



普通高等教育“十三五”规划教材

Environmental Remediation Botany

# 环境修复植物学

蒋丽娟 主编



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

# 环境修复植物学

蒋丽娟 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是在综合国内外最新研究成果和编者及其研究团队多年研究工作的基础上写成的。本书介绍了环境修复植物学基本概念,植物修复国内外研究进展,植物修复技术的优势、发展前景及面临的主要问题;较为详细地介绍了植物修复理论与机制,植物大气、水体和土壤主要污染物的净化修复作用与反馈机制,污染修复植物筛选的理论基础、原则与方法;以图文的形式详细介绍了主要大气、水体、土壤污染修复植物的基本特征、生态适应性与环境修复作用,并用案例介绍了植物修复技术在水体污染治理、土壤重金属污染治理中的应用等内容。本书内容丰富,结构严谨,集科学性、技术性和实用性于一体。

本书可作为广大高等院校环境科学与工程、生态学、生物学等相关专业本科生、研究生全面、系统地了解大气、水体和土壤污染环境植物修复的概论,植物修复的理论、原理,植物资源及其技术应用的教材,也可为生态环境教学、科研工作者和环境工程从业者提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

环境修复植物学 / 蒋丽娟主编. —北京: 科学出版社, 2017.6

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-052607-6

I. ①环… II. ①蒋… III. ①绿化种植-作用-环境污染-污染防治-高等学校-教材 IV. ①S731 ②X5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第085160号

责任编辑: 丛楠 韩书云 / 责任校对: 李影

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年6月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张: 18 1/4

字数: 415 000

定价: 55.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《环境修复植物学》编写人员名单

主 编 蒋丽娟

编写人员 (按姓氏笔画排序)

刘 健 刘 强 张路红 陈韵竹 易心钰

易诗明 黄 蓉 蒋丽娟 雷 电

## 序

工业化规模生产工业和生活产品、矿山开采、石化能源过度消耗，一方面极大地满足了人们日益增长的物质需求，另一方面大量排放的污染物对土壤、水体和大气造成了持续的、严重的污染，环境日益恶化已经危及人类生存安全。我们赖以生存的土壤、水体和大气承载能力是有限的，自然界自我修复、降解耗时长。许多知名专家断言，治理生态环境恶化难题，其复杂性、艰巨性和长期性远远超过单一应对经济危机。面对超过自然平衡能力的环境污染，采用传统的环境工程手段已经无法应对日益复杂的污染治理难题，人们呼唤经济、安全、绿色、可持续的污染生态环境修复技术，探索一条绿色、可持续发展的治理道路。

从能源和物质循环来说，以不竭太阳能为能源动力供应的植物群落修复污染环境，具有绿色、低耗、安全及可持续等特点。首先，植物作为生态系统中的初级生产者，通过其生命活动过程中捕获二氧化碳转化成有机物，释放氧气，直接或间接地为其他异养和部分自养生物提供食物、能量和栖息场所，创造并维持着人类赖以生存的生活环境。其次，植物因光合作用这一特殊的生命活动而成为大气环境的平衡者、修复者和环境污染程度指示者；植物根、茎和叶具有的特殊形态结构发挥着防风固沙、保土蓄水的作用，影响或改造环境。而在被污染的环境中，植物能利用其吸收、降解、挥发、过滤和固定等作用，净化土壤、水体和空气中的无机和有机污染物，即植物的环境修复作用。因此，环境修复植物技术的研究、开发应用可以净化土壤、水体和空气中的无机和有机污染物，生产工业原料产品，生产生态产品，是真正的“一石三鸟”。可以说，植物修复既是一个对日益污染退化的生态环境进行修复的过程，也是人类在环境治理实践过程中遵循自然规律的一种选择。

近 60 年来，植物修复技术发展迅速，用植物清理被污染的水体与土壤的“植物疗法”得到应用，植物修复从一个经验性、利用传统植物进行污染物净化的研究发展成为一个利用现代科学理论与高新技术装备的、多学科渗透与交叉的现代化多级学科。对大气、水体及土壤不同污染的响应、反馈、净化等机制的研究不断深入，植物修复示范工程日益增多，但大多处于理论研究和探索阶段。与经典植物学相比，环境植物学和实验植物生态学虽然有了良好的开端，但尚未形成系统理论和技术体系。

蒋丽娟教授及其科研团队自 20 世纪 90 年代以来，一直从事环境植物、能源植物和油料植物的研究与开发工作，在长期的环境植物科研和教学岁月里，通过不断创新，在环境植物领域的理论探索和技术创新方面积累了丰富的理论基础和实践经验。《环境修复植物学》一书系统分析了国内外植物修复最新的发展动态、研究成果和发展趋势。编者全面总结所主持或者参与的“十一五”以来国家环境保护公益性行业科研专项“长株潭矿区污染控制与生态修复技术研究”、“十二五”科技支撑项目“铅锌矿区废弃地植被生

态修复与安全屏障建设技术试验示范”等重大科研课题对治理的关键技术攻关的阶段性创新成果，进一步阐明植物对不同污染物的响应、反馈、净化等机制，并深入揭示相关的科学问题。以植物资源材料、生物工程为基础，集成环境工程技术，分别在重金属污染区域、有毒有害污染湿地水体建立工程中示范并加以总结分析和推广应用。

《环境修复植物学》一书以服务支撑绿色发展理念为己任，率先把环境修复植物作为学科研究方向和研究领域分离出来加以系统研究，为植物资源在环境修复中的应用奠定了理论基础和建立了技术体系，并将大大推进我国植物环境修复事业的发展，为美丽中国、健康中国建设贡献先进理念、科学理论、绿色技术和产品。

该书从环境修复植物学基本概念、植物修复基础理论、修复植物筛选培育、资源介绍及植物修复应用示范进行了整体构架，内容丰富，结构严谨，集科学性、技术性和实用性于一体。该书的出版将为广大高等院校环境科学与工程、生态学、生物学等相关专业的本科生、研究生全面、系统地了解污染环境植物修复的理论基础与机制、修复植物的选育原则与方法、修复植物生物学的特征与功能，以及修复植物资源应用现状与应用方式提供工具，为生态环境教学、科研工作者和环境工程从业者提供参考。

我非常乐意推荐。

中国工程院院士

中国科学院亚热带农业生态研究所研究员

2016年10月

# 前 言

随着经济的迅速发展,资源消耗和环境污染成为全人类面临的重大挑战,环境保护成为全球共同关注的事业。针对各类环境污染与生态问题,全球开展了很多消除环境污染、修复生态环境的研发。

在众多修复净化途径中,生物修复成为重要的途径之一,而其中通过植物及其相关微生物的累积、解毒或稳定作用解除污染物毒害的植物修复因具有绿色、低耗、安全及可持续性等特点,近年来其理论和技术受到极大的重视并得到极大的发展。植物对大气、水体及土壤不同污染的响应、反馈、净化等机制的研究不断深入,植物修复示范工程日益增多,污染修复植物的筛选、培育取得了明显的突破,但资料来源于各类文献报道,且大多处于理论研究水平。为了帮助高等院校环境科学与工程、生态学及生物学相关专业的本科生、研究生全面、系统地了解植物修复污染环境的理论基础与机制、修复植物选育的原则与方法、修复植物生物学的特征与功能,以及修复植物资源应用现状与应用方式,我们组织编写了本书。

本书是在综合国内外最新研究成果和编者研究团队承担或参与的国家环保公益项目“长株潭矿区污染控制与生态修复技术研究”、“十二五”科技支撑项目“铅锌矿区废弃地植被生态修复与安全屏障建设技术试验示范”、“洞庭湖流域生态综合治理及可持续发展技术及示范”、国际科技合作项目“人工湿地污水处理系统中有效微生物与富集植物培育技术”、948项目“水环境保护中的湿地功能利用及生物修复技术引进”阶段研究成果的基础上写成的。

本书共分7章,从理论到实践应用比较系统地介绍了大气、水体和土壤污染植物修复的机制、修复植物筛选、资源植物介绍及植物修复应用示范。第1章绪论,包括环境修复植物学基本概念、环境修复植物学研究进展、现代生物技术在植物修复中的应用、植物修复技术的发展趋势与应用前景;第2章植物修复的理论基础与机制,包括植物修复的理论基础、机制与原则;第3~5章分别介绍植物对大气污染、水体富营养化与重金属污染及土壤重金属污染的修复,包括植物污染修复作用与机制、植物对不同污染物在不同水平的反馈、污染修复植物资源的选育与介绍;第6章介绍植物修复污染水体的模式与实践应用示范;第7章介绍植物修复重金属污染土壤的设计过程与应用示范实例,以期将最新的植物修复研究成果应用于环境治理与保护实践中。

本书涉及的植物形态特征、生长习性、环境修复作用的数据参考引用了国内外文献。本书中的部分照片由中南林业科技大学林学院喻勋林教授提供,中南林业科技大学环境科学与工程学院吴晓芙教授对全书内容进行了指导与审核,在此深表谢意!

环境修复植物学内容范围广，涉及许多相关学科领域，由于编者本身的知识与实践经验有限，恳请广大读者对书中存在的疏漏提出批评指正，以便进一步修改补充，使本书内容更加充实和完善，更好地适应教学与科研发展的要求。

编者

2016年10月



# 目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 环境修复植物学的基本概念	1
1.1.1 环境与环境污染	1
1.1.2 环境植物与环境植物学	2
1.1.3 污染环境修复植物学	3
1.1.4 环境修复植物学的研究内容与任务	4
1.2 环境修复植物学的研究进展	4
1.2.1 植物修复概念的提出与发展	4
1.2.2 植物修复技术及其研究进展	5
1.2.2.1 植物修复技术的研究内容	5
1.2.2.2 植物修复技术的研究进展与趋势	8
1.3 植物修复技术的优势与局限性及现代生物技术在植物修复中的应用	12
1.3.1 植物修复技术的优势与局限性	12
1.3.1.1 植物修复技术的优势	12
1.3.1.2 植物修复技术的局限性	13
1.3.2 现代生物技术在植物修复中的应用	14
1.3.2.1 修复植物抗性遗传与抗性基因的研究	14
1.3.2.2 基因工程在污染环境植物修复中的应用	14
1.4 植物修复技术的发展趋势与应用前景	18
1.4.1 植物修复技术的研究趋势	18
1.4.1.1 植物修复野外试验及多学科综合研究	18
1.4.1.2 植物修复技术与其他修复技术综合应用	18
1.4.2 植物修复技术的应用前景	19
2 植物修复的理论基础与机制	20
2.1 植物修复的理论基础	20
2.1.1 植物对污染环境的适应性及适应性进化	20
2.1.1.1 植物对污染环境的适应性	20
2.1.1.2 污染环境中植物的适应性进化	21
2.1.2 植物对污染环境的响应与反馈	24
2.1.2.1 植物形态结构对污染环境的响应与反馈	24

2.1.2.2	植物细胞与组织结构对污染环境的响应与反馈 .....	24
2.1.2.3	植物对污染环境的生理生化响应与反馈 .....	25
2.1.2.4	植物在分子水平对环境污染的响应与反馈 .....	27
2.2	植物修复的机制 .....	28
2.2.1	植物对物质的吸收、排泄和积累 .....	28
2.2.1.1	植物对物质的吸收 .....	28
2.2.1.2	植物对物质的排泄 .....	29
2.2.1.3	植物对物质的积累 .....	29
2.2.2	植物根系的生理作用 .....	30
2.2.3	植物根际圈的作用 .....	30
2.3	植物修复污染环境的基本理论与原则 .....	31
2.3.1	植物修复污染环境的基本理论 .....	31
2.3.2	植物修复污染环境的基本原则 .....	31
3	植物对大气污染的净化修复 .....	33
3.1	大气污染概述 .....	33
3.1.1	大气污染的定义 .....	33
3.1.2	大气污染的类型 .....	33
3.2	植物对大气污染的修复及其机制 .....	34
3.2.1	植物对大气污染的修复作用 .....	34
3.2.1.1	植物维持氧和二氧化碳的平衡 .....	34
3.2.1.2	吸收和滞留二氧化硫 .....	34
3.2.1.3	对氮氧化物的吸收和净化作用 .....	35
3.2.1.4	吸收氟减轻氟化氢的污染 .....	36
3.2.1.5	吸收氯气和氯化氢 .....	36
3.2.1.6	吸滞粉尘减少空气含菌量 .....	36
3.2.2	植物修复大气污染的机制 .....	37
3.2.2.1	植物吸附与吸收作用 .....	37
3.2.2.2	植物代谢降解作用 .....	38
3.2.2.3	植物转化作用 .....	38
3.2.2.4	植物同化和超同化作用 .....	39
3.2.2.5	植物对污染物的中和缓冲作用 .....	39
3.3	植物对大气污染的反应 .....	39
3.3.1	植物对大气污染的宏观响应 .....	39
3.3.1.1	植物叶形态结构的变化 .....	40
3.3.1.2	植物生长发育的变化 .....	41
3.3.2	植物对大气污染的微观响应 .....	41
3.3.2.1	光合生理的变化 .....	41
3.3.2.2	蒸腾速率与气孔导度的变化 .....	42
3.3.2.3	细胞膜渗透率的变化 .....	42
3.3.2.4	电子传递速率的变化 .....	43
3.3.2.5	线粒体和质体的变化 .....	43

3.3.2.6	氧化酶系统的变化	43
3.3.2.7	同化产物分配的变化	44
3.3.2.8	叶片热值的变化	44
3.4	大气污染修复植物资源	44
3.4.1	大气污染修复植物资源的选育	44
3.4.2	常见大气污染修复植物资源	52
<b>4</b>	<b>植物对污染水体环境的修复</b>	<b>96</b>
4.1	水体污染概述	96
4.1.1	水体污染的定义	96
4.1.2	水体污染的类型	97
4.2	植物对污染水体的修复净化及其机制	98
4.2.1	植物对污染水体的修复作用	98
4.2.1.1	植物对悬浮物的吸附、过滤、沉淀作用	98
4.2.1.2	植物对污染物质的吸收作用	99
4.2.1.3	植物对微生物降解的辅助作用	99
4.2.1.4	植物对有害藻类的抑制作用	100
4.2.1.5	森林植被对水体的净化作用	100
4.2.2	植物对水体污染修复的机制	101
4.2.2.1	植物修复富营养化水体的机制	101
4.2.2.2	植物修复水体中重金属的机制	103
4.3	植物对污染水环境的响应	104
4.3.1	植物对水体富营养化的响应	104
4.3.1.1	植物生长及形态对富营养化水体的响应	104
4.3.1.2	植物生理生化特性对富营养化水体的响应	104
4.3.2	植物对重金属水污染的响应	107
4.3.2.1	植物形态结构对水体重金属污染的响应	107
4.3.2.2	植物光合与呼吸生理对水体重金属污染的响应	107
4.3.2.3	根系活力对水体重金属污染的响应	108
4.4	污染水体修复植物资源	108
4.4.1	污染水体修复植物资源的选育	108
4.4.2	主要污染水体修复植物资源	113
<b>5</b>	<b>植物对重金属污染土壤的修复</b>	<b>165</b>
5.1	土壤污染概述	165
5.1.1	土壤重金属污染的定义	165
5.1.2	土壤重金属污染的来源	165
5.2	植物对重金属污染土壤的修复及其机制	166
5.2.1	重金属污染土壤修复概述	166
5.2.2	植物对重金属污染土壤的修复作用	167
5.2.2.1	根际圈促进生物降解作用	167
5.2.2.2	植物对重金属污染的萃取作用	168

5.2.2.3	植物对重金属污染的挥发作用	168
5.2.2.4	植物对重金属污染的稳定作用	168
5.2.3	重金属污染土壤植物修复机制	169
5.2.3.1	植物根系的生理生态作用	169
5.2.3.2	植物体内的生理代谢活动	171
5.3	植物对土壤重金属污染的响应	172
5.3.1	植物个体生长发育对重金属污染的响应	172
5.3.2	植物理化水平对重金属污染的响应	173
5.3.3	植物细胞水平对重金属污染的响应	177
5.3.4	植物分子水平对重金属污染的响应	178
5.4	重金属污染土壤修复植物资源	178
5.4.1	重金属累积与超累积植物资源	179
5.4.1.1	重金属累积与超累积植物资源特点	179
5.4.1.2	重金属累积和超累积植物的筛选	180
5.4.1.3	重金属累积与超累积植物资源	181
5.4.1.4	重金属累积与超累积常见植物资源	186
5.4.2	重金属非超累积、大生物量植物资源	202
5.4.2.1	重金属非超累积、大生物量植物资源的特点	202
5.4.2.2	主要重金属污染修复大生物量植物资源	205
<b>6</b>	<b>污染水体植物修复模式与工程示范</b>	<b>249</b>
6.1	人工浮岛	249
6.1.1	人工浮岛的构建	249
6.1.2	人工浮岛的净化作用与优势	250
6.1.3	人工浮岛应用实例	251
6.2	人工湿地	251
6.2.1	湿地植物的选择与配置	251
6.2.2	人工湿地实例	252
6.3	生态沟渠	253
6.3.1	植物的选择与配置	254
6.3.2	生态沟渠的实践应用	254
<b>7</b>	<b>重金属污染土壤植物修复应用及工程示范</b>	<b>255</b>
7.1	重金属污染土壤植物修复概述	255
7.2	重金属污染土壤植物修复过程设计	255
7.2.1	修复目标与技术思路的选择	255
7.2.2	工程实施方案的确定	255
7.2.3	植物的筛选与种植方式	255
7.3	示范工程实例	256
7.3.1	示范工程主要植物种类	256
7.3.2	示范工程主要植物配置模式	259
	<b>主要参考文献</b>	<b>261</b>

## 1.1 环境修复植物学的基本概念

### 1.1.1 环境与环境污染

环境 (environment) 是客体, 是与某一主体事物的存在、变化、发展相关的所有其他客体事物的统称。因此, 环境是相对某中心事物而言的, 指相对并相关于某项中心事物的周围事物, 即围绕中心事物的外部空间、条件和状况, 构成中心事物的环境 (何强, 1994)。环境因中心事物的不同而异。对于文学、历史和社会科学来说, 环境是指具体的人周围的情况和条件。而对生物学来说, 环境是指生物周围的气候、生态系统、周围群体和其他种群。根据环境的属性, 通常将其分为自然环境、人工环境和社会环境。自然环境也称地理环境, 是指环绕于人类周围、未经过人为改造、天然存在的自然因子, 是生物个体、种群或群落生存空间自然条件的总和, 即无机因子 (光、热、水、土壤、大气等, 或称为非生物因子) 和有机因子 (动物、植物、微生物及人类, 也称为生物因子) 的总和。自然环境中各种有机因子和无机因子相互作用, 形成生物赖以生存的各种各样的环境条件, 也是人类赖以生存和发展的物质基础。按照环境要素来分类, 可以将其分为大气环境、水环境、地质环境、土壤环境及生物环境, 主要是指地球的五大圈——大气圈、水圈、土圈、岩石圈和生物圈。

环境污染 (environmental pollution) 是指环境因素受人类生产和生活过程中废弃物和有害物质的影响, 改变了环境原有的性质 (如组成成分) 或状态的现象。人们在生产、生活过程中不断向环境排放过量的污染物质, 并超过环境的自净能力, 使环境要素和状态发生改变、环境质量恶化, 干扰和破坏了生态系统的稳定和人类的正常生活生产条件 (任金旺和陈茂玉, 2005)。例如, 盐碱和重金属虽然在土壤中自然存在, 但工农业生产活动加速了盐碱、重金属、杀虫剂、酸雨和石化产品等有机和无机污染物的释放。这类污染物绝大部分不能降解而是沉积在环境中。快速过度的累积导致地力退化、森林毁灭、土地沙漠化、生物多样性丧失, 以及与环境退化相关的其他问题, 即环境污染最终导致人畜疾病的传染, 生态环境物种多样性与景观受损 (张艳华, 2007)。

环境污染的种类很多, 依据其存在的方式大体上分为大气污染、水体污染和土壤污染三大类。

大气污染 (air pollution): 是指在空气的正常成分之外, 增加新的成分或原有的某些成分剧增, 对人类健康和动植物生长造成危害, 甚至引起自然界的某些变化。例如, 工厂排出的废气、汽车排出的尾气、吸烟产生的烟雾等进入大气中, 洁净的大气被有毒有害气体或悬浮颗粒物污染。有数据显示, 全国 500 多座城市, 空气质量符合国家一级标准的不到 1%, 尤其是工业发达地区, 空气混浊, 含有大量重金属元素、浮尘、二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、一氧化碳 ( $\text{CO}$ )、苯并芘 (benzopyrene)、氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ )、烃类 (HC) 等致癌

物质。尤其是  $\text{SO}_2$  气体在不少工矿区超过了  $5.0\mu\text{g/g}$ ，酸雨沉降大面积发生，造成土壤和水体酸化，农作物、树木、鱼、虾等生物大量受害或死亡。大气中  $\text{CO}_2$  含量的增加，臭氧层变薄，造成大气温室效应，使全球气温升高，气候反常。

水体污染 (water contamination): 是指排入水体的污染物质超过了水体自净能力，使水中的成分及其性质发生变化，水体环境恶化，水生生物的生长受到损害，人类生活和健康受到不良影响。例如，未经处理的加工业、生活和医院等场所的废水随意排放，导致其邻近河流变成纳污河；农业生产中化肥、农药的不合理使用，导致邻近河流等水域生态系统富营养化，地下水的总矿化度 (total mineralization)、总硬度 (hardness)、硝酸盐 (nitrate)、亚硝酸盐 (nitrite)、氯化物 (chloride) 和重金属 (heavy metal, HM) 含量逐渐升高；畜禽养殖废弃物不经处理直接排放，造成周边环境（特别是地下水）的污染，湖泊变成蓄污池，水生生物锐减，人畜中毒事件时有发生。

土壤污染 (soil contamination): 是指由于土壤中某些有毒有害物质突然升高，超过了土壤的自净能力，导致土壤的理化性质发生变化，土壤中生物的生命活动受到抑制和破坏，土壤肥力降低，农作物生长发育受阻，产品质量变坏等。例如，采掘业、冶金、交通工业导致地表金属离子和近地面氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 含量增加，农业过量施用化肥、农药产生农田面源污染，被污染的大气和水环境污染物质最终回归到土壤，导致土壤被污染等。

由此可见，大气、水体及土壤环境的污染极大地改变了各类生物生存的界面和空间，导致生物物种减少、自然灾害频繁、疾病流行时常发生。

### 1.1.2 环境植物与环境植物学

作为生态系统中的初级生产者，植物通过其生命活动捕获二氧化碳转化成有机物，释放氧气，直接或间接地为其他生物提供食物、能量和栖息场所，创造并维持着人类赖以生存的生活环境。因此，环境植物 (environmental plant) 是指所有能够吸碳制氧 (即吸收  $\text{CO}_2$ ，释放氧气)、保土蓄水、维持生态环境稳定，或者能够促进生态环境更有利于人们工作、生活的植物，如经济植物 (粮油植物)、园林植物 (木本和草本的观花、观叶或观果植物)、水土保持植物、防风固沙植物 (绿地和风景名胜区的防护植物)，以及修复退化或污染生态环境的各类植物。在工业化进程中，植物因其具有特殊的生命活动 (光合作用) 而成为环境的平衡者，维持着人类与生物赖以生存的生活环境与生态环境的平稳。

生存环境的日益恶化及人类对资源需求的不断扩大，对生命科学提出了越来越高的要求，人类最终只有依靠所掌握的特定的生物学规律，尤其是植物学知识，才能解决人类所面临的生存问题。植物在适应多样化环境的过程中，都发展出了各自独特的形态结构、生理生化特性、繁殖特点等，构成了地球上种类繁多的植被景观与生态系统 (周云龙, 2004)，成为人类赖以生存的基础。因此，常常会看到在不同的环境里生长着不同的植物种类，栽种不同类型的植物需要选择不同的环境条件，植物与环境存在辩证统一的生态关系。一方面是植物个体或群体对不同环境的生态适应或环境对植物的塑造作用，即环境中的各个生态因子都对植物产生影响，使其在生长发育、形态结构、生理功能等方面发生相应的变化；而另一方面则是植物对环境的影响或改造作用，即植物对环境的作用产生各种不同的反应和多种多样的适应性 (缪汝槐, 1998)。因此，环境植物

学 (plant science of environment 或 environmental phytology) 是指研究植物及植物群落与环境相互关系的学科。其中包括研究自然环境中各生态因子对植物及植物群落形态结构、生理生态特性变化的影响, 主体是植物个体水平的生理生态学研究, 侧重于不同环境条件下植物生长发育过程的机制和规律研究, 探讨植物与环境之间的相互关系和相互作用, 是植物生态学的分支学科, 主要内容包括侧重于环境的实验植物生态学, 以及以生态系统产出为重点的生产生态学 (production ecology)。在我国, 虽然环境植物学和实验植物生态学工作涉及方面较广, 但与地植物学相比, 环境植物学和实验植物生态学目前只能说有了良好的开端, 尚未形成体系。

### 1.1.3 污染环境修复植物学

修复 (remediation) 是工程上的一个概念, 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。它包括恢复、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 或 rehabilitate) 是指把完全丧失功能的对象恢复至原初水平; 改建 (renewal) 则是指对部分受损的对象进行改善, 增加人类所期望的“人造”特点, 减少人类不希望的自然特点。因此, **环境修复** (environmental remediation) 是指借助外界的作用力, 使环境的某个受损的特定对象部分或全部恢复成为原初状态。而**污染环境修复** (remediation of contaminated environment) 则是指针对被污染的环境采取物理、化学及生物学技术与措施, 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。常见的修复材料包括不同种类的微生物、动物、植物、非金属矿物及无机、有机化学药剂等 (杨慧芬和陈淑祥, 2008)。而以植物为修复材料对污染或退化环境进行修复就称为**植物修复** (phytoremediation)。

在环境科学中, 植物监测已成为一门学科, 即以植物为分析对象, 了解环境污染的状况和程度、污染物质的成分及其分布, 植物起着“感应器”的作用。然而, 植物除能感知污染, 以其自身的伤斑和伤势来提醒人类环境已被污染外, 还能利用其吸收、降解、挥发、过滤和固定等作用, 净化土壤、水体和空气中的无机和有机污染物。因此, 以植物忍耐和超量累积某种或某些污染物的理论为基础, 利用植物及其根际圈共存微生物体系的吸收、挥发、降解和转化作用清除或降低环境中污染物的一门环境污染治理技术称为**植物修复技术** (phytoremediation technology), 即污染大气、土壤、水体等环境的“植物疗法”。概括地说, 就是利用植物治理土壤、大气和水体污染环境, 清除环境中的污染物或是将有毒物质毒性水平降低。具体地说, 是利用植物本身特有的利用、分解和转化污染物的作用, 利用植物根系特殊的生态条件加速根际圈微生物的生长繁殖, 以及利用某些植物的特殊积累与固定能力, 提高植物对环境中某些无机和有机污染物的脱毒和分解能力 (唐世荣和 Wilke, 1999)。植物修复技术也就是把一些对污染物具有忍耐力和高累积潜力的植物种植于污染区, 利用植物自身的生长代谢或与其根际微生物共同作用, 将污染物质吸收、固定或消除, 随后在适当的时间对植物进行收割处理, 使被污染的环境恢复到原初状态的一种原位污染治理技术。该技术可广泛应用于土壤、大气和水体污染的治理 (杨慧芬和陈淑祥, 2008)。由此可见, 植物既是环境污染的受害者, 也是环境的改造者, 在环境保护中起着至关重要的作用。

了解植物在污染环境修复中的生长发育规律,发挥植物净化优化大气、水体和土壤环境的特殊功能,有助于更好地利用植物为环境服务。**环境修复植物学**(plant science of environmental remediation)就是针对退化(污染)环境修复过程中,从植物形态结构、细胞及分子水平研究植物对典型污染物胁迫的形态、生理生化与分子生物学的不同响应,揭示环境污染这种特殊的胁迫因子对植物产生影响的生理生态学机制,以及植物的生态适应性遗传规律的学科。环境修复植物学是环境植物学的一个分支,也是植物生理生态学在污染或退化环境修复治理中的应用研究。

### 1.1.4 环境修复植物学的研究内容与任务

环境修复植物学是植物学(或植物生物学)在退化环境修复应用领域的拓展,并与植物分类学、地植物学、植物生理生态学、污染生态学、土壤学、环境化学、环境生态学、植物营养学、分子生物学与基因工程等多学科互相交叉渗透,在多学科交叉点上形成的一门新的环境治理理论与技术。其研究内容是应用植物学及其相邻或交叉学科的基础理论与方法、现代科学技术(如基因工程方法与技术),以及各种物理、化学分析技术与方法,以植物对环境的反应为基点,研究典型污染物质对植物形态、生理代谢、遗传物质的影响和危害,以及植物生长发育和遗传对环境污染的响应,探讨和认识植物对污染环境的适应和植物的微进化过程。其重点研究植物对污染环境的净化功能、植物对污染环境的修复潜力、植物修复技术的实际应用及植物对环境污染的监测等内容,特别是人类活动干扰和胁迫环境条件下植物对污染环境的适应性的基础研究与应用基础研究,为我国的环境安全提供理论依据、战略决策、示范模式和技术支撑。

## 1.2 环境修复植物学的研究进展

### 1.2.1 植物修复概念的提出与发展

植物修复一词的英文“phytoremediation”来源于希腊语“phyto”(即植物)和拉丁语“remedium”(意思是更新平衡、除去或修正)。植物修复最初是用于农田污染物的去除,至少已有300年的历史。20世纪50年代已开发应用植物修复放射性核素污染土壤,而有关植物修复研究的基础也大多来源于对农田污染土壤的修复。据此,植物修复技术的研究历史可以大致分为两个阶段,第一阶段是植物忍耐超量重金属特性与机制的研究。20世纪50~70年代,植物对重金属的耐受机制成为当时植物修复的热点,如植物耐受的回避或排除机制、细胞壁作用机制、重金属与各种有机酸的络合机制、渗透调节机制等(唐世荣和黄昌勇,1995)。第二阶段是应用植物进行污染土壤修复的研究。20世纪70年代末到90年代初,人们逐渐把研究重点转向了对超累积植物的研究。1972年,Severne和Brooks(1972)研究发现多花鼠鞭草(*Hybanthus floribundus*)叶子中Ni的含量达1%,叶灰分中Ni的含量高达23%,并将其报道为Ni超累积植物,随后发现报道了Ni超累积植物塞贝山榄(Jaffr,1972),1977年Brooks提出超富集植物(或超累积植物)(hyperaccumulator)的概念。超累积植物的发现激发了科学家对其研究的极大兴趣,极大地促进了Ni超累积植物的研究,至70年代末已鉴别出Ni超累积植物168种。同时,在



Ni 超累积植物的汁液中鉴定出含 Ni 的化合物——镍柠檬酸盐。基于某些植物对生长环境中的有毒金属具有特别的超富集能力（富集力），1983 年美国科学家 Chaney 首次提出了“phytoremediation”（植物修复）的概念。随着相关研究技术的发展，“phytoremediation”一词陆续出现在 Raskin、Cunningham 和 Berti 于 1993 年公开发表的技术文献中，后来又出现了“phytotechnology”（植物修复技术）一词。随着时间的推移和人类认识的提高，植物修复概念渐进完善，不断产生一些新的内涵和外延。

## 1.2.2 植物修复技术及其研究进展

### 1.2.2.1 植物修复技术的研究内容

与化学或化学工程修复清除污染土壤相比，植物修复技术被普遍认为是高效、低成本、环境友好的修复技术，是一种绿色、可持续、有着广阔应用前景的解决环境污染问题的技术。利用植物具有累积、分解或除去金属元素、盐分、杀虫或杀菌剂、有机溶剂、毒炸药、原油及其衍生物的能力，将污染土壤、水体、大气和其他环境中的污染物或毒物清除，植物修复技术在大气、水体及土壤净化修复中得到了广泛应用。广义的植物修复技术还包括工程建设中采用相关的生态植物（如不同种类的乔、灌、草、藤等），在特定环境条件下合理配置后，对开挖或填方所形成的边坡进行植被恢复的一种综合应用技术。其包括绿化景观、固土保水、防止浅层滑坡和塌方、污染物的净化等生态环境保护的基本内容（鲍平秋，2011；唐世荣，2006）。

迄今为止，利用这一绿色技术开展了水体富营养化的治理、多氯联苯（polychlorobenzene, PCB）植物根圈分解、重金属与放射性元素的吸收和去除、有机磷与无机污染物的分解、水溶性与挥发性物质的处理、环境激素的分解、空气污染物质的分解处理等研究（Chen et al., 2002）。其研究内容涉及累积与超累积植物或耐受性（耐性）植物的筛选及其在污染环境修复方面应用的潜力评估、各种理化和生物因素对植物修复环境的影响、植物-微生物共生体系特征对植物修复效率的影响、植物累积环境中污染物的机制、分子生物学及基因工程技术对环境修复植物生物学性状的改良及其应用、污染环境中植物系统发育与生物多样性变化等（唐世荣，2006）。

因植物从不同环境中去除污染物的机制各异，植物修复技术也被分成不同类型。根据污染物的类型、污染场地的条件、污染物的数量、植物种类、不同的应用机制和对环境的改造目的，植物修复技术与修复过程大致分为 7 种类型，即植物萃取（phytoextraction）、植物稳定或固化（phytostabilization）、植物挥发（phytovolatilization）或植物降解（phytodegradation）、植物促进（phytostimulation）或根际降解（rhizospherical degradation）、植物钝化（immobilization）、根际过滤（rhizofiltration）和植物吸收与转化（absorption and transformation）等（丁佳红等，2004；Cummings, 2009）。

（1）植物萃取 也称为植物累积，是指植物从土壤中吸收去除无机污染物，主要是重金属和类金属物质（如砷）（Peer et al., 2006）。这是目前研究应用最多而又最具有发展前景的污染土壤植物修复方法。其原理是植物具有从基质（如土壤和水基质）中吸收无机化学物质的能力，其中一些物质是植物生长必需元素（如 Mn、Cu、Zn），而另有一些元素在植物体内的生理功能目前尚不清楚。