



中国土壤环境与污染修复 发展现状与展望*

文 / 骆永明^{1,2} 章海波¹ 涂晨¹ 滕应²

1 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003

2 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008

【摘要】 文章系统综述了中国土壤环境污染状况与监管需求、国际土壤环境与污染修复研究态势和中国土壤环境与污染修复研究现状;展望了中国土壤环境与污染修复的未来研究与发展,强调了科学认识土壤环境系统和研究农用地及建设用地土壤污染防治和修复科技的紧迫性,提出了开展土壤污染防治与修复科技专项研究的建议,以促进现代土壤环境科学与技术创新,加快土壤修复产业发展。

【关键词】 土壤污染,土壤环境,土壤修复,研究与发展

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.Z1.013

当前,土壤环境质量维持正面临着全球“粮食安全、生态退化、环境污染、资源匮乏、能源紧缺、全球变化、灾害频发”等挑战^[1]。土壤是构成地球表层系统的基本环境要素,是具有固、液、气多相的开放体系,是农业的基本生产资料 and 人类赖以生存的物质基础,并支撑着陆地生态系统中的生命过程。土壤环境在时间上具有动态可变性,在空间上具有连续变异性^[2]。因此,如何协调发挥土壤的生产功能、环境保护功能、生态工程建

设支撑功能和全球变化缓解功能,是新时期我国土壤环境保护的重要任务。

1 中国土壤环境污染状况与监管需求

2014年4月17日国家环境保护部与国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤环境状况总体不容乐观,总污染超标率为16.1%,其中,中度和重度污染点位比例分别为1.5%和1.1%。部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧,工矿业废弃地土壤环境问题突出;镉、汞、砷、铅4种无机污染物含量分布呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势。近10年的研究也表明,我国土壤污

* 基金项目:环保公益性行业科研专项(201109018, 201409044)

修改稿收到日期:2015年6月4日



中国科学院

染问题主要体现在如下几个方面。

1.1 耕地土壤污染加剧,严重威胁国家“米袋子”和“菜篮子”民生工程

污灌区、工矿区周边、重污染企业周边、城郊结合部、高度集约化设施农业区等农产品产地土壤环境安全问题突出。《全国土壤污染状况调查公报》显示,耕地的超标率高于全国土壤总超标率,高达19.4%,镉为首要污染物。2013年,中国环境监测总站在全国蔬菜种植区采集了4 910个点位,发现超标率为24.3%,主要为重金属污染,占17.5%,有机污染占7.9%;重金属与有机污染物的复合污染也占1.3%。耕地土壤重金属污染已导致多地出现粮食作物镉、铅污染事件,如2002年农业部抽检结果显示,我国稻米铅超标率达28.4%、镉超标率达10.3%;近年来,在广东、湖南、江西、四川、浙江等多地出现“镉米”报道,引起社会广泛关注。此外,工矿区及周边影响区耕地土壤出现了区域及流域性土壤地球化学元素异常,土壤中镉、铬、铅、砷、汞等重(类)金属污染程度加剧,污染面积比20年前大幅度扩大。因此,如何遏制耕地土壤污染退化,守住我国耕地质量红线,确保耕地资源质量和农产品安全的任务日趋艰巨。

1.2 全国工业企业搬迁遗留场地土壤总体污染状况触目惊心,城镇人居环境安全与健康令人担忧

我国工业企业80%集中在城市,特别是大中城市,广泛分布在中东部地区。随着工业化、城市化进程的加快和国际履约工作的深入,许多城市为调整产业结构而实施了城市布局的“退二进三”、“退城进园”战略,大批工业企业将逐步被关停转产或搬迁,产生许多新的污染场地。《全国土壤污染状况调查公报》显示,金属冶炼、皮革、化工、电力等重污染企业用地及周边土壤污染超标率为36.3%;工业企业废弃场地土壤超标率为34.9%;工业园区土壤超标率为29.4%。据不完全统计,截至2009年,全国污染企业关停或搬迁近10万家,主要包括化工、农药、钢铁、焦化等重污染企业,出现大量高风险污染场地。这些场地土壤

往往受到挥发性或半挥发性有机污染物、重金属等多种污染物的污染,污染程度重、分布相对集中;特征污染物因地而异,通常有农药、苯系物、卤代烃、多环芳烃、石油烃、重金属等;污染土层深度可达数米至数十米,地下水同时受到污染。随着越来越多的城市工业用地转变为绿化、娱乐等公共用地或居住用地,潜在的建设用地土壤污染问题将逐渐暴露出来,成为城市土地利用中的环境隐患,大中小城市人居环境健康令人担忧。

1.3 矿区和油田区及其周边土壤环境安全问题不容忽视,严重威胁生态安全和人体健康

我国是世界第三大矿业大国,现有各类矿山4 000多座。矿产资源的开采、冶炼和加工对周边及下游生态破坏和土壤环境污染严重。《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国采矿区土壤超标率为33.4%,其中有色金属矿区周边土壤镉、砷、铅等污染较为严重;采油区土壤超标率为23.6%,主要污染物为石油烃和多环芳烃。长期大规模的矿山开采与冶炼还产生了大量的尾矿库、尾矿砂污染。据报道,全国现有固体废矿渣积存量达60亿—70亿吨,煤矿废水每年达26亿吨。一些矿区由于管理不善,形成污染事件,对当地和周边地区的陆地生态环境和人体健康造成了不良影响,例如广东韶关大宝山铅锌矿区“上坝癌症村”、英德硫铁矿区砷中毒、莲花山矿区砷污染、紫金矿业污染等事件。我国油田区内污染场地20余万处,呈现点、片、面交叉的污染态势,污染范围大,高浓度石油污染土壤及油泥沙积存量逾200万吨,对土壤、地下水和人体健康造成了极大威胁。

1.4 土壤污染复合化或混合化,流域性和区域化态势凸现

我国的流域和区域性土壤地球化学异常或污染规模空前。《全国土壤污染状况调查公报》显示,长江三角洲、珠江三角洲、东北老工业基地等部分区域土壤污染问题较为突出,西南、中南地区土壤重金属大范围超标。全国多目标区域地球化学调查结果也显示,长江流域、珠江流域、沿海经

济带、松花江流域、辽河流域出现贯穿全流域的以镉为主,铅、汞为辅的流域、区域性异常。流域及区域性地球化学异常同时具有自然地球化学高背景与人为污染相互叠加的显著特征,并且与土壤酸化等复合,呈现出污染隐患突出、恶化趋势加速、治理及防控难度大等特点。

与此同时,土壤环境管理能力建设不足,特别是家底不详,监管标准和法律缺失,管理支撑技术严重不足,已成为土壤环境保护与污染防治工作的瓶颈。2014年环境保护部审议并原则通过《土壤污染防治行动计划》,将科技、监管、投入列为土壤污染防治行动计划的三大支撑体系。

2 国际土壤环境与污染修复研究态势

国际土壤科学联合会(IUSS)在1998年的第16届国际土壤科学大会上正式成立了国际土壤修复专业委员会,在其后的各届国际土壤学大会上均对土壤污染过程、修复机理与技术、恢复方法、风险评估及测定技术等方面予以重点关注^[3,4]。美国、日本、加拿大、澳大利亚、欧盟等发达国家和地区也都在土壤污染与修复领域布设了大量的研究项目,支持土壤环境科学与污染修复技术的研发和应用推广。现将相关的国际研究态势概述如下。

2.1 土壤污染表征、界面过程与效应研究成为新热点,服务于污染调控修复的基础研究成为新需求

摸清土壤污染分布规律、成因和态势是土壤环境管理决策的重要基础。土-液、土-气、土-生和土-植等界面是认识土壤污染过程与修复调控机理的重要界面过程。近年来,针对土壤污染问题,国际上开展了土壤污染分布与成因、迁移积累、生态效应和控制修复等方面的研究;在污染现状的宏观层面上和污染生态过程的微观尺度上取得了

重要研究进展,但对土壤环境内部的微观过程以及土壤与大气、水界面的宏观过程研究甚少,尚难估计气、水输入对土壤中污染物积累及环境效应的贡献。目前,地下污染生态过程的研究越来越受到重视,低剂量暴露和复合污染的生态效应研究成为当前研究的前沿和热点,需要加强污染物的地下食物网传递过程和生物响应研究,为土壤环境基准的确定提供基础毒理学数据。在土壤污染修复与调控机理方面,近30年来,国际上对土壤中重金属、农药和持久性有机污染物的环境化学行为、微生物修复、根-土界面的迁移转化和交互作用、作物耐性与积累以及植物根系分泌物的鉴定、特性及其与重金属耐性、运输、积累关系等方面开展了研究,取得了长足进展,并逐渐关注到根际土壤-植物界面过程的分子机制研究^[5-9]。当前需要加强根际过程的化学与生物学耦合机制研究,以及基于根系-微生物-土壤颗粒表面特性耦合作用的污染土壤修复调控原理研究,为发展农用地土壤污染的植物-微生物和物化-生物联合修复提供理论基础。

2.2 土壤污染控制、修复技术及装备向原位、绿色可持续与多技术集成方向发展,成为最有市场化前景的环保产业

过去30年,欧、美、日、澳等国家纷纷制定了土壤修复计划,投巨资研究了土壤修复技术与设备。美国更是采用超级基金计划,支持污染场地修复技术的研发,积累了丰富的现场修复技术与工程应用经验,成立了许多土壤修复公司和网络组织,使土壤修复技术得到了快速发展。当前,土壤修复技术正朝着六大方向发展,即向绿色与环境友好的生物及(可监测的)自然修复、多目标的联合修复、原位修复、基于环境功能修复材料的修复、基于设备化的快速场地修复、土壤修复决策支持系统及修复后评估等技术方向



中国科学院

发展。我国土壤修复技术与装备体系的发展需要紧密结合国情,发展安全、低成本的原位农田及场地污染土壤生物强化修复技术和物化稳定技术,发展安全、土地能再开发利用、针对性强的工业场地快速物化工程修复技术与装备,发展能控制水土流失与污染物扩散的矿区植物稳定化与生态工程修复技术,建立污染土壤修复技术规范与示范应用,促进绿色、可持续土壤修复市场化和产业化发展^[10]。

2.3 土壤环境监测与信息技术迅猛发展成为提高土壤环境监管能力的有效手段

土壤环境污染物的检测与监测是土壤环境监管的基础,也是最主要的工具。发达国家依赖于先进的仪器设备,发展出一系列土壤环境分析的标准化方法及标准物质。例如,美国环境保护署从1980年开始出版针对固体废物(含土壤)的分析方法导则《固体废物物理/化学评价方法》(SW-846),到目前已更新至第三版,成为各国土壤环境污染分析的主要参考手册。在土壤环境监测技术上,国际的发展趋势已从单项监测技术与设备研发应用转变为多项监测技术集成与产品应用,从点位监测转变为区域监测,研发了多参数测定的各种监测技术和仪器设备。同时,伴随着信息技术的进步与应用,发展出基于观测和长期定位研究的环境监测网络及其信息管理系统,如,“联合国环境规划署(UNEP)建立的国际环境信息系统(IEIS)”等。依赖于信息技术的发展,一些发达国家也纷纷建立了土壤标准光谱库、土壤生态毒性数据库、污染场地修复决策支持系统等,以支撑土壤环境的监管。例如,加拿大建立了基于互联网的国家污染场地分类查询系统,并应用于污染土壤实际修复和管理^[11]。未来,研发土壤沉积物等复杂基质环境分析前处理相关设备、非扰动的连续高效采样技术与分析设备,以及原位在线监测传感器,构建不同尺度的土壤环境监测网络平台,服务于土壤环境安全的预测预警将成为土壤环境监测与信息技术研究的前沿。

2.4 土壤环境污染风险评估、基准与标准制定理论和方法体系建立与完善是土壤环境管理中不可或缺的重要内容

20世纪80年代以来,欧美等发达国家在土壤及场地污染暴露评估模型、暴露参数取值、受体-危害效应关系等方面开展了大量的研究。例如,美国研究确定了典型土地利用方式下主要暴露途径,建立了主要暴露途径的评估模型(如RBCA模型);英国环境署也针对不同的土地利用方式编制了CLEA模型,并对暴露模型参数的取值进行了系统的统计学研究;荷兰长期、系统地开展了污染土壤健康与生态风险评估研究,建立了CSOIL等评估模型。这些都为建立污染土壤人体健康和生态风险评估方法,制定土壤环境质量基准与标准奠定了理论、方法和技术基础^[12]。我国土壤环境污染评价、基准与标准研究工作起步较晚。未来基于土壤污染物生物有效性与迁移性的风险评估方法及基准与标准的构建将是该领域研究的重要内容。

2.5 土壤环境政策法规、资金机制与监管体系的完善是对土壤环境管理的强有力支撑

发达国家已经建立起较为成熟的土壤环境政策、资金机制与监管体系。美国建立了超级基金管理制度和“国家优先名录”,并纳入污染场地修复计划,推动了污染场地的治理。荷兰颁布了《土壤保护法》,对污染场地问题从管理、评估、修复、再利用、责任、资金等方面进行了规定。在英国,绝大多数污染场地是通过规划系统的开发或再开发而得到修复治理的。日本于1970年颁布《农用地土壤污染防治法律》,2003年又颁布了针对城市型土壤污染的《土壤污染对策法》和《土壤污染防治法实施细则》。在土壤污染防治的资金机制方面,“污染者付费”原则是这些国家土壤环境管理的主要政策之一。同时,在“污染者付费”原则的基础上,场地新开发商本着“受益者分担”原则,也承担部分经济责任,其中美国和英国的相关政策值得借鉴^[13]。



总体上,土壤环境与污染修复研究的国际前沿主要集中在土壤污染物形态及其分析、界面过程与通量、生物有效性与风险、修复过程及微观机制等方面;在修复技术上,向绿色与环境友好的生物、物化修复技术发展,以及修复决策支持和后评估技术发展,从单一向联合修复技术发展,从异位向原位修复技术发展^[10];在土壤环境管理上,从总量控制向风险管理发展,并在土壤环境管理支撑技术的发展基础上,逐步完善法规、政策与监管体系。

3 中国土壤环境与污染修复研究现状

工业化、城市化和农业集约化的快速发展,大量的不同类型污染物进入土壤,导致污染面积扩大,加剧生态环境恶化,影响食物安全,危及人群健康。加强土壤污染与修复的基础理论研究,进行污染土壤修复技术的研发与示范是当前我国土壤环境与污染修复领域的重要研究方向。近年来,我国土壤环境与污染修复研究进展主要体现在以下几个方面。

3.1 不同尺度的土壤污染调查与评价研究

20世纪70年代,我国开展了全国范围内的土壤环境背景值调查,研究了土壤背景值的区域分异性,并探讨了在环境健康、环境评价和农业利用等方面的应用前景。这是我国首次开展全国尺度的土壤污染相关的调查工作。21世纪初,在国家重点基础研究发展规划项目、行业公益性项目等支持下,开展了区域性的土壤污染调查与评价工作,主要集中在一些经济快速发展地区和基本农田生产区,包括东北老工业基地、京津冀地区、长江三角洲、珠江三角洲和香港地区等。从区域尺度上揭示了社会经济快速发展和高强度人类活动下经济快速发展地区的土壤环境质量现状与变化,对研究区土壤污染有了新认识。局部高风险区农田土

壤成为近年来土壤污染调查与评价工作的重点,比如粗放式废弃电子产品处理地、农村小冶炼集中分布区等,这些区域性土壤中往往呈现重金属和有机复合污染的现象,污染程度较严重。近年来在一些养殖场周围和污灌区农田土壤检测到了较高含量的抗生素和个人护理药品(PPCPs)等新型污染物,需要引起重视^[13]。不同行业的工业企业场地土壤的污染状况也是近年来重点关注的对象,比如炼焦企业、化工厂、农药厂、发电厂等。这些场地土壤中的突出污染物往往与生产工艺密切相关。为了全面了解我国土壤污染的状况,自2006年起开展了全国范围的土壤污染现状调查工作,于2014年4月17日发布了《全国土壤污染状况调查公报》,显示出全国土壤环境状况总体不容乐观。在上述的土壤污染调查过程中,对污染来源的解析成为一个重要内容,当前研究的主要污染源解析方法有多元统计法、比值法、稳定同位素法等。总体上看,目前仍然缺乏科学、统一的土壤污染评价方法,特别是对复合污染土壤的评价,土壤污染物来源解析的方法都处于定性或半定量水平。

3.2 土壤污染过程与机理研究

在土壤重金属的固液相分配方面,运用道南膜平衡技术(DMT)测定溶液中自由金属离子已成为新的研究方法,但目前研究仍然停留在对模拟土壤溶液的测定,对原位土壤的研究较少;XRD、EXAFS、FTIR、NMR等现代光谱分析技术被广泛用于研究重金属在土壤矿物或氧化物表面的分子作用机制,解析土壤固相中重金属的化学过程;经验统计模型和多表面机理模型被用来估算土壤-溶液界面上重金属的界面分配系数,测定土壤重金属离子在土壤-溶液界面的吸附动力学参数,以及基于Wien效应的重金属土壤吸附自由能和结合自由能;还通过建

立土壤重金属污染的生物配体模型,来研究重金属在土壤溶液-生物膜表面界面的动态分配,以及重金属在生物体内的积累过程。在土壤-植物系统砷的迁移转化机制方面,系统研究了镉、砷等金属在土壤-植物系统中转移、转化规律及关键影响因素^[14];发现了根际的化学和生物学过程深刻影响金属污染物向植物的转移,尤其是水稻根表铁膜的重要作用;阐述了一种新的影响水稻吸收积累砷的机理,纠正了传统研究体系中忽视铁膜所得到的结论,推进了水稻根际过程的研究;发现了菌根真菌在污染物从土壤向植物的转移中发挥了根部过滤作用,探明了根际生物-非生物相互作用对植物吸收重金属的重要影响;采用同步辐射等技术手段研究了污染物与土壤作用的微观机理,明确了污染物形态与生物有效性的相关关系。

在有机污染物与土壤胶体的作用机制方面,研究了不同类型土壤的理化性质对有机污染物吸附的影响,表明化合物疏水性、极性、 π 电子密度等理化性质差异,氢键、 π - π 电子交互作用、极性作用等对有机化合物吸附有重要贡献。研究了腐殖酸与粘土矿物对有机污染物的吸附,观察到腐殖质结构、有机物结构均对吸附亲和力有显著影响,以及土壤有机质的存在因有机物结构的不同,对粘土与有机污染物作用的影响也不同。研究了重金属对有机污染物吸附的影响,指明重金属与炭黑作用显著影响有机污染物的环境归趋,络合后重金属离子改变了炭黑孔隙水结构,从而影响了有机污染物在炭黑表面的作用。研究了重金属对磷脂吸附的影响,发现非与吸附在磷脂上的 Cu^{2+} 之间形成的阳离子 π 键作用增强了磷脂对非的吸附。研究了重金属对细菌吸附的影响,发现共存金属离子可通过增强细菌表面疏水性及阳离子 π 键的作用,显著促进细菌对非的吸附。开展了农田土壤中持久性有机污染物(POPs)的残留、迁移转化与作物积累的研究,提出了土壤中农药滴滴涕(DDT)还原脱氯新的中间产物及其代谢途径;探讨了蔬菜对土壤和大气中POPs的吸收、转运、

积累动态规律与机理,明确了气-植分配机制是蔬菜富集POPs的主要机制^[15]。建立了有机污染物实时可视追踪方法,并运用该方法研究了多环芳烃在蔬菜叶表和体内的分布与转运规律。

3.3 土壤污染的人体健康与生态风险评估研究

围绕土壤污染问题,系统开展了风险评估方法学研究。建立了一套从基因(DNA)、细胞、个体、种群和群落等不同层面的土壤生物毒性与生态毒理研究方法,以及污染土壤环境生态和健康风险评估方法。筛选了土壤中抗重金属复合污染的指示性微生物,报道了重金属复合污染土壤中分子遗传多样性的变化,构建了重金属(Cu、Zn、Pb、Cd)从土壤经蔬菜、稻米、地下饮用水和直接摄入土壤颗粒暴露途径,以及进入人体的健康风险预测与评价模型。同时,运用经验模型建立了土壤可溶性重金属的预测模型,并提出了基于健康风险或生态风险方法的土壤污染物临界值,为污染土壤风险管理和修复决策提供了参考实例。此外,还建立了成组生物毒性测试与化学分析相结合、离体与活体生物测试相结合的土壤污染遗传毒性评价、综合毒性评价和甄别方法,形成了以潜在健康风险和生态风险为终点的评价框架,为在我国开展土壤污染风险评估和风险管理提供了技术方法。

3.4 土壤环境质量基准与标准研究

土壤环境质量标准是国家为保护人群健康和生态环境,对土壤中污染物容许含量所作的规定,是体现国家的环境保护政策和要求、衡量土壤污染的尺度,防治土壤污染的依据,保护土壤环境的目标。土壤环境质量标准是以土壤环境质量基准为依据,并考虑社会、经济、技术等因素,经过综合分析制定的。在充分调研欧美发达国家及我国台湾和香港地区土壤环境标准及其制定的方法学基础上,结合我国国情,针对一级标准提出了运用地球化学统计的制定方法,针对二级标准和土壤修复标准,则采用基于风险评估的制定方法。但目前制定土壤环境质量标准时,所用的模型均直



接运用国外的已有模型,一些污染物的毒性参数和理化常数也主要参考国外相关数据库中的数据。而我国土壤类型复杂多样,土地利用方式与发达国家存在较大差异,直接套用国外模型与参数存在诸多不确定性^[12]。因此,亟需开展土壤环境质量标准制定相关的模型与参数研究,使制定的标准更具科学性与适用性,还包括针对一些特定地区和场地制定的指标体系,如黑土环境安全的生态指示、石油污染土壤环境基准等。

3.5 土壤污染修复原理及技术研究

我国的污染土壤修复技术研究起步较晚,在“十五”期间才得到重视,列入了高技术研究发展计划(“863”计划),其研发水平和应用经验都与美、英、德、荷等发达国家存在相当大的差距。近年来,顺应土壤环境保护的现实需求和土壤环境科学技术的发展需求,科技部、基金委、中科院、环保部、农业部、国土资源部等部门有计划地部署了一些土壤修复研究项目和专题,有力地促进和带动了全国范围内土壤污染控制与修复科学技术的研究与发展工作。期间,以土壤修复为主题的国内一系列学术性活动也为我国污染土壤修复技术的研究和发展起到了很好的引领性和推动性作用。土壤修复理论与技术已成为土壤科学、环境科学以及地表过程研究的新内容。中国土壤学会土壤修复专业委员会已于2015年4月正式成立。土壤修复学已经成为一门新兴的环境科学分支学科,修复土壤学也将发展成为一门新兴的土壤科学分支学科^[4]。

在污染土壤修复技术研究与发展上,虽然资金投入有限,但我国已经走过3个“五年计划”的研究历程。通过实行“专利、人才、标准”三大战略,带动了土壤修复技术创新、人才队伍和基地建设、规范与标准建立、企业和产业发展。“十五”期间,土壤修复研

究起步,主要针对农田土壤重金属污染问题,开展了基于净化思路的超积累植物修复技术研究;“十一五”期间,土壤污染问题受到重视,土壤修复技术研发得到加强。科技部确立了4个重要研究方向,包括土壤重金属污染控制与修复技术、土壤有机污染控制与修复技术、土壤生物性污染控制与修复技术和土壤放射性污染控制与修复技术;支持了“金属矿区及周边重金属污染土壤联合修复技术与示范、油田区石油污染土壤生态修复技术与示范、多环芳烃污染农田土壤微生物修复技术与示范、典型工业污染场地土壤修复技术与综合示范”等4个重点项目研究工作;总体上形成了重金属、POPs、石油和工业场地的物化修复技术(固化/稳定化技术、土壤淋洗技术、热脱附技术)和生物修复技术(植物修复技术、微生物修复技术、植物-微生物联合修复技术)两大土壤修复技术体系,建立了系列修复技术规范、研发了修复材料和装备、建成了多个污染土壤修复技术集成示范区^[16,17]。“十二五”期间,农田、矿区、油田和工业污染场地土壤污染问题更加受到重视,科技部设立了重大项目开展研究,针对问题、面向需求设置多个课题,加强绿色、安全、实用、快速的污染土壤修复技术与示范研究工作,目前正在进展中。

总体上,与发达国家相比,我国土壤污染防治与修复、土壤环境管理支撑、土壤环保产业化等技术体系仍待完善;在土壤环境分析与监测、快速原位土壤修复技术与装备,土壤环境基准与标准、法规与信息化管理,土壤修复工程技术及产业化规模等方面,还存在较大差距,制约了我国土壤环境保护与管理工作的开展。

4 对中国土壤环境与污染修复研究的展望

土壤污染事关食品安全、环境安全、生

态安全、国民健康和社会稳定。一方面,迫切需要加强土壤环境监管工作。刻不容缓的是制定中国《土壤污染防治法》,使我国土壤质量的维护与改善、污染预防、控制及修复等工作有法可依。其次是亟需制订、修订国家及地方土壤环境质量标准体系。尊重土壤发生及分布规律,按照分区、分类、分等的原则,科学制订新标准,修订旧标准,允许地方制定区域土壤环境质量标准体系。再次是尽快启动《土壤污染防治与修复行动计划》。坚持以防为主,点治、片控、面防相结合;分阶段、分步骤地构建适合我国国情的土壤污染防治体系。重点开展土壤污染防控与修复技术工程示范工作,以点带面,加快成功的技术与经验推广。最后是搭建土壤污染治理修复与资源持续利用的科技研究与交流平台。在加强基础理论与技术研发的同时,注重引进、吸收、消化适用于我国国情的国外先进技术,加快带动土壤修复新兴产业的发展。

另一方面,建议启动和实施土壤污染防治与修复科技重点专项,在现有工作基础上,进行整体、系统和有机联系的链条式设计,研究完善我国土壤污染防治的理论方法、治理修复技术、管理支撑及产业培育等体系(图1)。这是提升我国土壤环境污染防治和修复管理水平的必然要求,也是科学预防土壤污染,改善土壤环境质量,保障农产品质量安全,保护生态环境安全,维护人居环境健康的重大科技需求。一要科学认识土壤环境系统,深化了解土壤内、外部及其界面环境的污染物质相互作用、循环、效应及其调控途径,促进现代土壤环境科学与土壤修复技术发展。二要研究农用地和建设用地土壤污染的分析监测、过程机理、评估预测、防控修复、风险管理等关键科学与共性技术问题。

在未来5—10年,争取在如下7方面取得系统性突破:(1)土壤污染的源解析、界面机制与修复原理;(2)农用地、建设用地、矿区土壤及含水层污

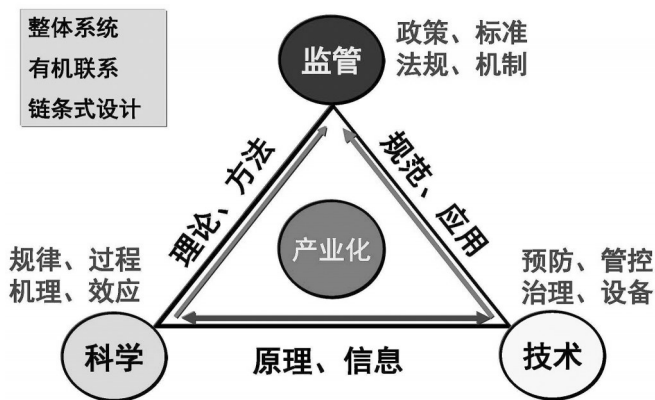


图1 建立我国土壤污染防治的理论、技术、管理及产业化体系

染控制修复技术、功能材料及装备;(3)土壤环境分析监测、评估及预测预警技术与装备;(4)土壤环境信息化技术与平台构建;(5)土壤环境质量基准与标准制定方法学;(6)土壤环境分区、分级、分类管理的关键技术方法;(7)土壤环境管理政策法规体系等。这将大幅度提高国家土壤环境监管水平和土壤污染防治科学决策能力,有力推动我国土壤修复产业化的稳健发展,提升土壤修复市场的国际竞争力。

参考文献

- 1 国家自然科学基金委员会,中国科学院. 未来10年中国学科发展战略:资源与环境科学. 北京:科学出版社,2012.
- 2 骆永明,等. 土壤环境与生态安全. 北京:科学出版社,2009.
- 3 赵其国,等. 面向不断变化世界,创新未来土壤科学——第19届世界土壤学大会综合报道. 土壤, 2010, 42(5): 681-695.
- 4 骆永明. 土壤修复学——土壤科学和环境科学的新兴学科//纪念朱祖祥院士诞辰90周年文集. 北京:科学出版社,2006,201-208.
- 5 Harms H, Schlosser D, Wick L Y. Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. Nature Reviews Microbiology, 2011, 9, 177-192.
- 6 Hochella M F Jr I, Lower S K, Maurice P A, et al. Twinning BS. nanominerals, mineral nanoparticles, and earth systems. Science, 2008, 319(5870): 1631-1635.
- 7 Sugden A, Stone R, Ash C. Ecology in the underworld. Science, 2004, 304(5677): 1613.

- 8 Whicker F W, Hinton T G, MacDonell M M, et al. Avoiding destructive remediation at DOE Sites. *Science*, 2004, 303(5664): 1615-1616.
- 9 Zala K. Dirty science: soil forensics digs into new techniques. *Science*, 2007, 318(5849): 386-387.
- 10 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势. *化学进展*, 2009, 21(2/3): 558-565.
- 11 骆永明, 李广贺, 李发生, 等. 中国土壤环境管理支撑技术体系研究. 北京: 科学出版社, 2015.
- 12 骆永明, 夏家淇, 章海波, 等. 中国土壤环境质量基准与标准制定的理论和方法. 北京: 科学出版社, 2015.
- 13 Zhu Y G, Johnson T A, Su J Q, et al. Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(9): 3435-3440.
- 14 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. *科学通报*, 2002, 47(3): 207-210.
- 15 骆永明, 蒋新, 滕应, 等. 城郊农田土壤复合污染与修复研究. 北京: 科学出版社, 2012.
- 16 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法. 北京: 科学出版社, 2004.
- 17 滕应, 骆永明. 设施土壤酞酸酯污染与生物修复研究. 北京: 科学出版社, 2014.

Soil Environment and Pollution Remediation in China: Current Status and Prospectives Research Development

Luo Yongming^{1,2} Zhang Haibo¹ Tu Chen¹ Teng Ying²

(1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Soil pollution is closely linked with the safety of food, environment, ecosystem, as well as public health and social stabilization. Therefore, it is extremely urgent to carry out related research and development on soil environmental protection and pollution prevention, control and remediation of farmland and construction land in China. This review provides a systematic summary of the current status of soil environment pollution, its need for regulation, international trends on soil environment and pollution remediation, and current status of soil environment and pollution remediation researches in China. In addition, this review makes a prospective for the future research and development of the Chinese soil environment and pollution remediation. It especially emphasized the urgency to explore soil environment system and study the technologies on soil pollution prevention, control and remediation for farmland and construction land. Based on the above-mentioned analyses, the paper proposes a national project initiative focusing on soil pollution prevention, control and remediation, which aims to promote the innovation in soil environmental science and technology, and speed up the development of soil remediation industry.

Keywords soil pollution, soil environment, soil remediation, research and development

骆永明 中科院烟台海岸带所研究员、博士。中科院海岸带环境过程与生态修复重点实验室主任, 中科院土壤环境与污染修复重点实验室学术委员会副主任, 中国土壤学会常务理事、土壤修复专业委员会学术顾问, “863”重大项目“污染土壤修复技术及示范”首席科学家。主要研究领域为土壤环境质量与风险管理、土壤污染与修复。已发表国际学术论文



中国科学院

180 余篇, 出版专著 10 余部。E-mail: ymluo@yic.ac.cn

Luo Yongming, Ph.D, Professor of Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS; Director of the CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation; Deputy director of the academic committee of CAS Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation. He also serves as the academic adviser of the Soil Remediation Branch and an executive member of the Soil Science Society of China. Dr. Luo is the chief scientist of the National High Technology Research and Development Program ("863"Program) Major Project "Contaminated Soil Remediation Technologies and Demonstration" (2012-2016). His research mainly focuses on soil environmental quality and risk management, soil pollution and remediation. He has published more than 180 research papers and 10 books. E-mail: ymluo@yic.ac.cn