

王幸智, 年跃刚, 张宪奇, 等. 曝气生物净化塘处理农村生活污水效果: 以豫南地区商城县为例[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 484-492.  
WANG X Z, NIAN Y G, ZHANG X Q, et al. Treatment effect of rural domestic sewage by aerated biological purification pond: taking Shangcheng County in southern Henan Province as an example[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 484-492.

# 曝气生物净化塘处理农村生活污水效果

## ——以豫南地区商城县为例

王幸智<sup>1</sup>, 年跃刚<sup>1\*</sup>, 张宪奇<sup>2</sup>, 闫海红<sup>1</sup>, 郭晓娅<sup>1</sup>, 殷勤<sup>1</sup>, 梁雨<sup>1</sup>

1. 中国环境科学研究院

2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院

**摘要** 为了提高农村生活污水治理效果的稳定性,同时考虑农村水生态景观建设需求,将具有强大调节能力的稳定塘技术、适合低浓度有机污水处理的接触氧化法和浅水湖泊草型清水稳态理论相结合,提出曝气生物净化塘工艺,应用于豫南地区商城县11个乡镇街区的农村生活污水处理,并选择其中4个典型案例运行1年的效果进行总结。结果表明:受乡镇街区的合流制排水系统、豫南地区多雨的气候特点及住户利用化粪池污水浇灌菜园习惯的影响,商城县各乡镇街区生活污水污染物浓度低且存在较大的波动性;曝气生物净化塘水力停留时间长,污水可在塘中完全混合,并形成适宜低污染物浓度净化的菌-草共生清水稳态系统,使净化后出水化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总氮(TN)、总磷(TP)指标均达到DB41/1820—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级标准,且出水COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N指标达到GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅳ类及以上水质标准。曝气生物净化塘适合低污染水平的农村生活污水的治理,且能形成清水型农村水生态景观。

**关键词** 曝气生物净化塘;豫南地区;乡镇街区;农村生活污水;雨污合流

中图分类号: X799.3 文章编号: 1674-991X(2021)03-0484-09 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210042

## Treatment effect of rural domestic sewage by aerated biological purification pond: taking Shangcheng County in southern Henan Province as an example

WANG Xingzhi<sup>1</sup>, NIAN Yuegang<sup>1\*</sup>, ZHANG Xianqi<sup>2</sup>, YAN Haihong<sup>1</sup>, GUO Xiaoya<sup>1</sup>, YIN Qin<sup>1</sup>, LIANG Yu<sup>1</sup>

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing)

**Abstract** In order to improve the stability of rural domestic sewage treatment and meet the demand of ecological landscape construction, aeration biological purification pond (ABPP) technology was put forward which is the combined mechanism of high-adjusted ability of stabilization pond technology, suitable for low concentration organic wastewater treatment of contact oxidation method and steady state of grass shallow lakes. The new process was applied to treat rural domestic sewage in 11 towns and districts of Shangcheng County in southern Henan Province, and the operating effects of 4 typical cases for one year were summarized. The results showed that the pollutant concentration of domestic sewage was low and fluctuated greatly due to the confluence drainage system, the rainy climate characteristics in southern Henan and the habits of residents using septic tank sewage to irrigate vegetable gardens. The ABPP had the long hydraulic retention time and completely mixed-sewage, forming bacteria-grass coexisted water steady state system which is suitable to purify the low concentration pollution. Chemical oxygen demand (COD<sub>Cr</sub>), ammonia (NH<sub>3</sub>-N), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) in the effluent reach Level 1

收稿日期: 2021-02-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100505)

作者简介: 王幸智(1994—),男,硕士研究生,主要从事农村生活污水处理技术研究,2466885472@qq.com

\* 责任作者: 年跃刚(1963—),男,研究员,博士,主要从事水污染控制与水生态修复技术研究,nianyg@craes.org.cn

standard of the *Rural Sewage Treatment Facilities of Water Pollutant Discharge Standard* (DB41/1820-2019),  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  and  $\text{NH}_3\text{-N}$  meet Grade IV or above quality standard of the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). ABPP is the appropriate process to treat rural domestic sewage with low pollutants, and benefit to improve the rural water ecological landscape.

**Key words** aerated biological purification pond; southern Henan Province; township blocks; rural sewage; storm-sewage system

农村生活污水是一类重要的污染源。农村地区人口密度小、居住分散,使农村生活污水具有产生量小、水质与水量波动大、收集与处理难的特点,加之污水往往与雨水混合,导致污染物浓度低,在处理技术上的要求不同于城市生活污水。农村生活污水的处理除考虑污水特征外,还应考虑不同农村的地域特点、气候与经济水平差异等,应因地制宜地选取不同的处理工艺。

国外开展农村生活污水治理较早,不同国家/地区采用的处理技术不同。如美国于20世纪中期开始农村生活污水治理工作,主要采用化粪池-土壤处理系统<sup>[1]</sup>处理农村家庭污水;欧洲较多采用人工湿地技术进行农村地区生活污水治理与水资源回用<sup>[2]</sup>,其中法国就超过500座<sup>[3]</sup>,而在气温较低的波兰也采用人工湿地处理单户生活污水<sup>[4]</sup>;日本于20世纪60年代开发了净化槽(Johkasou)技术且形成一套比较完善的技术管理体系,至2012年净化槽技术服务人口超过日本总人口的20%<sup>[5-6]</sup>;韩国主要采用生物膜法、高效组合工艺、序批式活性污泥法(SBR)等<sup>[7]</sup>进行农村生活污水治理;在发展中国家及发达国家的边远地区,常采用稳定塘(waste stabilization ponds, WSPs)技术处理农村生活污水,并将处理后尾水回用于公共区域绿化或农业灌溉<sup>[8]</sup>。

我国于2000年左右开始研究农村生活污水处理技术。如浙江省于2003年开展农村生活污水处理治理,其北部地区多采用好氧/好氧+生态处理工艺,中部和南部山区选择厌氧/厌氧+生态处理工艺<sup>[9]</sup>;北京市于2006年开展78个村的生活污水处理工程示范研究,采用的工艺包括生物接触氧化、生物转盘、厌氧生物滤池及膜生物反应器<sup>[10]</sup>;我国中部地区山西、河南、湖北等省份农村生活污水治理技术的抽样调查结果显示,73.33%的省份采用生物处理技术,16.67%采用生态处理技术,10.00%采用生物生态组合技

术<sup>[11]</sup>。我国农村生活污水具有水质、水量波动大的特点,选择处理效率高、经济性好、实用性强、便于运行维护与管理的农村生活污水处理技术和设备非常重要<sup>[12-13]</sup>。目前我国农村地区生活污水处理方面存在技术储备不足,缺乏污水治理与资源化利用相结合的创新技术等问题<sup>[14]</sup>。

2018年2月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《农村人居环境整治三年行动方案》,提出开展厕所粪污治理,梯次推进农村生活污水处理<sup>[15]</sup>,从此开启了全国农村生活污水处理的提速进程。2019年中央农村工作领导小组办公室、农业农村部等九部门联合印发《关于推进农村生活污水处理的指导意见》<sup>[16]</sup>,在扎实推进农村生活污水处理重点任务中要求合理选择技术模式,因地制宜地采用污染治理与资源利用相结合、工程措施与生态措施相结合、集中与分散相结合的建设模式和处理工艺,并鼓励具备条件的地区采用以渔净水、人工湿地、氧化塘等生态处理模式。

为解决豫南地区农村生活污水处理技术实际效果不理想的现实困境,通过基层调研,针对豫南地区乡镇街区雨污合流排水体制收集的污水浓度低、水质与水量波动大的特点,同时考虑农村景观和农业回用的需要,将稳定塘技术、接触氧化法和浅水湖泊草型清水稳态理论相结合,研发了曝气生物净化塘(aerated biological purification pond, ABPP)工艺,并于2019年11月在商城县建成了11个乡镇街区的农村生活污水处理工程。笔者选择其中4个具有代表性的工程案例,通过工程实施后1年的监测数据比较,分析农村生活污水合流制收集系统的水质特征,总结曝气生物净化塘工艺处理农村生活污水的效果和适用性,以期为我国中部地区农村生活污水处理提供新思路和创新工艺。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

豫南地区商城县位于河南省东南部,大别山北麓,鄂、豫、皖三省交界处,地处北亚热带北缘,气候

温和,雨量充沛,四季分明。近 20 年年平均气温为 15.4 ℃,1 月平均气温为 2.0 ℃,7 月平均气温为 27.6 ℃。2018 年降水量为 1 046.9 mm,年平均气温为 16.7 ℃。商城县共辖 17 个乡镇、300 多个村组,总人口 80 余万人。农村经济主要以粮食、茶叶等种植业为主,为省级生态县、全国休闲农业与乡村旅游示范县、生态产茶大县,优势主导产业是旅游业。全县共有较大河流 30 余条,大中小水库 60 余座,河流与水库水质良好、水体清澈,大部分水体为 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类。由于农业灌溉、生活洗涤、农村景观和历史习俗等原因,有修建水塘的传统,全县共有水塘 5 000 余口,有利用水塘提升农村水生态景观的基础条件。乡镇街区及村组均为雨污合流系统,基本没有排放污水的工业企业,主要是生活污水且污染物浓度低,可将农村生活污水治理与种植业灌溉以及农村水生态景观相结合。

## 1.2 曝气生物净化塘工艺

曝气生物净化塘是一种将稳定塘、生物接触氧化法和浅水湖泊草型清水稳态理论相融合形成的生活污水生态净化工艺。其中,稳定塘是在池塘内利用菌-藻共生系统净化污水的生态处理工艺,污染物通过吸附、生物降解、光降解作用被去除<sup>[10]</sup>,藻类光合作用提供微生物降解所需的氧气,水体流动与混合主要由风力驱动<sup>[17]</sup>。该工艺建设和运营成本低、管理方便,我国在“七五”“八五”期间研究与应用较多<sup>[18]</sup>,目前在世界上许多国家仍有较多应用。接触氧化法(biological contact oxidation process,BCOP)在净化池中放置浸没于水中的填料作为生物膜载体,由底部曝气为微生物供氧,是一种生物膜法污水处理工艺。该工艺适用于处理低浓度生活污水,可应用于污染河水净化<sup>[19-20]</sup>和景观水净化<sup>[21]</sup>。草型清水稳态理论指浅水生态系统存在以大型水生植物(草型)为主要初级生产者的清水稳态和以浮游藻类(藻型)为主要初级生产者的浊水稳态<sup>[22]</sup>,2 种类型都符合生态系统抵抗变化、保持平衡的稳态特征,水生态系统会在长期的人为胁迫或短期的强扰动下发生稳态转换<sup>[23]</sup>。沉水植物在清水稳态中发挥重要作用,如降低水体中的营养盐及有机物浓度,改善水体溶解氧浓度和透明度<sup>[24-26]</sup>,分泌化感物质抑制藻类生长<sup>[27]</sup>,因此,可利用沉水植物清水稳态进行污染物的净化。与传统氧化塘(或稳定塘)的菌-藻共生浊水稳态系统工艺不同,曝气生物净化塘为菌-草共生清水稳态系统。

曝气生物净化塘工艺流程为进水—格栅—调节池—生物净化塘—出水(图 1)。其中,净化塘中安装了曝气推流机,起到增氧和推流的作用;净化塘内设置的生物模块可增加微生物附着面积,增强微生物处理能力;塘内同时培育有沉水植物,构建形成较为完整的水生态系统。净化塘底部设置有防渗膜,以防污染地下水,一般塘内保持水深 1.8~2.0 m。曝气生物净化塘工艺具有稳定塘强大的调节能力和建设、运营成本低的特性,同时吸收了生物接触氧化法有效降解低浓度有机物的优势,可以利用农村地区原有水塘改造或依地形、地貌建设,在处理农村生活污水的同时,依据草型清水稳态理论营造出具有农村特色的水生态景观。

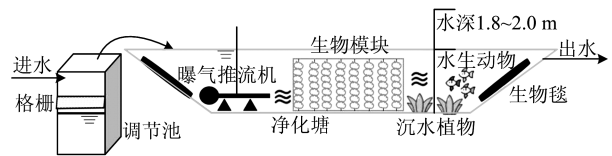


图 1 曝气生物净化塘工艺流程

Fig. 1 Technological process of ABPP

## 1.3 工程案例情况

根据曝气生物净化塘占地面积大小、有无防渗、是否考虑农业回用与农村生态景观等因素,选取商城县已建成的 11 个乡镇街区的农村生活污水处理工程中的 4 个有代表性的工程案例(表 1)进行研究。工程案例 I~IV 分别座落于商城县所辖汪岗镇、丰集镇、金刚台镇和吴河乡,4 个工程案例均位于河岸边,采用雨污合流系统收集生活污水,污水处理后排入河道。根据 DB41/T 958—2020《农业与农村生活用水定额》中人均日用水量[60 L/(d·人)]和镇政府提供的服务人口数估算生活污水产生量,污水排放系数取 0.8,计算各工程案例的实际处理污水量。考虑到曝气生物净化塘有强大的调节能力,污水提升泵按 4 倍污水量配备,用于降雨时提升初期雨水。

农村生活污水处理后的出水水质要求达到 DB41/1820—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级排放标准,即化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)≤60 mg/L,氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度≤8 mg/L(温度≤12 ℃时要求≤15 mg/L),总氮(TN)浓度≤20 mg/L,总磷(TP)浓度≤1 mg/L。

## 1.4 采样及分析方法

于 2020 年 1 月、5 月、8—12 月对 4 个曝气生物

表1 4个工程案例相关参数  
Table 1 Parameters related to 4 engineering cases

参数	工程案例 I	工程案例 II	工程案例 III	工程案例 IV
服务人口数/人	1 031	7 106	2 800	5 390
占地面积/m <sup>2</sup>	2 668	4 002	2 001	13 340
处理污水量/(m <sup>3</sup> /d)	50	340	135	260
水力停留时间/d	100	21	27	92
场地土地利用类型	河边稻田	河边山地	河边荒地	池塘
防渗条件	无需防渗	无需防渗	防渗膜防渗	无需防渗
周边可用灌溉条件	农田	无	菜地	无

净化塘工程案例的进、出水进行采样,样品按规范保存用于检测。检测项目选择 DB41/1820—2019 中的 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP,其中 COD<sub>Cr</sub> 采用 HJ 828—2017《水质 化学需氧量测定 重铬酸盐法》测定,检出限为 4 mg/L; NH<sub>3</sub>-N 浓度采用 HJ 535—2009《水质 氨氮测定 纳氏试剂分光光度法》测定,检出限为 0.25 mg/L; TP 浓度采用 GB/T 11893—1989《水质 总磷测定 钼酸铵分光光度法》测定,检出限为 0.01 mg/L; TN 浓度采用 HJ 636—2012《水质 总氮测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》测定,检出限为 0.05 mg/L。

### 1.5 数据统计与分析

在统计学中,将一组数据的最大值或最小值除以其平均值,得到的结果可反映数据的波动情况。采用浓度变化系数( $K_a$ )反映进水水质指标的波动变化,计算公式如下:

$$K_a = C_{\max}/C_b \text{ 或 } C_{\min}/C_b \quad (1)$$

式中: $C_{\max}$ 为水质指标的最大值,mg/L; $C_{\min}$ 为水质指标的最小值,mg/L; $C_b$ 为水质指标的平均值,mg/L。

使用 SPSS 20.0 软件对曝气生物净化塘出水的 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 指标数据进行描述性统计分析,获得各组数据的标准差。

## 2 结果

### 2.1 COD<sub>Cr</sub> 去除效果

4 个工程案例各月 COD<sub>Cr</sub> 去除效果如图 2 所示。由图 2 可知,工程案例 I~IV 各月平均进水 COD<sub>Cr</sub> 分别为 71、62、31 和 71 mg/L,平均出水 COD<sub>Cr</sub> 分别为 22、20、17 和 14 mg/L,不同进水 COD<sub>Cr</sub> 条件下,曝气

生物净化塘对 COD<sub>Cr</sub> 的平均去除率为 45%~80%。

4 个工程案例出水 COD<sub>Cr</sub> 均能达到 DB41/1820—2019 一级排放标准 (< 60 mg/L),且出水 COD<sub>Cr</sub> 具有较好的稳定性。其中,净化塘面积最大的工程案例 IV 的平均出水 COD<sub>Cr</sub> 最低,平均去除率达 80%,且出水稳定性也最好。

4 个工程案例不同月份进水 COD<sub>Cr</sub> 波动较大,但均较低,为 17~182 mg/L,进水 COD<sub>Cr</sub> 变化趋势与去除率变化趋势基本一致。进水 COD<sub>Cr</sub> 为 72~182 mg/L 时,去除率较高,可达 65% 以上;进水 COD<sub>Cr</sub> 低于 34 mg/L 时,去除率降为 50% 以下。但在 8 月,工程案例 I、II、IV 在进水 COD<sub>Cr</sub> 较低 (< 60 mg/L) 条件下,仍可达到较高的去除率 (> 80%)。4 个工程案例中,工程案例 III 的平均进水 COD<sub>Cr</sub> 最低,平均去除率也相对较低,为 45%。

### 2.2 NH<sub>3</sub>-N 去除效果

4 个工程案例各月 NH<sub>3</sub>-N 去除效果如图 3 所示。由图 3 可知,工程案例 I~IV 各月平均进水 NH<sub>3</sub>-N 浓度分别为 4.57、10.00、2.85 和 20.50 mg/L,平均出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度分别为 1.40、1.07、0.51 和 1.4 mg/L,不同进水 NH<sub>3</sub>-N 浓度条件下,曝气生物净化塘对 NH<sub>3</sub>-N 的平均去除率为 69%~93%。

4 个工程案例出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度均能达到 DB41/1820—2019 一级排放标准 (< 8 mg/L,温度 > 12 °C 时为 15 mg/L),且出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度比较稳定。净化塘面积最大的工程案例 IV 对 NH<sub>3</sub>-N 的平均去除率最高,达 93%;面积较大的工程案例 II 和水生动物丰富的工程案例 III 的平均去除率也能达到 89% 和 82%。

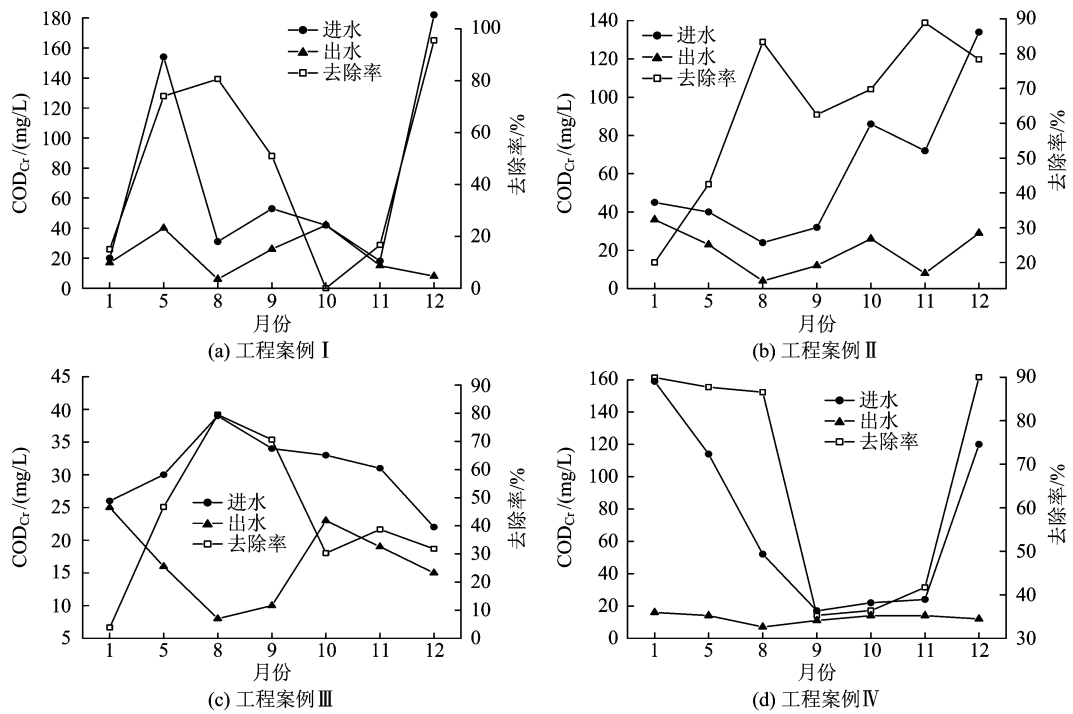


图 2 4 个工程案例各月 COD<sub>Cr</sub> 去除效果

Fig. 2 COD<sub>Cr</sub> treatment effects of 4 engineering cases in each month

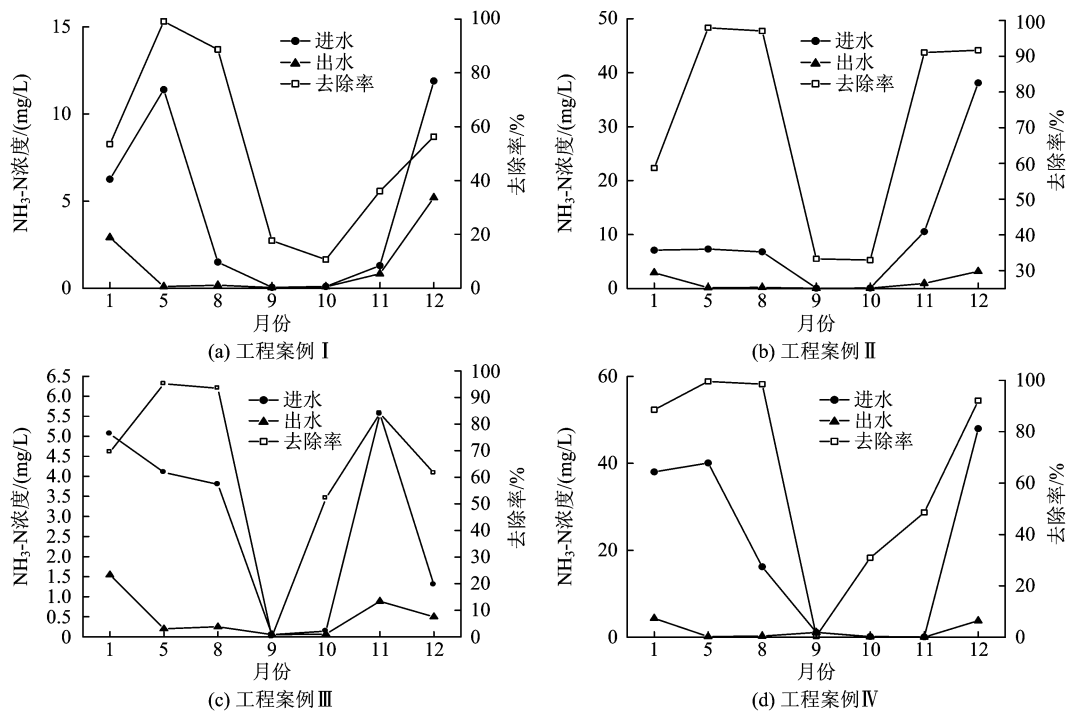


图 3 4 个工程案例各月 NH<sub>3</sub>-N 去除效果

Fig. 3 NH<sub>3</sub>-N treatment effects of 4 engineering cases in each month

4 个工程案例不同月份进水 NH<sub>3</sub>-N 浓度波动较大,但均较低,为 0.05 ~ 48.00 mg/L,进水 NH<sub>3</sub>-N 浓

度变化趋势与去除率变化趋势基本一致。进水 NH<sub>3</sub>-N 浓度为 3 ~ 48 mg/L 时,去除率较高,可达

65%以上;进水  $\text{NH}_3\text{-N}$  低于 1 mg/L 时,去除率迅速降为低于 50%。但在 8 月,案例 I~III 在进水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度较低 (< 8 mg/L) 条件下,仍可达到较高的去除率 (> 89%)。4 个工程案例中,工程案例 I 和 III 的平均进水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度低,平均去除率也相对较低,分别为 71% 和 82%。

### 2.3 TN 去除效果

4 个工程案例各月 TN 去除效果如图 4 所示。由图 4 可知,工程案例 I~IV 各月进水 TN 平均浓度分别为 10.40、14.20、7.38 和 32.30 mg/L,出水 TN 平均浓度分别为 5.85、6.41、2.72 和 4.20 mg/L,不同进水 TN 浓度条件下,曝气生物净化塘对 TN 的平均去除率为 44%~87%。

4 个工程案例出水 TN 浓度均能达到 DB41/1820—2019 一级排放标准 (< 20 mg/L),且出水浓度比较稳定。净化塘面积最大的工程案例 IV 对 TN 的平均去除率最高,达 87%。

4 个工程案例不同月份进水 TN 浓度波动较大,为 3.57~90.00 mg/L,进水 TN 浓度变化与去除率变化趋势基本一致。进水 TN 浓度大于 20 mg/L 时,去除率较高,可达 65% 以上;进水 TN 浓度低于 15 mg/L 时,去除率变得不稳定。在 8 月,工程案例 I~III 在进水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度较低 (< 8 mg/L) 条件下,仍可达到较高的去除率 (> 71%)。4 个工程案例中,工程案例 I~III 的平均进水 TN 浓度低,平均去除率也相对较低,分别为 44%、55% 和 63%。

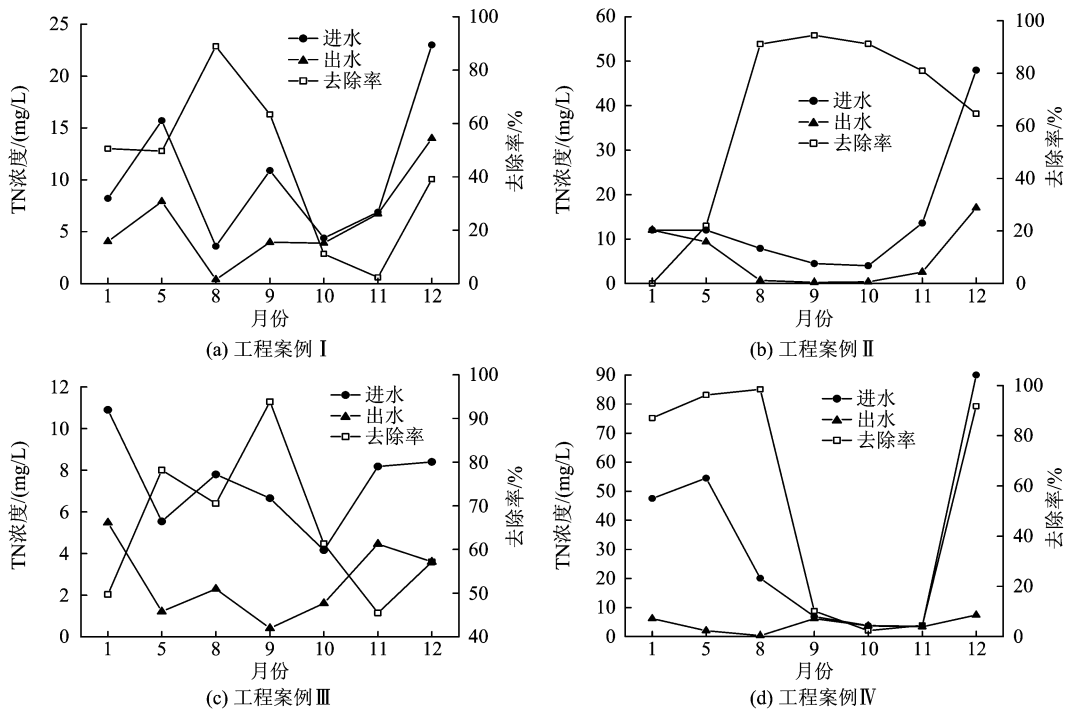


图 4 4 个工程案例各月 TN 去除效果

Fig. 4 TN treatment effects of 4 engineering cases in each month

### 2.4 TP 去除效果

4 个工程案例各月进出水的 TP 浓度变化如图 5 所示。由图 5 可知,工程案例 I~IV 各月进水 TP 平均浓度分别为 0.74、1.05、0.62 和 1.94 mg/L,出水 TP 平均浓度分别为 0.37、0.39、0.17 和 0.24 mg/L,不同进水 TP 浓度条件下,曝气生物净化塘对 TP 的平均去除率为 49%~89%。

4 个工程案例出水 TP 浓度均能达到 DB41/1820—2019 一级排放标准 (< 1 mg/L),且出水 TP 浓度具有较好的稳定性。其中,净化塘面积最大的

工程案例 IV 的平均出水 TP 浓度较低,平均去除率最高,达 89%,出水稳定性也最好。

4 个工程案例不同月份进水 TP 浓度波动较大,但均较低,为 0.08~3.75 mg/L,进水 TP 浓度变化与去除率变化趋势基本一致。进水 TP 浓度大于 1 mg/L 时,去除率较高,达 65% 以上;进水 TP 浓度低于 0.5 mg/L 时,去除率变得不稳定。4 个工程案例中,工程案例 I 的平均进水 TP 浓度较低,平均去除率最低,为 49%。

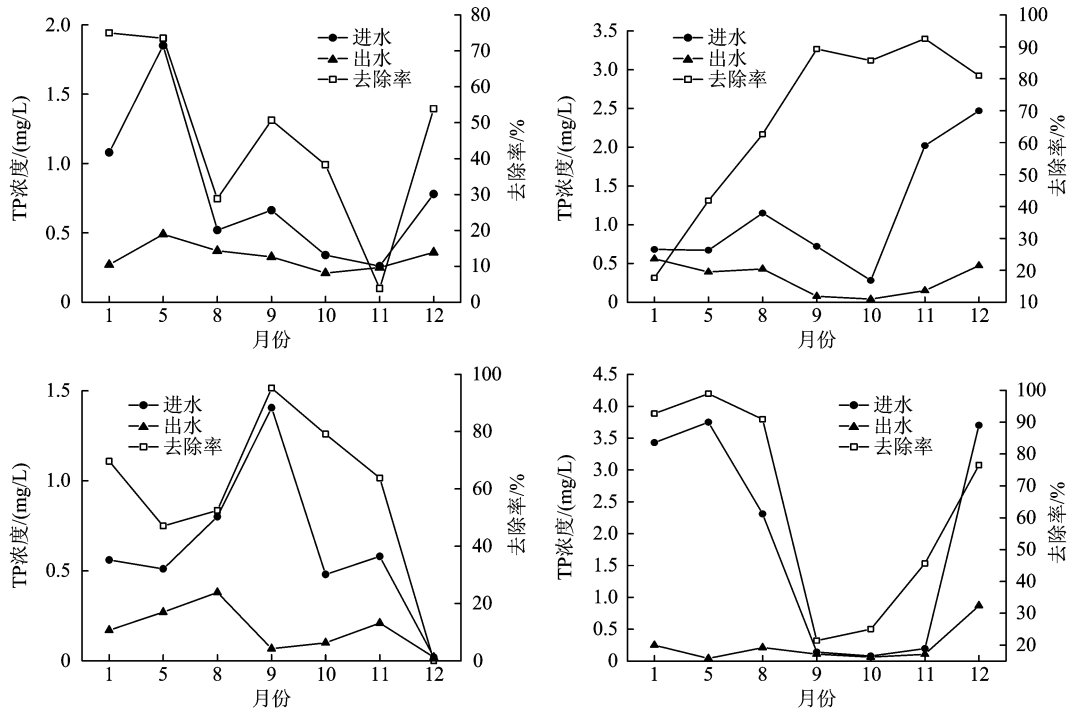


图 5 4 个工程案例各月 TP 去除效果

Fig. 5 TP treatment effects of 4 engineering cases in each month

### 3 讨论

#### 3.1 进水水质浓度波动性调节

曝气生物净化塘具有稳定塘强大的调节能力,对不同进水水质浓度波动性具有良好调节功能。4 个工程案例进水各项指标的  $K_a$  计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,  $COD_{Cr}$ 、 $NH_3-N$ 、 $TN$ 、 $TP$  的  $K_a$  变化范围很大,说明进水浓度波动性很大。

分别对 4 项污染物指标的进水和出水数据进行分析,进水  $COD_{Cr}$ 、 $NH_3-N$ 、 $TN$  和  $TP$  的标准差分别为 49、13.9、20.0 和 1.10,出水  $COD_{Cr}$ 、 $NH_3-N$ 、 $TN$  和  $TP$  的标准差分别为 9、1.5、4.2 和 0.19。标准差能反映组内数据个体间的离散程度,与进水各项指标数据相比较,出水数据离散程度较小,较稳定。综上,曝气生物净化塘对进水水质浓度的波动性有强大的调节作用。

表 2 4 个工程案例进水各项水质指标的  $K_a$

Table 2  $K_a$  of each influent water quality index of 4 engineering cases

指标	工程案例 I	工程案例 II	工程案例 III	工程案例 IV
$COD_{Cr}$	0.25 ~ 2.16	0.39 ~ 2.17	0.72 ~ 1.27	0.23 ~ 2.19
$NH_3-N$	0.01 ~ 2.56	0.00 ~ 3.81	0.02 ~ 1.94	0.00 ~ 2.34
$TN$	0.35 ~ 2.22	0.27 ~ 3.29	0.56 ~ 1.48	0.11 ~ 2.78
$TP$	0.33 ~ 2.31	0.25 ~ 2.17	0.03 ~ 2.27	0.04 ~ 1.93

#### 3.2 低有机物浓度污水的有效净化

曝气生物净化塘吸收了生物接触氧化法有效降解低有机物浓度污水的优势。4 个工程案例进水中有机物浓度均较低,平均进水  $COD_{Cr}$  为 31 ~ 71 mg/L,进水低  $COD_{Cr}$  与豫南地区多雨的气候特点、乡镇街区的合流制排水体制有关,另外利用进入化粪池污水对周边菜地施肥是豫南农村地区的传统习惯,该习惯从前端减少了污水的产生量,也削减了生活污水中污染物浓度。普通活性污泥法处理  $COD_{Cr}$  的范围是 150 ~ 400 mg/L<sup>[28-29]</sup>,若采用该技术处理低  $COD_{Cr}$  的生活污水,会导致活性污泥系统因碳源不足而污泥量减少或产生污泥膨胀,使系统无法正常运行。由于曝气生物净化塘中设置有浸没式生物填料,填料上形成的生物膜适应于净化低有机物浓度的农村生活污水,在接触氧化条件下进水有机污染物浓度变化对污染物去除率的影响不大<sup>[30-31]</sup>,因此可以实现低  $COD_{Cr}$  条件下较高的去除率。

#### 3.3 营养物质的菌-草系统联合去除

曝气生物净化塘采用菌-草共生清水稳态系统,其中的水生植物对营养物质有吸收作用,塘中的微生物对污染物具有降解作用,因此该菌-草系统联合可较好地去除低浓度营养盐。对于氮来讲,微生物可将有机氮转化为  $NH_3-N$ ,再通过细菌的硝化作用

转化为亚硝氮和硝氮,通过反硝化作用转化为氮气,从水中释放到大气。增大净化塘面积能提升  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除效果,在水深相同的情况下,净化塘面积越大,调节能力越强,出水效果和稳定性越好。对于磷来讲,植物可通过吸收和根系沉淀作用去除磷,同时塘中的细菌对磷有厌氧释放和好氧吸收功能,可将磷进行转移或沉淀,从而从水体中去除。

### 3.4 水生态景观功能

曝气生物净化塘工艺通过推流混合、生物膜净化和沉水植物吸收作用,使农村生活污水处理后出水水质达到较高的类别。对4个工程案例出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  及  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 浓度平均值与 GB 3838—2002 进行比较(表3)可知:工程案例 II ~ IV 出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  达到 III 类,工程案例 I 达到 IV 类;工程案例 III 出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度达到 III 类,其余3个工程案例达到 IV 类;工程案例 III 出水 TP 浓度达到 III 类,工程案例 IV 达到 IV 类,工程案例 I 和 II 达到 V 类。此外,净化塘内种植沉水植物,如苦草和狐尾藻,放养田螺和虾等具有水质净化功能的水生动物,通过动植物以及微生物的共同作用使水体具有较好的透明度(达 1 m 以上),使之整体上成为景观型处理设施。

表3 曝气生物净化塘出水污染物浓度平均值

Table 3 Average concentration of pollutants in effluent of the ABPP mg/L

项目	工程案例	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	$\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度	TP 浓度
浓度平均值	工程案例 I	22	1.40	0.37
	工程案例 II	20	1.07	0.39
	工程案例 III	17	0.51	0.17
	工程案例 IV	14	1.40	0.24
GB 3838—2002 水质标准限值	III 类水质	20	1.00	0.20
	IV 类水质	30	1.50	0.30
	V 类水质	40	2.00	0.40

## 4 结论

(1) 豫南地区商城县乡镇街区生活污水中污染物指标  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 存在较大的浓度波动性,其浓度变化系数分别为 0.23 ~ 2.19、0.00 ~ 3.81、0.11 ~ 3.29 和 0.03 ~ 2.31,由于曝气生物净化塘具有强大的调节能力,使处理后的出水浓度低且较为稳定。

(2) 乡镇街区生活污水中有机物浓度较低,平均  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  为 31 ~ 71 mg/L,由于曝气生物净化塘设置有浸没式生物填料,形成的生物膜适合低有机物浓

度生活污水的净化,使  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  平均去除率达 45% ~ 80%,出水平均  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  为 14 ~ 22 mg/L。

(3) 曝气生物净化塘对  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 的平均去除率分别为 69% ~ 93%、44% ~ 87% 和 49% ~ 89%,其菌-草系统发挥了微生物净化和水生植物吸收的共同作用,对低污染物浓度生活污水具有较好的净化作用。

(4) 曝气生物净化塘出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 指标满足 DB41/1820—2019 一级标准,出水总体可达 GB 3838—2002 V 类及以上水质,其中工程案例 III 出水总体可达 III 类水质。曝气生物净化塘适合低污染水平的农村生活污水的治理,可作为农村景观型生活污水处理方法。

## 参考文献

- [1] 李宪法,许京骐.北京市农村污水处理设施普遍闲置的反思: II. 美国污水就地生态处理技术的经验及启示[J]. 给水排水,2015,51(10):50-54.
- [2] 林卉,姜忠群,冒建华.人工湿地在农村生活污水处理中的应用及研究进展[J]. 中国农业科技导报,2020,22(5):129-136.  
LIN H, JIANG Z Q, MAO J H. Application and research of constructed wetlands in rural wastewater treatment[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2020,22(5):129-136.
- [3] MOLLE P, LIÉNARD A, BOUTIN C, et al. How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems[J]. Water Science and Technology,2005,51(9):11-21.
- [4] JÓZWIAKOWSKI K, MARZEC M, KOWALCZYK-JUŚKO A, et al. 25 years of research and experiences about the application of constructed wetlands in southeastern Poland[J]. Ecological Engineering,2019,127:440-453.
- [5] 张玉洁,吴俊奇,向连城,等.净化槽的应用与管理方法[J]. 环境工程技术学报,2014,4(2):109-115.  
ZHANG Y J, WU J Q, XIANG L C, et al. Application and management methods of Johkasou[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2014,4(2):109-115.
- [6] 于阳春,韩子叻,彭岩波,等.关于推动山东省农村分散式污水处理模式的思考[J]. 水利水电技术,2019,50(增刊2):129-132.  
YU Y C, HAN Z L, PENG Y B, et al. Study on decentralized treatment of rural domestic sewage in Shandong Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2019,50(Suppl 2):129-132.
- [7] 周律,李秉浩,李佳璘.韩国农村排水系统的建设和管理[J]. 环境污染与防治,2009,31(6):89-91.
- [8] GRUHLIK Y, LINGE K, JOLL C. Removal of organic micropollutants in waste stabilisation ponds: a review[J]. Journal of Environmental Management,2018,206:202-214.
- [9] 孔令为,邵卫伟,叶红玉,等.农村生活污水治理技术应用的浙江经验及发展方向[J]. 中国给水排水,2021,37(2):12-17.  
KONG L W, SHAO W W, YE H Y, et al. Experience and

- development direction of application of rural domestic wastewater treatment technology in Zhejiang Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(2): 12-17.
- [10] 李宪法, 许京骐. 北京市农村污水处理设施普遍闲置的反思 (I) [J]. *给水排水*, 2015, 51(6): 48-50.
- [11] 孙美玲, 魏维利, 刘春梅, 等. 中部地区农村生活污水治理现状分析 [J]. *现代化工*, 2020, 40(9): 4-7.  
SUN M L, WEI W L, LIU C M, et al. Analysis on current treatment situation of rural domestic sewage in central China [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(9): 4-7.
- [12] 李响婷, 石玉敏, 王俭. 农村生活污水一体化处理技术研究进展 [J/OL]. *环境工程技术学报*. doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20200146  
LI Y T, SHI Y M, WANG J. Research progress on integrated treatment technology of rural domestic sewage [J/OL]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20200146.
- [13] 骆其金, 钟昌琴, 谌建宇, 等. 农村生活污水处理技术评估方法与案例研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(2): 105-110.  
LUO Q J, ZHONG C Q, CHEN J Y, et al. Evaluation method of best available technologies for rural domestic wastewater treatment and case study [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6(2): 105-110.
- [14] 吕尤, 俞岚. 分散型农村生活污水处理技术评价方法 [J]. *给水排水*, 2020, 56(增刊 1): 548-551.  
LÜ Y, YU L. Evaluation method of decentralized rural domestic sewage treatment technology [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 56(Suppl 1): 548-551.
- [15] 中共中央办公厅 国务院办公厅. 农村人居环境整治三年行动方案 [A/OL]. (2018-02-05) [2020-02-10]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content\\_5266237.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5266237.htm).
- [16] 中央农村工作领导小组办公室、农业农村部、生态环境部, 等. 关于推进农村生活污水治理的指导意见 [A/OL]. (2019-07-11) [2020-02-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/12/content\\_5408646.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/12/content_5408646.htm).
- [17] REY A, MULLIGAN R, da SILVA A M F, et al. Three-dimensional hydrodynamic behavior of an operational waste-stabilization pond [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2021, 147(2): 05020009.
- [18] EDOKPAYI J N, ODIYO J O, POPOOLA O E, et al. Evaluation of contaminants removal by waste stabilization ponds: a case study of Siloam WSPs in Vhembe District, South Africa [J]. *Heliyon*, 2021, 7(2): e06207.
- [19] ZHANG L, HAN X X, YUAN B X, et al. Mechanism of purification of low-pollution river water using a modified biological contact oxidation process and artificial neural network modeling [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(2): 104832.
- [20] 吴雷祥, 刘玲花, 周怀东, 等. 生物接触氧化法处理农村河道受污染水体中试研究 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(29): 162-167.  
WU L X, LIU L H, ZHOU H D, et al. The pilot-test study on purifying contaminated stream water of the rural area in China based on biological contact oxidation process [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(29): 162-167.
- [21] SU J F, LIANG D H, FU L, et al. Biological floating bed and bio-contact oxidation processes for landscape water treatment: simultaneous removal of *Microcystis aeruginosa*, TOC, nitrogen and phosphorus [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(24): 24220-24229.
- [22] 邱新天, 徐翠, 尹心安, 等. 水质水量调控对浅水湖泊草藻转换过程影响分析 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(5): 683-692.  
QIU X T, XU C, YIN X A, et al. Effect of water quality and quantity regulation on regime shift between phytoplankton and macrophyte in shallow lakes [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(5): 683-692.
- [23] 赵磊, 刘永, 李玉照, 等. 湖泊生态系统稳态转换驱动因子判定方法研究进展 [J]. *水生态学杂志*, 2017, 38(1): 1-9.  
ZHAO L, LIU Y, LI Y Z, et al. Review on driving factor detection methods of regime shift in lake ecosystem [J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, 38(1): 1-9.
- [24] 郭雅倩, 薛建辉, 吴永波, 等. 沉水植物对富营养化水体的净化作用及修复技术研究进展 [J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(3): 58-68.  
GUO Y Q, XUE J H, WU Y B, et al. Research progress on purification effects and restoration technologies of submerged macrophytes on eutrophic water [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(3): 58-68.
- [25] 宋福, 陈艳卿, 乔建荣, 等. 常见沉水植物对草海水体(含底泥)总氮去除速率的研究 [J]. *环境科学研究*, 1997, 10(4): 47-50.  
SONG F, CHEN Y Q, QIAO J R, et al. Study on the removal rate to total nitrogen in Caohai Lake (including sediments) by common submerged macrophytes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1997, 10(4): 47-50.
- [26] 王书航, 李佳璐, 姜霞, 等. 基于光补偿深度的蠡湖沉水植物恢复区划分 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(9): 1389-1396.  
WANG S H, LI J L, JIANG X, et al. Division of submerged aquatic vegetation restoration region in Lihu Lake based on light compensation depth [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9): 1389-1396.
- [27] 谭凯婷, 柳君侠, 王志红, 等. 沉水植物修复富营养化景观水体的研究进展 [J]. *水处理技术*, 2019, 45(6): 15-18.  
TAN K T, LIU J X, WANG Z H, et al. Research progress of eutrophic landscape water restoration by submerged macrophyte [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(6): 15-18.
- [28] 姚力, 信欣, 周迎芹, 等. 好氧反硝化菌强化序批式活性污泥反应器处理生活污水 [J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(3): 73-77.  
YAO L, XIN X, ZHOU Y Q, et al. Aerobic denitrifying bacteria enhanced SBR for sewage treatment [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(3): 73-77.
- [29] ZHONG C, WANG Y Q, WANG Y J, et al. High-rate nitrogen removal and its behavior of granular sequence batch reactor under step-feed operational strategy [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 134: 101-106.
- [30] 向速林, 周文斌. 鄱阳湖区域农村生活污水控制技术试验研究 [J]. *江苏农业科学*, 2009, 37(2): 299-300.
- [31] HAN X X, FENG J W, ZHANG L, et al. Micro-polluted water treatment by biological contact oxidation process: aeration mode and bacteria community analysis [J]. *Environmental Engineering Science*, 2019, 36(12): 1491-1502. ◇