

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.01.010

苏州太仓市污水处理厂尾水排放河道的治理

赵联芳^{1,2}, 黄靖宇^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对污水处理厂尾水污染受纳河道河水的问题, 提出在不影响河道原有使用功能的前提下, 充分利用河道本身及其周边的条件净化污水处理厂排放的尾水, 并研究苏州太仓市双凤污水处理厂尾水排放河道治理示范工程的尾水深度净化效果。结果表明, 在河道的断头浜内布置水质强化净化系统, 能够有效地削减污水处理厂尾水中的污染物质, 对有机物、氮、磷的去除率均达到20%以上, 降低了污水处理厂对受纳河道河水的污染程度。

关键词: 污水处理厂尾水; 污水深度处理; 河道治理; 太仓市

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)01-0063-06

Renovation to effluent discharging river of sewage treatment plant in Taicang, Suzhou City

ZHAO Lianfang^{1,2}, HUANG Jingyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the problem of the pollution to effluent discharging river from sewage treatment plant, this paper proposed an idea that taking advantage of the conditions of river itself and surroundings of river to purify the effluent from sewage treatment plant without affecting the original functions of the river. And the purification effects of the demonstration project renovating on the effluent discharging river from sewage treatment plant in Taicang, Suzhou City was studied. The results show that the enhanced purification system set inside the river could further remove the pollutants from the effluent effectively, and the removal efficiency of organic matter, TN, TP were more than 20%, reducing the pollution of the sewage treatment plant on the receiving river.

Key words: effluent from sewage treatment plant; advanced sewage treatment; river renovation; Taicang City

目前,我国绝大多数污水处理厂采用的是二级生物处理工艺^[1],执行的是GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级B标准。自2007年5月太湖流域发生蓝藻暴发重大水污染事件以及引发无锡供水危机之后,环太湖流域城镇污水处理厂开始严格执行一级A标准,并推动了全国城镇污水处理厂一级A提标改造和扩建、新建工作^[2]。但是,即使污水处理厂排放的尾水达到一级A标准,尾水中的污染物浓度仍明显高于地表水环境质量标准。伴随着我国污水处理厂建设力度的加

大,尾水的排放量将会日益增大,更多的河流不可避免地成为接受尾水污染物的水体。如何治理遭受尾水污染的河流成为较为普遍的问题。

为了避免对地表水的污染,在污水处理厂内对尾水进行深度处理是最为理想的方法。在污水处理厂区内部构建污水深度处理^[3]设施,采用混凝、沉淀、过滤、消毒、活性炭吸附等物理、化学方法,对经过二级生物处理之后的尾水进行处理,在尾水进入河道之前进一步削减水中的污染物质。但是由于用地、投资和运行资金等因素的制约,现阶段我国大多

基金项目:国家自然科学基金(51209070);江苏省科技基础设施建设计划(BM2013013)

作者简介:赵联芳(1972—),女,副教授,博士,主要从事水体污染控制理论与技术研究。E-mail:lfzhao@hhu.edu.cn

数城镇污水处理厂选择在就近河道进行污水排放的情况非常普遍。因此,因地制宜、利用排放河道以及周边可利用的条件尽可能减少尾水的污染,是目前这一阶段减轻河道污染的可选择途径之一。

在不影响河道原有防洪、排涝、灌溉、航运及生态等功能的前提下,如何利用河道本身和周边的条件进行水质净化,是一个比较复杂的问题。一方面,不能将河道作为一个污水处理设施来看待,因为会影响河道原有的社会功能和生态服务功能;另一方面,不能无视被污染的河道丧失原有的社会功能、生态功能。如何巧妙利用原有条件,通过提高河道本身的净化能力,达到处理尾水、减少污染,又尽可能不影响河道原有功能,应该是治理尾水污染河道的要点。

经过近5年的运行,苏州太仓市双凤污水处理厂尾水排放河道治理工程发挥了较好的减污作用,并保持可持续运行。笔者以此为例探讨尾水污染河道治理的模式,旨在为尾水污染河道的治理提供借鉴。

1 尾水河道处理模式介绍

1.1 尾水河道旁侧生态处理系统

尾水河道旁侧生态处理,是一种尾水进入河道之前进行深度处理的模式,多采用生态生物处理技术,其主要特点是充分利用尾水排放河道周边的土地,构建人工湿地^[4]、生物接触氧化池^[5]、生物砾石床^[6]、土壤渗滤^[7]等处理系统,利用土壤或填料、植物和微生物的综合作用去除污水处理厂尾水中的污染物质,保护尾水接纳河道。由于这种尾水深度处理充分利用了当地的地形条件,因此往往能够减少投资、运行及维护费用,并且由于可以构建丰富的生态系统,因而具有良好的景观效果。

但是,由于尾水河道旁侧生态处理主要采用生态处理技术,较之污水处理厂内的物理化学处理技术,其除污能力较低,意味着处理同样的水量、水质需要更大的土地面积。因此,此种模式非常适合于污水处理厂与尾水接纳河道之间有足够的可利用土地,或接纳河道有较宽的河岸缓冲带。

1.2 尾水河道生态生物处理模式

尾水河道生态生物处理,主要是利用接纳河道的部分断面或部分河段作为处理系统,在未经深度处理的污水处理厂尾水直接排入河道时,利用河道条件进行污水处理^[8],但前提是不影响河道的原有功能。尾水河道生态生物处理采用的技术主要包括:生态浮床^[9]、生物塘^[10]、河道曝气^[11]、生态护坡^[12]、生物膜强化净化^[13]等单项技术或几种技术组合。采用此种深度处理模式需考虑尾水排放河道的等级、功能、断面特点等具体条件。实际上这些技

术措施都会对河道的功能产生影响,因此,必须分析对象河道原有的功能,才能确定哪些措施适合采用。一般来讲,过于人工化的措施要尽量避免。

2 太仓市尾水接纳河道概况

2.1 污水处理厂基本情况

苏州太仓市双凤污水处理厂位于苏州太仓市双凤镇,处理的污水类型主要为生活污水,采用的工艺为奥贝尔氧化沟,设计出水排放标准为1级B。2009年完成污水处理厂的升级改造,出水达到一级A排放标准。双凤污水处理厂的设计处理规模为:远期(2020年)处理规模为10000 t/d,近期(2010年)处理规模为5000 t/d,现状(2009年)污水处理量为1500~2000 t/d。

2.2 污水接纳河道基本情况

双凤污水处理厂外有一条村级河道,在污水处理厂处成为断头状态,是污水处理厂尾水排放河道,尾水排放口的位置详见图1。该村级河道在污水处理厂的河段不作为主要的排涝和泄洪通道,也没作通航的要求。该河道断面宽约20 m,水深约2 m,水流平缓。河道靠近污水处理厂的一岸为人工直立护岸,对岸为自然状况的自然岸坡,地形较为平缓。



图1 太仓双凤污水处理厂排放尾水河道

2.3 污水处理厂和尾水接纳河道的水质情况

表1是实测的双凤污水处理厂的出水及尾水接纳河道的水质情况。污水处理厂排放I级A标准的COD指标以 COD_{Cr} 计,地表水IV类标准、双凤污水处理厂尾水和接纳河水的COD指标以 COD_{Mn} 计。

表1 污水处理厂达标出水、地表水标准及

类别	现场监测水质指标对比					mg/L
	$\rho(COD)$	$\rho(BOD_5)$	$\rho(TN)$	$\rho(NO_3-N)$	$\rho(NH_3-N)$	
污水处理厂排放I级A标准	50.00	10	15.00		8.0	1.50
地表水IV类标准	≤ 10.00	6	1.50		1.5	0.30
双凤污水处理厂尾水 ^①	10.10		13.17	8.08	1.13	0.24
接纳河水 ^②	2.25		8.00	3.14	1.32	0.19

注:①为2009年7月13日现场取样测定的污水处理厂尾水水质指标;②为同时测定的双凤尾水河道的水质指标。

由表 1 可以明显看出:双凤污水处理厂尾水水质已经达到污水处理厂排放标准 I 级 A 要求,但超过地表水 IV 类水标准,尤其 TN 超标严重。尾水的水质特点为典型的低碳高氮污水,这意味着所选用的水质强化净化处理技术应具有较强的脱氮效率。

3 尾水河道处理技术示范工程设计

根据太仓市双凤污水处理厂尾水类型、污染物特征、尾水的入河方式及排放河道的水文、水质、地形、河道断面等实际情况,进行双凤污水处理厂尾水河道处理技术示范工程设计,以进一步削减双凤污水处理厂尾水中的污染负荷,改善尾水受纳河道的水质。

3.1 方案布置

方案主要包括两部分内容:污水处理厂尾水的水质强化净化系统工程和河道的生态净化系统工程。

3.1.1 水质强化净化区

由于污水处理厂处的河段没有具体的使用功能要求,因此可充分利用此断头浜实施污水处理厂尾水的强化净化工程,进一步削减尾水中的污染物。水质强化净化区采用的主要技术包括:“太阳能曝气+生物接触氧化+浮床”系统、湿地塘系统和生态护坡技术。

利用管道将污水处理厂的尾水引入断头浜的尽头,尾水依次流经“太阳能曝气+生物接触氧化+浮床”系统、湿地塘系统,然后从人工坝顶溢流进入受纳河道。

3.1.2 河道生态净化区

对尾水受纳河道的生态修复主要包括对直立护岸的生态修复及对原有天然湿地的修复,目的是改善尾水受纳河道水质状况,恢复河道生态功能。

方案布置详见图 2。

3.2 设计内容

3.2.1 水质强化净化区

虽然目前双凤污水处理厂尾水排放水质优于 I 级 A 标准,但为安全考虑,水质强化净化区系统的设计进水水质按 I 级 A 标准设计,出水水质按地表水 IV 类水水质标准设计。另外,尽管污水处理厂的现状污水处理量仅有 1500 t/d,但从安全角度考虑,净化系统的处理规模水量按 5000 t/d(近期设计污水处理量)设计。

a. 太阳能曝气系统。曝气系统主要提供生化反应过程中微生物所需的氧气,供氧的强度及均匀性对微生物净化污染物的效果有非常明显的影响。本设计采用美国先进的 SolarBee 水循环增氧系统,将该系统安装于断头浜适宜位置。其工作原理为:

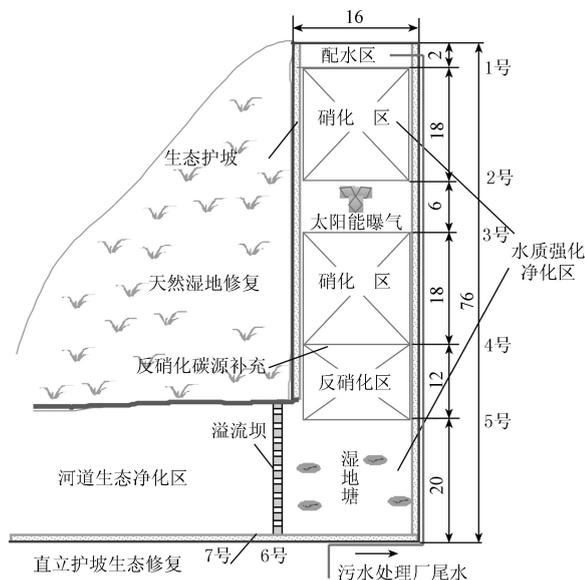


图 2 双凤污水处理厂尾水河道治理工程方案布置(单位:m)

系统通过太阳能光电板将太阳能转化为电能,驱动泵工作,把水体深处含氧量较低的水通过软管抽取到上部,并通过分水盘以一种近层流的方式重新分布,在水表面进行复氧,同时产生纵向的高速流,搅动整个水体,使表面水体和下层水体不断更新交换、复氧,从而整个水体得以均匀混合。

b. 生物接触氧化系统。为了保证尾水净化效果,借鉴污水生物膜处理工艺中净化效果较为稳定、应用较成熟的生物接触氧化法,将生物接触氧化法作为工艺主体。污染物去除的主要目标为有机物和 TN,将生物膜区域分为硝化区和反硝化区。

在本设计中,生物接触氧化法的池容采用“氨氮负荷(N_f)”进行设计,设计中取氨氮负荷 N_f 为 $0.05 \text{ kg}/(\text{m}^3/\text{d})$,计算得到所需硝化区长度为 24 m。考虑到远期规划,并结合断头浜尺寸,取硝化区长度为 36 m。反硝化区长度按硝化区的 1/3 计算,则长度为 12 m。工程采用的填料为高效立体弹性纤维填料。

污水处理厂尾水是一种典型的低碳高氮污水,为了提高 TN 的去除效率,需补充反硝化碳源。根据笔者课题组的研究成果,芦苇秆的分解能释放出大量的有机物,可显著提高脱氮效率。而且芦苇是岸边天然湿地中的主要物种,来源有保证,因此,本设计中采用芦苇秆作为有机碳源,添加量为 100 kg。将芦苇以帘状形式布置在从硝化区进入反硝化区的过水断面。

c. 湿地塘。湿地塘所占水面面积大约为 300 m^2 。在湿地塘种植睡莲等浮叶植物,利用植物和微生物的作用去除水中的污染物,还可增加湿地塘景观生

态效果。

d. 浮床。按照一定的间隔,将浮床布置在生物接触氧化池水面以上 0.5 m 水深的位置。这一方面通过植物根系和填料生物膜上的微生物作用对污染物进行降解,吸收水中 N、P,发挥浮床净化水质的作用,另一方面浮床上的水生植物也会产生一定的景观效果。

e. 生态护坡。水质强化净化区所在河段的河岸为土壤基质,河岸上长满杂草和灌木。对河岸进行修整后,种植菖蒲、香蒲等当地水生植物。这些植物的主要作用是拦截面源污染,并改善河道的自然状态。

3.2.2 河道生态净化区(未建)

尾水接纳河道靠近污水处理厂的一侧为直立型混凝土护岸。原有的河道断面非常狭窄,不适宜采取在河道中构筑边坡的修复方式。另外,如果拆除现有的直立护岸,要花费高额的人力、物力和财力。基于此,笔者设计了 3 种原位生态修复的示范工程方案:第一种是沉床式生态修复方式,即在水下打桩,在桩上安装沉床。可以从河岸向河中心将桩设计成一定的高度梯度,筛选不同类型的水生植物,从而,形成不同层次的景观效果。第二种是浮床式生态修复方式,即在距离直立护岸 150 cm 地方的河底安装光滑的套管,套管上套浮床。由于河道水位有一定的波动性,浮床可以随水面上下浮动,因此产生一定的河道生态景观效果。第三种也是浮床方式,但是浮床依靠锚或大石来固定。

尾水接纳河道的另一侧为以芦苇为主的天然湿地。原有天然湿地的植物生长状况良好,但植物种类单一,且其中一些灌木产生杂乱无章的景观效果。对此块天然湿地,仅需进行简单修整,去除一些杂乱灌木,并补栽一些其他水生植物,以改善天然湿地生态系统植物的多样性。

但是,由于种种原因,示范工程中“河道生态净化区”并未建设。

4 工程实施效果

太仓市双凤污水处理厂水质强化净化系统工程于 2009 年 12 月 18 日开始动工,至 2010 年 3 月 20 日完成生物接触氧化系统工程的建设及太阳能曝气系统的安装调试,2010 年 4 月 10 日完成生态护坡、湿地塘及浮床工程的建设,工程竣工。

4.1 竣工初期的工程效果

工程竣工将近 2 个月后,笔者于 2010 年 5 月 20 日对污水处理厂尾水水质强化净化系统中的水质进行检测,采样点位置详见图 2,其中,1 号为系统的进

水(污水处理厂尾水);2 号为硝化 I 区出水;3 号为太阳能曝气系统出水;4 号为硝化 II 区出水;5 号为反硝化区出水;6 号为湿地塘出水;7 号为尾水接纳河道。检测指标包括 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP、COD_{Mn},测定方法参照《水和废水检测分析方法》^[14]。

图 3 为尾水中各污染物质量浓度的沿程变化情况。从图 3 中可以看出,太仓市双凤污水处理厂水质强化净化系统对 N 有一定的去除效率,对 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 的去除率分别达到 26.2%、25.6%、18.8%。TN 和 NO₃⁻-N 的质量浓度有沿程逐渐降低的趋势。NH₄⁺-N 质量浓度在 2 号采样点处有一个突然降低的情况。分析认为,可能是由于该采样点非常接近太阳能曝气系统,促进了 NH₄⁺-N 的硝化作用。水质强化净化系统对 COD_{Mn} 和 TP 的去除效率为 18.9% 和 46%,COD_{Mn} 和 TP 质量浓度沿程变化趋势并不明显。

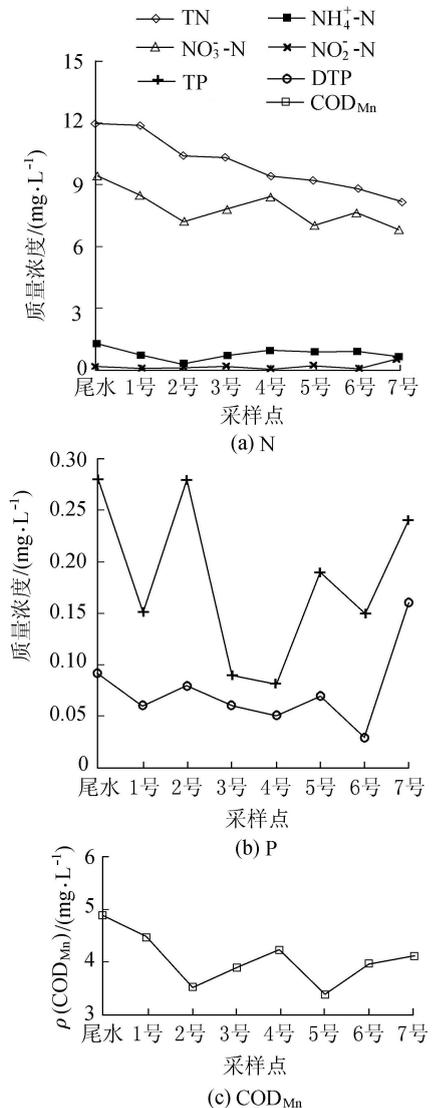


图 3 水质强化净化系统沿程净化效果

总体而言,水质强化净化系统对污水处理厂尾水水质有一定的净化效果,能够有效地削减部分污染物质。但系统出水尚未达到地表水环境质量的Ⅳ类水标准。分析其主要原因,主要是由于运行初期生物接触氧化区的填料上没有形成成熟的微生物系统:一方面,工程统竣工后的2个月时间里,气温较低,不利于微生物生长繁殖;另一方面,由于污水处理厂尾水水质达到Ⅰ级A标准,水中的污染物质浓度较低,也不利于微生物挂膜。

4.2 工程的长效运行效果

2014年10月27日,笔者在工程运行4年多后对工程运行效果进行了回访。

图4为水质强化净化系统所在河浜的现状照片。通过回访发现,太阳能曝气系统已经发生故障,停止运行将近2年;生物接触氧化系统的填料上附着了一层厚厚的褐色刚毛藻;湿地塘中零星漂浮几处睡莲;河两岸的美人蕉及香蒲等大型水生植物生长茂盛,但比较杂乱;水面上没有看到浮床,据说因无人管理维护,浮床在几次大风后被吹得东倒西歪,所以被移除出河道。



图4 太仓双凤污水处理厂排放尾水河道
(2014-10-27 现状)

对水质强化净化系统沿程取水样(取样位置同图2)进行水质检测,测定指标包括TN、TP、COD,测定方法参照《水和废水检测分析方法》^[14]。各水质指标的沿程去除规律性不显著,但是整个水质强化净化系统表现出一定的净化效果。对2号~6号采样点的数据取平均值,并与污水处理厂尾水水质进行比较,可以发现,COD、TN和TP的平均去除率分别达到37.1%、27.0%和10.3%,系统出水的COD、TN和TP平均质量浓度分别为13.30 mg/L、1.10 mg/L和0.05 mg/L,各指标均稳定达到地表水环境质量的Ⅳ类水标准(表2)。现场也观察到水质清澈,可以清晰地看到水面下生物接触氧化系统的填料,并能够看到鱼在填料的间隙中游动。

5 结语

本研究根据污水处理厂尾水排放河道的具体条

表2 水质强化净化系统净化效果

指标	污水处理厂排放 尾水质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	强化净化系统 出水质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	净化 效率/%
COD	21.00	13.30	37.1
TN	1.50	1.10	27.0
TP	0.06	0.05	10.3

件,充分利用该河道尽头的断头浜这一有利地形,布置水质强化净化系统,有效地削减了污水处理厂尾水中的污染物质,降低了对尾水接纳河道水质的污染程度。笔者对工程的实施效果及运行过程中取得的经验及存在的问题进行总结和分析,以便为其他工程提供参考。

a. 在进行污水处理厂尾水深度处理的方案设计阶段,不要仅仅局限于污水处理厂内部各项深度处理技术的优化比选,还需要充分调研尾水排放河道及其周边的具体条件,看是否有充分的地形条件、河道断面可以利用。这对有尾水深度处理和污水处理设施升级改造要求但占地面积严重不足的污水处理厂而言尤为重要。

b. 在利用河道进行污水处理厂尾水深度处理设计时,应以不影响河道的原有使用功能为前提,充分考虑河道的防洪、排涝、灌溉、航运及生态等功能的要求,尽量利用没有上述功能要求的部分河段,充分利用河道附近废弃的河浜、水塘等。

c. 一定要重视尾水排放河道治理工程后续的维护管理工作,以保证工程的长效持续性运行。虽然通常情况下,尾水河道治理模式的运行管理较为简单,但仍然需要安排专人负责管理。如果本工程中对太阳能曝气系统的日常巡查工作正常进行,则有助于及时发现问题。生态护坡、湿地塘及浮床等的植物的收割和维护也需要定期进行。对于尾水接纳河道距离污水处理厂较近的工程,可以与污水处理厂进行协商,派专人负责管理;对于接纳河道距离污水处理厂较远的工程,可以与当地的河道管理站进行协商,派专人负责管理。

致谢:衷心感谢太仓市水利局曹炳华副局长及其他工作人员对现场工作的支持,并感谢朱伟教授对本工程设计的指导及在论文撰写过程中的悉心指点,同时感谢课题组高玉春、胡婧、陈怀民等同学帮助进行现场采样及水样测试。

参考文献:

[1] 殷小伟,强志民,贲伟伟,等. 污水处理厂不同生物处理工艺对抗生素的去除效果[J]. 中国给水排水,2012,28(22): 22-26. (YIN Xiaowei, QIANG Zhimin, BEN Weiwei, et al. Removal of antibiotics by different biological

- processes in municipal sewage treatment plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28 (22): 22-26. (in Chinese))
- [2] 陆桂华,张建华. 太湖水环境综合治理的现状问题及对策[J]. *水资源保护*, 2014, 30(2): 67-70. (LU Guihua, ZHANG Jianhua. Present status and problems of comprehensive treatment of water environment in Taihu Lake and countermeasures [J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(2): 67-70. (in Chinese))
- [3] 殷玉蓉. 混凝沉淀+砂滤/活性炭工艺深度处理污水处理厂尾水研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2014.
- [4] 吴海明,王跃昌,袁佐栋,等. 东汶河人工湿地污水处理厂尾水深度处理工程设计[C]//第六届中国城镇水务发展国际研讨会论文集. 北京: 中华人民住房和城乡建设部, 2011: 124-127.
- [5] 盛铭军,王秀英. 生物接触氧化+沸石生物滤池工艺深度处理城市污水处理厂出水[J]. *工业用水与废水*, 2006, 37(5): 31-33. (SHENG Mingjun, WANG Xiuying. Deeply treatment of effluent water from urban wastewater treatment plant by biocontact oxidation-zeolite biological filter combined process [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2006, 37(5): 31-33. (in Chinese))
- [6] JINWOO J, TAIRA H, HIROSHI T, et al. Development of biological filter as tertiary treatment for effective nitrogen removal: biological filter for tertiary treatment[J]. *Water Research*, 2006, 40(6): 1127-1136.
- [7] 金亚若,万红友. 浅析土壤渗滤技术在再生水处理中的应用[J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(6): 72-77. (JIN Yaru, WAN Hongyou. An analysis of soil infiltration technology in the reclaimed water treatment [J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(6): 72-77. (in Chinese))
- [8] 唐运平,张志扬,邓小文. 利用城市生态河道深度净化污水处理厂出水的工程技术研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(7): 1165-1169. (TANG Yunping, ZHANG Zhiyang, DENG Xiaowen, et al. Tertiary treatment of secondarily-treated WWTP effluent by ecological river [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(7): 1165-1169. (in Chinese))
- [9] SUN Lianpeng, LIU Yang, JIN Hui. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(3): 135-140.
- [10] 王珺. 组合稳定塘系统对污水处理厂 CAST 工艺出水深度处理试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- [11] EMRE A, MELCHING C S. Allocation of supplementary aeration stations in the Chicago waterway system for dissolved oxygen improvement [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1577-1583.
- [12] 聂青,孙丽娜,崔广柏. 生态护坡技术在城市河道整治中的应用[C]//中国河道治理与生态修复技术专刊. 北京:中国水利技术信息中心, 2010: 7-11.
- [13] SHENG Yanqing, QU Yingxuan, DING Chaofeng, et al. A combined application of different engineering and biological techniques to remediate a heavily polluted river [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 1-7.
- [14] 国家环保局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

(收稿日期:2014-10-31 编辑:彭桃英)

(上接第 62 页)

- [13] 刘青松,张春雷,汪顺才,等. 淤泥堆场人工硬壳层地基极限承载力室内模拟研究[J]. *岩土力学*, 2008(增刊 1): 667-670. (LIU Qingsong, ZHANG Chunlei, WANG Shuncai, et al. Laboratory simulation study of the ultimate bearing capacity of the manmade crust over dredged wastes dump sites [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008 (S1): 667-670. (in Chinese))
- [14] 邓东升,洪振舜,刘传俊,等. 低浓度疏浚淤泥透气真空泥水分离模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(2): 250-253. (DENG Dongsheng, HONG Zhenshun, LIU Chuanjun, et al. Large-scale model tests on dewater of dredged clay by use of ventilating vacuum method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(2): 250-253. (in Chinese))
- [15] SHANG J Q, TANG M, MIAO Z. Vacuum and preloading consolidation of reclaimed land: a case study [J]. *Can Geotech*, 1998, 35(5): 740-749.
- [16] HAMER K, KARIUS V. Brick production with dredged harbour sediments; an industrial-scale experiment [J]. *Waste Management*, 2002, 22(5): 521-530.
- [17] 王中平,徐基璇. 利用苏州河底泥制备陶粒[J]. *建筑材料学报*, 1999, 2(2): 176-181. (WANG Zhongping, XU Jixuan. Manufacture of ceramsite by using Suzhou River sediment [J]. *Journal of Building Materials*, 1999, 2(2): 176-181. (in Chinese))
- [18] 赵晓维. 北京城市河湖环保清淤新技术[J]. *北京水利*, 2000(1): 19-20, 31. (ZHAO Xiaowei. Environmental dredging technology in Beijing urban rivers and lakes [J]. *Beijing Water Resources*, 2000 (1): 19-20, 31. (in Chinese))
- [19] 彭劫. 真空堆载联合预压法加固机理与计算理论研究 [D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [20] 周源,高玉峰,陶辉,等. 透气真空快速泥水分离技术对淤泥水分的促排作用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010(增刊 1): 3064-3070. (ZHOU Yuan, GAO Yufeng, TAO Hui, et al. Drainage-promotion effect of aeration vacuum rapid mud-water separating technique on dredged sludge [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010(S1): 3064-3070.

(收稿日期:2014-12-10 编辑:高渭文)