

人工湿地污水处理技术的工艺与设计

张迎颖¹, 丁为民¹, 钱玮燕², 王磊², 庞伟²

(1.南京农业大学 工学院, 南京 210031; 2.南京市建邺区环境监测站, 南京 210004)

摘要: 结合人工湿地技术的工艺原理与流程, 介绍了人工湿地工艺设计的主要内容, 展望了人工湿地研究的一些构想。人工湿地工艺设计研究包括植物的营养、基质的配置和人工湿地的构造及工程参数3个方面。深入研究植物和基质的筛选与组合、探讨污染物净化机理、优化水力学模型与降解动力学模型、建立人工湿地数据库, 将有利于提高人工湿地技术的设计水平。

关键词: 人工湿地; 污水处理; 工艺设计

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2455(2009)01-0005-06

Process and design of constructed wetland technology in wastewater treatment

ZHANG Ying-ying¹, DING Wei-min¹, QIAN Wei-yan², WANG Lei², PANG Wei²

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. Nanjing Jianye Environmental Monitoring Station, Nanjing 210004, China)

Abstract: The main aspects of the design of constructed wetland was presented combining with its technical principle and flow, and some research conceptions were proposed. The design of constructed wetland included three aspects: cultivation of macrophyte, configuration of substrate, constitution and engineering parameters. In order to promote the design level of constructed wetland, it was necessary to carry out a deep research on selection and combination of macrophyte and substrate, investigate the purification mechanism, optimize hydraulic models and kinetic models, and establish a database of constructed wetland.

Keywords: constructed wetland; wastewater treatment; process design

人工湿地作为一种新型的生态污水处理技术, 具有投资少、运行费用低、处理效果稳定、耐冲击负荷能力强等优点。该技术利用基质、植物、微生物的协同净化能力处理污水, 同时还可提高生物多样性, 美化生态景观, 具有一定的经济效益和生态环境效益, 受到了世界各国的普遍关注。在构建人工湿地的过程中, 最为基础的环节是工艺设计^[1-2], 这也一直是该技术研究的重点。本文主要阐述人工湿地处理技术工艺设计的主要内容。

1 工艺流程

1.1 人工湿地系统的基本类型

按照工程设计和水体流态的差异, 人工湿地污水处理系统可以分为表面流湿地、水平潜流湿地和垂直流湿地3种主要类型, 各类型在运行、控制等

方面的诸多特征存在着一定的差异^[3], 如表1所示。其中, 表面流湿地不需要砂砾等作基质, 造价较低, 但水力负荷较低, 该类型在美国、加拿大、新西兰、瑞典等国有较多分布; 水平潜流湿地的保湿性较好, 对BOD、COD等有机物和重金属等去除效果好, 受季节影响小, 目前在欧洲、日本应用较多; 垂直流湿地综合了前两者的特点, 但其建造要求较高, 至今尚未广泛使用。

1.2 人工湿地系统的工艺流程

人工湿地的工艺流程有多种, 目前常用的有: 推流式、阶梯进水式、回流式和综合式4种^[4-5],

基金项目: 江苏省2008年度普通高校研究生科研创新计划(CX08B_135Z)

收稿日期: 2008-09-03; 修回日期: 2008-10-21

如图 1 所示。

表 1 三种人工湿地处理污水系统类型比较

Tab. 1 Comparison of three types of constructed wetland

特征参数	表面流湿地	水平潜流湿地	垂直流湿地
水力流动	表面漫流	基质下水平流动	表面向基质底部纵向流动
水力负荷	较低	较高	较高
去污效果	一般	对 BOD、COD、重金属去除效果好	对 N、P 去除效果好
系统控制	简单, 受季节影响大	相对复杂	相对复杂
环境状况	夏季有恶臭, 易滋生蚊蝇	良好	夏季有恶臭, 易滋生蚊蝇

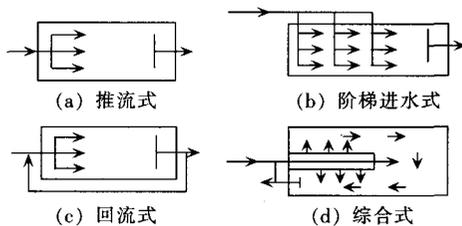


图 1 人工湿地的工艺流程

Fig. 1 Technical flow of constructed wetland

推流式是最基本的形式。阶梯进水式可避免湿地床前部堵塞, 使植物长势均匀, 有利于后部的硝化脱氮作用; 回流式可对进水进行一定的稀释, 增加水中的溶解氧并减少臭味; 出水回流还可促进湿地床中的硝化和反硝化作用, 采用低扬程水泵, 通过水力喷射或跌水等方式进行充氧; 综合式则一方面设置水体回流, 另一方面还将进水分布至湿地床的中部, 以减轻湿地床前端的负荷。

人工湿地的运行可根据处理规模的大小进行多种方式的组合, 一般有单一式、串联式、并联式和综合式等^[6], 如图 2 所示。在实际应用中, 人工湿地还常与氧化塘等进行串联组合。

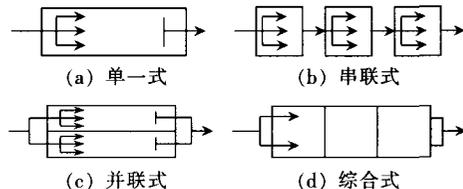


图 2 人工湿地的不同组合形式

Fig. 2 Several combination forms of constructed wetland

1.3 人工湿地系统的配套设施

实际设计中, 往往是将人工湿地进行多级组合, 并附加必要的预处理、后处理设施以构成湿地

处理系统^[6], 如图 3 所示。一般说来, 系统主要由 3 部分组成^[7]:

(1) 收集和预处理设施。由污水集水管网、污水集水池、格栅和沉淀池等组成。如果取水于被污染的河流, 可取消污水集水管网和污水集水池。

(2) 配水和集水设施。由配水井、配水槽、配水管网、布水管、集水管和集水池组成。

(3) 湿地床。根据出水水质要求, 可设计一级或多级湿地床, 污水经串联或并联的湿地床多次净化。

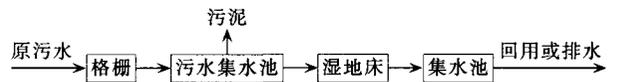


图 3 人工湿地系统的配套设施

Fig. 3 Auxiliary facilities of constructed wetland system

2 工艺设计

2.1 人工湿地植物的管养

水生植物是人工湿地系统的有机组成部分, 其主要作用为: 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。人工湿地植物的管养, 包括植物的选择与搭配、栽培与养护、收割与管理等内容。

按生长习性, 湿地植物可分为草本、灌木和乔木。人工湿地较多使用草本植物来净化污水, 尤其是挺水植物, 如被普遍采用的芦苇 (*Phragmites communis*)、黄菖蒲 (*Iris pseudoacorus*)、美人蕉 (*Canna indica L.*)、香蒲 (*Typha angustata*) 和灯心草 (*Juncus effusus*) 等。这些挺水植物根系发达、生物量大、生长率高, 在人工湿地中能起到固定床体表面、提供良好过滤条件、防止淤泥堵塞等作用。而利用灌木、乔木作为湿地植物的报道较少, 因为适应湿地环境的灌木、乔木不多。但也有一些乔木树种如两栖榕 (*Amphibious banyan*)、白千层 (*Melaleuca quinquenervia*)、茶树精油 (*Melaleuca alternifolia*)、池杉 (*Taxodium ascendens*)、水翁 (*Cleistocalyx operculatus*) 和红树林部分树种如秋茄 (*Kandelia candel*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 和白骨壤 (*Avicennia marina*) 等^[8-9] 可作为湿地树种, 它们对污染物表现出较好的净化效果。在建造湿地时, 植物的选取应遵循下列原则: 适地适种、耐污能力强、净化能力强、根系发达、经济和观赏价值高、

重视物种间的合理搭配。

湿地植物的栽培可在春、秋两季进行, 栽培方式主要有: 自然界移栽、直接种植和育苗移栽。从自然界移栽易受气候的限制, 还会引入杂草, 一般多发生在春季; 直接种植成活率高, 但生长速度较慢; 育苗移栽成活率高, 生长速度快, 可以在短期内布满整个湿地, 是目前普遍采用的方式。增大植物的栽种密度, 加强人工湿地管理, 定期进行植物收割, 及时清除植物残枝, 杜绝二次污染, 同时做好植物优势群落和生物多样性的保护工作, 才能维持系统处理效果的稳定。

2.2 人工湿地基质的配置

在湿地系统中, 基质是植物的载体, 是微生物的生长介质, 它将湿地中发生的所有处理过程连成一个整体。基质还能够通过沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物。对于基质的配置, 主要考虑基质的种类、粒径、深度等, 特别需要关注对磷的去除能力。

有研究表明, 在湿地对磷的去除或固定机制中, 基质吸附和沉淀发挥着最重要的作用, 同时也最具有发展潜力。袁东海等研究了7种基质材料净化污水中磷的机理, 结果表明: 矿渣、粉煤灰对磷有很好的去除效果, 蛭石、黄褐土和下蜀黄土次之, 沸石和砂子较差^[10]。基质中游离氧化铁、氧化铝和胶体氧化铁、氧化铝含量越高, 其固定形成的磷酸铁盐和磷酸铝盐数量越多, 基质净化磷素的能力越强。除砂子外, 上述其他基质磷素饱和和吸附后, 磷素释放比例很低, 一般不会造成二次污染。当然, 基质对其他污染物的去除效果也有一定的影响。朱夕珍等的研究表明: 煤灰渣基质的人工湿地对有机污染物的处理效果较好, COD和BOD₅的去除率分别达到71%~88%和80%~89%^[11]。因此, 在实际应用中, 可根据所处理污水中含有的主要污染物来配置合适的基质。

基质粒径的大小是影响湿地系统水力传导性的主要因素, 直接关系到湿地床体的孔隙度, 进而影响污染物在湿地中的停留时间。粒径大的基质, 孔隙度大, 所能容纳的污水量大, 吸附作用的时间长, 有利于污水的净化。湿地床的不同区域, 对基质粒径的需求不同。进水配水区和出水集水区的基质, 一般采用粒径在60~100 mm的砾石, 分布于整个床宽。处理区最常选用的粒径范围是4~16

mm, 实践表明, 粒径为8~16 mm的基质, 水力传导性好, 适宜植物生长, 处理效果优^[12]。几种基质的粒径及其水力传导性如表2所示^[1]。

表2 几种基质的粒径及其水力传导性
Tab. 2 Granular size and hydraulic conductivity of different substrates

基质类型	粒径/ mm	渗透率 η / mdarcy	水力传导率 k_s / ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
粗砂	2	0132	112×10^{-2}
碎石砂	8	0135	518×10^{-2}
细碎石	16	0138	817×10^{-2}
粗碎石	32	0140	$1\ 116 \times 10^{-2}$
粗岩石	128	0145	$11\ 517 \times 10^{-2}$

基质深度是决定人工湿地过水断面面积和污水处理效果的重要参数, 可根据系统所栽种植物的种类及根系的生长深度确定, 以保证湿地单元中必要的好氧条件。通常表面流湿地对基质厚度的要求不太严格, 潜流湿地的基质厚度约60 cm左右。

2.3 人工湿地系统的设计

人工湿地的构造与工程参数是人工湿地工艺设计的核心, 包括水力学特性、湿地床构型和配套设施的构筑3方面。其中, 水力学特性包括水力停留时间、水力负荷; 湿地床构型设计包括水力坡度、湿地床的长宽比和水位控制; 配套设施的构筑包括进出水装置、隔板装置和防渗设施。

2.3.1 水力停留时间

湿地的处理效果与水力停留时间关系密切, 停留时间过短, 生化反应不充分, 停留时间过长, 易引起污水滞留和厌氧区扩大, 影响处理效果^[13]。水力停留时间可定义为湿地可用容积与平均流量的比值, 即:

$$t = V \cdot \varepsilon / Q_{av} \quad (1)$$

式中: t ——水力停留时间, d;

V ——湿地容积, m^3 ;

ε ——湿地孔隙率(无量纲);

Q_{av} ——平均流量, m^3/d 。

从设计的角度出发, 理论水力停留时间是利用平均流量、系统几何形状、操作水位、初始孔隙率等来估算的。对于潜流湿地而言, 悬浮固体的不断沉积, 其孔隙率也随之发生变化, 其水力停留时间很难确定, 因此, 实际水力停留时间通常为理论值的40%~80%^[14]。

实践证明: 水力停留时间参数的重要意义, 首

先是与系统的除磷效果有关,有研究显示两者为显著线性正相关^[15]。其次,水力停留时间还影响系统除氮的效果,如郭明新等的研究表明,人工湿地处理系统对氮的去除率随时间的延长而提高^[16]。综合各方面的资料:表面流湿地的水力停留时间以4~8 d为佳;潜流湿地的水力停留时间以2~4 d为佳,以保证其反硝化作用的效果^[14-16]。

2.3.2 水力负荷

湿地系统的类型和尺寸可根据所处理的污染物浓度和负荷来确定。实际设计时,需准确知道污水中污染物的种类和浓度,再以日流量与某种污染物的浓度相乘即可估计处理负荷,根据该负荷以及推荐的湿地特定污染物负荷率就可选择相应的处理面积。

表面负荷率(ALR)指的是单位面积湿地对特定污染物所能承受的最大负荷。据美国国家环保局资料^[17-18],利用表面负荷率可以计算湿地处理工程的面积:

$$A_s = Q \cdot C_0 / ALR \quad (2)$$

式中: A_s ——湿地处理面积, hm^2 ;

Q ——湿地进水量, m^3/d ;

C_0 ——进水污染物的质量浓度, kg/m^3 。

对于表面流湿地进水区 BOD 负荷率可达 $100 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 潜流湿地设计 BOD 负荷率可为 $80 \sim 120 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。不过,也有学者认为水力负荷应采用流量除以过流断面面积,才能反映其真正含义,也更切合人工湿地的特点^[14]。

2.3.3 水力坡度

对表面流湿地的水力坡度加以考虑是为了解决回水所引起的滞留阻塞问题。其水头损失可用修正过的曼宁公式来计算^[19]:

$$s^{1/2} = v / (n^{-1} \cdot h^{2/3}) \quad (3)$$

式中: s ——水力坡度(无量纲);

v ——平均流速, m/s ;

n ——曼宁阻力系数, $\text{m}/\text{s}^{1/3}$; n 是水深以及其它表面阻力因素的函数;

h ——湿地平均水深, m 。

潜流湿地中水流动主要依靠进、出水处的水头损失,可用达西定律的原始模式计算^[20]:

$$Q = K \cdot A_c \cdot S = K \cdot W \cdot D_w \cdot dh/dl \quad (4)$$

式中: Q ——流量, m^3/d ;

A_c ——水流横断面面积, m^2 ;

K ——水力传导系数, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;

D_w ——水深, m ;

W ——潜流湿地宽度, m ;

dl ——潜流湿地的单位长度, m ;

dh ——水流阻力导致的水头损失, m 。

在湿地设计中,水力坡度的确定需综合考虑湿地类型、基质性质及湿地尺寸等因素。实践中,表面流人工湿地采用 0.5% 或更小,潜流人工湿地采用 0.5%~1%。关键是,水力坡度这一设计参数,需根据填料性质及湿地尺寸加以校正,例如以砾石为填料的湿地床一般要取 2%^[4]。

2.3.4 湿地床的长宽比

理论上,湿地水力负荷的要求确定之后,可根据负荷计算湿地面积,由以下公式求得湿地床体的长度 L :

$$L = A_s / W \quad (5)$$

潜流湿地的宽度 W 可以根据达西定律和一些关于深度的推荐值来计算。将公式(5)代入公式(4),可得:

$$W = [Q \cdot A_s / (K \cdot dh \cdot D_w)]^{1/2} \quad (6)$$

这样,即可求得能够保证一定水头损失的湿地最小宽度。

经验表明^[4,15]:湿地床长度通常为 20~50 m。湿地过短,则有效处理面积过小,不能保证净化效果;湿地过长,易造成死区,使水位难于调节,不利于植物生长。湿地的长宽比不宜过大,建议控制在 3:1 以下,目前,大多数欧洲国家人工湿地的长宽比在 1:1~2:1 之间,以土壤为主的系统,长宽比应小于 1:1。对于长宽比小于 1:1 的潜流湿地,必须慎重考虑在湿地整个宽度上均匀布水和集水的问题。

2.3.5 水位控制

水位控制通过系统深度来实现,是湿地运行、维护和调节的重要手段。系统深度在理论上应该是越深越好;但实践中需考虑植物根系的深度。如果过浅,根系无法正常生长,难以形成有利的降解微环境;如果过深,根系无法输氧至底部,影响硝化效果,降低工程效益。

北美湿地水质处理数据库中推荐的表面流湿地的水深在 10~200 cm,典型深度在 15~60 cm,运

行深度随植物种类不同而不同, 一般挺水植物区域水深 60 cm, 沉水植物区域水深 120 cm 左右^[1,4,15]。

潜流湿地系统对水位的控制有三点要求: 在系统接纳最大设计流量时, 进水端不出现雍水, 以防发生表面流; 在系统接纳最小设计流量时, 出水端不出现填料床面的淹没, 避免出现表面流; 考虑到植物的生长, 床中水面浸没植物根系的深度应尽量均匀, 并尽量使水面坡度与底坡基本一致。美国国家环保局^[18]根据工程经验, 确定潜流湿地进水区域水深约为 40 cm, 基质深度应比水深深 10 cm 左右。

2.3.6 进出水装置

湿地的进、出水设计应注意进、出水装置在整个宽度上布水或集水的均匀性。进水装置一般采用多孔管或三角堰等, 多孔管可设于床面上或埋于床面以下。系统的进水流量可通过阀或闸板调节, 过多的流量或紧急变化时应设有溢流、分流措施。出水装置一般在填料层底部设穿孔集水管, 并设置旋转弯头和控制阀门, 从而为整个湿地系统提供水位控制。

对于较小的湿地系统, 常用的进、出水装置是穿孔的 PVC 管, 长度与湿地宽度相当, 均匀穿孔; 较大的湿地系统, 常用多级堰或者升降水箱。在严寒地区, 进、水管的设置须考虑防冻措施, 并在系统的必要部位设置控制阀和放空阀。

2.3.7 隔板装置与防渗设施

隔板装置一般设置于湿地水流垂直方向或者平行方向上, 用于减少系统短路、促进污水混合, 改善混凝沉降效果。隔板使用取决于长宽比、单元配置情况和处理目标等, 一般不推荐使用隔板。

防渗设施的作用是防止湿地系统因渗漏而污染地下水, 其设置方法有多种, 如采用厚度为 0.5 ~ 1.0 mm 的高密度聚乙烯树脂, 或油毛毡密封铺垫等。需要注意的是, 湿地处理系统必须保证进水管与出水管之间没有泄漏现象。

3 实例分析

3.1 深圳白泥坑人工湿地系统

白泥坑人工湿地污水处理系统位于深圳市宝安区平湖镇东南, 占地面积 0.84 hm², 设计污水处理量为 3 100 m³/d, 平均水力停留时间为 23 h。该系统由四级处理池串联而成, 每级处理池由 2 ~ 3 个

小池并联使用, 种植芦苇、茭苕、席草、大米草等水生植物, 采用碎石作为基质。原水先流经一、二级碎石床, 对有机物进行降解, 再进入第三级兼性塘, 最后经过第四级碎石床变成洁净的水排出, 见图 4^[21]。

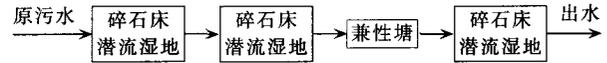


图 4 白泥坑人工湿地系统工艺流程

Fig. 4 Technical flow of Bainikeng constructed wetland

白泥坑人工湿地可以形成一个独立的生态系统, 具有很强的吸附过滤效果, 抗冲击负荷能力强, 出水水质稳定, 而且对部分重金属也有去除效果。经过两年的试验运行, 系统处理效果较好, 除了氨氮指标处理效果不明显外, 其余指标均能达到国家二级处理排放标准, 对 BOD₅、COD、SS 的平均去除率分别达到 90%、71%、88%^[21]。与传统污水处理方法相比, 该湿地系统运转和运行费用较低。系统无动力消耗, 管理方便, 除了定期的水质监测外, 平时无需其它管理。系统运行费用为 0.02 元/m³, 仅为传统活性污泥法的 10%。

3.2 廊道式人工湿地系统

针对农村污水分散、处理规模小的特点, 张克强等采用独特设计的廊道式人工湿地对其加以处理。该湿地系统将潜流与表面流相结合, 各级处理单元呈阶梯状, 以廊道曲线为绕行路径, 配以相应的水生植物, 可有效减少湿地面积, 同时解决冬季运行问题, 适用于中小规模的农村污水分散处理与回用^[22]。

该湿地系统由三级处理单元组成^[22], 如图 5 所示。第一级处于系统的最内圈, 为圆形结构, 采用垂直潜流工艺, 配以适当的基质、植物和间歇进水方式, 有助于系统微生物的有氧呼吸和硝化作用, 对 BOD₅、COD、SS 的降解效果较好。湿地的其他各级设计均为与第一级同心的圆环结构, 第二级采用水平潜流工艺, 为主要处理单元之一, 厌氧处理能力和有机质降解能力较强, 可以去除绝大部分的 BOD₅、COD、SS 和部分氮磷等。第三级可根据冬季气温加以选择, 寒冷地区可采用潜流工艺, 温暖地区可采用表面流工艺, 辅以与前两级不同的基质、植物, 依靠生物作用对二级出水施以进一步的处理, 从而更有效更彻底地去除氮磷。

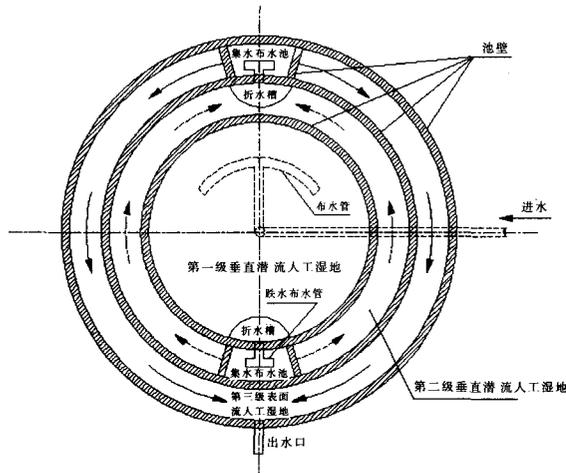


图5 廊道式人工湿地俯视

Fig. 5 Planform of channel constructed wetland

4 结语

人工湿地是结合了生态学原理与工程学方法而形成的生态工程污水处理技术，它利用生态系统中的整体优化、循环再生、区域分异等原理，在促进污染物良性循环的前提下，达到污水处理与回用的最佳效益，适合于处理水量不大、水质变化较小、管理水平较低的农村及小城镇污水。

20多年来，我国人工湿地污水处理技术的研究已经积累了一定的实验数据与理论基础，但是对于湿地内部机理和运行模型等仍然把握不够。因此，深入研究植物和基质的筛选与组合、探讨污染物净化机理、优化水力学模型与降解动力学模型、建立人工湿地数据库，将有利于提高我国人工湿地技术的设计水平和人工湿地系统的处理能力。

参考文献:

- [1] 赵桂瑜, 杨永兴, 杨长明, 等. 人工湿地污水处理系统设计研究[J]. 四川环境, 2005, 24(6): 24-27.
- [2] Siracusa G, LaRosa A D. Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a sicilian town and environment evaluation using emergy analysis[J]. Ecological Modelling, 2006, 197(3-4): 490-497.
- [3] 于少鹏, 王海霞, 万忠娟, 等. 人工湿地污水处理技术及其在我国发展的现状与前景[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 22-29.
- [4] 王薇, 俞燕, 王世和. 人工湿地污水处理工艺与设计[J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(1): 59-62.
- [5] 漆璐, 周仲魁, 孙占学. 人工湿地生态系统污水净化研究新进展[J]. 四川环境, 2007, 26(2): 92-95.

- [6] 张太平, 陈韦丽. 人工湿地生态系统提高氮磷去除率的研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 580-584.
- [7] 刘全中. 人工湿地系统水质净化技术的工艺设计[J]. 给水排水, 2001, 27(8): 35-36.
- [8] Bankston J L. Degradation of trichloroethylene in wetland crocsmms containing broad-leaved cattail and eastern cottonwood [J]. Water research, 2002, 36(6): 1539-1546.
- [9] 靖元孝, 杨丹菁, 陈章和, 等. 两栖榕在人工湿地的生长特性及其对污水的净化效果[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 614-619.
- [10] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 51-55.
- [11] 朱夕珍, 崔理华, 温晓露, 等. 不同基质垂直流人工湿地对城市污水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 4542-4571.
- [12] 梁继东, 周启星, 孙铁珩, 等. 人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析[J]. 生态学杂志, 2003, 22(2): 49-55.
- [13] Akratos C S, Tsihrintzis V A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 173-191.
- [14] 王世和, 王薇, 俞燕, 等. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 359-362.
- [15] 华涛, 周启星, 贾宏宇. 人工湿地污水处理工艺设计关键及生态学问题[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1289-1293.
- [16] 郭明新, 李万庆. 天津市城市污水自由水面构筑物湿地处理系统污水氮去除规律的研究[J]. 环境化学, 1996, 15(6): 516-521.
- [17] USEPA. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment[M]. Washington DC: USEPA 832-R-93-008, 1993.
- [18] USEPA. FWS wetlands for wastewater treatment[M]. Washington DC: USEPA 832-R-99-002, 1999.
- [19] Reed S C, Crites R, Middlebrooks E J. Natural systems for waste management and treatment [M]. San Francisco, Ca: Mc Graw-Hill, 1995.
- [20] 诸惠昌, 胡纪萃. 新型废水处理工艺——人工湿地的处理方法[J]. 环境科学, 1992, 14(2): 39-43.
- [21] 陈韞真, 叶纪良. 深圳白泥坑、雁田人工湿地污水处理场[J]. 电力环境保护, 1996, 12(1): 47-51.
- [22] 张克强, 杨莉, 杨鹏, 等. 适合农村污水分散处理的廊道人工湿地设计参数研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(1): 286-291.

作者简介: 张迎颖(1980-), 女, 江苏响水人, 博士研究生, 主要从事资源综合利用、环境工程等方面的研究, (电子信箱) fly8006@163.com.