

人工湿地中水生植物的作用和选择

吴建强,阮晓红,王 雪

(河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:综述国内外有关人工湿地水生植物在污水净化过程中的作用及其选择的研究成果,提出了人工湿地系统水生植物有待进一步研究的问题。人工湿地水生植物的主要作用为:吸收利用和吸附富集污染物质、传输氧到湿地系统、为微生物提供栖息地、维持系统的稳定、积累有机物质。人工湿地系统要选择栽种耐污能力强、去污效果好、适合当地环境、根系发达、有一定经济价值的水生植物。

关键词:人工湿地;污水处理;水生植物

中图分类号:X824 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-6933(2005)01-0001-06

Selection and function of aquatic plants in constructed wetlands

WU Jian-qiang, RUAN Xiao-hong, WANG Xue

(College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The effects and selection of aquatic plants in constructed wetlands during the process of wastewater purifying is expounded in detail. And the issues to be further studied on aquatic plants in the constructed wetland system are presented. The main functions of aquatic plants in constructed wetlands include assimilating, utilizing, adsorbing and enriching pollutants, transmitting oxygen to the constructed wetland system, providing habitat for microorganisms, maintaining the stability of system, and accumulating organic substances. Aquatic plants planted in the constructed wetlands should be those with high tolerance against pollution, good decontamination efficiency, developed root system, and those has economic value and fit for local area.

Key words: constructed wetland; wastewater treatment; aquatic plants

人工湿地是依据土地处理系统及水生植物处理污水的原理,由人工建立的具有湿地性质的污水处理生态系统。采用人工湿地(constructed wetlands)净化污水始于 1953 年德国的 Max Planck,该研究所的 Seidel 博士在研究中发现芦苇能去除大量有机和无机物^[1]。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^[2],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。现在国外已广泛运用人工湿地处理市政、工业、农业和城市暴雨径流废水技术^[3],而在我国这些都处于起步阶段。人工湿地具有以下特点^[4~6]:投资省,运行费用低,出水水质好,

具有较强的氮、磷处理能力,运行维护管理方便,管理水平不高,并能和稳定塘联合用于高纯度废水处理或者废水三级处理。

前人对人工湿地中水生植物的研究报道大多着眼于某一种或某几种植物的某一或某几个方面。本文在前人所做工作的基础上,对人工湿地中水生植物的作用及其选择作一个较为系统和全面的阐述。

1 水生植物的作用

介质、水生植物和微生物是人工湿地的基本构成^[7]。其中,水生植物是其特点所在,也是湿地处理系统最明显的生物特征,它是人工湿地的主要组成部分,并在其中起着重要作用。其作用主要体现在:

基金项目:国家“十五”重大科技专项(2003AA601070);水利部科技创新重点项目“生物-生态技术处理新沂河污水示范工程研究”。

作者简介:吴建强(1977—),男,江苏宜兴人,硕士研究生,研究方向为环境规划管理与评价。E-mail:wutong7779@yahoo.com.cn

吸收利用、吸附和富集作用；氧的传输作用；为微生物提供栖息地；维持系统的稳定；有机物的积累作用。另外，水生植物还具有美观可欣赏性、可以通过收割回收以达到一定经济效益、可作为介质所受污染程度的指示物、有助于酶在湿地系统的扩展等作用。

1.1 吸收利用、吸附和富集作用

水生植物能直接吸收利用污水中的营养物质，供其生长发育。废水中的有机氮被微生物分解与转化，而无机氮(氨氮)作为植物生长过程中不可缺少的物质被植物直接摄取，合成蛋白质与有机氮，再通过植物的收割而从废水和湿地系统中除去。无机磷也是植物必需的营养元素，废水中的无机磷在植物吸收及同化作用下可转化成植物的ATP、DNA、RNA等有机成分，然后通过植物的收割而移去^[8]。生根植物直接从砂土中去除氮磷等营养物质，而浮水植物则在水中去除营养物质^[4]。许多根系不发达的沉水植物，例如金鱼藻属(*Ceratophyllum*)也能直接从水中吸收营养物质^[4]。大型挺水植物的茎和叶以及浮水植物的根还可以用来减缓水流速度和消除湍流，以达到过滤和沉淀砂粒、有机微粒的作用^[4]。有人在城镇污水处理试验中发现^[9]，种植水烛(*Typha angustifolia*)和灯芯草(*Juncus effuses*)的人工湿地基质中氮、磷的含量分别比无植物的对照基质中的含量低18%~28%和20%~31%，可见水烛和灯芯草吸收利用了污水中部分的氮和磷物质。在海涂，芦苇(*Phragmites australis*)床湿地系统是削减进入海洋过量营养物质的强有力手段之一^[10]。池杉(*Taxodium ascendens*)人工湿地对污水中总氮和氨氮的净化效果明显地好于对照，对重金属亦具有良好的去除作用^[11]。

水生植物还能吸附、富集一些有毒有害物质，如重金属铅、镉、汞、砷、钙、铬、镍、铜、铁、锰、锌等，其吸收积累能力为：沉水植物>飘浮植物>挺水植物，不同部位浓缩作用也不同，一般为：根>茎>叶，各器官的累积系数随污水浓度的上升而下降^[12~15]。研究认为，植物对有毒有害物质的吸收以被动吸收为主，增加植物和废水的接触时间，可增强植物对其的去除率^[16~19]。垂直流人工湿地处理低浓度重金属污水的试验表明，风车草(*Cyperus alternifolius*)能吸收富集水体中30%的铜和锰，对锌、镉、铅的富集也在5%~15%^[20]。Ellis等^[21]的研究结果表明，湿地中宽叶香蒲(*Typha latifolia*)和黑三棱(*Sparganium sp.*)是摄取同化、吸附富集高速公路径流油类、有机物、铅和锌的较适宜植物种类。芥菜(*Brassica juncea*)根际附着大量的细菌后，能加速硒的富集和挥

发^[22]。高粱(*Azospirillum brasilense*)也能利用根际细菌加速硝酸盐、钾和磷酸盐的富集^[23]。另外一些研究也显示了植物的吸收和吸附作用，栽种植物的湿地对污水中的营养物质及重金属的去除能力高于无植物系统的^[24,25]。

1.2 氧的传输作用

湿地环境对很多微生物来说是一种严酷的环境，最严酷的条件是湿地土壤缺氧。缺氧条件下，生物不能进行正常有氧呼吸，还原态的某些元素和有机物的浓度可达到有毒的水平^[26]。人工湿地中污染物所需要的氧主要来自大气自然复氧和植物输氧。有研究表明，水生植物的输氧速率远比依靠空气向液面扩散速率大，植物的输氧功能对人工湿地降解污染物好氧的补充量远大于由空气扩散所得氧量。植物输氧是植物将光合作用产生的氧气通过气道输送至根区，在植物根区的还原态介质中形成氧化态的微环境^[27]。输送过程以及氧在湿地中的分布状态如图1所示(以芦苇床为例)^[28,29]。这种输氧作用使根毛周围形成一个好氧区域，其中好氧生物膜对氧的利用使离根毛较远的区域呈现缺氧状态，更远的区域则完全厌氧。这种连续呈现好氧、缺氧、厌氧的状态，相当于许多串联或并联的A/A/O处理单元，这样植物在为湿地系统输氧的同时，还可以通过硝化、反硝化作用及微生物对磷的过量积累作用使氮、磷从废水中去除。因此，水生植物在人工湿地去除铵、亚硝酸盐、硝酸盐、磷酸盐、SS和BOD等方面间接或直接地起着重要作用^[4]。

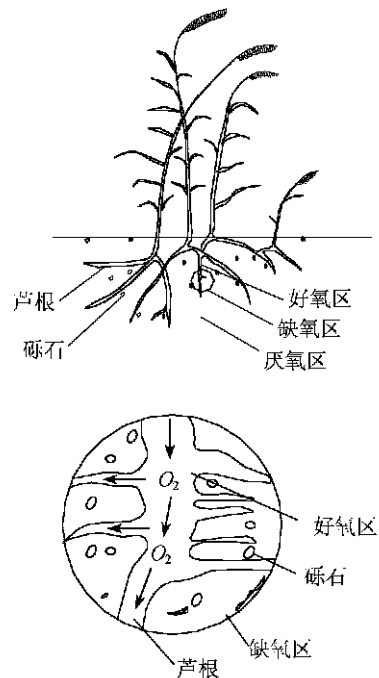


图1 湿地中氧的分布及植物输氧过程
通常人工湿地的输氧能力 T_0 在 $5 \sim 45 \text{ gO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$

之间,一般为 $20 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。处理过程的需氧量 R_0 可以用式(1)进行估算。植物的供氧能力 P_0 可以用式(2)来估算^[30]。

$$R_0 = 1.5Q(S_0 - S_a) \quad (1)$$

$$P_0 = A_s T_0 \quad (2)$$

式中: R_0 为处理过程的需氧量, gO_2/d ; Q 为流量, m^3/d ; S_0 为进水 BOD_5 质量浓度, mg/L ; S_a 为出水 BOD_5 质量浓度, mg/L ; P_0 为处理过程的需氧量, gO_2/d ; A_s 为湿地床面积, m^2 ; T_0 为植物的输氧能力, $\text{gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

人工湿地中植物根毛的释放氧气也有助于在好氧情况下湿地中物质的传递和变化,如图2所示^[28,29]。

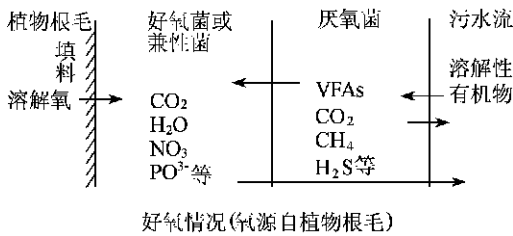


图2 植物根毛释放氧气作用下湿地中的物质传递及变化过程

1.3 为微生物提供栖息地

微生物是人工湿地净化污水的主要“执行者”,它们把有机质作为丰富的能源,将其转化为营养物质和能量。人工湿地中微生物的种类和数量是极其丰富的,因为人工湿地水生植物的根系常形成一个网络状的结构,并在植物根系附近形成好氧、缺氧和厌氧的不同环境,为各种不同微生物的吸附和代谢提供了良好的生存环境,也为人工湿地污水处理系统提供了足够的分解者。很多湿地的大型挺水植物在水中部分能附生大量的藻类,这也为微生物提供了更大的接触表面积^[4]。研究表明,有植物的湿地系统,细菌数量显著高于无植物系统,且植物根部的细菌比介质处高1~2个数量级,植物的根系分泌物还可以促进某些嗜磷、氮细菌的生长,促进氮、磷释放、转化,从而间接提高净化率^[8]。

1.4 维持系统的稳定

维持人工湿地系统稳定运行的首要条件就是保证湿地系统水力传输,水生植物在这方面起了重要作用。植物根和根系对介质具有穿透作用,从而在介质中形成了许多微小的气室或间隙,减小了介质的封闭性,增强了介质的疏松度,使得介质的水力传输得到加强和维持^[31,32]。成水平进行的人工湿地处理污水的试验中发现^[33],经过3~5个月的污水处理后,不种植物的对照土壤介质板结,发生淤积,

而种有水烛和灯芯草的人工湿地渗滤性能好,污水能很快地渗入介质。据报道^[32],即使较板结的土壤,在2~5年之内,经过植物根系的穿透作用,其水力传输能力仍可与砂砾、碎石相当。植物的生长能加快天然土壤的水力传输程度,且当植物成熟时,根区系统的水容量增大^[31,34]。当植物的根和根系腐烂时,剩下许多的空隙和通道,也有利于土壤的水力传输^[31]。有人认为植物根系可维持湿地沙的疏松状态,也有研究表明,植物根的生长和扩展,会在基质上层建立一个较密集的根区,从而使孔隙度下降^[35]。牛晓音等^[36]的试验研究发现,少量根系的存在对基质的孔隙度的影响不大。

1.5 有机物的积累作用

人工湿地中有机物的来源主要是污水和植物,湿地系统中植物的年生长量是相当高的,植物地上部分衰落时的残留物、根系及根系分泌物都有助于系统中有机物积累量的增加,因而植物是系统中最大的额外有机物来源。研究实验表明^[37],种植植物的系统中积累的有机物量比在相同条件下没种植植物的高 $1.2 \sim 2 \text{ kg}/\text{m}^2$,高出部分的有机物可能是由植物所贡献的。

有机物的积累容易造成湿地系统的堵塞。Laak^[38]指出,湿地系统在未达到平衡状态之前,堵塞仅仅依靠有机负荷,而当湿地系统达到平衡、有机物积累达到一定程度之后,沉积在湿地表面的有机物形成了一层黑色粘膜,包括厌氧分解产物(如多糖类物质和聚尿类物质^[39])以及由于受低温限制而没有发生化学变化的有机化合物^[40],导致了系统孔隙的外部堵塞。这种堵塞有很大部分原因是由于植物向系统贡献了较多的有机物,因此选择合适的植物和对植物进行定期收割以尽可能减少植物有机质在基质中的积累是解决湿地系统堵塞问题的关键。定期收割植物还在一定程度上促进了氮、磷等营养元素的去除,使其在湿地去除富营养化成分时起很大的作用^[35,41,42]。

2 水生植物的选择

目前,全球发现的湿地高等植物多达6700余种,而已被用于处理湿地且产生效果的不过几十种,很多植物还从未试用过^[43]。现在国际上公认的湿地淡水水生植物优势品种有宽叶香蒲(*Typha latifolia*)、芦苇(*Phragmites*)、苦草(*Vallisneria americana*)、软水草(*Hydrilla verticillata*)和狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)^[44~46]。一些地处热带和亚热带的发展中国家,有丰富的湿地物种,但由于受经

费限制,在开展湿地技术时无力开展观测研究,通常照搬发达国家的成果,包括在物种的利用上,而对本国本地区很有净化潜力的植物视而不见,再加上使用和管理水平有限,其处理效果不是很理想^[47,48]。欧美许多国家建立了大量的湿地处理系统,应用于小城镇的污水处理^[49];我国深圳白泥坑也建立起保护水源的人工湿地^[9]。但湿地中有些水生植物生长不良,影响净化污水的效果,水生植物的越冬也是个问题。因此,对于人工湿地处理系统而言,选择合适的水生植物显得尤为重要。选择植物时考虑的因素很多,但主要考虑以下几个方面:耐污能力强、去污效果好;适合当地环境;根系的发达程度;有一定的经济价值。

2.1 耐污能力强,去污效果好

耐污能力强和去污效果好是选择湿地植物的首要原则。湿地系统应根据不同的污水性质选择不同的湿地植物,如选择不当,可能导致植物死亡或者去污效果不好。例如,当污水中凯氏氮的浓度达到 54.5 mg/L(或氨氮 24.7 mg/L)时人工湿地中的香蒲叶将枯黄或致死,且短期内难以恢复^[33,41]。又如,用宽叶香蒲(*Typha latifolia*)和 *Ipones spp.* 建植的湿地系统处理含铜的工业废水,结果 BOD 的去除率很差,有时甚至还升高 10%^[50];同样,用芦苇和宽叶香蒲形成的人工湿地结合一个厌氧的消化系统来处理屠宰场污水,结果磷在污水中也出现积累的趋势^[51]。

2.2 适应当地环境

人工湿地选择的植物还必须适应当地的土壤和气候条件,否则,难以达到理想的处理效果。例如在向陆的浅滩地区通常分布有季节性、突发性的植物品种,而在常年淹水的地区则通常分布有大量沉水植物或者是水百合(*water lilies*)。在热带地区浮萍属(*Lemna*)中的水萍(*duckweed*)、凤眼兰属(*Eichhorhia*)中的凤眼蓝(*water hyacinth*)、大浮属(*Pistia*)中的水浮莲(*water lettuce*)等都被当地用来和稳定塘一起处理污水^[52~54]。在美国北卡罗来纳州地区,通过实验证明挺水植物类中的灯芯草(*Juncus effuses*)和庶草(*Scirpus validus*)适合当地环境条件,并被成功地运用于小型污水处理设施^[55]。灯芯草作为湿地中一种普通的淡水挺水植物,在英国的牧场、沼泽地和其他潮湿地区作为一种优势物种随处可见。Thompson 和 Grime(1979)在对 2 块具有代表性湿地的调查研究中,明确把灯芯草列为该地区的优势物种,并广泛推广运用^[56]。据文献报道^[57~61],小叶浮萍在滇池地区具有较强的生长适

宜性,在许多池塘均能发现。成水平等^[33]发现香蒲、灯芯草是武汉及北纬 30°附近地区人工湿地较为适宜的水生植物,特别是灯芯草冬季生长良好,是该地区更为理想的净水植物。李亚治^[62]进行的水葫芦—水草人工湿地研究发现,在气温变化不大的南方地区,水葫芦—水草人工湿地废水处理系统运行稳定且受季节变化的影响较小。除此之外,每个地区不同季节水生植物的处理效果也不一样。K. R. Reddy 等研究了凤眼莲等几种水生植物净化污水的能力,结果发现,夏季水生植物除氮效果的顺序为:凤眼莲 > 浮萍 > 水鳖 > 浮萍 > 槐叶萍 > 紫萍 > *egeria*,而冬季的顺序为:水鳖 > 凤眼莲 > 浮萍 > 浮萍 > 紫萍 > 槐叶萍 > *egeria*,夏季除磷效果最好的是凤眼莲和 *egeria*,冬季除磷效果最好的是水鳖和浮萍^[12]。

2.3 根系的发达程度

水生植物的净化功能与其根系的发达程度和茎叶生长状况(密度和速度)密切相关,因此选择人工湿地的水生植物时,必须全面考虑它的根系状况。在正常运行的人工湿地中,污染物主要是靠附着生长在水生植物根区表面及附近的微生物去除的。一般而言,根系越发达,湿地系统的去污效果越好。选择根系比较发达、根系较长的水生植物,能够大大扩展人工湿地净化污水的空间,提高其净化污水的能力。据报道,蔗草根系深度可以达到 0.76 m^[41],芦苇根系深度为 0.6~0.7 m,荇草、席草和灯芯草的根系深度为 0.45~0.6 m^[63]。人工湿地的设计深度一般是按水生植物的根系自然扩展深度来确定的,所以在设计人工湿地时要充分考虑所选水生植物根系的因素。在考虑根系密度的同时,还必须充分考虑根系表面积和地下茎(引起氧扩散进入根系的结构),它们也是选择植物的主要指标。根系密度、根系表面积、地下茎密度三者具有明显的相关性,但针对不同植物,这种相关性需要进一步研究^[64]。

2.4 有一定的经济价值

建造人工湿地时考虑一定的经济价值可以实现多种经营,经济上可持续发展的生态工程管理模式,这在欧美等发达国家早就被高度重视,且被广泛采用,而对于亚非拉等发展中国家来说,虽然这一点有其特殊意义,但目前研究、运用较少。在气候温和(纬度在 32°N 左右)的淡水湿地中,灯芯草作为经济植物被广泛运用于各种湿地,其产量用 AFDM 表示,可达 10 kg/(m²·a)^[65]。在我国四川地区,灯芯草也是农民常栽种的经济作物,每年收割 1~2 次,用于编织草席外售,有一定的经济价值。试验表明,在四

川地区选择灯芯草作为湿地植物是适宜的^[66]。

3 展 望

迄今为止,绝大多数有关人工湿地处理污水的观测都表明,它是高效的或是有效的。在我国,人工湿地的研究起步较晚,因此有关湿地植物的研究还需不断深入、探索。今后我国人工湿地水生植物的研究可以着重关注以下几方面: 人工湿地生境条件下水生植物的生理生态研究; 人工湿地水生植物对有毒有害污染废水净化方面的研究; 人工湿地水生植物种类的筛选及其适宜人工生境的研究与创建; 通过人工湿地水生植物种类的选择或对水生植物的管理来激发新根生长以提高氧的传递; 关于收割植物对人工湿地有机质影响的研究。

参考文献:

[1] House C H. Combining constructed wetlands and aquatic and soil filter 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 Scitech*, 1994, 30(8): 209 ~ 223.

[3] EPA. United states Environment Protection Agency. Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters[D]. USPEA Cincinnati, Ohio, USA. 2000.

[4] Greenway M. Suitability of macrophyte for nutrient removal from surface flow constructed wetlands receiving secondary treated sewage effluent in Queensland, Australia [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(2): 121 ~ 128.

[5] 朱彤. 人工湿地污水处理系统应用研究[J]. *环境科学研究*, 1991, 4(5): 17 ~ 22.

[6] Bhamidimarri R. Constructed Wetlands for wastewater treatment: the New Zealand experience[J]. *Water Science and Technology*. 1991, 24(5): 247 ~ 253.

[7] Conley L M, Dick R I, Lion L W. An Assessment of the root zone method of waste water treatment[J]. *Res JWPCF*, 1991, 63: 239 ~ 247.

[8] 张鸿, 陈光荣. 两种人工湿地中氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J]. *华中师范大学学报*, 1999, 33(4): 575 ~ 578.

[9] 成水平, 夏宜. 香蒲、灯芯草人工湿地的研究(一): 净化污水的机理[J]. *湖泊科学*, 1998, 10(2): 66 ~ 71.

[10] Hosokawa Y, Horie T. Flow and particulate nutrient removal by wetland with emergent macrophyte[J]. *Sci Total Environ*, 1992, suppl: 1271 ~ 1282.

[11] 杨昌凤, 黄淦全, 宋文初, 等. 模拟人工湿地处理污水的试验研究[J]. *应用生态学报*, 1991, 2(4): 350 ~ 354.

[12] 吴献花. 人工湿地处理污水的机理[J]. *玉溪师范学院学报*, 2002, 18(1): 103 ~ 105.

[13] 廖绅裕, 陈桂珠. 模拟秋茄湿地系统中镍、铜的分布积累与迁移[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(5): 545 ~ 549.

[14] Ye Z H, Whiting S N. Trace Element Removal from Coal Ash Leachate by a 10-year-old Constructed Wetland[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(9 ~ 10): 1710 ~ 1719.

[15] Ye Z H, Whiting S N. Removal and Distribution of Iron, Manganese, Cobalt, and Nickel within a Pennsylvania Constructed Wetland Treating Coal Combustion By Product Leachate[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(7 ~ 8): 1464 ~ 1473.

[16] 戴全裕. 水生高等植物对太湖重金属的监测及其评价[J]. *环境科学学报*, 1983, 3(3): 213 ~ 223.

[17] 戴全裕. 水生高等植物对废水 Ag 的净化与富集特性研究[J]. *生态学报*, 1990, 10(4): 343 ~ 348.

[18] 刘金栋. 芦苇对镉等几种毒物净化能力的研究[J]. *环境污染与防治*, 1984(6): 19 ~ 20.

[19] 吴玉树. 水生维管束植物对水体 Pb 污染的反应抗性和净化作用[J]. *生态学报*, 1983, 3(3): 185 ~ 195.

[20] Cheng S, Gosse W, Karrenbrock F, et al. Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals[J]. *Ecol Eng*, 2001, 18(3): 317 ~ 325.

[21] Ellis J B, Revitt D M, Shutes R B E, et al. The performance of vegetated biofilter for highway runoff control[J]. *Sci Total Environ*, 1994, 146 ~ 147; 543 ~ 550.

[22] de Souza MP, Chu D, Zhao M, et al. Rhizosphere bacteria enhance selenium accumulation and volatilization by Indian mustard[J]. *Plant Physiol*, 1999, 119: 565 ~ 573.

[23] Lin W, Okon Y, Hardy R W F. Enhanced mineral uptake by Zea mays and Sorghum bicolor roots inoculated with Azospirillum brasilense [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1983, 45: 1775 ~ 1779.

[24] Rosgers K H, Breen P F, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants[J]. *Res JWPCF*, 1991, 63: 934 ~ 941.

[25] 唐述虞, 宋正达, 史建文, 等. 金属矿酸性废水的湿地生态工程处理研究[J]. *中国环境科学*, 1993, 13(5): 356 ~ 360.

[26] 成水平. 人工湿地植物研究[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(2): 179 ~ 184.

[27] Fennessy M S, Cronk J K, Mitsch W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. *Ecol Eng*, 1994, 3(4): 469 ~ 484.

[28] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. *环境科学*, 1994, 16(3): 83 ~ 86.

[29] 吴晓磊. 污染物在人工湿地中的流向[J]. *中国给水排水*, 1994, 10(1): 40 ~ 43.

[30] 沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术——理论与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.

[31] Brix H. Treatment of waster water in the rhizosphere of wetland plants: The root-zone method[J]. *Wat Sci Technol*,

- 1987, 19:107~118.
- [32] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. *Wat Resour Res*, 1982, 18:1311.
- [33] 成水平,况琪军,夏宜,香蒲、灯芯草人工湿地的研究():净化污水的效果[J]. *湖泊科学*,1997,9(4):351~358.
- [34] Kickuth R. Degradation and incorporation of nutrients from rural wastewaters by plant rhizosphere under limnic conditions [A]. In:Utilisation of manure by land spreading. Comm of the Europe Communitons(EUR 5672e) [C]. London, 1977, 335~343.
- [35] Haberl R, Peffler R, Mayer H. Constructed wetlands in Europe[J]. *Wat Sci Tech*, 1995, 32(3):306~315.
- [36] 牛晓音,樊梅英,常杰,等.人工湿地运行过程中有机物质的积累[J]. *生态学报*,2002,22(8):1240~1246.
- [37] Chris C T, James P S S, Martin P U. Organic matter accumulation during maturation of gravel bed constructed wetlands treating farm darky wastewaters[J]. *Wat Res*, 1998, 32(10):3046~3053.
- [38] Laak R. Wastewater Engineering Design for Unsewered Areas [M]. 2nd edition. Lancaster: Technomic,1986.
- [39] Thomas R E, Schwartz W A, Bendixen T W. Soil chemical changes and infiltration rate reduction under sewage speeding [J]. *Soil Sci Am Proc*, 1996, 30: 641~646.
- [40] De Vries J. Soil filtration of wastewater effluent and the mechanism of pore clogging[J]. *Water Pollute Control Fed*, 1972, 44: 565~573.
- [41] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, et al. Role of aquatica plants in wastewater treatment[J]. *Wat Res*, 1990, 20(3): 363~368.
- [42] Breen P F. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment[J]. *Wat Res*, 1990, 24(6): 689~697.
- [43] Kadlec H R, Knight R L. Treatment Wetlands. Boca Raton [M]. FL: Lewis Publishers, 1996.
- [44] Gopal B, Gøel U. Competition and allelopathy in aquaticplant communities[J]. *Bot Rev*, 1993, 59:155~210.
- [45] Grace J B, Wetzel R G. Habitat partitioning and competitive displacement in cattails (*Typha*): experimental field studies [J]. *American Naturalist*,1981, 118:463~474.
- [46] Grace J B, Wetzel R G. Longterm dynamics of *Typha* populations[J]. *Aquat Bot*, 1998, 61:137~146.
- [47] Denny P. Implementation of constructed wetlands in developing countries [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 27~34.
- [48] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16: 545~560.
- [49] Cooper P F, Holbson J A, Susan J. Sewage treatment by reed bed systems[J]. *J Inst Water Environ Manage*, 1989, 3: 60~74.
- [50] Panswad T, Chavalparit O. Water quality and occurrence of protozoa and metazoa in two constructed wetlands treating different wastewaters in Thailand [J]. *Water Science and Technology*, 1997,36(12): 183~188.
- [51] Rivera R. The application of the root zone method for the treatment and reuse of high-strength abattoir waste in Mexico [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 271~278.
- [52] Costa R H R, Bavaresco A S L, Medri W, et al. Teritary treatment of piggery waste in water hyacinth ponds[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 42(10):211~214.
- [53] Kone D, Seigne C, Holliger C. Assessing design criteria for a water lettuce-based wastewater treatment system for BOD₅ removal under Sahelian climatic conditions[A]. In Preprints 5th Int. Con. On Waste Stabilization Ponds[C]. Auckland, NA,2002.191~199.
- [54] Nhapi I, Dalu J, Siebel M A, et al. An evaluation of duckweed-based pond system as an alternative option for decentralised treatment and reuse of wastewater in Zimbabwe [J]. *Water Science and Technology*,2003,48(2):327~333.
- [55] Kim H H, Broome S W. Nutrient removal from swine lagoon effluent by constructed wetland microcosms[A]. In Preprints 5th Int. Con. On Waste Stabilization Ponds[C]. Auckland, NZ, 2002. 305~321.
- [56] Richards P W, Clapham A R. *Juncus effusus* L [J]. *J Ecol*, 1941, 29:375~380.
- [57] 杨文龙.滇池内环境水生植物除磷除氮研究[J]. *云南环境科学*,1992,2(11):5~9.
- [58] 吴玉树,余国莹.根生沉水植物菹草对滇池水体的净化作用[J]. *环境科学学报*,1991,11(4):411~415.
- [59] 吴玉树,李森林.水生维管束植物对滇池水体的净化效应[J]. *生态学报*,1988,8(4):346~349.
- [60] 曹萃禾.四种生态类型的水生维管束植物净化能力的研究[J]. *水产科学*,1990,9(3):6~10.
- [61] 刘庆系.漂浮水生植物对污水处理的研究[J]. *农业环境保护*,1991,10(3):99~103.
- [62] 李亚治.水葫芦-水草人工湿地系统在再生浆造纸废水处理中的应用研究[J]. *环境工程*,2000,18(6):15~16.
- [63] 胡康萍.人工湿地设计的水力学问题研究[J]. *环境科学研究*,1991,4(5):8~12.
- [64] 崔玉波,李相猛,赵可.潜流人工湿地废水处理技术的效能[J]. *吉林建筑工程学院学报*,2002,19(2):7~10.
- [65] Wetzel R G, Howe M J. High production in a herbaceous perennial plant achieved by continuous growth and synchronized population dynamics[J]. *Aquat Bot*, 1999, 64: 111~129.
- [66] 黄时达,杨有仪.人工湿地处理污水的试验研究[J]. *四川环境*,1995,14(3):5~7.

(收稿日期:2003-09-04 编辑:傅伟群)