

中国土壤环境质量基准 与标准制定的理论和方法

骆永明 夏家淇 章海波 宋静 滕应 等著



科学出版社

中国土壤环境质量基准与标准制定的 理论和方法

骆永明 夏家淇 章海波 宋 静 滕 应 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书首次系统地总结了土壤环境质量基准与标准制定的相关理论、框架及方法体系,综合比较了不同国家及地区在标准名称、土地利用方式划分、保护目标、暴露途径等方面的异同。同时,结合中国国情及现有相关参数,提出了我国土壤环境一、二、三级质量标准的制定方法和二级基准计算值,并与国外同类标准进行了比较。此外,以重金属(镉、铅)和致癌性有机污染物(苯并[a]芘)为例,详细介绍了基准值的计算方法和标准的建议值。本书还综述研究了基于污染物的生物有效性或生物可及性的土壤环境质量基准与标准的制定方法。在此基础上,进一步提出了开展中国土壤环境质量基准和标准科学研究及制定工作的建议,具有重要的学术价值和指导意义。

本书可作为土壤污染防治与修复、环境保护、农业管理、生态建设、国土资源利用等专业和领域的管理者、科研工作者、研究生等的参考书,也可作为高等院校、科研院所中土壤学、环境科学、环境工程、生态学等相关学科的研究生教学参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

中国土壤环境质量基准与标准制定的理论和方法/骆永明,夏家淇,章海波,宋静,滕应等著. —北京:科学出版社,2015.2

ISBN 978-7-03-043253-7

I. ①中… II. ①骆… III. ①中国土壤—环境质量标准—制定—中国 IV. ①X-651

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第023019号

责任编辑:周丹宁倩/责任校对:杨赛

责任印制:李利/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:463 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《中国土壤环境质量基准与标准制定的理论和方法》

编委名单

骆永明	夏家淇	章海波	宋 静	滕 应	吴龙华
刘五星	涂 晨	王国庆	张红振	李志博	胡宁静
郑茂坤	李连祯	过 园	陈永山	孙向辉	罗 飞
韦 婧	邓绍坡	李晨曦			

序

“万物土中生”。土壤是人类赖以生存、生态文明建设、兴国安邦的基础性资源。目前，中国土壤的污染范围扩大，土壤环境质量恶化，已威胁到农产品、生态系统、饮用水源地、人居环境的安全。要消除或缓解这些威胁，需要大力加强土壤环境科学基础研究和土壤环境监管工作，包括土壤环境基准与标准的制定。中国已有 20 多年的土壤环境基准研究工作经验，但主要着眼于重金属方面，涉及有机污染物的研究刚刚开始；在土壤环境质量标准制定方面，已经在国家及相关部委层面颁布了若干重金属和有机污染物的标准。但与发达国家相比，中国的土壤环境标准制定缺乏土壤环境基准的基础性支撑；现有的土壤环境标准体系欠健全，标准指标少、适用性不广，亟须进行修订或补充制定，以强有力地支持国家土壤环境保护及相关的管理政策法规的制定。

近年来，中国科学院南京土壤研究所及中国科学院烟台海岸带研究所的有关科研人员联合开展了土壤环境基准与质量标准的研究工作。《中国土壤环境质量基准与标准制定的理论和方法》就是他们协同研究的创新成果，是国内系统性研究的首部专著。该书既有多学科综合的相关理论研究，也有充分借鉴发达国家及地区在土壤环境管理方面提出的污染物风险评估模型，还有通过他们自己的实践，结合中国国情，提出的土壤环境质量标准制定的框架与方法学体系。还值得一提的是该书介绍了土壤中污染物的生物有效性及其表征方法，并提出了基于生物有效性制定土壤环境基准与质量标准的新思路和新方法。此外，该书还结合实际案例介绍了农田土壤中镉、居住及工商业用地土壤中铅以及不同用地方式下土壤苯并[a]芘的基准和标准的制定方法，为其他类似污染物的基准与标准的制定提供了范例。

该书结构完整、内容新颖、图文并茂、数据丰富，具有科学性、系统性和指导性。该书的出版可为中国土壤环境基准研究与质量标准制修订提供参考蓝本，将有助于国家土壤环境管理、污染土壤修复产业和土壤环境保护事业的发展。



中国科学院院士

2014 年 10 月 20 日

前 言

土壤环境质量标准体系是土壤环境监管体系中的重要内容。土壤环境质量标准的制定需要土壤环境质量基准的基础性支持。我国自 20 世纪 80 年代后期进行现行土壤环境质量标准制定研究以来,在土壤环境质量基准与标准制定相关方面的研究进展有限。限于 20 世纪 90 年代的研究基础、条件和土壤环境管理的需求,从现在看来当时制定的有关标准体系缺乏全面系统的规划,不够完善;现行的《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)在土地利用类型及其适用性方面已不能满足当前的全国土壤环境管理的需求。在国际上,美国、英国、荷兰、澳大利亚等国都已经建立了以风险评估为基础的土壤环境质量基准与标准体系,其包含的污染物指标已涉及重金属、挥发性有机物、半挥发性有机物、持久性有机污染物等数十项甚至数百项之多,并还在继续投入大量人力、物力,加强有关基准与标准制定的基础性研究工作。

近年来,环境保护部正加大服务于土壤污染防治与土壤环境保护的标准体系的建设。特别是在 2014 年,在广泛调研与借鉴欧美等国家和地区有关理论、方法及经验的基础上,环境保护部制定发布了《场地环境调查技术导则》、《场地环境监测技术导则》、《污染场地风险评估技术导则》、《污染场地土壤修复技术导则》、《污染场地术语》,为各地开展污染场地环境状况调查、风险评估、修复治理提供了技术性指导。同时,国家有关部门还将“制修订土壤环境质量标准”纳入《土壤污染防治行动计划》中,使该项工作进一步有序推进。

自 1998 年回国参加中国科学院南京土壤研究所工作以来,作者率领的研究组致力于土壤污染过程、风险评估、治理修复与标准管理研究;曾结合以前主持开展的国家“973”项目的有关研究工作,于 2008 年提出了针对不同土壤利用方式的我国土壤环境质量标准体系的制修订方案。本书吸收了多年来中国科学院南京土壤研究所及中国科学院烟台海岸带研究所有关科研人员在土壤及场地污染发生、污染土壤风险评估及土壤环境质量基准与标准方面的研究成果,着眼于土壤环境质量基准和标准制定的理论与方法,从介绍土壤污染、土壤环境质量开始,首次全面系统地总结了土壤环境质量基准与标准制定的相关理论、框架及方法体系,综合比较了不同国家及地区在标准名称、土地利用方式划分、保护目标、暴露途径等方面的异同;同时,结合我国国情及现有参数,提出了我国土壤环境质量一、二、三级标准的制定方法,并进一步以重金属(镉、铅)和致癌性有机污染物(苯并[a]芘)为例,介绍了基准值的计算方法及标准的建议值。

全书共分十二章及四个附录。第一章——绪论,结合我国土壤污染态势、成因及危害,介绍了土壤污染、土壤环境质量监测与评价及我国土壤环境质量基准与标准的概况。第二章——国内外土壤环境质量标准及其制定的发展趋势,介绍并比较分析了发达国家、地区及我国的土壤环境质量标准现状,提出了我国土壤环境质量标准制定

的方向。第三章——土壤环境质量基准与标准制定的理论体系,包括环境容量、介质分配、剂量-效应、暴露与风险等理论,系统地阐释了土壤环境质量基准与标准制定过程中运用到的土壤环境科学及相关学科的基础研究成果。第四章——土壤环境质量基准与标准制定的框架体系,介绍了构建基准与标准框架的指标、结构、监测、分析等内容,并提出了我国土壤环境质量标准的分类、分级与指标体系。第五章——土壤环境质量基准与标准制定的方法体系,包括土壤环境地球化学方法、健康风险评估方法、生态风险评估方法,以及以保护地下水为目标的环境迁移风险评估方法,重点介绍了方法中的模型及参数确定。第六章——我国土壤环境质量一级标准制定研究,主要从土壤背景含量的角度考虑无机和有机污染物的一级标准。第七章——我国土壤环境质量二级标准制定研究,从健康风险评估和地下水保护角度介绍了二级标准制定的用地方式划分、暴露途径及其相关模型和参数。第八章——我国土壤环境质量三级标准的制定研究,从污染场地修复角度重点介绍了场地修复启动值、修复目标值的确定方法。第九章——以生物有效性为基础的土壤环境质量基准与标准研究,探讨了将生物有效性(或生物可及性)引入到土壤环境质量基准与标准制定中的思路与方法。第十章——我国农业用地土壤镉的环境质量基准与标准研究:案例1,以我国土壤重金属污染中首要污染物——镉为例,主要介绍了镉污染物在土壤-作物体系中的迁移与农产品质量安全的关系,以及对农田土壤镉的环境质量基准与标准确定的依据。第十一章——我国居住和工商业用地土壤铅的环境质量基准与标准研究:案例2,针对铅的特殊性,重点介绍了采用综合暴露吸收生物动力学模型(IEUBK)和成人血铅模型(ALM)确定土壤铅的环境质量基准值与标准的方法。第十二章——我国土壤苯并[a]芘的环境质量基准与标准研究:案例3,由于土壤中有有机污染物多环芳烃污染的普遍性,以最具有代表性的致癌性多环芳烃——苯并[a]芘为例,介绍了有机污染物的土壤环境质量基准与标准确定方法。在随后的四个附录中,附录1提供了以保护人体健康为目标的暴露途径与计算模型;附录2以列表方式提供了相关污染物的主要理化性质和毒性参数;附录3提供了世界部分国家及地区土壤环境质量标准;附录4提供了研究团队在开展相关研究中发表的论文与专著清单。需要说明的是,本书中有时会存在因选用模型不同而出现同类参数取值不同等现象。希望本书的出版有益于推进我国土壤环境质量基准相关的基础性研究和标准的制定,也有助于加快缩短我国有关研究工作与国际先进水平的距离。

本书吸收了国家自然科学基金重点项目“土壤-植物-微生物系统中毒害污染物的界面过程与生物修复机理”(41230858)、环保公益性行业专项“我国土壤环境功能区划方法与关键技术研究”(201209030)、国家“973”项目“长江、珠江三角洲地区土壤和大气环境质量变化规律与调控原理”(2002CB410800)第10课题等项目的部分研究成果,是在我国第一部《土壤环境质量标准》制定者夏家洪先生指导和直接参与下,几经补充修改,共同完成的。本书的主要执笔人为:骆永明、夏家洪、章海波、宋静、滕应;参加相关研究和本书撰写工作的还有:吴龙华、刘五星、涂晨、王国庆、张红振、李志博、胡宁静、郑茂坤、李连祯、过园、陈永山、孙向辉、罗飞、韦婧、邓绍坡、李晨曦等。全书由骆永明统稿、定稿。在撰写过程中,福建农林大学王果教

授、广东省生态环境与土壤研究所万洪富研究员、李芳柏研究员等提供了有关资料，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳切希望各位同仁给予批评指正。

骆永明

2014年10月于烟台

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 土壤污染	1
1.1.1 我国土壤污染现状与态势	2
1.1.2 我国土壤污染来源及其成因剖析	4
1.1.3 我国土壤污染的危害分析	5
1.1.4 土壤污染识别	6
1.2 土壤环境质量	7
1.2.1 土壤环境质量监测	8
1.2.2 土壤环境质量评价	9
1.3 土壤环境质量基准和标准	10
1.3.1 土壤环境质量基准与标准的发展现状	10
1.3.2 我国土壤环境质量基准与标准概况	11
主要参考文献	12
第二章 国内外土壤环境质量标准及其制定的发展趋势	13
2.1 发达国家土壤环境质量标准概况及其制定方法	13
2.1.1 发达国家土壤环境质量标准制定概况	13
2.1.2 发达国家土壤环境质量标准类型	19
2.1.3 发达国家土壤环境质量标准制定的基础差异	20
2.2 我国土壤环境质量标准概况及其制定方法	23
2.2.1 国家标准	24
2.2.2 环保行业标准	25
2.2.3 地方标准	28
2.2.4 港澳台地区标准	30
2.3 土壤环境质量标准制定发展趋势与我国制定方向	31
2.3.1 土壤环境质量标准制定的发展趋势	31
2.3.2 我国土壤环境质量标准的制定方向	32
主要参考文献	34
第三章 土壤环境质量基准与标准制定的理论体系	36
3.1 土壤污染物的环境容量理论	36
3.1.1 土壤环境容量的理论基础	36
3.1.2 土壤环境容量在基准与标准制定中的运用	37

3.2 土壤污染物的介质分配理论	39
3.2.1 重金属在土壤-溶液中分配	39
3.2.2 疏水性有机物在土壤组分中的分配	43
3.3 土壤中污染物的剂量-效应理论	47
3.4 土壤中污染物的暴露与风险理论	50
3.4.1 暴露评估	50
3.4.2 环境风险评估	53
主要参考文献	54
第四章 土壤环境质量基准与标准制定的框架体系	57
4.1 土壤环境质量基准与标准的结构组成	57
4.2 土壤环境质量基准与标准的污染物指标筛选	59
4.2.1 土壤环境质量基准与标准的污染物指标筛选原则	59
4.2.2 不同国家和地区土壤环境质量标准中的指标比较	61
4.3 土壤环境调查与现场监测方法	71
4.3.1 区域土壤环境调查方法	71
4.3.2 农田土壤环境调查方法	72
4.3.3 场地土壤环境调查方法	72
4.3.4 土壤污染现场监测方法	73
4.4 土壤环境分析方法	75
4.4.1 分析流程	75
4.4.2 国家及行业标准分析方法	77
4.4.3 美国国家环境保护局 (USEPA) 标准分析方法	77
4.4.4 实验室质量控制与质量保证	78
4.5 我国土壤环境质量基准与标准框架体系	79
4.5.1 标准分类分级体系	79
4.5.2 标准指标体系	79
主要参考文献	81
第五章 土壤环境质量基准与标准制定的方法体系	83
5.1 土壤环境地球化学法	83
5.1.1 元素统计法	83
5.1.2 元素参比法	84
5.1.3 累积频率曲线法	84
5.2 健康风险评估法	85
5.2.1 用地方式及其暴露途径	85
5.2.2 土壤直接暴露途径	86
5.2.3 土壤间接暴露途径	87
5.2.4 食物链途径	87
5.2.5 主要参数选定	89

5.3 生态风险评估法	90
5.3.1 生态物种敏感性分布法	90
5.3.2 生态毒理数据的筛选和转换	92
5.3.3 SSD 方法的应用准则	93
5.4 地下水保护目标法	93
主要参考文献	95
第六章 我国土壤环境质量一级标准制定研究	97
6.1 无机污染物	97
6.1.1 分区制定原则	97
6.1.2 元素统计法为基础	97
6.1.3 百分位法算背景	98
6.1.4 统计单元的划分建议	99
6.1.5 高背景值问题	101
6.2 有机污染物	102
主要参考文献	102
第七章 我国土壤环境质量二级标准制定研究	104
7.1 土壤环境质量标准制定的预设条件	104
7.1.1 用地方式与暴露情境设置	104
7.1.2 污染物毒性参数	104
7.1.3 敏感受体	105
7.2 土壤饱和浓度限值与不确定分析	105
7.2.1 土壤饱和浓度限值	105
7.2.2 不确定性分析	106
7.3 居住和工商业用地暴露模型及其参数设定	108
7.3.1 暴露途径与计算模型	108
7.3.2 参数设定	108
7.3.3 不同暴露途径的风险贡献率分析	116
7.4 农业用地暴露模型及其参数设定	119
7.4.1 暴露途径与计算模型	119
7.4.2 参数设定与基准计算	120
7.5 以保护地下水为目标的暴露模型及其参数设定	125
7.5.1 暴露途径与计算模型	125
7.5.2 参数设定与基准计算	125
7.6 土壤环境质量二级基准计算值	129
7.7 土壤环境质量二级标准的制定问题	132
7.7.1 基准计算值与国外土壤筛选值比较	132
7.7.2 二级标准制定中存在的问题与对策	143
主要参考文献	145

第八章 我国土壤环境质量三级标准的制定研究	146
8.1 污染场地风险评估与三级标准	146
8.2 污染场地土壤三级标准值计算	147
8.3 风险评估模型参数及其推荐值	149
8.4 污染场地土壤修复目标的确定	151
主要参考文献	152
第九章 以生物有效性为基础的土壤环境质量基准与标准研究	154
9.1 土壤污染物的生物有效性与生物可及性	154
9.2 土壤污染物的生物有效性表征方法	155
9.2.1 化学浸提及萃取法	156
9.2.2 仿生提取法	157
9.2.3 生物配体模型法	159
9.2.4 定量结构-活性 (QSAR) 相关模型	161
9.2.5 生物测试法	162
9.3 以生物有效性为基础的土壤污染临界值确定	162
9.3.1 土壤重金属浸提态的污染临界值	162
9.3.2 毒性浸出试验污染临界值	163
9.4 以生物有效性为基础的土壤环境质量基准与标准制定展望	167
9.4.1 土壤性质矫正的全量指标	167
9.4.2 土壤有效态含量指标	168
9.4.3 相对生物有效性矫正系数 (RBA) 的应用	168
主要参考文献	170
第十章 我国农业用地土壤镉的环境质量基准与标准研究: 案例 1	174
10.1 农田土壤中镉及其来源	174
10.1.1 土壤中镉的背景含量	174
10.1.2 土壤中镉的主要来源	175
10.2 土壤-植物系统镉迁移的模型建立与检验	177
10.2.1 土壤-植物系统镉迁移的建模方法	177
10.2.2 建模数据的收集	179
10.2.3 镉的作物富集系数模型与预测效果检验	180
10.2.4 回归模型的建立与检验	180
10.2.5 不确定性分析	182
10.2.6 土壤环境质量基准值推导	185
10.3 土壤有效态镉的环境质量基准值推导	186
10.3.1 土壤-蔬菜系统有效态镉的环境质量基准值	186
10.3.2 土壤-水稻系统有效态镉的环境质量基准值	189
10.4 基于生态风险的土壤镉环境质量基准值	191
10.4.1 生态风险评估方法	191

10.4.2 基于生态风险的土壤镉环境质量基准值·····	192
10.5 农业用地土壤镉的环境质量标准建议值·····	193
主要参考文献·····	193
第十一章 我国居住和工商业用地土壤铅的环境质量基准与标准研究：案例 2 ·····	197
11.1 土壤中铅及其来源·····	197
11.2 环境铅污染暴露模型·····	199
11.2.1 综合暴露吸收生物动力学 (IEUBK) 模型·····	199
11.2.2 成人血铅模型 (ALM)·····	200
11.3 土壤铅的环境质量基准值推导·····	201
11.3.1 基于 IEUBK 的居住用地土壤铅的环境质量基准·····	201
11.3.2 基于 ALM 的工商业用地土壤铅的环境质量基准·····	203
11.3.3 参数敏感性分析·····	204
11.4 居住和工商业用地土壤铅的环境质量标准建议值·····	205
主要参考文献·····	206
第十二章 我国土壤苯并 [a] 芘的环境质量基准与标准研究：案例 3 ·····	209
12.1 土壤中苯并 [a] 芘及其来源·····	209
12.2 用地方式划分及其暴露途径分析·····	210
12.2.1 用地方式划分·····	210
12.2.2 暴露途径及其计算模型·····	210
12.3 以保护人体健康为目标的土壤苯并 [a] 芘临界值推导·····	214
12.4 以保护地下水为目标的土壤苯并 [a] 芘临界值推导·····	215
12.5 土壤中苯并 [a] 芘的环境质量标准建议值·····	215
主要参考文献·····	218
结语 ·····	220
附录 1 以保护人体健康为目标的暴露途径与计算模型 ·····	224
附录 2 污染物的主要理化性质和毒性参数列表 ·····	239
附录 3 世界部分国家及地区土壤环境质量标准 ·····	248
附录 4 研究团队发表的相关论文和专著 ·····	293

第一章 绪 论

土壤是“生命之基，万物之母”，是构成生态系统的基本环境要素，是人类赖以生存的物质基础，也是经济社会发展不可或缺的重要资源。国际标准化组织将土壤定义为具有矿物质、有机质、水分、空气和生命有机体的地球表层物质，并将土壤的功能和作用归纳为如下八点：①生态系统中的物质和能量循环调节者；②植物、动物和人类的生命基础；③建筑物和道路的基础；④农业、园艺和林业生产的基础；⑤水库等地面水体的载体；⑥遗传基因库的载体；⑦自然历史的见证；⑧考古学和古生态学的历史见证。总体而言，土壤资源是土地资源的灵魂和核心，土地资源保护的关键在于保护土壤资源的数量与质量。它既是国家的自然资源，也是国家的重要环境要素。但土壤环境是一个开放的系统，大量人类活动产生的污染物通过多途径进入土壤环境。当前，我国土壤环境污染日趋严重，已对粮食及食品安全、饮用水安全、区域生态安全、人居环境健康、全球气候变化，以及经济社会可持续发展构成了威胁。在今后相当长的一段时期里，土壤环境安全将面临更加严峻的挑战。因此，加强土壤污染防治的基础研究，健全我国土壤环境质量综合监管体系，是维护土壤资源永续利用、保障生态安全、保护国民健康和实现可持续发展的重大战略需求（赵其国等，2009）。近期，国家将完善土壤环境保护标准体系作为土壤环境保护和综合工作的重要保障措施之一，并力争到 2020 年，建成国家土壤环境保护体系，使全国土壤环境质量得到明显改善。

1.1 土 壤 污 染

土壤污染是指人类活动产生的污染物进入土壤，导致土壤环境质量现存的或潜在的恶化，对生物、水体、空气和人体健康产生危害或潜在危害的现象。也就是说，土壤污染包含两类情况：一是土壤质量已恶化并产生危害，二是有恶化、危害之虞。据此，可将土壤环境质量恶化并产生危害的土壤，称为重度污染土壤；而将土壤环境质量潜在恶化但尚未引起危害的土壤，称为轻度污染或中度污染土壤（夏家淇和骆永明，2006）。日本早在 20 世纪 70 年代就将土壤污染作为人类健康及生活环境的一种公害看待。西方发达国家如美国、英国、荷兰、加拿大、德国、澳大利亚等也在其相关的法律条文中明确规定，需要针对对当地居民健康、生物体或水环境等已经形成危害或构成了危害风险的污染土壤进行治理或修复。

我国从 20 世纪 70 年代开始，开展了局域土壤污染调查与研究工作，探讨了部分土壤环境污染的现状、成因、趋势、危害及其防治对策。进入 21 世纪后，科学技术部组织开展了长江三角洲、珠江三角洲、东北老工业基地、环渤海地区等区域性土壤环境质量变化规律研究；国土资源部、环境保护部则开展了全国范围的土壤污染状况调查与防治专项、1：25 万区域多目标地球化学调查、我国土壤环境保护宏观战略研究等工作（骆永明，2007，2008；中国工程院和环境保护部，2011）。这些工作为我国土壤环境保护积累

了大量的基础资料,有助于了解我国土壤污染的基本态势。

1.1.1 我国土壤污染现状与态势

根据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》(以下简称《调查公报》)显示: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、农业等人为活动及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因。全国土壤总超标率为 16.1%,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 11.2%、2.3%、1.5%和 1.1%。污染类型以无机型为主,有机型次之,复合型污染比重较小,无机污染物超标点位数占全部超标点位的 82.8%。从污染分布情况看,南方土壤污染重于北方;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超标范围较大;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。

(1) 农田土壤污染

据《调查公报》显示,我国耕地土壤的点位超标率为 19.4%,要高于 1997 年中国环境状况公报中报道的 7.34% (约 1000 万 hm^2)。主要的污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅、滴滴涕和多环芳烃。根据全国第二次污灌普查显示,利用污水灌溉的农田面积已经由 1979 年的 30 余万公顷增加到 1999 年的 361.8 万 hm^2 ,目前污灌面积已接近 400 万 hm^2 (方玉东, 2011)。大气污染(以酸雨和氟污染为主)的农田面积约 530 万 hm^2 ;固体废物堆存侵占的农田和垃圾、污泥农用不当污染的农田面积 90 万 hm^2 (1993 年环境状况公报)。又据 2000 年中国环境状况公报,通过对 30 万 hm^2 基本农田保护区土壤有害重金属的抽样监测,其中 3.6 万 hm^2 土壤重金属超标,超标率达 12.1%;通过对 23 个省(自治区、直辖市)的不完全统计,共发生农业环境污染事故 891 起,污染农田 4 万 hm^2 ,造成农畜产品损失 2489 万 kg,直接经济损失达 2.2 亿元。长江三角洲、珠江三角洲、京津冀、辽中南和辽西南、中南等地区土壤污染面积较大,损害群众健康的环境问题仍然比较突出。

近年来,沿海大部分地区的耕地土壤中持久性毒害物质明显积累,农田、菜地农药残留和重金属及持久性有机污染物复合污染较突出。在某些经济快速发展区,主要类型土壤中六六六、滴滴涕、多环芳烃全部被检出,太湖全流域 15 种多氯联苯同系物检出率达 100%,并有大范围的农田受多氯联苯和多环芳烃等多种持久性有机毒害物的复合污染;农田耕层土壤镉、汞等重金属含量在增加,污染面积在扩大,并出现较大面积的镉、铅、铜、锌等多种金属复合污染现象,有时还伴随土壤酸化与持久性有机污染物的混合污染(骆永明, 2009)。

(2) 城市工业企业场地土壤污染

据报道,我国沈阳、北京、南京、上海、杭州、广州、香港等城市土壤出现重金属(如铅、铜、锌、铬等)、持久性有机污染物(如多氯联苯、多环芳烃等)和挥发性有机污染物(如石油烃、溶剂、助剂、苯系物、苯酚类等)等污染,主要分布在工业企业(包括搬迁、遗弃的场地)及其周边土壤。在全国各大中小城市中,类似的问题相当普遍。

全国土壤污染调查也对一些重污染企业用地、工业废弃地、工业园区、固体废物集中处理处置场地等进行了土壤污染状况的调查。根据《调查公报》显示,重污染企业用地和工业废弃地土壤的点位超标率分别为 36.3%和 34.9%,主要涉及黑色金属、有色金属、皮革制品、造纸、石油煤炭、化工医药、化纤橡塑、矿物制品、金属制品、电力等行业;主要污染物为镉、锌、汞、铅、铬、砷和多环芳烃等。

城市土壤污染对人居环境安全健康的影响已不容忽视。随着许多城市实施工业企业的“退二进三”、“退城进园”战略,大批高污染企业逐步被关停转产或搬迁,产生许多新的污染场地。2001~2009年,全国共有 9.8 万家企业关停或搬迁,包括化工厂、农药厂、钢铁厂、焦化厂、金属冶炼、电镀和机械加工厂等大量排放危险废弃物的企业。这些搬迁场地土壤往往受到农药、苯系物、卤代烃、多环芳烃、石油、重金属等多种污染物的污染,污染程度重、范围相对集中,深度可达数米至数十米,地下水同时受到严重污染。随着这些土地被转化为绿化、娱乐等公共用地或居住用地,潜在的土壤污染问题逐渐暴露,影响了城镇人居环境的健康安全。与欧美等发达国家遗留遗弃污染场地的环境问题相比,我国的场地土壤复合及混合污染问题更为复杂。在沈阳、广州、天津、兰州和上海等许多重点地区,场地土壤及地下水污染导致癌症等疾病的发病率和死亡率明显升高。由此引发的环境污染事故和对人体健康伤害的事件时有发生,已经成为城市土地开发利用中的环境隐患,大、中、小城市人居环境安全问题令人担忧。

(3) 矿区及油田周边土壤污染

长期大规模的开采与冶炼对我国矿山周边土壤环境造成了多种重金属的严重复合污染。根据《调查公报》显示,在调查的 70 个矿区的 1672 个土壤点位中,超标点位占 33.4%,主要污染物为镉、铅、砷和多环芳烃。有色金属矿区周边土壤镉、砷、铅等污染较为严重;在调查的 13 个采油区的 494 个土壤点位中,超标点位占 23.6%,主要污染物为石油烃和多环芳烃。全国每年工业固体废弃物排放量中 85%以上来自矿山开采,现有固体废矿渣积存量达 60 亿~70 亿 t;煤矿废水每年达 26 亿 t;废气达 1700 亿 m^3 ,导致土壤高背景和叠加性污染突出。如以有色金属矿开发为主的湘江流域沿岸土壤,出现了多种重金属复合污染,其总超标率高达 51.5%。我国油田区内有污染场地 20 余万处,呈现点、片、面交叉的污染态势,污染面积约 20 万 km^2 ,高浓度石油污染土壤及油泥沙积存量逾 200 万 t,对土壤、地下水和人体健康造成了极大威胁,同时,也威胁到以地下水为饮用水源的地区、集中式饮用水水源保护区、自然保护区等地土壤环境质量,影响饮用水源地安全。最近的研究显示,矿区及油田复合污染严重影响到土壤生物多样性,已经导致一些土壤微生物和动物种群的衰减甚至消失,危及土壤生态系统安全。

(4) 区域化及流域化土壤污染

近 30 年来,随着社会经济的高速发展和高强度的人类活动,我国因污染退化的土壤数量日益增加、范围不断扩大,污染物种类在扩展,土壤质量恶化加剧,危害更加严重,已经影响到区域经济可持续发展(章海波和骆永明,2011)。据调查结果显示,我国流域性和区域性土壤地球化学异常或污染规模较大。长江流域、珠江流域、湘江流域、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、汞为辅的流域性、区域性异常;黄河流域高氟、高砷、低碘现象异常显著;全国大、中、小城市土壤普遍出

现汞异常。经初步分析,这些流域性地球化学异常具有自然地球化学高背景值与人为污染相互叠加的显著特征,在流域性重金属异常或污染区内,部分地区重大地球化学灾害和污染隐患突出,土壤地球化学状况恶化趋势加速。2000年以来,国土资源部在我国东部的广东地区(珠江三角洲)、中部的武汉地区(江汉平原)和西部的成都平原地区开展的生态地球化学调查显示,这些地区均出现了大面积汞、镉、砷等有害元素高异常区,污染面积比20年前有所扩大。因此,如何防控与整治区域或流域土壤污染退化,确保我国土壤资源质量和环境安全的任务日趋艰巨。

总体上,土壤污染具有:①隐蔽性和潜伏性,土壤污染不像大气和水体污染那样易为人们所察觉;②不可逆性和长期性,土壤一旦遭到污染,污染物难以移动,极难去除;③后果严重性,土壤污染不仅可使粮食减产和农产品、食物链污染,而且可污染空气和饮用水进而危及人体健康等;④修复的艰难性,土壤污染修复需要专门材料、技术和设备,常常需要漫长的时间和巨大的资金。一份的预防胜过千份的修复,要以预防为主。伴随着社会经济的快速发展,我国一些地区土壤的污染物已表现出多源、复合、量大、面广、持久、毒害的污染特征;一些具有内分泌干扰作用的微量有机污染物还表现出持久性、生物积累性、毒性和半挥发性的“四性”特征;持久性有毒污染物的土壤污染具有明显的局域严重、剖面迁移、动态积累、复合或混合共存等特性。

1.1.2 我国土壤污染来源及其成因剖析

(1) 工矿企业粗放式增长,污水、尾矿渣和粉尘污染排放增加

产业结构不合理,涉及重金属污染的行业经济增长方式粗放。工业产值中污染较重的制造业和重化工业的比重大,产业层次低。煤炭、有色及黑色金属的矿采选业等行业污水、尾矿渣和粉尘污染排放量大;尾矿库量大且管理无序,其中危库、险库、病库占12.4%,对周围土壤和水环境污染严重。污水灌溉面积不断扩大,从1979年的30余万公顷增加到2011年的400万 hm^2 (方玉东,2011),一些污灌区土壤镉超标近100倍,同时还存在多环芳烃、石油烃等有机毒害复合污染。

(2) 农药、肥料和农用地膜等化学产品的长期大量使用

农用化学物质的高强度投入是造成农田和菜地土壤污染的重要原因。我国化肥用量占世界总量的21.6%,有17个省的平均施用量超过了国际公认的上限 $225\text{kg}/\text{hm}^2$,有4个省达到了 $400\text{kg}/\text{hm}^2$ 。我国农药使用量高出发达国家一倍。磷肥中镉含量可高达 $174\text{mg}/\text{kg}$,部分有机肥中镉含量也可高达 $1\text{mg}/\text{kg}$ 以上,长期施用将导致耕地土壤中重金属的积累。此外,农膜中具有内分泌干扰效应的增塑剂、有机肥中的抗生素等新型污染问题也已凸显。

(3) 区域地球化学异常及污染迁移扩散

我国西南地区的大片石灰岩成土母质发育土壤中有较高含量的镉等重金属,是重金属的地球化学异常区。同时,这些地区生态破坏严重,土壤受侵蚀程度高,土壤中重金属通过河流运输扩散可形成流域性污染,直接污染下游农田土壤。也有一些矿藏集中分布的地区由于不合理的开发活动,使点状污染扩散,形成局域性污染,进而演化成流域性污染。