

DOI: 10.11766/trxb201711300488

中国土壤污染防治技术体系建设思考*

陈卫平¹ 谢天^{1,2} 李笑诺¹ 王若丹³

(1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710062)

摘要 长期以来, 中国土壤资源面临着过度开发、严峻的环境问题和巨大的发展压力, 土壤污染的负面影响日益凸显, 已经严重影响到土壤的生态功能、人体健康和土地可持续利用。2016年出台的《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”)体现了党中央国务院对土壤保护的高度重视, 从顶层设计的战略角度对更好地推进中国土壤污染防治工作作了系统部署。为探索能快速、有效改善土壤环境质量、保障农用地生产安全和人居环境安全的土壤污染防治新模式, 本文紧密围绕“土十条”的总体思路和核心理念, 立足中国基本国情, 通过纲领性文件的深入解读, 剖析中国土壤污染防治体系的五大指导思想和五大基本原则, 系统构建不同土地用途的土壤污染防治体系。通过对中国土壤污染防治建设主题、建设目标和支撑体系的深入解读, 指出农用地土壤污染防治技术体系应涵盖预防技术、监管技术、修复与安全利用技术等四个方面, 建设用地土壤污染防治技术体系应涵盖污染预防、环境调查、风险评估、治理修复、全过程监管和可持续再利用等六个方面。中国土壤污染防治体系以法律体系研究为主, 忽视了技术体系和管理体系的系统研究。以“土十条”为思想指导, 一套系统有效的土壤污染防治体系应: (1) 从“治”的角度对污染土壤开展治理修复和风险管控; (2) 从“防”的角度预防新增污染和现存污染的迁移扩散, 重视对污染源的严格监管; (3) 形成以融资机制、公众参与等保障机制配套支撑的土壤污染全过程防治体系; (4) 在摸清土壤污染状况的基础上, 突出土地功能的个性差异, 建设用地以人居环境安全和土地可持续利用为目的, 农用地以保障农产品质量和人体健康为目的。

关键词 土壤污染防治体系; 土壤污染防治行动计划; 农用地; 建设用地

中图分类号 X3; X53 **文献标识码** A

长期以来, 粗放的经济增长方式、不合理的产业结构布局和居高不下的污染物排放显著影响了我国土壤环境质量, 对农产品食用安全和人体健康构成了严重威胁。2014年全国土壤污染状况调查结果显示, 全国土壤环境总体状况不容乐观, 土壤总的点位超标率为16.1%, 部分地区土壤污染较重, 尤以耕地和工矿废弃地土壤环境问题突出^[1]。针

对严峻的土壤污染形势, 各地区、各部门采取了积极措施进行土壤污染防治的探索和实践, 虽取得了一定成效, 但进展较为缓慢。2016年5月国务院印发了《土壤污染防治行动计划》(以下简称“土十条”), 从十个方面对有效开展土壤污染防治工作作了系统的战略部署^[2]。本文通过对“土十条”指导思想、基本原则和概念框架的深入解读, 围绕

* 环境保护部土壤环境管理司项目资助Supported by the Foundation of the Department of Soil Environment Management, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China

作者简介: 陈卫平(1976—), 男, 河南开封人, 博士, 研究员, 主要研究领域: 土壤污染过程与风险管控。E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

收稿日期: 2017-11-30; 收到修改稿日期: 2017-12-21; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-01-10

全过程风险管控的管理理念,分别构建了农用地和建设用地的土壤污染防治技术体系,为加快改善土壤环境质量,推进农用地安全利用和建设用地可持续发展提供决策参考。需要说明的是,“土十条”以农用地和建设用地为重点污染防治对象,对矿区和油田等其他土壤类型的污染防治未作延展性的详细论述。据此,本研究以农用地和建设用地为主要研究对象,农用地主要指可直接用于农业生产的耕地,建设用地主要指城市建设用地中的工业用地。

1 土壤污染防治技术体系指导思想

2016年5月国务院印发的《土壤污染防治行动计划》是我国土壤保护的纲领性文件,对今后一个时期我国土壤污染防治工作做出了全面战略部署。

“土十条”提出了预防为主、保护优先、风险管控的总体思路,在构建土壤污染防治技术体系时,需要考虑土地利用类型、污染程度、污染物类别、技术经济条件等因素,体现系统化、差异化、科学化、法制化、透明化的指导思想。具体而言:

(1) 系统化。土壤污染防治工作是一项复杂的系统工程,涉及法律法规、监管能力、科技支撑、资金投入和宣传教育等各个方面,要统筹法律规划—技术规范—管理手段,在土壤污染的源头预防、风险管控、治理与修复、监管能力建设等方面构建土壤污染综合防治的“大网”,推动土地精准管理及安全利用。

(2) 差异化。我国幅员辽阔,土壤、植被、气候等区域特征明显,污染特征和成因差异较大,需要因地制宜,结合各地实际,按照土壤环境现状和经济社会发展水平,采取不同的土壤污染防治对策和措施,开展区域差异化土壤污染综合防治。同时,农用地和建设用地的污染特征、风险传播途径以及资金渠道等存在较大差异,“土十条”也提出了针对性的策略,在制定地方土壤防治方案时需要差异化对待。

(3) 科学化。我国土壤污染防治工作基础薄弱,土壤污染家底不清,成因复杂,空间异质性强,风险传播途径多样,土壤污染防治相关标准和技术规范不健全,需要强化科学治土的理念,通过示范带动作用,防治结合,选择适宜的技术和模式,引导区域产业合理发展,逐步推进和完善土壤

污染防治工作。

(4) 法制化。依法治土是全面有效地防治土壤污染的迫切需求,完善土壤保护体制和机制,从污染者付费、土地资源管理与规划、土地开发利用、土壤保护技术与能力等方面,使土壤污染防治工作步入规范化、法制化轨道。

(5) 透明化。土壤污染防治各环节相关信息的公开透明化,一方面有利于建立土壤污染的监测预警体系和土地分类分级管理机制,为配套落实公众参与、终身责任追溯等机制提供物质基础;另一方面响应各利益方诉求,有助于解决其利益矛盾冲突,实现协同共治,可更好地发挥政府的主导和监管作用、公众的参与和监督作用、企业的积极性和自我约束作用等。

2 土壤污染防治技术体系基本原则

土壤污染具有隐蔽性、滞后性、累积性以及不可逆性和难治理性等特点。“土十条”以改善土壤环境质量为核心,以保障农产品质量和人居环境安全为出发点,坚持预防为主、保护优先、风险管控,突出重点区域、行业和污染物,实施分类别、分用途、分阶段治理,严控新增污染、逐步减少存量,形成政府主导、企业担责、公众参与、社会监督的土壤污染防治体系,促进土壤资源永续利用和生态文明建设。遵循“土十条”相关工作要求,在制定区域土壤污染防治技术体系时,应统筹考虑以下原则:

(1) 坚持预防为主、保护优先原则。土壤污染与各种工矿企业活动和农业生产活动密不可分,土壤污染损害一旦形成,要减轻或消除由它引起的损害花费的代价是极为昂贵的,有时是不可能的。因而,应强化环境准入和监管,加强源头管控,严查土壤风险源,从源头上控制土壤新增污染。同时,在土壤的保护和治理关系上,应把土壤的保护特别是未污染或轻微污染的土壤保护放在首位,划定保护红线,实施土地分类管理,建立严格的分类管理制度。

(2) 坚持风险管控、安全利用原则。土壤污染本身极具复杂性,超标不等于污染(地质背景异常),污染不等同于有害(土壤—作物重金属屏障),有害不等同于要修复(可改变土地用途)。

因此，应对污染土壤实行分类、分区、分级的用途管理和风险管控，较土壤修复本身更为重要和有效。同时，污染土壤的修复治理也应以实现安全利用为基本准则，选择经济有效的模式。

(3) 坚持功能优先、自然恢复原则。我国土壤修复仍处于起步阶段，技术尚显薄弱。同时我国耕地资源十分紧张，不宜采取大面积休耕的方式，使污染耕地自然恢复后再农业利用。因而，应以维护土地资源安全、保障土壤可持续利用为出发点，通过土壤改良、替代种植、低吸收品种筛选等农业管理措施，维持污染耕地的生产功能；在有条件的区域，可通过休养生息、强化自然修复等方式，提升土壤环境容量和自净能力，达到生态持续、经济可行、社会可接受的土壤利用目的。对于污染地块资金有限的情况，可采用监控自然修复、污染阻隔、改变用地、受体保护等非工程措施，实现土壤多功能优化利用。

(4) 坚持适度修复、持续发展原则。土壤污染防治不是与发展对立，而是坚持与发展融合促进。因此，应妥善处理发展与保护的关系，通过土壤污染防治促进地方经济生态化转型，促进企业寻求生态化转变，通过土壤污染治理促进区域环境质量改善和生态文明建设，达到土壤污染防治与区域社会经济融合发展的目的。而对于社会关注的环境热点区域，如对食品安全、人居环境有重大影响的重污染工矿企业场地与周边区域、集中式饮用水水源地等，开展适度修复。

(5) 坚持示范引导、因地制宜原则。场地、耕地、矿区等土壤污染情况各异，采用的修复模式也有很大的差异，实际应用中必须因地制宜，区别化进行土壤综合防治，既要鼓励先进技术的开发、引进，又要立足当前实际，实施可操作性强的土壤污染防治方案。因此，应通过建立土壤污染防治试验区、示范区，探索区域性土壤环境问题整治模式，在总结示范经验基础上，逐步加大投入和扩大整治范围，提升土壤综合防治的投入产出比。

3 土壤污染防治技术体系概念框架

目前，我国土壤污染防治体系以法律体系研究为主，忽视了技术体系和管理体系的系统研究^[3-6]。因此，本文结合我国实际情况，在摸清土壤污染状况的基础上，统筹推进污染源预防、建设

用地和农用地分级分类管理，构建土壤污染防治的基本概念框架。如图1所示，包括土壤环境质量调查、土壤污染源头管控、建设用地风险管控和农用地安全利用四个建设主题，以及由法律法规、标准体系、管理体制、融资机制、责任机制、市场机制、公众参与、科学研究和宣传教育等组成的保障支撑体系。

3.1 土壤环境质量调查

在我国土壤污染状况调查的基础上，进一步开展土壤污染状况详查工作，一方面，摸清农用地和重点行业企业用地的污染程度、面积、分布、风险等基本情况；另一方面，为建立全国范围的土壤环境数据库提供大数据支撑，并借助土壤监测点位实现数据的动态更新和部门共享。

3.2 土壤污染源头管控

按土地利用状态（未利用、规划利用、正在利用、搬迁遗留）和利用方式（建设用地和农用地）对可能造成土壤污染的风险源采取管控措施，坚持防范新增污染、减少污染输入、杜绝污染扩散和治理现存污染的建设目标。

3.3 建设用地风险管控

根据土壤污染状况详查结果和建设用地土壤环境风险评估结果，结合城市土地利用规划，合理确定土地用途，对暂不具备开发条件的土地采取治理修复或防止污染扩散的风险管控措施。

3.4 农用地安全利用

依据土壤污染程度兼顾农产品超标情况，划定耕地土壤环境质量类别，针对优先保护类、安全利用类和严格管控类耕地制定详细的管理措施，并针对数据不完整或者精度不够导致的耕地土壤环境质量划分与实际不符的情况，形成动态调整机制。同时，加强对林地、草地、园地等其他农用地的土壤环境管理，保障农业生产环境安全，尤其加强重度污染生产区的农林产品质量检测，对超标产品安全处置，对超标产品产地及时采取管控措施。

3.5 土壤污染防治支撑体系

土壤污染防治工作的有序开展离不开可操作管理手段的配套支持，从加快立法进程、构建标准体系、完善管理体制、拓宽融资渠道、明确责任机制、发挥市场作用、鼓励公众参与、加大研发力度和开展宣传教育等九个方面入手构建系统全面的土壤污染防治支撑体系，对于快速实现既定管理目标具有重要的现实意义。

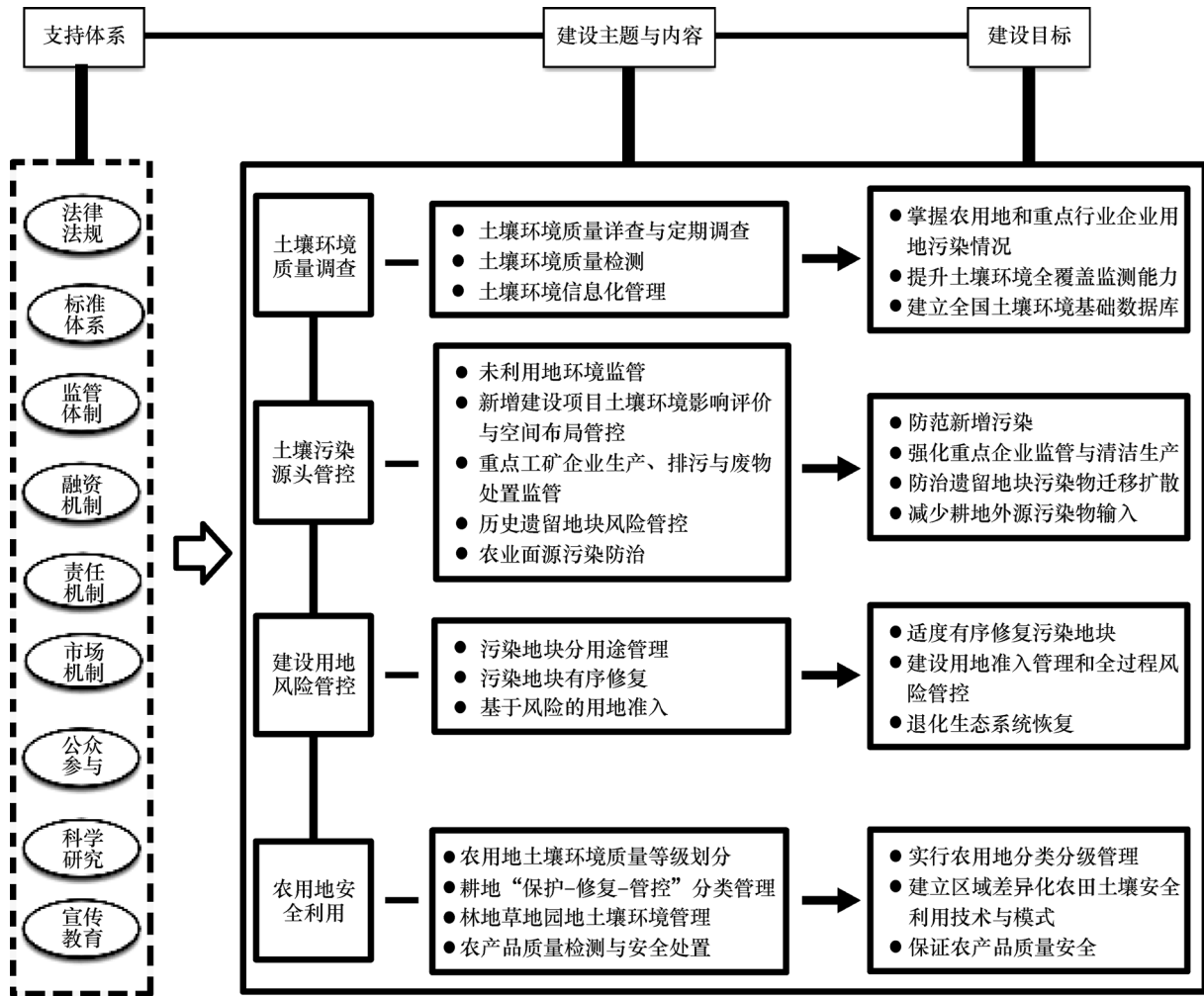


图1 土壤污染防治体系概念框架

Fig. 1 Conceptual framework of the soil pollution prevention and control system

4 农用地土壤污染防治技术体系

农用地土壤环境质量直接关系到农产品质量和人体健康。相关研究已从政策体系和技术体系等多个角度对农田土壤污染防治进行了初步探索^[7-8]。本文结合国内外研究进展和我国国情，构建了全面涵盖预防技术、监管技术和修复与安全利用技术的农用地土壤污染防治技术体系（图2），并对每一类别中已研、在研或待研的关键技术进行详细阐述，以期为我国农田污染有效防治提供技术指导 and 科学支撑。

4.1 农用地土壤污染预防技术

4.1.1 土壤污染源解析技术 土壤污染源解析技术是指通过对农田土壤污染特征及周边环境进行调查，结合同位素分析技术、源解析模型和

多目标调查技术等分析污染物的来源类型，并估计各污染源的贡献率，为针对性控制农田污染提供科学依据。同位素分析技术是以特定污染源具有特定的稳定同位素为原理而兴起的重金属污染源溯源技术，其实现需借助统计方法。定量源解析模型技术由于具有不依赖污染源排放的条件、气象和地学因素，及无需追踪污染物的具体迁移过程等优势，近年来获得了广泛发展。目前主要借助受体模型定量识别土壤污染物各类来源的贡献率。污染农田多目标调查技术通过合理选取土壤污染指标、综合应用多种监测和数值分析技术，优化土壤污染调查方案，达到揭示农田系统中污染物的多介质分布、输入途径和污染来源的目标。

由于农田环境的复杂性，以及以重金属为代

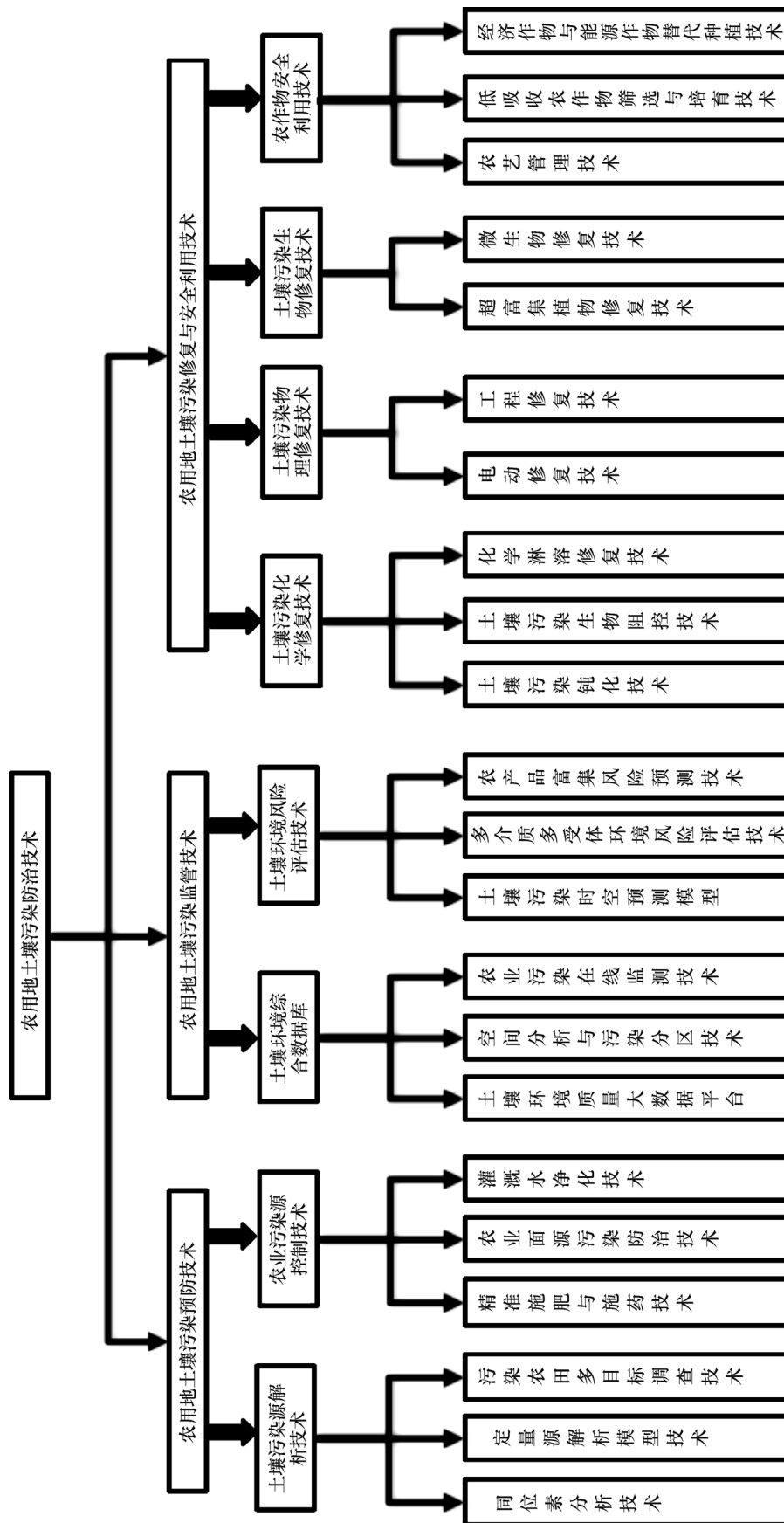


图2 农用地土壤污染防治技术体系
Fig. 2 Soil pollution prevention and control technology system for farmland

表的污染物的持续累积性，现有的技术尚难以实现真正意义上的源解析。目前的基本思路是通过：
 (1) 背景样地调查或者土壤剖面分析，明确区域农田土壤重金属污染是否由于高地质背景而非人类

活动造成的；(2) 灌溉水、肥料、大气沉降等现状监测，明确其污染来源现状；(3) 历史资料估算输入通量，综合运用模拟和统计分析，形成农田土壤重金属来源图谱(图3)。

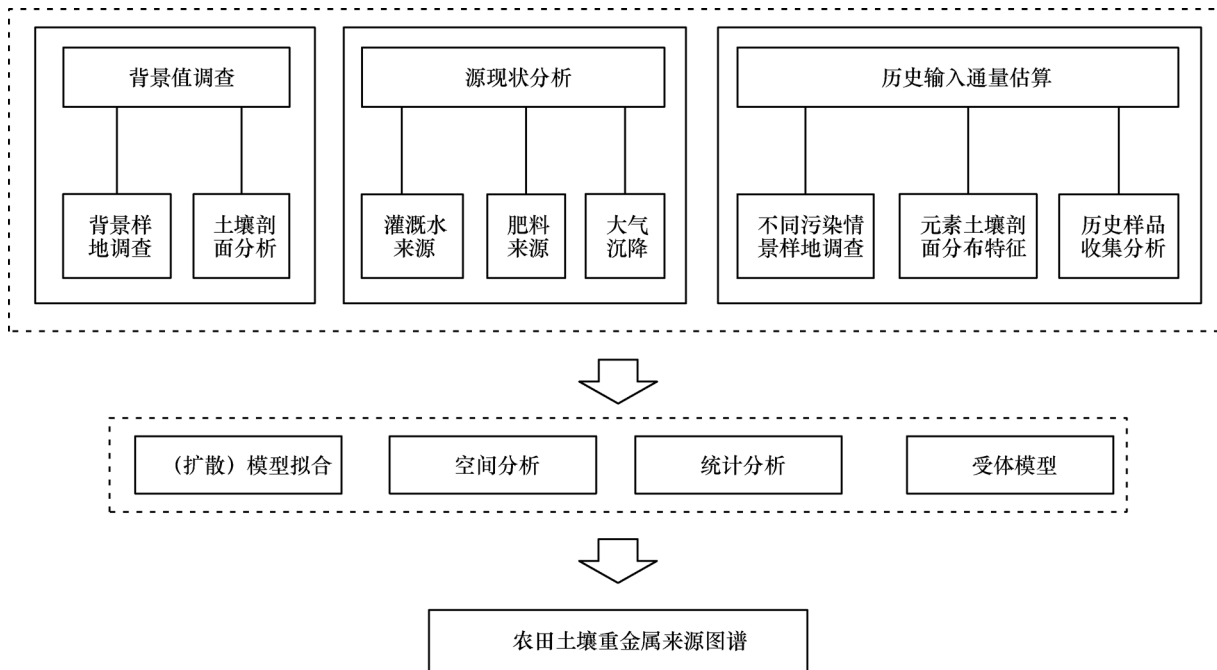


图3 农用地土壤重金属污染来源解析技术框架

Fig. 3 Technical framework of analyzing soil heavy metal pollution sources in farmland

4.1.2 农业污染源控制技术 农业污染源控制技术是对各类农业生产活动进行优化，防止或降低污染物进入农田系统，从源头上杜绝农田土壤污染。目前较成熟的、可大面积推广的技术主要包括：以测土配方施肥技术、缓控释肥技术和精准施药技术为主要手段的精准施肥与施药技术，避免因过度施肥、滥用农药等掠夺式农业生产方式造成土壤环境质量下降；以资源化利用农业废弃物和加强畜禽养殖污染防治为主要手段的农业面源污染防治技术，推行农业清洁生产；以加强灌溉水水质管理、开展灌溉水水质监测、净化处理未达标农田灌溉水为主要手段的灌溉水净化技术，防止污染源进入农田系统，加重或新增污染土壤。

4.2 农用地土壤污染监管技术

4.2.1 土壤环境综合数据库 监管技术的关键首先在于集成土壤环境数据、土壤理化性质、土地利用方式、农产品质量等多源数据，构建样本量大、数据多源、指标动态的土壤环境综合数据库。

一方面，通过农业污染的在线监测(包括农田灌溉水、地表径流、降尘和降水等)，提供农田系统污染物的实时输入负荷，实现与土壤环境质量大数据平台的有机整合及数据更新。另一方面，基于农田污染普查数据和相关土壤、农产品环境质量标准，划分农田系统土壤污染程度以及农产品超标程度的空间分布图，确定农田污染优先控制区，实现土壤环境质量大数据平台的数据完善。此外，也可基于大数据平台实现土壤污染风险评估，预测土壤环境质量演变趋势，为区域土壤环境综合管理提供支撑。

4.2.2 土壤污染风险评估技术 土壤污染风险评估技术是以土壤环境综合数据库为基础，综合考虑土壤环境质量、农产品超标情况和土壤污染趋势，全面评估区域农用地土壤污染风险，为土壤环境综合管理提供决策参考，包括以下三个方面：

(1) 土壤污染风险评估：基于农田土壤中污染物的实测浓度，参照标准文件中定义的土壤环境质量

标准值和分级标准，对农田土壤污染程度进行评估和风险等级划分。对于重金属类污染需要考虑地质背景。（2）农产品超标风险评估：考虑不同类型和品种作物对不同污染物的生物富集差异，根据农产品中污染物的实测浓度和《食品中污染物限量》（GB 2762-2012）中限量标准值，评估农产品超标风险。（3）污染累积风险评估：基于区域农田污染特征，识别主要污染来源，估算污染物输入输出通量，分析土壤污染物累积趋势，对土壤污染风险进行评估和分级。

4.3 农用地土壤污染修复与安全利用技术

4.3.1 化学修复技术 以改变污染物特性、阻止污染物吸收和促进污染物分离为思路，可将化学修复技术分为钝化技术、阻控技术和淋溶技术三类。土壤污染钝化技术是基于重金属土壤化学行为的改良措施，通过向污染土壤中添加重金属钝化剂来降低重金属在土壤中的溶解性、迁移能力和生物有效性，从而使重金属转化为低毒性或移动性较低的化学形态，以减轻其对生态环境和人类健康的危害，但钝化剂的添加并不能将重金属污染从土壤中去掉，其长期稳定性以及能否有效降低农作物吸收需要田间验证^[9]。土壤污染阻控技术利用硅（Si）、锰（Mn）、锌（Zn）等微量元素与重金属之间的竞争拮抗关系，不仅能有效抑制作物对重金属的吸收与转运，也能提供大量的营养元素保证植物正常生长，在一定程度上突破了重金属移除技术成本高、难大面积应用的技术瓶颈，但并非在所有的农田生态系统中均能成功应用。化学淋溶修复技术通过向污染土壤中注入淋洗剂，将污染物从土壤相中溶解，转移至液相中，再将富含污染物的液体进行抽提、分离和处理；但该技术易受土壤质地、淋洗剂种类和水源等因素制约，且存在破坏土壤性质和造成二次污染的隐患，目前尚无农田土壤污染修复中成功实施的案例。

4.3.2 物理修复技术 与化学修复相比，物理修复速度较快，修复效果显著，几乎不受土壤性质限制，且不易对环境造成二次污染，但这类修复方法工程量较大，以工程修复技术和电动修复技术为代表。工程修复技术根据污染程度，采取以污染土壤转移及清洁土壤置换为手段的换土法，以清洁土壤表层覆盖或与原污染土壤混匀为手段的客土法，和以翻挖深层清洁土壤至场地表面为手段的深耕法

等稀释污染物浓度，减轻污染物的生物毒性。电动修复技术是向污染土壤中插入惰性石墨电极，通入直流电，使土壤中的金属在外加电场作用下发生定向移动并在电极附近累积，定期将电极附近的电渗液抽出处理，除去污染物。该技术修复过程缓慢，常需配合其他修复技术联用，目前仍停留在实验室基础研究阶段^[10]，尚无农田土壤污染修复中成功实施的案例。

4.3.3 生物修复技术 生物修复技术具有环境友好和修复效果缓慢等特点，包含两个主要作用原理：一是利用超富集植物的重金属累积作用，将重金属从污染土壤中吸收、积累，使土壤中重金属含量降至可接受水平；二是利用微生物的代谢过程，改变根系微环境，使重金属发生沉淀、转移、吸收、氧化还原等作用，达到污染土壤修复目的。

4.3.4 农作物安全利用技术 农作物安全利用技术根据农田土壤污染程度，分别采取农艺管理技术、低积累农作物筛选和培育技术及作物替代种植技术。

农艺管理技术包括改变耕作制度和水分管理方式、调整作物品种、选择能降低土壤重金属污染的化肥或增施能固定重金属的有机肥等措施，来降低土壤重金属污染。此外，合理的农艺管理技术还能显著增加高富集植物对土壤重金属的吸收，从而提高植物修复效率。

低积累农作物筛选技术根据植物对重金属吸收能力的差异性及其吸收后重金属在植物各部位的分布规律，分析比较重金属在不同种类农作物或同类农作物不同品种各器官中（尤其可食部分）的积累水平，从而筛选出既不影响农作物产量且可食部分重金属含量在安全食用范围内的农作物品种，在当地污染农田进行推广种植。

作物替代种植技术是指改种不被人体摄入的非食用经济作物（如棉花、苧麻、桑树等）、非口粮作物（如酒用高粱、饲料玉米）和能源植物（如高粱）。一方面切断了重金属污染食物链，实现了农田土壤的污染修复，另一方面为当地创造了就业机会和经济效益，实现了农田土壤的高效利用和可持续发展。

总体上，不同的修复技术有不同的适用性和优劣势，其应用范围受土壤理化性质、污染程度、成本和修复时间等因素影响也会有所差异。如化学

修复效果显著,但成本较高且存在破坏土壤功能和造成二次污染的环境风险;物理修复效果稳定、修复彻底,但工程量大;生物修复见效慢,其优势在于操作简单和环境友好性;农作物安全利用技术以不破坏土壤特性、无生态风险、边修复边生产等优势,已在湖南、广东等地的重金属污染农田推广,但其修复效果及社会经济可行性有待考证。实际修复时应在不影响土地生产力的前提下,结合土壤污染特性,因地制宜地筛选可行性修复技术,集成使用多种修复技术,可在一定程度上克服单一修复技术存在的缺点,提高修复效率、降低修复成本。

5 建设用地土壤污染防治技术体系

我国大部分企业规模偏小,生产工艺落后,清洁生产和环境管理水平低下,污染治理设施、环境应急管理 with 处理处置设施配套滞后,导致局部存在土壤污染的风险隐患,严重影响周边居民生活质量和身体健康。为防控污染地块环境风险,环境保护部于2016年12月发布《污染地块土壤环境管理

办法》^[11],为系统加强污染地块的环境保护监督管理提供支撑。以此为鉴,本文从场地环境管理的基本流程入手,构建了全面涵盖污染预防、环境调查、风险评估、治理修复、可持续再利用和全过程监管等六个阶段的建设用地土壤污染防治技术体系(图4)。

5.1 建设用地土壤环境污染防治技术

加强工业土壤污染源源头管控,可有效降低工业活动环境影响,遏制土壤污染进一步加重,减轻区域土壤污染修复压力。从这个意义上来看,建设用地土壤环境污染防治技术主要包括三个方面:

(1)针对新建企业,通过制定和完善建设用地土壤环境影响评价内容,根据污染物排放特征合理规划空间布局,从前端设计预防新建工业企业对土壤环境的污染,对土壤污染防治工作可起到事半功倍的作用;(2)针对在产企业,加强日常生产活动及环境监管,开展重点企业整治,健全企业环境风险防范及应急体系,推进企业清洁生产;(3)针对关闭、搬迁、流转企业,开展土地用途改变及流转土壤环境质量状况强制调查,加强污染地块的跟

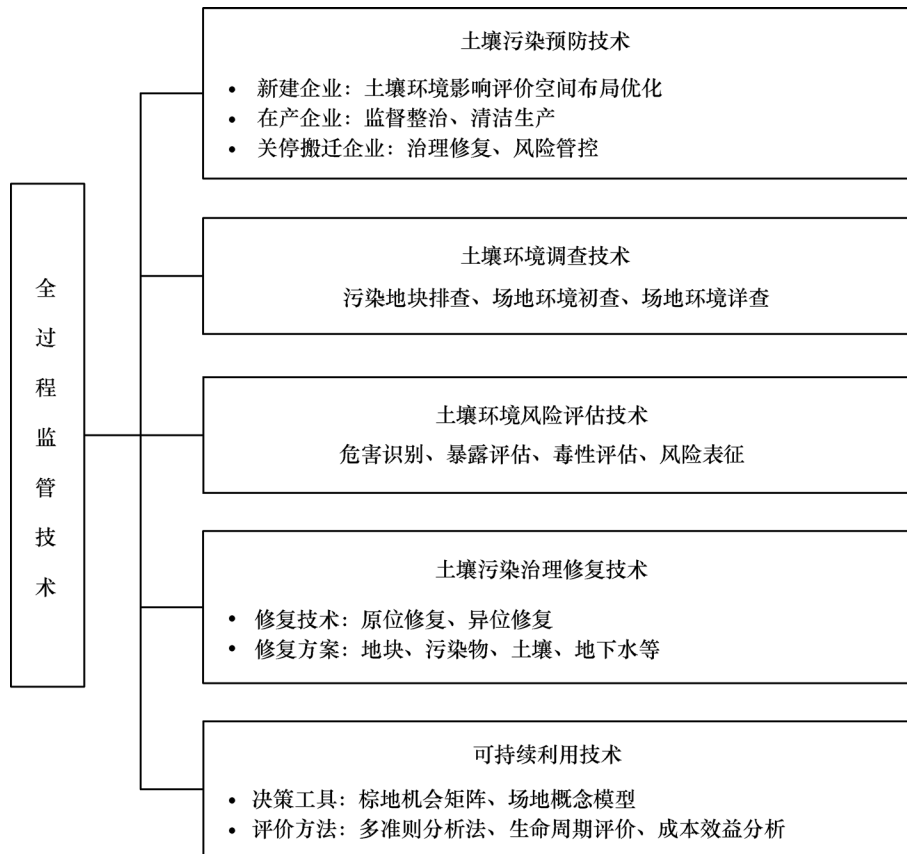


图4 建设用地土壤污染防治技术体系

Fig. 4 Soil pollution prevention and control technology system for construction land

踪监测，确保土地安全再利用。此外，在区域层面，明确区域土壤污染特征和环境容量，通过建立污染防控分区，引导企业合理布局，从土地规划、区域发展规划阶段就做好污染地块的处置、利用规划。

5.2 建设用地土壤环境调查技术

建设用地土壤环境调查技术包括污染地块排查、初步场地环境调查和场地环境详细调查三个层面，以满足污染地块（或者潜在污染地块）分级分类管理的需求。污染地块排查通过收集土地变更、企业生产活动、主要工艺、管理水平和再开发利用需求等相关材料识别场地污染情况，对污染场地进行初步筛选，确定是否需要开展进一步的“修复调查”；若需要，则需对疑似污染地块开展初步场地环境调查，确定场地土壤可能受污染的区域，通过样品采集和实验分析判定污染物浓度是否超过基于当前土地用途的风险筛选值或者相关土壤质量标准（如《建设用地土壤污染风险筛选指导值（三次征求意见稿）》），确定是否需要开展场地环境详细调查，进行风险评估；若需要，则根据风险评估技术导则的要求，开展规范、系统的深入调查，基于暴露途径、化学污染物浓度、污染场地面积等参数进行风险评估，确定场地初步修复目标值并划定修复范围。

5.3 建设用地土壤环境风险评估技术

基于风险评估技术导则文件，建设用地土壤环境风险评估技术包括危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征和确定修复目标值等工作程序。根据场地环境调查获取的资料，结合土地利用方式，识别敏感受体、暴露途径，关注污染物空间分布特征及性质参数，建立污染物迁移模型、受体暴露模型等场地概念模型，计算污染物危害效应，在此基础上建立调查场地的风险评估模型，估算暴露风险并根据需要进行风险的空间表征。若暴露风险超过基于当前土地用途的整治值，则需计算关注污染物基于致癌或非致癌风险的土壤修复限值，结合修复成本、时间等因素确定场地修复目标。因此，建设用地土壤环境风险评估技术为制定可行的场地修复方案、开展污染土壤修复和后期场地再开发利用决策提供技术支撑。

5.4 建设用地土壤污染治理修复技术

目前，国内外较为成熟或具有应用前景的工业

污染场地修复技术主要包括工程措施（原位修复、异位修复和异位处置）和非工程措施（污染隔离、用地方式变更、污染受体防护和自然修复）两大类^[12]。而建设用地土壤污染治理与修复是一项复杂的系统工程，影响修复效果的关键不仅在于修复技术的合理选取，更取决于耦合场地环境、利益相关方、土地利用需求、修复技术体系和修复目标等各个方面的系统修复模式，针对不同的地块、土层深度、污染物、水文条件、土壤性质、废物产生及处置制定因地制宜的修复方案^[13]。

5.5 建设用地可持续利用技术

污染土壤经修复通过验收后，将再次进入土地流转周期进行开发再利用。为防止土地再次污染，必须在耦合区域发展规划的基础上从前端设计入手合理规划土地用途，探索可持续的土地综合利用模式。借鉴欧美发达国家棕地可持续管理的成功经验，建设用地可持续利用技术可采用棕地机会矩阵、场地概念模型等决策工具，借助多准则分析法、生命周期评价、成本效益分析等方法量化识别土地再利用计划对社会、环境和经济受体的影响途径与作用机制，从而最大化污染场地再利用的增值服务（如作为公园用地改善环境质量和当地景观的同时，还可提高生物多样性及为居民创造社区融合的机会），最终实现场地再开发的社会效益、经济效益、环境效益的有机统一，满足区域环境、社会和经济发展的需求。

5.6 建设用地土壤污染防治全过程监管技术

越早建立监管制度越能有效开展土壤污染防治工作。全过程监管技术应涵盖建设用地土壤污染预防、日常生产活动监督（尤其是可能产生污染的行动）、污染土壤修复过程及相关材料递交和信息公开、修复结果审核等各个阶段，且需要环境保护主管部门联合其他权责部门、社会群体力量（公众、媒体及环保组织等）等广泛利益相关者的积极参与，特别要发挥社会群体力量在环境管理中的中流砥柱作用，加强对企业日常生产活动的监管力度，防止企业非法堆放、转移废弃物等可能加重场地污染的行为。

6 结 论

面对我国土壤污染形势严峻而土壤污染防治

法尚未出台的突出矛盾,“土十条”指明了土壤污染防治的工作方向,夯实了土壤污染防治的工作基础,提升了土壤污染防治的工作能力。以“土十条”为行动指南,一套系统有效的土壤污染防治体系不仅要从“治”的角度对污染土壤开展治理修复和风险管控,更要重视对污染源头的严格监管,从“防”的角度预防新增污染和现存污染的迁移扩散,同时配套完善标准体系、融资机制、责任机制、信息公开和公众参与等保障机制,形成政府主导、企业担责、公众参与、社会监督的土壤污染全过程防治体系。具体而言:(1)土壤污染防治技术体系的构建,需围绕预防为主、保护优先、风险管控的总体思路,统筹考虑土地利用类型、污染程度、社会经济发展水平、技术可行性等因素,体现系统化、差异化、科学化、法制化、透明化的指导思想。(2)土壤污染防治技术体系的构建,需以改善土壤环境质量为核心,针对重点区域、行业和污染物实施分类别、分用途、分阶段治理,坚持“预防为主,保护优先”、“风险管控,安全利用”、“功能优先,自然恢复”、“适度修复,持续发展”和“示范引导,因地制宜”的基本原则。

(3)土壤污染防治技术体系的构建,需在摸清土壤污染状况的基础上,同步推进土壤污染源头管控、建设用地风险管控和农用地安全利用,发挥法律法规、标准体系、管理体制、融资机制、责任机制、市场机制、公众参与、科学研究和宣传教育等体系的支撑作用。(4)农用地土壤污染防治技术体系的构建,需以保障农产品质量和人体健康为出发点,包括污染预防技术、污染监管技术、污染修复与安全利用技术。通过污染物来源解析,采取针对性措施防止或减少污染物进入农田系统;基于土壤环境综合数据库和相关标准,对土壤污染风险、农产品污染风险和污染累积风险进行现状评估、趋势预测和全程监管;根据污染特征采取化学、物理、生物修复技术或农艺管理、低积累农作物培育、作物替代种植等农作物安全利用技术。

(5)建设用地土壤污染防治技术体系的构建,需以人居环境安全和土地可持续利用为出发点,基于地块管理流程,全面覆盖污染预防、环境调查、风险评估、治理修复、可持续再利用和全过程监管等六个阶段,根据企业生产状态(新建、在产、关停或搬迁)、土壤污染程度、土地规划用途等采取分

级、分类、分用途的风险管控措施。

参考文献

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. 2014 [2017-10-08]. <http://websearch.mep.gov.cn/was40/search>
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. National survey of soil pollution status (In Chinese). 2014 [2017-10-08]. <http://websearch.mep.gov.cn/was40/search>
- [2] 国务院. 土壤污染防治行动计划. 2016 [2017-10-08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm
The State Council. Action plan for soil pollution prevention and control (In Chinese). 2016 [2017-10-08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm
- [3] 谢森,胡伟,宋书巧. 我国土壤污染防治法律体系研究. 安徽农业科学, 2015, 43 (31): 277—279
Xie S, Hu W, Song S Q. Research on legal system of China's prevention and control of soil pollution (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43 (31): 277—279
- [4] 常籍匀. 我国土壤污染防治法律体系思考. 法制与社会, 2016, 2 (4): 270—271
Chang J Y. Reflection on the legal system of soil pollution prevention and control in China (In Chinese). Legal System and Society, 2016, 2 (4): 270—271
- [5] 易芳,龙斌,王涛. 中国土壤污染防治管理体系思考. 环境科学与管理, 2017, 42 (3): 26—29
Yi F, Long B, Wang T. Thinking of soil pollution prevention and control management system in China (In Chinese). Environmental Science and Management, 2017, 42 (3): 26—29
- [6] 李云生,王浩,高妮影. 土壤污染防治投融资体系改革与基金设立研究. 环境保护科学, 2016, 42 (2): 29—32
Li Y S, Wang H, Gao N Y. Study of the reform of investment and financing system and the establishment of a fund for soil pollution prevention and control (In Chinese). Environmental Protection Science, 2016, 42 (2): 29—32
- [7] 张艳丽,刘东生,徐哲,等. 中日农田土壤污染防治政策体系比较研究. 农业环境与发展, 2010, 27 (5): 1—5
Zhang Y L, Liu D S, Xu Z, et al. Comparative

- study on the policy system of farmland soil pollution prevention and control between China and Japan (In Chinese). *Journal of Agricultural Environment and Development*, 2010, 27 (5): 1—5
- [8] 贺成龙, 虞锡君. 农用土壤污染的“三位一体”防治技术体系. *嘉兴学院学报*, 2013, 25 (3): 105—109
He C L, Yu X J. Trinity prevention and control technology system for agricultural soil pollution (In Chinese). *Journal of Jiaxing University*, 2013, 25 (3): 105—109
- [9] 武成辉, 李亮, 雷畅, 等. 硅酸盐钝化剂在土壤重金属污染修复中的研究与应用. *土壤*, 2017, 49 (3): 446—452
Wu C H, Li L, Lei C, et al. Research and application of silicate passivation agent in remediation of heavy metal-contaminated soil: A review (In Chinese). *Soils*, 2017, 49 (3): 446—452
- [10] 肖文丹, 叶雪珠, 徐海舟, 等. 直流电场与添加剂强化东南景天修复镉污染土壤. *土壤学报*, 2017, 54 (4): 927—937
Xiao W D, Ye X Z, Xu H Z, et al. Intensification of phytoremediation of Cd contaminated soil with direct current field and soil amendments in addition to hyperaccumulator *Sedum alfredii* (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (4): 927—937
- [11] 环境保护部. 污染地块土壤环境管理办法. 2016 [2017-10-08]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bl/201701/t20170118_394953.htm
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Measures for soil environment management in contaminated land (In Chinese). 2016 [2017-10-08]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bl/201701/t20170118_394953.htm
- [12] 宋昕, 林娜, 殷鹏华. 中国污染场地修复现状及产业前景分析. *土壤*, 2015, 47 (1): 1—7
Song X, Lin N, Yin P H. Contaminated site remediation industry in China: Current state and future trends (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (1): 1—7
- [13] 张倩, 蒋栋, 谷庆宝, 等. 基于AHP和TOPSIS的污染场地修复技术筛选方法研究. *土壤学报*, 2012, 49 (6): 1088—1094
Zhang Q, Jiang D, Gu Q B, et al. Selection of remediation techniques for contaminated sites using AHP and TOPSIS (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1088—1094

Thinking of Construction of Soil Pollution Prevention and Control Technology System in China

CHEN Weiping¹ XIE Tian^{1, 2} LI Xiaonuo¹ WANG Ruodan³

(1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract For long the soil resources of China have been confronted with over-exploitation, severe pollution and ever-increasing development pressures. The adverse impacts of soil pollution are subtle and escalating slowly, but already to such an extent that they have gravely affected human health, and sustainable utilization and fundamental ecological functions of the soil in modulating biogeochemical cycling of nutrients, supporting plant growth, and sustaining healthy human habitation. The promulgation of the “Action Plan for Soil Pollution Prevention and Control” in 2016 reflects great attention the Chinese government pays to the issue of soil protection. The plan laid down a systematic arrangement from the strategic point designed at the summit level to further promote development of soil pollution prevention and control project in China. To rapidly and effectively improve the soil environment, and guarantee safety of the agricultural production as well as human living habitats, centered around the general course and the core concepts of the plan, the paper has brought forth five guiding ideas and five basic principles for

construction of a China-specific soil pollution prevention and control system. New modes of soil pollution prevention and control were explored through in-depth interpretation of the programmatic document and construction of land-use specific soil pollution prevention and control systems. The paper elaborated the theme, targets and support system of the conceptual framework of soil pollution prevention and control, and pointed out that the soil pollution prevention and control technology system should encompass prevention technology, monitoring technology, remediation technology and technology for safe exploitation of farmland resources, as well as the following aspects, pollution prevention and control, environment investigation, risk assessment, management and remediation, end-to-end monitoring and sustainable utilization. It could be concluded that the studies on soil pollution prevention and control system in China were centered mainly on studies of the legal system, neglecting system research on technical system and management system. Guided by the core idea of the “Action Plan for Soil Pollution Prevention and Control”, a systematic and effective soil pollution prevention and control system should: (1) unfold management, remediation and risk control of contaminated soil from the perspective of “Harnessing”; (2) prevent emerging of new pollution and migration and diffusion of existing pollution and enforce rigid supervision of pollution sources from the perspective of “prevention”; (3) form an end-to-end soil pollution prevention and control system supported by financing mechanism, public participation and other accessorial mechanisms; and (4) pay attention to uniqueness of each tract of land individually in function on the basis of the clear knowledge of status of soil pollution, e.g. soil pollution prevention and control is aimed at a healthy inhabitant environment and sustainable land use for construction land, and at ensuring quality of agricultural produce and human health for farmlands.

Key words Soil pollution prevention and control system; Action Plan for Soil Pollution Prevention and Control; Farmland; Construction land

(责任编辑: 陈荣府)