

陈玉成 编 ●

污染环境生物修复工程



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

污染环境生物修复工程

陈玉成 编

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

污染环境生物修复工程/陈玉成编. —北京: 化学工业出版社, 2003. 2
ISBN 7-5025-4330-9

I. 污… II. 陈… III. 生物防治 (环境污染)
IV. X505

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 004737 号

污染环境生物修复工程

陈玉成 编

责任编辑: 陈 丽 董 琳

文字编辑: 周 侗

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 10 字数 264 千字

2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4330-9/X·239

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

工业革命极大地改变了人类社会文明发展的进程，使人们在享受工业文明创造的丰硕果实的同时，也遭受了随之而来的环境污染和生态破坏的危害。据统计，目前我国20%以上的耕地、90%以上的城市河流、75%以上的湖泊、50%以上的地下水都受到不同程度的污染；海洋赤潮频频发生；燃煤烟气污染尚未解决，光化学污染已露端倪；垃圾围城、白色污染和危险废物问题十分突出。这些已经严重影响到我国的生态环境和人民身体健康。

尽管环境污染日益加剧，污染状态更加复杂，但人们对环境质量的要求却越来越高。不仅要集中治理生产区、生活区内产生的污染，还要治理因生产、生活及事故等原因造成的土壤、河流、湖泊、海洋、地下水、大气和固体废物堆置场的污染，这就是污染环境的修复工程。污染预防工程、传统的环境工程（即“三废”治理工程）和环境修复工程分别属于污染物控制的产前、产中和产后三个环节，它们共同构成污染控制的全过程体系，是可持续发展在环境方面的重要体现。自“九五”以来，我国已开始花大力气重点整治三湖（太湖、巢湖、滇池）、三河（淮河、海河、辽河）、两区（酸雨控制区、二氧化硫控制区）、一市（北京市）、一湾（环渤海湾）等，并取得了明显的成效，为污染环境的修复积累了大量的经验。

污染环境的修复技术不外乎物理方法、化学方法和生物方法等三大类，鉴于生物在污染物的吸收、转运、降解、转化、固定等过程中发挥着强大的作用，生物修复具有投资少、运行费用低、最终产物少等优点，因此我国污染环境的修复工程应采取生物修复为主、物理化学修复为辅的策略。

生物修复工程是环境工程的重要组成部分，尽管其出现时间

不长，但发展非常迅速，并已经成为环境保护领域技术发展的重要生长点。我校环境科学与工程系开展污染环境修复的研究已有时日，并在1999年编制新的教学大纲时，率先在全国首次将《污染环境生物修复工程》作为环境工程专业的必修主干课程。本书的出版在于既可以执行新的教学计划，又可以充分发挥农业院校生物学科的优势，快速将相关成果转化为生产力，服务于经济建设。

《污染环境生物修复工程》基本上以作者为本科生的授课提纲为骨架，并参考国内外有关书籍及该领域的最新进展编写而成。本书在内容编排上分为两大部分，共十二章。第一部分包括第一章至第五章，主要阐述污染环境生物修复工程的原理，分别为绪论、生物修复的机理、影响生物修复的受体特性、影响生物修复的污染物特性、影响生物修复的环境条件；第二部分包括第六章至第十二章，主要介绍生物修复工程在受污染环境中的应用，分别为污染土壤的生物修复、污染河流的生物修复、污染湖泊的生物修复、污染地下水的生物修复、污染海洋的生物修复、污染大气的生物修复、固体废物污染的生物修复。

本书为教学用书，可供环境工程、环境科学专业的高年级本科生和研究生作为教材或教学参考书，也可供农业资源与环境、资源环境与城乡规划管理、生物技术、生物科学、生物工程等相关专业的师生参考。

由于污染环境生物修复的研究历史不足30年，我国开展相关研究的时间更短，加之生物修复涉及环境科学、工程科学、微生物学、生物学、植物学、生态学、化学、土壤学、水文学等很宽的学科领域，囿于作者的知识范围和学术水平，本书中疏漏和不足之处在所难免，敬请读者给予批评指正。此外，书中引用了许多国内外同行学者的学术观点和研究数据，虽然在引述时力求一一注明，但难免挂一漏万，在此向被引用者表示歉意和感谢。

本书得到了西南农业大学教材科、资源环境学院暨环境科学与工程系的大力支持，我的导师西南农业大学青长乐教授、牟树森教

授、蒲富永教授、皮广洁教授和武汉大学熊治廷教授对本书也极为关切，邓伟同志编绘了本书中的大部分图表，在此表示深深的谢意。

陈玉成

2002年8月于重庆

内 容 提 要

污染环境的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,使污染了的环境能部分或完全恢复到原始状态的过程。本书较为详尽地阐述了生物修复的机理,影响生物修复的受体特性、污染物特性、环境条件,以及生物修复在污染土壤、河流、湖泊、地下水、海洋、大气、固体废物中的工程应用技术。

本书由作者在长期的教学和科研中总结提炼,并参考国内外有关书籍及该领域的最新进展编写而成,具有科学性和指导性。

本书可供从事环境工程及相关学科的研究人员、工程设计人员和管理人员以及高等院校师生阅读和参考。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 生物修复的概念与类型	1
一、生物修复的概念.....	1
二、生物修复的产生与发展.....	4
三、生物修复的类型.....	5
第二节 生物修复的特点与应用	6
一、生物修复的特点.....	6
二、生物修复的应用实例.....	7
三、生物修复的应用前景.....	9
第三节 生物修复的原则及可处理性试验	10
一、生物修复的原则	10
二、生物修复的可处理性试验	11
第四节 生物修复工程设计	14
一、场地信息收集	14
二、技术查询	15
三、技术路线选择	15
四、可处理性试验	15
五、修复效果评价	15
六、实际工程设计	16
第二章 生物修复的机理	17
第一节 微生物对有机污染物的修复	17
一、有机污染物进入微生物细胞的过程	17
二、微生物降解有机污染物的基本反应类型	21
第二节 微生物对重金属污染物的修复	23
一、微生物对重金属离子的转化	23

二、微生物对重金属离子的吸收与吸附	26
第三节 植物对有机污染物的修复	30
一、植物对有机污染物的吸收	30
二、植物对有机污染物的修复机理	32
三、几类典型有机污染物的植物修复	33
第四节 植物对重金属污染物的修复	35
一、植物修复重金属的机理	36
二、植物对重金属的吸收运移	39
第五节 水生生物对富营养化物的修复	48
一、微生物对氮磷富营养物的修复	48
二、植物对氮磷富营养物的修复	51
三、生态系统对氮磷富营养物的修复	52
第三章 影响生物修复的受体特性	53
第一节 土壤受体特性	53
一、土壤物理学特性对生物修复的影响	53
二、土壤胶体物质对生物修复的影响	54
三、土壤化学平衡对生物修复的影响	58
四、土壤络合-整合平衡对生物修复的影响	58
五、土壤氧化还原平衡对生物修复的影响	59
六、土壤酸碱平衡对生物修复的影响	61
第二节 地表水受体特性	63
一、地表水体的组成与性质	63
二、地表水体的污染-自净对生物修复的影响	67
三、地表水体污染的特点	69
第三节 地下水受体特性	71
一、地下水的种类与特征	71
二、包气带污染对地下水的影响	73
三、污染物随地下水的运移	75
四、地下水污染的特点	79
第四节 大气受体特性	80

一、大气的组成	80
二、影响大气污染修复的气象动力因素	81
三、影响大气污染修复的气象热力因素	83
第四章 影响生物修复的污染物特性	88
第一节 优先污染物与目标污染物	88
一、污染物的概念与内涵	88
二、优先污染物	88
三、目标污染物	89
第二节 污染物化学结构对生物修复的影响	89
一、有机物化学结构对生物降解的影响	90
二、有机物的生物降解性预测	97
第三节 污染物的降解方式对生物修复的影响	99
一、共代谢的含义	99
二、参与共代谢的微生物、基质及其产物	100
三、共代谢的机制	102
四、共代谢的环境意义	103
五、共代谢的研究展望	103
第四节 污染物的生物可利用性对生物修复的影响	104
一、污染物的溶解度	105
二、污染物的辛醇-水分配系数	106
三、非水溶相液体的利用	108
四、污染物的吸着性	109
五、重金属的生物有效性	112
第五章 影响生物修复的环境条件	114
第一节 影响微生物修复的非生物因子	114
一、温度	114
二、酸碱度	116
三、氧气供应	117
四、营养物质	118
五、共存物质	121

第二节	影响微生物修复的生物因子·····	124
一、	微生物的协同作用·····	124
二、	微生物的捕食作用·····	126
第三节	影响植物修复的环境因子·····	127
一、	酸碱度·····	128
二、	氧化还原电位·····	128
三、	共存物质·····	130
四、	污染物间的复合效应·····	132
五、	植物营养物质·····	134
六、	植物激素·····	135
七、	生物因子·····	136
第六章	污染土壤的生物修复 ·····	137
第一节	原位微生物修复·····	137
一、	生物通风修复·····	137
二、	生物强化修复·····	139
三、	土地耕作修复·····	142
四、	化学活性栅修复·····	143
第二节	原位植物修复·····	143
一、	植物修复的特点·····	143
二、	重金属污染的植物修复·····	144
三、	放射性污染的植物修复·····	153
四、	植物修复技术的发展趋势·····	153
第三节	原位生态修复·····	155
一、	概述·····	155
二、	技术关键·····	155
第四节	异位生物修复·····	158
一、	预制床修复·····	158
二、	堆制式修复·····	160
三、	生物反应器修复·····	165
第七章	污染河流的生物修复 ·····	171

第一节 自然净化修复	171
一、河流水体曝气修复	171
二、多功能河道生态工程修复	173
三、生物试剂添加修复	173
第二节 陆生生态修复	176
一、河水土地渗滤修复系统	176
二、土地渗滤修复类型	177
三、土地渗滤修复效果	181
四、土地渗滤修复设计	183
第三节 水生生态修复	183
一、水生生态修复的类型	183
二、水生生态修复流程	187
第四节 湿生生态修复	188
一、湿生生态修复技术的类型	188
二、自然湿地修复技术	189
三、构造湿地修复技术	190
第五节 微污染饮用水源的生物修复	192
一、生物滤池修复	192
二、生物转盘修复	193
三、生物流化床修复	193
四、生物接触氧化修复	194
第八章 污染湖泊的生物修复	196
第一节 富营养化的微生物修复	196
一、深水曝气修复	196
二、生物试剂添加修复	198
第二节 富营养化的水生植被修复	199
一、水生植被修复的优化设计	200
二、水生植被修复的技术途径	207
三、水生植被的收割利用	211
第三节 富营养化的生物操纵修复	213

一、生物操纵的基本概念·····	213
二、生物操纵途径·····	215
三、生物操纵修复的展望·····	218
第四节 底泥环境疏浚修复 ·····	221
一、底泥对湖泊的潜在污染·····	221
二、底泥环境疏浚的特点·····	222
三、底泥环境疏浚的调查·····	223
四、底泥环境疏浚设备的选型·····	223
五、堆场余水及污染底泥处置·····	226
第九章 污染地下水的生物修复 ·····	229
第一节 抽提-处理修复 ·····	229
一、泵-处理修复·····	229
二、气体抽提修复·····	234
第二节 空气吹脱修复 ·····	242
一、空气吹脱现场中试·····	244
二、空气吹脱设计·····	245
第三节 原位工程生物修复 ·····	248
一、工艺类型·····	248
二、原位工程生物修复设计·····	250
三、典型原位生物修复系统·····	251
第四节 地下水的自然生物修复 ·····	253
一、自然生物修复过程·····	253
二、自然生物修复反应参数·····	254
三、自然生物修复评价·····	255
第十章 污染海洋的生物修复 ·····	257
第一节 海洋石油污染的修复 ·····	257
一、海洋石油污染的分布与赋存形态·····	257
二、海洋石油污染的生物修复·····	258
第二节 海洋赤潮污染的修复 ·····	262
第三节 海洋农药污染的修复 ·····	263

第十一章 污染大气的生物修复	265
第一节 有机废气的微生物修复	265
一、有机废气的微生物修复过程.....	265
二、有机废气的微生物修复工艺.....	267
第二节 无机废气的微生物修复	273
一、二氧化碳的微生物固定.....	274
二、硫化氢的微生物修复.....	278
第三节 污染大气的植物修复	279
一、绿色植物对气态污染物的修复.....	279
二、绿色植物对降尘的修复.....	281
三、绿色植物对生物性污染物的修复.....	283
四、绿色植物的释氧修复.....	283
第十二章 固体废物污染的生物修复	285
第一节 矿山废石场的生物修复	285
一、废石场修复的类型.....	285
二、废石场修复程序.....	285
第二节 露天采矿场的修复	287
一、无覆盖层的浅采矿场修复.....	288
二、有覆盖层的浅采矿场修复.....	288
三、无覆盖层的深采矿场修复.....	289
四、有覆盖层的深采矿场修复.....	289
第三节 矿山尾矿库的植物修复	290
一、限制尾矿库植物修复的因素.....	290
二、尾矿库植物修复程序.....	292
三、尾矿库植物修复的注意事项.....	293
第四节 垃圾场的生物修复	294
一、垃圾场生物修复的限制因素.....	294
二、垃圾渗滤液的土地生态修复.....	295
三、垃圾场的生物修复实例.....	296
参考文献	297

第一章 绪 论

第一节 生物修复的概念与类型

一、生物修复的概念

(一) 环境修复

修复 (remediation) 本来是工程上的一个概念, 顾名思义, 它是指借助外界作用力使某个受损的特定对象部分或全部恢复到原初状态的过程。严格说来, 修复包括恢复、重建、改建等三个方面的活动。恢复 (restoration) 是指使部分受损的对象向原初状态发生改变; 重建 (reconstruction) 是指使完全丧失功能的对象恢复至原初水平; 改建 (renewal) 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。它们三者的关系见图 1-1 所示。

环境意义上的修复是指对被污染的环境采取物理、化学与生物学技术措施, 使存在于环境中的污染物质浓度减少或毒性降低或完全无害化。因此, 为了更好地理解环境修复, 有必要从下面三方面进行理解。

首先要界定污染环境与健康环境。众所周知, 所谓环境污染 (contaminated environment), 是指任何物质或能量因子的过分集中, 超过了环境的承载能力, 从而对环境表现出有害的现象。环境污染的实质是由于人类活动不当所引起的环境质量的下降和环境功能的衰退。根据这一实质, 不难将污染环境定义为任何物质过度聚

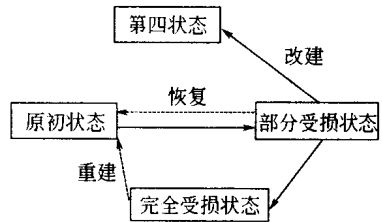


图 1-1 修复的三个过程 (实线表示破坏方向, 虚线表示修复方向)

集而产生的质量下降、功能衰退了的环境。与污染环境相对应的是健康环境 (sound environment)。最健康的环境当然是具有原始背景值的环境, 但当今地球上似乎再也难找到一块未受人类活动影响的“净土”, 即使人类足迹鲜至的南极、珠穆朗玛峰也可检测到农药的存在。因此健康环境只是相对的, 特指存在于其中的各种物质或能量都低于有关环境质量标准。众所周知, 环境质量标准是环境质量的反映, 而环境价值又是环境质量与人类需要之间客观存在的一种特定关系 (肯定或否定关系), 它受到道德准则的制约和影响。比如说某区域环境质量对一部分人来说可能满足其需要, 而对另一部分人来说则可能相反。从这个意义上讲, 健康环境体现了人类的价值取向。

其次要界定环境修复 (environmental remediation) 与环境净化 (environmental self-purification)。环境有一定的自净能力。污染因子进入环境中, 并非一定会产生污染, 而是只有当环境污染因子的载荷量超过了环境净化容量时才导致污染。环境中存在各种各样的净化机制, 如稀释、扩散、沉降、挥发等物理机制, 氧化还原、中和、分解、化合、吸附解吸、离子交换等化学 (含物理化学) 机制, 有机生命体新陈代谢等生物学机制。这些机制共同作用于环境, 致使污染物的数量或性质向有利于环境安全的方向发生改变。环境污染和环境净化是环境质量形成过程中的一对对立统一的矛盾, 其辩证关系见图 1-2。

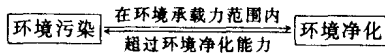


图 1-2 环境污染与环境净化的对立统一关系

环境修复与环境净化之间既有共同的一面, 也有不同的一面。它们两者的目的都是使进入环境中的污染因子的总量减少或强度降低或毒性下降。但环境净化强调的是环境中内源因子对污染物质或能量的清除过程, 是一种自然的、被动的过程; 而环境修复则强调人类有意识的外源活动对污染物质或能量的清除过程, 是一种人为的、主动的过程。

再次要界定环境修复与“三废”治理。传统“三废”（废水、废气、废渣）治理是环境工程的核心内容，强调的是点源治理，即工厂排污口的治理，需要建造成套的处理设施，在最短的时间内，以最快的速度与最低的成本，将污染物净化去除。而环境修复是最近几十年来才发展起来的环境工程技术，它强调的是面源治理，即对人类活动的环境进行治理，它不可能建造把整个修复对象包容进去的处理系统。如采用传统治理净化技术，即使对于局部小系统的修复，其运行费用也将是天文数字。环境修复和“三废”治理都是控制环境污染，只不过“三废”治理属于污染因子的产中控制，环境修复属于产后控制，而我们通常所说的污染预防则属于产前控制，它们三者共同构成污染控制的全过程体系，是可持续发展在环境上的重要体现。

（二）环境修复技术的类型

修复技术是指人类修复环境时所采用的手段。环境修复的对象是自然界，相应的技术作用对象也是自然界。技术的基本作用在于改变自然界的运动形式和状态，由此形成了工程技术、物理技术、化学技术与生物技术等四类基本技术。工程技术（engineering technology）是指广义的机械技术，是一个人工的机械自然过程，被用来改变自然界的机械运动状态和自然物的形态；物理技术（physical technology）是一个人工的物理自然过程，被用来改变自然物的物理性质；化学技术（chemical technology）是一个人工的化学自然过程，被用来改变自然界物质的化学组成；生物技术（biotechnology）是一个人工的生命运动过程，被用来改变生命体的运动状态与性质。以此为基础，环境修复可分为工程修复、物理修复、化学修复、生物修复等四大类型。

（三）生物修复的概念

从环境修复技术的类型可知，生物修复因体现更多优点而成为环境修复中最活跃的生长点。所谓生物修复（bioremediation），是指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，从而使污染了的环境能够部分或完全恢复到原初