

生态修复理论与技术

SHENGTAI XIUFU LILUN YU JISHU

“十二五”国家重点图书



市政与环境工程系列丛书

刘冬梅 高大文 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书
市政与环境工程系列丛书

生态修复理论与技术

刘冬梅 高大文 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

地球上的生态环境破坏和被污染现象时有发生,如何进行有效的生态修复是人们亟待解决的世界性问题。本书针对这一问题进行了全面介绍和探讨,内容主要包括当前生态环境破坏和污染现状、生态修复原理和方法、水域生态系统的修复与实践、湿地生态系统以及海洋和海岸带生态系统的修复、土壤污染的特点和生态危害、重金属污染土壤和有机物污染土壤的修复等的介绍和阐述。

本书针对当今不同生态系统的环境问题,分析了其现状、成因和解决的原理及方法,并给出了大量的实际工程案例,可以作为环境科学、环境工程和市政工程等学科本科生、研究生的专业授课书和参考书,也可作为与环境相关工作人员的理论基础参考书、指导书。

图书在版编目(CIP)数据

生态修复理论与技术/刘冬梅,高大文编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2017.5
ISBN 978-7-5603-6659-3

I. ①生… II. ①刘… ②高… III. ①生态恢复
IV. ①X171.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 111850 号

策划编辑 贾学斌
责任编辑 王晓丹
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 9 字数 205 千字
版 次 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-6659-3
定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

近年来,随着工业脚步的逐渐加快和城市化进程的不断推进,环境污染问题已成为全球性问题,引起了各界的强烈关注,因而对受污染的环境进行治理、修复和再生显得尤为重要。对于污染环境的治理问题,除传统的物理和化学方法以及逐渐成熟的生物方法外,人们也在极力探索解决问题的新方法和途径,并试图让环境保护与发展二者相协调,由此,恢复生态学和污染生态学应运而生。利用恢复生态学和污染生态学的原理和方法来解决环境问题备受瞩目,相关报道不断出现。针对这些现实状况,作者编写了本书,对指导相关专业工作者具有很重要的意义。

本书分为7章,将目前存在的生态环境问题进行了细致分类,并针对不同污染类型给出更加贴切的修复理论和手段,力求语言简明扼要,理论深入浅出。第1章绪论,介绍生态修复的定义、基本原理以及主要方法。第2章水域生态系统的修复与实践,主要介绍河流、湖泊、小流域和地下水等水域的修复原理和方法。第3章湿地生态修复,内容涵盖湿地生态系统的结构和功能介绍,以及湿地修复的过程与方法。第4章海洋和海岸带生态系统的修复,主要包括珊瑚礁生态系统、红树林生态系统、海滩生态系统和海岸沙丘生态系统的修复。第5章土壤污染生态学,由土壤与土壤污染、土壤污染发生及其动力学、土壤污染的生态危害3个部分组成。第6章重金属污染土壤修复的理论与技术,介绍土壤重金属污染、修复方法分类、修复的理论基础和修复技术等。第7章有机物污染土壤修复的理论与技术,涵盖土壤的有机物污染,以及有机物污染土壤的原位修复和异位修复。本书编写过程中为体现方法的可行性,选入了大量经典的实际工程案例。

本书由刘冬梅主持撰稿,第1~4章由刘冬梅撰写,第5~7章由高大文撰写,最后全书由刘冬梅统稿。本书还参考和引用了大量国内外近年发表的文献和期刊,主要文献列于书后。

由于作者水平和能力有限,书中错误和不当之处在所难免,敬请广大同行、专家和读者批评指正。

刘冬梅 高大文

2017年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 生态修复的定义与特点	1
1.1.1 生态修复的定义	1
1.1.2 生态修复的特点	2
1.2 生态修复的基本原理	3
1.2.1 污染物的生物吸收与积累机制	3
1.2.2 有机污染物的转化机制	3
1.2.3 有机污染物的生物降解机制	4
1.3 生态修复的主要方法	5
1.3.1 物理修复	5
1.3.2 化学修复	5
1.3.3 微生物修复	6
1.3.4 植物修复	6
1.3.5 自然修复	7
第 2 章 水域生态系统的修复与实践	8
2.1 河流生态系统的健康评价步骤	8
2.2 河流生态系统的修复	9
2.2.1 河流生态系统的结构与功能	11
2.2.2 人类对河流生态系统的影响	15
2.2.3 河流生态系统修复的理论依据	16
2.2.4 河流生态系统修复的目标与内容	18
2.2.5 河流生态系统修复的原则、方法与存在的问题	20
2.2.6 河流生态系统修复的实例分析	23
2.3 湖泊生态系统的修复	24
2.3.1 湖泊的类型与特点	26
2.3.2 湖泊的结构与生态功能	28
2.3.3 人类活动对湖泊的影响	30
2.3.4 湖泊生态系统修复的基本原理	32
2.3.5 湖泊生态系统修复的生态调控	34

2.3.6	湖泊生物操纵管理措施	38
2.3.7	湖泊生态系统修复实例分析	40
2.4	小流域治理与生态修复	42
2.4.1	小流域生态系统的概念、分类和特点	42
2.4.2	小流域水土流失治理技术	43
2.4.3	小流域综合治理与生态修复实例	49
2.5	地下水的生态修复	53
2.5.1	地下水形态	53
2.5.2	地下水污染物分布	55
2.5.3	地下水修复工程设计步骤	55
第3章	湿地生态修复	60
3.1	湿地的概念与类型	60
3.2	湿地的结构和功能	60
3.2.1	湿地的结构	60
3.2.2	湿地的功能	61
3.3	人类对湿地生态系统的影响	61
3.4	湿地生态修复的目标与原则	63
3.4.1	湿地生态修复的目标	64
3.4.2	湿地生态修复的原则	65
3.5	湿地生态修复的过程和方法	65
3.5.1	湿地生态修复的过程	66
3.5.2	湿地生态修复的方法	66
3.6	湿地生态修复的检验与评价	71
3.6.1	湿地生态修复的生物检验	71
3.6.2	湿地生态修复评价	71
3.7	湿地生态系统修复工程实例	72
第4章	海洋和海岸带生态系统的修复	75
4.1	珊瑚礁生态系统的修复	76
4.1.1	珊瑚礁生态系统的特征	76
4.1.2	珊瑚礁生态系统的功能	77
4.1.3	珊瑚礁生态系统受损的原因	78
4.1.4	受损珊瑚礁生态系统修复的技术和方法	78
4.2	红树林生态系统的修复	81
4.2.1	红树林的概念与特征	81

4.2.2	红树林的生态效益和社会经济价值	82
4.2.3	影响红树林生态系统的不利因素	83
4.2.4	红树林生态系统修复的技术和方法	84
4.3	海滩生态系统的修复	85
4.3.1	海滩生态系统的概述	85
4.3.2	海滩生态系统的功能	86
4.3.3	海滩生态系统的丧失和退化	87
4.3.4	海滩生态系统的修复技术和方法	87
4.4	海岸沙丘生态系统的修复	89
4.4.1	海岸沙丘生态系统的特征	89
4.4.2	海岸沙丘生态系统的功能	90
4.4.3	海岸沙丘生态系统受损的原因	90
4.4.4	海岸沙丘生态系统修复的技术和方法	90
第5章	土壤污染生态学	93
5.1	土壤与土壤污染	93
5.1.1	土壤环境的基本特征	93
5.1.2	土壤环境污染的基本特点	94
5.2	土壤污染发生及其动力学	95
5.2.1	土壤污染发生的概念	95
5.2.2	土壤污染动力学	96
5.3	土壤污染的生态危害	98
5.3.1	对植物的毒害及农产品安全危机	99
5.3.2	对动物的毒害及生态安全危机	100
5.3.3	对土壤微生物生态效应的影响	101
第6章	重金属污染土壤修复的理论与技术	103
6.1	土壤的重金属污染	103
6.1.1	环境中的重金属	103
6.1.2	世界土壤重金属污染	104
6.1.3	我国土壤重金属污染	105
6.2	重金属污染土壤修复技术的分类	105
6.2.1	按学科分类	105
6.2.2	按场地分类	107
6.3	重金属污染土壤修复的理论基础	107
6.3.1	土壤中重金属的动力学行为特征	107

6.3.2	植物修复重金属污染土壤的原理	107
6.3.3	微生物修复重金属污染土壤的原理	109
6.4	重金属污染土壤的植物修复技术	111
6.4.1	重金属超积累植物	111
6.4.2	超积累植物研究实例	113
6.4.3	植物修复技术的应用	114
6.5	重金属污染土壤的化学和物理化学修复技术	115
6.5.1	土壤中重金属的固定和稳定(S/S 技术)	115
6.5.2	电动力学修复	116
第7章	有机物污染土壤修复的理论与技术	119
7.1	土壤的有机物污染	119
7.2	有机物污染土壤的原位修复	120
7.2.1	原位修复的理论	120
7.2.2	原位修复技术	120
7.3	有机物污染土壤的异位修复	125
7.3.1	异位生物修复机理	125
7.3.2	异位修复技术	125
参考文献	127
名词索引	133

第1章 绪论

随着人口数量的剧增和工业化脚步的加快,人类过度开发利用不可再生资源,大面积植被因此遭受到不同程度的破坏,许多类型的生态系统也出现严重退化,继而引发了一系列的生态环境问题,如森林面积锐减,土地荒漠化,水土流失,空气污染加重,生物多样性降低,可利用水资源短缺等。这些日益加重的环境问题对人类的生存环境以及经济社会的可持续发展构成了严重的威胁。

1.1 生态修复的定义与特点

1.1.1 生态修复的定义

生态修复(Ecological Rehabilitation)是指利用生态工程学或生态平衡、物质循环的原理和技术方法或手段,对受污染或受破坏、受胁迫环境下的生物(包括生物群体,下同)生存和发展状态的改善、改良,或修复、重现。其中包含对生物生存物理、化学环境的改善和对生物生存“邻里”、食物链环境的改善等。

生态修复是以生态学原理为依据,利用特异性生物自身对污染物的代谢过程,同时借助物理、化学修复以及工程技术中某些强化或条件优化后的措施,使被污染环境得以修复。生态修复强调了当今社会中人类主体的能动性。因为在现代社会和当今生产力水平条件下,在有人类生产生活的生态系统中,只有以先进生产力为基础,充分发挥人的科学干预手段,才能尽快地实现被破坏生态系统的优化修复进程,并使之最大限度地服务于整个人类社会。

生态修复的出发点和立足点是整个生态系统,是对生态系统的结构与功能进行整体上的修复和改善,这样的一种宏观理念与思路,要求人们的思想观念、生产生活方式都要做变革,要更多地遵循自然规律,调整产业结构,提高环境人口容量,实现人与自然的和谐发展。

近年来有部分学者认为生态修复的概念应囊括生态修复、重建和改建,其内涵大体上可以理解为通过外界的物理、化学作用使受损(挖掘、占压、污染、全球气候变化、自然灾害等)的生态系统得到优化、修复、重建或改建(不一定与原来完全相同)。这与日本以及欧美国家的“生态修复”概念类似,但有别于环境生态修复的概念。按照这一概念,生态修复涵盖了环境生态修复,即非污染的退化生态系统,如毁林开荒等。水土流失和荒漠化可以通过退耕还林和封禁治理等手段修复生态系统,此过程可称为生态修复。并且,生态修复可以理解为“生态的修复”,即应用生态系统自组织和自调节能力对环境或生态本身进行修复。因此,我国生态修复在外延上可以从四个层面理解。第一个层面是污染环境的修复,即传统的环境生态修复工程概念。第二个层面是大规模人为扰动和破坏生态系

统(非污染生态系统)的修复,即开发建设项目的生态修复。第三个层面是大规模农林牧业生产活动破坏的森林和草地生态系统的修复,即人口密集农牧业区的生态修复,相当于生态建设工程或生态工程。第四个层面是小规模人类活动或完全由于自然原因(森林火灾、雪线上升等)造成的退化生态系统的修复,即人口分布稀少地区的生态自我修复。处于实施进程中的水土保持生态修复工程和重要水源保护地、生态保护区的封禁管护均属于这一范畴。第二、三、四层面综合起来即为生态修复学涉及的内容,这四个层面的生态修复可能在某一较大区域并存或交叉出现。与国外相比,我国的生态修复研究与实践主要在于两方面:一是工矿区扰动土地的人工生态重建,着重植物群落模式试验实践;二是退化草地和森林采伐或火烧迹地的修复,强调采取人工重建措施的快速性和短期性,相对忽视生态自我修复能力与过程的研究。图 1.1 中展示了国内的生态修复手段。



图 1.1 国内的生态修复手段

1.1.2 生态修复的特点

污染环境生态修复是以生态学原理为基础对多种修复方式进行优化综合,因此,其特点是:

- (1) 严格遵循和谐共存、循环再生、区域分异和整体优化等生态学原理。
- (2) 多学科交叉。

生态修复的实施,需要生态学、物理学、化学、植物学、微生物学、分子生物学、栽培学和环境工程等多学科的参与,因此,多学科交叉也是生态修复的特点。

- (3) 影响因素多而复杂。

生态修复主要是通过植物和微生物等的生命活动来完成的,影响生物活动的各种因素也将成为生态修复的重要影响因素,因此,生态修复也具有影响因素多而复杂的特点。

1.2 生态修复的基本原理

1.2.1 污染物的生物吸收与积累机制

土壤或水体受重金属污染后,植物会不同程度地从根际圈内吸收重金属,吸收数量的多少取决于植物根系生理功能及根际圈内微生物群落组成、氧化-还原电位、重金属种类和浓度、pH 以及土壤的理化性质等因素,其吸收机理尚不明确(主动吸收或被动吸收)。

1.2.2 有机污染物的转化机制

植物对重金属的吸收可能存在以下三种情形:

一是完全的“避”,究其原因,可能是当根际圈内重金属浓度较低时,植物根系依靠自身的调节功能完成自我保护。但也不排除这样的情况:无论根际圈内重金属浓度有多高,植物本身就具有这种“避”的机理,可以免受重金属毒害,但这种情形存在的可能很小。

二是植物通过自身的适应性调节,对重金属产生耐受性,虽然植物吸收根际圈内重金属,本身也能生长,但根、茎、叶等器官及各种细胞器会受到不同程度的伤害,使植物生物量下降。这种情形可能是植物根对重金属被动吸收的结果。

三是某些植物体内可能存在某种遗传机理,将一些重金属元素作为其生长增殖的营养源,所以即使根际圈内该元素浓度过高,植物也不受其伤害,超积累植物就属于这种情况。

植物根对中度憎水有机污染物有很高的去除效率,如 BTX(即苯、甲苯、乙苯和二甲苯)、氯代溶剂和短链脂肪族化合物等。有机污染物被植物吸入体内后,植物可以通过木质化作用将它们及其残片储藏在新生的组织结构中,也可以利用代谢或矿化作用将其转化为 CO_2 和 H_2O ,抑或使其挥发。根系对有机污染物的吸收程度取决于植物的吸收率、蒸腾速度和有机污染物的浓度。植物的吸收率取决于污染物的种类、理化性质及植物本身特性。其中,蒸腾作用可能是决定根系吸收污染物速率的关键变量,这涉及土壤或水体的物理化学性质、有机质含量及植物的生理功能,如叶面积,根、茎和叶等器官的生物量,蒸腾系数等因素。一般来说,植物根系对无机污染物,如重金属的吸收强度要大于对有机污染物吸收的强度,植物根系对有机污染物的修复,主要是依靠根系分泌物对有机污染物产生的络合和降解等作用。此外,植物根死亡后,向土壤释放的酶如脱卤酶、硝酸还原酶、过氧化物酶和漆酶等,也可以继续发挥分解作用。

细菌等微生物也可以积累大量的重金属,但由于这些微生物难以去除,并且虽然重金属在这些微生物体内可能会发生转化而暂时对环境无害,但微生物死亡后重金属又会重新进入环境并继续形成潜在危害。因此,这种机制对于重金属污染土壤或水体的修复意义不是很大。

植物降解功能也可以通过转基因技术得到增强,如把细菌中的降解除草剂基因转导到植物中产生抗除草剂的植物,这方面的研究已有不少成功的例子。因此,筛选、培育具有降解有机污染物能力的植物资源就显得十分必要。目前,植物降解有机污染物的研究

多集中在水生植物方面,这可能是水生植物具有大面积的富脂性表皮,易于吸收亲脂性有机污染物的缘故。阿特拉津是广泛使用的除草剂,土壤中残留十分严重。已有研究发现地肤属(*Kochia*)植物可明显地吸收阿特拉津,使土壤中多年沉积的阿特拉津量显著减少,且阿特拉津的降解不受其他农药如异丙甲草胺、氯乐灵的影响。

图 1.2 中展示了有毒有害有机物在环境中的降解方式。



图 1.2 有毒有害有机物在环境中的降解方式

1.2.3 有机污染物的生物降解机制

生物降解是指通过生物的新陈代谢活动将污染物分解成简单化合物的过程。这些生物包括部分动物和植物,但由于微生物具有各种独到的化学作用,如氧化-还原作用、脱羧作用、脱氯作用、脱氢作用和水解作用等,同时本身繁殖速度快,遗传变异性强,也使得它的酶系能以较快的速度适应发生变化的环境条件,并且微生物对能量利用的效率比动植物更高,因而具有将大多数污染物降解为无机物(如二氧化碳和水)的能力。由此可见,微生物在有机污染物降解过程中起到了很重要的作用,所以生物降解通常是指微生物降解。

微生物具有降解有机污染物的潜力,但有机污染物能否被微生物降解取决于这种有机污染物是否具有可生物降解性。可生物降解性是指有机化合物在微生物作用下转变为简单小分子化合物的可能性。有机污染物是有机化合物中的一大类。有机化合物由天然的有机物和人工合成的有机化合物两部分组成,天然形成的有机物几乎可以完全被微生物降解,而对于人工合成的有机化合物,其降解过程则复杂得多。多年研究表明,在数以百万甚至千万计的有机污染物中,绝大多数都具有可生物降解性,并且,有些专性或非专性降解微生物的降解能力及机理已被研究得十分清楚,但也有许多有机污染物是难降解或根本不能降解的,这就要求在加深对微生物降解机理的了解,以提高微生物降解潜力的同时,也要合成新的化学品用于可生物降解性试验。此外,对于那些不能生物降解的化学品应当明令禁止,只有这样才能更有利于人类和生态的可持续发展。

细菌不仅可以直接利用自身的代谢活动降解有机污染物,还能以环境中有机质为主要营养源,对大多数有机污染物进行降解,如多种细菌可利用植物根分泌的酚醛树脂(儿茶素和香豆素)降解多氯联苯(PCBs)以及 2,4-二氯苯氧乙酸(2,4-D)。细菌对低相对分子质量或低环有机污染物如多环芳烃 PAHs(二环或三环的)的降解,主要是将有机物

作为唯一的能源和碳源进行矿化,而对于高相对分子质量的和多环的有机污染物如多环芳烃 PAHs(三环以上的)、氯代芳香化合物、氯酚类物质、多氯联苯(PCBs)、二噁英及部分石油烃等则采取共代谢的方式降解。多数情况下这些污染物是被多种细菌产生的联合作用降解的,但有时也可被一种细菌降解。

1.3 生态修复的主要方法

1.3.1 物理修复

物理修复是根据物理学原理,利用一定的工程技术,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,如污水处理中的沉淀、过滤和气浮等,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),污染土壤修复的置稳定化、玻璃化、换土法、物理分离、蒸汽浸提、固定和低温冰冻等。

1.3.2 化学修复

化学修复是利用加入到环境介质中的化学修复剂能够与污染物发生一定的化学反应,使污染物被降解、毒性被去除或降低的修复技术。

由于污染物和污染介质特征的不同,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,滤出地下沉淀水中的污染物。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。不论是现代的各种创新技术,如土壤深度混合和液压破裂技术,抑或是传统的井注射技术,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,都是根据土壤特征和污染物类型,在生物修复法的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。

化学修复方法应用范围十分广阔,如污水处理的氧化、还原、化学沉淀、萃取和絮凝等;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。在污染土壤修复方面,化学修复技术发展较早,并且相对成熟。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:

- (1) 化学淋洗技术。
- (2) 溶剂浸提技术。
- (3) 化学氧化修复技术。
- (4) 化学还原与还原脱氯修复技术。
- (5) 土壤性能改良修复技术等。

化学淋洗技术能更有效地去除低溶解度和吸附力较强的污染物。化学氧化修复技术是一种对污染物类型和浓度不是很敏感的、快捷、积极的修复方式;化学还原与还原脱氯修复技术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。

1.3.3 微生物修复

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、代谢和降解等作用,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。

微生物是人类采取生物手段来修复污染环境最早的生命形式,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。

1.3.4 植物修复

植物修复是指利用植物及其根际圈微生物体系的吸收、挥发、转化和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:

(1)利用植物根际圈共生或非共生特效微生物的降解作用,净化有机污染物污染的土壤或水体。

(2)利用挥发植物,以气体挥发的形式修复污染土壤或水体。

(3)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。

(4)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。

(5)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及其根际圈微生物体系治理污染土壤(包括重金属及有机污染物质等)、净化水体(如污水的湿地处理系统、水体富营养化的防治等)以及利用植物净化空气(如室内空气污染和城市烟雾控制等)。狭义的植物修复主要指利用植物及其根际圈微生物体系净化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。

修复植物是指能够达到污染环境修复要求的特殊植物,如能直接吸收、转化有机污染物质的降解植物;对空气净化效果好的绿化树木和花卉等;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完全分开是不可能的,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,许多情况下还会形成共生关系,如菌根(真菌与植物共生体)、根瘤(细菌与植物共生体)等。所以,在修复植物对污染物质起作用的同时,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,将其称为植物修复。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,虽然植物对污染物也起到某些直接降解或转化作用,但起主导作用的是微生物,植物只是为这些微生物的生存创造了更加有利的条件,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称作植物-微生物联合修复。

1.3.5 自然修复

生态系统都具有自然修复的能力,包括污染物的自净化、植被的再生、群落结构的重构和生态系统功能的修复等。其理论基础主要包括:生物地球化学循环、种子库理论(生态记忆)、定居限制理论、自我设计理论、演替理论、生态因子互补理论等修复生态学的基本原理。对于污染物,生态系统通过生物地球化学循环具有自我净化的能力,例如土壤中的重金属可在物理、生物和化学作用下失活或转化,从而减轻重金属毒害。水资源中含砷、石油类等污染物,也可以自然衰减,降低环境风险。对于破坏的植被,根据定居限制理论,在生态系统修复前期可通过先锋植物、土壤种子库等为植被的再生提供基础,且这一能力十分突出,即使在重度损毁下依然存在着永久种子库。对于损毁的群落结构,生态系统可利用自身修复力,通过“种子库”所记录的物种关系形成先前稳定的群落结构,而根据自我设计理论,退化生态系统也能根据环境条件合理地组织自己形成稳定群落。对失去的生态系统功能,虽然自然修复很难像人工修复那样定向且全面地修复各影响因子,但生态因子的调节性能力、因子量的增加或加强能够弥补部分因子不足所带来的负面影响,使生态系统能够保持相似的生态功能,例如,土壤中微生物的增加,可以提高营养元素的活性从而弥补土壤肥力的不足,提高系统生物产量。

第2章 水域生态系统的修复与实践

地球有“水的星球”之称,水在推动地球及地球生物的演化、形成与发展过程中起着极为重要的作用。地球上的水主要由大气水(水汽、水滴和冰晶)、陆地水和海洋水三部分组成。许多学者将淡水生态系统、陆地生态系统与海洋生态系统并列为地球上的三大生态系统。作为生物圈重要的组成部分,水域(淡水、海洋)生态系统在维持全球物质循环、水循环和能量流动及调节全球气候中发挥着特殊作用。虽然全球水体面积占全球总面积的75%之多,远远大于陆地面积,但其中大部分是海水,陆地水面积极为有限。全球海洋水量占地球总水量的97.41%;陆地水体水量仅占总水量的2.59%;大气水量仅占地球水量的0.001%。全球陆地水(淡水)主要包括湖泊、水库、河流、土壤含水层和生物体中的液态水、冰川、积雪和永久冻土中的固态水等,其中人类不能直接利用的水体(如冰川和冰盖)和深层地下水占淡水总量的99%以上。由此可见,保护水资源,维护陆地水域生态系统的相对稳定,对人类的生存与发展尤为关键。本章中水域生态系统主要涉及流动的江河、溪流等和相对静止的湖泊、湿地等淡水生态系统。

淡水生态系统是指江河、湖泊、湿地、水库和池塘等内陆特定的水域生态系统。这些内陆水体不仅可以为人类提供食物、工农业生产及生活用水,而且具有渔业、航运、水利灌溉、发电、旅游休闲和净化污染物质等诸多社会经济价值。同时,这些水体也是各类野生动物理想的栖息地,具有极高的生物多样性,可为人类提供许多重要的生态服务功能。

然而,在过去的几十年中,随着人类生活水平的提高、人口的快速增长以及工农业生产的迅猛发展,人类对水资源的需求量急剧增加;同时,由于人类对水资源管理和利用缺乏科学的认识,造成了水资源随意开采、污染物的大量排入以及森林破坏(尤其是河岸植被带)等,严重影响和破坏了水域生态系统。而且,这种变化和破坏的程度是历史上任何时期所不具有的,水域生态系统自身及人工的修复速率也远远小于其受到损害的速率。水资源的损耗与短缺是水域环境严重破坏后的必然结果。

因此,如何延缓甚至阻止水域生态系统受损进程、维持其现有淡水生态系统的服务功能、修复受损水域生态系统和促进淡水资源持续健康发展已经成为当今国际社会关注的焦点之一。

2.1 河流生态系统的健康评价步骤

借鉴部分学者采用的河流健康等级分类法,以河流生态系统健康评价为基础,从多个层面去考虑进行河流生态系统的健康评价,进而确定修复手段等。具体步骤为:

(1)首先根据各个健康等级的描述,将健康、亚健康、脆弱、病态和恶劣5个等级分为3大类型,即将健康等级归为未损坏型的,均不需实施人工修复;将恶劣等级归为难以修复型的,表示暂时不进行修复;将亚健康、脆弱和病态等级作为待修复型,确定待修复的

对象。

(2)从水文状况出发,将水文状况为健康的归为水量充沛型,水文状况为亚健康、脆弱和病态的归为季节性断流型,水文状况为恶劣的归为常年断流型,对待修复型河流生态系统进一步分类。

(3)再根据水质状况,将水质状况为健康的归为未污染型,水质状况为亚健康、脆弱、病态和恶劣的归为污染型,对水量充沛型和季节性断流型的河流生态系统进一步分类。

(4)根据地貌和生物状况,将状况为健康的归为未破坏型,状况为亚健康、脆弱、病态、恶劣的归为破坏型,对河流生态系统进一步分类。

(5)最后根据不同类型河流生态系统的破坏特征,提出对应的修复模式。

2.2 河流生态系统的修复

今后的较长一段时间,我国仍将处于发展阶段。水污染仍是个一直存在的问题,并且还可能会导致局部水污染的进一步恶化。自改革开放起,部分持续排放的污染物质的累积形成了如今的水环境污染问题。从21世纪初来看,我国工业废水处理率虽已大幅度提高,但未被成功处理排放出去的污染物质绝大部分都是难降解污染物质,对水环境具有长期的潜在危害;全国城市生活污水处理率仍然极不乐观,大多数未经处理就直接排入水环境,生活污水成为主要的水污染源;我国已经认识到农业对水环境的严重影响,但是尚未采取全面的管理措施和监管手段进行有效的防治与查处。根据监测调查数据显示,我国半数以上的城市水环境污染问题比较严重,有的城市水环境仍在继续恶化。

被污染的城市水环境如图2.1所示。



图2.1 被污染的城市水环境

水环境中的污染物质直接导致水体和土壤的功能被破坏,使各种生物良好的生存状态被打破,或者污染物质通过“食物链”影响动物、植物和人类;并且污染物质能抑制分解者的活性,导致污染物质在环境中的持续积累。总之,污染物质的毒性表明其不能与环境