

DOI: 10.11766/trxb201901200043

推进土壤污染防治与修复 厚植农业高质量发展根基

张桃林¹ 王兴祥²

(1 中华人民共和国农业农村部, 北京 100125)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 科学有效地开展土壤污染防治与治理修复, 从农产品质量安全的源头上保证产地环境安全, 已日益成为公众关注的热点。本文阐述了新时代土壤科学的新使命与功能定位, 分析了我国农用地土壤污染防治与修复研究和实践的进展动态, 从促进农业绿色发展和高质量发展出发, 提出了我国土壤污染防治与治理修复及产业化发展的战略重点与技术路径。

关键词 土壤污染; 农产品质量安全; 治理修复; 农业绿色高质量发展

中图分类号 S19 **文献标识码** A

原环境保护部和国土资源部2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》表明, 全国土壤环境状况总体不容乐观, 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。工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因^[1]。我国局部地区的土壤污染及其农产品污染物超标问题, 引起了社会各界的广泛关注^[2-6]。土壤污染防治与治理修复是实施乡村振兴和美丽中国战略的重要任务, 事关国家生态文明建设、农业绿色可持续发展和高质量发展。坚决打好污染防治攻坚战, 加快解决历史交汇期的生态环境问题是新时代赋予的重大任务。如何结合我国国情、农情、民情, 科学有效地开展土壤污染防治与治理修复, 适应新时代发展需求, 已成为政府、科学界、企业界和社会公众共同关注的热点。

1 对新时代土壤地位与功能的再认识

土壤是人类赖以生存和发展的基石, 是保障人类食物(也包括纤维、生物质能源等)与生态环境安全的重要物质基础。如何协调发挥土壤的生产功能、环境保护功能、生态建设功能和全球变化缓解等功能, 保障土壤资源持续高效安全利用已日益成

为全世界共同关注的热点问题^[6-9]。

随着中国特色社会主义进入新时代, 我国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾。同样, 我国农业农村发展已进入新的历史阶段, 主要矛盾也发生了重大转变。目前我国粮食和主要农产品供需关系总体上呈现出“总量基本平衡、结构性短缺、长期性偏紧”的格局。同时, 随着农业发展内外部环境条件的深刻变化, 农业正在进入“加快转方式调结构、全面推进现代农业建设”的新阶段, 现代农业建设面临着前所未有的资源环境约束和市场竞争挑战, 土壤和产地环境管理在农业绿色发展和高质量发展中的作用更加凸显。

事实上, 伴随着我国农业发展经历的从解决人民群众基本温饱到吃得好、吃得安全、吃得营养健康的过程, 我国的土壤学也已经或正在经历从聚焦土壤肥力、追求作物产量, 到关注土壤安全和土壤健康、保证农产品质量安全^[7-11], 到更加突出土壤质量、支撑农业高质量发展的变化历程。一个时代有一个时代的使命。与国家从“站起来”, 到“富起来”, 到现在中华民族迎来“强起来”伟大飞跃的时期一样, 我国农业也迎来了转型升级、高质量发展、实现“农业强”的新时期, 赋予我们新

作者简介: 张桃林(1961—), 男, 江苏姜堰人, 博士, 研究员, 农业农村部副部长

收稿日期: 2019-01-20; 收到修改稿日期: 2019-02-02; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-02-26

的时代使命。当前,人民对膳食结构优化和营养水平提升的期望值越来越高。良好生态环境是最公平的公共产品,是最普惠的民生福祉。农产品产地环境质量安全是农产品质量安全的第一道关口,防治土壤污染直接关系到农产品质量安全、人民群众身心健康和经济社会可持续发展。土壤污染防治作为重大环境保护工程和民生工程,已纳入国家环境治理体系,《中华人民共和国土壤污染防治法》已颁布实施。我们要深刻理解和把握新时代对土壤学发展和土壤科技工作者的新要求,主动迎接新挑战担负新使命,充分利用吸收各相关学科的最新成果,推动学科交叉融合,加强土壤学理论和实践及功能拓展的研究,加强土壤学微观、中观、宏观不同尺度层面的研究创新和系统贯通,加快建立适应新时代经济社会绿色发展和高质量发展的现代土壤科学研究与发展体系。

2 农用地污染防治与农产品质量安全监管工作进展

长期以来,国家高度关注农业生产与资源环境保护之间的关系,推动形成了一系列水土资源和产地环境综合管理与生态农业和循环农业的理论、模式及技术和政策法规体系,走出了一条具有中国特色的农业资源环境保护与现代农业发展及生态文明建设之路。尤其是近年来,围绕生态文明建设,谋划推进了一系列开创性、长远性的工作,制定了《关于加快推进生态文明建设的意见》、《生态文明体制改革总体方案》、《生态环境损害赔偿制度改革试点方案》,以及大气、水、土壤等三个污染防治行动计划(即三个“十条”)和新的环境保护法、土壤污染防治法等大政方针,并逐步落实主体功能区制度,划定并严守生态保护红线,优化国土空间开发格局。就耕地保护和粮食安全及农业可持续发展方面而言,近年来相继发布了《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》、《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》、《国家质量兴农战略规划(2018—2022年)》等,将农用地尤其是耕地土壤污染防治与治理修复融入农业绿色发展、高质量发展中统筹推进。

2.1 农业面源污染防治

2015年,原农业部提出到2020年实现农业用

水总量控制,化肥、农药使用量减少,畜禽粪便、农作物秸秆、农膜基本资源化利用的“一控两减三基本”目标任务。近年来,各地坚持投入减量、绿色替代、综合治理,有效推动了150个果菜茶有机肥替代化肥示范县建设、300个畜牧大县畜禽粪污资源化试点、150个县秸秆综合利用试点、100个用膜大县地膜回收利用试点。通过几年的努力,全国化肥农药使用量提前3年实现零增长,水稻、玉米、小麦三大粮食作物化肥利用率约为37.8%,较2015年提高2.6个百分点,农药利用率约为38.8%,较2015年提高2.2个百分点;规模化养殖污染防治有序推进,以农村能源和有机肥为主要方向的资源化利用产业日益壮大,粪污综合利用率达到70%,秸秆农用为主、多元发展的利用格局基本形成,全国秸秆综合利用率达到83.7%,有效遏制了部分地区农业面源污染加剧的趋势。

2.2 耕地质量保护和污染防治

近年来,国家开展了一系列农产品产地土壤重金属污染普查、动态监测和土壤污染治理修复研究与试点示范,相关政策措施出台的频次和强度、资金支持力度,堪称前所未有。

1) 全面提升耕地质量。初步构建了国家、省、市、县四级耕地质量长期定位监测网络;实行最严格的耕地保护制度,加大旱涝保收高标准农田建设力度,推广土壤改良保育技术,推进中低产田改造,全面提升耕地质量。根据监测分析结果,近30年来,我国耕地肥力状况总体向好。

2) 加强农业产地环境监测与保护。原国家环境保护部、国土资源部和农业部均分别开展了有关全国土壤污染状况调查工作,虽然由于各自调查目的和方法及采样点布局、采样密度等不同,结果不尽相同,但总的状况格局和趋势是一致的。为落实2016年出台的“土十条”,2017年起三部门又联合开展土壤污染详查,旨在进一步摸清农用地土壤污染总体状况及分布。前不久,生态环境部和农业农村部围绕打好污染防治攻坚战,进一步对农业面源污染防治工作作了部署,联合印发了《农业农村污染防治攻坚战行动计划》,提出了“一保两治三减四提升”的目标,即加大农村饮用水水源保护力度;治理农村生活污水、垃圾等农村人居环境最为突出的问题,减少化肥、农药使用量和农业用水总量;提升主要由农业面源污染造成的超标水体水

质、农业废弃物综合利用率、环境监管能力和农村居民参与度。最近，农业农村部又会同生态环境部印发了《国家土壤环境监测网农产品产地土壤环境监测工作方案（试行）》，按照“说清现状，兼顾风险”的目标，新布设了4万多个国控监测点位，整合优化相关行业土壤环境监测点位近8万个，统筹开展覆盖全部耕地和主要土壤类型的长期例行监测，为构建我国耕地土壤环境监测体系、保障农产品质量安全提供支持。此外，自然资源部正在部署开展“三调”（即第三次全国国土调查）工作，其中包括了耕地质量调查内容。

3) 推进耕地污染防治试点示范。原农业部自2012年起在全国建立了9个重金属污染治理示范区，开展重金属污染耕地修复及农作物种植结构调整试点，同时建成4个特定农产品产地禁产区划分示范点，开展特定农产品禁止生产区划分和种植结构调整示范。在此基础上，原农业部、财政部于2014年在湖南长株潭地区11.3万 hm^2 耕地（2015年扩展为18万 hm^2 ）启动了重金属污染修复及农作物种植结构调整试点，这是我国耕地污染治理的一次大规模尝试，在世界范围内也不多见。以“因地制宜、政府引导、农民自愿、收益不减”为原则，按照“分类管理、预防为主、农用优先、治用结合、综合施策”的治理思路，对未污染产地加大保护力度，严格控制外源污染；对轻中度污染产地，采取农艺、生物、化学、物理等措施实施治理；对严重污染的产地，调整种植结构，划定特定农产品禁止生产区，实施限制性生产，初步探索、总结了一套重金属污染耕地治理“VIP+n”技术模式，培育筛选了一批镉低积累水稻品种，研发了一批钝化剂、阻控剂、功能性肥料等土壤治理修复新产品^[6,12]。近年来，国家启动了农田土壤污染防治与修复技术国家工程实验室、农业部产地环境污染防治重点实验室、国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室等重点实验室、工程实验室或工程中心建设，支撑农用地土壤污染防治技术研发与产业化发展。2015年以来，在原国家科技支撑计划项目“重金属超标农田安全利用技术研究与示范”和国家重点研发计划专项“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”等支持下，各地方、各单位不断研发新技术、新产品和新模式，糙米降镉效果显著提升^[13-17]，试点示范取得重要进展。

2017年以来，结合实施“土十条”，农业农村部在江苏、河南、湖南3省6县启动耕地土壤环境类别划分试点，进一步探索完善耕地土壤环境质量分类方法，建立耕地分类清单。

2.3 农业标准化生产和农产品质量安全监管

近年来，农业农村部切实贯彻绿色发展理念，坚持质量兴农，将农产品质量安全作为推进农业供给侧结构性改革、建设现代农业和健康中国的重要任务，坚持“产出来”“管出来”两手抓、两手硬，编制了《“十三五”全国农产品质量安全提升规划》，构建了监管队伍、大力推进标准化生产、绿色化发展、规模化经营、品牌化创建、法制化监管，带动农业转型升级，提高质量效应，会同有关部门组织制定了农产品产地环境污染防治相关国家和行业标准120余项，全面加强与规范农产品产地环境安全管理，逐步探索出一套符合中国国情和农情的农产品质量安全监管模式，切实保障农业产业健康发展和公众“舌尖上的安全”。近年来，农业农村部农产品质量安全例行监测信息表明，中国农产品质量安全形势总体平稳向好。随着《“十三五”全国农产品质量安全提升规划》等实施，我国农产品质量安全源头控制能力、标准化生产能力、风险防控能力、追溯管理能力及执法监管能力和农产品质量安全将得到进一步全面提升。

但我们也要清醒认识到，受外源性和内源性污染的双重影响，目前我国部分地区产地土壤和水体等环境污染以及农产品质量安全潜在风险问题不容忽视。一方面，工矿业和城乡生活污染向农业系统转移排放，导致农产品产地环境质量下降和污染问题及事件仍有存在；另一方面，农业生产系统内部由于化学品（化肥和农药等）过量使用，以及农业废弃物（畜禽粪污、农作物秸秆和农田残膜等）不合理处置等形成的农业面源污染问题仍然突出。由于土壤是一个多相、开放、非线性的复杂系统，加之土壤污染成因的多元性、过程的复杂性，使得土壤污染治理修复往往具有特殊艰巨性。以湖南长株潭地区的试点为例，虽然通过修复治理试点稻米达标率明显提升，但目前对试点地区达标率空间变化规律及原因尚不十分明确，相关技术措施的针对性、精准性、有效性及成熟度、适宜度还不足，技术参数有待优化，总体达标率还有待进一步提高。

3 土壤污染修复治理工作的战略重点

“土十条”要求到2020年,要实现267万 hm^2 轻度和中度污染耕地安全利用、133万 hm^2 重度污染耕地严格管控和67万 hm^2 受污染耕地治理与修复,受污染耕地安全利用率达到90%左右,这是土壤污染防治攻坚战的重要任务。虽然,我国已经开展了大量土壤污染修复治理研究与试点实践,但距离土壤污染防治攻坚战,农业绿色发展、高质量发展国家需求仍有差距,面临巨大挑战。土壤污染防治与治理修复工作中,相关科技支撑不够、政策支持不足、配套法规不健全和市场培育不充分等问题亟待解决。具体而言:土壤污染治理与修复的理论研究、技术研发、成果转化、推广应用和当前土壤污染治理与修复需求还不匹配,尚未形成土壤环境调查、风险评估、风险管控、治理与修复以及效果评估的标准和完整技术体系;土壤污染防治成本和收益的精细、精准分析方法体系相对缺乏,对土壤污染防治的眼前账和长期账,经济账、政治账、社会账和生态环境账等缺乏细致把握;相关调查评估和治理修复市场不规范,企业良莠不齐,调查评估质量不高甚至弄虚作假,污染土壤修复不到位或过度修复等现象均不同程度存在。

为了打好污染防治攻坚战,尽快补齐土壤生态环境保护的突出短板,必须深入贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想,牢固树立和贯彻落实新发展理念,按照实施乡村振兴战略和“土十条”的总要求,以提高农业供给体系质量、效率和可持续性为主攻方向,以绿色为导向,加快推进农业供给侧结构性改革和农业发展方式转变,坚持“藏粮于地、藏粮于技”战略,以技养地、以法(律)护地、以制(度)管地,正确处理好治理与生产、政府与市场、攻坚(战)与持久(战)、源头(控制)与末端(治理)的关系,切实加强土壤污染防治和治理修复,坚决打赢净土保卫战。

3.1 加强普查规划,科学分类分区

在开展土壤及产地环境质量调查和统筹现有各类规划的基础上,制定国家及地方农产品产地土壤污染治理规划,根据土壤污染局部性、区域性、流域性等特点,在探明土壤污染成因的基础上进行科学分类分区治理^[18],进一步突出和明确农产品产地土壤环境保护的方向和重点目标任务。按照“土十条”要求,将耕地全面划分为优先保护类、安全

利用类和严格管控类,有序推进耕地土壤环境质量类别划定,逐步建立分类清单。在此基础上,大力推进农业种养结构调整和区域布局优化,使布局更合理、优势更突出、产品更优质。

3.2 完善质量标准,强化监测预警

土壤污染物含量与农产品质量之间并非简单直接的线性关系,不能简单认为耕地某些指标超过限量值,农产品就一定超标、不安全。我国部分土壤重金属高背景值地区,通过种植适宜的农作物或果树、采用配套的栽培和土壤管理技术,多年来生产的农产品一直是安全的,甚至是出口创汇的主打产品,农产品质量经得起严格检验^[19-22]。土壤环境质量标准也在不断发展完善过程中,《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[23]明确指出,当土壤污染物含量超过土壤污染风险筛选值、低于风险管制值的,对农产品质量、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险的,应当加强土壤环境监测和农产品协同监测,原则上应当采取安全利用措施。因此,要根据当前农产品产地土壤环境管理需求的实际,进一步完善现行土壤环境质量标准体系,科学建立基于区域气候和生产特点、土壤性质、种植品种和种植方式的特定农产品产地土壤污染物限量标准,开展针对特定农产品的农用地土壤污染风险评估,指导农产品安全生产。原农业部2009年立项的国家公益性行业(农业)科研专项“主要农产品产地土壤重金属污染阈值研究与防控技术集成示范”开展了这方面的探索,并初步建立了特定农产品土壤重金属安全阈值研究方法^[24-25],起草发布了种植根茎类蔬菜和水稻的土壤镉、铅、铬、汞、砷安全阈值^[26-27]。最近,同时考虑土壤和作物污染物含量进行土壤污染风险评估的方法逐步得到重视^[28],2017年原环境保护部和农业部印发的《农用地土壤环境质量类别划分技术指南》(试行)在综合评价土壤环境质量类别时也兼顾了土壤和作物因素。

同时,为了避免出现“边治理边污染”的现象,除了严格控制工矿业和城乡生活污染向农业系统转移排放外,需要强化源头控制,尽快制修订污泥农用,农田灌溉水,以及肥料、农药、还田秸秆等农业投入品污染物限量标准体系,以适应新的土壤污染防治形势要求。此外,要按照《关于深化环境监测改革提高环境监测数据质量的意见》和《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干

意见》的部署要求，加强普查摸底，建立国家级农产品产地重金属污染等数据库，并加快推进国家数据信息共享平台建设。健全完善农产品产地环境动态监测体系，整合和加密监测点，构建覆盖农业主产区和主要农作物的农产品产地环境监测网络，以及常态化监测和长效预警机制，切实提高产地环境监测数据质量，推动实现农业资源环境承载能力监测预警规范化、常态化、制度化，引导和约束各地严格按照资源环境承载能力谋划农业农村发展。

3.3 强化科技支撑，发展绿色可持续修复治理模式

土壤污染物类型（重金属、有机污染物和有害生物等）、来源及其形态转化过程的复杂性、土壤类型和土地利用方式的多样性、界面过程及植物吸收转运的复杂性，决定了土壤污染风险评估的复杂性和修复治理任务的艰巨性。从目前各部门、各地方已开展的土壤修复研究和示范工程看，初步形成了物理、化学、生物、农艺及其组合的土壤修复技术体系，在推动我国土壤污染防治及修复科学技术的发展，以及实际修复治理过程中取得了一定成效。但总体而言，适合不同生态类型区大面积农用地治理的先进适用、低成本高效益、绿色可持续的技术模式还很缺乏，运行机制也亟待探索完善。

1) 技术和模式亟待总结与提升。一方面要总结各部门和地方土壤污染治理试点经验，对现有各种治理修复技术、装备及模式进行比选、优化、集成和熟化、简化，初步总结形成经济有效、简单适用、可复制推广的修复技术模式和工程技术体系及示范样板，为全国耕地污染修复治理提供系统整体的解决方案。另一方面，要有针对性地深化和扩大试点示范，重点在南方酸性土水稻种植区和典型工矿企业周边农区、污水灌区、大中城市郊区、高集约化蔬菜基地、地质元素高背景区等土壤污染潜在高风险地区，建设污染耕地安全利用与治理修复试点示范区，按照“分类施策、农用优先、预防为主、治用结合”的原则，从防、控、治关键环节入手，突出风险管控，注重综合治理，逐步建立治地用地结合、产地与产品一体化的耕地可持续管护利用机制。同时，要加大科技研发支持力度，加强农用地监测预警、污染源解析、污染物迁移转化、土壤与作物污染相关性等基础研究，推进土壤污染诊断、风险管控、治理与修复等共性关键技术研发和推广，加大农业投入品减施、水分管理、

土壤调理、品种替代、生物修复、污染超标农产品处置与安全利用等实用技术研发，提升现有的技术与模式，尽快形成一整套适合我国国情、农情、民情的，以保障农产品质量安全为出发点，以控源（Source Reduction）、降活（Availability Reduction）、阻吸（Absorption Reduction）、减量（Concentration Reduction）为核心内容的“4R”农用地土壤重金属污染风险管控技术模式。

2) 科学研究与治理实践需要注意的问题。

①利用优先。耕地污染治理的核心目标是保障农产品安全生产，不能脱离我国农业生产实际，为“治理”而“治理”，而应寓治理于农业结构调整和农产品安全生产及耕地安全利用中，尤其是对中轻度污染耕地，在保证农产品质量安全的前提下，要优先和科学利用受污染耕地的生产功能，既能满足农用地土壤污染防治的需要，又能保障农产品质量安全，实现农用地土壤污染治理与农业生产的有效结合。有条件的地方和单位，要充分结合轮作休耕制度试点等项目，探索土壤污染物减量去除技术，但应做好技术经济性分析及适用条件论证。②系统方法论。土壤污染治理，必须坚持绿色可持续修复，需要多学科交叉、多部门协同，开展土壤修复全链条、全过程、全因子的系统研究。比如，在高产优质多抗品种选育和区试过程中，不仅要关注气候带的适应性，而且也要关注土壤环境生态类型区的适应性，并加强污染物低积累品种资源库建设。要从成土母质-土壤-水体-大气-作物体系系统研究土壤污染治理，包括污染暴露途径、毒性参数、生态和健康风险评估方法、安全阈值、污染风险管控技术等方面内容，贯穿监测调查、修复方案、修复治理技术与施工组织、修复效益评估全过程。同时，土壤修复不单纯是一个技术工程，更是一个系统工程，需要政府、科技界、企业界、土地承包者、经营者及全社会的共同努力和参与，确保政策和技术落地不走样、治理效果不打折。③土壤修复的动态和相对性与长期性问题。一些修复技术和产品应用短期内农产品质量可能有显著提升，但随着条件的变化（比如土壤酸化^[29-30]、高富集作物种类或品种的种植），可能会有反复。此外，土壤修复治理不仅要关注修复治理技术对农产品中目标污染物含量降低的效果，同时也要关注土壤修复剂（如钝化剂等）等新型材料的环境友好性和安全性，技术的

经济性和可持续性、以及对土壤肥力提升及农产品营养品质改善的效果,防止顾此失彼,甚至导致新的“二次污染”或营养健康风险。

3.4 健全政策体系,创新体制机制

1) 加强法治建设。逐步建立健全最严格的农产品产地保护、农产品产地占补平衡管理、农业资源损害赔偿、农业环境治理与生态治理等覆盖农产品质量安全的全链条、全过程、全要素的法律法规制度体系。强化政府在政策扶持、规范管理、公共服务等方面的主导作用,建设一批生产与保护紧密结合的示范项目,将土壤保护内化于生产之中,解决好治理和生产“两张皮”问题,并按照“国家统筹、省负总责、市县落实”的原则,完善土壤环境管理体制,全面落实土壤污染防治属地责任。

2) 创新修复治理机制。加大对试点区域各类新型农业生产经营主体、社会化服务组织的培育力度,打造一批农田污染防治技术、装备产业化企业,构建政府引导,市场、企业和农业经营者共同推进的多元化参与机制,建立健全耕地污染治理修复社会化服务体系。建立健全农产品产地保护绩效考核及奖惩和责任追究机制,加大对破坏农业环境违法行为的处罚力度。加快落实健全完善绿色生态导向的农业补贴制度和农用地污染防治生态补偿机制,发展现代生态循环农业,对开展种植结构调整、特定农产品禁止生产区划分或自主采取土壤污染防治措施的农民进行补偿,确保农民收入不减少、农产品有毒有害物质不超标。创新金融、保险、税收等支持政策,对开展耕地污染治理的农业经营主体或市场主体优先实施信用担保、贴息贷款或税收减免,完善耕地污染防治保险产品和服务。完善耕地污染防治投融资机制,因地制宜探索通过政府购买服务、第三方治理、政府和社会资本合作(PPP)、事后补贴等形式,吸引社会资本主动投资参与耕地污染治理修复工作,构建多方共同参与的现代治理体系。

参考文献

[1] 中华人民共和国环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources

of the People's Republic of China. Report on the national general survey of soil contamination (In Chinese). http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm

- [2] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等. 中国农田重金属问题的若干思考. 土壤学报, 2013, 50(1): 186—194
Zeng X B, Xu J M, Huang Q Y, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 186—194
- [3] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 2014, 49(2): 750—759
- [4] 张桃林. 科学认识和防治耕地土壤重金属污染. 土壤, 2015, 47(3): 435—439
Zhang T L. More comprehensive understanding and effective control of heavy metal pollution of cultivated soils in China (In Chinese). *Soils*, 2015, 47(3): 435—439
- [5] 徐建明,孟俊,刘杏梅,等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 153—159
Xu J M, Meng J, Liu X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security (In Chinese). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 153—159
- [6] 黄道友,朱奇宏,朱捍华,等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1030—1043
Huang D Y, Zhu Q H, Zhu H H, et al. Advance and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil (In Chinese). *Research of Agriculture Modernization*, 2018, 39(6): 1030—1043
- [7] 张桃林. 加强土壤和产地环境管理,促进农业可持续发展. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 435—444
Zhang T L. Strengthening soil and environment management of agricultural producing area, promoting sustainable development of agriculture in China (In Chinese). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(4): 435—444
- [8] 赵其国,骆永明. 论我国土壤保护宏观战略. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 452—458
Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China (In Chinese). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(4): 452—458
- [9] 沈仁芳,滕应. 土壤安全的概念与我国的战略对策. 中

- 国科学院院刊, 2015, 30 (4): 468—476
- Shen R F, Teng Y. Concept of soil safety and its application in China (In Chinese). Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30 (4): 468—476
- [10] 张甘霖, 吴华勇. 从问题到解决方案: 土壤与可持续发展目标的实现. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 124—134
- Zhang G L, Wu H Y. From “Problems” to “Solutions”: Soil functions for realization of sustainable development goals (In Chinese). Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 124—134
- [11] 赵其国. 发展与创新现代土壤科学. 土壤学报, 2003, 40 (4): 321—327
- Zhao Q G. Development and innovation of modern soil Science (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (4): 321—327
- [12] Liang X F, Xu Y, Xu Y M, et al. Two-year stability of immobilization effect of sepiolite on Cd contaminants in paddy soil. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 12922—12931
- [13] Chen Z, Tang Y T, Yao A J, et al. Mitigation of Cd accumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) by Fe fertilization. Environmental Pollution, 2017, 231: 549—559
- [14] Huang G X, Ding C F, Hu Z Y, et al. Topdressing iron fertilizer coupled with pre-immobilization in acidic paddy fields reduced cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.). Science of the Total Environment, 2018, 636: 1040—1047
- [15] Huang G X, Ding C F, Guo F Y, et al. The optimum Se application time for reducing Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) and its mechanism. Plant and Soil, 2018, 431 (1/2): 231—243
- [16] Huang G X, Ding C F, Zhou Z G, et al. A tillering application of zinc fertilizer based on basal stabilization reduces Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 167: 338—344
- [17] Wang X Q, Yu H Y, Li F B. Enhanced immobilization of arsenic and cadmium in a paddy soil by combined applications of woody peat and Fe (NO₃)₃: Possible mechanisms and environmental implications. Science of the Total Environment, 2019, 649: 535—543
- [18] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 145—152
- Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China (In Chinese). Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 145—152
- [19] 刘凤枝, 师荣光, 徐亚平, 等. 农产品产地土壤环境质量适宜性评价研究. 农业环境科学学报, 2007, 26 (1): 6—14
- Liu F Z, Shi R G, Xu Y P, et al. Study on soil environmental suitability assessment for agricultural producing area (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26 (1): 6—14
- [20] Cheng J J, Ding C F, Li X G, et al. Heavy metals in navel orange orchards of Xinfeng County and their transfer from soils to navel oranges. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 122: 153—158
- [21] Cheng J J, Ding C F, Li X G, et al. Rare earth element transfer from soil to navel orange pulp (*Citrus sinensis* Osbeck cv. Newhall) and the effects on internal fruit quality. PLoS One, 2015, 10 (3): e0120618. DOI: 10.1371/journal.pone.0120618
- [22] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测. 农业环境科学学报, 2018, 37 (1): 18—26
- Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, et al. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37 (1): 18—26
- [23] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15619-2018 土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准(试行). 2018
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 15619-2018 Soil environmental quality: Risk control standard for soil contamination of agricultural land (In Chinese). 2018
- [24] Ding C F, Ma Y B, Li X G, et al. Derivation of soil thresholds for lead applying species sensitivity distribution: A case study for root vegetables. Journal of Hazardous Materials, 2016, 303: 21—27
- [25] Ding C F, Ma Y B, Li X G, et al. Determination and validation of soil thresholds for cadmium based on food quality standard and health risk assessment. Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 700—706
- [26] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T36783-2018种植根茎类蔬菜的旱地土壤镉、铅、铬、汞、砷安全阈值. 2018
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB/T36783-2018 Safety thresholds values of cadmium, lead,

- chromium, mercury and arsenic in upland soils for planting rootstalk vegetables (In Chinese). 2018
- [27] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T36869-2018水稻生产的土壤镉、铅、铬、汞、砷安全阈值. 2018
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB/T36869-2018 Safety threshold values cadmium, lead, chromium, mercury and arsenic in soil for rice production (In Chinese). 2018
- [28] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 一种农田土壤重金属影响评价的新方法: 土壤和农产品综合质量指数法. 农业环境科学学报, 2016, 35 (7): 1225—1232
Wang Y J, Liu C, Zhou D M, et al. A new approach for evaluating soil heavy metal impact: A comprehensive index combined soil environmental
- quality and agricultural products quality (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35 (7): 1225—1232
- [29] Guo F Y, Ding C F, Zhou Z G, et al. Stability of immobilization remediation of several amendments on cadmium contaminated soils as affected by simulated soil acidification. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 161: 164—172
- [30] 郭娟, 罗小丽, 姚爱军, 等. 模拟酸雨条件下铁硅材料和生物炭对土壤镉砷形态及生物有效性的影响. 农业环境科学学报, 2018, 37 (7): 1495—1502
Guo J, Luo X L, Yao A J, et al. Effects of iron-silicon material and biochar on soil Cd and As speciation and vegetable uptake under simulated acid rain condition (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37 (7): 1495—1502

Prevention and Remediation of Soil Contamination to Strengthen the Foundation for Green and High-Quality Agricultural Development in China

ZHANG Taolin¹ WANG Xingxiang²

(1 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Beijing 100125, China)

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

Abstract How to take scientific and effective countermeasures to prevent and remediate soil contamination, so as to ensure the quality and safety of agricultural products, has become a great public concern in China. This paper illustrated the status and functions of soil in the new era and proposed that a modern soil science research and development system adaptable to the green and high-quality development of the economy and society be established. The progress in research and development on contamination control of agricultural land and quality safety of agricultural products, including prevention and control of agricultural non-point source pollution, soil contamination control and remediation to ensure the quality of farmland, and standardized production of agricultural products and supervision of their quality and safety, was systematically reviewed. Furthermore, the strategic focus and technical approach for science and technologies on soil contamination prevention, control and remediation, along with their industrial applications, were proposed to promote the green and high-quality agricultural development. The strategies to achieve this objective should be focused on (1) soil investigation planning based on scientific soil classification and categorization, (2) further development of soil environmental quality standards, as well as the monitoring and early warning system, (3) development of the green and sustainable remediation models with strong scientific and technological support, and (4) improvement on the policy-making framework and institutional innovations.

Key words Soil contamination; Agricultural product quality safety; Remediation; Green and high-quality development

(责任编辑: 卢 萍)