

文章编号: 1000-5641(2011)01-0055-08

# 人工湿地技术削减雨水初期径流 污染负荷研究进展

钱嫦萍, 陈振楼, 曹承进, 王军

(华东师范大学 资源与环境科学学院 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 拟从技术特点、技术流程、技术原理、技术参数、技术使用中存在的问题以及技术的应用前景等方面对雨水初期径流污染人工湿地技术进行分析和描述. 介绍了该技术在国内外和研究现状, 并展望了其未来研究方向. 以期为我国城市雨水初期径流污染控制工程提供参考依据.

**关键词:** 人工湿地; 雨水初期径流; 技术特征与原理

**中图分类号:** X824 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2011.01.006

## Review of artificial wetland treatment technique for initial rainwater runoff pollutant removal

QIAN Chang-ping, CHEN Zhen-lou, CAO Cheng-jin, WANG Jun

(Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education,  
School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** This paper analyzed and described the technical characteristics, technical procedures, technical principles, technical parameters, technical problems and technology prospects in the artificial wetland treatment. The development prospect of the technique at home and abroad was also anticipated. This investigation will provide references for the project of controlling the city black-odor river pollution.

**Key words:** artificial wetland; water runoff; technical characteristics and principles

### 0 引 言

随着城市化步伐的不断加快,城市中不可渗透的表面也不断增长,导致由雨水径流引起的非点源污染成为河流湖泊等水体黑臭的重要因素之一. 城市地面污染的加剧使得初期雨水径流污染日益突出,如汽车产生的污染物、屋面建筑材料、混凝土道路垃圾和城区污水等

收稿日期: 2010-10

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX07317-006); 国家自然科学基金(40971259); 上海市优秀学科带头人计划(10XD1401600)

第一作者: 钱嫦萍, 女, 博士研究生. E-mail: qianchangping@126.com.

通讯作者: 陈振楼, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: zlchen@geo.ecnu.edu.cn.

污染物几乎都集中在初期几毫米降雨中,其污染负荷远高于降雨中后期<sup>[1]</sup>.这种雨水径流尤其是暴雨径流具有随机性、突发性和强冲击性,其污染负荷时空变化幅度大,研究、控制和治理的难度也比较大,传统的水处理工艺很难满足要求<sup>[1,2]</sup>.因此,迫切需要建立具有抗冲击力强、可间歇运行和高效低耗的水质处理技术.雨水初期径流污染人工湿地技术应运而生.

湿地是由水、永久性或间歇性处于水饱和状态下的基质以及水生生物所组成的一种具有独特结构和强大功能的生态系统,它对于保护生物多样性,改善自然环境,保护和净化水源具有重要作用.在污水净化方面,湿地被认为是“天然的污水净化器”<sup>[3]</sup>.然而自然湿地资源是非常有限的,为充分发挥湿地的强大生态功能,研究和建立人工湿地生态系统成为环境污染治理尤其是面源污染治理的重要举措.人工湿地是20世纪70年代末迅速发展起来的一种污水处理技术<sup>[2]</sup>.目前,人工湿地处理作为城市或工业废水二级处理设施仍存在效率低、受季节和温度影响较大、环境卫生较差以及对地下水的影响等一些问题,但作为三级处理或深度处理等有很大优势.并且人工湿地用于处理雨水径流污染的研究也日益增多,因为它被认为是控制雨水径流面源污染的有效途径之一<sup>[2,4]</sup>.

## 1 雨水初期径流污染人工湿地技术简介

### 1.1 技术概述

人工湿地在天然湿地的基础上采取措施进行人工强化,主要是指通过模拟天然湿地的结构与功能,选择一定的地理位置与地形,根据人们的需要人为设计与建造的湿地.是一个为了人类的利用和利益,通过模拟自然湿地,人为设计与建造的由饱和基质、挺水与沉水植被、动物和水体组成的复合体<sup>[5]</sup>.

雨水初期径流污染人工湿地技术主要是利用土壤、人工介质、植物和微生物的物理、化学、生物三重协同作用,对雨水径流进行处理的一种技术.其作用机理主要为:截留过滤作用、接触沉淀作用、水生植物的根部对氮、磷的吸收作用、微生物分解、吸附和转化作用、土壤的脱氮作用和土壤中矿物质的吸附与离子交换作用及各类动物的作用<sup>[6,7]</sup>.按水流方式可将人工湿地分为表面流人工湿地、潜流人工湿地和垂直流人工湿地三类.其中潜流式人工湿地技术是核心,应用也比较广泛,一般由两级湿地串联,处理单元并联组成.湿地中根据处理污染物的不同而填有不同介质,种植不同种类的净化植物.

选择使用的水生植物的耐污和净化性能是人工湿地技术能否正常发挥污染治理效能的关键所在<sup>[8,9]</sup>.雨水初期径流污染处理中,由于雨水径流的随机性、暴雨的突发性和污染物成分的不确定性,在选择水生植物时需选择处理性能好,成活率高,抗水性能强,成长周期长,美观及具有经济价值的水生植物作为湿地系统的种植植物.目前,应用比较好的植物有芦苇、香蒲和蘆草等水生植物.

人工湿地的优点是建设和运行费用低,处理效果好,能耗少,操作简便,运行管理方便,系统所需仪器、设备简单,系统本身无需额外动力,这对于节省资金、保护水环境以及进行有效的生态恢复具有十分重要的现实意义,同时具有一定的景观作用,因此越来越受到关注<sup>[10-12]</sup>.

### 1.2 技术流程

根据所处理的降雨径流的特征,人工湿地系统主要有4个部分组成:预处理区、进水缓冲区和湿地处理区和雨水滞留区(主要流程示意图见图1).降雨径流进入预处理区后,经格

栅或筛网截留和捕获颗粒物大的污染物质,到沉淀池沉降一部分沉积物和其他对湿地有害的碳氢化合物,减轻对后续工艺的冲击负荷和水力影响. 剩余的径流入缓冲区,进水缓冲区通常为表面水平流人工湿地,一般以自然泥土为基质,具有自由水面,人工适当辅以布水、基底修复等工程措施,属于好氧湿地,沉淀更多的颗粒及去除一定的污染物<sup>[13]</sup>. 初步处理过的径流入湿地处理区,本区域为复合式潜流人工湿地,一般由几个湿地串联或并联组合而成,单个湿地由湿地防渗膜、自下而上设置的砾石、粗沙和种植土、湿地植物、集配水系统及导膜管等构成<sup>[13,14]</sup>,大部分污染物在此区得到降解. 最后,水流进入由景观塘或氧化塘等构成的滞留区,水体中的营养物质得到进一步去除后流入接纳水体.

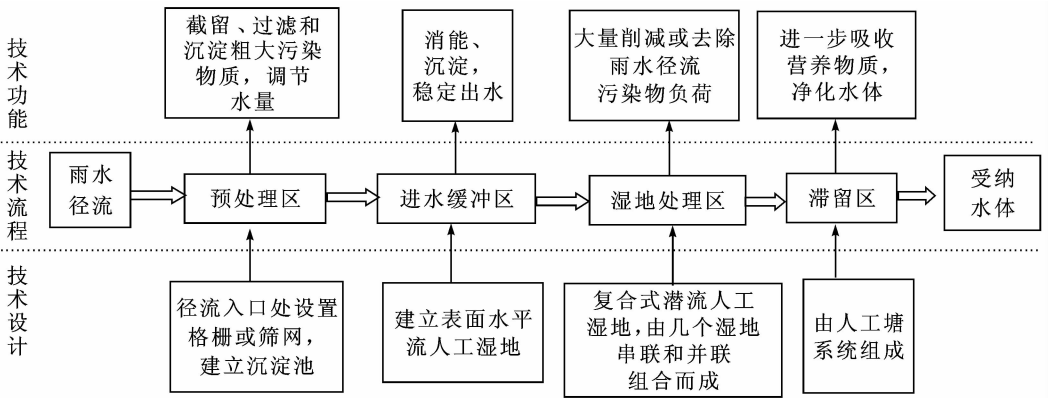


图 1 雨水径流人工湿地处理技术流程和功能示意图

Fig. 1 Technical processes and functions diagram of constructed wetland for initial rainwater runoff pollution

### 1.3 技术原理

虽然雨水初期径流污染人工湿地处理技术因径流特征而有别于普通的人工湿地污水处理技术,但基本原理是相同的. 人工湿地主要由基质或填料床、水体、水生植物、无脊椎或脊椎动物和好氧或厌氧微生物种群等五大类构成. 尤其是基质、水生植物和微生物在人工湿地系统中发挥着净化雨水的主要作用. 基质主要有沉淀、截留、过滤和吸附作用,还可为水生植物和微生物的生存提供环境;水生植物对雨水中的悬浮物质有很好的截留作用,对污水中的营养成分直接吸收转化;而微生物作用比较复杂,且在湿地系统污染物净化中占据核心地位. 雨水中的有机物降解、氮磷和重金属等污染物的去除主要是通过各种微生物的联合以及水生植物和各种微生物的协同发生的物理、化学和生物三重作用进行的<sup>[4,15]</sup>. 同时通过填料的定期更换和植物的割收最终从系统中去除.

### 1.4 技术指标

#### 1.4.1 降雨径流的水量、水质

雨水径流人工湿地系统的进水水量和水质具有随机性和不稳定性,这使人工湿地的设计和运行管理不同于一般的污水处理人工湿地. 对降雨径流特征和径流中污染物浓度的充分了解对雨水径流污染人工湿地技术设计十分重要. 为充分了解降雨径流的水质水量特征,需要定期监测汇水区的降雨过程(如不同频率一次总降雨量、降雨历时和降雨径流流量)和降雨径流中污染物浓度(如径流中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ,  $\text{BOD}_5$ ,  $\text{SS}$ ,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  的浓度及其与两次

降雨间隔时间的关系).

#### 1.4.2 人工湿地容积

人工湿地技术的关键参数就是人工湿地的容积大小. 有研究认为,湿地的最佳储存容积应当是使汇水区达到 13 mm 水位的容积<sup>[16]</sup>,有效去除的最小储存容积是使汇水区达到 6 mm水位的容积. 储存容积可用下式计算<sup>[2]</sup>,

$$V = C \times y \times A_{ws}.$$

式中, $V$  为湿地的储存容积( $m^3$ ); $C$  为系数,取 10; $y$  为汇水区的设计水位(mm); $A_{ws}$  为汇水区的表面积( $hm^2$ ).

#### 1.4.3 水力停留时间

水力停留时间指雨水径流在人工湿地内的平均驻留时间. 人工湿地技术为了达到一定的污染物处理效果,必须有一定的水力停留时间. 水力停留时间受湿地长度、宽度、植物、基底材料渗透率、水深和水力坡度等因素的影响. 一般水力停留时间最大不超过 24 h,暴雨期间至少应有 30 min 的水力停留时间以保证处理效果. 有研究显示,水力停留时间达 10~15 h 就可以达到很好的处理效果<sup>[17]</sup>. 雨水径流初期人工湿地的水力停留时间,即人工湿地有效容积与平均水量比值,计算公式为

$$t = V \times \epsilon / Q_{av}.$$

式中, $t$  为水力停留时间(d); $V$  为人工湿地质基在自然状态下的体积,包括基质实体及其开口、闭口孔隙( $m^3$ ); $\epsilon$  为孔隙率(%); $Q_{av}$  为平均水量( $m^3/d$ ).

#### 1.4.4 表面有机负荷

人工湿地的表面有机负荷是指每公顷人工湿地面积单位时间内负担的五日生化需氧量公斤数. 控制  $BOD_5$  负荷可以为反硝化提供碳源,因为碳源不足将会导致脱氮效率下降;同时还可以有效防止因有机物负荷过高而不利于微生物和植物的生长. 同时,有机负荷的控制对维持湿地系统好氧状态及防止蚊虫、恶臭等非常重要.

#### 1.4.5 植物的选取

在人工湿地技术的应用中,水生植物的选择使用是这一技术能否正常发挥污染治理效能的关键所在<sup>[8,9]</sup>. 降雨径流的随机性和突发性等特点也给人工湿地技术选择水生植物提出了特殊要求. 在雨水径流处理系统中,选择的水生植物应该能忍受较大范围内的水位、含盐量、温度和 pH 值,对污染物有较好的去除效果,有广泛用途或较高的经济价值<sup>[2]</sup>. 从很多研究试验结果和实际应用效果看,雨水初期径流污染人工湿地应用效果较好的水生植物有芦苇(*Phragmites communise*)、菖蒲(*Calamus Linn.*)、香蒲(*Typha Linn.*)和蘆草(*Scirpus acutus*)等,种植密度以 9~25 株/ $m^2$  为宜. 另外,植物根系在人工湿地中发挥着重要的作用,根系深度是湿地池型深度设计的一个重要参数.

#### 1.4.6 基质的选取

基质是指在人工湿地床体内用以提供人工湿地植物与微生物生长并对污染物起过滤、吸收作用的填充材料,有砾石、土壤和砂子等. 雨水径流湿地系统多采用砾石作为填料,由于砾石缺乏营养,需在上面覆盖 15~20 cm 的有机土壤. 选择合适的人工湿地质基,是构建人工湿地、提高人工湿地净化能力的关键措施.

## 2 人工湿地技术在国内外的研究

20 世纪 50 年代湿地开始被应用于污水净化<sup>[18]</sup>,而用人工湿地对污水净化的应用在 20

世纪 70 年代末开始受到关注<sup>[19]</sup>. 20 世纪 80 年代和 90 年代初,美国相继召开了多次关于人工湿地的研讨会,总结各国人工湿地污水处理的经验,提出相关的理论和参考设计参数. 这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. 特别是处理工业废水、城市生活污水、雨水径流和酸性矿坑水等. 其中加利福尼亚州的 Arcata 表面流人工湿地已运行近 20 年,成为美国最著名的雨水径流污染处理人工湿地.

在欧美等发达国家,人工湿地技术已经成为面源污染控制的实用技术. 其中,英国的可持续排水系统中,将人工湿地技术成功应用于住宅、商业区、工业区、公路和机场等地面雨水径流污染的治理;澳大利亚采用人工湿地技术取代传统的雨水调蓄池技术净化合流溢流污水,并积累了相关工程经验.

人工湿地技术在水环境污染治理中对氮磷具有良好的去除效果,尤其是在城市黑臭河道治理中发挥了重要的作用. 应用人工湿地除氮最主要的途径就是硝化和反硝化作用,其中溶解氧是限制硝化过程的主要因素<sup>[2]</sup>. James 等人采用人工湿地处理了 33 场暴雨径流,在第一年氨氮的去除效果要好于第二年. 研究认为,这是由于沉积物的积累,湿地中氧的含量降低造成的. 并且发现氮的去除主要发生在降雨之后,而不是降雨期间<sup>[4]</sup>. 德国利用水平流和垂直流湿地芦苇床系统处理富营养化水体中营养物质(N、P 等)并进行比较,结果表明,超过 90% 的有机污染和 N、P 等污染被去除<sup>[20]</sup>. 美国田纳西州人工湿地系统试验在不同水力负荷下对氨氮、总氮的去除规律,实验结果显示,二级系统氨氮去除率较一级系统高 20%~50%,周期性落干可提高氨氮的去除率,水力停留时间的增长可以改善总氮的去除效果<sup>[21]</sup>. Comin 等人采用恢复湿地处理农田径流,研究表明<sup>[15]</sup>,水生植物可积累氮约 20~100 mg/(m<sup>2</sup>·d),占进水可溶性无机氮的 66%~100%. 反硝化速率则偏低,最大占进水可溶性无机氮的 24%,植物的吸收成为除氮的主要方式<sup>[22]</sup>. 加拿大潜流芦苇床湿地系统在植物生长旺季中的 TN 平均去除率为 60%,TKN 为 53%,TP 为 73%,磷酸盐平均去除率为 94%<sup>[23]</sup>. 英国芦苇床垂直流中试系统用于处理高氨氮污水,平均去除率可达 93.4%<sup>[21]</sup>. 日本为渡良濑蓄水池修建的人工芦苇湿地不仅使得蓄水池水质得到明显改善,而且水体生物多样性也有所恢复<sup>[23]</sup>. 在使用表面流人工湿地处理 Quebec 农田径流污染时发现,砂质基质层比粘土质基质层对磷的吸收效果更为明显<sup>[24]</sup>.

### 3 雨水初期径流污染人工湿地技术在国内的研究现状

我国人工湿地技术始于“七五”期间,首例采用人工湿地处理污水的研究是 1988-1990 年在北京昌平进行的自由水面流人工湿地. 近 10 年来,人工湿地技术在我国被广泛应用于农业面源污染控制及生活污水、垃圾场渗滤液、采油废水、啤酒废水和制浆造纸废水等的处理. 尤其是近年来,城市化步伐的不断加大,城市河流黑臭现象日益突出,雨水初期径流污染成为重要的影响因子之一,人工湿地技术作为一种投资费用低、处理效果好的生态处理技术在用于处理雨水径流污染的研究亦日益增多.

杨敦等使用潜流式人工湿地在控制暴雨径流污染试验中得出,人工湿地系统对控制暴雨径流产生面源污染有较好的净化作用,设计的几种湿地系统对 COD<sub>Cr</sub>, TN, TP 的去除效率可达 90%,95%和 80%,其中菖蒲-沸石湿地系统具有最好的综合净化能力,平均去除率为 COD<sub>Cr</sub> 87.13%,TN 97.33%,TP 77.29%<sup>[25]</sup>. 同年,徐丽花等开展人工湿地处理雨水径流的模拟实验中,同样得出以沸石为填料的人工湿地基质比较适用于间歇性雨水径流污染

的控制,对径流中 COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TN 具有较高的去除率,分别为 80.3%, 99.5%, 96.7%, 95.4%<sup>[26]</sup>. 石文娟等采用潜流式人工湿地系统对桂林市桃花江上游流域降雨径流污染物进行处理,其中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN, TP 的去除效率可高达 90%, 92%, 90%, 98%, 得出潜流式人工湿地系统采用沸石作填料,能高效去除降雨径流中的  $\text{NH}_3\text{-N}$ , 与表面流人工湿地(FWS)相比,有较好的污染物去除效果<sup>[27]</sup>.

研究显示,在一些城市分散式小区设置人工湿地处理初期雨水径流时,选择自然流人工湿地较为客观,因生态小区雨水初期经沉淀后水质较好,一方面投资费用小,还可以增加小区绿化景观效应<sup>[28]</sup>. 肖海文等在处理生态住宅区雨水径流的人工湿地运行研究中认为,在恒定流量的运行条件下,设有调蓄构筑物的人工湿地系统对住宅区雨水径流有良好的净化效果,出水水质能达到《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T18921—2002)的要求<sup>[29]</sup>.

国内一些研究学者将塘/湿地作为一种组合技术对雨水径流污染进行处理,并取得了良好的效果. 塘-湿地组合系统对降雨径流中污染物的传输过程具有明显的空间调控作用和较高的持留效率,能够通过多种持留和净化机制,有效地降低暴雨径流中污染物的浓度,降低颗粒物的体积平均粒径,达到削减 TSS 的作用<sup>[30]</sup>. 江帆等结合人工湿地存在的问题和试验地的实际情况,设计了一套新型人工湿地——折流式人工湿地床与氧化塘组合,将其用于雨水径流的处理应用上,通过试验证明其用于处理雨水径流污染时具有良好的处理效果且运行效果稳定<sup>[31]</sup>. 张荣社采用沉淀池、自由表面湿地、沸石潜流湿地和稳定塘组合工艺系统在滇池东岸小河口村建立暴雨径流人工湿地工程,处理 3 种不同土地利用的暴雨径流. 工程运行结果显示,人工湿地系统能够有效控制暴雨径流中的氮和磷,达到 50% 去除率的设计要求;对 SS 的去除率在 80% 以上, COD 的去除率小于 30%. 这说明小河口暴雨径流控制示范工程能有效去除暴雨径流中的主要污染物,在控制暴雨径流及农业非点源污染方面切实可行. 同时也证明人工湿地系统对暴雨径流中的氮磷有良好的去除效率,且抗冲击负荷能力强<sup>[32]</sup>.

#### 4 研究展望

目前,人工湿地技术在雨水径流污染处理中发挥着重要作用,受到很多专家学者的关注和研究,但在实际工程应用中还存在着许多问题,值得深入研究.

(1) 加大雨水径流的水动力学模型研究. 在目前的国内外研究中,结合降雨径流特征(尤其是暴雨初期),湿地水动力学模型方面研究相对较少. 笔者认为,这方面的研究将更有利于研究污染物在湿地中迁移转化的机制.

(2) 加强人工湿地数据库的建设. 为减少重复劳动和改良经验人工湿地设计方法,建立和完善人工湿地数据库非常必要. 美国 EPA 已经开发和建设北美人工湿地数据库,但仍需要进一步工作,有必要更细致地研究不同地区特征和运行数据,以便在将来的建设中提供更合理的参数. 而在我国这项工作非常落后,今后进一步规范相关的人工湿地统计,建立健全的湿地数据库是环境和地学工作者的重任之一.

(3) 加大雨水初期径流污染人工湿地技术的推广应用研究. 两个方面值得研究,一是由于城市雨水是分散排入城市排水管网,集中排入河道的形式,因而如何有效收集雨水初期径流成为今后研究的重点和难点,也是技术推广应用的关键;二是雨水集中排放河道处一般埋设较深,往往较地面低 3~4 m,如何将这些位于地处的雨水进入湿地接受处理是一个难题.

## [参 考 文 献]

- [1] 蒋海涛,于丹丹,韩润平. 城市初期雨水径流治理现状及对策[J]. 水资源保护, 2009, 25(3): 33-36.  
JIANG H T, YU D D, HAN R P. Countermeasures and present conditions for managing urban initial rainwater runoff[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(3): 33-36.
- [2] 徐丽花,周琪. 暴雨径流人工湿地处理系统设计的几个问题[J]. 给水排水, 2001, 27(8): 32-34.  
XU L H, ZHOU Q. Several problems in artificial wetland system design for storm water runoff treatment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27(8): 32-34.
- [3] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 51-59.  
XIA H P. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed[J]. Wetlands: A Review, Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(4): 51-59.
- [4] CARLETON J N, GRIZZARD T J, GODREI A N, et al. Performance of a constructed wetlands in treating urban stormwater runoff [J]. Water Environment Research, 2000, 72 (3): 295-304.
- [5] HAMMER D. Constructed Wetlands for Waste Water Treatment[M]. Michigan: Lew is Publishers Inc., 1989: 5-20.
- [6] 加藤盛善. 河流与湖泊的直接净化原理及环境修复技术(概要)[J]. 贵州环保科技, 2004, (增刊): 17-19.  
JIATENG S S. Summary of direct purification theory and environment recovery technology of river and lake[J]. Guizhou Environmental Protection Science and Technology, 2004 (supp): 17-19
- [7] 邓辅唐,孙石,李强. 人工湿地技术处理河道污水[J]. 环境工程, 2006, 3(24): 90-93.  
DENG F T, SUN S, LI Q. Treatment of river sewage by technology of constructed wetland [J]. Environmental Engineering, 2006, 3(24): 90-93.
- [8] 于少鹏. 培育人工湿地净化污水研究——构建哈尔滨生态市的新举措[J]. 哈尔滨学院学报, 2003, 24(7): 54-59.  
YU S P. Building man-made wetlands to purify sewage—A new measure in making ecological city of Harbin [J]. Journal of Harbin Teachers College, 2003, 24(7): 54-59.
- [9] 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): 35-39.  
LIU Y Z. Process design of artificial wetland system water purification [J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27(8): 35-39.
- [10] COOPER P. A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment system[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(3): 1-9.
- [11] KIVAISSI A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing country: A review[J]. Ecological Engineering, 2001, 16: 545-560.
- [12] 张虎成,田卫,俞穆清. 人工湿地生态系统污水净化研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 2(5): 11-15.  
ZHANG H C, TIAN W, YU M Q. Study progress in constructed wetland ecosystems for sewage purification [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004, 2(5): 11-15.
- [13] 赵薇,张艳桥. 人工湿地在雨水处理与湖泊水质改善中的应用研究[J]. 环境保护科学, 2010, 36(1): 24-27.  
ZHAO W, ZHANG Y Q. Application study on constructed wetland in rainwater treatment and lake water quality improvement[J]. Environmental Protection Science, 2010, 36(1): 24-27.
- [14] 尹炜,李培军,叶闽,等. 塘-人工湿地生态系统处理城市地表径流的初期运行[J]. 环境工程, 2006, 24(3): 93-95.  
YIN W, LI P J, YE M, et al. Initial operation of treating urban surface runoff by pond-constructed wetland ecosystem[J]. Environmental Engineering, 2006, 24(3): 93-95.
- [15] COMIN F A, ROMERO J A, ASTORGA V, et al. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff [J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 255-261.
- [16] URBONAS B, STAHR P. Stormwater: Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage, and CSO Management[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [17] SHUTES R B, REVITT D M, LAGERBERG I M, et al. The design of vegetative constructed wetlands for the

- treatment of highway runoff [J]. *The Science of the Total Environment*, 1999, 235: 189-197.
- [18] VERHOEVENA J T A, MEULEMAN A F M. Wetlands for waste water treatment: Opportunities and limitations[J]. *Ecological Engineering*, 1999 (12): 5-12.
- [19] 杜中典. 污水人工湿地系统中有机物积累规律与堵塞机制的研究进展[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 474-476.  
DU Z D. Advance in regularity of organic matter accumulation and clogging mechanisms of constructed wetlands [J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5): 474-476.
- [20] VOLKER L, ELKE E, MARTINA L, et al. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 18: 157-171.
- [21] MICHAEL C K, DENNIS B G. Subsurface flow constructed wetlands treating municipal wastewater for nitrogen transformation and removal[J]. *Water Environment Research*, 1997, 69(12): 54-62.
- [22] GARBA L, JACQUE B, LINDA D, et al. Nitrogen and phosphorus removal in a subsurface-flow reed bed[J]. *Water Quality Research Journal of Canada*, 1998, 33(2): 319-329.
- [23] 田伟君, 王超, 李勇, 等. 城市污染水体强化净化技术研究进展[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(2): 136-139.  
TIAN W J, WANG C, LI Y, et al. Advances in intensified purification technology for urban polluted water bodies[J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 2004, 32(2): 136-139.
- [24] CHARLOTTE R Y, PRASHER S O. Phosphorus reduction from agricultural runoff in a pilot-scale surface-flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35: 1693-1701.
- [25] 杨敦, 徐丽花, 周琪. 潜流式人工湿地在暴雨径流污染控制中应用[J]. *环境保护*, 2002, 21(4): 334-336.  
YANG D, XU L H, ZHOU Q. Application of subsurface flow constructed wetlands in controlling storm runoff pollution[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(4): 334-336.
- [26] 徐丽花, 周琪. 人工湿地控制暴雨径流污染的实验研究[J]. *上海环境科学*, 2002, 21(5): 274-277.  
XU L H, ZHOU Q. Experimental study on artificial wetland for controlling stormwater runoff pollution[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2002, 21(5): 274-277.
- [27] 石文娟, 刘辉, 张学洪. 应用人工湿地控制降雨径流污染的实验研究[J]. *西南给排水*, 2007, 29(2): 20-23.  
SHI W J, LIU H, ZHANG X H. The application research on constructed wetland for rain runoff pollution control [J]. *Southwest Water & Wastewater*, 2007, 29(2): 20-23.
- [28] 刘瑞. 城市生态住宅小区分散式雨水人工湿地处理研究[J]. *湿地科学与管理*, 2008, 4(1): 25-27.  
LIU R. Creating artificial wetland in urban residences with rainwater[J]. *Wetland Science & Management*, 2008, 4(1): 25-27.
- [29] 肖海文, 翟俊, 邓荣森, 等. 处理生态住宅区雨水径流的人工湿地运行特性研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(11): 34-38.  
XIAO H W, ZHAI J, DENG R S, et al. Performance of constructed wetland for treatment of stormwater runoff in eco-residential area[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(11): 34-38.
- [30] 单保庆, 陈庆锋, 尹澄清. 塘-湿地组合系统对城市旅游区降雨径流污染的在线截控作用研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(7): 1068-1075.  
SHAN B Q, CHEN Q F, YIN C Q. On-line control of stormwater pollution by pond-wetlands composite system in urban tourist area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(7): 1068-1075.
- [31] 江帆, 张磊磊. 折流式人工湿地处理雨水径流的机理初步分析[J]. *山西建筑*, 2008, 34(6): 203-204.  
JIANG F, ZHANG L L. Mechanism of folds flow constructed wetlands in rain runoff treatment[J]. *Shanxi Architecture*, 2008, 34(6): 203-204.
- [32] 张荣社. 人工湿地暴雨径流氮磷污染控制[D]. 北京: 清华大学, 2003.  
ZHANG R S. The control of constructed wetland on the nitrogen and phosphorus in storm water runoff [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.