

# 植物修复污染水体和土壤的研究进展

韩照祥

(淮海工学院化学工程系,江苏连云港 222005)

**摘要** :从水体富营养化的修复、人工湿地修复、自然生态系统修复、土壤的污染行为和修复等方面,综述了近年来国内外科研工作者在植物修复技术的最新成果,指明了植物修复技术的发展趋势。

**关键词** :植物修复;富营养化;水污染

中图分类号 :X131 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2007)01-0009-04

## Development of phytoremediation technique on water and soil pollution

HAN Zhao-xiang

(Department of Chemical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

**Abstract** :Achievements on phytoremediation technique at home and abroad were summarized from the remediation of eutrophication, artificial wetland and natural ecosystem, and contaminative behavior and rehabilitation of soil. And the trends of phytoremediation were discussed.

**Key words** :phytoremediation; eutrophication; water contamination

由于海洋、河流、湖泊和土壤的污染,人类的身体健康及动植物生存繁衍都受到严重影响,各国的环境工作者和生态学家已经利用很多方法来解决水体和土壤污染问题<sup>[1]</sup>。其中,植物的生物修复方法是最为看好的一种方法。该法是利用植物吸收污染物的量来判断污染程度,评价污染物的生物可利用性。

### 1 植物对水体污染修复的研究

#### 1.1 植物对富营养化水体修复的研究

高等水生植物包括漂浮植物、沉水植物、浮叶根生植物和直立水生植物,水生植物对富营养化水体中的氮、磷可净起到吸附、沉淀、吸收代谢、富集浓缩等各种作用<sup>[2]</sup>。Reddy 等借鉴废水处理中的 A/O (Anaerobic/Oxic) A<sup>2</sup>/O (Anaerobic/Anoxic/Oxic) 工艺原理,构建成水体中水花生 (*Alternanthera philoxeroides*)、菱 (*Trapa spp.*)、水鳖 (*Trionyx steindechneri*)、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

NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sup>[3]</sup>。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。一方面抑制藻类的生长,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、凤眼莲等净化性较强的夏季喜温植物和伊乐藻 (*Elodea Nuttallii*)、菹草 (*Potamogeton crispus*) 等耐寒型沉水植物,组成常绿型水生植被,可形成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<sup>[3]</sup>。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、花卉等各种适宜的陆生植物,在收获农产品、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、磷元素,以达到变害为宝、化害为利、净化水质,使水体产生良性循环。宋祥甫<sup>[4]</sup>、矿远文等<sup>[5]</sup>进行的浮床水稻试验表明,水稻在富营养化水体表面生

长、发育良好,同时对水体中氮、磷营养物质有十分显著的去除效果。刘淑媛等<sup>[2]</sup>进行人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体试验,结果显示:多花黑麦草(*Lolium perenne*)、水蕹菜(又名空心菜,*Ipomoea aquatica* Forsskal)对氮和磷的去除率分别达到80%和90%以上,水芹(*Oenanthe stolonifera* Roxb. wall)对氮、磷的去除率可达到75%以上<sup>[6]</sup>。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,从而获得了客观的经济效益。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、旱伞草(*Cyperus alternifolius*)试验表明,通过三季收获植物带走的氮、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。随着时间的延长,藻类大幅度减少。区块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,还有助于解决鱼虾贝类养殖中产生的富营养化问题,这一点引起了全世界科研人员的关注并开展了很多相关研究<sup>[7]</sup>。

## 1.2 植物在人工湿地修复技术的研究

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来实现对污水的净化。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,污染水可以在床体的填料缝隙中曲折地流动,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、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、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繁殖生长。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。由于这种处理系统的出水质量好,适合于处理饮用水源,或结合景观设计,种植观赏植物,改善风景区的水质状况,这种技术已经成为提高大型水体水质的有效方法<sup>[8]</sup>。英、美、日、韩等国都已建成一批规模不等的人工湿地。中国科学院南京地理与湖泊研究所“云南湖泊环境治理”课题组,运用我国传统的生物氧化塘技术,结合国际先进的潜流人工湿地和表面流人工湿地技术,

以及该所多年一直在实践和应用的湖滨带植被生态恢复技术,提出一套综合的经营性人工湿地治理技术,对抚仙湖流域的面源污染进行控制和治理,目前已显示出治理功效。经过近一年的运转及研究监测,抚仙湖窑泥沟经营性人工湿地在滞留和降解面源污染负荷上有着极显著的作用,不仅建设费用低(相对于活性污泥曝气处理系统和单一的潜流人工湿地系统),而且运转费用少,集经济效益、环境效益和社会效益于一体,可以说是控制和治理湖泊面源污染的有效模式之一。这种方法主要通过拦污网及污水沉淀池,首先除去所有生活固体垃圾和上游农田耕作废弃物以及50%左右的泥沙悬浮物,然后在生物氧化塘中无土栽培高密度的水芹菜(平均 $10 \text{ kg/m}^2$ )和水蕹菜(平均 $8 \text{ kg/m}^2$ )以及菱(平均 $6.5 \text{ kg/m}^2$ )等经济植物,通过对经济植物的不断收获而移出氮、磷等污染物,同时,发达的水生植物根系为微生物及微型动植物提供了良好的微生态环境,根系微生物的大量繁殖,为污染有机物的高效降解、迁移和转化提供了保证。为进一步有效地降解和滞留污水中的氮、磷,该人工湿地系统还建设了近 $1000 \text{ m}^2$ 的水平潜流芦苇人工湿地和香蒲人工湿地以及 $4000 \text{ m}^2$ 的表面流人工湿地(栽种的经济植物包括水芹菜、水蕹菜、莲藕和茨菰等)。污水经过多级植物、生物生态功能区的净化降解,出水氮、磷质量浓度最低可达 $1.35 \text{ mg/L}$ 和 $0.187 \text{ mg/L}$ ,净化率分别为89%和81%<sup>[9]</sup>。

## 1.3 植物对自然生态系统修复的研究

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而成为关注的热点。Burken观察到将印第安芥(*B. juncea*)根部浸入 $6 \text{ mg/L}$  Cu溶液中24 h后,根部的Cu回收率可达到97.5%,生物积累系数达到 $498^{[10]}$ 。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  $3.36 \text{ g/kg}^{[11]}$ 。Baker综述了超量积累植物的分布、生态学和生物化学,列举了已发现的20余种Cu超量积累植物,它们主要集中在非洲中南部。Tang Shirong等在安徽省铜陵发现了Cu超量积累植物鸭趾草。Tchobanglous等提出由于水培植物种苗具有相当大的根表面积/体积比,使其成功应用于含毒害性金属的水质处理,并代表了第二代植物修复水处理技术<sup>[12]</sup>。苏州市利用水生植物治理被污染的湖水,在湖水岸上30~50 m的范围内种植芦苇、莲藕或水草,然后再在约距湖水50 m的岸上栽种香樟树、美人蕉或是柳树,同时投放鲢、鳙鱼等能吃藻类的鱼种。湖边浓密的植物起到过滤作用,而芦苇、水草、

莲藕、美人蕉和柳树的根茎可以很好地吸收并消化水中的污染物,进入湖泊的水变得清洁,使之恢复自我净化的功能。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》,也是利用水生植物对水中氮、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(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。水葫芦在水体中蔓延速度十分迅速,其生长能消耗大量的溶解氧,又会加剧水体富营养化,水葫芦几成“污染”的代名词。中国的湖泊已有65%呈现富营养状态,还有29%正在转向富营养状态,对其治理必须考虑利用水生植物的自身治污特性。可利用采收的水葫芦加工成活性有机肥和草粉饲料,打通水生植物资源化利用的途径,形成良性循环。上海青浦县的专家将水葫芦加工成草粉饲料,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,从水体中带出各类污染物质和有机物近2.2万t,年产獭兔约25万只。沈阳市在治理浑河污染时,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。

## 2 植物对土壤污染修复的研究

### 2.1 重金属在植物内的污染行为研究

通过分析植物种植前后土壤中重金属含量的变化与植物吸收重金属的量的相关性,寻找相关性较好的植物作为指示植物。用黑麦幼苗法指示重金属污染程度是Neubauer等首先提出的<sup>[13]</sup>。用黑麦幼苗法测定土壤中痕量元素的有效性,并通过试验找到可以替代黑麦的最佳植物——小麦,用可食用的植物如萝卜的含量和生理生化反应指示土壤中镉、铅的浓度,胡萝卜吸收铜的量表征土壤受重金属镉的污染程度以及各种豆科植物的变色病监测除草剂的大气沉降量等等,已经被广泛应用于重金属污染评价。植物的指示行为可通过肉眼观察植物体受污染影响后发生的形态变化。生长在污染土壤中的敏感植物受污染物的影响,会引起根、茎、叶在色泽、形状等方面的症状。锰过剩引起植株中毒,会使老叶边缘和叶尖出现许多焦枯褐色的小斑并逐渐扩大,铜、铅、锌复合污染使水稻的植株高度减小、分蘖数减少、茎叶及稻谷产量降低。蒋先军等研究认为,锌使印度芥菜(*Brassia juncea*)的根量随处理浓度的升高而显著减少,铜、铅、镉、锌的单一及复合污染均使其叶片失绿<sup>[14]</sup>。镉进入植物体内并积累到一定程

度,会出现生长迟缓、植株矮小、退绿、产量下降等现象。Punsiion Tracy在控制温度的条件下试验了蔬菜及谷类植物吸收积累铜的特性,认为大多数谷类植物如Wheat,Barley,Radish,Oil Seed Rape,Lettuce,Red cabbage,Brussel Sprouts,Carrot都可用做土壤中镉的生物可利用性的指示植物,并表现出不同的外观形态。杨林书等用盆栽小麦幼苗地上部分的含镉量、生物减产量和幼苗过氧化物酶POD活性突变点所对应的土壤含镉量标征土壤镉污染,发现麦苗在二叶期、返青期和拔节期三段苗期,其地上部分的含镉量都比抽穗期与成熟期的茎、叶、籽粒高,且与籽粒含镉量、土壤投镉量呈极显著的正相关,苗含镉量与POD活性变化呈显著正相关<sup>[15]</sup>。

### 2.2 土壤污染的植物修复研究

植物修复(phytoremediation)就是筛选和培育对重金属具有超常规吸收和富集能力的植物,种植在污染的土壤上,让植物把土壤中的污染物吸收,再将收获植物中的重金属元素加以回收利用。目前我国受重金属污染的耕地面积占全国耕地总面积的20%,每年因土壤污染而损失的粮食产量达1000万t,直接经济损失超过100多亿元。因此,土壤污染的植物修复研究作为一种绿色环保技术,引起了公众及科学界的广泛兴趣。金松岩通过对2个中国典型的砷矿区土壤与植物的系统调查与采样分析,发现若干种植物对砷具有极强的耐性和不同程度的富集能力。砷在蜈蚣草(*Pteris vittata*)、剑叶凤尾蕨(*Pteris ensiformis*)、酸模(*Rumex acetosa*)、苕麻(*Boehmeria nivea*)和蟋蟀草(*Digitaria sanguinalis*)的含量都比较高。不同采样点芒草地上部含砷量为13~760mg/kg,平均为160mg/kg。这几种植物对于砷污染土壤的植物修复研究与应用具有重要的价值<sup>[16]</sup>。中国科学院地理科学与资源研究所陈同斌研究员主持的重金属污染土壤的植物修复技术课题,在国际上率先开发出砷污染土壤的植物修复技术,并建立了第一个植物修复示范工程。研究证实,在南方湖南、广西等地大面积分布的蕨类植物蜈蚣草对砷具有很强的超富集功能,其叶片含砷比例高达0.8%,远超过植物体内的氮、磷含量。该项技术的研究已初步形成了砷、铜、锌污染土壤植物修复的技术体系,已筛选和鉴定出6种重金属超富集植物。与此同时,他们还研制出提高植物修复效果的有机废液、微生物添加剂和混合添加剂,对降低土壤修复成本和改善环境有明显作用。示范研究的结果表明,利用植物修复手段治理重金属污染土壤完全可行。美国、加拿大和欧盟的植物修复公司已经开始盈利。

在美国利用植物对铅污染进行净化作用,种植的植物可将土壤中铅含量由 1 100 ppm 降至 850 ppm。此外,还利用植物净化饮料水中所含的卤素、苯、甲苯、乙苯等化学毒性物质。葡萄牙利用 *Phragmites* 属的植物,对工厂废水进行脱氮处理,并完成 3000 hm<sup>2</sup> 人工湿地的种植。还利用水耕栽培禾本科植物进行芳香族化合物与环境荷尔蒙物质的分解。

用植物修复土壤的关键是选育超积累植物 (Hyperaccumulator),提高土壤中重金属的生物有效性,提高植物的吸收效果,缩短修复周期。根据野外采集样本分析,全世界大约发现了 500 种超积累植物,而最重要的超积累植物主要集中在十字花科,世界上研究最多的植物主要在芸苔属 (*Brassica*)、庭芥属 (*Alyssums*) 及遏蓝菜属 (*Thlaspi*)。这些超积累植物大多是在气候温和的欧洲、美国、新西兰及澳大利亚的污染地区发现的。就目前的情况来看,直接在野外筛选到比较理想超积累植物的难度很大,而且这些超积累植物大多存在根系浅、生物量小、生长缓慢等缺点,这使植物修复的工程应用受到限制。科学家们希望对植物通过基因改造获得较理想的重金属超积累植物。研究人员通过过量表达 PCs 合成途径中的一种限制酶,取得了很好的效果,被转入大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 的 GSHII 基因的印度芥菜 (*Brassica juncea*)、同野生型相比,转化植株不仅对 Cd 的抗性增强,同时在地上组织中积累的 Cd 含量上升了 3 倍<sup>[17]</sup>。田吉林等<sup>[9]</sup>将细菌中催化甲基汞转变为离子汞的 merB 基因进行序列改造,通过农杆菌的介导转入烟草, Southern 杂交检测证明得到转基因植株,转基因植株后代对有机汞表现出较强的抗性。Meagher 博士领导的研究小组在模式植物拟南芥上转移 merA 和 merB 基因,获得抗汞和挥发汞的转基因植物,以转化汞的存在形态,修复有机汞或无机汞污染的土壤和水体<sup>[18]</sup>。Rugh 将 merA 引入 *Arabidopsis thaliana*,发现转基因的植物抗汞能力提高了 3~4 倍,并提高了对汞的吸收能力,这种植物对 Au<sup>3+</sup> 抗性也得到提高。将 merB 基因引入 *Arabidopsis thaliana*,转基因植物能有效地将甲基汞和其他形式的有机汞转化为无机汞,前者的毒性是后者的 100 倍<sup>[19]</sup>。Varvara 等将细菌中的 1-氨基环丙烷-1-羧基脱氨酶基因转入到番茄 *Lycopersicon esculentum*,分别在启动子 35S、rolD 和 PRB-1b 的控制下,番茄具有了对 Cd、Co、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的耐性,并分别不同程度地提高了这些重金属在植物体内的积累<sup>[20-22]</sup>。

### 3 展 望

由于植物对水体和土壤的污染的修复技术成本

低,不会造成二次污染,备受青睐,可广泛应用于植被恢复以及大气、水体和土壤污染等的修复。但是,植物修复技术仍是不完善的,需要土壤学、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的交叉研究。因此,为了提高植物修复技术,拓宽植物修复的应用前景,需要在以下几个主要方面进行研究:

a. 对现有植物种及其变种进行筛选和栽培,寻找更多指示污染物有效性的野生或栽培植物,得到对某一具体污染物具有超级修复潜力的植物,采用基因工程技术改造植物,以获得理想的超积累植物,获得对复合污染物的几种重金属元素同时具有强大的富集能力的植物。

b. 通过园艺措施优化植物修复过程,如调节 pH 值、施用肥料及螯合剂等。人工添加配体如 EDTA 等可提高重金属的生物可利用性,但螯合剂的加入会提高修复成本,并有可能对土壤中的微生物产生抑制作用,或者可能使污染物发生迁移。因此,要将电化学、土壤学和植物生理学与分子生物学结合起来,研究重金属离子在植物根系的吸附、吸收和转运。

c. 开展对植物根系—污染物机理的研究。由于植物根系的特殊功能,其活动会影响周围的小生境,从而影响污染物的化学行为,进一步影响重金属在土壤中的浓度、生物效应和生态环境效应。Inskip 等研究了根系分泌物中的有机酸对 Fe<sup>3+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 的影响以及氨基酸对 Cu<sup>2+</sup> 溶解性的影响。张敬锁等人的研究指出有机酸对土壤中的镉和微量元素有明显的活化作用,对镉活化顺序为:EDTA > 缺铁小麦根系的分泌物 > 柠檬酸 > 苹果酸 > 水,这种活化能力主要取决于有机酸和镉等重金属的结合能力。通过对根系—污染物小生境的研究,探求植物修复技术的机理。

d. 测定不同污染区重金属的背景值,收集土壤中有效态重金属与植物各个组成部分吸收关系的各种资料,建立指示植物的种子资源库和相关资料库,以便为环境污染提供经济、简单、高效的监测方法,为水体和重金属的污染治理提供可靠的依据。

#### 参考文献:

[1] 国家环保总局. 跨世纪的中国环保 [J]. 环境保护, 1999, (8): 12-16.  
[2] 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 (4): 518-521.

(下转第 21 页)

存在的问题是人水关系紧张的直接表现。渭河的治理、开发与保护,不仅影响着当地社会经济的发展,还直接影响着黄河流域的治理大局。要共同实现渭河流域和黄河流域水资源与生态环境的可持续发展,就必须从流域整体出发,分区分段进行治理,科学分配有限水资源,并在调整产业结构、提高水资源利用效率的同时,加强污水处理基础设施的建设,彻底改变过去浪费水、污染水的观念,最终建立节水型社会。

参考文献:

[1] 王兆印,李昌志,王贵新.潼关高程对渭河河床演变的影响[J].水利学报,2004(9):1-8.  
 [2] 邢大韦,张玉芳,栗晓玲.对2003陕西渭河洪水的思考[J].水利与建筑工程学报,2004(1):1-5.  
 [3] 王兆印,吴保生,李昌志.对渭河下游是否已经达到冲淤平衡的分析[J].人民黄河,2004,26(4):16-18.

[4] 胡春宏,陈建国,郭庆超.潼关高程的稳定降低与渭河下游河道综合治理[J].中国水利水电科学研究院学报,2004,2(1):19-25.  
 [5] 赵俊侠,王宏,马勇.1990~1996年渭河水沙变化原因初步分析[J].水土保持学报,2001,15(6):136-139.  
 [6] 陈发中,戴明英,吴卿.渭河水沙变化及特性分析[J].人民黄河,1999,21(8):16-19.  
 [7] 史鉴,陈兆丰,邢大韦.关中地区水资源合理开发利用与生态环境保护[M].郑州:黄河水利出版社,2002:207-211.  
 [8] 许炯心.人类活动影响下的黄河下游得到泥沙淤积宏观趋势研究[J].水利学报,2004(2):8-16.  
 [9] 陈霁巍,穆兴民.黄河断流的态势成因与科学对策[J].自然资源学报,2000,15(1):31-35.  
 [10] 李佩成,冯国章.论干旱半干旱地区水资源可持续供给原则及节水型社会的建立[J].干旱地区农业研究,1997,15(2):1-7.

(收稿日期:2005-09-01 编辑:傅伟群)

(上接第12页)

[3] 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.  
 [4] 宋祥甫.浮床水稻对富营养化水体中氮磷的去除效果及规律研究[J].环境科学学报,1998,18(5):489-494.  
 [5] 矿远文,温达志.有机物及重金属植物修复研究进展[J].生态学杂志,2004,23(1):90-96.  
 [6] 赵爱芬,赵雪,常学礼.植物对污染土壤修复作用的研究进展[J].土壤通报,2000,31(1):43-46.  
 [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] 蒋先军,骆永明.镉污染土壤的植物修复及其EDTA调控研究I.镉对富集植物印度芥菜 *Brassica juncea* 的毒性[J].土壤,2000,33(4):35-39.  
 [9] 田吉林,沈瑞娟. MerB 基因序列修饰及转基因烟草对有机汞的高抗作用[J].科学通报,2002,47(23):1815-1819.  
 [10] REDDY, D. Variations in physicochemical parameters of water selected aquatic systems[J]. Hydrobiologia, 1981, 85: 201-207.  
 [11] REDDY K R, PATRICH J W H, LINDAU C W. Nitrification denitrification at the plant root sediment interfaces in wetlands[J]. Limnology and Oceanography, 1998, 34(6):1004-1013.  
 [12] JERALD L, SCHNOOR L A, LICHT S C. Phytoremediation of organic and nutrient contaminant[J]. Environ Sc & Technol, 1995, 29(7):318A-323A.  
 [13] DONNELLY P K, FLETCHER J S. In abstracts of the 13th annual meeting of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1992, 2:103-109.  
 [14] BURKEN J G, SCHNOOR J L. Phytoremediation: plant

uptake of atrazine and role of root exudates[J]. J Environ Qual, 1996, 122(11):958-963.  
 [15] PETERSON M, HORST G L, SHEA P J, et al. Germination and seedling development of switchgrass and smooth brome grass exposed to 2,4,6-trinitrotoluene[J]. Environ Pollut, 1998, 99(1):53-59.  
 [16] TCHOBANGLIOUS G. Ecological engineering for wastewater treatment[M]. New York: Bok Skogen Publishers, 1991:110-120.  
 [17] NEUHAUER H, SEHNEIDER W. Die Aufnahme von Kcim pflanzen und ihre Anwendung auf die Beseitigung von Nitrat im Boden[J]. Z pflanzenbau Bodenkd, 2000, A 329-362.  
 [18] PUNSSION T, LEEP N W, ALLOWAY P J. Cadmium uptake and accumulation characteristics in a range of vegetable crops. 5th international conference on the biogeochemistry of trace elements[J]. Vienna Austria, 1999, 1:578-579.  
 [19] YAN Jingsong, MA Shijun. Ecological engineering for wastewater treatment[M]. New York: Bok Skogen Publishers, 1991:81-90.  
 [20] MITSCH W J. Ecological Engineering[M]. Hoboken: Wiley Press, 1993:177-191.  
 [21] HASSETT S B, SWARTOUT J, SCHOENY R, et al. Health effects of mercury and mercury compounds[C]//Mercury Study Report to Congress, Vol. Washington: Environmental Protection Agency, 1997.  
 [22] MURPHY. A comparison of metallothionein gene expression and nonprotein thiols in ten Arabidopsis ecotypes[J]. Plant physiology, 1995, 109:945-954.

(收稿日期:2005-00-00 编辑:傅伟群)