

Technology and Cases of
Environmental Bioremediation

环境生物修复 技术与案例

李素英 / 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Technology and Cases of
Environmental Bioremediation

环境生物修复

技术与案例

主 编 李素英

副主编 常 英

参 编 刘 芳 王海鸥 王鑫厅

内 容 提 要

本书对国内外生物修复技术进行了综述和总结。全书共分7章，首先对生物修复的基本概念和原理作了详细的介绍；然后对植物、微生物和综合技术应用于大气、水体和土壤环境污染修复作了较全面的阐述；最后，综合应用生物修复的原理，以案例方式讲解了典型环境问题的生物修复工程，以便于读者根据实际需要来选择适用的生物修复技术。

本书可供环境保护、资源管理、生物技术领域的科研人员、教师、学生、管理干部和企业工程师等参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

环境生物修复技术与案例/李素英主编. —北京：中国电力出版社，2015.1
ISBN 978-7-5123-5459-3

I. ①环… II. ①李… III. ①环境生物学-研究 IV. ①X17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 007405 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：未翠霞 联系电话：010—63412611

责任印制：蔺义舟 责任校对：罗凤贤

汇鑫印务有限公司印刷·各地新华书店经售

2015 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·12.5 印张·297 千字

定价：35.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

大气、水体、土壤环境污染严重，采用常规废水、废气及垃圾堆埋来处理这种大面积受污染的环境，结果通常难尽人意。近年来，各国科学家陆续成功地研究开发出可用于治理大面积污染环境的生物修复技术。与其他工程措施相比，生物修复技术具有费用低、可以就地处理、对周围环境干扰少等许多优点，已引起国内外环境污染研究领域专家们的广泛关注。

生物修复（Bioremediation）是指利用特定的生物吸收、转化、清除或降解环境污染物，从而修复被污染环境或消除环境中污染物，实现环境净化、生态效应恢复的生物措施。它是一种低耗、高效和环境安全的环境生物技术。这种技术的最大特点是可以对大面积的污染环境进行治理，目前所处理的对象主要是石油污染及农田农药污染。生物修复最成功的例子是20世纪80年代末对阿拉斯加海岸线的石油污染的生物修复，经处理后，使得近百千米海岸的环境得到改善。

本书对国内外生物修复技术进行了综述和总结。本书共分7章。第一到三章对生物修复的基本概念与原理作了详细的介绍；第四到六章为生物修复技术的分支系统，包括大气污染的生物修复、水体污染的生物修复和土壤污染的生物修复；第七章总结了生物修复的实践技术和典型案例，强调生物修复技术的应用性和可操作性。

本书由李素英担任主编，常英担任副主编，参加编写的人员还有刘芳、王海欧、王鑫厅。具体编写分工为：第一章和第三章，李素英；第二章，常英；第四章，李素英、常英；第五章，王海欧；第六章，王鑫厅；第七章，刘芳、王海欧。本书初稿资料收集与校对，还得到了任丽娟、王冉、曹瑞、胡亮亮、于敬、刘斌和于海军的帮助，本书的顺利完成与他们的奉献是分不开的。在此，向以上人员表示由衷地感谢。

本书可供环境保护、资源管理、生物技术领域的科研人员、教师、学生、管理干部和企业工程师等参考。

由于编者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，谨请各位读者批评指正，以使本书不断完善。

编 者

前言

第一章 绪论	1
第一节 生物修复的概念与特点	1
一、生物修复的概念	1
二、生物修复的特点	3
第二节 生物修复的产生与发展	4
一、生物修复技术的产生	4
二、生物修复技术的发展	5
第三节 生物修复技术的类型	6
一、微生物修复	6
二、植物修复	7
三、动物修复	8
四、生态修复	8
第四节 生物修复案例及分析	8
一、河道污水的生物修复	8
二、太湖水污染的生物修复	10
第五节 生物修复的前景及应用	12
一、生物修复的前景	12
二、生物修复的应用	13
参考文献	14
第二章 环境的微生物修复原理	16
第一节 用于生物修复的微生物	16
第二节 微生物修复的影响因素	18
一、非生物因子对微生物修复的影响	18
二、生物因子对微生物修复的影响	24
第三节 微生物对有机物污染的修复	26
一、环境中主要有机污染物	26
二、有机污染物的微生物修复机理	27
三、影响有机污染生物修复的因素	28
四、有机污染物微生物修复的应用	30
第四节 微生物对重金属污染的修复	32
一、微生物对重金属离子的生物吸附	32

二、微生物对重金属的生物转化作用	33
三、重金属污染微生物修复技术的研究与应用	33
参考文献	34
第三章 环境的植物修复原理	37
第一节 植物对有机污染物的修复	37
一、有机污染物的概述	37
二、植物对有机污染物修复的原理和方法	40
第二节 植物对重金属污染物的修复	45
一、重金属的环境污染	45
二、植物对土壤中重金属污染物的修复	48
三、植物对水环境中重金属污染物的修复	49
四、植物对大气环境中重金属污染物的修复	51
五、植物重金属修复的发展趋势及应用前景	52
参考文献	53
第四章 大气的生物修复工程	56
第一节 大气污染	56
一、大气特性	56
二、大气污染及形成的条件	59
第二节 污染大气的微生物修复	60
一、有机废气的微生物修复	60
二、无机气体的微生物修复	64
第三节 污染大气的植物修复	71
一、物理性大气污染物的植物修复机理	71
二、生物性大气污染物的植物修复机理	71
三、化学性大气污染物的植物修复机理	72
四、大气污染的植物修复案例	74
第四节 大气污染的综合修复技术	78
一、物理与生物综合修复技术	78
二、化学与生物综合修复技术	80
三、生态修复技术	81
参考文献	82
第五章 水体的生物修复工程	86
第一节 水体	86
一、水体的特性	86
二、地表水体的特性	88
三、地下水体特征	89
四、水体的生物修复工程优势	91
第二节 强化水体自然净化技术	91
一、河道生物接触氧化技术	92

二、水层曝气循环技术	93
三、人工浮岛技术	94
四、生物试剂添加修复	94
第三节 稳定塘净化技术	96
一、稳定塘的污水净化机理	96
二、稳定塘净化过程的影响因素	97
三、稳定塘的分类及其各自的特点	98
四、稳定塘的特点	102
五、稳定塘的设计计算	102
第四节 人工湿地技术	105
一、人工湿地净化原理	105
二、人工湿地类型	107
三、人工湿地设计	108
第五节 土壤渗滤技术	111
一、净化原理	112
二、结构类型	113
第六节 富营养化的生物操纵技术	118
一、水体富营养化概述	118
二、生物操纵防治水库富营养化技术	120
第七节 河流生态修复	124
一、河流生态修复的发展阶段	125
二、河流生态修复的任务	126
三、河流地貌特征的保护和恢复	126
四、岸坡防护生态工程技术	128
第八节 地下水的生物修复工程	131
一、包气带土层治理技术	131
二、地下水污染治理技术与方法	132
参考文献	134
第六章 土壤的生物修复工程	136
第一节 土壤	136
一、土壤的物理性质	136
二、土壤环境的化学性质	139
第二节 土壤的生物修复	142
一、有机污染土壤的生物修复	142
二、重金属污染土壤的生物修复	149
参考文献	155
第七章 生物修复工程设计	157
第一节 生物修复工程设计原理	157
一、场地信息收集	157

二、技术查询·····	157
三、技术路线选择·····	157
四、可处理性试验·····	157
五、修复效果评价·····	157
六、实际工程设计·····	158
第二节 生物修复工程设计案例·····	158
一、污染水体的生物修复工程·····	158
二、污染大气的生物修复工程·····	168
三、污染土壤的生物修复工程·····	169
四、公路边坡修复工程·····	170
五、矿山的环境恢复工程·····	175
六、小流域水土流失的环境恢复工程·····	183
参考文献·····	189

第一章

绪 论

环境问题是目前人类生存和发展过程中所面临的重大问题。针对环境问题，人类已开始采取一系列的修复措施，主要有物理方法、化学方法及生物方法三大类。人类最早采用的是化学修复技术，但是化学修复技术的成本较高、耗能相对较大。随着生产技术的进步，人类追求低能耗、高效率的方法来去除环境中的污染物。从国内和国外众多资料可看出，生物修复技术正逐渐成为利用生物技术处理环境污染的一种有效方法。这种方法在国外较早获得关注，最近几年，国内也开始重视起来，并且取得了一些实用的科研成果。

本章主要从生物修复的基本概念及其产生和发展入手，阐明生物修复的内涵、治理环境污染的原理及其应用前景。随着生物技术的快速发展，生物修复技术将在污染环境的治理中显示出显著的优势，而且会在预防环境污染等方面起到越来越重要的作用，这将成为一种既经济又有效的污染环境的治理方法。

第一节 生物修复的概念与特点

随着环境污染的日益恶化，人们对受损环境的修复技术也逐渐重视起来。生物修复(Bioremediation)技术是20世纪80年代以来出现和发展起来的清除和治理环境污染的生物工程技术，主要是利用生物(特别是微生物)催化降解污染物，从而修复被污染环境或消除环境中污染物的一个受控或自发进行的过程(张玉等, 2008)。

一、生物修复的概念

最初人们大多采用微生物修复受损的环境，所以生物修复被认为是生物(特别是微生物)催化降解环境污染物，减少或最终消除环境污染的受控或自发过程(吕晓龙, 2008)。金振辉认为，生物修复技术是利用生物体或其制品降解污染物，减少毒性或转化为无毒产品，富集和固定有毒物质的环境生物技术，大尺度生物修复技术还包括生态系统调控等。这种生物技术主要可以应用于水产规模化养殖和工厂化养殖污染、石油污染、重金属污染、城市排污以及海洋其他废物(水)的处理等工作(池银花, 2006)。

其后，李静等提出生物修复技术主要是利用自然环境中生息的微生物或投加的特定微生物，在人为促进工程化条件下分解污染物，修复受污染的环境(温志良等, 1999)。胡庆昊在《应用于污染环境治理的生物修复技术》中认为生物修复就是利用特定的生物(包括微生物-土著或外源微生物以及植物等)在一定的条件下进行消除或富集环境污染物，从而达到对污染环境进行恢复的生物过程(Willessc, 1993)。在大多数情况下，微生物修复主要是利用天然存在的或特别培养的微生物，在可调控环境条件下将有毒污染物转化为无毒物质的处理技术(Ronald, Matlas, 1995)。简单地说，生物修复即利用微生物降解环境中有毒有害物质，消除污染者，减少其浓度的修复方法(滑丽萍等, 2005)。但随着时间和技术的成熟，

生物修复技术在生物的选择上逐渐扩展到植物，甚至是动物。沈德中指出，生物修复是指利用天然存在的或特别培养的生物（植物、微生物和原生动物）在可调控环境条件下将有毒污染物转化为无毒物质的处理技术（金建祥，2004）。

生物修复技术大多应用于土壤污染治理、地下水污染治理、海洋污染治理等，所以沈定华认为生物修复技术是利用生物新陈代谢的方法将土壤、地下水和海洋中的有毒有害污染物吸收、转化或分解并从环境中去除的一种技术（李章良、孙佩石，2003）。也有学者从其他方面考虑，如胥思勤认为生物修复是指采用工程化方法，利用微生物，将土壤、地下水和海洋中有毒有害污染物就地降解成二氧化碳和水，或转化成为无害物质的方法（胡庆昊、朱亮，2002）。黄胜和等（2010）在《环境保护与循环经济》中提到生物修复技术是利用生物体或其制品降解污染物、减少毒性或转化为无毒产品、富集和固定有毒物质的环境生物技术，大尺度生物修复技术还包括生态系统调控等。

在多年的研究中，生物技术在治理污染的地下水方面的应用较多。地下水生物修复技术是指利用天然存在或特别培养的生物通过生物降解作用将有毒污染物转化为无毒物质的处理技术。目前，地下水生物修复技术主要有泥炭生物屏障法、生物注射法、植物修复法、有机黏土法和生物反应器法等（沈德中，2002）。

在污染土壤的治理中，生物修复是一种新方法。利用生物削减、净化土壤中的重金属或降低重金属毒性（金振辉等，2008）。在土壤重金属污染方面，生物修复技术主要指利用生物的生命代谢活动减少存在于环境中的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者完全恢复到原始状态的过程（沈定华等，2004）。这种技术主要通过两种途径来达到对土壤中重金属的净化作用：①通过生物作用改变重金属在土壤中的化学形态，使重金属固定或解毒，降低其在土壤环境中的移动性和生物可利用性；②通过生物吸收、代谢达到对重金属的削减、净化与固定作用（黄胜和等，2010）。在污染土壤治理中，生物修复技术是运用现代生物技术，使土壤的有害污染物得以去除，土壤质量得以提高或改善的一种修复方法（张飒等，2012）。温志良认为生物修复是指利用微生物或植物的生命代谢活动，将土壤环境中的危害性污染物降解成二氧化碳和水或其他无公害物质的工程技术。还有学者认为，生物修复技术是利用生物的生命代谢活动降低环境中有毒有害物质的浓度或使其完全无害，从而使污染的土壤部分地或完全地恢复到原始状态。生物修复技术包括微生物修复和植物修复（Boopathy, 2000）。在《土壤污染的生物修复技术研究进展》中，李章良等认为生物修复是利用生物的生命代谢活动减少环境中有毒有害有机物质的浓度或使其完全无害化，从而使受有机污染的土壤环境能部分地或完全地恢复到原始状态。

利用生物的生命代谢活动来减少污染环境中的有毒有害物质的浓度或使其无害化，从而使污染了的环境能够部分或完全地恢复到原初状态的过程（Gujraletal, 1956）。生物修复是利用生物的生命代谢活动减少存在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。陈玉成（2003）认为生物修复是利用生物，特别是微生物催化降解有机机物，从而修复被污染环境或消除环境中污染物的一个受控或自发进行的过程。

目前，大多数人共同认可的定义为：生物修复是指（天然的或是接种的）将土壤、地表及地下水或海洋中危险性污染物现场去除或降解的工程技术系统。

二、生物修复的特点

生物修复是一类低耗、高效和环境安全的生物技术，主要依靠细菌、真菌甚至高等植物以及细胞游离酶的自然代谢过程降解、去除环境中的污染物（周启星等，2004）。虽然生物修复技术产生只有 30 多年的历史，但是生物修复技术的发展势头是其他修复技术不能相比的。

现代或传统的化学修复主要是通过添加化学药剂清除和降低环境中的污染物质。即针对污染物的特点，选择适合的化学药剂，利用药剂的化学性质与污染物进行化学作用，从而达到去除污染物质的目的。但是，投入了大量的化学物质可能对生态系统产生负面影响，而且我们对生态系统的最终行为和环境效应了解地还不是很透彻，大规模的实地应用还十分有限。

物理修复是最传统的修复方法，主要是利用污染物与环境之间的各种物理特性差异来去除环境中的污染物质。物理修复具有很多优点，如快捷、积极、高效、修复时间短、操作简单等。但是与生物修复技术相比，物理修复有很多不足之处，如修复效果不尽如人意、消耗人力物力较多、所需费用较高、有可能引起二次污染等。

相比之下生物修复技术具有以下优点。

(1) 生物修复技术对环境影响不大。生物修复主要是自然过程的强化，它最终的产物是水、二氧化碳和脂肪酸等，不会对环境产生二次污染或使污染转移，遗留下来的问题较少。生物修复法与化学法、物理法相比，能达到无害化，永久地消除污染物的污染隐患。

(2) 生物修复可以在现场作业，节约了大量费用。其费用与传统的物理、化学法相比，只是它们费用的 30%~50%。例如，日本在处理污染土壤时利用生物修复技术的设备投资极少，其费用大约只有每平方米 4000 日元，但是采用高温燃烧、清洗或加热挥发等处理技术时成本要大大提高，每平方米的费用大概要 5 万~10 万日元。美国环境中心对一万多吨的污染土壤修复成本的研究结果表明，使用异位生物修复技术，成本为每吨 230~300 美元，而燃烧法的成本为每吨 740 美元。与异位生物修复技术相比，原位生物修复技术的成本会更低，但是原位生物修复技术的影响因素多，工艺条件不易控制。在 20 世纪 80 年代，采用生物修复技术处理污染土壤每平方米只需 100~250 美元。而采用焚烧填埋每平方米则需要 250~1000 美元。

(3) 最大限度降低污染物浓度。生物修复技术可以把污染物的残留浓度降到最低。在经过生物修复处理过的污染土壤中，BTX（苯、甲苯、二甲苯等）总浓度会降到 0.05~0.10 mg/L，甚至低于检测限。

(4) 生物修复技术可以同时处理受污染的地下水和土壤。同时，生物修复技术和其他处理技术相结合使用，可以处理复合性污染。

(5) 可用于其他污染处理技术不能处理的场地。例如，受污染的土壤位于公路或建筑物下方不能挖掘搬运时，可以采用原位生物修复技术进行处理，所以生物修复技术在应用范围上有很大优势。

当然，生物修复技术也有一定的局限性。

(1) 条件苛刻。生物修复技术与其他处理技术相比，科技含量较高，运作必须符合场地的特殊条件，生物的代谢活动易受环境变化的影响。

(2) 处理时间长。生物修复主要的运作机理是生物的新陈代谢。生物特别是高等动植物的生长繁殖需要经历一定的生命周期才能完成其代谢活动，所以需要较长的时间。

(3) 特定的生物只能利用、吸收、降解、转化特定的化学物质，状态稍有变化的物质就很可能被同一生物酶破坏。

(4) 生物不能去除环境中的所有污染物。污染物的低生物有效利用性及难降解性等常使生物修复不能进行。

第二节 生物修复的产生与发展

环境污染的修复技术有物理方法、化学方法和生物方法三大类。物理、化学方法在治理污染时具有一定的局限性，这使得人们大力地开发运用生物修复技术。虽然生物修复技术也有一定的局限性，但是生物在污染物的吸收、转运、降解、转化、固定等过程中能发挥强大的作用，而且生物修复具有投资少、运行费用低廉、终产物少等优点。这使得生物修复具有很大的发展潜力，是环境污染治理和修复的理想方法。

本节对生物修复的产生和发展做初步归纳总结。

一、生物修复技术的产生

生物修复最早起源于有机污染物的治理方面，最早的生物修复从微生物利用开始。人们运用微生物制作发酵食品已经有几千年的历史，利用厌氧或好氧微生物处理污染水体也有一百多年的历史，可是利用生物修复技术处理污染现场的有机物却只有 30 多年的历史。

近些年，由于石油泄漏和部分污染物的不合理处置和工业三废的大量排放，使得大面积的土壤和许多水体遭到严重污染。大部分污染物仅靠土壤和水体的自净能力是很难在短时间内被去除干净的，甚至有些污染物经过物理和化学方法处理后，还会生成更难降解的有毒有害物质，给人类和动植物的生存带来更加严重的危害。

20 世纪 70 年代中期是近代生物修复的萌芽阶段。当时欧美一些国家开始研究用微生物、植物治理污染的水体和土壤，在研究中发现生物修复的处理效果要明显优于化学、物理的处理方法。起初，生物修复的应用范围很小，只是处于试验阶段。

生物修复的第一阶段是小规模使用生物修复技术处理污染物质，它的基础研究源于 30 多年前，集中在地下水环境、土壤和地面水体中的石油生物降解的实验室研究。到了 20 世纪 80 年代以后，前人的基础研究成果被应用到大规模的环境污染治理上，并且取得了很大的成功，这使得生物修复技术逐渐成为一种新的生物治理技术。1972 年，利用微生物修复技术清理美国宾夕法尼亚州 Ambler 管线泄漏的汽油，这是生物修复技术的首次资料记载，也是应用生物修复技术进行大面积污染治理的开端。

生物修复的第二阶段是从 1989 年开始的，当时美国阿拉斯加海域受到大面积的石油污染，为了处理污染，生物修复技术首次被大规模使用。1989 年 3 月，超级油轮 Exxon Valdez 号的 42 000m³ 的原油在 5 个小时内全部泄漏到美国的阿拉斯加海岸，这个海岸是美国最原始、最敏感的海岸，原油泄漏影响 1450 多千米的海岸线。由于原油量过大致使常规的净化方法不起作用，Exxon 公司和美国国家环境保护局马上就开始了著名的“阿拉斯加研究计划”，即利用生物修复技术来清除漏油污染。在修复过程中，对部分受污染的海岸有控制地使用两种亲油性微生物肥料，然后采样分析添加营养物质促进生物降解原油的效果。加入微生物肥料后，受污染的海滩上的沉积物表面和次表面的异养菌和石油降解菌的数量增加了

一到两个数量级，石油污染物的降解速度提高了 2~3 倍，使得原油净化时间缩短了将近两个月。这个项目表明，在石油泄漏不久，就出现了石油的生物降解；营养物质的加入并没有引起水体的富营养化，附近的海洋水体环境没有受到影响。此后，生物修复技术成为人们可以接受的治理漏油的有效方法。在美国阿拉斯加海岸的石油泄漏治理中，生物修复技术得到了成功应用，并最终得到了美国政府环保部门的认可。所以，阿拉斯加海岸的漏油事件成为生物修复技术发展的里程碑。

除此之外，还有两个生物修复工程也证明了生物修复技术的成功：其一为二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯和 BTEX（弗吉尼亚 Fuffolk 一个工厂的排放物）污染地下水、土壤的生物修复工程；其二为密歇根 Grayling 一个空军基地的柴油储蓄罐管道破裂造成深层土壤和水体高浓度污染治理工程。这两个工程分别经过 16 和 13 个月的生物处理运行后，地下水和土壤的污染物浓度都已达到密歇根州自然资源局规定的标准。

从 21 世纪初到现在，是生物修复技术的快速发展阶段。近些年来，世界很多国家开始关注特种功能微生物的利用。例如，已经成功分离出多种可降解石油污染物的特异微生物，包括真菌、细菌、菌团和酵母；降解塑料制品四亚甲基丁二酸（tetra methylene succinate）的高温菌类；降解卤化有机物的假单胞菌等。人们大力开发新的超级微生物可以大大加快生物降解污染物的效率，为生物修复的发展奠定了坚实的基础。

二、生物修复技术的发展

美国从 20 世纪 90 年代初开始庞大的地下水、土壤、海洋等环境污染治理项目，称为“超基金项目”。早在 20 世纪 80 年代中期，其他发达国家就开始了生物修复的初步研究，并成功地完成了一些实际的处理项目。它们的生物修复技术可以与美国并驾齐驱，德国、荷兰位于欧洲前列，在整个欧洲从事生物修复技术研究的公司和机构大约有上百个。

世界上不同国家在生物修复方面的开发研究重点所不同。

(1) 美国侧重于不同污染土地和水体的修复和整治，尤其侧重外源有机污染物的治理，这些毒物多是来源于军事工业及军事用品的生产。

(2) 日本将研究的重点放在解决全球性环境修复上，主要体现在以生物氢气为动力的研究和利用微生物对大气中二氧化碳的固定，这可以减轻和消除工业革命造成的大气中二氧化碳浓度急剧升高的问题。

(3) 欧美国家主要是对传统废物处理系统进行强化和改进，从而更好地处理化学污染物，并提高对污染物的降解能力。

我国的生物修复还处在刚刚起步阶段，在过去的几年中主要是研究追踪国际上生物修复技术的发展，大范围应用的实例还非常少。最早的生物修复是应用在石油废物的处理以及农药的有机污染治理上。随着我国生物修复研究的深入，生物修复技术又应用在土壤、地下水等环境污染的治理上。生物修复已经从细菌修复发展到真菌修复、植物修复、动物修复，由有机污染物的生物修复发展到无机污染物的生物修复。

现在，利用微生物修复技术治理污染的研究受到世界各国的重视，发展迅速，研究也日益广泛。例如，在极地现场通过接种抗寒微生物混合菌种来修复北极冻原地带的油滴污染土壤，经过一年的修复后，土壤中的油污染浓度降低到原来的 1/20。如果在堆肥时加入经过驯化的降解菌，就可以加大对多环芳烃的降解作用。经过实验证明，生物修复技术完全可以应用在污染物的治理上，且在很多领域上取得了相当可观的成就。

由于微生物反应具有多样性和温和性,通过强化微生物代谢分解作用来控制微生物降解难降解的污染物是生物修复技术中的关键技术,在发达国家生物修复技术已经得到相当大的重视,未来的发展前景广阔。

生物修复技术是20世纪80年代迅速发展起来的一项治理环境污染的技术。大量实践证明,应用生物修复技术去除环境中的污染物可以节约大量的投资,对周围环境影响小,可以原地进行修复,能最大限度地去除环境中的污染物质。随着生物修复技术的不断发展进步和基因工程的出现,将会使这一技术应用于更多的环境污染治理。虽然我国的生物修复技术起步较晚,但未来的发展前景广阔。

第三节 生物修复技术的类型

生物修复技术可以划分为以下四大类型。

一、微生物修复

从狭义上来说,生物修复,是指通过微生物的作用清除土壤和水体中的污染物,或使污染物无害化的过程。它包括自然的和人为控制条件下的污染物降解或无害化过程。例如,微生物通过带电荷的细胞表面吸附重金属离子,或通过摄取必要的营养元素主动吸收重金属离子,将重金属离子富集在细胞表面或内部。

1. 微生物的吸收

微生物可以直接吸持重金属。由于个体微小,微生物能直接吸附固定金属离子,如微生物多肽,多糖,糖蛋白上的官能团—COOH、—NH₂、—SH、—OH、—PO₄等对重金属离子的固定作用。微生物吸收的主要过程包括胞外沉积、胞外络合及积聚、结合。其次,微生物的代谢产物(如微生物分泌磷酸根、富里酸、腐殖酸,产硫细菌产生H₂S等),能在土壤中与重金属结合形成不溶性的化合物,使重金属对植物的可利用度减小。此外,微生物还可以直接将重金属吸收在细胞内,不断积聚,进行金属离子的络合或其他配位反应,使重金属的移动性能降低(何炎森、李瑞美,2003;俞慎等,2003)。

2. 微生物转化

微生物转化是利用土壤中的某些微生物对重金属的吸收、沉淀、氧化和还原等作用,降低土壤中重金属毒性的技术(王宏树等,1987)。

微生物转化包括以下几个方面。

(1) 通过微生物的氧化还原作用降低重金属自身毒性,如微生物将Cr⁶⁺转变成Cr³⁺。

(2) 微生物还可以像植物一样将离子态的As、Hg、Sc等还原成单质态使之挥发,然后集中收集。

(3) 微生物可以完成甲基化、去甲基化过程。

(4) 分泌有机酸可以改变根际pH值;调节重金属离子在土壤胶体上的吸附特征,还可以产生不溶性盐钝化重金属。

(5) 微生物可以产生硫化物钝化重金属。

有些微生物具有嗜重金属性。在实践中,可以利用微生物这一特征进行重金属污染土壤的净化,这已经成为一种去除重金属的行之有效的方法,多个国家都在广泛研究与探索。细菌还可以产生特殊的酶,对Cd、Co、Ni、Mn、Zn、Pb和Cu等有亲和作用,以此来还原

重金属。例如，柠檬酸杆菌产生的酶能使 Pb、Cd 形成难溶性磷酸盐（夏星辉、陈静生，1997）。细菌、放线菌比真菌对重金属更敏感，革兰氏阳性菌可吸收 Cd、Co、Ni、Pb 等。一般来说，微生物对重金属的氧化还原等作用也能降低重金属的毒性（李荣林等，2005）。

二、植物修复

植物修复是利用植物能忍耐或超积累某种或某些重金属的特性来修复重金属污染土壤的技术的总称。植物修复过程包括对污染物的吸收和清除，也包括对污染物的原位固定及分解转化，即植物根系过滤技术、植物萃取技术、植物挥发技术、植物固定技术、根际降解技术（韦朝阳、陈同斌，2001）。它是解决重金属污染问题的一个很有前景的方法，这一修复方法已经在全世界得到了迅速的发展和应

1. 植物固定

植物固定方法主要是利用耐重金属植物或超积累植物降低土壤中重金属的移动性，从而降低重金属被淋滤到地下水或者通过空气扩散使其进一步污染环境的可能性。在植物固定中，植物主要有两种作用：①保护受污染土壤不受侵蚀，通过减少土壤渗漏来防止有毒重金属污染物淋失；②通过根部积累和沉淀或根表吸收来加强土壤中金属污染物的固定（周启星，1999）。例如，Cunningham 等研究发现部分植物可降低土壤中 Pb 的生物有效性，缓解 Pb 对环境中生物的毒害作用。另外，植物还可以通过改变根际环境来改变污染物的化学形态，从而降低或消除重金属污染物的化学和生物毒性作用。植物固定并不是彻底清除土壤中的重金属，而是暂时将其固定，使其对环境中的生物不产生毒害作用，并没有彻底解决环境中的重金属污染问题。所以，植物固定主要适合于土壤质地黏重、有机质含量高的受污染土壤的修复。

2. 植物萃取

植物萃取（又称为植物提取技术）是植物修复的主要途径。植物萃取主要是利用重金属超积累植物从土壤中吸取一种或多种重金属，并将重金属转移、储存到植物的地上部分，然后通过收割植物地上部分进行集中处理，以使土壤中重金属含量降低到可接受水平的一种方法。常用作萃取的植物包括各种野生超积累植物或某些高产的农作物，如芸苔属植物：印度芥菜、油菜、杨树、苎麻等。目前主要去除污染土壤中的重金属 Pb、Cd 等。植物萃取技术的关键是所用植物必须具有生长快、生物量大和抗病虫害能力强的特点，并能够对多种重金属有较强的富集能力。

3. 植物挥发

植物挥发是利用植物的吸收、积累和挥发，减少土壤中一些挥发性污染物，即植物将污染物吸收到体内后，将其转化为气态物质释放到大气中，达到修复重金属污染土壤的目的（Sillanp, Virkntyt, 1999）。

Rugh 等研究表明，如果把源于细菌中的汞抗性基因转入植物体中，就可以使植物具有在通常情况下会中毒的汞浓度条件下正常生长的能力。而且这种植物还可以将土壤中吸取的汞还原成挥发性的单质汞，通过植物的蒸腾作用挥发到大气中。例如，水稻、花椰菜、卷心菜、胡萝卜和一些水生植物，具有较强的吸收和挥发土壤或水中 Se 的能力。将毒性较强的无机硒转变为基本无毒的二甲基硒。海藻能吸收并挥发砷，即把 $(\text{CH}_3)_2\text{AsO}_3$ 挥发出体外。植物挥发技术不要求收获和处理含污染物的植物体，这是一种有很大开发潜力的植物修复技术。但是这种方法将污染物转移到大气中，对人类和其他生物具有一定的风险（龙新宪，2002）。

4. 根系过滤

根系过滤技术(又称植物过滤技术)是指利用耐重金属植物或超累积植物庞大的根系过滤、吸收、沉淀、富集污水或土壤中的重金属元素后,将植物收获并进行妥善处理,达到修复受重金属污染土壤或水体的目的。陆生植物、半水生植物和水生植物均可以作为根系过滤植物。植物的幼苗对重金属的去除作用明显,因为植物幼苗根系表面积与体积的比值较大,生长迅速,吸附有毒离子的能力强,所以清除重金属的效果较明显。目前常用的植物大多是各种耐盐的野草,如加克拉莎草、印度芥菜、弗吉尼亚盐角草、盐地鼠尾粟、向日葵及各种水生植物。

5. 超累积植物

无论是植物萃取、挥发还是植物固定、根系过滤作用,植物本身的特性才是决定污染治理效率的关键。所以,寻找与筛选适宜的植物始终是植物修复研究的一项重要任务。能够富集重金属元素的植物也不断被人们发现。

目前,普遍认为重金属含量超过一般植物 100 倍的植物属于超累积植物,即 Cr、Co、Ni、Cu、Pb 含量应在 1000 mg/kg 以上, Mn、Zn 含量应在 10 000 mg/kg 以上。现已发现 As、Cd、Co、Cu、Mn、Ni、Se 和 Zn 等元素的超累积植物达 700 多种,其中半数以上属于 Ni 超累积植物。

总而言之,植物修复技术的关键是寻找适当的超累积植物或耐金属植物。以后,关于植物修复技术的研究重点将主要放在以下几个方面:①寻找、筛选、引种、培育超累积植物;②分子生物学和基因工程技术的应用;③加强植物修复技术的实践性环节;④加强对超累积植物的机理及其回收的处理研究。

三、动物修复

动物修复在国外产生较早,我国关于动物修复的研究还处在探索阶段。这一方法主要是将生长在污染土壤中的植物体、果实等投喂给动物,通过分析动物发生的变异来研究污染土壤的污染状况;也可以把污染土壤直接投喂给动物,如蚯蚓、线虫等进行研究。土壤中的蚯蚓可以吸收或富集土壤中的残留农药,并通过代谢作用把部分农药分解为低毒或无毒产物。在土壤中还有很多的小动物群,如跳虫、蜈蚣、蜘蛛、土蜂等,都可以对土壤中的农药有一定的吸收和富集作用,可以去除土壤中的部分农药。

四、生态修复

生态修复主要是利用培育的生物或培养接种微生物的生命活动,对污染物进行转移、转化及降解,从而去除环境中的污染物。实际上,这是对环境恢复力和自净能力的强化。开发生态技术是环境治理的研究热点。现在开发的生态技术,主要是按照仿生学的原理对自然界恢复能力和自净能力的强化,即按照自然界自身的规律来恢复自然环境。这是人类与环境和谐相处的、合理的、符合逻辑的治理环境污染的思路,同时也是一个新的技术。

第四节 生物修复案例及分析

一、河道污水的生物修复

案例一:广州河道污水的生物修复

广州白云区利用河道生物修复技术治理河道污染效果比较显著。白云区每天向河道内排入超过 5000t 的生活和工业废水,为了解决这一问题当地环保部门选择了 2300m 的河道作

为试点（图 1-1）。这些河道主要排入的是石井工业区的工业废水和红星、庆丰等村的生活污水，选取的河段在最近十多年来都是臭气熏天的状态，河道里积成了 1.3m 厚的黑臭淤泥。

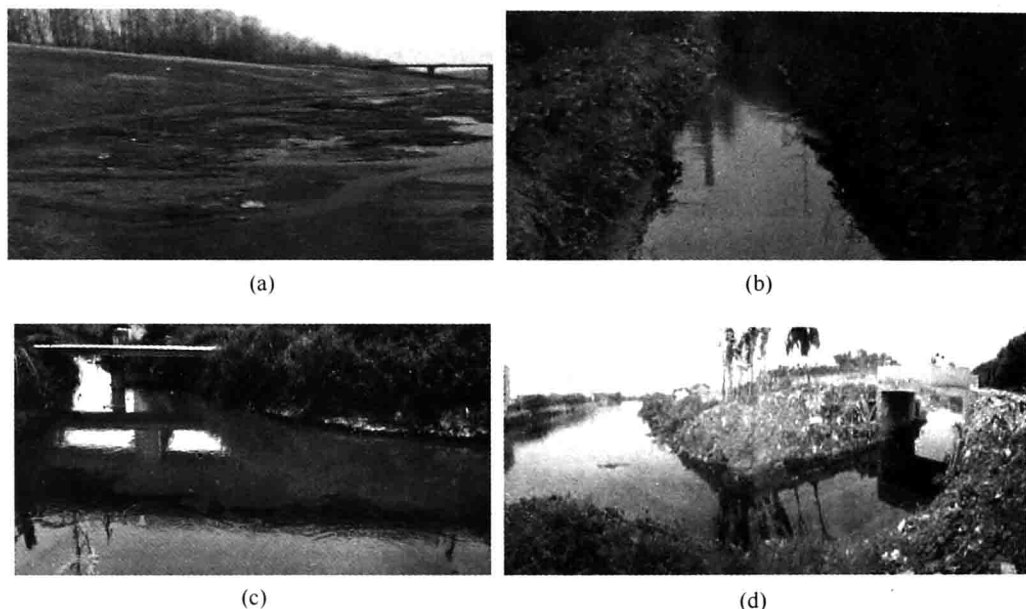


图 1-1 受污染的河道

(a) 淤塞的河道；(b) 污水在河道中流淌；
(c) 河道中泥浆水和正常水体交汇；(d) 生活垃圾的肆意堆放

开始时，很多村民都说这些河道治理不了，就是治理也没用，这个河道多少年都是这样。但是，从 2003 年 7 月末开始，研究人员取底泥、氧化塘、扩增底泥微生物、全河段撒底泥土著微生物，采取水体生物修复、人工增氧及生态修复河道等一系列的措施，使黑臭水体逐渐由黑色变为白色。氧化塘是治理河道的主体，其中的生物种群主要有细菌、藻类、原生动物、后生动物等，这个系统主要是依靠藻类的光合作用和水表面风力搅动自然供氧，利用河道的淤泥提供生物生长所必需的营养物质。8 月 5 日，下游潮汐河道已经基本消除了黑臭的味道，并逐渐由黑色转为绿色，河道内也发现了零星的小鱼。到 8 月 10 日，河道里的水质已基本稳定，水体颜色和潮汐水体基本一致，呈现出碧绿色，透明度最高达到 60cm 左右，并且在此后的时间里水体透明度逐步增加（图 1-2），最终使 5000t 的黑水变为绿水，这在很大程度上减少了黑臭水体向珠江水系的排放。这正是应用了生物修复技术，实现了广州人所梦想的河道美景。



图 1-2 治理后的水体水质