

引用格式:

张文萍, 王润贤, 沈科元, 张鑫全, 曾乐, 关勍兮, 颜智勇, 李汉常, 谭歆, 刘全良. 增氧条件下根系生理生长特性对粉绿狐尾藻氮磷吸收的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(5): 58–65.

ZHANG W P, WANG R X, SHEN K Y, ZHANG X Q, ZENG L, GUAN J X, YAN Z Y, LI H C, TAN X, LIU Q L. Effects of root physiological growth characteristics on nitrogen and phosphorus uptake of *Myriophyllum aquaticum* under aerobic conditions[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(5): 58–65.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 增氧条件下根系生理生长特性对粉绿狐尾藻 氮磷吸收的影响

张文萍<sup>1</sup>, 王润贤<sup>1</sup>, 沈科元<sup>2</sup>, 张鑫全<sup>2</sup>, 曾乐<sup>2</sup>, 关勍兮<sup>2</sup>, 颜智勇<sup>3</sup>, 李汉常<sup>1</sup>, 谭歆<sup>1</sup>, 刘全良<sup>1</sup>

(1. 湖南农业大学水利与土木工程学院, 湖南 长沙 410128; 2. 中铁城建集团有限公司, 湖南 长沙 410208;  
3. 湖南农业大学环境与生态学院, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 为探明增氧条件下粉绿狐尾藻根系生理生长特性对植株氮磷吸收的影响规律, 通过粉绿狐尾藻的盆栽试验, 研究增氧0、4、6、8、10 min条件下, 粉绿狐尾藻不同生长时期根系的生理生长特性及其对氮磷的吸收特征, 并探究它们之间的相互关系。结果表明: 与不增氧的对照组相比, 增氧可提高粉绿狐尾藻单株根部、茎叶部和植株的氮磷吸收量, 且茎叶部的氮磷吸收量均高于根部的; 增氧可提高不同生长时期粉绿狐尾藻的根系活力、根系体积、根表面积、总根长; 增氧条件下, 粉绿狐尾藻成熟期( $T_5$ 时期)的单株氮吸收量、磷吸收量、根系活力、根系体积、根表面积、总根长分别增加3.39%~72.06%、14.40%~58.20%、69.37%~275.14%、18.57%~47.84%、5.80%~64.88%、2.70%~57.77%; 增氧6 min时,  $T_5$ 时期粉绿狐尾藻单株植物氮吸收量出现阈值, 为171.07 mg, 增氧8 min时,  $T_5$ 时期粉绿狐尾藻单株植物磷吸收量出现阈值, 为9.98 mg; 增氧6 min为调控粉绿狐尾藻根系生理生长特性、促进其对氮磷吸收的理想增氧时间。综上, 增氧调控可提升粉绿狐尾藻的根系活力、促进根系生长, 进而增强了粉绿狐尾藻根系对氮、磷元素的吸收。

**关键词:** 粉绿狐尾藻; 增氧处理; 氮; 磷; 根系活力; 根系生长

中图分类号: X52; X173

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)05-0058-08

## Effects of root physiological growth characteristics on nitrogen and phosphorus uptake of *Myriophyllum aquaticum* under aerobic conditions

ZHANG Wenping<sup>1</sup>, WANG Runxian<sup>1</sup>, SHEN Keyuan<sup>2</sup>, ZHANG Xinquan<sup>2</sup>, ZENG Le<sup>2</sup>,  
GUAN Jiexi<sup>2</sup>, YAN Zhiyong<sup>3</sup>, LI Hanchang<sup>1</sup>, TAN Xin<sup>1</sup>, LIU Quanliang<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources & Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;  
2. China Railway Urban Construction Group Co. Ltd., Changsha, Hunan 410208, China; 3. College of Environment & Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** To investigate the influences of root physiological growth characteristics on nitrogen(N) and phosphorus(P) uptake of *Myriophyllum aquaticum* under aerobic conditions, pot experiment was conducted. Root physiological growth characteristics, and N and P uptake characteristics of *M. aquaticum* were analysed. Five treatments were designed for 0, 4, 6, 8, and 10 min under aerobic conditions, the relationships between root characteristics and N and P uptake of *M. aquaticum* were determined. The results showed that, compared with the non-aerated CK group, N and P uptake amounts per plant of

收稿日期: 2024-11-29

修回日期: 2024-12-30

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2023JJ30311); 湖南省水利科技项目(XSKJ2024064-4)

作者简介: 张文萍(1977—), 女, 山西文水人, 博士, 副教授, 主要从事农业水资源高效利用及修复研究, 48175413@qq.com

the stems and leaves under aerobic conditions were higher than those of the roots; the total N and P uptake amounts per plant of the roots, stems and leaves, and the whole plant, and the root vitality, root volume, root surface area and total root length of *M. aquaticum* at different growth stages under aerobic conditions could be increased. The N uptake amount, P uptake amount per plant, root activity, root volume, root surface area, and total root length of *M. aquaticum* in T<sub>5</sub> period under aerobic conditions increased by 3.39%-72.06%, 14.40%-58.20%, 69.37%-275.14%, 18.57%-47.84%, 5.80%-64.88%, 2.70%-57.77%, respectively. The maximum values of N uptake amount per plant of T<sub>5</sub> period(171.07 mg) in 6 minutes and P uptake amount per plant of T<sub>5</sub> period(9.98 mg) in 8 minutes under aerobic conditions appeared, respectively. An aerobic treatment of 6-minute was a perfect aerobic time for regulating root physiological growth characteristics and promoting N and P uptake of *M. aquaticum*. In conclusion, aerobic regulation could significantly enhance the vitality and growth of the root system of *M. aquaticum*, and increase its uptake of N and P elements.

**Keywords:** *Myriophyllum aquaticum*; aerobic treatment; nitrogen; phosphorus; root vitality; root growth

河湖流域作为地球生态系统的重要组成部分,存在多个包含氮(N)、磷(P)、碳(C)循环的水域生态子系统,水体富营养化通过改变氮、磷、碳循环子系统,引起藻类、微生物等水生生物大量繁殖和水生植物大规模消亡,危害人类健康和植被生态系统<sup>[1]</sup>。在全球气候变暖条件下,河湖流域生态系统氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)排放已成为国际地学研究领域的学术前沿和热点<sup>[2]</sup>。水生植物作为河湖流域生态系统的重要功能组分,生态适应性强,氮磷净化效果好,在为水生生物提供栖息地、降低底泥氮磷含量的同时,提高了水体富营养化的治理效果。绿狐尾藻对水体总氮、总磷平均去除贡献率分别为49.84%、90.41%<sup>[3]</sup>,所收割植株亦可作为饲料或田间绿肥<sup>[4]</sup>。因此,探究粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*),尤其是低温条件下粉绿狐尾藻对氮磷的吸收特性,不仅有利于优化水生植物-微生物-底泥微环境组合<sup>[5]</sup>,而且对应对全球气候变暖、实现河湖流域生态面源污染修复、氮磷碳协同降解<sup>[6]</sup>目标具有重要的理论指导意义。

目前,多数学者主要侧重于从植物自身生理生长状态、底泥微环境特性、根际水体状况等方面对粉绿狐尾藻氮磷吸收变化特征进行探讨<sup>[7-12]</sup>。有研究表明,水生植物根系结构越发达,其泌氧能力越大,植物将无机态氮磷转化为植株生长所需有机物的能力越强<sup>[8]</sup>,粉绿狐尾藻的根系活力、总根长、根表面积以及根系体积均显著优于黑藻、刺苦草等的相应指标<sup>[9]</sup>。也有研究表明,不同水生植物对水体氮磷污染物耐受性不同,粉绿狐尾藻对水体氨氮、总氮、总磷去除率分别高达97.4%、90.2%、93.36%<sup>[10]</sup>,适当的氮磷胁迫甚至能提高粉绿狐尾藻的净光合速率和氮磷吸收能力,但NH<sub>4</sub><sup>+</sup>质量浓度超

过420 mg/L,粉绿狐尾藻生长严重受阻甚至死亡<sup>[11]</sup>。还有研究<sup>[12]</sup>表明,水质调节、底泥翻耕、增氧处理等措施能通过改变根际底泥微生物种群数量和多样性,优化水生植物氮磷吸收特征。其中,曝气增氧方式通过对植株根系增氧<sup>[13]</sup>,提高了根系酸性磷酸酶、脲酶等的活性,促进了蛋白酶合成,进而改变了植株根系形态和结构特征<sup>[9]</sup>,同时还能实现氮气和碳的固定化,增强植株对氮磷的吸收,减少氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、甲烷(CH<sub>4</sub>)等气体的排放<sup>[14]</sup>,达成降污减排的协同治理效果<sup>[15]</sup>。然而,关于增氧如何调控根系生理生长特性、改变水生植物氮磷吸收比、在提高绿狐尾藻耐寒性的同时,维持较高的根系活力<sup>[16]</sup>,进而影响水生植物各部位氮磷等元素吸收的生理机制,目前,尚缺乏深入系统的研究。本研究中,以粉绿狐尾藻作为试验材料,通过机械增氧方式调控增氧水平,分析粉绿狐尾藻不同生长时期的根系活力、根系体积等根系生理生长特性与其单株植株氮磷吸收量、氮磷质量分数的变化规律及它们之间的相互关系,探究增氧水平影响粉绿狐尾藻根系生理生长特性的生理机制,明确影响粉绿狐尾藻植株氮磷吸收的关键因素,以期为河湖流域生态面源污染修复、温室气体减排及氮磷碳协同降解提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及供试材料

试验地位于湖南省长沙市湖南农业大学土壤与肥料试验中心站(28°14'11"N, 113°09'50"E),属于亚热带季风性湿润气候,气候温和、降水充沛,年均降水量、年总降水时长分别为1 361.60 mm、158.90 d,年均气温为16.8~17.2 °C,年均日照时数

为1 726 h, 年均无霜期为279 d。

供试土壤为第四纪红黄泥土, 经风干、打碎、过孔径为1 cm的筛后备用。土壤全氮、全磷、碱解氮、有效磷、有机质质量分数分别为750、380、39.64、16.94、8.20 mg/kg, pH为6.14。供试PVC盆顶部、底部直径和高度分别为300、250、250 mm。

## 1.2 试验设计

参照前期试验结果, 以不增氧处理为对照(CK), 设4、6、8、10 min等4个增氧(输送氧气)处理(分别记为OJ<sub>1</sub>、OJ<sub>2</sub>、OJ<sub>3</sub>、OJ<sub>4</sub>), 各处理设25个重复, 共计125盆。于

2019年7月10日将土壤装入盆中, 每盆土壤干质量约6.5 kg, 加水湿润至水深1 cm左右, 浸水处理1月。取长势基本一致并具有代表性的粉绿狐尾藻植株, 预培育1~2 d, 用蒸馏水清洗后修剪植株至50 mm长, 并移栽于PVC盆中, 待粉绿狐尾藻适应环境后加入营养液至水深10 cm, 标记好刻度线, 每日定时用蒸馏水补充水量至标记刻度线处。其中, 营养液由磷酸二氢钾、氯化铵、蒸馏水配制而成, 其氮、磷、铵态氮质量浓度分别为120、32、25 mg/L。于2019年8月22日开始进行增氧试验, 采用机械增氧方式(加气泵额定功率为220 V/50 Hz, 排气量为20 L/min), 利用自制预埋的增氧管路系统, 向粉绿狐尾藻根际输氧, 于每日8:00进行通气, 持续约5月。

## 1.3 样品采集与测定指标及方法

### 1.3.1 植株样品采集与预处理

粉绿狐尾藻生长和生理活性受季节气候影响显著, 为提高粉绿狐尾藻耐寒性, 同时使其保持较高的根系活力<sup>[17]</sup>, 分别于秋季生长旺盛期(9月15日, T<sub>1</sub>), 生长期(10月10日, T<sub>2</sub>), 生长期(10月27日, T<sub>3</sub>), 衰老期(11月16日, T<sub>4</sub>), 成熟期(12月22日, T<sub>5</sub>)等5个时期, 各处理分别采集3盆长势基本一致的代表性植株, 保持粉绿狐尾藻根部完整, 放入低温保温箱并带回实验室; 沿茎基部将绿狐尾藻根部和茎叶部分开, 用蒸馏水清洗并用滤纸吸干, 先测定根系生理生长特性指标; 再将样品放入恒温干燥箱, 105 °C杀青30 min后, 调温至75 °C烘烤24 h, 用电子分析天平称量植株各部位的干生物量; 烘干样品经粉碎后用于植株各部位氮磷质量分数的检测。

### 1.3.2 根系生理生长特性指标测定

采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法检测根系活力; 采用根系扫描仪(Epson express11000xL)测定粉绿狐尾藻根系体积、根表面积、总根长。

### 1.3.3 植株各部位氮磷质量分数检测

采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消化法消煮粉绿狐尾藻根部和茎叶部样品, 采用KDY-9820凯氏定氮仪测定消化液中氮含量, 并计算样品氮质量分数; 采用钒钼黄比色法在波长400~490 nm处用吸光光度法测定消化液中磷含量, 并计算样品磷质量分数。根据植株根、茎叶部的干质量与氮磷质量分数计算各部位和植株的氮磷吸收量。

## 1.4 数据分析

以粉绿狐尾藻不同生长时期根系生理生长特性指标为自变量, 以粉绿狐尾藻成熟期各部位氮磷质量分数、吸收量和植株氮磷吸收量为因变量, 建立多元线性逐步回归方程模型, 构建最优解释模型, 自动筛选出对因变量影响最大的关键自变量。

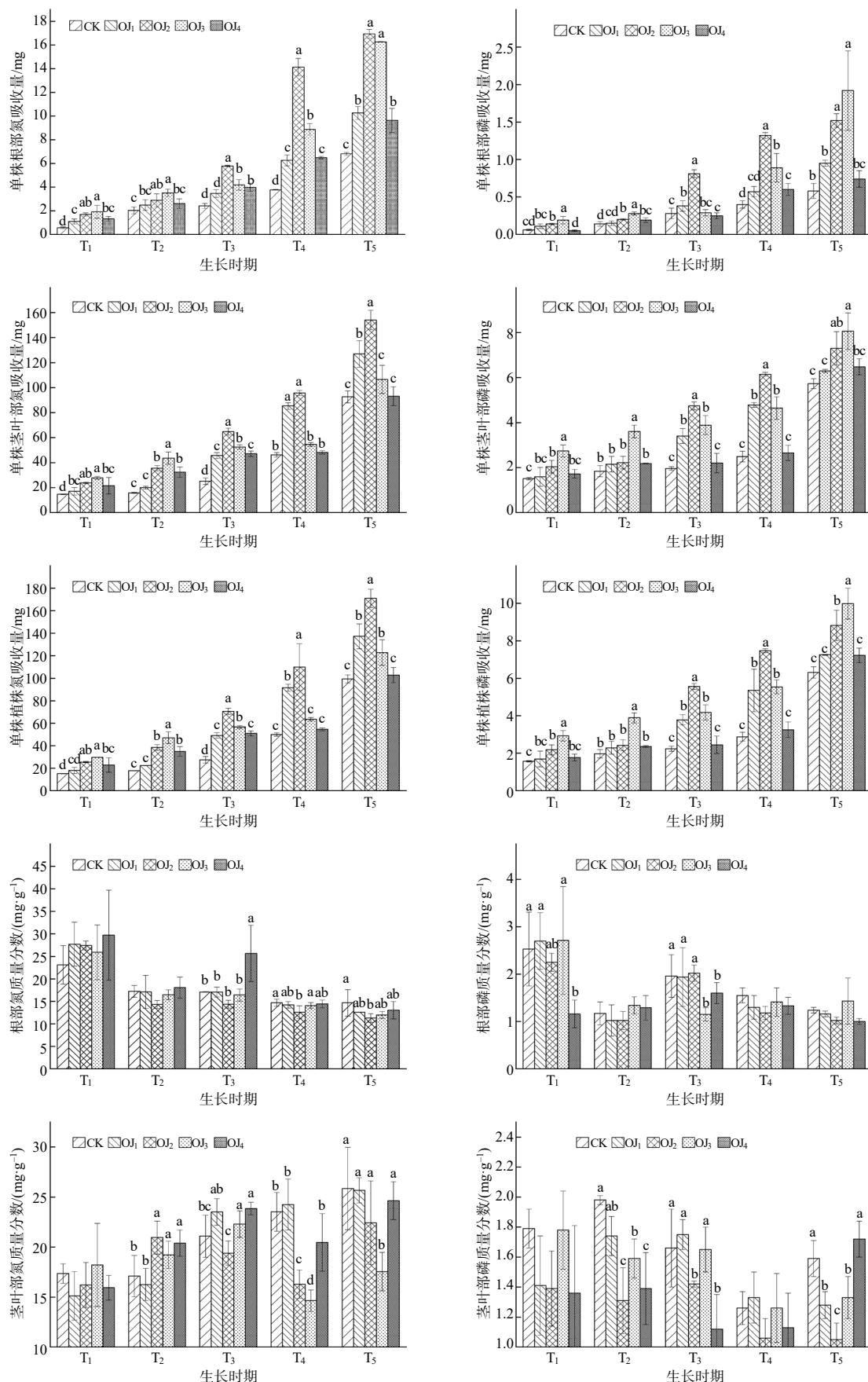
运用OriginPro 2022软件对粉绿狐尾藻T<sub>5</sub>时期氮磷吸收指标及其根系生理生长特性进行层次聚类分析并形成树状图结构。其中, 以粉绿狐尾藻T<sub>5</sub>时期各部位氮磷吸收量、氮磷质量分数、不同生长时期根系活力及根系体积等根系生长特性指标为因素集, 以{满意, 比较满意, 不满意}为判断集。

采用Excel 2023和OriginPro 2022软件进行数据整理与绘图; 运用SPSS 28.0进行方差分析, 并选用Duncan's新复极差法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 增氧处理对粉绿狐尾藻氮磷吸收的影响

由图1可知, 粉绿狐尾藻的单株根部、茎叶部和植株氮、磷吸收量均随生长时期推进而逐渐上升, 且茎叶部氮、磷吸收量均高于根部的; T<sub>5</sub>时期增氧6 min处理的粉绿狐尾藻单株植株氮吸收量最大, 为171.07 mg; T<sub>5</sub>时期增氧8 min处理的粉绿狐尾藻单株植株磷吸收量最大, 为9.98 mg, 其次是T<sub>5</sub>时期增氧6 min处理的, 为8.82 mg。不同生长时期, 粉绿狐尾藻根部、茎叶部的氮、磷质量分数不同, 其中, 根部氮、磷质量分数均在T<sub>1</sub>时期出现最大值(OJ<sub>4</sub>的磷质量分数除外), 这可能是由于增氧导致了粉绿狐尾藻干生物量质量比例发生了变化。

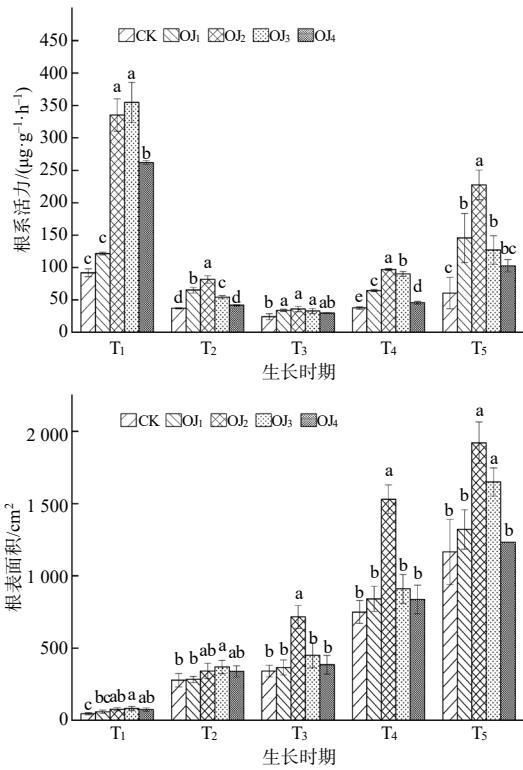


图柱上不同字母表示不同增氧处理在同一生长时期内的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

图1 不同增氧处理和生长时期粉绿狐尾藻氮磷吸收指标变化趋势

Fig.1 Trends of N and P uptake indices of *Myriophyllum aquaticum* under different aeration treatments and growth periods

由图1可知,增氧条件下粉绿狐尾藻单株根部、茎叶部和植株氮磷吸收量均高于不增氧条件下的,且不同生长时期单株根部、茎叶部及植株氮磷吸收量均随增氧时间的增加表现为先上升后下降的趋势,且与CK相比,增氧条件下粉绿狐尾藻T<sub>5</sub>时期的单株氮、磷吸收量分别增加了3.39%~72.06%、14.40%~58.20%,这说明增氧有利于粉绿狐尾藻氮磷的吸收和转运。增氧8 min时,T<sub>1</sub>时期单株植株氮、磷吸收量阈值分别为29.65、2.93 mg,T<sub>2</sub>时期单株植株氮、磷吸收量阈值分别为47.13、3.89 mg;增氧6 min时,T<sub>3</sub>时期单株植株氮、磷吸收量阈值分别为70.56、5.56 mg,T<sub>4</sub>时期单株植株氮、磷吸收量阈值分别为109.86、7.47 mg。



图柱上不同字母表示不同增氧处理在同一生长时期内的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

图2 不同增氧处理和生长时期的粉绿狐尾藻根系生理生长特性指标

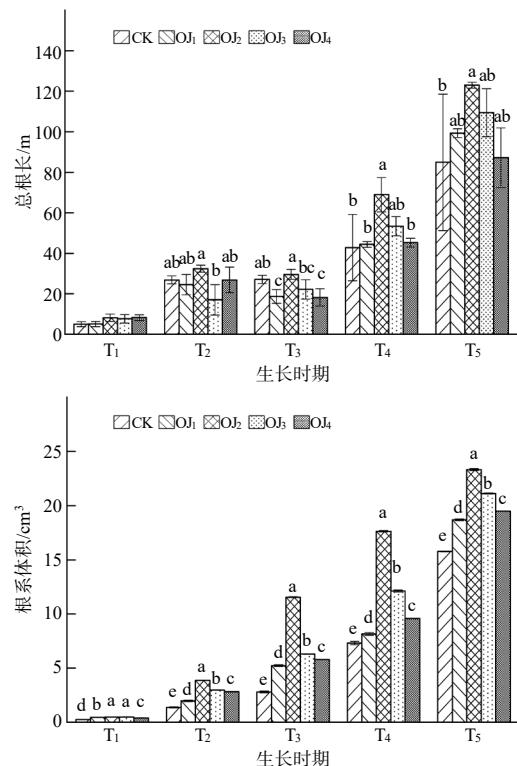
Fig.2 Root system physiological-growth characteristic indices of *Myriophyllum aquaticum* under different aeration treatments and growth periods

### 2.3 粉绿狐尾藻氮磷素吸收指标与其根系生理生长特性指标的相互关系

由表1可知,5个时期粉绿狐尾藻单株根部、茎叶部和植株氮吸收量与其根系活力、总根长、根表面积、根系体积均呈显著或极显著正相关(T<sub>2</sub>时期的根系活力除外),T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻根部磷吸收量及T<sub>4</sub>时期粉绿狐尾藻单株茎叶部磷吸收量与其根系活力、总根长、根表面积、根系体积均呈显著或极显著负相关(T<sub>5</sub>时期根表面积除外),T<sub>4</sub>时期粉绿狐尾藻茎叶部氮质量分数与其根系活

### 2.2 增氧处理对粉绿狐尾藻根系生理生长特性的影响

由图2可知,增氧使绿狐尾藻5个生长时期根系活力、根系体积、根表面积、总根长均增加(T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>的总根长除外);在T<sub>5</sub>时期,与CK相比,增氧条件下粉绿狐尾藻根系活力、根系体积、根表面积、总根长分别增加了69.37%~275.14%、18.57%~47.84%、5.80%~64.88%、2.70%~57.77%;绿狐尾藻根系体积、根表面积、总根长均随生长时期延长呈逐渐增加的趋势,根系活力则呈先降低后增加的趋势,增氧6 min时,T<sub>5</sub>生长时期根系体积、根表面积、总根长均出现最大值,分别为23.32 cm<sup>3</sup>、1 921.22 cm<sup>2</sup>、123.07 m,根系活力仅低于T<sub>1</sub>时期的,为227.29 μg/(g·h)。



力、总根长、根表面积、根系体积呈极显著负相关;T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>时期粉绿狐尾藻单株茎叶部和植株磷吸收量及T<sub>4</sub>时期粉绿狐尾藻单株根部磷吸收量与其根系活力、总根长、根表面积、根系体积均呈极显著正相关,T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻茎叶部磷质量分数与其根系活力、总根长、根表面积、根系体积成极显著负相关。由此可见,增氧处理提高了粉绿狐尾藻根系活力,促使根系生长,这可能是提高粉绿狐尾藻氮磷吸收量的关键。

表1 不同生长时期粉绿狐尾藻氮磷吸收指标与其根系生理生长特性指标的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between N and P uptake indices and root system physiological-growth characteristic indices of *Myriophyllum aquaticum* under different growth periods

指标	生长时期	相关系数				指标	生长时期	相关系数			
		根系活力	总根长	根表面积	根系体积			根系活力	总根长	根表面积	根系体积
单株根部 氮吸收量	T <sub>1</sub>	0.877**	0.814**	0.745**	0.811**	单株根部 磷吸收量	T <sub>1</sub>	0.580*	0.397	0.385	0.675**
	T <sub>2</sub>	0.374	0.640*	0.606*	0.518*		T <sub>2</sub>	0.175	0.735**	0.695**	0.577*
	T <sub>3</sub>	0.713**	0.730**	0.799**	0.962**		T <sub>3</sub>	0.498	0.778**	0.852**	0.878**
	T <sub>4</sub>	0.882**	0.924**	0.924**	0.982**		T <sub>4</sub>	0.886**	0.925**	0.872**	0.962**
	T <sub>5</sub>	0.708**	0.947**	0.877**	0.924**		T <sub>5</sub>	0.453	0.833**	0.694**	0.729**
单株茎叶部 氮吸收量	T <sub>1</sub>	0.839**	0.753**	0.700**	0.692**	单株茎叶部 磷吸收量	T <sub>1</sub>	0.708**	0.673**	0.416	0.577*
	T <sub>2</sub>	0.312	0.844**	0.681**	0.804**		T <sub>2</sub>	0.079	0.505	0.498	0.356
	T <sub>3</sub>	0.754**	0.784**	0.752**	0.919**		T <sub>3</sub>	0.710**	0.748**	0.806**	0.825**
	T <sub>4</sub>	0.595*	0.534*	0.722**	0.564*		T <sub>4</sub>	0.873**	0.730**	0.746**	0.742**
	T <sub>5</sub>	0.816**	0.691**	0.665**	0.685**		T <sub>5</sub>	0.406	0.756**	0.642**	0.723**
单株植株 氮吸收量	T <sub>1</sub>	0.836**	0.778**	0.721**	0.720**	单株植株 磷吸收量	T <sub>1</sub>	0.713**	0.663**	0.421	0.602*
	T <sub>2</sub>	0.318	0.841**	0.683**	0.800**		T <sub>2</sub>	0.088	0.531*	0.521**	0.379
	T <sub>3</sub>	0.775**	0.784**	0.759**	0.927**		T <sub>3</sub>	0.711**	0.782**	0.845**	0.866**
	T <sub>4</sub>	0.662**	0.613*	0.782**	0.648**		T <sub>4</sub>	0.910**	0.796**	0.799**	0.813**
	T <sub>5</sub>	0.841**	0.763**	0.730**	0.754**		T <sub>5</sub>	0.447	0.828**	0.698**	0.765**
根部氮 质量分数	T <sub>1</sub>	0.191	0.278	0.145	0.266	根部磷 质量分数	T <sub>1</sub>	-0.191	-0.297	-0.341	0.036
	T <sub>2</sub>	-0.489	-0.397	-0.244	-0.391		T <sub>2</sub>	-0.412	0.161	0.209	-0.007
	T <sub>3</sub>	-0.284	-0.397	-0.401	-0.286		T <sub>3</sub>	-0.229	0.141	0.132	0.089
	T <sub>4</sub>	-0.560*	-0.638*	-0.743**	-0.699**		T <sub>4</sub>	-0.319	-0.340	-0.542*	-0.409
	T <sub>5</sub>	-0.520*	-0.661**	-0.486	-0.622**		T <sub>5</sub>	-0.279	0.019	-0.067	-0.141
茎叶部氮 质量分数	T <sub>1</sub>	-0.192	-0.019	-0.078	-0.071	茎叶部磷 质量分数	T <sub>1</sub>	-0.08	-0.167	-0.419	-0.290
	T <sub>2</sub>	0.193	0.663**	0.319	0.716**		T <sub>2</sub>	-0.499	-0.683**	-0.533*	-0.820**
	T <sub>3</sub>	-0.048	-0.181	0.547**	-0.455		T <sub>3</sub>	-0.024	-0.013	-0.043	-0.277
	T <sub>4</sub>	-0.730**	-0.712**	-0.542**	-0.726**		T <sub>4</sub>	-0.147	-0.403	-0.471	-0.410
	T <sub>5</sub>	-0.174	-0.525*	-0.482	-0.492		T <sub>5</sub>	-0.733**	-0.700**	-0.713**	-0.645**

注: \*、\*\*分别表示显著相关( $P<0.05$ )、极显著相关( $P<0.01$ )。

$T_5$ 时期粉绿狐尾藻氮磷吸收指标与根系生理生长指标的多元线性逐步回归方程列于表2, 其中,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_4$ 分别为 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_4$ 时期粉绿狐尾藻的根系活力;  $x_{10}$ 为 $T_5$ 时期粉绿狐尾藻的总根长;  $x_{14}$ 为 $T_4$ 时期粉绿狐尾藻的根表面积。由表2可知,  $T_5$ 时期粉绿狐尾藻单株根部、茎叶部、植株氮吸收量与根系生理生长特性指标拟合方程的关键自变量均为粉绿狐尾藻的根系活力, 其 $R^2$ 分别为0.923、0.887、0.906;  $T_5$ 时期粉绿狐尾藻单株根部、茎叶部、植株磷吸收量与根系生理生长特性指标拟合方程的关键自变量也均为粉绿狐尾藻的根系活力, 其 $R^2$ 分别为0.710、0.659、0.697;  $T_5$ 时期根部、茎叶部氮质量分数拟合方程的关键自变量分别为粉绿狐尾藻的总根长和根系活力, 其 $R^2$ 分别为0.437、0.402, 根部、茎叶部磷质量分数拟合方程的关键自变量分别为

表2  $T_5$ 时期粉绿狐尾藻氮磷吸收指标与根系生理生长特性指标的多元线性逐步回归方程Table 2 Multiple linear stepwise regression equation between N and P uptake indices and root system physiological-growth characteristic indices of *Myriophyllum aquaticum* during  $T_5$  growth period

指标	回归方程	R <sup>2</sup>	P
单株根部氮吸收量( $y_1$ )	$y_1=1.00+0.16x_4$	0.923	<0.01
单株茎叶部氮吸收量( $y_2$ )	$y_2=36.27+1.40x_2$	0.887	<0.01
单株植株氮吸收量( $y_3$ )	$y_3=38.46+1.578x_2$	0.906	<0.01
根部氮质量分数( $y_4$ )	$y_4=20.16-0.072x_{10}$	0.437	<0.01
茎叶部氮质量分数( $y_5$ )	$y_5=28.55-0.023x_1$	0.402	<0.01
单株根部磷吸收量( $y_6$ )	$y_6=-1.81+0.20x_4$	0.710	<0.01
单株茎叶部磷吸收量( $y_7$ )	$y_7=51.25+0.07x_1$	0.659	<0.01
单株植株磷吸收量( $y_8$ )	$y_8=53.79+0.11x_1$	0.697	<0.01
根部磷质量分数( $y_9$ )	$y_9=1.74-0.0001x_{14}$	0.239	<0.01
茎叶部磷质量分数( $y_{10}$ )	$y_{10}=1.74-0.0001x_2$	0.712	<0.01

粉绿狐尾藻的根表面积和根系活力,其 $R^2$ 分别为0.239、0.712。可见,这些拟合方程的自变量以T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>时期粉绿狐尾藻根系活力为主,这说明增氧提高了T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>时期粉绿狐尾藻根系活力,这可能是促进T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻氮磷吸收的关键。

#### 2.4 粉绿狐尾藻氮磷吸收层次聚类分析结果

由图3可知,距离1 800~2 100对应各处理可分为3种类型:满意{OJ<sub>2</sub>},不满意{OJ<sub>3</sub>},非常不满意{CK, OJ<sub>1</sub>, OJ<sub>4</sub>}。从前面结果(图1和图2)中也可知,粉绿狐尾藻T<sub>5</sub>时期增氧6 min处理(OJ<sub>2</sub>)的单株氮吸收量、根系体积、根表面积、总根长均最高,单株磷吸收量、根系活力也较高。这表明增氧6 min为调控根系生理生长特性、提升粉绿狐尾藻对氮磷吸收的理想增氧时间。

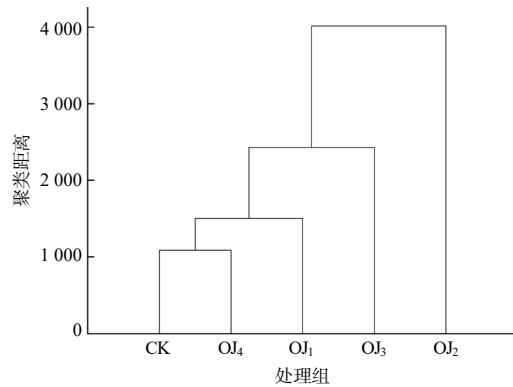


图3 T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻氮磷吸收层次聚类分析结果

Fig.3 Hierarchical clustering analysis result of N and P uptake of *Myriophyllum aquaticum* during T<sub>5</sub> growth period

### 3 讨论

水生植物对氮磷的吸收需求,会随着其生长时期产生和运输氧气能力的不断增强而增加<sup>[9~14]</sup>。本研究中,粉绿狐尾藻各部位氮磷吸收量均随生长时间的延长呈逐渐升高趋势,增氧条件下粉绿狐尾藻单株根、茎叶部和植株氮磷吸收量均高于不增氧条件下的,T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻单株植株氮、磷吸收量阈值分别为171.07 mg(增氧6 min)、9.98 mg(增氧8 min)。研究表明,水生植物种类、根际微环境和根系生理生长特性是影响水生植物氮磷吸收的主要原因<sup>[18]</sup>,其中,根系泌氧有利于好氧微生物生长和水体氮磷等污染物的降解,植物根系结构越发达,其根系泌氧能力越大,植物将无机态氮磷转化为植株生长所需有机物的能力也越强<sup>[7]</sup>。粉绿狐尾藻根系更倾向于吸收氨氮和磷,高氮磷环境会促进

根系通气组织的形成<sup>[11]</sup>。氨氮、硝氮、总磷质量浓度分别高于25、15、35 mg/L,可增加菖蒲根系泌氧量,减少粉绿狐尾藻根系泌氧速率<sup>[19]</sup>。增氧通过提升根际水体溶解氧含量,增强粉绿狐尾藻将无机态氮磷转化为有机氮磷的效能<sup>[17,20]</sup>,提高水体氮磷的净化效果<sup>[14]</sup>。也有研究表明,增氧可加强根际底泥微生物硝化反应<sup>[17,21]</sup>,促使根际水体与底泥氮、磷发生氧化反应,改变根际微环境微生物优势种群、丰度及多样性,同时利用根细胞转运蛋白将N、P固定到蛋白质上,合成氨基酸等以供植物利用<sup>[22]</sup>,减少氧化亚氮、甲烷等温室气体排放,有助于推进河湖流域生态治理及达成“双碳”目标<sup>[23]</sup>。

增氧多通过氧气参与根系活性表达及酶类合成等方式,促进更多氮磷向粉绿狐尾藻植物各部位转运。本研究表明,增氧处理下粉绿狐尾藻不同生长时期根系活力、根系体积、根表面积均高于不增氧的。粉绿狐尾藻不定根、侧根对氮素信号响应极其敏感<sup>[11]</sup>,氮素促进粉绿狐尾藻不定根、侧根增加,增氧则通过增强根系活力促进了植株本身对氮磷的吸收利用。粉绿狐尾藻通气组织细胞间薄壁组织与氧气的接触面扩大,可减少根径向的氧气损失及氧化亚氮、甲烷和二氧化碳的排放,还可增强根尖的营养元素吸收能力,将所需氮磷营养物质运输到植株不同部位<sup>[1]</sup>。增氧可有效提升根际溶解氧含量,并调控水体pH,同时显著增强水生植物根系活力,进而促进了根系的生长与发育进程。也有研究<sup>[24]</sup>表明,粉绿狐尾藻启动C<sub>4</sub>代谢机制将外源C吸收固定在其体内,合成大量有机物蛋白质,促使植物根际吸收氮磷,分泌更多脲酶、磷酸酶、氨基酸等,保证了植物对氮磷的有效利用。高氧环境(氧质量浓度6 mg/L)下根系有机酸总量(草酸、柠檬酸含量等)和叶绿素、可溶性糖含量的显著上升,提高了粉绿狐尾藻生育末期的根系活性<sup>[25]</sup>,这可能是粉绿狐尾藻T<sub>5</sub>时期单株磷吸收量增加的关键。拟合回归分析结果表明,增氧促使T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>时期粉绿狐尾藻根系活力和T<sub>4</sub>时期根表面积及T<sub>5</sub>时期总根长增加,这可能是T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻氮磷吸收量增加及根部氮磷质量分数降低的关键原因。

### 4 结论

- 1) 增氧可有效促进粉绿狐尾藻的氮磷吸收。无论增氧或不增氧,粉绿狐尾藻单株茎叶部氮磷吸收

量均高于根部的；增氧6 min时，T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻单株植物氮吸收量出现最大值，为171.07 mg；增氧8 min时，T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻单株植物磷吸收量出现最大值，为9.98 mg。

2) 增氧可提高T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>时期粉绿狐尾藻根系活力和T<sub>4</sub>时期根表面积及T<sub>5</sub>时期总根长，这可能是T<sub>5</sub>时期粉绿狐尾藻单株氮磷吸收量增加、根部氮磷质量分数降低的关键原因；增氧6 min为有效调控粉绿狐尾藻根系生理生长特性，促进其对氮磷吸收的理想增氧时间。

### 参考文献：

- [1] GLIBERT P M. Eutrophication, harmful algae and biodiversity: challenging paradigms in a world of complex nutrient changes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(2): 591–606.
- [2] ROBERTSON G, PAUL E, HARWOOD R. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere[J]. *Science*, 2000, 289: 1922–1925.
- [3] 谢陈, 李希, 何兴兵, 等. 水芹-绿狐尾藻人工湿地对养殖废水的处理效果[J]. *植物资源与环境学报*, 2024, 33(1): 26–34.
- [4] 张瑛, 李宝珍, 刘锋, 等. 绿狐尾藻对不同铵硝配比的生理响应[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(1): 84–90.
- [5] 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.
- [6] 谭歆. 增氧处理对绿狐尾藻磷素吸收的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [7] 钟玉英, 林建伟, 李姜维, 等. 常见水生植物对氮磷营养盐的利用和蓄积[J]. *生态毒理学报*, 2024, 19(5): 356–367.
- [8] 李华歆, 殷春雨, 杨国梁, 等. 不同功能型沉水植物对溶解氧影响及环境效应[J]. *水生生物学报*, 2024, 48(2): 232–241.
- [9] SOUZA F A, DZIEDZIC M, CUBAS S A, et al. Restoration of polluted waters by phytoremediation using *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc., Haloragaceae[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 120: 5–9.
- [10] 洗应男, 张瑛, 李宝珍, 等. 绿狐尾藻光合色素组成及氮磷化学计量学特征对外源铵的响应[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(4): 451–460.
- [11] 张文萍, 蒋易, 张鑫全, 等. 增氧条件下粉绿狐尾藻的氮磷吸收特征[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(3): 271–282.
- [12] 李静凯, 朱丽琴, 黄荣珍, 等. 改变碳输入对亚热带针阔混交林土壤化学性质和微生物群落的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(1): 95–104.
- [13] 宋莎莎, 安伟, 张庆范, 等. 海洋生态修复碳汇开发利用机制、路径和建议[J]. *海岸工程*, 2024, 43(4): 349–359.
- [14] 郑冰清, 孙彩云, 符洪铭, 等. 沉水植物水生态修复工程的水-气界面CO<sub>2</sub>通量及生态效益研究: 以武汉东湖为例[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(5): 496–506.
- [15] 常小云, 张树楠, 张苗苗, 等. 绿狐尾藻生态沟渠在低温状态下对磷的去除[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(4): 852–858.
- [16] 黄鑫星, 蒋家陆, 罗沛, 等. 氨态氮浓度和收割频率对绿狐尾藻根系泌氧特性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(5): 1112–1118.
- [17] 罗海霞, 罗雪梅, 苟小林, 等. 内陆河流域浮床植物根际微生物群落特征与比较[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(13): 5642–5651.
- [18] 刘惠东, 李汉常, 姚邦松, 等. 不同氧磷管理对水稻根系活力和产量的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(2): 130–137.
- [19] 娄慧敏, 郑玺, 王平平, 等. 水氮耦合对陕南烤烟渗透调节物质及抗逆生理特性的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(2): 30–35.
- [20] 尹丹, 朱忆雯, 胡敏, 等. 水稻根际微生物及其驱动的土壤碳氮磷循环[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(11): 2207–2220.
- [21] 夏桂敏, 罗秀兰, 聂修平, 等. 不同生育期水分亏缺耦合施氮量对花生光合特性和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 67–75.
- [22] JANE S F, HANSEN G J A, KRAEMER B M, et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes[J]. *Nature*, 2021, 594: 66–70.
- [23] ABIKO T, KOTULA L, SHIONO K, et al. Enhanced formation of aerenchyma and induction of a barrier to radial oxygen loss in adventitious roots of *Zea nicaraguensis* contribute to its waterlogging tolerance as compared with maize(*Zea mays* ssp. *mays*)[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2012, 35(9): 1618–1630.
- [24] MUTHUI S W. 氨氮对沉水植物光合作用和呼吸作用的影响: 以光叶眼子菜, 微齿眼子菜和穗状狐尾藻为例[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2021.
- [25] 刘文利, 姜亮亮, 刘冰, 等. 中国植被碳源/汇时空演变特征及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1456–1467.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正