



环境科学

水生植物原位修复水体污染应用研究进展

陆东芳¹ 陈孝云²

(福建农林大学园林学院¹, 材料工程学院², 福州 350002)

摘要 随着水体环境污染的加重和人类环保意识的增强,人们不断地寻求新的水污染治理技术。水生植物原位修复作为一种高效、低耗、环境友好的水污染治理技术近年来受到广泛关注。介绍了近年来水生植物原位修复技术在水污染治理方面的应用研究进展。

关键词 水生植物 原位修复 水污染治理

中图分类号 X173; **文献标志码** B

随着工业的发展和城市建设速度的加快,大量废气、废水等的排放严重污染了水体、大气环境,影响了人类的身心健康和正常生活^[1-3]。而传统的物理、化学、生物等处理技术已不能满足现代工业和社会发展的需求,由此越来越多的专家、学者着手寻求高效、低耗、环境友好的水污染处理技术^[4-7]。一些研究表明,采用水生植物净化富营养化水体、低浓度有机及重金属污染物时起到良好的效果,该技术不仅能起到净化水的作用,还能改善生态环境,促进退化水生生态系的恢复,成为近年来环境领域研究的热点之一^[8-13]。但由于水生植物净化技术起步的较晚,目前大多数的研究还集中于同一生活型水生植物对废水的净化效率方面,而对利用不同境的水生植物处理污染水体的研究则较少^[9,13-17]。本文试图通过对前人研究进行探讨,以期从植物的基因出发通过改变植物的某些基因来提高植物对污染物的净化功能。

1 水生植物原位修复的概念

水生植物原位修复即利用水生植物吸收、降解或转化污染环境中有毒有害物质,减少其浓度的修复方法。与传统物理、化学修复技术相比,植物原位修复技术具有可原地进行、投资省、对周围环境的扰动小、对污染物去除具有持久性、公众易接受、可以与物理化学方法结合使用等优点^[5,13,14,18,19]。但植物原位修复也有其局限性,例如有些化学物质利用植物降解比较困难、植物对污染物的净化具有专一性、植物对污染物会发生中毒等^[8,20-22]。

2 水生植物修复技术的应用

2.1 重金属污染的植物修复

环境中的重金属并非是植物生长所需要,当达到一定程度后具有毒害作用,对于此类化合物一些植物演化出了特定的生理机制使其脱毒。高等水生植物通常是通过螯合和区室化等作用来耐受并吸收富集环境中的重金属^[23,24],如重金属诱导可以使凤眼莲体内产生有重金属络合作用的金属硫肽,

这些机制的存在使许多水生植物可大量富集水中的重金属^[25]。低等水植物藻类对重金属的去除一般通过吸附和转移两个阶段来实现,通常受光照、温度、pH、重金属浓度及其化学形态、水硬度等物理化学因素影响^[23,26]。表 1 为常见水生植物对污染物的去除情况。

Zayer 等^[27]研究了浮萍对废水中微量元素的积累,结果表明浮萍对 Cd、Se 和 Cu 有良好累积效果,对 Cr 的累积能力一般,对 Ni 和 Pb 累积能力较差;而这些微量元素对植物生长的毒性效应为 Cu > Se > Pb > Cd > Ni > Cr。Hansen 等^[28]利用兔脚草、猫尾草、盐水沼泽蕹草属等植物净化含 Se 石油炼制废水,其对 Se 的除去率可达 89%。Zhang 等^[29]研究发现,水中大型植物中金属浓度受土壤和水质 pH 值的影响,水生植物的金属生物利用率取决于环境金属浓度、土壤或水 pH 值、配位体浓度、与其他金属对络合点的竞争以及暴露方式等。Soeder 等^[30]对空心藻吸附 Pd 和 Cd 进行了研究,1 mg · L⁻¹ 的 Pd 溶液中发现 在 23℃ 下净化 20 h,对 1 mg · L⁻¹ 的

Pd 溶液中吸收率达 100%,在 30℃ 下仅 1.5 h 就能从溶液中吸收 90% 的 Pd;而在同等条件下对 Cd 的吸收效率要低一些。杨红玉等^[26,31]研究发现,在 Cd 离子浓度低于 0.5 mg · L⁻¹ 时绿藻能有效吸收镉,此时富集系数也最大。

2.2 富营养化水体的植物修复

大型水生植物可以直接从水层和底泥中吸收氮、磷,并同化为自身的结构组成物质(蛋白质、核酸等)。同化的速率与生长速度、水体营养物水平呈正相关,并且在合适的环境中,它往往以营养繁殖方式快速积累生物量,而氮、磷是植物大量需要的营养物质,所以对这些物质的固定能力较高^[32—38]。藻类对营养物质的去除一般为吸收利用,但优先吸收氨氮和其他还原态氨。由于藻类不产生活性硝酸还原酶,它对硝态氮的吸收仅仅发生在氨氮浓度极低或耗尽时,对磷的去除通常受 N/P 比影响。当污水中氮浓度高而磷浓度低时,藻类对磷的去除率较高,反之则降低^[39—41]。

表 1 常见水生植物对污染物去除情况

植物种类	生长特点	氮、磷存储量/(t · hm ⁻²)	污染物去除功能
凤眼莲	根系发达,生长速度快,分泌克藻物质	20.0—24.0	富集镉、铬、铅、汞、砷、硒、铜、镍等;吸收降解酚、氰; COD、BOD 去除率高;抑制藻类生长
大漂	根系发达	6.0—10.5	富集汞、铜
浮萍	生长速度快,分泌克藻物质	1.3—5.2	富集镉、铬、铜、硒;抑制藻类生长
紫萍、槐叶萍	生长速度快,分泌克藻物质	2.4—3.2	富集铬、镍、硒;抑制藻类生长
满江红	生长速度快,分泌克藻物质	—	富集铅、汞、铜
香蒲	根系非常发达,生长速度快	4.3—22.5	去除砷、锑、铁、锰, BOD、氮;酚类和石油类污水
芦苇、	根系非常发达,生长速度快	6.0—35.0	去除砷、锑、铁、锰, BOD、氮;酚类和石油类污水
石菖蒲	根系发达,分泌克藻物质	8.6—32.7	抑制藻类生长
猫尾草	出苗速度慢,生长速度较快	—	去除 Se
狐尾藻	生长速度快	—	吸收 TNT、DNT 等结构相近化合物
空心藻	生长速度快	—	富集铅和镉

吴振斌等^[42]等在东湖利用围隔移栽苦草、狐尾藻和菹草等沉水植物,经过3年时间围隔区域水体透明度显著升高,BOD和COD大大降低。吴洁^[43]等对杭州西湖浮游植物群落进行为期2年的逐月调查分析,结果表明大部分采取截污、疏浚、引水冲污等治理措施的湖区,浮游植物群落结构与治理前基本相同;而西湖子湖之一小南湖经一系列工程重建,恢复大面积沉水植物后,水体透明度大大提高,藻量明显下降。由此可见截污、疏浚和引水等治理措施并不能根本改善湖泊水质,重建和恢复水植物系统才是治理富营养化湖泊的关键。宋祥普等^[44]采用水域浮床无土种植水稻的方法,通过水稻的吸收和富集作用去除水体中的氮和磷。王超等^[45]利用黄花水龙处理太湖地区沟渠、池塘及河网水体中的氮、磷等物质。唐静杰等^[46]利用香根草、水葫芦、水芹等植物吸收富营养化的氮、磷,都取得较好的效果。大森美香子等^[47,48]研究了水茭苳、洋麻和马蹄莲对水质的净化性能,发现水茭苳成长速度最快,对氮、磷去除速度也最快。黄德锋等^[49]研究了风车草、美人蕉两种植物人工湿地在不同月份对富营养化景观水的净化效果,发现其对富营养化景观水中的污染物均有较好的净化效果,但风车草湿地去除效果优于美人蕉湿地;且对污染物的去除效率随水力负荷的增加而降低。Brix等^[50]研究发现挺水植物对磷、氮的吸收能力分别为 $(30-150) \text{ kg 磷}/(\text{ha}^2 \cdot \text{年})$ 、 $(2\ 000-2\ 500) \text{ kg 氮}/(\text{ha}^2 \cdot \text{年})$ 。Sharon等^[51]进行凤眼莲净化二级处理出水实验研究,发现7 d后植物组织中的氮量增加了2.9%、磷增加了6.7%。Gustavo等^[6]对凤眼莲和水浮莲进行了14周的实验,结果发现凤眼莲对TP、TN、NTU的去除效果分别为82.0%、46.1%、90.6%,水浮莲分别为83.3%、43.9%、89.3%。周元清等^[52]以3种不同生活型的水生植物慈姑、大藻、穗状狐尾藻作为提取剂去除废水中的污染物,发现这3种水生植物对废水均有显著的净化效果,经处理后废水的TN、TP、NH-N、NO₂-N、NO₃-N、BOD、COD显著下降。Tam等^[53]将小球藻和栅藻分别培养在一级处理出水和二级处理出水中,结果表明两种藻类在一

级处理水中生长得较好,培养一周后对氮、磷的去除率达到70%以上。Govindan等^[54]利用藻类处理混合污水时发现,除了氮磷大量被去除外,BOD和COD也减少了90%。

2.3 有机物污染水体的植物修复

许多水生植物不仅有较高的耐污能力,还能富集水中的有机物质。比如凤眼莲由于其线粒体中含有多酚氧化酶,可以通过多酚氧化酶对外源苯酚的羟化及氧化作用而解除酚对植物株的毒害^[55-62],所以对含酚有机物有很强的吸收富集能力。藻类对有机物的去除主要是通过富集和降解,对于不同藻类及不同污染物其富集机制亦不相同^[39]。

Soltan等^[63]研究发现,酚浓度为 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液用凤眼莲净化(30—40)h,酚可降至 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;且在一定温度范围内(17℃—37℃)随着温度的升高凤眼莲除酚速度加快。Joseph等^[64]研究发现,沉水植物狐尾藻等具有直接吸收降解三硝基甲苯的能力,酚及氰化物等在植物体内能分解转变为营养物质,但是TNT在植物体内的降解机制尚不清楚。王剑虹^[65]指出芦苇对酚类和石油类污水具有净化作用。周元清等^[66,67]对凤眼莲、芦苇、水花生水生净化石油化工废水进行了研究,发现凤眼莲对COD、BOD的去除率最高,芦苇次之,水花生稍低。Hosetti等^[68]认为单种藻类对BOD的去除比单种细菌或原生动物更有效,其中普通小球藻对BOD的去除率可达到83%。林毅雄等^[69]发现斜生栅藻、策哈衣藻和普通小球藻对丙体-666有机农药的去除效果明显。Maguire等^[70]对金属有机物净化的研究,发现纤维藻能在 $25 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的三丁锡中生长,并能将三丁锡降解为二丁锡、单丁锡和无机锡。邓星明等^[71]利用藻菌生物膜净化炼油废水发现,坑形席藻能去除正十四烷。刘厚田等^[72,73]研究发现在藻菌共生系统中藻类也能单独降解偶氮染料,当放养凤眼莲后对酚去除效率提高2—3倍。

2.4 水生植物与生物协同作用对污染物的净化

水生植物不仅可以吸收和富集某些有机污染物,还能促进物质的沉淀和微生物的分解作用来净

化水体。一些研究表明^[74—78],水生植物群落的存在为微生物和微型动物提供了附着基质和栖息场所,其浸没在水中的茎叶为形成生物膜提供了广大的表面空间,埋在湿地土壤中的根系也为微生物提供了基质。植物机体上寄居着稠密的光合自养藻类、细菌和原生动物的新陈代谢能大大加速截留在根系周围的有机胶体或悬浮物的分解^[79]。Reed 等^[80]研究表明根系微生物与凤眼莲等植物有明显的协同净化作用,在凤眼莲和水浮莲等植物根部吸附有大量的微生物和浮游生物,大大增加了生物的多样性使不同种类污染物逐次得以净化。利用固定化氮循环细菌技术,可使氮循环细菌从载体中不断向水体释放,并在水域中扩散,影响了水生高等植物根部的菌数,从而通过硝化—反硝化作用,进一步加强水体除氮能力和强化整个水生生态系统的自净能力。

3 水生植物修复技术的应用前景展望

水生植物修复技术是近年发展起来的一项污染环境治理技术,采用水生植物修复污染环境与传统物理化学技术相比可以节省大量投资、可以就地进行、对周围环境的影响小等优点。由于水生植物修复技术的研究起步较晚,目前还存在一些亟待解决的问题:(1)人们在利用水生植物对污水进行生物净化时,通常只根据环保性能来选择水生植物,而没有考虑它们的外来物种问题、资源化利用程度以及该植物在水体中的布局对整个水生生态系统群落结构的影响问题;(2)单一水生植物季节性变化明显生物净化作用不稳定,如何利用多种大型水生植物和水生植被组建人工复合生态系统,发挥多种水生高等植物在时间和空间上的差异,实现优势互补;(3)水生植物对污染物的净化效率偏低,如何通过调控水生植物的某些基因,提高植物的净化功能。但相信随着生物技术、基因工程技术、种群优化组合技术、资源化回收及加工技术的不断进步,水生植物修复技术将会不断地应用于更多的污染环境治理中。

参 考 文 献

- 1 Amet J M, Spengler J D. Indoor environments and health moving into the 21st century. *Am J Public Health*, 2003; 93(9): 1489—1495
- 2 黄 亮, 吴乃成, 唐 涛, 等. 水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移. *中国环境科学*, 2010; 30(4): 1—6
- 3 Hozhina E I, Khranov A A, Gerasimov P A, *et al.* Uptake of heavy metals, arsenic, and antimony by aquatic plants in the vicinity of ore mining and processing industries. *J Geochem Explor*, 2001; 74: 153—162
- 4 卓 燕, 苏宏智, 秦 良, 等. 水生植物应用于富营养化控制的研究趋向. *污染防治技术*, 2010; 23(2): 51—53
- 5 梅 瑜, 孔旭晖. 利用水生植物进行污水净化的研究进展. *广东农业科学*, 2010; 2: 155—156
- 6 Liu S X, Chen X Y, Chen X. A TiO_2/AC composite photocatalyst with high activity and easy separation prepared by a hydrothermal method. *J Hazard Mater*, 2007; 143: 257—263
- 7 Liu S X, Chen X, Chen X Y. Activated carbon with excellent chromium(VI) adsorption performance prepared by acid - base surface modification. *J Hazard Mater*, 2007; 141: 315—319
- 8 Gonzaga G, Silva H. Efficiency of aquatic macrophytes to treat nile tilapia pond effluents. *Sci Agric (Piracicaba, Braz)*, 2006; 63(5): 433—438
- 9 刘 鹏, 俞慧娜, 张晓斌, 等. 几种水生观赏植物对城市污水的生理响应. *水土保持学报*, 2008; 22(4): 163—167
- 10 迟 橙, 龙岳林. 水生植物修复城市富营养化污水的研究进展. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2009; 35(1): 51—55
- 11 Sun G Z, Zhao Y Q, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *J Biotech*, 2005; 115(2): 189—197
- 12 Seo D C, Cho J S, Lee H J, *et al.* Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. *Wat Res*, 2005; 39(11): 2445—2457
- 13 王 谦, 成水平. 大型水生植物修复重金属污染水体研究进展. *环境科学与技术*, 2010; 33(5): 96—102
- 14 刘 音, 张升堂. 被污染水体的植物修复技术研究进展. *安徽农业科学*, 2009; 37(15): 7147—7149
- 15 Hautier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. *Science*, 2009; 324: 636—638
- 16 Brown L M, White J R, Brix H. Alum application to improve water quality in a municipal wastewater treatment wetland effects on macrophyte growth and nutrient uptake. *Chemosphere*, 2010; 79(2): 186—192
- 17 秦巧燕, 朱建强. 磷的环境效应及水生植物修复技术研究进展. *长江大学学报(自然科学版)*, 2009; 6(4): 1673—1409

- 18 Lin Y F, Jing S R. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from ground water in constructed wetland. *Environ Pollution*, 2002; 19: 413—420
- 19 Sun G, Austin D. A mass balance study on nitrification and deammonification in vertical flow constructed wetlands treating landfill leachate. *Wat Sci & Technol*, 2007; 56(3): 117—123
- 20 Polomki R F, Taylor M D, Bielenberg D G, *et al.* Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in greenhousebased laboratory-scale subsurface constructed wetlands. *Water Air & Pollution*, 2009; 197(1—4): 223—232
- 21 Hautier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. *Science*, 2009; 324: 636—638
- 22 Sooknah R D, Wilkie A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. *Ecol Eng*, 2004; 22(1): 27—42
- 23 王剑虹, 麻 密. 植物修复的生物学机制. *植物学通报*, 2000; 17(6): 504—512
- 24 孙 蓀. 人工湿地处理技术的净化机理及应用现状. *环境科技*, 2010; 23(1): 112—115
- 25 王 谦, 成水平. 大型水生植物修复重金属污染水体研究进展. *环境科学与技术*, 2010; 33(5): 96—102
- 26 杨红玉, 王焕校. 某些绿藻对镉的富集作用及其毒性反应. *环境科学学报*, 1990; 10(1): 4—72
- 27 Zayer A. Phyto accumulation of trace elements by wetland plants duckweed. *Environ Qual*, 1998; 27(3): 71—72
- 28 Hansen D. Selenium removal by constructed wetland role of biological volatilization. *Environ Sci Technol*, 1998; 32(5): 591—597
- 29 Zhang X, Liu P, Yang Y, *et al.* Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes. *Environ Sci*, 2007; 19: 902—909
- 30 Mishra V K, Tripathi B D. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes. *Bio Technol*, 2008; 99: 7091—7097
- 31 叶雪均, 邱树敏. 3 种草本植物对 Pb—Cd 污染水体的修复研究. *环境工程学报*, 2010; 4(5): 1023—1029
- 32 吴 湘, 王友慧, 郭建林, 等. 3 类水生植物对池塘养殖废水氮磷去除效果的研究. *西北植物学报*, 2010; 30(9): 1876—1881
- 33 蔡佩英, 刘爱琴, 侯晓龙. 9 种水生植物对模拟污水中氮、磷的生物净化效果. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2010; 39(3): 313—318
- 34 金树权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究. *农业环境科学学报*, 2010; 29(8): 1571—1575
- 35 徐德福, 徐建民, 王华胜, 等. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究. *植物营养与肥料学报*, 2005; 11(5): 597—601
- 36 蒋跃平, 葛 滢, 岳春雷, 等. 轻度富营养化人工湿地处理系统中植物的特性. *浙江大学学报(理学版)*, 2005; 32(3): 309—319
- 37 周小平, 王建国, 薛利红, 等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究. *应用生态学报*, 2005; 16(11): 2199—2203
- 38 程 伟, 程 丹, 李 强. 水生植物在水污染治理中的净化机理及其应用. *工业安全与环保*, 2005; 31(1): 6—9
- 39 严国安, 谭智群. 藻类净化污水的研究及其进展. *环境科学进展*, 1995; 3(3): 45—54
- 40 严国安, 李益健, 王志坚. 固定化栅藻对污水净化及其生理特征的变化. *中国环境科学*, 1995; 15(1): 10—13
- 41 Soeder C J. Studies on heavy metal purification by employing algae. *Mitt Internet Verein Limnol*, 1978; 21: 574—583
- 42 吴振斌, 邱东茹, 贺 锋, 等. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究. *武汉植物学研究*, 2001; 19(4): 299—303
- 43 吴 洁, 虞左明. 西湖浮游植物的演替及富营养化治理措施的生态效应. *中国环境科学*, 2001; 21(6): 540—544
- 44 宋祥普, 邹国燕. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究. *环境科学学报*, 1998; 18(5): 489—493
- 45 王 超, 张文明, 王沛芳, 等. 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究. *环境科学*, 2007; 28(5): 975—986
- 46 唐静杰, 成小英, 张光生. 不同水生植物—微生物系统去除水体氮磷能力研究. *中国农学通报*, 2009; 25(22): 270—273
- 47 大森美香子. 3 种类の水生植物による生活排水処理水の营养盐除去特性. *环境技术*, 1998; 27(8): 20—24
- 48 吴建强, 黄沈发, 丁 玲. 水生植物水体修复机理及其影响因素. *水资源保护*, 2007; 23(4): 18—23
- 49 黄德锋, 李 田. 景观植物潜流湿地对富营养化景观水的净化. *工业用水与废水*, 2007; 38(6): 49—53
- 50 Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Wat Sci Tech*, 1994; 29(4): 71—78
- 51 Bramwell S A, Prasad P V D. Performance of a small aquatic plant wastewater treatment system under caribbean conditions. *J Environ Manage*, 1995; 43: 213—220
- 52 周元清, 吴兆录, 赵雪冰, 等. 水生植物在水污染治理中的应用研究进展. *玉溪师范学院学报*, 2006; 22(12): 69—72
- 53 Tam N F Y, Wong Y S. Wastewater nutrient removal by *chlorella pyrenoidosa* and *scenedesmus* sp. *Environ Pollution*, 1989; 58: 19—26
- 54 Govindan V S. Treatment on mixed wastewater by algae. *Asian Environ*, 1984; (1): 7—5
- 55 汪 敏, 郑师章. 凤眼莲体内多酚氧化酶的生理生化特性. *复旦学报(自然科学版)*, 1994; 33(2): 157—164
- 56 吴月燕, 吴秋峰, 曾华军. 富营养化水体中水生植物的生态和生

- 理生化效应. 浙江大学学报, 2009; 35(3): 337—344
- 57 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. 环境污染治理技术与设备, 2003; 4(2): 36—40
- 58 赵大君, 郑师章. 无菌凤眼莲的降酚研究. 生态学杂志, 1994; 13(3): 25—29
- 59 Prasad M N V, Malec P, Waloszek A. Physiological responses of Lemnistrisulca L. (duckweed) to cadmium and copper bioaccumulation. Plant Science, 2001; 161(5): 881—889
- 60 Paresh L, Bill F. Relationships between aquatic plants and environmental factors along a steep himalayan altitudinal gradient. Aquatic Botany, 2006; 84(1): 3—16
- 61 Sarah J. Effects of water level and phosphorus enrichment on seedling emergence from marsh seed banks. CoUeted from northeru belize. Aquatic Botany, 2004; 79(4): 311—323
- 62 吴月燕, 吴秋峰, 曾华军. 富营养化水体中水生植物的生态和生理生化效应. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009; 35(3): 337—344
- 63 Soltan M, Rashed M N. Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations. Adv Environ Res, 2003; 7: 321—334
- 64 Joseph B, Hughes J. Transformation of TNT by aquatic plants and plant tissue cultures. Environ Sci Technol, 1997; 31(1): 266—271
- 65 王剑虹, 麻 密. 植物修复的生物学机制. 植物学通报, 2000; 17(6): 504—512
- 66 周元清, 李淑英, 李夏公, 等. 用不同生活型水生植物作为高级提取剂去除废水中污染物的研究. 玉溪师范学院学报, 2008; 24(8): 1—5
- 67 李志银, 张惠芳, 孙 玲, 等. 大型水生植物对污染水体的生态修复. 中国西部科技, 2010; 9(20): 49—52
- 68 Hosetti B B. Application of microorganism on wastewater treatment. Environ Ecol, 1988; 6: 508—517
- 69 林毅雄. 莱因衣藻和小球藻对丙体-666的富集和降解研究. 中国环境科学, 1984; 4(2): 15—21
- 70 Maguire R. Removal of organic compounds in wastewater. Appl Organomet Chem, 1987; (1): 475—482
- 71 邓星明, 詹发萃, 邓亚农. 一种降解石油烃的淡水藻类-坑形席藻. 植物学报, 1982; 24: 548—553
- 72 刘厚田, 杜晓月, 刘金齐, 等. 藻菌系统降解偶氮染料的机理研究. 环境科学学报, 1993; 13: 332—338
- 73 方云英, 杨肖娥, 常会庆, 等. 利用水生植物原位修复污染水体木. 应用生态学报, 2008; 19(2): 407—412
- 74 Dessureault-R J, Nowack B, Schulin R, *et al.* Spatial and temporal variation in organic acid anion exudation and nutrient anion uptake in the rhizosphere of *Lupinus albus*. Plant Soil, 2007; 301: 123—134
- 75 Dessureault R J, Nowack B, Schulin R, *et al.* Spatial and temporal variation in organic acid anion exudation and nutrient anion uptake in the rhizosphere of *Lupinus albus*. Plant Soil, 2007; 301: 123—134
- 76 李慎瑰, 赵以军, 程 凯. 湿地植物根际微生物生物处理生活污水的模型规模研究. 工业安全与环保, 2009; 35(8): 9—10
- 77 唐静杰, 成小英, 张光生. 不同水生植物-微生物系统去除水体氮磷能力研究. 中国农学通报, 2009; 25(22): 270—273
- 78 汪 敏, 郑师章. 凤眼莲与其根际细菌相互作用的研究. 应用生态学报, 1994; 5(7): 309—313
- 79 王 印, 韩会玲, 赵旭阳, 等. 水生植物对城市污水净化作用的研究进展. 水科学与工程, 2009; 2: 36—39
- 80 Reed S C, Middlebrooks E J, Crites R W. Natural system for wastewater management and treatment. In: New York, ed. McGraw Hill Book Company, 1988

Progress of the In-situ Remediation of Water Pollution by Aquatic Plant

LU Dong-fang¹, CHEN Xiao-yun²

(College of Landscape Architecture¹, College of Material Engineering², Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, P. R. China)

[Abstract] With consistent deterioration of the environment and people's increasing awareness of protecting environment, researchers are constantly looking for new technology for water pollution treatment. As a high effectiveness, lower energy consumption and environmentally friendly technology for water pollution treatment, aquatic plants in-situ remediation has become hotspot of current researches. Aim at summarizing the aquatic plants in-situ restoration technologies on the resolution of water pollution are developed.

[Key words] aquatic plants in-situ remediation water pollution treatment