

生态环境修复与节能技术丛书

污染土壤生物 修复原理与技术

李法云 吴龙华 范志平 等编著



**The Principle and Technology
for Bioremediation
of Contaminated Soil**



化学工业出版社

生态环境修复与节能技术丛书



污染土壤生物 修复原理与技术

李法云 吴龙华 范志平 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分 10 章, 论述了土壤的性质和环境容量、土壤污染与可持续利用、典型污染物在土壤环境中的化学行为及其生态效应、污染土壤微生物修复原理、植物修复原理、动物修复原理、生物修复工程技术、生物修复工程设计和项目管理以及生物修复技术工程应用案例。

本书强调理论联系实际, 从土壤环境功能与典型污染物的化学行为和生物修复原理(理论基础)、技术(工程技术与设计)以及应用(工程实例)三个方面进行了探讨, 在介绍基本原理和主要内容的基础上, 适当地反映了污染土壤生物修复领域最新研究成果和进展状况, 可供从事土壤污染控制与修复等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考, 也供高等学校相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

污染土壤生物修复原理与技术/李法云等编著.
北京: 化学工业出版社, 2016.5
(生态环境修复与节能技术丛书)
ISBN 978-7-122-26526-5

I. ①污… II. ①李… III. ①污染土壤-生态
恢复-研究 IV. ①X530.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 051511 号

责任编辑: 刘兴春 刘 婧
责任校对: 吴 静

文字编辑: 林 丹
装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京云浩印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 17½ 字数 411 千字 2016 年 12 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 85.00 元

版权所有 违者必究

《生态环境修复与节能技术丛书》 编委会

主 任：李法云

副 主 任：苏宏业 荣湘民 范志平

委 员 （以姓氏笔画为序）：

马 放 刘 强 刘学军 苏成利

苏宏业 李 平 李法云 吴龙华

余新晓 宋海星 范志平 罗 义

荣湘民 侯卫峰 曹江涛 彭建伟

学术指导：官春云

《污染土壤生物修复原理与技术》 编著人员

编著人员 （以姓氏笔画为序）

丁克强 王 科 王艳杰 王道涵 邢维芹

曲向荣 刘 强 孙小峰 李法云 吴龙华

范志平 荣湘民 铁柏清 郭 橙 涂志华

曾清如 薛南冬 魏小娜

前言

FOREWORD

土壤是人类赖以生存的物质基础,是人类不可缺少、不可再生的自然资源,也是人类环境的重要组成部分。土壤污染对人类的危害性极大,它不仅直接导致粮食的减产,而且通过食物链影响人体健康。此外,土壤中的污染物通过地下水的污染以及污染物的转移构成对人类生存环境多个层面上的不良胁迫和危害。

20 世纪 60 年代,从发达国家如荷兰、美国,因为化学废弃物的倾倒导致严重的土壤污染开始至今,土壤污染问题已遍及世界五大洲,主要集中在欧洲,其次是亚洲和美洲。在中国,随着工农业生产和乡镇企业及农村城镇化的迅速发展,土壤环境污染问题已越来越严重! 中国国家环境保护部和国土资源部于 2014 年 5 月联合发布的《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,土壤污染总的超标率为 16.1%,其中耕地的超标率达到 19.4%,总体上以无机污染为主,无机污染物超标点位数占全部超标点位的 82.8%。其中,城市和工业场地污染严重,重金属矿区问题突出,尤以土壤重金属镉污染问题最为突出。此外,区域性和流域性污染态势恶化,高强度人为活动地区的土壤环境复合污染问题尤为严峻。土壤环境质量直接关系到农产品的安全。中国由于土壤污染每年生产的重金属污染粮食多达 1.2×10^7 t; 全国出产的主要农产品中,农药残留超标率高达 16%~20%,PAHs 超标率高达 20% 以上。在许多重点地区,土壤及地下水污染已经导致癌症等疾病的发病率和死亡率明显高于没有污染的对照区数倍到十多倍。土壤污染已成为限制中国农产品国际贸易和社会经济可持续发展的重大障碍之一,污染土壤迫切需要修复与治理。2016 年 5 月,国务院正式颁布《土壤污染防治行动计划(国发[2016]31 号)》,这是中国土壤修复事业发展的重要里程碑。

污染土壤生物修复是当今环境保护领域技术发展的热点领域,也是最具挑战的研究方向之一。目前,中国的生物修复处于刚刚起步阶段。在过去的十几年中,研究主要是跟踪国际生物修复技术的发展。随着人们对土壤污染治理要求的提高,国家各项法律与制度的日臻完善,国家和企业对污染治理投入的增加,估计在今后的 10~30 年内,中国生物修复技术研究水平将会有很大的提高,并能在实际生产中得到广泛的应用。

考虑到不同知识背景读者的需要,本书从土壤的性质、质量和典型土壤污染物的化学行为及生态效应的基本知识入手,介绍了污染土壤微生物修复、植物修复和动物修复的基本原理,生物修复工程技术、工程设计和项目管理以及生物修复技术工程应用案例,以使读者对污染土壤生物修复的原理、发展和技术应用有较为明晰和透彻的了解。本书是在国家自然科学基金项目(41571464、30570342、29807002)与辽宁省高等学校优秀人才支持计划(A 类)部分研究成果的基础上,参考了大量的国内外文献,并注意适当反映污染土壤生物修复的最新进展。在写作过程

中，引用了参考文献的部分图表和实例资料，在此对所有作者表示感谢。

本书主要由李法云、吴龙华、范志平编著。具体分工如下：第1章由李法云、魏小娜、范志平、王道涵编著；第2章、第3章、第4章由曲向荣、李法云、魏小娜编著；第5章由薛南冬、李法云编著；第6章由吴龙华、孙小峰、王科、李法云编著；第7章由李法云、王道涵、范志平、王艳杰编著；第8章由吴龙华、丁克强、邢维芹、李法云编著；第9章由曾清如、刘强、荣湘民、李法云、魏小娜编著；第10章由铁柏清、吴龙华、李法云、孙小峰、魏小娜、郭橙、涂志华编著。书中图由李法云绘制，全书最后由李法云、魏小娜统稿。

本书在编著过程中，得到辽宁石油化工大学生态环境研究院、土壤肥料资源高效利用国家工程实验室（湖南农业大学）、中国科学院南京土壤研究所、石油化工过程运行优化与节能技术国家地方联合工程实验室、北京林业大学、哈尔滨工业大学、辽宁大学、中国科学院生态环境研究中心、沈阳工业大学、辽宁工程技术大学等单位有关领导和专家的指导和帮助。在出版过程中，得到了化学工业出版社的大力协作与支持，在此一并谢忱。

限于编著者水平和学识，书中难免有欠缺和不妥之处，我们殷切希望广大读者和有关专家对本书提出批评指正，在此表示诚挚的谢意。

编著者

2016年6月

目录

CONTENTS

第1章 绪论

1

1.1 土壤污染现状与修复的紧迫性	1
1.2 生物修复的概念	3
1.3 生物修复工程技术体系	4
1.3.1 微生物修复技术	4
1.3.2 植物修复技术	5
1.3.3 生物联合修复技术	5
1.4 生物修复研究进展	7
参考文献	9

第一篇 土壤环境的性质、质量与典型污染物

第2章 土壤的性质和环境容量

11

2.1 土壤环境的物质组成与结构	11
2.1.1 土壤环境的物质组成	11
2.1.2 土壤结构与土壤环境结构	13
2.2 土壤的性质	14
2.2.1 土壤的吸附性	14
2.2.2 土壤的酸碱性	17
2.2.3 络合-螯合性	19
2.2.4 土壤环境中的氧化还原性	20
2.2.5 土壤微生物功能及其环境效应	21
2.2.6 土壤动物种类及其环境效应	25
2.3 土壤环境背景值	26
2.3.1 土壤环境背景值概述	26

2.3.2 土壤环境背景值的应用	29
2.4 土壤环境容量	33
2.4.1 土壤环境容量的概念	33
2.4.2 土壤环境容量的应用	36
2.5 环境污染对人体健康的危害	39
2.5.1 急性危害	39
2.5.2 慢性危害	41
2.5.3 远期危害	41
参考文献	43

第3章 土壤污染与可持续利用

45

3.1 土壤污染的产生	45
3.1.1 土壤污染物的种类	45
3.1.2 污染物进入土壤的途径	47
3.1.3 土壤污染的发生因素	47
3.1.4 土壤污染的影响和危害	49
3.2 土壤环境质量标准	50
3.2.1 土壤质量的定义与关键科学问题	50
3.2.2 中国土壤环境质量分类和标准分级	51
3.3 国内外土壤污染防治与修复相关法规	52
3.3.1 美国	52
3.3.2 英国	54
3.3.3 荷兰	54
3.3.4 加拿大	55
3.3.5 瑞典	55
3.3.6 新西兰	58
3.3.7 日本	60
3.3.8 中国	61
3.4 土壤资源的可持续利用	62
3.4.1 土壤污染现状及引发的社会问题	63
3.4.2 土壤资源可持续利用的内涵	65
3.4.3 土壤资源可持续利用存在的障碍	66
3.4.4 实现土壤可持续利用的途径	68
3.4.5 加强土壤资源质量管理	69
参考文献	71

第4章 污染物在土壤环境中的化学行为及其生态效应

73

4.1 重金属在土壤中的化学行为及其生态效应	73
------------------------------	----

4.1.1	土壤重金属来源及其危害	73
4.1.2	土壤理化性质与重金属的关系	73
4.1.3	重金属在土壤中的化学行为	75
4.1.4	土壤环境重金属污染的特征	78
4.1.5	土壤中重金属的生态效应	79
4.1.6	有毒重金属在土壤中的迁移转化及其危害	81
4.2	土壤中有机污染物的化学行为及其生态效应	82
4.2.1	有机污染物在土壤中迁移转化	83
4.2.2	土壤中有机污染物的化学行为	84
4.2.3	典型有机污染物在土壤中的化学行为及其生态效应	86
4.3	重金属复合污染	112
4.3.1	土壤中重金属的种类和形态	112
4.3.2	重金属复合污染的表征	112
4.3.3	重金属复合污染的生态效应	115
4.3.4	重金属之间的联合作用	117
4.3.5	交互作用的影响因素	119
4.4	有机污染物-重金属复合污染	120
4.4.1	有机污染物-重金属复合污染研究的重要性	120
4.4.2	有机污染物-重金属在土壤中交互作用的形式及其特点	120
	参考文献	122

第二篇 生物修复的原理

第5章 有机污染物微生物修复

126

5.1	有机污染物微生物降解概述	126
5.1.1	微生物摄取有机污染物的方式	126
5.1.2	微生物降解有机污染物的途径	127
5.1.3	共代谢	128
5.1.4	有机污染物的化学结构对微生物降解的影响	130
5.1.5	有机污染物微生物降解的条件	134
5.2	石油污染物的微生物降解	138
5.2.1	石油污染物的微生物降解过程	139
5.2.2	石油类物质在土壤中微生物降解的影响因素	141
5.2.3	微生物降解在修复石油污染土壤上的应用	142
5.3	农药的微生物降解	143
5.3.1	降解农药的微生物	144
5.3.2	农药污染土壤的微生物修复	145
5.4	多氯联苯的微生物降解	146

5.4.1	多氯联苯的处理方法	146
5.4.2	多氯联苯的微生物降解	149
5.5	三氯乙烯的微生物降解	150
5.5.1	氯代烃污染与微生物降解	150
5.5.2	三氯乙烯的微生物降解作用	150
5.6	多环芳烃类化合物的微生物降解	153
5.6.1	多环芳烃在环境中的微生物降解	153
5.6.2	多环芳烃污染土壤的微生物修复	155
5.7	五氯酚的微生物降解	156
	参考文献	158

第6章 植物修复原理

161

6.1	有机污染物植物修复原理	162
6.1.1	植物对有机物的吸收积累和代谢	162
6.1.2	根际对有机污染物降解的影响	163
6.2	重金属污染土壤植物修复原理	163
6.2.1	重金属污染土壤植物修复	163
6.2.2	植物积累重金属的分子生物学机理	165
6.3	重金属超积累植物	166
6.3.1	超积累植物特征	166
6.3.2	超积累植物的来源和分布现状	166
6.3.3	超积累植物的局限性	169
6.3.4	超积累植物研究展望	169
6.4	环境条件对植物修复的影响	169
6.4.1	气候因子	170
6.4.2	土壤因子	170
	参考文献	172

第7章 动物修复原理

174

7.1	土壤动物的生物指示作用	174
7.1.1	土壤动物的类型及作用	174
7.1.2	土壤动物的生物指示作用	175
7.2	污染物对土壤动物的生态毒理作用	176
7.3	蚯蚓对污染土壤修复的原理	178
7.3.1	蚯蚓对土壤物理性质及过程的调节	178
7.3.2	蚯蚓对土壤化学性质及过程的调节	178
7.3.3	蚯蚓对土壤生物学性质及过程的调节	179

参考文献	180
------------	-----

第三篇 生物修复工程技术

第8章	生物修复工程技术	182
------------	-----------------	------------

8.1	概述	182
8.1.1	生物修复的特点	182
8.1.2	生物修复的方法	183
8.1.3	生物修复的可行性	187
8.1.4	植物修复过程中修复植物的处置	188
8.2	微生物修复工程技术	189
8.2.1	堆积法	189
8.2.2	生物反应器	195
8.3	植物修复工程技术	201
8.3.1	植物提取修复	201
8.3.2	植物挥发修复	201
8.3.3	植物稳定修复	202
8.3.4	植物代谢修复	202
8.4	联合修复工程技术	203
8.4.1	污染物的根际修复	203
8.4.2	污染物的微生物-电动修复	204
8.4.3	污染物的化学/物化-生物联合修复	205
	参考文献	206

第9章	生物修复工程设计	210
------------	-----------------	------------

9.1	场地特点	211
9.1.1	土壤中的污染物	211
9.1.2	土壤中的微生物	212
9.1.3	土壤特性	212
9.1.4	土壤的水文、地理、气象、空间等特征和条件	212
9.1.5	有关法律法规	213
9.2	选择修复技术路线	213
9.3	修复可行性研究	213
9.3.1	可行性研究的总体目标	213
9.3.2	实验设计	214
9.3.3	实验方法	217
9.4	设计的修改	218

9.5 工程设计 219

9.5.1 原位生物修复的工程设计 219

9.5.2 异位生物修复设计 224

9.6 污染场地评估技术 226

9.6.1 污染场地环境风险评估 226

9.6.2 污染场地修复效果评估 228

9.6.3 生物修复项目的评价和综合管理 228

参考文献 229

第四篇 生物修复工程应用

第10章 生物修复技术的实际应用 231

10.1 石油污染土壤和地下水的原位生物修复 231

10.1.1 石油污染物降解的影响因素 232

10.1.2 石油污染土壤和地下水原位生物修复方法及其应用实例 233

10.2 含氯有机溶剂的自然生物修复 255

10.3 土壤中有有机污染物的植物修复 256

10.3.1 有机污染物植物修复的定义及其类型 256

10.3.2 有机污染物植物修复应用实例 256

10.4 重金属污染土壤的植物修复 257

10.4.1 重金属污染土壤植物修复的定义及其类型 257

10.4.2 重金属污染土壤植物修复应用实例 258

参考文献 259

土壤是人类赖以生存的物质基础，是不可再生的自然资源，也是人类环境的重要组成部分。土壤污染对人类的危害性极大，不仅直接导致粮食的减产，而且通过食物链影响人体健康。此外，土壤中的污染物通过地下水的污染以及污染物的转移构成对人类生存环境多个层面上的不良胁迫和危害。正确认识土壤环境，有利于加强污染防治与修复，持续提高土壤质量，改善土壤生态系统功能，为人类社会的生存提供健康的土壤环境。

1.1 土壤污染现状与修复的紧迫性

土壤与人类生产和生命活动联系紧密，其中的污染物多种多样，污染源的分布也相当广泛。在农业生产方面，人口的压力促使人们片面追求农业高产、稳产，因而越来越依赖于化肥和农药的使用，化肥和农药的过量使用造成土壤中农药和无机盐积累，并进一步污染地下水。同时，农业生产活动也导致土壤中微生物群落结构的失衡，一些不良微生物成为群落中的优势种群，形成地域性的生物污染。

工业生产所引起的环境污染则更为严重，人们一方面通过采矿、冶炼、化工提纯等技术使本来在环境中呈分散、低浓度存在的物质如重金属、放射性元素及天然有机化学品得以浓缩和富集于局部陆地生态环境；另一方面还通过合成工业生产更多的对于自然界来说相对陌生的物质，如 DDT、狄氏剂、艾氏剂等，这些污染物浓度大大超过了区域陆地生态系统原有的自净能力。

人类的日常生活也向陆地生态系统中排放了大量的废弃物。生活污水的排放携带大量的动植物油类、洗涤剂及 N、P 等营养物质；垃圾堆放将人们生活中产生的大量合成塑料、建筑废料等排入系统，其掩埋和焚烧等处理措施产生二次污染的可能性也令人担忧。

土壤作为自然体和环境介质，是陆地生态系统的重要组成部分，是进入系统的污染物质的主要载体，具有一定的环境容纳能力和净化功能。但当如此庞大的有害、有毒物质进入陆地生态系统时，势必会超出其环境容量，改变系统结构，导致系统失衡。特别是大量的工农业生产和生活产生的污染物质可以直接或间接通过土壤介质对陆地生态系统中的动植物造成短期或长期的毒害作用。

20 世纪 60 年代，从发达国家如荷兰、美国，因为化学废弃物的倾倒导致严重的土壤污染开始至今，土壤污染问题已遍及世界五大洲，主要集中在欧洲，其次是亚洲和美洲。在中国，随着工农业生产的发展，土壤环境污染问题已经非常突出。2014 年《中国环境状况公报》公布，截至 2013 年年底，中国共有耕地约 $1.352 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，其中近 1/5 的耕地遭到污

染,其中仅 Cd 污染耕地就涉及 11 个省 25 个地区;中国耕地面积不足全世界的 10%,却使用了全世界近 40%的化肥,且化肥当季利用率只有 33%左右,普遍低于发达国家 50%的水平;同时,中国也是世界农药生产和使用第一大国,单位面积农药施用量是世界平均水平的 2.5 倍,但有效利用率只有 35%左右;每年地膜使用量约 1.3×10^6 t,超过其他国家的总和。土壤污染已经危及中国 18 亿亩的耕地红线。另外,矿区土壤污染及城市棕色地块(工业搬迁后留下的未经修复的土地)污染也不容忽视。2010 年发布的《中国污染场地的修复与再开发的现状分析》认为,中国工业企业搬迁遗留的场地中有将近 1/5 存在较严重污染。2014 年《全国土壤污染状况调查公报》对 690 家重污染企业用地及周边的 5846 个土壤点位进行调查,超标点位占 36.3%;对 81 块工业废弃地的 775 个土壤点位进行调查,超标点位占 34.9%,主要污染物为锌、汞、铅、铬、砷和多环芳烃;对 70 个矿区 1672 个土壤点位进行调查,超标点位达 33.4%。在各类环境要素中,土壤是污染物的最终受体,工业“三废”排放、各种农用化学品使用、城市污染向农村转移,污染物通过大气、水体进入土壤,重金属和难降解有机污染物在土壤中长期累积,致使局部地区土壤污染负荷不断加大。

与水体与大气环境相比,土壤从受到污染到产生不良后果是一个逐步积累的过程,通常土壤将有害物质输送给农作物,再通过食物链损害人畜健康,但土壤本身可能还会继续保持其生产能力,只有在土壤农作物以及摄食的人或动物的健康状况出现问题时土壤污染才能反映出来。所以土壤污染后可能需要相当长的时间才能被发现。例如历史上著名的土壤污染公害事件——日本痛痛病(Itaiitai disease),从土壤受到污染到最后基本确定为镉污染土壤所生产的镉米所致,前后经历了十几年的时间。因此,土壤污染具有一定的隐蔽性和潜伏性。其次,土壤一旦受到污染,其恢复过程极其困难。例如重金属元素对土壤的污染就是一个不可逆的过程,因为重金属一旦进入土壤不可能通过降解过程而消失,只能从一个位置迁移到另一个位置。许多有机化学物质的污染也需要一个比较长的时间才能降解完全。尤其是持久性有机污染物不仅很难被降解,而且可能产生毒性较大的中间产物。例如,六六六和 DDT 在中国已禁用 20 多年,但至今仍然能从土壤环境中检出,就是由于其中的有机氯非常难于降解且其具有与不可逆性。20 世纪 60~70 年代,中国东北沈抚灌区由于污水灌溉引起的石油、酚类污染以及后来的张士灌区的镉污染,造成大面积土壤受到污染,引起了水稻矮化、生产的稻米有异味、含镉量超标等问题。经过十多年的努力,付出了巨大的代价,包括施用改良剂、深翻、清洗、在污染土壤上覆盖清洁土壤等各种措施,才逐步恢复其部分生产力。

一方面,土壤是一个复杂的物理、化学与生物的复合环境介质,污染物质进入土壤后被土壤吸附固定,聚集于土壤中。特别是重金属和放射性元素都能与土壤有机质或矿物质结合,并且长久的保存在土壤中,无论它们如何转化也很难重新离开土壤。另外,污染物在土壤环境中不像在水体大气中那样容易迁移、扩散和稀释,尤其是难降解污染物很难靠稀释作用和自净化作用来消除,因此容易在土壤中不断积累而达到很高的浓度。由于土壤污染的潜伏性特点,所以往往通过食物链危害人群及动物的健康,这一过程不易被人发觉,一旦发现就是比较严重的污染事故。例如近十几年在多个省份发生的三氯乙醛污染就是一个比较典型的事例。该事故是施用了含三氯乙醛的磷肥引起的,影响范围涉及山东、河南、河北等十多个省份万亩以上的农田,轻则减产,重则绝收,给农业生产带来惨重损失。另一方面,农田系统中输出的大量营养物质形成了对水域富营养化的严重威胁,仅化肥氮的淋洗和径流损失每年就约 1.74×10^6 t,长江、黄河和珠江每年输出的溶解态无机氮达 9.75×10^5 t,成为近

海赤潮的主要污染源。土壤环境的污染还会形成对人体健康的直接威胁,在北京、沈阳、广州、天津、南京、兰州和上海等许多地区,土壤及地下水污染已经导致癌症等疾病的发病率和死亡率明显高于没有污染的对照区数倍到10多倍。由于污染,土壤的营养功能、净化功能、缓冲功能和有机体的支持功能正在丧失,作物的产量和品质也因此受到严重影响。

土壤污染危害深远,关乎国民生计和国家安全,目前许多地区土壤污染已大大超出土壤的自净能力,如果不进行及时治理,即使经历千百年土壤也无法自净。2008年以来,中国重大污染事故频繁发生,其中仅重金属污染事故就达30多起。污染事故不仅增加了环境治理成本,也不利于社会的稳定,而土壤一旦受到污染,其修复所需的费用更是天价。如常州农药厂土壤修复估算约需2亿元,无锡胡埭电镀厂重金属铬污染修复费用890万元,苏州化工厂土壤污染修复需数亿至数十亿元。在相关的污染法规建设方面,中国已有50余部关于环境污染的法规,“大气十条”和“水十条”也已相继出台。2014年3月国家环境保护部常务会议审议通过了《土壤污染防治行动计划》,即“土十条”,中国将治理土壤污染确定为向污染宣战的三大行动计划之一。2016年5月,国务院正式颁布《土壤污染防治行动计划》(国发[2016]31号),这对推动我国土壤修复事业的发展与土壤资源安全利用具有重要的历史意义。

面对严峻的土壤污染状况,在国家相关政策的激励下,土壤修复产业必将会蓬勃发展。可见,无论从农业生产所面临的现实问题,还是从中国社会经济发展和国家安全的内在需求的角度来看,土壤环境污染问题已成为限制中国社会经济可持续发展的重大障碍之一。因此,作为人均耕地小国和农业大国的中国,研究解决土壤污染问题势在必行,迫切需要进行土壤污染的防治工作以及对污染土壤进行修复,恢复其生产能力,改善其环境功能。修复污染土壤,对于阻断污染物进入食物链,防止对人体健康造成危害,促进土地资源的保护与可持续发展具有重要现实意义。

1.2 生物修复的概念

生物修复主要是指依靠生物(特别是微生物)的活动使土壤或地下水中的污染物降解或转化为无毒或低毒物质的过程。主要是利用土壤中特定的微生物、根系分泌物、菌根和超富集植物等降解或吸收积累土壤污染物,实现污染土壤修复的目的。狭义的生物修复单指利用微生物降解与转化机制来治理污染物,植物修复技术的发展极大地丰富了生物修复内涵。因此,广义的生物修复包括微生物修复和植物修复两部分,有时也包括土壤动物修复。

微生物修复技术也称为环境生物技术,主要通过生物技术对人为造成的环境污染进行治疗、恢复、纠正和修补,包括微生物的处理方法和过程。微生物能利用污染物作为碳源和能源,从而达到对污染物的分解和矿化的目的;遗传学和分子生物学的方法能改善微生物的降解能力;通过实验科学手段,创造微生物生长的良好环境条件,通过强化使生物修复技术有效地消除污染,净化环境,使已被破坏的生态平衡重新加以恢复。

植物修复技术主要是利用植物本身特有的吸收能力富集污染物、转化固定污染物以及通过氧化-还原或水解反应等生态化学过程,使土壤环境中的有机污染物得以降解,使重金属等无机污染物被固定脱毒;与此同时,还利用植物根际特殊的生态条件加速土壤微生物生长,显著提高根际微环境中微生物的生物量和潜能,从而提高对土壤有机污染物的分解作用。此外,利用某些植物特殊的积累与固定能力可去除土壤中某些无机污染物。

1.3 生物修复工程技术体系

1.3.1 微生物修复技术

根据处置位置的不同,微生物修复技术可以分为异位生物修复和原位生物修复两大类。

1.3.1.1 异位生物修复

异位生物修复是将土壤挖出,在场外或运至场外的专门场地处理的方法。该技术主要有固相处理和生物反应器法等类型。

(1) 固相处理

固相处理包括土壤耕作法、制备床法、堆腐法和土地填埋法。土壤耕作法是通过施肥、灌溉和耕作来增加土壤中的营养物质和氧气,提高微生物活性,加快其对有机污染物的降解。制备床法是将污染土壤移入特殊的制备床上,在人为控制条件下保持最佳的微生物降解状态,达到修复效果。堆腐法是制备床法的一种形式,它是利用好氧高温微生物处理高浓度的固体废弃物的一个特殊过程。土地填埋法是将污泥施入土壤中,通过施肥、灌溉等保持最佳营养和环境条件,使污染物在土壤表层得以好氧降解。

(2) 生物反应器法

生物反应器法是将污染土壤从污染地点挖出来放到一个特殊的反应器中处理的方法。土壤通常加水处理,生物修复条件在反应器中得到加强,整个处理过程中反应条件得到严格控制,处理效果十分理想。

1.3.1.2 原位生物修复

原位生物修复一般主要集中于对亚表层土壤生态条件进行优化,尤其是通过调节加入的无机营养或可能限制其反应速率的氧气的供给,促进土著微生物或外加特异微生物对污染物质进行最大程度的生物降解。原位生物修复主要有以下3种方式。

(1) 生物通风法

生物通风法是在不饱和土壤中压入空气,以增强空气在土壤中及大气与土壤之间的流动,为微生物活动提供充足的氧气。同时,还通过注入井/地沟提供营养液。与真空挥发和土壤通风不同,生物通风是向土壤注入空气,设计一定的流速以使生物降解速率达到最大并减少挥发有机物向大气的逸出。

(2) 生物搅拌法

生物搅拌法是将土壤的饱和部分压入空气,同时从土壤的不饱和及部分真空吸取空气,这样既向土壤提供了充足的氧气又加强了空气的流通。

(3) 泵出处理法

泵出处理法是将污染的地下水回收,进行地表处理后与营养液混合,由注入井/地沟回注入土壤。由于处理后水中包含有驯化的降解菌,因而对土壤有机污染物的生物降解有促进作用。

1.3.1.3 其他微生物修复技术

(1) 遗传改性法

遗传改性法是通过结合、转导和转变等遗传改性方法加强微生物矿化污染物的能力。除用于处理易降解的有机污染物外,还包括多环芳烃、多氯联苯等难降解物质的处理。

(2) 游离酶法

游离酶法是利用微生物分离出来的游离酶将有害污染物转化为无害或更安全的化合物的方法。游离酶能够快速降低毒性,且能在不适合微生物的环境中保持活性,使在高 pH 值、高温、高盐或高溶剂浓度土壤中的应用成为可能。

1.3.2 植物修复技术

植物对土壤中的无机和有机污染物有不同程度的吸收、挥发和降解等修复作用,用于污染土壤修复的植物特殊之处在于,其在某一方面表现出超强的修复功能。根据修复植物的修复功能和特点可将植物修复分为4种基本类型(周启星,2004)。

(1) 植物提取修复

利用重金属超富集植物从污染土壤中超量吸收、积累一种或几种重金属元素,之后将植物整体或部分收获并集中处理,然后再继续种植超积累植物,使土壤中的重金属含量降到可接受的水平。植物提取修复是目前研究最多且最有发展前途的一种修复技术。

(2) 植物挥发修复

利用植物将土壤中的一些挥发性污染物吸收到植物体内,然后将其转化为气态物质释放到大气中,从而对污染土壤起到治理效果。目前研究主要集中在易挥发性的重金属如 Hg 等,对有机污染物也具有较好的应用前景。

(3) 植物稳定修复

通过耐性植物根系分泌物质来积累和沉淀根际圈污染物质,使其失去生物有效性,以减少污染物质的毒害作用。但更重要的是,利用耐性植物在污染土壤上生长来减少污染土壤的风蚀和水蚀,防止污染物质向下淋移而污染地下水或向四周扩散进一步污染周围环境。该技术主要偏重在重金属污染土壤的稳定修复方面。

(4) 植物降解修复

利用修复植物的转化和降解作用去除土壤中的有机污染物质,其修复途径包括污染物质在植物体内转化及分解和在根际圈内的直接降解。植物降解一般对某些结构比较简单的有机污染物去除效率很高,对结构复杂的污染物质则无能为力。

1.3.3 生物联合修复技术

由于土壤污染的普遍性、复杂性和特殊性,单一的修复技术往往不能完全解决问题,协同两种或两种以上的土壤修复方法,形成联合修复技术,不仅可提高对单一污染土壤的修复速率与效率,而且可克服单项修复技术的局限性。目前联合修复技术已成为土壤修复技术研究的热点。生物修复技术受到修复环境的制约,在现场应用和工程化推广的方面都有技术局限性。然而生物技术作为一种绿色的修复技术有其技术优势,尤其是在与其他的强化技术联合后,能够对修复效果起到放大作用,是污染土壤修复的技术发展方向。