

doi: 10.7541/2023.2023.0130

不同功能型沉水植物对溶解氧影响及环境效应

李华歆^{1,2} 殷春雨³ 杨国梁¹ 蔡颖⁴ 黄晓龙¹ 李宽意^{1,2} 关保华^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 上海建桥学院有限责任公司, 上海 201306; 4. 江苏省环境工程技术有限公司, 南京 210019)

摘要: 研究选用刺苦草(*Vallisneria spirulosa*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)分别代表底层型、冠层少根型和冠层多根型沉水植物, 通过中宇宙实验, 探索不同功能型沉水植物在生长过程中水柱和沉积物中溶解氧(DO)浓度及其相关指标的差异。实验结果表明: 不同处理组水柱DO浓度存在显著差异, 空白组水柱DO浓度显著低于植物处理组, 且空白组水柱总氮(TN)和总磷(TP)浓度降低程度最少; 黑藻组比叶面积、叶面积指数、净增长生物量、相对生长速率和水柱DO浓度最大, 能够有效降低水柱TP和TN浓度; 穗花狐尾藻组株高最高, 提升水柱DO浓度显著高于刺苦草, 水柱TP降低程度最大; 刺苦草组比根长、单株总根长和根冠比最大, 提升沉积物深度6 cm以内的DO效果最好, 沉积物铁含量最高, 沉积物总氮(TN)、总碳(TC)含量和间隙水总溶解性磷(TDP)浓度最低。在修复富营养湖泊过程中, 可根据水和沉积物缺氧状况, 合理配置底层型和冠层型沉水植物, 构建释氧能力较强的群落, 从沉积物表层到水柱上层均为湖泊提供充足的氧气, 从而更加有利于清水态的形成。

关键词: 功能型; 沉水植物; 溶解氧; 环境效应; 植冠; 根系

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2024)02-0232-10



随着富营养化加剧, 沉水植物大量丧失, 藻类水华频发, 水体呼吸作用增强, 全球淡水湖泊的溶解氧(Dissolved oxygen, DO)呈现明显下降趋势^[1, 2]。自1960年以来, 将近400个温带淡水湖泊表层水和底层水溶解氧浓度分别下降了0.45和0.42 mg/L, 下降率达5.5%和18.6%, 远远超过海洋2%的下降速率^[1, 3]。此外, 全球变暖使水温升高, 溶解氧饱和度下降, 同时也促进了藻类在表层水中的生长, 大量沉降的藻类残体更加剧了底层水的缺氧状态^[4]。溶解氧下降会导致沉积物中氮、磷等营养元素的释放通量增加, 加重湖泊富营养化^[5], 促进甲烷和氧化亚氮等温室气体的排放^[6]; 缺氧还会引起好氧/厌氧微生物的群落格局发生逆转, 导致鱼类和无脊椎动物大量死亡, 湖泊生物多样性丧失^[2]。

恢复沉水植被能够缓解湖泊溶解氧下降的趋势^[7]。沉水植物是浅水湖泊沿岸带重要的生境塑造

者与功能维持者, 是湖泊从浊水态向清水态转变并维持的关键^[8, 9]。向湖泊释放氧气是沉水植物的重要功能之一^[10]。然而, 由于沉水植物生长形态差异对功能的影响远大于物种多样性, 因此研究功能性状与溶解氧浓度提升之间的关系, 有利于沉水植物群落的构建和管理^[11, 12]。以往的研究虽然关注了沉水植物功能性状与氮、磷营养盐之间的关系^[13-16], 但尚未关注功能性状与水体溶解氧的关系。

沉水植物是在水下进行光合作用的^[17], 产生的氧气一部分通过植冠释放进入水柱, 一部分通过根系分泌到沉积物中^[7, 18, 19], 植冠和根系的功能性状差异将会影响释放到水柱和沉积物的氧气量和溶解氧的作用范围。底层型沉水植物^[20]生物量多贴近沉积物附近, 一般具有相对较多的根; 冠层型沉水植物生物量多集中在水面附近, 植冠大, 一般根较少^[21]。本文假设: 底层型沉水植物在沉积物-水

收稿日期: 2023-04-26; 修订日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(32171534和32001157); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2022C02038) 资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32171534 and 32001157); Zhejiang Province “Spearhead” and “Leading Wild Goose” Research and Development Project (2022C02038)]

作者简介: 李华歆(1994—), 女, 硕士研究生; 主要从事水生植物生态学研究。E-mail: lihuaxincq@foxmail.com

通信作者: 关保华, E-mail: bhguan@niglas.ac.cn

界面释放氧气, 提高沉积物溶解氧浓度, 对沉积物理化性质影响较大; 冠层型沉水植物在水柱上层释放氧气, 提高水柱中溶解氧浓度, 对水柱水质影响较大。为验证以上假设, 本研究分别以刺苦草(*Valisneria spirulosa* Yan)代表底层型沉水植物, 以穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)代表具根的冠层型沉水植物, 以黑藻[*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle]代表少根的沉水植物, 在相同的生长条件下, 测定功能性状差异, 以及水体和沉积物理化性质的变化, 以期深入理解不同功能性状的沉水植物对溶解氧的影响及其环境效应, 为改善富营养化湖泊溶解氧下降问题中沉水植物的群落功能性状配置提供精准指导。

1 材料与方法

1.1 实验设置

实验在中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统野外观测站东山分站(120°25'17.23"E, 31°2'0.75"N)完成, 实验从2021年8月16日开始, 在2021年10月13日结束。实验用沉水植物来自于该站周边池塘。选取带有根系的单株(去掉克隆植株或分枝)刺苦草、黑藻和穗花狐尾藻, 在具有底泥的圆形桶内预培养1周左右。在实验开始时, 从预培养桶内挑选健壮且株高一致的刺苦草[株高(35.10±4.10) cm; 单株鲜重(8.26±0.36) g; 叶片数10.50±1.60; 根冠比为0.13]、黑藻[株高(25.60±5.70) cm; 单株鲜重(1.53±0.27) g; 分枝数4.30±1.80; 无根]和穗花狐尾藻[株高(47.50±7.00) cm; 单株鲜重(3.36±0.29) g; 无分枝; 根冠比为0.04]进行种植。

实验在东山站户外水泥池中进行, 水泥池长100 m, 宽50 m。水泥池仅作为摆放实验桶的场所并起到一定的降温作用, 其水位维持在50 cm左右, 不超过实验桶, 不影响实验结果^[22]。在水泥池中心位置(避免水泥池壁遮挡阳光)放入16个大塑料桶, 容积为300 L(高84 cm, 上直径74 cm, 下直径60 cm), 分两排间隔20 cm放置。抽取周边池塘的水, 经超滤网(80目)过滤后盛入大塑料桶中, 水深保持74 cm, 当蒸发导致水位下降时, 补充抽滤后的水。实验用水总氮和总磷的初始值分别为(0.45±0.04) mg/L和(14.51±0.60) μg/L。实验共4个组, 每组4个重复, 分别为空白对照组、刺苦草组、黑藻组和穗花狐尾藻组。为了取样方便, 在大桶中不铺设底泥, 但在每个大桶中分别放置2个塑料小桶(高38 cm, 上直径30 cm, 下直径27 cm, 体积20 L)。实验开始时(2021年8月16日), 采集周边池塘的底泥, 晾晒3d, 加水过筛混匀后铺设10 cm到小塑料桶底部。底泥初

始TC含量为(9.44±0.06) mg/g, TN(1.13±0.01) mg/g, TP(0.46±0.01) mg/g, 铝Al(54.97±0.31) mg/g, 铁Fe(30.56±0.35) mg/g, 钙Ca(6.95±0.05) mg/g, 锰Mn(0.54±0.01) mg/g, 锌Zn(0.06±0.00) mg/g。每个小桶种植3株植物, 呈三角形均分小桶空间, 植物下部插入底泥。

1.2 实验方法

实验室测量水中的TN、TP和叶绿素 a (Chl. a)浓度。TN经碱性过硫酸钾法测定, TP经钼酸铵法测定, Chl. a 运用多段分光光度法测定。选取3个连续晴天(2021年9月3日—9月5日, 水温在28—33℃), 使用YSI在凌晨5:00(日出时间5:30左右)至傍晚19:00(日落时间18:30左右)每隔2h测量水中溶解氧、电导率、温度和pH。测量时将YSI(Pro Plus)探头放入水面以下25—30 cm的位置, 稳定1—2min后记录数据。测量溶解氧时, 刺苦草、黑藻和穗花狐尾藻平均生物量(鲜重)分别为680.48、555.25和194.16 g/m²。

在实验结束时, 选择晴天, 在13:00(植物光合作用达到最强时)左右测量沉积物溶解氧。将便携式溶氧仪(JPB-607A型, 上海仪电科学仪器股份有限公司)的探针从植物根际插入沉积物, 从沉积物表层0 cm开始, 每隔2 cm做一次记录。利用带刻度水枪抽取表层沉积物(0—2 cm), 装入50 mL离心管, 以4000 r/min转速, 离心20 min, 将上清液经过0.45 μm玻璃纤维膜过滤^[23]后获得沉积物间隙水, 用于测量间隙水溶解性总磷(TDP)浓度。另取一部分沉积物冷冻干燥后磨碎, 测定TN、TP和TC及与磷的沉积关系密切多价态金属元素^[24]的含量。TN和TC含量通过元素分析仪(Euro Vector-EA3000, 意大利)测定, TP和金属元素含量通过电感耦合等离子体发射光谱仪(Leeman-Prodigy, 美国)测定。

收获植物, 自来水冲洗干净之后, 用慢性滤纸吸取植物表面水分, 测量其株高、根长和生物量(鲜重, 烘干后测干重)等形态指标。为避免重叠, 将植株叶片和根系展开, 利用扫描仪(EPSON Expression 12000XL-J331B, 日本精工爱普生株式会社)扫描叶片和根, 利用专业软件WinRHIZO统计植株总叶面积和总根长。使用表1中的公式计算比叶面积、比根长、相对生长速率、根冠比和叶面积指数等指标。

1.3 统计分析

各组间实验结束时水中TN、TP、Chl. a 、间隙水TDP和植物各指标, 以及沉积物TN、TP、TC和总Fe均用单因素方差(One-way-ANOVA)分析, 各处理差异性比较用LSD法。1d内不同时段水中溶

表 1 植物指标计算公式

Tab. 1 Calculation formulas of plant index

公式Formula	说明Instruction	参考文献Reference
$SLA(m^2/g) = \frac{LA}{LB}$	比叶面积Specific leaf area (SLA, m^2/g) 单株叶面积Leaf area per plant (LA, m^2) 叶生物量(干重)Leaf biomass (dry weight; LB, g)	[25]
$SRL(m/g) = \frac{RL}{RB}$	比根长Specific root length (SRL, m/g) 根长Root length (RL, m) 根生物量(干重)Root biomass (dry weight; RB, g)	[26]
$RGR(\%) = \frac{\ln(W_2) - \ln(W_1)}{t_2 - t_1} \times 100$	相对生长速率Relative growth rate (RGR, %) 初始植物干重Plant dry weight at start (W_1 , g) 收获时植物干重Plant dry weight at end (W_2 , g) 实验开始时间Start time (t_1 , d) 实验结束时间End time (t_2 , d)	[27]
$RSR(g/g) = \frac{RB}{SB}$	根冠比Root shoot ratio (RSR, g/g) 地下生物量(干重)Root biomass (dry weight; RB, g) 地上生物量(干重)Shoot biomass (dry weight; SB, g)	[28]
$LAI(m^2/m^2) = \frac{TLA}{SA}$	叶面积指数Leaf area index (LAI, m^2/m^2) 叶片总面积Total leaf area (TLA, m^2) 底泥面积Soil area (SA, m^2)	[29]

解氧和不同深度沉积物溶解氧数据利用一般线性模型进行重复测量方差分析(Repeated Measurement ANOVAs)。以上统计分析均使用SPSS.26软件进行处理。在方差分析前,数据均通过正态分布和方差齐性检验。显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 植物功能性状差异

植物叶和根特征 黑藻的比叶面积(图 1A)显著大于刺苦草和穗花狐尾藻($P<0.05$),刺苦草也显著大于穗花狐尾藻($P<0.05$)。黑藻叶面积指数(图 1B)最高,刺苦草略低,二者均显著大于穗花狐尾藻($P<0.05$)。黑藻根极少,无法计算根相关的指标。刺苦草比根长高于穗花狐尾藻但无显著差异(图 1C; $P>0.05$),但单株总根长显著高于穗花狐尾藻(图 1D; $P<0.05$)。

植物生长差异 三种沉水植物株高之间存在显著差异(图 2A; $P<0.01$),穗花狐尾藻>黑藻>刺苦草。刺苦草根冠比显著大于穗花狐尾藻(图 2B; $P<0.05$)。初始种植生物量最低的黑藻,在最终收获时反而净增长最多,最终的总生物量最高,刺苦草次之,穗花狐尾藻的净增长量和总生物量都最低

(图 2C)。黑藻的相对生长速率(RGR)最高,显著高于刺苦草和穗花狐尾藻($P<0.05$);穗花狐尾藻相对生长速率也显著高于刺苦草(图 2D; $P<0.05$)。

2.2 不同功能型沉水植物对水柱和沉积物溶解氧的影响

种植3种植物和无植物的对照组,水中溶解氧浓度均在日出后逐渐增加,日落时达到高峰,此后再下降(图 3A),但种植沉水植物的实验组水中溶解氧浓度均显著高于空白对照组($P<0.05$)。其中,黑藻处理组溶解氧浓度显著高于其他两种植物组($P<0.05$)。穗花狐尾藻组水中溶解氧浓度也显著高于底层型沉水植物刺苦草组($P<0.05$)。图 3A左上角显示了水柱中电导率和pH在1d中的变化趋势,从中可以看出,种植黑藻的水体中pH较高,而电导率则明显低于其他处理组。

在实验结束时测量植物根际的沉积物溶解氧浓度,穗花狐尾藻组、黑藻组和空白对照组沉积物溶解氧浓度随深度发生极小的变化,两种冠层型植物组沉积物溶解氧浓度甚至在2 cm以上深度还略低于对照组(图 3B)。刺苦草组沉积物中溶解氧浓度在6 cm深度之前显著大于冠层型植物组和对照组($P<0.05$),但溶解氧浓度随沉积物深度增加逐渐下降,到6 cm深度后与其他组相同。

2.3 水和沉积物变化

水质理化指标 各组别初始水柱TP含量一致(图 4A),实验结束时与初始相比,空白组、刺苦草组、黑藻组和穗花狐尾藻组分别降低20.30%、30.46%、50.76%和77.83%。在实验结束时,植物组水柱中TP浓度均低于对照组;其中,穗花狐尾藻组显著低于刺苦草组和空白组($P<0.05$),而黑藻组低于刺苦草组但差异不显著($P>0.05$),刺苦草组与对照组无显著性差异($P>0.05$)。水柱TN含量在实验开始时均为0.45 mg/L(图 4B),实验结束时与初始相比空白组、刺苦草组、黑藻组和穗花狐尾藻组分别降低1.56%、5.56%、7.84%和9.18%,但各处理组之间没有显著性差异(图 4B; $P>0.05$)。在实验开始时水中大部分藻类被过滤掉,因此水柱Chl.a仅为0.66 $\mu g/L$,实验结束时与初始相比空白组、刺苦草组、黑藻组和穗花狐尾藻组分别上升了109.07%、65.41%、84.40%和49.74%,各处理之间也没有显著性差异(图 4C; $P>0.05$)。

沉积物理化指标 在实验结束时,刺苦草组间隙水TDP浓度最低(图 5A),穗花狐尾藻组最高,空白组高于黑藻组,但各处理组之间没有显著差异($P>0.05$)。沉积物TP含量与初始相比,空白组、刺苦草组、黑藻组和穗花狐尾藻组分别下降了3.60%、

2.68%、5.10%和0.78% (图 5B), 但实验结束时各处理组没有显著差异。沉积物TN含量与初始相比, 空白组、刺苦草组、黑藻组和穗花狐尾藻组分别下降了10.17%、17.26%、10.46%和6.25% (图 5C), 刺苦草组显著低于穗花狐尾藻组($P<0.05$)。实验结束沉积物TC含量与初始相比, 空白组和刺苦草组分别下降3.45%和5.33% (图 5D), 而黑藻组和穗花狐尾藻组反而分别上升了1.35%和4.12%。在实验结束时, 空白组和刺苦草组显著低于穗花狐尾藻组($P<0.05$)。沉积物总Fe含量实验结束时与初始相比, 空白组、刺苦草组、黑藻组和穗花狐尾藻组分别上升了1.71%、10.74%、1.12%和0.77% (图 5E), 实验结束时刺苦草组显著高于其他处理组($P<0.01$)。植物处理组其他金属元素浓度略低于空白组(图 5F), 各处理组之间没有显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 不同功能型沉水植物的增氧效应

沉水植物能够显著改善水质, 促进湖泊形成清

水态^[30]。这是一个复杂的过程, 包括促进营养物沉降、抑制营养物再悬浮等物理过程^[31]; 也包括直接抑制浮游植物生长, 以及庇护浮游动物, 促进其牧食作用从而间接抑制浮游植物等的生物过程^[32, 33]。最直接也最显著的是沉水植物在生长过程中通过生理活动和新陈代谢对水体产生的化学影响, 能显著影响水体离子浓度、pH和电导率等表征参数, 也极大改变碳、氮、磷、铁和锰等元素的地化循环过程^[34]。然而, 这些化学过程, 甚至包括部分生物和物理过程, 都或多或少, 或直接或间接地受到沉水植物释放到水体的溶解氧的影响^[35]。沉水植被区水柱中溶解氧浓度的昼夜差异可高达8 mg/L^[36]。在本研究中, 种植沉水植物的水柱中溶解氧浓度均高于对照组, 在1d的不同时段内, 黑藻组比对照组高出2—4 mg/L。

水中溶解氧浓度水平受制于氧气输入、生态系统呼吸水平及水体的溶解氧饱和度^[37, 38]。在日照时间内, 沉水植物是持续向水体增氧的, 实验系统的呼吸水平是相对固定的, 如果植物的释氧量足

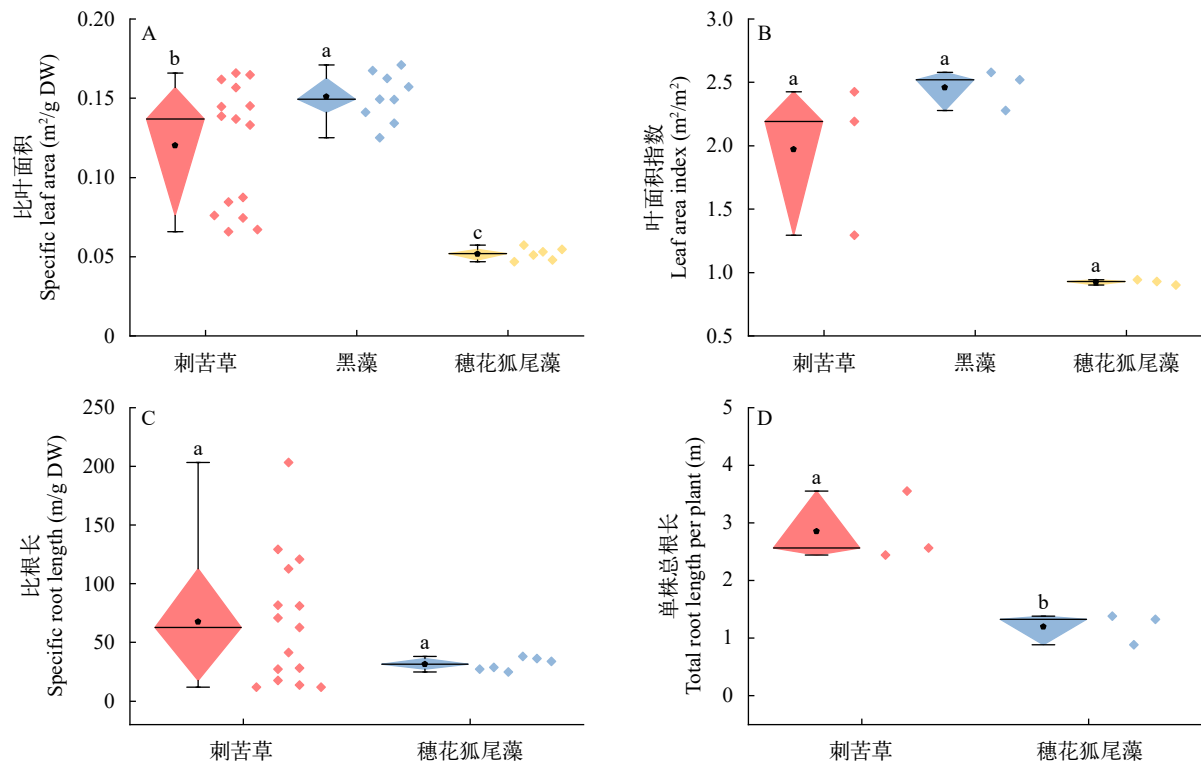


图 1 三种植物在收获时的比叶面积(A)、叶面积指数(B)、比根长(C)和单株总根长(D)

Fig. 1 Specific leaf area (A), leaf area index (B), specific root length (C) and total root length per individual (D) of the three plants at harvest

菱形箱线图内点表示均值点, 上、下短横线表示最大值、最小值, 菱形箱线图右边为数据点具体分布情况。图中字母a、b和c表示显著性差异, $P<0.05$ 时显著; 下同

The points inside the diamond box plot indicate the mean points, the upper and lower short horizontal lines indicate the maximum and minimum values, and the right side of the diamond box plot shows the specific distribution of data points. Letters a, b and c in the graph indicate significant differences ($P<0.05$). The same applies below

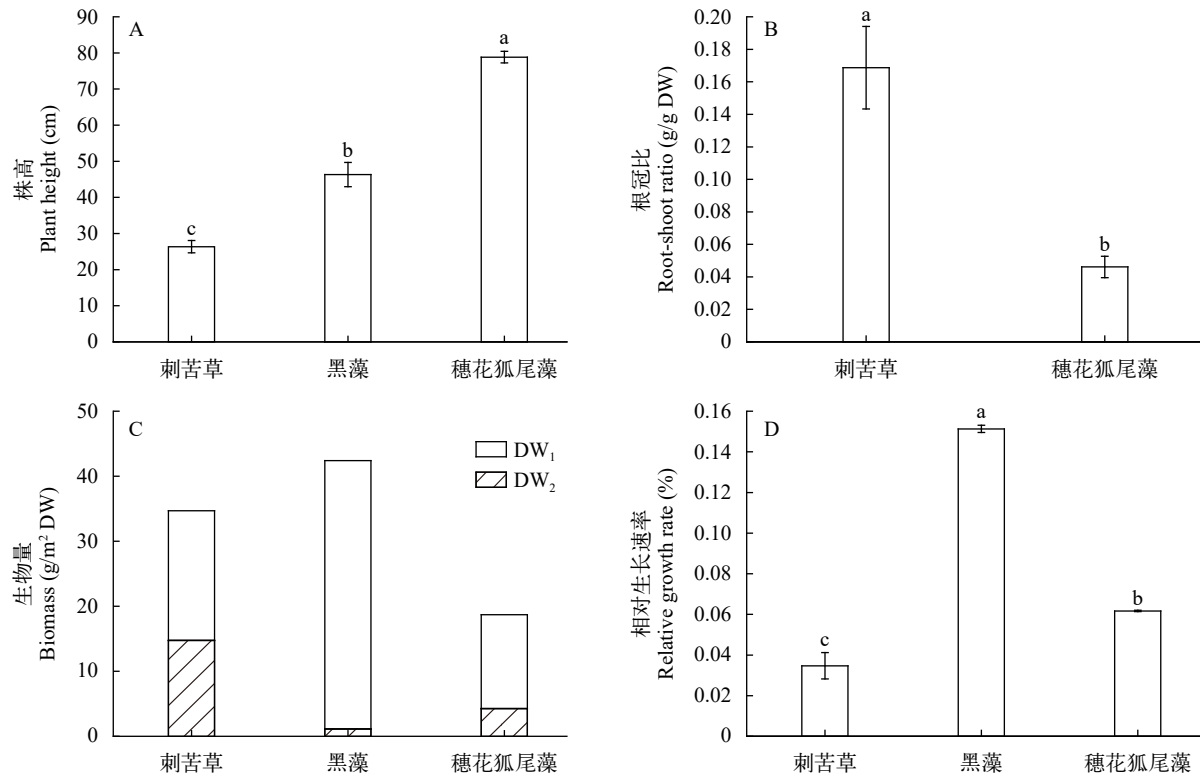


图2 三种植物的株高(A)、根冠比(B)、生物量(C)、和RGR(D, 相对生长速率)

Fig. 2 Plant height (A), root shoot ratio (B), biomass (C) and relative growth rate (RGR) (D) of the three plants

DW₁表示净增长生物量(干重), DW₂表示初始生物量(干重)

DW₁ represents the net increase biomass (dry weight) and DW₂ represents the initial biomass (dry weight)

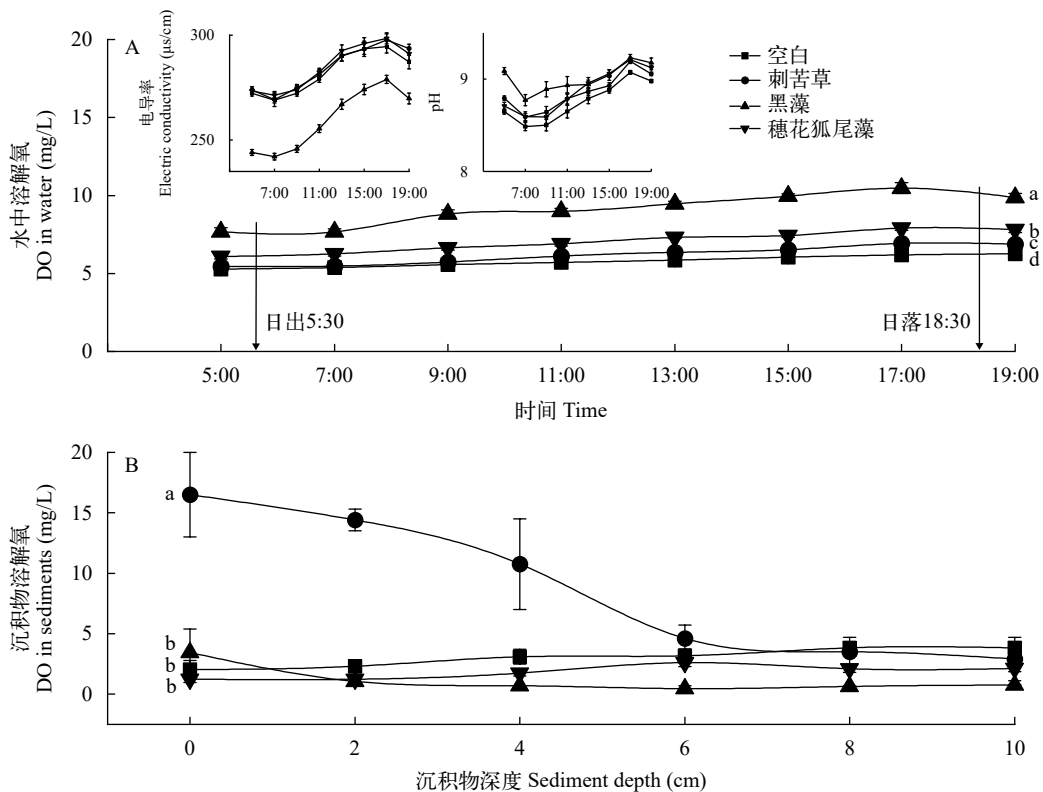


图3 各组水柱(A)和沉积物(B)中溶解氧浓度

Fig. 3 Dissolved oxygen in water column (A) and sediment (B) of each treatment

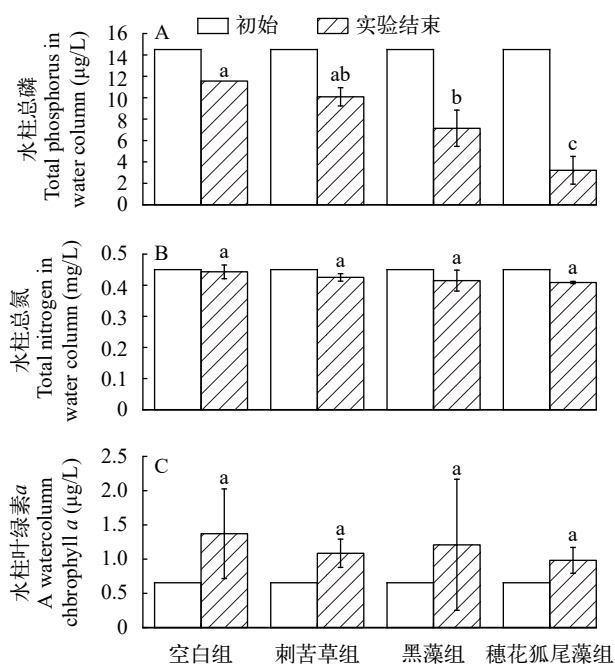


图4 各组水柱总磷(TP)(A)、总氮(TN)(B)和水柱叶绿素 a (Chl. a)(C)初始与实验结束对比柱状图

Fig. 4 Histograms of initial vs end-of-experiment comparison of water column TP (A), TN (B) and water column Chl. a (C) for each treatment group

够,理论上溶解氧应该会达到饱和状态。在标准大气压下,纯净水溶解氧饱和度主要受温度影响,温度越高饱和度越低^[39, 40]。本实验测量时间段内水温在28—33℃,对应纯净水溶解氧饱和度在7.83—7.18 mg/L^[39]。在1d的时间内,空白组和底层型刺苦草组溶解氧浓度均低于饱和溶解氧浓度7.18 mg/L,说明空白组和刺苦草组水中溶解氧尚处于不饱和状态。穗花狐尾藻组水中溶解氧浓度在下午17:00左右才接近饱和状态。冠层型黑藻组在上午9点至下午5点溶解氧浓度均大于对应最大饱和溶解氧浓度7.83 mg/L^[39],出现超饱和现象。这可能跟黑藻植冠功能性状(比叶面积和叶面积指数)远超过刺苦草和穗花狐尾藻,以及冠层贴近水面能够充分利用光能进行光合作用有关。水中溶解氧浓度的垂直变化与沉水植物冠层位置有关^[41],刺苦草株高显著低于穗花狐尾藻和黑藻。此外,黑藻组水体pH较高而电导率明显偏低(图4A)。这可能是黑藻强烈的光合作用消耗了大量的CO₂和HCO₃⁻,产生的CO₃²⁻与Ca²⁺离子结合形成了CaCO₃,导致水中离子浓度降低的缘故^[34]。水中离子浓度降低也能促进黑藻组水中溶解氧饱和度提升^[7, 42]。

维管植物也会氧化它们的根围。光合作用产生的氧气通过通气组织扩散到根部,随后扩散到表皮,进入沉积物。因此,根系相对发达的水生植物

对沉积物的氧化作用比较强。此外,贴地生长的叶片释放的氧气也能参与沉积物表层氧化^[36]。在本研究中,生物量集中在沉积物附近的刺苦草具有较高的比根长、根冠比和单株总根长,能够向沉积物输送氧气。但由于根长一般仅有2—10 cm,输送的氧气进入沉积物的深度有限^[36],因此,仅能在刺苦草根区6 cm以内的深度测出明显较高的溶解氧浓度。穗花狐尾藻虽然也有不少根,但其根区沉积物溶解氧浓度比对照还低,推测其根系泌氧作用有限。黑藻几乎无根,对沉积物释氧作用也极弱。黑藻和穗花狐尾藻都具有多而且细碎的叶片,生长过程中会有更新^[43]。在实验结束时,种植黑藻和穗花狐尾藻的沉积物表层总碳量增加,很可能是衰亡的叶片堆积在沉积物表面,反而引起了表层沉积物缺氧。

总而言之,本实验的结果显示,大量生物量贴近水面的冠层型沉水植物释放到水柱中的氧气比较多,对水中增氧作用明显,但对沉积物增氧作用较小。而生物量贴近沉积物的底层型沉水植物对水中增氧作用较小,但对沉积物增氧作用明显。

3.2 不同功能型沉水植物增氧的环境效应

沉水植物的增氧具有重要的生物地球化学效应,也能引起生态系统组分发生改变。水中的还原性金属离子会被迅速氧化,与无机磷结合后沉降,是水中磷浓度下降的一个重要原因^[5, 44]。但是,水中金属离子浓度通常较低^[45],而1 mol的DO能氧化4 mol金属离子(如Fe²⁺),因此,只需要很少的溶解氧就能够将水中大部分的低价金属离子氧化,并与相应数量的磷结合沉淀;当水中低价态金属离子大部分被氧化后,溶解氧浓度增加就不再跟磷浓度表现出相关关系。水中总磷浓度降低的另一个更重要的原因是沉水植物的吸收作用^[46]。穗花狐尾藻叶片同化磷的能力高于苦草和黑藻^[47],能够从水中吸收更多的磷用于自身生长,这可能就是黑藻水中DO浓度最高,但TP浓度依然高于穗花狐尾藻的原因。沉水植物的增氧还导致叶片周围硝化作用增强,远离叶片的部分则存在反硝化脱氮作用,从而有效降低氨氮和总氮浓度^[32]。增氧作用也能降低温室气体排放量,每1 mol的DO能氧化0.30 mol NH₄-N或0.60 mol CH₄^[8]。营养盐浓度的降低抑制了藻类的生长,因此Chl. a 浓度也较低^[48]。

沉水植物对沉积物的增氧作用影响更大,因为沉积物中还原物质更多更复杂。铁结合态磷(Fe-P)是沉积物中磷的重要组成部分,在氧化环境下磷伴随着铁的沉淀进入沉积物中^[44, 49],避免底层磷向上释放^[36]。与本研究结果一致,底层型刺苦草根区沉

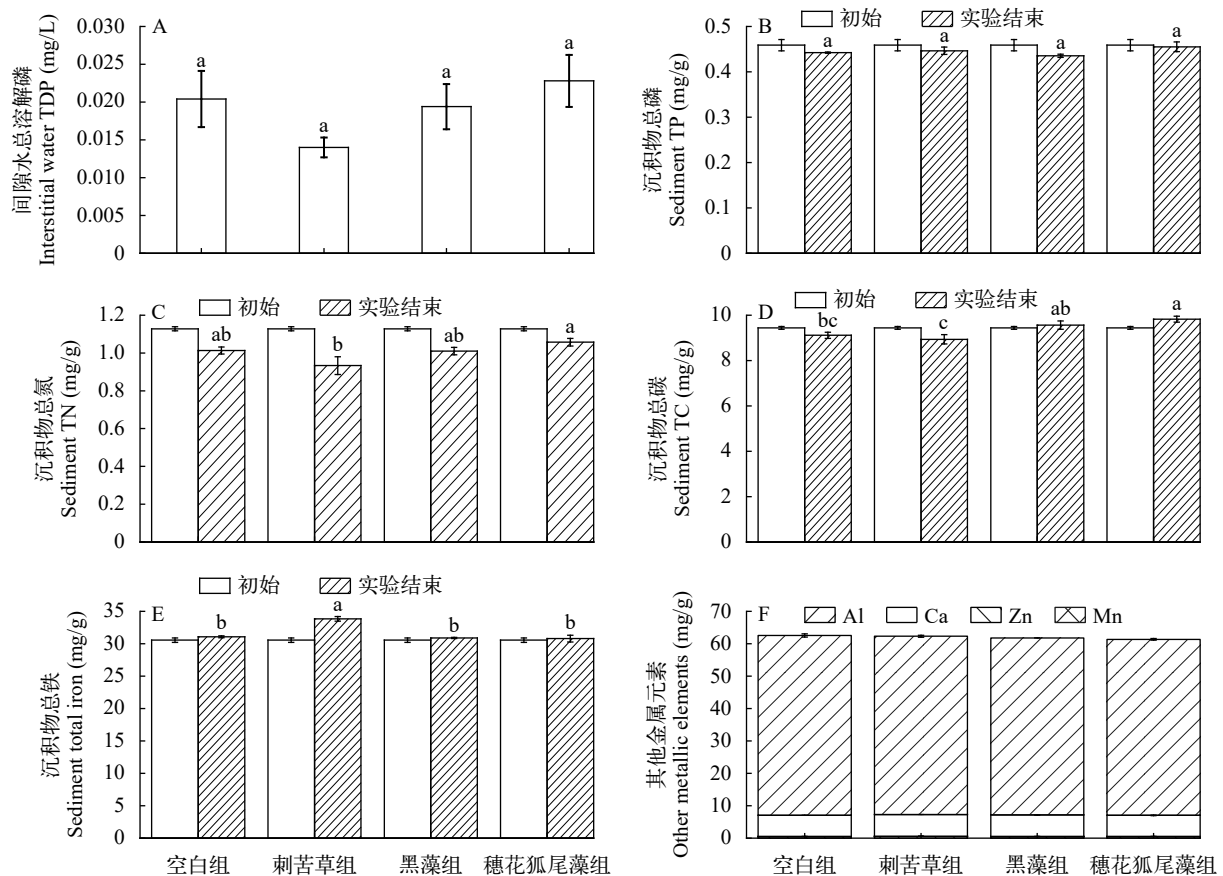


图5 间隙水总溶解磷(TDP)(A)、沉积物总磷(TP)(B)、总氮(TN)(C)、总碳(TC)(D)、总铁(E)和其他金属元素含量(F)

Fig. 5 Contents of interstice water TDP (A), sediment total phosphorus (B), total nitrogen (C), total carbon (D), total iron (E) and other metal elements (F)

积物DO浓度最高, 沉积物Fe含量最高(总铁增加量是其他处理的6倍以上), 沉积物TP下降少。当然, 根生型沉水植物主要靠根部从间隙水中吸收营养盐^[46], 这可能是间隙水TDP降低的原因。沉水植物增氧对沉积物有机碳和氮的影响也很大, 能促进有机质降解和脱氮作用^[43, 50, 51]。能够为沉积物增氧的刺苦草组沉积物中TN和TC都下降较多, 对沉积物没有增氧作用的黑藻和穗花狐尾藻组TN下降较少, TC不降反增。然而, 各处理组差异并不显著, 其他金属元素也没有表现出明显趋势, 这可能还是因为种植密度比较低, 刺苦草的增氧作用相对于沉积物庞大的还原物质库来说只是杯水车薪的缘故。

沉水植物的增氧作用不但能改变水柱和沉积物的理化性质, 也能引起生物群落发生变化。微生物群落响应最快, 物种多样性和好氧菌群都会增加^[52]。也能支持更多的水生动物进行呼吸作用^[17, 18]。此外, 在复杂的野外条件下, 高密度的沉水植物还能改变水体温度、改变水流和消光等作用, 能够放大或削弱沉水植物的增氧作用, 为水生生物创造多样化的栖息环境, 有利于水生生态系统多样性提高。

4 结论

本文的实验结果表明, 具有发达根系、生物量贴近沉积物的底层型沉水植物刺苦草对沉积物的增氧作用较强, 改变间隙水和沉积物中营养盐浓度和金属离子的含量; 冠层发达、生物量贴近水面生长的冠层型沉水植物黑藻对水柱增氧作用较强, 降低水中营养盐浓度。冠层型沉水植物穗花狐尾藻虽然也有根, 但其跟黑藻一样, 仅对水柱有增氧作用。因此, 在进行水体生态修复时, 考虑沉水植物功能型的差异, 释放到水中和沉积物的氧气位置和量不同, 建议对底层型沉水植物和冠层型沉水植物进行合理搭配, 打造立体增氧沉水植物群落, 使水柱上层到沉积物表层均能获得足够的氧气, 整体提升水质, 有利于长期稳定维持湖泊的清水态, 也有利于提高水生生态系统多样性。

参考文献:

- [1] Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M, *et al.* Widespread deoxygenation of temperate lakes [J]. *Nature*, 2021(594): 66-70.
- [2] Schindler D E. Warmer climate squeezes aquatic preda-

- tors out of their preferred habitat [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, **114**(37): 9764-9765.
- [3] Schmidt S, Stramma L, Visbeck M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades [J]. *Nature*, 2017(542): 335-339.
- [4] Liu X, Huang T, Li N, *et al.* Algal bloom and mechanism of hypoxia in the metalimnion of the Lijiahe Reservoir during thermal stratification [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2258-2264. [刘雪晴, 黄廷林, 李楠, 等. 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 [J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2258-2264.]
- [5] Pei J, Feng M. Effects of environmental factors on the release of nitrogen and phosphorus from the sediment of the Yanming Lake, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(12): 3447-3459. [裴佳瑶, 冯民权. 环境因子对雁鸣湖沉积物氮磷释放的影响 [J]. 环境工程学报, 2020, **14**(12): 3447-3459.]
- [6] Rogener M K, Hunter K S, Rabalais N N, *et al.* Pelagic denitrification and methane oxidation in oxygen-depleted waters of the Louisiana shelf [J]. *Biogeochemistry*, 2021, **154**(2): 231-254.
- [7] Liu M, Ran Y, Peng X, *et al.* Sustainable modulation of anaerobic malodorous black water: the interactive effect of oxygen-loaded porous material and submerged macrophyte [J]. *Water Research*, 2019(160): 70-80.
- [8] Kalff J. *Limnology: Inland Water Ecosystems* [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002: 231-233.
- [9] Wang Y W, Li Y H, Zhang B, *et al.* Structural characteristics of zooplankton and phytoplankton communities and its relationship with environmental factors in different regions of Nanhu Lake in Jiaxing city [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3106-3117. [王雅雯, 李迎鹤, 张博, 等. 嘉兴南湖不同湖区浮游动植物群落结构特征与环境因子关系 [J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3106-3117.]
- [10] Wang L, Wu X, Song H, *et al.* Effect of environmental factors on phosphorus transformation during the growth of submerged macrophytes [J]. *Sn Applied Sciences*, 2023, **5**(4): 2523-3963.
- [11] Hilt S, Alirangues N M M, Bakker E S, *et al.* Response of submerged macrophyte communities to external and internal restoration measures in north temperate shallow lakes [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018(9): 194.
- [12] Dalla Vecchia A, Villa P, Bolpagni R. Functional traits in macrophyte studies: current trends and future research agenda [J]. *Aquatic Botany*, 2020(167): 103290.
- [13] Zhang Q, Liu Y P, Luo F L, *et al.* Does species richness affect the growth and water quality of submerged macrophyte assemblages [J]? *Aquatic Botany*, 2019(153): 51-57.
- [14] Hu A, Li Y, Yang Y, *et al.* Effects of different growth from submerged macrophyte assemblages on biomass accumulation and water purification [J]. *Journal of Lake Science*, 2022, **34**(5): 1484-1492. [胡傲, 李宇辉, 杨予静, 等. 不同生长型沉水植物配置对生物量积累和水质净化效果的影响 [J]. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1484-1492.]
- [15] Sang Y X, Yang J L, Xiong Y, *et al.* Comparative phosphorus accumulation and Ca-P content of two submerged plants in response to light intensity and phosphorus levels [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2698-2705. [桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 等. 不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较 [J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2698-2705.]
- [16] Zhao Y, Guan B, Yin C, *et al.* Water quality profits by the submerged macrophyte community consisting of multi-functional species-rich groups [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(850): 157847.
- [17] Deng J Y, Gao X Y, Shan H, *et al.* The measurement of photosynthetic parameters of submersed macrophytes with aims to explore the plant distribution depth in Erhai Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(7): 1157-1167. [邓嘉懿, 高晓钰, 单航, 等. 洱海沉水植物的光合特性与分布水深的关系 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(7): 1157-1167.]
- [18] Fu F, Huang S, Yuan J, *et al.* Effect evaluation of remediation in three typical rivers with *Vallisneria spiralis* under different pollution and spatial characterization of functional microorganisms [J]. *Ecological Engineering*, 2021(171): 106353.
- [19] Yang F, Xiao K, Pan H, *et al.* Chloroplast: the emerging battlefield in plant-microbe interactions [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021(12): 637853.
- [20] Fu H, Yuan G, 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] Van T K, Wheeler G S, Center T D. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria spiralis* as influenced by soil fertility [J]. *Aquatic Botany*, 1999, **62**(4): 225-233.
- [22] Zhang X, Zhen W, Jensen H S, *et al.* The combined effects of macrophytes (*Vallisneria spiralis*) and a lanthanum-modified bentonite on water quality of shallow eutrophic lakes: a mesocosm study [J]. *Environmental Pollution*, 2021(277): 116720.
- [23] Liu M, Yuan J L, Lian Q P, *et al.* Effects of inner-circulation pond aquaculture on distribution and release flux of phosphorus in the overlaying-sediment-interstitial water [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(5): 1045-1056. [刘梅, 原居林, 练青平等. 池塘内循环流水养殖模式对养殖塘上覆水-沉积物-间隙水磷时空分布特征及释放通量的影响 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(5): 1045-1056.]
- [24] Saha A, Vijaykumar M E, Das B K, *et al.* Geochemical distribution and forms of phosphorus in the surface sediment of Netravathi-Gurupur estuary, southwestern coast

- of India [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023(187): 114543.
- [25] Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **70**(1): 29-51.
- [26] Boot R G A, Mensink M. Size and morphology of root systems of perennial grasses from contrasting habitats as affected by nitrogen supply [J]. *Plant and Soil*, 1990, **129**(2): 291-299.
- [27] Miyashita A, Tateno M. A novel index of leaf RGR predicts tree shade tolerance [J]. *Functional Ecology*, 2014, **28**(6): 1321-1329.
- [28] Jia J, Li C, Chang Z. Soil texture rather than water potential determines the root: shoot ratio in ryegrass and alfalfa [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, **23**(1): 1297-1305.
- [29] Korlyakov K A, Nokhrin D Y. Specific surface area and biomass of zoophytes in different waterbodies of the southern trans-Ural region [J]. *Inland Water Biology*, 2011, **4**(3): 327-331.
- [30] Li Y, Wang L, Chao C, *et al.* Submerged macrophytes successfully restored a subtropical aquacultural lake by controlling its internal phosphorus loading [J]. *Environmental Pollution*, 2021(268): 115949.
- [31] Su H, Chen J, Wu Y, *et al.* Morphological traits of submerged macrophytes reveal specific positive feedbacks to water clarity in freshwater ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(684): 578-586.
- [32] Long Y, Hu X, Jiang J, *et al.* Phosphorus sorption-Desorption behaviors in the sediments cultured with *Hydrilla verticillata* and *Scripus triquetus* as revealed by phosphorus fraction and dissolved organic matter [J]. *Chemosphere*, 2021(271): 129549.
- [33] Riis T, Tank J L, Reisinger A J, *et al.* Riverine macrophytes control seasonal nutrient uptake via both physical and biological pathways [J]. *Freshwater Biology*, 2020, **65**(2): 178-192.
- [34] Wang J, Zhang S, Que T, *et al.* Mitigation of eutrophication in a shallow lake: the influences of submerged macrophytes on phosphorus and bacterial community structure in sediments [J]. *Sustainability*, 2021, **13**(17): 9833.
- [35] Ni M, Liang X, Hou L, *et al.* Submerged macrophytes regulate diurnal nitrous oxide emissions from a shallow eutrophic lake: A case study of Lake Wuliangshai in the temperate arid region of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(811): 152451.
- [36] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes [J]. *Aquatic Botany*, 1986(26): 341-370.
- [37] Yang C, Shi Z, Jiao C, *et al.* Analysis of temporal variation of dissolved oxygen and its main influencing factors in the Lugu Lake from 2013 to 2020 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, **38**(4): 139-145. [杨春艳, 施择, 焦聪颖, 等. 2013—2020年泸沽湖溶解氧随时间变化规律及主要影响因素分析 [J]. 中国环境监测, 2022, **38**(4): 139-145.]
- [38] Sharma A, Devi I. A sustainable biosorption technique for treatment of industrial wastewater using snail shell dust (*Bellamya bengalensis*) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, **195**(3): 1-14.
- [39] Benson B B, Krause D Jr. The concentration and isotopic fractionation of gases dissolved in freshwater in equilibrium with the atmosphere. 1. Oxygen [J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, **25**(4): 662-671.
- [40] Hu P, Yang Q, Yang Z, *et al.* Experimental study on dissolved oxygen content in water and its physical influence factors [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(6): 679-686. [胡鹏, 杨庆, 杨泽凡, 等. 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究 [J]. 水利学报, 2019, **50**(6): 679-686.]
- [41] Frodge J D, Thomas G L, Pauley G B. Effects of canopy formation by floating and submergent aquatic macrophytes on the water quality of two shallow Pacific Northwest Lakes [J]. *Aquatic Botany*, 1990, **38**(2/3): 231-248.
- [42] Zhang Y, Yang P H, Wang J L, *et al.* Diurnal variations and hydrochemical comparisons of Anartificial Lake in winter and summer, a case of Chongde Lake in Southwest University [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2016, **38**(6): 92-98. [张宇, 杨平恒, 王建力等. 小型人工湖泊水体地球化学冬夏昼夜变化对比研究——以西南大学崇德湖为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, **38**(6): 92-98.]
- [43] Atapaththu K S S, Parveen M, Asaeda T, *et al.* Growth and oxidative stress response of aquatic macrophyte *Myriophyllum spicatum* to sediment anoxia [J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2018, **191**(4): 289-298.
- [44] Wen S L, Liu J J, Dai J R, *et al.* Iron(hydr) oxides mediated immobilization and interaction of dissolved organic matter and inorganic phosphate: a review [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(5): 1428-1440. [文帅龙, 刘静静, 戴家如, 等. 铁(氢)氧化物介导的溶解性有机质、无机磷的固定及相互作用研究进展 [J]. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1428-1440.]
- [45] Zhong Z, Qiu S, Qian K, *et al.* Study of acoustic environment as well as metal ions of drinking water and surface water in Jiangxi university of Chinese medicine [J]. *Biological Disaster Science*, 2021, **44**(3): 321-326. [钟志清, 邱受亮, 钱坤, 等. 声环境、饮用水及地表水中金属离子的调查研究——以江西中医药大学为例 [J]. 生物灾害科学, 2021, **44**(3): 321-326.]
- [46] Carignan R, Kalff J. Phosphorus sources for aquatic weeds: water or sediments [J]? *Science*, 1980, **207**(4434): 987-989.
- [47] Li X Y, Wang R K, Zeng Z M, *et al.* Nitrogen and phosphorus contents of submerged plants above substrate in

- shallow region of Qionghai Lake and around constructed wetlands [J]. *Wetland Science*, 2019, **17**(6): 663-669. [李小艳, 王荣坤, 曾正明, 等. 邛海浅水湖带及其附近人工湿地中沉水植物底质以上植株中氮和磷含量 [J]. 湿地科学, 2019, **17**(6): 663-669.]
- [48] Li S Q, Shi X F, Li J F, *et al.* Growth differences between *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum spicatum* and the effects on water environment in newly built water supply lakes in Changshu city [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(7): 1139-1147. [李诗琦, 施学峰, 李俊峰, 等. 常熟新建水源地湖泊轮叶黑藻和穗状狐尾藻的生长差异及对水环境的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(7): 1139-1147.]
- [49] Limmer M A, Evans A E, Seyfferth A L. A new method to capture the spatial and temporal heterogeneity of aquatic plant iron root plaque in situ [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(2): 912-918.
- [50] Zhao Y, Chang L, Li Y, *et al.* High-gravity photocatalytic degradation of tetracycline hydrochloride under simulated sunlight [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023(53): 103753.
- [51] Tang H, Ma Z, Qin Y, *et al.* Pilot-scale study of step-feed anaerobic coupled four-stage micro-oxygen gradient aeration process for treating digested swine wastewater with low carbon/nitrogen ratios [J]. *Bioresource Technology*, 2023(380): 129087.
- [52] Ang Z Q, Sun X J, Cao X Y, *et al.* Diversity and network structure of epiphytic bacterial communities on different submerged macrophytes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(4): 1234-1249. [昂正强, 孙晓健, 曹新益等. 不同沉水植物叶片附着细菌群落多样性及网络结构差异 [J]. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1234-1249.]

DIFFERENT FUNCTIONAL TYPES OF SUBMERGED MACROPHYTES ON DISSOLVED OXYGEN AND ITS ENVIRONMENTAL EFFECTS

LI Hua-Xin^{1,2}, YIN Chun-Yu³, YANG Guo-Liang¹, CAI Ying⁴, HUANG Xiao-Long¹,
LI Kuan-Yi^{1,2} and GUAN Bao-Hua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Jian Qiao University Co, Shanghai 201306, China; 4. Jiangsu Environmental Engineering Technology Co., Nanjing 210019, China)

Abstract: The concentration of dissolved oxygen (DO) in lakes decreases due to eutrophication and climate warming. However, submerged macrophytes can release oxygen through photosynthesis, effectively increasing DO levels in lakes. The process can induce changes in the physicochemical properties of the water column and sediment, subsequently impacting the ecosystem. We conducted a mesocosm experiment to examine the differences in dissolved oxygen and related indexes in water column and sediment across different functional types of submerged macrophytes. *Valisneria spinulosa* was assigned to bottom-dwelling species, *Hydrilla verticillata* was assigned to less rooted canopy-forming species, while *Myriophyllum spicatum* was assigned to more rooted canopy-forming species. The results showed that significant differences in water column DO among treatment groups. The blank group had significantly lower water column DO compared to the plant treatment group, and it exhibited the least reduction in total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the water column. The specific leaf area, leaf area index, net growth biomass, total biomass, relative growth rate and water column DO of *H. verticillata* were the largest, which can effectively reduce the concentration of TP and TN in the water column. The plant height of *M. spicatum* was the highest, and its ability to elevate water column DO was significantly higher than that of spiny bittercress, with the greatest reduction in water column TP. *V. spinulosa* had the largest specific root length, total root length per individual and root shoot ratio among the 3 species. It significantly increased DO concentration in the sediment up to a depth of 6 cm. Additionally, *V. spinulosa* had the highest sediment iron content and the lowest sediment total nitrogen (TN), total carbon (TC) content and total dissolved phosphorus (TDP) in interstitial water. Therefore, we suggest diverse functional submerged macrophyte types were constructed in the restoration of eutrophic lakes, such as combining bottom-dwelling and canopy-forming species, since it would be conducive to the formation of clear water state.

Key words: Functional types; Submerged macrophytes; Dissolved oxygen; Environmental effects; Canopy; Root system