场吻合,被认为是覆盖区硫化物矿床上方表层土壤深穿透地球化学异常形成的主要原因。但随着研究深入,发现在没有大的电导体或者硫化物颗粒不连续的浸染状斑

岩矿床上方也出现了还原菌现象,作者认为其形成与无数微导体的氧化还原诱导的自极化作用有关。在氧化还原梯度中,微小的导体(例如硫化物颗粒)将产生累积的电场偶极子,进行纵向串联和横向平行,负极性朝向氧化还原梯度的氧化端。同时,带电荷的细菌可能是氧化还原梯度内的“极化物质”,*Geobacter sulfurreducens* 就是这种在细胞外电子转移到矿物氧化剂时极化的生物之一。

Matthew Alan Bodna 报告了加拿大温哥华岛 Lara 多金属块状硫化物隐伏矿详细土壤填图和土壤地球化学建模成果。该区土壤覆盖物包括冰碛物、冲积层和崩积层,为了科学理解影响地球化学结果的控制因素,作者先建立景观演化模式。 $-180\text{ }\mu\text{m}$  土壤样品经王水消解后,等离子质谱/光谱进行多元素测定,同时测定土壤物理化学参数,选择代表性样品进行循序提取。还采集了少量西方铁杉树皮样品,了解生物对元素迁移影响。作者认为在 VMS 和黄铁矿带上方 B 层土壤地球化学信息系矿化体物质机械分散、镁铁质岩石的冰川搬运和极少量的生物输入综合作用的结果,因此,景观填图对于在冰川覆盖地区有效和准确地解释地球化学响应至关重要。

加拿大纪念大学 Derek Wilton 等尝试采用 MLA-SEM(矿物解离分析仪—扫描电子显微镜)勘查稀土。在奇怪湖矿区,沿冰川运移方向长 30 km,宽 2~4 km 范围内,按网格采集了 67 个表层沉积物样品。截取 125~180  $\mu\text{m}$  粒级样品约 0.3 g,置于环氧树脂圆盘中,压平,采用 SEM-MLA 分析矿物,结果发现了相当数量的褐帘石、galenbergit 及硅钙钙石,独居石、钽石等稀土矿物,证明方法的有效性。

芬兰地质调查局 Maarit S. Middleton、法国地质调查局 Bruno Lemièrre 与丹麦、格陵兰地质调查局 Simon Thaarup 等联合,介绍了欧洲跨国深部地球化学勘查计划(UpDeep)。该项目旨在开发深部勘查的地球化学专业技术,并将该项技术引入到欧洲。土壤偏提取和生物地球化学勘查技术在其他大陆已经得到广泛应用,但在欧洲少有尝试,主要原因是人为影响和缺乏持续研究导致其接受度低。UpDeep 是一个为期三年的项目(2017~2020 年),由欧洲信息和原材料技术部门资助,联合芬兰地质调查局、法国地质调查局、维也纳技术大学、芬兰技术研究中心有限公司、Spinverse 创新管理有限公司、丹麦和格陵兰地质调查局等研究机构,目的是科学检验矿产勘查中的土壤偏提取和生物地球化学实用性,以促进欧洲地表地球化学技术应用。项目数据来自芬兰

现有的土壤偏提取和生物地球化学数据和将得到的法国和格陵兰岛实验的新数据。商业可行性和市场开发将由 Spinverse 创新管理有限公司承担。项目需要解决浅表地球化学的几个技术问题,包括高效采样方案和样品介质选择,标准物质的生产和定值,并将构建基于网络的数据分析和交付平台,以快速交付结果,促进地球化学顾问和勘探公司之间在数据解释时可互动交流。在另一个报告中,他们还介绍了 UpDeep 项目正在法国中部 Beauvoir Li-Ta-Sn and La Bosse 钨矿床上采用传统土壤全量、偏提取、便携式 X 荧光快速分析和生物地球化学测量进行试点的情况。他们采集了 160 件土壤样品,Ah 层土壤分别用去离子水、焦磷酸钠、王水提取,B 层土壤用热盐酸羟胺、ALS 实验室的离子淋滤(Ionic Leach™)和王水提取,同时用便携式 X 荧光仪测定土壤全量。此外,还采集了 84 个蕨类样品、80 个荆棘样品和 64 个花旗松样品。欧洲地表土壤地球化学受到的挑战是人类活动、矿山开采(古代—20 世纪中叶)、农业和林业活动影响。样品分析结果未出,效果如何有待观察。

澳大利亚地球化学景观特殊,大部分待发现矿产资源都被厚厚的深风化壳和运积物覆盖,对未来的矿产勘探,特别是地球化学勘查构成了重大挑战。来自 AMIRA International 的 Adele Seymon 等披露了为未来矿产勘查提供人力和财力资源的计划。他们认为过去 60 年厚覆盖区矿产勘查方法和技术组合并没有成功开辟新的疆域。为了迎接这项全球性挑战,AMIRA International 最近在考虑推出澳大利亚覆盖区勘查路线图,旨在扩大 UNCOVER(国家科学计划)在该领域的努力,建立一个能够加强行业、学术和研究组织、政府地质调查机构及其他重要利益相关者之间的合作。短期内确定了三个优先重点领域,包括查明覆盖层的类型、形成时代和厚度;对主矿化系统痕迹进行描绘和填图;增进对各种尺度不同类型和矿种矿物系统理解。路线图给出了其可能的结构、资金、所需的技能和人力资源,以及一个为期 15 年的综合计划中的主要活动。

Ryan Noble 尝试测试超细土壤来改善近地表化探效果。前人研究认为来自深部隐伏矿信息可以向上迁移至地表覆盖物,并被细粒级土壤颗粒表面动态吸附。但由于细颗粒分离困难,超细颗粒土壤测量并未推广应用。作者在西澳 20 多个主要矿床,选择 200 nm 超细颗粒,开展物理提取方法、化学分析方法和样品量等实验,建立了一套新的超细粒级土壤测量流程,包括 $<2\text{ }\mu\text{m}$  土壤粒级的分离、测定粒

度分布、光谱矿物学及其他物理化学参数。该技术的主要优点是样品量少,无粒金效应,对贱金属元素也有效。会上展示了将以前区域化探填图采集的副样进行重新测试,分离出超细粒级的分析结果,获得了新成果,在覆盖区发现了 Au 异常靶区。

澳大利亚 CSIRO 的 Ravi Anand 提出中厚覆盖区利用物理化学界面和指示矿物开展找矿的想法。报告人通过西澳和博茨瓦纳二叠纪、第三纪和第四纪沉积物所覆盖的金和贱金属矿床的研究工作,认为两种类型的界面都有信号显示:①铁质结核、矿物颗粒和铁帽碎片等机械分散形成的物理界面;②元素通过地下水渗透过粗粒沉积后,沿着不整合面或覆盖物向上迁移至地表覆盖物。物理界面的确定需要古地理演化资料支持,化学界面取样可反映深部隐伏矿。报告人提出,详细分析覆盖物中单一矿物组成或结构可获取金属分散的重要信号。

西澳地质调查局 Paul Morris 使用土被和三齿稗化学特征在覆盖区追踪与层控 Pb-Zn 矿化有关的控制流体通道的断层。在西澳东北部 Ngurrupa 土壤覆盖地区,为了确定 400 km 长的 Stansmore 断层是否为该区隐伏矿化的流体通道,沿两条剖面采集并分析了 <50  $\mu\text{m}$  细粒级淤泥和黏土及三齿稗的化学成分。结果显示,在由地貌和地球化学信息确认的断层附近,土壤中易溶元素(如 Cs、Li、K)和稀土元素含量增高。而另在一条不太确定且结构复杂的断层实验剖面上,土壤(特别是稀土)和三齿稗(稀土、B 和 Re)中元素含量也发生变化。两条剖面上,已知或推断的断层附近都出现了类似的易随流体迁移的元素,包括 Zn、Tl 和 Cd 等,表明断层附近这些元素被带入,深部可能存在隐伏层控 Pb-Zn 矿化。

中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所王学求等报告了中国化探成就和面临的挑战,认为深穿透地球化学是一种有效的矿产勘查方法,可用于覆盖区发现区域和局部目标。

## 5 极端环境下矿产勘查

极端环境是指超干旱、苔原、热带、高海拔、亚海洋和外星球等景观。本专题宣读论文相对较少,仅 6 篇,仅涉及极干旱区和高纬度寒区。

阿塔卡马沙漠是世界级斑岩铜矿集区,但过去在阿塔卡马沙漠,由于覆盖严重,采集运积砾石的常规地面化探已证明无效。Alexandra E. Brown 等通过对阿塔卡马沙漠砾石的地貌学研究,来指导地球化学勘查。作者通过研究碱性环境下的金属运输、

信号保存或水文地球化学特征,提出斑岩铜矿探途元素如 Cu、Mo、Re、As、Se 和 Te 从埋藏矿床淋出进入地下水,在 Eh 和 pH 条件控制下扩散迁移,水中元素受地震影响沿构造带向上方覆盖层迁移,在运积物表层形成异常。为了正确识别异常,需要根据地形地貌识别基岩构造,遥感方法可识别冲积层中活动断裂。作者认为对聚集有深部矿化信息的表层砾石进行采样,通过弱试剂提取,等离子质谱测定多元素,可用于区域或矿区矿产勘查。

另一项在阿塔卡马沙漠进行的研究由女王大学的 James Andrew Kidder 等完成。他们在该区前人大量水化学和同位素研究的基础上,通过总结前人研究结果,推测出极干旱阿塔卡马沙漠可能存在的水源和聚集地,为该区水化学数据解释提供依据。

英美资源集团 John C Barr 的另一个报告展示了其在纳米比亚用直升飞机采集土壤最表层尘埃的地球化学勘查案例。控制飞机的飞行速度 40~80 km/h,飞行线距 200 m,大约 5 个样/ $\text{km}^2$  的采样点距,完成测量面积约 2 500  $\text{km}^2$ 。发现的异常采用常规土壤测量和钻探进行追踪。作者认为该方法在干旱和半干旱地区是一种高效和快速的地球化学手段。

Wayne Jackaman 在加拿大努纳武特(Nunavut)极地地区的 Duggan Lake 开展了水系沉积物和水化学调查。加拿大以前极北地区 1 个样/13  $\text{km}^2$  区域化探遇到的问题是使用直升机成本过高,占 50% 以上。为了降低成本,作者提出新的地球化学调查策略,降低采样密度,除对较大水系采集水系沉积物和水样外,还采集重矿物样品。作者展示了 2012 年在努纳武特 Kitikmeot 行政区中部巴瑟斯特湾东南部进行的区域河流沉积物、重矿物和水地球化学调查工作。在 244 个采样点采集样品 260 件,完成调查面积 14 000  $\text{km}^2$ ,获得了多元素分析和矿物学数据。

Ray E. Lett 应用矿物溶解度模型(HREEQC 热力学模型)解释加拿大不列颠哥伦比亚省山区的溪流和泉水化学结果。

Perti Sarala 和 Anne Taivalkoski 在芬兰应用雪作为地球化学采样介质。在芬兰北部地区,雪覆盖长达 7 个月,而且降雪期和积雪性质基本恒定,雪采样简单快捷,不影响环境。雪来自大气的水,但它可携带局部和长距离迁移的灰尘、金属离子、碳氢化合物甚至矿物颗粒。雪底部与地面接触,受到下伏土壤和基岩的气体 and 热的影响,适合作为地球化学采样层位。雪样品测定了 160 种碳氢化合物(SGH, Actlabs)和金属离子(ICP-MS)。作者展示了几个在

芬兰雪地球化学应用实例,能够很好地反映各种类型矿化。

6 巨型矿体的足迹——矿物学、光谱和地球化学向量

本专题安排 13 个报告,涉及矿物地球化学(10)和遥感(3)两个领域,笔者仅介绍矿物地球化学成果。目标矿物包括石英、电气石、磷灰石、绿泥石、黄铁矿等。

6.1 电气石

劳伦森大学 Christopher E Beckett-Brown 等研究了加拿大 Co-Mo-Au 斑岩系统的电气石的微量元素特征。电气石是斑岩系统中常见的副矿物,包含多种元素,许多元素的分配系数接近于 1,能够记录整个矿物结晶过程中流体成分的物理化学变化。选择多个加拿大斑岩系统(Highland Valley Copper, Schaft Creek, Woodjam 和 Casino)作为研究区,研究电气石微量元素特征与矿化的关系。从结构看,与斑岩矿化有关的电气石有 3 种:浸染状、脉状和角砾状。通过激光烧蚀等离子质谱微量元素分析发现,对氧化还原条件敏感元素(Mn, As 和 Sb)、高场强元素(Ti, Zr, Nb, Th)和大离子亲石元素(Sr, Ba)均明显富集,而稀土元素则低于检出限( $<0.01 \times 10^{-6}$ )。结果表明电气石痕量元素分析可分辨出矿化与非矿化斑岩系统。

塔斯马尼亚大学 Francisco Testa 等用电气石微量元素评价斑岩铜矿床含矿性。电气石在各种地质环境中的稳定性及其元素组分的变化性,使得电气石成为记录不同地质过程和微量元素分带模式的强有力手段。作者分析了中新世晚期至智利上新世里约布兰科—洛斯布朗斯地区(La Americana, Sur-Sur, Cerro Negro 和 Las Arenas)的几个矿床的电气石。结果发现矿床周围电气石组成沿垂向和水平方向呈现规律性变化,且不同矿床规模其组成也有明显差异,认为电气石组成具有区分无矿、弱矿化和强矿化斑岩系统的潜力。

6.2 石英

塔斯马尼亚大学 David Richard Cooke 等研究菲律宾 Mankayan 铜金矿蚀变帽中石英微量元素矿物帽并指导找矿。石英是热液系统中最常见的矿物,在一定温度压力条件下,石英晶格中  $Si^{4+}$  被  $Ti^{4+}$  替代,可以作为在高温环境地质的温度计。菲律宾 Mankayan 岩帽蕴藏有 Lepanto 高硫铜金矿床和隐伏的超大型高品位 Far South East 斑岩铜金矿床。石

英在岩帽中普遍分布,是硅质蚀变岩石的主要蚀变矿物。作者使用阴极发光识别石英类型并确定其形成序列。岩帽石英的 LA-ICP-MS 分析结果显示从矿床向外,微量元素含量及比值变化达 3 个数量级,这种变化可作为判别矿化中心的指标。该团队(Lejun Zhang 等)还研究了阿根廷 Veladero 高硫浅成热液 Au-Ag 矿床石英微量元素并用于含矿性分析。阴极发光和 LA-ICP-MS 分析结果表明石英微量元素含量及结构能够有效指示高硫矿化体系,并确定可能的矿化中心。

6.3 磷灰石

塔斯马尼亚大学 Joshua Phillips 等通过研究热液成因磷灰石地质年代学来探讨美国西南部斑岩矿产潜力。采用原位 U/Pb LA-ICP-MS 测年技术研究岩浆和热液磷灰石热事件,认为阿帕奇玄武岩中伴生的正长岩—绿泥石蚀变在矿物学上与其他元古宙盆地(澳大利亚北部的麦克阿瑟和伊萨山盆地)观察到的类似,提出美国西南部的元古宙盆地可能有勘查 IOCG 或沉积岩容矿贱金属矿床的潜力。

6.4 多矿物

湖首大学 Joseph Vrzovski 等用绿泥石矿物化学特征作为寻找绿岩型金矿的手段。巴里克黄金公司的 Hemlo 金矿作为世界级超大型矿床,已产黄金大于 21 百万盎司。作者采用激光烧蚀等离子质谱法测定了金矿体及其围岩中绿泥石常量元素,发现这些元素存在空间变化规律,能够区分近矿、远矿和侵入岩。近矿绿泥石中 Mg 含量较远矿和侵入岩的绿泥石富集,远矿和侵入岩中绿泥石富 Fe。矿床附近侵入岩中绿泥石具有高的  $w(Fe)/w(Al)$  比值,而近矿绿泥石  $w(Mg)/w(Si)$  比值高。作者认为金矿床周围的主要元素变化是矿床周围热梯度的反映,可以作为金矿床的近矿指示。

湖首大学另一团队 Nicolas Derome 等通过研究蚀变矿物的微量元素地球化学特征来获取更多矿床和及其分带评价指标。对红湖金矿三个钻孔、露天采场和由矿床到围岩长达 7 km 的地表岩石剖面进行采样,测定全岩、绿泥石、石英、电气石和黄铁矿微量元素,结果显示红湖金矿床附近全岩和绿泥石中的 Sb 和 As 含量增加,而在其周围较小的卫星矿床中,矿化体附近 Sb 和 As 浓度却较低;W 含量也在红湖金矿附近增加。

美国地质调查局 Karen D Kelley 等在阿拉斯加中东部未结冰的植被覆盖区(约 220 km<sup>2</sup>)尝试进行常规水系沉积物测量的同时,利用基于扫描电镜的矿物自动识别系统(SEM-MPA)研究指示矿物勘查

矿床的有效性。在 Taurus 斑岩铜矿区,作者采集了 17 件水系沉积物样品和 7 件钻孔岩芯。矿床附近 1~2 km 范围内水系沉积物中 Cu 含量为  $18 \times 10^{-6} \sim 38 \times 10^{-6}$ , Au 含量为  $5 \times 10^{-9} \sim 12 \times 10^{-9}$ , Mo 含量为  $1 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ , 元素含量较低, 仅稍高于背景区, SEM-MPA 观察未发现含铜矿物。因此, 只能选择与矿化有关的抗风化稳定矿物, 如在距离金牛座矿床最近的水系中观察到了 Alunite 明矾石。黄玉和其他常见斑岩铜指示矿物如绿帘石、绿泥石、磷灰石、钛铁矿、金红石和锆石也出现在沉积物样品中, 但它们出现在背景区样品中, 不是矿化特征指示矿物。下一步将对这些样品采用电子探针和 ICP-LA-MS 分析出矿物的化学成分, 研究矿化区与背景区水系沉积物矿物化学组成变化, 寻找找矿标志。

## 7 探测金属和非金属矿床的碳氢化合物

近年来, 碳氢化合物作为探测矿床的指标显示出相当大的潜力, 但也存在较大争议。本次会议专门安排了 5 个报告, 内容主要为碳氢化合物测量在勘查矿产中的应用案例和最新技术进展。

不列颠哥伦比亚大学 Winterburn Alan Peter 等报告了地球化学方法在加拿大西北领地 DO-18 隐伏金伯利岩上的应用效果。岩体上方, 细粒级冰碛物样品中 Mg、Ni、Cr 和 Nb 出现清晰的低缓异常, 同时发现一组特殊的烃类, 特别是轻质烷烃和轻质苯异常与土壤异常高度吻合。基因组测序研究确定样品组内不同的微生物群, 并将微量元素化学、烃化学和微生物作用有机结合。报告还详细讨论了三者之间的因果关系。

David Seneshen 等介绍了石油和金属矿床上碳氢化合物和金属异常。Geochemical Insight 公司采集了石油和金属矿床上方各种介质样品, 包括壤中气、土壤、植物或者地下水, 分析有机和无机指标。会上作者展示了不同介质样品中  $C_1$  至  $C_{24}$  碳氢化合物以及主量和微量元素地球化学调查结果。利用类似法医推理的地球化学手段(多证据如烃比值、碳和氦同位素、地表土壤及植被和地下水的主要和微量元素组成等)破解地表地球化学异常与下伏油田和金属矿床关系。作者展示了威利斯顿盆地(Roncott 油田)、密歇根盆地(Albion-Scipio 油田)、格林河流域(Jonah 致密气田)、大盆地(Grant Canyon 油田)和犹他州东部产于砂岩中的 Entrada 哈雷圆顶氮气田等的地球化学调查实例。另外, 作者还介绍了怀俄明州东南部兰斯铀矿床地球化学试点测量结

果, 在铀矿地表投影范围内, 乙烷、氮和氢含量出现异常。

Jamil Sader 等在加拿大魁北克西北部 Temiskaming 地区利用碳氢化合物和土壤地球化学勘查金伯利岩和硫化物矿床。利用 AGI Sorbers 采样器(Gore 吸附剂)吸附土壤中来自矿床氧化产生的挥发性组分(轻硫相——20 个碳以下的有机物), 同时采集对应层位土壤并测定微量元素。在金伯利岩上方,  $C_3 \sim C_7$  出现负异常, 土壤中金伯利岩探途元素 Ni、Co、K 和 REE 也同样出现负异常。目前尚不清楚这种碳氢化合物和地球化学负异常是否与相同的地球化学作用有关还是彼此独立。然而, 在埋藏的硫化物矿床上方,  $C_3 \sim C_7$  烃和二甲基二硫醚出现正异常,  $C_{12} \sim C_{20}$  烃出现负异常。作者认为碳氢化合物和轻硫物质都可以用于探测埋藏的矿床, 但具体的特征可能有所不同。

澳大利亚 Ryan Noble 等对土壤的水提取和被动土壤气体法进行了应用试点研究。研究区包括西澳 Jaguar 和 Bentley 贱金属 VMS 矿床、North Miitel 镍矿床以及智利的 Inca de Oro 铜矿床。采用实验室模拟(矿石风化)和现场试验(浅井和横剖面)来了解土壤碳氢化合物和气态元素穿过覆盖层的迁移机理。在土壤全量无异常的 North Miitel 镍矿床, 气态碳氢化合物和土壤(10~20 cm)水提取的元素都有异常显示, 其中水提取的 Ni、Co、Mo、Sb 和 Sn 含量指示矿化。通过对比, 水提取和被动土壤气体法优于羟胺盐酸盐和王水提取的效果, 其他矿区和实验室模拟实验表明金属气体迁移均获得了一定的效果。作者认为对探测指标与矿床关系及其迁移机制的理解将有助于这些勘查技术的未来应用。

不列颠哥伦比亚大学 Pearce Michael Luck 等提出有机组分可作为铜斑岩勘查的探途指标。矿床上方土壤烃类异常被认为是微生物代谢和死亡细胞破裂的副产物。微生物作用如硫化物和铁的氧化以及硫酸盐的还原是表生风化作用关键因素。这些作用产生的有机化合物常以生物膜(微生物和有机细胞外聚合物)出现在矿床上方。在各种金属和非金属矿床上方, 矿石、岩体、冰碛物、水和空气界面处产生的氧化还原梯度的存在有利于微生物活动发生和碳氢化合物信号在土壤中保存。作者观测到冰碛物覆盖的斑岩铜矿上方土壤中有机化合物信息能够成功指示斑岩铜矿的存在, 直链烷烃浓度在矿化露头上方及其附近升高。土壤碳氢化合物信号与矿化体、主构造和表层覆盖物有关, 综合分析地质、地球化学和环境(包括生物和微生物学)特征有助于对多种

化合物有机信号的解释。各种数据分析技术的应用旨在排除无矿地质体或地貌变化引起的碳氢化合物的异常,捕捉到有价值的矿化信息。

## 8 水文地球化学:环境与勘探应用

水化学专题共安排 14 个报告,5 篇应用于矿产勘查,9 篇应用于环境和其他方面。本文仅介绍水化学在矿产勘查中的应用。

内华达勘探公司 Wade Allan Hodges 在美国内华达州凯利流域采用低成本浅钻取样的水文地球化学测量勘查隐伏卡林型金矿床。内华达州是全球单位面积金储量最大的金矿集区之一,但矿区 60% 被沙砾覆盖,金矿勘查成本高、难度大。近来低成本钻探取样并直接分析地下水中对卡林型金矿有指示意义的微量元素,大大降低了水化学测量成本,成为一种低成本、高效的隐伏卡林型金矿的勘查方法。试点流域(900 km<sup>2</sup>)盆地周围和附近已发现 7 千万盎司黄金。过去资料显示该区仍然具有很大的找金潜力,但该区大部分被 50~300 m 不等的运积物覆盖,使得勘探费用高且风险大。已经完成 500 个钻孔的施工,采集了 900 件地下水样品,分析水中金和其他微量元素。通过地下水中的离散三维浓度梯度分析和验证,在浅处发现了金含量 $>0.1\times 10^{-6}$ 的金矿矿化,且矿化具有向深部继续延伸的趋势。作者认为传统的勘探技术结合低成本钻探取样的新水文地球化学技术,大大降低了该区金矿勘探成本和风险。

另一位来自内华达勘探公司的 James Buskard 提出将水化学技术应用到不同尺度的金矿勘查中。对于勘查 Au,最好的水文地球化学指示元素是水中溶解的 Au 本身。尽管 Au 在水中溶解度低,但严格控制采样过程、采用恰当的分析方法和合理的取样密度(浅钻),可以直接检测出水中万亿分之一的 Au( $10^{-9}$ )。与其他地球化学勘查方法相比,水文地球化学优点在于需要样品数少且能够反映隐伏矿(深部补给),是一种非常适合在覆盖区中应用的 Au 勘查手段。水化学测量一般认为只适合于流域尺度确定的找矿远景区,但作者认为在靶区选择阶段,只要增加采样密度(包括钻孔分层取样),采用 3D 技术表达地球化学成果,水化学测量仍然能够发挥作用。作者在智利中南部的 LaCabaña 地区开展了试点研究,该区为蛇纹石化含铂族元素(PGE)的橄榄岩体,采集与含 PGE 超镁铁岩接触的地表水和地下水,采用 AAS、IC、ICP-OES 和 ICP-MS 多方法测定了河水、溪水、井水和泉水中主量和微量元素(包

括 PGE)含量。结果表明,与橄榄岩接触的水为碳酸镁型,铬( $0.86\times 10^{-9}\sim 4.27\times 10^{-9}$ )和镍( $9.57\times 10^{-9}\sim 52.89\times 10^{-9}$ )含量高,而与云母片岩接触的水是氯化钠型,铬、镍相对低且变化小。结论是水文地球化学能够有效识别矿化,可以作为运积物覆盖区矿产勘查手段。

爱尔兰地质调查局 Vincent Gallagher 等介绍了爱尔兰 Tellus 调查计划中区域地表水地球化学调查结果。Tellus 是爱尔兰地质调查局开展的爱尔兰全国区域地球化学和航空地球物理调查计划简称。该计划已覆盖该国 50% 以上的面积,其目的是在 6~8 年内完成对整个国家(70 000 km<sup>2</sup>)的综合填图。地球化学计划采样介质包括土壤、水系沉积物和地表水(一级和二级溪流),采样平均密度为 1 个样/3.5~4 km<sup>2</sup>。地表水元素含量由 ICP-MS 分析,阴离子组成由离子色谱测定。目前水质量控制数据和元素分布图可在 GSI 网站上免费下载。为了更好地解释数据,还开展了试点研究,选择矿化区和远离矿化的背景区,分别采集湿季和干季水样,除分析元素含量外,还测定地球化学条件参数,如 Eh、pH、电导率、总溶解固体量(TDS)和水温。结果发现无论是湿季和干季,都出现了两种截然不同的水类型:酸性氧化水 and 中性还原水。与矿化有关的指示元素为 As、Ba、Co、Cu、Mo、Ni、Li 和 W。作者认为水化学测量可以作为运积物覆盖区勘查沉积岩容矿矿床的地球化学手段。

澳大利亚 Nathan Reid 等介绍了澳大利亚低密度水文地球化学调查成果。CSIRO 已公开了该国地下水分析和质量监控数据库,包括总溶解固体量(TDS)和 60 多个元素含量数据。在大区域内,特定指标能够反映岩群和矿化特征,如 Yilgarn Craton 北部的 Agnew 和 Granny Smith Gold。在远景区尺度上,指示元素如 Au、Ni、Cu、Zn、W、As 数据非常有价值。作者认为在综合考虑环境、岩石风化和高质量分析等因素后,水文地球化学不仅可用于不同尺度矿产勘查,而且可为人体健康和农业提供地球化学基准值。

Ron Yehia 和 Dave Heberlein 介绍了快速水文地球化学测量技术应用实例。试点区在不列颠哥伦比亚省南部,使用便携式台式光度法(Palintest®)测定水中 Al、Ca、Cl、Cu、F、Fe、Mg、Mn、K、Si 和 SO<sub>4</sub>,检出限从  $1\times 10^{-6}$  低至  $10\times 10^{-9}$ 。阳极溶出伏安法(ASV,PDV6000Ultra)测定 As、Cd、Cu 和 Pb,检出限  $0.5\times 10^{-9}$ 。现场重复分析的精密密度为 20% 左右(Cl 除外)。PDV6000Ultra ASV 系统对大多数元素(尤

其是 Cu 和 As)的分析精度可以与室内实验室结果相媲美。作者认为试点测量圈定的异常可能与贱金属和贵金属矿化有关。

## 9 微观到宏观的生物地球化学:勘查、选矿、修复和环境

生物系统在矿产勘查、选矿和场地修复中发挥着越来越重要的作用。本专题共安排 10 个报告,内容主要为矿产勘查中生物地球化学应用,最活跃的科研机构为不列颠哥伦比亚大学。

不列颠哥伦比亚大学 Sean Crowe 做了“微生物与矿产:机遇与挑战”的综述报告,认为在地质时间尺度上,微生物与地质过程密切相关,并将地球从其由单细胞微生物生命支配的早期缺氧状态转变为目前复杂的多细胞有氧生命的富氧状态。微生物代谢作用极大地改变了地球表面许多元素的分布,并直接或间接地参与了世界上许多巨型矿床的形成。因此,微生物是世界上最有效的地球化学家,我们可以从他们处理矿物资源的能力中学到很多东西。报告中作者概述了基因组学和合成生物学应用于矿产资源开发的解决方案时所遇到的挑战。

堪萨斯大学 David Fowle 做了“覆盖区调查:实验生物地球化学可以为埋藏矿化提供重要线索吗”的主题发言。生物地球化学作用一直影响着埋藏矿化系统上方土壤中金属的分散和富集。这些作用结果会以诸如同位素异常、高 pH 和氧化还原衬值、气体通量和电化学异常等次生信号表现出来。关于异常的形成机理,目前的概念综合了电化学、地下水脉动、气体分散以及这些生物地球化学循环等作用,但在解释诸如选择性提取、稳定同位素和其他元素地球化学等数据时仍然存在诸多问题。作者展示了其选择各种类型矿石(斑岩铜矿、铜镍硫化物矿床和 VMS 铜锌矿床)和对应种类的微生物进行流动柱模拟实验获得的结果和认识。

不列颠哥伦比亚大学 Rachel Simister 等研究了矿石风化过程中土壤微生物群落的响应。他们尝试利用土壤微生物群落指纹技术结合现代 DNA 测序技术寻找掩埋矿。在围隔实验中,选择不同的铜浓度(低含量代表埋藏矿床含量,高含量代表露头矿强异常),提取微生物群落 DNA,并对核糖体 RNA 基因(16S rRNA)的小亚基进行测序。结果显示,OTU(operational taxonomic units)数量为  $2\,265 \pm 105$ (范围 1993~2380), $\alpha$ 多样性(Chao1 指数)为  $3\,438 \pm 327$ (范围 2\,808~3\,791),表明测序覆盖率足

以捕获 65% 的微生物群落多样性信息。加铜处理后的样品与对照组明显不同,表明黄铜矿和含铜物质改变了微生物群落的组成,受黄铜矿和含铜物质影响,一些微生物种类如 Rhodanobacteria、SC-I-84 和 Acidimicrobiales 增加,从酸性水、含硫化物矿山废弃物和其他与矿山相关环境中采集的物质中,经常发现这些物种,且数量相对较高,说明这些微生物的生态与其栖息地中的金属浓度之间存在某种联系。加入矿石的土壤中,其微生物群落变化几周后就可检测到。这种强的微生物反应对于应用微生物群落指纹勘查金属矿床非常有意义。

不列颠哥伦比亚大学 Bianca Patrizia Iulianella Phillips 等从分子生物学方面阐述微生物在矿产勘查中的作用,提出随着廉价的现代测序技术和大数据评估技术的出现,矿产勘查微生物学方法正在向定量、高效和低成本率方向发展。微生物群落信息与土壤化学、矿物学和景观演化的结合提高了成果解释的科学性。他们实验的初步结果表明,相对于背景土壤,掺入低量硫化物(如  $<200 \times 10^{-6} \text{Cu}$ )的冰碛物就可检测出微生物群落组变化。目前正在进行类似于金伯利岩更高含量 Ni 和 Cu 的微生物实验,通过对已有的斑岩、金伯利岩和 VMS 矿床上的土壤微生物群落解析,并将群落基因组衍生数据集与痕量金属化学、矿物学、表层地质学和其他环境变量(包括 Eh 和 pH)相结合,确定微生物群落变化是否与地球化学信号相关。作者认为微生物特征和微量元素异常信号之间的这种强关联性,可将微生物群落剖析法作为冰碛物覆盖区的矿产勘查方法,并随着测序技术设备小型化,这种方法可开发为便携式现场分析技术。

David Heberlein 和 Colin Dunn 提出卤素可作为盲矿的指示,并展示了两个应用实例。卤素(F、Cl、Br 和 I)是火成岩、变质岩和沉积岩的常见成分,它们在成矿系统的金属活化和迁移中起着重要作用。研究区位于 Chemainus 附近的 Lara 冰碛物覆盖的 VMS 矿床和 Courtenay 附近华盛顿山出露的浅成热液 Au-Ag-Cu 矿化区。在华盛顿山,将黄雪松树皮和山地铁杉叶片中的卤素含量与 Ah 层土壤和埋置土壤中 3 个月的活性炭收集器中的卤素浓度进行比较。在 Lara,采集和分析了西部铁杉和西部红花,经过方法实验,植物灰分的温水浸出 Cl,且 Br 和 I 衬值和精度最佳。研究结果表明,Ah 层土壤中的卤素浓度受水饱和度的影响不能指示矿化,而在华盛顿山金矿化区,山地铁杉叶子和分泌物显示出明显的 Cl、Br 和 I 顶状异常;在 Lara,西部的铁杉树叶中卤

素在 Coronation Trend 周围形成同心环状异常。通过这两个实例可得出,卤素可能是探测浅埋硫化物矿化的有效探途元素。

挪威地质调查局 Belinda Flem 等应用生物地球化学勘查钼和铅矿床。沿着奥斯陆裂谷布置了 100 km 横剖面 and 41 个采样点,采集了 15 种不同介质的样品,研究了 12 种植物组织,包括云杉、越橘和蓝莓叶和树枝、蕨类植物、马尾草、松树皮、苔藓、蘑菇(红褐色乳盖)及 C 和 O 层土壤对矿化和岩性变化的指示效果。大多数介质在两个矿床附近出现清晰的地球化学信号。O 层土壤、云杉叶和木贼对钼矿床指示效果最佳,蕨类植物、木贼与 C 层土壤对铅矿化异常衬值最高。与植物相比,蘑菇富含 Ag、Cs、Cu、Rb、Na 和 Cd,并含极高浓度的主要营养素 K、P 和 S,木贼和蕨类植物都富含稀土元素,如 Ce、La 和 Y。但令人奇怪的是,大多数介质对于岩性变化没有明显反映。

英美资源集团 John C Barr 介绍了空气植物颗粒物的地球化学信息及其在矿产勘查中的应用。植物根系对各种植物和树木的躯干、树皮、树枝、叶子中元素的吸收,前人做了大量研究,但对树汁中的元素研究很少,而对植物颗粒元素研究几乎是空白。作者进行了一系列受控的实验室模拟,使用不同浓度的锌、铅、镉和锰的放射性示踪剂,研究各种植物(包括针叶树)对元素的吸收,测量并比较植物组织、植物颗粒以及最表面土壤被模拟雨水淋滤后溶液中的元素含量。选择穿过矿化体的剖面,采集来自植被和空气中的植物颗粒作为试点研究。采样工作靠一种特殊设计装在直升机下面的真空装置(收集器)来完成。将收集到的颗粒真空冲击到特制的三层塑料胶带底层(柔软的聚脂薄膜粘合剂),胶带中间为带有微孔的稍厚样托层,顶层为 Teflon 塑料。采样后胶带采用激光烧蚀—电感耦合等离子体发射光谱(LA-ICP-ES)进行元素分析,最多可达 34 个元素。根据飞机的速度,连续采样距离 20~100 m,颗粒采样效率约为 400 个样本/h。

芬兰地质调查局 Maarit S. Middleton 与维也纳科技大学 Irene Hoffman 等研究了芬兰北部矿区生物地球化学数据处理方法。在芬兰北部 6 种不同类型和规模的矿床(包括 Au-Co 矿床,IOCG 和 Ni-Cu-PGE 矿床)上进行的生物地球化学试点测量都能探测到矿化信号,甚至在深部矿床(深度达 200 m)上方,也有弱异常显示。作者展示了其采用成分分析法(CoDa)对芬兰北部生物地球化学数据的处理结果。

来自澳大利亚 CSIRO 的 Melvyn Lintern 等报告了西澳 Garden Well 金矿床地球化学试点研究成果。Garden Wel 金矿储量 4 百万盎司,覆盖物厚度 30 m,氧化作用深度大于 70 m,原生矿埋深 400 m。该区属半干旱气候,植被主要为金合欢和木麻黄。对植物、富含有机质的表层土壤、下部土壤(0.1~0.2 m)、地下水和钻孔中铁质物进行取样和多元分析,目的是确认是否存在地球化学异常和了解金属溶解、迁移、沉淀作用特征。结果显示,在金合欢树叶、地下水和铁质物中均发现了 Au 的强异常。作者认为是生物地球化学机制导致植物异常的形成,即浅层地下水 Au 被植物根吸收,在叶子中产生异常。

新南威尔士大学 David Cohen 等提出用 fpXRF 进行各种尺度的生物地球化学填图。现场便携式分析设备,特别是 fpXRF 的持续发展,使实时获取生物样品和常规地质样品多元元素地球化学数据成为可能。

### 10 寻找矿产的分析技术:从实验室—野外现场分析

近年来,实验和分析技术向化学、矿物学、同位素和遥感受谱多方法及实验室分析和现场分析并举方向发展。本次会议继续重视矿产勘查中现场分析技术,特别是便携式 X 射线荧光(pXRF)分析仪的应用,9 个报告中 4 个与该方法有关。

奥林巴斯公司 Aaron Baensch 对过去 10 年便携式 XRF 技术进行了总结,认为过去十年(2008~2018 年),矿产勘查和采矿业的手持式和便携式 X 射线荧光(pXRF)分析仪的创新和应用空前加速,曾经备受批评的未来主义设备现已成为行业标配,将继续以越来越快的速度发展,以满足现代地球学家所要求的高性能和现场测定要求。报告中对 pXRF 技术以及应用程序开发的主要进展和成就进行了总结,硬件/软件技术创新表现在:①从活动源移动到管道;②外形更坚固;③Silicon Pin(Si-PIN)探测器对硅漂移探测器(SDD)的创新;④新一代高计数率(HCR)数字脉冲处理器(DPP);⑤持续降低 LOD 和扩展测量元素范围(轻元素和 REE);⑥基于现场的样品制备设备的创新;⑦实时质量保证/质量控制、数据管理、可视化以及云数据交付的应用软件。

SGS 公司 Hugh A de Souza 等分析了便携式仪器及其所提供的现场服务。在过去十年中,随着火

星探测器上小型化和坚固耐用的分析工具的发展以及智能芯片和微电子技术的进展,便携式分析工具不断涌现。目前可用于元素分析的仪器有 XRF、LIBS、microXRF,用于矿物学分析的有近红外(pNIR和 pFTIR)、XRD 和 uRaman。它们都能为矿产勘查和矿山开采决策实时提供数据,提高工作效率。虽然便携式仪器的兴起是分析技术的重大创新,但正确的样品制备、仪器校准和操作方案仍然是获得可靠结果的关键。作者提出为提高结果可靠性,必须开发便携式制备设备和标准化样品加工方法,培养有经验的分析师。

澳大利亚 CSIRO 的 Melvyn Lintern 和 PPPB 公司 Simon Bolster 报告声称能够利用 pXRF 现场测定低含量金。这主要是由于 detectORE TM 的发明,使常规 pXRF 能够在野外进行 24 h 测量,并提供低至  $10 \times 10^{-9}$  级的金测量结果。他们还展示了一些现场试验结果说明其效果,并预测该技术将极大推动全球金矿勘查工作。

法国地质调查局 Bruno LEMIER 等应用 pXRF 评价了废弃矿山的环境和确定地球化学基准值。

美国赛普司公司 Andrew Somers 介绍了手持式激光诱导击穿光谱(LIBS)现场地球化学和矿物学测定手段。激光诱导击穿光谱或 LIBS 是原子发射光谱的一种形式,可以快速提供光谱数据,显示一系列元素的峰。该技术已应用于各种环境的地质样品测试中,包括实验室、矿物加工厂甚至是火星科学实验室好奇号探测器。随着宽波长范围、高分辨率手持式 LIBS 仪器的出现,地质样品野外现场定性和定量分析成为可能。LIBS 能够测定 pXRF 不可测的轻元素(如 Li, Be, B, C, Na)。除测定元素含量外,采用主成分分析(PCA)等数据处理技术可用于识别不同光谱之间的差异,提取地球化学指纹。

Bureau Veritas 矿业公司 amil Sader 和 Dundee 贵金属公司 Nikolay Zhivkov 等以  $<2 \mu\text{m}$  的土壤黏土组分作为采样介质勘查矿产,布置了一条穿过矿化带和背景区的测量剖面,取  $<180 \mu\text{m}$  (30 g) 与  $<2 \mu\text{m}$  (0.5 g) 粒级样品,采用王水/ICP-MS 进行分析,发现虽然两种粒级结果在矿化附近均有异常显示,但  $<2 \mu\text{m}$  的 Au 和 Ag 异常衬值更高。同时,  $<2 \mu\text{m}$  黏土部分重现性和一致性更好,特别是 Au 和 Ag 的精密度降低了 12%。一些元素如 Cu 和 Zn 等在  $<2 \mu\text{m}$  粒级中含量更高,作者认为颗粒更细,具有更大的比表面积,有利于元素吸附。

不列颠哥伦比亚大学 Ryan Shaw 和 Peter Winterburn 研究了地球化学样品部分提取过程中矿物

学反应模型。实验土壤样品来自加拿大西北地区的金伯利岩和智利阿塔卡马沙漠的斑岩铜矿。循序提取结果表明,除了提取目标相外,其他相也会被破坏。对提取后样品使用 XRD、LA-ICP-MS、同步加速器 XANES 和 SEM 方法的矿物学和化学表征,以建立痕量金属行为模型。

Goldcorp 公司 Thomas Bissig 和不列颠哥伦比亚大学 Peter Winterburn 使用氦探测器勘查被侧向运移砾石覆盖的铜矿。作者认为铀可以与 Cu 一起在氧化和酸性大气流体中迁移,因此 Rn 气体测量可以间接探测砾石中 Cu 异常。为了验证这一假设,他们在智利 Picarón 次生铜矿和 Huiniquintipa 次生铜矿床上方和附近共埋置了 128 个 Rn 探测器,时间约 10 天,同时在背景区安排了 12 个探测器作为对照。结果显示,在已知外来矿化之上或附近的 Rn 含量为  $3\,300 \sim 8\,000 \text{ Bq/m}^3$ ,背景对照区 Rn 含量为  $333 \sim 2\,250 \text{ Bq/m}^3$ ,而在 Picarón 矿化上方至 35 m 处土壤选择性提取结果中 Cu 含量却没有升高。因此,对于传统方法失效的地区,Rn 测量是低成本潜在找矿手段。

## 11 结束语

第 28 届国际应用地球化学会议交流成果颇丰。在技术上,从野外采样、分析方法到数据处理,都有了新进展。在方法研究上,理论结合实际,跨学科交叉研究活跃,表现出“八仙过海,各显神通”之势,出现一些奇思妙想的方法,显示出地球化学在矿产勘查领域仍然具有良好前景:

1) 信息化给地球化学野外调查方式带来改变。笔和纸等传统的野外工具变成电子设备,Android 平板电脑和手机应用软件可实现水文地球化学、生物地球化学、土壤和岩石样品采集定位和记录的数字化,可节省大量时间,提高效率。

2) 新思路、新方法探索方兴未艾。同位素地球化学勘查正在走向实际应用;激光烧蚀等离子质谱分析技术在矿物微量元素地球化学研究中应用不断深入;生物地球化学特别是微生物研究异常活跃,基因测序技术引入使得数据解释更科学;土壤有机气体地球化学测量技术(SGH 和 GORE)在应用中完善;被解密的航空化探(无机和植物微粒)仍需检验;水化学测量(包括浅钻取样)在区域矿产勘查中战略意义得到认可;覆盖区地球化学勘查技术成熟之路仍然漫长。

3) 随着智能芯片和微电子技术的进展,便携式

分析仪器不断涌现。目前可用于元素分析的仪器有 XRF、LIBS、microXRF,用于矿物学分析的有近红外 (pNIR 和 pFTIR)、XRD 和 uRaman。它们都能在野外现场应用,为矿产勘查和矿山开采决策实时提供数据,提高工作效率。特别是随着 detectORE TM 的发明,可使用常规 pXRF 在野外营地现场测定微量

金(检出限  $10\times10^{-9}$ ),对于金矿勘查可能具有革命性意义。

4)数据处理。大数据时代,在充分理解数据本质基础上,利用机器学习和人工智能方法能挖掘地球化学数据信息。

## Applied geochemistry for future resource exploration —Summary of the 28<sup>th</sup> IAGS conference

WANG Ming-Qi, YE Rong

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

**Abstract:** As partner of the Resources for Future Generations 2018 Conference, the Association of Applied Geochemists (AAG) held the IAGS 2018 symposium as an integral component of the RFG18 conference in Vancouver, BC, Canada during June 16 ~ 22, 2018. The RFG covered Energy, Minerals, Water and the Earth. 113 oral presentations showcasing through specific the advancements and applications of geochemistry in the spheres of exploration and environment were made in 10 AAG sessions covering Minerals and Water during the IAGS 2018 symposium.

**Key words:** applied geochemistry; minerals; water; resource exploration

(本文编辑:蒋实)