

The Theory and Practice of
Phytoremediation for Degraded Environment

退化环境植物修复的 理论与技术实践

王庆海 肖波 却晓娥 等 编著



科学出版社

退化环境植物修复的 理论与技术实践

The Theory and Practice of
Phytoremediation for Degraded Environment

王庆海 肖波 却晓娥 等编著

科学出版社

北京

《退化环境植物修复的理论与技术实践》
编著者名单

| | |
|-----|-----------|
| 王庆海 | 北京市农林科学院 |
| 肖 波 | 北京市农林科学院 |
| 却晓娥 | 中国林业科学研究院 |
| 李 翠 | 北京市农林科学院 |
| 武菊英 | 北京市农林科学院 |
| 尧水红 | 中国农业科学院 |
| 方显瑞 | 北京市农林科学院 |

前 言

资源消耗和环境污染是全人类面临的重大挑战。环境保护应成为全世界人民的共同事业。据中华人民共和国环境保护部、国家统计局和农业部联合发布的《第一次全国污染源普查公报》，全国各类源废水排放总量 2092.81 亿 t，废气排放总量 637 203.69 亿 m³。主要污染物排放总量：化学需氧量(COD)3028.96 万 t，氨氮(NH₃-N)172.91 万 t，石油类 78.21 万 t，重金属(镉、铬、砷、汞、铅，下同)0.09 万 t，总磷(TP)42.32 万 t，总氮(TN)472.89 万 t，二氧化硫 2320.00 万 t，烟尘 1166.64 万 t，氮氧化物 1797.70 万 t。农业源中主要水污染物排放(流失)量：COD 1324.09 万 t，TN 270.46 万 t，TP 28.47 万 t，铜 2452.09t，锌 4862.58t。农业污染对环境污染的贡献排在工业污染和生活污染之前。其中，COD、TN 和 TP 的排放量分别占对应污染物总排放量的 43.7%、57.2%和 67.3%。这些大量排放的污染物，势必对土壤、水体和大气造成严重污染。

土壤是人类赖以生存的最重要的自然资源之一。由于人类活动和自然因素的影响，土壤污染已成为一个备受关注的环境问题。重金属、放射性核素和有机物等污染物进入农田，是造成土壤退化的重要原因之一。据唐世荣等报道，我国目前被重金属污染的耕地就有近 2×10^7 hm²，约占我国耕地面积的 1/5。土壤污染降低了农产品的数量和质量，制约了农业的可持续发展。土壤和水体的有机物污染，是我国面临的另一个环境问题。特别是在工业发达、农业集约化程度高的地区，环境的有机污染问题尤为突出。据估计，已检出的环境有机污染物超过 200 种。这些污染物在地表水、地下水中均可检出，就连饮用水源地也遭受了有机物的污染，这对人类健康构成巨大威胁。

面对环境污染的严峻形势和频繁发生的环境污染事故，我国相关政府机构和学者开展了大量的管理和研究工作，有效遏制了环境进一步恶化的势头，局部生态环境得到改善。但对分布面较广的环境污染，治理是件十分困难的事。除需要巨额投入外，缺乏切实可行的治理技术也使得治理过程变得遥遥无期。植物修复理论的提出，为解决这一艰巨而复杂的问题提供了一个新的思路。植物修复技术是一种环境友好型的清洁技术，许多国家都投入了大量的人力和物力对该技术进行研究与开发，近年来，我国也对该技术开展了大量研究工作。当然，植物修复技术还不甚成熟，仍有许多有待完善的地方，但随着研究工作的不断深入，该技术将日趋完善，可操作性更强，市场前景也将更为广阔。

本书的资料主要来源于作者承担的国家社会公益性科研项目“绿色农业科学研究与示范”(2060302)，北京市科技计划项目“荒滩地、废弃地综合治理技术示范”(D08060500460806)、“农田污染因子监测与生态修复技术应用”(D101105046410001)、“人工湿地草本植物的筛选”(Z07090500550728)，北京市科技新星计划项目“高等水生植物对农药的消除作用研究”(2006B03)，以及北京市农业科技成果产业化专项“受损生态系统草地植被重建与高效利用研究”(Z0006321001291)。本书是上述各科研项目的积淀和结晶，也是作者及其研究团队长期理论与实践研究的总结与升华。

在本书出版之际,我们衷心地感谢北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心客座硕士研究生卢清、阳娟、李瑞华、张威、刘艳青、朱艳清和黄传伟及博士后黄顶等,他们在上述研究项目完成、资料整理和成文过程中付出了大量辛勤劳动。本书还引用了大量国内外同行学者的研究成果,在此一并表示感谢!

由于学识和时间有限,本书难免有疏漏和不当之处,敬请各位读者和专家批评指正。

编著者

2011年12月于北京

目 录

前言

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 第一章 植物修复的理论框架 | 1 |
| 第一节 植物修复的含义及溯源..... | 1 |
| 第二节 植物修复的基本理论..... | 3 |
| 参考文献..... | 6 |
| 第二章 植物修复的研究进展 | 8 |
| 第一节 污染水体的植物修复..... | 8 |
| 第二节 水土流失及农业面源污染的植物修复技术 | 27 |
| 第三节 污染土壤的植物修复 | 36 |
| 第四节 污染大气的植物修复 | 44 |
| 第五节 植物修复技术的优势及局限性 | 50 |
| 第六节 植物修复技术的发展趋势 | 52 |
| 参考文献 | 57 |
| 第三章 植物修复技术在治理水体富营养化中的应用 | 69 |
| 第一节 水生植物对 N、P 污染浓度的适应性评价 | 69 |
| 第二节 水生植物及其组合的 N、P 去除能力 | 90 |
| 第三节 水生植物在人工湿地中的 N、P 去除能力及生活力 | 97 |
| 第四节 退化湿地的恢复..... | 108 |
| 参考文献..... | 114 |
| 第四章 植物修复技术在治理水体农药污染中的应用 | 117 |
| 第一节 水生植物对杀虫剂毒死蜱的去除作用..... | 117 |
| 第二节 水生植物对除草剂阿特拉津的去除作用..... | 131 |
| 第三节 水生植物对植物生长调节剂多效唑的去除作用..... | 150 |
| 参考文献..... | 161 |
| 第五章 植物修复技术在治理土壤重金属污染中的应用 | 164 |
| 第一节 锌污染土壤的植物修复..... | 164 |
| 第二节 铬污染土壤的植物修复..... | 171 |
| 第三节 镍污染土壤的植物修复..... | 176 |
| 参考文献..... | 183 |
| 第六章 植物修复技术在治理土壤石油烃污染中的应用 | 186 |
| 第一节 高抗、弱吸收作物品种的筛选 | 186 |
| 第二节 作物对土壤中石油烃污染的去除作用..... | 198 |
| 参考文献..... | 200 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 第七章 植物修复技术在防治农业面源污染中的应用 | 201 |
| 第一节 河滨缓冲带植被生长状况和微生物的变化..... | 202 |
| 第二节 河滨缓冲带对地表径流污染物的去除..... | 206 |
| 第三节 河滨缓冲带对渗漏水污染物的去除..... | 209 |
| 第四节 复合河滨缓冲带建植后目标水库的水质变化..... | 219 |
| 参考文献..... | 224 |
| 第八章 植物修复技术在水土流失防治中的应用 | 225 |
| 第一节 植物篱选择与建植..... | 225 |
| 第二节 植物篱的水土保持功能与效果..... | 227 |
| 第三节 植物篱防治水土流失的机理分析与成本比较..... | 241 |
| 第四节 植物篱技术的推广..... | 246 |
| 参考文献..... | 246 |
| 第九章 植物修复技术在废弃土地治理中的应用 | 248 |
| 第一节 抗逆草种的筛选..... | 249 |
| 第二节 植被重建的生态功能评价..... | 253 |
| 参考文献..... | 262 |

彩图

第一章 植物修复的理论框架

第一节 植物修复的含义及溯源

人类活动造成重金属对周边生存环境污染的历史,可追溯到铁器时代。特别是工业革命后,由于人口数量的增长,这种污染活动急剧增加(Saier Jr and Trevors,2010)。

植物修复(phytoremediation)既是一个对社会发展造成的日益退化的生态环境进行修复的过程,也是人类在治理环境实践过程中的一种遵循自然规律的选择。近 20 年来,植物修复研究进展迅速,已从一个经验性的利用传统植物进行污染物净化的研究发展成为一个用现代科学理论与高技术武装起来的、多学科渗透与交叉的现代化超级学科,特别是借助分子生物学的手段改造目标植物(phytoremediation agent),使植物修复更具针对性,修复效率也大幅度提高。随着人类生态意识的增强,这种低成本、环境友好型的技术将更为政府相关管理部门和社会公众所接受。

一、概念的提出与发展

利用植物去除农田污染物至少已有 300 年的历史,利用植物修复放射性核素污染土壤在 20 世纪 50 年代就已开发应用。1977 年 Brooks 提出超富集植物的概念,1983 年 Chaney 提出利用超富集植物清除土壤重金属污染的思想,但植物修复作为专业术语直到 20 世纪 80 年代后才出现(Gerhardt et al.,2009;韦朝阳和陈同斌,2001)。它是由 Raskin 等于 1991 年提出的,Cunningham 和 Berti 于 1993 年在公开发表的技术文献中用到该词(Mccutcheon and Schnoor,2004)。自 90 年代以来,该技术的开发和利用得到了飞速发展,现已成为多种污染物原位修复最有前途的治理策略,植物修复也成为环境污染治理研究领域的前沿课题之一。

植物修复是指利用植物和植物生长及其共存的微生物作为技术手段来净化环境中的有机和无机污染物,主要依靠植物及其根际微生物菌群自然发生的进程来达到控制、隔离、去除或降解污染物的目的(Pilon-Smits,2005;Tsao,2003)。

植物修复概念的完善是一个渐进的过程,随着时间推移和人类认识的提高,概念还会有一定的变化。无论学者还是公众,从不同的角度对此概念会有不同的理解,因此仍然不断产生一些新的内涵和外延。

二、植物修复技术的类型

根据污染物的类型、污染场地的条件、污染物的数量以及植物种类,植物修复过程具体可以分为 6 种(Arthur et al.,2005;Pilon-Smits,2005)。

1. 植物萃取

植物萃取(phytoextraction)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)。其原理是植物均具有从土壤或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的营养元素,而有一些在植物体内的生理功能目前尚不清楚。植物吸收污染物后将其从根部运输至茎、叶,可以通过收割植物地上部分将污染物清除出土壤。因此在该技术利用过程中,含有毒有害物质的植物的处理及回收利用格外引人关注。收获的植物材料不可食用,可用作木材或加工为木板;或用作燃料,将灰分在垃圾填埋场处理;若污染物是有价值的金属还可回收利用。影响该技术成功的因素主要有污染程度,金属的生物可利用性,植物的拦截、吸收及富集能力等。可见,寻找合适的超富集植物和诱导出超级富集体也是该技术成功的关键所在。而植物对污染物(如重金属)产生富集的首要条件是,该植物的根和茎、叶细胞能够耐受高浓度的相应元素,并有能力将该元素从根系转运到茎、叶(王庆仁等, 2001)。

2. 植物固定

植物固定(phytostabilization)是指植物根系—微生物互作可以使土壤中的有机污染物和部分无机污染物与土壤团粒紧密结合,从而钝化或固定土壤中的污染物,降低其生物有效性及迁移性,使其不能为生物所利用,阻止其向周边环境扩散(Ghavzan and Trivedy, 2005)。主要途径有减少污染土壤的侵蚀、土壤渗漏及地表径流,从而防止污染物的淋移和扩散;或者是将污染物转化为较难被生物利用的形态(如沉积在根际),阻止其进入食物链。植物稳定只是暂时将污染物以生物不可利用的形态固定下来,减少其对生物和环境的危害,并没有将其清除出环境。然而污染物的生物可利用性随环境条件的变化可能又会发生改变。因此,植物固定不是一个彻底解决环境污染问题的方法。

3. 植物降解

植物降解(phytodegradation)是指植物通过酶活性在植物体内直接降解有机污染物,将其转化为毒性较小或无毒的物质(Arthur et al., 2005)。该技术主要适用于疏水性适中的污染物,如BTEX^①、TCE(三氯乙烯)、TNT(三硝基甲苯)等军用排废。对于疏水性非常强的污染物,由于其会紧密结合在根系表面和土壤中,因而无法发生运移。对于这类污染物,更适合采用之前提到的植物固定来治理。植物降解在植物修复过程中的作用常采用抑菌条件下检测植物体内污染代谢物含量水平的方法来评价(Bhadra et al., 2001; 王庆海等, 2010)。

4. 植物促进

植物促进(phytostimulation)也称根际降解(rhizodegradation),是指植物的根系分泌物(如氨基酸、糖和酶等物质)能够促进根际微生物的活性和生化反应,对有机污染物进行

① BTEX 是石油中常见的苯、甲苯、乙基苯、三种二甲苯基(邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯)的异构体的合称。

生物降解(Ghavzan and Trivedy, 2005)。植物促进常常伴随在植物降解过程中。植物的根际是一个复杂的微生态系统,在该系统中,植物—微生物互作是根际生物降解的关键因素。植物可以提高微生物的数量和活力,而微生物对污染物的降解又可提高污染物的生物可利用性,利于植物吸收。

5. 根滤作用

根滤作用(rhizofiltration)主要是指植物去除水体污染物的功能。其原理是利用水培植物的根系从污水中吸收、富集或沉淀金属及有机污染物。当水低速流经植物根区时,植物对硝酸盐也有较好的去除效果(Russelle et al., 2004)。水生植物还具有将污染物(如放射性污染物 Se)吸收后挥发到空气中的能力。狐尾藻属植物(*Myriophyllum brasiliense*)、大米草(*Juncus xiphioides*)、宽叶香蒲(*Typha latifolia*)和盐沼蘆草(*Scirpus robustus*)在湿地中均具有去除 Se 的潜力(Pilon-Smits et al., 1999)。另外,植物残体也可以吸附污染物。进行根滤作用所需要的媒介以水为主,因此根滤是水体、浅水湖和湿地系统进行植物修复的重要方式,实施该技术所选用的植物也以水生植物为主。

6. 利用植物去除大气污染物

大气污染的植物修复是一种以太阳能为动力,利用植物的同化或超同化功能净化污染大气的绿色植物技术(骆永明等, 2002)。大气污染对植物有一定的影响和危害,另外,植物对于一定浓度范围内的大气污染物,不仅具有一定程度的抵抗力,而且也具有相当程度的吸收能力。也就是说,植物对一定程度的大气污染具有净化作用。这种净化作用主要有两种途径:一种是植物积聚和过滤粉尘、隔音等物理途径;而更多的一种是通过植物叶片对大气污染物的吸收、转化和累积而达到净化大气效果的生物化学途径。植物可去除室内外空气中的 NO_x 、 SO_2 、 CO_2 、臭氧、神经毒气、烟尘颗粒物和挥发性卤代烃等多种污染物(Pilon-Smits and Freeman, 2006),一些植物的挥发性物质还可杀灭大气中的微生物(戚继忠和齐清弘, 2000; 谢慧玲和詹瑞华, 1997)。

第二节 植物修复的基本理论

长期以来,人们对植物作用的认识主要停留在两个方面。首先,植物为人类提供了木材、食物和纤维;其次,它具有景观绿化功能并为其他物种提供栖息地。在工业化进程日益加快的今天,人们越来越意识到植物在生态系统平衡中所起的重要作用。尤其是植物在减缓全球气候变暖过程中的作用,科学界和公众有着愈加深刻的认识。目前,植物在修复污染环境中的作用也在不断地研究之中。

一、退化生态系统

退化生态系统是指生态系统在自然或人为干扰下形成的偏离自然状态的系统;系统的结构和功能在干扰的作用下发生位移,位移的结果是打破了原有生态系统的平衡状态,使系统的结构和功能发生变化或者出现障碍,形成破坏性波动或恶性循环(任海等, 2004;

王堃,2004)。实际上,生态系统时刻都在发生变化,这种变化既有正向的也有负向的。正常的生态系统是生物群落与自然环境在平衡位置作一定范围的波动,或者是围绕某一阈值振动。而一旦生态系统的某些要素或系统整体发生不利于生物和人类生存要求的量变和质变,系统的结构和功能将发生与其原有的平衡状态或进化方向相反的位移,该生态系统就发展成为一类“病态”生态系统,也就是退化生态系统(章家恩和徐琪,1999)。

与健康的生态系统相比,退化生态系统具有如下特征(盛连喜等,2002)。在系统结构方面:种群数量、物种组成、群落或系统结构发生改变,物种多样性、生化物质多样性、结构多样性和空间异质性低。在能量学方面:生物生产力低、系统储存的能量低、食物链单一且多为直线状。在物质循环方面:总有机质存储少、矿质元素较为开放、无机营养物质多储存于生物库中。在稳定性方面:土壤和微环境恶化,生物间相互关系改变,生态学联系和生态学过程简化、对外界干扰显得较为脆弱和敏感,系统的抗逆能力和自我恢复能力低。

生态退化包括陆地生态系统的退化、水生生态系统的退化和大气系统的退化(章家恩和徐琪,1999)。就陆地生态系统的退化而言,主要有以下几种类型(王堃,2004):①森林采伐迹地,这是由于人为干扰所造成的退化类型,其退化状态随采伐强度和频度而异;②退化草地,由于过度放牧、盲目开垦、滥挖滥搂及其他一些不合理利用方式所致;③弃耕地,是人类对自然植被的破坏性干扰类型,其退化状态随弃耕的时间而异;④采矿废弃地,是指采矿活动所破坏的、非经治理而无法使用的土地;⑤沙漠化土地,由人类的不合理利用或者气候变化所引起的;⑥裸地,有原生裸地和次生裸地,通常是由潮湿、干旱、盐渍化、有机质缺乏、基质强度移动等极端条件造成的;⑦垃圾堆放场。除土地退化外,由于人口增加和工农业生产的发展,进入地表水的污染物大幅增加,人类赖以生存的淡水生态系统也在日益退化,特别是水体富营养化问题,已严重威胁社会经济的可持续发展和人类健康。高等沉水植物种群的减少是健康水生生态系统退化的重要指标(濮培民等,2001)。水生生态系统的退化,导致其大气调节功能、物质生产功能、水资源调节功能、水质净化功能和生物栖息地功能下降(张修峰等,2007)。大气系统的退化主要有大气污染和全球气候变化。在整个生物圈,不同生态系统的退化是相互影响的。例如,大气污染致使森林生态系统发生退化,陆地生态系统退化(尤其是植被退化)会使该系统内的营养物质氮(N)和磷(P)过多地进入毗邻水体,从而造成水生生态系统退化。

二、干扰与生态系统退化

退化生态系统形成的原因极为复杂,干扰是生态系统退化最原始、也是最根本的推动力。干扰使生态系统发生退化的主要机制是在干扰的压力下,系统的结构与功能发生变化,干扰的压力不仅在群落物种多样性的发生与维持中起重要作用,在生物进化中也是重要的选择压力;在功能过程中,干扰能减弱生态系统的功能过程,甚至使生态系统的功能丧失。干扰既有人为因素也有自然因素。包维楷和陈庆恒(1999)分析指出生态系统退化的根本驱动力,乃是人类的直接或间接干扰。人为因素主要包括人类社会中所发生的一系列的、经济、文化、社会活动或过程(如工农业活动、城市化、商业、旅游、战争等)(章家恩和徐琪,1999)。据 Daily(1995)估计,地球上植被覆盖的地表大约有 43% 的土地已退化,

他还对造成土地退化的人类活动进行了排序:过度放牧占 35%,森林砍伐占 30%,其他农业活动占 28%,过度收获薪材占 7%,生物工业占 1%。自然干扰主要包括一些天文因素变异而引起的全球环境变化(如冰期、间冰期的气候冷暖波动),以及地球自身的地质地貌过程(如火山爆发、地震、滑坡、泥石流等自然灾害)和区域气候变异(如大气环境、洋流及水分模式的改变等)。人为干扰往往叠加在自然干扰之上,共同加速生态系统的退化(章家恩和徐琪,1999)。根据对系统的作用途径基本上可将干扰因素归纳为两大类:一类是对系统结构成分的丰盛有直接或间接影响;另一类是对系统结构成分和环境有直接或间接影响(包维楷和陈庆恒,1999)。由于所承受的干扰体的差异,生态系统退化的程度、速度和过程也表现出明显的差异。包维楷和陈庆恒(1999)把生态系统的退化过程归纳为如下几种:突变过程、渐变过程、跃变过程、间断不连续过程及复合退化过程。

三、植物修复技术的理论基础

利用植物修复技术恢复退化的生态环境,是一项庞杂的系统工程。因为生态系统本身就是由许多生态因子所决定的开放系统,它被物流、能流和信息流所穿过,通过复杂的生物网结构和多样化的生态环境相互作用,而展示一定的生态功能。植物修复技术涉及众多学科,包括生物地球化学、地质学、植物分类学、植物生理学、植物生态学、植物营养学、毒理学、土壤化学、环境生态学和农业生物环境工程等,多学科交叉为该技术的发展和應用注入了强劲的动力。植物修复技术应用了这些学科的许多理论,主要有:限制性因子原理(生态系统恢复的关键因子)、种群密度制约及分布格局原理(物种组合及空间配置原理)、生态适应性理论(乡土种对群落恢复的重要性)、生态位原理、演替理论、植物入侵理论、生物多样性原理、干扰理论、景观生态学理论等,但最主要的还是生态学理论。

尽管植物修复技术的理论基础较多,但最具指导意义的是恢复生态学中的人为设计理论,这也是唯一从恢复生态学自身产生的理论(盛连喜等,2002)。该理论认为,通过工程方法和植物重建,可直接恢复退化生态系统,但恢复的类型可能是多样的。此理论更强调人的主观能动性,但恢复的结果具有不确定性。

四、植物修复技术的原则

植物修复遵循的原则,也反映了其依据的理论。据此可以归纳出植物修复技术的几个原则(刘凯等,2011;盛连喜等,2002)。

1. 生态学原则

所谓生态学原则,主要是生态演替、食物链(网)和生态位原则等。其包括物质和能量循环再生原理、生物之间及生物与环境间的和谐共存原理、生态系统的自我净化功能等。遵循生态学原则,就是要根据生态系统自身的演替规律和结构与功能统一规律,在生态系统恢复和重建过程中,分步骤、分阶段,循序渐进。植物修复方法的选择、方法的优化组合、影响因子的调控等措施必须遵循生态学的基本原理和方法,才能维持生态修复过程中物质流、能量流、信息流的良性循环和动态平衡,才能最大限度地激活退化环境的自我恢复功能,达到修复目的。

2. 可行性原则

可行性原则包括技术可行性、经济可行性。技术可行性是指修复工程设计方案中的技术应满足先进性、实用性、可操作性、可实施性等要求。经济可行性是指修复工程的技术成本、项目运行成本低,可被接受,工程具有投入成本低、效益佳的特点。进行植物修复时,要认真、透彻地研究被恢复对象的各种情况,做综合的分析评价并充分论证,将风险降到最低。

3. 工艺优化原则

工艺优化原则,也称为整体优化。在污染环境植物修复中,优化原则不仅包括以生态环境的自我恢复能力为核心,对修复工程中各种修复方法、影响因子等进行最优化组合和调控,也包括将修复对象的系统内在自我恢复能力和外源增加的修复功能有机结合,寻求投入的最小化和效果的最大化之间的优化。

4. 地域性原则

由于不同区域具有不同的生态环境背景,如气候条件、地貌条件和水文条件等,这种地域的差异性和特殊性正是原有生物群落形成的基础和条件。因此,植物修复作为一个客观存在的生态工程工艺实体,与所处地域的自然环境和退化特征密切联系。在退化环境执行植物修复计划时,首先需要考虑和遵循的就是地域的生态环境本底和历史背景。物种的引进、生物群落的设计都要因地制宜,有的甚至需要经过长期的定位试验和不同模式的比较,确定工艺参数与调控方法,选择最佳的修复工艺或工艺组合。

5. 安全性原则

工程实施中采用的修复植物及辅助措施不对人体健康造成威胁,不向被修复的环境引入病原微生物或有毒、有害物质,修复过程和结果对环境本身的生态安全性不造成威胁;修复工程环境效应的安全性,即修复工程不产生对地上植物、地下水、空气等有毒害的二次污染物。

参 考 文 献

- 包维楷,陈庆恒. 1999. 生态系统退化的过程及其特点. 生态学杂志, 18(2): 36~42
- 刘凯,张健,杨万勤,等. 2011. 污染土壤生态修复的理论内涵、方法及应用. 生态学杂志, 30(1): 162~169
- 骆永明,查宏光,宋静,等. 2002. 大气污染的植物修复. 土壤, 34(3): 113~119
- 濮培民,王国祥,李正魁,等. 2001. 健康水生态系统的退化及其修复——理论,技术及应用. 湖泊科学, 13(3): 193~195
- 戚继忠,齐清弘. 2000. 园林植物清除细菌能力的研究. 城市环境与城市生态, 13(4): 36~38
- 任海,彭少麟,陆宏芳. 2004. 退化生态系统恢复与恢复生态学. 生态学报, 24(8): 1756~1764
- 盛连喜,冯江,王妮. 2002. 环境生态学导论. 北京: 高等教育出版社
- 王堃. 2004. 草地植被恢复与重建. 北京: 化学工业出版社

- 王庆海, 娟阳, 武菊英, 等. 2010. 3种挺水植物对水体中毒死蜱去除的过程和效率分析. *农业环境科学学报*, 29(4): 769~772
- 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 2001. 植物修复——重金属污染土壤整治有效途径. *生态学报*, 21(2): 326~331
- 韦朝阳, 陈同斌. 2001. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. *生态学报*, 21(7): 1196~1203
- 谢慧玲, 詹瑞华. 1997. 植物杀菌作用及其应用研究. *河南农业大学学报*, 31(4): 367~370
- 张修峰, 刘正文, 谢贻发, 等. 2007. 城市湖泊退化过程中水生态系统服务功能价值演变评估——以肇庆仙女湖为例. *生态学报*, 27(6): 2349~2354
- 章家恩, 徐琪. 1999. 恢复生态学研究的一些基本问题探讨. *应用生态学报*, 10(1): 109~113
- Arthur E L, Rice P J, Rice P J, et al. 2005. Phytoremediation—an overview. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(2): 109~122
- Bhadra R, Wayment D G, Williams R K, et al. 2001. Studies on plant-mediated fate of the explosives RDX and HMX. *Chemosphere*, 44(5): 1259~1264
- Daily G C. 1995. Restoring value to the world's degraded lands. *Science*, 269(5222): 350~354
- Gerhardt K E, Huang X D, Glick B R, et al. 2009. Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: potential and challenges. *Plant Science*, 176(1): 20~30
- McCutcheon S C, Schnoor J L. 2004. Overview of Phytotransformation and Control of Wastes. In: McCutcheon S C, Schnoor J L. *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.: 1~58
- Ghazan N J, Trivedy R K. 2005. Environmental pollution control by using phytoremediation technology. *Pollution Research*, 24(4): 875~884
- Peer W, Baxter I, Richards E, et al. 2006. Phytoremediation and hyperaccumulator plants. In: Tamas M, Martinoia E. *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification*. Berlin/Heidelberg: Springer: 299~340
- Pilon-Smits E, De Souza M P, Hong G, et al. 1999. Selenium volatilization and accumulation by twenty aquatic plant species. *Journal of Environmental Quality*, 28(3): 1011~1018
- Pilon-Smits E, Freeman J L. 2006. Environmental cleanup using plants: Biotechnological advances and ecological considerations. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(4): 203~210
- Pilon-Smits E. 2005. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56(1): 15~39
- Russelle, M P, Kelley, D W, Trojan, M D, et al. 2004. Phytofiltration shows promise to reduce ground water nitrate. In: *Proceedings of the 59th Annual Soil and Water Conservation Society Conference*. July 24-28, 2004, St. Paul, Minnesota. 26
- Saier Jr M H, Trevors J T. 2010. Phytoremediation. *Water, Air and Soil Pollution*, 205(Suppl 1): 61~63
- Tsao D. 2003. Overview of phytotechnologies. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 78: 1~50

第二章 植物修复的研究进展

第一节 污染水体的植物修复

用植物修复技术去除水体 N、P 污染,水生植物是该技术体系中的要素之一,起到举足轻重的作用。水生植物不仅能以水体中 N、P 污染物为养分,通过直接吸收利用而将之清除出水体,而且还能有益微生物提供良好的生活环境,促进微生物的降解功能。同时,水生植物发达的根系还可改善基质的通透性,增强基质对污染物的吸附和转化。因此,研究水生植物的净化效果及净化机理对了解植物修复技术的复杂过程和作用机理有很大帮助。

一、水生植物的概念

水生植物是指生长在水中或至少是生长在由于水分充足而周期性缺氧的基质上的任何大型植物(包括水生植物或水生大型藻类),尤其是在湿地和其他水生生境中生长的植物(王德华,1994)。水生植物是一个生态学范畴上的类群,是不同类群植物通过长期适应水环境而形成的趋同性适应类型,主要包括两大类:水生维管束植物和高等藻类。水生维管束植物(aquatic vascular plant)具有发达的机械组织,植物个体比较高大。通常具有 4 种生活型(life form)(颜素珠,1983):挺水(emergent)、漂浮(free floating)、浮叶(floating leaved)和沉水(submergent)(表 2-1,图 2-1)。

表 2-1 大型水生植物的 4 种生活型

| 生活型 | 生长特点 | 代表种类 |
|------|-----------------------------|---------|
| 挺水植物 | 根茎生于底泥中,植物体上部挺出水面 | 芦苇、香蒲 |
| 漂浮植物 | 植物体完全漂浮于水面,具有特化的适应漂浮生活的组织结构 | 风眼莲、浮萍 |
| 浮叶植物 | 根茎生于底泥,叶漂浮于水面 | 睡莲、荇菜 |
| 沉水植物 | 植物体完全沉于水气界面以下,根扎于底泥或漂浮于水中 | 狐尾藻、金鱼藻 |

水生植物由于长期生活在缺氧、弱光的环境中,在形态学、生理学及其他方面有一些适应性改变,根茎和叶形成了完整的通气组织。特别是长时间生长于污水中的植物,能产生更多的幼株以及增大根密度来加强氧气产生量和输送量,形成一种最大量的地下部分氧气输送体系,以保证器官和组织对氧气的需要(Hardej and Ozimek, 2002;李宗辉等,2007)。在生理学上,它们具有从皮孔和叶将氧输至根、无氧呼吸、乙烯产量增加、硝酸盐转化为 N_2O 和 N_2 效率降低等方面的适应性改变。其他方面的适应性变化包括:具有水面传粉及传播种子的能力、种子可在水中萌发、种子存活力增加等(李扬汉,1984)。

我国水系众多,水生植物资源非常丰富,有 600 多种,其中高等水生植物有 300 多种

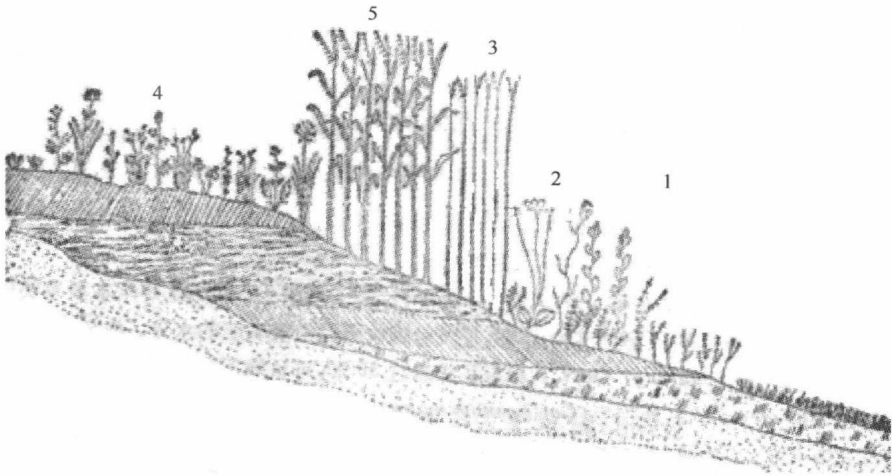


图 2-1 湖泊植物丛生的情况(模式图)(李扬汉,1984)

1. 沉水植物;2. 浮叶植物;3. 挺水植物;4. 湿生植物;5. 由挺水植物向湿生植物过渡类型

(中国国家环境保护总局,2007)。根据北京市水土保持工作总站的《北京地区水生植物资料汇编》,北京所见水生植物有 51 科 83 属 147 种,包括乔木、灌木和草本植物。据统计,研究人员目前已对 45 种以上的水生植物净污作用进行了研究(表 2-2)(朱斌等,2002)。水生植物在生态系统中具有重要的地位。它们从太阳获得能量,并通过光合作用将能量贮存在化学键中,作为动物直接或间接的食物来源;水生植物可以为许多野生生物提供栖息场所;水生植物还是碳氧气体循环中活跃的参与者。

表 2-2 净化富营养化水体的水生植物研究频度统计

| 序号 | 研究频度等级 | 水生植物名称 | 生态类型 |
|----|--------|---|---------|
| 1 | 1 | 凤眼莲(<i>Eichhornia crassipes</i>) | 漂浮植物 |
| 2 | 2 | 芦苇(<i>Phragmites australis</i>) | 挺水植物 |
| 3 | 3 | 喜旱莲子草(<i>Alternanthera philoxeroides</i>) | 挺水或湿生植物 |
| 4 | 4 | 香蒲(<i>Typha angustifolia</i>) | 挺水植物 |
| 5 | 5 | 菹草(<i>Potamogeton crispus</i>) | 沉水植物 |
| 6 | 6 | 水蕴(<i>Ipomoea aquatica</i>) | 挺水或湿生植物 |
| 7 | 7 | 茭白(<i>Zizania latifolia</i>) | 挺水植物 |
| 8 | 7 | 浮萍(<i>Lemna minor</i>) | 漂浮植物 |
| 9 | 7 | 菱(<i>Trapa quadrispinosa</i>) | 浮叶植物 |
| 10 | 7 | 金鱼藻(<i>Ceratophyllum demersum</i>) | 沉水植物 |
| 11 | 8 | 伊乐藻(<i>Elodea canadensis</i>) | 沉水植物 |
| 12 | 8 | 莲花(<i>Nelumbo nucifera</i>) | 浮叶植物 |
| 13 | 8 | 苦草(<i>Vallisneria spiralis</i>) | 沉水植物 |
| 14 | 8 | 黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>) | 沉水植物 |

续表

| 序号 | 研究频度等级 | 水生植物名称 | 生态类型 |
|----|--------|--|---------|
| 15 | 8 | 水芹(<i>Oenanthe javanica</i>) | 挺水或湿生植物 |
| 16 | 9 | 紫萍(<i>Spirodela polyrhiza</i>) | 漂浮植物 |
| 17 | 9 | 灯心草(<i>Juncus effusus</i>) | 湿生植物 |
| 18 | 9 | 菖蒲(<i>Acorus calamus</i>) | 挺水植物 |
| 19 | 9 | 水葱(<i>scirpus tabernaemontani</i>) | 挺水植物 |
| 20 | 9 | 多花黑麦草(<i>Lolium multiflorum</i>) | 湿生植物 |
| 21 | 9 | 大茨藻(<i>Najas marina</i>) | 沉水植物 |
| 22 | 9 | 睡莲(<i>Nymphaea tetragona</i>) | 浮叶植物 |
| 23 | 10 | 满江红(<i>Azolla imbricata</i>) | 漂浮植物 |
| 24 | 10 | 大花美人蕉(<i>Canna generalis</i>) | 栽培或陆生植物 |
| 25 | 10 | 聚草(<i>Myriophyllum spicatum</i>) | 沉水植物 |
| 26 | 10 | 水鳖(<i>Hydrocharis dubia</i>) | 漂浮植物 |
| 27 | 10 | 荇菜(<i>Nymphoides peltatum</i>) | 漂浮植物 |
| 28 | 10 | 槐叶萍(<i>Salvinia natans</i>) | 漂浮植物 |
| 29 | 10 | 石菖蒲(<i>Acorus tatarinowii</i>) | 挺水植物 |
| 30 | 11 | 稻(<i>Oryza sativa</i>) | 挺水植物 |
| 31 | 11 | 鸭跖草(<i>Commelina communis</i>) | 湿生植物 |
| 32 | 11 | 慈姑(<i>Sagittaria sagittifolia</i>) | 挺水植物 |
| 33 | 11 | 荆三棱(<i>Scirpus yagara</i>) | 挺水植物 |
| 34 | 11 | 马来眼子菜(<i>Potamogeton malaianus</i>) | 沉水植物 |
| 35 | 11 | 篦齿眼子菜(<i>Potamogeton pectinatus</i>) | 沉水植物 |
| 36 | 11 | 狐尾藻(<i>Myriophyllum</i> sp.) | 沉水植物 |
| 37 | 12 | 大藻(<i>Pistia stratiotes</i>) | 漂浮植物 |
| 38 | 12 | 水芋(<i>Calla salustris</i>) | 挺水或湿生植物 |
| 39 | 12 | 荸荠(<i>Eleocharis dulcis</i>) | 挺水植物 |
| 40 | 12 | 普生轮藻(<i>Chara vulgaris</i>) | 沉水植物 |
| 41 | 12 | 水筛(<i>Blyxa japonica</i>) | 沉水植物 |
| 42 | 12 | 水龙(<i>Jussiaea repens</i>) | 漂浮植物 |
| 43 | 12 | 两栖蓼(<i>Polygonum amphibium</i>) | 浮叶植物 |
| 44 | 12 | 薏苡(<i>Coix lacryma-jobi</i>) | 湿生植物 |
| 45 | 12 | 茭苳(<i>Cyperus malaccensis</i>) | 挺水植物 |

二、水生植物的净化效果

水生植物对污水的净化作用包括附着、吸收、积累、降解等。污水中的悬浮颗粒在根区网络系统的过滤作用下沉降,放射性物质、重金属和一些有毒、有害物质可被植物根系