

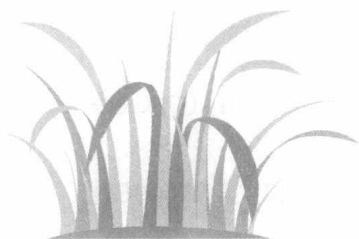
# 水土修复技术

温泉 宋俊德 贾威 著



吉林大学出版社

非外借



# 水土修复技术

温 泉 宋俊德 贾 威 著

图书在版编目 (CIP)数据

水土修复技术 / 温泉, 宋俊德, 贾威著. — 长春:  
吉林大学出版社, 2017.10  
ISBN 978-7-5692-1291-4

I. ①水… II. ①温…②宋…③贾… III. ①水土保持—生态恢复 IV. ①X171.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 285096 号

书 名: 水土修复技术  
SHUITU XIUFU JISHU

---

作 者: 温 泉 宋俊德 贾 威 著

策划编辑: 邵宇彤

责任编辑: 邵宇彤

责任校对: 李潇潇

装帧设计: 优盛文化

出版发行: 吉林大学出版社

社 址: 长春市朝阳区明德路 501 号

邮政编码: 130021

发行电话: 0431-89580028/29/21

网 址: <http://www.jlup.com.cn>

电子邮箱: [jdcbs@jlu.edu.cn](mailto:jdcbs@jlu.edu.cn)

印 刷: 北京一鑫印务有限责任公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 16.5

字 数: 316 千字

版 次: 2017 年 10 月第 1 版

印 次: 2017 年 10 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-5692-1291-4

定 价: 58.00 元

---

版权所有 翻印必究

# 前 言

我国环保部与国土资源部联合发布的“全国土壤污染状况调查报告”中显示,当前我国部分土壤污染极为严重,各类耕地土壤质量严重下降,工矿区废弃地土壤污染严重超标,全国土壤总的点位超标率达到了16.1%,因肥料滥用、农药污染等因素导致的耕地土壤点位超标率更是高达19.4%,耕地污染的面积达1.5亿亩。我国耕地整体质量本来就不高,1/3缺有机质,70%以上缺磷,20%左右缺钾。相比起来,我国耕地基础肥力对粮食产量的贡献率仅为50%,而欧美发达国家则为70%~80%。在此情况下,还有相当数量的耕地受到了中重度污染不宜耕种。据报道,全球每年释放的铜、镉、铅、锌重金属污染物分别达到93.90万吨、2.2万吨、78.30万吨和135.00万吨。治理土壤重金属污染是21世纪全球迫切需要解决的环境污染问题之一。

我国1995年制定了土壤环境质量标准,2015年1月,环境保护部公布了《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)的修订草案《农用地土壤环境质量标准》,2016年5月28日,国务院印发了《土壤污染防治行动计划》,简称《土十条》。2017年6月22日,《土壤污染防治法》(草案)首次提交全国人大常委会审议。《土十条》与《水十条》《大气十条》一样,作为国家对环境治理的具体行动计划与方案,其出台必定会推动土壤污染治理的进程。但是,我国的土壤污染问题十分复杂,进行治理应抱以科学审慎的态度。

土壤是一种复杂的、多相的高度不均匀的环境介质。污染物质通过大气、水体等途径污染土壤,土壤耕作又使重金属重新分布,最终在微观上的田块和宏观上的区域上土壤重金属污染呈现高度不均匀的特性。在治理土壤重金属污染方法中,常用的有客土法、施用石灰或者螯合剂、化学淋溶法等方法,这些方法在对污染土壤改良或者修复中虽具有一定的作用,但在实践中也往往都存在某些局限。

本书是在课题组多年的教学科研工作的基础上,经过修改、充实后撰写的。本书共分7章,分别为:第1章概述;第2章污染物的迁移过程;第3章污染物迁移的流体力学;第4章地下水污染修复;第5章土壤污染的修复;第6章

地表水修复技术；第7章修复效果检验和评价。第1、2、4、5、6主要由温泉撰写，第3、7章主要由宋俊德、贾威撰写。本书首先简单介绍土壤与水资源的基本特征、迁移及转化过程、修复效果检验和评价，并从流体力学角度对污染物迁移进行分析，重点解决了地下水污染、土壤污染、地表水污染的几种修复技术。

在本书撰写过程中，参考了大量文献、资料，也得到了辽宁工程勘察设计院（即辽宁天纵生态环境修复工程有限公司）的大力支持，在此一并感谢。

编者

2017年3月

# 目 录

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 第 1 章 | 概述                | 001 |
| 1.1   | 土壤与水资源的基本特征       | 002 |
| 1.1.1 | 土壤的基本特征           | 002 |
| 1.1.2 | 地下水的基本特征          | 003 |
| 1.1.3 | 陆地水资源的基本特征        | 004 |
| 1.1.4 | 土壤和水环境污染的基本特点     | 005 |
| 1.2   | 污染来源及分类           | 006 |
| 1.2.1 | 土壤污染              | 006 |
| 1.2.2 | 地下水污染             | 008 |
| 1.2.3 | 地表水污染             | 009 |
| 1.3   | 土壤与水污染状况          | 010 |
| 1.3.1 | 土壤污染              | 010 |
| 1.3.2 | 地下水污染             | 015 |
| 1.3.3 | 地表水污染             | 017 |
| 2.1.1 | 机械迁移              | 020 |
| 第 2 章 | 污染物的迁移过程          | 020 |
| 2.1   | 污染物的迁移方式          | 020 |
| 2.1.2 | 物理化学迁移            | 021 |
| 2.1.3 | 生物性迁移             | 022 |
| 2.2   | 污染物的转化过程          | 022 |
| 2.2.1 | 挥发与溶解             | 023 |
| 2.2.2 | 吸附与解吸             | 024 |
| 2.2.3 | 化学反应              | 031 |
| 2.2.4 | 生物作用              | 035 |
| 3.1.1 | 土壤、含水层及地下水        | 040 |
| 第 3 章 | 污染物迁移的流体力学        | 040 |
| 3.1   | 土壤和地下水中污染物迁移的流体力学 | 040 |
| 3.1.2 | 多孔介质              | 044 |

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 3.2.1 | 流体             | 046 |
| 3.2.2 | 渗流             | 046 |
| 3.2   | 多孔介质中流体的运动过程   | 046 |
| 3.2.3 | 流体流动的描述方法      | 047 |
| 3.3.1 | 对流迁移           | 048 |
| 3.3.2 | 扩散迁移           | 048 |
| 3.3.3 | 机械弥散           | 048 |
| 3.3   | 多孔介质中溶质的运移过程   | 048 |
| 3.3.4 | 水动力弥散          | 049 |
| 3.3.5 | 多孔介质中溶质运移的理想模型 | 049 |
| 第4章   | 地下水污染修复        | 051 |
| 4.1   | 地下水污染修复        | 051 |
| 4.1.1 | 地下水资源现状及污染状况   | 053 |
| 4.1.2 | 地下水污染修复技术      | 057 |
| 4.1.3 | 地下水污染修复技术发展趋势  | 061 |
| 4.2   | 典型地下水污染修复技术    | 062 |
| 4.2.1 | 原位曝气           | 062 |
| 4.2.2 | 原位生物修复技术       | 067 |
| 4.2.3 | 可渗透反应格栅        | 073 |
| 4.2.4 | 原位化学氧化技术       | 082 |
| 4.2.5 | 抽出-处理技术        | 089 |
| 4.2.6 | 自然衰减修复技术       | 091 |
| 4.2.7 | 水生植物修复技术       | 092 |
| 4.2.8 | 土壤、地下水联合修复技术   | 097 |
| 4.3   | 地下水污染防治对策      | 109 |
| 5.1.1 | 土壤背景值          | 110 |
| 5.1.2 | 土壤环境容量         | 110 |
| 第5章   | 土壤污染的修复        | 110 |
| 5.1   | 土壤污染修复         | 110 |
| 5.1.3 | 土壤修复技术         | 111 |
| 5.1.4 | 土壤修复发展趋势       | 112 |

|        |                        |     |
|--------|------------------------|-----|
| 5.2    | 物理化学修复法                | 113 |
| 5.2.1  | 土壤通风                   | 113 |
| 5.2.2  | 热解吸修复技术                | 122 |
| 5.2.3  | 热脱附技术                  | 125 |
| 5.2.4  | 土壤淋洗                   | 127 |
| 5.2.5  | 萃取修复技术                 | 132 |
| 5.2.6  | 原位化学氧化                 | 139 |
| 5.2.7  | 土壤固化 / 稳定化             | 144 |
| 5.2.8  | 土壤焚烧                   | 150 |
| 5.2.9  | 原位加热修复技术               | 151 |
| 5.2.10 | 电动修复技术                 | 152 |
| 5.2.11 | 客土法                    | 153 |
| 5.3    | 微生物修复法                 | 153 |
| 5.3.1  | 生物强化技术                 | 157 |
| 5.3.2  | 微生物共代谢作用               | 160 |
| 5.3.3  | 土壤耕作                   | 161 |
| 5.3.4  | 生物堆                    | 162 |
| 5.3.5  | 固定化微生物技术               | 166 |
| 5.3.6  | 生物刺激修复                 | 167 |
| 5.4    | 植物修复法                  | 168 |
| 5.4.1  | 植物修复基本概念               | 168 |
| 5.4.2  | 植物修复污染环境的基本原理          | 172 |
| 5.4.3  | 植物修复类型                 | 176 |
| 5.4.4  | 有机污染物的植物降解机理           | 180 |
| 5.4.5  | 植物修复优缺点                | 181 |
| 5.4.6  | 植物修复有机污染物的研究与应用        | 182 |
| 5.4.7  | 植物修复有机污染土壤在实际工程中应考虑的因素 | 182 |
| 5.4.8  | 植物修复技术的展望              | 184 |
| 5.4.9  | 生物修复                   | 184 |
| 5.4.10 | 渗透反应墙                  | 188 |
| 5.5    | 联合修复法                  | 190 |
| 5.6    | 工程控制                   | 191 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 第6章 地上修复技术 .....                         | 195 |
| 6.1 热处理技术 .....                          | 195 |
| 6.1.1 热氧化 .....                          | 195 |
| 6.1.2 催化氧化 .....                         | 198 |
| 6.1.3 其他热处理法 .....                       | 199 |
| 6.2 吸附处理法 .....                          | 199 |
| 6.2.1 活性炭吸附系统 .....                      | 200 |
| 6.2.2 沸石吸附系统 .....                       | 204 |
| 6.2.3 高分子吸附系统 .....                      | 205 |
| 6.2.4 吸附再生技术 .....                       | 205 |
| 6.3 生物处理法 .....                          | 206 |
| 6.3.1 生物法处理工艺 .....                      | 208 |
| 6.3.2 生物法降解动力学 .....                     | 209 |
| 6.3.3 生物法技术的存在问题与发展 .....                | 210 |
| 6.4 溶剂吸收法 .....                          | 210 |
| 6.4.1 吸收法工艺流程 .....                      | 211 |
| 6.4.2 吸收法工程化应用 .....                     | 212 |
| 6.5 其他分离方法 .....                         | 212 |
| 6.5.1 膜分离法 .....                         | 212 |
| 6.5.2 光解和光催化法 .....                      | 213 |
| 6.5.3 等离子法 .....                         | 214 |
| 6.5.4 压缩冷凝处理法 .....                      | 214 |
| 6.6 地表水系统修复技术 .....                      | 215 |
| 6.6.1 水资源生态修复理念及目标 .....                 | 216 |
| 6.6.2 城市河道底质改善技术 .....                   | 221 |
| 6.6.3 城市河道生态修复技术 .....                   | 222 |
| 6.6.4 城市河水强化处理技术 .....                   | 226 |
| 6.6.5 城市水体修复技术应用 .....                   | 227 |
| 6.7 矿山修复 .....                           | 228 |
| 6.7.1 传承自然：生态文化利用主导的矿山生态修复及旅游开发模式 .....  | 230 |
| 6.7.2 还原记忆——工业记忆复原主导的矿山生态修复及旅游开发模式 ..... | 231 |
| 6.7.3 诗意园林——休闲空间营造主导的矿山生态修复及旅游开发模式 ..... | 231 |



第 1 章

概述

自然环境修复是借助外界的作用力，使自然环境的某个受损的特定对象的部分或全部恢复成为原来初始的状态。修复包括恢复、重建、改建等三个方面的活动。恢复是指使部分受损的对象向原初状态发生改变；重建是指使完全丧失功能的对象恢复至原初水平；改建则是指使部分受损的对象进行改善，增加人类所期望的“人造”特点，减小人类不希望的自然特点。

自然环境修复技术包括物理方法、化学方法和生物方法等三大类。其中生物修复方法已成为环境保护技术的重要组成部分。生物修复是利用生物的生命代谢活动减少存于环境中有毒有害物质的浓度或使其完全无害化，使污染了的环境部分或完全恢复到原始状态的过程。生物修复是环境工程领域刚刚兴起的一门新技术，用一种或多种微生物来降解土壤中的有机毒物，如农药、石油烃类和有机磷、有机氯等，使这类物质变成无毒的或变成二氧化碳，这个过程国际上叫“生物修复工程”。目前已成功应用于土壤、地下水、河道和近海洋面的污染治理。

土壤和地下水污染治理的国际商业化程度不断增加，同时在各 国产生了一系列新的环境法规。20 世纪 90 年代后期，人们对土壤和地下水污染修复的认识逐步全面和成熟，人们在重视修复技术的同时，开始更多考虑现实的因素，如场地修复经费的来源、未来土地的利用方式等，同时对修复技术的认识也在改变。

表 1-1 全球土壤修复市场

| 国家或地区         | 污染场地数量   | 目前市场值                  | 未来潜在市场                    |
|---------------|----------|------------------------|---------------------------|
| 美国            | 500 000  | 120 亿美元，占全球<br>需求量 30% | 30 ~ 35 年后，估计达到 1 000 亿美元 |
| 加拿大           | 30 000   | 2.5 ~ 5 亿美元            | 10 年以内达到 35 亿美元           |
| 西欧国家          | >600 000 | 500 亿欧元                | 每年占 0.5% ~ 1.5% 的 GDP 消费量 |
| 澳大利亚          | 160 000  | 未评估                    | 未评估                       |
| 拉丁美洲和<br>非洲国家 | 未评估      | 97 亿美元                 | 预计每年增长 4.5% 左右            |

续表

| 国家或地区 | 污染场地数量            | 目前市场值       | 未来潜在市场          |
|-------|-------------------|-------------|-----------------|
| 英国    | 100 000           | 60 亿英镑      | 未评估             |
| 日本    | 500 000           | 12 亿美元      | 2010 年达到 30 亿美元 |
| 中国    | 300 000 ~ 600 000 | 30 ~ 60 亿美元 | 预计每年增长超过 8%     |

近几年来由于土壤污染日益严重，并已经威胁到地下水资源，给人类健康带来巨大隐患，因此我国开始重视土壤污染的调查与治理工作，但是与发达国家相比，对于土壤污染的治理和修复技术起步较晚。本书主要偏重土壤和地下水的修复治理技术。

## 1.1 土壤与水资源的基本特征

### 1.1.1 土壤的基本特征

土壤是土地资源的核心，是介于生物界和岩石圈之间的一个复杂的开放体系，是支持植物、动物和微生物生长和繁殖的疏松地表。土壤是由岩石风化而成的矿物质、动植物残体腐解产生的有机质、土壤生物（固相物质）以及水分（液相物质）、空气（气相物质）等组成，土壤中这三类物质构成了一个矛盾的统一体。它们互相联系，互相制约，为作物提供必需的生活条件，是土壤肥力的物质基础。土壤环境是一个复杂多变的、常带有人类活动痕迹的自然历史综合体，它具有以下基本特征：

（1）土壤作为生态系统的基本单元，具有土壤、水和植物的整体性。土壤是岩石圈最外面一层的疏松部分，能够提供植物生长所需的营养条件和环境条件，具有支持植物和微生物生长繁殖的能力，被称为土壤圈，其内部有生物栖息。土壤圈处于大气圈、岩石圈、水圈和生物圈之间的过渡地带，是联系有机界和无机界的中心环节。土壤是由固体、液体和气体三相共同组成的多相体系。因此表现出其他环境系统不可替代的功能：联系有机界和无机界的中心环节并同化外界输入的有机化合物，是整个生物圈极为重要的组成部分。土壤环境是与人类关系最密切的环境要素之一，同时也是人类社会赖以生存的重要自然资源。

（2）土壤中存在各种胶体体系和多孔体系，通过吸附 / 解吸、溶解 / 沉淀、络合 / 螯合、老化、离子交换以及过滤等过程，对营养物质或污染物质产生重要作用，从而起到营养支持作用或产生污染毒害 / 解毒效应。

（3）通过植物的吸收、积累效应，一方面使土壤环境中的污染物质得以下降，另



一方面使污染物能够转移到植物体内,然后以食物链的形式进入人体,从而危害人类健康。

(4) 土壤具有一定的自净能力,因此可以承载一定的污染负荷,具有一定环境容纳量。它的自净能力一方面与自身物化性质如土壤颗粒、有机物含量、温度、湿度、pH值、离子种类和含量等因素有关,另一方面还与土壤中微生物种类和数量有关。然而其自净能力是有限的,污染一旦超过土壤的最大容量,必然会引起不同程度的土壤污染。

土壤固相包括矿物质和有机质,其中矿物质约占土壤固体总重量的90%以上,而有机质约占固体总重量的1%~10%。可见土壤成分以矿物为主,此外还有土壤溶液,它是土壤水分及其所含溶解物质和悬浮物质的总称。土壤液相是指土壤中水分及其水溶物。土壤溶液是植物和微生物从土壤吸收营养物的媒介,也是污染物在土壤中迁移的主要途径。土壤中有无数孔隙充满空气,即土壤气相。典型土壤约有35%的体积是充满空气的孔隙,因而土壤具有疏松的结构。土壤中的化学品来自农药施用、大气干湿沉降、工业废水与废物排放、污水灌溉与污泥施用等。有机污染物进入土壤后,会与土壤成分相互作用,由于土壤是由多种组成的高度不均一性介质,所以污染物的赋存状态会发生很大变化与分化。这将导致污染物的流动性、生物有效性甚至化学反应活性都不同程度地降低,对其环境生态风险及修复效率都产生重大影响。

土壤中的固体颗粒的粒度级别或粒度组合称为土壤的机械组成,又称土壤质地。根据土壤机械组成可对土壤进行分类。我国土壤质地分为砂土、壤土和黏土三个级别。土壤质地是影响土壤肥力高低、可耕性好坏和污染物容量大小的基本因素之一。同时也是选择修复技术和方法时需要考虑的重要条件。

### 1.1.2 地下水的基本特征

地下水是储存于包气带以下地层空隙,包括岩石孔隙、裂隙和溶洞之中的水。地下水是地球内部及其外层空间水循环的产物,是地球系统中物质与能量循环的积极参与者,是一种具有资源、供水和生态等功能的重要环境要素。

#### 1. 地下水的分类

- (1) 按起源不同,可将地下水分为渗入水、凝结水、初生水和埋藏水;
- (2) 按矿化程度不同,可分为淡水、微咸水、咸水、盐水、卤水;
- (3) 按含水层性质分类,可分为孔隙水、裂隙水、岩溶水;
- (4) 按埋藏条件不同,可分为上层滞水、潜水、承压水。

#### 2. 地下水的特征

在一定的水文地质条件下,汇集于某一排泄区的全部水流,自成一个相对独立的地下水流系统,又称地下水流动系。处于同一水流系统的地下水,往往具有相同的补给来源,相互之间存在密切的水力联系,形成相对统一的整体;而属于不同地下水流系统的

地下水,则指向不同的排泄区,相互之间没有或只有极微弱的水系联系。此外,与地表水系相比较,地下水流系统具有如下的特征:

(1)空间上的立体性。地表上的江河水系基本上呈平面状态,而地下水流系统往往自地表面起可直指地下几百上千米深处,形成空间立体分布,并自上到下呈现多层次的结构,这是地下水流系统与地表水系的明显区别之一。

(2)流线组合的复杂性和不稳定性。地表上的江河水系,一般均由一条主流和若干等级的支流组合而成有规律的河网系统。而地下水流系统则是由众多的流线组合而成的复杂动态系统,在系统内部不仅难以区别主流和支流,而且具有多变性和不稳定性。这种不稳定性,可以表现为受气候和补给条件的影响呈现周期性变化;也可因为开采和人为排泄,促使地下水流系统发生剧烈变化,甚至在不同水流系统之间造成地下水劫夺现象。

(3)流动方向上的下降与上升的并存性。在重力作用下,地表江河水流总是自高处流向低处;然而地下水流方向在补给区表现为下降,但在排泄区则往往表现为上升,有的甚至形成喷泉。

### 1.1.3 陆地水资源的基本特征

陆地上的淡水资源储量只占地球上水体总量的 2.53%,其中固体冰川约占淡水总储量的 68.69%。主要分布在两极地区,人类在目前的技术水平下,还难以利用。液体形式的淡水水体,绝大部分是深层地下水,开采利用的也很小。目前人类比较容易利用的淡水资源,主要是河流水、淡水湖泊水以及浅层地下水,储量约占全球淡水总储量的 0.3%,只占全球总储水量的十万分之七。全世界真正有效利用的淡水资源每年约有 9 000 立方千米。世界各大洲的水资源分布如下:

从各大洲水资源的分布来看,年径流量亚洲最多,其次为南美洲、北美洲、非洲、欧洲、大洋洲。从人均径流量的角度看,全世界河流径流总量按人平均,每人约 10 000 立方米。在各大洲中,大洋洲人均径流量最多,其次为南美洲、北美洲、非洲、欧洲、亚洲。

我国水资源及其分布如下:

我国河流较多,流域面积在 1 000 平方千米以上的大河流共计 1 598 条,总长达 42 万千米,流域面积大约 667 万平方千米,地表径流 27 800 亿立方米,地下径流 6 000 亿立方米。全国水能蕴藏量  $6.8 \times 10^8 \text{ kW}$ ,占世界总量 13.5%,可开发水能蕴藏量  $3.78 \times 10^8 \text{ kW}$ ,占世界总量 16.8%。

我国水资源分布特点:年内分布集中,年间变化大;黄河、淮河、海河、辽河四流域水资源量小,长江、珠江、松花江流域水量大;西北内陆干旱区水量缺少,西南地区水量丰富。水资源总数多,人均占有量少,中国水资源总量居世界第四位。人均占有量



仅为世界平均值的 1/4, 约为日本的 1/2、美国的 1/4、俄罗斯的 1/12。水资源区域分布不相配, 全国水资源 80% 分布在长江流域及其以南地区, 人均水资源量 3 490 立方米, 亩均水资源量 4 300 立方米, 属于人多、地少、经济发达、水资源相对丰富的地区。长江流域以北广大地区的水资源量仅占全国 14.7%, 人均水资源量 770 立方米, 亩均约 471 立方米, 属于人多、地多, 经济相对发达、水资源短缺的地区, 其中黄淮海流域水资源短缺尤其突出。中国内陆地区水资源量只占全国的 4.8%, 生态环境不强, 开发利用水资源受到生态环境水的制约。

#### 1.1.4 土壤和水环境污染的基本特点

土壤环境的多介质、多界面、多组分以及非均一性和复杂多变的基本特点, 决定了土壤环境污染具有区别于大气环境污染和水体环境污染的特点。

##### 1. 隐蔽性和滞后性

大气污染、水污染和废弃物污染等问题一般都比较直观, 通过感官就能发现。而土壤污染则不同, 它往往要通过对土壤样品进行分析化验和农作物的残留检测, 甚至通过研究对人畜健康状况的影响才能确定。因此, 土壤污染从产生污染到出现问题通常会滞后较长的时间。

##### 2. 累积性和地域性

污染物质在大气和水体中, 一般都比在土壤中更容易迁移, 这使得污染物质在土壤中并不像在大气和水体中那样容易扩散和稀释, 因此容易在土壤中不断积累而超标, 同时也使土壤污染具有很强的地域性。

##### 3. 不可逆转性

大气和水体如果受到污染, 切断污染源后通过稀释作用 and 自净化作用就有可能使污染源不断减轻, 但是难降解污染物在土壤环境中很难靠稀释作用和自净化作用来消除。重金属对土壤的污染基本上是一个不可逆转的过程, 许多有机化学物质的污染也需要较长的时间才能降解, 被某些重金属污染的土壤可能要经过 100 到 200 年才能够恢复。

##### 4. 治理难而周期长

土壤污染一旦发生, 仅依靠切断污染源的方法往往很难恢复, 有时要靠换土、淋洗土壤等方法才能解决问题, 其他治理技术可能见效较慢。因此, 治理污染土壤通常成本较高、治理周期较长。

鉴于土壤污染难于治理, 而土壤污染问题的产生又具有明显的隐蔽性和滞后性等特点, 因此土壤污染问题一般都不太容易受到重视。

## 1.2 污染源及分类

### 1.2.1 土壤污染

#### 1. 土壤污染环境影响

土壤有机质是土壤的重要组成部分，其性质和含量是影响污染物生物有效性最主要的因素。大多数有机污染物都是非极性的，其吸附程度主要取决于土壤有机质的含量与性质，尤其是在有机质含量分数大于 1% 时。

土壤矿物也是土壤的重要组成部分，当土壤有机质含量低于 1% 时，其对土壤或沉积物的吸附和赋存状态可能起到重要作用。

随着工农业的发展，越来越多的活性炭、生物炭、碳纳米材料等碳质吸附剂进入土壤环境。由于上述碳质吸附剂具有较大的比表面积和孔体积，对有机污染物能够表现出很强的吸附能力，进入土壤后必然会改变土壤的性质，对有机污染物在土壤中的吸附/解吸及赋存状态产生影响，进而影响有机污染物的生物有效性。

溶解性有机质 (DOM) 主要指能够溶解于水、酸或碱溶液的有机质，它仅是一个操作定义：能通过 0.45 $\mu\text{m}$  的滤膜，具有不同结构和分子量的有机物，广泛存在于天然水体和土壤中。土壤 DOM 来源于凋落物和残根分解产物和土壤腐殖质。

表面活性剂是日常生活和工业生产中常见的化工产品，普遍存在于环境中。表面活性剂分子具有亲水和亲油两种基团，因而具有特殊的表面活性。表面活性剂的一个重要特征是，在一定浓度下能自发形成胶束。表面活性剂胶束中，疏水基团处于胶束的内部形成疏水性内核，从而提供相对较大的疏水环境，疏水性有机污染物分配其中，大大提高了在液相中的表观溶解度，这就是表面活性剂的增溶作用。根据亲水基团电荷性质的不同，通常将表面活性剂分类为阴离子型、阳离子型、两性型和非离子型。由于表面活性剂的表面活性、增溶能力及自身电荷性质，对环境中有有机污染物的溶解、吸附、挥发及生物有效性都有重要影响。土-水-表面活性剂体系中，表面活性剂不仅存在于水溶液中，也会吸附于土壤固相上。由于土壤表面呈现电负性，阳离子表面活性剂进入土壤后，主要聚集在土壤颗粒表面，形成类胶束结构，能够有效地分配溶液中的疏水性有机污染物，从而显著增强疏水性有机污染物在土壤固相上的吸附，降低其生物有效性，对土壤有机污染物的缓解有重要意义。

除了上述因素，土壤温度、湿度、pH 值等也会对土壤中污染物产生影响。

#### 2. 土壤污染来源

土壤的污染，一般是通过大气与水污染的转化而产生，它们可以单独起作用，也可以相互重叠和交叉进行，属于点污染的一类。随着农业现代化、工业水平的提高，大量



化学肥料、农药及化学品散落到环境中，土壤遭受非点污染的机会越来越多，其程度也越来越严重。在水土流失和风蚀作用等的影响下，污染面积不断地扩大。

根据污染物质的性质不同，土壤污染物分为无机物和有机物两类：无机物主要有汞、铬、铅、铜、锌等重金属和砷、硒等非金属；有机物主要有酚、有机农药、油类、苯并芘类和洗涤剂类等。以上这些化学污染物主要是由污水、废气、固体废物、农药和化肥带进土壤并积累起来。

(1) 污水灌溉。生活污水和工业废水中，含有氮、磷、钾等许多植物所需要的养分，所以合理地使用污水灌溉农田，一般有增产效果。但污水中还含有重金属、酚、氰化物等许多有毒有害的物质，如果污水没有经过必要的处理而直接用于农田灌溉，会将污水中有毒有害的物质带至农田污染土壤。例如，冶炼、电镀、燃料、汞化物等工业废水能引起镉、汞、铬、铜等重金属污染；石油化工、肥料、农药等工业废水会引起酚、三氯乙醛、农药等有机物的污染。

(2) 大气污染。大气中的有害气体主要是工业中排出的有毒废气，它的污染面大，会对土壤造成严重污染。工业废气的污染大致分为两类：气体污染，如二氧化硫、氟化物、臭氧、氮氧化物、碳氢化合物等；气溶胶污染，如粉尘、烟尘等固体粒子及烟雾、雾气等液体粒子，它们通过沉降或降水进入土壤，造成污染。例如，有色金属冶炼厂排出的废气中含有铬、铅、铜、镉等重金属，对附近的土壤造成污染；生产磷肥、氟化物的工厂会对附近的土壤造成粉尘污染和氟污染。

(3) 化肥。施用化肥是农业增产的重要措施，但不合理地使用也会引起土壤污染。长期大量使用氮肥，会破坏土壤结构，造成土壤板结，生物学性质恶化，影响农作物的产量和质量。过量地使用硝态氮肥，会使饲料作物含有过多的硝酸盐，妨碍牲畜体内氧的输送，使其患病，严重的导致死亡。

(4) 农药。农药能防治病、虫、草害，如果使用得当，可保证作物的增产。农药也是一类危害性很大的土壤污染物，施用不当会引起土壤污染。喷施于作物体上的农药粉剂、水剂、乳液等，除部分被植物吸收或逸入大气外，约有一半散落于农田。这一部分农药与直接施用于田间的农药（如拌种消毒剂、地下害虫熏蒸剂和杀虫剂等）构成农田土壤中农药的基本来源。农作物从土壤中吸收农药，在根、茎、叶、果实和种子中积累，通过食物、饲料危害人体和牲畜的健康。此外，农药在杀虫、防病的同时，也使有益于农业的微生物、昆虫、鸟类遭到伤害，破坏了生态系统，使农作物遭受间接损失。

(5) 固体废物。工业废物和城市垃圾是土壤的固体污染物。例如，各种农用塑料薄膜作为大棚、地膜覆盖物被广泛使用，如果管理、回收不善，大量残膜碎片散落田间，会造成农田“白色污染”。这样的固体污染物既不易蒸发、挥发，也不易被土壤微生物分解，是一种长期滞留于土壤的污染物。

(6) 工业场址污染。炼油厂、化工厂、钢铁厂、印染厂等工业场址产生大量废液、