

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2012.00001

富营养化湖泊规模化种养的水葫芦与浮游藻类的相互影响

周庆 韩士群 严少华 宋伟 黄建萍

(江苏省农业科学院, 农业资源与环境研究所, 南京 210014)

THE MUTUAL EFFECT BETWEEN PHYTOPLANKTON AND WATER HYACINTH PLANTED ON A LARGE SCALE IN THE EUTROPHIC LAKE

ZHOU Qing, HAN Shi-Qun, YAN Shao-Hua, SONG Wei and HUANG Jian-Ping

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

关键词: 水葫芦; 浮游藻类; 多样性; 根系; 拦截

Key words: Water hyacinth; Planktonic algae; Diversity; Root system; Interception

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2012)04-0000-09

水葫芦(学名凤眼莲, *Eichhornia crassipes* Solms)是被公认为去除富营养化水体氮、磷效果较好的水生漂浮植物^[1-3],也是目前生态修复工程中应用较广的水生漂浮植物^[4]。随着《太湖流域控制性种养水葫芦技术规范》的出台,水葫芦安全控养模式在太湖流域的应用相对较为成熟。目前,研究者们对于水葫芦应用的顾虑由最初的影响航道和渔业的问题转向了威胁其他水生生物及其多样性的问题^[5]。有关大水面放养的水葫芦对底栖动物群落结构与多样性的影响已有报道^[6]。而浮游藻类是湖泊水生生物的重要组成部分,是食物链和营养结构的基础环节,有关水葫芦对浮游藻类及其多样性影响的研究较少,实验室研究主要集中在其种植水或提取的化感物质对微囊藻^[7]、集胞藻^[8]、栅藻^[9]、原甲藻^[10]等单个藻种的影响。而在巢湖源水预处理的0.006 km²植物塘中试研究^[11]、滇池晖湾圈养0.013 km²浮水植物去除水体污染物的工程试验^[12]、以及星云湖隔河湖湾0.2 km²漂浮植物除藻技术^[13]等大水面研究中,研究重点主要在水葫芦对水体理化性状的改善,而对浮游藻类的影响主要集中在藻细胞生物量上的变化。同时,在水华暴发期间生态修复工程中控养的水葫芦,其根系拦截的大量水华藻类是否会对水葫芦生长产生不利影响,这方面的研究也未见报道。

本文通过研究水葫芦修复富营养化水体过程中对浮游藻类群落结构与多样性的影响,分析水葫芦各生理指

标与根系拦截藻和各水体理化指标的相关性,初步探讨了富营养化湖泊中水葫芦与浮游藻类的相互影响,为进一步探明水葫芦对水体生物多样性的影响及其在生态修复工程中应用推广的可行性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点

由常州市农委组织实施的4 km²水葫芦控制性种养工程主要位于武进区西太湖水域,3月底、4月初开始逐步放养水葫芦种苗。本研究地点选在武进太湖竺山湾水域的水葫芦种养区(N 31°27'02.55"—31°27'29.23", E 120°04'05.17"—120°04'31.53"),水流方向是自东南向西北方向。此种种养区大小为360 m×100 m,临近武进区太滆村,附近有经营湖鲜味特色的大小餐饮数十家。每年8—9月出现藻类水华的暴发和消退。采样点位设置(图1),在非种养区[包括种养区上游P-(U)、种养区下游P-(D)]、种养区不同区域(P+: 1、2、3、4、5,其中2、3、4为种养区内部区域)各设3个采样点,种养区的每个采样点平行采集3个水样、植株样和根系洗脱样,而非种养区的每个采样点平行采集3个水样。

1.2 样品采集与处理方法

2009年7月水葫芦放养工作结束,待水葫芦适应水体环境后,从2009年8月初至9月底进行样品的连续采

收稿日期: 2011-05-26; 修订日期: 2012-03-07

基金项目: 江苏省农业科技自主创新项目(CX(11)4061)资助

作者简介: 周庆(1980—),女,江苏南京人;副研;主要从事水体藻类生态及微生物方面的研究。Tel: 025-84390241; E-mail: qqzhouqing@sina.com

通讯作者: 严少华, E-mail: shyan@jaas.ac.cn

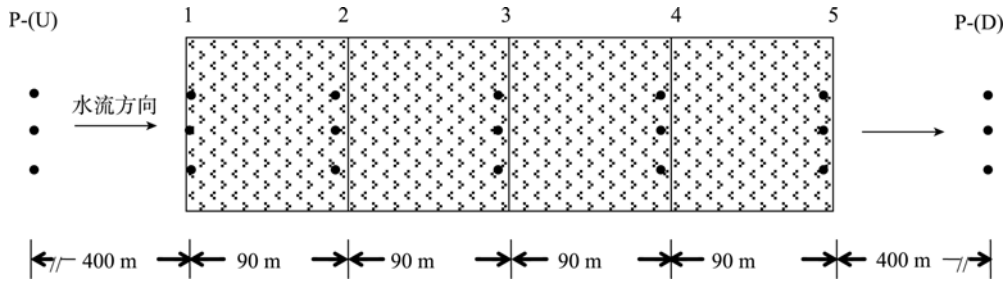


图 1 采样位置示意图

Fig. 1 Layout of sampling plots both inside and outside the cultivation area

集。水体浮游藻类定性样品用 25 号浮游生物网(64 μm) 采集, 定量样品采集表层 0.5 m 和 1 m 处的水层, 等量混合均匀后, 取 1 L 加鲁哥氏液(Lug's solution)固定, 沉淀 48h 后浓缩至 50 mL。根系拦截藻的采集, 采用软毛刷和无菌水刷洗水葫芦根系, 刷洗液连同软毛刷冲洗液一并收集, 定容至 1 L, 然后加入鲁哥氏液固定, 沉淀 48h 后浓缩至 50 mL。浮游藻类的计数和鉴定参照文献[14, 15]。根系刷洗后的整株水葫芦作为植株样带回实验室。

1.3 分析方法

水体TN含量, 采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[16]; TP含量, 采用过硫酸钾消解-钼锑抗比色法测定^[17]; DO含量, 采用JPB-607型便携式溶氧仪测定; pH, 采用PHB-1型便携式pH计测定; 叶绿素含量、温度、电导率, 采用YSI 600CHL 叶绿素监测仪测定。

水葫芦株高与分枝数按常规方法现场测量, 每个样点样本量为 10; 根系活力, 采用 α -萘胺氧化法^[18]; 叶片可溶性糖用蒽酮比色法^[18]测定; 叶片叶绿素含量按丙酮提取法测定^[19]; 叶片可溶性蛋白含量用Bradford法测定^[20];

根系体积采用排水法测定; 根系表面积采用亚甲烯兰比色法测定^[21]。

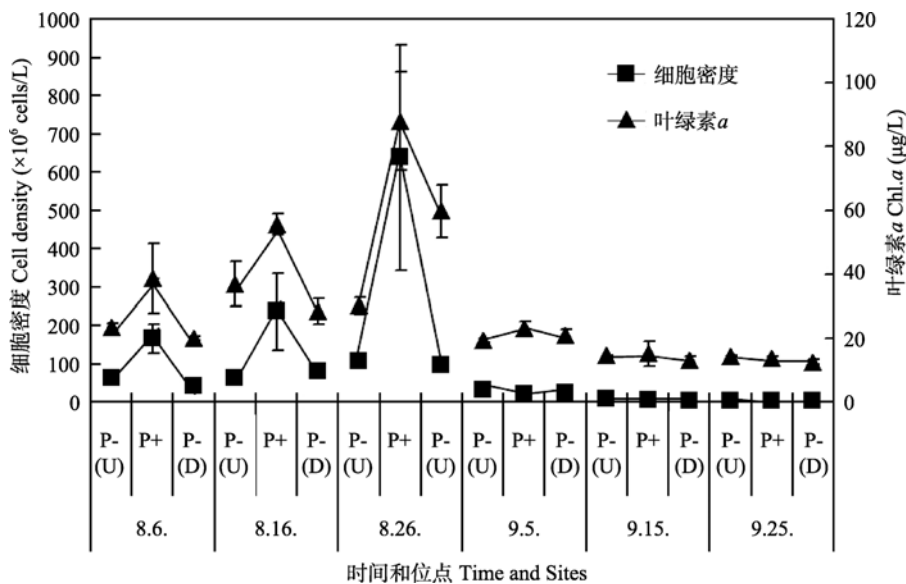
2 结果

2.1 种养区内部和非种养区的浮游藻类密度与叶绿素 *a* 含量

水体浮游藻类密度与叶绿素 *a* 含量有着较好的一致性, 随着时间与区域的变化有明显的差异(图 2)。8 月水华暴发期, 种养区内部的浮游藻类密度和叶绿素 *a* 含量均显著高于非种养区, 分别是非种养区的 1.7—11.2 倍和 1.2—4.0 倍。而随着蓝藻水华的消退, 这种区域差异不显著。这可能是由于水葫芦是漂浮植物, 其根系针对表层水体中高密度浮游藻类的拦截效果较好。

2.2 种养区和非种养区的浮游藻类群落结构与多样性

8 月水华暴发期间, 蓝藻为优势种群(图 3), 种养区内水体蓝藻相对丰度比非种养区高 2.54%—3.75% ($P < 0.05$), 其中各区域微囊藻的相对丰度达到 82.7% 以上。随着藻华的消退, 种养区内的蓝藻相对丰度逐渐低于非种

图 2 不同区域水体浮游藻类密度与叶绿素 *a* 含量的变化Fig. 2 The concentration of chlorophyll *a* and phytoplankton density in water at different subareas

养区, 蓝藻中的平列藻、束丝藻、浮游蓝丝藻逐步取代了微囊藻的绝对优势地位, 绿藻、隐藻、裸藻、硅藻也逐步成为浮游藻类的优势种群。

8—9 月, 绿藻门的优势藻栅藻和硅藻门的优势藻脆杆藻在水葫芦种养区与非种养区的分布差异不明显(图 4), 而甲藻门的多甲藻与硅藻门的小环藻主要分布在非种养区(图 5)。特别是多甲藻, 可能在受到水葫芦抑制的同时还受到水华藻类的抑制, 因此在蓝藻水华暴发期, 非种

养区水体中也未检测到多甲藻。采用 Shannon-wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数分析, 水葫芦种养区内水体的浮游藻类多样性比非种养区低, 但这种差异不显著, 可能由于大水面风浪和水体交换影响(图 6)。

2.3 种养区不同区域的水葫芦根系拦截藻的状况

由不定根和侧根组成的发达的水葫芦根系形成的表面积非常巨大, 本实验中采自太湖竺山湾的水葫芦, 平均每株的根系表面积为 29.95 m², 最高达 60.23 m²。在蓝

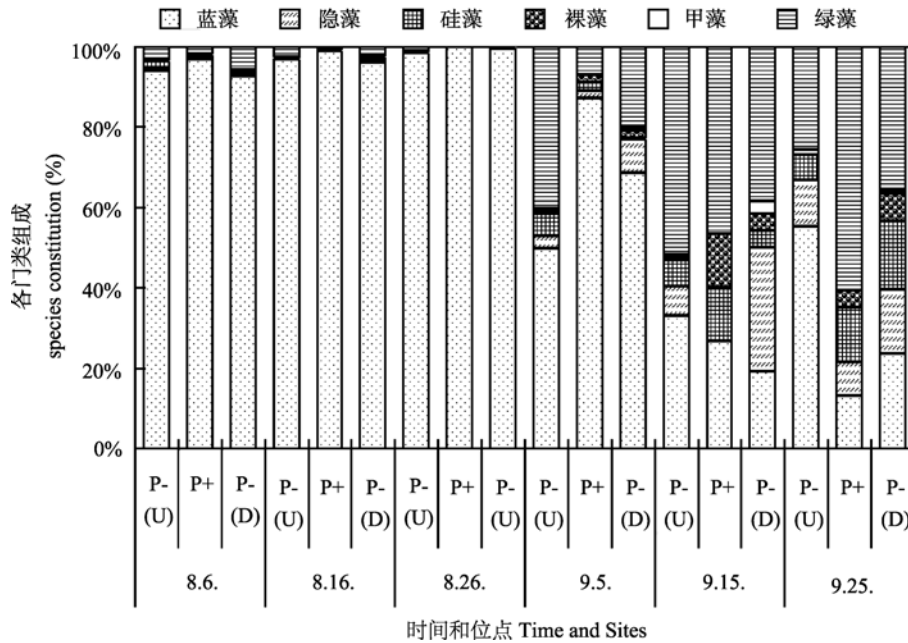


图 3 不同区域浮游藻类各门类组成

Fig. 3 Species composition of phytoplankton in water at different sampling-plots

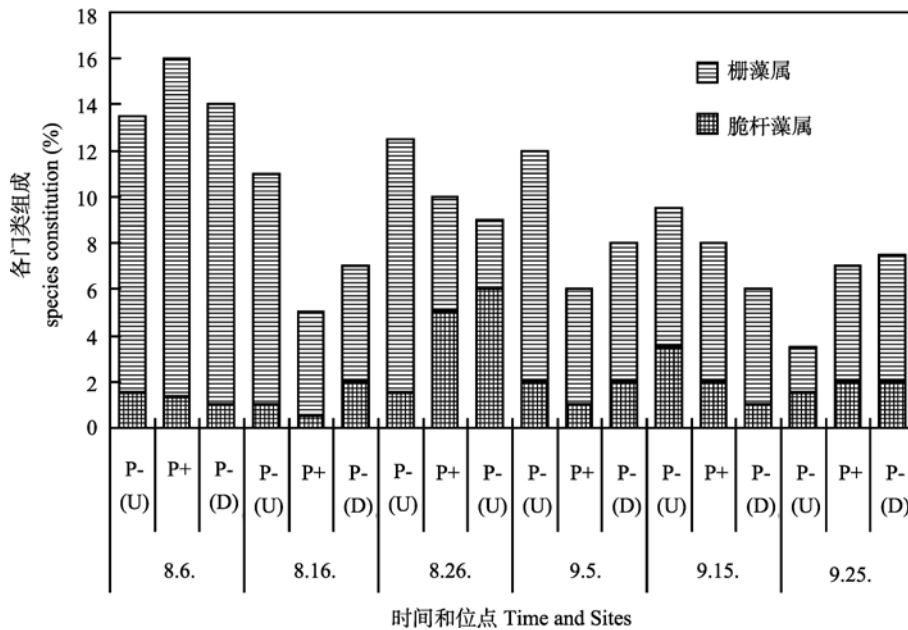


图 4 不同区域水体栅藻和脆杆藻的密度

Fig. 4 Cell density of Scenedesmus and Fragilaria in water at different sampling-plots

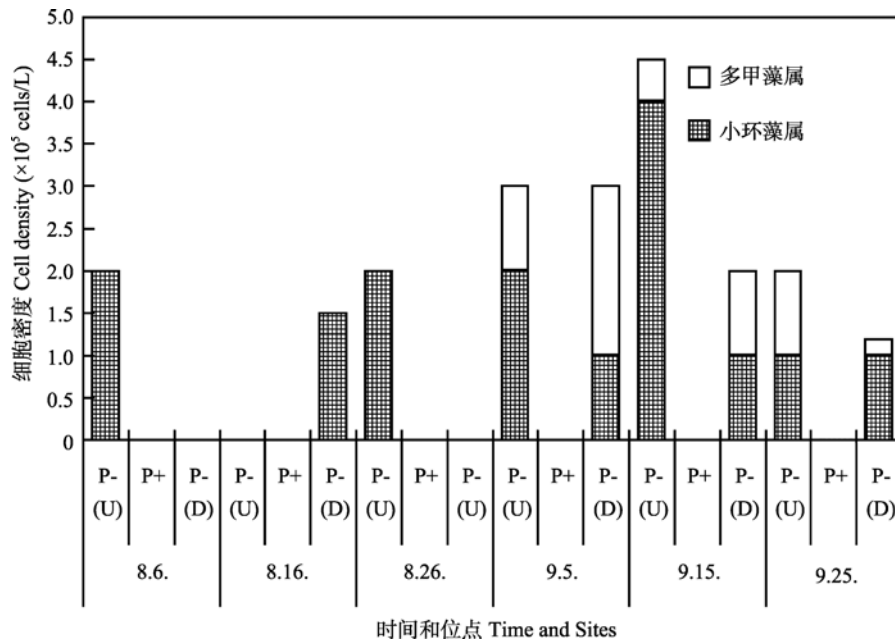


图 5 不同区域水体多甲藻和小环藻的密度

Fig. 5 Cell density of Peridinium and Cyclotella in water at different sampling-plots

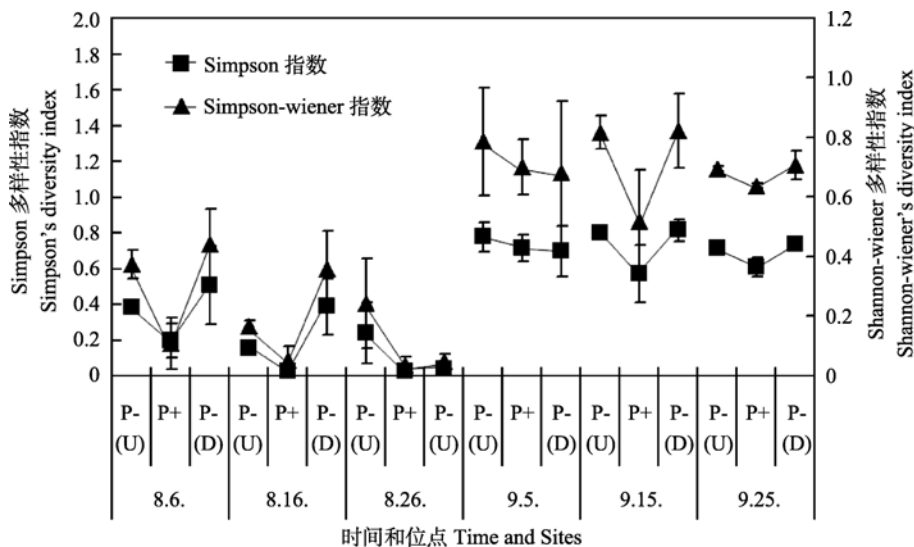


图 6 不同区域水体浮游藻类的多样性

Fig. 6 The diversity of planktonic algae in water at different sampling-plot

藻水华暴发时, 种养区处于拦截前沿和尾部区域的水葫芦, 其根系拦截的浮游藻细胞密度要显著高于种养区内(图 7)。但随着水华的消退, 种养区不同区域水葫芦根系拦截藻的密度差异不显著。而不同区域的水葫芦根系拦截藻的多样性波动较大。

2.4 水葫芦生长-生理状况及其与根系拦截藻类能力的关系

水葫芦株高与叶片数 种养区内各区域的水葫芦茎叶生长指标株高和叶片数, 与相应水体理化指标(TN、TP、DO 等)、根系拦截藻量和植株生理指标(根系活力、

叶片可溶性蛋白含量等)之间均无显著相关性。水葫芦株高与其在种养区中的位置有关, 种养区中间区域的水葫芦显著高于处于拦截前沿与尾部区域的, 显示可能是受密度和波浪影响; 种养区不同位置水葫芦的叶片数差异不显著(图 8)。

水葫芦根系活力与叶片可溶性蛋白含量 在蓝藻水华暴发(8.6—8.16.)及逐渐消退(9.5—9.15.)过程中, 水葫芦的根系活力与根系单位面积上拦截的藻细胞密度呈极显著负相关性(相关系数-0.8125, $P < 0.01$)。而在整个蓝藻水华暴发与消退(8.6—9.15.)过程中, 水葫芦的根系

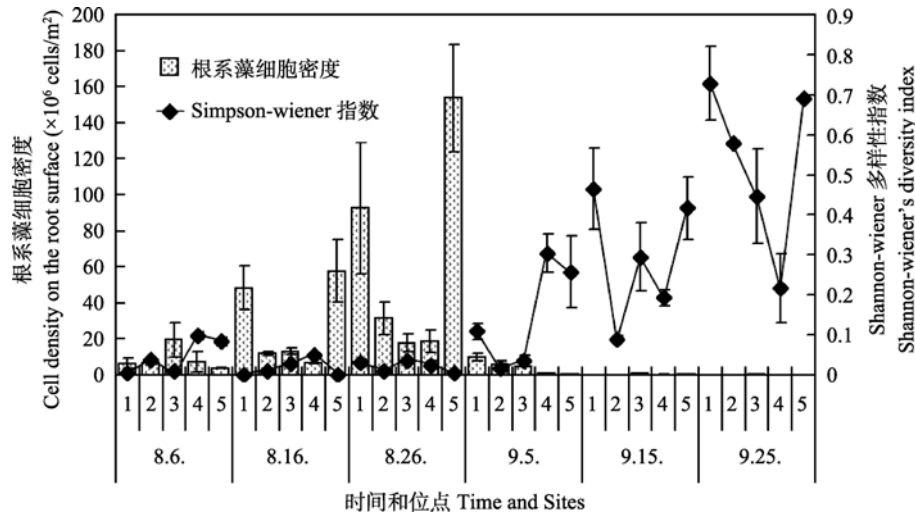


图 7 不同区域的水葫芦根系拦截藻的状况

Fig. 7 Phytoplankton density and diversity on the root surface of water hyacinth at different sites

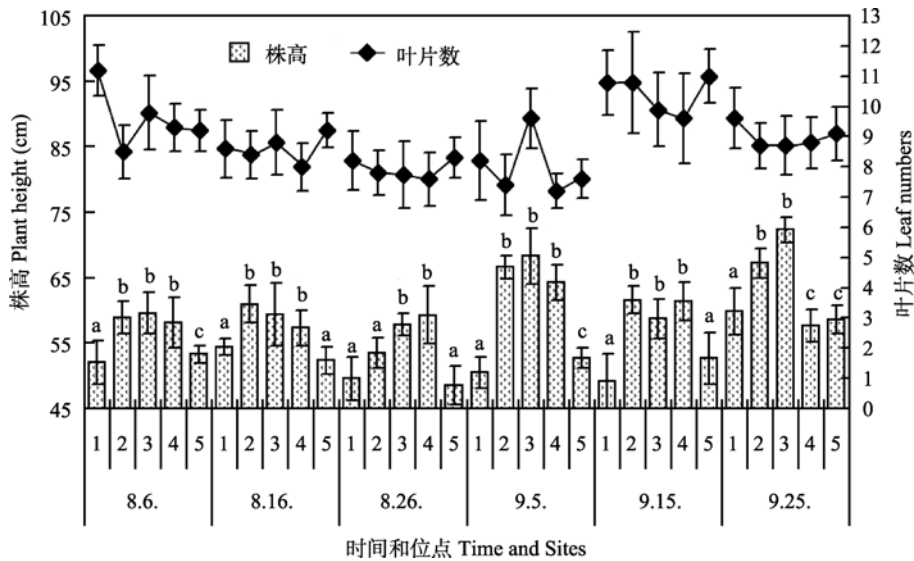


图 8 种养区内不同区域的水葫芦株高和叶片数

Fig. 8 The plant height and leaf numbers of water hyacinth at different sampling-plots

活力与水葫芦植株密度呈显著正相关性(相关系数 0.4830, $P < 0.05$)(图 10), 根系单位面积上拦截的藻细胞密度与水葫芦植株密度之间却无显著相关性。另一方面, 在水华最严重的时期(8.26), 水体 DO 出现显著下降时, 水葫芦的根系活力反而与根系单位面积上拦截的藻细胞密度呈极显著正相关性(相关系数 0.8901, $P < 0.01$), 且平均根系活力显著高于水华暴发初期(图 9)。

叶片可溶性蛋白含量反映了叶片代谢酶类的总体水平^[22]。水葫芦叶片可溶性蛋白含量与根系单位面积上拦截的藻细胞密度的相关性不显著, 但与水葫芦根系活力呈极显著正相关性(相关系数 0.7050, $P < 0.01$), 与水葫芦植株密度呈极显著正相关性(相关系数 0.7281, $P < 0.01$)(图 10)。同时, 在水华暴发过程中, 随着根系上藻类数量

的显著增加并没有使水葫芦的叶片总体代谢水平出现显著下降。因此, 根系单位面积上拦截的藻细胞可能对水葫芦的叶片总体代谢水平影响较小。

水葫芦叶片可溶性糖含量 叶片可溶性糖是光合作用的初级产物, 是植物体内多糖、蛋白质、脂肪等大分子化合物合成的物质基础, 反映了植株生长的能力^[23]。水葫芦叶片可溶性糖含量与根系单位面积上拦截的藻细胞密度的相关性不显著, 但与水体 pH 呈极显著负相关关系(相关系数 -0.5340, $P < 0.01$), 与水体 TN 水平呈极显著正相关关系(相关系数 0.3897, $P < 0.01$)(图 11)。本结果与马成仓等^[24]研究的碱性 pH 对油菜叶可溶性糖含量的影响相一致, 碱性 pH 对植物的影响主要是影响营养成分的有效度, 而具体 pH 与糖代谢影响的机制尚不明确。杨宇

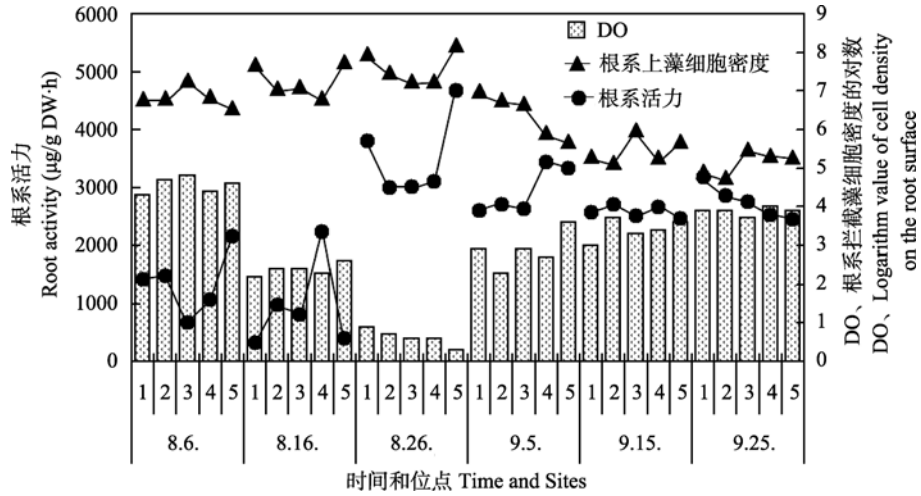


图 9 水葫芦根系活力与根上拦截的藻细胞密度、DO 的关系

Fig. 9 The relations between root activity of water hyacinth and levels of DO in water, cell density on the root surface

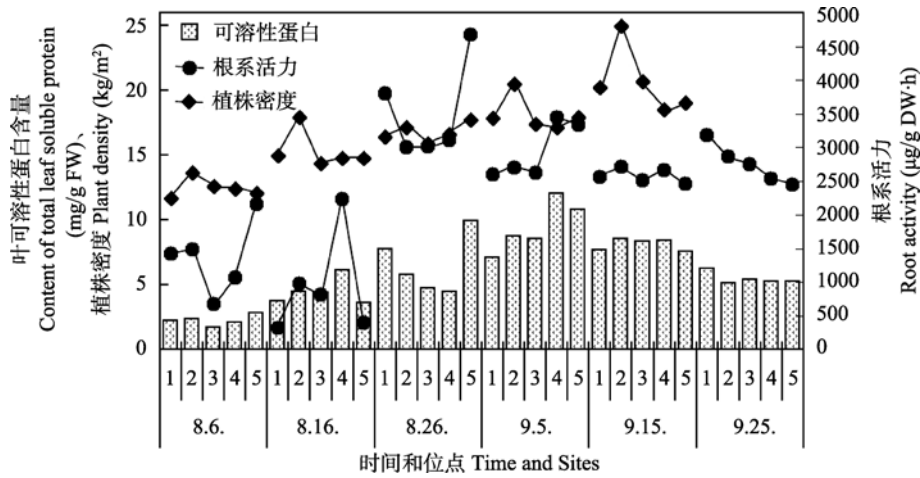


图 10 水葫芦根系活力与叶片可溶性蛋白含量、植株密度的关系

Fig. 10 The relations between root activity and content of total leaf soluble protein, plant density of water hyacinth

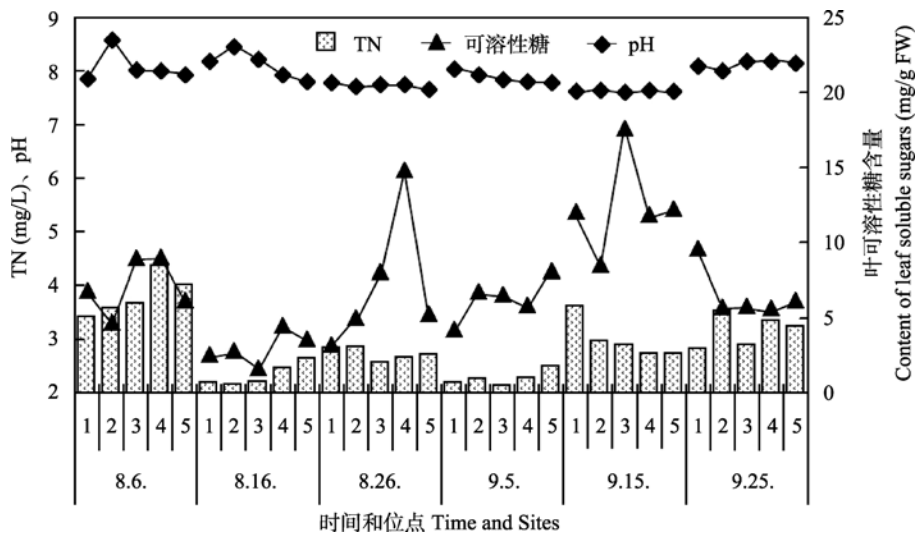


图 11 水葫芦叶片可溶性糖含量与水体 TN、pH 的关系

Fig. 11 The relationship between leaf soluble sugars of water hyacinth and TN, pH in the water of the cultivation area

虹等^[25]对烤烟叶糖含量的研究发现,在一定浓度范围内氮素水平对叶可溶性糖含量具有明显促进作用,这可能是由于氮素水平的增加有利于含氮化合物的合成,叶绿素也包括其中,进而促进光合作用,使得氮素水平对碳水化合物产生了间接调控的效果,而这一机制是否符合水葫芦还有待进一步研究。但可见,水体理化因素是影响水葫芦生长状况的重要因素。

水葫芦叶片叶绿素 *a/b* 和类胡萝卜素/总叶绿素值水葫芦叶片中主要的色素为叶绿素和类胡萝卜素。叶片中的叶绿素 *a* 含量与叶绿素 *b* 含量呈极显著正相关(相关系数 0.8081, $P < 0.01$),其中叶绿素 *a* 对叶绿素含量的贡献最大。而总叶绿素含量与类胡萝卜素含量也呈极显著正相关(相关系数 0.6594, $P < 0.01$)。

叶绿素 *a/b* 值反映了叶绿体中类囊体的垛叠程度,叶绿素 *a/b* 值越低,类囊体的垛叠程度越低,致使光能在两个光系统之间的分配受到影响,从而导致光合能力下降^[26]。如图 12 所示,水葫芦叶片叶绿素 *a/b* 值与根系单位表面积上拦截的藻细胞密度的相关性不显著,但与水体电导率呈极显著正相关关系(相关系数 0.6859, $P < 0.01$),与叶片中可溶性蛋白的含量呈显著正相关关系(相关系数 0.3749, $P < 0.05$)。类胡萝卜素/总叶绿素值反映了植物光合活性的强弱以及忍受逆境的能力^[27],实验发现,水葫芦叶片类胡萝卜素/总叶绿素值与根系单位表面积上拦截的藻细胞密度的相关性不显著,而与水体电导率呈极显著正相关性(相关系数 0.5881, $P < 0.01$) (图 12)。可见,水葫芦对微弱的低盐度变化存在生理响应。

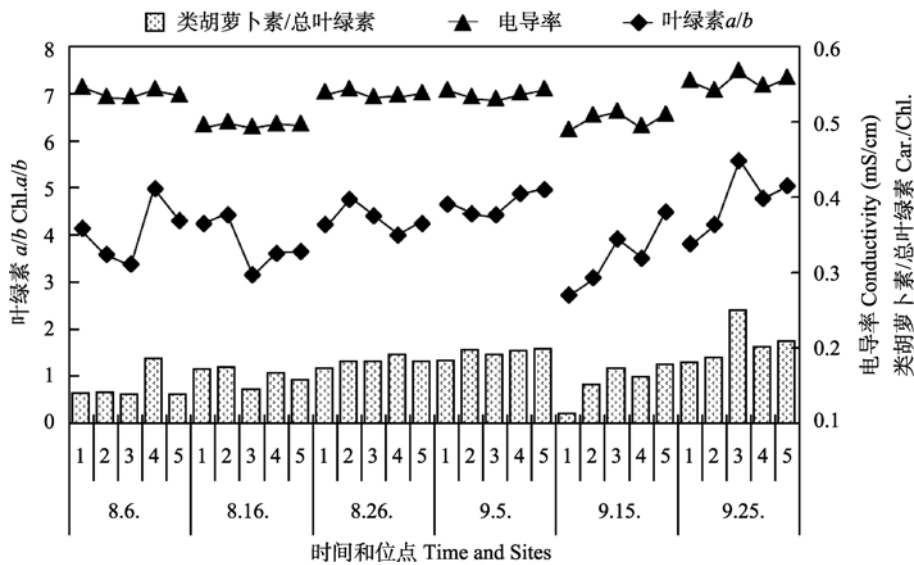


图 12 水葫芦叶片叶绿素 *a/b*、类胡萝卜素/总叶绿素值与水体电导率的关系

Fig. 12 The relations between conductivity in water and values of Chl.a/b, Car./Chl in leaves

通常,植物在高盐胁迫下,气孔关闭,导致电子传递受抑制,产生活性氧,引起蛋白质的大量降解,为了耐受这一胁迫,叶绿体对光能的捕获能力降低,光合作用下降,以降低活性氧的产生^[28]。而水葫芦在低盐度下,叶片叶绿素 *a/b* 值和可溶性蛋白含量随电导率的增加而上升,这可能是由于在低盐度下,气孔不会关闭,随着盐度的上升,叶绿体对光能的捕获能力提高,电子传递越活跃,可溶性蛋白含量越高,从而有利于增强光合作用。但这一推测有待进一步研究。

3 讨论

水葫芦通过限制资源(光源、营养)^[29]和分泌化感物质^[30],对浮游藻类产生竞争抑制。Almeida, *et al.*^[31]研究发现,在葡萄牙的一个浅水湖中水葫芦对绿藻具有选择性的抑制作用。本研究发现,水葫芦对绿藻门的优势藻栅

藻和硅藻门的优势藻脆杆藻影响较小,而对甲藻门的多甲藻与硅藻门的小环藻抑制作用明显。水葫芦种养区内水体的浮游藻类多样性比非种养区低,但在大水面风浪和水体交换的影响下,这种差异变得不显著。

水华暴发期,水葫芦种养区内部的浮游藻类密度和叶绿素 *a* 含量均显著高于非种养区,这一结果与Brendonck, *et al.*^[32]对乌干达Chivero湖沿岸水葫芦种养区的研究相一致,这是由于水葫芦发达的根系能够截留水华藻类等固体悬浮物,从而导致根系下水体中浮游藻类密度上升。但Brendonck, *et al.*研究的水葫芦种养区内部的浮游藻类密度是非种养区的 10—30 倍,高于本研究的结果,这可能是由于Chivero湖与太湖富营养化程度不同而导致的水葫芦根系生长差异引起的。因此以水葫芦构建的漂浮植物带可以成为拦截蓝藻水华的有效屏障。

有关水葫芦根系拦截的水华藻类对水葫芦是否产生

影响的研究未见报道, 本文通过采集大水面控养区不同区域的水葫芦, 分析了其各生理指标与水葫芦根系拦截藻细胞的密度、以及相关水体理化指标的相关性。结果表明, 水葫芦的总体生理状况主要受复杂水环境因素的综合影响, 根系拦截藻细胞的密度是其中的影响因素之一。然而, 即使是在水华暴发严重期, 水葫芦的各项生理指标并没有随根系拦截藻细胞密度的上升而显著下降, 水葫芦对水华藻类的拦截并未对其自身造成显著的不利影响。

Dinges^[33]曾指出, 盐分含量是影响水葫芦生长的因素之一。在高浓度盐胁迫下, 水葫芦叶片叶绿素 a/b 值随盐分含量增加而下降^[34]。杨红研究认为适合水葫芦生长的电导率在 1.5 ms/cm 以下, 天然淡水的电导率在 0.5 ms/cm 以下, 不会对水葫芦的生长产生影响^[35]。本研究发现, 水葫芦在天然水体较低的电导率下, 叶片叶绿素 a/b 值随电导率的增加而上升, 可能促进了水葫芦的光合活性。

参考文献:

- [1] Wang Z G, Shen S D, Gu F G, *et al.* The comparison of nitrogen and phosphorus absorption rate among several aquatic vascular plants in water [J]. *Freshwater Fisheries*, 2004, **34**(5): 6—8 [万志刚, 沈颂东, 顾福根, 等. 几种水生维管束植物对水中氮、磷吸收率的比较. 淡水渔业, 2004, **34**(5): 6—8]
- [2] Reddy K R, De busk T A. Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, **14**(4): 459—462
- [3] Li W C. Construction and purification efficiency test of an ever green aquatic vegetation in an eutrophic lake [J]. *China Environment Science*, 1997, **17**(1): 43—57 [李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究. 中国环境科学, 1997, **17**(1): 43—57]
- [4] Zhang Z Y, Chang Z Z, Liu H Q, *et al.* Effect of *Eichhornia crassipes* on removing nitrogen and phosphorus from eutrophicated water as affected by hydraulic loading [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(2): 148—154 [张志勇, 常志州, 刘海琴, 等. 不同水力负荷下凤眼莲去除氮、磷效果比较. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(2): 148—154]
- [5] Luken J O, Thieret J W. Assessment and Management of Plant Invasions [M]. New York: Springer. 1997, 300
- [6] Liu G F, Liu H Q, Zhang Z Y, *et al.* Effects of large-area planting water hyacinth on macro-benthos community structure and biomass [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(12): 2925—2931 [刘国锋, 刘海琴, 张志勇, 等. 大水面放养凤眼莲对底栖动物群落结构及其生物量的影响. 环境科学, 2010, **31**(12): 2925—2931]
- [7] Geng X J, Fan Y, Wang X Q, *et al.* Effects of an allelochemical, N-phenyl-2-naphthylamine, from *Eichhornia crassipes* on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2009, **46**(5): 1493—1496 [耿小娟, 范勇, 王晓青, 等. 水葫芦化感物质N-苯基-2-萘胺对铜绿微囊藻生长的影响. 四川大学学报(自然科学版), 2009, **46**(5): 1493—1496]
- [8] Wu C, Chang X X, Wu F, *et al.* Studies on allelopathy of aquatic macrophytes on *Synahocystis* sp. [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Science Edition)*, 2008, **30**(5): 535—540 [吴程, 常学秀, 吴锋, 等. 高等水生植物对集胞藻(*Synahocystis* sp.)的化感作用研究. 云南大学学报(自然科学版), 2008, **30**(5): 535—540]
- [9] Tang P, Wu G R, Lu C M, *et al.* Effects of the excretion from root system of *Eichhornia crassipes* on the cell structure and metabolism of *Scenedesmus arcuatus* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, **20**(3): 355—359 [唐萍, 吴国荣, 陆长梅, 等. 凤眼莲根系分泌物对栅藻结构及代谢的影响. 环境科学学报, 2000, **20**(3): 355—359]
- [10] Shu Y, Liu Z Q, Li L J. Inhibitory effect of extracts from *Eichhornia crassipes* on the growth of *Prorocentrum donghaiense* [J]. *Ecologic Science*, 2006, **25**(2): 124—127 [舒阳, 刘振乾, 李丽君. 凤眼莲浸出液对东海原甲藻生长的抑制作用. 生态科学, 2006, **25**(2): 124—127]
- [11] Fan X Y, Gao H Q, Tang F, *et al.* Pretreatment of Chaohu Lake source water by hydrophyte pond [J]. *China Water and Wasterwater*, 2010, **26**(21): 58—61 [樊新源, 高和气, 汤峰, 等. 水生植物塘预处理巢湖源水中试研究. 中国给排水, 2010, **26**(21): 58—61]
- [12] Deng F T, Qing X Y, Yang H, *et al.* The captive engineering test of *Eichhornia crassipes* in the large area of open water in the Dian Lake [A]. In: Chinese Society for Environmental Sciences (Eds.), Proceedings of Annul Meeting of Chinese Society for Environmental Sciences (2007) [C]. Beijing: China Environmental Science Press. 2007, 2093—2098 [邓辅唐, 卿小燕, 杨绘, 等. 滇池开阔水域大面积圈养凤眼莲的工程试验. 见: 中国环境科学学会编著, 中国环境科学学会学术年会优秀论文集(2007). 北京: 中国环境科学出版社. 2007, 2093—2098]
- [13] Li M X, Li W C, Yang F L, *et al.* Research on technology of removing the algae by floating vegetation in the river bay of Xingyun Lake [J]. *Yunnan Environmental Science*, 2006, **25**(3): 42—44 [李荫玺, 李文朝, 杨逢乐, 等. 星云湖隔河湖湾飘浮植物除藻技术研究. 云南环境科学, 2006, **25**(3): 42—44]
- [14] Zhang Z S, Huang X F. Research Methods for Freshwater Plankton [M]. Beijing: Science Press. 1991, 5—80 [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社. 1991, 5—80]
- [15] Hu H J, Wei Y X. The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology [M]. Beijing: Science Press. 2006 [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社. 2006]
- [16] GB/T11894-1989, Water quality-determination of total nitrogen-alkaline potassium persulfate digestion-UV spectrophotometric method [S]. [GB/T11894-1989, 水质总

- photometric method [S]. [GB/T11894-1989, 水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法]
- [17] GB/T11893-1989, Water quality-determination of total phosphorus-ammonium molybdate spectrophotometric method [S]. [GB/T11893-1989, 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法]
- [18] Practical Instructions of plant physiology in East China Normal University, Plant Physiology Experimental Guide (2nd edition) [M]. Beijing: China Higher Education Press. 1985, 68—147 [华东师范大学生物系植物生理教研室编. 植物生理实验指导(第 2 版). 北京: 高教出版社. 1985, 68—147]
- [19] Chen J X, Wang X F. Plant Physiology Experimental Guide [M]. Guangzhou: South China University Press. 2006, 134 [陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导. 广州: 华南理工大学出版社. 2006, 134]
- [20] Bradford M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein using the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, **72**(5): 248—254
- [21] Zhang Z L, Qu W J. Plant Physiology Experiment Guide (3rd) [M]. Beijing: China High Education Press. 2002, 38 [张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导(第三版). 北京: 高等教育出版社. 2002, 38]
- [22] Han B, Sun J, Guo S R, *et al.* Effects of calcium on antioxidant enzymes activities of cucumber seedlings under salt stress [J]. *Acta Horticulturae Sinica*. 2010, **37**(12): 1937—1943 [韩冰, 孙锦, 郭世荣, 等. 钙对盐胁迫下黄瓜幼苗抗氧化系统的影响. 园艺学报, 2010, **37**(12): 1937—1943]
- [23] Liu H R, Song H X, Liu D P, *et al.* Dynamics changes of soluble sugar and free amino acid contents in stem and leaf of different oilseed rape varieties [J]. *Acta Agricultural Boreali-occidentalis Sinica*, 2007, **16**(1): 123—126 [刘浩荣, 宋海星, 刘代平, 等. 油菜茎叶可溶性糖与游离氨基酸含量的动态变化. 西北农业学报, 2007, **16**(1): 123—126]
- [24] Ma C C, Hong F H. Effect of pH on seed germination and seedlings growth and metabolism in Rape [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, **24**(4): 509—512 [马成仓, 洪法水. pH 对油菜种子萌发和幼苗生长代谢的影响. 作用学报, 1998, **24**(4): 509—512]
- [25] Yang Y H, Zhao Z X, Li C J, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on carbohydrate content and related metabolic enzymes of flue-cured tobacco in paddy field and highland [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, **15**(6): 1386—1394 [杨宇虹, 赵正雄, 李春俭, 等. 不同氮形态和氮水平对水田与旱地烤烟烟叶糖含量及相关酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(6): 1386—1394]
- [26] Maslenkora L T. Adaptation to salinity as monitored by PSII oxygen evolving reaction in barley thylakoids [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1993, **142**(5): 629—634
- [27] Liu Z Y, Liu Z Q. Progress on the Photosynthetic Inherit of CRop and its Appliance in Breeding. Study and Progress on Crop Breeding [M]. Beijing: Agricultural Press. 1993, 168—183 [刘振亚, 刘贞琦. 作物光合作用的遗传及其在育种中的应用研究进展. 作物育种研究进展. 北京: 农业出版社. 1993, 168—183]
- [28] Zhao X, Wu Y X, Zhao M G, *et al.* Response of photosynthesis function of Salt Cress and Arabidopsis to NaCl salt stress [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, **24**(2): 154—160 [赵昕, 吴雨霞, 赵敏桂, 等. NaCl 胁迫对盐芥和拟南芥光合作用的影响. 植物学通报, 2007, **24**(2): 154—160]
- [29] McVea C, Boyd C E. Effects of water-hyacinth cover on water chemistry, phytoplankton, and fish in Ponds [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1975, **4**(3): 375—378
- [30] Yang S Y, Yu Z W, Sun W H, *et al.* Isolation and identification of antialgal compounds from root system of water hyacinth [J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1992, **18**(4): 399—402 [杨善元, 俞子文, 孙文浩, 等. 凤眼莲根系中抑藻物质分离与鉴定. 植物生理学报, 1992, **18**(4): 399—402]
- [31] Almeida A S, Goncalves A M, Pereira J L, *et al.* The impact of *Eichhornia crassipes* on green algae and cladocerans [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2006, **15**(12a): 1531—1538
- [32] Brendonck L, Maes J, Rommens W, *et al.* The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe). II. Species diversity [J]. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 2003, **158**(3): 389—405
- [33] Dinges R. Upgrading stabilization pond effluent by water hyacinth culture [J]. *Journal - Water Pollution Control Federation*, 1978, **50**(5): 833—845
- [34] Wu Z B, Qiu C Q, Xia Y J, *et al.* Effects of the salinity in petrochemical wastewater on the growth and purification efficiency of water hyacinths [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1990, **14**(3): 239—246 [吴振斌, 丘昌强, 夏宜静, 等. 石化废水盐分对凤眼莲生长及净化效率的影响. 水生生物学报, 1990, **14**(3): 239—246]
- [35] Yang H Y. The study on the environmental factors, mechanisms and rules of water hyacinth growth [D]. Thesis for Master of Science. Fujian Normal University, Fujian. 2006 [杨红玉. 水葫芦生长的环境影响因素、机理及规律研究. 硕士学位论文. 福建师范大学, 福建. 2006]