

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.039

局部循环供氧生物膜技术处理分散污水脱氮除磷分析

赵秋^{1,2} 吴迪² 钱姗² 高贤彪² 孙向阳¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 天津市农业资源与环境研究所, 天津 300192)

摘要: 针对现代农业科技示范区污水特点, 在处理农村生活污水的“两级回流连续供氧生物膜”工艺基础上设计“两级交替回流局部循环供氧生物膜”工艺, 并对该工艺处理分散污水的脱氮除磷效能进行了实际应用研究。系统采用沉淀池和循环池交替回流技术, 简化调节池为集水池, 改造水解酸化池为水解酸化调节池, 在平均处理量100 t/d, 水力停留时间(HRT)为2 d的情况下, 稳定运行2 a结果表明: 工艺对有机污染物、NH₃-N、总氮和总磷的去除率分别为71.6%、64.4%、45.5%和72.0%; 出水有机污染物、NH₃-N、总氮和总磷的平均质量浓度分别为15.3、9.2、17.2、0.8 mg/L, 出水符合城镇污水处理厂污染物排放(GB 18918—2002)一级B标准。进水有机污染物与总氮比值、有机污染物与总磷比值与总磷、有机污染物和NH₃-N去除率呈正相关关系, 与总氮去除率呈负相关关系。实践证明, 该工艺对波动较大的冬季低温期及复杂水质期高冲击、高负荷的特殊分散污水具有较好的脱氮除磷和有机物去除能力。

关键词: 分散污水; 局部循环供氧; 生物膜; 两级交替回流; 脱氮除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)02-0294-06

Nitrogen and Phosphorus Removal Effect of Decentralized Sewage Treatment Using Biofilm Technology with Integration of Local Circulating and Oxygen-supply

ZHAO Qiu^{1,2} WU Di² QIAN Shan² GAO Xianbiao² SUN Xiangyang¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin 300192, China)

Abstract: Simultaneous nitrogen and phosphorus removal performance of a kind of biomembrane process integrated with partial circulatory aeration and two-stage treated water returning alternately was studied by utilizing the technology to treat typical decentralized wastewater from Modern Agricultural Science and Technology Innovation Base in Tianjin. The system with a total effective volume of 234 m³ was composed of collecting tank, hydrolysis acidification balance tank, partial aerobic tank, secondary sedimentation tank and circulation tank. Sewage pumps in collecting tank were controlled by PLC automatic control system. Sludge pumps in secondary sedimentation tank worked 10 min every 2 h controlled by PLC automatic control system. Circulating water pumps in circulation tank controlled by PLC automatic control system could maintain necessary water flowing when inflowing and sludge returning were simultaneously stopped. The nominal air delivery of clover roots blowers in equipment room was 2.0 m³/h. Hydrolysis acidification balance tank and partial aerobic tank were both filled with combined bio-carrier at a filling height of 2 m and the filling percentage and hydraulic load of the two tanks were 60%, 1.25 m³/(m³·d) and 70%, 2.0 m³/(m³·d), respectively. The operation of the whole system was controlled by PLC. Pumps for inflow worked intermittently and total time of it's working was 6 h every day. Aeration was continuous and partial. Since June, 2013, the test running was completed, the system was always operating formally in the way of intermittent inflow, partial aeration and alternate wastewater return. The raw decentralized wastewater was discharged from office building, research activities building, expert floor, restaurant, guest house and industry incubator and except for those from restaurants and toilets, which were firstly discharged into oil separation tank and septic tank for pre-treating, the most was

收稿日期: 2016-06-29 修回日期: 2016-08-08

基金项目: 天津市科技支撑项目(14ZCZDNC00019)和天津市农转资金项目(201101037)

作者简介: 赵秋(1977—),女,博士生,天津市农业资源与环境研究所副研究员,主要从事废弃物利用研究,E-mail: qiu Zhao_2008@163.com

通信作者: 吴迪(1977—),男,副研究员,主要从事污水处理研究,E-mail: wudi_1008@163.com

discharged directly into the system to treat. The designed treating capacity of this system was $150 \text{ m}^3/\text{d}$ and the maximum influent quantity, minimum influent quantity and average influent quantity in reality was $140 \text{ m}^3/\text{d}$, $80 \text{ m}^3/\text{d}$ and $100 \text{ m}^3/\text{d}$, respectively. The return ratio was controlled at 2:1 by PLC. Through long term operation of two years, the results showed that the average removal percentages for BOD_5 , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP were 71.6%, 64.4%, 45.5% and 72.0%, respectively, and the average effluent concentrations of BOD_5 , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP were 15.3 mg/L, 9.2 mg/L, 17.2 mg/L and 0.8 mg/L, respectively. It was indicated that the quality of treated effluent was up to "Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant" level 1B and treated water can be used as irrigation water. Nitrogen and phosphorus removal function was also well established when treating decentralized wastewater with high fluctuation and high loading. And it was further observed that removal percentages for BOD_5 , $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP were increased with the increase of BOD_5/TN and removal percentage for TN was decreased with the increase of BOD_5/TN and BOD_5/TP , while TN/TP was not one of main contributors to affecting removal percentage of BOD_5 , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP.

Key words: decentralized sewage; partial circulating oxygen-supply; biofilm; two-stage alternate return; nitrogen and phosphorus removal

引言

分散污水(新农村、旅游景区、观光园区、农业示范区等地的污水)具有高氮磷的特点,对河流湖泊等受纳水体造成严重污染,使其成为我国现阶段面源污染的主要污染源之一^[1-4]。

目前,我国分散污水处理技术(如一体化脱氮除磷污水净化装置^[5]、小型合并处理净化槽^[6]、“分散处理系统”、“菲尔托”技术、一体化集成净化装置等^[7-10]) 在氮、磷去除方面很难达到排放标准。而人工湿地和人工复合生态床等处理技术也存在有机负荷低、处理效果受季节影响大和日常维护难等缺点^[11-12]。

水资源供需矛盾在京津冀地区更加突出,因而再生水被广泛用于农业灌溉、景观水体、绿化、养殖等领域,尤其是补充景观水体和生态河道成为现阶段利用的主要方面,这对出水的氮、磷提出了更高要求^[13-14]。

本文所用工艺为自主开发的“两级交替回流局部循环供氧生物膜”工艺,本工艺是在处理农村生活污水的“两级回流连续曝气生物膜”工艺基础上开发的新工艺^[15]。本文以实际运行的污水处理站为研究对象,探讨间歇进水条件下,新工艺对有机物和氮、磷的去除效果。

1 材料与方法

1.1 试验装置

天津现代农业科技创新基地位于天津市武清开发区西侧,距离市区较远,产生的污水无法纳入市政管网,属于典型的分散污水。基地占地 200 hm^2 , 日常工作人员 300 余人,高峰期可达 1 200 人,污水主要由行政办公、实验室、专家楼、宿舍、餐厅和中试孵

化 6 个区域产生。整个污水处理工程示意图如图 1 所示。

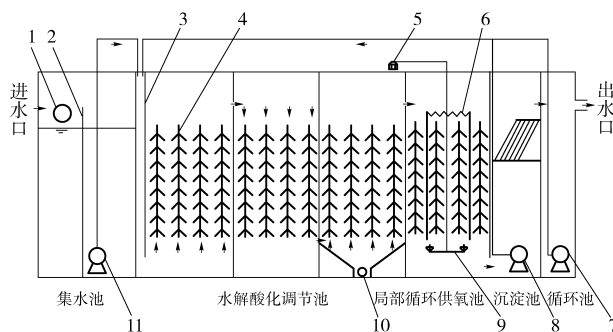


图 1 工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of combined process of experimental tanks

1. 泄洪管 2. 格栅 3. 布水板 4. 生物填料 5. 鼓风机 6. 环形导流板 7. 水泵 8. 污泥泵 9. 曝气系统 10. 排泥口 11. 污水泵

污水处理站总有效容积为 234 m^3 , 设计最大处理能力为 $150 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均进水量为 $100 \text{ m}^3/\text{d}$, 水力停留时间约为 2 d (HRT)。其中, 集水池 33.6 m^3 、水解酸化调节池 120 m^3 、局部循环供氧池 75 m^3 、沉淀池 27 m^3 、循环池 14.4 m^3 。污水泵、污泥泵为南方泵业有限公司生产的 50WQ20-15-2.2 型; 水泵为 50WQ15-15-1.5 型; 三叶罗茨鼓风机为章冕鼓风机有限公司生产的 SSR-65-3 型, 其转速为 $1530 \text{ r}/\text{min}$; 风量 $2.0 \text{ m}^3/\text{min}$, 2 台罗茨鼓风机交替工作。污泥泵每 2 h 工作 10 min, 水泵保证系统在无进水和污泥回流情况下的正常水力推流。全部操作均由 S7-200 型 PLC 控制中心(西门子电气集团有限公司)进行控制。

1.2 试验水质指标

试验进水时间 2013 年 7 月—2015 年 6 月。进水水质比农村生活污水复杂^[16], 具体水质指标为有

机污染物质量浓度 33.2 ~ 166.7 mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度 14.2 ~ 50.4 mg/L、总氮质量浓度 22.6 ~ 62.2 mg/L、总磷质量浓度 1.835 ~ 6.96 mg/L、pH 值为 6.5 ~ 8.1。

1.3 试验设计与运行管理

该项目于 2013 年 4 月建成后,于 2013 年 6 月完成设备运行工况的调试,在调试过程中一直以间歇进水、局部供氧、交替回流方式运行。试验从 7 月开始分别在每月中旬采集一次出水样和进水样,分别为 500 mL,连续采集 24 个月,样品冷冻保存。

试验设计最大处理量为 150 m^3/d ,实际最大进水量为 140 m^3/d ,最小进水量为 80 m^3/d ,平均进水量为 100 m^3/d ;系统采用沉淀池和循环池交替回流,PLC 自动控制,调节回流比为 2:1;水解酸化调节池和局部循环供氧池组合填料填充深度均为 2.0 m,填充率分别为 60% 和 70%,水力负荷分别为 1.25 $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 和 2.0 $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。进水方式为液位自动控制间歇进水,污水泵工作时间约 6 h/d。曝气方式为连续局部供氧,污泥泵工作频率为每 2 h 工作 10 min,水泵保证系统在无进水和污泥回流情况下的正常水力推流。

1.4 测定项目及方法

有机污染物质量浓度采用稀释与接种法测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度利用流动分析仪测定;pH 值利用 pH-HJ90B 型酸度剂测定;总磷质量浓度采用钼酸铵分光光度法测定;总氮质量浓度测定参照文献[17]。

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 软件进行统计分析和制图,用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,LSD 法作多重比较。

2 结果与讨论

通过有机污染物质量浓度、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度、总氮质量浓度和总磷质量浓度 4 项指标的监测数据总结其运行规律并对可能影响其运行效果的因素进行分析。

2.1 对有机污染物的去除效果

如图 2 所示,局部循环供氧一体化生物膜工艺对进水波动较大的分散污水有机污染物有较好的去除效果,并具有良好的稳定性。2 a 运行期有机污染物去除率维持在 47.6% ~ 90.9% 之间,平均去除率为 71.6%,显著高于两级回流连续曝气工艺的 63.7%;出水有机污染物质量浓度稳定在 6.5 ~ 23.6 mg/L 之间,平均值为 15.3 mg/L,优于改造前的有机污染物 20.8 mg/L。对于波动强、高有机物

污水处理约 18 个月时间有机污染物去除率稳定在 75% 以上,有机污染物质量浓度稳定在 13.6 mg/L 以下。该工艺的高度稳定性和处理效果得益于两方面:第一,水解酸化调节池和局部供氧池进水频率改变,即污水泵启停频次由每天 10 次增加到 20 ~ 25 次,启动时间由每次 30 min 缩短至 10 ~ 12 min,进水量由每次 15 m^3 降低到 5 m^3 ,缓解了瞬间大量进水对系统的冲击,对系统工作的稳定性起到关键性的作用;第二,水解酸化调节池组合填料腐解微生物与泥水循环系统回流污泥协同作用促进了有机物的截流与降解功能,同时加速了反硝化进程。史明明等^[18]也认为腐解微生物是消耗碳源的重要条件。

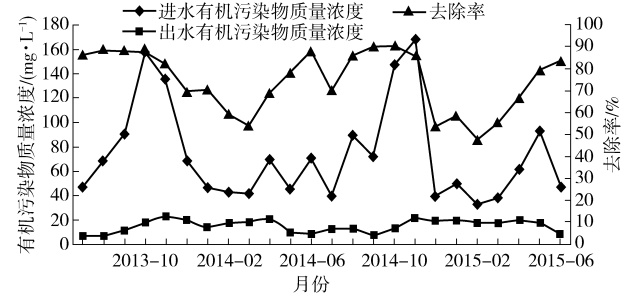


图 2 有机污染物去除效果

Fig. 2 Monthly variation of BOD₅ removal performance

运行期间,有 2 个特殊时期,分别为冬季低温期(12 月、1 月、2 月、3 月)和水质复杂期(10 月和 11 月)。冬季低温期(进水量和有机物含量均为全年最低水平)有机物平均去除率为 58.6%,低于全年平均值。分析原因,冬季进水温度逐渐降低,微生物新陈代谢速率下降使系统对有机物去除率降低。HE 等^[19]研究认为低温导致微生物功能下降。水质复杂期有大量中试孵化区企业排放的废水,虽然进水有机污染物平均质量浓度(151.9 mg/L)远高于整个监测期平均值(65.9 mg/L),但出水有机污染物平均质量浓度达到了城镇污水处理厂排放一级 B 标准,为 19.4 mg/L。说明现有工艺对可生化废水具有较强的处理能力。

2.2 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总氮的去除效果

由图 3、4 可以看出,监测期间进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均

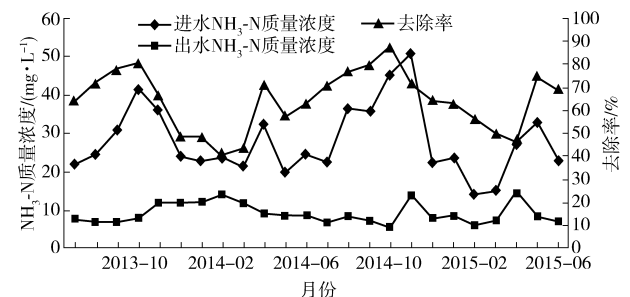


图 3 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果

Fig. 3 Monthly variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ removal performance

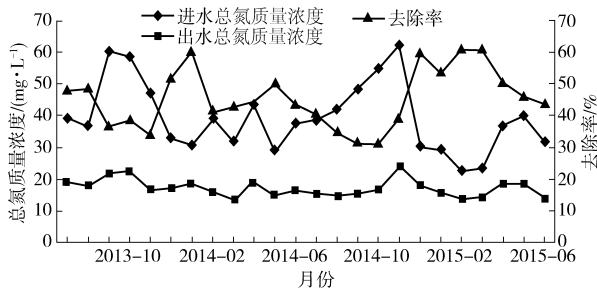


图 4 总氮去除效果

Fig. 4 Monthly variation of TN removal performance

质量浓度为 28.0 mg/L,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均质量浓度为 9.2 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率为 64.4%;进水总氮平均质量浓度为 39.4 mg/L,出水总氮平均质量浓度为 17.16 mg/L,总氮去除率为 45.5%。虽然进水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总氮质量浓度波动较大(进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为 14.2 ~ 50.4 mg/L,总氮质量浓度为 22.6 ~ 62.2 mg/L),但是出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度维持在 15.0 ~ 17.0 mg/L 之间、总氮质量浓度维持在 19.0 ~ 21.0 mg/L 之间,保持相对稳定的状态。

分散污水中氮主要以有机氮的形式存在,水解酸化调节池内的氨化菌以污水中有机物为碳源和能源,将有机氮分解为 $\text{NH}_3\text{-N}$;局部循环供氧池的好氧段(曝气系统上方、局部循环供氧池中间区域)的硝化细菌和亚硝化细菌联合作用将 $\text{NH}_3\text{-N}$ 氧化为亚硝态氮和硝态氮;局部循环供氧池的缺氧段(局部循环供氧池非曝气区域)的反硝化细菌再以硝态氮和亚硝态氮为电子受体,利用水解酸化调节池分解后的有机物和进水直接分流到此区域的有机物(水解酸化调节池与局部循环供氧池缺氧段进水比例为 1:5)为碳源和能源将硝态氮和亚硝态氮还原为气态氮(N_2)排出系统实现氮的脱除^[20]。使有机物在反硝化过程中被大量消耗,为硝化细菌的生长提供了条件^[21-22]。该系统中的生物膜和污泥回流工艺联合作用促进了碳源生成、无氧条件和硝酸盐的积累,从而达到脱氮目的。

进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总氮最高峰和最低峰分别在水质复杂期和冬季低温期出现,与有机物变化规律相同。

冬季低温期 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率 51.9%,低于全年平均值(64.4%);出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均质量浓度为 10.1 mg/L,高于监测期间出水平均值 9.2 mg/L。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除是由硝化细菌(亚硝化细菌)作用完成的,硝化细菌和亚硝化细菌是一类化能无机微生物,系统中的有机物(碳源)对其有抑制作用。冬季低温期,系统中大量以有机物为能源微生物活性降低,导致有机物在系统内积累,部分有机物进入局部循环供氧池好氧区,使硝化细菌和亚硝化细菌失去竞争优势,致使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除能力降低。

冬季低温期总氮平均去除率 53.9%,高于全年平均值(45.5%);出水总氮质量浓度平均值为 15.9 mg/L,低于监测期间出水平均值 17.2 mg/L。总氮的去除最终由反硝化细菌反硝化作用脱除,反硝化细菌是一类化能有机微生物,在将硝态氮、亚硝态氮反硝化为氮气(N_2)的过程中需要大量有机物作为碳源和能源。系统中存在大量生物膜和活性污泥,低温期利用有机物的微生物(水解酸化调节池)活性降低,为反硝化细菌利用有机物提供了条件,同时,水解酸化调节池与局部循环供氧池缺氧区进水分配比例为 5:1,为局部循环供氧池缺氧区的反硝化细菌提供了较为充足的碳源,再加上进水总氮普遍偏低,使其去除率比整个监测期间平均去除率高。

水质复杂期由于有大量中试孵化区企业排放的有机废水,其进水总氮平均质量浓度为 55.7 mg/L,比整个监测期间进水总氮平均值(39.4 mg/L)高 41.3%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均质量浓度为 43.3 mg/L,比整个监测期间进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均值(28.0 mg/L)高 55.0%。而经过本工艺处理后,水质复杂期的出水总氮质量浓度平均值为 20.0 mg/L,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度平均值为 10.0 mg/L,均达到了安全排放的指标。在此期间,虽然氨氮、总氮及有机物是整个监测期间最高的,但有机物与氮的比值较低;环境温度较高,系统微生物均在适宜环境中生长,有利于系统脱氮效能发挥。实践证明,本工艺局部循环供氧池的好氧/缺氧环境提高了系统的脱氮能力。

2.3 对总磷的去除效果

由图 5 可知,整个运行过程中系统对总磷平均去除率为 72.0%,进水总磷的平均质量浓度为 3.0 mg/L,出水总磷平均质量浓度为 0.8 mg/L,达到了城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918—2002)中一级 B 的规定。根据分析,整个系统以水解酸化-缺氧/好氧脱氮除磷为核心,将污泥的外排设置在水解酸化调节池末端,二次沉淀池的回流污泥需流入水解酸化调节池,再进入水解酸化调节池末端的储泥池后定期排出系统,因而增加了水解酸化池污泥浓度,提高了聚磷菌生物总量^[23-24]。同

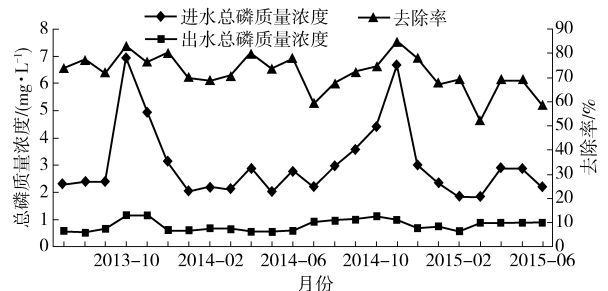


图 5 总磷去除效果

Fig. 5 Monthly variation of TP removal performance

时,工艺设定排泥频次(早、中、晚各1次),减少了外排污泥量,有效控制了厌氧水解对磷的释放,提高了系统对磷的去除效果。

冬季低温期总磷平均去除率为69.6%,低于整个监测期间总磷去除平均值(72.0%)。进水中总磷平均质量浓度为2.3 mg/L,出水总磷平均质量浓度为0.7 mg/L,均低于整个监测期间进水总磷质量浓度平均值(3.0 mg/L)和出水总磷质量浓度平均值(0.8 mg/L)。冬季低温是影响聚磷菌活性的主要因素^[25-26]。随着进水温度逐渐降低,此时进水总磷浓度降低,影响了聚磷菌对磷的摄入量,因此,出水总磷质量浓度较低。

水质复杂期总磷平均去除率为79.8%,高于整个监测期间总磷去除率平均值(72.0%)。进水中总磷平均质量浓度为5.8 mg/L,出水总磷平均质量浓度为1.1 mg/L,均高于整个监测期间进水总磷质量浓度平均值和出水总磷质量浓度平均值。水质复杂期虽然出水总磷质量浓度高于全年平均值,但总磷去除率是全年最高的,比全年平均去除率提高10.8%。说明该时期是系统除磷能力最强时期。

2.4 进水指标与污染物去除率的关系

由表1可知,在该模式下处理农业园区的分散污水2a期间,进水各项指标与各污染物去除率之间的相互关系表现为:有机污染物、NH₃-N和总磷去除率随着有机污染物与总氮比值的升高而升高,总氮去除率随着有机污染物与总氮比值和有机污染物与总磷比值的升高而降低;有机污染物、总氮、NH₃-N和总磷去除率受进水的总氮与总磷比值变化影响较小。

表1 进水指标与去除率之间的相关系数

Tab.1 Correlation between quality of influent sewage and pollutant removal efficiency

进水指标	有机污染物去除率	总氮去除率	NH ₃ -N去除率	总磷去除率
有机污染物与总氮比值	0.50	-0.41	0.47	0.48
有机污染物与总磷比值	0.64	-0.53	0.55	0.17
总氮与总磷比值	0.10	-0.15	0.01	-0.32

3 结论

(1)根据实际分散污水(农业示范园区)水质和排放特点对“局部循环供氧一体化生物膜”工艺进行改进设计和建设,并跟踪监测2a进水、出水有机物、氮、磷等指标。结果证实出水有机污染物、NH₃-N、总氮和总磷的平均质量浓度分别为15.3、9.2、17.2、0.8 mg/L,均符合GB 18918—2002中的一级B排放标准,改进工艺具有较强的脱氮除磷、去有机物能力,更适应此类分散污水处理需求。

(2)通过长期的运行监测分析,该系统实现了对波动性较大的农业示范园区复杂污水的氮、磷和有机物脱除,主要在于现有工艺对于调节池与储存池容积改进,排泥频次、生物膜与回流污泥循环模式设计等,从而实现NH₃-N、总氮、总磷和有机污染物平均去除率在64.4%、45.5%、72.0%和71.6%以上。

(3)该工艺解决了冬季低温期因低温微生物活性抑制造成的系统有机物、氮、磷去除率低的问题,提高了水质复杂期污水有机物、磷的去除能力。

参 考 文 献

- 1 ATKINSON S, FERNANDES L, CAPRARA A, et al. Prevention and promotion in decentralized rural health systems: a comparative study from northeast Brazil[J]. Health Policy and Planning, 2005, 20(2): 69-79.
- 2 WANG M, WEBBER M, FINLAYSON B, et al. Rural industries and water pollution in China[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 86(4): 648-659.
- 3 HELLSTROM D, JONSSON L. Evaluation of small wastewater treatment systems[J]. Water Science and Technology, 2003, 48(11-12): 61-68.
- 4 陈华永, 方炎鑫. 诸I型生活污水净化沼气池的试验研究[J]. 环境与健康杂志, 1999, 16(3): 145-146.
CHEN Huayong, FANG Yanxin. Study on zhu-I methane-generation pit for purifying domestic sewage[J]. Journal of Environment and Health, 1999, 16(3): 145-146. (in Chinese)
- 5 陈吕军, 张玉魁, 施汉昌, 等. 一体化脱氮除磷污水净化装置的开发及处理效果研究[J]. 给水排水, 2009, 35(增刊): 97-100.
CHEN Lüjun, ZHANG Yukui, SHI Hanchang, et al. Research on an integrated equipment for removing organic pollutants, nitrogen and phosphorus[J]. Water and Wasterwater Engineering, 2009, 35(Supp.): 97-100. (in Chinese)
- 6 刘庆玉, 王书文, 焦银珠. 小型生活污水处理工艺和设计[J]. 水处理技术, 2005, 31(5): 69-71.
LIU Qingyu, WANG Shuwen, JIAO Yinzh. Technological process and design for small scale domestic sewage treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2005, 31(5): 69-71. (in Chinese)
- 7 HAM J H, YOON C G, JEON J H, et al. Feasibility of a constructed wetland and wastewater stabilisation pond system as a sewage reclamation system for agricultural reuse in a decentralised rural area[J]. Water Science & Technology, 2007, 55(1-2): 503-511.
- 8 SARI L, WENDY S, KATARZYNA K R, et al. Effect of temperature on anaerobic treatment of black water in UASB-septic tank systems[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(5): 980-986.
- 9 贺锋, 曹湛清, 夏世斌, 等. 生物膜-人工湿地组合工艺处理城镇生活污水的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1655-1660.

- HE Feng, CAO Zhanqing, XIA Shibin, et al. studies on municipal wastewater treatment with a combination system of biofilm reactor and constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8): 1655-1660. (in Chinese)
- 10 袁莉英, 梁威, 肖恩荣. 膜生物反应器-复合垂直流人工湿地(SMBR-IVCW)系统处理混合废水的应用研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2): 361-365.
YUAN Liying, LIANG Wei, XIAO Enrong. Applications of membrane bioreactor-integrated vertical flow constructed wetland(SMBR-IVCW) system in comprehensive wastewater treatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 361-365. (in Chinese)
- 11 刘超翔, 胡洪营, 张建, 等. 不同深度人工复合生态床处理农村生活污水的比较[J]. *环境科学*, 2003, 24(4): 92-96.
LIU Chaoxiang, HU Hongying, ZHANG Jian, et al. Rural sewage treatment performance of constructed wetlands with different depths[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(4): 92-96. (in Chinese)
- 12 SAKADEVAN K, BAVOR H. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1998, 32(2): 393-399.
- 13 沈东升, 贺永华, 冯华军. 农村生活污水地埋式无动力厌氧处理技术研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 111-115.
SHEN Dongsheng, HE Yonghua, FENG Huajun. Underground unpowered anaerobic reactor for rural domestic sewage treatment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(7): 111-115. (in Chinese)
- 14 SHANNON M A, BOHN P W, ELIMELECH M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades[J]. *Nature*, 2008, 452: 301-320.
- 15 吴迪, 高贤彪, 李玉华, 等. 一体化生物膜技术处理滨海农村污水[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(8): 2539-2543.
WU Di, GAO Xianbiao, LI Yuhua, et al. Integrated biofilm technology for treating rural domestic sewage in coastal areas[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 6(8): 2539-2543. (in Chinese)
- 16 吴迪, 高贤彪, 李玉华, 等. 两级回流生物膜工艺处理农村生活污水效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 218-224.
WU Di, GAO Xianbiao, LI Yuhua, et al. Treatment effect of rural domestic sewage in rural area using biofilm with two-stage reflux[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(1): 218-224. (in Chinese)
- 17 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- 18 史明明, 刘晃, 龙丽娜, 等. 碳源供给策略对水产养殖废水生物絮团处理效果的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 317-323. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160506&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.042.
SHI Mingming, LIU Huang, LONG Li'na, et al. Effect of carbon source supply tactics on treatment of aquaculture wastewater with biofloc technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 317-323. (in Chinese)
- 19 HE S B, XUE G, KONG H N. The performance of BAF using natural zeolite as filter media under conditions of low temperature and ammonium shock load[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1-2): 291-295.
- 20 WU C Y, CHEN Z Q, LI X H, et al. Nitrification-denitrification via nitrite in SBR using real-time control strategy when treating domestic wastewater[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, 36(2): 87-92.
- 21 吴昌永, 彭永臻, 彭轶. A²O工艺处理低C/N比生活污水的试验研究[J]. *化工学报*, 2008, 59(12): 3126-3131.
WU Changyong, PENG Yongzhen, PENG Yi. Biological nutrient removal in A²O process when treating low C/N ratio domestic wastewater[J]. *CIESC Journal*, 2008, 59(12): 3126-3131. (in Chinese)
- 22 潘碌亭, 王文蕾, 余波. 接触氧化-强化混凝工艺处理崇明农村生活污水特性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 242-247.
PAN Luting, WANG Wenlei, YU Bo. Characteristics of rural domestic sewage processed with contact oxidation-enhanced coagulation in Chongming island[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 242-247. (in Chinese)
- 23 周健, 肖龙, 何强, 等. 连续流长泥龄生物膜反应器除磷技术研究[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(13): 29-33.
ZHOU Jian, XIAO Long, HE Qiang, et al. Research on continuous-flow biofilm reactor with long sludge age for phosphorus removal[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(13): 29-33. (in Chinese)
- 24 葛士建, 王淑莹, 曹旭, 等. 分段进水脱氮除磷工艺中反硝化除磷的实现与维持[J]. *化工学报*, 2011, 62(9): 2615-2622.
GE Shijian, WANG Shuying, CAO Xu, et al. Achievement and maintenance of denitrifying phosphorus removal in step feed nutrient removal process[J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(9): 2615-2622. (in Chinese)
- 25 王霞芳, 纪荣平. 厌氧悬浮填料床预处理农村生活污水的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2010(7): 61-63.
WANG Xiafang, JI Rongping. Research on pretreatment of rural sewage with anaerobic suspending media beds[J]. *Rural Water and Hydropower*, 2010(7): 61-63. (in Chinese)
- 26 李亚峰, 李大起, 张晓宁. 水解酸化-二段生物接触氧化工艺处理城市生活污水[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2009, 25(6): 1131-1135.
LI Yafeng, LI Daqi, ZHANG Xiaoning. Study on domestic sewage disposal by hydrolyzation acidification and two-stage bio-contact oxidation process[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2009, 25(6): 1131-1135. (in Chinese)