

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.002

推流方式对微藻光生物反应器处理养猪废水的影响

肖海文, 刘 艺, 翟 俊, 李海星, 陶光卿, 雷雨田
(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 探讨微藻光生物反应器处理养猪废水的运行方式对开发可资源回收、低成本的畜禽养殖废水处理技术具有重要意义。为此,通过试验考察了处理实际养猪废水时,日推流时长和推流流速对廊道式微藻光生物反应器启动、藻液生物量浓度和污染物去除效果的影响,探讨了最佳推流运行方式。结果表明,全天24 h连续推流可促进反应器快速启动;低流速(0.062 m/s)、白天12 h间歇推流可让反应器获得最大的藻液生物量和最佳处理效果;推流流速和日推流时长越大,COD去除率就越高;仅在白天推流且流速较低时,反应器也能保持较高的氨氮去除率;而推流流速越小、日推流时长越短,总磷去除率就越高。

关键词: 养猪废水; 微藻; 光生物反应器; 推流流速; 推流时长

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0007-06

Effect of Plug-flow Operational Mode on Performance of Microalgal Photobioreactor for Treatment of Piggery Wastewater

XIAO Hai-wen, LIU Yi, ZHAI Jun, LI Hai-xing, TAO Guang-qing, LEI Yu-tian
(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The operational mode of microalgal photobioreactor for the treatment of piggery wastewater is of great significance for developing the livestock and poultry wastewater treatment technologies with resource recovery and low operational cost. In this study, the effects of daily plug-flow duration and plug-flow velocity on the start-up, algal biomass concentration and pollutants removal efficiency of the corridor microalgal photobioreactor for the treatment of actual piggery wastewater were investigated, and the optimal plug-flow operational mode was discussed. The 24-hour continuous plug-flow operation promoted the rapid start-up of the reactor. The daily intermittent plug-flow operation with low flow velocity enabled the reactor to obtain the maximum algal biomass concentration and the best treatment performance. The larger flow velocity and the longer daily plug-flow time resulted in the higher COD removal efficiency. The reactor also maintained a high removal efficiency of ammonia nitrogen at the daily intermittent plug-flow operation mode with low flow velocity. The lower flow velocity and shorter daily plug-flow time led to the higher removal efficiency of total phosphorus.

Key words: piggery wastewater; microalgae; photobioreactor; plug-flow velocity; plug-flow duration

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51878093)

通信作者: 肖海文 E-mail: xiaohaiwen99@163.com

近年来,随着经济的发展和人民生活水平的提高,我国生猪出栏量一直稳定增长。然而,规模化、集约化养猪场增加的同时也导致了大量高污染废水的集中产生,对生态环境造成了巨大的压力。利用微藻净化能力开发的各类光生物反应器能高效去除废水中的有机物、氮和磷,并可固碳产生微藻生物质,为能源和生物质的回收提供了可能,这项低成本、可持续性强的水处理技术在畜禽养殖废水处理中逐渐成为研究热点^[1]。

微藻光生物反应器多设计成廊道式(或环形),采用推流器使微藻悬浮环流,与污染物充分接触。推流控制参数主要包括日推流时长和推流流速等,其通过影响反应器的混合、传质等对污染物的去除产生影响,同时也很大程度决定了反应器的运行电耗和成本。然而,目前的微藻光生物反应器研究中,针对推流控制方式的研究相对缺乏,且存在结果不一致的情况。例如,周静等^[2]研究发现改变流速条件对藻类的生物量会产生较大影响;王华等^[3]发现低流速有利于藻类生长,而高流速条件下藻类生长会受到抑制;李旭东等^[4]发现降低高效藻类塘流速有利于污染物的去除;而黄翔峰等^[5]发现较高流速下的除污效果明显优于低流速。以上研究均在连续推流(日推流时长为24 h)条件下运行光生物反应器,间歇推流方式的研究仍十分鲜见。鉴于此,笔者通过中试考察处理实际养猪废水时,推流方式对廊道式微藻光生物反应器启动时间、生物量和污染物去除效果的影响,探讨了廊道式微藻光生物反应器的最佳推流运行工况,以期对光生物反应器处理畜禽养殖废水的工程设计和节能运行控制提供一定的借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置是基于实际工程——重庆徐伦养猪场光生物反应器运行问题分析而设计的,用于研究廊道式微藻光生物反应器的最佳运行调控参数。共4个构造相同的反应器装置,单个装置平面布置见图1。每个反应器尺寸为 $L \times B \times H = 1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,水深 $h = 0.15 \text{ m}$,有效体积为216 L。反应器内设两台可调推流器,每台功率为45 W。反应器位于实验室楼顶阳光棚温室内,仅利用天然太阳光,无外加光源。试验期间测得室内光的照度为20~

42 klx,反应器内水温为18~22℃、pH为6.2~8.0。所有反应器的进水均从同一蓄水箱引入。

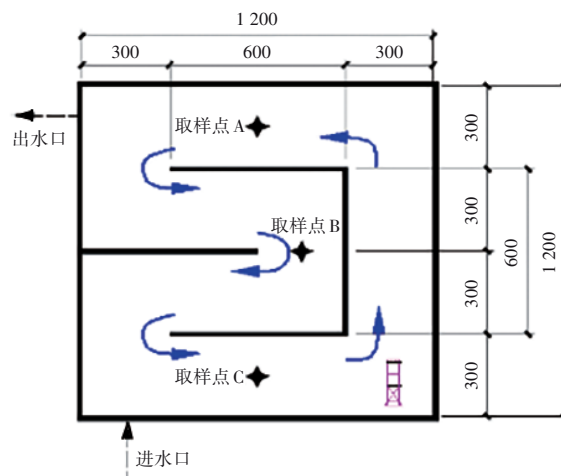


图1 廊道式微藻光生物反应器装置平面布置

Fig.1 Plain of microalgal photobioreactor

1.2 原水水质

试验原水取自重庆徐伦养猪场(干清粪工艺)废水处理流程中UASB反应器的出水口,是经厌氧预处理后的养猪废水,其COD、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 浓度范围分别为2 551~2 594、44.8~45.3、724~735、2.03~3.12、0.43~0.57 mg/L,平均值分别为2 573、45.1、730、2.58、0.50 mg/L。该工程中的光生物反应器出水用微滤膜进行固液分离,藻液大部分回流,少量剩余藻液排入干化场干化后堆肥返田;出水则进入消毒池,用次氯酸钠消毒后回用于猪栏粪便的干清粪冲洗。

1.3 试验方案

1.3.1 微藻的富集培养和反应器启动

微藻的富集培养、扩大培养及最终反应体系的建立和启动流程见图2。

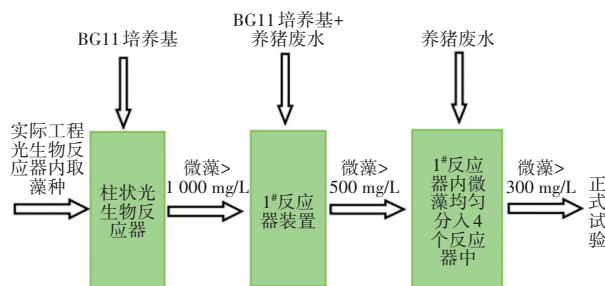


图2 微藻富集培养及反应器启动流程

Fig.2 Schematics of microalgae enrichment and start-up of photobioreactor

每轮试验均于徐伦养猪场光生物反应器内采集微藻藻种,通过实验室柱状光生物反应器进行富集培养,待其生物量 $>1\ 000\text{ mg/L}$ 后,将藻液注入 $1^{\#}$ 反应器,用培养液和养猪废水的混合液进行扩大富集培养;待该反应器内生物量 $>500\text{ mg/L}$ 后,将藻液再分入每个反应器,在相同条件下再次扩大培养,待反应器内生物量超过 300 mg/L ,进行正式试验。

1.3.2 试验安排

正式试验共设9种推流工况(见表1),以考察不同推流流速和日推流时长对廊道式微藻光生物反应器运行效果的影响。推流流速的设置参考了徐伦养猪场廊道式光生物反应器的平均流速($0.06\sim 0.13\text{ m/s}$)。每种工况运行约60 d,进水方式相同,即每日09:00于各反应器出水口排水 10.8 L 作为前一天出水,之后从蓄水箱引入 10.8 L 养猪废水作为进水,如此每天循环,反应器的水力停留时间(HRT)为20 d,充水比为5%。

表1 推流工况设置

Tab.1 Setting of plug-flow conditions

工况	日推流时长/h	平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	24(全天)	0.134
2	24(全天)	0.062
3	24(全天)	0.048
4	12(07:00—19:00)	0.134
5	12(07:00—19:00)	0.062
6	12(07:00—19:00)	0.048
7	8(08:00—16:00)	0.134
8	8(08:00—16:00)	0.062
9	8(08:00—16:00)	0.048

1.4 检测项目与方法

反应器进、出水取样频率为每周1~2次,测定指标包括COD、 NH_4^+-N 、TP、pH、光的照度和水温等。藻液生物量取样在反应器推流时进行,采用虹吸方式在反应器内3个取样点(见图1)中部液位各取 50 mL 藻液,混合后测定生物量。其他指标的测定方法均采用国家标准方法。

2 结果与分析

2.1 推流方式对反应器启动的影响

反应器内藻液生物量直接反映发挥生物作用的菌藻共生体系浓度,其大小和稳定程度可作为反应器启动成功的重要表征指标。启动后,各工况反应器内生物量的变化见图3。若定义生物量浓度波

动不超过均值的10%为生物量稳定,则各工况反应器达到稳定的时间点如图3中箭头所示。

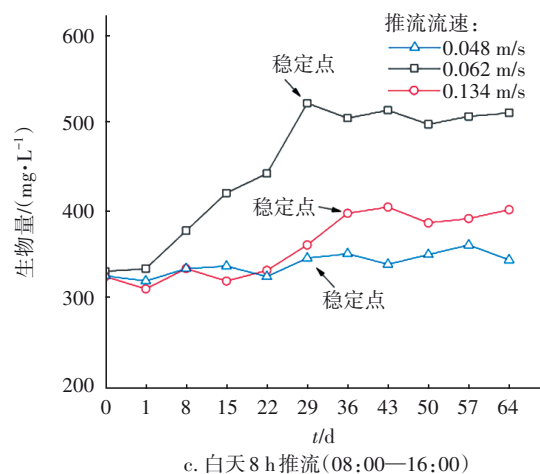
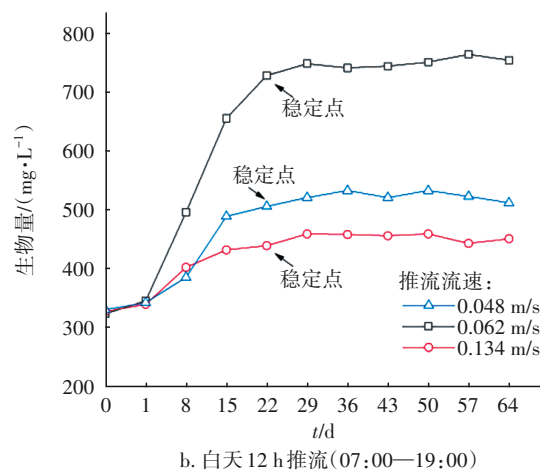
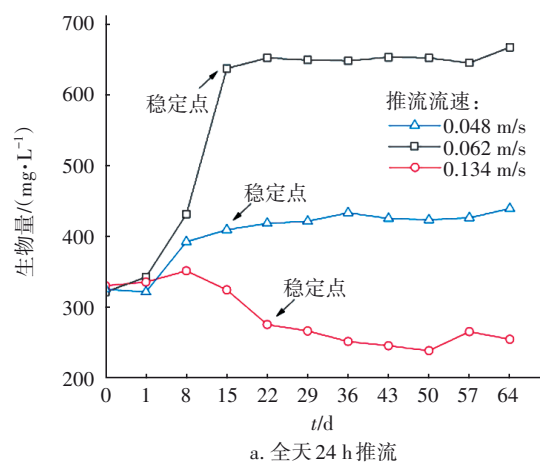


图3 反应器中微藻生物量的变化情况

Fig.3 Variation of biomass in photobioreactor

由图3可知,不同推流方式下,反应器内生物量达到相对稳定的时间和稳定时的生物量差异明显。日推流时间越长,启动达到微藻生物量稳定的耗时就越短。除工况1(24 h推流,流速为 0.134 m/s)反

反应器启动失败外(稳定时生物量低于启动浓度),推流24、12、8 h从启动到生物量相对稳定的耗时分别约为15、22和29 d。全天24 h的推流方式较白天12 h间歇推流能明显加快反应器的启动过程。

2.2 推流方式对反应器稳定后生物量的影响

推流方式对反应器稳定后的生物量也有明显影响。各工况达到稳定后的生物量均值见图4。可知,从菌藻共生生物量角度看,最佳推流方式为工况5,即最佳日推流时长和流速分别为12 h和0.062 m/s,在此条件下达到的最大平均生物量为748 mg/L。日推流时长和流速对微藻光生物反应器的影响表现在两方面,首先,推流流速越大、时间越长,混合和传质效果越好,反应器内藻类及微生物与污染物能充分混合、接触,菌藻不易附壁或沉淀,而且溶液中DO、温度、pH、CO₂等影响生化反应的参数分布也会更加均匀;但另一方面,高强度推流可能会造成过大的剪切力,破坏菌藻细胞结构和增殖,而且,水流扰动过高会使水下沉积物再悬浮,这些悬浮物在悬浮/沉降过程中会对藻类产生类似絮凝剂的网捕卷扫作用^[6],从而使菌藻细胞沉降于池底,并且沉积物再悬浮会降低透明度,使微藻光合作用减弱,生长受到抑制,工况1应该就属于这种过度推流扰动而导致微藻生物量无法增殖的情况。

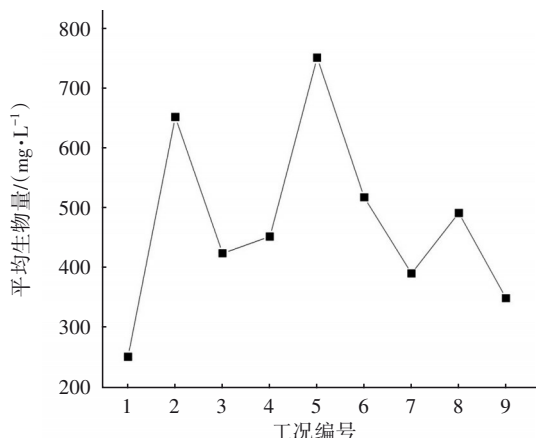


图4 不同工况下反应器稳定后的平均生物量

Fig.4 Average biomass of photobioreactor under different conditions

因此,廊道式光生物反应器需要调试最优的流速。本试验条件下,0.062 m/s流速下的生物量在所有日推流时长下均为最高,表明设置的0.134 m/s流速偏高,此时过度推流已抑制藻类增殖;0.048 m/s流速偏低,此时反应器混合传质不足,成为制约菌

藻共生系统生物量增殖的重要因素。

已有研究表明^[7-8],白天藻类光合作用释放O₂,促进好氧菌生长,此时菌藻协同作用对污染物的降解效果最好,水中营养盐、O₂和CO₂等需要更好的混合效果以促进反应中的传质效果和微藻生长;而夜间藻类以呼吸作用为主,与微生物竞争水中营养物质,此时推流带来的传质强化和微生物在水中的充分悬浮混合都更有利于细菌的新陈代谢,从而抑制了藻类生物量的增长。目前,应用于污水处理的大多数微藻光生物反应器均采用全天推流或连续搅拌混合模式^[2]。本试验结果表明,采用夜间停运、白天推流的间歇运行方式并不会削弱菌藻生物量的增殖,甚至还能促进生物量的增长,例如,白天12 h推流的生物量均大于同流速下全天24 h推流的生物量(见图3),而反应器内菌藻共生体系对污染物的协同作用机制应该是导致这一现象的主要原因。

因此,昼推夜停的推流模式更有利于廊道式光生物反应器维持较高的藻液生物量和处理效果,这也为反应器的节能运行提供了可能。

2.3 推流方式对污染物去除效果的影响

图5为不同推流流速和日推流时长下,反应器出水COD、氨氮和TP浓度及其去除率情况。可以看出,推流方式对廊道式微藻光生物反应器去除主要污染物的效果也具有明显影响。但对不同污染物,其影响规律却表现出很大的不同。由图5(a)可知,推流流速越大、日推流时间越长,反应器出水COD浓度就越低。但相同流速下全天24 h推流较白天12 h推流对COD去除率增长的贡献并不大。由于所有工况出水COD浓度均优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),因此从节能50%的角度考虑,白天12 h间歇推流、流速为0.134 m/s是去除COD的最佳工况。反应器对COD的去除,除了颗粒态有机物随SS的物理、化学沉淀作用而被去除外,主要依靠菌藻共生体系内细菌等异养微生物的生物降解作用。白天菌藻相互促进,异养微生物在微藻释氧的好氧条件下快速降解有机物,此时采用较大推流流速有利于反应器混合和传质,表现为白天加强推流能降低出水COD浓度、提高其去除率;夜间微藻与细菌形成对营养盐等的竞争,异养微生物好氧代谢活动降低,此时强化推流传质作用使COD去除率提高的效果会相应减弱。

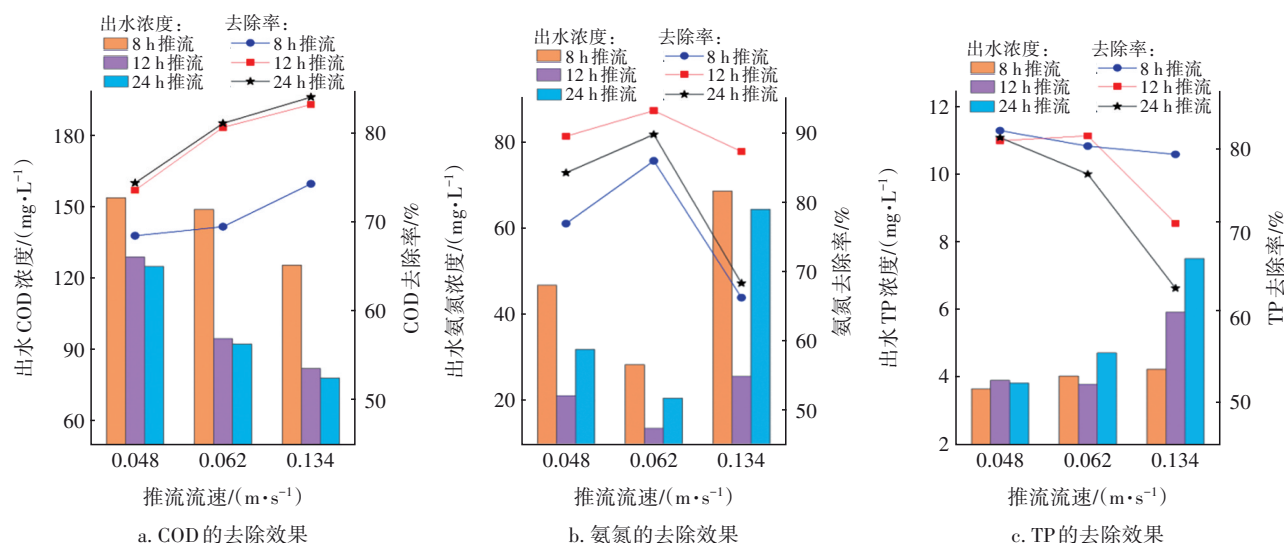


图5 不同流速和日推流时长下污染物去除情况

Fig.5 Removal of pollutants at different push velocity and time

由图5(b)可知,所有工况出水氨氮浓度均优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),其中白天12 h间歇推流、流速为0.062 m/s是去除氨氮的最佳工况。当流速超过0.062 m/s时,反应器对氨氮的去除率迅速下降,表明高强度的传质和混合对氨氮的去除是不利的。微藻光生物反应器对氨氮的去除主要是物理挥发、微生物硝化和微藻吸收同化三方面的共同作用。推流方式对这三种作用有不同的影响。在相同水温 and pH 条件下,增加推流流速和混合搅拌时间通常能促进水中游离 NH_3 向空气中挥发的速率,同时也有利于微生物的好氧硝化。但推流流速和日推流时长对藻类吸收氨氮的影响却是两方面的,从图5可看出,在任意推流时间下,适中流速(0.062 m/s)对氨氮的去除效果明显优于过高流速(0.134 m/s)和过低流速(0.048 m/s),这表明过高流速(0.134 m/s)很大程度抑制了微藻的生长,不但使微藻对氨氮的直接吸收减少,还影响了微生物对氨氮的好氧硝化;过低流速(0.048 m/s)则无法实现有效推流和混合,使微生物对氨氮的硝化作用以及氨氮挥发效果降低,导致氨氮总体去除效果不佳。因此,适宜的流速(0.062 m/s)和白天适当的日推流时长(12 h)可以有效提高系统对氨氮的去除效果。

由图5(c)可知,所有工况出水TP浓度均优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),且推流流速越小、推流时间越短,TP去除效果越好。白天8 h间歇推流、流速为0.048 m/s是去除TP的最

佳工况。日推流时长对TP去除率的影响较小,这表明反应器对TP的去除主要依靠物理/化学沉淀作用,过高的推流流速和过长的日推流时长会导致TP的沉积去除效率下降,很多学者的研究也得到了类似的结论,例如Costa等^[9]研究发现高效藻类塘中约90%的TP是通过化学沉淀作用去除的。

2.4 最佳推流方式和能耗评估

针对当前高浓度畜禽养殖废水处理难达标,以及处理设施运行能耗成本高的问题,从环保达标和节能降耗两方面评价微藻光生物反应器的处理效果和最佳推流工况,以COD、氨氮和TP出水浓度低于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)浓度限值的百分比之和为处理效果评分[见式(1)],并计算各工况的日能耗,结果见表2。可知,在试验进水条件下,处理效果最佳的推流方式为白天12 h推流、流速=0.062 m/s,此时能耗为0.54 kW·h/d,这是在保障出水水质达标情况下最节能的运行方式。这一工况(工况5)与反应器内生物量最高的工况一致(见图4)。

$$\text{处理效果评分} = \frac{C_{\text{COD}} - C_{\text{COD出}}}{C_{\text{COD}}} + \frac{C_{\text{氨氮}} - C_{\text{氨氮出}}}{C_{\text{氨氮}}} + \frac{C_{\text{TP}} - C_{\text{TP出}}}{C_{\text{TP}}} \quad (1)$$

式中: C_{COD} 、 $C_{\text{氨氮}}$ 、 C_{TP} 分别为GB 18596—2001中要求的COD、氨氮和TP排放浓度限值; $C_{\text{COD出}}$ 、 $C_{\text{氨氮出}}$ 、 $C_{\text{TP出}}$ 分别为廊道式微藻光生物反应器出水COD、氨氮和TP平均浓度。

表2 各推流方式的处理效果评分以及能耗

Tab.2 Evaluation of treatment effect and energy consumption at different plug-flow conditions

项 目	推流流速=0.048 m/s		推流流速=0.062 m/s		推流流速=0.134 m/s	
	处理效果评分	能耗/(kW·h·d ⁻¹)	处理效果评分	能耗/(kW·h·d ⁻¹)	处理效果评分	能耗/(kW·h·d ⁻¹)
推流时长=8 h	1.57	0.24	1.76	0.36	1.30	0.72
推流时长=12 h	1.92	0.36	2.12	0.54	1.73	1.08
推流时长=24 h	1.81	0.72	2.02	1.08	1.06	2.16

3 结论

① 推流方式对廊道式微藻光生物反应器启动耗时和稳定后藻液生物量浓度的影响明显,全天24 h连续推流能促进反应器快速启动。

② 在白天12 h间歇推流且维持较低流速(0.062 m/s)条件下,廊道式微藻光生物反应器可实现节能条件下的最大藻液生物量和最佳处理效果。

③ 推流方式对不同污染物去除效果的影响不同。推流流速越大、日推流时间越长,反应器对COD的去除率越高;仅在白天推流且流速较小时,反应器也能维持较高的氨氮去除率;而推流流速越小、日推流时间越短,反应器对总磷的去除率就越高。

参考文献:

- [1] 李亚丽,赵国强,武双,等. 畜禽废水处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(9): 18-22.
LI Yali, ZHAO Guoqiang, WU Shuang, *et al.* Research progress of livestock and poultry wastewater treatment technology[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(9): 18-22 (in Chinese).
- [2] 周静,苟婷,张洛红,等. 流速对不同浮游藻类的生长影响研究[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 75-82.
ZHOU Jing, GOU Ting, ZHANG Luohong, *et al.* The effect of flow velocity on the growth of different phytoplankton [J]. Ecological Science, 2018, 37(6): 75-82 (in Chinese).
- [3] 王华,逢勇. 藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 884-889.
WANG Hua, PANG Yong. Numerical simulation on hydrodynamic character for algae growth [J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 884-889 (in Chinese).
- [4] 李旭东,何小娟,周琪,等. 高效藻类塘处理太湖地区农村生活污水研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(11): 1505-1509.

LI Xudong, HE Xiaojuan, ZHOU Qi, *et al.* Study on Taihu rural domestic wastewater treatment performance in a high rate algal pond system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(11): 1505-1509 (in Chinese).

- [5] 黄翔峰,池金萍,何少林,等. 高效藻类塘处理农村生活污水研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(5): 35-39.
HUANG Xiangfeng, CHI Jinping, HE Shaolin, *et al.* Study on treatment of rural domestic sewage by high efficiency algae pond [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(5): 35-39 (in Chinese).
- [6] PANNARD A, BORMANS M, LAGADEUC Y. Short-term variability in physical forcing in temperate reservoirs: effects on phytoplankton dynamics and sedimentary fluxes [J]. Freshwater Biology, 2007, 52(1): 12-27.
- [7] WANG Y Y, WANG S Y, SUN L Q, *et al.* Screening of a *Chlorella*-bacteria consortium and research on piggery wastewater purification [J]. Algal Research, 2020, 47: 101840.
- [8] 谢冰涵,公维佳,梁恒,等. 光生物反应器对厌氧消化液的处理效能[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 14-18.
XIE Binghan, GONG Weijia, LIANG Heng, *et al.* Treatment efficiency of anaerobic digestion effluent by photobioreactor [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(17): 14-18 (in Chinese).
- [9] COSTA R H, MEDRI W, PERDOMO C C. High-rate pond for treatment of piggery wastes [J]. Water Science and Technology, 2000, 42(10/11): 357-362.

作者简介:肖海文(1976-),女,四川雅安人,博士,副教授,主要从事雨水、废水的治理和资源化利用以及人工湿地废水处理技术研究。

E-mail: xiaohaiwen99@163.com

收稿日期:2022-01-27

修回日期:2022-04-28

(编辑:刘贵春)