

基于 AQUATOX 模拟的小球藻处理水产养殖废水试验

马兴冠^{1,2}, 周欣彤¹, 简文浩¹

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽河流域水污染防治研究院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 为实现低碳快捷处理水产养殖废水,探究利用小球藻处理废水的最优方案。方法 以某鲢鱼养殖基地水体为对象,利用 AQUATOX 软件建立水生态环境模型,根据不同的水产养殖废水浓度、水力停留时间和流量建立 5 个试验组,稀释后投加 5 mg/L 的小球藻藻种,模拟分析小球藻的处理效果,并将结果与实测数据进行对比。结果 投加小球藻的最适比例为: $\rho(\text{小球藻}):\rho(\text{TN}):\rho(\text{NH}_3\text{-N}):\rho(\text{TP}):\rho(\text{CODCr})=1:16.8:3.2:0.8:40$;最适投加比例的小球藻对废水中的 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、CODCr 的处理效率分别达到了 73%、72.5%、94%、75%;藻生物量也达到了初始值的 26 倍。结论 应用 AQUATOX 模型可以快速实现小球藻处理水产养殖废水方案优化, TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 CODCr 质量浓度模拟结果的平均相对误差分别为 0.32%、2.52%、4.83% 和 0.10%。

关键词 小球藻;水产养殖废水处理;AQUATOX 模型;优化方案;模拟控制

中图分类号 X522

文献标志码 A

引用格式:马兴冠,周欣彤,简文浩.基于 AQUATOX 模拟的小球藻处理水产养殖废水试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):378-384. (MA Xingguan, ZHOU Xintong, JIAN Wenhao. Experimental study on treatment of aquaculture wastewater by chlorella based on AQUATOX simulation[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2): 378-384.)

Experimental Study on Treatment of Aquaculture Wastewater by Chlorella Based on AQUATOX Simulation

MA Xingguan^{1,2}, ZHOU Xintong¹, JIAN Wenhao¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Liaoning Province Liaohe River Basin Water Pollution Prevention and Control Research Institute, Shenyang, China, 110168)

收稿日期:2022-03-25

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601001)

作者简介:马兴冠(1972—),男,教授,博士,主要从事水污染控制理论与技术等方面研究。

Abstract: In order to low carbon and fast treatment of aquaculture wastewater, the optimal solution for wastewater treatment by *Chlorella* was explored. The water body of a Spanish mackerel aquaculture base taken as the object, the water ecological environment model was established by using AQUATOX software. Five simulation groups were established according to different aquaculture wastewater concentrations, hydraulic retention times and flow rates. 5 mg/L of *Chlorella* algae species after dilution were added in the simulation groups. The treatment performance of *Chlorella* was obtained by the simulation experiments. Based on the results of simulation and the actual measured data, the optimal ratio of *Chlorella* spiked was $\rho(\text{Chlorella}) : \rho(\text{TN}) : \rho(\text{NH}_3\text{-N}) : \rho(\text{TP}) : \rho(\text{COD}_{\text{Cr}}) = 1 : 16.8 : 3.2 : 0.8 : 40$; the treatment efficiencies of *Chlorella* spiked with the optimal ratio on the TN, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, and COD_{Cr} in the wastewater reached 73%, 94%, 72.5%, and 75%, respectively. Biomass has also reached 26 times of the initial value. The application of the AQUATOX model can be quickly achieved to optimise the *Chlorella* treatment scheme for aquaculture wastewater, and the average relative errors of the simulation results for TN, TP, $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD_{Cr} mass concentrations were 0.32%, 2.52%, 4.83% and 0.10%, respectively.

Key words: *chlorella*; aquaculture wastewater treatment; AQUATOX model; optimization scheme; analog control

我国水产养殖业正呈现出规模化和集约化的发展趋势,水产养殖废水中氮磷浓度的升高主要源于养殖过程中过度投放的饲料和养殖排泄物^[1],已有许多研究采用物理化学等方法对水产养殖废水进行净化处理,仍然存在一系列问题亟待解决^[2]。在双碳背景下,微藻因固碳能力强和能有效去除水中污染物质等特点而在废水处理中被广泛关注^[3]。微藻是一类极简单的低等植物,具有体积小、质量轻、易培养的特点,环境适应能力和生存能力极为强大^[4],因此在不同类型的污水处理中得到广泛应用,包括养殖污水、市政污水、有机废水和重金属污水等^[5]。微藻在处理氮磷含量较高的农业污水、养殖污水以及市政污水等方面表现出很高的处理效率,同时在这些污水中能够实现一定程度的生长^[6]。目前,用于水产养殖废水处理的微藻主要有小球藻、色球藻、杜氏盐藻、螺旋藻、小环藻、栅藻等。小球藻个体较小,在水体中分布均匀,且小球藻的生长速率快,对于水产养殖废水的耐受能力高,是处理该类废水的优良微藻,也可作为优良的生物饵料,能提升鱼、虾、贝类等养殖动物对于病毒的抵抗能

力,提高养殖产品产量^[7]。有研究表明,小球藻具有高度同化氮、磷的能力,通过吸收氮、磷营养元素合成自身生物物质,对氨氮和总磷有良好的去除效果,小球藻对海水养殖废水中 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、COD 均有较好的处理效果^[8-9]。然而,在面对不同质量浓度的水产养殖废水时,迅速确定小球藻投加的最佳方案仍然是一个关键问题。AQUATOX 软件能够比较准确地描述水中生态系统实际情况和污染物质的去除效果^[10]。基于此,笔者以某水产养殖废水为研究对象,利用 AQUATOX 软件建立水产养殖废水中添加小球藻后的水质变化和藻类生长过程模型,对比模拟结果与实测数据,评估 AQUATOX 模型模拟小球藻对养殖废水的处理效果,在此基础上,通过模拟试验,得到了小球藻处理养殖废水的优化方案。

1 AQUATOX 模型

1.1 模型建立

选取北方某鲢鱼养殖基地水体作为研究对象,养殖基地排放池的进出水采用连续式内回流,排放池的主要特征参数如表 1 所示。

利用 AQUATOX 软件建立水体模拟模型,模拟时段为 2021 年 6 月 21 日至 2021 年 7 月 1 日,共 11 d。

表 1 排放池特征参数

Table 1 Characteristic parameters of discharge pond

池面积/ m ²	最大边 长/m	池高/m	平均水 深/m	水力停留 时间/h	流量/ (L·min ⁻¹)
50	8	5	2	12	138.86

选取 21 个状态变量和驱动变量进行模拟,其中 TN、NH₃-N、NO₃⁻-N、TP、COD_{Cr}、水量、水温、风速和 pH 的初始数据在 6 月测得。污染物边界条件和初始污染物质量分数如表 2 所示。模型中小球藻的相关参数取值:饱和光照强度为 22.5 W/m²、磷的质量浓度为 0.055 mg/L、氮的质量浓度为 0.400 mg/L、最适温度为 35 ℃、最大光合速率为 3.6 mg/d、沉降速率为 0.01 m/d。

表 2 初始水质参数

Table 2 Initial water quality parameters mg/L

$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$	$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$
42.0	8.0	2.0	100.0	22.0

1.2 模拟方程

生物生长模拟采用一级动力方程,并针对小球藻进行了生态模拟计算,选取藻类的生物量、藻类种群负荷、光合作用、呼吸作用、排泄或光呼吸、非掠食性死亡、掠食性死亡、沉降活动、下游运移、上游汇入生物量、扩散传播以及脱落的生物量作为主要相关因子。

采取一级动力方程对 TN、TP、NH₃-N 和 COD_{Cr} 等营养盐进行模拟,选取其质量浓度、负荷率、呼吸作用、硝化作用、植物吸收、下游运移、上游汇入以及扩散质量为主要相关因子建立模拟方程,进行计算。

2 模型验证

2.1 藻生物量预测结果分析

2.1.1 小球藻质量浓度变化

有研究结果表明^[11],在 TN、TP 质量浓

度比为 16:1 的环境下小球藻的生长速率最快。该鲢鱼养殖基地废水中 TN 的质量浓度为 42 mg/L,TP 的质量浓度为 2 mg/L, $\rho(\text{TN}):\rho(\text{TP})=21:1$,小球藻在鲢鱼养殖废水中生长速率增加较快。在投加小球藻 9 d 后,小球藻质量浓度由 5 mg/L 增加到 83 mg/L,生长效果显著。在培养阶段后期,TN、TP 质量浓度比逐渐增大,当浓度比超过 22:1 时,小球藻生长缓慢^[12]。可能是养殖废水中有机物被大量同化利用,导致小球藻生长所需营养物质不足,造成其生长平缓,或者由于小球藻的密度增大后形成种内竞争,部分藻细胞停止生长。

2.1.2 模拟误差分析

小球藻生物质量浓度的模拟与实测结果对比如图 1 所示。在培养的前 4 天,模拟结果与实测结果保持一致,从培养的第 5 天开始,实测值和模拟值的误差逐渐增大,由 4% 上升到 29%。分析认为,由于在模拟的小球藻生消方程中,生物减少率只考虑了有限因素,而实际小球藻减少率还与小球藻本身的质量浓度有关,当小球藻浓度超过限值后,小球藻死亡率急剧增大,这是导致误差逐渐扩大的原因。要想获得准确的小球藻质量浓度预测结果,应该对原生消方程做适当的调整,但小球藻质量浓度的误差不影响对营养盐的模拟。

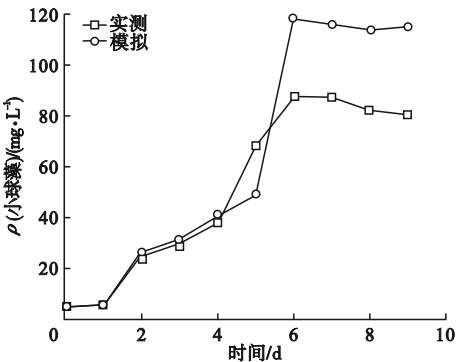


图 1 小球藻质量浓度变化的模拟值与实测值对比

Fig. 1 Simulated and measured values of chlorella mass concentration

2.2 污染物降解预测结果分析

2.2.1 污染物质量浓度变化

图2为污染物降解的预测值与实测值对比。水中氮的主要存在形式有亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、无机铵盐、溶解氨和含氮有机化合物等,小球藻藻体细胞可以利用这些氮源来

合成胞内组分^[13]。鲈鱼养殖废水中 TN 初始质量浓度为42 mg/L,投加小球藻后的第6天,水体中 TN 质量浓度达到最低值 16.24 mg/L,最大日去除量为 3.58 mg/L,去除率为 61.33%,可见小球藻对养殖废水中的 TN 去除效果显著(见图 2(a))。

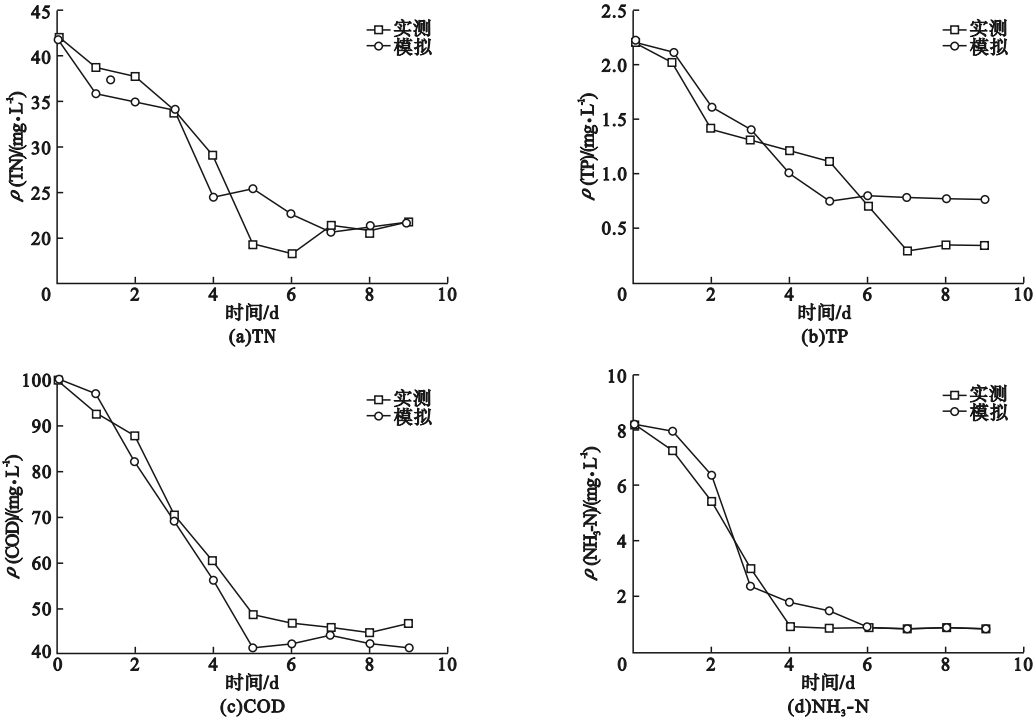


图2 水质指标模拟值与实测值对比

Fig. 2 Simulated and measured values of water quality index

水体富营养化受到磷浓度的影响显著^[12]。大部分磷是以正磷酸盐形式存在的,正磷酸盐可以分成溶解型和颗粒型两种,小球藻可以吸收水体中溶解型无机磷酸盐,用于合成细胞内的脂肪、蛋白质、核酸等物质,从而起到对磷的降解作用。鲈鱼养殖废水中 TP 初始质量浓度为 2.2 mg/L,在废水中投加小球藻后,废水中 TP 的质量浓度逐渐降低。第8天时,TP 质量浓度达到稳定值。小球藻对废水中 TP 的最大日去除量为 0.18 mg/L,降解率为 84%(见图 2(b))。

化学需氧量是反映水体有机污染程度的重要指标^[14]。鲈鱼养殖废水中 CODcr 初始质量浓度为 100 mg/L。处理的第 2~5 天,

废水中 CODcr 质量浓度急剧下降,第8天后 CODcr 质量浓度不再降低,第9天略有升高。CODcr 的日去除量为 6.33 mg/L,去除率为 57.78%(见图 2(c))。整体看,小球藻对 CODcr 有一定的去除效果。

鲈鱼养殖废水中 NH₃-N 初始质量浓度为 8 mg/L,投加小球藻后第4天,NH₃-N 质量浓度降为 0.67 mg/L,小球藻对 NH₃-N 去除率为 92%。继续培养,质量浓度虽仍有降低,但数值变化较小。小球藻对养殖废水中的 NH₃-N 去除效果显著(见图 2(d))。

2.2.2 模拟误差分析

用平均相对误差对验证结果进行了分析。TN、TP、NH₃-N、CODcr 质量浓度的平均

相对误差分别为 0.32%、2.52%、4.83%、0.10%,各水质指标的平均相对误差都在 5% 以内,模拟值与实测值基本接近。模拟的水质变化趋势基本能反映实际处理过程中的变化规律。

3 小球藻投加方案优化

水力停留时间(HRT)影响小球藻与废水中有机物的接触时间,水力停留时间越长,处理效果越好,但处理效率会降低。流量影响废水中有机物质的扩散速率,扩散速率的提高有利于小球藻和有机物质的充分接触。根据污染物初始质量浓度、水力停留时间和流量不同,分别设置 G₁、G₂、G₃、G₄、G₅ 五个模拟试验组,利用建立的生态模型模拟在不同质量浓度的废水中投加质量浓度为 5 mg/L 小球藻的处理效果,确定水产养殖废水水质与投加小球藻处理及培养的最佳方案。模拟试验组污染物质量浓度、水力停留时间及流量等参数如表 3 所示。

表 3 模拟组污染物各参数

Table 3 The parameters of pollutants in Simulate			
编号	$\rho(\text{CODcr})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	水力停留时间/h	流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
G1	300	6	277.83
G2	200	8	208.38
G3	100	10	167.67
G4	50	12	138.86
G5	25	14	119.07

注:各组 $\rho(\text{CODcr}):\rho(\text{TP}):\rho(\text{TN}):\rho(\text{NH}_3\text{-N})=50:1:21:4$ 。

3.1 小球藻质量浓度变化规律

5 个模拟试验组小球藻质量浓度变化如图 3 所示。在培养初期,0~5 d,各组藻的日均生长量达到了 11 mg/L,且 5 组小球藻的生长速度较为均衡,相差不大。从培养的第 5 天开始,G₂ 组和 G₃ 组小球藻的生长速率远快于其他组。在培养的第 9 天,G₂ 组藻质

量浓度达到了投加量的 26 倍,G₃ 组达到了 23.4 倍,其余各组最高不超过 9 倍。G₁ 组因为污染物质量浓度过大,超出了小球藻的负荷能力,从而抑制了其生长发育。G₄ 组和 G₅ 组污染物质量浓度较小,随着水体小球藻数量的增加,水体无法给予小球藻足够的营养物质,所以水体小球藻质量浓度不再快速增长,而是在恒定的数值附近上下波动。

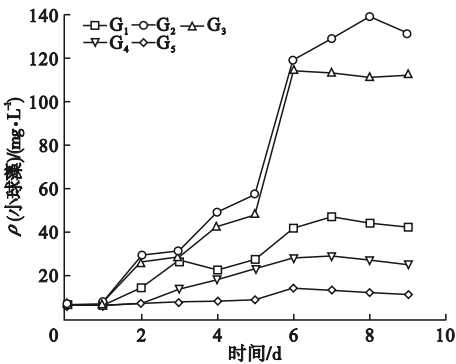


图 3 小球藻质量浓度变化

Fig. 3 Changes of Chlorella mass concentration

从图 3 中还可以看出,水力停留时间对小球藻的生物量影响很大,水力停留时间 8~10 h 的时候生物量最大,水力停留时间 14 h 小球藻生长缓慢。流量的影响规律相反。

3.2 污染物质量浓度变化规律

图 4 为各试验组污染物质量浓度变化模拟结果。在整个模拟过程中,G₁ 组的 TN 质量浓度从 126 mg/L 降低到了 25 mg/L,削减量达到了 80%;次之是 G₂ 组的 73%;G₃、G₄、G₅ 组均不到 50%。

G₁、G₂、G₃、G₄、G₅ 组的 TP 的质量浓度分别从 6 mg/L、4 mg/L、2 mg/L、1 mg/L、0.5 mg/L 降低到了 1.5 mg/L、1.1 mg/L、0.77 mg/L、0.64 mg/L、0.23 mg/L,处理效率分别为 75%、72.5%、65%、36%、54%,以此判断 G₁、G₂ 组处理效果较好。

G₁ 组对 NH₃-N 的处理效率最高,从最初的 24 mg/L 降低到了 0.94 mg/L,处理效率达到了 96%,G₂ 组的处理效率也达到了 94%,G₃ 组、G₄ 组、G₅ 组的处理效率分别为

90%、93%、86%。各组处理 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的效率都比较好。

G_1 、 G_2 两组 CODcr 的削减量较为可观,

分别达到了 82% 和 75%,其余各组随着 CODcr 质量浓度的降低,对于 CODcr 的处理效果逐渐变差。

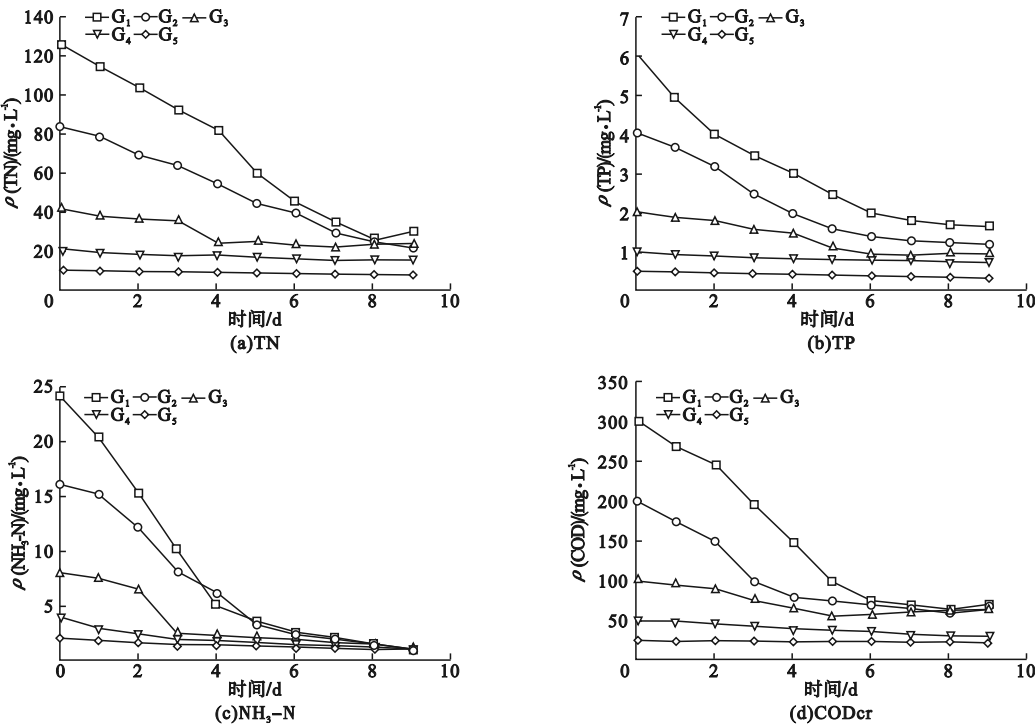


图4 污染物质量浓度变化

Fig. 4 Change of pollutant mass concentration

对比 5 个试验组的结果, G_2 组在小球藻的培养和对水质的改善两方面最好,该组的小球藻与污染物的质量浓度比为: $\rho(\text{小球藻}) : \rho(\text{TN}) : \rho(\text{TP}) : \rho(\text{NH}_3\text{-N}) : \rho(\text{COD}_{\text{cr}}) = 1 : 16.8 : 3.2 : 0.8 : 40$ 。模拟期间,小球藻对 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、CODcr 的处理效率分别达到了 73%、72.5%、94%、75%,同时,小球藻生长量为初始的 26 倍。

从图 4 中还可以看出,水力停留时间越长,流量越小,TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 CODcr 的去除效率越高,跟生物量没有正相关性。

4 结 论

(1)通过 AQUATOX 软件构建的模拟模型验证分析显示,在向水产养殖废水中添加小球藻后,小球藻生物质量浓度的模拟值与实测值之间的误差逐渐增大。在此过程中,

TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 CODcr 质量浓度的平均相对误差分别为 0.32%、2.52%、4.83% 和 0.10%,所有水质指标的平均相对误差均保持在 5% 以内。

(2)小球藻处理水产养殖废水的最适投加比例为: $\rho(\text{小球藻}) : \rho(\text{TN}) : \rho(\text{TP}) : \rho(\text{NH}_3\text{-N}) : \rho(\text{COD}_{\text{cr}}) = 1 : 16.8 : 3.2 : 0.8 : 40$,小球藻水力停留时间为 8 h,流量为 208.38 L/min,对养殖废水中 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、CODcr 的处理效率分别达到了 73%、72.5%、94%、75%,小球藻生长量也达到了初始的 26 倍。

参考文献

[1] 马洪婧,刘鹰,吴英海,等.微生物固定化技术处理水产养殖废水研究进展[J].水处理技术,2022,48(7):13-18.
(MA Hongjing, LIU Ying, WU Yinghai, et al. Review on the aquaculture wastewater treatment with microbial immobilization

- technology [J]. Technology of water treatment, 2022, 48(7): 13–18.)
- [2] 伍建业, 吴永贵, 兰美燕, 等. 复合人工湿地对陆基水产养殖废水中氮磷的净化及其微生物群落特征[J]. 环境工程学报, 2023, 17(2): 517–531.
(WU Jianye, WU Yonggui, LAN Meiyang, et al. Nitrogen and phosphorus purification from land-based aquaculture wastewater and microbial community characteristics of the combined constructed wetland [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2023, 17(2): 517–531.)
- [3] 马兴冠, 简文浩. 生活污水培养小球藻生长条件及生长动力学研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(10): 75–80.
(MA Xingguan, JIAN Wenhao. Growth conditions and growth kinetics of chlorella vulgaris cultured in domestic sewage [J]. Technology of water treatment, 2023, 49(10): 75–80.)
- [4] 李亚丽, 甄新, 李春庚, 等. 藻菌共生系统处理污水的研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(11): 3181–3185.
(LI Yali, ZHEN Xin, LI Chungeng, et al. Study on pollutant removal and biomass accumulation by symbiosis of algae and bacteria in wastewater treatment [J]. Applied chemical industry, 2021, 50(11): 3181–3185.)
- [5] 罗智展, 舒璇, 许瑾, 等. 利用微藻处理污水的研究进展[J]. 水处理技术, 2019, 45(10): 17–23.
(LUO Zhizhan, SHU Hu, XU Jin, et al. Research progress of wastewater treatment by microalgae [J]. Technology of water treatment, 2019, 45(10): 17–23.)
- [6] 周浩媛, 陈军, 盛彦清. 微藻技术在污水处理中的应用与展望[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(11): 160–171.
(ZHOU Haoyuan, CHEN Jun, SHENG Yanqing. Research progress of microalgae wastewater treatment technologies [J]. Environmental science & technology, 2020, 43(11): 160–171.)
- [7] 丁一, 侯旭光, 郭战胜, 等. 固定化小球藻对海水养殖废水氮磷的处理[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 336–342.
(DING Yi, HOU Xuguang, GUO Zhansheng, et al. Treatment of nitrogen and phosphorus in mariculture wastewater by immobilized chlorella [J]. China environmental science, 2019, 39(1): 336–342.)
- [8] 马兴冠, 宁惠婕, 刘金金, 等. 藻菌比对低碳氮生活污水处理效能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 565–569
(MA Xingguan, NING Huijie, LIU Jinjin, et al. Influence of algal-bacterial ratios on the treatment efficiency of low carbon nitrogen ratio domestic sewage [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(3): 565–569.)
- [9] 马兴冠, 宁宇, 李洪波. 高速公路服务区集中式污水处理工艺及综合评价[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5): 947–954.
(MA Xingguan, NING Yu, LI Hongbo. Comprehensive evaluation of centralized sewage treatment technology in expressway service area [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5): 947–954.)
- [10] 冯丽娟, 肖耿锋, 程香菊, 等. 基于 AQUATOX 模型的集装箱养殖尾水净化塘生态系统模拟及调控预测[J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1525–1536.
(FENG Lijuan, XIAO Gengfeng, CHENG Xiangju, et al. Simulation and regulation prediction of container aquaculture wastewater ponds ecosystem based on AQUATOX model [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2022, 16(5): 1525–1536.)
- [11] 马彩虹, 麻晓霞, 马玉龙, 等. 不同氮磷浓度对小球藻生长性能的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(22): 11367–11369.
(MA Caihong, MA Xiaoxia, MA Yulong, et al. Effects of different concentrations of N, P on the growth performance of chlorella sp. [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2012, 40(22): 11367–11369.)
- [12] 魏杰, 刘倩, 王月琪, 等. 氮磷比对蛋白核小球藻和塔玛亚历山大藻种间竞争的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 35(4): 1074–1081.
(WEI Jie, LIU Qian, WANG Yueqi, et al. Effect of nitrogen-phosphorus ratio on the interspecific competition of chlorella pyrenoidosa and alexandrium tamarense [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2014, 35(4): 1074–1081.)
- [13] 胡海燕. 水产养殖废水氨氮处理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
(HU Haiyan. Study on ammonia nitrogen treatment for aquaculture wastewater [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.)
- [14] 范可章, 姚国兴, 陈爱华, 等. 文蛤密度对养殖水体底质硫化物和 COD 影响的研究[J]. 水产养殖, 2006, 27(1): 9–12.
(FAN kezhang, YAO Guoxing, CHEN Aihua, et al. Effect of meretrix stocking density on sulfide and COD in substrate of water [J]. Journal of aquaculture, 2006, 27(1): 9–12.)
- [15] 王黎颖. 小球藻对水产养殖废水的净化及响应[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
(WANG Liying. The purification and response of chlorella vulgaris to aquaculture wastewater [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)