

淹水时间对洞庭湖典型湿地植物生长及水质净化能力的影响*

李卓雅^{1,2,3}, 潘柏含^{1**}, 余炜诚^{2,3}, 李峰^{2,3}, 黄如^{2,3,4}

(1: 湖南师范大学生命科学院, 长沙 410081)

(2: 中国科学院亚热带农业生态研究所, 洞庭湖湿地生态系统观测研究站, 长沙 410125)

(3: 湖南省自然资源事务中心, 自然资源部洞庭湖流域生态保护修复工程技术创新中心, 长沙 410004)

(4: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以5种洞庭湖典型湿地植物菖蒲 (*Acorus calamus*)、菰 (*Zizania latifolia*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、短尖藨草 (*Carex brevicuspis*) 和香蒲 (*Typha orientalis*) 为研究对象, 设置不同淹水时间 (30、60、90、120 d) 处理, 系统分析其形态、生理响应及氮磷去除效率。结果表明, 淹水时间显著影响植物形态、生理响应和氮磷去除效率。形态上, 随淹水时间增加, 菖蒲生物量与株高显著下降; 短尖藨草生物量与根长总体稳定而株高略降; 芦苇、菰和香蒲株高则随淹水时间增加而不断增加。生理上, 随淹水时间延长, 菰的MDA与可溶性糖显著下降而抗氧化酶活性及叶绿素含量升高; 芦苇的SOD与脯氨酸降低、可溶性糖升高; 短尖藨草的MDA、SOD与叶绿素下降, 可溶性糖与脯氨酸上升; 香蒲的MDA、SOD与脯氨酸呈先降—后升—再降的变化 (60 d最低、90 d最高), 叶绿素含量则持续下降。净化能力方面, 芦苇与香蒲对水体氮、磷的去除率随淹水时间延长持续提升; 菖蒲、菰与短尖藨草在60-90 d处理时达到峰值然后下降。综上, 不同植物在淹水环境下的形态—生理—功能响应应具有显著物种特异性和时间依赖性, 芦苇和香蒲能够在持续淹水环境下维持较高的净化效能, 更适合作为长期淹水湿地生态系统的优选物种。

关键词: 湿地植物; 淹水胁迫; 生物量响应; 生理适应; 水质净化效率

Effects of Flooding Duration on the Growth and Water Purification Capacity of Typical Wetland Plants in Lake Dongting*

Li Zhuoya^{1,2,3}, Pan Baihan^{1**}, Yu Weicheng^{2,3}, Li Feng^{2,3} & Huang Ru^{2,3,4}

(1: College of life science, Hunan Normal University, Changsha 410081, P. R. China)

(2: Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Research, Changsha 410125, P. R. China)

(3: Hunan Center of Natural Resources Affairs, Technology Innovation Center for Ecological Protection and Restoration Project of Dongting Lake Basin, Ministry of Natural Resources, Changsha 410004, P. R. China)

(4: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: This study investigated the morphological, physiological, and functional (nutrient removal) responses of five typical wetland plants in Lake Dongting—*Acorus calamus*, *Zizania latifolia*, *Phragmites australis*, *Carex brevicuspis*, and *Typha orientalis*—to different flooding durations (30, 60, 90, and 120 days). Results indicated that flooding duration significantly affected all measured aspects. Morphologically, biomass and plant height of *A. calamus* decreased significantly over time,

* 2025-10-17 收稿; 2026-02-07 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2023YFC3208703)、湖南省科技创新平台计划 (2022PT1010)、国家自然科学基金项目 (42171062、42301068)、湖南省水利科技项目 (XSKJ2024064-59) 和安徽省省级环境保护科研项目 (2023hb0001) 联合资助。

**通信作者; E-mail: baihan@hunnu.edu.cn

whereas *P. australis*, *Z. latifolia*, and *T. orientalis* showed continued increases in plant height. *C. brevicuspis* maintained relatively stable biomass and root length, with only a slight decrease in plant height. Physiologically, responses were species-specific. In *Z. latifolia*, malondialdehyde (MDA) and soluble sugar contents decreased significantly, while antioxidant enzyme activity and chlorophyll content increased. In *T. orientalis*, MDA, superoxide dismutase (SOD), and proline levels showed dynamic changes, decreasing initially, peaking at 90 days, and then declining, whereas its chlorophyll content decreased continuously. Regarding purification function, nitrogen and phosphorus removal rates of *P. australis* and *T. orientalis* improved continuously with prolonged flooding. In contrast, *A. calamus*, *Z. latifolia*, and *C. brevicuspis* reached peak removal efficiency at 60–90 days before declining. In summary, responses were highly species-specific and time-dependent. *P. australis* and *T. orientalis* maintained high purification efficiency under prolonged flooding, indicating their greater suitability as dominant species for long-term flooded wetland ecosystems.

Keywords: Wetland plants; Flooding stress; Biomass response; Physiological adaptation; Water purification efficiency

湿地植物是湿地生态系统结构和功能的核心组成部分,在维持水体健康和生态平衡方面扮演着不可或缺的角色^[1]。植物通过吸收营养盐、富集重金属、降解有机污染物以及调控微生物群落等机制^[2-4],参与水体氮、磷等污染物的削减过程,对于有效缓解湖泊、河流等水体富营养化进程、控制农业面源污染以及退化湿地恢复等至关重要^[5-6]。然而湿地植物污染物截留与转化能力受到多种生物因素如物种差异和非生物因素如光照、温度等的显著影响和制约^[7],其中水文条件被认为是最关键且直接的调控因子^[8]。在湿地生态系统中,湿地水文过程直接决定湿地植物的空间分布格局与群落组成^[9],还可通过调控植物的生理代谢途径与生态适应策略^[10],最终影响其吸收、转化和去除污染物的效率。

现有研究表明,当植物遭受淹水胁迫时,土壤和水体中的氧气迅速耗竭,造成植物体缺氧,迫使植物从高效产能的有氧呼吸转向能量产生效率低下的无氧呼吸^[11],这一根本性代谢转换伴随着一系列连锁生理反应,根系活力显著下降^[12],如根系酶活性降低、养分吸收速率减缓;根系形态结构发生适应性或损伤性改变^[13],如促进通气组织发育以增加氧气运输;以及关键生理过程受阻,如光合作用效率降低^[14]、能量供应不足、活性氧积累加剧^[15-16]。生存环境改变导致生理变化,使得植物难以维持正常生长和生理代谢,最终导致植物截留和同化氮、磷等污染物的核心生态功能效率削弱。

淹水胁迫对湿地植物产生的生态生理效应,其本质是水位深度与淹水持续时间两个关键维度共同作用的结果。在自然湿地环境中,由于地貌地形的显著高低起伏,不同空间位置的植物个体或群落所经历的淹水事件在多个关键参数上存在高度时空异质性,这种异质性直接导致湿地内部形成显著的水文梯度。具体而言,位于低洼地势的植物经历的淹水持续时间长,其所遭受的厌氧胁迫强度更高,生理压力也更为严峻。相反,位于地势稍高处的植物经历淹水持续时间短,所经历的胁迫强度和累积效应相对减弱。这种局域水文格局差异,是塑造湿地植物群落空间分布、生理状态、生存适合度^[17-18],并最终决定其污染物净化功能的核心驱动力之一^[19]。

洞庭湖作为我国第二大淡水湖,是长江中游重要的天然调蓄湖泊,其复杂的江湖关系和独特的水文特征备受关注。近年来,受人类活动、气候变化等影响,湿地环境问题突出,具体如水质污染加剧^[20],水位变幅显著增大^[21],湿地萎缩与植被退化等^[22]。已有研究多聚焦于水位对湿地植物生长、分布及净化能力的影响,然而不同淹水时长对湿地植物形态-生理-净化功能影响的研究较为欠缺。因此,本研究以洞庭湖流域5种常见湿地植物即菖蒲(*Acorus calamus*)、菰(*Zizania latifolia*)、芦苇(*Phragmites australis*)、短尖薹草(*Carex brevicuspis*)和香蒲(*Typha orientalis*)为研究对象,系统比较5种植物在不同淹水时间下的生理生态响应及其净化能力,进而识别适应性强、净化效率高的植物资源,从而为退化湿地生态修复中物种选择提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验设计

本研究在中国科学院亚热带农业生态研究所洞庭湖湖泊湿地生态系统国家野外科学观测研究站大通

湖分站 (29°13'N, 112°33'E) 开展。2024 年 3 月于洞庭湖湿地采集各植物无性繁殖体: 带顶芽的根茎段 (菖蒲、芦苇、香蒲)、分蘖茎段 (菰) 和带根基部的分株 (短尖藨草)。每种植物预采 300 株, 温室预培养 20 d, 期间保持水分与光照条件一致。预培养结束后, 筛选出植株高度为 30~35 cm 且生长健壮、大小一致的个体各 120 株用于试验, 每桶定植 5 株。试验开始时, 各植物单株的初始生物量为 (5.61±0.96) g。

试验基质取自洲滩裸地原状土壤。使用内径 20 cm、高 15 cm 的 PVC 管在原位套取 0~15 cm 土层原状土, 采样后封闭管底, 将其作为种植容器置于聚乙烯桶内 (高 70 cm, 口径 46 cm)。

试验采用两因素设计: 植物种类 (菖蒲、菰、芦苇、短尖藨草、香蒲) 与淹水时间 (30、60、90、120 d), 共 20 个处理; 每处理设 6 个重复, 共 120 个试验单元。淹水处理在聚乙烯桶内进行, 每桶加入试验用水 (初始浓度: 总氮 2 mg·L⁻¹、总磷 0.2 mg·L⁻¹), 统一控制水深为 30 cm (自土壤表面起算)。洞庭湖 3-5 月为涨水期, 于 7 月份水位达到最高^[23], 为模拟水位上涨过程, 各处理分别于试验的第 90 d、60 d、30 d 和 0 d 开始淹水 (对应 30、60、90、120 d 的淹水持续时间), 从而保证所有处理组在试验末期同步结束淹水, 避免了因采样时间不同 (如处于不同季节) 所导致的植物生理状态差异对结果的干扰。在淹水阶段, 将 PVC 管置于桶底; 在未淹水阶段, 将 PVC 管置于距桶底 30 cm 处, 以保证植株未被淹没且获得必要水分。试验于 2024 年 4 月至 8 月进行, 历时 4 个月 (120 d)。试验期间定期补加自来水以补偿蒸发与渗漏, 保持恒定水位。试验装置布局与处理设置见图 1。

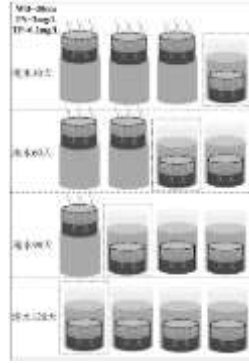


图 1 试验设计示意图 (以芦苇为例)

Fig.1 Experimental design schematic (*Phragmites australis*)

1.2 测定指标与方法

试验开始时, 采集植物幼苗与水样用于测定初始背景值 (如植物生物量、水体 TN/TP 浓度)。试验结束后, 于各处理取植物最高处倒数第二片新鲜叶片, 采用 80% 丙酮提取法测定叶绿素 (chlorophyll) 含量。丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 采用硫代巴比妥酸法测定; 超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 采用氮蓝四唑 (NBT) 光还原法测定; 过氧化氢酶 (catalase, CAT) 采用过氧化氢紫外吸收法测定; 可溶性糖 (soluble sugar) 采用蒽酮-硫酸法测定; 脯氨酸 (proline) 采用酸性茚三酮法测定。

收获时按处理同步采集植物样品, 用水洗净后吸干表面水分, 测定株高、根长等形态指标。随后在 70 °C 烘干至恒重 (约 72 h), 称量干重。干燥样品研磨成粉并过筛后, 采用 vario MAX cube 元素分析仪 (德国) 测定植物全氮含量; 样品经 H₂O₂-H₂SO₄ 消煮后, 采用 AA3 流动注射分析仪 (美国) 测定全磷含量。水体总氮 (total nitrogen, TN) 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; 水体总磷 (total phosphorus, TP) 浓度采用钼酸铵分光光度法测定。

1.3 数据处理

氮、磷去除率用于表征试验结束后水体总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的去除百分比, 计算公式为:

$$\eta_N = (C_{N0} - C_{Nx}) / C_{N0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_P = (C_{P0} - C_{Px}) / C_{P0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η_N 为水体总氮去除率; η_P 为水体总磷去除率; C_{N0} 为初始水体总氮含量, C_{Nx} 为淹水 30、60、90 和 120 d 后水体总氮含量; C_{P0} 为初始水体总磷含量, C_{Px} 为淹水 30、60、90 和 120 d 后水体总磷含量。

数据分析前，分别采用 Shapiro-Wilk 与 Levene 检验进行正态性和方差齐性检验；必要时对数据进行对数或平方根变换。随后，以物种为单位，采用单因素方差分析（one-way ANOVA）检验淹水时间对该物种形态、生理性状及水体总氮（TN）和总磷（TP）变化的影响；当效应显著时，进行 Tukey HSD 事后检验（ $\alpha = 0.05$ ）。所有统计分析均在 R 4.4.2 中完成。

2 结果与分析

2.1 淹水时间对 5 种湿地植物生长与形态特征的影响

淹水时间对菖蒲、菰、芦苇和香蒲的总生物量及根长具有显著影响（表 1）。随淹水时间延长，菖蒲和芦苇的总生物量均显著下降，菰和香蒲的总生物量呈先升后降，而短尖藁草的总生物量在不同淹水时间下无显著差异；同时，菖蒲、菰和芦苇的根长显著降低，香蒲根长则呈先升后降（图 2）。此外，淹水时间对五种植物的株高均有显著影响（表 1）：菖蒲和短尖藁草在淹水 120 d 时株高最低，而菰、芦苇和香蒲则在 120 d 时达到最大（图 2）。

表 1 淹水时间对 5 种植物生长与形态特征影响的单因素方差分析(F 值)

Tab.1 One-way ANOVA for the effect of flooding duration on the growth and morphological traits of five plant species (F-values)

	菖蒲	菰	芦苇	短尖藁草	香蒲
总生物量	42.55**	9.18**	28.28**	0.94	3.85*
株高	18.21**	11.85**	6.97**	9.66**	11.44**
根长	28.69**	10.43**	38.28**	0.43	5.09*

注：* $P < 0.05$ ；** $P < 0.01$ 。下同。

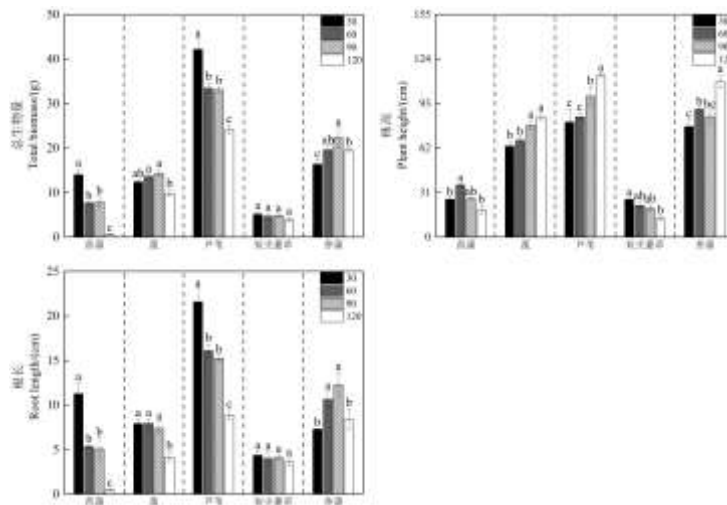


图 2 不同淹水时间处理下植物生长与形态特征响应

不同字母表示同种植物在不同淹水时间处理下差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。

Fig.2 Responses of plant growth and morphological traits under different flooding durations

2.2 淹水时间对 5 种湿地植物生理特征的影响

总体而言，淹水时间对 5 种湿地植物的多项生理指标均产生显著影响，但不同物种的响应模式存在差异（表 2，图 3）。具体表现为：对丙二醛（MDA）与超氧化物歧化酶（SOD）而言，淹水时间对菰、芦苇、短尖藁草和香蒲均产生显著影响，而对菖蒲影响不显著（表 2）。菰、芦苇和短尖藁草的 MDA 含量随淹水时间延长总体呈下降趋势；香蒲在淹水 90 d 时显著升高，随后降低。SOD 方面，菰呈“先升一后降一再升”，120 d 达最大值；芦苇与香蒲均呈“先降一后升一再大幅下降”趋势，并在 120 d 降至最低；短尖藁草在 60 d 出现显著下降后趋于稳定。与此相应，在过氧化氢酶（CAT）上，随淹水时间延长，菰与短

尖藁草均呈“先升—后降—再升”，其中菰在 120 d 达到最大 ($P < 0.05$)；而芦苇则随时间逐步增加并趋于稳定 (图 3)。

淹水时间对 5 种湿地植物的可溶性糖与脯氨酸含量均产生显著影响 (表 2)：对可溶性糖而言，菖蒲在 30-90 d 呈“先降—后升”趋势，菰与芦苇均为“先升—后降—再升”趋势，短尖藁草在 90 d 达峰，香蒲为“先升—后降”且最终趋于稳定 (图 3)；脯氨酸中，菖蒲在 30-90 d 持续增加，菰呈“先升—后降—再回升”趋势，香蒲与之相反在 60 d 降至最低并于 90 d 回升达到最大，芦苇持续下降，短尖藁草“先升—后降”且在 90 d 达最大值 (图 3)。

淹水时间对菖蒲、菰、短尖藁草和香蒲的叶绿素含量均产生显著影响 (表 2)：菖蒲在 120 d 显著降低；菰先小幅降低后显著升高；短尖藁草与香蒲则随淹水时长增加显著降低 (图 3)。

表 2 淹水时间对 5 种植物生理特征影响的单因素方差分析 (F 值)

Tab.2 One-way ANOVA for the effect of flooding duration on the physiological traits of five plant species (F -values)

	菖蒲	菰	芦苇	短尖藁草	香蒲
丙二醛含量	3.00	14.38**	5.59*	4.67*	6.33**
超氧化物歧化酶含量	1.88*	4.22*	3.88*	13.03**	4.83*
过氧化氢酶含量	0.40	8.53**	0.96	5.63*	0.92
可溶性糖含量	170.10**	65.67**	13.35**	192.10**	31.79**
脯氨酸含量	68.55**	41.59**	185.80**	266.70**	129.20**
叶绿素含量	7.49**	3.98*	0.70	42.25**	9.32**

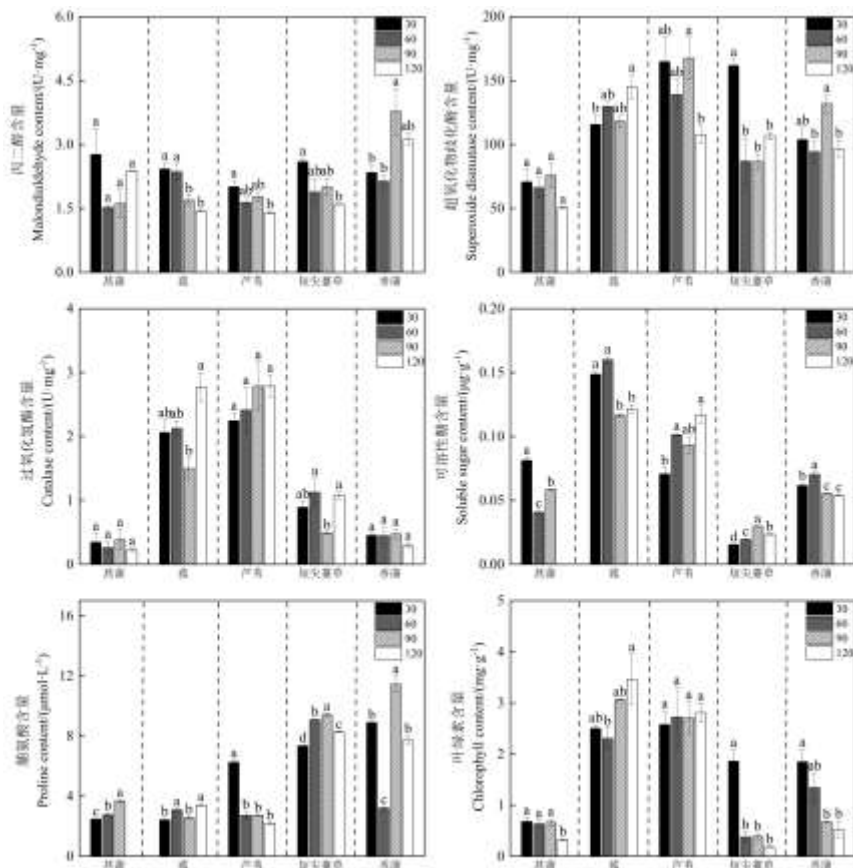


图 3 不同淹水时间处理下植物生理特征的响应

Fig.3 Responses of plant physiological traits under different flooding durations

2.3 淹水时间对 5 种湿地植物体内氮、磷含量的影响

淹水时间对不同植物体内氮、磷含量的影响存在显著差异 (表 3)。由图 4 可知: 菖蒲体内氮、磷含量随淹水时间增加呈持续上升趋势; 菰在淹水 30-90 d 期间体内氮含量差异不显著, 磷含量于淹水 60 d 最低, 至淹水 120 d 时氮、磷含量出现回升; 芦苇体内氮含量在不同淹水时长间差异不显著, 磷含量则在淹水 120 d 达到最大; 短尖藁草体内氮含量在淹水 90 d 达到最大值, 而磷含量随淹水时间延长呈上升趋势; 香蒲体内氮、磷含量均呈先降后升趋势, 并在淹水 60 d 时达到最低。

表 3 淹水时间对 5 种植物体内氮、磷含量影响的单因素方差分析(F 值)

Tab.3 One-way ANOVA for the effect of flooding duration on the nitrogen and phosphorus contents of five plant species (F -values)

	菖蒲	菰	芦苇	短尖藁草	香蒲
植物体氮	9668.00**	119.90**	1.89	575.40**	695.50**
植物体磷	12153.00**	132.50**	5.05*	345.30**	339.50**

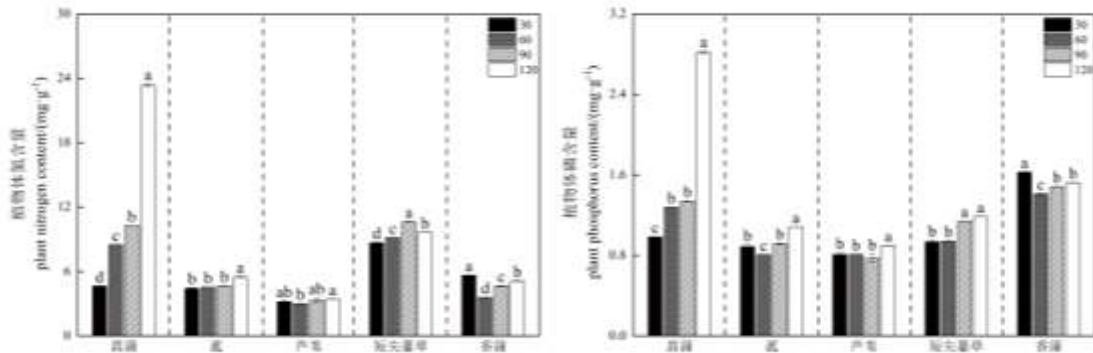


图 4 不同淹水时间下植物体内氮、磷含量的变化

Fig.4 Changes in plant nitrogen and phosphorus contents under different flooding durations

2.4 淹水时间对 5 种湿地植物净化能力的影响

不同物种间水体养分浓度随淹水时间变化趋势存在显著差异 (表 4; 图 5): 总氮方面, 芦苇与香蒲种植组均随淹水时间延长呈持续下降趋势, 120 d 时最低 ($P < 0.05$); 菖蒲与短尖藁草种植组呈先降后升的趋势, 60 d 时最低; 菰种植组在四个淹水时长下差异不显著。总磷方面, 芦苇与香蒲种植组随淹水时间延长持续下降, 120 d 时最低; 菖蒲与菰种植组呈先降后升趋势, 其中菖蒲 30 d 时最低、菰在 60 d 时最低; 短尖藁草种植组在四个淹水时长下变化不显著。

表 4 淹水时间对各处理组水体总氮和总磷含量影响的单因素方差分析(F 值)

Tab.4 One-way ANOVA for the effect of flooding duration on the water total nitrogen and phosphorus concentrations across treatment groups (F -values)

	菖蒲	菰	芦苇	短尖藁草	香蒲
水体总氮	2.75	1.61	26.07***	4.66*	4.82*
水体总磷	22.15***	19.29***	14.73***	0.18	39.81***

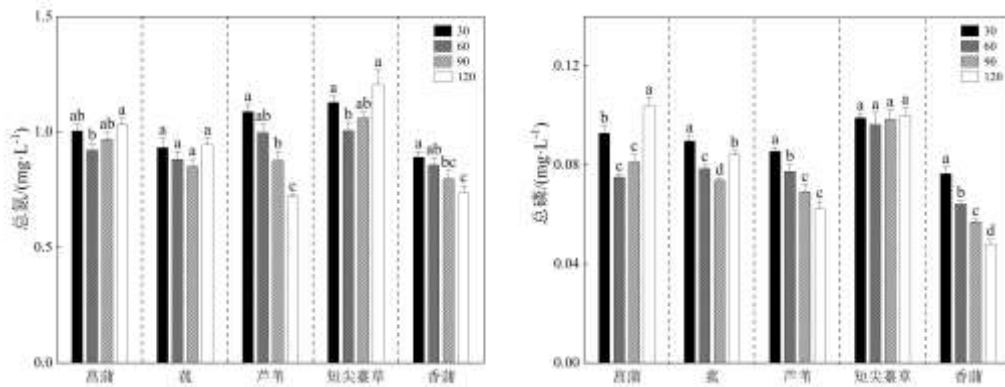


图5 不同淹水时间下各处理组水体总氮和总磷含量的变化

Fig.5 Changes in total nitrogen and total phosphorus contents of water under different flooding durations across treatment groups

在氮、磷去除方面（图 6），不同物种对淹水时间的响应规律为：菖蒲、菰与短尖藁草氮磷去除率随淹水时间增加均呈先上升后下降的变化规律，其中菖蒲与短尖藁草在淹水 60 d 达到峰值，菰在淹水 90 d 达到峰值；相比之下，芦苇与香蒲种植组的氮磷去除率随淹水时间延长呈持续上升趋势。

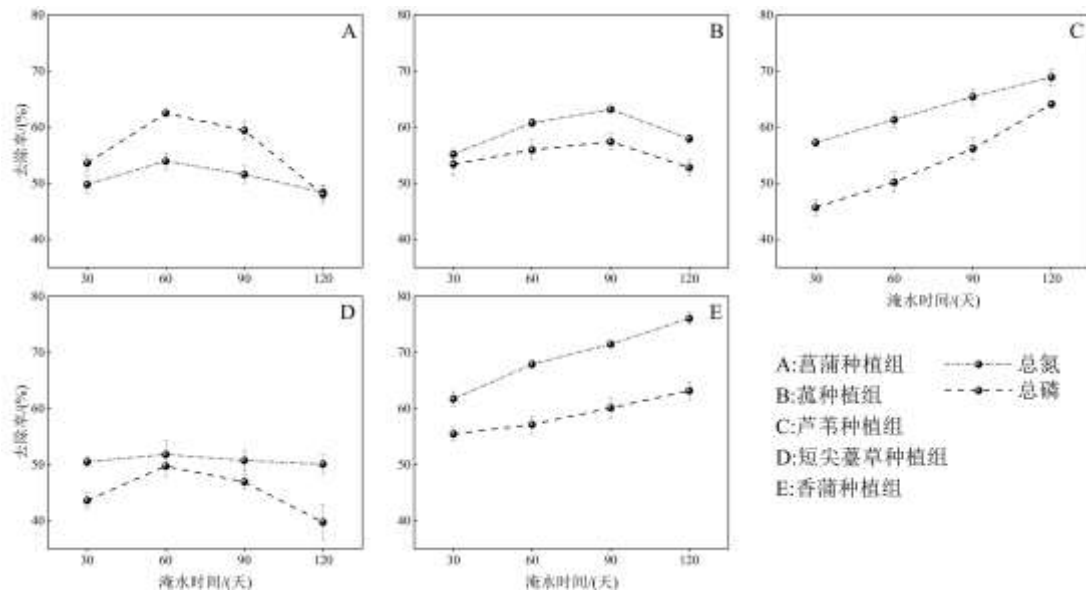


图6 不同淹水时间下各处理组水体总氮、总磷去除率的变化

Fig.6 Changes in total nitrogen and total phosphorus removal rates in water under different flooding durations among treatment groups

3 讨论

3.1 淹水时间对湿地植物生长与形态影响的机制

湿地植物形态指标是对淹水胁迫最直观的反应，不同植物采取不同方式来应对淹水胁迫。已有研究表明部分植物可通过伸长茎叶来“逃离”淹水环境^[24]；此外还可通过减少能量消耗，依赖营养物质储备耐受长时间水淹^[25]。

本研究发现，在 5 种受试植物中，菖蒲生物量随淹水时间延长显著下降，其株高和根长在淹水 120 d 达到最低。这可能是由于在淹水造成的缺氧胁迫下，植物根系活力下降导致水分和营养吸收受阻，同时植物从有氧呼吸转为无氧呼吸，加剧了营养物质的消耗，抑制了光合产物的积累^[24]，最终导致植物叶片黄化萎蔫，最终表现为生物量显著降低。

与菖蒲不同,短尖藁草生物量与根长随淹水时间延长无显著变化,但其株高有小幅降低。这可能是由于短尖藁草通过减少能量消耗,依赖营养物质储备耐受长时间水淹^[25]。短尖藁草的地下根状茎是主要的物质储藏器官,当受淹水胁迫时,地上部物质合成受阻,植物通过提高根状茎生物量分配比以储存物质能量及并调整物质能量^[26-28],使其流向必要的代谢活动,这种资源分配策略被认为是其维持耐受能力的关键机制。芦苇总生物量随淹水时间延长呈下降趋势;菰生物量亦表现相同变化趋势,并在淹水 120 d 时最低,可能与淹水过长超出植株耐受阈值、导致部分植株死亡有关。相较之下,香蒲生物量随淹水时间延长呈上升趋势,在本试验条件下显示出较强的耐淹能力。

同时本研究发现在 5 种受试植物中,菰、芦苇和香蒲株高随淹水时间延长而增长,表明湿地植物可通过加速枝条及叶片的伸长生长,将植物叶片伸出水面重新恢复植物的气体交换来适应淹水环境,这与前人的研究结果一致^[29]。

3.2 不同淹水时间下湿地植物的生理响应及体内氮、磷积累

在淹水胁迫下,植物体内发生一系列生理响应,其核心是氧化损伤与防御系统、光合碳同化能力以及养分吸收与分配之间的动态平衡。淹水胁迫诱导膜脂过氧化反应,导致植物氧化损伤^[30]。其中 MDA 作为该过程的特征性终产物,其积累量可作为评估植物逆境损伤程度的关键指标^[31],含量与受胁迫程度呈显著正相关。此外,在淹水胁迫条件下植物体内多种形态活性氧爆发式生成,同时其清除系统受到抑制,导致活性氧显著累积^[32]。过量活性氧积累会造成植物代谢紊乱、细胞死亡、光合作用速率下降等严重后果^[33-35]。本研究显示,菖蒲淹水 30 d 时 MDA 含量达峰值,表明初期氧化应激剧烈;至 120 d 时 MDA 再度升高,同时抗氧化酶与叶绿素含量均较低,说明其抗氧化合成系统受阻,且光合系统严重受损,无法有效清除活性氧,最终导致代谢崩溃与植株死亡。其体内氮、磷含量持续积累但生物量下降,表明缺氧导致的运输阻滞与能量失衡使其生长严重受限^[36]。

芦苇与菰二者 MDA 含量随淹水时间延长而下降,SOD、CAT 等抗氧化酶含量显著提升,表明 SOD 和 CAT 两种抗氧化酶可通过清除体内有害的超氧阴离子自由基和分解细胞内的过氧化氢,使植物体内活性氧达到平衡,帮助植物抵御逆境^[37]。同时,叶绿素含量持续上升,光合能力增强,为植物生长提供了物质能量基础^[38]。此外芦苇体内磷在后期富集,给植物提供充足养分,与其快速生长对磷的高需求相符^[39];菰的氮、磷含量在后期显著上升,体现了其对养分稳态的较强调节能力^[40]。

本研究发现短尖藁草 MDA 含量随淹水时间增加整体呈下降趋势,可溶性糖和脯氨酸含量呈先增后减的趋势。表明一定淹水时长下,短尖藁草通过积累可溶性糖与脯氨酸等渗透调节物质,维持细胞水分平衡与膜稳定性,应对淹水条件变化^[41]。可溶性糖为植物重要的生长指标是植物生长和繁殖最主要的能量来源,同时也是植物合成其他化合物的原料^[42]。Liang 等^[43]研究表明可溶性糖含量越高,植物在逆境下植物细胞失水的可能性越小,成活的可能性越大,抗性提高。脯氨酸和可溶性糖均是植物在逆境条件下重要的溶质物质,用于维持细胞渗透压和稳定性。短尖藁草叶绿素含量在淹水 120 d 时最低,光合作用与生物量积累受限。同时其在淹水 90 d 与 120 d 时氮、磷含量均处于较高水平,且根长变化不显著而株高显著降低,推测其通过动用根状茎的养分储备以抵御淹水胁迫。总体来看,淹水条件下植物倾向将吸收的养分优先贮存在地下器官,并通过调节分配比例以维持必要代谢活动,该机制是耐受长期淹水的关键^[44]。

长期淹水下,香蒲其 MDA 含量较高,表明仍承受显著氧化损伤;但同时维持较高的抗氧化酶活性与渗透调节物质含量,显示其通过资源重分配,优先保障抗氧化酶和渗透调节物质积累。但叶绿素合成受限表明光合功能部分牺牲,从而保障在淹水逆境中的基本生存能力^[45-47]。这种策略使其在长期淹水逆境中保持了生存竞争力。香蒲氮、磷含量呈先降后升,表明中期存在显著代谢抑制,后期逐步恢复;结合其较高的抗氧化酶活性与渗透调节物质水平以及生物量回升,进一步佐证其作为强耐淹物种的竞争优势^[48]。

本研究中五种植物应对淹水胁迫的差异可归纳为不同的能量权衡与资源分配策略:菖蒲因抗氧化系统崩溃而死亡;短尖藁草采取慢生长、高储备的耐受策略存活;菰、芦苇和香蒲通过生长逃避与高效活性氧清除实现适应。

3.3 不同淹水时间对湿地植物净化功能的影响与生态意义

本研究结果表明,不同湿地植物在氮磷去除过程中对淹水时间的响应规律存在显著差异。总体来看,

芦苇和香蒲处理组的水体氮、磷浓度随淹水时间延长呈持续下降趋势，其去除率也不断升高，表现出较强的长期淹水适应性和稳定的净化功能。相比之下，菖蒲、菰和短尖藁草处理组的氮磷去除率则呈现出先升后降的变化规律，在中期淹水阶段（60-90 d）达到峰值，随后下降，说明其净化作用在一定时间内最为显著，但长期淹水条件下效能下降。这种净化效能差异可能与植物生理特征和耐淹能力有关。芦苇和香蒲均属于典型挺水植物，具有发达的通气组织和根状茎系统，仍能维持根系的氧气供应，从而保证了养分吸收与转运能力^[49]。同时，在长期淹水环境中，二者能够有效提升抗氧化酶活性和渗透调节物质，这使得它们能够维持较大的生物量与发达的根系，为反硝化细菌提供丰富的附着基质，从而促进氮素转化；同时为磷的沉积与固定提供有利条件，因此其净化效果表现出持续增强的趋势^[50]。而菖蒲、菰和短尖藁草对淹水的适应性相对有限，短期或中期淹水植物 MDA 含量较低，且其抗氧化酶和溶质含量相对较高，能使其抵御淹水胁迫，刺激其生长和营养吸收，使净化率达到峰值；但随着淹水时间延长，根系缺氧加剧，其 SOD、可溶性糖和叶绿素含量急速下降，生理活性降低，导致对氮磷的吸收能力减弱，同时部分植株逐渐死亡，死亡组织在分解过程释放氮磷等物质，从而出现后期去除率下降的现象^[51]。已有研究指出，芦苇、香蒲等挺水植物在人工湿地中具有稳定而持久的氮磷去除能力，这与本研究结果相一致^[52]。而部分研究亦表明，菖蒲等植物在长期淹水条件下净化能力下降，这与本研究结论一致^[53]。由此可见，植物对养分去除的效果不仅与物种差异有关，还受到淹水持续时间的显著调控，存在一定的阈值效应，即淹水持续时间对植物养分去除能力的影响并非简单的线性关系。当淹水时间短于某个临界值时，植物可能通过增强代谢、促进生长等方式适应淹水环境，从而维持甚至提升对氮、磷等养分的吸收与转化效率；然而，一旦淹水持续时间超过该临界阈值，胁迫效应将占据主导，导致植物根系缺氧受损、生理功能紊乱、生物量下降甚至死亡，其养分去除能力便会降低甚至丧失。本研究发现对菖蒲及短尖藁草而言在淹水 60-90 d 内对养分的去除率随时间延长而增加或保持稳定；但当淹水时间超过 90 d 时，去除率会出现显著下降的拐点。

4 结论

淹水时间显著影响植物的生长适应策略与污染物去除能力。菖蒲在长期淹水下出现生长受限，表现出典型的养分滞留与运输受阻特征；短尖藁草依赖根状茎储备维持耐淹能力；芦苇、菰和香蒲则通过伸长生长适应水淹，其中香蒲在长期淹水下展现出较强渗透调节能力，具有显著的耐淹优势。在净化功能上，芦苇和香蒲对氮、磷的去除率随淹水时间延长持续上升，表现出稳定的长期净化能力；菖蒲、菰和短尖藁草则在中期淹水阶段净化效果最佳，随后逐渐下降。从湿地生态修复物种选择角度看，芦苇和香蒲能够在持续淹水环境下维持较高的净化效能；而菖蒲、菰和短尖藁草虽在整体净化效率上不及芦苇和香蒲，但对中短期淹水具有一定的生理耐受性。

5 参考文献

- [1] Zhao JG, Liu CQ, Li HB et al. Review on Ecological Response of Aquatic Plants to Balanced Harvesting. *Sustainability*, 2022, 14(19): 12451. DOI:10.3390/SU141912451.
- [2] Verhofstad MJM., Poelen MDM, van Kempen MML et al. Finding the harvesting frequency to maximize nutrient removal in a constructed wetland dominated by submerged aquatic plants. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 423-430. DOI:10.1016/j.ecoleng.2017.06.012.
- [3] Nishu M, Neeraj T, Dhananjay S et al. Toxicological impacts of microplastics on human health: a bibliometric analysis. *Environmental science and pollution research international*, 2023, 31(46): 57417-57429. DOI:10.1007/S11356-023-30801-4.
- [4] Singh T, Awasthi G, Tiwari Y. Recruiting endophytic bacteria of wetland plants to phytoremediate organic pollutants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(09): 9177-9188. DOI:10.1007/S13762-021-03476-Y.
- [5] Kaplan D. Leveraging working wetlands for basin-scale nitrogen removal. *Nature Water*, 2025, 3(08): 848-849. DOI: 10.1038/S44221-025-00472-1.
- [6] Zhao SZ, Liu F, Qiao RX et al. Influence characteristics of rhizosphere exudates of wetland plants on nitrogen mineralization under nitrogen input. *Ecological Science*, 2024, 43(6): 70-76. DOI:10.14108/j.cnki.1008-8873.2024.06.008. [赵士

- 喆, 刘芬, 乔睿萱等. 氮输入下湿地植物根际分泌物对氮矿化过程影响特征. *生态科学*, 2024, 43(6): 70-76.]
- [7] Wang DS, Gan XY, Wang ZQ et al. Research status on remediation of eutrophic water by submerged macrophytes: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 169: 671-684. DOI:10.1016/J.PSEP.2022.11.063.
- [8] Feldman AF, Feng X, Felton AJ et al. Plant responses to changing rainfall frequency and intensity. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5: 276-294. DOI:10.1038/S43017-024-00534-0.
- [9] Cui BS, Cai YZ, Xie T et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: problems and prospects. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(6): 738-746. DOI:10.16360/j.cnki.jbnuns.2016.06.011. [崔保山, 蔡燕子, 谢湉等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 738-746.]
- [10] Volaire F. A unified framework of plant adaptive strategies to drought: Crossing scales and disciplines. *Global Change Biology*, 2018, 24(07): 2929-2938. DOI:10.1111/gcb.14062.
- [11] Zhou WG, Chen F, Meng YJ et al. Plant waterlogging/flooding stress responses: From seed germination to maturation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 148: 228-236. DOI:10.1016/j.plaphy.2020.01.020
- [12] Cao J, Yao XC, Zheng X et al. Simulation Experiment on Physiological and Ecological Characteristics of *Triarrhena lutarioriparia* Seedlings under Different Soil Moisture Contents. *Wetland Science*, 2020, 18(3): 356-361. DOI: 10.13248/j.cn.ki.wetlandsci.2020.03.013 [曹昀, 尧晓晨, 郑祥等. 不同土壤含水量下南荻幼苗的生理生态特征实验研究. *湿地科学*, 2020, 18(3): 356-361.]
- [13] Xue YL, Wang ZH, Cheng G et al. Physiological and Molecular Mechanisms of Plant Submergence Tolerance. *Molecular Plant Breeding*, 2005: 1-9. [薛逸琳, 王紫菡, 程功等. 植物对淹水胁迫的响应及调节机制. *分子植物育种*, 2025: 1-9.]
- [14] Sharma S, Bhatt U, Sharma J et al. Ultrastructure, adaptability, and alleviation mechanisms of photosynthetic apparatus in plants under waterlogging: A review. *Photosynthetica*, 2022, 60(03): 430-444. DOI:10.32615/PS.2022.033.
- [15] Sahana B, Gautam K. Exploring the significant contribution of silicon in regulation of cellular redox homeostasis for conferring stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 166: 393-404. DOI:10.1016/J.PLAPHY.2021.06.005.
- [16] Muhammad L, Muhammad S, Faisal MM et al. Effect of strigolactone on growth, photosynthetic efficiency, antioxidant activity, and osmolytes accumulation in different maize (*Zea mays* L.) hybrids grown under drought stress. *Plant Signaling & Behavior*, 2023, 18(1): 2262795-2262795. DOI:10.1080/15592324.2023.2262795.
- [17] Zhang C, Chen WB, Huang FF. Effects of grassland connectivity on plant diversity in Poyang Lake. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(01): 259-278. DOI:CNKI:SUN:DLXB.0.2024-01-016. [张成, 陈文波, 黄芳芳. 鄱阳湖草洲景观连通性对植物多样性的影响. *地理学报*, 2024, 79(01): 259-278.]
- [18] Ge PY, Yang TW, Zhang P et al. Ecological Restoration Project for Yancheng Coastal Wetland Based on Bird Habitat Demand: A Case Study of Chenjiagang Reservoir. *Wetland Science & Management*, 2021, 17(04): 33-36. DOI:CNKI:SUN:LKGL.0.2021-04-007. [戈萍燕, 杨棠武, 张鹏等. 基于鸟类栖息需求的盐城滨海湿地生态修复工程: 以陈家港水库生态修复工程为例. *湿地科学与管理*, 2021, 17(04): 33-36.]
- [19] Li K, Xie YJ, Sun W et al. Spatial response of lake water quality to multi-scale landscape pattern of lakeside zone in agricultural watershed. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 10. DOI:10.13287/j.1001-9332.202006.036. [李昆, 谢玉静, 孙伟等. 农业主产区湖泊水质对湖滨带多尺度景观格局的空间响应. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 10.]
- [20] Zhu GW, Xu H, Zhu MY et al. Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1510-1524. DOI:10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. *湖泊科学*, 2019, 31(6): 1510-1524.]
- [21] Jiang H, Li HX, Xu Y et al. Hydrological Characteristics and Trends of Dongting Lake over the Last 20 Years. *Journal of Hydroecology*, 2025, 46(01): 213-224. DOI:10.15928/j.1674-3075.202409230001. [姜恒, 李洪翔, 徐悦等. 洞庭湖近 20 年水文情势特征及变化趋势. *水生态学杂志*, 2025, 46(01): 213-224.]
- [22] Hu JY, Xie YH, Li F et al. Characteristics of *Carex brevicuspis* and its impact factors in Dingzidi, East Dongting Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(03): 745-751. DOI:10.13287/j.1001-9332.2013.0027. [胡佳宇, 谢永宏, 李峰等. 东洞庭湖丁字堤苔草群落特征及其影响因子. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 745-751.]

- [23] Liu YZ, Jiang CB, Long YN et al. Study on the Water Level–Discharge Relationship Changes in Dongting Lake Outlet Section over 70 Years and the Impact of Yangtze River Backwater Effect. *Water*. 2023, 15(11): 2057. DOI:10.3390/w15112057
- [24] Jing S, Zhang X, Niu H et al. Differential Growth Responses of *Alternanthera philoxeroides* as Affected by Submergence Depths. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13(000): 13. DOI:10.3389/FPLS.2022.883800.
- [25] Wang HF, Zeng B, Qiao P et al. Survival and growth response of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus* and *Alternanthera philoxeroides* to long-term submergence. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(06): 2571-2580. DOI:CNKI:SUN:STXB.0.2008-06-020. [王海锋, 曾波, 乔普等. 长期水淹条件下香根草(*Vetiveria zizanioides*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)的存活及生长响应. 生态学报, 2008(06): 2571-2580.]
- [26] Renziehausen T, Frings S, Schmidt-Schippers R. 'Against all floods': plant adaptation to flooding stress and combined abiotic stresses. *Plant Journal*, 2024, 117(06): 1836-1855. DOI:10.1111/TPJ.16614.
- [27] Pan BH, Zou Y, Deng ZM et al. Clonal growth adaptation of *Carex brevicuspis* to sediment deposition in Lake Dongting wetland. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(5): 1470-1479. DOI:10.18307/2024.0533. [潘柏含, 邹雅, 邓正苗等. 洞庭湖湿地短尖藨草(*Carex brevicuspis*)种群克隆生长对泥沙淤积的适应. 湖泊科学, 2024, 36(5): 1470-1479.]
- [28] Du YH, Ding XH, Zhou QQ et al. Effects of water level changes on growth of *Miscanthus lutarioriparius* seedlings. *Ecological Science*, 2023, 42(06): 156-163. DOI:10.14108/j.cnki.1008-8873.2023.06.016. [杜雨航, 丁小慧, 周巧巧等. 水位变化对南荻幼苗生长的影响. 生态科学, 2023, 42(6): 156-163.]
- [29] Voesenek LACJ, Colmer TD, Pierik R et al. How plants cope with complete submergence. *New Phytologist*, 2006, 170(02): 213-226.
- [30] Guo W, Dong ZW, Li GY et al. Seasonal changes of physiological and biochemical characteristics of four shrub species in Chaiwopu Lakeshore desert area of Xinjiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(05): 1350-1360. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202505.005. [郭伟, 董正武, 李光莹等. 新疆柴窝堡湖滨荒漠区 4 种灌木生理生化特性的季节变化. 应用生态学报, 2025, 36(05): 1350-1360.]
- [31] Yang L, Zhao P, Song X et al. Molecular and Physiological Responses of *Toona ciliata* to Simulated Drought Stress. *Horticulturae*. 2024, 10(10): 1029. DOI:10.3390/HORTICULTURAE10101029.
- [32] Guo WJ, Yan TY, Wang ZK et al. Research advances in using seaweed fertilizers to mitigate plant water stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(03): 950-968. DOI:10.13287/j.1001-9332.202503.036. [郭文靖, 严腾宇, 王宗抗等. 利用海藻肥缓解植物水分胁迫研究进展. 应用生态学报, 2025, 36(3): 950-968.]
- [33] Ding HG, Du SY, Jia HW et al. Composition of bacterial communities in mangrove sediments at different depths. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(7): 2223-2229. DOI:10.13287/j.1001-9332.202507.011. [丁宏广, 杜思懿, 贾瀚文等. 红树林不同深度沉积物的细菌群落组成. 应用生态学报, 2025, 36(7): 2223-2229.]
- [34] Zhang L, Wang L, Fang YC et al. Phosphorylated transcription factor *PuHB40* mediates ROS-dependent anthocyanin biosynthesis in pear exposed to high light. *The Plant Cell*, 2024, 36(09): 3562-3582. DOI:10.1093/PLCELL/KOAE167.
- [35] Liu XL, Ji P, Liao JP et al. CRISPR/Cas knockout of the NADPH oxidase gene *OsRbohB* reduces ROS overaccumulation and enhances heat stress tolerance in rice. *Plant Biotechnology Journal*, 2025, 23(2): 336-351. DOI:10.1111/PBI.14500.
- [36] Pan J, Wang L, Huang CH et al. Review on effects of salt stress on plant energy metabolism processes in arid regions. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(1): 111-118. DOI:CNKI:SUN:ZGSS.0.2024-01-012. [潘晶, 王磊, 黄翠华等. 盐胁迫对干旱区植物能量代谢过程的影响综述. 中国沙漠, 2024, 44(1): 111-118.]
- [37] Xu XD, Sun Y, Sun B et al. Effects of exogenous melatonin on active oxygen metabolism of cucumber seedlings under high temperature stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010(5): 6. DOI:10.13287/j.1001-9332.2010.0183. [徐向东, 孙艳, 孙波等. 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗活性氧代谢的影响. 应用生态学报, 2010(5): 6.]
- [38] Feng XK, Ma YM, Liang Q et al. Deletion of *GhSCY2D* Causes Impaired Chloroplast Development and Temperature-Dependent Leaf Yellowing in Cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant Cell and Environment*, 2025, 48(07): 4902-4917. DOI:10.1111/PCE.15476.
- [39] Wang JQ, Song YZ. Review on the formation mechanism of *Potamogeton crispus* turion. *Wetland Science*, 2025, 23(02):

- 405-414. DOI:10.13248/j.cnki.wetlandsci.20240025. [王锦旗, 宋玉芝. 菹草 (*Potamogeton crispus*) 石芽形成机制研究进展. 湿地科学, 2025, 23(02): 405-414.]
- [40] Lambers H. Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2021, 73: 17-42. DOI:10.1146/ANNUREV-ARPLANT-102720-125738.
- [41] Song YY, Zhang Q, Jiang SY et al. Groundwater depth and its relation with typical vegetation distribution in the Poyang Lake wetland, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(01): 123-133. DOI:10.13287/j.1001-9332.202101.018. [宋炎炎, 张奇, 姜三元等. 鄱阳湖湿地地下水埋深及其与典型植被群落分布的关系. 应用生态学报, 2021, 32(01): 123-133.]
- [42] Li YN, Zhang SZ, Zhang TZ et al. Effects of drought-high calcium on non-structural carbohydrate contents of *Quercus acutissima*. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7): 8. [李亚楠, 张淞著, 张藤子等. 干旱—高钙对麻栎幼苗非结构性碳水化合物含量和分配的影响. 生态学报, 2020, 40(7): 8.]
- [43] Liang GP, Wang H, Gou HM et al. Overexpression of *VaBAM3* from *Vitis amurensis* enhances seedling cold tolerance by promoting soluble sugar accumulation and reactive oxygen scavenging. *Plant Cell Reports*, 2024, 43(05): 151. DOI:10.1-007/S00299-024-03236-5.
- [44] Schulz K, Timmermann T, Steffenhagen P et al. The effect of flooding on carbon and nutrient standing stocks of helophyte biomass in rewetted fens. *Hydrobiologia*, 2011, 674(01): 25-40. DOI:10.1007/s10750-011-0782-5.
- [45] Sun S, Zhang XJ, Liu JP et al. Synergistic effects of shade and drought on the physiological metabolism and resistance system of *Arthraxon hispidus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(05): 1770-1779. [孙帅, 张小晶, 刘金平等. 遮阴和干旱对荩草生理代谢及抗性系统影响的协同作用. 生态学报, 2018, 38(05): 1770-1779.]
- [46] Hu XY, Jin J, Lan YY et al. Response of Six Emergent Plants to Water Level Stress. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(03): 49-57. DOI:10.15928/j.1674-3075.2019.03.007. [胡茜靛, 金晶, 兰燕月等. 6种挺水植物对水位梯度的响应研究. 水生生态学杂志, 2019, 40(03): 49-57.]
- [47] Zhao SW, Hua JM, Pan YN et al. Research advances in the regulatory mechanisms of root apoplast on mineral nutrition of plants. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(6): 1923-1932. DOI:10.13287/j.1001-9332.202506.009. [赵文书, 化佳敏, 潘一诺等. 根系质外体对植物矿质营养元素调控机理的研究进展. 应用生态学报, 2025, 36(6): 1923-1932.]
- [48] Chatterjee Y, Tomar S, Mishra M et al. *OsLdh7* Overexpression in Rice Confers Submergence Tolerance by Regulating Key Metabolic Pathways: Anaerobic Glycolysis, Ethanol Fermentation and Amino Acid Metabolism. *Plant Cell and Environment*, 2025, 48(04): 2804-2820. DOI:10.1111/PCE.15358.
- [49] Zhang WL, Zhang SH, Zhang JJ. Stormwater quantity and quality control performance of bioretention systems: A literature review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(1): 264-276. DOI:10.13287/j.1001-9332.202301.028. [张文龙, 张守红, 张建军. 生物滞留系统径流与水质调控效应研究进展. 应用生态学报, 2023, 34(1): 264-276.]
- [50] Zhang SW, Huang SX, Xie HJ et al. Heightened threat of aged microplastics in constructed wetlands: impacts on nitrogen cycles and greenhouse gas emissions. *Water Research*, 2025, 288(A): 124660. DOI:10.1016/J.WATRES.2025.124660.
- [51] Zheng XL, Wang RJ, Zhao QF et al. Ecophysiological mechanisms of plant growth under the influence of rhizosphere oxygen concentration: A review. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(7): 10. DOI:CNKI:SUN:ZWSB.0.2017-07-011. [郑小兰, 王瑞娇, 赵群法等. 根际氧含量影响植物生长的生理生态机制研究进展. 植物生态学报, 2017, 41(7): 10.]
- [52] Pang QZ, Guo JC, Wei C et al. Migration Regularity and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by Four Different Wetland Plants. *Journal of Northwest Forest University*, 2019, 34(6): 6. [庞庆庄, 郭建超, 魏超等. 4种湿地植物对污水中氮磷的去除效能及其迁移规律. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 6.]
- [53] Cao J, Wang GX, Liu Y. Effects of flooding on germination and seedlings growth of Sweet Flag (*Acorus calamus L.*). *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(5): 8. DOI:10.18307/2007.0513 [曹昀, 王国祥, 刘玉. 淹水对菖蒲萌发及幼苗生长的影响. 湖泊科学, 2007, 19(5): 8.]