文章编号：1674－9057（2011）02－0252－06

组合工艺对农村生活污水中氮磷的去除效果

徐芝芬[1a,2]，李金城[1a,1b]，莫德清[2]，阙光龙[1a]，李文文[1a]，孙 鑫[1a]，苏春良[1a]，黄朗妃[1a]

（1. 桂林理工大学 a. 环境科学与工程学院；b. 广西环境工程与保护评价重点实验室，广西 桂林 541004；
2. 桂林电子科技大学 生命与环境科学学院，广西 桂林 541004）

摘 要：利用“厌氧生物反应器＋潜流复合型人工湿地”组合工艺处理农村生活污水中氮和磷。厌氧生物反应器和潜流复合型人工湿地水力停留时间分别为24和48 h，进水总氮、氨氮和总磷分别为10.3～51.8 mg/L、6.8～44.7 mg/L和0.9～5.2 mg/L，组合工艺对总氮、氨氮和总磷的平均去除效率分别为30.7%、42.9%和72%，不同季节处理效率为：夏季＞春季＞冬季。组合工艺中的COD主要由厌氧水解酸化、基质截留、微生物代谢而被去除，氮主要由人工湿地微生物作用和植物吸收被去除，磷主要由人工湿地基质吸附被去除。系统整体脱氮效果的提高可采用在厌氧生物反应器后增加充氧装置，提高污水中的溶解氧，通过增强人工湿地中的硝化能力来实现。

关键词：组合工艺；农村生活污水；脱氮除磷

中图分类号：X703 **文献标志码：**A

根据统计，全国河流中的污染河长已占总河长的42.7%，完全污染、失去水的使用价值的劣Ⅴ类河流占总河长的15%[1]。随着经济的发展和农村生活水平的提高，大量污水和地表径流排入水环境，使江河受到污染。漓江流域广大农村产生的生活污水未经处理，随意排入漓江，是造成漓江水体污染的主要原因之一[2]。结合当地农村的经济基础和现有的管理水平，因地制宜地采用基建省、能耗低、效率高、运行管理简单的污水处理工艺是非常必要的。

“厌氧生物反应器＋潜流复合型人工湿地”组合工艺的净化原理是：在厌氧生物反应器内，污水中不易降解的大分子有机污染物水解成小分子和可溶性化合物[3]，然后进入潜流复合型人工湿地，污染物在人工湿地内通过基质－微生物－植物的物理、化学和生物的三重协同作用去除[4]。与其他技术比较，该组合工艺具有投资省、效率高、能耗低、维护简单的特点，在经济相对落后的农村地区具有很高的推广价值。本文以“厌氧生物反应器＋潜流复合型人工湿地”组合工艺处理农村生活污水中的污染物，着重分析了氮、磷的去除特征。

1 材料与方法

1.1 试验装置

在桂林市北冲污水处理厂内建立了日处理量为1.2 m^3/d的试验装置（图1）。旋流沉砂池的出水经泵提升至高位水箱，自流进入厌氧生物反应器，再自流进入潜流复合型人工湿地，污水经净化后排放。

厌氧生物反应器的有效容积为1.2 m^3，反应器分为3级：第1级内挂设立体弹性填料，第2、

收稿日期：2010－08－14

基金项目：广西高校人才小高地建设“环境工程”创新团队资助计划项目（桂教人［2007］71）；桂林市科技局科技开发项目（20100126－2）；广西教育厅科研项目（201010LX172）

作者简介：徐芝芬（1985—），女，硕士研究生，研究方向：水环境污染与控制技术。

通讯作者：李金城，博士，教授，china_ljc@ 263.net。

引文格式：徐芝芬，李金城，莫德清，等. 组合工艺对农村生活污水中氮磷的去除效果［J］. 桂林理工大学学报，2011，31（2）：252－257.

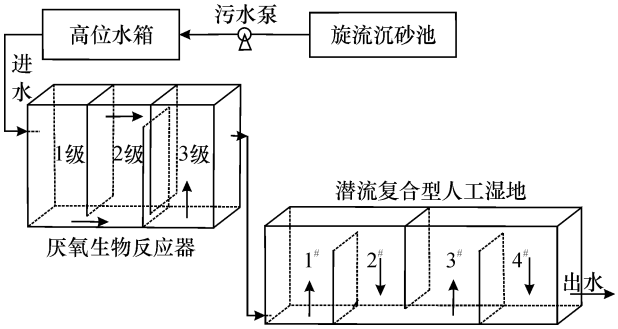


图 1　组合工艺示意图

Fig. 1　Schematic drawing of combined process

3 级内挂设无剩余污泥型生物填料。潜流复合型人工湿地为长方体砖混结构，尺寸 2.0 m × 1.5 m × 0.9 m。人工湿地设计为 4 个单元，基质依照粒径大小分为上中下 3 层（高度分别为 15、35、25 cm）：上层 1# ~ 3#为小碎石，4#为河沙；中层 1#为中号碎石 + 大块 WSC 填料[5]，2#为中号碎石 + 小块 WSC 填料，3#为中号碎石 + 细沸石，4#为竹碳；下层 4 个单元均为大号碎石。湿地上种植的植物通过优化选择确定为美人蕉和再力花[6-7]。

1.2　试验水质

通过实地采集 39 个村庄水样分析，漓江流域农村生活污水水质情况见表 1。

本次试验为模拟试验，试验用水取自该污水厂曝气沉砂池的出水，进水水质见表 2。对比分析表 1、表 2，各项水质指标相近，故该污水厂旋流沉砂池的出水可以作为试验用水。

1.3　试验方法

试验采用 24 h 连续进水方式运行。出水方式通过阀门控制，根据水力停留时间确定进水流量。稳定运行期间厌氧生物反应器的 HRT 为 24 h，潜流复合型人工湿地的 HRT 为 48 h。

水质检测的项目：pH、COD、SS、氨氮、总氮、总磷、可溶性正磷酸盐、可溶性总磷酸盐[8]。采样频率为每周 1 ~ 2 次，根据系统运行情况及气候变化，适当增加测定次数。

1.4　组合工艺的启动

2009 - 10 系统建设完毕，厌氧生物反应器内挂设填料，人工湿地移栽美人蕉、再力花，间歇进水培育系统。植株移栽半个月后，美人蕉、再力花长势良好。11 月底系统连续进水，开始试验。

2　结果与分析

2.1　总氮、氨氮的去除

2.1.1　*总氮的去除*　总氮进水浓度为 10.3 ~ 51.8 mg/L（图 2）。居民的洗衣、洗澡用水总量大，污水中污染物浓度相对偏低；4 月以后，桂林进入雨季，强降雨也降低了总氮的进水浓度。运行期间总氮平均去除率为 30.7%，6 ~ 7 月的平均去除率达到 65.2%。系统运行前期，总氮出水浓度波动较大是由于系统还不够成熟，冬春两季气温较低，不利于植物的生长和微生物的繁殖，去除率低，有时甚至出现去除率为负值。5 月以后，随着气温的升高，植物生长加快，人工湿地内微生物群落逐渐培养形成，氮的去除率也逐步增加，出水水质明显提高，这期间植物生长所需的氮对系统内氮的去除起到较大作用。各季节的去除效率顺序为夏季 > 春季 > 冬季。组合工艺总氮运行期间系统出水平均浓度为 16.0 mg/L，达到了《城镇污水

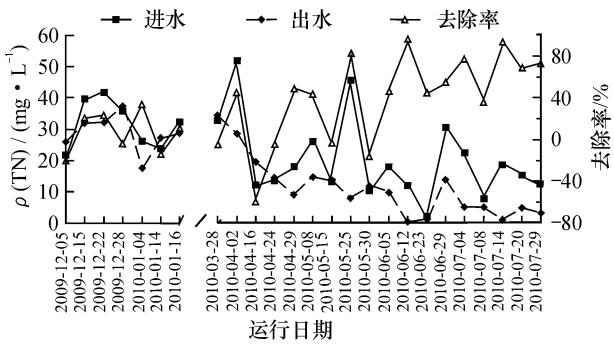


图 2　组合工艺总氮去除效果

Fig. 2　TN removal of combined process

表 1　漓江流域农村生活污水污染物平均浓度

Table 1　Pollutant average concentration of the rural domestic sewage in Li River watershed

样品数	COD/(mg·L⁻¹)	氨氮/(mg·L⁻¹)	总氮/(mg·L⁻¹)	总磷/(mg·L⁻¹)	SS/(mg·L⁻¹)	pH
39	50.2 ~ 320.5	8.5 ~ 50.5	15.2 ~ 55.6	2.0 ~ 6.0	100.0 ~ 250.0	6.5 ~ 7.5

表 2　试验进水水质

Table 2　Characteristics of the influent feeding to combined process

COD/(mg·L⁻¹)	氨氮/(mg·L⁻¹)	总氮/(mg·L⁻¹)	总磷/(mg·L⁻¹)	SS/(mg·L⁻¹)	pH
42.1 ~ 296.0	6.8 ~ 44.7	10.3 ~ 51.8	0.9 ~ 5.2	72.0 ~ 160.0	6.7 ~ 7.4

处理厂污染物排放标准》（GB 18918—2002）中的一级 B 标准，稍高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918—2002）中的一级 A 标准。

2.1.2 氨氮的去除 从图 3 可以看到，氨氮进水浓度为 6.8 ~ 44.7 mg/L，波动较大，这是由于 5、6 月桂林的降雨量明显增大，甚至有连续 20 h 以上的降雨，对系统进水浓度冲击较大，导致氨氮浓度偏低及波动范围大。运行期间氨氮的平均去除率为 42.9%，6 ~ 7 月的平均去除率达到 71.8%，与总氮的去除规律类似，都是随气温升高，人工湿地内微生物活性提高，植物生物量增加，去除效率提高，6 月以后去除率较稳定。氨氮去除率负值的出现都出现在进水浓度不是很高时，这是由于在厌氧阶段有机氮转化成氨氮，使厌氧段的出水高于进水，而经复合型人工湿地处理后氨氮浓度有所下降，但去除效率不高，导致出水浓度大于进水浓度。组合工艺氨氮运行期间系统出水平均浓度为 12.3 mg/L，未达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918—2002）中的一级 A 标准的排放要求。

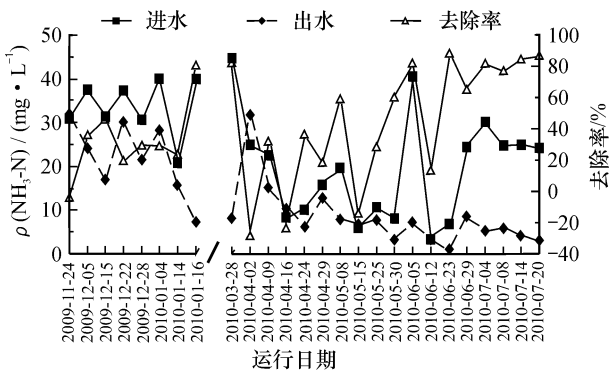


图 3 组合工艺 NH_3-N 去除效果

Fig. 3 NH_3-N removal of combined process

2.1.3 水流沿程总氮、氨氮浓度的变化 图 4 为 2010 - 05 - 25 沿水流方向各处理单元总氮、氨氮浓度变化曲线，此时系统运行稳定。总氮主要在人工湿地中去除，厌氧生物反应器对总氮的去除效率很低，从进水的 45.6 mg/L 降低到 35.2 mg/L，去除率为 22.7%。在厌氧生物反应器内总氮先增加后降低，这是由于水流从第一级到第二级时经过底部隔墙，水力冲刷能力较强，将转折处填料及底部污泥吸附截留的颗粒态氮带进水中，因而导致二级出水浓度有所上升，随后总氮呈现较有规律的下降。

由沿程各单元氨氮浓度曲线可知，氨氮从进水的 10.8 mg/L 降低到 7.8 mg/L，去除率为 27.8%。在系统内氨氮呈先增加后减少的趋势，在人工湿地的最后两级得以去除。在厌氧生物反应器内，水中的有机氮转化成铵态氮，使系统氨氮负荷增加，湿地 2# 是下行流方式进水，对基质截留的有机物冲击较大，有机氮在厌氧条件下释放铵态氮，使湿地 2# 出水氨氮浓度增加。由于湿地后两级植物生长茂盛，根系微生物获得充足的氧气，加速了湿地内的硝化反应，从而使污水中的总氮和氨氮去除。

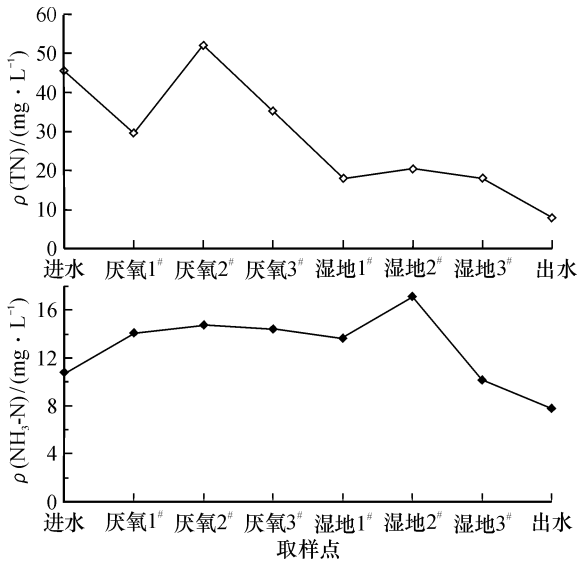


图 4 程各单元总氮、氨氮浓度变化

Fig. 4 Different concentration of TN and NH_3-N in each unit of combined process

2.2 总磷的去除

图 5 为组合工艺对总磷的去除效果。2009 - 11—2010 - 04 进水浓度较高，在 2.1 ~ 5.2 mg/L 内，2010 - 05—07 进水浓度介于 0.9 ~ 3.1 mg/L，这是由于桂林冬春季节居民用水量相对较小，降雨量也少，进入 5 月以后，居民用水量明显增加，进水磷浓度降低，7 月后，进水磷浓度有所上升。在系统运行前期，冬季气温低，人工湿地中微生物繁殖困难，植物生长缓慢，磷主要依靠人工湿地中的基质吸附去除，5 月以后，人工湿地中的微生物及植物也起到去除磷的作用，弥补了 WSC 填料吸附量减少的问题，去除率仍保持较高。总体来看，系统对磷的去除效果较好，在磷进水负荷

波动较大时，系统的出水都能够得到保证。运行期间总磷出水的平均浓度为 0.76 mg/L，平均去除率为 72.3%。2010－05－07 总磷出水的平均浓度达到 0.49 mg/L，达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918—2002）中的一级 A 标准。

2.2.1　各种形态磷的变化　已有研究表明，在人工湿地净化污水的过程中，湿地基质起到了极其重要的作用[9]。图 6 为总磷的各种形态，即可溶性总磷酸盐和可溶性正磷酸盐在沿水流方向的浓度变化。

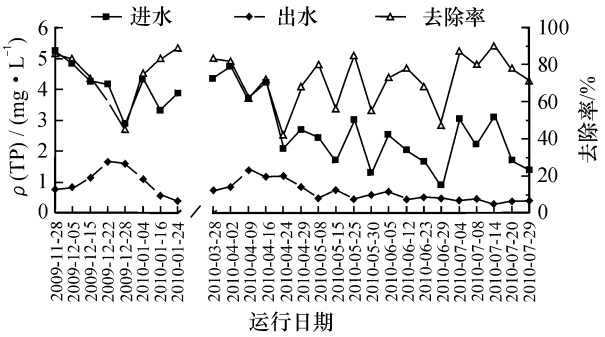


图 5　组合工艺 TP 去除效果

Fig. 5　TP removal of combined process

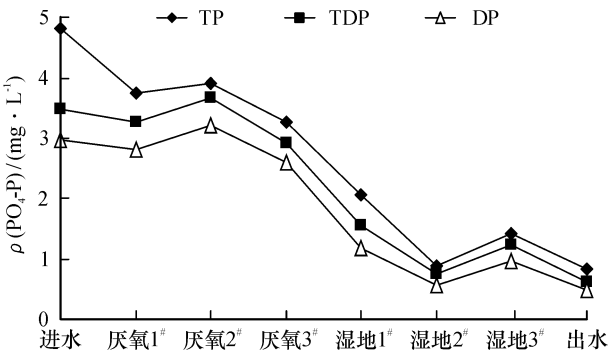


图 6　沿水流方向组合工艺不同磷形态的变化曲线

Fig. 6　Various phosphorus forms along the flow direction

系统中各形态磷的变化趋势基本一致，在人工湿地 3#中出现各形态磷浓度都有所增加的原因是 3#中水流为上升流，在湿地表面采集的水样中含有植物枯叶腐殖质及湿地表面原生动物等杂质，从而导致了 3#中各形态磷浓度的增加。

厌氧生物反应器对总磷、总溶解性磷和溶解性正磷酸盐的去除率分别是 38.8%、19.2% 和 14.9%，复合型人工湿地对总磷、总溶解性磷和溶解性正磷酸盐的去除率分别是 61.2%、80.8% 和 85.1%。人工湿地 1#和 2#对磷的去除率达到了 50%，由此可见人工湿地中的 WSC 填料对磷的去除起到了重要作用。总磷的去除主要是磷酸盐的减少，原因是可溶性磷酸盐与湿地基质中游离态钙、镁、铝发生吸附沉淀作用，形成不溶性磷酸盐并从系统中移除。

2.2.2　pH 对磷的去除影响　Reddy[10]在研究中发现，人工湿地中的磷可通过沉淀或吸附反应而被降解，其中，pH 值起着重要作用，本研究也得到了类似结果。湿地中 WSC 填料的主要成分是氧化钙和二氧化硅，呈碱性。由图 7 可以看出，出水 pH 值和系统对总磷的去除率呈相同的趋势，开始阶段系统出水 pH 值较高，总磷去除率也高，随着运行时间的增加，出水 pH 值趋于稳定，总磷去除率在一定范围内波动。这是由于人工湿地中除磷材料使污水中 pH 值升高，从而促进磷酸盐与钙离子等形成沉淀。随着进水时间增加，pH 值下降，此时高效除磷的吸附量趋于下降，但气温的逐渐升高，人工湿地内微生物逐步增多，湿地植物的生长加快，聚磷菌等微生物和植物吸收也起到了一定作用，故整个系统对磷的去除率还是保持在较高水平。

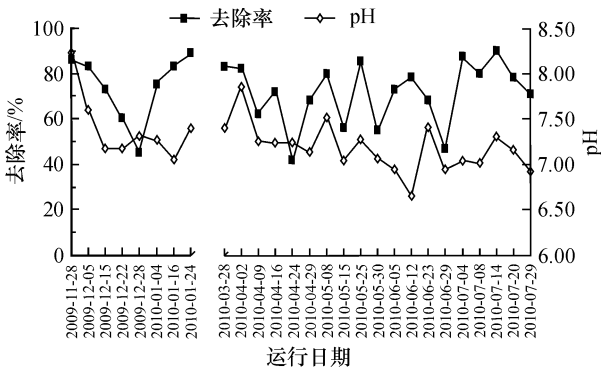


图 7　总磷去除率和 pH 值的变化

Fig. 7　Variation of pH and removal rate of TP

2.3　COD、SS 的去除

2.3.1　COD 的去除　COD 的分布情况如图 8 所示。运行期间 COD 进水浓度波动较大，在 42.1 ~ 296.0 mg/L 变化，但出水相对稳定，在 4.1 ~ 48.0 mg/L，平均去除率为 76.4%。系统运行前期，由于冬季温度较低，厌氧生物反应器内的填料挂膜效果不好，人工湿地对 COD 的去除起到主要作用。虽然冬季温度较低，但对系统的出水没有太大影响。这是由于系统运行前期人工湿地中基质对有机物起到很好的吸附和截留作用。春季气温升高，厌氧生物反应器对 COD 的去除效果大

大提高，人工湿地的去除作用则由基质截留和湿地植物生长共同作用。整个系统在运行期间对 COD 的去除一直保持较稳定，出水 COD 达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918—2002）中的一级 A 标准。

2.3.2 SS 的去除 由图 9 可知，进水 SS 浓度为 72.0 ~ 160.0 mg/L，波动较大。厌氧生物反应器对 SS 的去除起到主要作用，这是由于污水在反应器内受到很好的沉淀和填料阻截作用。系统稳定后，人工湿地对 SS 的去除也起到了一定作用，使出水 SS 维持在较低水平。系统运行前期，SS 去除效果不稳定，但进入春夏季 SS 出水基本维持在 10 mg/L 以下，去除率保持在 90% 以上。

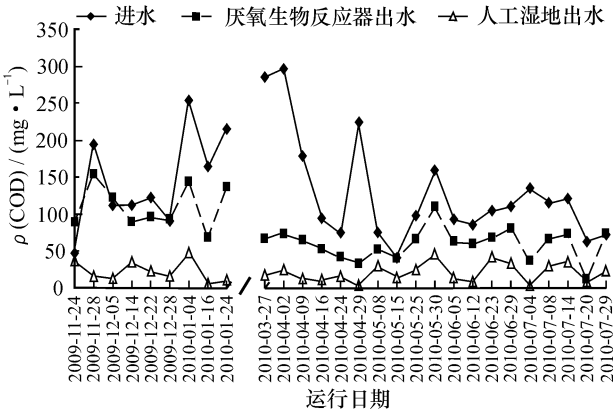


图 8 组合工艺 COD 去除效果

Fig. 8 COD removal in each unit of combined process

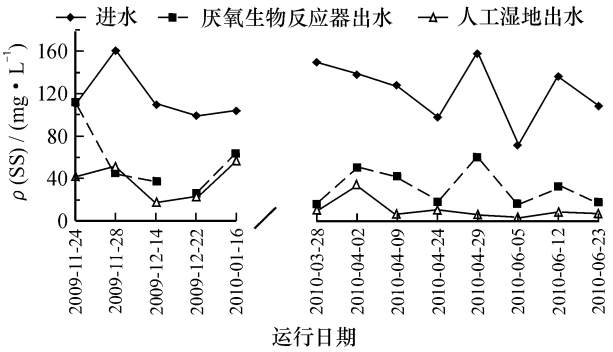


图 9 组合工艺 SS 去除效果

Fig. 9 SS removal in each unit of combined process

3 结 论

（1）利用“厌氧生物反应器 + 潜流复合型人工湿地”组合工艺处理漓江流域农村生活污水，厌氧生物反应器和潜流复合型人工湿地的 HRT 分别为 24 和 48 h，进水 COD 浓度在 42.1 ~ 296.0 mg/L，出水 COD 的浓度低于 50 mg/L。进水 SS 浓度在 72.0 ~ 160.0 mg/L，出水 SS 浓度在 10 mg/L 以下，达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918—2002）中的一级 A 标准。

（2）进水总氮为 10.3 ~ 51.8 mg/L，运行期间总氮平均去除率为 30.7%，总氮出水平均浓度为 16.0 mg/L。进水氨氮为 6.8 ~ 44.7 mg/L，运行期间氨氮平均去除率为 42.9%，出水平均浓度为 12.3 mg/L。不同季节处理效率为夏季 > 春季 > 冬季。总氮、氨氮的去除主要由潜流复合型人工湿地内微生物作用和湿地植物吸收去除，厌氧生物反应器的贡献较低，反应器内总氮、氨氮都呈增加趋势，提高了人工湿地的进水负荷。

（3）进水总磷为 0.9 ~ 5.2 mg/L，运行期间平均去除率为 72.3%，出水平均浓度为 0.76 mg/L。在夏季总磷出水平均浓度为 0.49 mg/L，可以达标排放。系统中各形态磷的变化趋势基本一致，总磷、总溶解性磷和溶解性正磷酸盐的去除率分别为 83.0%、82.4%、84.1%。pH 值对总磷的去除有重要影响。

（4）“厌氧生物反应器 + 潜流复合型人工湿地”组合工艺对 COD、SS 和磷的去除效果较好，但脱氮能力较差。可采用在厌氧生物反应器后增加充氧装置，增加污水中的溶解氧，提高系统的整体脱氮效果。该污水处理工艺可以根据当地农村的地形条件做到整个系统运行无需动力，不需要运行费用，这对于经济条件相对落后的农村地区来说非常重要，可确保污水处理站的长期运行；运行无需人员操作，这解决了农村地区缺乏相关环保技术人员的问题；不影响生态景观，对农村地区的生态环境不造成破坏，对旅游区的农村意义十分重大。基建成本低、效率高、能耗低、运行管理简单等特点使该工艺适合广大农村地区，特别适合对景观要求较高的地区。

参考文献：

[1] 陈宜菲. 我国水环境污染现状及其防治 [J]. 黑龙江科技信息，2008，35：187 - 188.

[2] 徐芝芬，李金城，王芬，等. 漓江风景区沿岸小城镇生活污水处理技术分析 [C] //第三届华南青年地学学术研讨会论文集，2009：384 - 386.

[3] 黄武，陈明晖，赵光华，等. 无动力、地埋分散式厌氧系统处理农村生活污水 [J]. 中国给水排水，2008，24 (20)：43－45.

[4] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术 [M]. 北京：科学出版社，2007：8－9.

[5] 李金城，王君雅，徐芝芬，等. 不同人工湿地填料除磷性能试验 [J]. 桂林理工大学学报，2010，30 (4)：603－607.

[6] 朱克，李金城，王君雅，等. 潜流人工湿地冬季运行状况及脱氮除磷效果分析 [J]. 桂林工学院学报，2008，28 (S)：112－114.

[7] 朱华丽，李金城，朱克，等. 波式潜流人工湿地处理生活污水的中试效果研究 [J]. 桂林工学院学报，2008，28 (S)：76－78.

[8] 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，2002，230－359.

[9] 吴振斌，梁威，成水平，等. 人工湿地植物根区土壤酶活性与污水净化效果及其相关分析 [J]. 环境科学学报，2001，21 (5)：622－624.

[10] Reddy K R. Fate of nitrogen and phosphorus in a wastewater retention reservoir containing aquatic macrophytes [J]. Environ. Qual., 1983, 12 (1): 137－140.

Nitrogen and Phosphorus Removal from Rural Domestic Wastewater in Combined Process

XU Zhi-fen[1a,2], LI Jin-cheng[1a,1b], MO De-qing[2], QUE Guang-long[1a], LI Wen-wen[1a], SUN Xin[1a], SU Chun-liang[1a], HUANG Lang-fei[1a]

(1. a. *College of Environmental Science and Engineering*; b. *Guangxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Protection and Assessment, Guilin University of Technology, Guilin* 541004, *China*; 2. *College of Life and Environmental Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin* 541004, *China*)

Abstract: Nitrogen and phosphorus removal by "Anaerobic bioreactor + Subsurface horizontal-flow compound wetland" for rural sewage treating is studied. The total nitrogen varies from 10.3 to 51.8 mg/L, ammonia from 6.8 to 44.7 mg/L, while total phosphorus ranges from 0.9 to 5.2 mg/L in rural domestic wastewater. At anaerobic bioreactor's HRT of 24 h and artificial wetland's HRT of 48 h, the average removal efficiency for TN, ammonia and TP are 30.7%, 42.9% and 72.3%, respectively. The treatment performance ranks in a descending order as following: summer, spring and winter. The major mechanism for COD removal in combined technology is hydrolisis acidification, matrix interception and microorganism metabolism. The total nitrogen is mainly removed through microorganism function and plant absorption in artificial wetland, while the total phosphorus mainly through matrix absorption. In order to improve the overall TN removal we can set an oxygenation equipment after anaerobic bioreactor, which can improve DO in wastewater and increase the nitration ability in artificial wetland.

Key words: combined technology; rural domestic wastewater; nitrogen and phosphorus removal