

文章编号:1001-7380(2015)04-0005-06

柳林污水处理系统净化效率研究

王红玲¹,王瑞刚^{2*},施士争^{1*},王磊¹,黄瑞芳¹

(1. 江苏省林业科学研究院,江苏省农业资源保护与利用平台,江苏 南京 211153;2. 农业部环境保护科研监测所,天津 300191)

摘要:该文模拟污水土地处理系统,在太湖西山岛上某农庄营建了1个柳树特色的污水处理系统,该系统由3级慢渗带(垂直型)和1级表流湿地组成,总长度100 m,平均宽6.5 m。模拟农村实际生活污水中总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)和铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)等富营养盐浓度,人工配制污水累计290 t,在5 d内陆续灌溉到处理系统中,观测结果表明位于系统末端收集池中富营养污染物TN,TP,COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (铵态氮)去除率分别达到75.4%,99.2%,89.9%和95.4%,其中TP,COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均优于或达到五类水标准。净化效率总体呈现出随着柳林处理级数的增加,污水的净化效率也增加;同一天同一级柳林湿地不同时间段出水中TN,TP,COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度变化不明显。

关键词:柳树;土地处理系统;人工污水;总氮;总磷;化学需氧量;铵态氮

中图分类号:S792.12;X173 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2015.04.002

Research on the purification efficiency for artificial wastewater by sewage treatment system of willow

WANG Hong-ling¹, WANG Rui-gang^{2*}, SHI Shi-zheng^{1*}, WANG lei¹, HUANG Rui-fang¹

(1. Jiangsu Academy of Forestry, The Jiangsu Provincial Platform for Conservation and Utilization of Agricultural Germplasm, Nanjing 211153, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: An willow-land treatment system constructed on Xishan Island, Taihu Lake was composed by three-step series slow filtration land treatment system and primary surface-flow constructed wetland, which was totally 100 m length and averaged 6.5 m wide. The artificial sewage was prepared by simulating the rural domestic sewage on the level of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD) and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$). In 5 days, 290 t artificial sewage was irrigated successively into the new treatment system. Results showed that the quality of water from collecting tank in the end of the system was improved dramatically, and the removal rate of TN, TP, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was 75.4%, 99.2%, 89.9% and 95.4% respectively, compared with the initial sewage. Through disposing, the content of TP, COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ achieved or even exceeded the surface water quality of V Class. On the whole, purification efficiency was advanced with the increase of willow woods grade. Intraday water quality from the same grade had no significant change on the content of TN, TP, COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$.

Key words: Willow; Land treatment system; Artificial wastewater; TN; TP; COD; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

近年来,我国乡镇、农村生活污水的排放量不断增加,已成为环境污染的重要来源。据估算,2010

收稿日期:2015-04-12;修回日期:2015-07-10

基金项目:林业公益性行业科研专项资金项目“柳树能源林及环境修复兼用型新品种选育”(201204812);国家科技重大专项课题“竺山湾湖滨缓冲带生态建设与功能修复技术集成研究及工程示范”(2012ZX07101-009)。

作者简介:王红玲(1982-),女,江苏宝应人,助理研究员,主要从事柳树遗传育种研究。E-mail:whl_ling@126.com。

***通信作者:**王瑞刚,副研究员。E-mail:3761520835@sina.com;

施士争(1968-),男,江苏泗阳人,研究员,主要从事柳树栽培育种及困难立地造林技术研究。E-mail:shshzn@163.com。

年全国农村生活污水年排放总量为 270 亿 t, 主要分布在人口密集的东部和中部地区^[1], 为避免或减轻污水危害, 急需切实有效的净化处理措施。生物修复技术因其安全、高效、低成本、易操作等优点, 成为污水拦截和净化的主要措施之一。污水土地处理系统是一种污水生物净化系统, 污水通过灌溉作物、林地或草地得到净化, 其工艺类型主要包括快速渗滤、慢速渗滤、地表漫流、地下渗滤和湿地系统等 5 种^[2], 在国外已得到成熟应用^[3-4], 具有成本低廉, 管理维护简单, 环境生态效益好等优势, 可供我国农村生活污水处理参照^[5]。

由于我国土地资源紧张, 污水灌溉农作物又存在食物安全隐患^[6], 因此更应关注利用林地进行污水处理, 用于修复的树种主要有杨树、柳树、桉树、柑桔、葡萄等^[7-8]。其中柳树因易栽培、生长迅速、适应性和耐性强等特性, 尤其适用于农村生活污水处理, 瑞典、丹麦、法国等地均有较成熟的应用^[9-10], 而国内关于柳树应用于处理污水的报道很少^[11]。江苏省林业科学研究院柳树研究所保存和选育了丰富的柳树资源, 为我国利用柳树进行农村污水土地处理系统的研究、应用及推广奠定了基础^[12]。为此, 本文以自主选育的高生物量灌木柳树优良无性系和乡土乔木柳腺柳为试验材料, 模拟传统土地处理系统, 构建以灌木柳林慢渗带和腺柳林表流湿地为主体的柳树特色生活污水处理系统, 并开展了其对人工配制污水净化效果的研究, 为我国柳树土地处理系统净化农村生活污水提供依据。

1 材料和方法

1.1 柳林生活污水处理系统的构建

2012 年初, 在位于苏州吴中区西山岛金庭镇某生态农庄内营建柳树生活污水处理系统, 占地共计约 1 334 m², 由垂直型一、二、三级灌木柳林慢渗带和腺柳林表流湿地 4 部分组成。系统呈带状, 宽 6.5 m, 三级慢渗带长分别为 35, 20, 25 m, 表流湿地长 20 m (如图 1)。慢渗带中加布管道, 带内土深 40 cm, 底部和管道周边布石质, 引导污水经过整个林带; 用水泥混凝土砌边, 使过滤带成为半封闭系统。

用于营建慢渗带的高生物量灌木柳树无性系为无性系 2413、51-3、2396, 以及苏柳 1053 和苏柳 2345 等, 分别为簸杞柳、杞柳、二色柳、银柳等的杂交后代; 表流湿地因常年处于高水位, 采用苏州西山岛种源的腺柳 (乔木) 插干造林。一级和二级慢渗带中

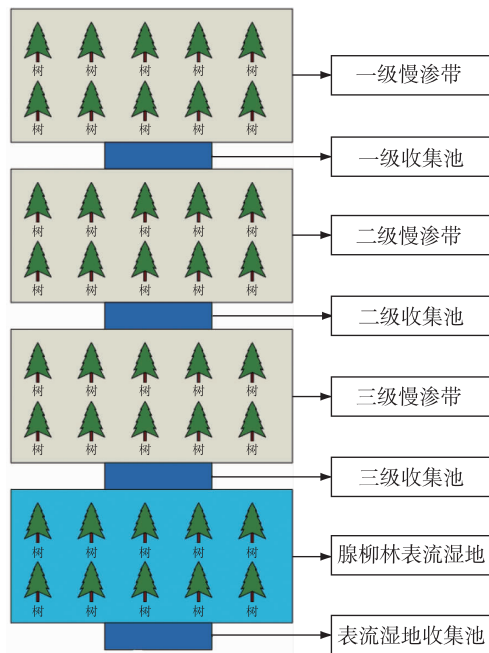


图 1 柳林生活污水处理系统示意图

灌木柳的栽植密度为 30 cm × 20 cm, 三级栽植密度为 40 cm × 20 cm, 表流湿地柳树栽植密度为 50 cm × 40 cm。污水灌溉前, 一级、二级和三级柳林长势基本一致, 株高 150 ~ 200 cm, 平均存活率约 92%; 表流湿地柳树为乔木柳树, 常年淹水, 长势较弱, 株高 120 cm 左右, 存活率约 75%。

1.2 人工生活污水的配制

参考农村实际生活污水浓度, 配制灌溉用生活污水, 污水中 COD 质量浓度为 335 mg/L, TN 质量浓度为 65 mg/L, TP 质量浓度为 23.8 mg/L; 其中 COD 以葡萄糖配制, 1 mg/L 葡萄糖等同于 1 mg/L COD, 氮源为 NH₄Cl (化学纯), 磷源为 K₂HPO₄ · 3H₂O (化学纯)^[13]。生活污水中的 N 主要是有机氮和铵态氮为主, 在 pH 低于 8 的环境中, 铵态氮所占比例超过 90%, 故本文以铵态氮作为主要氮源。

1.3 污水灌溉和取样方法

污水灌溉从 7 月 17 日开始, 7 月 21 日止; 水样采集止于 22 日。试验开始时, 试验地土壤含水率约为 20%, 按土壤饱和含水率 60% 估算 (土壤容重约为 1.4 g/cm³), 总灌溉量应不超过 290 t。为防止流速过快影响处理效率, 将灌溉速度控制在 4 ~ 5 t/h, 每天 7:00 开始灌溉, 每天连续灌溉时间不高于 12 h, 污水在系统内停留时间不低于 12 h。污水均提前配制, 并在发酵池中停留 8 ~ 10 h。连续灌溉 5 d, 每天灌溉量分别为 50, 60, 60, 46, 30 t; 前 3 d 为连续灌溉,

后2 d为间断性灌溉,即灌溉1~2 h,暂停3~4 h。

设立2种水样采集方式,一是灌溉期间出水口水质实时监测,即灌溉期间,从出水口出水开始计时,每3~4 h取样1次,实时采集各级林地出水口的水样,7月17日开始,7月21日止;每次采样间隔5 min,采集3次,作为重复。二是灌溉期内各级水质的日变化,即每天7:00采集3级收集池和表流湿地收集池的水样,7月18日开始,7月22日止;每次在各收集池的3个不同部位采集。

1.4 污水水质测定方法

污水水质测定参照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行^[14],具体分析方法为:TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,TP采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法,COD采用重铬酸钾消解-硫酸亚铁铵滴定法, NH_4^+ -N采用纳式试剂-可见分光光度法。柳树污水处理系统净化效率以末端腺柳林表流湿地收集池水质和进水水质进行计算。

1.5 数据分析

对比人工配制污水营养盐的起始浓度,采用 excel 2010 对数据进行比较分析,得出柳树污水系统对富营养盐的净化效率,并绘制图表。

2 结果与分析

2.1 灌溉期间出水口水质连续变化情况

2.1.1 出水中 TN 浓度变化情况 经过慢渗带处理后,人工配制的污水中 TN 的含量出现明显的降低,第2,3,4,5 d的最后1次取样时(即第33,56,80,103 h),第三级慢渗带出水口 TN 分别比对照降低了81.5%,53.8%,60.0%和55.4%(如图2所示)。在5 d的处理过程中,总体呈现出随着林带处理级数的增加,污水中 TN 的净化效率也增加。以每天最后1次出水采集样为例,第2,3,4,5 d第三级慢渗带出水中 TN 含量分别是第一级的22.6%,48.4%,27.7%和33.7%。处理第2,3 d时,三级慢渗带出水口 TN 含量均小于进水,且同一级慢渗带不同时间段出水中 TN 含量变化不明显;随着处理天数的增加,在处理后的第4,5 d,第一级慢渗带出水中的 TN 含量均接近或大于进水,第二级中 TN 含量均小于进水(除第80 h和第90 h)。

2.1.2 出水中 TP 浓度变化情况 经过慢渗带处理后,人工配制的污水中 TP 的含量出现明显的降低,第33,56,80,103 h,第三级慢渗带出水口 TP 分

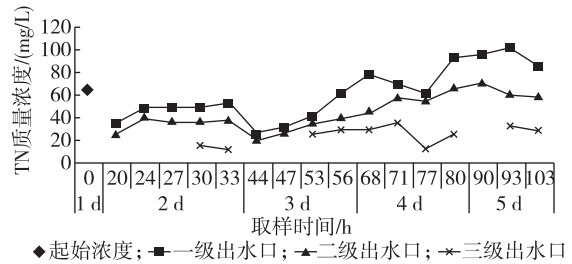


图2 3级灌木柳林慢渗带出水中的TN质量浓度

别比对照降低了91.6%,91.1%,83.6%和84.9%。在103 h的处理过程中,污水中 TP 的净化效率变化不明显。以每天最后1次出水为例,第2,3,4,5 d第三级慢渗带出水的 TP 量分别是第一级出水的30%,17%,22%和23%。同一天同一级柳林湿地不同时间段出水中 TP 变化不明显(如图3所示)。

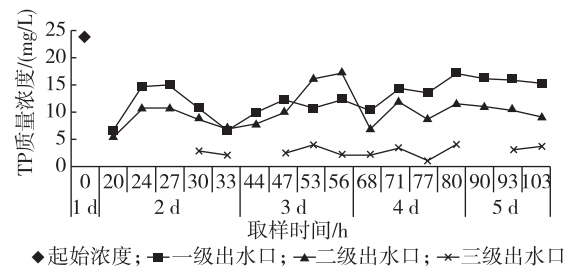


图3 3级灌木柳林慢渗带出水中的TP质量浓度

2.1.3 出水中 COD 浓度变化情况 经过慢渗带处理后,人工配制的污水中 COD 的含量出现明显的降低,第33,56,80,103 h,第三级慢渗带出水口 COD 分别比对照降低了62.4%,65.4%,73.4%和72.5%。在5 d的处理过程中,总体呈现出随着慢渗带级数的增加,污水中 COD 的净化效率也增加。以每天最后1次出水为例,第2,3,4,5 d第三级慢渗带出水的 COD 量分别是第一级出水的70.8%,70.7%,38.4%和42.9%。同一天同一级慢渗带不同时间段出水中 COD 变化不明显(如图4所示)。

2.1.4 出水中 NH_4^+ -N 浓度变化情况 如图5所示,经过慢渗带处理后,人工配制的污水中 NH_4^+ -N 的含量出现明显的降低,第33,56,80,103 h,第三级慢渗带出水口 NH_4^+ -N 含量分别比对照降低了53.8%,61.5%,57.7%和76.9%。在5 d的处理过程中,总体呈现出随着处理级数的增加,污水中 NH_4^+ -N 的净化效率也增加。以每日最后1次出水为例,第2,3,4,5 d第三级慢渗带出水的 NH_4^+ -N 含量分别是第一级出水的75.3%,71.4%,64.7%

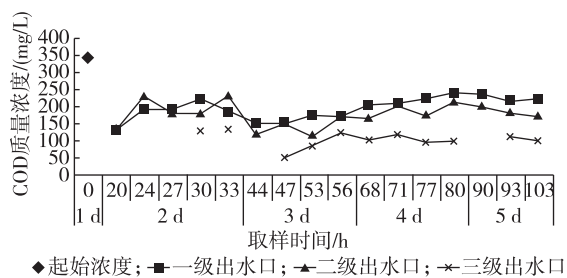
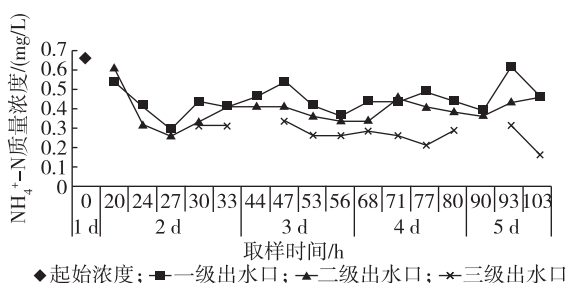


图 4 3 级灌木柳林慢渗带出水中 COD 的质量浓度

和 33.3%。同一天同一级慢渗带不同时间段出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 变化规律不明显。

图 5 3 级灌木柳林慢渗带出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的质量浓度

2.2 灌溉期内各级水质的日变化情况及净化效率

如图 6 所示,经过三级灌木柳林慢渗带(垂直型)和腺柳林表流湿地的逐级净化,其一、二、三级慢渗带收集池和腺柳林表流湿地收集池水体中 TN, TP, COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量逐渐降低,96 h 净化处理后,一、二、三级慢渗带收集池以及腺柳林表流湿地收集池水体中 TN 含量分别为 43, 36, 17, 16 mg/L, 与对照相比分别降低 33.8%, 44.6%, 73.8%, 75.4%; TP 含量分别为 3.7, 3.0, 2.5, 0.19 mg/L, 与对照相比分别降低 84.4%, 87.4%, 89.5% 和 99.2%; COD 含量分别为 76, 80, 66, 34 mg/L, 与对照相比分别降低 77.3%, 76.1%, 80.3%, 89.9%; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分别为 0.1, 0.15, 0.05, 0.03 mg/L, 与对照相比分别降低 84.6%, 76.9%, 92.3% 和 95.4%。除 TN 外,腺柳林表流湿地收集池水体中的 TP, COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均达到或优于五类水质标准^[15], 所有指标均优于或达到国家准排标准^[16]。

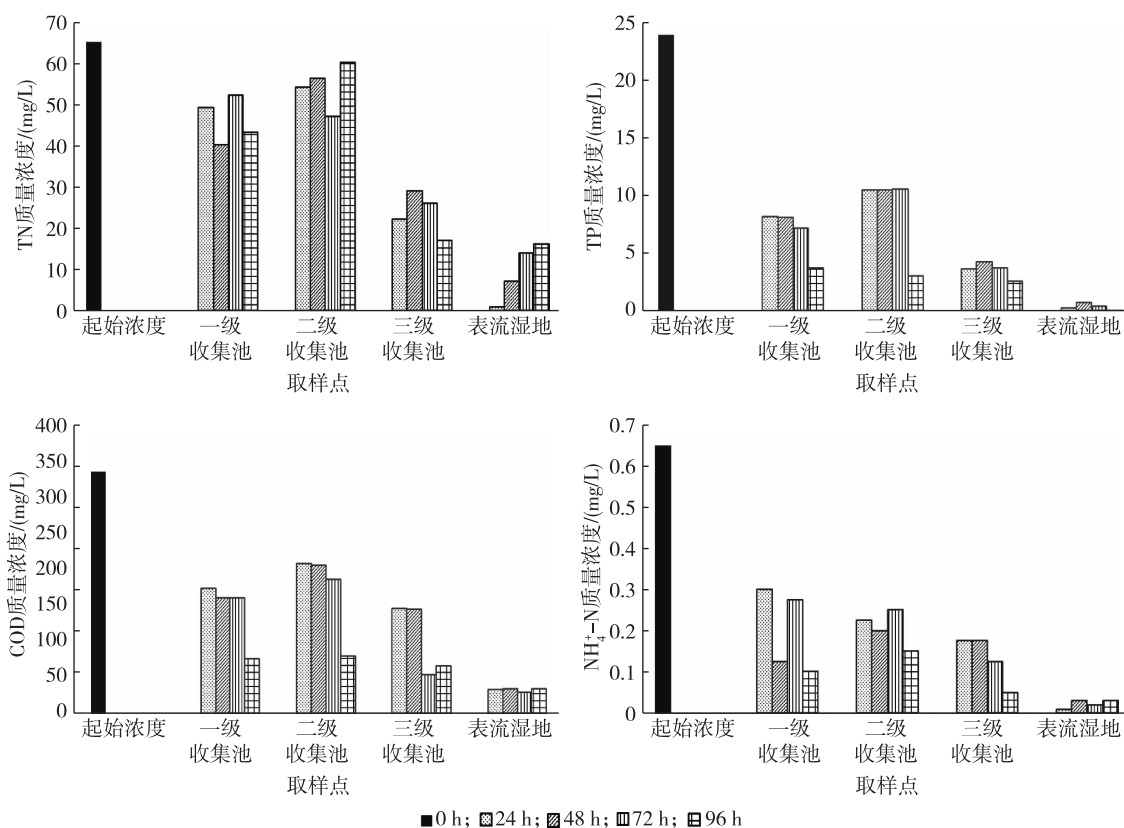


图 6 柳树污水处理系统各级出水水质的变化

96 h 净化处理后,整个污水处理系统末端腺柳林表流湿地收集池水体中 TN,TP,COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别达到 75.4%,99.2%,89.9% 和 95.4%,除 TN 的去除率随着处理时间有小幅降低外,其他指标在 96 h 的处理时间内变化不明显(如图 7 所示)。

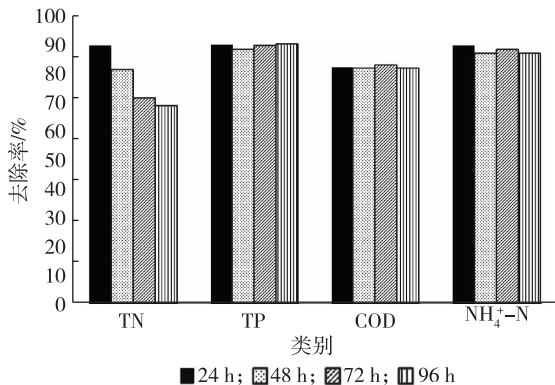


图7 柳树污水处理系统对人工配制污水的净化效率

3 讨论

污水土地处理系统主要是利用土壤、植物、微生物等相互作用,从土表层到土壤内部形成了好氧、缺氧和厌氧的多项系统,使各种污染物质在不同的环境中发生作用,最终达到去除或削减污染物的目的^[2]。污水土地处理系统去除 TN,TP, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 COD 的高效性,与其他传统工程措施相比最具显著的优势。

硝化—反硝化脱氮作用、氮素挥发和作物吸收是土壤—植物系统中氮的主要去除途径^[17-18]。北京某小区土壤毛细管渗滤系统建成运行 6 a 的结果表明,系统对生活污水中有机物、氮和磷的去除率较高,其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率大于 90%^[19]。本文实时监测结果显示,经过灌木柳林慢渗带处理后,各时间段第三级柳林慢渗带出水口水体中 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率均超过了 53.8%,并呈现出随着处理级数的增加,污水的净化效率也随之增加的趋势。日监测结果显示,5 d 连续灌溉的污水,经过 3 级灌木柳林慢渗带(垂直型)和腺柳林表流湿地的逐级净化后,腺柳林表流湿地出水中 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率达到 75.4% 和 95.4% (绝对浓度达到 16.0,0.03 mg/L),对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的处理效果更佳。但随着处理时间的延长,系统对人工污水中 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的净化能力有所下降,可能与污水灌溉量大有关,使柳林土地经常处于一个满水厌氧条件,降低了其好氧处理

能力。

污水土地处理系统中磷的去除主要是通过土壤吸附后与土壤中钙、铝、铁等离子发生沉淀反应,被铁、铝氧化物吸附去除和植物吸收利用。土地处理系统对 TP 的去除率几乎维持在 80% 以上,最高可达 95%,且几乎所有污水土地处理系统常年运行后均未出现磷吸附饱和现象^[20-22]。例如,贵州黄壤的实验工艺中,土壤的固磷和除磷明显高于其他生物除磷工艺,而且运行较稳定^[23]。本研究结果显示,经过 5 d 连续污水灌溉后,3 级慢渗带对 TP 的处理效果均能达到 83.6%,且经过慢渗带和表流湿地处理后,5 d 的总体去除效果为 99.2% (绝对浓度达到 0.19 mg/L),优于五类(0.4 mg/L)。这说明本研究构建的污水处理系统对 TP 的处理效果很好,和前人的研究结果相似^[23]。

土地处理系统对有机物,特别对可降解有机物的净化能力较强,污水中的有机质进入土壤后,首先通过过滤、吸附作用被截留下来,然后通过生物氧化作用将其降解。李海军^[24]与澳大利亚科学与工业组织(CISCO)对新型渗滤土地处理系统进行的实验结果表明:渗滤系统通过土壤的生物、物理、化学作用,使 COD 的去除率达到 70%;从沈阳西部慢滤系统几年的运行数据看,对 COD 的去除率达 87.8%^[18]。本研究实时监测结果显示,连续 5 d 灌溉的污水,3 级慢渗带(垂直型)对 COD 处理效果均达到了 62.4%;日监测也显示,在经过 3 级慢渗带和表流湿地的逐级净化后,表流湿地收集池水体中 COD 的去除率达到了 89.9%。这表明整个柳林污水处理系统对人工污水中 COD 的处理效果很好,达到并超过了前人报道的净化效果^[19],但随着处理时间的延长,其对 COD 的处理效果有所降低,可能灌溉污水的量太多导致好氧微生物失效有关。

各级出水口实时监测中一级和三级富营养盐含量比较分析表明,TN 和 TP 的拦截主要集中在第一级,而 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的拦截在 3 级慢渗带中相对比较平均。随着林带的延长,富营养盐去除效率越高,日监测结果显示二级收集池富营养浓度最高,说明 2 级柳林慢渗带不足以满足此类级别污水浓度的修复效率,经 3 级柳林慢渗带处理后,基本能达到或优于城镇二级污水处理厂排放标准,增加下游的腺柳林表流湿地后,基本能达到五类水标准。

4 结论

3 级灌木柳林慢渗带和腺柳林表流湿地对 TN,

TP, COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率 75.4%, 99.2%, 89.9%, 95.4%; 对 TP 和 COD 的处理效果好于 TN 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$; 净化效率总体呈现出随着柳林处理级数的增加, 污水的净化效率也增加; 整个处理系统在 5 d (污水 200 t) 的处理过程中对水质的控制比较稳定。

参考文献:

- [1] 王青颖. 中国农村生活污水处理技术应用现状及研究方向[J]. 污染防治技术, 2007, 20(5): 37-41.
- [2] 杨文涛, 刘春平, 文红艳. 浅谈污水土地处理系统[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 394-397.
- [3] Belila A, Ghrabi A, Hassen A. Molecular analysis of the spatial distribution of sulfate-reducing bacteria in three eutrophicated wastewater stabilization ponds [J]. Annals of Microbiology, 2010, 61(3): 563-573.
- [4] 陈 艺, 陈 昕. 用土壤法进行生活污水的深度处理[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 87-90.
- [5] 孙海如, 周虎城, 王俊玉. 村镇生活污水处理技术整合研究[J]. 给水排水, 2006, 32(7): 23-25.
- [6] 齐学斌, 钱炬炬, 樊向阳, 等. 污水灌溉国内外研究现状与进展[J]. 中国农村水利水电, 2006(1): 13-15.
- [7] 邵志鹏, 苗香雯, 崔绍荣. 利用污水灌溉树木的研究进展[J]. 世界林业研究, 2002(5): 26-32.
- [8] 白保勋, 樊 巍, 杨海青, 等. 生活污水慢渗对“中林 2001”杨树人工林生长的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1403-1408.
- [9] 徐芝生. 瑞典利用柳树进行污水治理[J]. 湿地科学与管理, 2006, 2(2): 56-57.
- [10] Brix H. Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onside treatment of domestic sewage; proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Avignon, France, September 26 - 30, 2004[C].
- [11] WU S B, Austin D, Liu L, et al. Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(6): 948-954.
- [12] 施士争. 以柳树为原料的生物质能源产业链探讨[J]. 江苏林业科技, 2007, 34(2): 46-50.
- [13] 楚伟伟. 波形潜流人工湿地处理模拟生活污水的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010, 17.
- [14] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法, 3 版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [15] 国家环境保护总局. GB 3838 - 2002 中华人民共和国地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 国家环境保护总局. GB 18918 - 2002 城镇生活污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] Kadlec R H, Tanner C C, Hally V M, et al. Nitrogen spiraling in subsurface-flow constructed wetlands: Implications for treatment response [J]. Ecological Engineering, 2005, 25(4): 365-381.
- [18] Huett D O, Morris S G, Smith G, et al. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands [J]. Water Research, 2005, 39(14): 3259-3272.
- [19] 田宁宁, 杨丽萍, 彭应登. 土壤毛细管渗滤处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2000, 16(5): 12-15.
- [20] 张 建, 黄 霞, 施汉昌, 等. 地下渗滤系统在污水处理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(4): 22-25.
- [21] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. Science of The Total Environment, 2007, 380(1-3): 48-65.
- [22] 张笑一, 史 莉, 彭润芝, 等. 地沟式污水土地处理和人工湿地中植物对磷去除的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 151-153.
- [23] 台培东, 宋玉芳, 李培军, 等. 地下渗滤污水土地处理系统中主要温室气体 CH_4 和 NO_2 的排放和控制研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(增): 77-80.
- [24] 李海军. 阳高县 FILTER 污水土地处理系统应用效果分析[J]. 山西水利科技, 2006(4): 17-19.
- [15] 张晓磊, 马风云, 陈益泰, 等. 水胁迫下不同种源麻栎生长与生理特性变化[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(3): 16-19, 33.
- [16] 唐罗忠, 徐锡增, 方升佐. 土壤渍涝对杨树和柳树苗期生长及生理性状影响的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(5): 471-474.
- [17] 唐罗忠, 徐锡增, 程淑婉. 淹水胁迫对杨树生物量及生理性状影响的比较[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(2): 14-18.
- [18] 邹 琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.

(上接第 4 页)

- [11] 张银龙, 王月茜, 王亚超, 等. 南京市典型森林群落枯枝落叶层的生态功能研究[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 11-14.
- [12] 郁 慧, 刘中亮, 胡宏亮, 等. 干旱胁迫对 5 种植物叶绿体和线粒体超微结构的影响[J]. 植物研究, 2011, 31(2): 152-158.
- [13] 郝蓬莱, 张金平, 韩新英, 等. 干旱胁迫对麻栎无性系蒸腾作用的影响[J]. 林业科技开发, 2012, 26(3): 62-65.
- [14] 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1021-1029.