

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.01.008

三峡库区乡镇生活污水人工快渗处理中的氮素转化

蒲贵兵,吕 波,何 东,尹洪军

(重庆市市政设计研究院 重庆 400020)

摘要 :以三峡库区乡镇生活污水为水源 ,以三峡库区特有的滤料为介质 ,研究了三峡库区乡镇生活污水人工快渗处理中氮素的转化行为。结果表明 :人工快渗技术用于三峡库区乡镇生活污水无害化处理极为有效 ,其出水总氮、氨氮及硝氮的平均质量浓度分别为 10.18 mg/L、6.26 mg/L 及 3.08 mg/L ,TN、NH₄⁺-N 的平均去除率分别为 75.32%、79.26%。提出通过增设饱水层、优化湿干比及在饱水层中人为添加碳源等途径来提高人工快渗处理中氮的去除率。

关键词 :乡镇生活污水 ;人工快渗 ;氮素转化 ;三峡库区

中图分类号 :X705 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2011)01-0034-04

Study on nitrogen transition behavior of CRI treating rural sewage in the Three Gorges reservoir region

PU Gui-bing , LV Bo , HE Dong , YIN Hong-jun

(Chongqing Municipal Engineering Design and Research Institute , Chongqing 400020 , China)

Abstract :Using rural sewage in the Three Gorges reservoir region as water source and specific filter material in the Three Gorges reservoir region as media , the nitrogen transition behavior of constructed rapid infiltration (CRI) treating rural sewage was studied. The results showed that CRI was very effective in sewage bio-safety disposal in the Three Gorges reservoir region. The average content of total nitrogen (TN) , ammonia nitrogen (NH₄⁺-N) , and nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) in the effluent were 10.18 , 6.26 and 3.08 mg/L respectively , and the average removal rate of TN , NH₄⁺-N were 75.32% and 79.26% . In order to further protect the water environment in the Three-Gorges reservoir region , several measures were proposed to improve the removal rate of TN , such as addition of saturated water layer , optimization of wet to dry weight ratio and addition of carbon source to the saturated water.

Key words :rural sewage ; constructed rapid infiltration (CRI) ; nitrogen transition ; Three Gorges reservoir region

人工快渗污水处理系统(constructed rapid infiltration system ,简称 CRI 系统)是在土地快速渗滤系统的基础上 ,采用渗透性能良好的介质(以一定级配的天然河砂为主 ,并掺入活性矿物填料) ,采用干湿交替的运转方式 ,污水在通过快渗池时产生综合的物理、化学和生物反应 ,使污染物得以去除 ,从而达到水质净化目的的一种生态学处理方法^[1]。它适用于城市污水集中和分散处理、中水回用、受污染水体修复以及微污染源水资源化处理。近年来 ,CRI 系统在西方一些发达国家获得了广泛的应用^[2-4] ,国

内也有相关的试验研究和示范工程^[5-16] ,该系统愈来愈成为污水无害化的重要手段。结合三峡库区及重庆市乡镇的实际情况 ,三峡库区管理委员会及重庆市政府推荐在库区乡镇生活污水处理中采用 CRI 系统。该系统尽管具有操作简单、运行管理方便、低能耗、低投资和低运行管理费用等优点 ,但也有水力负荷高和出水水质好等特点 ;但也存在对 TP、TN 去除率偏低的问题^[17-18]。氮是 CRI 系统中较为关键的限制性设计因素 ,因此 ,研究 CRI 系统中氮转化行为具有较为积极的意义。笔者以库区常见土壤和渗

滤介质构建 CRI 系统 ,初步考察该系统对库区乡镇生活污水处理中氮的转化行为 ,为进一步改善 CRI 系统的脱氮效率提供依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用污水取自重庆市某乡镇生活污水 (2008-10-20 取样) ,其基本化学成分见表 1。

表 1 CRI 系统进、出水水质指标

水质指标	平均进水质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	平均出水质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	平均 去除率/%
COD	325.24	50.46	84.49
BOD ₅	145.18	18.02	87.59
SS	209.68	15.96	92.39
TN	41.24	10.18	75.32
NH ₄ ⁺ -N	30.18	6.26	79.26
NO ₃ ⁻ -N	0.64	3.08	

快渗池的结构与滤料组成见图 1 所示。以库区常见的灰棕紫泥土^[10]、河砂、陶粒、卵石作为试验材料。灰棕紫泥土是土地处理的主要微生物载体 ,河砂作为土壤颗粒骨架以提高水力负荷 ,卵石(5~10 mm)作为沥水及承托层 ,陶粒的粒径(4~8 mm)介于土壤颗粒和卵石承托层之间 ,以防渗滤介质的流失 ,同时有增加孔隙率、加强装置内部通气的作用。

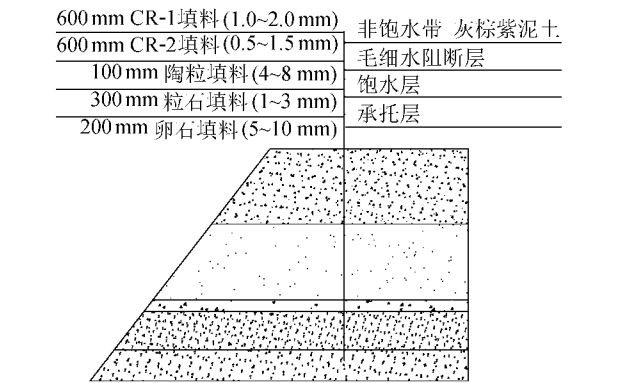


图 1 滤层分布示意图

1.2 实验装置与分析方法

1.2.1 实验装置

生活污水首先进入集水池 ,在集水池中设置滤网拦截污水中大尺寸的悬浮及漂浮物 ,集水池水面与配水管出口保持作用水头恒定 ,配水管出水直接喷灌至 CRI 系统的土层表面。由于装置过水断面确定 ,通过控制流量向装置配水 ,可实现流速控制(图 2)。

CRI 系统装置长 2.0 m ,宽 2.0 m ,高 2.2 m ,系统复氧完全依靠自然落干。布水区、渗透区和集水区的高度分别为 0.2 m、1.8 m 和 0.2 m。为了提高脱氮效率 ,强化反硝化的进行 ,在承托层上方设置了 0.3 m 厚的饱水层(1~3 mm 的粒石)^[8] ;为了防止毛细水

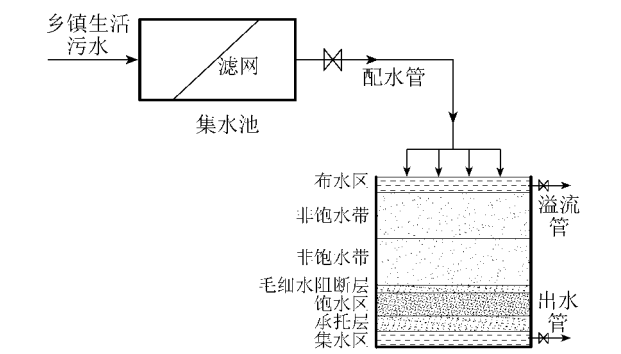


图 2 CRI 系统处理生活污水试验装置

的产生 ,在饱水层上方设置了 0.1 m 厚的毛细水阻断层(4~8 mm 的粒石) 。采用穿孔管布水方式 ,在 CRI 系统的渗滤速度下降时对表面约 20~30 cm 的填料层进行翻耕和晾晒。

CRI 系统采用干、湿交替的运行方式 ,湿干比为 1:3^[10] ,布水量为 125 m³/次 ,布水时间为 45 min/次 ,8 次/d ,即快渗池的运行周期为 6 h(其中 1.5 h 淹水(0.3 h 布水) ,4.5 h 落干) 。考察运行稳定后 1 个工作周期内氮的变化。

1.2.2 实验项目与分析方法

COD 参照 HACH-COD ;BOD 参照 HJ/T86-2002 进行 ;SS 参照 GB11901 执行 ,氨氮 纳氏试剂分光光度法 ;TN 紫外分光光度法 ,硝氮的测定 参照 CJ/T51-2004 规定操作。

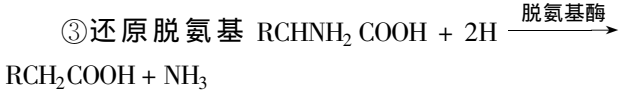
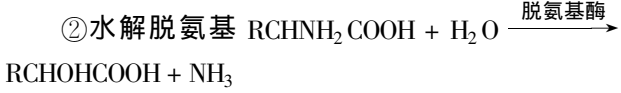
2 结果与讨论

2.1 CRI 系统中氮的生化反应

2.1.1 有机氮的水解及氨化

CRI 系统中的有机氮主要包括蛋白质、核酸、氨基酸、胺类物质、尿素等 ,这些含氮化合物在适当的微生物(好氧和厌氧微生物)作用下 ,会发生水解及氨化。主要反应式如下^[19] :

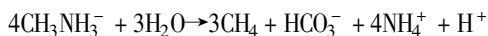
a. 蛋白质的氨化 :蛋白质的氨化为 :蛋白质
蛋白酶 → 肽 → 氨基酸 → 氨基酸为微生物吸收 ,
在脱氨基酶的作用下脱下氨基 ,并以氨的形式释放。



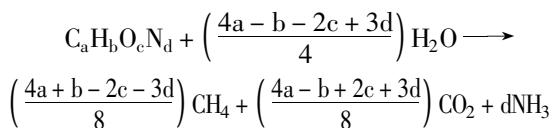
b. 核酸的水解及氨化 :核酸是组成生物细胞的必需物质 ,其在厌氧消化中的氨化过程如下所示 :



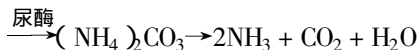
c. 胺类物质的氨化: 胺类物质常由氨基酸脱羧后而得, 其氨化过程如下:



通过上面的分析可知: 蛋白质总氨化反应为:

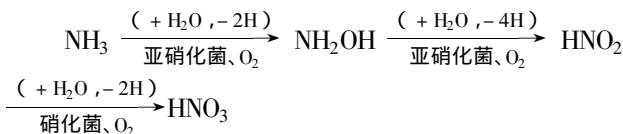


d. 尿素的氨化: 其反应式为: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

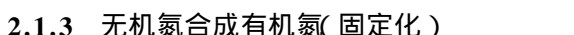
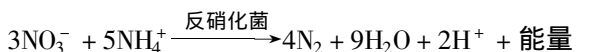
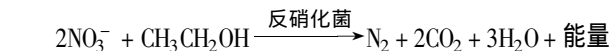
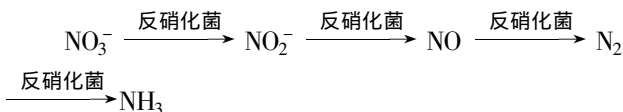


2.1.2 硝化及反硝化

在落干期, 体系中的氨氮将通过硝化作用(氨氮为电子供体, O_2 为电子受体)而转化为硝氮, 其过程如下所示:

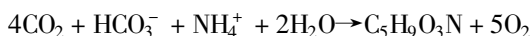


当反应器中的 O_2 耗尽后, 微生物在反硝化菌的作用下, 利用有机碳或氨氮为电子供体, 硝氮为电子受体发生反硝化作用, 其过程如下:



2.1.3 无机氮合成有机氮(固定化)

氮是微生物生长繁殖及代谢所必需的营养元素, 微生物利用反应所产生的能量, 以有机碳、无机氮(氨氮)等为基础合成自身物质, 其反应如下:



2.2 总氮的变化

TN 是所有形态氮元素含量之和, 其变化趋势为所有形态氮元素变化规律的叠加。因而, 影响 TN 变化规律的因素较多。氮在污水中可以 4 种形态存在: 有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮。有机氮和氨氮是生活污水中氮存在的主要形态, 生活污水经常规一级处理或污水在地表经较长距离的明渠流动之后, 绝大部分氮呈氨离子形式。在 CRI 系统中, 氮的去除主要有挥发作用、吸附作用、生物脱氮, 其中生物脱氮是主要去除机制。生物脱氮是指污水中

的含氮有机物在生物处理过程中被异养型微生物氧化分解, 转化为氨氮, 然后由自养型硝化细菌将其转化为亚硝酸盐或硝酸盐, 然后再由反硝化细菌将亚硝酸盐或硝酸盐还原转化为氮气, 从而达到脱氮的目的, 其过程包括氨化、硝化、反硝化 3 个阶段。总氮浓度的变化可能是由有机氮的水解、矿化、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的挥发及硝化、硝氮的反硝化、N 的浓缩及无机氮合成有机氮等共同作用的结果, 其变化趋势见图 3。

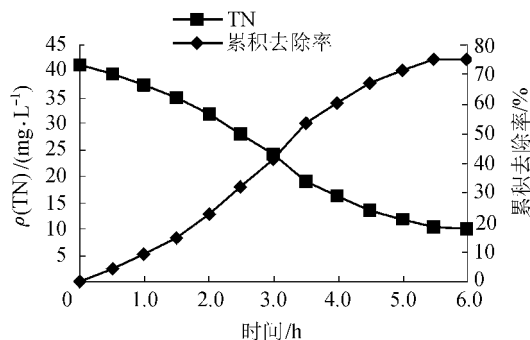


图 3 CRI 系统中总氮的变化趋势

由图 3 可以看出, 随着渗滤的进行, TN 浓度持续降低, 最后趋于平稳。CRI 系统中出水 TN 平均质量浓度为 10.18mg/L , 平均去除率为 75.32% 。该装置采用干湿交替的运行方式, 厌氧-好氧环境交替出现。在落干期, 土壤微环境为好氧条件, 土壤颗粒中所吸附的有机氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 逐渐转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$; 在淹水期, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 进行反硝化、厌氧氨氧化^[14]转化为 N_2 从反应器中逸出, 并且 CRI 装置中增设了饱水层, 为反硝化菌创造了适宜的生长环境, 在饱水层内反硝化菌将硝态氮还原为气态氮, 从而使本装置的脱氮效率较高。

2.3 氨氮质量浓度的变化

CRI 系统中氨氮质量浓度的变化主要是由氨基酸的氨化、氨氮的硝化、渗滤介质对氨氮的吸附、氨氮的浓缩、氨氮的挥发、硝氮的反硝化、厌氧氨氧化^[14]及无机氮合成菌体蛋白等共同作用的结果, 其变化趋势见图 4。

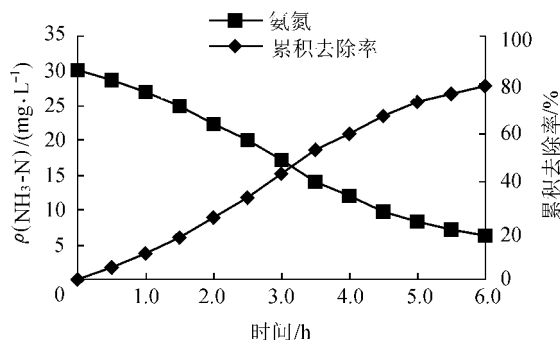


图 4 CRI 系统中氨氮的变化趋势

从图 4 可以看出, 氨氮质量浓度随着渗滤过程的进行而逐渐降低, CRI 系统中出水氨氮平均质量浓度

为 6.26 mg/L,其平均去除率为 79.26%。本实验的氨氮取出率较高,除了与本实验的温度较高从而使生物活性较高^[15]相关以外,还与实验装置密切相关。

生活污水经长距离的输送及一级处理后,在进入快渗装置前,其中的有机氮大多都已经经过氨化作用而转化为氨氮。进入快渗装置后,一方面,快渗装置特殊的填料结构对氨氮产生了较好的吸附作用;另一方面,由于 CRI 系统中好氧-厌氧环境的交替出现,为硝化、反硝化作用创造了条件,从而氨氮得以去除。

CRI 系统对氨氮的去除主要由过滤截留、吸附和生物降解作用共同完成,其中过滤截留和吸附作用主要起调节机制,而氨氮的真正去除主要靠发生在好氧-厌氧交替带的硝化、反硝化生物作用。人工快渗系统是一种自然处理技术,不需人工曝气,其复氧过程主要靠空气的扩散和对流来完成。该装置在 1:3 湿干比条件下,可能由于其复氧不足而影响了氨氮的进一步硝化,从而使得 CRI 出水中氨氮浓度较高。因此,加大系统的复氧量将有利于改善系统的去污效果。

研究结果表明^[10]:当湿干比分别为 1:4、1:3、1:2 时, NH_4^+ -N 的平均去除率由 78.2%、72.3%降至 65.0%。

从 TN、 NH_4^+ -N 变化中还可看出,氮是本装置对污染物质去除的控制因素,如何在快渗系统中有效的构建氨化、硝化和厌氧反硝化的环境,最大程度地脱氮也是目前学术界研究的热点之一^[4]。

2.4 硝氮变化

CRI 系统中硝氮浓度的变化是由氨氮的硝化、硝氮的反硝化、厌氧氨氧化^[14]、硝氮的浓缩及无机氮合成菌体蛋白等共同作用的结果,其变化趋势见图 5。

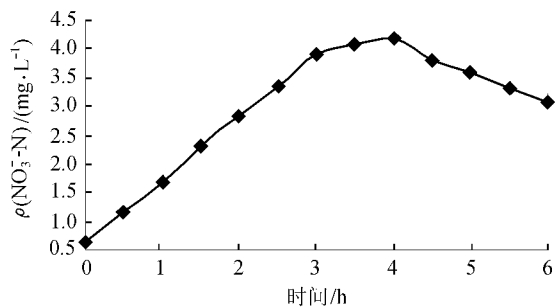


图 5 CRI 系统中硝氮的变化趋势

由图 5 可以看出,随着渗滤的进行,硝氮质量浓度先增加,而后降低,最后趋于平稳,CRI 系统出水中硝氮平均质量浓度为 3.08 mg/L。

然而,由于 CRI 系统对氮的去除主要是通过反硝化作用^[8],但是在运行中淹水期要短于落干期,使

得厌氧反硝化菌不能完全发挥作用,出水硝态氮浓度偏高;并且,土壤颗粒带负电荷, NO_3^- -N 也带负电荷,土壤微环境中小尺度的硝酸盐具有很强的流动性,极易随出水流出反应器;另一方面反硝化的顺利进行除需要厌氧环境外,还应确保有足够的碳源,由于有机污染物在上部滤层就得到有效去除,进入饱水层的 COD、BOD 有限,使得反硝化菌不能完全将硝态氮还原为气态氮;因此,在 CRI 系统出水中 NO_3^- -N 浓度仍然较高。

3 结论及建议

人工快渗技术用于三峡库区乡镇生活污水无害化处理是极为有效的,其出水 TN、 NH_4^+ -N、及 NO_3^- -N 的平均质量浓度分别为 10.18 mg/L、6.26 mg/L 及 3.08 mg/L,TN、 NH_4^+ -N 的平均去除率分别为 75.32%、79.26%,水质完全能达到 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 标准。

为了进一步保护库区水环境,强化 CRI 中氮的去除是极为必要的,这可以通过增设饱水层、优化湿干比及在饱水层中人为添加碳源等途径来实现。

参考文献:

- [1] SEKI K,MIYAZAKI T. A mathematical model for biological clogging of uniform porous media[J]. Water Resour Res, 2001, 37(2):2995-3000.
- [2] KADAM A, OZA G, NEMADE P, et al. Municipal wastewater treatment using novel constructed soil filter system[J]. Chemosphere, 2008, 71(5):975-981.
- [3] HANS-PETER H, ADRIAN B, CHRISTOPHER B F, et al. Bohannan Ammonia-oxidizing bacteria respond to multifactorial global change[J]. PNAS, 2004, 101:15136-15141.
- [4] Division of Environmental Health, Washington State Department of Health. Nitrogen reducing technologies for onsite wastewater treatment system[R]. Washington:USA Washington State Department of Health, 2005.
- [5] 何江涛,钟佐兕,汤鸣皋,等.人工构建快速渗滤污水处理系统试验研究[J].中国环境科学,2002,22(3):239-243.
- [6] 潘彩萍,王小奇,钟佐兕.人工快渗处理牛湖河水的实践[J].中国给水排水,2004,20(9):71-72.
- [7] 张永华,张金炳,殷淑华.水力负荷周期对人工快渗系统污染物去除效果的影响[J].华北水利水电学院学报,2004,25(3):68-71.
- [8] 刘家宝,杨小毛,王波,等.改进型人工快渗系统处理污染河水中试[J].中国给水排水,2006,22(13):14-17.
- [9] 张永华,杨崇豪,杨小毛,等.运行方式对人工快渗系统除污效果的影响[J].人民长江,2006,37(8):86-87.

(下转第 45 页)

3 结 语

通过对以上结果分析,2008 年崂山水库水体整体状况良好,但在 8 月、9 月水体出现轻度富营养化,Chl-a 和浮游植物细胞密度均较高,达到轻度富营养化的标准。其原因估计是崂山水库四面环山,中成盆地,水库周边有很多耕种的土地和农家餐馆。化肥、农药等农业面源污染物和生活污水随着降水进入水库对库区水体产生了一定不良影响。

青岛市政府对崂山水库的水质保护非常重视,2009 年崂山水库上游污水治理工程被列为市、区两级政府为民办实事的重点工程之一,总投资 2.07 亿元,2010 年底竣工完成。届时,上游区域内的 38 个村庄 2.3 万居民的污水直排现象将得到根治。在加强治污的同时,建议在崂山水库附近的种植业全面推广有机肥,防止因氮磷超标可能引起的水库水体的富营养化,另一方面建议水库进行无饵料养殖,在不投饵的情况下,养殖对水体净化有益的鳙鱼、鲢鱼等,鲢鱼、鳙鱼可对硅门藻的直链藻、针杆藻,蓝藻门的鱼腥藻、微囊藻,绿藻门的衣藻、小球藻和隐藻门的蓝隐藻等起抑制作用^[16-17]。

参考文献：

[1] 戴绍军,秦智,张思聪,等. 哈尔滨二龙山水库浮游植物及水体污染状况的研究[J]. 植物研究, 2001, 21(4): 624-629.

[2] 杜桂森,王建厅,武殿伟,等. 密云水库的浮游植物群落结构与密度[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 501-504.

(上接第 37 页)

[10] GUO J S, WANG C Y, FANG F et al. Applicability study of CRI treating sewage in the Three-Gorges Reservoir region[J]. Environmental Science, 2006, 27(11): 2327-2332.

[11] 马鸣超,姜昕一,刘菲,等. 污水人工快速渗滤系统中氨氧化菌 16SrDNA 的 DGGE 分析[J]. 高校地质学报, 2007, 13(4): 688-693.

[12] 李丽,陆兆华,王昊,等. 新型混合填料人工快渗系统处理污染河水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(11): 86-89.

[13] ZHENG Yan-xia, FENG Shao-yuan, ZHAO Xu-yang. Simulation study on constructed rapid infiltration for treatment of surface wastewater in town[J]. IFIP International Federation for Information Processing, 2008, 259: 851-858.

[14] JIANG X, MA M C, LI J, ZHONG Z S. Molecular ecology of anammox bacteria in constructed rapid infiltration system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(4): 573-577.

[15] ZHENG Y, FENG S, LIU P. The effect of water temperature

[3] 张哲海,梅卓华,孙洁梅,等. 玄武湖蓝藻水华成因探讨[J]. 环境监测管理 & 技术, 2006(3): 11-14.

[4] 黄美丽. 南靖南五水库水质调查[J]. 环境监测管理 & 技术, 2004(4): 26-28.

[5] 中国标准出版社. 水质分析方法国家标准汇编[G]. 北京: 中国标准出版社, 1996.

[6] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[7] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.

[8] 韩茂森,孙明霞,胡维兴,等. 淡水浮游生物图谱[M]. 北京: 农业出版社, 1978.

[9] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

[10] 《水生生物监测手册》编委会. 水生生物监测手册[M]. 南京: 东南大学出版社, 1993.

[11] 顾丁锡,舒金华. 湖泊水污染预测及其防治规划方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.

[12] B·福迪. 藻类学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.

[13] 詹玉涛. 釜溪河浮游植物分布及其与水质污染的相关性研究[J]. 中国环境科学, 1991, 11(1): 29-33.

[14] 郭佩涌,林育真,李玉仙. 东平湖浮游植物与水质评价[J]. 海洋湖沼通报, 1997(4): 37-42.

[15] 周亮进,由文辉. 福建省山仔水库富营养化特征[J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 26-29.

[16] 周根娣,周忠贤,方志发,等. 非投饵网箱鲢鱼、鳙鱼对藻类的遏制效果[J]. 上海农业学报, 2005, 21(2): 94-95.

[17] 王洪起. 于桥水库的水质保护与渔业生产[J]. 湖泊科学, 1995, 7(4): 379-384.

(收稿日期: 2009-11-30 编辑: 高渭文)

and HRT on constructed rapid infiltration treatment of slightly-polluted surface water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(12): 2509-2513.

[16] FENG S Y, ZHENG Y X, TANG Z J, et al. Experimental study on purification of slightly-polluted surface water by constructed rapid infiltration system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 422-426.

[17] 牟新民,黄培鸿,张金炳,等. 人工快速渗滤系统处理深圳市茅洲河水的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(4): 370-377.

[18] 张金炳,黄培鸿,杨小毛,等. 东莞华兴电器厂生活污水人工快速渗滤处理系统[J]. 环境工程, 2003, 21(6): 32-35.

[19] 王家玲. 环境微生物学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

(收稿日期: 2009-12-13 编辑: 高渭文)