

增氧对粉绿狐尾藻氮素吸收及其底泥微环境的影响

李汉常, 张文萍, 文清柏, 谭歆, 李宗浩, 钟诚, 李炎, 易达理, 杨良玖

引用本文:

李汉常, 张文萍, 文清柏, 谭歆, 李宗浩, 钟诚, 李炎, 易达理, 杨良玖. 增氧对粉绿狐尾藻氮素吸收及其底泥微环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 155–165.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0179>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施磷增氧条件对水稻光合特性及镉吸收分配的影响

张文萍, 管啸, 钟诚, 易宇, 肖卫华, 易达理, 杨良玖, 吴根义

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 1875–1886 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1346>

玉米秸秆添加量对温室土壤氨挥发及辣椒氮素吸收的影响

吴红艳, 于淼, 高晓梅

农业环境科学学报. 2022, 41(10): 2307–2314 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0326>

农田汇水河道水生植物原位净化工程处理效果分析

张迎颖, 闻学政, 姚一丹, 杨非, 王岩, 刘海琴, 张志勇

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1607–1615 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1429>

同步硝化反硝化菌(*Alcaligenes faecalis* WT14)养殖污水脱氮效果研究

陈均利, 张树楠, 戴桂金, 张苗苗, 吴金水, 刘锋

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1811–1817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0325>

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2397–2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李汉常, 张文萍, 文清柏, 等. 增氧对粉绿狐尾藻氮素吸收及其底泥微环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 155–165.
LI H C, ZHANG W P, WEN Q B, et al. Effects of oxygenation on the nitrogen uptake of *Myriophyllum aquaticum* and sediment
microenvironment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1): 155–165.



开放科学 OSID

增氧对粉绿狐尾藻氮素吸收及其底泥微环境的影响

李汉常¹, 张文萍^{1*}, 文清柏², 谭歆¹, 李宗浩¹, 钟诚¹, 李炎¹, 易达理¹, 杨良玖¹

(1. 湖南农业大学水利与土木工程学院, 长沙 410128; 2. 湖南省欧阳海灌区水利水电工程管理局, 湖南 耒阳 421800)

摘要:为探明增氧对粉绿狐尾藻氮素吸收及其底泥微环境的影响,本研究以粉绿狐尾藻为材料进行盆栽试验,以不增氧处理为对照(CK),分别设置O₁(4 min)、O₂(6 min)、O₃(8 min)、O₄(10 min)4个增氧水平,系统研究了粉绿狐尾藻不同生长时期氮素吸收及其底泥铵态氮、硝态氮含量等的变化规律,揭示了增氧调控底泥微环境、提高粉绿狐尾藻对水体氮污染物降解能力的机理。结果表明:无论增氧与否,粉绿狐尾藻根部和地上部氮素吸收量及植株氮素积累量均随生长时间延长呈逐渐增加趋势,且地上部氮素吸收量均高于根部;与CK相比,生长前期(t₁、t₂时期)增氧8 min、中后期(t₃、t₄、t₅时期)增氧6 min对应的粉绿狐尾藻氮素吸收与积累量均最大,其中增氧6 min对应t₅时期的粉绿狐尾藻植株氮积累量为171.08 mg·株⁻¹。增氧使粉绿狐尾藻生长前期底泥pH值降低,使生长后期有机质含量增加的同时,降低了t₂时期底泥硝态氮含量和t₄、t₅时期铵态氮含量,t₅时期底泥硝态氮含量反而增加,促进了t₅时期粉绿狐尾藻氮素的吸收与累积。研究表明,增氧通过提高水体溶解氧含量影响底泥pH值和有机质,调控底泥氮的形态转化和向水体中的释放,有效提高了粉绿狐尾藻对污染水体氮污染物的降解能力。

关键词:氮素吸收量;底泥pH值;有机质;铵态氮;硝态氮;增氧处理

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)01-0155-11 doi:10.11654/jaes.2022-0179

Effects of oxygenation on the nitrogen uptake of *Myriophyllum aquaticum* and sediment microenvironment

LI Hanchang¹, ZHANG Wenping^{1*}, WEN Qingbai², TAN Xin¹, LI Zonghao¹, ZHONG Cheng¹, LI Yan¹, YI Dali¹, YANG Liangjiu¹

(1. College of Hydraulic & Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Ouyanghai Irrigation District Water Conservancy and Hydropower Engineering Administration of Hunan Province, Leiyang 421800, China)

Abstract: To investigate the effects of oxygenation on nitrogen uptake by *Myriophyllum aquaticum* and sediment microenvironment, a pot experiment was conducted using *Myriophyllum aquaticum* as tested material. The control group was treated without oxygenation, and four oxygenation levels of O₁ (4 min), O₂ (6 min), O₃ (8 min), and O₄ (10 min) were designed. The variation characteristics of nitrogen uptake by plants and the content of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in sediments under different culture periods were systematically studied. The mechanism of oxygenation regulating sediment microenvironment and improving the degradation ability of nitrogen pollutants in water by *Myriophyllum aquaticum* was revealed. Results showed that, with oxygenation or not, the nitrogen uptake of roots and shoots and the nitrogen accumulation of plants all increased gradually with the extension of culture time, and the nitrogen uptake of shoots was higher than that of roots. Oxygenation significantly promoted the absorption of nitrogen by *Myriophyllum aquaticum*. Oxygenation for 8 min in the early growth stage (t₁ and t₂ periods) and for 6 min in the middle and late growth stage (t₃, t₄, and t₅ periods) corresponded to the maximum

收稿日期: 2022-02-25 录用日期: 2022-07-04

作者简介: 李汉常(1996—),男,广西兴业人,硕士研究生,主要从事农业节水灌溉新技术研究。E-mail: 1085305371@qq.com

*通信作者: 张文萍 E-mail: zhangwenping_hunau@hunau.edu.cn

基金项目: 湖南省水利科技一般项目(XSKJ2021000-16, XSKJ2021000-22, XSKJ2021000-42); 国家自然科学基金项目(51909088); 湖南省教育厅项目(19A213)

Project supported: The Water Conservancy Science and Technology General Project of Hunan Province, China (XSKJ2021000-16, XSKJ2021000-22, XSKJ2021000-42); The National Natural Science Foundation of China (51909088); The Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China (19A213)

nitrogen accumulation of *Myriophyllum aquaticum*. The maximum nitrogen accumulation of plants in the t_5 sampling periods was $171.08 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ with 6 min of oxygenation. Oxygenation resulted in the decrease of the sediment pH in the early growth stages and an increase in the organic matter content of the sediment in the late growth stages. Oxygenation decreased the nitrate nitrogen content in the t_2 period and the ammonium nitrogen content in the t_4 and t_5 periods but increased the nitrate nitrogen content of the sediment in the t_5 period, thus promoting the absorption and accumulation of nitrogen by *Myriophyllum aquaticum*. Oxygenation affected the pH value and organic matter of sediment by increasing dissolved oxygen content in water. Thereby, the form transformation of sediment nitrogen was regulated and released to the water body, effectively improving the degradation ability of *Myriophyllum aquaticum* to the nitrogen pollutants in polluted water bodies.

Keywords: nitrogen uptake; pH value of sediment; organic matter; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; oxygenation treatment

畜禽养殖废弃物和工农业废水及生活污水的无序排放,致使大量外源氮磷进入水体,造成河湖沟渠等水体富营养化和水体缺氧,引起藻类及其他浮游生物的迅速繁殖和水生动植物的大量死亡^[1]。同时,外源氮磷经吸附、迁移、絮凝和沉淀等作用以不同形态蓄积于底泥并形成氮磷库^[2]。水体溶解氧量(DO)、底泥pH值和有机质等环境因子的微小改变,均会导致底泥氮磷的再次释放,从而造成水体内源性氮磷污染^[3],因此,对河湖沟渠等水体富营养化的预防和治理刻不容缓。目前国内外学者多侧重于通过培养水生植物吸收水体氮污染物,以达到低耗、高效、环保安全去除水体氮污染物的目的^[4-5]。不同水生植物去除水体氮污染物的能力差异显著^[6-8],根系泌氧能力及根系发达程度越高,其水体污染净化能力越强^[9]。与芦苇(*Phragmites australis*)、菖蒲(*Acorus calamus* L.)、纸莎草(*Cyperus papyrus* L.)、浮萍(*Lemna minor* L.)相比,粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)对水体铵态氮(NH_4^+-N)和总氮(TN)的平均去除率分别达97.4%和90.2%^[10],去氮效果相对较好,而芦苇和菖蒲对水体氮的去除贡献率为36.4%~77.1%^[11],纸莎草和浮萍对水体氮的去除贡献率分别达69.5%和30%~47%^[12-13]。粉绿狐尾藻根系发达、生物量增长快,对高浓度氮适应性和耐污能力强,常作为污水生态处理和控制农业面源污染的优选生态修复物种之一^[14];同时粉绿狐尾藻能分泌某些化感物质,破坏水体藻类细胞超微结构,并抑制藻类光合和呼吸作用,影响细胞内某些蛋白质合成和酶活性,实现对藻类生长的抑制甚至导致藻类死亡,从而降低水华现象的发生概率^[15]。而高氮营养盐可限制水生植物根系活性氧的累积并促进根系腐烂,使其难以满足污染水体中有机物降解和硝化作用等对氧的需求^[16-17],降低水生植物对氮素的吸附固化及对水体污染的治理效果^[18],因此,水体氧环境是影响水生植物各器官氮素吸收及其脱氮效果的关键。缺氧条件下部分底泥微生物利用硝酸根离子

(NO_3^-)代替氧气电子受体,在反硝化酶作用下产生一氧化二氮(N_2O)和一氧化氮(NO),并将底泥氮重新释放到水体,造成水体二次污染^[19];利用文丘里空气喷射器、空气泵或微纳米气泡水系统对作物根际进行充氧^[20-22],有效提高水体溶解氧含量和pH值,可促进植株根系生长^[23],加快水体氮污染物降解速度,促进作物根系对养分的吸收^[16];同时增氧可调控底泥pH值,增强底泥微生物硝化作用或反硝化作用^[24],加快植物残体的腐解周期、有机物的矿化速率和底泥氮的形态转化,进而影响根系对氮素的吸收^[25-26];水生植物不同生长时期对氧的需求亦不相同。综上所述,增氧技术作为一项极为节水、节能且利于环境的水分管理措施,可通过调控水体-植物-底泥微环境,促进水生植物对水体及底泥中氮素的吸收,进而提高水生植物对水体氮污染物的脱氮效果。粉绿狐尾藻氮素吸收及底泥微环境对根际增氧的响应具有复杂性,增氧通过影响底泥理化特性及底泥氮的赋存形态,导致粉绿狐尾藻各器官氮含量发生改变,这可能是造成粉绿狐尾藻氮素吸收差异显著的重要原因,但对于增氧调控底泥理化特性及底泥氮的赋存形态,影响粉绿狐尾藻各生长时期不同器官氮素吸收的机理还缺乏系统和深入的研究。本研究以粉绿狐尾藻为研究对象,采用机械增氧方式对粉绿狐尾藻进行增氧水平调控,分析增氧条件下粉绿狐尾藻不同生长时期底泥pH值和有机质、全氮、硝态氮、铵态氮含量及植株氮素吸收的变化规律,明确粉绿狐尾藻底泥理化特性及氮赋存形态对增氧的响应机制,揭示底泥全氮、硝态氮和铵态氮含量对植株氮素吸收的影响机理,为从内源性氮污染物的防治修复工作方面构建一种高效治理农业面源污染的方法提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在湖南农业大学土壤与肥料实验中心站玻

璃温室内进行,温室采光和通风均良好。实验站所处地理位置属于亚热带季风性气候,四季分明,年平均气温为17.60℃,年平均无霜期为280.50 d,年平均降雨量为1403.53 mm,年总降雨时长为158.90 d,月平均降雨量为116.96 mm,月总降雨时长为13.24 d,平均气压为101.22 kPa,相对湿度为80%。

1.2 供试材料

供试品种为粉绿狐尾藻,试验土壤取自实验站田地,为第四纪红黄泥土,肥力中等,土样经风干、打碎后过1 cm筛。将土装入盆中,每盆加水湿润至留有1 cm左右水层,浸水处理1个月后测得底泥基本理化性质见表1。

1.3 试验设计

本试验以机械增氧时间确定增氧水平,共设5个处理,分别为CK(不增氧)、O₁(4 min)、O₂(6 min)、O₃(8 min)、O₄(10 min);各处理设27个重复,共计135盆。机械增氧采用螺旋方式预埋自制增氧管路系统,利用加气泵通过预埋增氧灌溉管路系统向粉绿狐尾藻根际输送,每日早8点准时通气1次,试验用塑料盆上部内径30 cm,底部直径25 cm,高25 cm,每盆装干土6.5 kg。根据已有试验结果,将粉绿狐尾藻均匀剪切至5 cm,扦插到盆里,待粉绿狐尾藻生长稳定后,加营养液至距离土面10 cm,营养液采用氯化铵试剂和纯水配制,浓度为120 mg·L⁻¹,每天定时用纯水补充蒸发水量以保证体积恒定。试验周期为2019年8月22日至12月22日。

1.4 测试指标及方法

1.4.1 底泥肥力及铵态氮和硝态氮含量测定

于9月15日、10月10日、10月27日、11月16日、12月22日(取样时期分别以t₁、t₂、t₃、t₄、t₅表示)各取长势较为一致的代表性植株3盆,随机用土钻取5个点的底泥样品,取样深度为0~10 cm,样品混合后,用四分法取1/4底泥装入灭菌袋包扎密封,于4℃保存,用于测定底泥铵态氮和硝态氮含量,剩余部分样品装土样袋内于阴凉通风处晾干后用研钵磨碎、过筛,用于测定底泥pH值和有机质、全氮、碱解氮含量。其中底泥全氮采用浓H₂SO₄-H₂O₂消解-凯氏定氮法测定;全磷采用HClO₄-H₂SO₄法测定;碱解氮采用碱解扩散法

测定;有效磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提法测定;铵态氮含量和硝态氮含量采用2 mol·L⁻¹ KCl浸提-流动分析仪测定;pH值采用奥力龙868型pH计测定;有机质采用重铬酸钾-外加热法测定。

1.4.2 粉绿狐尾藻各器官全氮含量测定

分别于9月15日、10月10日、10月27日、11月16日、12月22日各取长势较为一致的代表性植株3盆,在24 h内用H₂SO₄-H₂O₂消煮蒸馏法消解-凯氏定氮法测定粉绿狐尾藻根部和地上部植株全氮含量。

1.5 数据分析

粉绿狐尾藻各器官氮素吸收量及积累量由以下公式计算:

粉绿狐尾藻各器官氮素吸收量(mg·株⁻¹)=各器官氮含量(mg·g⁻¹)×各器官干生物量(g·株⁻¹)

粉绿狐尾藻氮素积累量(mg·株⁻¹)=Σ粉绿狐尾藻各器官氮素吸收量(mg·株⁻¹)

采用逐步分析法建立多元线性回归方程模型,模型如下:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon$$

式中:y为因变量,分别为粉绿狐尾藻根部、地上部氮素吸收量和植株氮素积累量;x₁,x₂,...,x_n为自变量,为取样时期相应参数;β₀为y轴截距;β₁,β₂,...,β_n为多元线性回归系数;ε为随机误差。

试验数据采用Excel 2007进行统计分析,数据结果的单因素方差分析(One-way ANOVA)在IBM SPSS version 22.0中采用Duncan新复极差法(SSR)完成;采用Excel 2007和OriginPro 2016绘制图表。

2 结果与分析

2.1 增氧对粉绿狐尾藻氮素吸收的影响

无论增氧与否,粉绿狐尾藻根部、地上部氮吸收量及植株氮积累量均随生长时间延长呈逐渐增加趋势,且地上部氮素吸收量均高于根部;适量增氧显著提高了粉绿狐尾藻各器官及植株对氮素的吸收,导致不同时期粉绿狐尾藻各器官氮素吸收量、植株氮积累量产生显著差异。由表2可知,与CK处理相比,t₁、t₂、t₃、t₄、t₅生长时期O₁~O₄处理粉绿狐尾藻根部氮吸收量分别增加91.39%~236.12%、22.15%~73.27%、

表1 底泥基本理化性质

Table 1 The basic physicochemical characteristics of the experimental soil

全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	pH值 pH value	有机质 Organic matter/(mg·kg ⁻¹)
0.75	0.38	39.64	16.94	6.14	8.20

43.71%~140.28%、66.55%~275.78%、41.70%~149.20%,地上部氮吸收量分别增加16.16%~89.48%、26.53%~177.49%、81.98%~158.06%、4.09%~107.02%,0.57%~66.40%,植株氮积累量分别增加18.98%~94.97%、26.03%~165.59%、78.64%~156.51%、9.23%~119.72%、3.39%~72.06%。生长前期(t_1 、 t_2 时期) O_3 处理根部、地上部氮吸收量和植株氮积累量最高,根部氮吸收量分别为1.91、3.51 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$,地上部氮吸收量分别为27.73、43.62 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$,植株氮积累量分别为29.65、47.13 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$; t_3 、 t_4 、 t_5 时期 O_2 处理粉绿狐尾藻根部和地上部氮吸收量和植株氮积累量最高,根部氮吸收量分别为5.78、14.13、16.94 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$,地上部氮吸收量分别为64.78、95.73、154.13 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$,植株氮积累量分别为70.56、109.86、171.08 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 时期粉绿狐尾藻根部、地上部氮吸收量及植株氮积累量均表现为随增氧时间增加呈先增加后降低趋势。以增氧时间 x 为自变量,粉绿狐尾藻植株氮积累量 y 为因变量拟合方程(表2),进一步表明 t_1 、 t_2 时期增氧8 min和 t_3 、 t_4 、 t_5 时期增氧6 min对粉绿狐尾藻氮素的累积效应最大。结果表明,适量增氧有利于粉绿狐尾藻对氮素的吸收和积累,增氧过量反而会降低氮素的积累,增氧对 t_4 、 t_5 时期粉绿狐尾藻氮素的吸收和累积作用更显著。

表2 粉绿狐尾藻各器官氮吸收量及植株氮积累量差异性分析($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)

Table 2 Difference analysis of nitrogen accumulation and nitrogen uptake in different organs of *Myriophyllum aquaticum* ($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$)

器官 Organ	处理 Treatment	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
根部 Root	CK	0.57±0.08d	2.03±0.29c	2.41±0.22d	3.76±0.27d	6.80±1.26c
	O_1	1.09±0.21cd	2.48±0.44bc	3.46±0.32c	6.26±0.47c	10.26±0.55b
	O_2	1.69±0.14ab	2.88±0.55ab	5.78±0.06a	14.13±0.75a	16.94±0.37a
	O_3	1.91±0.55a	3.51±0.32a	4.19±0.44b	8.87±0.49b	16.27±0.17a
	O_4	1.32±0.19bc	2.61±0.40bc	3.98±0.34bc	6.49±0.10c	9.63±1.02b
地上部 Aboveground	CK	14.64±0.25c	15.72±0.39c	25.11±2.70d	46.24±1.77b	92.63±4.78c
	O_1	17.00±2.92bc	19.89±1.14c	45.68±2.32c	85.34±2.67a	127.02±10.66b
	O_2	23.78±0.58a	35.54±2.15b	64.78±2.78a	95.73±20.39a	154.13±7.76a
	O_3	27.73±1.26a	43.62±4.87a	52.47±1.72b	54.57±1.52b	106.57±11.29c
	O_4	21.53±6.57ab	32.32±4.19b	47.02±2.21c	48.13±1.33b	93.16±7.66c
植株 Plant	CK	15.21±0.26d	17.75±0.17c	27.51±2.91d	50.00±1.56c	99.43±3.52c
	O_1	18.09±2.78cd	22.36±1.57c	49.14±2.44c	91.60±3.14b	137.28±11.12b
	O_2	25.47±0.65ab	38.42±2.55b	70.56±2.72a	109.86±20.84a	171.08±8.09a
	O_3	29.65±1.47a	47.13±5.19a	56.66±1.29b	63.43±1.52c	122.84±11.42b
	O_4	22.85±6.45bc	34.93±4.33b	51.00±2.22c	54.62±1.28c	102.79±6.78c
拟合方程 Fitted equation		$y = -0.144x^2 + 2.564x + 14.127$ $R^2 = 0.679$	$y = -0.227x^2 + 4.720x + 15.507$ $R^2 = 0.688$	$y = -0.837x^2 + 10.873x + 26.266$ $R^2 = 0.848$	$y = -1.905x^2 + 18.908x + 50.310$ $R^2 = 0.802$	$y = -2.132x^2 + 21.634x + 97.633$ $R^2 = 0.790$

注:数据为平均值±标准差($n=3$)。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The data are mean ± standard deviation ($n=3$). Different lowercase letters in the same column represent significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

2.2 增氧对底泥全氮、铵态氮及硝态氮含量的影响

2.2.1 底泥全氮、铵态氮及硝态氮含量差异性分析

由图1a可知,增氧使 t_1 、 t_2 时期底泥全氮含量显著降低, t_4 、 t_5 时期底泥全氮含量增加。与CK相比, t_1 、 t_2 时期 O_1 ~ O_4 处理底泥全氮含量分别降低19.52%~42.64%、14.19%~56.70%, t_4 、 t_5 时期底泥全氮含量分别增加19.58%~59.95%、13.95%~21.85%; t_1 、 t_2 时期全氮含量随增氧时间的增加先降低后增加,且均在 O_3 处理出现阈值; t_4 、 t_5 时期则呈逐渐增加趋势。无论增氧与否,底泥全氮含量均随生长时期的延长先降低后增加。增氧可能通过调控粉绿狐尾藻根系泌氧及释放有机酸等间接影响底泥氮的迁移转化,进而影响底泥氮含量的变化。

增氧可促进粉绿狐尾藻根系对底泥铵态氮的吸收与转化,使粉绿狐尾藻各生长时期底泥铵态氮含量显著降低(图1b)。与CK处理相比, t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 时期 O_1 ~ O_4 处理底泥铵态氮含量分别降低44.50%~50.66%、8.10%~19.86%、18.17%~44.26%、6.19%~35.31%、5.09%~17.20%,表现为粉绿狐尾藻各生长时期底泥铵态氮含量均随增氧时间的增加先降低后增加,其中 t_1 、 t_2 时期在 O_3 处理出现阈值, t_3 、 t_4 时期在 O_2 处理出现阈值, t_5 时期在 O_1 处理出现阈值。CK、 O_1 处理底泥铵态氮含量随着生长时期延长先增加后降低。

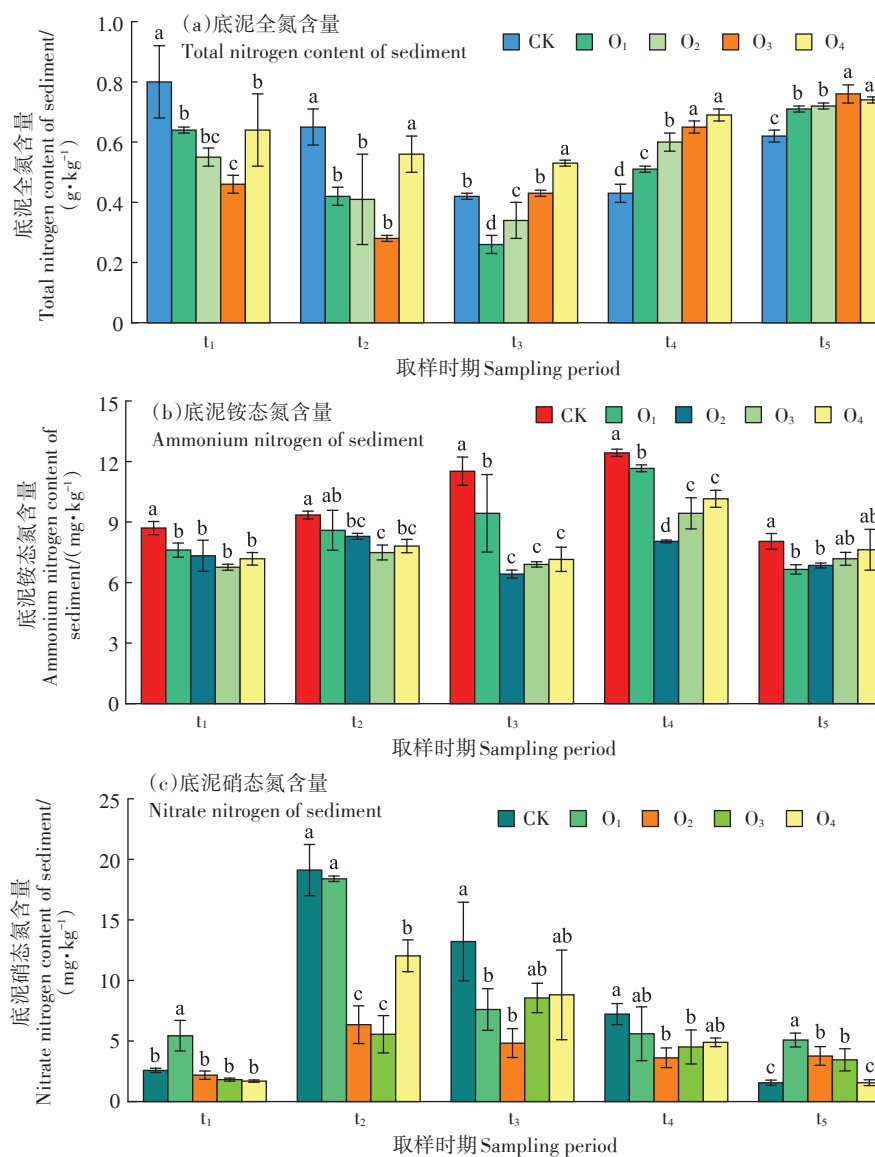
增氧可促进 t_2 、 t_3 、 t_4 时期粉绿狐尾藻根系对底泥硝态氮的吸收与转化,反而抑制 t_5 时期底泥硝态氮的吸收(图 1c)。与 CK 处理相比, t_2 、 t_3 、 t_4 时期 $O_1 \sim O_4$ 处理底泥硝态氮含量分别降低 3.73%~70.92%、33.33%~63.45%、22.40%~49.96%, t_5 时期底泥硝态氮含量增加 0.23%~226.74%。CK、 O_1 、 O_3 、 O_4 处理底泥硝态氮含量均随生长时期延长先增加后降低, O_2 处理粉绿狐尾藻 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 时期底泥硝态氮含量均高于 t_1 时期。

2.2.2 底泥铵态氮、硝态氮含量与 pH 值、有机质相关性分析

增氧降低粉绿狐尾藻生长前期(t_1 、 t_2 时期)底泥

pH 值,同时促使其底泥铵态氮含量降低。由表 3 可知,与 CK 相比, t_1 、 t_2 、 t_3 时期 $O_1 \sim O_4$ 处理底泥 pH 值分别降低 4.07%~9.75%、0.70%~4.78%、1.42%~2.62%, t_4 、 t_5 时期底泥 pH 值则随增氧时间增加呈先升高后降低的趋势,并在 O_1 处理出现阈值。由表 4 可知, t_1 、 t_3 时期底泥铵态氮含量与底泥 pH 值极显著正相关($P < 0.01$), t_2 时期底泥铵态氮含量与底泥 pH 值显著正相关($P < 0.05$)。

增氧使粉绿狐尾藻生长前期(t_1 、 t_2 时期)底泥有机质含量降低,中后期(t_3 、 t_4 、 t_5 时期)底泥有机质含量增加的同时,促使 t_3 和 t_4 时期底泥铵态氮含量增加。



Different lowercase letters indicate significant difference between different oxygenation time treatment in the same period

图 1 不同增氧处理下底泥全氮、铵态氮和硝态氮含量动态变化

Figure 1 Dynamic changes of total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents in sediments under different oxygenation treatments

由表3可知,与CK处理相比,增氧使 t_1 和 t_2 时期底泥有机质含量分别降低0.83%~11.05%和1.34%~5.66%, t_3 、 t_4 、 t_5 时期底泥有机质含量分别增加2.81%~7.91%、7.40%~12.94%、4.13%~16.80%。其中 t_1 和 t_2 时期底泥有机质含量随增氧时间的增加先降低后升高, t_3 和 t_4 时期底泥有机质含量则先升高后降低,并均在 O_2 处理出现阈值。由表4可知, t_3 和 t_4 时期底泥铵态氮含量与底泥有机质含量显著负相关($P<0.05$), t_3 时期底泥硝态氮含量与底泥有机质含量极显著负相关($P<0.01$)。

2.3 粉绿狐尾藻氮素吸收指标与底泥理化特性相关性分析

2.3.1 粉绿狐尾藻氮素吸收指标与底泥全氮含量相关性分析

由表5可知,增氧通过促进 t_1 和 t_2 时期粉绿狐尾藻根部、地上部对氮素的吸收,降低了 t_1 和 t_2 时期底泥全氮含量;增氧促进 t_3 时期粉绿狐尾藻根部氮素吸收的同时,其底泥全氮含量反而增加。表现为 t_1 和 t_2 时期粉绿狐尾藻根部氮吸收量、地上部氮吸收量和植株氮积累量与底泥全氮含量极显著负相关($P<0.01$), t_3

表3 底泥pH值、有机质差异性分析

Table 3 Difference analysis of pH value and organic matter of sediment

指标 Index	处理 Treatment	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
pH 值 pH value	CK	7.69±0.17a	6.70±0.05a	6.35±0.08a	6.05±0.03c	6.10±0.02ab
	O_1	7.38±0.03b	6.65±0.02ab	6.26±0.05ab	6.15±0.02a	6.13±0.01a
	O_2	7.20±0.09c	6.59±0.02bc	6.24±0.02b	6.11±0.03ab	6.08±0.04ab
	O_3	7.07±0.05cd	6.53±0.08c	6.23±0.07b	6.07±0.01bc	6.05±0.05b
	O_4	6.94±0.06d	6.38±0.05d	6.18±0.03b	5.96±0.04d	6.04±0.02b
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	CK	10.58±0.24a	10.49±0.16a	9.75±0.09c	9.38±0.19b	8.74±0.20d
	O_1	10.42±0.36a	9.98±0.06ab	10.47±0.12a	10.51±0.34a	9.10±0.10c
	O_2	9.41±0.35b	9.90±0.48b	10.53±0.18a	10.59±0.15a	10.08±0.06a
	O_3	10.14±0.06a	10.34±0.07ab	10.46±0.12a	10.21±0.74a	9.55±0.11b
	O_4	10.49±0.25a	10.35±0.29ab	10.03±0.12b	10.08±0.04a	10.22±0.16a

表4 底泥铵态氮、硝态氮含量与底泥pH值、有机质相关性分析

Table 4 Correlation analysis of sediment ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content and soil pH value and organic matter

指标 Index		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
底泥铵态氮 Sediment ammonium nitrogen	pH 值 pH value	0.854**	0.627*	0.750**	0.031	-0.014
	有机质 Organic matter	0.263	0.143	-0.596*	-0.587*	-0.240
底泥硝态氮 Sediment nitrate nitrogen	pH 值 pH value	0.374	0.425	0.403	-0.054	0.346
	有机质 Organic matter	0.230	0.220	-0.682**	-0.361	-0.056

注:**表示在0.01水平差异极显著,*表示在0.05水平差异显著。下同。
Nate:** represents significant differences at 0.01 level, * represents significant differences at 0.05 level. The same below.

表5 粉绿狐尾藻氮素吸收指标与底泥全氮含量相关性分析

Table 5 Correlation analysis of nitrogen absorption index of *Myriophyllum aquaticum* and total nitrogen content in bottom sediment

指标 Index	取样时期 Sampling period	根部氮吸收量 N uptake of roots	地上部氮吸收量 N uptake of above ground	植株氮积累量 N accumulation of plant
底泥全氮含量 Total nitrogen content of sediment	t_1	-0.785**	-0.778**	-0.797**
	t_2	-0.726**	-0.661**	-0.670**
	t_3	-0.115	-0.185	-0.181
	t_4	0.463	-0.023	0.047
	t_5	0.642**	0.176	0.254
多元线性回归方程 Multiple linear regression equation		$y=-24.18x_1+26.94$ ($R^2=0.586, P<0.01$)	$y=-176.02x_3+184.41$ ($R^2=0.389, P<0.01$)	$y=-184.11x_5+199.59$ ($R^2=0.345, P<0.01$)

时期根部氮吸收量与底泥全氮含量极显著正相关($P<0.01$)。t₅时期粉绿狐尾藻氮素吸收指标与不同生长时期底泥全氮含量多元线性回归分析结果进一步表明, t₁、t₃时期是影响粉绿狐尾藻 t₅时期氮吸收及积累的关键时期,增氧促进 t₁和 t₃时期粉绿狐尾藻根部、地上部对氮素吸收的同时,降低了两时期底泥全氮含量,进而促进了 t₅时期粉绿狐尾藻植株对氮素的吸收。

2.3.2 粉绿狐尾藻氮素吸收指标与底泥铵态氮含量、硝态氮含量相关性分析

由表6可知,增氧有利于促进粉绿狐尾藻植株对底泥铵态氮的吸收与转化。表现为 t₁、t₂和 t₃时期根部、地上部氮吸收量和植株氮积累量分别与底泥铵态氮含量呈极显著负相关($P<0.01$); t₄时期根部氮吸收量与底泥铵态氮含量呈极显著负相关($P<0.01$); t₅时期地上部氮吸收量与底泥铵态氮含量呈显著负相关($P<0.05$),植株氮积累量与底泥铵态氮含量呈极显著负相关($P<0.01$)。t₅时期粉绿狐尾藻氮素吸收指标与不同时期底泥铵态氮含量多元回归分析结果进一步表明, t₄、t₅时期底泥铵态氮含量是影响粉绿狐尾藻 t₅时期氮素吸收与积累的关键,增氧降低 t₄、t₅时期底泥铵态氮含量的同时,促进了 t₅时期粉绿狐尾藻植株氮的吸收与积累。

增氧可有效提高 t₂、t₃时期粉绿狐尾藻对底泥硝态氮的吸收能力,进而导致 t₂、t₃时期底泥硝态氮含量降低。由表6可知, t₂、t₃时期根部、地上部氮吸收量和

植株氮积累量分别与硝态氮含量呈极显著负相关($P<0.01$); t₄时期根部氮吸收量与底泥硝态氮含量呈极显著负相关($P<0.01$); t₅时期地上部氮吸收量和植株氮积累量与底泥硝态氮含量呈极显著正相关($P<0.01$)。t₅时期粉绿狐尾藻氮素吸收指标与不同时期底泥硝态氮含量多元线性回归分析进一步表明, t₂和 t₃时期底泥硝态氮含量是影响粉绿狐尾藻 t₅时期根部氮吸收量的关键因素,从结果可以判断,增氧导致 t₂时期底泥硝态氮含量降低、t₅时期底泥硝态氮含量增加的同时,促进了 t₅时期粉绿狐尾藻植株氮的吸收与积累。

3 讨论

3.1 粉绿狐尾藻的氮素吸收特征

本研究结合机械增氧方式,掌握了粉绿狐尾藻不同生长时期各器官的氮素吸收规律,揭示了增氧提高粉绿狐尾藻降解水体污染物能力的机制。本研究中,无论增氧与否,粉绿狐尾藻均能通过根部吸收水体氮素以合成自身物质结构,达到去除水体氮污染物的目的。不同器官对水体氮的吸收存在差异,表现为粉绿狐尾藻根部、地上部氮吸收量及植株氮积累量均随生长时期的延长而逐渐增加,且地上部氮吸收量均高于根部(表2)。目前,水生植物对污染水体的净化机制多从植物自身吸收氮素、改善水体-植物-底泥微环境、微生物3个方面进行探讨,其中植物自身吸收氮

表6 粉绿狐尾藻氮素吸收指标与底泥铵态氮含量、硝态氮含量相关性分析

Table 6 Correlation analysis of nitrogen absorption index of *Myriophyllum aquaticum* and ammonium nitrogen content, nitrate nitrogen content in sediment

指标 Index	取样时期 Sampling period	根部氮吸收量 N uptake of root	地上部氮吸收量 N uptake of above ground	植株氮积累量 N accumulation of plant
铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	t ₁	-0.702**	-0.721**	-0.736**
	t ₂	-0.714**	-0.762**	-0.766**
	t ₃	-0.773**	-0.848**	-0.846**
	t ₄	-0.920**	-0.408	-0.500
	t ₅	-0.465	-0.638*	-0.645**
多元线性回归方程 Multiple linear regression equation		$y=-2.19x_4+34.59$ ($R^2=0.744, P<0.01$)	$y=-23.67x_5+286.75$ ($R^2=0.362, P<0.01$)	$y=-26.50x_5+319.30$ ($R^2=0.371, P<0.01$)
硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	t ₁	-0.349	-0.465	-0.466
	t ₂	-0.755**	-0.946**	-0.944**
	t ₃	-0.720**	-0.797**	-0.795**
	t ₄	-0.674**	-0.415	-0.470
	t ₅	0.464	0.678**	0.680**
多元线性回归方程 Multiple linear regression equation		$y=-0.57x_2+0.95x_3+16.10$ ($R^2=0.888, P<0.01$)	$y=11.43x_5+79.48$ ($R^2=0.418, P<0.01$)	$y=12.71x_5+87.51$ ($R^2=0.421, P<0.01$)

素是系统去除氮污染物的主要途径^[15]。粉绿狐尾藻通过茎叶光合作用分泌氧气到水体中,提高水体溶解氧含量和pH值,促进其根系生长并吸收水体大量溶解态氮营养物质^[27-28],是造成粉绿狐尾藻净化污染水体、脱氮效果显著的重要原因^[9];而粉绿狐尾藻根系表面可分泌特异性化感物质,造成根际微环境微生物群落结构的多样性及特异性,为反硝化细菌提供更易降解的代谢物质的同时,更有利于污染水体中氮的反硝化去除^[15]。此外,冬季低温抑制了水体微生物及耗氧有机质活性,增氧导致其溶解氧含量增加,使粉绿狐尾藻中后期根部仍保持较强的生命力^[29],可能造成粉绿狐尾藻中后期各器官氮吸收量及植株氮积累量不断增加。

水体溶解氧含量是影响粉绿狐尾藻氮素吸收与转移的关键,不同生长时期粉绿狐尾藻对氧的需求亦不同,利用自制增氧管路系统对粉绿狐尾藻根际进行适量增氧,可使粉绿狐尾藻根系发达,有效提高粉绿狐尾藻对氮素,尤其是生长后期氮素的吸收同化效果, t_1 、 t_2 时期增氧8 min和 t_3 、 t_4 、 t_5 时期增氧6 min对粉绿狐尾藻氮素积累的累积效应最大。本研究中,增氧处理下粉绿狐尾藻根部、地上部氮吸收量及植株氮积累量均高于不增氧处理;生长前期(t_1 、 t_2 时期)增氧8 min处理的根部、地上部氮吸收量和植株氮积累量最高,生长后期(t_3 、 t_4 、 t_5 时期)增氧6 min处理的根部、地上部氮吸收量和植株氮积累量最高。这说明粉绿狐尾藻根系泌氧有限,难以满足污染水体水生生物新陈代谢、以氧气为电子受体的有机物降解、硝化作用等对氧的需求^[16-17,30],适量增氧可提高水体中氧的传递速率和溶解氧含量,加快水体氮污染物降解速度^[16],同时刺激粉绿狐尾藻植株侧根形成^[31-32],提高根总表面积、总体积等根系生长指标^[33],促使粉绿狐尾藻吸收积累更多营养物质^[34],但过量增氧反而降低粉绿狐尾藻对氮素的吸收同化效果。本研究中,粉绿狐尾藻不同生长时期根部、地上部氮吸收量及植株氮积累量均随增氧时间增加呈先增加后降低的趋势。水体高溶解氧含量使水生生态系统更易达到饱和状态,并对其系统功能产生轻微削减作用^[35],过度增氧抑制了植株相关氮代谢酶活性,限制植株对氮的利用^[36]。此外,增氧促使粉绿狐尾藻中后期根系分泌更多的糖类、氨基酸和生物酶等有机物质,加强其根部呼吸代谢和氮代谢关键酶活性^[37],降低低氧环境对粉绿狐尾藻的胁迫,可能是导致中后期粉绿狐尾藻氮素吸收增加的另一重要原因。综上所述,增氧影响水体溶解氧含量及

粉绿狐尾藻根系生理生长特性,使根系发达,提高了粉绿狐尾藻对水体氮污染物的降解能力。

3.2 粉绿狐尾藻氮素吸收与其底泥理化特性的关系

改善水体-植物-底泥微环境是水生生态系统去除氮污染物的另一主要途径,增氧通过调控粉绿狐尾藻底泥氮的形态转化,增强底泥微生物活性,造成粉绿狐尾藻生长前期底泥全氮含量的降低和生长后期全氮含量的增加。本研究中,增氧使 t_1 、 t_2 时期底泥全氮含量降低19.52%~42.64%、14.19%~56.70%, t_4 、 t_5 时期全氮含量增加19.58%~59.95%、13.95%~21.85%,增氧使粉绿狐尾藻生长前期根系生长旺盛,促进了其对底泥氮的吸收转化并降低了土壤全氮含量;增氧增强粉绿狐尾藻生长中后期根际微生物的繁殖及代谢能力^[38],加速部分衰退茎叶残体分解及底泥有机物和底泥氮的矿化^[39-41],致使其生长中后期底泥全氮含量增加。 t_5 时期粉绿狐尾藻氮素吸收指标与不同时期底泥全氮含量多元线性回归分析结果进一步表明,增氧促进 t_1 和 t_3 时期粉绿狐尾藻根部、地上部氮素吸收的同时,降低了 t_1 和 t_3 时期底泥的全氮含量,最终导致 t_5 时期粉绿狐尾藻植株内氮素吸收及积累量的增加。

粉绿狐尾藻优先以铵态氮作为氮源,增氧通过降低粉绿狐尾藻生长中前期底泥pH值,提高其生长后期有机质含量,持续为粉绿狐尾藻提供无机氮素,促进了粉绿狐尾藻植株对氮素的吸收,造成底泥铵态氮、硝态氮含量的减少。本研究中,增氧使 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 时期底泥铵态氮含量分别降低44.50%~50.66%、8.10%~19.86%、18.17%~44.26%、6.19%~35.31%、5.09%~17.20%;增氧使 t_2 、 t_3 、 t_4 时期底泥硝态氮含量分别降低3.73%~70.92%、33.33%~63.45%、22.40%~49.96%, t_5 时期底泥硝态氮含量反而增加0.23%~226.74%。硝化需好氧环境,反硝化需厌氧环境,增氧使水体-底泥系统形成好氧、缺氧交替的铵硝混合营养环境^[42],加强了底泥微生物的硝化作用和底泥养分的溶解速度^[43],提高了底泥中氮的去除率^[44]。增氧使粉绿狐尾藻根系分泌的 H^+ 或有机酸增加,根际周边底泥pH值降低的同时,致使更多底泥吸附的氮素被溶解并释放到上覆水中^[15];增氧释放到水体中的氧气能提高底泥表层氧化还原电位(Eh),增强了底泥表面氧化层可交换态氮的硝化反应,并生成亚硝酸盐(NO_2^-)和硝酸盐(NO_3^-)^[45-46],从而促进了底泥氨态氮的挥发和降低。不增氧处理下粉绿狐尾藻生长后期根系逐渐衰老,微生物硝化作用因溶氧量不足而受到抑制,导致底泥硝态氮含量降低,增氧则刺激底泥有机

质含量、微生物和酶活性上升,增强底泥有机氮矿化作用^[38],提高了底泥铵态氮含量。底泥铵态氮、硝态氮含量与底泥pH值、有机质相关性分析结果进一步表明,底泥pH值是影响 t_1 、 t_2 、 t_3 时期底泥铵态氮含量的关键,有机质则是影响 t_3 、 t_4 时期底泥铵态氮含量和 t_3 时期底泥硝态氮含量的关键,表现为 t_1 、 t_2 、 t_3 时期底泥铵态氮含量与底泥pH值呈正相关关系($R=0.627^* \sim 0.854^{**}$), t_3 和 t_4 时期底泥铵态氮含量与底泥有机质呈负相关关系($R=-0.596^* \sim -0.587^*$), t_3 时期底泥硝态氮含量与底泥有机质呈负相关关系($R=-0.682^{**}$)。综上所述,增氧在提高水体溶解氧含量、降低底泥pH值的同时,影响底泥氮的形态转化,促使底泥氮向上覆水释放,提高了粉绿狐尾藻对水体氮污染物的降解能力。

4 结论

(1)适量增氧有利于粉绿狐尾藻对氮素的吸收和积累,过量增氧则抑制其氮素的吸收与积累,生长前期(t_1 、 t_2 时期)增氧8 min和生长中后期(t_3 、 t_4 、 t_5 时期)增氧6 min对粉绿狐尾藻氮素吸收的累积作用显著。

(2)底泥pH值和有机质是影响底泥铵态氮、硝态氮含量及粉绿狐尾藻氮素吸收的关键,增氧导致粉绿狐尾藻生长前中期(t_1 、 t_2 、 t_3 时期)底泥pH值和铵态氮含量降低,同时导致 t_3 、 t_4 时期底泥pH值降低,底泥有机质含量和底泥铵态氮含量增加,提高了粉绿狐尾藻对水体氮污染物的降解能力。

参考文献:

- [1] 李鑫,李映雪,徐德福,等. 太阳能曝气下生物炭漂浮湿地的净化能力[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(7):54-59. LI X, LI Y X, XU D F, et al. Effects of solar aeration on purification capacity of floating constructed wetlands with biochar[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(7):54-59.
- [2] 董浩平,姚琪. 水体沉积物磷释放及控制[J]. 水资源保护, 2004, 20(6):4. DONG H P, YAO Q. Phosphorus release and control from water sediments[J]. *Water Resources Protection*, 2004, 20(6):4.
- [3] 胡晓明,夏晗婷,曹静,等. 富营养水体底泥原位控磷技术研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2011, 10(1):75-80. HU C M, XIA H T, CAO J, et al. Study on the *in situ* control phosphorus technology of eutrophic water sediment[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2011, 10(1):75-80.
- [4] 刘少博. 不同浓度铵态氮对绿狐尾藻的生理特征与氮磷吸收影响[D]. 长沙:湖南农业大学, 2017:2-8. LIU S B. Effect of different ammonia concentration on physiological characteristics, nitrogen and phosphorus uptake of *Myriophyllum aquaticum*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017:2-8.
- [5] 关秀婷,周林飞,成遣. 不同生长期水生植物对湿地沉积物中营养物质含量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(1):70-77. GUAN X T, ZHOU L F, CHENG Q. Effects of aquatic plants in different growth stages on nutrient contents in wetland sediments[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(1):70-77.
- [6] SUN H S, LIU F, XU S J, et al. *Myriophyllum aquaticum* constructed wetland effectively removes nitrogen in swine wastewater[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8:1932.
- [7] 李强坤,胡亚伟,孙娟. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):210-214. LI Q K, HU Y W, SUN J. Migration and transformation of agricultural non-point source pollutants in drainage ditches[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):210-214.
- [8] 肖瑾,成水平,吴振斌,等. 植物修复技术及其在污水处理中的应用[J]. 淡水渔业, 2006, 36(5):59-62. XIAO J, CHENG S P, WU Z B, et al. Phytoremediation technology and its application in sewage treatment[J]. *Freshwater Fisheries*, 2006, 36(5):59-62.
- [9] 许巧玲,汪丽,张凤,等. 8种水生植物对高污染负荷水体除污能力的筛选[J]. 园艺与种苗, 2021, 41(12):49-52. XU Q L, WANG L, ZHANG F, et al. Screening of eight aquatic plants for treating high pollution load wastewater[J]. *Horticulture & Seed*, 2021, 41(12):49-52.
- [10] 王丽莎,李希,李裕元,等. 亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向[J]. 环境科学, 2021, 42(3):1433-1442. WANG L S, LI X, LI Y Y, et al. Nitrogen and phosphorus removal in surface flow constructed wetland planted with *Myriophyllum elatinoides* treating swine wastewater in subtropical central China[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3):1433-1442.
- [11] 邓志强,李旭辉,阎百兴,等. 富营养化水体中芦苇和菖蒲浮床氮净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11):2258-2263. DENG Z Q, LI X H, YAN B X, et al. A comparative study on nitrogen removal from polluted water by floating beds planted with *Phragmites australis* and *Acorus calamus*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11):2258-2263.
- [12] KYAMBADDE J, KANSIME F, GUMAELIUS L, et al. A comparative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum*: Based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate[J]. *Water Research*, 2004, 38(2):475-485.
- [13] KOMER S, VERMAAT J E. The relative importance of *Lemna gibba* L. bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater[J]. *Water Research*, 1998, 32(12):3651-3661.
- [14] 马永飞,杨小珍,赵小虎,等. 污水氮浓度和 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(3):1167-1179. MA Y F, YANG X Z, ZHAO X H, et al. Effects of wastewater nitrogen concentrations and $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ on nitrogen removal ability and the nitrogen component of *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3):1167-1179.
- [15] 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 macro-

- phytes on eutrophic water[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(3):58-68.
- [16] 李春华, 王蔚卿, 倪利晓, 等. 人工曝气对垂直潜流人工湿地运行效率的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(3):259-263. LI C H, WANG W Q, NI L X, et al. Influences of artificial aeration on performance of vertical-flow constructed wetlands[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2011, 39(3):259-263.
- [17] OUELLET-PLAMONDON C, CHAZARENC F, COMEAU Y, et al. Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27(3):258-264.
- [18] WANG C, ZHANG S H, WANG P F, et al. Effects of ammonium on the antioxidative response in *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(2):189-195.
- [19] RUCKAUF U, AUGUSTIN J, RUSSOW R, et al. Nitrate removal from drained and reflooded fen soils affected by soil N transformation processes and plant uptake[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 36(1):77-90.
- [20] LIU Y X, ZHOU Y P, WANG T Z, et al. Micro-nano bubble water oxygenation: Synergistically improving irrigation water use efficiency, crop yield and quality[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222:835-843.
- [21] LEI H J, BHATTARAI S, BALSYS R, et al. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and mazzei air injector in soil-less irrigation systems[J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(6):421-430.
- [22] BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Oxygenation enhances growth, gas exchange and salt tolerance of vegetable soybean and cotton in a saline vertisol[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(7):675-688.
- [23] 胡志华, 朱练峰, 林育炯, 等. 根部增氧模式对水稻产量与氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6):1503-1512. HU Z H, ZHU L F, LIN Y J, et al. Effect of root aeration methods on rice yield and nitrogen utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6):1503-1512.
- [24] 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1):167-174. HU J J, ZHU L F, HU Z H, et al. Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1):167-174.
- [25] 孙凯, 胡丽燕, 张伟, 等. 水稻根系泌氧对土壤微生物区系及氮素矿化影响的研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12):3413-3420. SUN K, HU L Y, ZHANG W, et al. Effects of rice root radial oxygen loss on soil microflora and organic nitrogen mineralization: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(12):3413-3420.
- [26] 蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(8):979-988. JIANG J, SONG M H. Review of the roles of plants and soil microorganisms in regulating ecosystem nutrient cycling[J]. *Chinese Journal of Plant*, 2010, 34(8):979-988.
- [27] 姚舒欣. 曝气联合强化微生物技术对黑臭水体水质的影响研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018. YAO S X. Study on the effect of aeration and strengthening microorganism combination technology on the quality of black-odor river[D]. Chongqing:Chongqing University, 2018.
- [28] 赵婉婉, 郭丽芸, 吴伟. 水生植物根系生态化学特性及其生态响应研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3):231-236. ZHAO W W, GUO L Y, WU W. Research progress on ecochemical characteristics and ecological responses of aquatic plant roots[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(3):231-236.
- [29] HE W, LUO J, XING L H, et al. Effects of temperature-control curtain on algae biomass and dissolved oxygen in a large stratified reservoir: Sanbanxi Reservoir case study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 248:109250.
- [30] 周莹. 水生生物对水体溶解氧日变化规律影响[D]. 沈阳:沈阳师范大学, 2016. ZHOU Y. Effect of aquatic organisms on the diurnal variation of dissolved oxygen in water[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2016.
- [31] ZHAO X Q, ZHAO S P, SHI W M. Enhancement of NH_4^+ uptake by NO_3^- in relation to expression of nitrate-induced genes in rice (*Oryza sativa*) roots[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1):86-91.
- [32] 段英华, 张亚丽, 沈其荣. 水稻根际的硝化作用与水稻的硝态氮营养[J]. 土壤学报, 2004, 41(5):803-809. DUAN Y H, ZHANG Y L, SHEN Q R. Nitrification in rice rhizosphere and the nitrate nutrition of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):803-809.
- [33] 肖卫华, 刘强, 姚帮松, 等. 增氧灌溉对杂交水稻根系生长及产量的响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(6):68-71. XIAO W H, LIU Q, YAO B S, et al. Response of root growth and yield of hybrid rice to oxygenation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(6):68-71.
- [34] 胡志华, 朱练峰, 林育炯, 等. 根际氧浓度对水稻产量及其氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(4):382-389. HU Z H, ZHU L F, LIN Y J, et al. Effects of rhizosphere oxygen concentration on rice grain yield and nitrogen utilization[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(4):382-389.
- [35] 赵同宇. 溶解氧对人工湿地系统除磷性能影响研究[J]. 辽宁化工, 2021, 50(7):982-984, 1097. ZHAO T Y. Study on the effect of dissolved oxygen on phosphorus removal performance of constructed wetland system[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2021, 50(7):982-984, 1097.
- [36] 赵锋, 张卫建, 章秀福, 等. 连续增氧对不同基因型水稻分蘖期生长和氮代谢酶活性的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(2):344-351. ZHAO F, ZHANG W J, ZHANG X F, et al. Effect of continuous aeration on growth and activity of enzymes related to nitrogen metabolism of different rice genotypes at tillering stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(2):344-351.
- [37] 徐春梅, 王丹英, 陈松, 等. 增氧对水稻根系生长与氮代谢的影响[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(3):320-324. XU C M, WANG D Y, CHEN S, et al. Effect of aeration on root growth and nitrogen metabolism in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(3):320-324.
- [38] 王美丽. 曝气对黑臭河道水体污染修复的影响研究[D]. 石家庄:

- 河北科技大学, 2015. WANG M L. Study on effect of aeration on water body remediation of black-odor river[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.
- [39] GSCHWENDTNER S, ESPERSCHUTZ J, BUEGGER F, et al. Effects of genetically modified starch metabolism in potato plants on photosynthate fluxes into the rhizosphere and on microbial degraders of root exudates[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, 76(3):564–575.
- [40] BERTIN C, YANG X H, WESTON L A, et al. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere[J]. *Plant & Soil*, 2003, 256(1):67–83.
- [41] 赵霞, 徐春梅, 王丹英, 等. 根际溶氧量对分蘖期水稻生长特性及其氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18):3733–3742. ZHAO X, XU C M, WANG D Y, et al. Effect of rhizosphere oxygen on the growth characteristics of rice and its nitrogen metabolism at tillering stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(18):3733–3742.
- [42] 宋利国, 宋维星, 王宜东, 等. 盐胁迫对间歇增氧垂直流人工湿地脱氮性能及微生物群落影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(3):106–116. SONG L G, SONG W X, WANG Y D, et al. Effects of salinity on nitrogen removal performance and microbial community of intermittent aeration vertical flow constructed wetland [J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2022, 52(3):106–116.
- [43] 李荣涛, 杨萍果, 李琳琳, 等. 潮汐流与曝气人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(8):962–971. LI R T, YANG P G, LI L L, et al. Research progress on nitrogen removal from low pollution water by different types of constructed wet-lands[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(8):962–971.
- [44] 刘宗楠. 水生植物耦合微生物对污染水体的修复作用研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2019. LIU Z N. Study on the remediation of contaminated water body by coupled microorganisms of aquatic plants[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [45] LIU F, ZHANG S N, WANG Y, et al. Nitrogen removal and mass balance in newly-formed *Myriophyllum aquaticum* mesocosm during a single 28-day incubation with swine wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166:596–604.
- [46] GAO J Q, MA N, ZHOU J, et al. Peroxidation damage and antioxidative capability of *Ceratophyllum demersum* under[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2012, 27(4):539–549.

(责任编辑:朱晓昱)