

# 人工湿地植物系统优化管理研究

刘红<sup>1</sup>, 刘学燕<sup>2</sup>, 欧阳威<sup>1</sup>, 代明利<sup>1</sup>, 刘培斌<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学环境科学研究所环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 3. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

**摘要:**在北京官厅水库附近建立潜流人工湿地(总面积:  $5 \times 20 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ), 芦苇、蒲草混合种植, 研究其工艺参数对植物生长状况的影响, 植物生长优劣及杂草的存在对污染物去除效率的影响。结果表明, 人工湿地运行初期控制水位和水力负荷对植物生长非常重要; 在相同的水力负荷下, 植物生长状况良好的人工湿地污水处理效果明显高于植物生长状况差的人工湿地, 污染物去除效率与植物生长的优劣呈正相关关系; 大量杂草特别是浅根旱生杂草的生长会降低人工湿地的净化效率。最后分析了人工湿地生态, 提出系统植物的种植、运行期和冬季的管理方法和综合利用思路。

**关键词:**人工湿地; 芦苇; 蒲草; 植物系统

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 2043(2004)05 - 1003 - 06

## Optimization and Utilization of Constructed Wetland Plant Systems

LIU Hong<sup>1</sup>, LIU Xue-yan<sup>2</sup>, OUYANG-wei<sup>1</sup>, DAI Ming-li<sup>1</sup>, LIU Pei-bin<sup>3</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 3 Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Intercropped with *Phragmites communis* and *Typha angustifolia*, subsurface flow constructed wetland systems (CWS) with the surface area of  $5 \times 20 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  were established beside Guanting Reservoir, an important source of Beijing. Using parallel experiment on the spot, the influence of operation parameters on the growth of plants, and the influence of the growth status of plants and weeds on the removal of pollutants were studied. The results showed that it was important to control water level and hydraulic loading at the beginning of the constructed wetland systems start-up. Under the same hydraulic loading, the wetland with better growing plants had higher pollutants removal efficiency than that with relatively worse growing plants, and the pollutants removal efficiency was correlated to the growth status of plants. The presence of large quantities of weeds, especially those shallow-rooted xeric weeds, reduced the removal of contaminants in the wetland. In order to improve the utilizing efficiency of artificial wetland, we also studied the artificial ecological chain of wetland system, the state of the plant diseases, insect pests and the amount and quality of the plant, discussed the measures for plant cultivating and controlling and for preventing and curing plant diseases and insect pests in artificial wetland, and put forward the thought of integrative optimization and utilizing the systematic plant.

**Keywords:** constructed wetland; *Phragmites communis*; *Typha angustifolia*; plant systems

工业社会发展以来,许多国家就有将污水排入天然湿地中的做法,而有意识、有目的地利用湿地来处理污水则始于20世纪70年代。1953年Seidel博士在研究中发现芦苇能去除大量有机和无机物<sup>[1]</sup>。20世纪60年代末,Seidel与Kickuth合作并由Kickuth于

1972年提出了根区理论<sup>[2]</sup>,该理论的提出掀起了人工湿地研究与应用的“热潮”,标志着人工湿地(Constructed Wetland)作为一种独具特色的新型污水处理技术正式进入水污染控制领域<sup>[3]</sup>。

从生态上说,湿地是由水、永久或间歇性处于水饱和状态下的基质以及植物和生物所组成的,是一种具有较高的生产力和较大活性、处于水陆交接相的复杂的生态系统<sup>[4]</sup>。人工湿地是一种新型的污水处理模式,是以污水处理为目的的一种人工设计建造和监督

收稿日期: 2004 - 02 - 17

基金项目: 国家重点科技攻关计划项目(96 - 920 - 40 - 04)

作者简介: 刘红(1964—),女,教授,主要从事水污染控制与资源化、微污染水源水净化和流域污染治理方面的研究工作。

控制的与沼泽类似的地面,其设计和建造是通过对湿地自然生态系统中的物理、化学和生物作用的优化组合来运行的,也正是利用这3种作用的协同关系来进行废水的处理<sup>[5,6]</sup>,使水质得到不同程度的改善,同时通过营养物质和水分的生物地球化学循环,促进绿色植物的生长,实现污水的资源化和无害化。它具有出水水质稳定、对N、P等营养物质去除能力强、基建和运行费用低、技术含量低、维护管理方便、耐冲击负荷强、适于处理间歇排放的污水和具有美学价值等优点<sup>[7-9]</sup>。因此,自西德于1974年首先建造人工湿地以来,该工艺在欧美得到推广应用。但在我国这一工艺引进较晚,直到“七五”期间才开始人工湿地的研究,对人工湿地在处理各种污水及其机理研究方面进行了大量研究,但在人工湿地系统的整体生态效应方面研究较少,对人工湿地系统植物的病虫害防治、生长促进及其收割利用上很少有报道。本文通过实地试验研究,对此作一些探讨。

人工湿地系统以土壤和砂砾结构的水平潜流系统种植芦苇和蒲草为多,这两种植物既是当地的常见物种,也是国际公认的最佳湿地植物<sup>[10]</sup>。我国人工湿地数量较少,但也基本采用水平潜流系统,种植的植物基本都包括芦苇和香蒲,南方地区的人工湿地还种有席草、大米草、凤眼莲等。本文针对种植芦苇(*Phragmites communis*)和香蒲(*Typha angustifolia*)的水平潜流系统进行人工湿地植物系统优化研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

本研究人工湿地位于北京官厅水库边,于2002年3月开始建造,4月建成。当地(河北省怀来县)年平均气温9.1℃,降水量主要集中在5—9月份,占全年80%以上,属北方大陆性气候。实验地周边土地为河滩地,土壤为沙质土。

### 1.2 人工湿地设计

单块湿地规模大小为长20m,宽2m,深0.6m,共5块平行湿地进行对比实验。人工湿地床体以当地砂石为填料,底部20cm厚填料为直径0.3~0.6cm的卵石,中间20cm填料为粒径0.1~0.3cm砂砾,表面覆盖20cm土壤。其结构和布置如图1、图2。在5块湿地中,1~4号湿地以间种方式种植芦苇和蒲草,行距为0.5m,株距为0.5m,5号湿地不种植任何植物,作为植物湿地实验对比。本实验人工湿地建造材料均取自当地,芦苇和香蒲为当地野生芦苇和香蒲移栽。

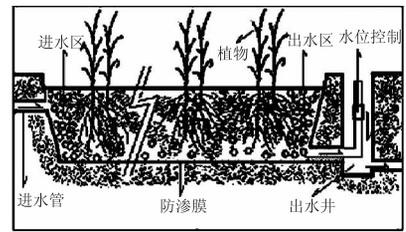


图1 潜流人工湿地结构示意图

Figure 1 The schematic diagram of SSFW

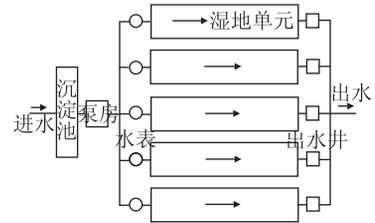


图2 人工湿地截面图

Figure 2 The cross sectional drawing of constructed wetlands

### 1.3 分析指标

化学分析指标包括 $COD_{Mn}$ 、TN、TP、 $NH_3-N$ 。记录不同种植物的生长状况,人工湿地动植物构成的变化,人工湿地系统病虫害发生时间、密度、对植物的伤害程度及虫害天敌生长情况,测定人工湿地生物量、植物根长及植物含氮磷量。

分析测定方法均为国家标准方法,用Microsoft Excel对数据进行方差和图表分析。

### 1.4 运行与采样

人工湿地系统自建造完成起全年连续运行,采样与监测每月进行。水质监测每月连续测试6d,观测项目在春冬季每半月一次,在夏秋季每周一次。有季节要求的测定项目(如生物量)随季节进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 人工湿地水力负荷与植物生长的关系

人工湿地植物根系在污染物去除中发挥着重要作用。由于植物湿地运行初期的生长好坏直接影响到今后植物的生长和污染物的去除效率,因此促进植物生长和促进植物根系在湿地床体介质中的生长在人工湿地运行初期尤为重要。

在人工湿地运行初期,除了气候、植物的适应性等因素,水力负荷及人工湿地的床体水位是影响植物的成活率及其生长的主要因素。

2002年5月—6月采用如表1的水力负荷及水位进行了不同水力负荷下植物生长状况对比试验。

在运行1个月后,以植株高度、密度为参考,实验

表 1 不同水力负荷及水位实验对比

Table 1 Comparisons of different hydraulic loading and water line in constructed wetlands

湿地编号	1号	2号	3号	4号
水力负荷/ $m \cdot d^{-1}$	0.25	0.3	0.4	0.4
水位状况	完全表流	正常潜流	正常潜流	湿地淹水
植物高度/ $m$	1.4	0.8	1.1	1.5
湿地覆盖度/%	60	10	40	70
备注	少量杂草	较多杂草	少量杂草	无杂草

注:1~4号为本研究湿地的编号(以下同)。

结果可简单描述为:4号>1号>3号>2号(“>”表示“优于”)。

实验结果表明,在人工湿地植物移栽初期,水力负荷稍大并且在调节水位后达到人工湿地保持轻度淹水时,植物生长较快,成活率较高。人工湿地植物(芦苇和香蒲)属于挺水植物,在移栽时的生长特性和水稻相似,需要在缓流或者静止的水中才能保持较好的生长状态和成活率。

进一步的实验表明,人工湿地系统稳定运行后,水力负荷及水位除了控制杂草对人工湿地植物的影响外对植物生长的作用较小。但受到初期成活率及生长情况的影响,各对比人工湿地植物持续保持原有的差异。这也同样表明了人工湿地运行初期对植物管理的重要性。

由于人工湿地植物根系的重要作用,在人工湿地植物达到较高成活率、生长稳定后,还需要对人工湿地植物根系的生长进行引导。一般做法是降低人工湿地床体水位,在植物根的趋水性作用下使根向床体介质深处生长。在人工湿地植物根长达到要求后恢复正常运行。

## 2.2 人工湿地植物生长状况与污染物去除率的关系

人工湿地对污水处理的过程中,湿地植物具有三个间接的重要作用<sup>[11]</sup>:(1)显著增加微生物的附着(植物的根茎叶);(2)湿地中植物可将大气气传输至根部,使根在厌氧环境中生长;(3)增加或稳定土壤的透水性。

在完成人工湿地初期运行实验后,得到植物生长情况差异不等的5块人工湿地。在此基础上,2002年6月15日—28日通过在不同植物生长状况下监测污染物 $COD_{Mn}$ 的去除效果,进行了植物生长的差异性对处理微污染地表水(进水 $COD_{Mn}$ 值为 $6.00 \pm 0.15 mg \cdot L^{-1}$ )去除率关系的实验。由表2可见,在相同的水力负荷下,自由表流式人工湿地处理效果明显低于潜流式人工湿地,无植物潜流的人工湿地污水处理效

表 2 植物生长差异对污水去除率的影响

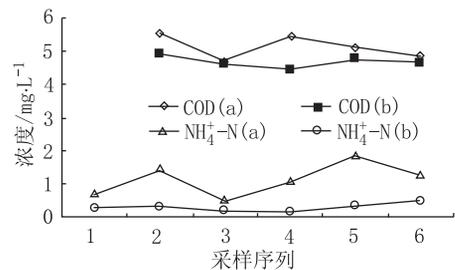
Table 2 Influence of the diversity of wetland plants on the treatment efficiency of wastewater in constructed wetlands

对比人工湿地编号	1号	2号	3号	4号	5号
水位控制	完全表流	正常潜流	正常潜流	正常潜流	正常潜流
植物生长情况	良	差	良	优	少量杂草
水力负荷/ $m \cdot d^{-1}$	0.20	0.20	0.25	0.35	0.25
COD 平均去除率/%	34.02	44.18	45.12	45.02	34.38

果明显低于有植物潜流的人工湿地,并且污水去除效率与植物生长的优劣成正比关系。

## 2.3 杂草对污水净化效果的影响

在潜流型人工湿地中,由于污水从地表以下潜流,表面相对干燥,容易生长旱生杂草。图3给出了进水水质稳定,气温恒定在 $28^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$ 时,除草前6d(a)和后6d(b)湿地对 $COD_{Mn}$ 和 $NH_4^+ - N$ 的去除率变化。实验表明,大量杂草特别是浅根旱生杂草的生长能降低人工湿地净化效率。

图 3 除草前后出水水质( $COD_{Mn}$ 和 $NH_3 - N$ )对比Figure 3 Comparisons on the concentration of  $COD_{Mn}$  and  $NH_4^+ - N$  in effluent between before and after weeding in constructed wetlands

由于旱生杂草根区大多在表面覆土中,发挥不了芦苇和蒲草对处理床中污水的吸收、提供氧气等许多作用,并且旱生杂草的生长周期短,生命力强,其植物体产生大量碎屑和残体,在湿地中被微生物分解成可溶性有机物和植物营养元素,被湿地水流和雨水冲刷淋溶进入处理床体,增加了处理水的浓度,特别是在靠近出水区的区段停留时间很短,增加的有机物和植物营养元素不能去除,造成出水浓度增加。

## 2.4 人工湿地系统生态链

本研究观测发现,湿地中生长了许多伴生动物。在芦苇和蒲草植株上长有蚜虫、瓢虫、蜘蛛、蚂蚁、苍蝇、蚊子等,湿地土壤和水中长有蚯蚓、水蛭、水蛆、青蛙、其他土壤动物、微生物等。在湿地田埂及周边土壤中还有许多田鼠出现并发现其洞穴。人工湿地中还生长有多种杂草、水藻等植物。所有这些伴生动物与人工湿地植物和微生物构成了多条生态链。

有益生态链:植物-害虫(蚊虫、蚜虫、卷叶虫等)-天敌(青蛙、瓢虫、鸟等),土壤-微生物、藻类-土壤动物(蚯蚓等)。中性生态链:植物碎屑-微生物-植物营养元素-植物。有害生态链:土壤-植物-病毒、害虫、田鼠,水-蚊子幼虫,水-水藻-微生物-植物营养元素。

人工湿地与自然生态系统不同,属于人为控制的人工生态系统,为达到发挥其最大功能有必要对一些有益的生态链予以保护和加强,对有害的生态链要予以清除。

### 2.5 人工湿地植物病虫害发生状况

人工湿地作为一个人工生态系统,如同农田生态系统,要求所种植物长势比其他杂草更好,实现我们种植的目的。但如同农作物一样也发生病虫害,本人工湿地在运行过程中,湿地植物出现了一些病虫害,如在芦苇上发现芦苇豹蠹蛾、卷叶虫,蒲草上发现蚜虫等一些病虫害。在严重时导致植物枯黄矮小,甚至死亡。在观测中发现病虫害多发生于夏秋,此时正是植物生长迅速时期,一旦发生病虫害、对人工湿地的运行效果特别是对植物的产量将会造成较大影响。

### 2.6 人工湿地植物生物量

关于湿地生物量国内外已有报道<sup>[12,13]</sup>。大量的湿地产物已成为阻碍人工湿地正常运行的一个需要解决的问题。大量的湿地产物如果滞留在人工湿地中,将分解出大量的N、P及有机物等,大大降低其污水处理效率,甚至使出水浓度增高。但从芦苇、蒲草型人工湿地产物本身来说,湿地植物产量高,这也是一种资源,可以开发利用。

生物量(地上部分干物质)按湿地块生长植物(芦苇和蒲草等)的总重量计算(如表3)。

表3 湿地植物生物量

Table 3 Biomass of wetlands plants

湿地号	1号	2号	3号	4号	5号
生物量/kg	10.5	6.0	5.2	9.0	3.6
折合产量/kg·hm <sup>-2</sup>	2 625	1 500	1 300	2 250	900

### 2.7 研究地植物品质

植物的品质与人工湿地床体介质、表层土质有关,植物吸收的肥料与人工湿地所处理的污水来源及其水质也有很大的关系。由于本实验所处理的污水为地表微污染水,土质为沙土,肥性低,故长成人工湿地植物质量较一些人工培育或者沼泽地芦苇和蒲草差。至收割时为止,人工湿地蒲草状况为:株高在叶下垂状态约为1.4~2 m之间,平均高度在1.7 m;平均

叶宽(蒲叶中部)为2.1±0.5 cm。芦苇状况为:植株普遍较细,茎径约为0.2~0.3 cm,株高在0.9~2.1 m间,平均高度约为1.4 m。根据实验测定,研究地在处理相对清洁的地表水的情况下植物吸收氮磷量偏低,缺乏植物营养元素,品质相对偏低。其植物全氮、全磷含量与其他芦苇产地的芦苇对比如表4。

表4 湿地植物含TN、TP量(%)

Table 4 Contents of TN and TP in wetlands plants(%)

芦苇来源	1号	2号	3号	4号	5号	辽东湾 <sup>[16]</sup>
TN	0.258	0.325	0.235	0.354	0.186	1.59
TP	0.064	0.033	0.032	0.027	0.026	0.075

## 3 讨论

### 3.1 人工湿地植物种植及生长期的管理措施

人工湿地植物生长的好坏与污水净化效率及生物量直接相关,因此促进植物的生长,防治杂草的生长具有实际意义。人工湿地杂草的防治可以从人工湿地的建造参数的调整、引种植技术和运行期管理几个方面来进行。另外,引进一些优良品种对提高人工湿地净水效率和人工湿地生物量都大有裨益。

在人工湿地种植阶段,为使人工湿地植物成活率提高,一般都在床体介质上覆盖一层土。Platzer<sup>[16]</sup>指出,潜流湿地高的净化能力主要依靠土壤有效的通气性。并且大部分旱生杂草的根部都在土壤表层30 cm内,故一般覆土厚度应小于30 cm。实验表明,正常潜流运行时,在厚度达30 cm相对干燥的覆土表面杂草容易滋生。为达到人工湿地土壤的通气性良好和人工湿地植物的生长良好,覆土厚度宜为10~20 cm。

在建造人工湿地引种植物时应与农作物栽培一样,根据气候和植物的特点在春季适当时候进行种植。为防止杂草的生长,人工湿地植物种植应相对密集,采用小于0.5 m×0.5 m的行株距,根据成活率的大小确定最终行株距,以保证此期间对杂草生长的抑制。但也要考虑人工湿地床体基质的孔隙度大小,防止植株过密时根部生长对床体的堵塞,降低人工湿地的水力负荷,缩短人工湿地的使用寿命。

北方地区人工湿地植物生长期约在4月—11月。在4月—7月为植物迅速生长的发育期,在此期间对植物湿地的控制对植物的产量具有重要意义。由于在此期间,植物没有覆盖整个湿地,杂草容易生长。在北方地区,4月份植物进入生长发芽期。因此,在此期间应根据气候条件尽早清除人工湿地冬季保温设备,使湿地温度尽快回升,促使人工湿地植物尽

早发芽生长,利于提高污水处理效率,也相应增加了植物的生长时间。可通过去除人工湿地表面保温材料,加大水力负荷及提高出水水位实现湿地淹水而溶解冰层和冻土,迅速提高人工湿地温度。为防止杂草的大量生长,每年春季植物发芽阶段可对湿地进行淹水,防止一些旱生杂草的生长。待植物生长良好,足以在与杂草生长竞争中占据优势时,恢复正常水位(此过程大约半个月,可根据污水处理允许条件实施)。由观测结果和生物量实验结果表明,在此期间预防和清除过杂草的人工湿地单元植物长势和最后产量明显高于未预防和清除杂草的湿地单元。

### 3.2 人工湿地病虫害防治措施

农作物病虫、草、鼠害是农业生产上的重要生物灾害,是制约高产、优质、高效益和持续发展的重要因素之一<sup>[17]</sup>。人工湿地作为一个人工生态系统,除了要求污水处理达到最大的经济环境效益外,其系统植物也可在允许条件下达到其最大的经济效益——提高产量,病虫害的防治也是其中的重要一环。但由于人工湿地最主要的功能是作为污水处理技术系统处理目标污水,达到污水无害化、资源化,所以在防治病虫害的过程中不可引入新的污染源,如农药等化学药剂。其作物的病虫害控制模式可参考农作物的绿色病虫害防治方法<sup>[18]</sup>:

(1)清除害虫的非作物寄主(即所谓中间寄主)。

(2)板诱杀或驱避害虫。黄色板涂油可诱杀蚜虫、白粉虱,白色可诱蓟马,银灰色可避蚜虫。

(3)应用昆虫生长调节剂如灭幼脲、优乐得等,使害虫不能正常生长发育,如影响幼虫脱皮、延期或提早化蛹、蛹畸形、成虫小型、卵不孵化等,造成生理障碍死亡。

(4)应用害虫性外激素防治害虫。现在可以人工合成小地老虎等害虫的性外激素,称为合成信息干扰剂,这种干扰剂妨碍害虫交配,使害虫不能正常繁殖后代。此法称为信息防治法。

(5)应用生物防治害虫。保护利用益虫等有益动物以及应用 Bt、病毒制剂等微生物农药防治害虫。

(6)应用植物性农药(植物抽提物)防治(趋避作用、拒食、毒杀)害虫。

### 3.3 人工湿地非生长季节管理措施

在 11 月份,人工湿地植物收割后,应及时清理人工湿地上的残留植物碎屑,防止后续实验因植物残留而造成出水去除效率降低甚至污染物的浓度升高。在进入冬季冰冻期前作好进出水和湿地保温措施。人工

湿地表面保温措施可采用保持湿地淹水 20 cm,自然冰冻成冰帽,待冰帽冻好后降低水位至人工湿地土壤表面下,形成一个保温空气层。冬季实验(另文)证明,在整个冬季人工湿地在此措施下可保持正常运行和实现一定的污水处理效果。

### 3.4 人工湿地植物利用

芦苇是一种很好的工业原料,可以作为造纸、建材等原料。芦苇茎叶含有 10 种较高的动物必需的氨基酸<sup>[13]</sup>,因此也是喂养牛、羊等家畜的很好饲料。本研究人工湿地中生长的芦苇由于属于自然野生,高度和粗度都不及一些地方的优良品种,如微山湖和盘锦芦苇,特别是盘锦苇田修建了人工灌溉系统,芦苇产量迅速增加,此外,还采取了改良土壤、施肥、灭草、病虫害防治等综合措施,科学育苇逐步向纵深发展<sup>[14]</sup>,其产芦苇粗壮、品质好、产量高。在人工湿地中可以选择一些优良品种种植,以获得较高的产量(辽东湾大多芦苇年产量在  $4\ 500 \sim 7\ 500\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[15]</sup>),使效益最大化。蒲草也是一种很好的工业原料,是造纸和人造棉的重要原料,还可以用于编织。蒲草的花粉可入药,蒲菜也是人们喜爱食用的。

本研究为官厅水库入库河流水质净化前期实验项目,后期处理大流量的河流污水需要较大的工程用地,从实验产量看,届时人工湿地的植物产量将是可观的。综合利用人工湿地植物资源将可减少资金投入,吸纳劳动力等,能够发挥较大的经济社会效益。

## 4 结论

(1)人工湿地运行初期控制水位和水力负荷对植物生长非常重要。

(2)在相同的水力负荷下,植物生长状况良好的人工湿地污水处理效果明显高于植物生长状况差的人工湿地,污染物去除效率与植物生长的优劣呈正相关关系。

(3)大量杂草特别是浅根旱生杂草的生长会降低人工湿地的净化效率。

(4)人工湿地作为一种应用前景广阔的新型污水处理工艺,在我国已经成为研究热点。但要推广应用,还必须结合各地方特点,对人工湿地植物系统的生态优化和植物产物的出路作一些研究。本文就我国北方地区的芦苇和蒲草潜流人工湿地作为研究对象进行了一些总结,提出了一些人工湿地植物系统优化管理措施及植物利用的建议。但本文仅从人工湿地植物的地上部分进行了研究,对于人工湿地植物的地下生物

量的控制、开发利用,地下生物量过多与人工湿地使用寿命等问题还有待进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] House CH. Combining constructed wetlands and aquatic and soilfilter for reclamation and reuse of water[J]. *Ecol Eng*, 1999, 12: 27 - 38.
- [2] Brix H. Use of constructed wetland in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives[J]. *Wat Sci Tech*, 1994, 30(8): 209 - 223.
- [3] 籍国东,孙铁珩,李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(2): 224 - 228.
- [4] 朱彤,等. 人工湿地污水处理系统应用研究[J]. *环境科学研究*, 1991, 4(5): 18 - 22.
- [5] TennesseeValley Authority. 1990. River basin operations water resources, destruction of constructed wetlands for treatment of municipal wastewater, monitory report for the period: March 1998 to October 1989: 5.
- [6] 王久贤. 人工湿地水力学研究[D]. 成都:成都科技大学硕士论文. 1991.
- [7] Drizo A, Frost C A, Grace J. Physico chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Wat Res*, 1999, 33(7): 3595 - 3602.
- [8] 高拯民. 城市污水土地处理技术设计[M]. 北京:中国标准出版社,1991.
- [9] 孙铁珩,周思毅. 城市污水土地处理技术设计[M]. 北京:环境科学出版社,1997.
- [10] Brij G. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 40(3): 27 - 35.
- [11] 白晓慧,王宝贞,余敏,等. 人工湿地污水处理技术及其发展应用[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, 32(6): 89 - 92.
- [12] Bradbury I K, GraceJ. Primary production in wetlands, In, Gore, A. J. P. (Editor), *Ecosystems of the world, 4A, Mires: swamp, bog, fen and moor*. Elsevier scientific publishing company: 1983, 287 - 310.
- [13] 杨海莲,陈国仓,张承烈. 不同生境芦苇的营养成分分析[J]. *草业学报*, 1994, 3(1): 1 - 6.
- [14] 曲向荣,贾宏宇,张海荣,等. 辽东湾芦苇湿地对陆源营养物质净化作用的初步研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 270 - 272.
- [15] 张启德,方汉隆,王玉秀,辽河三角洲资源、环境与可持续发展[M]. 北京:科学出版社,1996. 23.
- [16] Platzer C, Mauch K. Soil clogging in vertical flow reed beds —Mechanisms, parameters, consequence and solutions[J]. *Wat Sci Tech*, 1997, 35(5): 175 - 181.
- [17] 戴小枫,叶志华,曹雅忠,等. 浅析我国农作物病虫害鼠害成灾特点与减灾对策[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 119 - 122.
- [18] 曾怡曾. 不用化学农药的农作物病虫害防治法[J]. *植物医生*, 2001, 6, 14(3): 44 - 45.