

马帅兵, 吕亚兵, 姜鸣晨, 等. 自然光照条件下苦草生长及去除氮磷能力研究[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(2): 47-55.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.006

自然光照条件下苦草生长及去除氮磷能力研究

马帅兵¹, 吕亚兵¹, 姜鸣晨¹, 林深¹, 何东¹,
徐聚臣¹, 侯杰^{1,2}, 何绪刚^{1,2}, 李迎春³

1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070;
2. 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 武汉 430070;
3. 麻城市农业科学研究所, 黄冈 438300

摘要 为探究苦草型清水态养殖水深的适宜控制范围, 依据池塘中苦草自然分布水深, 设置全日光光强的5%(L1)、15%(L2)、25%(L3)和35%(L4)4个光强梯度组(L1为适宜光强组, L2、L3和L4为强光组), 对应池塘水下深度分别为1.0~1.1、0.6~0.8、0.4~0.6和0.3~0.4倍透明度, 研究自然光照周期和强度下苦草(*Vallisneria natans*)的生长、抗氧化和净化能力。结果显示: 自然光照周期下, 苦草总生物量随光照强度增强(5%~35%全日光范围)而显著增加, 叶片长度最大值出现在L2组; L2、L3和L4组丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性均显著低于L1组; 水中溶解氧(DO)含量和pH值L3和L4组显著高于L1组, 而叶绿素a(Chl a)含量相反; 各组铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)质量浓度分别在3、2周内快速下降到较低水平(分别 <0.30 、 <0.02 mg/L); 除L1组外, 其他组硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总氮(TN)质量浓度随时间以不同速率持续下降, 直至试验结束(分别 <2.50 、 <3.00 mg/L), 一定程度与光照强度呈负相关; L3和L4组谷氨酰胺合成酶(Fd-GOGAT)和碱性磷酸酶(AKP)活性显著高于L1和L2组; 各组对正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和总磷(TP)去除率均达80%以上, 表现出较好的去除效果。结果表明, 苦草型清水态养殖水位宜控制在苦草上方约0.3~0.6倍透明度范围内。

关键词 光照强度; 苦草; 生长状况; 水体氮磷; 净化能力; 草型池塘

中图分类号 S964.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0047-09

近年来, 针对传统池塘养殖废弃物过度积累、水体有毒氮素超标严重、养殖效率和效益不高等问题^[1-2], 涌现出了一系列新型分区养殖模式, 如池塘“零排放”圈养^[3]、集装箱式循环水养殖^[4]和流水槽循环水养殖^[5]等模式, 即在养殖区集中饲喂, 在净化区采用增氧、生物膜技术等手段来提升水体自净能力。其中, 净化区水体质量直接关乎新型养殖模式的成败。净化区水体通常有“藻”“草”型2种水体可供选择。草型清水态水体具有不“倒藻”、溶氧更均匀丰富、氨氮及亚硝态氮等有毒氮素浓度更低、水质更稳定等^[6-7]诸多“藻”型水体所无法比拟的优点, 因而在新型分区养殖池塘构建“草”型水体技术倍受关注。

苦草(*Vallisneria natans*)为多年生无茎沉水植物, 有耐候好、寿命长、植株高和根系泌氧等优点^[8],

具有防止底泥再悬浮、吸收氮磷等营养盐、维持水生生态系统稳定等多重生态功能^[7,9]。而且, 由于苦草喜荫, 不会长出水面, 苦草型水体更加清洁、管理简便, 成为草型清水态水体营造的首选植物。目前, 针对苦草生长及水质净化能力的环境影响因子, 如光照^[10]、水深^[11]、氮磷浓度^[12]等已有相关研究, 但均集中在湖泊; 关于池塘水体苦草适宜种植水深及其生长与净化能力等鲜有报道。相较于湖泊, 池塘水体更浅, 晴好天气时, 一天内相当长时段池塘中上层水体光照强度均远高于苦草光饱和点 $[200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ^[13], 这是否会对苦草生长和净化能力造成不良影响尚不清楚。因此, 有必要研究和分析自然光照条件下苦草的生长及其氮磷去除能力, 以期对苦草型养殖水体构建和管理等提供理论依据。

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2022BBA0058); 中央高校基本科研业务费专项(2662023SCP004)

马帅兵, E-mail: shuaibingma@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 何绪刚, E-mail: xgh@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验材料

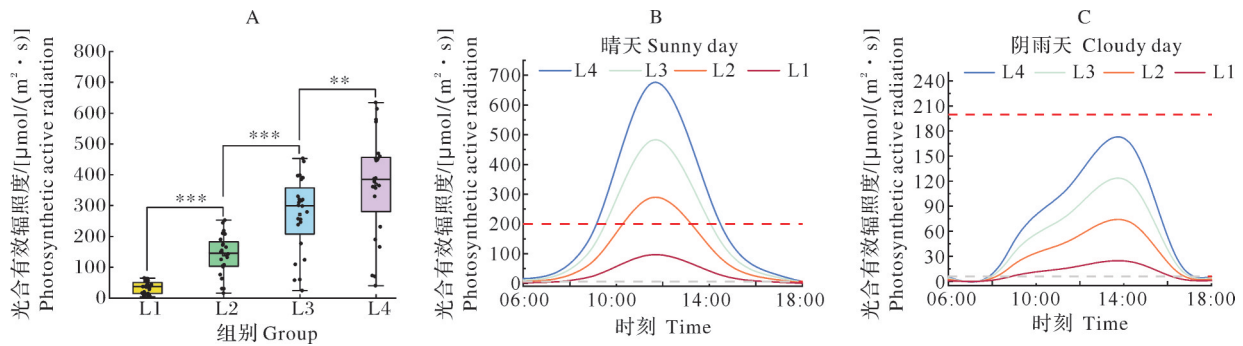
试验所用苦草采自湖北武汉周边池塘,选取大小一致、健康的苦草植株洗干净之后备用。水和沉积物采自华中农业大学水产学院养殖教学实践基地集约化养殖池塘。从池塘采集的水直接用作试验用水[总氮质量浓度(6.08 ± 0.43) mg/L,总磷质量浓度(0.40 ± 0.05) mg/L],而沉积物经自然风干,去除大颗粒杂质及动植物残体,研磨过孔径0.15 mm筛后,充分混匀用作试验底泥[总氮含量(244.60 ± 30.12) mg/kg,总磷含量(474.52 ± 52.70) mg/kg]。

1.2 试验设计

依据池塘中苦草自然分布水深,确定试验光照强度范围为全日光强度的5%~35%。按等间距分布原则,设定4个试验光照梯度组:全日光强度的5%(L1)、15%(L2)、25%(L3)和35%(L4)(图1A),各组3个平行。据苦草型圈养池塘(透明度为160 cm)

实测发现,L1、L2、L3和L4组光照强度对应的水下深度分别为1.0~1.1、0.6~0.8、0.4~0.6和0.3~0.4倍透明度。自然光周期下,晴天和阴雨天白天时段L1组光照强度均基本处于苦草光补偿点和饱和点之间(图1B、C),可视为适宜光强组,其他试验组可视为强光组(L2、L3及L4组晴好天气时白天较长时段均不同程度高于苦草光饱和点,图1B)。

试验于2022年9—11月间在华中农业大学水产学院教学实践基地室外模拟进行。试验装置如图2所示。在12个聚乙烯塑料桶底部铺设预先混匀的底泥(高约10 cm),注入试验用水(高约55 cm),按60株/m²的密度种植健康苦草[单株鲜质量(2.42 ± 0.08) g,叶长(21.32 ± 0.70) cm]。将多层黑色尼龙网盖在桶口上方以实现设定的试验光照强度,塑料桶侧面用黑色塑料薄膜包裹以阻挡侧光。试验期间,每周用蒸馏水补足桶中因取样或蒸发减少的水分,自然光照周期下培养49 d。



A. 试验期间上午10:00平均光照强度; B. 2022年9月4日白天光照强度; C. 2022年9月1日白天光照强度。红色虚线表示苦草光饱和点,灰色虚线表示苦草光补偿点(该数据来自文献[13])。A. Average light intensity at 10:00 am during the experiment; B. Daytime light intensity on September 4, 2022; C. Daytime light intensity on September 1, 2022. The red dotted line represents the light saturation point of *Vallisneria natans*, and the gray dotted line represents the light compensation point of *Vallisneria natans* (The data are from reference [13]). **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$.

图1 光照强度的变化

Fig.1 Changes in light intensity

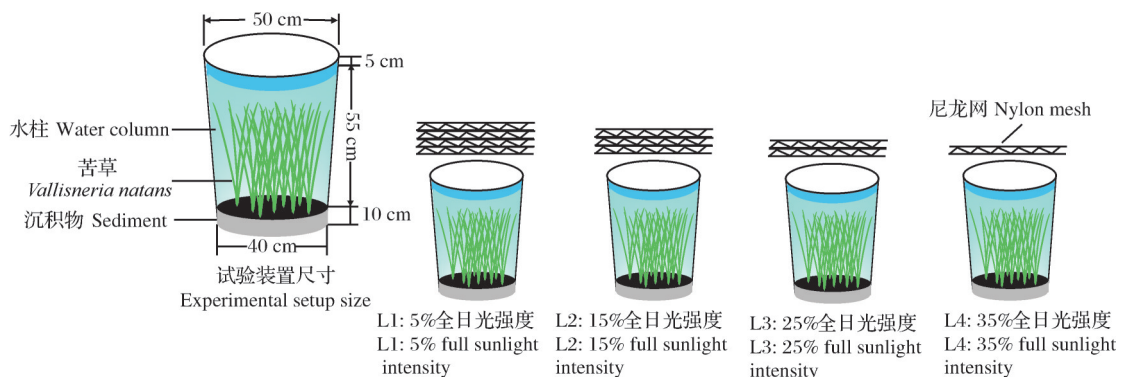


图2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic of experimental apparatus

1.3 监测和采样分析

试验期间,每周监测2次水下光合有效辐射度(photosynthetic active radiation, PAR)、水温(water temperature, WT)、溶解氧(dissolve oxygen, DO)和pH值等指标,每周测定1次水体三态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)和叶绿素a(Chl a)等指标。监测和采样均在上午10:00进行。试验结束时,将试验装置内的水、泥和植物全部取出,苦草剥离底泥后用少量去离子水洗净并测量其生物量,然后保存于4℃冰箱,以测定生理指标。

使用水下光合辐照计(SM206,中国)测定每个试验桶水层下方10 cm左右处PAR,使用YSI多参数水质监测仪测定WT、DO及pH值。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TN、TP和Chl a测定方法参考国家标准《水和废水监测分析方法》^[14]。

1.4 苦草生长生理指标测定

使用直尺和电子天平测定苦草平均总生物量和叶片长度。苦草叶片内丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、谷氨酸合成酶(Fd-GOGAT)活性、谷氨酰胺合成酶(GS)活性和碱性磷酸酶(AKP)活性测定采用中国南京建成生物工程研究所和格锐思生物科技有限公司的检测试剂盒,操作步骤详见试剂盒说明书。

利用公式(1)、(2)分别计算各组苦草生物量平均总积累量和叶片长度平均增长量:

$$T_0 = T_{\text{end}} - T_{\text{initial}} \quad (1)$$

式(1)中: T_0 为试验期间各组苦草生物量平均总积累量, g/m^2 ; T_{end} 为试验结束时各组苦草平均总生

物量, g/m^2 ; T_{initial} 为试验开始时各组苦草平均总生物量, g/m^2 。

$$L_0 = L_{\text{end}} - L_{\text{initial}} \quad (2)$$

式(2)中: L_0 为试验期间各组苦草叶片长度平均增长量,cm; L_{end} 为试验结束时各组苦草平均叶片长度,cm; L_{initial} 为试验开始时各组苦草平均叶片长度,cm。

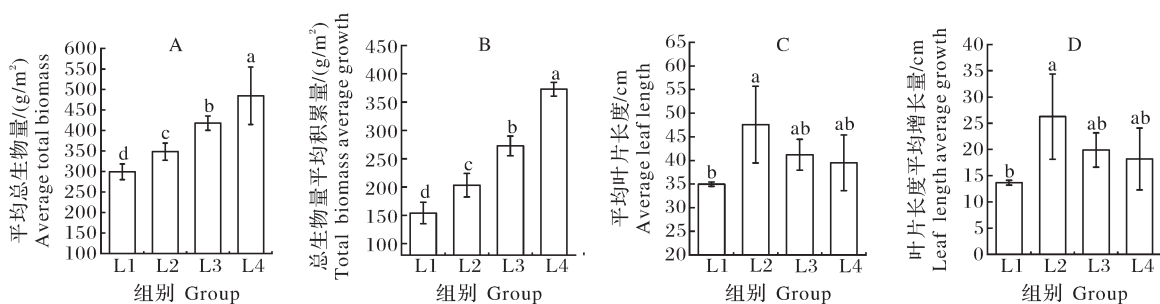
1.5 数据处理与统计分析

试验数据均表示为平均值±标准差(Mean±SD),使用SPSS26.0软件进行t检验和单因素方差分析(One way-ANOVA),采用Duncan's多重检验以确定差异显著性,最后使用Origin 2022软件进行绘图。 $P<0.05$ 表示有显著差异; $P<0.01$ 表示有极显著差异。

2 结果与分析

2.1 苦草生长指标

测定结果显示,各试验组苦草平均总生物量和生物量平均总积累量与光照强度均呈显著正相关关系($P<0.05$),L4组平均总生物量及总积累量达最高[分别为(484.66 ± 69.86) g/m^2 和(372.80 ± 12.17) g/m^2](图3A、B)。表明自然光照条件下,5%~35%范围内的全日光光强不会给苦草生长带来负面影响,光照越强,苦草生长量越大,进而光合产氧量随之越多。与生长量不同,苦草叶片平均长度和平均长度增长量的最大值[分别为(47.58 ± 8.13) cm和(26.26 ± 8.13) cm]均出现在L2组(图3C、D),表明光照强度适度增加有利于苦草叶片生长,但过强光照反而会抑制苦草叶片向上生长。



字母不同表示组间存在显著性差异($P<0.05$);下同。Values with the same letters shows no significantly different ($P<0.05$); the same as below.

图3 苦草生物量(A、B)和叶片长度(C、D)的变化

Fig.3 Changes in biomass(A, B) and leaf length(C, D) of *Vallisneria natans*

2.2 苦草生理指标

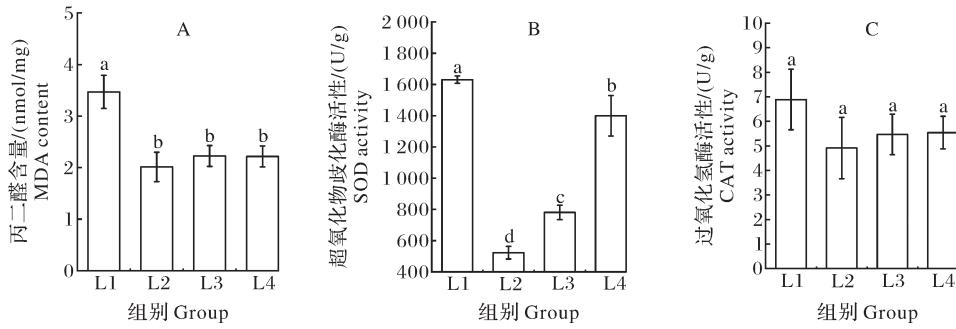
由图4可见,L2、L3和L4较高光强组MDA含量和SOD活性均显著低于适宜光强组(L1组)($P<$

0.05),而CAT活性与L1组差异未达显著水平($P>0.05$),但变化趋势与MDA和SOD一致。表明,弱光条件下苦草产生的脂质过氧化产物更多,并通过升

高SOD和CAT活性来减少机体的脂质过氧化损伤;而强光条件下,苦草体内产生的脂质过氧化物较少,因而氧化损伤程度较低。因此,自然光周期下,一定强度的强光(15%~35%的全日光光强)不会引起苦草氧化应激。

由图5可见,较强光强组(L3、L4组)Fd-GO-

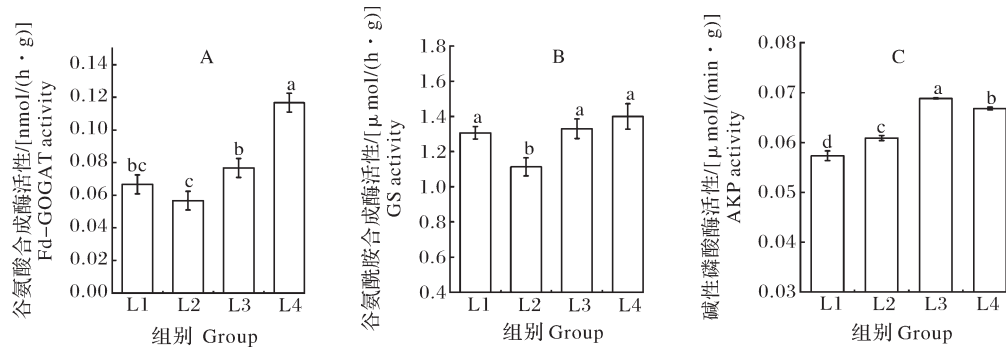
GAT和AKP活性显著高于相对较弱光强组(L1、L2组)($P<0.05$);GS活性最低出现在L2组,而其他各组间差异不显著($P>0.05$)。结果表明,自然光周期下,相比适宜光强条件,较高光强(25%~35%的全日光光强)更有利于提高苦草吸收利用水体无机氮、磷能力。



A: 丙二醛含量 MDA content; B: 超氧化物歧化酶活性 SOD activity; C: 过氧化氢酶活性 CAT activity.

图4 苦草抗氧化指标变化

Fig.4 Changes in antioxidant indicators of *Vallisneria natans*



A: 谷氨酸合成酶活性 Fd-GOGAT activity; B: 谷氨酰胺合成酶活性 GS activity; C: 碱性磷酸酶活性 AKP activity.

图5 苦草氮磷代谢指标变化

Fig.5 Changes in nitrogen and phosphorus metabolism indicators of *Vallisneria natans*

2.3 水环境特征

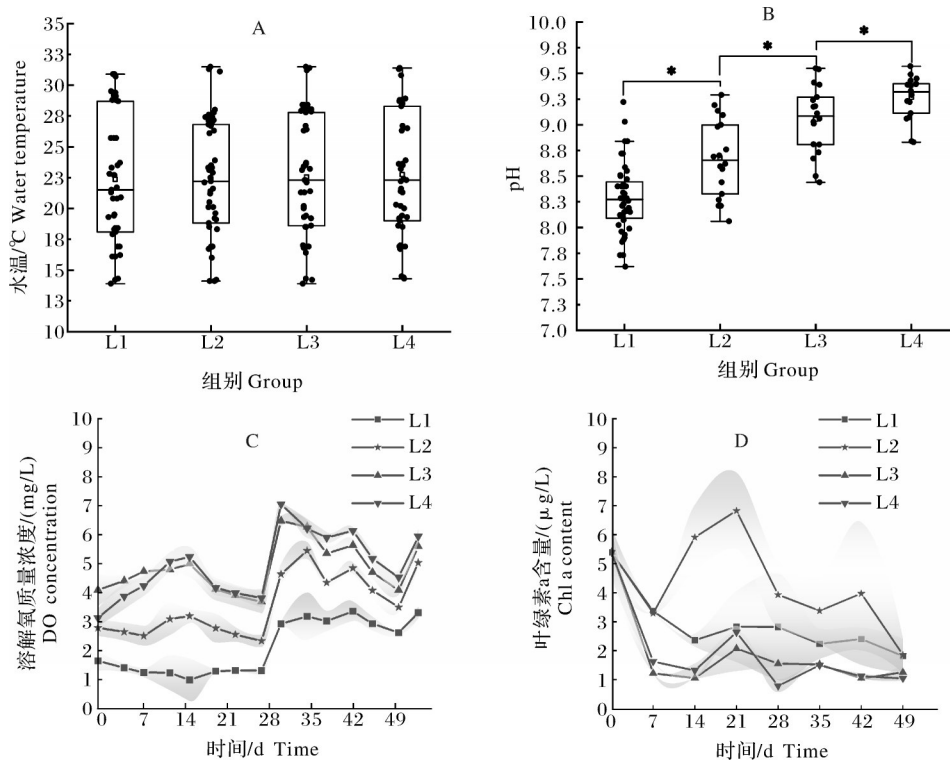
试验期间,各组间WT无显著差异($P>0.05$),均值为22.5℃(变化范围为13.9~31.5℃)(图6A);随光照强度增强,pH值和DO质量浓度显著增加,且较强光照组(L3和L4组)DO质量浓度持续维持的水平最高(>8 mg/L)(图6B、C)。表明,自然光周期条件下,适当提高光照强度有利于苦草光合作用强度。

试验开始第1周,苦草处于快速生长期,各组Chl a质量浓度快速下降;7~21 d,L2组Chl a质量浓度出现快速反弹,于21 d时达到最高点[(6.90±1.32) μg/L],之后持续下降,至49 d时降至最低点[(1.88±0.57) μg/L];7~49 d,其他试验组Chl a质量浓度在较低水平波动;各组49 d时的Chl a质量浓度均显著低于试验初始浓度($P<0.05$)(图6D)。结

果表明,自然光周期下,5%~15%全日光光强条件会使苦草生长量相对减少,进而减弱了苦草对藻类的化感作用;适当提高光照强度(全日光光强的25%~35%)不仅有利于苦草生物量增加,而且能减少水体藻类含量,提高水体透明度。

2.4 苦草对水体氮、磷去除效果

试验前3周,各组 NH_4^+ -N质量浓度急剧下降至低水平(<0.30 mg/L);试验前2周各组 NO_2^- -N、 PO_4^{3-} -P和TP质量浓度急剧下降至低水平(分别为 <0.02 、 <0.01 、 <0.15 mg/L);除L1组外,其余试验组 NO_3^- -N、TN质量浓度随时间持续下降,直至试验末期达最低水平(分别为 <2.50 、 <3.00 mg/L); NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TN、 PO_4^{3-} -P和TP质量浓度均表现出一定程度的光强负相关性,即光照强度越强,浓度越低(图7A~F)。



A: 水温 WT; B: 酸碱度 pH; C: 溶解氧质量浓度 DO concentration; D: 叶绿素 a 含量 Chl a content. 阴影区域代表试验误差。Shaded area represents experimental error. *: $P < 0.05$.

图6 水环境因子变化

Fig.6 Changes in water environmental factors

试验结束时, 强光组(L2、L3 和 L4 试验组) NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 TN 去除率显著高于 L1 适宜光照组 ($P < 0.05$), 且与光照强度呈正相关, L4 组去除率达最高; 而 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 和 TP 去除率在强光组与 L1 组间无显著差异 ($P > 0.05$), 但均达到较高水平, 分别为 $>70\%$ 、 $>80\%$ 、 $>80\%$ (图 7G、H)。上述结果表明, 自然光周期下, 苦草生长快速消耗了氮、磷营养元素, 且较强光照 (全日光光强的 25%~35%) 条件更有利于苦草对水体氮磷的吸收。

3 讨论

3.1 光照强度对苦草生长的影响

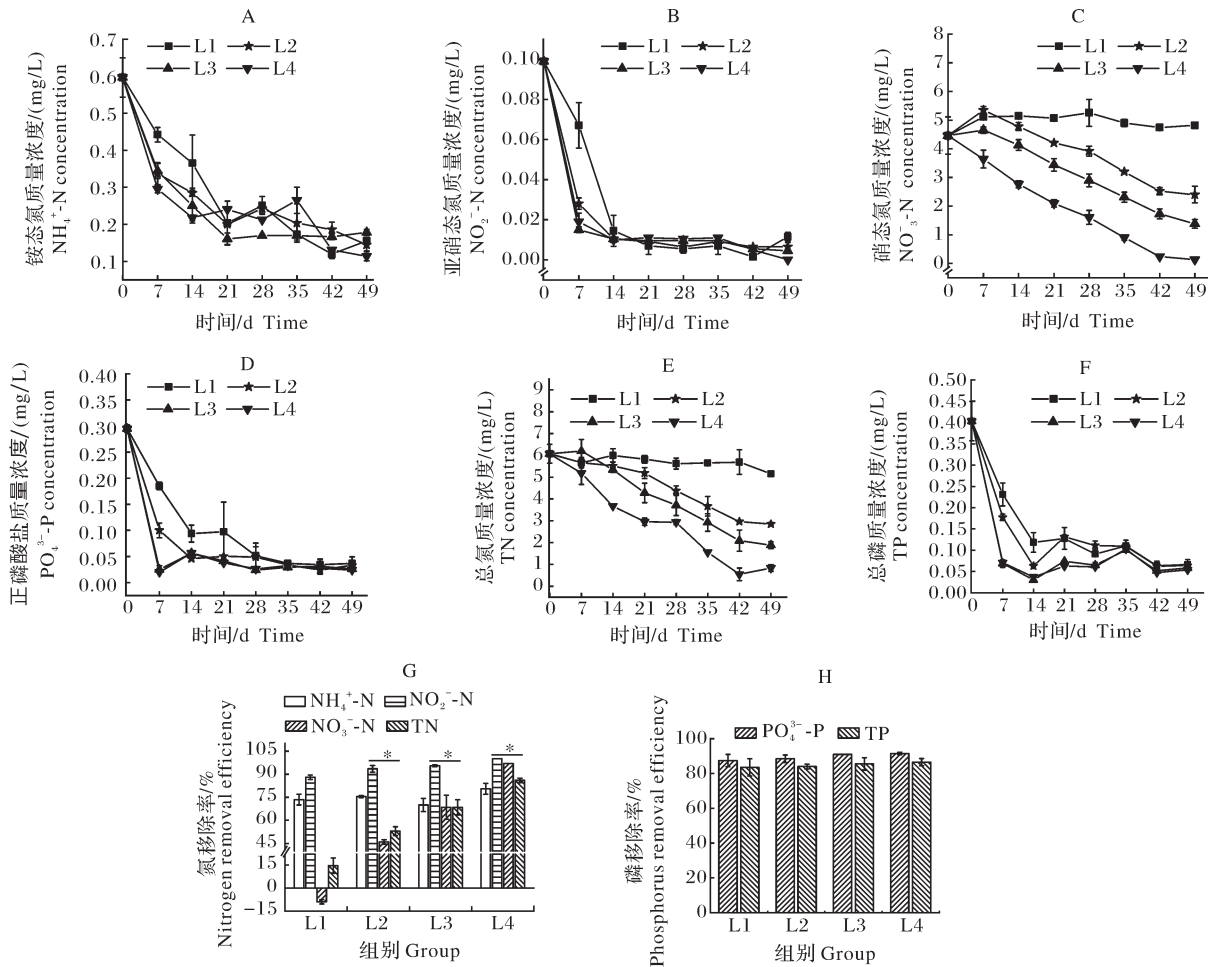
光照及其可利用性是影响植物生长的重要因素, 能够显著影响苦草形态和生物量的分配策略^[15]。自然光周期下, 通过调控水深满足苦草适宜生长所需光照强度, 是成功构建草型清水态养殖水体的关键。已有研究表明, 过强或过弱的光照强度均会对苦草生长造成不利影响^[16], 而苦草会在生长和繁殖之间进行权衡^[17], 采取不同的生长策略^[18-19]。光照强度不足时, 苦草叶片向水面伸长以适应弱光条件, 而高光照强度则抑制其叶片长度的伸长, 同时刺激

无性繁殖增加总生物量, 这是水生植物应对恶劣环境的常见策略^[20]。本研究结果与上述研究结论一致, 即自然光周期下, 较高光强条件 (全日光的 25%~35%) 会抑制苦草叶片向上生长, 但同时刺激无性繁殖促使总生物量显著增加, 而苦草总生物量的增加在一定程度上也反映出苦草对水体中有害氮素的吸收能力增强^[21-22]。

本研究中, 自然光周期条件下, 强光照 (全日光的 15%~35%) 能使苦草体内产生的脂质过氧化产物降低, 减少氧化应激反应。弱光条件下苦草虽能维持生长, 但复杂的生存环境往往使它需要额外的光合产物来抵御风险, 一般需要 10%~20% 的表面辐照度完成其生活史^[23]; 同时, 苦草生长过程会表现出更大的易感性^[24-25], 外界环境压力会引起苦草细胞内活性氧的产生和积累, 诱导相关酶系统活性增强^[10]。因此, 自然光周期下, 保持苦草型清水态养殖水体中苦草叶片顶端光照达到全日光光强的 15%~35%, 将有利于苦草生长, 减少氧化应激反应^[11]。

3.2 光照强度对苦草净化能力的影响

试验开始 2~3 周后, 各组水体中 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 质量浓度均快速下降到较低水平 (分别 <



表示强光试验组与L1组各项指标差异显著, $P < 0.05$ 。 represents significant difference in indicators between the strong light experimental group and L1 group, $P < 0.05$.

图7 不同光照强度条件下的水体铵态氮(A)、亚硝态氮(B)、硝态氮(C)、正磷酸盐(D)、总氮(E)、总磷(F)质量浓度和氮磷去除率(G、H)

Fig.7 Ammonium nitrogen (A), nitrite nitrogen (B), nitrate nitrogen (C), orthophosphate (D), total nitrogen (E), total phosphorus (F) concentrations and nitrogen and phosphorus removal rates (G, H) in water to different light intensity condition

0.30、 < 0.02 mg/L),且一定程度与光照强度成反比,表明苦草型水体能够快速降低有毒氮素浓度,且随光照强度(全日光的5%~35%范围内)升高去除效果更佳。主要缘于苦草生物量与光照强度呈正相关,且苦草生长期会优先吸收水体中氨氮,硝酸盐次之^[21]。因此,随光照强度增加, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度下降速度会加快。此外,草型清水态水体中苦草光合作用产生的氧气能够从底部自然扩散到表层,水环境溶解氧分布比较均匀,且随光照强度适当提高溶解氧浓度升高^[26],同时苦草生物量增加为硝化微生物提供了更大的附着面积^[27]。因此,本研究有部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 会在硝化微生物作用下进行硝化反应转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,进一步提高苦草型水体

中有害氮素的去除效率。值得注意的是,试验期间,由于试验装置内无外源性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 输入,这可能会低估苦草型水体对氨氮的去除能力。此外,强光试验组(L2、L3和L4组) $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TN质量浓度随时间变化呈现不同程度持续下降趋势,在一定程度上与光照强度呈反比,而L1组随时间变化出现相反趋势。可能因本试验条件下适当提高光照强度有利于苦草生物量积累,水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度较低的情况下苦草生长会大量吸收利用 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,从而导致该研究结果中硝态氮和总氮去除率与光照强度呈显著正相关关系;而L1组由于光照不足引起苦草生长状态不佳,出现叶片腐烂现象,从而导致水体中硝态氮和总氮含量上升,Falkowski等^[28]研究结果支持该推论。

研究表明, Fd-GOGAT 和 GS 主要参与氮代谢过程, 能将无机氮转化为有机氮形式供机体利用, 其活性高低指示了苦草吸收氮素能力的强弱^[29]。本研究中, 强光条件(全日光的 25%~35% 范围内)显著提高了苦草体内参与氮代谢的酶活性。因此, 自然光周期下, 较强光照条件(全日光的 25%~35%)将有利于显著提高苦草对氮素的去除能力。

磷作为沉水植物生长的必需元素, 在环境中以不同的形式存在, 但水下植物只能吸收无机磷, 因此, 通过碱性磷酸酶(AKP)催化水溶性有机磷转化为无机磷, 才能供沉水植物生长吸收利用^[30]。本研究试验条件下, 各组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 去除率均达到了 80% 以上, 达到较好的去除效果。与适宜光强组相比, 强光组(全日光的 15%~35% 范围内) AKP 活性显著提高, 更有利于机体对磷的吸收利用。同时, 苦草在生长期能以提高 DO 质量浓度、pH 值等方式影响沉积物对上覆水中磷的吸附能力, 进而减弱沉积物和上覆水之间磷的迁移转化^[31], 表现为不同程度地降低了上覆水中各形态磷含量。此外, 苦草能够在水体中分泌化感物质, 有效抑制藻类生长繁殖^[9]。本研究中, 较高光强组(全日光的 25%~35% 范围内) Chl a 含量显著降低, 表明自然光周期下, 较高光强能够提高苦草对藻类的化感作用。因此, 自然光周期下, 通过调控水深适当提高苦草型养殖水体水下光照强度不仅可增加苦草总生物量、提高氮磷吸收能力, 而且能抑制藻类生长, 从而提高水体透明度^[9]。

综上所述, 自然光周期和一定强度条件下(在 5%~35% 全日光范围内), 提高光照强度, 能促进苦草生长量增加且不会引起氧化应激反应、提升苦草氮磷吸收能力、有效改善水环境质量(提高 DO 质量浓度, 降低 Chl a 含量)。因此, 苦草型清水态养殖水体实际应用中, 25%~35% 全日光光强有利于苦草生长及水体氮磷去除。

参考文献 References

- [1] WANJA D W, MBUTHIA P G, WARUIRU R M, et al. Fish husbandry practices and water quality in central Kenya: potential risk factors for fish mortality and infectious diseases [J/OL]. *Veterinary medicine international*, 2020, 2020: 6839354 [2023-11-28]. <https://doi.org/10.1155/2020/6839354>.
- [2] BOSMA R H, VERDEGEM M C J. Sustainable aquaculture in ponds: principles, practices and limits [J]. *Livestock science*, 2011, 139(1/2): 58-68.
- [3] 何绪刚, 侯杰. 池塘圈养模式研究进展 [J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(3): 21-29. HE X G, HOU J. Research progress on pond Juanyang mode [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 21-29 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王磊, 贾松鹏, 舒锐, 等. 陆基推水集装箱式水产养殖模式解析及发展展望 [J]. *中国水产*, 2020(11): 51-53. WANG L, JIA S P, SHU R, et al. Analysis and development prospect of land-based water pushing container aquaculture model [J]. *China fisheries*, 2020(11): 51-53 (in Chinese).
- [5] NI M, LIU M, LOU J F, et al. Stocking density alters growth performance, serum biochemistry, digestive enzymes, immune response, and muscle quality of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) in in-pond raceway system [J]. *Fish physiology and biochemistry*, 2021, 47(4): 1243-1255.
- [6] 王建富, 辛玮光, 张超, 等. 人工湖草型清水态生态系统构建技术研究与实践: 以西北某新建人工湖为例 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1105-1113. WANG J F, XIN W G, ZHANG C, et al. Research and practice on the construction technology of macrophytes-dominated clear water ecosystem in the artificial lake: taking a new artificial lake in the northwest as an example [J]. *Journal of environmental engineering technology*, 2022, 12(4): 1105-1113 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张友德, 张甜甜, 何建军, 等. 沉水植物对城市景观水体净化机理及影响因素的研究进展 [J]. *绿色科技*, 2021, 23(22): 142-146, 150. ZHANG Y D, ZHANG T T, HE J J, et al. Research progress on purification mechanism and influencing factors of submerged macrophytes on urban landscape water [J]. *Journal of green science and technology*, 2021, 23(22): 142-146, 150 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张群, 宋晴, 朱义, 等. 7 种沉水植物人工条件下的越冬能力研究 [J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2015, 33(2): 85-89. ZHANG Q, SONG Q, ZHU Y, et al. Research on overwintering abilities of seven submerged plants under artificial conditions [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (agricultural science)*, 2015, 33(2): 85-89 (in Chinese with English abstract).
- [9] 汤鹏, 于鲁冀, 彭赵旭, 等. 水生植物化感作用抑藻研究进展 [J]. *生物学杂志*, 2021, 38(4): 104-108. TANG P, YU L J, PENG Z X, et al. Research progresses on algae inhibition by allelopathy of aquatic plants [J]. *Journal of biology*, 2021, 38(4): 104-108 (in Chinese with English abstract).
- [10] CHEN J F, CHOU Q C, REN W J, et al. Growth, morphology and C/N metabolism responses of a model submersed macrophyte, *Vallisneria spiralis*, to various light regimes [J/OL]. *Ecological indicators*, 2022, 136: 108652 [2023-11-28]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108652>.
- [11] 王磊, 胡效卿, 张卓伦, 等. 不同水深和基质下苦草 (*Vallis-*

- neria natans*)的生理生态适应策略[J].生态学杂志,2021,40(8):2421-2430.WANG L, HU X Q, ZHANG Z L, et al. Physiological and ecological adaptation strategies of *Vallisneria natans* to different water depths and sediments[J]. Chinese journal of ecology, 2021, 40(8):2421-2430 (in Chinese with English abstract).
- [12] 黄瑾,宋玉芝,秦伯强.不同营养水平下苦草对附着和浮游藻类的影响[J].环境科学与技术,2010,33(11):17-21. HUANG J, SONG Y Z, QIN B Q. Effect of *Vallisneria natans* on periphytic algae and phytoplankton with different nutrients[J]. Environmental science & technology, 2010, 33(11):17-21 (in Chinese with English abstract).
- [13] 苏文华,张光飞,张云孙,等.5种沉水植物的光合特征[J].水生生物学报,2004,28(4):391-395.SU W H, ZHANG G F, ZHANG Y S, et al. The photosynthetic characteristics of five submerged aquatic plants[J]. Acta hydrobiologica sinica, 2004, 28(4):391-395 (in Chinese with English abstract).
- [14] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.State Environmental Protection Administration. Standard methods for examination of water and wastewater [M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002(in Chinese).
- [15] CHEN J F, CAO T, ZHANG X L, et al. Differential photosynthetic and morphological adaptations to low light affect depth distribution of two submersed macrophytes in lakes [J/OL]. Scientific reports, 2016, 6: 34028 [2023-11-28]. <http://doi.org/10.1038/srep34028>.
- [16] PENG H, GE D B, YUAN G X, et al. Effect of clonal fragmentation on the growth of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara at contrasting nutrient and light conditions [J]. Hydrobiologia, 2021, 848(4):903-912.
- [17] YUAN G X, FU H, ZHONG J Y, et al. Growth and C/N metabolism of three submersed macrophytes in response to water depths [J]. Environmental and experimental botany, 2016, 122: 94-99.
- [18] CHOU Q C, ZHANG W, CHEN J F, et al. Phenotypic responses of a submersed macrophyte (*Vallisneria natans*) to low light combined with water depth [J/OL]. Aquatic botany, 2022, 176: 103462 [2023-11-28]. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2021.103462>.
- [19] DONG B L, ZHOU Y Q, JEPPESEN E, et al. Response of community composition and biomass of submersed macrophytes to variation in underwater light, wind and trophic status in a large eutrophic shallow lake [J]. Journal of environmental sciences, 2021, 103:298-310.
- [20] FU H, YUAN G X, CAO T, et al. An alternative mechanism for shade adaptation: implication of allometric responses of three submersed macrophytes to water depth [J]. Ecological research, 2012, 27(6):1087-1094.
- [21] 徐昇,李欣,钟萍,等.苦草根系对硝氮和氨氮的吸收[J].生态科学,2012,31(3):312-317.XU S, LI X, ZHONG P, et al. The uptake of nitrate and ammonium by the root of *Vallisneria natans* [J]. Ecological science, 2012, 31(3):312-317 (in Chinese with English abstract).
- [22] 崔建伟,李金凤,崔健,等.6种水生植物去除污水中总磷的实验研究[J].湿地科学,2023,21(3):430-438.CUI J W, LI J F, CUI J, et al. Experimental study on removing total phosphorus in sewage by six kinds of aquatic plants [J]. Wetland science, 2023, 21(3):430-438 (in Chinese with English abstract).
- [23] GOLDSBOROUGH W J, KEMP W M. Light responses of a submersed macrophyte: implications for survival in turbid tidal waters [J]. Ecology, 1988, 69(6):1775-1786.
- [24] CHEN J F, LIU Z G, XIAO S, et al. Effects of benthivorous fish disturbance on chlorophyll a contents in water and the growth of two submersed macrophytes with different growth forms under two light regimes [J/OL]. Science of the total environment, 2020, 704: 135269 [2023-11-28]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135269>.
- [25] CHEN J F, REN W J, CHOU Q C, et al. Alterations in biomass allocation indicate the adaptation of submersed macrophytes to low-light stress [J/OL]. Ecological indicators, 2020, 113: 106235 [2023-11-28]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106235>.
- [26] 周娜娜,冯素萍,高新生,等.植物光合作用的光抑制研究进展[J].中国农学通报,2019,35(15):116-123.ZHOU N N, FENG S P, GAO X S, et al. Photoinhibition of plants photosynthesis: research progress [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2019, 35(15):116-123 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张松贺,王佳阳,牟小颖,等.不同水体沉水植物叶面微生物群落特征[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):66-74.ZHANG S H, WANG J Y, MU X Y, et al. Characteristics of microbial community on leaf surface of submerged plants in different water bodies [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2022, 50(6):66-74 (in Chinese with English abstract).
- [28] FALKOWSKI P G, STONE D P. Nitrate uptake in marine phytoplankton: energy sources and the interaction with carbon fixation [J]. Marine biology, 1975, 32(1):77-84.
- [29] TURPIN D H, VANLERBERGHE G C, AMORY A M, et al. The inorganic carbon requirements for nitrogen assimilation [J]. Canadian journal of botany, 1991, 69(5):1139-1145.
- [30] WANG S R, JIAO L X, YANG S W, et al. Effects of organic matter and submerged macrophytes on variations of alkaline phosphatase activity and phosphorus fractions in lake sediment [J]. Journal of environmental management, 2012, 113: 355-360.
- [31] 王立志,王国祥.衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响[J].生态学报,2013,33(17):5426-5437.WANG L Z,

WANG G X. Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in de-

composition period [J]. *Acta ecologica sinica*, 2013, 33 (17) : 5426-5437 (in Chinese with English abstract).

Growth, nitrogen and phosphorus removal ability of *Vallisneria natans* under natural light

MA Shuaibing¹, LÜ Yabing¹, JIANG Mingchen¹, LIN Shen¹, HE Dong¹,
XU Juchen¹, HOU Jie^{1,2}, HE Xugang^{1,2}, LI Yingchun³

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Engineering Research Center of the Ministry of Education for Green Development of Bulk Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430070, China;
3. Agricultural Science Research Institute of Macheng, Huanggang 438300, China

Abstract In order to explore the optimal control range of water depth for *Vallisneria natans* type aquiculture, based on the natural distribution water depth of *V. natans* in the pond, four light intensity gradient groups, including 5% (L1), 15% (L2), 25% (L3), and 35% (L4) of the full sunlight intensity (L1 was the suitable light intensity group, L2, L3, and L4 were the strong light groups), were set up, corresponding to the underwater depth of 1.0-1.1, 0.6-0.8, 0.4-0.6, and 0.3-0.4 times the transparency of the pond, respectively, to study the growth, antioxidant, and purification ability of *V. natans* under natural light period and intensity. The results showed that under natural light period, the total biomass of *V. natans* increased significantly with the increase of light intensity (5%-35% full sunlight range), and the maximum leaf length appeared in L2 group. The content of malondialdehyde (MDA) and superoxide dismutase (SOD) activity in L2, L3, and L4 groups were significantly lower than those in L1 group; the content of dissolved oxygen (DO) and pH values in water in L3 and L4 groups were significantly higher than those in L1 group, while the chlorophyll a (Chl a) content was opposite. The concentrations of ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) in each group rapidly decreased to lower levels (<0.30 , <0.02 mg/L) within 3 and 2 weeks, respectively; except for group L1, the concentrations of nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) and total nitrogen (TN) in other groups continued to decrease at different rates with time until the end of the experiment (<2.50 , <3.00 mg/L), which was negatively correlated with light intensity to a certain extent. The activities of glutamate synthase (Fd-GOGAT) and alkaline phosphatase (AKP) in L3 and L4 groups were significantly higher than those in L1 and L2 groups, and the removal rates of orthophosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) and total phosphorus (TP) in each group were more than 80%, showing good removal effects. Research has shown that the water level for *V. natans* type aquiculture should be controlled within a range of about 0.3 to 0.6 times transparency above *V. natans*.

Keywords light intensity; *Vallisneria natans*; growth status; nitrogen and phosphorus in water; purification capacity; grass-type pond

(责任编辑:边书京)