

文章编号:1000-582X(2011)05-093-06

## 三级渗滤系统控制农业径流污染的试验

高 旭,黄 磊,陈明国,陈俊宏,谢伟丹,马晓霞

(重庆大学 城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

**摘 要:**为明确渗滤系统在控制农业径流污染中的拦截削减性能,在重庆市万州高峰镇鹿山河旁建立三级渗滤系统,开展了农业径流污染净化效果的试验。结果显示,系统对 SS、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和 TP 具有较好的去除效果,平均去除率可分别达到 80%、78%、37%及 48%。污染物浓度沿系统各级逐渐降低,TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率沿程逐渐趋缓,TP、SS 去除率沿程没有明显减缓的趋势。系统第一级对氮的去除以颗粒态为主,第二、三级以溶解态为主;系统第一、二级对磷的去除以颗粒态为主,第三级对颗粒态磷与溶解态磷的去除比例相近。系统第一级对各污染物的去除效率最高,硝化作用较强;第二级 TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率与第一级相比依然较高;第三级  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 去除率较低,但 SS 的去除效率与第二级相当。

**关键词:**渗滤系统;农业径流污染;氮;磷;去除率

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

## Experiments on controlling agricultural runoff pollution by three-stage filtration system

GAO Xu, HUANG Lei, CHEN Ming-guo, CHEN Jun-hong, XIE Wei-dan, MA Xiao-xia

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** A three-stage filtration system, which locates next to Lushan River in Gaofeng Town of Chongqing, is built to make clear its effects on controlling the runoff pollution. The system is adaptive to variation of inflow quality and quantity. The average removal rates of SS,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN and TP are 80%, 78%, 37% and 48%, respectively. The concentrations of various pollutants decrease gradually along the way with the increase of filtration system stages. The removal rates of TN and  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  increase steadily with the increase of stages, but SS and TP don't. In the system, the removed nitrogen during the first stage is mainly in particulate state and in dissolved state during the second and third stage. The removal rate of particulate phosphorus in the first and second stage is better than in the last one. In the third stage, the removals of particulate phosphorus and dissolved phosphorus are almost the same. In the first stage, the removal rates of various pollutants are at the highest level, and the nitrification is strong. Compared with the first stage, the removal efficiency of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and TN in the second stage is relatively high. The removals of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN and TP are low in the last stage, while the removal rate of SS is almost same to the second.

**Key words:** three-stage filtration system; agricultural runoff; nitrogen; phosphorus; removal rate

收稿日期:2011-01-18

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAJ08B01-03);国家科技重大专项(2009ZX07104-005-004-001);重庆市科技攻关计划项目(CSTC2008AB7135)

作者简介:高旭(1971-),男,重庆大学副教授,博士生导师,主要从事饮用水源地保护与修复,水处理热力学研究,(E-mail)gaoxu@cqu.edu.cn。

农业非点源污染主要是指在农业生产活动中,农田中的土粒、氮素、磷、农药及其它有机或无机污染物质,在降水或灌溉过程中,通过农田地表径流、农田排水和地下渗漏,使大量污染物质进入水体,造成的水环境污染<sup>[1]</sup>。全球范围来看,30%~50%的地球表面已受非点源污染的影响,并且在全世界不同程度退化的 12 亿  $\text{hm}^2$  耕地中约 12% 的耕地污染由农业非点源污染引起<sup>[2]</sup>,农村非点源污染源在水体污染中占据重要地位。

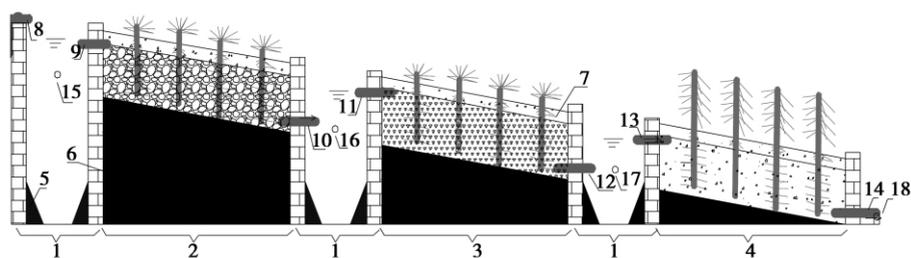
近年来,渗滤系统的研究和应用在国内外受到重视,广泛应用到污水处理、城市雨水径流净化等诸多领域。Quanrud 等<sup>[3]</sup>在田间尺度上研究了土壤渗滤处理系统通过生物降解作用对市政废水中有机污染物的削减;姜凌等<sup>[4]</sup>利用人工土壤层处理雨水径流、补给地下水进行研究,采用土砂比参数 5:1、渗透厚度为 1 m 的人工土壤层能去除雨水径流中大部分污染物;郑艳侠等<sup>[5]</sup>利用土壤含水层处理系统去除三家店水库微污染有机物,该系统对水库微污染水中有机物有一定的去除效果,且建筑沙滤料的去除效果比河道沙相对好一点;许萍等<sup>[6]</sup>试验结果显示,应用浅层人工土、植物系统净化城区径流水质是经济有效的雨水利用方案;为了控制太湖流域农村面源污染,田猛等<sup>[7]</sup>结合人工湿地原理和快速渗滤机理,开发透水坝技术,达到了拦蓄 5 d 处理雨量为 14 000  $\text{m}^3$  的降雨径流的设计要求,同时透水坝的 TN、TP 去除率分别为 15.59% 和 23.44%。目前,有关渗滤系统在水污染控制方面的理论应用研究,多以垂直流态的滤柱或水平流态的滤池为实验装置,考察渗滤系统净水效果,并以此作为渗滤系统工

程应用的理论依据。但农业径流污染多发生在山地和丘陵地形中,污染大多沿坡地顺势而下,流态既不是水平流也非垂流,改变径流污染的流态本身是一件比控制径流污染水质更困难的工作。忽略径流污染流态特征,仅以水质变化情况衡量渗滤系统控制径流污染效果的方法是不充分的。重庆市万州区高峰镇是中国典型的山区小镇,农业生产落后,雨季径流污染以营养盐污染为主,其中 TN 和 TP 的含量超过《在地表环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类标准。笔者根据汇水区域地表径流污染的特点,选取当地常见滤料作为渗滤介质,针对山地地形,设计三级渗滤系统。以 SS、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和 TP 为指标,评价了渗滤系统的净水效果,并对污染物在系统沿程上的去除规律展开分析研究,以期对渗滤系统控制农业径流污染的实际应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

系统整体为砖混结构,长 6.5 m,宽 0.8 m,坡度 20°。图 1 是渗滤系统的结构示意图,系统设为三级,每级渗滤介质层长 1.5 m,滤层厚 0.45 m,考虑到植物的生长需要,在每级表层覆盖 5 cm 的小砾石(粒径为 5~10 mm)。每级之间通过沉砂井相连,沉砂井可以起到沉砂、消能蓄水和均匀配水的作用。系统底部和四周以水泥墙封闭,并进行防渗处理。选用的渗滤介质(不包含表层 5 cm 的小砾石)和植物具体见表 1。



1. 沉砂井; 2. 第一级; 3. 第二级; 4. 第三级; 5. 砂斗; 6. 地基; 7. 表层小砾石;  
8. 系统进水口; 9. 第一级进水口; 10. 第一级出水口; 11. 第二级进水口;  
12. 第二级出水口; 13. 第三级出水口; 14. 第四级出水口; 15. 第一级进水取水口;  
16. 第一级出水取水口; 17. 第二级出水取水口; 18. 第三级出水取水口

图 1 三级渗滤系统结构示意图

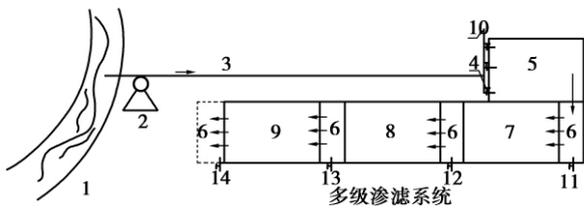
表 1 渗滤介质与植物

植物	科目	栽种时间	种植密度株/ $\text{m}^2$	介质	粒径/mm
第一级 空心菜	禾木科	09.9	12	砖块	40~60
第二级 空心菜	禾木科	09.9	12	卵石	20~40
第三级 美人蕉	美人蕉科	09.9	12	砾石	5~10

### 1.2 试验方法

试验装置位于重庆市万州区高峰水库补给河流鹿山河旁,图 2 是试验现场的平面布置示意图。试验研究在 2009 年 3 月至 11 月进行,分挂膜、水质净化 2 个阶段。挂膜期间采取从鹿山河连续进水动态挂膜方式。挂膜启动完成后,移栽植物,植物完成初期的

生长后,进入系统净化水质的运行阶段,采取间歇式的运行方式,每个周期 24 h,进水 12 h,间歇12 h。期间系统的水力负荷控制在 0.20~1.0 m<sup>3</sup>/h 之间。



1. 鹿山河;2. 水泵;3. 进水管;4. 流量调节器;5. 配水池;6. 沉沙井;7. 渗滤系统第一级;8. 渗滤系统第二级;9. 渗滤系统第三级;10. 溢流口;11. 进水取水口;12. 渗滤系统第一级出水取水口;13. 渗滤系统第二级出水取水口;14. 渗滤系统第三级出水取水口

图 2 三级渗滤系统的平面布置图

### 1.3 试验用水水质

本试验设计的处理对象为农业径流污染。受天气影响较大,不便储存转移。试验实施过程中,根据前期对选定汇水区域农业径流污染的监测,以鹿山河河水为源水,模拟径流污染。试验期间试验进水水质见表 2。

表 2 试验进水水质及试验分析方法 mg/L(pH除外)

分析项目	浓度范围	均值	分析方法
DO	2.87~5.61	4.37	YSI550A 便携式溶氧仪
pH	7.34~7.81	7.61	YSIpH100 便携式酸度计
TN	1.35~5.42	3.13	碱性过硫酸钾消解,紫外分光光度法
TP	0.09~1.04	0.44	过硫酸钾消解,钼酸铵分光光度法
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.31~0.93	0.52	紫外分光光度法
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.31~1.89	1.11	纳氏试剂比色法
SS	50~390	230	重量法

## 2 结果与讨论

### 2.1 系统对主要污染物的净化效果

径流污染与点源污染不同,径流污染发生时,径流污染的水质变化很大<sup>[8]</sup>。本试验模拟的水质变化在一定程度上体现了径流污染的该特点。图 3-6 表示三级渗滤系统进水浓度、出水浓度和污染物去除率。可以看出,在渗滤系统进水的水质变化较大的情况下,系统最终出水中的各污染物浓度及去除率也随之有一定的波动。系统对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率在 63%~93% 范围之间,对 TN 的去除率在 14%~54% 范围之间,TP 的去除率在 19%~74% 之间,系统对 SS 的去除率在 61%~92% 范围之间。尽管水质的波动较大,但系统对 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、SS 的平均去除率分别为 37%、78%、48%、80%。由此可

见,系统对这些污染物有较好的去除能力,并对水质水量的波动有一定的适应性。

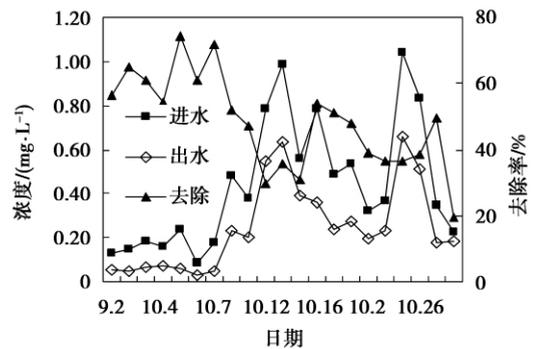


图 3 系统对 TP 的去除效果

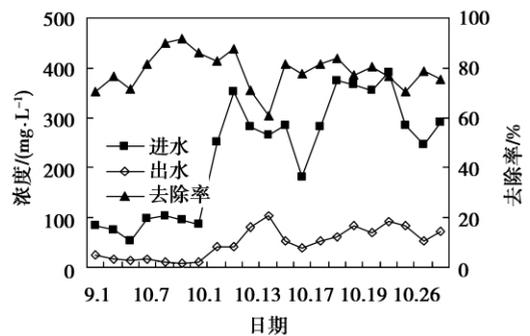
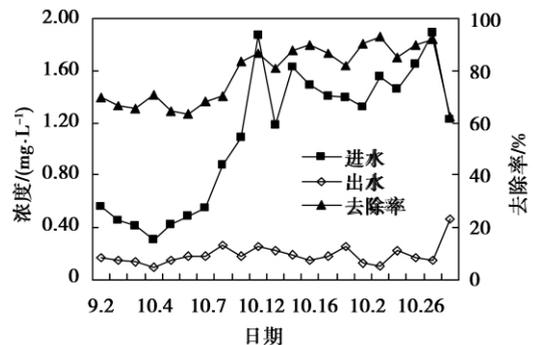


图 4 系统对 SS 的去除效果



### 2.2 污染物平均去除率沿程变化规律

由图 7 知,经过系统第一级后,较系统进水,SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 分别平均削减了 46%、40%、22%、26%;经过系统第二级后,SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 去除率分别平均增加 14%、26%、10%、12%;经过系统第三级后,SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 去除率分别平均增加 20%、12%、5%、10%。随着渗滤系统的级数增加,各污染物浓度沿程均体现出逐渐减少的趋势,对污染物的去除效率逐渐升高,去除率在最后一级达到最大值。系统 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率没有随串联级数的增加而线性递增,而是逐渐趋缓,这与张伟等<sup>[9]</sup>曾经做过多级串联式生物接触氧化池级数优化设计的研究中结论吻合。系统 SS、TP 去除率在三级没有出现明显平缓的趋势。

系统各级出水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度逐渐升高并趋缓,在最后一级达到最大。由于系统进水平均 DO 为 4.37 mg/L,高 DO 条件一方面为硝化作用提供了有利条件,促使系统 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 逐级升高,另一方面可能限制反硝化作用的进行,不利于反硝化脱氮的进行。

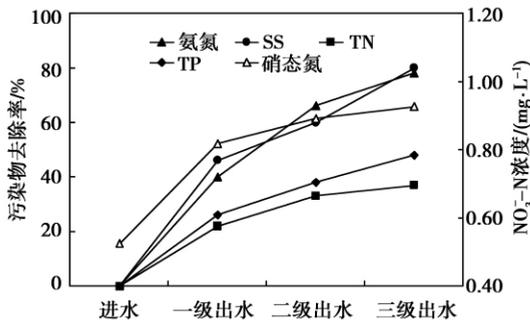


图 7 污染物平均去除率沿程变化

水中 N、P 元素以颗粒态和溶解态的形式存在。试验中,以 0.45 μm 滤膜抽滤的方式,分别将 TN、TP 的形态以溶解态与颗粒态进行简单区分。从图 8 知,在系统第一级中,进水 TN64%以颗粒态形式去除,36%以溶解态形式去除,进水 TP55%以颗粒态形式去除,45%以溶解态形式去除;在系统第二级中,进水 TN25%以颗粒态形式去除,75%以溶解态形式去除,进水 TP60%以颗粒态形式去除,40%以溶解态形式去除;在系统第三级中,进水 TN25%以颗粒态形式去除,75%以溶解态形式去除,进水 TP50%以颗粒态形式去除,50%以溶解态形式去除。通过对氮磷在系统中的去除形态分析知,系统第一级对 N 的去除以颗粒态为主,第二、三级以溶解态为主;系统第一、二级对 P 的去除以颗粒态为主,第三级颗粒态 P 与溶解态 P 的去除比例相近。

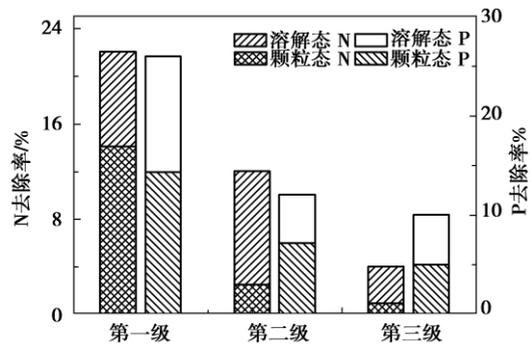


图 8 各级对 N、P 的去除特性

### 2.3 系统各级去除污染物规律的分析讨论

由图 9-12 可知,在三级渗滤系统各级中 TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率关系基本一致,呈现逐级递减的规律。而各级 SS 去除率关系却有所不同,表现为第一级去除率最高,第二、三级去除率相近。

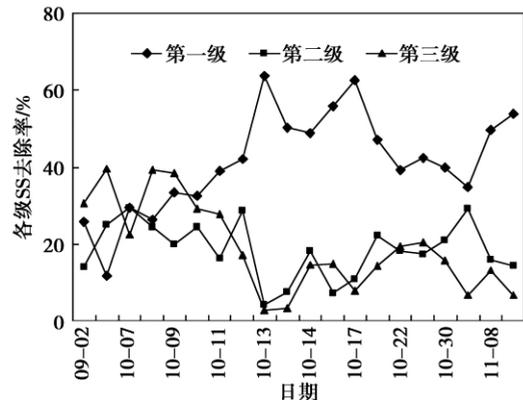


图 9 各级 SS 去除效果

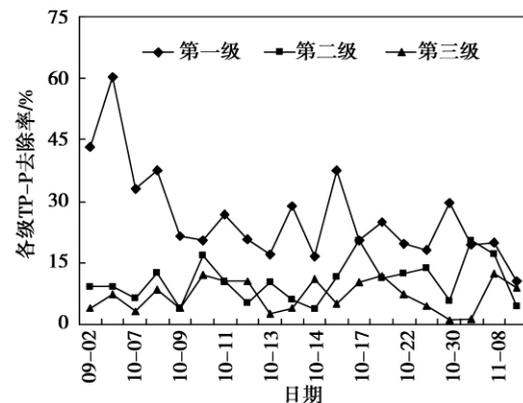


图 10 各级 TP 去除效果

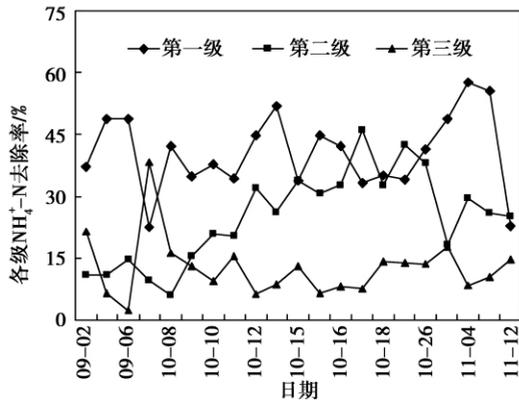


图 11 各级 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果

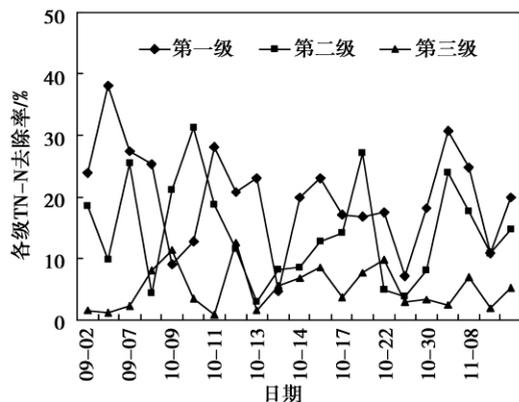


图 12 各级 TN 去除效果

渗滤系统的第一级对 SS、TP 保持最高的去除效率,首先是因为系统的第一级进水 SS 和 TP 浓度较高,为渗滤介质的物理拦截悬浮物和颗粒态 P 提供了有利条件;其次,渗滤系统的第一级介质为砖块,主要采用页岩加工烧制,有研究发现页岩具有良好的吸附溶解态 P 的性质<sup>[10]</sup>。而且砖块的多孔性结构有利于吸附、离子交换等物理化学作用的发生。渗滤系统第二级的渗滤介质为卵石,卵石的表面光滑,比表面积小,不利于生物的附着和化学作用的发生,影响该级对 SS、TP 的去除效率。经过前两级渗滤作用后,TP 浓度大幅降低,系统第三级渗滤介质的吸附、离子交换等作用没有得到充分发挥,致使该级对 TP 的去除率较低。由于第三级渗滤介质粒径最小,对 SS 仍能起到一定的拦截作用,本级对 SS 的去除效率与第二级相当。

根据图 9-12,系统第一级对 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率较高。一方面,较高的氮素进水浓度及兼具多孔性和良好氮素吸附性的砖块介质<sup>[11]</sup>促进了氮素的拦截吸附去除,使 TN 去除率较高;另一方面,较高的进水 DO 浓度促进了硝化作用,使 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 转

化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,表现为系统第一级 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度提升幅度和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度降低幅度均较大。

系统第二级装填介质为卵石,卵石的吸附拦截性能较差,使颗粒态 N 去除率下降。该级种植了生长良好的空心菜,有研究发现空心菜对氮素,尤其是对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 具有很好的吸收能力<sup>[12-16]</sup>,因此,本级 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 去除效果依然较高。空心菜对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的吸收可能限制了硝化作用的进行,使本级 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度提升幅度不大。

系统第三级对 TN 的去除很低,虽然该级装填有拦截性能较高的小粒径砾石,而种植的美人蕉对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 也具有较高的吸收能力<sup>[17-20]</sup>,但是经过前两级拦截、吸附和植物吸收,颗粒态 N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度大幅降低,限制了系统对氮素的进一步去除。较低的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度也限制了硝化作用的进行,使第三级 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度基本不变。

### 3 结 语

1)在三级渗滤系统控制径流污染的试验当中,系统对污染物有较好的去除效果,对 SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 的平均去除率分别为 80%、78%、37%和 48%。三级渗滤系统对进水水质水量变化有较好的适应性。

2)随着渗滤系统级数的增加,SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 浓度在沿程上均体现出逐渐减少的趋势,去除率在最后一级达到最大。系统对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 去除效率沿程逐渐趋缓,但 SS、TP 去除率沿程没有明显减缓的趋势。

3)系统第一级对 N 的去除以颗粒态为主,第二、三级以溶解态为主;系统第一、二级对 P 的去除以颗粒态为主,第三级颗粒态 P 与溶解态 P 的去除比例相近。

4)系统各级污染物去除关系表明,系统第一级对各污染物的去除效率最高,硝化作用较强;第二级对 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效率与第一级相比依然较高,植物对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的吸收限制了硝化作用的进行;在进水污染物浓度较低的情况下,第三级对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 去除率较低,但对 SS 的去除率与第二级相当。

#### 参考文献:

[1] US EPA. National water quality inventory: report to congress executive summary[R]. Washington D. C. : US EPA, 1995.  
 [2] CORWIN D L, LOAGUE K, ELLSORTH T R. GIS-based modeling of non-point source pollutants in the

- vadose zone[J]. *Soil and Water Conservation*, 1998, 53(1):34-38.
- [3] QUANRUD D M, HAFFER J, KARPISCAK M M, et al. Fate of organics during soil-aquifer treatment: sustainability of removals in the field [J]. *Water Research*, 2003, 37(14): 3401-3411.
- [4] 姜凌, 秦耀民. 利用土壤层净化雨水补给地下水的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6):94-96.  
JIANG LING, QIN YAO-MIN. Research on utilizing soil purifying urban rainwater to recharge groundwater[J]. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2005, 19 (6): 94-96.
- [5] 郑艳侠, 冯绍元, 蔡金宝, 等. 用土壤含水层处理系统去除水库微污染有机物的试验研究[J]. *水利学报*, 2005, 36(9):1083-1087.  
ZHENG YAN-XIA, FENG SHAO-YUAN, CAI JIN-BAO, et al. Experimental study on removal of organic substance in reservoir water by means of soil aquifer treatment system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(9):1083-1087.
- [6] 许萍, 李俊奇, 郭靖, 等. 北京城区雨水人工土植物系统水质净化研究[J]. *北京建筑工程学院学报*, 2005, 21(4):45-50.  
XU PING, LI JUN-QI, GUO JING, et al. Research on removal of pollutants from stormwater using artificial soil and plant system by experimentation in Beijing [J]. *Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture*, 2005, 21(4):45-50.
- [7] 田猛, 张永春. 用于控制太湖流域农村面源污染的透水坝技术试验研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1665-1670.  
TIAN MENG, ZHANG YONG-CHUN. Experimental study on permeable dam technique to control rural non-point pollution in Taihu basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10): 1665-1670.
- [8] 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.  
XUN LI-HUA, ZHOU QI. On design of artificial wetland system for storm water disposal[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2001, 27(8): 32-34.
- [9] 张伟, 刘振鸿. 多级串联式生物接触氧化池的优化设计[J]. *中国纺织大学学报*, 2000, 26(5): 37-39.  
ZHANG WEI, LIU ZHEN-HONG. Optimal design of series biological contact oxidation system[J]. *Journal of China Textile University*, 2000, 26(5): 37-39.
- [10] 赵桂瑜, 秦琴, 周琪. 几种人工湿地基质对磷素的吸附作用研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(6): 84-85.  
ZHAO GUI-YU, QIN QIN, ZHOU QI. The sorption effects of several constructed wetland's stroma on phosphorus [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(6): 84-85.
- [11] ARIAS C A, BUBBA M D, BRIX H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds [J]. *Water Research*, 2001, 35(5): 1159-1168.
- [12] 常会庆, 寇太记, 乔鲜花, 等. 几种植物去除污染水体中养分效果研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 122-126.  
CHANG HUI-QING, KOU TAI-JI, QIAO XIAN-HUA, et al. Removal efficiency of nutrients from wastewater by several plants[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5): 122-126.
- [13] LI M, WU Y J, YU Z L. Nitrogen removal from eutrophic water by floating-bed-grown water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with ion implantation[J]. *Water Research*, 2007, 41(14): 3152-3158.
- [14] ABE KAORU, HIRAKA MASAOKI, TOKIWA HIDEO. Treatment of discharged solution from the rose Soilless culture system by using plant bed filter ditches[J]. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, 74(3): 273-279.
- [15] Chhay Ty and T R Preston, Effect of water spinach and fresh cassava leaves on intake, digestibility and N retention in growing pigs[J]. *Livestock Research for Rural Development*, 2005, 17(2): 77-83.
- [16] 关保华, 葛滢, 常杰, 等. 富营养化水体中植物的元素吸收与净化能力的关系[J]. *浙江大学学报:理学版*, 2002, 29(2): 190-197.  
GUAN BAO-HUA, GE YING, CHANG JIE, et al. Relationship between elements in the absorption and purification ability of plants in eutrophic water [J]. *Journal of Zhejiang University: Sciences Edition*, 2002, 29(2): 190-197.
- [17] 陈力, 郭沛涌, 柴洪云, 等. 不同种植方式对陆生植物美人蕉与紫背万年青净化富营养化水体中氮的影响[J]. *华中科技大学学报:城市科学版*, 2009, 26(2): 26-31.  
CHEN LI, GUO PEI-YONG, CHAI HONG-YUN, et al. The effect of terrestrial plants in different planting patterns repairing nitrogen in eutrophic water [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition*, 2009, 26(2): 26-31.
- [18] 韩潇源, 宋志文, 李培英, 等. 高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(6): 741-747.  
HAN XIAO-YUAN, SONG SHI-WEN, LI PEI-YING, et al. Selection and assembly of macrophyte species in constructed wetland for purification of N and P in wastewater[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(6): 741-747.
- [19] NAKAI S, ZOU G, SONG X, et al. Release of anti-cyanobacterial allelochemicals from aquatic and terrestrial plants applicable for artificial floating islands[J]. *Water and Environment Technology*, 2008, 1(6):55-63.
- [20] KONNERUP D, KOOTTATEP T, BRIX H. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(2): 248-257.

(编辑 郑洁)