

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2012.04.011

河流滨岸带坡面对降雨径流的污染削减效应

——以上海市樱桃河为例

张 舟¹, 邹家唱², 朱 韬¹, 于佳欣¹, 蔡晨冰¹, 徐 迅¹

(1. 华东师范大学环境科学系, 上海 200241; 2. 中山大学环境工程系, 广东 广州 510006)

摘要: 选取上海市闵行区樱桃河畔具代表性的滨岸带地域, 在模拟降雨过程中, 设置不同坡度, 不同坡长及植被条件下的对比实验。得出最优方案: 坡度约为 $8^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$, 被冬青覆盖的河滨带在宽度为 4~5 m 时, 对降雨径流的污染削减效果最佳。此时模拟地表径流平均入水质状况为, 进水水质: $\rho(\text{COD}) = 154.7 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 0.55 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 1.19 \text{ mg/L}$, 出水水质: $\rho(\text{COD}) = 77.38 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 0.29 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 0.69 \text{ mg/L}$; 削减率分别为 49.98%, 47.27%, 41.61%。试验结果为提高城市绿地规划与建设的合理性以及城市降雨径流非点源污染的控制提供参考。

关键词: 河流滨岸带; 降雨径流; 污染削减; 樱桃河; 上海市

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2012)04-0050-04

River bank slope's contribution to pollution reduction of rainfall runoff: A case study of Yingtiao River, Shanghai

ZHANG Zhou¹, ZOU Jia-chang², ZHU Tao¹, YU Jia-xin¹, CAI Chen-bing¹, XU Xun¹

(1. Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Contrast experiments were conducted of different gradients, grade lengths, and vegetation covers during a simulated rainfall process on the bank of the Yingtiao River, a typical river bank area, in the Minhang District of Shanghai. The results show that a river bank that has a gradient of $8^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ and is covered by Chinese ilex with a grade length of four to five meters has an optimal pollution reduction effect. Meanwhile, the average quality of input water is 154.7 mg/L for COD, 0.55 mg/L for TP, and 1.19 mg/L for $\text{NH}_3\text{-N}$; and the quality of exported water is 77.38 mg/L for COD, 0.29 mg/L for TP, and 0.69 mg/L for $\text{NH}_3\text{-N}$. The reduction rates of COD, TP, and $\text{NH}_3\text{-N}$ are 49.98%, 47.27%, and 41.61%, respectively. This study provides references for rational design and construction of urban public green lands and non-point pollution control of urban rainfall runoff.

Key words: river bank; rainfall runoff; pollution reduction; Yingtiao River; Shanghai

城市河流受纳的污染分为点源污染、面源污染。近年来各地已对点源污染开发出较成熟的处理技术和排放制度, 而对面源污染的控制仍存在较大缺失, 其中城市降雨径流已成为城市地表水环境的第三大污染源^[1]。与此同时, 利用人工湿地系统、快速渗滤系统以及土壤含水层处理系统等各种处理方式进行

削减城市降雨径流污染的研究受到广泛关注^[2]。

国外自 20 世纪 70 年代起已开始利用各类型的绿地来蓄渗地表径流和削减径流污染, 其中最具代表性的是美国提出的最佳管理措施(BMPs)^[3], 而国内对天然绿地削减径流污染的研究起步相对较晚, 且已有研究多为室内模拟实验。针对以上问题, 笔者以上

基金项目: 上海市华东师范大学大夏科研基金项目(2011 DX-183)

作者简介: 张舟(1990—), 女, 本科生, 专业为城市水资源与水环境管理。电子邮箱: wodezhongguoxin2@163.com

海市樱桃河为例,探究城市中的天然绿地对降雨径流的污染削减效果并提出较优设计方案。不同坡度、植被植物种类的下凹式绿地对城市不同功能区降雨径流污染的削减研究还有待进一步研究^[4]。

1 实验设计与数据采集

1.1 樱桃河基本水环境指标

樱桃河为苏州河末端支流,河宽约为 19.2 m,水深约 2 m。秋冬季节樱桃河基本水质状况为: $\rho(\text{NH}_3\text{N}) = 1.02\text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 0.32\text{ mg/L}$, $\rho(\text{COD}) = 78.38\text{ mg/L}$, pH 值为 7.50, 电导率为 0.73。其中 COD 污染较严重,水质整体评价为劣 Ⅲ 类。

1.2 方案设计

有关降雨污染的研究多集中于夏秋季节,为弥补研究资料缺失,实验选择秋冬季节。该季节气候相对干燥,降雨不易形成径流。经实验检测对比,雨水自身污染物含量不及地表径流污染物含量的 1/20,为保证实验数量和质量,采用人工模拟方式进行。

1.2.1 模拟降雨径流

采用自来水冲刷路面的方式模拟降雨径流,并采集水样,作为流经河流滨岸带的初始水质状况。

1.2.2 实验样地选取

樱桃河的河流滨岸带平均带宽约为 5.5 m,东岸被低矮的林丛覆盖,坡度较陡,约 $55^\circ \sim 60^\circ$;西岸整体较为平坦,但坡度不均,缓坡约为 8° ,陡坡约为 29° 。植被群落结构包括灌木层、草本层,其中灌木层主要植物为法国冬青、六月雪,草本层主要植物为狗牙根、沿阶草。土壤质地较为均一,综合评价为壤土。

河东岸坡度较陡且多被林丛覆盖,不利于开展实地研究;故选取河流西岸两处不同坡度、不同植被的样地进行研究。

1.2.3 对比实验设置

为探究河流滨岸带的坡面设计对降雨径流的污染削减效果及其影响因素,设置 3 组对比: ① 不同坡度。选取 1 处约 8° 的缓坡,记为 A 坡;另 1 处约为 29° 的较陡坡,记为 B 坡。两处均为 $3\text{ m} \times 1\text{ m}$ 矩形样地。② 不同坡长。选取 1 处 $5\text{ m} \times 1\text{ m}$ 矩形试验样地,分别在坡长 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m 处设置出水采集口采样。③ 不同植被。分别取相同坡度、不同植被的两处 $3\text{ m} \times 1\text{ m}$ 矩形样地,在坡长为 3 m 处设置出水采集口采集水样。

1.3 水质指标测定

对收集的水样进行 pH 值,电导率, COD, TP, NH_3N 5 项指标检测。根据太湖水域的总体监测报告,包括苏州河在内的上海市内河流富营养化严重,

而樱桃河作为苏州河的支流,需对富营养污染源进行严格控制,因此将 NH_3N 、TP 被确定为检测指标;参见 2009 年度中国环境状况公报,全国酸雨分布区域主要集中在长江以南-青藏高原以东地区,故将 pH 值列入检测指标;根据对实验河流的水质监测,发现其 COD 污染较严重,因此将 COD 列为必测项目;而电导率是用来测量水质的导电性能和矿化程度,反映降雨径流对河水自由离子浓度和矿化程度的影响,故也将其列入检测指标。具体检测方法见表 1。

表 1 目标检测的各项水质指标及其测定方法

水质指标	测定方法和仪器
pH 值	pH/mV/ thermometer, IQ Scientific Instruments Inc.
电导率	电导仪, ECTest™ TM 10 High+, Spectrum [®] Technologies Inc.
COD	快速消解分光光度法(HJ/T 399-2007), DBR200 型数字式反应器(Hach Company)
TP	GB 11893-89《钼酸铵分光光度法》
NH_3N	HJ 535-2009《纳氏试剂分光光度法》

2 实验结果与讨论

2.1 坡度对污染物削减效应的影响

取矩形样地最高边的中点作为入水口,分别引导模拟降雨径流流经 A, B 样地,在坡长 2 m 处设置出水采集口进行采样。实验共进行 8 次冲刷,每次持续 10 min,每隔 2 min 取样 1 次。对样品进行水质指标测定,得到结果见图 1。

因各水样 pH、电导率均变化微小,且与受纳水体情况相当,故该两项指标影响可忽略。经计算得到, NH_3N 削减率: A 坡为 65.07%, B 坡仅为 11.47%; TP 削减率: A 坡为 61.43%, B 坡为 36.57%; COD 削减率: A 坡为 10.74%, B 坡仅为 3.3%。综上可知,较为平缓的 A 坡效果更好。分析如下: ① 模拟降雨径流主要受重力作用流经滨岸带,坡度越陡,相对应的水力停留时间越短,植物吸收以及土壤基质吸附污染物的时间也较短; ② 陡坡上水流的重力分量较大,增加了植物拦截污染物的压力负荷,使得水流中的污染物质不易被拦截吸附,更可能因水流冲刷导致轻微的水土流失,使土壤中的污染物进入径流而加剧其污染程度。

2.2 带宽对污染物削减效应的影响

取样地最高边的中点作为入水口,在不同坡长处(1、2、3、4、5 m)进行采样,每 1 m 处作 4 组实验,分别收集进水与出水。

以坡长 1 m 处为例: 0 min 时的 NH_3N 浓度即为模拟降雨径流的初始质量浓度,其后每隔 3 min 采集水样 1 次,测量 NH_3N 质量浓度(表 2)。

◆ A坡 ■ B坡 — 线性(A坡) ---- 线性(B坡)

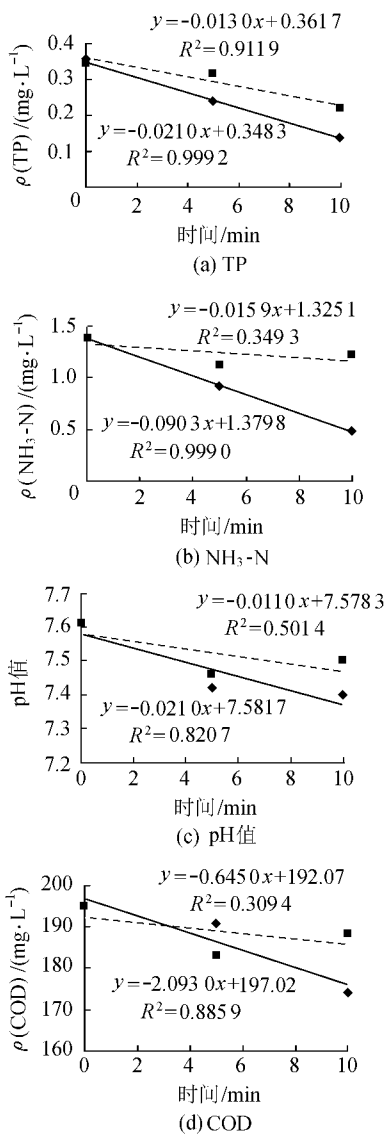


图1 不同坡度河滨带的污染物质量浓度随时间变化

表2 坡长1 m 处的 NH₃-N 质量浓度

实验组别	$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			
	0 min	3 min	6 min	9 min
1	0.96	0.56	0.70	0.46
2	0.74	0.70	0.52	0.48
3	0.54	0.42	0.50	0.48
4	1.10	0.56	1.50	1.78

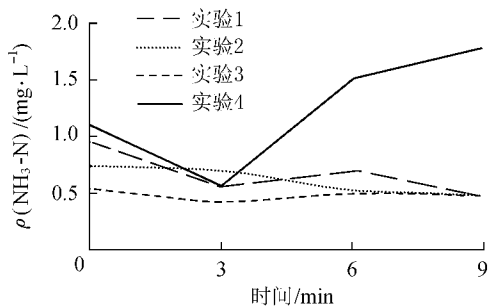


图2 坡长1 m 处 NH₃-N 的质量浓度

第4组数据明显偏离其他3条线的一般趋势,因此将其作为明显误差线剔除。分析可能其原因为人为误差:倾倒模拟雨水时不均匀或速度过快,造成流经样地的水流量瞬间增大,水流速度加快,相当于降雨强度较大的情况。较强水流将土壤中的污染物冲刷出来,造成后续采样浓度反而偏大的情况出现。

对其他3组求平均值,得到其 NH₃-N 削减率为 26.61%。同理,算得 1 m 处 TP 和 COD 削减率分别为 13.52% 与 2.39%。其他坡长实验结果见图 3。

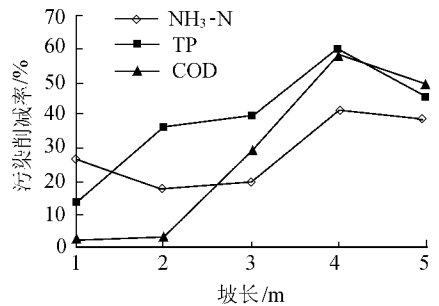


图3 各项水质指标在不同坡长处削减率

通过比较发现,当坡长为 4~ 5 m 时河流滨岸带对降雨径流中污染物的削减效果最佳。此时坡度为 8°, 坡长约为 4~ 4.9 m。

2.3 植被对污染物削减效应的影响

实验选取覆盖度约为 90% 的草地与冬青地分别进行模拟实验。草地代表植株矮小、根系不发达的草本植物;而冬青代表根系发达、机械组织强、植株紧密的蕨类和草本植物。取矩形样地最高边中点作为入水口,在坡长均为 3 m 处设置采样点,每隔 3 min 采样 1 次,共进行 6 组实验。求出两地的平均削减效果,得不同植被对污染物的削减效果见图 4。

如图 4 所示,冬青地比草地的污染削减效果更好。相同条件下,冬青地的 NH₃-N 削减率为 38.90%,草地只有 13.94%;冬青地的 COD 削减率为 36.31%,草地为 29.91%;冬青地的 TP 削减率为 63.16%,而草地只有 36.97%。

分析如下:乔灌木冬青根系较为发达,对水分和有机物质的吸收能力更强,可增强其对污染物的吸附作用;且植株紧密,机械支撑系统比草本植物更坚固,增加其抗冲击压力负荷以有效应对强降雨径流,利于对污染物的拦截作用;此外因其根系对土壤的固着更加紧密,可有效减缓径流冲刷的水土流失,减少土壤中的污染物的淋溶,优化净化效果^[5]。pH 值与电导率相对变化很小,影响可忽略。

2.4 讨论

通过本次实验,证实了河流滨岸带对污染程度较轻的降雨径流削减效果显著。任玉芬等^[6]对屋面、路面、草坪的径流水质进行了监测,比较分析发

◆ 冬青地 ■ 草地 --- 线性(冬青地) — 线性(草地)

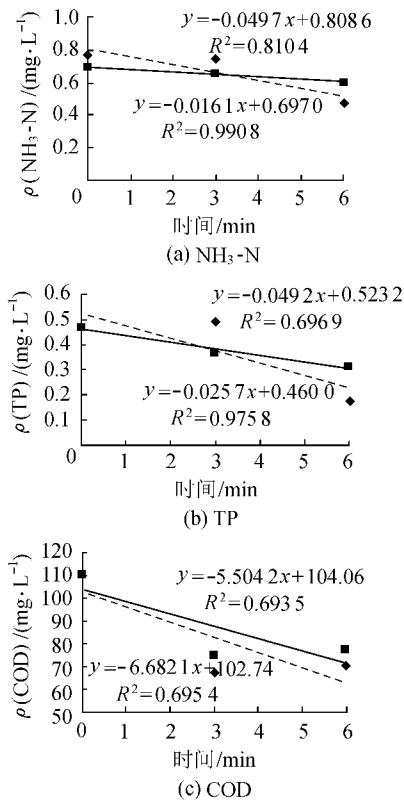


图4 不同植被河滨带对降雨径流的污染削减效果

现,3种下垫面类型的径流水质均较差,COD、TN、TP、 BOD_5 平均质量浓度超过地表水环境质量Ⅲ类标准。这与本实验中人工模拟降雨径流的污染物浓度相符合^[7]。

同时从实验数据也可得知:在不同坡度,不同坡长及植被条件下,不同污染物的削减效果差异较大。究其原因,不同污染物随水流流经河流滨岸带时,具有不同的削减方式:COD、TP的削减主要依靠土壤覆被植物吸收利用、土壤基质吸附及土壤微生物分解利用; $\text{NH}_3\text{-N}$ 的削减途径包括土壤基质吸附、基质及覆被植物的过滤、沉淀以及挥发,覆被植物吸收和土壤基质中微生物引起的硝化、反硝化作用。这些削减方式都与土壤理化性质及覆被植物特性有极大关系^[8-10],削减效果都直接受到坡度、坡长及覆被植物的影响。

除上文所述,河流滨岸带对实际降雨径流中污染物削减效应的影响因素还有降雨量、降雨强度、降雨时间等,这些因素可引起降雨径流在河流滨岸带的水力停留时间及所含污染物浓度的变化。其中降雨量和降雨强度是两个重要因素,强度越大,雨水对城市下垫面的冲刷就越强;在相同污染物累积的条件下,降雨量越大,径流中污染物浓度越低。因此在河滨带的建筑参数设计时,还应考虑到当地的降雨周期及降雨强度等客观因素。

3 结论

a. 在模拟地表降雨径流为中低污染物浓度负荷 $\rho(\text{COD}) = 40.0 \sim 154.0 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 4.0 \sim 13.9 \text{ mg/L}$; $\rho(\text{TP}) = 0.5 \sim 2.9 \text{ mg/L}$ 时,河流滨岸带对其有良好的污染物削减效率,出水水质能达到GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅲ类地表水标准。

b. 在低温少雨、中低污染物浓度的地表降雨径流情况下,河滨带对降雨径流的污染削减的较优设计方案为:坡度为 $8^\circ \pm 0.5^\circ$,坡长为4~5m,有类似冬青的根系发达、机械组织较强的植被覆盖。此时模拟地表径流平均入水水质状况 $\rho(\text{COD}) = 154.7 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 0.55 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 1.19 \text{ mg/L}$ 等,出水水质: $\rho(\text{COD}) = 77.38 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 0.29 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 0.69 \text{ mg/L}$ 。削减率分别为49.98%,47.27%,41.61%。出水水质达到国家城镇污水处理厂污染物排放标准的一级B标准。

c. 在设计城市河滨带时,若地域不受限制,尽量保持 10° 以下的坡度以及4~5m的带宽;若由于地域限制不能在城市中心地带保证4~5m的河岸坡长,应尽可能减缓河滨带坡度(保持 30° 以下),同时选取类似乔灌木冬青等根系发达、机械组织抗冲击力较强的植被,紧密栽种覆盖河流滨岸带,以达到相对较好的污染削减效果。

d. 受限于实验地点及其生态特征、人工模拟的误差等因素,实验结论适用范围具有一定的局限性;关于影响河滨带污染削减效果的因素,在降雨强度、河滨带覆盖植被等方面还需要进一步研究探讨。

致谢:感谢华东师范大学环境科学系车越副教授、吕永鹏博士在实验方案等方面的指导与论文修改方面的宝贵建议。

参考文献:

[1] AMIR T, RONALD L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2004, 327(1/3): 175-184.

[2] 程江. 上海中心城区土地利用/土地覆被变化的环境水文效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.

[3] SILBURN D M, EGLANDVILLE S. Management practices for control of runoff losses from cotton furrows under storm rainfall [J]. Aust J Soil Res, 2002, 40: 1-20.

[4] 刘勇华, 高超, 王登峰, 等. 城市降雨径流污染初始冲刷效应对BMPs选择的启示[J]. 水资源保护, 2009, 25(6): 29-32.

(下转第57页)

COD为21729.0t、NH₃-N为875.8t,各功能区总纳污能力COD全年纳污量为31858.7t,NH₃-N全年纳污量为1214.5t。在选定的38个水功能区年度水质目标达标评价方面,6个保护区中有3个全年稳定达标,2个达标率在65%以上,1个达标率低于50%;2个保留区全年达标率均低于50%;7个缓冲区中有1个全年稳定达标,4个达标率在75%以上,其余2个缓冲区达标率均低于50%;23个开发利用区中有1个全年稳定达标,3个达标率在80%以上,6个达标率在50%以上,13个达标率均低于50%。

2.3 入河污染物应削减量分析

水功能区入河污染物应削减量为水功能区污染物现状入河量与该水功能区的纳污能力之差。根据以上污染物入河量和纳污能力,现状COD和NH₃-N入河量分别为120864.5t和1783.6t,分别超过纳污能力的3.79倍和1.47倍。徐州市水功能区COD和NH₃-N应削减总量分别为89005.8t和569.1t,平均削减率分别为73.6%和31.9%。其中COD削减任务最重的是开发利用区,超过纳污能力3.78倍,需削减量为60514.4t,平均削减率为73.58%;保护区次之,需削减量为28782t,平均削减率为78.33%;保留区最小,COD需削减量为1086.5t,超过纳污能力2.58倍,平均削减率为61.18%。NH₃-N削减任务最重的保护区,超过纳污能力2.36倍,需削减量为342t,平均削减率为57.58%;其次是开发利用区,NH₃-N需削减量为312.2t,平均削减率为26.28%,超过纳污能力1.76倍。

3 施行限制纳污总量控制的建议

在治污方面,首先要治理污染源和严格控制新污染源的产生和排泄。除了尽量减少污水排放

外,要通过建设污水处理设施,收集处理污水,使之达到国家规定的排放标准。同时要对一些分散、布局不合理的排污口调整改造,实行污水集中处理后达标排放。其次要进行排污管道改造,使城市污、废水与雨水分别排放,逐步实现清污分流,提高污水处理效率。在水利工程方面,要通过引、蓄水工程进行水体置换与稀释,调整改善水环境。同时要要进行河道(湖、库)整治,不仅有利于防洪,而且河道内被污染的淤泥清除后,可减轻河道底泥对水体的污染。在生态防护方面,要加大生态保护力度,建设生态水利。主要包括实行水资源优化配置,加强水土保持,确保应有生态用水量等等。

参考文献:

- [1] 王浩. 实行最严格的水资源管理制度关键技术支撑探析[N]. 中国水利报, 2011-03-22(08).
- [2] 孙宇飞, 王建平, 王晓娟. 关于“三条红线”指标体系的几点思考[J]. 水利发展研究, 2010(8): 62-65.
- [3] 邹朝望, 林得才. 试论“三条红线”四项评价指标的科学性[C]//湖北省水利学会. 实行最严格水资源管理制度高层论坛论文集, 2010: 86-89.
- [4] 李明武, 陈玲. 徐州市区水环境问题及对策[J]. 能源技术与管理, 2006(3): 51-53.
- [5] 徐州市环境保护局. 2010年徐州市环境状况公报[J]. 徐州: 徐州市环境保护局, 2011.
- [6] 王方清, 吴国平, 刘江壁. 建立长江流域水功能区纳污红线的几点思考[J]. 人民长江, 41(15): 19-22.
- [7] 景彦亭, 时晓飞, 刘庆华. 邢台市水功能区纳污能力分析研究[J]. 地下水, 2011, 33(1): 84-86.
- [8] 毛晓文. 水域纳污能力计算的不确定性及其定量控制[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2009, 9(3): 83-87.

(收稿日期: 2012-05-20 编辑: 高渭文)

(上接第53页)

- [5] 严国武, 杨夫英. 论植物措施在秦州区水土保持生态环境建设中的作用及发展前景[J]. 甘肃科技, 2009, 25(22): 167-169.
- [6] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3225-3230.
- [7] 张旭东, 阮晓红, 孙敏. 利用地表漫流系统处理新沂河污水的试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005,

33(3): 273-276.

- [8] 孙敏, 阮晓红, 张旭东, 等. 地表漫流系统处理污染新沂河水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(9): 46-49.
- [9] 张荣社, 周琪, 李旭东, 等. 自由表面人工湿地脱氮效果中试研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(12): 9-11.
- [10] 熊飞, 李文朝, 潘继征, 等. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J]. 湿地科学, 2005, 3(3): 228-234.

(收稿日期: 2011-05-03 编辑: 高渭文)