

中国土壤质量地球化学调查与评价的研究现状和进展

武春林^{1,2}, 王瑞廷^{1,3}, 丁坤³, 韩玲²

(1. 西北有色地质矿业集团, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:土壤质量地球化学调查与评价是近三十年来勘查地球化学的新研究热点。通过系统分析整理相关领域公开发表的论文、专著、报告等数据和资料, 总结概括了中国土壤质量地球化学调查评价工作的研究对象、研究内容、研究方法, 对这项工作的历史沿革、研究现状做出概略描述, 并在已有成果和进展的基础上, 提出未来的研究展望, 建议开展精度更高、针对性更强、应用范围更广、技术手段更先进的土壤质量地球化学调查与评价工作, 更好的服务于国家发展战略。

关键词:土壤质量地球化学调查; 生态地球化学; 评价指标体系; 绿色农业

中图分类号: P934

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)03-0240-13

Geochemical Survey and Evaluation on Soil Quality in China: Research Status and Advances

WU Chunlin^{1,2}, WANG Ruiting^{1,3}, DING Kun³, HAN Ling²

(1. Northwest Nonferrous Geological Mining Group Limited Company, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Geochemical survey and evaluation of soil quality is a new research hotspot in recent thirty years. Through systematically analyzing and sorting out the papers, monographs, reports and other data and materials published in the related fields, the research object, content and method of soil quality geochemistry survey and evaluation in China have been summarized, the historical evolution and research status of this work have been briefly described. On the basis of the existing achievements and progress, the future research prospect has been put forward. It is suggested to carry out geochemical survey and evaluation of soil quality with higher accuracy, more pertinence, wider application and more advanced technical means, providing better service for the national development strategy.

Keywords: geochemical survey of soil quality; ecological geochemistry; evaluation index system; green agriculture

收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-03-26

基金项目: 西北有色地质矿业集团“土壤质量地球化学评价方法及其在陕西省关中平原农业生态调查中的应用研究”博士后项目资助(西北地矿发[2016]64号), 中国地质调查局“新疆阿拉尔—图木舒克—昆玉综合地质调查”(0617-1711FZ0763)项目资助

作者简介: 武春林(1982-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 工程师, 主要从事土壤质量地球化学调查评价、农业地质、勘查地球化学方面工作。E-mail: wuchunlin_nwme@163.com

20 世纪 70 年代以来,随着世界人口增加,全球经济和工业的快速发展,环境污染加剧、土壤质量退化、农作物生产力水平和品质下降等生态环境问题日益严重,耕地面积不断减少,土壤质量调查与评价成为国内外学者研究的热点(WARKENTIN BP et al. ,1977,1995;赵其国等,1997;成杭新等,1999;谢学锦等,2004;WIENHOLD B J et al. ,2004,2005;黄勇等,2008,2009;汪媛媛等,2011;XIE Xuejing et al. ,2014;YAO Wensheng et al. ,2014)。

土壤质量地球化学评价的实质就是利用地球化学方法和指标体系,评价土壤在特定区域及气候条件下实现其功能的程度及评估其存在的潜在风险。这项工作是农业生产可持续发展重要的指导思想和科学依据,但目前尚缺乏统一的评价指标体系及评价方法(朱立新,1994;朱立新等,1994;BLENKOV Ð K,1995;谢学锦等,2002;杨忠芳等,2002;王平等,2004;奚小环,2009;谢学锦等,2010;杨少平等,2011;LI Min et al. ,2014;YANG Zhongfang et al. ,2014)。

土壤质量地球化学调查与评价是土地质量地球化学调查工作的核心工作手段。专家学者们以生态地球化学理论为依托,通过集成创新土地质量地球化学调查、评价、监测、预警等方法技术,形成系列技术规范(夏家淇等,1995;中国环境监测总站等,2005;叶家瑜等,2005;周国华等,2008;成杭新等,2014;文冬光等,2014;奚小环等,2015;杨忠芳等,2014,2015,2016),构建土地质量地球化学评价的框架、思路和方法,以土壤圈为中心评价地球系统,涵盖土壤、大气干湿沉降物、灌溉水、农作物等方面,突

破传统指标评价体系,为全面判断土地质量现状提供方法指导。笔者主要论述土壤质量的调查与评价工作,不涉及大气沉降、灌溉水和农作物等的方面内容,研究范畴包含于土地质量地球化学调查评价。

土壤质量地球化学调查涵盖地质、生态、水文、农业、土壤和微生物等领域,研究元素及有机污染物在不同生态系统中的分布分配特征、地球化学循环过程,及其对生态系统和人类健康的影响(杨忠芳等,2004,2005a,2005b;成杭新等,2004,2008;奚小环,2004,2005,2007,2008;周国华等,2009)。这项研究以生态系统为研究单元、以物质在生态系统各环境要素中的循环和生态系统间的迁移为主线、以化学元素和有害物质对生物体的影响为中心,着重在不同空间尺度上进行生态地球化学研究,探索地球化学问题中主要元素的成因来源、迁移转化、生态效应、变化趋势全过程。它的应用领域包括农业和土地利用规划、灌溉和饮用水的质量、养殖业和渔业、医药与公共卫生、环境污染、野生动植物保护、城市化学环境的改造等(THORNTON I,1993;林景星等,2003;奚小环,2003;施俊法等,2003)。

1 土壤质量地球化学调查与评价的研究对象、内容及方法

1.1 土壤质量地球化学调查与评价的研究对象和内容

土壤地球化学调查针对不同尺度地质生态系统开展工作,在研究中要划分和评价非均质的复合地球化学场的天然及人为影响程度,并将这些成果反映在不同比例尺的图件上(表 1)。

表 1 土壤质量地球化学调查评价的工作等级和研究内容表			
Tab. 1 The grade and content of geochemical survey and evaluation for soil quality			
调查范围(km ²)	工作比例尺	调查对象	研究内容
$n \times 10^5 \sim n \times 10^6$	1 : 100 万	全球性区带/国家	研究元素在地球系统的循环规律和环境效应
$n \times 10^4 \sim n \times 10^5$	1 : 25 万	区域/省级尺度	全面掌握评价区土地质量地球化学宏观状况
$n \times 10^2 \sim n \times 10^3$	1 : 5 万	市县级尺度	查明优势土地资源和重要的生态地球化学问题
$n \times 10^1 \sim n \times 10^2$	1 : 1 万~1 : 2 000	乡镇-村组尺度	评价土地资源利用潜力,提高土地利用价值

注:依据奚小环等,2015;杨忠芳等,2015,2016 等综合。

该项工作的主要对象为农业土壤,采样介质为土壤耕作层、成土母质、底积物等,样品分析测试的指标主要包括 Ag、As、Au、B、Ba、Be、Bi、Br、Cd、Ce、

Cl、Co、Cr、Cu、F、Ga、Ge、Hg、I、La、Li、Mn、Mo、N、Nb、Ni、P、Pb、Rb、S、Sb、Sc、Se、Sn、Sr、Th、Ti、Tl、U、V、W、Y、Zn、Zr、SiO₂、Al₂O₃、TF_{e2}O₃、MgO、

CaO、Na₂O、K₂O、TC、C_{org}、pH 值以及与农业生产密切相关的土壤元素有效态、形态、价态,土壤有机污染物等(奚小环等,2015;杨忠芳等,2016)。

通过土壤质量地球化学调查工作可以获取研究区土壤背景值/基准值的地球化学特征,对一个地区生态环境状况作出总的评估;在对某一具体地区及其实际状况作综合性多功能评估的基础上,提出土地合理利用的策略;同时根据获得的精确地质-地球化学资料编制出一系列地球化学成果图,包括区域地球化学图、异常及地球化学分区图、土地质量地球化学等级图、名优特农产品种植建议图、配方施肥建议图及土地利用规划建议图等各种地球化学图件。

具体的研究内容主要有以下几个方面。

(1)土地合理使用和区域发展规划。通过查明土壤中有益元素和有害元素的分布分配特征、共生组合规律,结合研究区地质地貌、生态区划、人类活动等各项指标的研究,利用多目标地球化学填图方法,可以编制出一系列全新的图件,从而为土地合理利用、区域发展规划的制定提供依据。

(2)区域生态环境质量评估。对环境要素进行质量评价,核心是查明各种污染物在生态环境中的含量、迁移、转化,及对人类社会的影响。在具体的调查研究过程中,不仅要考虑其总量,而且要研究化学元素和污染物的各种相态及它们对生态环境的影响。此外,除对重金属进行研究外,还要查明有机污染物和放射性核素的含量和分布特征。

(3)土壤肥力评估。利用土壤地球化学勘查资料对土壤肥力进行评估的工作主要集中在常量(全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、有效钾以及有机质总量)和微量(B、Zn、Mo、Mn、Fe、Cu、Cl、Co、Se、V等)营养元素含量的评估上。

(4)地方病防治和动植物健康研究。地表环境是动植物赖以生存的场所,它们的健康、疾病与生态地理环境的性质、变化紧密相关。地球化学填图能反映出调查区表生环境元素含量与地壳克拉克值的差异程度,并用各种地球化学图件或参数表示出来,这对于区内地方病的防治和动植物的健康研究具有重要的指导意义。

1.2 土壤质量地球化学调查与评价的研究方法

1.2.1 调查方法

目前,中国正在开展的土地质量地球化学调查分为国家—省级、市—县级、乡—镇级和村—组级共

4 个层次(尺度)进行。主要工作方法有面积性土壤地球化学测量、土壤垂向剖面测量、综合地质地球化学剖面测量、灌溉水(饮用水)调查、大气干湿沉降物调查、以及农作物及其根系土调查,系统采集土壤、农作物及其根系土、大气干湿沉降、灌溉水等各类介质样品(周国华等,2008;杨忠芳等,2015,2016)。笔者仅针对土壤质量地球化学调查进行概述。

土壤质量地球化学调查的核心工作方法是面积性土壤地球化学调查工作,它的指导思路是按照一定的空间网度,采用网格化采样方法,遵循代表性原则采集样品,具体的采样要求见表 2、表 3。

表 2 土壤质量地球化学调查采样密度范围与测网布设表
Tab. 2 The sampling density and network layout of geochemical survey for soil quality

工作范围及性质	比例尺	采样密度范围(个/km ²)	测量网(m)
流域/省级 (区域调查)	1:250000	0.25~2	1000×1000~ 1000×500
地区/市县级 (普查)	1:50000	4~16	500×500~ 250×250
局地/乡镇级 (详查)	1:10000	20~36	200×250
局地/村级组 (精查)	1:5000~ 1:2000	40~64	125×200~ 125×125

注:深层土壤采样仅在 1:250000 尺度开展,采样密度为表层样品的 1/4。

1.2.2 评价指标体系

土壤质量指标用于描述土壤质量及其相关的人类活动,包括土地满足人类需求的条件及其变化以及相关的人类行为。目前普遍认为土壤质量是不能直接测定的指标,需要通过测定不同的土壤性状来反映土壤整体质量,所以评价土壤质量必须借助一定的评价指标体系。当前土壤质量研究的焦点是哪些土壤性质应该作为土壤质量评价指标(赵传冬等,2003;刘占锋等,2006;奚小环,2006;杨忠芳等,2007;聂兰仕等,2011;李朝奎等,2011)。

土壤质量不可能由单一的指标表示,必须由足够的代表土壤化学、生物和物理性质和过程的复杂指标组成,笔者主要讨论地球化学指标和评价体系。土壤地球化学质量评价指标可以被简单的定义为对土壤功能变化最敏感的地球化学性质和过程,众多的土壤地球化学指标组成最小数据集,用来间接的评价土壤功能。

表 3 土壤质量地球化学调查采样要求表
Tab. 3 The sampling requirements of geochemical survey for soil quality

样品类型	采样深度(cm)	采样物质	采样重量(g)	样品采集	加工处理	组合分析
表层样品	0~20	土壤耕作层/发生层	>1 000	100 m 范围内 3~5 处采样组合	风干、晾晒、揉搓至自然粒级,按要求过不同孔径尼龙筛,取筛下颗粒缩分装袋	相邻 4 点组合为 1 件样品后分析测试
深层样品	150~200	成土母质/无扰动层	>1 000	单孔位		

注:依据周国华等,2008;奚小环等,2015;杨忠芳等,2015,2016 等综合。

选择评价指标时应遵循以下原则:①主导性原则,从影响土壤质量的众多属性中选择影响土壤质量的限制性因子,以保证土壤质量评价的科学性。②独立性原则,所选的指标应既能反映土壤的综合性质且指标间具有独立性,避免信息的重叠。③敏感性和稳定性原则,所选指标应能够敏感地反映土壤质量的变化,且在一定时空内具有稳定性。

随着数字化信息技术在农业研究中的应用,量化数字方法在土壤质量评价中得到广泛的应用及青睐。土壤质量定量评价工作的基本思想是根据可获知的土壤外部属性运用数学方法对土壤内在属性进行量化表达,从而达到认识土壤内部性质为有效管理和保护土壤,为农业可持续发展提供理论依据的目的。

适宜的评价指标和适当的评价方法是影响土壤质量评价结果的关键因素,标准化的方法一般包括 3 个内容:①筛选具有代表性的评价指标。②确定评价指标的权重。③建立适宜的数学模型进行土壤质量评价。

土壤质量评价工作都是围绕着这 3 个内容进行,每个过程都会影响土壤质量评价结果的准确度,

且每个内容本身也是一个独立的研究内容。因此,指标体系最小数据集筛选方法、评价指标转化的数学模型、定量化评价方法是当前土壤质量评价研究的热点(刘占锋等,2006;汪媛媛等,2011)。

目前,国内外土壤质量的评价方法,按大类可分为指数法、模型法、GIS 参与法以及时空动态监测评价方法等(NEMEROW N L,1974;吴新民等,2003;黄勇等,2008;余涛等,2008a,2008b;刘坤等,2008;刘晨等,2008;王洪翠等,2008;杨忠芳等,2008;秦雯雯等,2011;杨刚等,2011;王立胜等,2012;于成广等,2012;姚振等,2012),具体的指标选取和评价方法分类见表 4、表 5。

表 4 土壤质量地球化学评价指标分类表
Tab. 4 The classification of geochemical evaluation indexes for soil quality

环境指标	肥力指标	健康及其他指标
Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn、六六六、DDT 等	N、P、K、Ca、Mg、S、Cl、Si、B、Mo、Mn、Fe、Co、Ni、Na、Cu、Zn 等	pH、TOC、CEC、Se、F、I 等

注:依据奚小环等,2015;杨忠芳等,2015,2016 等综合整理。

表 5 土壤质量地球化学评价方法分类表
Tab. 5 The methods of geochemical evaluation for soil quality

评价方法类型	理 论 依 据	具 体 模 型 举 例
指数法	利用指标实测值与标准值的比值,结合不同指标的权重值,综合叠加,划分土壤质量地球化学等级	Nemerow 综合指数法、地质累积指数法、土壤质量指数法、综合优或劣势指数法等
模型法	根据地统计学、模糊数学、人工神经网络等理论构建数学模型进行评价	系统聚类法、模糊综合评价模型、多层次模糊综合判定模型、灰色关联综合评价模型、物元模型等
GIS 参与的方法	地理信息系统平台与空间插值的应用	模糊变权评价法、土壤数据库(SOTER)法等
时空动态监测评价方法	地统计学、GIS、模糊数学、多元统计分析等方法综合应用,获得土壤质量地球化学综合等级	多变量指标克立格法(MVIK)、土壤质量动力学方法、GIS 与指数和法结合的方法等

注:具体评价方法描述见文中提到的相关参考文献。

土壤是具有多方面功能的综合体,土壤质量作为土壤内部属性不能直接被人们认识,必须对一系

列土壤性质进行综合评价才能间接了解,土壤质量评价必须是土壤多方面功能的综合(林景星等,

2003;黄勇等,2008,2009;汪媛媛等,2011;王淑敏等,2011;王思翀,2011)。

中国现行的土壤质量地球化学评价,主要是综合土壤中养分元素、健康元素、环境元素和理化性质,以及大气干湿沉降物、灌溉水质量等因素,依据已有标准进行等级划分。未来应加强对土壤质量评价指标体系与评价方法的研究,包括针对不同的土壤功能,选择土壤质量评价指标体系,对阈值、量化、评价方法和评价模型进行研究(刘占锋等,2006;和莉莉等,2008;王淑敏等,2011;王思翀,2011;蔡美芳等,2014;纪小凤等,2016)。

2 土壤质量地球化学调查与评价的历史沿革、研究现状及进展

中国土壤质量地球化学调查工作可以划分为 3 个阶段:在 20 世纪 80 年代以前,属早期起步阶段,主要针对全国土壤开展少量概略性调研工作;20 世纪最后十年,属探索与发展阶段,开展多项水工环调查工作,对土壤地球化学污染逐步重视;21 世纪以来,土壤质量地球化学调查与评价工作高速发展,不同层级的调查项目广泛开展,我们对土壤家底有了较清晰的掌握。未来十几年,这项工作将迈向高峰,为社会经济发展提供坚实基础和有力支撑。

2.1 早期土壤调查与研究起步阶段

1930 年,国民政府农商部地质调查所受中华教育文化基金董事会的委托,从事中国土壤调查与研究,并成立土壤研究室。当时中国对土壤的调查研究几乎为一张白纸,因此以开展区域概测为主,进行全国性调查。土壤调查的工作先后在山东、陕西、河北、甘肃、广西、广东及江西等省展开,足迹遍布全国(程裕淇等,1996)。通过大量的野外地质工作调查,撰写了调查报告及有关论文一百余篇,并在此基础上编制了中国第一幅比例尺为 1:750 万的中国土壤概图,编印出版了专著《中国土壤地理》。

2.2 探索与发展阶段

20 世纪 90 年代,随着工业化进程的加速,环境污染、全球变化与可持续发展之间的矛盾已成为关乎人类生存发展的重大问题。1995 年前后西方国家的科学家开始关注环境评价,但重点是矿山与矿业活动对环境污染的综合评估及修复技术的发展(THORNTON I,1993;WIENHOLD B J et al.,2004)。

中国的勘查地球化学家较早意识并预测到了土壤污染的极端重要性。1993 年,中国科学院院士谢学锦就曾指出:中国改革开放以来对工业化的过分追求及对环境问题的忽视,可能引发危及国家与民族存亡的区域性化学定时炸弹的形成与爆发,并提出从全国尺度上对土壤污染进行地球化学监测。

1992 年,原地矿部科技司设置了《全国环境地球化学监测网络及全国动态地球化学图》的重大基础研究项目。1999 年根据该项目成果形成的《化学定时炸弹:中国陆地环境面临的新问题》(成杭新等,1999)一文中预测,中国东部、中南部的部分地区有可能在不同的时间阶段及不同地区的大面积范围内出现不同元素的化学定时炸弹。前些年湘江流域发现的土壤重金属污染及部分作物重金属超标也证实了上述预测。

1996 年,地质矿产部实施“第二轮填图”计划,其宗旨是:加强地质矿产部制定的 25 个重点片区的区调工作;开拓新的服务领域。例如,农业地质、灾害地质、生态地质、环境地质等专题地质填图及研究;完善和发展区调技术方法;建立全国区域地质调查数据库及不同比例尺数字地质图图库等。之后,逐步迎来了中国区域地质调查工作的新阶段。

1999 年,经国务院批准,在财政部的大力支持下,国土资源部组织实施了为期 12 年的新一轮国土资源大调查,主要针对中国土地、矿产、海洋等自然资源和环境,开展基础性、公益性、战略性综合调查评价和监测预警等工作。

中国水工环地质工作不断为农业发展提供支撑服务。2000 年以前,中国共完成 1:50 万~1:20 万区域水文地质普查面积 820 万 km²,并依据国家需要,除西藏以外,各省(区、市)都编制了水文地质工程地质区划、农业水文地质区划等,这些区划在各地制定农业区划及农业开发中得到应用。

上述区域地质、水工环地质领域的调查工作,为下一步土壤质量地球化学调查工作的提出和快速发展奠定了坚实的基础。

2.3 土壤质量地球化学调查工作的高速发展阶段

针对 20 世纪末的工作现状,中国勘查地球化学家根据人多地少、人口密集分布、粮食主产区相对连片的特点,提出进行平原区的区域性地球化学调查(谢学锦等,2002)。

1999年,中国地质调查局正式启动“多目标区域地球化学调查计划”。通过十几年的持续调查,初步完成全国土地地球化学调查工作,首次系统查明中国土地的地球化学状况,为国家土地资源管理和土壤污染防治提供了重要的国情数据。

2000年以前,对土壤污染的研究一直停留在基础科学层面,全国甚至没有一个专门的机构来管理土壤污染问题。2003年,中国地质调查局根据1999~2001年在广州、武汉、成都3个地区的调查结果,形成专报,引起党和国家领导人的高度重视,促使“全国土壤现状调查与污染防治”专项的提出和批准实施。

依据十几年来的调查成果,2014年中国环境保护部和国土资源部联合发布了《全国土壤污染调查公报》;2015年中国地质调查局发布了《中国耕地地球化学调查报告(2015年)》;2016年中国地质调查局发布了《中国地球化学调查报告(2016年)》。

2014年,中国地质调查局调整业务布局,提出九大计划、50项工程,其中“国土开发与保护基础地质支撑计划”中专门设置了“土地地球化学调查工程”。

2016年5月28日,国务院发布《土壤污染防治行动计划》(即“土十条”)。2017年以来,中国逐步开展了大规模的土壤污染调查、防治和修复工作。

2018年1月,《第三次全国土地调查总体方案》经国务院批准发布。这又是一项与土壤质量地球化学调查密切相关的国家级大规模重点工作。

土壤质量地球化学调查评价工程,是土壤质量地球化学调查工作的拓展和深化,是在过去十余年开展的全国多目标区域地球化学调查基础上,充分发挥勘查地球化学技术优势,服务土地质量与生态保护的一项工作。它既是全国多目标区域地球化学调查工作的延续,又拓展了土壤质量评价、监测、预警与修复等多方面的工作,是摸清中国土地质量家底的重要手段,也是积极拓宽地质工作服务领域的重要举措。

2.4 中国土壤质量地球化学调查的主要成果

(1)土壤国情概况。1999~2015年期间,全国完成多目标区域地球化学调查面积约为200万 km^2 (图1),基本覆盖了东北平原、华北平原、四川盆地、长江中下游地区以及东南沿海经济发达地区(张德存等,2001;赵琦,2002;廖启林等,2004;黄勇等,

2008;余涛等,2008a,2008b;王洪翠等,2008;杨忠芳等,2008;王立胜等,2012;于成广等,2012)。其中符合绿色农产品产地环境质量的耕地面积占调查耕地面积的88.8%,无污染耕地占调查耕地总面积的91.8%。发现重金属污染土地约占全部调查面积的13%。重金属污染由北向南显示面积扩大、含量增高及种类增多趋势。与20世纪80年代相比,全国耕地全氮、有效磷、有效钾含量增加明显,有机碳总体也呈增加趋势,但部分地区仍存在耕地有机质明显下降、土壤酸化和碱化加剧等问题^①。

(2)土地资源规划管理。运用土地质量地球化学评价成果,为国土资源部门进行土地利用规划调整完善,永久基本农田划定与保护,土壤污染治理修复,土地整治和表土剥离再利用工程,特色农业开发等工作提供数据支撑。

(3)富硒土地开发与扶贫攻坚。截止2015年,全国发现富Se土地20.87万 km^2 ,其中包括绿色富Se耕地5244万亩,主要成因与煤系地层、碱性花岗岩、碳质灰岩及河湖相沉积作用等有关,类型繁多,分布广泛^②。

富Se土地开发目前在全国各地区普遍开展并取得显著成果,年经济效益数以千亿计,对于精准扶贫、永久脱贫发挥独特作用。

(4)土壤重金属污染。全国多目标区域地球化学调查揭示出大量土壤污染与土壤环境问题(VI-ARD B et al., 2004;和莉莉等,2008;TENG Y G et al., 2010;蔡美芳等,2014;纪小凤等,2016),Cd、Hg、Pb等重金属元素在表层土壤呈富集趋势,引起社会各方面高度关注,成为影响经济社会健康和可持续发展的重大科学问题。

(5)土壤碳与全球变化研究。土壤存在巨大碳容量和天然固碳作用是减缓碳释放可选择的最为经济有效途径之一。研究表明^②,土壤碳密度较低和变化幅度较大构成中国土壤有机碳储量分布的主要特征。中国中东部地区与过去第二次土壤普查土壤有机碳相比,约20年期间河北平原、河南平原、湖北江汉平原、湖南洞庭湖平原依次增加42.8%、37.0%、22.0%、4.5%,东北平原、广东珠江三角洲平原、海南岛依次减少29.4%、19.2%、10.3%。

①中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告, 2015.

②奚小环. 全国土地质量地球化学调查与评价概论讲座, 2017.

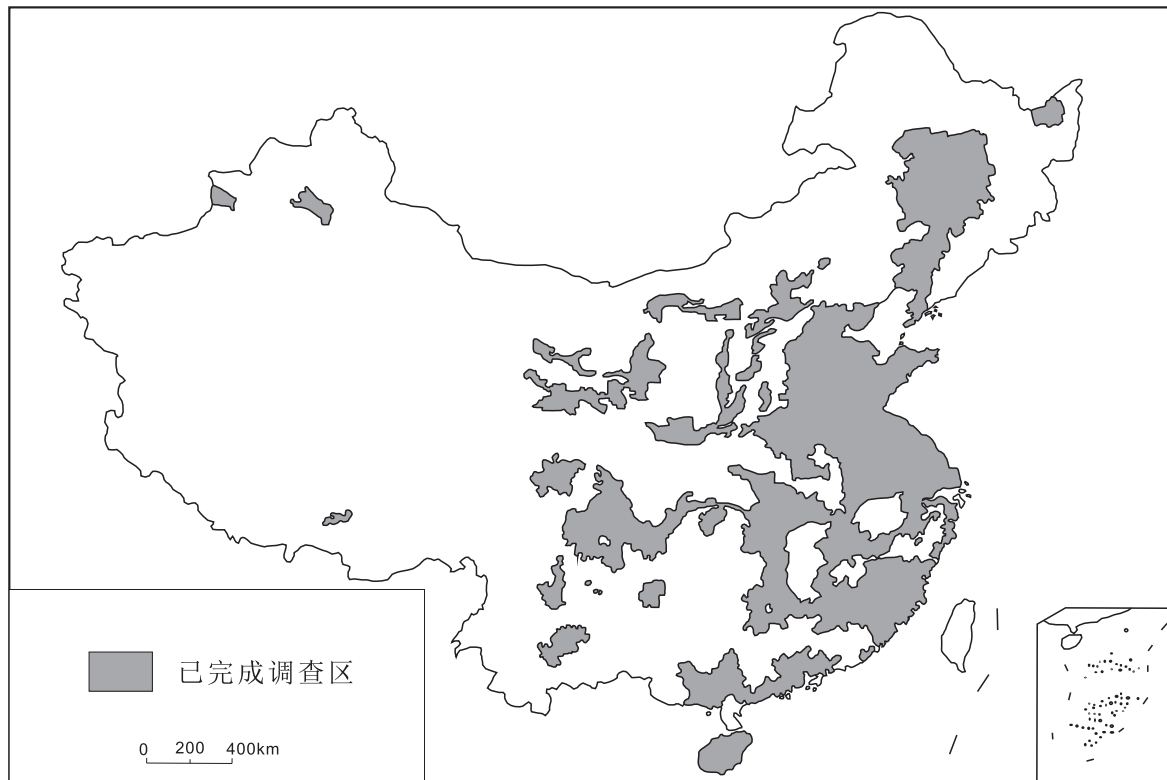


图1 1999~2015年间多目标区域地球化学调查工作程度图^①

Fig. 1 The working degree map of the multi-objective regional geochemical survey during 1999—2015

出版专著《中国土壤地球化学参数值》和《中国土壤碳密度系列参数》，为土壤学、生态学、生物学、环境学、地学、农学等学科领域，以及国土、环保、农业、林业、卫生等行业部门提供巨量系统的大数据资料，指导和深化各方面的应用实践与学术研究(王海荣等, 2011; 成杭新等, 2014)。

(6)基础地质理论与找矿突破。运用地球化学理论和方法划分第四纪沉积相和成土母质，研究第四纪沉积环境，推断隐伏断裂等，为第四纪地质填图增添了大量新参数。

通过调查，发现一批具有找矿前景的异常，经检查取得重要找矿线索，提交工程验证。随着调查和评价工作深入进行，预期将在油气资源、地热资源及固体矿产资源方面取得突破。

3 土壤质量地球化学调查与评价研究展望

1999年以来，国土资源部组织中国地质调查局等单位持续开展土地质量地球化学调查工作，初步

查明了中国东、中部平原盆地等主要农业生产区的土壤环境质量状况；建立了系列调查方法技术标准；形成了调查项目高效运行和质量有效控制的成功模式和经验。

这是一项融第四纪地质研究、矿产资源勘查、环境质量评价、土地合理使用和农业生产服务为一体的综合性地质调查工作，取得了大量的第一、第二环境的基础数据资料，蕴涵了丰富的第四纪地质、矿产资源和环境评价信息，合理有效地利用这些宝贵的第一手资料，对中国国民经济发展、城镇规划和土地合理使用具有重要的指导意义。

当前地质调查工作已从传统方法进入到高科技应用时代，数字技术、遥感、可视化、云计算与地质、地球物理、地球化学手段相结合的综合调查方法成为主流。针对中国土地质量地球化学调查工作的研究现状，结合工作实际分析探讨，提出以下建议与展望。

(1)未来若干年内，建议国家继续推进1:25万土地质量地球化学调查评价工作，以期实现全国可

^①中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告, 2015.

测面积全覆盖的目标。各地区也将在此基础上循序渐进地开展区域评价、普查评价及详查评价工作,为国土资源规划管理提供大数据应用系统,服务于环保、农业、林业、卫生等各行业部门,以及地质学、土壤学、生态学、生物学、环境学、农学等各学科领域。在实际开展多目标地球化学调查时应以生态环境或地质地理区划为单元,同时兼顾大城市(城市群)。建议对不同研究区所存在的特殊问题进行有针对性的调查、监测工作。

(2)建议在土地质量地球化学调查基础上进一步开展更高层次的土地生态地球化学评价,对地球系统与生态系统地球化学循环机制演化规律与机理进行更深入的科学研究,对生态危害与生态风险进行科学评价和预测。

不同层级的土地质量地球化学调查工作将为正在开展的第三次全国土地调查提供丰富的基础数据和背景信息。

(3)将土地的经济价值、地质-地球化学-地球物理指标、遥感信息等紧密结合形成农林与城市区划综合的评价与对策;利用地理信息系统平台将各种资料可视化,建立预测模型、进行动态预测。

综合集成地球物理、地球化学和多源信息遥感领域不断发展的新理论、新技术,建立土壤元素含量与农作物长势关系模型,利用多源信息遥感技术对农作物进行动态监测,最终实现对土壤重金属污染程度和肥力调查的动态监测。

(4)针对土地污染问题,按照国家“土十条”要求大力推进土壤重金属与有机污染调查评价、治理修复与监控监管,推动土地数量、质量、生态“三位一体”管护落到实处。

建设土壤环境质量监测网络,提升土壤环境信息化管理水平。主要针对重金属污染问题建立国家、省区与市县三级生态地球化学监测预警体系,采取全面监控与重点监控相结合原则,制定统一的监控方法技术、指标标准、质量精度及评估内容等。

(5)进一步推动富含有益微量元素(Se、B、Zn等)土壤的调查评价工作,特别重视富Se土壤的科学研究,为进一步开展专项富Se土地资源调查、富Se土壤地球化学评价标准的制定、富Se土壤开发利用与保护等工作提供目标靶区和技术理论支撑。

(6)全球变化是人类社会发展最大的科学问题,土地利用与土地覆被变化是导致土壤有机碳发生

汇/源变化的主要原因。充分依托大量精密的多目标区域地球化学调查数据资料,以土地利用方式变化对土壤碳储量影响的地球化学过程、机制与环境效应为重点,研究土壤有机碳分布特征、碳储量分布、土壤碳汇潜力与储碳机制等,研究土壤地球化学固碳工程技术及土壤碳监测网络与土壤碳变化趋势预测等。改变土地利用方式,改善土地生态状况与保持耕地有机质水平,促进土地科学利用和生态管护,采取积极有效措施应对全球变化。

(7)进一步完善、建立各耕地区块质量登记、监测制度,形成全覆盖的全国土地质量档案及其数据库,利用大数据技术长期跟踪、监控土地质量,指导耕区施肥、灌溉、作物种植和农业开发,为推动实施乡村振兴战略、实现乡村产业振兴和生态振兴提供支撑。

参考文献(References):

- 赵其国,孙波,张桃林.土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤,1997,(3):113-120.
- ZHAO Qiguo, SUN Bo, ZHANG Taolin. Soil Quality and Sustainable Environment I. Definition and Evaluation Method of Soil Quality [J]. Soil, 1997, (3): 113-120.
- 成杭新,严光生,沈夏初等.化学定时炸弹:中国陆地环境面临的新问题[J]. 长春科技大学学报,1999,29(1):68-73.
- CHENG Hangxin, YAN Guangsheng, SHEN Xiachu, et al. Chemical Time Bomb: A New Problem Faced by China's Terrene Environment[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, 29(1): 68-73.
- 谢学锦,程志中,成杭新.应用地球化学在中国发展的前景[J]. 中国地质,2004,31(S1):16-29.
- XIE Xuejing, CHENG Zhizhong, CHENG Hangxin. Future Development of Applied Geochemistry in China[J]. Geology in China, 2004, 31(S1): 16-29.
- 黄勇,杨忠芳.中国土地质量评价的研究现状及展望[J]. 地质通报,2008,27(2):207-211.
- HUANG Yong, YANG Zhongfang. Land Quality Evolution in China: Present Status and Prospect[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 207-211.
- 黄勇,杨忠芳.土壤质量评价国外研究进展[J]. 地质通报,2009,28(1):130-136.
- HUANG Yong, YANG Zhongfang. Recent Research Pro-

- gress of Overseas Soil Quality Evolution[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(1): 130-136.
- 汪媛媛, 杨忠芳, 余涛. 土壤质量评价研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22617-22622.
- WANG Yuanyuan, YANG Zhongfang, YU Tao. Research Progress of Soil Quality Evolution[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(36): 22617-22622.
- 朱立新. 农业地球化学的研究进展及近期内的主要任务[J]. 地质科技情报, 1994, 13(3): 63-68.
- ZHU Lixin. Development of Research on Agricultural Geochemistry and Its Main Tasks in the Near Future[J]. Geological Science and Technology Information, 1994, 13(3): 63-68.
- 朱立新, 周国华, 任天祥. 农业地球化学调查研究的基本工作方法[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(6): 368-373.
- ZHU Lixin, ZHOU Guohua, REN Tianxiang. Basic Methods on Agri-geochemical Survey and Study[J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 1994, 3(6): 368-373.
- 布连科夫 ㊀. К. 等, 邱郁文编译. 多目标地球化学填图的原则与功能[J]. 国外地质科技, 1995, (4): 59-63.
- BLENKOV ㊀ К. et al. Principles and Functions of Multi-purpose Regional Geochemical Mapping[J]. Overseas Geosciences, 1995, (4): 59-63.
- 谢学锦, 周国华. 多目标地球化学填图及多层次环境地球化学监控网络——基本概念与方法[J]. 地质通报, 2002, 21(12): 809-816.
- XIE Xuejing, ZHOU Guohua. Multi-purpose Regional Geochemical Mapping and Multi-level Environmental Geochemistry Monitoring Network: Its Basic Concept and Methodology[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(12): 809-816.
- 杨忠芳, 陈岳龙, 汪明启, 等. 地球化学填图的国际研究现状及建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 826-832.
- YANG Zhongfang, CHEN Yuelong, WANG Mingqi, et al. The Status of International Geochemical Mapping and Suggestions to China's Mapping[J]. Advances in Earth Sciences, 2002, 17(6): 826-832.
- 王平, 奚小环. 全国农业地质工作的蓝图——“农业地质调查规划要点”评述[J]. 中国地质, 2004, 31(S1): 11-15.
- WANG Ping, XI Xiaohuan. Blueprint of Nationwide Agro-geological Environmental Survey-On the “Main Points of the Plan of Nationwide Agrogeological Environmental Survey”[J]. Geology in China, 2004, 31(S1): 11-15.
- 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): 1-2, 7.
- XI Xiaohuan. Exploration Geochemistry at the All-round Development Stage[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2009, 33(1): 1-2, 7.
- 谢学锦, 任天祥, 严光生, 等. 进入 21 世纪中国化探发展路线图[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 245-267.
- XIE Xuejing, REN Tianxian, YAN Guansheng, et al. 21st Century's Roadmap for Exploration Geochemistry in China[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 245-267.
- 杨少平, 弓秋丽, 文志刚, 等. 地球化学勘查新技术应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1844-1877.
- YANG Shaoping, GONG Qiuli, WEN Zhigang, et al. Application Research of the New Technologies for Geochemical Survey[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1844-1877.
- 夏家淇, 蔡道基, 夏增禄, 等. 土壤环境质量标准(GB15618-1995)[S]. 北京: 国家环境保护局, 1995.
- XIA Jiaqi, CAI Daoji, XIA Zenglu, et al. Environmental Quality Standard for Soils(GB15618-1995)[S]. Beijing: National Environmental Protection Agency, 1995.
- 中国环境监测总站, 南京市环境监测中心站. 土壤环境监测技术规范(HJ/T 166-2004)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- China National Environmental Monitoring Centre, Nanjing environmental monitoring center. The Technical Specification for Soil Environmental monitoring(HJ/T 166-2004)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- 叶家瑜, 李锡坤, 刘棕, 等. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)(DD2005-03)[S]. 北京: 中国地质调查局, 2005.
- YE Jiayu, LI Xikun, LIU Zong, et al. Technical Requirements for Sample Analysis of Eco-geochemical Evaluation(for Trial Implementation)(DD2005-03)[S]. Beijing: China Geological Survey, 2005.
- 周国华, 杨忠芳, 成杭新, 等. 局部生态地球化学评价技术要求(试行)(DD2008-05)[S]. 北京: 中国地质调查局, 2008.
- ZHOU Guohua, YANG Zhongfang, CHENG Hangxi, et al. Technical Specifications for Local Ecological Geochemical Assessment (for Trial Implementation)(DD2008-05)[S]. Beijing: China Geological Survey, 2008.
- 成杭新, 杨忠芳, 周国华, 等. 生态地球化学预警技术要求(DD2014-09)[S]. 北京: 中国地质调查局, 2014.
- CHENG Hangxin, YANG Zhongfang, ZHOU Guohua, et al. Technical Specifications for Eco-geochemical Warning(DD2014-09)[S]. Beijing: China Geological Survey, 2014.
- 文冬光, 蔡五田, 郝爱兵, 等. 污染场地土壤和地下水调查与风险评价规范(DD2014-06)[S]. 北京: 中国地质调查局, 2014.

- WEN Dongguang, CAI Wutian, HAO Aibing, et al. Technical Specifications for Investigation and Risk Assessment of Contaminated Soil and Groundwater (DD2014-06) [S]. Beijing: China Geological Survey, 2014.
- 奚小环, 陈国光, 张德存, 等. 多目标区域地球化学调查规范 (1:250000) (DZ/T 0258-2014) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- XI Xiaohuan, CHEN Guoguang, ZHANG Decun, et al. Specification of Multi-purpose Regional Geochemical Survey (1:250000) (DZ/T 0258-2014) [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- 杨忠芳, 余涛, 叶家瑜, 等. 土地质量地球化学监测技术要求 (DD2014-10) [S]. 北京: 中国地质调查局, 2014.
- YANG Zhongfang, YU Tao, YE Jiayu, et al. Technical Specifications for Land Quality Geochemical Monitoring (for Trial Implementation) (DD2014-10) [S]. Beijing: China Geological Survey, 2014.
- 杨忠芳, 成杭新, 周国华, 等. 区域生态地球化学评价规范 (DZ/T 0289-2015) [S]. 北京: 国土资源部, 2015.
- YANG Zhongfang, XI Xiaohuan, ZHOU Guohua, et al. Specifications of Regional Ecogeochemical Assessment (DZ/T 0289-2015) [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources, 2015.
- 杨忠芳, 余涛, 李敏, 等. 土地质量地球化学评价规范 (DZ/T 0295-2016) [S]. 北京: 国土资源部, 2016.
- YANG Zhongfang, YU Tao, LI Min, et al. Specification for Geochemical Evaluation of Land Quality (DZ/T 0295-2016) [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources, 2016.
- 林景星, 张静, 史世云, 等. 生态环境地质学—21 世纪新兴的地球学科[J]. 地质通报, 2003, 22(7): 459-469.
- LIN jingxing, ZHANG Jing, SHI Shiyun, et al. Ecoenvironmental Geology—A Rising Branch of Earth Science during the 21st Century[J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(7): 459-469.
- 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 Xiaohuan. Exploration Geochemistry, Resources and Environment in 1999-2001[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2003, 27(1): 1-6.
- 施俊法, 李友枝. 国外生态地球化学填图理论及其发展趋势[J]. 物探与化探, 2003, 27(6): 469-472.
- SHI Jufa, LI Youzhi. Theories and Development Trends of Ecological Geochemical Mapping Abroad[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2003, 27(6): 469-472.
- 杨忠芳, 成杭新, 陈岳龙, 等. 进入 21 世纪的勘查地球化学: 对生态地球化学的展望[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 600-605.
- YANG Zhongfang, CHENG Hangxin, CHEN Yuelong, et al. Exploration Geochemistry in 21st Century: Prospect on Ecological Geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(2): 600-605.
- 成杭新, 杨忠芳, 赵传冬, 等. 区域生态地球化学预警: 问题与讨论[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 607-615.
- CHENG Hangxin, YANG Zhongfang, ZHAO Chuandong, et al. Early Warning on Regional Ecological Geochemistry: Problems and Discussions[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(2): 607-615.
- 奚小环. 生态地球化学与生态地球化学评价[J]. 物探与化探, 2004, 28(1): 10-15.
- XI Xiaohuan. Eco-geochemical Research and Eco-geochemical Revolution[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2004, 28(1): 10-15.
- 奚小环. 多目标区域地球化学调查与生态地球化学——第四纪研究与应用的新方向[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 269-274.
- XI Xiaohuan. Multi-purpose Regional Geochemical Survey and Ecogeochemistry: New Direction of Quaternary Research and Application[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(3): 269-274.
- 杨忠芳, 奚小环, 成杭新, 等. 区域生态地球化学评价核心与对策[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 275-284.
- YANG Zhongfang, XI Xiaohuan, CHENG Hangxin, et al. The Core and Countermeasures of Regional Ecological Geochemical Assessment [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(3): 275-284.
- 杨忠芳, 成杭新, 奚小环, 等. 区域生态地球化学评价思路及建议[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 687-693.
- YANG Zhongfang, CHENG Hangxin, XI Xiaohuan, et al. The Thinking and Suggestion of Regional Ecological Geochemical Assessment[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(8): 687-693.
- 奚小环. 多目标的地质大调查——21 世纪勘查地球化学的战略选择[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 283-288.
- XI Xiaohuan. Multipurpose Comprehensive Geological Survey: the Strategic Choice of Exploration Geochemistry in 21st Century[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(4): 283-288.
- 奚小环. 生态地球化学: 从调查实践到应用理论的系统工程[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 1-8.
- XI Xiaohuan. Ecological Geochemistry: from a Geochemical Survey to an Applied Theory[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5): 1-8.

- 成杭新,杨忠芳,奚小环,等.新一轮全球地球化学填图:中国的机遇和挑战[J].地学前缘,2008,15(5):9-22.
- CHENG Hangxin, YANG Zhongfang, XI Xiaohuan, et al. A New Round of Global Geochemical Mapping: Opportunity and Challenge to China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5): 9-22.
- 周国华,田黔宁,孙彬彬,等.生态地球化学预测预警若干问题探讨[J].地质通报,2009,28(1):118-123.
- ZHOU Guohua, TIAN Qianning, SUN Binbin, et al. Discussion on Ecological Geochemical Early-warning and Forecasting[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(1): 118-123.
- 赵传冬,成杭新,庄广民,等.多目标地球化学填图中土壤环境质量评价方法的探讨[J].地质与勘探,2003,39(6):78-81.
- ZHAO Chuandong, CHENG Hangxin, ZHUANG Guangmin, et al. A Study on Evaluation Method of Soil Environment in Multi-purpose Geochemical Mapping[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(6): 78-81.
- 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.
- LIU Zhanfeng, FU Bojie, LIU Guohua, et al. Soil Quality: Concept, Indicators and Its Assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 901-913.
- 奚小环.土壤污染地球化学标准及等级划分问题讨论[J].物探与化探,2006,30(6):471-474.
- XI Xiaohuan. A Discussion on the Geochemical Standard and Grade Division of Soil Pollution[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2006, 30(6): 471-474.
- 杨忠芳,余涛,冯海艳,等.区域生态地球化学评价数据的统计方法[J].地质通报,2007,26(11):1405-1412.
- YANG Zhongfang, YU Tao, FENG Haiyan, et al. Data Statistical Principles and Methods for Regional Ecogeochemical Assessments [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(11): 1405-1412.
- 聂兰仕,王学求,杨忠芳,等.农业生态地球化学评价系统设计与实现[J].物探与化探,2011,35(2):254-257.
- NIE Lanshi, WANG Xueqiu, YANG Zhongfang, et al. The Design and Implementation of the Evaluation System for Ecological Agro-geochemistry[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(2): 254-257.
- 李朝奎,王利东,李吟,等.土壤重金属污染评价方法研究进展[J].矿产与地质,2011,25(2):171-176.
- LI Chaokui, WANG Lidong, LI Yin, et al. Progress on Evaluation Method of Soil Heavy Metal Contamination[J]. Mineral Resources and Geology, 2011, 25(2): 171-176.
- 吴新民,潘根兴.影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析[J].土壤学报,2003,40(6):921-928.
- WU Xinmin, PAN Genxing. The Correlation Analysis between the Content of Heavy Metals and the Factors Influencing the Pollution of Heavy Metals in Urban Soils in Nanjing City [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 921-928.
- 黄勇,杨忠芳,张连志,等.基于重金属的区域健康风险评估——以成都经济区为例[J].现代地质,2008,22(6):990-997.
- HUANG Yong, YANG Zhongfang, ZHANG Lianzhi, et al. Regional Health Risk Assessment on Heavy Metals in Chengdu Economic Region [J]. Geoscience, 2008, 22(6): 990-997.
- 余涛,杨忠芳.重金属元素摄入总量与健康安全评估——以湖南洞庭湖地区为例[J].地质通报,2008,27(2):196-202.
- YU Tao, YANG Zhongfang. Intake Amount of Heavy Metal Elements and Health and Safety Assessments——A Case Study of the Dongting Lake Area, Hunan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 196-202.
- 余涛,杨忠芳,岑静,等.磁化率对土壤重金属污染的指示性研究——以沈阳新城子区为例[J].现代地质,2008,22(6):1034-1040.
- YU Tao, YANG Zhongfang, CEN Jing, et al. The Study of Magnetic Susceptibility as the Indication of Contaminated Soil with Heavy Metals; the Case of Xinchengzi District in Shenyang [J]. Geoscience, 2008, 22(6): 1034-1040.
- 刘坤,李光德,张中文,等.城市道路土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J].环境科学与技术,2008,31(2):124-127.
- LIU Kun, LI Guangde, ZHANG Zhongwen, et al. Heavy Metal Pollution and the Ecological Hazard in Urban Soils of Side Roads in Tai'an [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 124-127.
- 刘晨,陈家玮,杨忠芳,等.北京郊区农田土壤中HCH残留调查及评价[J].物探与化探,2008,32(5):567-570.
- LIU Chen, CHEN Jiawei, YANG Zhongfang, et al. The Investigation and Evaluation of HCH Residues in Soils of Beijing Suburbs [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2008, 32(5): 567-570.
- 王洪翠,杨忠芳,李伟,等.土地质量评估中评价单元的划分——以山西忻州盆地为例[J].地质通报,2008,27(2):203-206.
- WANG Hongcui, YANG Zhongfang, LI Wei, et al. Evalua-

- tion Units in the Land Quality Assessments——A Case Study of the Xinzhou Basin, Shanxi, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 203-206.
- 杨忠芳, 侯青叶, 余涛, 等. 农田生态系统区域生态地球化学评价的示范研究: 以成都经济区土壤 Cd 为例[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 23-35.
- YANG Zhongfang, HOU Qingye, YU Tao, et al. An Example of Eco-geochemical Assessment for Agroecosystems: a Study of Cd in Chengdu Economic Region[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5): 23-35.
- 秦雯雯, 杨忠芳, 侯青叶, 等. 江西省鄱阳湖地区饮用水健康风险评价[J]. 现代地质, 2011, 25(1): 182-188.
- QIN Wenwen, YANG Zhongfang, HOU Qingye, et al. Health Risk Assessment of Drinking Water in Poyang Lake Region in Jiangxi Province[J]. Geoscience, 2011, 25(1): 182-188.
- 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2014-2021.
- YANG Gang, SHEN Fei, ZHONG Guijiang, et al. Concentration and Health Risk of Heavy Metals in Crops and Soils in a Zinc-Lead Mining Area in Southwest Mountainous Regions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 2014-2021.
- 王立胜, 汪媛媛, 余涛, 等. 土地质量地球化学评估与绿色产能评价研究: 以吉林大安市为例[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 879-885.
- WANG Lisheng, WANG Yuanyuan, YU Tao, et al. Study on Geochemical Assessment of Land Quality and Green Productivity Evaluation in Da'an City, Jilin Province[J]. Geoscience, 2012, 26(5): 879-885.
- 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.
- YU Chengguang, YANG Zhongfang, YANG Xiaobo, et al. Study and Application on Land Quality Geochemical Assessment Methods: Taking Panjin City as an Example [J]. Geoscience, 2012, 26(5): 873-878.
- 姚振, 田兴元, 姬丙艳, 等. 西宁-乐都地区土地质量地球化学评估[J]. 西北地质, 2012, 45(1): 317-323.
- YAO Zhen, TIAN Xingyuan, JI Bingyan, et al. The Geochemical Assessment for Land Quality in Xining-Ledu Area[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(1): 317-323.
- 程裕淇, 陈梦熊编著. 前地质调查所(1916~1950)的历史回顾: 历史评述与主要贡献[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- CHENG Yuqi, CHEN Mengxiong. Historical Review of the Former Geological Survey(1916-1950): Historical Commentary and Major Contributions[M]. Beijing: Geological Press, 1996.
- 张德存, 张宏泰. 江汉平原多目标地球化学调查主要成果与意义[J]. 中国地质, 2001, 28(12): 1-4.
- ZHANG Decun, ZHANG Hongtai. Main Results and Significance of Multi-purpose Geochemical Survey in the Jianghan Plain[J]. Geology in China, 2001, 28(12): 1-4.
- 赵琦. 成都市多目标地球化学调查和双层采样效果[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 186-191.
- ZAOH Qi. Multi-target Geochemical Survey and Results of Double-layer Sampling in Chengdu City[J]. Geology in China, 2002, 29(2): 186-191.
- 廖启林, 吴新民, 翁志华, 等. 南京地区多目标地球化学调查基本成果及其相关问题初探[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 70-77.
- LIAO Qili, WU Xinmin, WENG Zhihua, et al. Basic Results of Multi-target Geochemical Survey in the Nanjing Area and Its Relevant Problems[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 70-77.
- 和莉莉, 李冬梅, 吴钢. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1210-1216.
- HE Lili, LI Dongmei, WU Gang. Heavy Metal Contamination of Urban Soils in China: State and Prospect[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1210-1216.
- 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 223-230.
- CAI Meifang, LI Kaiming, XIE Danping, et al. The Status and Protection Strategy of Farmland Soils Polluted by Heavy Metals[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(120): 223-230.
- 纪小凤, 郑娜, 王洋, 等. 中国城市土壤重金属污染研究现状及展望[J]. 土壤与作物, 2016, 5(1): 42-47.
- JI Xiaofeng, ZHENG Na, WANG Yang, et al. Heavy Metal Contamination of Urban Soils in China: Recent Advances and Prospects[J]. Soils and Crops, 2016, 5(1): 42-47.
- 王淑敏, 胥哲明, 潘彩霞. 城市绿地土壤质量评价指标研究进展[J]. 中国园艺文摘, 2011, (7): 38-40.
- WANG Shumin, XU Zheming, PAN Caixia. Research Progress on Indicators of Soil Quality Evaluation of Urban Green Space[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2011, (7): 38-40.
- 王思翀. 土地评价综述[J]. 吉林农业(学术版), 2011, (5): 80-81.

- WANG Sichong. Review of Land Evaluation[J]. Jilin Agriculture, 2011, (5): 80-81.
- 王海荣, 杨忠芳. 土壤无机碳研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(35): 21735-21739.
- WANG Hairong, YANG Zhongfang. Research Progress on Soil Inorganic Carbon[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(35): 21735-21739.
- 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- CHENG Hangxin, LI Kuo, LI Min, et al. Geochemical Background and Baseline Value of Chemical Elements in Urban Soil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 265-306.
- WARKENTIN BP, FLETCHER HR. Soil Quality for Intensive Agriculture[C]. In Proc. International Seminar on Soil Environ Fert Manage Intensive Agric Soc Sci Soil Manure. Tokyo: Natl Inst of Agric Sci, 1977: 594-598.
- WARKENTIN BP. The Changing Concept of Soil quality [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50(3): 226-228.
- WIENHOLD B J, ANDREWS S S, KARLEN D L. Soil Quality: A Review of the Science and Experiences in the USA [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2): 89-95.
- WIENHOLD B J, ANDREWS S S, KARLEN D L. Soil quality: Indices and Appraisal[C]. Indian: Indian Society of Soil Science, 2005: 67-72.
- XIE Xuejing, CHENG Hangxin. Sixty Years of Exploration Geochemistry in China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 4-8.
- YAO Wensheng, XIE Xuejing, ZHAO Pizhong, et al. Global Scale Geochemical Mapping Program-Contributions from China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 9-20.
- LI Min, XI Xiaohuan, XIAO Guiyi, et al. National Multi-purpose Regional Geochemical Survey in China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 21-30.
- YANG Zhongfang, YU Tao, HOU Qingye, et al. Geochemical Evaluation of Land Quality in China and Its Applications[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 122-135.
- THORNTON I. Environmental Geochemistry and Health in the 1990s: A Global Perspective[J]. Applied Geochemistry, 1993, Supplement Issue(2): 203-210.
- NEMEROW N L. Scientific Stream Pollution Analysis[M]. Washington: Scripta Book Company, 1974.
- VIARD B, PIHAN F, PROMEYRAT S, et al. Integrated Assessment of Heavy Metal (Pb, Zn, Cd) Highway Pollution: Bioaccumulation in Soil, Graminaceae and Land Snails[J]. Chemosphere, 2004, 55(10): 1349-1359.
- TENG Y G, NI S J, WANG J S, et al. A Geochemical Survey of Trace Elements in Agricultural and Non-agricultural Topsoil in Dexing Area, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2010, 104(3): 118-127.