

· 综 述 ·

# 受污水体水生植物修复技术的应用及其发展

王正兴, 沈耀良

(苏州科技学院江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215011)

**摘要:** 基于水生植物修复技术的基本特征, 本文着重对其应用中的区域性、安全性、影响因素等问题及目前新型植物修复技术进行了分析探讨。

**关键词:** 水生植物; 影响因素; 发展前景

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1001-3644(2006)03-0077-04

## Application and Prospect of the Aquatic Plants in Polluted Water Purification

WANG Zheng-xing, SHEN Yao-liang

(Key Lab of Environmental Science & Engineering, University of Science & Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China)

**Abstract:** Based on the basic characters analysis of the aquatic plants, the application zones, security and influence factors of biological repair are analyzed, and the new application of aquatic plant technology in polluted water purification are also introduced.

**Key words:** Aquatic plant; influence factor; prospect

## 1 前言

目前水生植物修复技术, 因其低廉的投资管理费用、稳定的净化效果、种类繁多而潜力巨大、无二次污染等优点而日益引起关注。植物修复技术利用植物自身与周围微生物、环境共同作用来处理土壤或受污染水体。植物对污染物具有特殊的耐受作用, 尤其是水生植物, 能够通过绿色植物特有的光合作用, 吸收、分解水中氮、磷等营养物质; 同时水生植物的根、茎、叶为微生物的生长提供了良好的界面环境, 其中空的结构利于氧气的传输, 使根系周围形成了兼氧、好氧等多种微生物, 经过硝化反硝化过程, 与植物自身共同作用, 对水中污染物形成良好的去除效果。

## 2 水生植物修复技术的应用

### 2.1 应用的区域性

水生植物种类繁多, 据不完全统计, 仅太湖中水生维管束植物种类总和就超过八十种, 其中包括挺水植物、浮水植物、浮叶植物和沉水植物等类型。而水生植物修复技术兴起于近十几年, 发展时间较短, 研究的种类少, 范围较为集中, 大部分植物种类、特性尚不为人知。

尽管本技术开发前景广阔, 但水生植物的生长受风、湿度、温度、光照等气候条件的影响, 具有一定的区域性, 适宜的风速和湿度会影响污染物的挥发及植物的蒸腾作用, 光照、温度的变化对植物的光合作用及光合产物的运输、分布至关重要, 进而影响根分泌物的含量与组成, 最终影响植物的修复效果<sup>[1]</sup>。因此, 水生植物修复选择植物宜因地制宜, 首选生长在受污水体中的原生植物, 既治理了受污水体, 又恢复了水体自身的自然生态系统。同时亦可引种外来物种, 但其对当地水体的适应性及修复效果尚需进一步研究论证。

收稿日期: 2006-01-17

基金项目: 国家“十五”重大科技专项 863 项目(2003AA601070); 江苏省“十五”社会发展重点项目(BS2004048)

作者简介: 王正兴(1980-), 男, 内蒙古赤峰人, 苏州科技学院环境工程专业 2004 级在读硕士研究生, 助理工程师。研究方向为水污染控制。

## 2.2 生物入侵及基因技术

受污水体引种水生植物易随植物的迅速生长而产生生物入侵问题。生物入侵指人们的活动有意或无意将产于外地的生物引到本地,这些生物快速地进行生长繁衍,危害本地生产和生活,改变当地生态环境,带来巨大危害<sup>[2]</sup>。以上海为例,凤眼莲是常用的一种治理污染水体的水生漂浮植物,其对各类污染物均有极强的抗污净化能力,但凤眼莲的过度生长严重影响了上海城市河道航行的通畅性,2003年,仅黄浦江、苏州河的人工打捞凤眼莲总量就超过60000吨<sup>[3]</sup>。而即便使用现代生物技术培育的转基因植物,如控制不当,其进入自然或人工水体后,仍有可能成为入侵物种对生态系统造成破坏。因此,引进外来物种处理污染水体,有必要对其生长特性特别是其对原水体生态系统的影响进行详细评价。

由于水生植物种类多、数量大,其对污染水体的修复潜力尚未完全开发,因此现阶段生物基因技术应用于水生植物修复的研究较少,大部分尚处于实验阶段。如 Varvara P Grichko 等将细菌中的1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氨基酶基因引入到番茄 *Lycopersicon esculentum* 后,分别在启动基因35S(花椰菜同源嵌合体病毒)、rolD (*Agrobacterium rhizogenes*) 和 PRB-1b(番茄)的控制下,番茄对Cu、Zn等重金属的富集作用有不同程度的提高<sup>[4]</sup>;美国华盛顿大学将具有强氧化卤素能力的人体细胞色素P<sub>450</sub>的转录基因转移到烟草上,结果被改造的烟草分解三氯乙烯的速度比对照高出640倍<sup>[5]</sup>。

## 2.3 影响因素

### 2.3.1 温度

温度是水生植物生长的必备要素,因此也影响着植物对受污水体的净化效果。高光等<sup>[6]</sup>在伊乐藻、轮叶黑藻净化污水效果实验中分别于6~8、12~15、17~19、23~25的环境条件下,在96h内,测定水中TN、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、COD<sub>Mn</sub>等指标发现:(1)温度对水生植物的净化效果影响很大。在6~8范围内,随着温度的降低,伊乐藻及轮叶黑藻对污水的净化率显著降低。(2)在实验所设定的条件下,23~25时,伊乐藻及轮叶黑藻对污水的净化效果最好。同时,水温对植物的季节生长也有显著影响,它不仅决定植物的萌发、生长

量和生长速率,还决定着开花和休眠期<sup>[7]</sup>。有研究表明苦草等水生植物的种子萌发与种皮结构、水温及萌发基质有关,水温对植物种子的萌发有一定的促进作用<sup>[8]</sup>。

### 2.3.2 光照

水体光强影响着水生植物特别是沉水植物的光合作用,苦草适于在水底生长,金鱼藻和狐尾藻在水体上层有较强的竞争能力,菹草和黑藻的最大光合产量出现在中层<sup>[9]</sup>。水底的光强往往很弱,一般认为,水底光强不足入射光的1%时,沉水植物不能定居。不同植物对光照的敏感程度不同,而水体的透明度即成为表征水体光照的限定因子。梁子湖水草的种群数量受到水深及透明度的影响,当水深/透明度比值达5.26时,绝大部分水草生长受到制约<sup>[10]</sup>。尤其藻类富营养湖泊中较低的透明度是制约沉水植被修复的关键因子<sup>[11]</sup>。有研究表明:在水体的一定深度存在光补偿点和补偿深度,只有在光补偿深度以上,沉水植物才能进行正常的光合作用和呼吸作用<sup>[12]</sup>。

### 2.3.3 营养水平

受污水体中的N、P等是水生植物生长的营养来源,有的植物喜欢偏肥水体,有的喜欢偏瘦水体。为研究水中N、P含量与水生植物净化效率的关系,有研究表明向网围养鱼试验区的养鱼污水中分别加入5mg/L、10mg/L、20mg/L的KNO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub>Cl、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>配成实验用污水,于17~19, pH值7.44~7.51,96h内实验发现:在一定的浓度范围内,水生植物的净化率随水体中N、P等物质含量的增加而增大;随着水中N、P浓度的不断增大,超过一定限度后,水生植物的净化率反而减小。可见,水生植物对污染物的吸收及耐受能力有一定限度,其净化率并非随水体营养化程度成正比增长<sup>[6]</sup>;金鱼藻在一定营养程度范围内具有一定的抵抗逆境胁迫、适应环境的能力,但当营养盐浓度过高超过金鱼藻抗逆能力时,就会抑制金鱼藻的生长<sup>[13]</sup>。

水生植物特别是沉水植物的引种与恢复对水体污染的治理有明显作用,但水体的温度、光照强度与营养负荷已成为沉水植物能否有效发挥作用的瓶颈。因此,在水体营养负荷较低,植物生长缓慢的条件下,可投加微生物制剂作为有效补充,改善水体透明度,然后再引种水生植物,提高净化效率<sup>[14]</sup>。

### 3 水生植物修复技术的发展

#### 3.1 网箱养草技术

水生植物修复亦面临诸多问题, 如: 水位升高或水华导致水体光照不足影响沉水植物生长; 水生植物修复初期, 新建立的生态系统相当脆弱, 如何使之适应环境变化及环境灾变并逐步趋于稳定, 是水生植物修复的关键; 尤其植物生长初期, 在生存竞争中与藻类相比, 难以取得竞争优势, 常导致修复失败<sup>[15]</sup>。

近年来, 鉴于沉水植物在富营养化湖泊修复中的重要作用, 人们将沉水植物引种至网箱中, 离开底泥, 悬浮在水中生长, 以弥补富营养化水体光照不足等缺点, 并利于管理、收获。同时依据季节、处理程度的要求, 借助网箱沉子、浮子的随意移动, 充分利用距离优势, 及时调整光照, 随时控制植物数量、种类, 使净化效率最大化, 即“网箱养草”技术。

1998年, 谢田等<sup>[16]</sup>将金鱼藻、竹叶眼子菜、黑藻悬浮养殖于类似网箱养鱼的网箱内, 置于废水塘中, 结果发现植物生长正常时, 其对静水和流速

10 m/min 的水能提高水体 DO, 静水中对 TN、TP、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 削减明显, 其中金鱼藻对网箱养草的种植方式适应良好。同时金鱼藻自散养之日起, 约 2 个月内增氧作用明显, 若人为将其周转周期定为 2 个月, 这一周转周期虽比自然生长的沉水植物快, 但比藻类几天或一周的周转周期要慢得多, 这就有利于减缓营养循环, 控制藻类, 从而增加水体稳定性。2003~2004 年, 在云南星云湖的现场试验证明本技术对 TN、TP 有明显的削减作用<sup>[17]</sup>。

“网箱养草”净水技术具有良好的应用前景, 但仍有尚需解决的问题, 如 (1) 网箱特有的距离优势虽然提高了植物光合作用的速度与效率, 但持续高的光合速率是否会导致无机碳源的匮乏, 尤其是由于游离 CO<sub>2</sub> 消耗, 使表层水 pH 过高, 造成其偏离植物光合作用最适 pH, 致使光合速率下降, 废水中对植物有毒害作用的非离子氨比例增大, 因此, 网箱内水体 pH 值的大小及变化规律需进一步研究; (2) 植物的“向重性”尚不清楚, 其关系到网箱中植物的栽培方式 (平卧栽培、竖直栽培); (3) 工程实施中网箱的制作、工程预算及其可操作性等问题都未有详细论证。

#### 3.2 超积累植物

目前水生植物修复主要依靠直接从水体吸收

N、P, 但其中一些重金属及其化合物亦可以离子形式转移到植物体内并得到富集, 此类植物即超积累植物。超积累植物通常在污染物胁迫环境下长期诱导、驯化并发生适应性突变, 其往往生长缓慢, 生物量低, 并常受到其它植物的竞争性威胁。超积累植物多为野生型稀有植物, 对生物气候条件要求较为苛刻, 分布区域性较强, 因此使成功引种受到严重限制。

超积累植物修复过程的机理是: 通过螯合离子交换和选择性吸收等物理和化学过程吸收金属离子; 给根际微生物提供附着和形成菌落的场所, 并促进微生物群落的生长, 而在根际微生物的体内, 重金属离子和细胞壁上的活性基团 (包括羧基、羟基、磷酸基、胺基等) 发生定量结合反应, 通过物理吸附或形成无机沉淀沉积在细胞壁上; 植物还通过根部释放的分泌物的作用将金属离子以沉淀物的形式沉降下来<sup>[18]</sup>。如重金属诱导就可使凤眼莲体内产生有重金属络合作用的金属硫肽, 这些机制使许多水生植物具有富集大量重金属的能力<sup>[19]</sup>。

有研究表明, 紫萍生长速度快, 可富集铬、镍; 满江红可富集铅、汞、铜等<sup>[20]</sup>; 槐叶萍在 6 h 内表现出快速吸收与净化作用, 其对水体中银的净化率达 81.0%<sup>[11]</sup>; 湿重每 kg 浮萍在 3 d 内能够吸收 42.53 mg 铜、34.3 mg 铅、1.11 mg 镉<sup>[21]</sup>; 李卫平等研究表明, 在废水中重金属同等起始浓度下 (3.8 ug/g), 干重每 kg 水葫芦富集铜 1.40 g、锌 0.48 g、镍 0.21 g、铬 1.80 g<sup>[22]</sup>。宽叶香蒲能有效净化铅、锌矿废水, 对铅、锌、铜和镉的去除率分别达到 93.98%、97.02%、96.87% 和 96.39%, 使水质得到明显改善<sup>[23]</sup>。

通过植物的富集作用, 重金属在环境中的浓度明显降低, 富集在植物体内的重金属还可通过定期收割等方式回收利用, 既作到污染治理, 又可回收、节约资源, 实现可持续发展。超积累植物专一性、区域性强, 目前大多处于实验阶段, 因此今后应大力开发适应性强、高效稳定的超积累水生植物。

#### 3.3 水生经济植物

水生植物修复研究多注重处理效果, 较少顾及经济效益, 常选择如凤眼莲、宽叶香蒲等植物, 景观效果欠佳且经济价值不高。

由文辉等<sup>[24]</sup>将水生经济植物水蕹菜、水芹菜以无土栽培方式, 丽娃河水为种植水, 分别作静态实验与现场实验。静态实验发现水蕹菜 (4~10

月)和水芹菜(11~3月)对河水均有较好的净化能力。当河水停留时间为30d时,水蕹菜对污染物的去除率为:TN 81.32%, $\text{NO}_3\text{-N}$  89.90%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  87.86%,TP 71.34%;水芹菜对污染物的去除率为:TN 82.77%, $\text{NO}_3\text{-N}$  86.64%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  86.03%,TP 94.77%。根据污染物去除率负荷测算,每公斤水蕹菜(鲜重)每天可去除污水中TN 26.49 mg, $\text{NO}_3\text{-N}$  16.70 mg, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  8.31 mg,TP 3.22 mg;每公斤水芹菜(鲜重)每天可去除污水中TN 24.73 mg, $\text{NO}_3\text{-N}$  13.25 mg, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  11.25 mg,TP 2.71 mg。至实验结束(30d),发现两植物除根部外,茎、叶部分重金属含量均达到食用标准。

现场实验表明,若以水蕹菜一年栽种200d计,通过定期收割(25d),每平方米水面可获水蕹菜34.4 kg,同时可自河水中移除TN 182.25 g、TP 22.15 g;若以一年栽种水芹菜60d计,每平方米水面可收获水芹菜15.2 kg,同时可自河水中移除TN 22.55 g、TP 2.47 g。若实现轮种,则每平方米水面可收获经济植物约50 kg,以每公斤一元计,每平方米产值50元,约为投入成本(种苗、人工载体、人工管理费等)的2倍左右。

由此可见,采用经济植物修复受污水体,效果良好,兼顾经济效益,能提高政府与企业的积极性,具有广阔的市场前景。

## 4 结 论

水生植物修复技术节省投资、效果稳定,但此技术起步较晚,且融生态学、生物科学、环境科学、植物学、植物生理学、现代水利工程学、景观学、美学等多学科于一体,对复合型人才要求很高,技术开发难度较大<sup>[25]</sup>。未来的研究应注重本土原生植物的特性、跨区域引进新型物种的意义、水生植物修复的机理、物质循环、根系与水或土壤的微环境关系、植物与周围微生物如何共同作用等方面。尽管仍有诸多不足,但随着研究手段的不断提高,人们认知水生植物的不断深入,其将得到更为广泛的应用。

## 参考文献:

[1] 韩阳,李雪梅,朱延姝,等. 环境污染与植物功能[M]. 北京:化学工业出版社,2005. 199-209.

- [2] 杨凤辉,马涛,陈佳宽,等. 上海黄浦江凤眼莲灾害的发生机理及控制对策初探[J]. 复旦学报(自然科学版),2002,41(6):599-603.
- [3] 印丽萍,钱天荣,沈国辉,等. 外来入侵植物对上海生物安全的影响及防范[J]. 上海农业学报,2004,20(4):102-104.
- [4] Varvara P Grichko. Increased ability of transgenic plants expressing the bacterial enzyme ACC deaminase to accumulate Cd, Co, Cu, Ni, Pb and Zn[J]. Journal of Biotechnology, 2000, 81: 45-53.
- [5] Doty S L, Shang T Q, Wilson A M. Enhanced metabolism of halogenated hydrocarbons in transgenic plants containing mammalian cytochrome P450 2E1[J]. Proceeding National Academy of USA, 2000, 97:6287-6291.
- [6] 高光. 伊乐藻、轮叶黑藻净化养鱼污水效果试验[J]. 湖泊科学,1996,8(2):184-188.
- [7] 苏胜齐,姚维志. 沉水植物与环境关系评述[J]. 农业环境保护,2002,21(6):570-573.
- [8] 由文辉,宋勇昌. 淀山湖3种沉水植物的种子萌发生态[J]. 应用生态学报,1995,6(2):196-200.
- [9] 苏文华,张光飞,张云孙,等. 5种沉水植物的光合特征[J]. 水生生物学报,2004,28(4):391-395.
- [10] 陈中义,雷泽湘,周进. 梁子湖六种沉水植物种群数量和生物量周年动态[J]. 水生生物学报,2000,24(6):582-588.
- [11] 张圣照,王国祥,濮培民. 太湖藻型富营养化对水生高等植物的影响及植被的恢复[J]. 植物资源与环境,1998,7(4):52-57.
- [12] 白峰清,郑丙辉,田自强. 水生植物在水污染控制中的生态效应[J]. 环境科学与技术,2004,27(4):99-100.
- [13] 王珺,顾宇飞,朱增银,等. 不同营养状态下金鱼藻的生理响应[J]. 应用生态学报,2005,16(2):337-340.
- [14] 王建华,潘伟斌. 城区富营养化景观水体的生物修复技术[J]. 四川环境,2005,24(5):34-36.
- [15] 王国祥,成小英,濮培民. 湖泊藻型富营养化控制-技术、理论和应用[J]. 湖泊科学,2002,14(3):273-282.
- [16] 谢田,陈桂芳,熊娅,等. 网箱养草净化地表水现场扩大实验结果初探[J]. 贵州环保科技,2001,7(1):12-16.
- [17] 谢田,汪俊三,覃环,等. "网箱养草"净化水质的设想及初步试验结果-IV 污染物削减效应探讨[J]. 贵州环保科技,2005,11(1):7-11.
- [18] 唐志坚,张平,左社强,等. 植物修复技术在地表水处理中的应用[J]. 中国给水排水,2003,19(7):27-29.
- [19] 王英彦. 用凤眼莲根内金属硫肽检测水体的重金属污染的初步研究[J]. 环境科学学报,1994,14(4):431-438.
- [20] 种云霄,胡洪营,钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2003,4(2):36-40.
- [21] 辛晓云,马秀东. 氧化塘水生植物净化污水的研究[J]. 山西大学学报(自然科学版),2003,26(1):85-87.
- [22] 李卫平,王军,李文,等. 应用水葫芦去除电镀废水中重金属的研究[J]. 生态杂志,1995,14(4):30-35.
- [23] 阳承胜,蓝崇钰,束文圣. 宽叶香蒲人工湿地对铅/锌矿废水净化效能的研究[J]. 深圳大学学报(理工版),2000,17(2):51-57.
- [24] 由文辉,刘淑媛,钱晓燕. 水生经济植物净化受污染水体研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2001,(1):99-102.
- [25] 胡晓东,阮晓红,宫莹. 植物修复技术在我国水环境污染治理中的可行性研究[J]. 云南环境科学,2004,23(1):48-50.