

被污染水体的植物修复技术研究进展

刘音, 张升堂 (1. 山东科技大学矿山灾害预防控制实验室, 山东青岛 266510; 2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266510)

摘要 本文从植物对水体富营养化的修复、重金属污染水体的修复、有机污染物的水体修复等方面, 综述了近年来国内外关于植物修复技术对污染水体的研究及应用现状, 并对植物修复技术的发展方向进行了展望。

关键词 植物修复; 污染水体; 水生植物

中图分类号 X171.4 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2009)15-07147-03

Research Progress on the Phytoremediation Technique of Polluted Water Bodies

LIU Yin et al (Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510)

Abstract The research and application status of phytoremediation techniques of polluted water bodies at home and abroad in recent years were summarized from the aspects of the remediation of water eutrophication, the remediation of water body polluted by heavy metals, the remediation of water body polluted by organic pollutants and so on. And the developmental trend of phytoremediation techniques was predicted.

Key words Phytoremediation; Polluted water bodies; Hydrophyte

随着我国经济的快速发展以及人口的不断增长, 用水量急剧增加, 污水排放量也相应增加, 从而导致我国淡水资源的短缺和水环境污染日益加剧, 并严重制约了我国经济的可持续发展, 影响了人民的身体健康, 因此, 对受污染水体进行综合治理与修复已刻不容缓。各国的环境工作者和生态学家逐渐认识到水质问题是水生态问题, 水体污染和富营养化的生物学修复理论和技术成为当前国内外研究的焦点^[1]。

1 植物修复技术概述

植物修复技术是新近发展起的生物修复技术的一个分支。所谓生物修复技术是指利用生物生命代谢活动对水体中污染物的吸收、转化和降解, 达到减缓或最终消除水体污染、恢复水体生态功能的生物措施, 这一过程是受控或自发的^[2]。而植物修复技术就是利用绿色植物及其根际的微生物共同作用, 以清除环境污染物的一种新的原位治理技术。水生植物对污染水体的修复净化是在适宜的条件下水生植物通过吸附、吸收、富集和降解几个环节来进行修复的, 植物可通过根系吸收, 也可直接通过茎、叶等器官的体表吸收, 吸收到体内的有机物。一些属于难降解的种类, 如重金属及 DDT、六六六等有机氯农药, 可贮存于植物体内的某些部位, 其蓄积量甚至达到很高时植物仍不会受害。如将蓄积大量污染物的植物体适时地从水体中移出, 则水体即可达到较好的净化效果。也有一些有机污染物, 如酚和氰等进入植物体内, 可被降解为其它无毒的化合物, 甚至降解为 CO₂ 和 H₂O, 这是更为彻底的净化途径^[3]。

植物修复技术与传统的物理化学修复技术相比, 具有以下优点: 费用省, 植物修复技术可以现场进行, 减少了运输费用。避免了人类直接与污染物接触; 环境影响小, 不会形成二次污染或导致污染物的转移; 可以最大限度地减低污染物浓度; 工程造价相对较低, 不需要耗能或耗能很低; 能够实现水体营养平衡, 改善水体的自净能力, 并具有一定的生态景观效应。

2 植物修复技术在污染水体修复中的研究及应用

2.1 植物对富营养化水体的修复 水生植物对富营养化水

体具有良好的修复效果, 它对水体中的氮、磷可起到吸附、沉淀、吸收代谢和富集浓缩等各种作用。Reddy 等借鉴废水处理中的 A/O (Anaerobic/Oxic)、A₂/O (Anaerobic/Anoxic/Oxic) 工艺原理, 构建成水体中水花生 (*Aternanthea philoxeroides*)、菱 (*Tapa spp.*)、水鳖 (*Tilonyxsteindchneri*)、凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*) 的植物群落, 通过植物根系附近的微生物代谢作用, 消耗水体中的溶解氧, 使之呈现厌氧状态, 而这种厌氧状态有利于反硝化过程, 从而能最大限度地除去水体中的 NO₃⁻。在进水口处的水花生群丛紧密交织在一起, 构成坚强的防护带, 能将“水华”挡在群落之外, 群落自身保持旺盛生长, 其下水中的反硝化和氨化细菌的数目较大, 但水中溶解氧却很低。菱对藻类及水中悬浮物有良好的过滤作用。由于水花生和菱的作用, 使群落系统内部的水体透明度得到明显提高, 从而有利于沉水植物和浮叶植物的生长。这一方面可抑制藻类的生长, 另一方面又不断地吸收、分解水中的营养盐和污染物, 使整个系统处于良性循环状态。菱和凤眼莲等净化性较强的夏季喜温植物以及伊乐藻 (*Elocha Nuttallii*) 和菹草 (*Potamogeton crispus*) 等耐寒型沉水植物, 组成常绿型水生植被, 可形成具有长期和净化功能的季节性交替互补系统, 对富营养化水体的净化作用十分显著^[4]。

许多学者认为, 在富营养化水域表面以浮床技术种植粮油、蔬菜和花卉等各种适宜的陆生植物, 在收获农产品和美化水域景观的同时, 通过其吸收和吸附作用, 富集去除水体中过多的氮和磷元素, 以达到变害为宝、化害为利和净化水质的效果, 使水体产生良性循环。南京莫愁湖种植莲藕, 年产莲藕 25 万 kg, 去除的氮有 60 t 之多, 磷有 1 t 多, 经过 3 年时间, 水色由原来的 14 级上升到 11 级^[5]。刘淑媛等人进行人工基质无土栽培经济植物的净化富营养化水体试验, 结果显示, 多花黑麦草 (*Lolium perenne*)、水蓼菜 (又名空心菜, *Ipomea aquatica* Forsskal) 对氮和磷的去除率分别达到 80% 和 90% 以上, 水芹 (*Ceratophyllum demersum* Roxb. wall) 对氮、磷的去除率可达到 75% 以上^[6]。利用经济植物净化富营养化水体, 既改善了富营养化水体水质, 获得环境效益, 又有利于经济作物的生长, 客观的经济效益相当可观。在太湖典型富营养化水域所进行的种植美人蕉辅以空心菜和旱伞草 (*Cyperus alternifolius*) 的试验表明, 通过三季收获, 通过植物去除的

作者简介 刘音(1973-), 女, 陕西米脂人, 硕士, 讲师, 从事资源清洁再利用率的研究和教学工作。

收稿日期 2009-03-02

氮和磷总量远远超过其基础总量,磷的最高去除量高出近40倍,水质均由原来的劣Ⅴ类上升到Ⅲ类,透明度从原来的45 cm增加到180 cm以上。随着种植时间的延长,藻类大幅度减少,区域中出现了多年不见的水生生物,初步具备了自然恢复水生态系统的环境条件。人们在海水养殖富营养化的治理研究过程中发现,大型海藻是海洋环境中非常有效的生物过滤器,将海藻与鱼虾贝类共养,不仅可以提供资源,而且还有助于解决鱼虾贝类养殖中产生的富营养化问题,这一结果引起了全世界科研人员的关注并开展了很多相关研究^[7]。

我国的湖泊已有65%呈现富营养状态,还有29%正在转向富营养状态,因而对其治理必须考虑利用水生植物的自身治污特性。中国科学院武汉植物研究所研究员李伟主持的湖北省科技攻关项目《城市湖泊水质修复与保持技术》,就是利用水生植物对水中氮和磷等营养元素和污染物的吸收及分解作用,通过选择不同的水生植物及其组合来适应不同的受污染水体,控制水生植物凤眼莲(即水葫芦)的数量来调控净化能力的大小,以修复受污染水体和保持水质。沈阳市在治理浑河污染时,通过栽培水葫芦以恢复自然生态系统,如今,浑河沈阳段的水里已经有了大量的鱼类和底栖生物,河面上的水葫芦也长得郁郁葱葱。上海青浦县的科研人员利用水葫芦修复湖泊水质,并将可利用采收的水葫芦加工成活性有机肥和草粉饲料,开辟水生植物资源化利用的途径,形成良性循环。水葫芦可加工成草粉饲料,用于饲养獭兔,并以免粪和水葫芦的压滤液作为沼气发生源,每年可收集水葫芦12万t,从水体中去除的各类污染物质和有机物近212万t,年产獭兔约25万只。

2.2 植物对重金属污染水体的修复 对重金属污染水体的修复与有机物的不同,有机物污染可由生物降解而清除,重金属污染的修复只能从一种形态转化为另一种形态,或通过扩散迁移等作用,使污染物浓度逐步降低。近年来,利用植物修复技术对重金属所造成的环境污染进行治理,以其更廉价、更易实施及更易为公众所接受的特点而成为关注的热点。重金属污染水体的植物修复往往是通过寻找能够超累积或超耐受该有害金属的植物,将金属污染物以离子的形式从水体中转移至植物特定部位,再将植物处理,或者依靠植物将金属固定在一定环境空间以阻止其进一步的扩散。Burken通过研究观察到,将印第安芥(*B. juncea*)根部浸入6 ng/L Cu溶液中24 h后,根部的Cu回收率可达到97.15%,生物积累系数达到498^[8]。Peterson利用Swichgrass进行环境水体重金属污染的修复时最多可吸收Cu 3.36 g/kg^[9]。Baker综述了可超量积累重金属植物的分布、生态学和生物化学,列举了已发现的20余种可超量积累Cu的植物,它们主要集中在非洲中南部。Tang Shirong等人在安徽省铜陵发现了超量积累Cu的植物鸭趾草。Thobangous等人提出,由于水培植物种苗具有相当大的根表面积/体积比,因而可成功应用于含毒害性金属的水质处理^[10]。

一些研究表明^[11],水生植物对重金属的忍受能力因植物种类的不同而有所差异。一般而言,挺水植物>漂浮和浮叶植物>沉水植物。水生植物对重金属吸收的累积能力依次为沉水植物>漂浮和浮叶植物>挺水植物,根系发达的水

生植物大于根系不发达的水生植物。重金属在水生植物体内的分配情况,一般以根部最高,其次是茎、叶和果实。以凤眼莲为例,其根部的含As量为叶部的3.4倍,Gr为22.0倍、Cu为3.7倍,Pb为3.3倍,Zn为2.5倍,Mb为2.2倍^[12]。在利用水生植物净化污水时,必须掌握重金属对植物体的致害阈值和适合的净化时间,还需要对净化后的植物残体进行及时打捞,否则很容易造成水体的二次污染。水生植物对重金属元素的吸收积累以及有毒物质对水生植物的影响受温度和pH等生态因子的制约。当气温达到10℃左右(阳光直射下)时,凤眼莲在含As处理液中2.5 h后即出现受害症状,而当气温在20~30℃时,用同样浓度含As处理液处理凤眼莲,2 d后才出现受害症状。污水的pH值为7时,最有利于凤眼莲对Hg和Cd的吸收^[11]。水生植物对污水的净化率与其生长状况有关^[13]。夏、秋季节,许多喜温水生植物处于生长旺盛期,同时也表现出较高的净化效率,这是由于水生植物的净化能力与其自身的生长状况及新陈代谢有关。深秋和冬季,许多喜温水生植物已处于衰老和死亡阶段,自然会失去其净化能力。但对于耐寒植物来说,情况则相反,在寒冷季节对废水中污染物有较高的净化率。因此,可以充分利用这两类习性不同的水生植物对废水进行净化处理,以解决冬季污水净化的问题。

2.3 植物对含有机污染物的水体的修复 水生植物能够吸收水体中的酚类和氰类污染物且吸收后并不都积聚在体内,而是通过酶系的作用和生化作用进行转化和分解,使其失去毒性,而根系吸附的那部分酚和氰,由于根际微生物的作用而逐步的分解转化。试验证明^[14],凤眼莲可大幅度加速水溶液中甲基对硫磷的消解,能有效地将之去除。刘建武等人研究了凤眼莲净化含萘废水的机理,发现凤眼莲主要是依靠根系的吸附作用和吸收作用甚至根际微生物的降解等途径完成净化作用^[15-17]。杀虫剂DDT及其代谢物是典型的持久性污染物,已有不少植物被用作杀虫剂的吸收和代谢的研究。在无菌条件下,浮萍和伊乐藻在6 d内可以富集全部水环境中的DDT,并能将1%~13%的DDT降解为DDD和DDE。此外,研究还表明,金鱼藻、伊乐藻或浮萍的加入,可以显著降低地表水异丙甲草胺的浓度^[18]。Roxanne等人研究了受TNT污染地表水的植物修复技术,结果表明,利用植物降解移除量可达到100%^[19]。另据Peterson等人报道,利用植物—柳枝稷(*Panicum virgatum*)进行TNT的降解和修复也是一条有效途径^[20]。

在对有机污染物水体的修复中,利用人工湿地方法也具有显著的效果。人工湿地的原理是利用自然生态系统中物理、化学和生物的共同作用,通过过滤、吸附、共沉、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对污水的净化^[21]。这种湿地系统是在一定长宽比及底面有坡度的洼地中,由土壤和填料(如卵石等)混合组成填料床,污染水体可以在床体的填料缝隙中曲折流动,或在床体表面流动。同时在床体的表面种植具有处理性能好、成活率高的水生植物(如芦苇等),形成一个独特的动植物生态环境,对有机污染物具有较强的降解能力。废水中的不溶性有机物通过湿地的沉淀和过滤作用,可以很快地被截留,进而被微生物利用,废水中可溶性

有机物则可通过植物根系生物膜的吸附和吸收及生物代谢降解过程而被分解去除。随着处理过程的不断进行,湿地床中的微生物也在繁殖生长,这可通过对湿地床填料的定期更换及对湿地植物的收割将新生的有机体从系统中去除。这种湿地处理系统由于出水质量好,比较适合处理饮用水源,或结合景观设计,种植观赏植物,改善风景区的水质状况,因而提高大型水体水质的有效方法。靖元孝等人利用种植风车草(*Cyperus alternifolius*)的潜流型人工湿地对生活污水进行净化,使TN、TP、COD和BOD的去除率分别为64%、47%、74%和74%^[22]。崔理华等人在垂直流人工湿地中采用煤渣与草炭混合基质代替砂砾基质,以风车草为湿地植物构成垂直流人工湿地系统,观察其对化粪池出水中P、N和有机物的净化效果,结果表明,该湿地系统对化粪池出水中的COD、BOD₅、NH₄⁺-N和总P的去除率分别为76%~87%、88%~92%、75%~85%和77%~91%^[23]。

3 植物修复技术的发展趋势

综上所述,受污染水体的植物修复技术作为一项绿色污染治理技术经过多年的研究,已经取得很大进展,为污染水体的修复做出了重要的贡献。但是该技术仍有许多不完善的地方,需要与土壤学、生态学、植物学、植物生理学、分子生物学和环境科学等多门学科作进一步的交叉研究。为提高植物修复污染水体的技术,拓宽植物修复的应用前景,今后仍有许多工作要做:

(1) 由于超积累植物的数量少,因而今后应继续寻找和开发生物量大、超量积累有害重金属的植物,寻找更多指示污染物有效性的野生或栽培植物,采用基因工程技术改造植物,以获得理想的超积累植物。

(2) 大量的植物修复技术集中在重金属污染上,而针对有机物的植物修复研究相对较少,因此应加强关于植物对有机污染修复方面的研究。

(3) 加强植物修复与物理化学修复相结合的技术研究。

(4) 加强植物修复后材料的资源化再利用研究。

参考文献

[1] 浙江大学环境修复与生态健康教育重点实验室. 植物修复技术应用

(上接第7140页)

6 结语

利用大气状态探测仪和液态水含量探测仪实时探测数据,建立了云中催化剂播撒的温度、 $e-E_1$ 和液态水含量阈值,指导过冷云人工催化作业,尤其在把握云体催化时机、部位和催化剂种类方面提供了判别依据,提高了云体的催化实效,能够更有效地增加降水。

参考文献

[1] 中国气象局科技发展司. 人工影响天气岗位培训教材[M]. 北京: 气象出版社,2003:300.

前景广阔[J]. 国际学术动态,2006(3):12-16.

- [2] 罗义,毛大庆. 生物修复概述及国内外研究进展[J]. 辽宁大学学报:自然科学版,2003,30(4):298-302.
- [3] 蒋志学,邓士谨. 环境生物学[M]. 北京:中国环境科学出版社,1989:179-181.
- [4] 田淑媛. 水生微管束植物处理废水及其利用[J]. 城市环境与城市生态,2000,13(6):54-56.
- [5] 陈金霞,徐玉华,张小莉. 生物修复技术在污染治理中的应用[J]. 上海化工,2000(9):4-7,20.
- [6] 田文辉,刘淑媛. 利用人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体的研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,1999,35(5):518-522.
- [7] 夏立群,张红莲. 植物修复技术在近海污染治理中的研究与应用[J]. 水资源保护,2005,21(1):32-35.
- [8] REDDY K R. Diel variations in physicochemical parameters of water selected aquatic systems [J]. Hydrobiologia,1981,85:201-207.
- [9] REDDY K R, PAIRICH J W, LINDAUC W. Nitrification and denitrification at the plant root sediment interfaces in wetlands [J]. Limnology and Oceanography, 1998,34(6):1004-1013.
- [10] SCHNOOR J L, LICHT L A, MCCUTCHEONS C, et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants [J]. Environ Sci & Technol, 1995,29(7):318-323.
- [11] 胡肆惠,陈章龙,陈灵芝. 凤眼莲等水生植物对重金属污水检测和净化作用的研究[J]. 植物生态学与地植物学丛刊,1981,5(4):187-192.
- [12] 戴全裕,高翔,卢红,等. 水生植物对重金属废水中的吸收积累能力[J]. 环境科学学报,1993,4(3):213-221.
- [13] 戴全裕,戴文宁,高翔,等. 水生高等植物对废水中银的净化与富集特性研究[J]. 生态学报,1990,10(4):343-348.
- [14] 夏会龙,吴良欢,陶勤南. 凤眼莲植物修复水溶液中甲基对硫磷的效果与机理研究[J]. 环境科学学报,2002,22(3):329-332.
- [15] 刘建武,林逢凯,王郁. 水生植物净化萘污水能力研究[J]. 上海环境科学,2002,21(7):412-415.
- [16] 刘建武,林逢凯,王郁. 水生植物根系对萘的吸附过程研究[J]. 环境科学与技术,2003,26(2):32-34.
- [17] 刘建武,林逢凯,王郁. 水葫芦净化塘降解萘污水过程研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2003,4(6):19-23.
- [18] RICE P J, ANDERSON T A, COAIS J R. Phyto remediation of herbicide contaminated surface water with aquatic plants [R]. Washington DC: Phytoremediation of Soil and Water Contaminants, American Chemical Society, 1997:133-151.
- [19] ROXANNE R, MEDINA V F, LARSON S L, et al. Phytoremediation of TNT-contaminated ground water [J]. Soil Contam, 1998,7(4):511-529.
- [20] PEIERSON M M, HORST G L, SHEA P J, et al. Germination and seedling development of switch grass and smooth brome grass exposed to 2,4,6-trinitrotoluene [J]. Environ Pollut, 1998,99:53-59.
- [21] 徐祖信. 河流污染治理技术与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [22] 靖元孝,陈兆平,杨丹菁. 风车草对生活污水的净化效果及其在人工湿地的应用[J]. 应用与环境生物学报,2002,8(6):614-617.
- [23] 崔理华,朱夕珍,骆世明. 煤渣-草炭基质垂直流人工湿地系统对城市污水的净化效果[J]. 应用生态学报,2003,14(4):597-600.
- [2] 陶树旺,刘卫国,李念童,等. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究[J]. 应用气象学报,2001,12(S1):14-22.
- [3] DENNIS A S. Weather modification by cloud seeding [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [4] FENG D X, CHEN R Z, JIANG G W, et al. The study of high efficient AgI pyrotechnics and their nucleating properties [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1994,8(3):329-336.
- [5] 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨[J]. 应用气象学报, 2001,12(S1):10-13.
- [6] 张连云,冯桂利. 降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究[J]. 气象,1997,23(5):3-7.
- [7] 王鹏飞,李子华. 微观云物理学[M]. 北京:气象出版社,1989.
- [8] 陈创实,郭英琼. 气象常用参数和物理量查算表[M]. 北京:气象出版社,1980:1-4.