

勘查地球化学 80 年来重大事件回顾

王学求

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 中国地质科学院应用地球化学重点开放实验室,
国土资源部地球化学探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000)

提要: 勘查地球化学诞生于 20 世纪 30 年代初期, 经历了 80 年的发展, 已经成为一门重要的地球化学分支科学, 为矿产勘查做出了巨大贡献。本文对勘查地球化学过去 80 年发展历程的标志性事件进行了回顾; 对勘查地球化学基础理论研究进展和对矿产发现做出的贡献进行了概括总结; 对近年勘查地球化学最为活跃的研究领域进行了简要介绍。在 20 世纪 70 年代以前勘查地球化学作为一门独立学科已经形成, 它的标志性事件是经典教科书的出版、勘查地球化学专业设立、勘查地球化学杂志的创刊、国际勘查地球化学家协会成立和勘查地球化学学术会议定期召开。在基础理论研究方面体现在局部地球化学分散模型和区域分布模式的建立。一些国家大规模区域或国家地球化学调查或填图计划的实施, 为全球 3 次批量矿床发现作出了巨大贡献。近些年勘查地球化学最为活跃的研究领域集中在: (1) 在微观尺度上, 从纳米水平和分子水平研究化学元素的分散和迁移机理, 发展覆盖区找矿的地球化学技术; (2) 在区域尺度上, 继续开展区域地球化学调查或填图理论与技术研究, 为成矿带地球化学评价和靶区圈定提供高质量数据和图件; (3) 在全球尺度上, 致力于全球地球化学基准建立, 为了解全球化学元素分布背景、过去地球化学演化和预测未来全球化学变化提供定量评价标尺。

关键词: 勘查地球化学; 标志性事件; 地球化学填图; 全球地球化学基准; 深穿透地球化学

中图分类号: P622+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)06-0322-09

1 勘查地球化学的诞生及其标志性事件

1.1 勘查地球化学的诞生

勘查地球化学作为地球化学的一门分支科学, 是指系统测量天然介质中化学元素或化合物含量和组成用于矿产勘查的科学(Hawkes 和 Webb, 1962)^[1]。它的目的是发现岩石、土壤、水系沉积物、水、植物及气体等介质中形成各种类型的地球化学分散模式或异常去追踪和发现新的矿床或油气藏。

20 世纪 30 年代初期, 受 V.M.Goldschmidt, V.I. Vernadsky 和 A.E.Fersman 等的影 响和光谱分析技术的应用, 前苏联和斯堪的纳维亚诞生了勘查地球化学^[2], 至今已有 80 年的历史。20 世纪 40 年代, 第二次世界大战后, 由于世界经济起飞对矿产需求的大

增, 勘查地球化学方法开始引入美国和加拿大。20 世纪 50 年代以后, 开始传入英国及其殖民地国家^[3], 同时, 中国、澳大利亚、印度和世界上的其他地区也开始了试验研究。

勘查地球化学与理论地球化学研究的最大不同点在于要进行大批量样品分析测试, 而成百上千, 乃至上万件样品的分析测试, 就需要一种低成本的高速分析技术, 因而勘查地球化学诞生和发展与分析技术的出现和发展是密不可分的。20 世纪 30 年代末和 40 年代初发射光谱方法的出现导致了勘查地球化学在前苏联的诞生; 50 年代湿法快速比色方法的出现推动了地球化学勘查方法在美、英、加、德、法等国的发展; 70 年代 X 射线荧光方法和原子吸收方法的大规模应用则使勘查地球化学从一种局部的辅助性的找矿方法开始向区域性的战略性方法转

收稿日期: 2012-11-28; 改回日期: 2012-12-27

基金项目: 深部探测专项“地壳全元素探测技术与实验示范”(SinoProbe-04)和 IUGS/IAGC Task Group on Global Geochemical Baselines 资助。

作者简介: 王学求, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 从事勘查地球化学研究; E-mail: wangxueqiu@igge.cn。

变; 90 年代等离子质谱法又大大地提高了微量元素和痕量元素分析灵敏度, 增强了地球化学方法探测弱信息的能力和大大提高了地球化学填图水平。

中国从 1951 年开始地球化学勘查实验研究, 已经走过了整整 60 年的历史。谢学锦等(2010)^[3]在《二十世纪中国化探》一书中对中国化探 50 年(1950—2000 年)的历史进行了系统回顾和总结。本文将从国际视角对勘查地球化学 80 年的历史进行简要回顾和总结。

1.2 勘查地球化学学科形成的标志性事件

勘查地球化学历经 80 年的发展, 已经从经验或技术发展成为一门地球化学分支科学, 可以以下重要性事件作为学科形成的标志(图 1):

(1) 勘查地球化学诞生: 20 世纪 30 年代初期, V. M. Goldschmidt, V. I. Vernadsky 和 A. E. Fersman 等的影响和光谱分析技术的应用, 前苏联和斯堪的纳维亚诞生了勘查地球化学^[2]。中国在 1951 年开始地球化学探矿试验^[3]。

(2) 经典教科书出版: 经典教科书出版是一个学科形成的重要标志。1941 年前苏联的 Ye A Sergeev 出版了《地球化学探矿法》一书^[4]。这是世界上第一

本系统阐述地球化学勘查理论与方法的著作。1962 年美国 H. E. Hawkes 与 J. S. Webb 《矿产勘查的地球化学》(Geochemistry in Mineral Exploration) 一书出版^[1], 1974 年加拿大 AA Levinson 《勘查地球化学导论》(Introduction to Exploration Geochemistry) 一书出版^[2]。这两本著作成为西方国家经典教科书, 系统地阐述了勘查地球化学的理论体系与方法学。1977 年前苏联 A. Beus 和 S. V. Grigorian 《矿床地球化学勘查方法》(Geochemical exploration methods for mineral deposits) ^[5]一书系统阐述了原生晕找矿方法和原生晕元素分带理论以及利用原生晕找盲矿所取得的辉煌成就。1979 年谢学锦的《区域化探》^[6]一书对区域地球化学调查方法进行了系统阐述, 为区域化探全国扫面计划奠定了基础。

(3) 勘查地球化学专业设立: 1954 年英国帝国理工学院成立应用地球化学研究室, 开始讲授勘查地球化学课程。在中国, 1956 年南京大学开始创建地球化学专业, 1960 年北京地质学院设立地球化学与地球化学探矿专业。

(4) 国际地球化学勘查学术会议召开: 1966 召开了第一届国际地球化学勘查学术会议 (The 1st

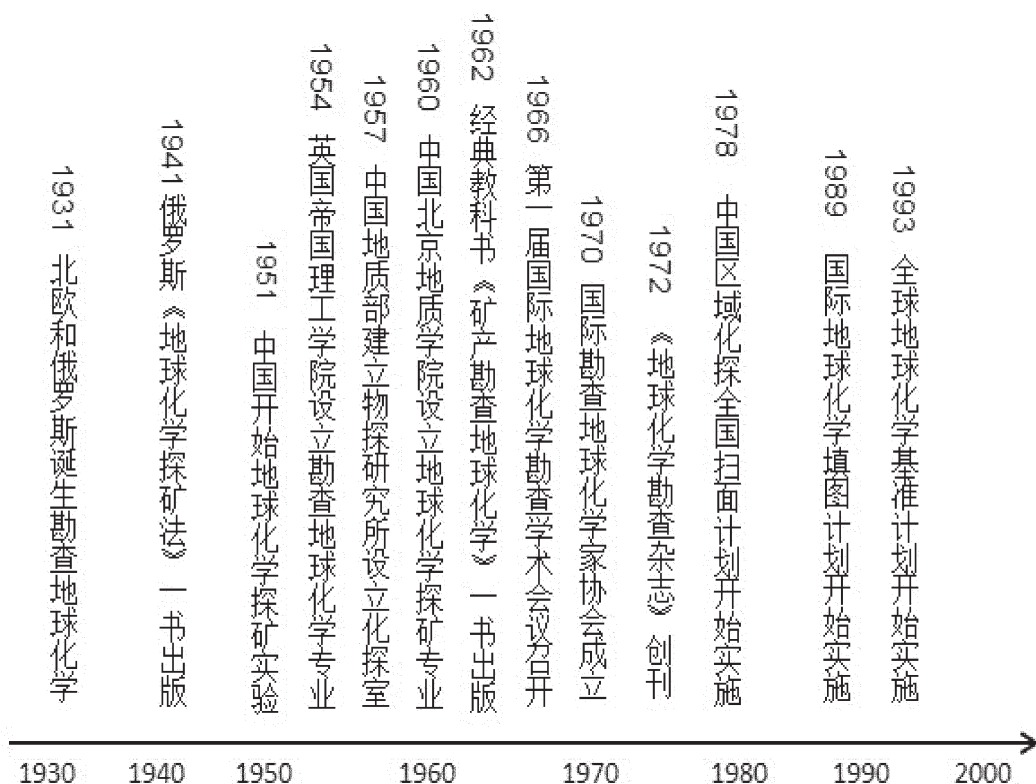


图 1 勘查地球化学形成的标志性事件

Fig.1 Landmark events of exploration geochemistry in the growing up process of the past 80 years

International Geochemical Exploration Symposium), 以后基本上每两年召开一次, 第 25 届于 2011 年在芬兰召开。国际地球化学勘查学术会议诞生, 为勘查地球化学家搭建了面对面学术交流平台。

(5) 勘查地球化学家协会成立: 1970 国际勘查地球化学家协会成立 (The Association Exploration Geochemists)。

(6) 《地球化学勘查杂志》创刊: 1972 年国际《地球化学勘查杂志》(Journal of Geochemical Exploration) 的创刊, 使得勘查地球化学家可以更深入、更迅速地发表最新研究成果, 广泛地传播勘查地球化学知识。

2 基础理论的建立

2.1 局部地球化学分散模式

勘查地球化学的理论是基于成矿物质在成矿过程中围岩中留下原生分散晕或在成矿以后分散在四周土壤、水系沉积物、水、植物及气体中的次生地球化学分散晕, 根据这些元素变化轨迹或分散模式去追踪和发现新的矿床。图 2 是简化的勘查地球化学分散模型^[7]。这一分散模型包含原生分散和次生分散过程。原生分散是指成矿过程中分散在岩石中的地球化学模式, 也称作原生晕。Hawkes(1957)^[8]将原生地球化学模式划分为: ①面形模式 (areal

patterns), 来自深部的热液或其他流体浸润于一个大的岩体中所形成的宽广模式; ②围岩模式 (wall rock patterns), 邻近热液通道的岩石被热液活动的改造; ③渗滤模式 (leakage patterns), 热液沿通道、构造和微裂隙运动所析出的矿液留下的模式。渗滤模式在矿体勘查中尤为重要, 因为原生晕的组分分带和原生晕的几何形态都是建立在这一模式的基础上的, 这一模式为我们利用原生晕寻找隐伏矿床奠定了理论基础。

次生分散是指矿体和原生异常在风化过程中所含的元素会遭到侵蚀, 从原来的地点分散出去进入表生环境介质中 (原地风化残积物、坡积物、水系沉积物、地表水和地下水、生物和气体等) 形成次生异常。①碎屑模式, 次生模式的成因水、冰、风的机械搬运和重力作用对固体介质的搬运而形成的模式 (坡积物、水系沉积物等); ②水成模式, 地下水和地表水对元素的液体搬运所形成的异常模式; ③生物成因模式, 植物的代谢可以将元素从土壤中积累起来, 微生物也可以积累金属形成异常模式; ④气体分散模式, 气体包括烃类气体、放射性成因气体、二氧化碳气体、二氧化硫气体及汞蒸气; ⑤物理化学分散模式, 近些年的研究发现有些模式与上述分散模式都无法解释。相继提出离子扩散、电化学梯度模式、蒸发迁移和毛细管作用。⑥多成因接力传递模式。事实

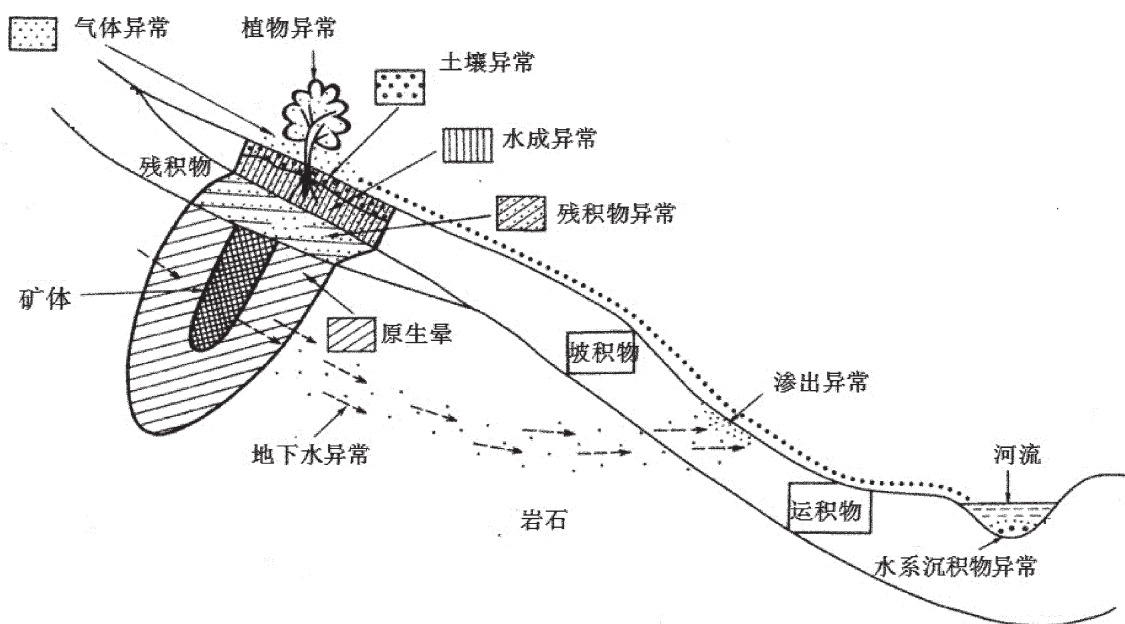


图 2 勘查地球化学分散模型^[7]

Fig.2 Simplified dispersion models of exploration geochemistry

上在自然界中, 地球化学分散模式的形成可能不是一次作用因素形成的, 往往要经历两次以上过程的接力传递才能形成。如地下水的循环可以将成矿元素搬运至近地表潜水面附近, 植物再对水分吸收, 植物腐烂再沉积到土壤中, 在地表形成异常, 这就是接力迁移模式。

2.2 区域地球化学分散与分布模式

上述分散理论模型, 很好地解释了局部地球化学异常的成因。但对大规模区域甚至全球地球化学模式的成因却没有给出解释。从 20 世纪 80 年代开始, 随着一些大规模地球化学填图或调查计划的实施, 发现更为宽广的区域甚至洲际尺度地球化学模式。如全国发现了一大批金异常面积可达几百到上万平方米区域异常或地球化学省。当时, 对金表生行为的认识还都限于金是呈颗粒形式存在, 密度又大, 不会在水系中长距离迁移, 而在水系沉积物中为什么会形成大规模金地球化学异常? 王学求等^[8]通过对金颗粒的研究发现: 岩石、土壤、水系沉积物等都大量存在 <5 μm 的超微细金(包括微粒金、胶体金和亚微米至纳米级的各种金颗粒)(表 1)。超微细金具有极强的物理活动性, 几乎能被各种营力做长距离搬运。大规模区域金异常是由超微细金所形成的(图 3)。这一发现圆满地解释了大规模区域金异常的形成机理, 为金矿区域化探奠定了理论基础^[9]。

实际上, 大规模地球化学异常具有多层套合特征, 即地球化学省包含区域异常, 区域异常又包含若干局部异常。这种多层套合地球化学异常是由高背景岩石、成矿作用、矿床次生分散相互叠加的结果。高背景岩石提供了大规模地球化学省形成的初始物源分布, 成矿过程使得元素的进一步富集形成区域

表 1 颗粒金与超微细金各自所占的比例 (引自王学求和谢学锦, 2000)^[8]

Table 1 Proportions of coarse and ultrafine Au particles

样品号	颗粒金(>5 μm)比例/%	超微细金(<5 μm)比例/%
岩石	26%~93	63.7
土壤	53%~99	77.2
水系沉积物	36%~90	54.2

地球化学异常, 矿床风化产生元素的点源分散进一步形成叠加异常浓集中心, 最后形成了具有多层套合的地球化学异常。这种新的认识核心在于多层套合地球化学模式是由元素的区域分布和矿床的点源分散相互叠加的产物。

3 大规模国家或区域地球化学调查计划与批量矿床发现

勘查地球化学自 20 世纪 30 年代诞生以来, 由于大规模区域或国家地球化学调查计划的实施, 为全球矿产发现作出了决定性的贡献, 其中最具有代表性的是 3 次大规模计划带动 3 次全球大规模矿床发现高潮: 一是从 20 世纪 30 年代一直延续到 70 年代的前苏联金属量测量计划导致一批斑岩铜矿的发现; 二是 20 世纪 70 年代美国和加拿大铀资源调查计划导致许多铀矿产地的发现; 三是自 20 世纪 80 年代一直延续至今的中国区域化探扫面计划的实施导致了数百个金矿的发现。

3.1 前苏联金属量测量计划与斑岩铜矿的发现

从 20 世纪 30 年代一直延续到 70 年代在前苏联地区使用地球化学方法发现了许多斑岩铜矿。前苏联 1932—1933 年利用岩屑采样在中亚 Almalyk 地区发

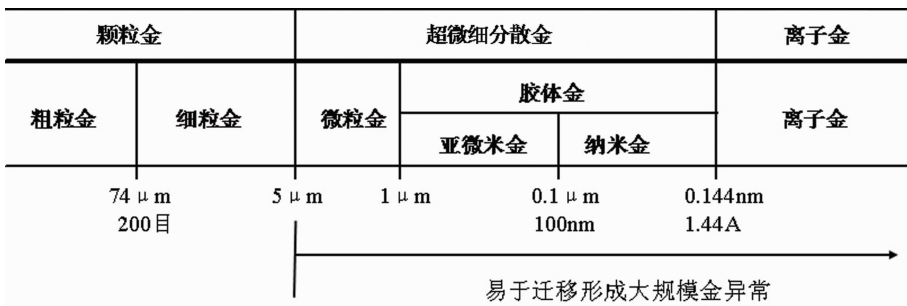


图 3 金的分类图谱与活动性^[8]

Fig.3 Category of gold particle distribution

现巨型 Kalmakyr 和 Balikti 斑岩铜矿^[9]。这是前苏联第一个地球化学勘查成功实例,也是世界上首个报道地球化学找矿成功实例。前苏联另一个重大发现是利用水系沉积物和土壤测量方法在远东 Baimsky 地区发现的巨型 Peschanka 斑岩型铜金矿^[1]。这一发现结束了位于前苏联远东地区环太平洋带没有大型斑岩型铜矿的历史。1955 年,前苏联地质部门命令所有地质测量必须系统地开展土壤和风化岩石的地球化学测量工作^[2]。1947—1969 年,哈萨克斯坦共采集了超过 6 千万件地球化学样品,采样工作按照每年数百万件的速度进行。

3.2 美国和加拿大地球化学调查计划与铀矿发现

20 世纪 70 年代美国和加拿大根据世界铀矿资源紧缺的情况分别制定了全国性的铀矿资源普查计划,其核心部分是水系沉积物地球化学测量与水化学测量(美国)或湖积物测量(加拿大)。美国的国家铀资源评价计划(National Uranium Resource Evaluation Program, NURE)^[13],使用每 10 km² 一个样的采样密度系统采集水和水系沉积物。加拿大联邦-省铀区域勘查计划(Federal-Provincial Uranium Reconnaissance Program)^[14]于 1975 年开始进行,采样密度 13 km² 一个湖积物或水系沉积物样品。使用激光荧光等分析铀等元素。这两个计划发现了一批新的铀矿产地,特别是为盆地砂岩型铀矿的发现作出了巨大贡献。

3.3 中国的区域化探扫面计划与大批金矿发现

“区域化探全国扫面计划”^[15]自 1979 年开始实施,是一项持续时间最长的科学与调查密切结合的大计划,至今已进行了 30 余年,覆盖了全国近 700 余万平方千米国土的面积,一直在中国矿床的发现中起着主导作用。该计划使用水系沉积物作为采样介质,1 个样/km²,1 组合分析样/4 km²,分析 39 种元素。编制了 39 种元素约 900 幅 1:200 000 地球化学图,并分别使用每个 1:2.5 万,1:5 万和 1:10 万图幅 1 个平均值数据编制了 1:15 000 000 中国地球化学图集出版^[16]。这一计划提供的巨量信息为新矿床发现做出了巨大贡献。从 1981 年至 2005 年的 20 多年间,原地矿部门和国土资源部门根据“区域化探全国扫面计划”在全国共圈定异常 58 788 处(表 2)^[17],根据这些异常检查发现矿床 3 349 处,为中国矿床的发现起到了巨大作用,其中发现的金矿占 70%以上。

4 覆盖区勘查地球化学理论与技术研究进展

4.1 理论研究取得实质性突破

覆盖区找矿一直是勘查地球化学研究的焦点,特别是自 20 世纪 90 年代开始,在国内外诞生了电地球化学方法(CHIM),地气法(GEOGAS);酶提取法(ENZYME LEACH),活动态金属离子法(MMI);金属元素活动态提取方法(MOMEQ)等^[18-23]。在此背景下,“深穿透地球化学”(Deep-penetrating Geochemistry)的概念开始被提了出来^[24]。尽管这些技术取得了很好的试验和应用效果,但理论研究一直处于推测或描述性模型阶段。近几年,在迁移机理研究上取得两项突破性进展:一是发现纳米金属(铜、金等)微粒的存在和迁移证据^[25-28];二是在矿体上方树叶植物细胞中观测到成矿元素(Ravi Anand 内部报告,未发表)。从纳米尺度和分子水平直接观测的微观迁移证据使得覆盖区勘查地球化学迁移机理研究从描述性模型向实证性实现了质的飞跃。

4.2 技术研究取得显著进展

目前国内外覆盖区地球化学技术包括以下几个系列:(1)物理分离提取技术:细粒级测量、磁性分离氧化物;(2)电化学测量技术:大电流供电提取技术,小电流独立供电提取技术;(3)选择性化学提取技术:偏提取(Partial extraction),元素有机质形式结合法(MPF),活动金属离子法(MMI),酶提取法(ENZYME LEACH),金属活动态提取法(MOMEQ);(4)气体和地气测量技术:汞气测量、

表 2 化探圈定的异常数及发现矿床数
(根据奚小环,2003 补充)^[16]

Table 2 The number of anomalies delineated by geochemical exploration and deposits discovered

五年计划	发现 异常数	检查 异常数	验证 异常数	发现 矿床数
“六五”(1981—1985)	5711	2042	741	679
“七五”(1986—1990)	4260	1570	661	689
“八五”(1991—1995)	19870	3692	1074	756
“九五”(1996—2000)	17665	5648	1128	782
“十五”(2001—2005)	11282	4671	614	443
合计	58788	17623	4218	3349

烃类气体测量、地气测量等;(5)水化学测量技术:元素测量、硫酸根测量;(6)生物测量技术:植物,细菌。中国在此基础上,研发了系列深穿透地球化学技术,包括:(1)纳米微粒探测技术;(2)元素活动态提取技术;(3)地气测量技术;(4)偶极子独立供电的电化学提取技术。这些技术先后在国内外已知隐伏矿床进行了广泛的试验,积累了大量观测数据,取得了良好的试验与应用效果。各种技术总体还在完善之中,目前最为稳定的是使用土壤作为采样介质的各种选择性提取技术或微粒分离技术。

5 全球地球化学基准建立

全球地球化学基准计划 (Global Geochemical Baselines Project, IGCP360) 开始于 1993 年^[29]。它的目的是用系统的全球网格化采样, 获得全球地球化学基准图, 作为衡量全球化学元素含量未来变化的参照标尺。部署 5000 个全球基准网格 (Global Reference Network Grid, GRN) 覆盖整个地球陆地面积, 全球基准参考网网格的划分纬向是以赤道 0° 为起点, 经向以格林威治 0° 经线为起点, 每个格子

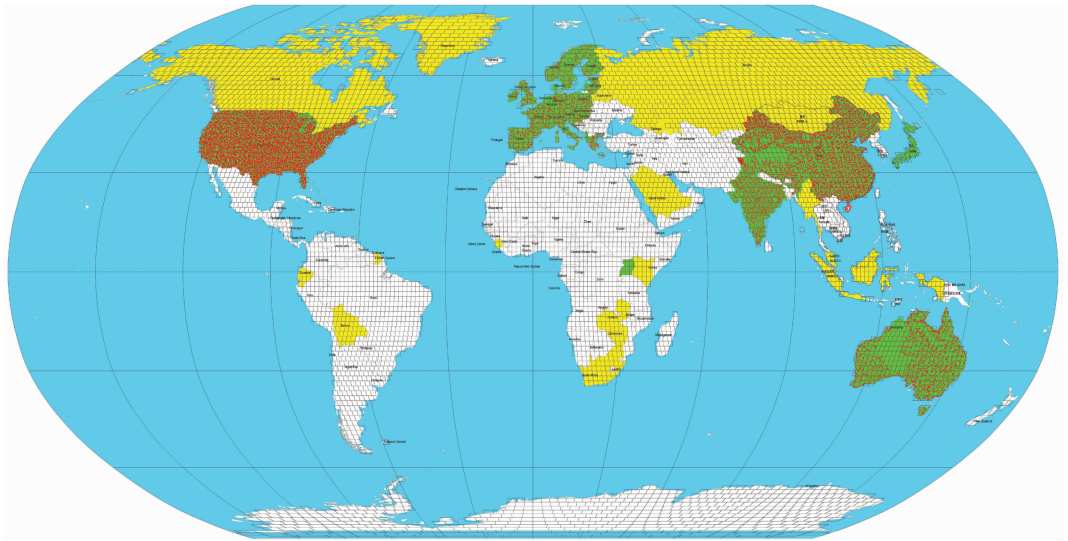


图 4 全球地球化学基准网及采样进展(每 1 网格大小是 160 km×160 km)

Fig.4 Global-scale geochemical reference networks covering whole China (each grid equal to 160 km by 160 km)

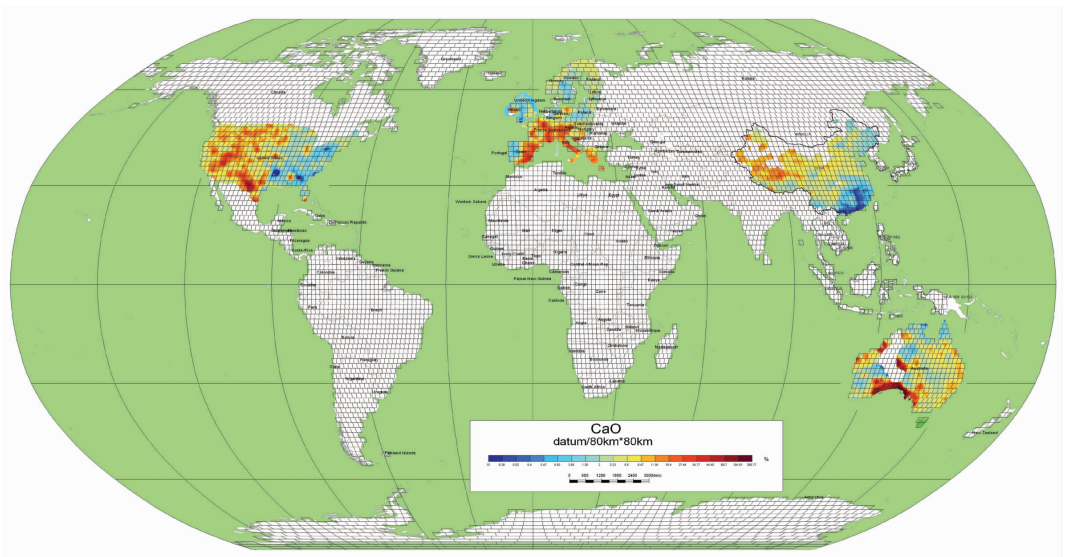


图 5 全球 CaO 地球化学基准图

Fig.5 Global CaO geochemical map

大小为 160 km×160 km, 全球共有约 5000 个网格。尽管全球地球化学基准计划于 1993 年就提了出来, 但前 10 年进展非常有限, 只有中国和北欧国家开展了少量试验性工作^[30,31]。但近 10 年进展迅速, 欧洲 26 个国家^[32]、中国^[33]、美国^[34]、澳大利亚^[35]、印度^[36]都已经基本完成采样工作, 覆盖了全球 22% 的面积(图 4)。初步制作了覆盖这些国家的全球地球化学基准图。图 5 是全球 CaO 地球化学基准图。CaO 的分布与全球降雨量和酸雨分布非常一致, CaO 高含量分布于干旱沙漠地区, 低含量分布于降雨量大或酸雨地区。对全球地球化学基准建立有的两个技术难题也取得共识: 一是全球代表性采样介质在山区使用河漫滩沉积物或泛滥平原沉积物, 在平原区使用土壤, 在干旱沙漠或半干旱草原区使用汇水盆地沉积物^[37]; 二是为准确建立地球化学基准值, 必需完善配套分析方案和严格质量监控, 以现代先进的大型分析仪器, 如等离子体质谱仪(ICP-MS)、等离子体光学发射光谱仪(ICP-AES)和 X 射线荧光光谱仪(XRF)为主, 配合其他多种专用分析仪器及技术组成的 20 种配套分析方法测试 76 个元素^[38]。

6 勘查地球化学近期和未来研究方向

勘查地球化学近期和未来研究主要集中在以下 3 个方面:

(1) 在微观尺度上, 从纳米水平和分子水平研究化学元素的分散和迁移机理, 发展覆盖区找矿的地球化学技术。

(2) 在区域尺度上, 继续开展区域地球化学调查或填图理论与技术研究, 为成矿带地球化学评价和靶区圈定提供高质量数据和图件。

(3) 在全球尺度上, 致力于全球地球化学基准建立, 建立覆盖全球的地球化学基准网, 为了解全球化学元素分布背景、过去地球化学演化和预测未来全球化学变化提供定量评价标尺。

本文只介绍了狭义的勘查地球化学, 没有包含环境或生态地球化学调查评价等内容。中国在多目标地球化学调查和生态环境地球化学调查取得了丰富的成果, 在国外, 特别是欧洲, 涉及环境、生态、农业、牧业、城市地球化学调查和评价的工作和成果非常多, 俄罗斯也是最早开展多目标地球化学调查的国家。由于笔者知识有限和本文篇幅所限, 不能涵盖这方面内容, 相信会有专家专门撰文回顾和总结全

世界这方面的研究进展和成果。

参考文献(References):

- [1] Hawkes H E, Webb J S. Geochemistry in Mineral Exploration [M]. New York: Harper & Row, 1962: 1-415.
- [2] Levinson A A. Introduction to Exploration Geochemistry (second edition) [M]. Applied Publishing Ltd., Wilmette, Illinois, U.S.A. 1980: 1-612.
- [3] 谢学锦, 李善芳, 吴传璧, 等. 二十世纪中国化探(1950—2000) [M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1-618.
Xie Xuejin, Li Shanfang, Wu Chuanbi, et al. Exploration Geochemistry in China (1950-2000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 1-618(in Chinese).
- [4] Sergeev Ye. A Geochemical Method of Prospecting for Ore Deposits [M]. USGS (translation from Russian, 1950), 1941: 1-87.
- [5] Beus A A, Grigoryan S V. Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits [M]. Wilmette: Applied Publishing Co., 1977: 1-287.
- [6] 谢学锦. 区域化探 [M]. 北京: 地质出版社, 1979: 1-192.
Xie Xuejin. Regional Geochemical Survey [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979: 1-192(in Chinese).
- [7] Xie Xuejing. Geochemical mapping—evolution of its aims, ideas and technology [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(5): 927-937.
- [8] Hawkes H E. Principles of Geochemical Prospecting. Geological Survey Bulletin 1000—F. United States Government Printing Office, Washington, 1957.
- [9] 王学求, 谢学锦. 金的勘查地球化学—理论与方法·战略与战术 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000: 1-309.
Wang Xueqiu, Xie Xuejin. Exploration Geochemistry of Gold—Principles and Methodology, Strategy and Tactics [M]. Ji'nan: 2000: 1-309(in Chinese).
- [10] Zenin M F. The Balikti porphyry-copper deposit in Almayk [J]. Middle Asia Geological Materials, 1937, 5: 39-61 (in Russian).
- [11] Kotlyar B B. Geochemical Exploration in the Former Soviet Union [J]. Explore, 1996, 91: 1-10.
- [12] Sokolov V A, Alexeyev F A, Bars E A, et al. Investigations into direct oil detection methods [C]//The 5th World Petroleum Congress Proceeding 1, 1959: 667-681.
- [13] Ferguson R B and Price V. National Uranium Resource Evaluation (NURE) Program—Hydrogeochemical and stream-sediment reconnaissance in the eastern United States [J]. J. Geochem. Explor., 1976 6: 103-117.
- [14] Darnley A G, Cameron E M, Richardson K A. The federal-Provincial Uranium Reconnaissance Program. Uranium Exploration '75 [C]//Geological Survey of Canada, Paper, 1975, 75-26: 49-68.
- [15] 谢学锦. 区域化探全国扫面规划 [J]. 物化探研究报导, 1978, 3: 28-36.
Xie Xuejin. Regional Geochemistry—National Reconnaissance

- Project [J]. *Bulletin of Geophysical and Geochemical Exploration*, 1976, 3:28-36(in Chinese).
- [16] 谢学锦, 任天祥, 孙焕振. 中国地球化学图集[M]. 北京:地质出版社, 2012:1-135.
- Xie Xuejin, Ren Tianxiang. *Geochemical Atlas in China* [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2012:1-135(in Chinese).
- [17] 奚小环. 1999-2001 勘查地球化学·资源与环境[J].物探与化探, 2003, 27:1-6.
- Xi Xiaohuan. *Exploration Geochemistry -Resources and Environments 1999 -2001* [J]. *Journal of Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27:1-6 (in Chinese with English abstract).
- [18] Ryss Yu S, Goldberg I S. The partial extraction of metals (CHIM) method in mineral exploration [C]//Method and Technique, ONTI, VITR, Leningrad, 1973, 84:5-19. (In:Bloomstein E. Translation by Earth Science Translation Services of section entitled CHIM surface set-up unipolar extraction. USGS Open-File Report, 1990, 90-462.)
- [19] Kristiansson K, Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of Rn in the ground and a new physical model for the transport[J]. *Geophysics*, 1982, 47(10):1444-1452.
- [20] Clark J R. Enzyme-induced leaching of B-horizon soils for mineral exploration in areas of glacial overburden [J]. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. B:Appl. Earth Sci.)*, 1993, 102:B19-B29.
- [21] Mann A W, Birrell R D, Gay L M, et al. Partial extractions and mobile metal ions[C]// Camuti K S (ed.). *Extended abstracts of the 17th IGES*, 1995, 31-34.
- [22] Wang Xueqiu, Cheng Zhizhong, Lu Yinxu, et al. Nanoscale metals in earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant ore deposits in overburden terrains[J]. *J. Geochem. Explor.*, 1997, 58(1):63-72.
- [23] Cameron E M, Hamilton S M H, Leybourne M I. L, et al. Finding deeply-buried deposits using geochemistry [J]. *Geochemistry - exploration, environment, analysis*, 2004, 4(1):7-32.
- [24] 王学求. 深穿透勘查地球化学[J]. 物探与化探, 1998, 22(3):166-169.
- Wang Xueqiu. Deep-penetration exploration geochemistry [J]. *Journal of Geophysical and Geochemical Exploration*, 1998, 22(3): 166-169(in Chinese with English abstract).
- [25] Cao Jianjin, Hu Ruizhong, Liang Zhirong, et al. TEM observation of geogas-carried particles from the Changkeng concealed gold deposit, Guangdong Province, South China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 101:247-253.
- [26] 王学求, 叶荣. 纳米金属微粒发现——深穿透地球化学的微观证据[J]. 地球学报, 2011, 32(1):7-12.
- Wang Xueqiu, Ye Rong. Findings of Nanoscale Metal particles: evidence for deep-penetrating geochemistry [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2011, 32(1):7-12 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王学求, 张必敏, 刘雪敏. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查[J]. 地学前缘, 2012, 19(3):101-112.
- Wang Xueqiu, Zhang Bimin, Liu Xuemin. Nanogeochemistry: Deep-penetrating geochemical exploration through cover[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3):101-112 (in Chinese with English abstract).
- [28] 叶荣, 张必敏, 姚文生, 等. 隐伏矿上方纳米铜微粒存在形式与成因[J]. 地学前缘, 2012, 19(3):120-129.
- Ye Rong, Zhang Bimin, Yao Wensheng, et al. Occurrences and formation of copper nanoparticles over the concealed ore deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3):120-129 (in Chinese with English abstract).
- [29] Darnley A G, Bjoklund A, Bolviken B, et al. A global geochemical database for environmental and resource management [M]. *Earth Science 19*, UNESCO Publishing, Ottawa:Jacqueline Elsmore and Susan Davis, 1995, 122.
- [30] Bolviken B, Bogen J, Demetriades A, et al. Regional geochemical mapping of Western Europe towards the year 2000 [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, 56:141-166.
- [31] Xie Xuejing. The suitability of floodplain sediment as a global sampling medium:evidence from China [J]. *J. Geochem. Explor.*, 1997,58:51-62.
- [32] Salminen R (chief editor). *FOREGS Geochemical Atlas of Europe, part 1 -background information, methodology, and maps*. Electric publication, URL address:<http://gtk/publ/foregsatlas>, march 15, 2005.
- [33] 王学求. 全球地球化学基准:了解过去,预测未来[J].地学前缘. 2012, 19 (3):7-18.
- Wang Xueqiu. *Global Geochemical Baselines:understanding the past, predicting the future* [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 7-18 (in Chinese with English abstract).
- [34] David B.Smith, William F.Cannon, Laurel G.Woodruff, et al. History and Progress of the North American Soil Geochemical Landscapes Project, 2001-2010 [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19 (3):19-32.
- [35] Carita t P de, Lech M E, McPherson A A. Geochemical mapping 'down under':selected results from pilot projects and strategy outline for the National Geochemical Survey of Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 2008, 8:301-312.
- [36] Govil P K, Krishna A K, Gowd S S, et al. Global geochemical baseline mapping for environmental management in India: an overview. *Global Geochemical Mapping Symposium, Abstracts*, China Geological Survey, 2006:36-40.
- [37] Smith D B, Wang Xueqiu, Reeder S, et al. The IUGS/IAGC Task Group on Global Geochemical Baselines[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19 (3):1-6.
- [38] 张勤, 白金峰, 王焯. 地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统[J]. 地学前缘, 2012, 19 (3):33-42.
- Zhang Qin, Bai Jinfeng, Wang Ye. Analytical scheme and quality monitoring system for China Geochemical Baselines [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19 (3):33-42 (in Chinese with English abstract).

Landmark events of exploration geochemistry in the past 80 years

WANG Xue-qiu

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: Exploration geochemistry has made great achievements both in basic knowledge of dispersion and distribution of elements and applications in mineral exploration since it was born in the 1930s. The author has generalized its growing up landmarks, reviewed its theoretical studies and contributions to mineral discoveries in the past 80 years, and described most active research fields at present. The growing up progress can be seen from the landmarks such as publication of classic text books, teaching of exploration geochemistry in universities, issuing of journals of geochemical exploration, establishment of associations of exploration geochemists and initiation of international exploration geochemistry symposia. Theoretical studies have been based on dispersion and distribution patterns of elements and mechanisms which control the dispersion and distribution of the elements. Exploration geochemistry, particularly applied to regional geochemical surveys/mapping, has delineated numerous geochemical anomalies leading to mineral discoveries all over the world. At present, the most active research fields are focused on 1) nano-scale and molecular-level understanding of migration mechanism of elements from covered mineral deposits, 2) regional-scale geochemical mapping; 3) global-scale geochemical baselines.

Key words: exploration geochemistry; landmarks; geochemical mapping; global geochemical baselines; deep-penetrating geochemistry

About the first author: WANG Xue-qiu, male, born in 1963, doctor, senior researcher, engages in the study of exploration geochemistry; E-mail: wangxueqiu@igge.cn.