不同磷浓度和光照培养对密刺苦草及附生席藻生长的影响

庞炜杰,贾晓悦,杨天羽,夏爽,裴国凤*
(中南民族大学 生命科学学院,湖北 武汉 430074)

摘 要 在富营养化水体中光照和营养盐是影响沉水植物恢复重建的重要环境因素,为了探讨光照强度和外源磷添加对沉水植物和附生蓝藻的影响,本研究通过室内模拟实验,以密刺苦草和其附生席藻为研究对象,测定了在不同光照强度(30~115 μmol·m^{-2}·s^{-1})和磷浓度(0~10 mg·L^{-1})下水体理化因子、席藻生物量和覆盖度以及密刺苦草的生长指标.结果表明:与弱光照相比,强光照下的席藻生物量和覆盖度分别增加了74.5%和57.5%,说明在一定范围内席藻的生物量随光照增强而增大;实验前期,高浓度外源磷的添加导致席藻生物量快速上升,同时发现随着光照和磷营养盐浓度的增加,席藻由附着型生物膜转变为浮游型藻殖段,其中光照对席藻生活型的影响显著大于磷营养盐(P<0.05).强光照下密刺苦草的根系长度、根系数量和干重分别比弱光照处理组增加了74.6%、54.2%和43.6%;同时在高浓度磷条件下,密刺苦草通过增加植株数、株高以及根系数量的生长方式积累生物量.

关键词 光照;磷;席藻;苦草
中图分类号 X52 **文献标志码** A **文章编号** 1672-4321(2026)04-0456-07
doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20260704

Effects of different phosphorus concentrations and light conditions on the growth of *Vallisneri denseserrulata* Makino and epiphytic *Phormidium* sp.

Pang Weijie, Jia Xiaoyue, Yang Tianyu, Xia Shuang, Pei Guofeng*
(College of Life Sciences, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, Hubei China)

Abstract Light and nutrient salts are important environmental factors affecting the restoration and reconstruction of submerged macrophyte in eutrophic water. In order to explore the impacts of light intensity and exogenous phosphorus addition on submerged plants and epiphytic cyanobacteria, the physical and chemical factors, biomass and coverage of *Phormidium* sp. and physiological indicators of *Vallisneri denseserrulata* Makino(*V. denseserrulata* Makino) in water under different light intensity(30~115 μmol·m^{-2}·s^{-1})and phosphorus concentration(0~10 mg·L^{-1})were determined by laboratory simulation experiments with *V. denseserrulata* Makino and their epiphytes as the research objects. The results showed that the biomass and coverage of *Phormidium* sp. increased by 74.5% and 57.5% respectively under strong light compared with low light, indicating that the biomass of *Phormidium* sp. increased with the increase of light in a certain range. In the early stage of the experiment, the addition of high concentration of exogenous phosphorus caused a rapid increase in the biomass of *Phormidium* sp.. At the same time, it was found that with the increase of light and phosphorus nutrient concentration, *Phormidium* sp. transformed from attached biofilm to planktic algal gonium, and the influence of light on the life pattern of *Phormidium* sp. was significantly greater than that of phosphorus nutrient salt (P<0.05). Compared with low light, the root length, root number and dry weight of *V. denseserrulata* Makino increased by 74.6%, 54.2% and 43.6%, respectively, under high light, indicating that low light inhibited the root length. At the same time, under the condition of high

收稿日期 2024-11-19
* **通信作者** 裴国凤(1969-),女,教授,博士,研究方向:藻类环境生物学,E-mail: peigf@mail.scuec.edu.cn
基金项目 国家自然科学基金资助项目(30970550);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZQ23021)

concentration of phosphorus nutrients, the biomass was accumulated by reducing root length to increase plant number, plant height and root number.

Keywords　light; phosphorus; *Phormidium* sp.; *Vallisneri denseserrulata* Makino

通过外源或内源方式输入浓度过高的氮、磷营养盐易导致浮游藻类过度繁殖，进而引发水生态环境污染的现象被称为水体富营养化[1]. 严重的水体富营养化不仅会导致湖泊内浮游藻类大量繁殖，使草型湖泊转变为藻型湖泊，还导致了水体溶解氧的下降进而引发沉水植物和底栖动物的逐渐衰亡[2]. 针对水体富营养化这一严重的环境问题，有研究表明，通过恢复沉水植物、重建草型湖泊生态系统被认为是富营养化湖泊治理的有效途径[3]. 沉水植物因具有良好的净化水质和改善水生态环境的功能而被广泛应用于现今的富营养化水体的治理之中[4]. 作为水生态系统中的初级生产者，沉水植物不仅可通过叶片吸附转换上覆水体中的氮磷营养盐和颗粒悬浮物以维持浅水湖泊或河流的清水稳态[5]，还能利用根部固定表面沉积物，以防止沉积物颗粒再次悬浮所导致的营养盐大量释放[6]. 沉水植物生长和繁殖会受到光照强度、温度和水深等环境因子的影响，其中光照强度被认为是对沉水植物生长最重要的影响因子[7]. 有研究证明，水体扰动造成的沉积物颗粒悬浮以及浮游植物的快速繁殖会导致光照在水体中垂直分布的降低，进而影响沉水植物的正常生长和分布[8]. 在富营养化水体中，丝状蓝藻是湖泊或河流中的优势种类[9]. 一些种类的蓝藻在水生态系统中以丝状附着型生物膜和浮游型藻殖段这两种生活型存在[10]，伴随着水体磷营养盐浓度的升高和其他环境因子的改变，附着生长的丝状蓝藻转变为藻殖段形态并扩散于上覆水体中. 当丝状蓝藻过量繁殖并附着在沉积物表面时会形成蓝藻藻垫[11]，藻垫通过其分泌的胞外聚合物紧密附着在沉积物表面时，可有效降低沉积物中磷营养盐向上覆水体的释放[12]. 但当丝状蓝藻附着于沉水植物上时，会明显影响沉水植物的光合作用以及对水体营养盐的吸收，最后导致沉水植物生物量的减少甚至衰亡. 目前，有关外源磷与光照强度对附生丝状蓝藻与沉水植物生长的影响以及附生丝状蓝藻对沉水植物的抑制作用的研究相对较少，为了进一步探讨附生丝状蓝藻对沉水植物的影响，本文以席藻与密刺苦草作为研究对象，利用室内“上覆水-席藻-密刺苦草-沉积物”的静态培养系统，测定不同浓度的磷营养盐与光照强度对席藻和密刺苦草生长产生的影响，以期对富营养化水体的治理提供科学参考.

1　材料与方法

1.1　试验材料

沉积物：在湖北省武汉市南湖右岸（30°49 N，114°38 E），使用采样器采集表层沉积物（0~10 cm），过30目筛网后自然风干备用，使用前将风干沉积物粉碎为约1 cm^3颗粒.

沉水植物：实验所用密刺苦草（*V. denseserrulata* Makino）为实验室纯化培养，使用前洗净、修剪株高为10 cm.

丝状蓝藻：席藻（*Phormidium* sp.）由附着在沉积物和沉水植物表面的丝状蓝藻藻垫中分离纯化得到，在实验室条件下用BG11液体培养基培养至附着型生物膜阶段备用.

外源营养盐：通过添加KH_2PO_4（磷酸二氢钾，分析纯）模拟外源营养盐输入水体，控制初始水体营养水平.

1.2　实验设置和培养条件

实验设置四个处理组（A、B、C、D）和一个对照组CK，每组两个平行. 实验设置在一个40 × 30 × 30 cm^3的玻璃缸内，依次平铺加入3 kg白砂和2 kg沉积物，种植50 g（鲜重）密刺苦草，用虹吸法沿缸壁注入26 L去离子水. 处理组和对照组加入10 g（鲜重）席藻. 实验周期60 d，控制温度（25±2）℃，光照周期为14 h光照：10 h黑暗，同时保持水位稳定，每个实验均重复2次. 具体条件如表1所示.

表1　磷浓度和光照梯度设置

Tab. 1　Settings of each experimental system

组别	外源输入水体TP浓度/mg·L^{-1}	光照强度/μmol·m^{-2}·s^{-1}
A	1.5	115
B	1.5	30
C	1.5	70
D	10	70
CK	0	70

1.3　测定项目和分析方法

1.3.1　水体理化因子分析

实验前20 d每隔3 d、后30 d每隔5 d用便携式测量仪测定各处理组水体pH、溶解氧（DO）、氧化还

原电位(ORP)、电导率(EC)和水下光照强度;量取150 mL水样,参照《水和废水监测分析方法》[13]测定上覆水体的总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)和可溶性活性磷(SRP),每个指标设置2组平行取平均值.

1.3.2 密刺苦草生长指标

实验期间,测量密刺苦草的株高,在实验末期将缸中所有密刺苦草分别拔出并洗净,统计植株总株数、单株叶片数、根系长度和根系数量,然后放入85 ℃恒温烘箱干燥72 h后计算干重.

1.3.3 席藻生长指标

席藻生物膜生物量:随机选取沉积物或缸壁表面3 × 3 cm^2面积,用镊子和一次性滴管将面积内生物膜剥离并破碎,随后将破碎的藻液倒入15 mL的离心管中,用丙酮浸取法测定[14]生物膜Chl-*a*含量.浮游型藻殖段生物量:量取200 mL水样,在抽滤器上放置0.45 μm的乙酸纤维滤膜抽滤水样,取出抽滤后的滤膜放入15 mL的离心管中,采用丙酮浸取法测定滤膜的Chl-*a*含量,以表示丝状蓝藻的藻殖段生物量.覆盖度:使用手机拍照玻璃缸水面的正视图,计算丝状蓝藻生物膜在沉积物表面(40 × 30 cm^2)覆盖的面积,用丝状蓝藻生物膜面积/缸底面积的比率(百分比)表示覆盖度.

1.4 数据处理与统计分析

使用IBM SPSS Statistics 25.0对不同处理组数据进行单因素方差分析(ANOVA),"*"代表显著性水平(0.01<*P≤0.05,0.001<**P≤0.01,***P≤0.001).

2 结果与分析

2.1 水体理化指标的变化

在实验过程中,所有实验组的pH值呈上升趋势,实验组pH值始终在7.0~9.3之间变化.处理组A的pH值在实验中始终高于处理组B,在44 d时处理组A的pH达到峰值,为9.26(图1(a)).在50 d时处理组A的DO值显著大于处理组B(P<0.05),处理组B的DO值在实验期间始终小于8 mg·L^{-1}(图1(b)).与初始值相比,处理组D的ORP在16 d升高了71.2%,且与处理组A存在极显著差异(P<0.01).但在50d时各个实验组间的ORP值无显著差异(P>0.05)(图1(c)).实验末期所有实验组的EC值相较实验初期提升了63%~66%,但各处理组和对照组之间无显著差异(P>0.05)(图1(d)).上述结果表明,除ORP与EC外,pH和DO均受光照强度与磷营

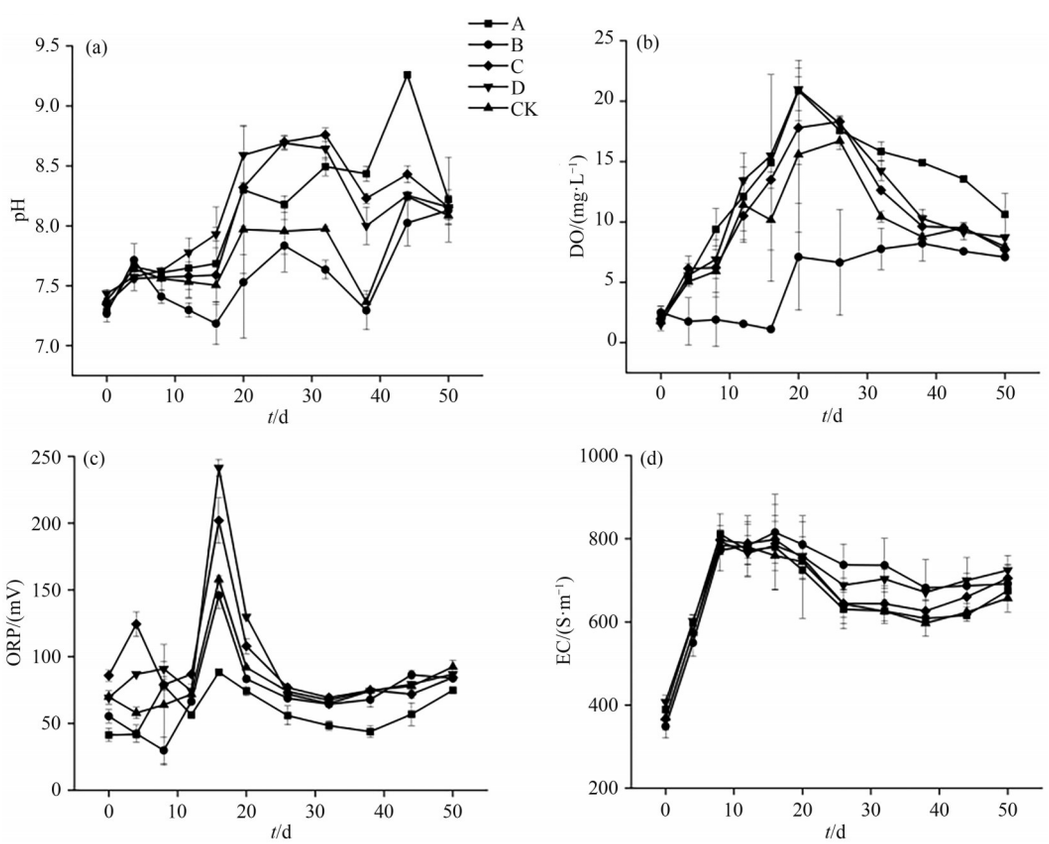


图1 实验组上覆水中PH、DO、ORP、EC的变化

Fig. 1 Dynamic changes of PH, DO, ORP and EC in overlying water of experimental group

养盐浓度的影响，其中光照强度的变化对水体pH和DO的浓度产生的影响最大.

在实验的前8 d，处理组和对照组的TN呈上升趋势，在12 d时处理组B达到最大值，为13.22 mg·L^{-1}（图2(a)）. 在实验前16 d，处理组和对照组的NH_4^+-N呈上升趋势，但在16-50 d间各组浓度均出现不同程度下降，其中处理组B的下降幅度达90%（图2(b)）. 在实验的0-12 d间处理组D的TP和SRP浓度显著高于处理组CK（P<0.01）. 在12 d后各组均开始下降至2 mg·L^{-1}以内，下降幅度约为87%，与初始值无显著差异（P>0.05）（图2(c)和(d)）. 上述结果表明，在低光照强度下可促使实验前中期沉积物的氮营养盐浓度快速释放至上覆水体中，同时添加了高浓度外源磷下的密刺苦草和席藻对水体磷的去除率约为90%.

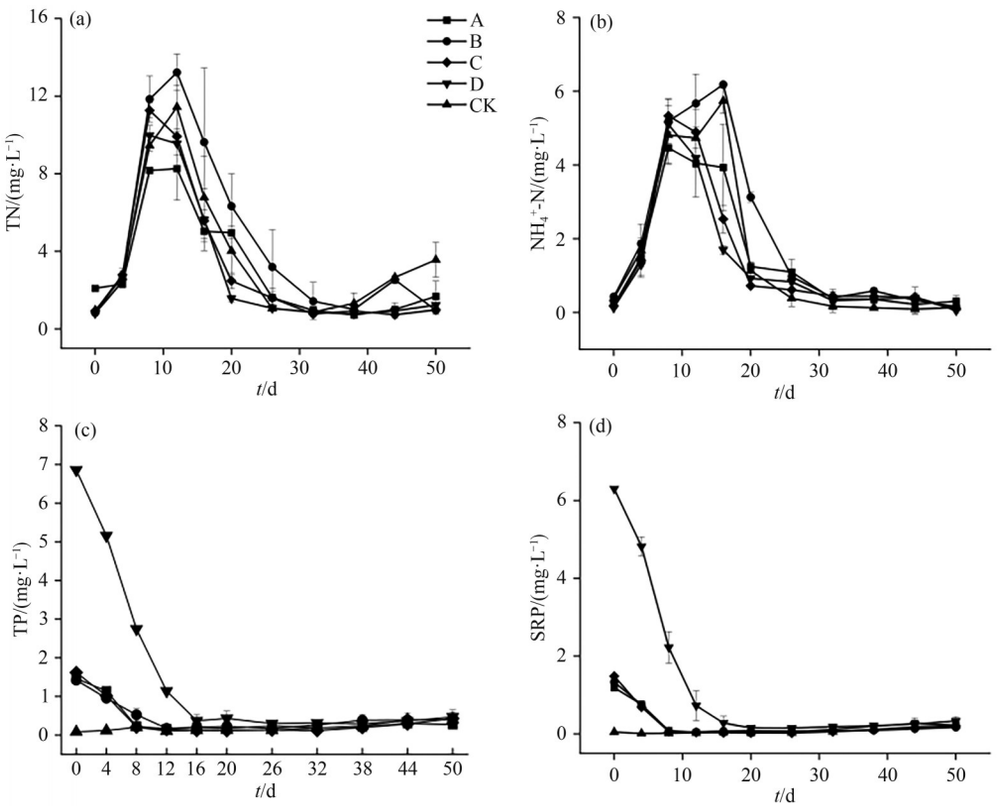


图2　实验组上覆水中TN、NH_4^+-N、TP和SRP浓度的变化

Fig. 2　Dynamic changes of TN, NH4+-N, TP and SRP concentrations in overlying water of experimental group

2.2　水下光照强度和席藻覆盖度的变化

实验期间处理组B的水下光照强度始终低于其余处理组和对照组CK，在50 d时处理组B的光照强度达到最低值，为1.7 μmol·m^{-2}·s^{-1}（图3）. 所有的处理组和对照组的水下光照强度自26 d开始不断减弱，至50 d时除处理组B外的其余处理组和对照组的光照强度均在8~11 μmol·m^{-2}·s^{-1}之间，无显著差异（P>0.05）. 处理组D的席藻覆盖度在16-32 d时呈持续上升的趋势，并在32 d时与对照组和处理组C有显著差异（P<0.05）；但实验进行至50 d时各组之间无显著差异（P>0.05）. 实验过程中处理组B的席藻覆盖度在9%~40%的范围内变化，50 d时其席藻覆盖度相比实验初期仅增长了59%，显著低于其余处理组和CK组（P<0.05）. 实验结果表明，在实验前中期外源磷的添加能对促使席藻覆盖度的提升，但席藻覆盖度主要与水下光照强度的变化相关.

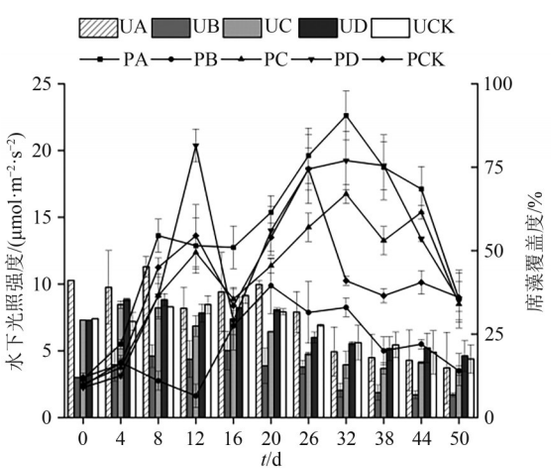


图3　水下光照强度与席藻覆盖度的变化

Fig. 3　Dynamic changes of underwater light intensity and *Phormidium* sp. coverage

2.3 席藻生物量的变化

处理组A与其他处理组和对照组的藻殖段生物量相比均存在显著差异(P<0.05). 处理组B和C的藻殖段生物量均在1.5~11 μg·L^{-1}之间变化,同时在实验过程中处理组C的藻殖段生物量显著低于处理组D(P<0.05). 处理组B的生物膜生物量显著低于其余处理组和对照组(P<0.01),与处理组B相比,处理组A的生物膜生物量增加近6.6%. 处理组C、D和对照组CK的生物膜生物量变化范围在0.14~2.78 μg·L^{-1}间变化,不存在显著性差异(P>0.05). 藻殖段和生物膜的生物量最大值均在处理组A,分别为27.56 μg·L^{-1}和3.54 μg·L^{-1}. 所有实验组内的藻殖段生物量均大于对应组的生物膜生物量,处理组A的席藻藻殖段极显著大于生物膜生物量(P<0.01),同时处理组D的席藻藻殖段显著大于生物膜生物量(P<0.05)(图4(a)和(b)). 上述结果表明,磷浓度和光照的升高明显促进席藻由生物膜转化为藻殖段. 同时高光照对席藻藻殖段和生物膜生物量增长有极显著的促进作用(P<0.01).

2.4 密刺苦草生长指标的变化

由表2可知,与实验初期相比,所有处理组和对照组的各项指标在50 d时均有相应的变化,其中总干重、总株数和株高相较于0 d均有显著升高(P<0.05),但苦草根系数量相较于实验初期均有不同程度的下降,下降幅度分别为32.7%、76.9%、63.5%、56.7%和75%. 处理组A的苦草总干重和根系长度均大于其余处理组和对照组,分别为13.8 g和18.2 cm,且与处理组B的总干重和根系长度存在显著差异(P<0.05). 相较于实验初期的其余处理组和对照组,实验结束时处理组D的苦草总株数、株高和叶数的上升幅度最大,分别为80%、79.5%和60%. 处理组B在50 d时的总干重、总株数、叶数、根系长度和根系数量均低于其余处理组和对照组,分别为7.3 g,49、13、10.6 cm和24. 上述结果表明外源P的输入和光照强度的变化对苦草的生长均产生明显的影响,其中光照的加强对密刺苦草的总干重和根系长度的增长呈正相关,而P浓度的上升促进了密刺苦草的株高的增长并分蘖出更多新的植株.

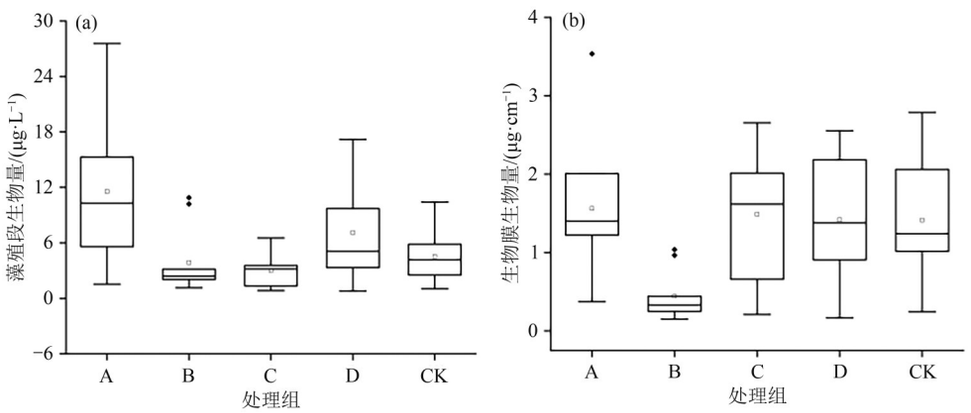


图4 藻殖段和席藻的生物量变化

Fig. 4 The dynamic biomass changes in biofilms and hormogon of *Phormidium* sp.

表2 密刺苦草生理指标的变化

Tab. 2 The dynamic changes of physiological indices of *V. denseserrulata* Makino

	总干重/g	总株数	株高/cm	叶数	根系长度/cm	根系数量
0 d	4.4±0.4	24±3	8.6±0.7	14±5	15.2±2.8	104±18
50 d(A)	13.8±2.3	79±9	32.2	20±6	18.2±2.5	70±13
50 d(B)	7.3±1.1	49±6	26.7±5.5	13±5	10.6±3.1	24±8
50 d(C)	8.4±1.5	84±10	26.5±4.2	20±4	12±2.4	26±5
50 d(D)	10±1.2	96±19	33.4±7	21±8	11±1.8	45±9
50 d(CK)	9±0.9	65±16	25.9±5.1	17±6	11±2.3	38±8

3 讨论

3.1 环境因子对席藻的影响

光照是影响丝状蓝藻生长的关键因素之一[15]. 已有的研究表明,在一定的光照强度范围内,藻类生物量随着光照升高而上升,但当光强超过阈值后,藻类就会受到一定的抑制作用[16]. 不同的藻类对光强有不同的需求,高静思等[17]研究发现阿氏颤

藻生长的最适光照条件为36 μmol·m^{-2}·s^{-1}，舒柔等[18]认为细鞘丝藻的最适光强范围为9~18 μmol·m^{-2}·s^{-1}. 本研究结果表明，席藻生物量随光照强度的增强而上升，但70 μmol·m^{-2}·s^{-1}处理下的席藻生物量与115 μmol·m^{-2}·s^{-1}相比没有显著差异，说明席藻的最适光强在70~115 μmol·m^{-2}·s^{-1}之间. 在浅水湖泊的生态系统中，生物膜和浮游藻殖段对光照的竞争是重要的生态过程之一[19]. 相较于其他光照条件，115 μmol·m^{-2}·s^{-1}的光照条件处理时席藻藻殖段显著高于生物膜生物量，导致这种现象出现的主要原因是在相对的光照强度范围内浮游藻殖段的生物量随光照的增强而上升，但多数附生丝状蓝藻属于弱光生长型[20]，所以这促使其生活形态附生丝状附着型转变为浮游藻殖段型并导致水体富营养化水平的加剧. 除光照外，丝状藻类的生长在一定条件下还会受到营养盐浓度的限制. 已有的研究表明[21]，席藻的生物量会随着水体氮、磷浓度的增大而上升，本实验结果与此说法相符. 在实验前期，添加高浓度外源磷处理组的席藻生物量与低浓度相比有明显的升高趋势，在32 d后各组席藻的生长达到平台期并逐渐衰亡. 造成席藻衰亡的原因是因为席藻对水体磷营养盐的吸收和利用达到一定阈值后，席藻生物量的增长就不与水体磷营养盐浓度呈正比关系，因此在实验后期席藻生物量开始逐渐减少并最终导致其衰亡，而席藻分解后释放的营养盐随后由密刺苦草加以吸收利用并促使其迅速生长，避免了席藻衰亡所造成的二次污染.

3.2　环境因子对密刺苦草生长的影响

光照强度的减弱会导致沉水植物生物量以及繁殖能力的降低[22]. 当水下光照强度降至入射光的1%时，沉水植物将难以存活；低于5%时，部分种类的营养繁殖体的萌发则受到抑制[23]. 本研究结果表明，强光照与弱光照条件相比，密刺苦草的各个生长指标均有上升，其中根系数量、根系长度和干重有明显变化，变化幅度分别为74.6%、54.2%和43.6%. 有研究表明，随着水下光强的减弱，苦草的各个生物量指标尤其是苦草的根系长度和数量均会出现相应的增长变缓慢甚至降低[24]，并导致上覆水体内溶解氧浓度的下降，而本实验与此说法相符合. 在弱光照条件下光合作用的减弱导致了沉水植物的胁迫耐受能力降低，并导致植物吸收磷所必需的能量供给的减少[25]，这解释了高光照下密刺苦草生长指标增长相比低光照的生长指标出现增长的结果.

同时沉水植物在生长繁殖的过程中需要不断吸收上覆水及沉积物中的氮、磷等营养盐，其中它们主要经根系吸收沉积物中的氮、磷并分配到叶片[26]. 有研究表明，随着上覆水里的正磷酸盐被苦草作为营养物不断吸收，其各个生长指标也随之上升[27]. 同时能够发现密刺苦草的根长因植物为应对环境变化会调整根和茎的资源分配而变短，让资源更多的分配到与生产力有关的组织器官[28]，本实验结果与此说法大致相同，但除了P负荷的影响外，丝状蓝藻的生活型态转变也影响了密刺苦草的生长. 在一些实验中，探讨的主要是光强和营养盐浓度对密刺苦草的影响，但关于藻类生长对密刺苦草产生影响这一方面并没有深入探讨，一些学者认为，沉水植物与丝状藻类是互利共生的关系，蓝藻生物膜的增长能够有效抑制藻殖段浓度的上升，降低水中过量的营养盐浓度，为沉水植物提供良好的生活环境[29]. 但另一些学者则认为沉水植物与丝状藻类属于竞争关系，尤其是沉水植物与丝状藻类对上覆水中营养盐、光照等的竞争，丝状蓝藻阻碍宿主植物对水中营养盐的吸收和利用[30]. 在本实验中，各组的上覆水藻殖段生物量明显高于席藻生物膜，且加入了高浓度P营养盐的处理组中的密刺苦草生物量以及根长没有发生衰退的迹象，这就说明了席藻在强光照和高浓度P的条件下的由生物膜转化为藻殖段形态，减少了密刺苦草上附着生物膜的生物量，有利于密刺苦草的叶片对光照和营养盐的吸收.

4　结语

（1）高光照和高磷负荷导致了席藻由附着型生物膜转变为浮游型藻殖段，其中高光照对席藻浮游藻殖段生物量的升高具有显著的促进作用（P<0.05）.

（2）光照强度的变化对席藻生物量产生显著影响（P<0.05），在强光照条件下的席藻生物量相比弱光照增长近6.6%，在实验前期高浓度磷的添加显著促进了的席藻生物量的上升（P<0.05）.

（3）强光照促进了密刺苦草的根系数量、根系长度和干重的增长，其中对根系数量的影响最大. 同时高浓度磷对密刺苦草的总株数、株高以及根系长度具有显著的促进作用，与实验初期相比，分别增加80%、79.5%和60%.

参　考　文　献

[1]　Wang D, Gan X, Wang Z, et al. Research status on

remediation of eutrophic water by submerged macrophytes: A review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 169: 671-684.

[2] Wang G X, Zhang L M, Chua H, et al. A mosaic community of macrophytes for the ecological remediation of eutrophic shallow lakes[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 582-590

[3] 胡俊杰,万年新,王涛,等.底栖细鞘丝藻对沉积物磷释放的影响[J].中南民族大学学报(自然科学版),2021, 40(6):574-578.

[4] Dai Y, Jia C, Liang W, et al. Effects of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage [J]. Ecological Engineering, 2012, 40: 113-116.

[5] 张航, 陈嘉欣, 蔡芳芳. 四种沉水植物对富营养化水体净化效果的比较[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(2): 34-41.

[6] 张萌, 方红亚, 倪乐意. 我国浅水湖泊富营养化治理的可用水生植物修复技术[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4649-4652.

[7] 张嵘梅, 马博馨, 杨志杰, 等. 沉水植物苦草属在水体环境修复中的研究进展和应用现状[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28): 144-154.

[8] Short F T, Burdick D M, Kaldy J E III. Mesocosm experiments quantify the effects of eutrophication on eelgrass, *Zostera marina*[J]. Limnology and Oceanography, 1995, 40(4): 740-749.

[9] 许海, 陈洁, 朱广伟, 等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1239-1247.

[10] 梅雪英, Razlutskij V, G RudstamLars G, 等. 杂食性鱼类对浅水水体底栖-浮游生境耦合作用的影响: 微综述[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 667-674.

[11] Mccormick P V, O′Dell M B, Shuford R B E, et al. Periphyton responses to experimental phosphorus enrichment in a subtropical wetland[J]. Aquatic Botany, 2001, 71(2): 119-139.

[12] 易志勇, 王青, 杨英, 等. 东湖沿岸带底栖藻垫对磷的滞留作用[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 913-917.

[13] 国家环境保护总局.《水和废水监测方法》第4版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[14] 杨琳. 浮游植物叶绿素a测定方法研究进展[J]. 四川环境, 2019, 38(1): 156-160.

[15] Muhetaer G, Asaeda T, Jayasanka S M D H, et al. Effects of light intensity and exposure period on the growth and stress responses of two cyanobacteria species: *Pseudanabaena galeata* and *Microcystis aeruginosa* [J]. Water, 2020, 12(2): 407.

[16] Xue S, Su Z, Cong W. Growth of *Spirulina platensis* enhanced under intermittent illumination[J]. Journal of Biotechnology, 2011, 151(3): 271-277.

[17] 高静思, 朱佳, 董文艺. 光照对我国常见藻类的影响机制及其应用[J]. 环境工程, 2019, 37(5): 111-116.

[18] 舒柔, 何海涛, 陈武琦, 等. 底栖细鞘丝藻和苦草对光照强度的响应策略[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(6): 1577-1582.

[19] Vadeboncoeur Y, Steinman A D. Periphyton function in lake ecosystems [J]. The Scientific World Journal, 2002, 2: 1449-1468.

[20] Yin Q, Carmichael W W, Evans W R. Factors influencing growth and toxin production by cultures of the freshwater Cyanobacterium *Lyngbya wollei* Farlow ex Gomont [J]. Journal of Applied Phycology, 1997, 9(1): 55-63.

[21] Brookes J D, Carey C C. Resilience to blooms [J]. Science, 2011, 334(6052): 46-47.

[22] 牛淑娜, 张沛东, 张秀梅. 光照强度对沉水植物生长和光合作用影响的研究进展[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(11): 9-12.

[23] Madgwick G, Emson D, Sayer C D, et al. Centennial-scale changes to the aquatic vegetation structure of a shallow eutrophic lake and implications for restoration [J]. Freshwater Biology, 2011, 56(12): 2620-2636.

[24] 邹丽莎, 聂泽宇, 姚笑颜, 等. 富营养化水体中光照对沉水植物的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 2073-2080.

[25] Angekstein S, Schubert H. *Elodea nuttallii*: Uptake, translocation and release of phosphorus. Aquatic Biology, 2008, 10: 209-216.

[26] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 苦草(*Vallisneria natans*)生长期对沉积物磷形态及迁移的影响[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5): 753-760.

[27] 张饮江, 刘晓培, 金晶, 等. 沉水植物对水体净化的研究进展[J]. 科技导报, 2012, 30(27): 72-79.

[28] 赵军, 章更生, 周梅荣. 苦草的生物学特性及其利用[J]. 中国水产, 2001(4): 38-39, 37.

[29] 刘阳, 胡婕, 高珊珊, 等. 太阳辐射减弱对浮游与底栖藻类竞争的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(1): 133-136.

[30] 代亮亮, 郭亮亮, 吴中奎, 等. 不同浓度藻类水华对两种沉水植物的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2765-2773.

(责编&校对 姚春娜)