

doi: 10.11720/wtyht.2019.0197

奚小环. 自然资源时期: 大数据与地球系统科学——再论全面发展时期的勘查地球化学[J]. 物探与化探, 2019, 43(3): 449-460. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0197>

Xi X H. Natural resources period: Big data and systematic science of the earth—More on exploration geochemistry during the overall development period [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 449-460. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0197>

自然资源时期: 大数据与地球系统科学 ——再论全面发展时期的勘查地球化学

奚 小 环

(中国地质调查局, 北京 100037)

摘 要: 中国勘查地球化学全面发展的重要标志和本质特征是大数据信息与地球系统科学。勘查地球化学的全面发展坚持资源与环境并重方针, 真实生动地反映国家经济社会发展的历史轨迹, 在科学技术领域具有典型意义。自然资源时期地质工作关于资源内涵从矿产资源、国土资源到一切自然资源, 关于环境内涵从地质环境、国土环境到包括山水林田湖草生命共同体在内的一切自然环境。本文继 2008 年对此有所评述后, 在国家自然资源部成立之际, 地质工作面临深刻转型之时, 从大数据信息科学与自然资源地球化学调查、建立地球系统科学指导的自然资源地球化学理论体系与自然资源地球化学评价体系, 以及针对自然资源领域重大科学问题, 深化地球化学应用研究与理论研究, 构建完善的科学体系等若干值得注意的方面再次就此议题加以评论。勘查地球化学的长期目标是通过大数据信息与地球系统科学研究揭示自然资源与自然环境状况, 实现对地球资源的科学开发、合理利用和整体保护, 创造人类与地球和谐共处的生存环境。由此, 转型和升级贯穿中国勘查地球化学发展的全过程。地球化学将以形态和内涵的系统性、综合性、整体性作用, 以及应用实践的多目标全方位面貌出现在国家行业部门与科技领域, 极大地拓展和深入经济社会发展各个方面。勘查地球化学以方法技术优势实行大调查、大数据、大应用战略, 建立大环境、大生态、大地球观, 向大地质、大资源、大科学转变, 为解决自然资源与生态环境问题提供地球化学方案, 将全面发展时期的勘查地球化学从大数据信息应用优势和地球系统科学理论高度提升到“大地球化学”境界。

关键词: 自然资源; 生态文明; 大数据; 地球系统科学; 科学体系; 发展历程; 升级和转型; 勘查地球化学
中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)03-0449-12



0 引言

中国勘查地球化学全面发展的两个重要标志和本质特征, 即大数据信息与地球系统科学。勘查地球化学全面发展时期以大数据信息运用和科学技术优势取得世人瞩目的巨大成就, 真实生动地反映国家经济社会发展的历史轨迹, 在科技界具有典型意义。本文继 2008 年对此有所评述^[1]后, 在国家自然资源部成立之际, 地质工作面临深刻转型之时, 再次就此议题略作评论, 以供参考。

1 勘查地球化学发展历程

中国勘查地球化学从初创发展至今将近 70 年期间, 紧随国家经济社会发展赋予地质工作的职能和职责, 历经矿产资源时期(1949~1998 年)与国土资源时期(1998~2018 年), 正在进入自然资源时期(2018 年)。与此相适应, 勘查地球化学在各重要时期, 特别是在国家发展重点转移的关键时刻作出正确的抉择, 引导学科领域从战术发展阶段(1949~1978 年)、战略发展阶段(1979~1998 年)进入全面发展阶段(1999 年至今)^[1], 开创学科新局面, 开拓

收稿日期: 2019-02-22

作者简介: 奚小环(1949-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事地球化学调查与评价工作。

学科新边界,形成一波又一波的发展浪潮。

在矿产资源时期,勘查地球化学在地质找矿为中心方针指导下,以矿区化探和全国区域化探为标志,从战术发展阶段提升到战略发展阶段,实现第一次发展浪潮到第二次发展浪潮的飞跃。在国土资源时期,勘查地球化学审时度势,不失时机地开启资源与环境并重工作新局面,以全国多目标区域地球化学调查为标志实行重大结构性调整,由战略发展阶段向全面发展阶段转型升级,兴起第三次发展浪潮。进入自然资源时期,国家经济社会发展方式发生根本改变,以资源环境为代价的消耗型粗放式的发展方式难以为继,实现人与自然生命共同体和谐发展,为生态整体保护、系统修复和综合治理提供体制保障,开创自然资源开发利用和保护工作新局面,给予地质工作新的更加宽广的发展空间和服务领域,勘查地球化学将在调查评价、应用实践方面发挥更多作用,在学科理论、技术方法研究方面取得更大突破,带动勘查地球化学进入新一轮的全面发展浪潮。

勘查地球化学历经三大发展时期,掀起三次发展浪潮,既是一个完整的具有连续性的发展过程,体现在应用领域的逐步扩大与科学技术的不断进步,又分别形成反映时代特征的具体定位与中心命题。从第一次到第二次发展浪潮是以地质找矿为中心的矿产资源异常评价,主要体现在对区域化探发现的大量局部异常进行分类、筛选与检查,对具有找矿前景的异常进行工程验证,实现地质找矿突破,相当于战术性的定性评价,带有明显的计划经济性质和工业文明时代特征。第三次发展浪潮是以资源与环境并重的国土资源地球化学评价,包括矿产资源潜力地球化学评价与土地质量地球化学评价,具有明确的服务全社会全体公民的国家公益性质和推动生态文明建设导向。其中矿产资源潜力地球化学评价主要任务是圈定找矿地球化学远景区带,进行矿产资源定量预测和资源量估算^[2-5]。土地质量地球化学评价从土地资源与土地环境两个方面进行全面评价,划分土地资源环境质量等级,对优质土地保护开发,对污染土地修复治理,服务国土资源数量、质量与生态三位一体管护^[6-7]。自然资源时期将在生态文明建设思想主导下进一步形成山水林田湖草生命共同体为系统的自然资源地球化学调查与评价体系,为全面发展时期的勘查地球化学提供更加广阔的空间,推进勘查地球化学在未来发展的广度与深度上达到更高水平和更高境界。

全面发展阶段的勘查地球化学,在国土资源时期已经初步构建以地球化学调查为基础,地球化学

理论为指导,融合资源与环境为一体的现代勘查地球化学发展的总体框架和科学体系^[8],在总体发展方针上实现由地质意义上的局部系统、区域系统向地球系统的重大转变。在矿产资源领域以全国区域化探为基础,成矿地球化学理论为指导,建立调查体系、理论体系、评价体系与方法体系,在全球、区域、普查与详查各级尺度上进行资源潜力评价。生态环境领域以全国多目标区域地球化学调查为基础,生态地球化学理论为指导,建立调查体系、理论体系、评价体系、监测预警体系、治理修复体系及方法技术体系,在全球、区域、局部各级层面开展生态地球化学评价^[9-28]。资源环境领域的地球化学调查与评价从地球系统高度涵盖自然资源主体,实质上就是自然资源地球化学调查与评价,包括自然资源系统地球化学分布状态、影响效应及变化趋势等,在理论、概念、内涵以及调查评价程序、工作方法技术与指标标准要求等方面为全面发展阶段的勘查地球化学从国土资源时期跨入自然资源时期创立科学理论基础和应用技术条件,特别在生态环境领域发布《多目标区域地球化学调查规范》、《区域生态地球化学评价规范》、《局部生态地球化学评价规范》、《土地质量地球化学评价规范》、《生态地球化学评价样品分析技术要求》、《生态地球化学评价样品分析外部检查质量控制暂行规定》、《多目标区域地球化学数据库建设技术要求》及正在制定的《生态地球化学监测与预警技术要求》等一整套国家与行业标准。勘查地球化学长期建立起来的以地球系统科学为指导的成矿地球化学、生态地球化学理念和资源环境多目标全面发展方向契合经济社会历史发展规律与生态文明建设国策,顺应世界地学领域发展潮流,成为未来自然资源时期地质工作可供借鉴的典型范例。

但是,自然资源时期无论在广度与深度、宏观与微观各方面都将极大地超越过去的时代,形成向资源环境科学领域和应用实践纵深发展态势,在调查评价、方法理论及技术指标标准等方面提出新的问题和新的要求。勘查地球化学的发展仍然面临诸多认识方面问题和应用实践问题,需要认真研究和应对。

2 若干值得关注的问题

2.1 大数据信息科学与自然资源地球化学调查体系

未来地球科学领域必然是大数据信息科学的天下。地球化学大数据信息科学研究地球系统本质的共性的物质属性,从矿产资源、国土资源扩展到一切

自然资源,从地质环境、国土环境扩展到包括山水林田湖草生命共同体在内的一切自然环境,在很大程度上改变以往仅仅采用随机性“小数据”推演普遍性大科学问题的思维方式与研究路线,进入大数据信息主导的自然资源时代。

全面发展时期的勘查地球化学在资源与环境两个方向上实现自然资源大数据信息应用,形成自然资源地球化学调查体系。在矿产资源方面建立概查化探、区域化探、普查化探与详查化探体系^[8],在生态环境方面建立多目标区域地球化学调查(生态地球化学区域调查)、生态地球化学普查、生态地球化学详查与生态地球化学精查体系^[8],从全局的、整体的高度逐步深入地聚焦和认识资源环境重大科学问题,以大数据信息集群优势在土地评价、矿产勘查、生态环保、农业经济、卫生健康乃至国土规划、城乡建设、精准扶贫等行业部门起到举足轻重作用,在地质学、生态学、环境学、土壤学、生物学、农学及至全球变化、全球环境、全球治理等科学领域进行开创性研究,在某些重要方面站在引领地位,成为地质领域认识和解决资源环境问题的基本方法理论范式。正是全国多目标区域地球化学调查的广泛持续开展,首次通过大数据信息揭示我国土壤污染时空分布、组成、强度及其危害程度,早在本世纪初对全国土壤污染态势作出正确判断^[29-30],即由西部、中部至东部地区呈现重金属元素面积增大、种类增多及含量强度增高趋势,证明与我国工业化发展程度相一致。随后证实由工矿业和农业引起的环境污染区域化、流域化问题严重,如长江流域、珠江流域镉等重金属大面积污染问题。即刻引起国家高度重视,部署实施由原环保部、国土资源部负责的《全国土壤现状调查及污染防治》重点项目。这项调查工作于2005年至2013年基本完成,调查成果受到国家各级政府与社会各界极大关注,全国人大环资委于2014年4月25日听取全国多目标区域地球化学调查关于土壤污染情况汇报,原环保部、国土资源部及中国地质调查局先后发布“全国土壤污染状况调查公报(2014年)”、“中国耕地地球化学调查报告(2015年)”等,提高和激发全民环保理念与生态自觉,为国家决策提供重要依据,直接促成国务院《土壤污染防治行动计划》于2016年5月28日发布实施,《中华人民共和国土壤污染防治法》于2018年8月31日获十三届全国人大常委会第五次会议全票通过并颁布施行,明确生态环境、自然资源及农业农村等部门责任与义务,充分体现地质调查工作的重要推动作用。“十九大”中央提出经济社会领域三

大攻坚战,地球化学调查评价工作全面参与其中精准脱贫、污染防治两项重大任务,承担全国土壤污染防治重点项目,担负实施土壤污染详查全过程,为生态文明建设作出重大贡献;通过优质绿色土地资源规划利用及富硒富锌富锗富硼农业特色产业开发在乡村振兴、扶贫攻坚及确保粮食安全等方面发挥独特作用,每年创造经济社会效益数以千亿计,取得一系列重大成果,形成资源环境多目标全面应用发展的生动局面。

全国区域化探与多目标区域地球化学调查在国家资源环境领域发挥重要作用,推动地球化学调查评价工作在全国范围普遍开展,极大促进经济社会发展。可以说,当前地球化学调查覆盖到哪里,土地、矿产、环保、农业等各行业部门和科学领域的评价研究工作就延伸到哪里,国家、地方各级政府和行业部门公益类项目,企业、社会等开发类资金大量投入,在目前地质工作极度萎缩的艰难局面下,引导地质行业广大地质队伍实行战略转移,为地质行业拓展工作领域和发展空间,大踏步地走出传统地质工作范围,深入国家土地资源、生态环境、农业农村等各行业部门和科学领域。自然资源时期将更加有力地推进全国区域性和基础性地球化学调查工作,更加丰富大数据种类,提高大数据精度,确保大数据质量,使不断更新换代的大数据全面覆盖国土疆域,建立国家自然资源大数据信息系统,为地质事业开创新的更加广阔的发展道路。

全国区域化探与多目标区域地球化学调查是整个地质工作的基石和自然资源大数据信息的基本来源,具有国家公益性地质工作主体地位。大数据源于大调查,没有大调查就没有大数据。这里所说的大调查就是建立地球化学调查体系,首先全面实施全国区域化探和多目标区域地球化学调查。自然资源时期从国家对自然资源开发利用和保护高度,要求承担国家资源环境整体保护、系统修复与综合治理等重要职责,将更加突出大数据信息科学的关键作用和应用前景。迄今为止,我国区域化探从1979年至2015年将近40年期间,共计完成670万 km^2 ,尚约300万 km^2 面积亟待完成,包括西藏、新疆、青海、甘肃、内蒙等西部地区,以及东部某些早期工作存在方法技术、分析误差等质量问题需要更新换代的地区。全国多目标区域地球化学调查方面,从1999年至2019年将近20年期间,约计完成260万 km^2 ,未完成面积约400万 km^2 ,主要分布在我国中部与西部广大地区。全国多目标区域地球化学调查主要反映现实生态环境信息,存在时效性问题,应确保其在并

不很长的时期内完成全国范围的调查工作,更需全面规划和稳步实施。中国区域地球化学调查在世界地学界享有较高地位,受到高度评价,成为各国引用和参照的范例。在全国范围实现区域化探与多目标区域地球化学调查的全面覆盖,成为国家基础地质调查和地球科学领域的整装性成果,是这一代地学工作者的历史责任,也为国家与世界地学界所期待。

2.2 确立地球系统科学指导的自然资源地球化学理论体系

地球化学调查数以亿万计的大数据资料隐含地球系统的丰富信息,揭示自然资源与自然环境领域一系列重要科学问题。确立以地球系统科学为指导的成矿地球化学和生态地球化学理论体系,对于从科学高度与深度上提高驾驭大数据信息能力,深化研究矿产资源与生态环境领域重大科学问题,具有重要意义。

地球系统是地球上最大的成矿系统。矿产资源方面建立成矿地球化学理论体系,主要研究地球系统在成壳、成岩、成矿、成晕过程成矿物质与成矿作用问题^[5,31-47],包括成矿地球化学全球分带理论、区域分带理论、次级分带理论与原生分带理论问题。①成矿地球化学全球分带理论主要研究全球成矿系统的成矿物质与成矿作用问题。地球壳幔系统成矿物质原始分异与板块级构造运动产生全球性成矿地质作用,形成全球规模的地球化学分带。成矿地球化学全球分带理论具体研究全球范围成矿洲及成矿洲之间关系的成矿地球化学问题,即成矿洲系列的成矿地球化学问题;研究成矿洲范围成矿域及成矿域之间关系的成矿地球化学问题,即成矿域系列的成矿地球化学问题;研究成矿域范围成矿省及成矿省之间关系的成矿地球化学问题,即成矿省系列的成矿地球化学问题;研究成矿省范围成矿区带及成矿区带之间关系的成矿地球化学问题,即成矿区带系列的成矿地球化学问题。②成矿地球化学区域分带理论主要研究地球区域成矿系统的成矿物质与成矿作用问题。全球构造运动推动区域地质系统多旋回多期次地质作用与成矿物质的持续分异富集,形成具有矿田级次的区域成矿地球化学分带。成矿地球化学区域分带理论具体研究成矿区带范围矿田及矿田之间关系的成矿地球化学问题,即矿田系列的成矿地球化学问题。③成矿地球化学次级分带理论主要研究矿田成矿系统的成矿物质与成矿作用问题。区域地质作用过程构造—岩浆活动促使矿田系统成矿物质进一步分异富集,形成具有矿床级次的成矿地球化学分带。成矿地球化学次级分带理论具

体研究矿田范围矿床及矿床之间关系的成矿地球化学问题,即矿床系列的成矿地球化学问题。④成矿地球化学原生分带理论主要研究矿床成矿系统的成矿物质与成矿作用问题。构造—岩浆活动通过矿床系统复杂物理化学条件岩浆—热液作用促使成矿物质的高度分异富集,形成具有矿体级次的成矿地球化学分带。成矿地球化学原生分带理论具体研究矿床范围矿体及矿体之间关系的成矿地球化学问题,即矿体系列的成矿地球化学问题。

由上所及,成矿地球化学理论研究以成矿物质为主体。地球壳幔形成初始时期成矿物质分异分带与分布组合已成格局,在大洋动力与大陆动力作用推动下,整个成矿地球化学过程是地球系统成矿物质在各级次地质运动中逐步富集与形成密集分带的过程。成矿地球化学理论体系是从地球系统维度研究成矿过程中这种既相互联系、贯通又呈现不同地史年代的显著的时期性和阶段性特征,研究元素地球化学分布、分配、组合、丰度、性质与亲和能力,及其在各种地质作用和物理化学条件中的行为方式、分异演化、迁移富集过程,研究不同成矿级次、成矿时期和成矿阶段的成矿系统与成矿系列问题。

地球系统是地球上最大的生态系统。生态环境方面建立生态地球化学理论体系,主要研究土壤圈元素化合物地球化学分布特征、赋存状态及其在岩石圈、水圈、大气圈、生物圈等整个地球系统循环演化过程与生态环境之间关系问题,包括全球、区域与局部生态地球化学理论问题。①全球生态地球化学理论主要研究碳、氮、汞、硫等全球分布、全球循环及影响全球环境和产生全球变化的地球化学问题,重点研究不同地理气候景观条件土壤碳储量与碳密度分布分配、时空变化、循环演变、汇源转化与影响因素及其对全球变暖响应等。土壤圈有机碳分布及在地球系统循环是全球碳循环及引发全球变化的主要因素^[48-50],可能与汞、硫等协同作用产生全球规模的生态地球化学效应,引发全球生态地球化学危机,成为当今世界超越国界疆域的关系人类生存发展的重大科学问题。②区域生态地球化学理论主要研究镉、汞、铅、砷等重金属区域分布、循环及影响区域环境和产生区域变化的地球化学问题,具体研究特定自然景观条件下各类重金属区域分布组合、含量强度、形态特征、循环过程、交互作用及其生态影响模式等。土壤圈镉元素分布及在生态系统循环是影响区域生态环境的主要问题,各类重金属、有机污染物叠加组合可能产生交互作用和增强区域生态环境效应^[51],是必须重点关注的影响国家经济社会发展的

重要科学问题。③局部生态地球化学理论主要研究有益或有害元素指标分布、循环及影响局部环境和产生局部变化的地球化学问题,侧重于研究具体的特定的地理景观环境中元素指标的特殊地球化学行为与生态效应,包括有益或有害元素指标含量特征、形态价态、循环途径及外部环境与生态效应等,有益组分缺失、超量或有害组分增强都可能形成不利生态影响,有益与有害元素组分共生又可能产生某种复杂地球化学效应等。

经济社会发展全球化必然伴随生态环境问题的全球化。可以认为,全球生态地球化学理论着重于研究整个地球系统生态环境状态问题。全球生态地球化学状态在总体上影响和控制区域与局部生态地球化学状态,而局部的、区域的生态环境问题也可能扩展蔓延成为全球性问题,必须站在全球高度和运用地球系统观加以研究认识,针对生态环境问题在不同层级上揭示和阐述生态地球化学变化过程和演化规律。

2.3 建立以地球化学调查为基础,地球化学理论为指导,方法技术为支撑的自然资源地球化学评价体系

通过地球化学调查与理论研究揭示和认识自然资源与生态环境领域重要科学问题,还必须以方法技术为支撑进行自然资源地球化学评价,针对自然资源科学问题与目标任务确立评价技术路线、工作内容、技术方法、指标标准、质量管控、预期成果及经济社会效益等,解决自然资源与生态环境领域的实际应用问题。

在矿产资源领域,形成以全国区域化探为基础,成矿地球化学理论为指导,地球化学勘查方法技术为支撑的区域矿产资源评价体系,在概查化探、区域化探、普查化探与详查化探^[5,52-54]等各勘查阶段结合地质背景条件建立找矿地球化学分带模式,进行找矿地球化学评价。其中概查化探评价主要任务是研究全球规模的成矿地球化学异常元素组成与分布,在全球尺度上划分成矿地球化学洲、域、省及成矿地球化学区带,建立成矿洲、成矿域、成矿省及成矿区带地球化学异常分带模式,进行全球矿产资源远景评价。区域化探评价主要任务是研究区域规模的地球化学异常元素组成与分布,在区域尺度上划分找矿远景区,建立矿田、矿床地球化学分带模式,进行区域矿产资源潜力评价及踏勘性查证。普查化探评价主要任务是研究矿田规模的地球化学异常元素组成与分布,在矿田尺度上划分异常浓集地带,建立矿床、矿体地球化学异常分带模式,进行成矿类型

判断和矿产资源规模预测及浅部工程验证。详查化探主要任务是研究矿床规模的地球化学异常元素组成与分布,在矿床尺度上划分异常浓集部位,建立矿体地球化学分带模式,定量预测和估算资源储量及进行深部工程验证。

在生态环境领域,建立以全国多目标区域地球化学调查为基础,生态地球化学理论为指导,地球化学方法技术为支撑的生态地球化学评价体系,在全球、区域、局部等各层面上进行生态地球化学评价^[55-60]。其中全球生态地球化学评价主要任务是研究土壤有机碳分布与变化特征及其对全球变化影响,重点研究不同土地利用方式与覆被类型的土壤碳密度和碳储量特征,研究不同自然景观、土壤类型及土地利用方式等因素对土壤碳密度影响路径,研究土壤碳源碳汇转换速率与演化模式及土壤固碳储碳能力与技术方法措施等,通过优化与改进土地利用方式提高土壤固碳储碳能力。区域生态地球化学评价主体是全国大流域、大地域等大型地理景观及其分布的各类生态系统,包括河流生态系统、农田生态系统、城市生态系统、湖泊湿地生态系统、海洋生态系统、草原生态系统、矿山生态系统及森林生态系统等^[55]。局部生态地球化学评价主要针对重要科学问题,包括矿区、污染场地、地方病或优质富硒产地、绿色食品产地等^[56],均已形成较为成熟的规范。通过生态地球化学评价建立生态环境监测监控网络,开展生态地球化学监测预警、治理修复及风险评估与风险管控。为此,有必要研究建立生态地球化学背景与生态地球化学异常参数,作为评价标准衡量和研究地球系统及各层级生态系统各类元素指标循环状态、环境容量与承载能力及可能产生的生态效应,避免生态系统难以承受之重。

自然资源时期,全国以多目标区域地球化学调查为基础,将在大流域和大地域为主体的两个层面上开展区域生态地球化学评价,应格外予以重视。全国大流域评价工作方面,大江大河流域作为山水林田湖草自然生命共同体的时空载体,通常具有类似的地理景观类型、连续的可追溯的物质来源和循环过程、共性的生态环境问题及共同的成因机理,使既分散分布又相互贯通和有机联系的山岭、水系、湖泊、森林、平原、盆地及草原等各类生态系统置于统一的流域范围之中,从江河流域总体上关注自然资源与生态环境问题,从整体高度进行自然资源与生态环境综合评价,实行生态整体保护、系统修复和综合治理。

大流域范围区域生态地球化学评价作为独立的

基本评价单元,包括整体评价与生态系统分类评价两个部分。其中整体评价在国家层面以长江、黄河、淮河、珠江、辽河、松花江及海河等一级大江大河流域为主体,省区、市县层面以洞庭湖、鄱阳湖、太湖、青海湖、滇池等湖泊,汾河、闽江、汉江、浔江、嘉陵江、乌江、雅鲁藏布江、塔里木河、渭河、黑河等二级或三级江河流域为主体。整体评价要点:①按照大地构造单元—成矿系统(成矿域、省、区带等)从宏观上论述元素分布、组成及异常特征,着重阐述元素地球化学分布组成的地质背景、物质来源及控制因素等。主要论述与地质背景的关系,即原生地球化学问题。②结合自然地理景观、生态系统特点等论述元素地球化学分布与组成、背景与异常、富集与贫化等表生特征、影响因素、演化趋势及其环境质量和生态影响。主要论述表生地球化学问题。③按照国家与行业有关指标标准,从养分、环境、健康等元素指标方面对整个流域资源环境地球化学状况进行等级划分和全面评价,提出影响生态环境的主要地球化学问题,以及自然资源开发利用前景。④阐述土壤背景值与基准值系列参数及其变化特征,包括以地壳丰度值为尺度的变化特征,以及以第一环境土壤背景值为基准(即土壤基准值)研究第二环境土壤背景值变化特征与变化规律,揭示土壤污染与土壤环境问题,制定流域范围土壤环境质量标准,评价土壤环境质量与生态风险。⑤阐述土壤碳密度、碳储量及其变化趋势,研究土壤碳源—汇影响因素、变化速率及演化模式,提出有利于土壤固碳、储碳政策建议。全流域整体评价是宏观的和主导性的,在此基础上,进一步按照河流、农田、城市、湖泊湿地、草原、森林、矿山或近海海域等生态系统进行分类评价,其要点:①生态系统主要类型、分布状态及其地理景观、地质背景与地球化学特征等,存在的主要资源环境地球化学问题。②针对生态系统硒、锗、锌各项有益元素指标,镉、汞、铅、砷各类重金属元素指标等生态地球化学问题进行重点评价,包括成因来源、迁移转化、生态效应及变化趋势与生态环境风险等。③依据评价研究成果及有关指标标准对各类生态系统地球化学状况进行质量与生态等级划分,提出自然资源整体保护、系统修复和综合治理措施,以及规划利用建议,经济社会效益等。

全国大地域评价工作方面,多目标区域地球化学调查逐步地覆盖全国广大地区,生态环境问题基本清楚,具备在大的地域范围开展区域生态地球化学评价的条件,如按照华北平原、东北平原、江汉平原、河套平原、呼伦贝尔草原、伊犁草原等广阔地区,

四川盆地、北部湾、河西走廊、哈密—吐鲁番盆地、拉萨河谷等地理景观,江苏、山东、福建、海南岛等区域调查全覆盖省区或市县行政区划,东北、华北、中南、华东、西南、西北六大区,长江三角洲、珠江三角洲、环渤海等国家级经济区,乌蒙山、大别山、秦岭等各大山岭,未来按照黄土高原、青藏高原、云贵高原等巨型板块乃至全国范围等。这就需要在大地域范围及其所分布的江河流域、生态系统三个层面上开展区域生态地球化学评价,确保大地域区域生态地球化学评价的全面性和完整性。如东北平原区域生态地球化学评价包括东北平原及其所分布的松花江、嫩江、辽河等流域,河流、农田、城市、草原、森林、矿山及湖泊湿地等生态系统三个层面。东北平原作为大地域范围首先从整体上开展区域生态地球化学评价,在此基础上,对松花江、嫩江、辽河等流域分别进行整体评价,对生态系统进行分类评价。大地域与江河流域的整体评价及生态系统分类评价要点均如上所述。以此类推,如四川盆地及其分布的长江及嘉陵江、岷江、乌江等流域与各类生态系统,珠江三角洲及其分布的西江、北江、东江等流域与各类生态系统,乌蒙山系及其分布的长江、珠江及赤水河、乌江、清水江等流域与各类生态系统,福建省及其分布的闽江、晋江、九龙江等流域与各类生态系统,广西北部湾及其分布的右江、郁江、南流江等流域与各类生态系统等等。展望未来,当多目标区域地球化学调查覆盖全国疆域,将在全国范围及长江、黄河、淮河等大江大河流域两个层面上开展整体评价,以及对全国河流、农田、湖泊、草原、森林等生态系统进行分类评价。

应该注意,大的地域性整体评价主要侧重于宏观地质背景、自然景观条件及其普遍性的生态地球化学问题,以及与不同流域、不同生态系统之间的对比研究,从大地域的总体高度论述这种既相联系又有差别的普遍性与特殊性关系,通过研究对比从大地域的整体性和共同性方面把握各流域、各生态系统间的不同性。在大地域总体评价基础上,进一步开展各大流域及其分布的生态系统为主体的评价工作,更侧重于流域的整体性及其与不同生态系统之间的对比研究,从流域高度论述这种整体的联系性及与各类生态系统之间的差异性方面。

土地质量地球化学评价^[6]与土地生态地球化学评价^[7]是以地球化学调查为基础,生态地球化学理论为指导的,按照土地资源特点和指标标准,服务于土地质量和土地生态管理开展的评价工作,是生态地球化学方法理论的实际应用,实质上就是生态

地球化学调查与评价。首先按照区域、普查及详查等不同级别依次进行土地质量地球化学调查评价,主要通过养分指标与环境指标分析进行土地质量等级划分和质量评定,服务于土地质量管护。针对土地质量地球化学评价提出的重要元素指标问题进行更高层次的土地生态地球化学评价,深入研究土地质量的生态地球化学问题,包括土地各项质量指标组成与关联、交互作用、综合效应、生态影响及变化趋势等,服务于土地生态管护。同样,依据生态地球化学方法理论,按照生态环境部门特点和指标标准,建立生态环境影响评价与土壤污染影响地球化学评价系统;按照农业部门特点和指标标准,建立农业资源环境地球化学评价系统;按照全球治理领域要求,建立全球治理地球化学评价系统等,积极主动地适应各行业部门与科学领域需求和特点,服务于国家经济社会发展各方面。

2.4 针对自然资源领域重大科学问题,深化地球化学应用研究与理论研究,构建完善的科学体系

基于生态文明理念的地质工作与以往根本不同之处,在于科学技术软实力将起决定性作用。通过实际调查凝练关系经济社会发展的重大科学问题,进行科学评价与实际应用,通过高科技促进学科领域高质量发展,为此地球化学必须深化应用研究与理论研究。所谓“深化”就是不可能一步到位,那么需要经过什么研究过程、到达什么研究程度算是“深化”?以下姑且按照一般情况从应用研究、理论与科学体系三个维度上予以阐明。简而言之,就是在地球化学应用研究方面实现从信息化、模式化到智能化,理论研究方面从特征化、规律化到机理化,科学体系建立方面从平台化、系统化到体系化的深化过程。

在应用研究方面,首先完成基本的信息化系统建设。现代勘查地球化学本身就是大数据科学。信息化以地球化学大数据为基础,包括数据调查获取、参数统计、综合集成和实际运用等。高精度大数据必然要求高精度的科学研究。在信息化基础上进行资源与环境模式化研究,即在资源领域建立地球系统及各级成矿系统成矿地球化学模式,运用成矿地球化学模式进行矿产资源潜力评价和定量估算;在环境领域建立地球系统及各类生态系统生态地球化学模式,运用生态地球化学模式进行生态环境风险评估和趋势判断,从而实现资源环境智能化开发与应用。实现地球化学智能化的前提是模式化,而模式化的前提是信息化,即建立大数据科学。正如机械化延伸和替代人类体力劳动一样,智能化通过大

数据与模式化研究延伸和替代人类脑力劳动,即按照人类思维方式进行的模拟、深化和创造。在理论研究方面,特征是指事物的外在形态、形式或现象等,规律指特征、现象或形态的内在联系及其运动过程,机理指形成规律的诸多控制因素及其性质和原理。理论研究在统计分析资源环境大量参数特征基础上,归纳和总结具有普遍指导意义的规律性的联系与过程,以及产生规律性事物的成因机理等。在科学体系方面,所谓平台化就是建立大数据信息平台,系统化就是建立方法理论系统,体系化就是建立科学技术体系。只有创建起现代科学体系才具有稳固的发展定力,才有可能应对来自资源环境各方面的挑战,解决重大科学问题。勘查地球化学科学体系是以调查为基础,理论为指导,科学问题为导向,按照科学性、系统性、层次性原则构建的既相互独立又相互联系的体现研究过程的具有逻辑关系的整体^[8]。构建科学技术体系可以从不同的角度,采取不同的方式,但总要基于当前经济社会和科技发展的现实状况、实际需要及具有可实现可操作原则。总之,应用研究侧重于技术创新及解决经济社会发展现实的地球化学问题,理论研究更侧重于科学发现和科学原理的论证,科学体系是将应用研究与理论研究等相关方面紧密结合形成的统一的有机联系的科学共同体,在学科领域发展和实际应用过程构成合力作用。

从横向关系看,应用研究、理论与科学体系三大方面分别体现研究程度的三个层次。第一层次为信息化、特征化及平台化,其中信息化是主要的,没有信息化也就难以研究特征,更无法建立信息平台。第二层次为模式化、规律化及系统化,模式化是主要的,没有模式化难以深化规律性研究,形成方法理论系统。第三层次为智能化、机理化及体系化,智能化是主要的,没有智能化,机理研究可能失之深度,体系化失之广度。长期以来,第一层次方面,通过地球化学调查在信息化、特征化及平台化方面不断发展和完善,在取得地球化学高精度大数据及其特征参数研究和数据库信息系统建设方面已经形成比较成熟、先进及可操作性的成果,是重要的基础性工作,在资源环境领域取得巨大成功,总体处于国内外前沿水平。在第一层次推动下,第二层次模式化、规律化及系统化研究经过努力探索在资源环境某些领域已经或正在取得若干重要成果,尚需系统总结、提升及完善。第三层次,在智能化、机理化及体系化方面,在某些优势方面取得积极进展,显现极大研究潜力,总体处于起步阶段。以成矿地球化学为例,成

矿地球化学分带现象谓之特征,分带模式谓之规律,分带成因谓之机理。又如微量元素赋存状态谓之特征,赋存的类质同相模式谓之规律,控制元素赋存关系的晶体场论谓之机理。当然这是有条件的、简化的和相对的,但或可作为一种衡量的尺度,看出我们在特征的研究方面是比较充分的,模式研究方面缺少系统性,而成因机理研究方面缺乏深度,在生态环境领域更是相距甚远。总之,应用实践是第一位的、主要的,在基本实现第一层次研究后,第二、第三层次问题渐次转化为主要的问题,而且会提出新的问题,产生更深层次的循环往复,永无止境。由此表明,一方面勘查地球化学在资源环境领域发展的广度上成效明显,但在研究的系统性和深度上尚显不足。另一方面说明科学探索本来是不不断深化的,存在发展的无限可能,预示地球化学未来发展的巨大空间与广阔前景。应该说,在勘查地球化学战术与战略发展阶段更多地关注应用技术方法问题,在全面发展阶段必须同时注重科学理论问题。

勘查地球化学关于生态环境领域科学体系中,在前述调查体系、理论体系及评价体系之后,尚有监测预警体系、治理修复体系与风险评估体系。通过实际调查发现,通过理论研究认识问题,通过系统评价解决问题,还必须通过监测加以预警,通过治理进行修复,通过风险评估实施风险管控,全部过程是相互联系的不可或缺的整体。对此以往多有论述,但实践中关于监测预警、治理修复及风险评估管控并没有形成真正可行的方法方案,经济社会发展往往突破生态环境容量的承载能力,破坏生态系统的稳定机制,成为目前全国土壤污染详查结束后面临的重大现实问题。但看似是方法方案问题,实际症结却还是应用研究与理论研究问题。中国之大,各地区地质条件复杂,自然景观多样,我们对一般的普遍意义上的生态环境问题是有深刻认识的,但对复杂条件下的特殊的生态环境问题缺乏深入系统的有针对性的研究,包括影响模式、形成规律及成因机理等,当然就难以提出科学有效的方法方案。正如医生治病必须对症下药一样,应用地球化学方法监测预警与治理修复也必须依据调查评价结论,针对特定的地质背景和自然地理景观,特定元素指标分布组成和循环演化规律、机理及其生态效应采取特定的监测预警与治理修复方法方案,提出特定的风险控制措施。这就更加凸显应用理论研究的重要作用。

当前,土壤监测预警方面比较注重建立各级次监测网及监测重金属含量与组成变化,土壤治理修

复方面多限于简单的置换、电分离等方法,应重点研究各地区特定物理化学环境下元素指标形态演化、交互作用及生态循环等规律性机理性问题,使监测预警更加准确,治理修复能够因地制宜采取经济、有效及有利于生态恢复方法。我们多次提议针对全国活动断裂建立基于地震灾害的土壤汞(气)监测网络,进行不间断监控以预测地震发生,也需要加强研究土壤汞(气)形成规律、异常机制及其与地震前兆、发生及强烈程度和影响范围等关系,依据土壤汞(气)变化规律和模式实现地震中长期以至短期预报。

3 结语

勘查地球化学的长期目标是通过大数据信息与地球系统科学研究揭示自然资源与自然环境、自然生态状况,实现对地球资源的科学开发、合理利用和整体保护,创造人类与地球和谐相处的生存环境。

回顾勘查地球化学全面发展历程,依据国家地质工作定位及服务经济社会发展方向,主要做了两件事:转型与升级。由单目标矿产勘查到资源环境多目标调查评价谓之转型,从地质系统到地球系统与生态系统科学谓之升级。现在也可以概括为供给侧改革。如果升华到人与自然关系层面上看问题,矿产勘查以资源开发为宗旨,是人类向大自然扩张和索取,注重人类对自身利益的追逐。地球系统与生态系统科学观以生态文明为宗旨,视人类与自然界为生命共同体,相互依存、互相联系及相互作用,注重人与自然共性的整体利益方面。这就是资源与环境问题的核心。历史上充满智慧和活力的千年都江堰因兼顾生物与生态利益而光照后世,如今一些看似气吞山河的工程却因其片面利益而为世人诟病即是例证。这点认识是人们到了自然生态系统危及人类生存安全时才有所感悟。国家经济社会发展方式结构性转变,是工业文明走向生态文明时代的深刻变革,也是勘查地球化学向多目标全面发展阶段转型升级的本质所在。

贯彻与实现生态文明建设是自然资源时期的总方针。自然资源时期总体任务可以归纳为“调查评价、整体保护、规划利用、治理修复、风险评估、监测预警”24字方针。勘查地球化学的总体思路是以国土空间为载体全面开展自然资源地球化学调查,运用地球系统科学思想构建地球化学理论体系,按照地球化学工作程序与层级对自然资源地质地球化学状态进行系统评价,依据地球化学调查评价大数据

信息对自然资源和生态环境实行整体保护与规划利用,采用地球化学方法理论进行治理修复,按照国家或行业指标标准进行监测、监控、监管及风险预警。为此,有必要建立地质地球化学调查评价、整体保护、规划利用、治理修复、风险评估及监测预警全程工作机制,建立自然资源调查评价的地球化学系统,完善适应自然资源管理的地球化学方法技术体系、指标标准体系与质量监控体系,从调查实际和科学研究角度支撑与行使国家自然资源所有者职能。

21 世纪是勘查地球化学全面发展的时代。勘查地球化学以方法技术优势实行大调查、大数据、大应用战略,一批科技成果迅速转化为生产要素,不断创造巨大经济社会效益。地球化学将应用实际与全球科技发展态势紧密联系,建立大环境、大生态、大地球观,为现代地球科学提供新思想、新技术和新的可能。地球化学研究的科学领域和服务的行业部门在不断拓展和深化,地球化学调查评价程式和基本方法理论正逐步被各有关行业部门与科学领域所接受和遵循,向大地质、大资源、大科学转变,确立地球化学在解决重大科学问题中的重要地位。地球化学将以形态和内涵的系统性、综合性与整体性作用,以及应用实践的多目标全方位面貌出现在行业部门与科技领域,为解决自然资源与生态环境问题提供地球化学方案。全面发展时期的勘查地球化学将从大数据信息应用优势和地球系统科学理论高度提升到“大地球化学”的境界。

参考文献 (References) :

- [1] 奚小环.全面发展时期的勘查地球化学[J].物探与化探, 2009, 33(1):1-3.
Xi X H. Exploration geochemistry at the all-round development stage[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(1): 1-2
- [2] 叶天竺,吕志成,庞振山,等.勘查区找矿预测理论与方法[M].北京:地质出版社, 2014.
Ye T Z, Lyu Z C, Pang Z S, et al. Prospecting theory and method for prospecting in exploration area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [3] 叶天竺.矿床模型综合地质信息预测技术方法理论框架[J].吉林大学学报:地球科学版, 2013, 43(4): 1053-1072.
Ye T Z. Theoretical framework of methodology of deposit modeling and integrated geological information for mineral resource potential assessment[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(4): 1053-1072.
- [4] 马振东,龚鹏,龚敏,等.中国铜矿地质地球化学找矿模型及地球化学定量预测方法研究[M].武汉:中国地质大学出版社, 2014.
Ma Z D, Gong P, Gong M, et al. Study on geological and geochemical prospecting model and geochemical quantitative prediction method of copper deposits in China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [5] 奚小环,李敏,刘荣梅,等.区域成矿地球化学理论体系问题研究:兼论沱沱河区域化探异常集群[J].地学前缘, 2015, 22(5):196-214.
Xi X H, Li M, Liu R M, et al. Research on theoretical system of regional metallogenic geochemistry: The assembly of regional geochemical anomalies in Tuotuo River[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(5):196-214.
- [6] 杨忠芳,余涛,李敏,等.DZ/T 0295-2016 土地质量地球化学评价规范[S].2016.
Yang Z F, Yu T, Li M, et al. DZ/T 0295-2016 Specification of land quality geochemical assessment[S]. 2016.
- [7] 奚小环,李敏.现代地质工作重要发展领域:“十一五”期间勘查地球化学评述[J].地学前缘, 2013, 20(3):161-169.
Xi X H, Li M. Reviews of the development of the exploration geochemistry during the Eleventh Five-Year Period[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3):161-169.
- [8] 奚小环,李敏.现代勘查地球化学科学体系概论:“十二五”期间勘查成果评述[J].物探与化探, 2017, 41(5):779-793.
Xi X H, Li M. Summary of modern exploration geochemistry scientific system: Commentary on exploration achievements obtained in the period of '12th Five-Year Plan'[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(5): 779-793.
- [9] 肖桂义,秦爱华.多目标区域地球化学调查调查与评价文集[M].北京:地质出版社, 2011.
Xiao G Y, Qin A H. Multi-target regional geochemical survey survey and evaluation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [10] Hou Q, Yang Z, Ji J, et al. Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 68-84.
- [11] Xia X, Yang Z, Cui Y, et al. Soil heavy metal concentrations and their typical input and output fluxes on the southern Song-nen Plain, Heilongjiang Province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 85-96.
- [12] 于成广,杨忠芳,杨晓波,等.土地质量地球化学评估方法研究与应用:以盘锦市为例[J].现代地质, 2012, 26(5):873-878, 909.
Yu C G, Yang Z F, Yang X B, et al. Study and application on land quality geochemical assessment methods: Taking Panjin city as an example[J]. Geoscience, 2012, 26(5):873-878, 909.
- [13] 黄春雷,宋金秋,潘卫丰.浙东沿海某地区大气干湿沉降对土壤重金属元素含量的影响[J].地质通报, 2011, 30(9):1433-1441.
Huang C L, Song J Q, Pan W F. Impact of dry and wet atmospheric deposition on content of heavy metals in soils along coastal areas of eastern Zhejiang Province[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(9):1433-1441.
- [14] 成抗新,杨忠芳,奚小环,等.长江流域沿江镉异常源追踪与定量评估的研究框架[J].地学前缘, 2005, 12(1):261-272.
Cheng H X, Yang Z F, Xi X H, et al. A research framework for

- source tracking and quantitative assessment of the Cd anomalies along the Yangtze River Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 261-272.
- [15] 成杭新, 杨忠芳, 奚小环, 等. 长江流域沿江镉异常示踪与追源的战略与战术[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(3): 285-291.
Cheng H X, Yang Z F, Xi X H, et al. Strategy and tactics for tracing and source tracking of Cd anomalies along the Changjiang River basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3): 285-291.
- [16] 杨忠芳, 夏学齐, 余涛, 等. 湖南洞庭湖水系 As 和 Cd 等重金属元素分布特征及输送通量[J]. *现代地质*, 2008, 22(6): 897-908.
Yang Z F, Xia X Q, Yu T, et al. Distribution and fluxes of As and trace metals in the Dongting Lake water system, Hunan Province, China[J]. *Geoscience*, 2008, 22(6): 897-908.
- [17] 杨琼, 侯青叶, 顾秋蓓, 等. 广西武鸣县典型土壤剖面 Se 的地球化学特征及其影响因素研究[J]. *现代地质*, 2016, 30(2): 455-462.
Yang Q, Hou Q Y, Gu Q B, et al. Study of geochemical characteristics and influencing factors of soil selenium in the typical soil profiles in Wuming County of Guangxi[J]. *Geoscience*, 2016, 30(2): 455-462.
- [18] 窦磊, 杜海燕, 游远航, 等. 珠江三角洲经济区生态地球化学评价[J]. *现代地质*, 2014, 28(5): 915-927.
Dou L, Du H Y, You Y H, et al. Eco-geochemical survey and assessment in Pearl River Delta economic zone, Guangdong Province, China[J]. *Geoscience*, 2014, 28(5): 915-927.
- [19] 戴慧敏, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1356-1364.
Dai H M, Gong C D, Dong B, et al. Distribution of soil selenium in the northeast China plain and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1356-1364.
- [20] 戴慧敏, 刘驰, 宫传东, 等. 东北平原土壤碳库构成及其与土壤性质的关系[J]. *第四纪研究*, 2013, 23(5): 986-994.
Dai H M, Liu C, Gong C D, et al. Soil carbon pool in northeast plain of China and its relations between the soil properties[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 23(5): 986-994.
- [21] 代杰瑞, 郝兴中, 庞绪贵, 等. 典型土壤环境中重金属元素的形态分布和转化——以山东烟台为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(6): 713-719, 728.
Dai J R, Hao X Z, Pang X G, et al. Distribution and transformation of heavy metals in typical soil environments: A case study in Yantai[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(6): 713-719, 728.
- [22] 陈国光, 梁晓红, 周国华, 等. 土壤元素污染等级划分方法及其应用[J]. *中国地质*, 2011, 31(6): 1631-1639.
Chen G G, Liang X H, Zhou G H, et al. Grade division method for soil geochemical contamination and its application[J]. *Chinese Geology*, 2011, 31(6): 1631-1639.
- [23] 夏学齐, 杨忠芳, 余涛, 等. 中国东北地区 20 世纪末土地利用变化的土壤碳源汇效应[J]. *地学前缘*, 2011(6): 56-63.
Xia X Q, Yang Z F, Yu T, et al. Soil carbon source/sink caused by land use change in the last decades of the last century in Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011(6): 56-63.
- [24] 余忠珍, 马逸麟, 袁存堤, 等. 鄱阳湖及周边经济区农业地球化学环境评价[J]. *资源调查与环境*, 2010, 31(2): 127-135.
Yu Z Z, Ma Y L, Zhong C D, et al. Agricultural geochemical environmental evaluation for Poyang Lake and its surrounding Economic districts[J]. *Resources Survey & Environment*, 2010, 31(2): 127-135.
- [25] 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 等. 乌裕尔河流域颗粒有机碳的来源: 碳同位素证据[J]. *地学前缘*, 2011(6): 150-160.
Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Origin of particulate organic carbon in the Wuyuer River: Carbon isotopic evidences[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011(6): 150-160.
- [26] 高宇, 李晓慧, 张玲燕, 等. 银川盆地富硒土地资源研究[J]. *农业科学研究*, 2011(4): 88-89.
Gao Y, Li X H, Zhang L Y, et al. Preliminary exploration of selenium rich area in Yinchuan basin[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2011(4): 88-89.
- [27] 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 等. 我国主要农耕区水稻土有机碳含量分布及影响因素研究[J]. *地学前缘*, 2011(6): 11-19.
Yu T, Yang Z F, Hou Q Y, et al. Distribution and influencing factors of paddy soil organic carbon content in China's major farming areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011(6): 11-19.
- [28] 成杭新, 庄广民, 赵传冬, 等. 北京市土壤 Hg 污染的区域生态地球化学评价[J]. *地学前缘*, 2008, 15(5): 126-145.
Cheng H X, Zhuang G M, Zhao C D, et al. Regional eco-geochemical assessment of mercury in soils in Beijing[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 126-145.
- [29] 奚小环. 我国土壤地球化学状况不容忽视——广州、武汉、成都地区多目标区域地球化学调查成果与对策建议[R]. 国务院专报信息, 2003.
Xi X H. The geochemical status of soil in China cannot be ignored—the results of multi-target regional geochemical survey in Guangzhou, Wuhan and Chengdu and countermeasures[R]. State Council special report information, 2003.
- [30] 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): 1-6.
Xi X H. Exploration geochemistry, resources and environment in 1999~2001[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(1): 1-6.
- [31] Hawkes H E, Webb J S. *Geochemistry in mineral exploration*[M]. New York: Harper & Row, 1962.
- [32] Levinson A A. *Introduction to exploration geochemistry*[M]. Calgary: Applied Publishing Ltd, 1974: 55-58.
- [33] Beus A A, Grigorian S V. *Geochemical exploration methods for mineral deposits*[M]. Wilmette: Applied Publishing Ltd, 1977.
- [34] 谢学锦, 刘大文, 向运川. 地球化学块体——概念和方法论的发展[J]. *中国地质*, 2002, 29(8): 225-233.
Xie X J, Liu D W, Xiang Y C, et al. Geochemical blocks: Development of concept and methodology[J]. *Chinese Geology*, 2002, 29(8): 225-233.
- [35] 张本仁. 区域地球化学研究的理论—方法构想与实践[C]. 中国地质大学, 2005.
Zhang B R. Theory-method conception and practice of regional geochemistry research[C]. China University of Geosciences, 2005.

- [36] Rampone E, Hofmann A W. A global overview of isotopic heterogeneities in the oceanic mantle [J]. *Lithos*, 2012(148):247-261.
- [37] Hart S R. A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle [J]. *Nature*, 1984(309):753-757.
- [38] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988(90):297-314.
- [39] Rudnick R L, Barth M, Horn I, et al. Rutile-bearing refractory eclogites: Missing link between continents and depleted mantle [J]. *Science*, 2000(287):278-281.
- [40] 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤. 矿床学(第三版) [M]. 北京: 地质出版社, 2011.
Zhai Y S, Yao S Z, Cai K Q. *Mineral deposits (third edition)* [M]. Beijing: Geological publishing house, 2011.
- [41] 陈毓川. 矿床的成矿系列 [J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 90-94.
Chen Y C. Metallogenic series of ore deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 1994, 1(3): 90-94.
- [42] 陈毓川, 培荣富, 宋天锐. 中国矿床成矿系列初论 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
Chen Y C, Pei R F, Song T R. *Preliminary Discussion on Mineralization Series of China Deposits* [M]. Beijing: Geological publishing house, 1998.
- [43] 翟裕生, 邓军, 彭润民, 等. 成矿系统论 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.
Zhai Y S, Deng J, Peng R M, et al. *Metallogenic system theory* [M]. Beijing: Geological publishing house, 2010.
- [44] 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
Zhai Y S, Deng J, Li X B. *Regional mineralization* [M]. Beijing: Geological publishing house, 1999.
- [45] 陈毓川. 中国成矿体系与区域成矿评价 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Chen Y C. *China's metallogenic system and regional mineralization evaluation* [M]. Beijing: Geological publishing house, 2006.
- [46] 翟裕生. 地球系统科学与成矿学研究 [J]. 地学前缘, 2004, 11(1):1-10.
Zhai Y S. *Earth system sciences and the study on metallogenesis* [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1):1-10.
- [47] 奚小环, 李敏. 中国区域化探若干基本问题研究: 1999-2009 [J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 267-282.
Xi X H, Li M. *Regional geochemical exploration in China: from 1999 to 2009* [J]. *Chinese Geology*, 2012, 39(2): 267-282.
- [48] 陈泮勤. 地球系统碳循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Chen P Q. *Earth system carbon cycle* [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [49] 方精云, 唐艳红, 林俊达, 等. 全球生态学: 气候变化与生态响应 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Fang J Y, Tang Y H, Lin J D, et al. *Global ecology: Climate change and ecological response* [M]. Beijing: Higher education press, 2000.
- [50] 奚小环, 李敏, 张秀芝, 等. 中国中东部平原及周边地区土壤有机碳分布与变化趋势研究 [J]. 地学前缘, 2013, 20(1):154-165.
Xi X H, Li M, Zhang X Z, et al. *Research on soil organic carbon distribution and change trend in middle-east plain and its vicinity in China* [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1):154-165.
- [51] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Chen H M. *Behavior and environmental quality of chemical substances in soil* [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [52] DZ/T 0011-2015 地球化学普查规范(1:50000) [S].
DZ/T 0011-2015 *Geochemical census specification (1:50000)* [S].
- [53] 陈国光, 马振东, 张华, 等. 地球化学详查规范(送审稿) [S].
Chen G G, Ma Z D, Zhang H, et al. *Geochemistry detailed inspection specification (draft for review)* [S].
- [54] DZ/T 0248-2014 岩石地球化学测量技术规程 [S].
DZ/T 0248-2014 *Rock geochemical measurement technical specification* [S].
- [55] 杨忠芳, 成杭新, 周国华, 等. DZ/T 0289-2015 区域生态地球化学评价规范 [S].
Yang Z F, Cheng H X, Zhou G H, et al. *DZ/T 0289-2015 Regional eco-geochemical evaluation specification* [S].
- [56] DD2008-05 局部生态地球化学评价技术要求 [S].
DD2008-05 *Technical requirements for local ecological geochemical evaluation* [S].
- [57] DZ/T 0258-2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250000) [S].
DZ/T 0258-2014 *Multi-target regional geochemical survey specification (1:250000)* [S].
- [58] 叶家瑜, 江保林. 区域地球化学勘查样品分析方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2004.
Ye J Y, Jiang B L. *Regional geochemical exploration sample analysis method* [M]. Beijing: Geological publishing house, 2004.
- [59] 叶家瑜, 姚岚. 区域地球化学调查样品分析质量控制方法探讨 [J]. 岩矿测试, 2004, 23(2):137-142, 147.
Ye J Y, Yao L. *Discussion of quality control method for the analysis of samples in regional geochemical survey* [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2004, 23(2):137-142, 147.
- [60] DD2005-03 生态地球化学评价样品分析技术要求 [S].
DD2005-03 *Technical requirements for analysis of ecological geochemical evaluation samples* [S].

Natural resources period: Big data and systematic science of the earth -More on exploration geochemistry during the overall development period

XI Xiao-Huan

(China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The important marks and essential characteristics of China's exploration geochemistry are big information and systematic science of the earth. The overall development of exploration geochemistry persists in the policy of laying equal stress on resources and environment, truly and actively reflects the historical locus of the development of national economy and society, and has typical significance in the field of science and technology. During the natural resources period, the connotations of geological work related to resources are from mineral resources, land resources to all natural resources, whereas the connotations of geological work related to environment are from geological environment, land environment to all natural environments which include life community of mountains, water, forests, cultivated land, lakes and grass. At the time when the Ministry of Natural Resources is established and geological work is faced with deep transformation, the author, following writing a comment on this problem in 2008, here makes another discussion on this topic in some aspects which are worthy of attention, such as big data information science and geochemical survey of natural resources, establishment of geochemical theoretical system and geochemical evaluation system for natural resources guided by systematic science of the earth, important scientific problems aimed at the field of natural resources, deepening geochemical application research and theoretical research, and establishment of perfect scientific system. The long-term aim of exploration geochemistry lies in revealing the situation of natural resources and natural environment, realizing scientific development, and rational utilization and integrated protection of the earth's resources by means of big data information and systematic science of the earth, thus creating an environment that mankind can harmoniously coexist with the earth. Therefore, the whole process of the development of China's exploration geochemistry will be permeated with transformation and upgrade. Geochemistry will emerge in national professional department and science and technology field with the multi-purpose and all-round appearance characterized by the role of systematic nature, comprehensive nature and integration as well as application practice, thus extremely expanding and deepening its role in economic and social development. With its technological advantages, exploration geochemistry will implement big survey, big data and big application strategy, establish big environment, big ecology and big earth outlook, and transform itself into big geology, big resources and big science, so as to provide a geochemical scheme for solving problems of natural resources and ecological environment and promote exploration geochemistry in the period of overall development from the advantages of big data information application and the height of systematic scientific theory to the realm of 'big geochemistry'.

Key words: natural resources; ecological civilization; big data; systematic science of the earth; scientific system; development course; upgrade and transform; exploration geochemistry

(本文编辑:蒋实)