



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

大藻对污水中污染物净化作用和效果分析

刘鹤莹, 杨鹏, 支苏丽, 杜德林, 张克强

引用本文:

刘鹤莹, 杨鹏, 支苏丽, 杜德林, 张克强. 大对污水中污染物净化作用和效果分析[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 903-912.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0492>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

29种水生植物对农村生活污水净化能力研究

张倩妮, 陈永华, 杨皓然, 陈明利, 柳俊

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 392-402 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0235>

人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展:效果、机制和影响因素

王宇娜, 国晓春, 卢少勇, 刘晓晖, 王晓慧

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 722-734 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0499>

农村生活污水土壤渗滤系统处理技术研究进展

王淞民, 张春雪, 刘丽媛, 曹昊宇, 彭皓, 魏孝承, 郑向群

农业资源与环境学报. 2022, 39(2): 293-304 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0487>

不同季节生态沟净化养殖废水能力对比研究

吴华山, 赵慧, 黄红英, 徐跃定

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 245-250 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0262>

一种无动力·蒸发式农村生活污水处理新技术及其工程应用

陈咄圳, 赵建军, 郑向群

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 570-574 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0264>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘鹤莹, 杨鹏, 支苏丽, 等. 大藻对污水中污染物净化作用和效果分析[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 903–912.

LIU H Y, YANG P, ZHI S L, et al. Purification effect and effect analysis of *Pistia stratiotes* L. on pollutants in sewage: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 903–912.



开放科学 OSID

大藻对污水中污染物净化作用和效果分析

刘鹤莹^{1,2}, 杨鹏², 支苏丽², 杜德林^{1,2}, 张克强^{1,2,3*}

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150036; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 农业农村部环境保护科研监测所大理综合实验站, 云南 大理 671004)

摘要:大藻被广泛应用于污水处理,是一种高效脱氮除磷和吸收重金属的水生植物。本文主要采用文献调研方法,系统总结大藻对污水中污染物的净化作用,重点讨论和分析了大藻对多种污染物的去除效果、影响因素及净水机制。结果表明,大藻具有较强的营养传输能力、固碳增汇能力和多种污染物吸收能力,将其生物特性与系统环境整体及内部微生物的作用相结合,合理施用大藻对多类污水的治理均有较好的应用价值。此外,本文对大藻在除盐和抗生素方面的应用研究及建立水中养分的吸收转运模型等提出展望,旨在为大藻在污水净化中的应用提供指导。

关键词:大藻;氮;磷;抗生素;污水净化处理

中图分类号:X703;X173 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2022)05-0903-10 doi: 10.13254/j.jare.2021.0492

Purification effect and effect analysis of *Pistia stratiotes* L. on pollutants in sewage: A review

LIU Heying^{1,2}, YANG Peng², ZHI Suli², DU Delin^{1,2}, ZHANG Keqiang^{1,2,3*}

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150036, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 3. Dali Agro-Environmental Science Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671004, China)

Abstract: *Pistia stratiotes* L., a hydrophyte with excellent abilities in removing nitrogen or phosphorus and absorbing heavy metals, has been used widely in sewage purification treatment. To summarize the purification effect of *P. stratiotes* on pollutants in sewage systematically, this study mainly adopted the literature investigation method and focused on discussing the removal efficiency and analyzing the influencing factors and removal mechanism of *P. stratiotes*. The results showed that *P. stratiotes* had strong capacities of nutrient transport, carbon sequestration, and pollutant absorption. Because of the combination of the biological characteristics of *P. stratiotes* and the role of the system environment and microbes within it, proper usage of the plant provides good application value for the treatment of many kinds of sewage. In addition, the authors also searched for studies on salt or antibiotics removal by *P. stratiotes*, with the hope of establishing or improving a nutrient absorption and transport model, which could provide guidance for using *P. stratiotes* in sewage purification treatment.

Keywords: *Pistia stratiotes* L.; nitrogen; phosphorus; antibiotics; sewage purification treatment

收稿日期:2021-08-07 录用日期:2021-10-22

作者简介:刘鹤莹(1997—),女,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要从事养殖业污染防治研究。E-mail:liuturn@outlook.com

*通信作者:张克强 E-mail:keqiangzhang68@163.com

基金项目:云南省重大科技专项计划项目(202102AE090011);云南省专家工作站项目(202005AF150204);天津市奶牛(肉羊)产业技术体系创新团队建设(ITTCS2021000)

Project supported: Major Science and Technology Special Plan Project of Yunnan Province(202102AE090011); Yunnan Province Expert Workstation Project(202005AF150204); Innovation Team of Tianjin Dairy(Sheep) Research System(ITTCS2021000)

大藻(*Pistia stratiotes* L.),又名水白菜(*Water lettuce*)、水芙蓉、水浮莲等,是天南星科大藻属漂浮植物,喜高温高湿气候,在23~35℃环境中能够快速生长,天然盛生于我国南方及西南方富营养化湖泊。大藻繁殖速度快,根系发达,具有较强的营养传输能力和固碳增汇能力^[1];富含蛋白质及有机酸,不仅可作饲料原材料,而且具有高产发酵气体的先天优势^[2],资源开发利用价值高;善消纳污染物,易打捞,被广泛应用于多类污染水体的生态修护。

大藻污水净化处理的相关研究往往聚焦于水生植物组合对不同水体的净化效果,也有学者针对常见工农业用水中的污染因子转移状况进行追踪。但关于大藻对常见污染物的去除效果、影响因素和净水机制等没有系统的阐述,对氮、磷等营养盐适应状况了解不甚透彻,对特定废水的污染物消纳效果缺少总结。本文主要通过文献调研的方法,重点讨论和分析了大藻对不同污染物的去除效果、影响因素及净水机制,并基于该植物净水能力对其脱盐及去除抗生素的后续研究提出展望。同时,建议建立大藻对养分吸收转运的模型,旨在为大藻在污水深度处理中的应用提供指导。

1 大藻对污水中不同污染物的去除效果

1.1 常规污染物

大藻是一种脱氮除磷效果优异的植物,对污、废

水中一些常规污染物的去除效果如表1所示。该植物对必需元素仅在耐受阈值下具有净化作用,氮、磷、钾含量超过100、50 mg·L⁻¹和150 mg·L⁻¹时大藻生长会受到抑制^[6]。笔者通过监测不同浓度自配废水培育下的大藻酶活,认为大藻偏好利用氨氮,对氨氮和硝氮的耐受阈值分别为126 mg·L⁻¹和84 mg·L⁻¹。在适宜条件下,大藻的脱氮效率往往随水体氮浓度的增加和时间延长而升高。大藻对总氮初始浓度为2.45~9.41 mg·L⁻¹的富营养化江水,经21 d水质净化处理,其去除率为48.36~61.10%^[17];用大藻直接处理氨含量约15 mg·L⁻¹的生活污水,1个月内对总氮的最大去除率在80%以上^[18];对于总氮在27.19 mg·L⁻¹的二级处理城市污水,28 d内去除率可达96.3%^[19]。通常而言,陈腐的水产养殖用水中氨氮含量增加,大藻在缓流养殖废水中数小时就可使氨氮和亚硝态氮的去除率超过40%^[10],时间延长后,由于植物的光合作用,水中溶解氧含量增加,硝化反应更为剧烈,微生物反硝化作用也增强,鱼鳖养殖的主要代谢产物均会减少。另外,废水中的高含量碳能够增加氨化细菌对氮的吸附,降低氮有效性的同时,水体碳素也会被植物利用以供其生长。外界环境磷浓度达到4 mmol·L⁻¹时,叶片内多种细胞器磷含量降低,大藻的吸磷能力受到抑制^[20]。目前较为庞大的净化生态系统内,大藻除磷被认为是磷沉降作用,比植物吸收作用更大^[21-22]。

大藻无法直接同化有机物,需要自身根系及所在

表1 大藻对常规污染物的去除效果

Table 1 Removal effects on conventional pollutants of *Pistia stratiotes* L.

污、废水种类 Type of sewage or wastewater	处理时间 Time	氮素去除率 Nitrogen removal rate/%				总磷去除率 TP removal rate/%	化学需氧量去除率 COD removal rate/%	电导率降低率 EC reduction rate/%	参考文献 Reference
		总氮 TN	氨氮 NH ₃ -N	硝氮 NO ₃ -N	亚硝氮 NO ₂ -N				
社区生活污水	24 h	—	88.66	83.6	—	81.2	—	—	[3]
模拟农村粪便污水出水	20 d	89.4	99.0	—	—	77.2	>61.7	—	[4]
中试规模处理厂生活污水	42 d	100	—	—	—	100	79.18	—	[5]
生活污水厂尾水	90 d	45.74	42.96	—	—	34.21	30.93	5.95	[6]
奶牛场稀释废水	8 d	—	69.21	—	—	45.88	82.33	—	[7]
厌氧消化牛粪废水	31 d	—	99.2	—	—	64.2	79.6	37.1	[8]
猪场沼液发酵池稀释废水	14 d	—	98.9	—	—	90.9	—	—	[9]
观赏鱼基地污水	1.5 h	4.5	42.4	21.4	47.5	51.5	25.9	—	[10]
甲鱼养殖水	60 d	94.93	—	—	—	97.47	—	—	[11]
黄颡鱼养殖水	60 d	—	61	—	33	—	—	—	[12]
人工湿地出水	7 d	75.6	97.5	—	—	84.5	—	—	[13]
中试规模泻湖	7 d	—	98.26	88.10	—	88.07	61.72	—	[14]
稀释渗滤液	—	—	57.40	65.19	—	69.57	97.03	79.97	[15]

注:“—”表示无相关数据。下同。

Note: “—” means no relevant data. The same below.

水域中微生物的辅助,且必须限制待处理水体中的有机质浓度。大藻对于COD含量在 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下的稀释后的畜禽养殖废水,其最大去除率可达到80%左右^[7]。SOOKNAH等^[8]测定大藻对厌氧牛粪废水中总COD和可溶性COD去除情况发现,水中难溶性有机质含量也在减少。李磊等^[23]通过分析猪场废水中溶解性有机物的组成,认为漂浮植物大藻净水技术有利于增加废水中类腐殖质组分比例,提高溶解性有机物的腐殖化程度。

1.2 重金属

大藻能够有效吸收采矿、冶炼、电解、颜料、农药及医药等行业污、废水中难以被分解破坏且具有较长半衰期的重金属,辅以干燥或灰化等工序可以减少毒害废物的传播。植物修复重金属废水成本投入较低,可避免二次污染,是当前治理该类废水的常用方法。

大藻对重金属的累积速度往往在初期显著增加,随时间推移生长速率下降,一定时间后可去除环境中的大部分污染物。表2列出了大藻对不同重金属的去除效果,通过对比大藻根部和地上部重金属含量发现,尽管金属会迁移到茎叶,但其根系作为拦截并固定该类污染物的主要部位,对重金属的积累量超过地上部。大藻对镉、铬、铜、铅、镍、锌等重金属的吸收量各有不同,但去除效率可以证明其优良的蓄积能力。

1.3 抗生素及抗性基因

多数污水中抗生素含量并不高,目前结果多是在实验室内对配制污水中特定浓度典型抗生素的去除数据,认为大藻根际分泌物的产生与部分类型低浓度抗生素的降解具有相关性。磷胁迫或植物激素茉莉酸甲酯均会激发大藻根际微生物分泌代谢物,产生羟基自由基,诱导有机底物发生氧化作用,大藻对四环

表2 大藻对不同种类重金属的去除效果

Table 2 Removal effects on different kinds of heavy metal of *Pistia stratiotes* L.

重金属 Heavy metal	污、废水种类 Type of sewage or wastewater	处理时间 Time	最大去除率 Maxium removal rate/%	最大吸收水平 Maxium absorption level		转移系数 Traslocation factor	生物富集系数 Bioaccumulation factor	参考文献 Reference
				根部Root (DW)	地上部Shoot (DW)			
Cd	10% 纺织废水(V/V)	6 d	83.76	81%	19%	—	—	[24]
Cd	75% 糖厂废水(V/V)	60 d	—	$0.149\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0.128\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	<0.7	<1.5	[25]
Cd	$0.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Cd}(\text{NO}_3)_2$	60 h	87.8	—	—	—	—	[26]
Cd	$10.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Cd}(\text{NO}_3)_2$	14 d	98	$3\,923\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$889\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	—	[27]
Cd	$10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CdCl}_2$	31 d	—	$10\,724.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$2\,271.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	1 072.48	[28]
Cr	电镀含铬废水	7 d	99.4	$135\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$14.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	—	[29]
Cr	$8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	30 d	77.3	85 mg	56 mg	0.47	3.06	[30]
Cr	$15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	10 d	80	$1.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	550	[31]
Cu	$8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CuSO}_4$	30 d	95.1	96 mg	70 mg	0.53	3.20	[30]
Cu	20% 纺织废水(V/V)	6 d	88.94	90%	20%	—	—	[24]
Cu	75% 糖厂废水(V/V)	60 d	—	$0.728\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0.491\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	>0.7	5.0	[25]
Cu	雨水蓄水池(东池)	60 d	—	$39.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$4.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	—	[32]
Cu	纺织、天然气及石化废水	春季	—	$30.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	0.26	0.95	[33]
Pb	5% 纺织废水(V/V)	6 d	81	71%	29%	—	—	[24]
Pb	$2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Pb}(\text{NO}_3)_2$	35 d	—	$321\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$15.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	—	[34]
Pb	$25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Pb}(\text{NO}_3)_2$	2 d	72	$11\,458\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$506\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	—	[27]
Ni	养殖场工、农业污水	春季	—	$0.92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	0.12	1.10	[33]
Ni	炼油废水	60 min	87	—	—	—	—	[35]
Ni	$10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NiSO}_4$	6 d	—	$863.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$116.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	<0.15	—	[36]
Zn	雨水蓄水池(东池)	—	—	$181\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	—	[32]
Zn	75% 糖厂废水(V/V)	60 d	—	$6.581\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$4.455\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	>0.9	3.0	[25]
Zn	$1.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ ZnSO}_4$	168 h	72	$7.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$1.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	—	[37]
Zn	$2.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Zn}(\text{NO}_3)_2$	72 h	99.5	—	—	—	—	[26]
Zn	$83.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅-锌混合液	60 min	96	—	—	—	—	[38]

素和土霉素的去除效果与这种氧化机制有关^[39-40]。BANSAL等^[41]开展了四环素类污染水体的可持续修复技术研究,发现大藻根系分泌物对土霉素的改性效果最好;同时发现植物根系分泌物中四环素类抗生素在达到一定含量后几乎不再变化。GUJARATHI等^[42]通过对紫外吸收光谱的变化分析,也证实了大藻根际分泌物会对抗生素进行改性,四环素和土霉素的修饰作用在24 h内最为明显。另外,大藻对污水中抗生素的去除效果与该物质初始含量有极大关系。大藻可以在短时间内明显去除污水中低于 $2.5 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的氨苄青霉素和盐酸四环素,而对于浓度超过 $10 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的盐酸金霉素和盐酸土霉素,其去除效果则不如凤眼莲^[43]。通常来讲,低浓度抗生素可以提高植物根系活力,而高浓度抗生素的去除率较低,会胁迫植物根系,使其无法有效清除氧自由基,从而对植物产生毒害效应^[44]。对于养殖业畜禽养殖废水及周边废水中可能会产生的抗生素抗性基因问题,基于对植物特性的研究,推测大藻可以降低因水体径流扩散而导致的抗性基因传播,其种类、丰度的去除变化值得关注。

1.4 农药

大藻对农田废水中农药的吸收效果是近些年研究的热点。不同品种农药对大藻形态的危害各异,灭草松、硝磺草酮和氟磺胺草醚等有机农药会使大藻叶片变薄,鲜质量降低,新根生长受抑制^[45];异恶草酮浓度在 $37.86\sim 54.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时不会使大藻的叶片和根系产生可见变化^[46],过量时会抑制植株叶片中类胡萝卜素合成,致使植物白化坏死。但是,大藻对农药的降解及去除效果较好,及时打捞植物就可将水中农药转移。BARCHANSKA等^[47]观察到大藻在7 d内对硝磺草酮的吸附率达到42%~58%,对其两种降解产物4-甲基磺酰基-2-硝基苯甲酸和2-氨基-4-甲基磺酰基苯甲酸的吸附率为57%~75%。该植物在试验前期对水中异恶草酮降解速率较快,且在第24天使残留量降低到10%以下^[46]。王雅丽等^[48]种植的大藻使农田退水中苯醚甲环唑的降解半衰期由5.41 d下降到3.24 d,农药残留量减少,最终去除率约为98.21%。尽管大藻在草甘膦等农药胁迫下存在生殖退化的风险,但其种群的遗传变异似乎与其对农药的耐受性无关^[49],而更多地与水域范围及地理地形有关。受胁迫大藻的恢复适应能力因农药品种不同而有所差异,但目前鲜见多种典型有机农药对大藻种群遗传分化水平的影响分析;另外,农药在该植物中的吸收转运机制尚不明确,大藻修复农药废水有

待进一步研究。

1.5 染料

在处理染料废水的实际应用中,大藻是除藻类外,可以在较短时间内对水质具有较好的色度去除效果的一种水生植物,其对纺织废水的脱色能力超过凤眼莲^[24],且11 d内两种偶氮染料AZUL MARINO和NEGRO的变色率达到90%和70%^[50]。大藻可以聚集染料分子的原因:一是叶片通气组织发达,其纤维可固着染料,具有吸附离子型染料的能力;二是体内含有羟基、羧基和氨基等官能团,可与活性偶氮染料之间形成共价键等。因而用大藻吸附染料时要考虑染料自身的分子结构及其在叶片中的扩散能力。目前有学者利用大藻干物质对离子型染料靛蓝胭脂红、活性艳红K-2BP和亚甲基蓝进行吸附动力学研究^[51-52],发现其对该类染料的吸附均为物理吸附,无法实现转化吸收。

1.6 其他污染物

除上述主要污染物外,盐分也是工农业用水中不可或缺的产物,大藻对不同种类盐分的吸收利用情况目前研究较少。盐敏感性植物的生长状态可以间接表征水质变化程度,若掌握大藻对特定污染因子的耐受浓度,利用该植物对规模化奶牛场奶厅高盐度有机废水进行低成本污染处理,降低水中的氯盐、硫酸盐等无机盐及有机质含量,则可以替代或减少工业法对高盐废水的处理成本。

2 大藻去除污染物的影响因素和净水机制

2.1 影响因素

2.1.1 污水污染物浓度

在高浓度养殖废水或农村生活污水中直接培育大藻往往使叶片变褐变脆,必须经稀释或多级工艺方法处理后再排放至植物稳定塘,以利于大藻对氮、磷的吸收和利用。通常来说,污水中污染物浓度越高,大藻的相对生长率越高,对污染物的去除效果也越好。SUNDARALINGAM等^[53]用大藻处理初始硝态氮浓度为 $8.5, 28.5, 48.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $68.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的地下水,6周后去除率分别为91.8%、69.5%、61.5%和67.4%,大藻单位氮增加量随污水浓度升高而显著改变。陈金发等^[7]对 COD_{Cr} 浓度低于 $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的奶牛场废水进行质量浓度胁迫研究,分析大藻叶片中SOD和POD等抗氧化酶的变化趋势,认为 COD_{Cr} 在 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下的低质量浓度废水不会对大藻形成抑制,大藻能够稳定地发挥污水净化作用。

2.1.2 季节

春夏季大藻茎叶对氮和磷的降解贡献率远超根部^[54],前期植物生长缓慢,根部稀疏,可附着的微生物含量较低,氨挥发、硝化和反硝化等作用对氮素的去除效果不及植物吸收作用。大藻在夏季温湿条件下快速生长繁殖,随生物量的增长,水体中污染物去除速率较快,氨氮迅速减少,释放 N_2 和 N_2O 含量较低^[55],水体 pH 和 DO 降低^[6]。秋冬天气变冷,大藻缓慢生长,气温及营养适宜时,根系长而茂盛,短期内植株可分蘖但个体难以增大,此时对污水的净化主要凭借根系生物量;温度不足以维持大藻生长时根系的大量脱落,植物出现释磷现象,且微生物同化作用也会受温度影响而减弱,可溶性磷酸盐在水中略有释放,此时应及时捕捞大藻。在北方需避免水生植物发生黄萎病或疫病,为冬季保苗创造空气流通度较好的温室环境。

2.1.3 pH

通常情况下,大藻在 pH 6~10 范围内能正常生长繁殖。水体 pH 影响植物对重金属和染料的吸附效果。酸性条件下大藻根系易生成含铁、铀氧化物或磷酸盐片状纳米晶体的沉积物,pH 为 5.0 时大藻对练江水体中锌和砷的选择性较强,水体呈中性时 8 d 内对汞的去除率超过 90%^[56];而在弱碱性条件下,培育在铀矿坑水中的大藻根部表面光滑,未形成沉积^[57]。因此,有效控制溶液酸碱度可以影响大藻植株根系细胞膜与金属阳离子的交换,并形成金属氧化物及矿物盐的沉积,促进大藻根系对重金属的有效积累。

2.1.4 盐度

SOOKNAH 等^[8]提出 SCOD 中未定性的可溶性化合物和高盐度是抑制大藻生长的主要原因,认为溶液电导率的下降很可能与大藻根部生物量和根吸收某些离子的能力有关。目前笔者正在开展大藻对含盐奶厅废水的净化试验,初步认同大藻根部会先从高盐度奶厅废水中汲取氮、磷盐以供自身生长,尽管大藻会使奶厅废水中高含量的硫酸盐、氯化物及余氯含量降低,但这些物质严重影响大藻的生长状况。笔者通过探究多比例稀释度的高盐畜禽废水配水对大藻的生理影响,认为电导率为 $2\ 127\sim 2\ 547\ \mu S\cdot cm^{-1}$ 是大藻的绝对致死浓度。高盐度霍格兰营养液中多种盐分相互影响,3 d 内大藻叶绿体迅速分解,叶片从尖端变浅白并干枯,个体较小的植株根部脱水严重;高浓度牛场养殖废水使大藻叶片腐烂变黄,甚至使根系脱落;高浓度硫、氯盐配水使大藻基部叶片尖端变黄并

逐渐向内延伸,内侧嫩叶最先萎焉;高浓度氮素使大藻倒伏现象明显。

2.2 去除机制

2.2.1 吸附、过滤、沉淀作用

大藻根系发达,在植株快速生长期,个体之间根系紧密、相互交织,在缓流水体中可以初步阻挡水中大颗粒悬浮物,具有较强的过滤性和富集性,例如染料的去除主要归功于大藻根系及叶片的吸附能力,水中难溶性固体含量的降低主要是因为大藻根系的过滤能力^[25],及时打捞大藻可将部分污染物转移。植物吸磷-释磷受植物生长周期和生态环境的影响较大,因而从长期角度看,磷素的去除被认为是沉淀起主导作用^[22]。另外,秋冬季虽然不适合植物生长,但大藻根系分泌物与脱落的根系结合成较为黏稠的深褐色絮状物,能使悬浮物及可溶污染物沉降,大藻仍可在水体起到净化作用。

2.2.2 吸收作用

根部和茎部表皮细胞内散布大量维管束和空腔,具有较好的传输能力。褚淑祎等^[58]发现在冬季夜间“睡眠”状态下的大藻对氨氮和总氮去除率超过昼间,植物吸收能力起主导作用。通过分析大藻不同部位的氮素形态发现,尽管根部溶解性氮含量高于茎叶^[19],但养分经根部运输后,地上部的吸收利用情况更好,茎叶的氮、磷含量均高于根部^[59]。然而对氮素吸收利用效率的调控机制研究往往集中于常见农作物,且目前未有学者研究过大藻的氮素利用率。事实上,大藻对大规模水域脱氮除磷的主要原因并非植物吸收,对于中度氮、磷负荷的生态浮床系统,水生植物对大量元素的吸收作用仅有 2%~3%^[60];对于轻度富营养化水体,吸收作用因光照、温度、植物种类、系统构建规模、水速等而有所差异,人工湿地的建造有利于植物对有机物的吸收。目前经大藻处理的畜禽养殖废水中氮磷转化形态的相关研究较少,笔者发现在大藻处理奶厅废水的过程中,水体碱度发生变化,水中羟基自由基减少,存在一定氧气,可满足氨基酸发生羟化作用的条件,导致可溶性有机氮降低,水中及植物根系附着微生物菌种的种类和含量影响植物对含氮化合物的吸收,同时认为有机氮转化成无机氮的效果受环境温度等影响。大藻摄入大量盐分后叶绿素降解明显,酶活反应剧烈,随时间推移其活性丧失,不再积累盐分。

2.2.3 微生物的辅助作用

大藻根部是水体与大气养分交换的重要部位,在

水中形成好氧微环境,便于好氧微生物分解有机物;在较靠近水面的位置形成厌氧区和兼氧区,利于硝化和反硝化反应,使环境中的养分转化成利于植物吸收的无机盐。张悦^[61]认为冬季水生植物根际微生物的活跃程度对水质净化起主导作用,亚硝化细菌和反硝化细菌含量降低,优势种群门类发生改变。大藻在净化富营养化水体的过程中,根系总细菌 16S rRNA 丰度减少,*nirS* 型反硝化细菌对脱氮起主导作用^[62]。然而目前国内外对污染水体中大藻根际微生物的丰度和功能研究甚少,还需进一步探索非重金属胁迫下产生根系分泌物的其他条件,尽可能系统而全面地反映根际微生物-植物-环境的互作机制。

目前国内学者通过外施高效细菌和大藻联合处理废水,认为结合固定化氮循环细菌或光合细菌等有益菌可提高原位水质。如李敏等^[63]向水产养殖水中补充混合微生物菌剂,发现水中氨氮和亚硝氮含量降低。陈坤等^[64]在猪场氧化塘内投加光合细菌,联合作用下总氮、总磷、BOD₅、COD 的降幅分别为 61.8%~81.0%、41.8%~76.0%、64.8%~82.3% 和 66.8%~79.1%,均优于大藻单独净化水样效果^[64]。

2.2.4 共存离子的协同作用

除富集能力外,大藻还会通过甲基化、氧化还原等机制来保护自身免受重金属毒性。当遇到高浓度砷或镉胁迫时,植物通气组织会受到 Fe³⁺、Zn²⁺ 等共存离子协同影响^[65],植株根部羧基诱使细胞膜与阳离子重金属的交换速率提升^[66],Fe³⁺氧化物易附着在根系周围形成铁斑,促进根部细胞吸收重金属^[67],保护植物免受重金属毒害;同时该胁迫会使大藻的生长速率变慢,谷胱甘肽合成增加,有利于促进植物解毒并维持植株体内的碳平衡^[68]。马丽等^[69]认为 1.0~2.0 mg·L⁻¹ 的 Fe³⁺ 可代替植物铁鞘增强大藻根部对砷酸盐的吸附。高浓度 CdCl₂ 复合溶液中大藻根系积累大量的 K、Fe 和少量的 Si、Cl、Ca,在偏酸性条件下形成铁斑,阻碍根系接触更多的非营养元素,增强大藻对镉的耐受性^[70]。

2.2.5 对藻类的化感作用

水体富营养化导致藻类和入侵植物暴发,然而漂浮植物与藻类存在竞争关系,缺氧和相对厌氧环境会抑制大藻生长发育。适宜条件下大藻自身化感物质的释放及根际微生物的分解使该植物防控除藻成为可能。

目前针对水生植物降解藻类的化感物质成分分析研究很少,ALIOTTA 等^[71]筛选出脂肪酸、羟基脂肪

酸、α-细辛醚等 6 种主要的提取物以抑制蓝藻、绿藻、金藻和红藻生长。国内学者更偏向从细胞的光合作用来考虑化感物质对藻类的生长抑制机理。田如男等^[72]发现含大藻的两种水生植物群落组合种植水对小球藻叶绿素 a 的抑制效果较为理想。WU 等^[73]优化了从大藻中提取化感物质的方法,短时间内极大程度降低铜绿微囊藻叶绿素 a 含量和细胞培养物,并观察到培养期间提取的化感物质对产生和释放微囊藻毒素(LR)无显著影响。BICH 等^[74]用浮萍和大藻的甲醇提取物对 8 种植物的种子萌发和幼苗生长情况进行研究,发现每毫升干质量当量提取物超过 0.01 g 时所有测试植物的根系生长受抑制,超过 0.03 g 时茎部生长受抑制。化感物质对藻类生长抑制还可以从藻类细胞结构破坏程度、呼吸作用抑制情况、酶活降低速率、细胞内小分子物质的质量变化等角度进一步研究,针对特定藻类的大藻有效提取物成分及化感机制的研究还有待探索。

3 结论与展望

受多种因素影响,大藻具有高效脱氮除磷和吸收重金属的特性,对抗生素、农药、染料等污染物的去除效果较好。大藻的生物特性决定该植物在污水的净化治理中可以有效改善水质,在适宜的系统环境内充分调动水域内部及植物根系微生物的活性,合理施用大藻甚至可以实现污水净化后再利用的功能。然而,该领域获得的数据仅基于实验室内小试或中试实验,而该植物在野外条件下耐受的污染阈值、对氮磷之外非常规污染物的吸收效果等尚未完全掌握。因此,今后研究大藻与污水净化处理技术的结合应用可能还需在以下几个方面加强:

(1)大藻对养分吸收的研究。目前大藻对某些污染因子的去除效果仅限于对表面现象的描述,而其对一些基础养分的选择仍无法确定,如大藻在不同环境条件下对常见无机氮的吸收偏好,影响大藻分蘖与繁殖的水体碳、氮、磷养分需求差异以及大藻对常见类别污、废水的耐受浓度阈值等。

(2)大藻对特定盐分、抗生素等胁迫物质的去除机制研究。该方面研究可以通过植物抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、内源性激素含量、叶绿素荧光参数等光合情况进行分析,明确大藻对经深度处理后的工业废水中特定胁迫物质的阈值。另外,畜牧业养殖废水中存在的抗生素问题不容忽视,基于抗生素抗性基因在畜禽粪便-水系统中的分布、扩散情况,下一

步研究重点可集中在大藻对主要污染物磺胺类、喹诺酮类抗生素的处理效果,或者从植物活性成分与抗生素的协同作用角度挖掘机理,补充该领域对抗性基因的相关研究。

(3)构建并完善大藻吸收和转运机制的相关模型。由于植物的代谢及环境因素的改变,养分吸收机理模型对数值的预测可能不是十分精准,需要对现有模型参数进行优化,确定环境因素中主要影响因素,将植物吸收与水动力学结合,模拟缓流状态下大藻对废水的碳、氮、磷养分最佳需求比例,满足实际需求。

(4)结合现场条件调整深度处理工艺参数。模拟生态系统作为一种以植物修复为主要原理的污水深度处理技术,可使植物最大程度地发挥净水优势,但需要考虑工艺规模、单位面积适宜栽种的大藻生物量、光照、温度及其他外界因素,并根据季节性净化效果、组合去污情况等选择适宜的捕捞周期。

另外,大藻在野外条件下繁殖速度过快,可以很快铺满水面,目前只能采取人工收割的方式将大藻带离出净化后的污水,清理方式较为复杂,可以在中小规模水域内定制合适的水生植物固定架,避免大藻逃逸。由大藻及一年生漂浮植物组合构成的生态浮岛,不仅可以有效避免多年生水生植物不及时收割造成的氮磷重新释放问题,而且捕捞处理后资源化利用价值高。大藻营养丰富,可作为青贮饲料用于养殖业,或经处理后作绿肥。目前,大藻的药用价值和发酵产气能力被逐渐挖掘,因而其后续利用价值也应得到关注。

参考文献:

- [1] 陈苗, 张才学, 孙省利. 十一种大型水生植物固碳能力研究[J]. 南方农业, 2018, 12(13): 14-17. CHEN M, ZHANG C X, SUN X L. A study on the carbon sequestration capacity of eleven aquatic macrophytes[J]. *South China Agriculture*, 2018, 12(13): 14-17.
- [2] MADENOĞLU T G, FALIZI J N, KABAY N, et al. Kinetic analysis of methane production from anaerobic digestion of water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) with waste sludge[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2019, 94(6): 1893-1903.
- [3] MUSTAFA H M, HAYDER G. Performance of *Pistia stratiotes*, *Salvinia molesta*, and *Eichhornia crassipes* aquatic plants in the tertiary treatment of domestic wastewater with varying retention times[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(24): 9105.
- [4] 相洪旭, 李田, 陆斌, 等. 漂浮植物塘协同处理农村分散生活污水研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(12): 2143-2147. XIANG H X, LI T, LU B, et al. Research on aquatic floating plant cooperating with septic tank for rural domestic wastewater treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(12): 2143-2147.
- [5] SCHWANTES D, GONÇALVES A C, SCHILLER A P, et al. *Pistia stratiotes* in the phytoremediation and post-treatment of domestic sewage[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(7): 714-723.
- [6] 刘海琴, 邱园园, 闻学政, 等. 4种水生植物深度净化村镇生活污水厂尾水效果研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 616-626. LIU H Q, QIU Y Y, WEN X Z, et al. The deep purification of four aquatic macrophytes for tailrace of rural sewage treatment plants[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(4): 616-626.
- [7] 陈金发, 杨平, 聂琦珊, 等. 大藻对不同质量浓度畜禽废水的净化作用及生物学效应[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(3): 87-94. CHEN J F, YANG P, NIE Q S, et al. Purification and biological effect of *Pistia stratiotes* under different concentrations of livestock wastewater[J]. *Journal of Chongqing University*, 2014, 37(3): 87-94.
- [8] SOOKNAH R D, WILKIE A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22(1): 27-42.
- [9] 许立婧, 焦阳, 王兴祥, 等. 大藻生态塘-渔业模式对猪粪污沼液氮磷消纳研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 138-143. XU L J, JIAO Y, WANG X X, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in piggery methane fluid by *Pistia stratiotes* ecological pond-fishery system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(10): 138-143.
- [10] 牟希东, 胡隐昌, 汪学杰, 等. 水浮莲对水产养殖排放水体净化的初步研究[J]. 渔业现代化, 2007(6): 11-13, 46. MU X D, HU Y C, WANG X J, et al. Purification effect of *Pistia stratiotes* on aquatic wastewater[J]. *Fishery Modernization*, 2007(6): 11-13, 46.
- [11] 郑洁敏, 牛天新, 李春娟. 人工植物床对外塘甲鱼养殖水体的净化作用[J]. 浙江农业科学, 2013(3): 337-341. ZHENG J M, NIU T X, LI C J. Purification effect of artificial plant bed on aquaculture water of pond turtle[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2013(3): 337-341.
- [12] 朱浩, 刘兴国, 刘文斌, 等. 水生植物对黄颡鱼养殖水体的净化效果[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(3): 517-521. ZHU H, LIU X G, LIU W B, et al. Purification effect of aquatic plants on aquaculture water of *Pseudobagrus fulvidraco*[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(3): 517-521.
- [13] GABALLAH M S, ISMAIL K, BELTAGE A, et al. Wastewater treatment potential of water lettuce (*Pistia stratiotes*) with modified engineering design[J]. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2019, 41(3): 197-205.
- [14] OLGUÍN E J, GARCÍA-LÓPEZ D A, GONZÁLEZ-PORTELA R E, et al. Year-round phytofiltration lagoon assessment using *Pistia stratiotes* within a pilot-plant scale biorefinery[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 326-333.
- [15] MUKESH R, BINOD K J, SWETA B, et al. Efficiency of *Pistia stratiotes* in the treatment of municipal solid waste leachate in an upwards flow constructed wetland system[J]. *Ecology, Environment and Conservation*, 2021, 27(S): 235-244.
- [16] 龙镜. 大藻控制环境条件研究——以锦屏县清水江为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017: 23-40. LONG B. Study on environment control of *Pistia stratiotes*: A case study of Qingshui River in Jinping

- Country[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2017:23-40.
- [17] 李猛, 马旭洲, 王武. 大藻对水体氮磷去除效果的初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(9): 1137-1142. LI M, MA X Z, WANG W. Effects of *Pistia stratiotes* L. on removal rate for nitrogen and phosphorus in polluted water body[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(9): 1137-1142.
- [18] 周小锋, 田晖. 农村污染缓流水体的修复研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(5): 43-45. ZHOU X F, TIAN H. Rehabilitation of slow-flow polluted water bodies in rural-urban[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2007(5): 43-45.
- [19] 赵丽君, 陈刚新, 张文超, 等. 2种漂浮植物对再生水水质净化能力比较[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 58-63. ZHAO L J, CHEN G X, ZHANG W C, et al. Comparison of purification of reclaimed water quality by two kinds of floating plants[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(6): 58-63.
- [20] 张黎黎. 磷在水生植物大藻体内的分配研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2014: 19-22. ZHANG L L. Phosphorus in the allocation of aquatic macrophytes *Pistia stratiotes* L[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2014: 19-22.
- [21] ROBLES-PLIEGO M, OLGUIN E J, HERNÁNDEZ-LANDA J, et al. Dual purpose system for water treatment from a polluted river and the production of *Pistia stratiotes* biomass within a biorefinery[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2015, 43(11): 1514-1521.
- [22] 黄炜杰, 李秋霞, 谢泳杰, 等. 利用水生植物净化河涌污水能力的比较研究[J]. 广西植物, 2014, 34(5): 642-650. HUANG W J, LI Q X, XIE Y J, et al. Comparative study on the ability which utilized hydrophytes purify polluted water of river[J]. *Guihaia*, 2014, 34(5): 642-650.
- [23] 李磊, 刘明, 李燕丽, 等. 浮水植物处理对猪场污水中可溶性有机物组成的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(5): 865-874. LI L, LIU M, LI Y L, et al. Effects of floating plants on the compositions of dissolved organic matter in swine effluent[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(5): 865-874.
- [24] TABINDA A B, ARIF R A, YASAR A, et al. Treatment of textile effluents with *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* and *Oedogonium* sp. [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(10): 939-943.
- [25] KUMAR V, SINGH J, CHOPRA A K. Assessment of plant growth attributes, bioaccumulation, enrichment, and translocation of heavy metals in water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) grown in sugar mill effluent [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(5): 507-521.
- [26] RODRIGUES A C D, AMARAL S N M B, SANTOS F S, et al. Bio-sorption of toxic metals by water lettuce (*Pistia stratiotes*) biomass[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(4): 156.
- [27] VESELÝ T, TLUSTOŠ P, SZÁKOVÁ J. The use of water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) for rhizofiltration of a highly polluted solution by cadmium and lead[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, 13(9): 859-872.
- [28] 蒯广东, 李轶, 方晓航, 等. Cd胁迫对水浮莲中Cd积累和生理特征的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(18): 4363-4367. KUAI G D, LI Y, FANG X H, et al. Effect of Cd stress on Cd accumulation and physiological characteristics of *Pistia stratiotes* L.[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(18): 4363-4367.
- [29] 兰旺荣, 徐松立, 黄旭光, 等. 大藻对微污染含铬废水的净化及其适应机制[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(3): 98-102, 128. LAN W R, XU S L, HUANG X G, et al. Treatment and adaptation mechanism of *Pistia stratiotes* on micro-polluted wastewater containing chromium[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(3): 98-102, 128.
- [30] TABINDA A B, IRFAN R, YASAR A, et al. Phytoremediation potential of *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* to remove chromium and copper[J]. *Environmental Technology*, 2018: 1-16.
- [31] ZHOU Y Q, LI S Y, SHI Y D, et al. Phytoremediation of chromium and lead using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 401/402/403: 2071-2075.
- [32] LU Q, HE Z L, GRAETZ D A, et al. Uptake and distribution of metals by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2011, 18(6): 978-986.
- [33] GALAL T M, FARAHAT E A. The invasive macrophyte *Pistia stratiotes* L. as a bioindicator for water pollution in Lake Mariut, Egypt[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(11): 701.
- [34] ESPINOZA-QUIÑONES F R, MÓDENES A N, COSTA I L, et al. Kinetics of lead bioaccumulation from a hydroponic medium by aquatic macrophytes *Pistia stratiotes* [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2009, 203(1/2/3/4): 29-37.
- [35] UGYA A Y, IMAM T S, HUA X, et al. Efficacy of *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* and *Nymphaea lotus* in the biosorption of nickel from refinery wastewater[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(6): 13075-13087.
- [36] SINGH K, PANDEY S N. Effect of nickel-stresses on uptake, pigments and antioxidative responses of water lettuce, *Pistia stratiotes* L. [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2011, 32(3): 391-394.
- [37] RODRIGUES A C D, ROCHA M V C, LIMA E S A, et al. Potential of water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) for phytoremediation: Physiological responses and kinetics of zinc uptake[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2020, 22(10): 1019-1027.
- [38] VOLF I, RAKOTO N G, BULGARIU L. Valorization of *Pistia stratiotes* biomass as biosorbent for lead (II) ions removal from aqueous media[J]. *Separation Science and Technology*, 2015, 50(10): 1577-1586.
- [39] 张建聪, 赵洋毅, 段旭, 等. 磷胁迫对高原湿地浮水植物大藻根系分泌物的影响[J]. 环境化学, 2019, 38(2): 385-394. ZHANG J C, ZHAO Y Y, DUAN X, et al. Effects of phosphorus stress on root exudates of floating plant *Pistia stratiotes* in plateau wetlands[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(2): 385-394.
- [40] JENSEN C D, GUJARATHI N P. Characterization of a macrophyte microcosm as a surface water treatment system for antibiotics[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2015, 34(6): 1605-1612.
- [41] BANSAL O P. Green remediation of tetracyclines in soil-water systems[J]. *Health*, 2013, 5(12): 2039-2044.
- [42] GUJARATHI N P, HANEY B J, LINDEN J C. Phytoremediation potential of *Myriophyllum aquaticum* and *Pistia stratiotes* to modify anti-

- biotic growth promoters, tetracycline, and oxytetracycline, in aqueous wastewater systems[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, 7(2):99-112.
- [43] 陈小洁, 李凤玉, 郝雅宾. 两种水生植物对抗生素污染水体的修复作用[J]. 亚热带植物科学, 2012, 41(4):1-7. CHEN X J, LI F Y, HAO Y B. The preliminary exploration of remediation the antibiotics polluted water by two hydrophytes[J]. *Subtropical Plant Science*, 2012, 41(4):1-7.
- [44] LUO Y, XU L, RYSZ M, et al. Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River basin, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(5):1827-1833.
- [45] RIBEIRO V H V, ALENCAR B T B, SANTOS N M C, et al. Sensitivity of the macrophytes *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* to hexazinone and dissipation of this pesticide in aquatic ecosystems[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 168:177-183.
- [46] ESCOTO D F, GAYER M C, BIANCHINI M C, et al. Use of *Pistia stratiotes* for phytoremediation of water resources contaminated by clomazone[J]. *Chemosphere*, 2019, 227:299-304.
- [47] BARCHANSKA H, PLONKA J, JAROS A, et al. Potential application of *Pistia stratiotes* for the phytoremediation of mesotrione and its degradation products from water[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(11):1090-1097.
- [48] 王雅丽, 龚道新. 6种常见水生植物对农田退水中残留苯醚甲环唑的去除效果研究[J]. 农药科学与管理, 2011, 32(2):38-41. WANG Y L, GONG D X. Effects of aquatic plants on degradation of difenoconazole in water[J]. *Pesticide Science and Administration*, 2011, 32(2):38-41.
- [49] CÍCERO E A S, PITELLI R A, SENA J A D, et al. Genetic variability and sensitivity of *Pistia stratiotes* accesses to glyphosate[J]. *Planta Daninha*, 2007, 25(3):579-587.
- [50] FERDEŞ M, VOICU G, DINCA M. Comparative study of water discoloration by phytoremediation using *Pistia stratiotes* and *Chlorella vulgaris* [J]. *Romanian Biotechnological Letters*, 2019, 24(6):953-960.
- [51] FERREIRA M, OLIVEIRA N M, LIMA L L S, et al. Adsorption of indigo carmine on *Pistia stratiotes* dry biomass chemically modified[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(28):28614-28621.
- [52] 邱罡, 梁贺升, 陈少瑾. 水浮莲干粉对离子型染料的吸附机理研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(11):159-162. QIU G, LIANG H S, CHEN S J. Study on adsorption mechanism of ionic dyes by dried *Pistia stratiotes* L.[J]. *New Chemical Materials*, 2016, 44(11):159-162.
- [53] SUNDARALINGAM T, GNANAVELRAJAH N. Phytoremediation potential of selected plants for nitrate and phosphorus from ground water [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2014, 16(3):275-284.
- [54] 金树权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8):1571-1575. JIN S Q, ZHOU J B, ZHU X L, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of ten aquatic macrophytes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8):1571-1575.
- [55] 张芳, 易能, 邸攀攀, 等. 不同水生植物的除氮效率及对生物脱氮过程的调节作用[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2):174-180. ZHANG F, YI N, DI P P, et al. Nitrogen removal efficiency and control of bio-denitrification process of aquatic plants[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(2):174-180.
- [56] 田秀芳, 张彩云, 胡兆华, 等. 大藻对练江水体重金属的去除和富集特征研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(6):91-95. TIAN X F, ZHANG C Y, HU Z H, et al. Removal efficiency and accumulation characteristics of heavy metal by *Pistia Stratiotes* L in Lianjiang River [J]. *Environmental Science and Management*, 2021, 46(6):91-95.
- [57] 聂小琴, 董发勤, 丁德馨, 等. 两种土著水生植物对铀矿坑水的修复能力研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(11):1946-1953. NIE X Q, DONG F Q, DING D X, et al. Ability of *Pistia stratiotes* L. and *Eichhornia crassipes* for remediation of uranium-contaminated waste water[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, 49(11):1946-1953.
- [58] 褚淑祎, 肖继波, 王慧明, 等. 低温条件下生态槽深度处理农村生活污水的日变化特性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6):2087-2092. CHU S Y, XIAO J B, WANG H M, et al. Diurnal variation characterization of advanced treatment of rural domestic sewage by eco-tank under low temperature[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(6):2087-2092.
- [59] 秦红杰, 张志勇, 刘海琴, 等. 两种漂浮植物的生长特性及其水质净化作用[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8):2470-2479. QIN H J, ZHANG Z Y, LIU H Q, et al. Growth characteristics and water purification of two free-floating macrophytes[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(8):2470-2479.
- [60] PETERSON S B, TEAL J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems[J]. *Ecological Engineering*, 1996, 6:137-148.
- [61] 张悦. 水生植物及根际微生物对富营养化水体中氮磷的净化作用研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019:41-44. ZHANG Y. Purification of nitrogen and phosphorus from eutrophic water by aquatic plants and rhizosphere microorganisms[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2019:41-44.
- [62] 邸攀攀. 富营养化水体生态修复过程中微生物丰度变化研究[D]. 南京:南京农业大学, 2015:28-30. DI P P. Study on variation of microorganisms in bioremediation of eutrophic waters[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015:28-30.
- [63] 李敏, 段登选, 许国晶, 等. 大藻-微生态制剂协同净化养殖池塘富营养化水体的效果[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(1):94-99. LI M, DUAN D X, XU G J, et al. Effects of *Pistia stratiotes*-probiotics purifying eutrophied pond water[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(1):94-99.
- [64] 陈坤, 崔友勇, 张娅婷, 等. 光合细菌和水浮莲在河南农村猪场污水中的应用[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4):103-105. CHEN K, CUI Y Y, ZHANG Y T, et al. Application of *Pistia stratiotes* and *Rhodospirillum* sp. to the treatment of wastewater from a rural swine farm in Xinyang of Henan Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4):103-105.
- [65] 冉艳淋, 陈国梁. 几种常见沉水植物对砷富集的研究进展[J]. 生物

- 工程学报, 2020, 36(3):407-415. RAN Y L, CHEN G L. Arsenic accumulation by submerged plants: A review[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3):407-415.
- [66] 高志勇, 谢恒星, 刘楠楠, 等. 湿地植物在处理纺织工业废水中的应用及作用机制[J]. 北方工艺, 2016(8):204-207. GAO Z Y, XIE H X, LIU N N, et al. Application and mechanism of wetland plants in the treatment of textile industry wastewater[J]. *Northern Horticulture*, 2016(8):204-207.
- [67] ZHAO F J, MCGRATH S P, MEHARG A A. Arsenic as a food chain contaminant: Mechanisms of plant uptake metabolism and mitigation strategies[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, 61:535-559.
- [68] CAMPOS F V, OLIVEIRA J A, SILVA A A, et al. Involvement of glutathione and glutathione metabolizing enzymes in *Pistia stratiotes* tolerance to arsenite[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2020, 22(4):404-411.
- [69] 马丽, 王海娟, 杨晓燕, 等. Fe^{3+} 对3种水生植物吸收不同形态砷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6):1111-1121. MA L, WANG H J, YANG X Y, et al. The uptake of different arsenic forms in three aquatic plants as affected by Fe^{3+} [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6):1111-1121.
- [70] SINGHA K T, SEBASTIAN A, PRASAD M N V. Iron plaque formation in the roots of *Pistia stratiotes* L.: Importance in phytoremediation of cadmium[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(2):120-128.
- [71] ALIOTTA G, MONACO P, PINTO G, et al. Potential allelochemicals from *Pistia stratiotes* L. [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1991, 17(11):2223-2234.
- [72] 田如男, 孙欣欣, 魏勇, 等. 水生花卉对铜绿微囊藻、斜生栅藻和小球藻生长的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12):2732-2738. TIAN R N, SUN X X, WEI Y, et al. Effects of hydrophytes on the growth of *Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12):2732-2738.
- [73] WU X, WU H, CHEN J R, et al. Effects of allelochemical extracted from water lettuce (*Pistia stratiotes* Linn.) on the growth, microcystin production and release of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(11):8192-8201.
- [74] BICH T T N, KATO-NOGUCHI H. Allelopathic potential of two aquatic plants, duckweed (*Lemna minor* L.) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L.), on terrestrial plant species[J]. *Aquatic Botany*, 2012, 103:30-36.