

环 / 境 / 保 / 护 / 与 / 科 / 学 / 发 / 展 / 观 / 丛 / 书

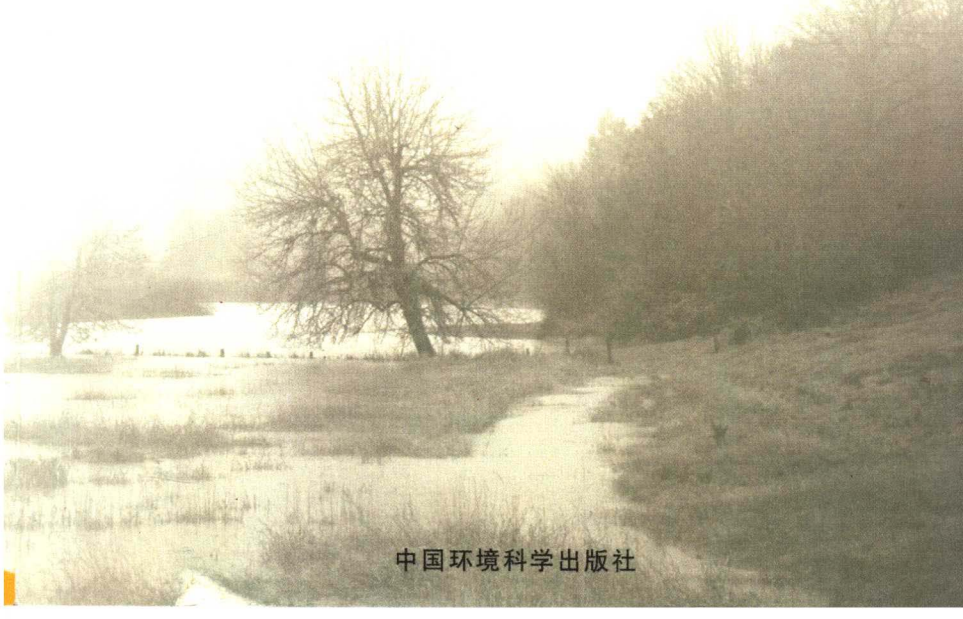
ECOLOGICAL

REMEDICATION

生态修复

周启星 魏树和 张倩茹 等编著

中国环境科学出版社



环境保护与科学发展观丛书

生态修复

周启星 魏树和 张倩茹 等编著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

生态修复 / 周启星等编著. —北京: 中国环境科学出版社, 2006.1

(环境保护与科学发展观丛书)

ISBN 7-80209-256-6

I. 生… II. 周… III. 生态环境—环境治理—研究IV. X171.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 002139 号

环境科学与工程出版中心

电话(传真): 010-6711 2735

网 址: www.cesp.cn

电子信箱: sanyecao@cesp.cn

本中心立足于出版环境科学与工程各类专业图书。以服务为宗旨, 以市场为导向。做绿色文明的倡导者, 充当环境文化的传播者。

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.cn>

联系电话: 010-67112765 (总编室)

发行电话(传真): 010-67125803

印 刷 北京东海印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2006 年 1 月第 一 版
印 次 2006 年 1 月第 一 次 印 刷
印 数 1—5 000
开 本 787×1092 1/32
印 张 8
字 数 180 千字
定 价 26.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

我们提出树立和落实科学发展观，就是要以实现人的全面发展为目标，让发展的成果惠及全体人民；就是要以经济建设为中心，实现经济发展和社会全面进步；就是要统筹城乡发展、统筹区域发展、统筹经济社会发展、统筹人与自然和谐发展、统筹国内发展和对外开放，推进生产力和生产关系、经济基础和上层建筑相协调；就是要促进人与自然的和谐，走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路。

胡锦涛 2004 年 6 月 2 日在两院院士大会上的讲话

前 言

随着工农业生产的发展和人民生活水平的提高，环境中污染物的种类和数量在不断增加，复合污染已成为环境污染最为突出的特点之一，也是环境科学与工程研究中面临的最为棘手的重大问题。为了彻底解决环境的污染问题，特别是复合污染问题，促成了生态修复技术的产生和发展。近年来，污染环境微生物修复、植物修复、动物修复和酶学修复得到了长足的发展，物理修复、化学修复和物理-化学修复等传统技术也得到了较大的创新，也为生态修复这一新兴技术的发展奠定了基础和物质条件。

生态修复作为污染环境修复最为完美的技术，既是污染环境修复技术领域的理念，又是一项实实在在的可实施的尖端技术。可以说，如何使这一处于前沿的技术发挥最大的作用和效果，尤其使生态修复的思想尽快扎根于广大环保科技工作者的心中，特别是渗入到广大环保管理部门管理人员的管理思维中，并对其管理行为产生广泛和深远的影响，成为本书的最大宗旨。

本书共分六章。第一章，从解决环境污染的有效途径与新技术开发的战略高度对生态修复进行了理论上的阐述；第二章，对作为生态修复基础的生物修复技术及其进展进行了“追根溯源”；第三章，对作为生态修复构成要素的物理修复、化学修复进行了扼要介绍；第四章，涉及了植物修复这一生态修复基本形式的论述与简介；第五章，选择性地介绍了污染环境修复标

准以及有关的污染环境修复评判的方法；第六章，生态修复实施与研究展望。各章作者分别为：第一章，周启星；第二章，张倩茹、宋玉芳；第三章，周启星、郭观林、华涛、于颖；第四章，魏树和；第五章，周启星、王美娥、晁雷；第六章，周启星。

在此值得一提的是，《污染土壤修复原理与方法》（周启星、宋玉芳等著，2004）所针对的修复对象主要是围绕污染土壤及地下水进行的，而本书所涉及的修复对象不仅涉及了污染土壤及地下水，而且还包括了污染地表水，甚至污染的大气环境，是在生态系统整体水平上的修复。这是两本书的主要区别。当然，前者是一本专业性很强的学术专著，而后者是一本通俗易懂，更适合不同层次、不同专业、不同行政管理领域甚至广大一般读者阅读的书籍。因此，希望本书的出版，使生态修复这一技术得到更为广泛的认可、应用和实践。

最后，我们殷切希望广大读者和有关领导、专家对本书提出批评指正，愿本书成为有关人员的良师益友，从而共同推动污染环境修复领域的向前发展。

作 者

2005年5月1日于北京

目 录

第一章 生态修复——解决环境污染的有效途径与新技术

第一节 基本概念	2
一、环境污染与污染环境	2
二、污染环境的治理与修复	3
三、生物修复	4
四、植物修复	5
五、物理修复	6
六、化学修复	6
第二节 生态修复	8
一、生态修复的定义与特点	8
二、生态修复的机制与基本方式	10
三、生态修复有待解决的关键技术问题	18
第三节 生态修复的意义及技术的发展	23
一、最终解决环境污染的措施	23
二、经济有效性	24
三、污染环境修复技术的发展	25

第二章 生物修复——生态修复的基础

第一节 生物修复基本原理概述	36
一、微生物对污染物的作用	36
二、生物修复影响因素分析	39
第二节 原位生物修复	48
一、什么是原位生物修复	48

二、原位生物修复技术类型	49
三、系统参数与设计	50
第三节 异位生物修复	52
一、什么是异位生物修复	52
二、异位生物修复技术类型	52
三、系统参数与设计	56
第四节 生物修复的实施与应用	59
一、生物修复的实施	59
二、应用实例	62
第五节 生物修复效果评价	65
一、机遇与挑战并存	65
二、生物修复效果的判断	66

第三章 物理与化学修复——生态修复的构成要素

第一节 物理修复技术	72
一、物理分离修复技术	72
二、蒸汽浸提修复技术	77
三、固化/稳定化修复技术	80
四、玻璃化修复技术	84
五、热力学修复技术	88
六、热解吸修复技术	91
七、冰冻修复技术	94
八、隔离包埋技术	95
第二节 化学修复技术	96
一、化学淋洗修复技术	96
二、溶剂浸提修复技术	102

三、化学氧化修复技术.....	103
四、化学还原与还原脱氯修复技术.....	105
五、原位化学反应处理墙.....	106
六、电化学修复技术.....	107
第四章 植物修复——生态修复的基本形式	
第一节 植物修复基本原理.....	112
一、概述.....	112
二、植物根际圈对污染物的修复过程.....	117
三、污染物在植物体内的转运与积累.....	120
第二节 重金属的植物修复.....	122
一、重金属污染途径与特点.....	122
二、植物对重金属的避害机制.....	123
三、重金属的植物挥发修复.....	125
四、重金属的植物稳定修复.....	125
五、重金属的植物提取修复.....	127
六、植物提取修复技术的构建.....	136
第三节 有机污染物的植物修复.....	145
一、环境中主要有机污染物及其植物修复的 可行性.....	145
二、多环芳烃的植物修复.....	148
三、石油污染的植物修复.....	151
四、农药污染的植物修复.....	152
五、其他有机污染物的植物修复.....	155
六、有机污染植物修复强化措施.....	156

第五章 污染环境修复标准——生态修复评判基础	158
第一节 污染环境修复标准的制定	160
一、环境质量标准	160
二、污染环境修复标准的制定	163
第二节 一些发达国家污染土壤修复标准	169
一、美国	169
二、澳大利亚	184
三、丹麦	184
四、英国	187
五、荷兰	190
六、法国	195
第三节 污染土壤修复效果评判	202
一、有关概念与内涵	202
二、污染土壤修复效果评定方法	202
第六章 生态修复——实施与研究展望	
第一节 如何商业化与产业化的问题	216
一、研究与发展	216
二、市场定位	217
三、技术实施	217
第二节 今后研究展望	220
一、存在问题	220
二、技术局限性	224
三、研究展望	226
主要参考文献	228

大气、水体、土壤是人类赖以生存的自然环境要素，其不同组合方式形成了多种多样的生存空间。人类在直接或间接地从自然环境中攫取生活、生产必需的物质和能量的同时，也不断地将各种有毒有害污染物排入环境，但由于环境系统的稀释、扩散、转化和降解等自然净化作用，在人类发展的相当长的一段时期内并没有对人类本身造成较大的危害。

随着地球上人口的骤增和工农业生产的迅速发展，特别是工业革命以来，人类对自然资源需求水平不断提高，生产强度日益加大，有毒、有害废弃物不断地输入环境，远远超过了环境的自净能力而导致环境污染日益严重。为了解决人类面临的这个重大问题，对于大气污染和地表水污染治理的研究已十分广泛，许多技术已相当成熟并被广泛应用。

对于污染土壤及地下水的治理来说，由于其具有隐蔽性、滞后性、累积性以及难治理和修复周期长等区别于大气和地表水体污染的特点，其修复问题已成为环境科学研究日益活跃的领域，同时也是世界性难题。虽然人们已在污染土壤及地下水物理修复和化学修复领域进行了有益探索，形成了一些实用技术，但这些修复方法往往会破坏场地结构、造成二次污染，对于污染面积巨大且污染程度较轻的土壤甚至难以应用。为此，近年来，人们在污染环境的物理修复、化学修复甚至生物修复取得一定成功基础上，进一步提出了生态修复的理念，并对其概念、内涵、原理、产业化途径等进行了理论上的探讨和实践上应用的探索，试图以生态学的原理和方法，在污染环境的修复与治理过程中实现人与自然的和谐发展，从而达到可持续发展。

第一节 基本概念

一、环境污染与污染环境

环境污染和污染环境是使用比较频繁，同时也是比较容易产生混淆的两个不同概念。

污染环境 (contaminated environment) 是指被污染了的环境，其内在含义是经过量化指标或其他评估方法评价之后，确认环境已经受到了污染。

2 环境污染是比较定性的概念，表明并不是有害物质或因子进入环境就等于产生了污染，而必须当这些外来物质使环境系统结构和功能发生本质变化且产生不利影响时，才造成污染。其中能够造成环境污染的物质或因子则被称为环境污染物，简称为污染物。

环境污染 (environment pollution) 是指有害物质或有害因子输入大气、水和土壤等环境介质，并在这些环境介质中扩散、迁移和转化，使生态系统的结构与功能发生变化，对人类或其他生物的正常生存和发展产生不利影响的现象。

环境污染源可分为自然污染源和人为污染源，对人类生产和生活造成重大影响的通常为人为污染源，包括化学污染物和生物类污染物（如肠细菌、炭疽杆菌和病毒等）。化学污染物主要分为有机污染物和无机污染物两大类。

- ◆ 有机污染物主要是指化学农药、酚、多环芳烃、多氯联苯、石油烃等。
- ◆ 无机污染物主要是指重金属如镉、汞、铅、砷、铬、

镍、铜、锌等，放射性核素如铯、锶、铀等，营养物质如氮、磷、硫等，还有其他物质如氟、酸、碱等。

环境污染具有以下基本特征：

1. 人体健康效应

正在显著地对人体健康产生危害或引起这种危害的可能性很大，其中这里的显著“危害”主要是指死亡、疾病、严重伤害、基因突变、先天性致残或对人的生殖功能造成损害等不良健康效应，如致癌、肝脏功能紊乱和皮肤病等，甚至包括污染导致的精神紊乱或分裂症。

2. 动物或作物效应

正在显著地对动植物生长发育和繁殖产生危害或引起这种危害的可能性很大，包括导致家畜、野生动物、作物或其他生命体的死亡、疾病或其他物理损害。

3. 水污染效应

正在导致主要水体受到污染或可能受污染，也就是说，只要存在与该土壤接壤的各种水体（包括地表水和地下水），都有受到污染的风险。

4. 生态系统效应

正在显著地影响或危害生态系统及其他重要组分，而且这种危害使生态系统功能产生不可逆转的不良变化，涉及对特有或珍稀生物物种的不良效应。

5. “财产损失”效应

主要是指对人类拥有的各种财产的损害作用，如对建筑物结构的损害、对房产占有权的干扰等。

二、污染环境的治理与修复

污染环境的治理与修复也是两个非常容易混淆的概念，两者使用均相当频繁，许多时候甚至互相替代。其实，两者

是有差别的。通俗地说，治理有些“治标”的意味，而修复则是“标本兼治”并“复原”。

治理 (treatment) 是指采用一些措施使受污染的环境不再对系统中生物或其周围环境产生负面影响。

修复 (remediation) 是在使污染环境得到治理后，虽然可能会在结构上发生某些变化，但最终还能够恢复未污染之前的功能，使污染环境重新焕发生机与活力而被重新使用。

随着可持续发展战略的深入人心，人们对治理也赋予了更高的要求，即使在污染环境得到控制的同时，也要将环境中污染物去除或做无害化处理。从这个意义上来讲，治理与修复两个概念往往很容易混用。

三、生物修复

生物修复 (bioremediation) 一般来说，生物修复主要是指微生物修复，即利用天然存在的或人为培养的专性微生物对污染物的吸收、代谢和降解等功能，将环境中有毒污染物转化为无毒物质甚至于彻底去除的环境污染修复技术。

生物修复之所以主要是指微生物修复，是因为人类最早利用生物来修复污染环境的生命形式主要是微生物，而且对于污水处理来说其应用技术比较成熟，影响也极其广泛。但生物包括微生物、植物、动物等生命形式，特别是近些年来，植物修复已成为环境科学的热点，同时也为公众所接受，因而，广义的生物修复既包括微生物修复、植物修复，也包括植物与微生物的联合修复，甚至还涉及土壤动物修复和细胞游离酶修复等有生命活动参与的修复方式。

四、植物修复

植物修复 (phytoremediation) 是指利用植物及其根际圈微生物体系的吸收、挥发和转化、降解的作用机制来清除环境中污染物质的一项新兴的污染环境治理技术。

植物修复途径主要包括：

- ◆ 利用超积累植物,去除污染土壤或水体甚至大气中的重金属;
- ◆ 利用挥发植物,以气体挥发的形式修复污染土壤或水体;
- ◆ 利用固化植物,钝化土壤或水体中有机或无机污染物,使之减轻对生物体的毒害;
- ◆ 利用植物本身特有的利用、转化或水解作用,使环境中污染物得以降解和脱毒;
- ◆ 利用植物根际圈共生或非共生特效降解微生物体系的降解作用,清洁有机污染物污染的土壤或水体;
- ◆ 利用绿化植物,净化污染空气。

广义的植物修复包括利用植物净化空气(如室内空气污染和城市烟雾控制等),利用植物及其根际圈微生物体系净化水体(如污水的湿地处理系统、水体富营养化的防治等)和治理污染土壤(包括重金属及有机污染物等)。狭义的植物修复主要指利用植物及其根际圈微生物体系清洁污染土壤或污染水体,而通常所说的植物修复主要是指利用重金属超积累植物的提取作用去除污染土壤或水体中的重金属。

能够达到污染环境修复要求的特殊植物统称为**修复植物**,如对空气净化效果好的绿化树木和花卉等;能直接吸收、转化有机污染物质的降解植物;利用根际圈生物降解有机污染物的根际圈降解植物;以及提取重金属的超积累植物、挥

发植物和用于污染现场稳定的固化植物等。

要将植物修复与微生物修复截然分开是不可能的，因为对于绝大多数植物来说，植物的生命活动与其根际环境中微生物的生命活动是密不可分的，许多情况下还形成共生关系，如菌根（真菌与植物共生体）、根瘤（细菌与植物共生体）等。在修复植物对污染物起作用的同时，其根际圈微生物体系也在起作用，只不过植物对污染物修复起绝对作用，因而，还应称其为植物修复。而对于以微生物降解为主要机制的根际圈生物降解修复来说，对污染物起到修复作用的主要是根际圈微生物体系，植物虽然对污染物也起到某些直接降解或转化作用，但主要是微生物在起主导作用，植物只是为这些微生物更好地生存创造了有利条件，但这些条件却是至关重要的。因此，根际圈生物降解修复也可以叫做植物—微生物联合修复。

五、物理修复

物理修复 (physical remediation) 是根据物理学原理，采用一定的工程技术，使环境中污染物部分或彻底去除或转化为无害形式的一种污染环境治理方法。

相对于其他修复方法，物理修复一般需要研制大中型修复设备，因此其耗费也相对昂贵。

物理修复方法很多，如大气污染治理的除尘（重力除尘法、惯性力除尘法、离心力除尘法、过滤除尘法和静电除尘法等），污水处理的沉淀、过滤和气浮等，污染土壤修复的置土/换土法、物理分离、蒸汽浸提、固定/稳定化、玻璃化和低温冰冻等。

六、化学修复

依赖于污染介质的特征和污染物的不同，化学修复手段

可以是将液体、气体或活性胶体注入地表水、下表层介质、含水土层，或在地下水流经路径上设置可渗透反应墙，滤出地下水中的污染物。注入的化学物质可以是氧化剂、还原剂/沉淀剂或解吸剂/增溶剂。不论是传统的井注射技术，还是现代的各种创新技术，如土壤深度混合和液压破裂技术，都是为了将化学物质渗透到土壤表层以下或者与水体充分混合。通常情况下，都是根据污染物类型和土壤特征，当生物修复法在速度和广度上不能满足污染土壤修复的需要时才选择化学修复方法。

化学修复 (chemical remediation) 是利用加入到环境介质中的化学修复剂与污染物发生一定的化学反应，使污染物被降解和毒性被去除或降低的修复技术。

化学修复方法应用十分广泛，如气体污染物治理的湿式除尘法、燃烧法，含硫、氮废气的净化等；污水处理的氧化、还原、化学沉淀、萃取、絮凝等。相对于其他污染土壤修复技术来讲，化学修复技术发展较早，也相对成熟。污染土壤化学修复技术目前主要涵盖以下几方面的技术类型：

- ◆ 化学淋洗技术；
- ◆ 溶剂浸提技术；
- ◆ 化学氧化修复技术；
- ◆ 化学还原与还原脱氯修复技术；
- ◆ 土壤性能改良修复技术等。

化学氧化修复技术是一种快捷、积极，对污染物类型和浓度不是很敏感的修复方式；化学还原和还原脱氯法则作用于分散在地表下较大、较深范围内的氯化物等对还原反应敏感的化学物质，将其还原、降解；而原位化学淋洗技术对去除低溶解度和吸附力较强的污染物更加有效。

选择何种修复手段，要依赖于仔细的土壤或地表水实地勘察和预备试验的结果。