

在磷浓度不同的基质中 种植密度对野菱生长的影响

关保华¹, 安树青^{2,①}, 蔡颖², 姜昊², 徐德琳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, 江苏 南京 210008;
2. 南京大学生命科学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 研究了在3种不同磷浓度(低浓度 $27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 中浓度 $52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 高浓度 $115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 基质中, 不同种植密度(11 和 32 株 $\cdot \text{m}^{-2}$) 对野菱(*Trapa incisa* Sieb. et Zucc.) 生长和不同部位磷含量的影响。结果表明, 在磷浓度不同的基质中, 野菱单株的根、茎和叶干质量及总干质量都随种植密度的提高而增加。种植密度的高低对野菱茎直径和叶数没有显著影响($P > 0.05$), 但在3种基质中, 种植密度高的野菱植株的叶数都高于种植密度低的野菱植株。种植密度对野菱各部位干物质分配以及磷含量的影响因基质中磷浓度的不同而表现出不同的规律性; 种植密度高的野菱植株的茎和叶片中的磷含量高于种植密度低的野菱植株, 种植密度低的野菱植株的茎生物量比和根中的磷含量均高于种植密度高的野菱植株。研究结果显示, 提高种植密度不仅能促进野菱个体的生长, 且能促进磷在野菱体内的运输。

关键词: 野菱; 种植密度; 磷浓度; 生长

中图分类号: Q948.8; X173 文献标志码: A 文章编号: 1004-0978(2009)01-0042-06

Effects of planting density on growth of *Trapa incisa* in substrata with different phosphorus concentrations GUAN Bao-hua¹, AN Shu-qing^{2,①}, CAI Ying², JIANG Hao², XU De-lin² (1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2009, 18(1): 42-47

Abstract: Effects of planting density on growth and phosphorus content in different parts of *Trapa incisa* Sieb. et Zucc. cultivated in three substrata with different phosphorus concentrations (low concentration $27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, median concentration $52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ and high concentration $115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) were studied. The results show that dry weight of root, stem and leaf and total dry weight per plant all increase with the planting density increasing in different substrata. The planting density has no significant influence on stem diameter or leaf number ($P > 0.05$), but the leaf number of *T. incisa* under a high planting density is more than that of under a low planting density in all three substrata. The impact of planting density on biomass allocation and phosphorus content in different parts of *T. incisa* varies with phosphorus concentration in the substrata. The phosphorus content in stem and leaf increases as the planting density increasing, while biomass ratio of stem and phosphorus content in root decreases as the planting density increasing. It is concluded that the growth of *T. incisa* and the phosphorus translocation in the plant can be promoted by increasing planting density.

Key words: *Trapa incisa* Sieb. et Zucc.; planting density; phosphorus concentration; growth

磷是水体富营养化的主导因素^[1]。过量的磷盐输入湖泊, 在导致水体富营养化的同时, 也使湖泊

基质中沉积的磷不断增加, 形成磷富营养化型的基质^[2-3]。水体和基质的富营养化对水生植物的生长

收稿日期: 2008-09-29

基金项目: 国家“973”计划项目(2008CB418201); 湖泊与环境国家重点实验室开放研究基金项目(2008SKLSE009)

作者简介: 关保华(1976—), 女, 河南南阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事水生植物生态学研究。

①通讯作者 E-mail: anshq@nju.edu.cn

和分布具有重要影响^[4-6]。一般情况下,水体中磷的增加有利于提高水生植物生产力,但磷的过量输入则往往导致水生植物的大量死亡甚至消失^[7-10]。水生植物在水生生态系统中具有重要作用^[11-12],为附着生物、无脊椎动物、鱼类和鸟类提供了食物和栖息地^[13]。水生植物群落一般具有多样性比较低的特点,所以每个物种的作用都非常重要^[14]。如何保证水生植物在磷富营养化状态下的生长和恢复,是湖泊学研究和湖泊管理中亟待解决的问题。

野菱(*Trapa incisa* Sieb. et Zucc.)是菱科(Trapaceae)菱属(*Trapa* L.)一年生浮叶植物^[15]。在由多种菱属植物组成的自然群落内,野菱在数量上总是占据优势^[16];随着水体富营养化的加剧,部分菱属植物逐渐消失,但野菱依然占据优势,表现出较强的抗污染和抗人为干扰的能力^[8],这种能力很可能与较高的种群密度有关。

作者以野菱为实验材料,研究了在磷浓度不同的基质条件下种植密度对野菱生长的影响,以期探讨在高磷含量基质中种植密度与野菱生长的关系,为水体富营养化条件下的植物修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验于2005年5月17日至7月1日在南京大学浦口校区温室中进行,此时是野菱的生长盛期^[16]。实验所用的野菱幼苗采自江苏南京溧水的一个自然池塘。选取茎长与菱盘大小基本一致的野菱植株(平均茎长 90 ± 10 cm),用自来水冲洗干净,避免从原水体中带出昆虫卵或者幼虫及藻类等其他水生生物。缓苗3 d后,选取生长状态良好的野菱植株,种植在大小为 $75 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$ 的塑料水族箱里,箱底铺设厚度为15 cm的由河沙与壤土按体积比1:1混合的基质,培养用水为自来水,箱内水深保持25 cm。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 实验设置3个磷浓度和2个种植密度的交叉处理,共计6个处理组,每个处理4次重复。分别模拟不同营养状态的湖泊沉积物的总磷含量^[17],设置的3个磷浓度分别为:1)低磷浓度(low substratum phosphorus concentration),不添加无机磷肥,总磷浓度 $27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;2)中磷浓

度(median substratum phosphorus concentration),添加少量无机磷肥,总磷浓度 $52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;3)高磷浓度(high substratum phosphorus concentration),加入2倍于中磷浓度的无机磷肥,总磷浓度 $115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。将各处理需添加的无机磷肥掺入每只水族箱的基质中,混匀。此外,每个水族箱都添加1 kg氮肥,混匀。2个种植密度处理分别设置为低种植密度和高种植密度,种植密度分别为11和32株 $\cdot \text{m}^{-2}$,植株间距相等。

1.2.2 生长指标及磷含量的测定方法 在上述基质中培养6周后采收所有的野菱植株,立即用游标卡尺测量各处理组野菱不同单株的茎直径并计算叶数。清洗干净后将各处理组野菱不同单株的根、茎、叶分开并于80℃条件下烘干至恒质量,称量各部分的干质量,并计算野菱单株总干质量。烘干后的野菱根、茎和叶用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 法消化后用比色法分析磷含量^[18],2次重复。

1.3 数据处理

按Hunt^[19]的生长分析方法计算下列参数:叶生物量比(leaf biomass ratio, LBR) = (叶生物量/单株总生物量) $\times 100\%$;茎生物量比(stem biomass ratio, SBR) = (茎生物量/单株总生物量) $\times 100\%$;根生物量比(root biomass ratio, RBR) = (根生物量/单株总生物量) $\times 100\%$ 。采用Excel 2003和SPSS 12.0软件处理数据。用One-way ANOVA中的Duncan多重比较法检验各处理间的差异显著性。

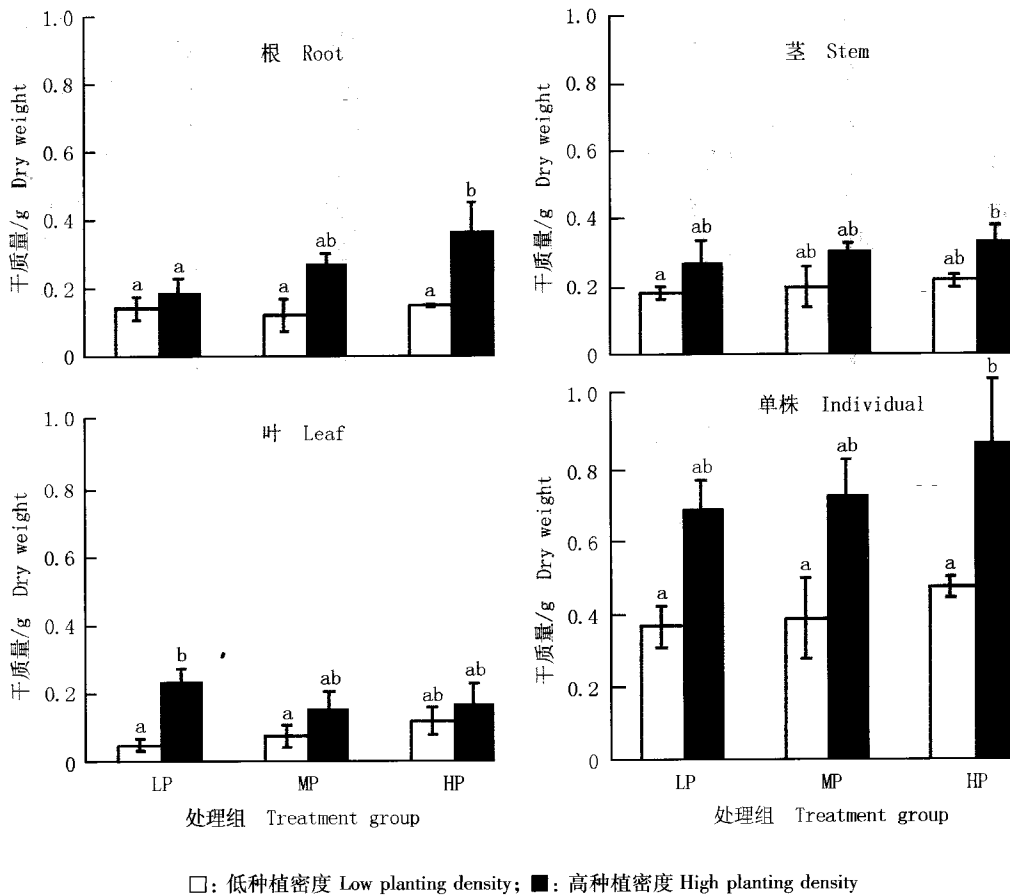
2 结果与分析

2.1 种植密度对野菱生长的影响

在磷浓度不同的基质中种植密度对野菱生长的影响见图1。由图1可见,无论是在低磷($27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、中磷($52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)还是高磷($115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)浓度的基质中,种植密度高的野菱植株的根、茎和叶的干质量和单株总干质量都高于种植密度低的野菱植株。在磷浓度高的基质中,种植密度高的野菱植株的根干质量和单株总干质量都显著高于任一基质中种植密度低的野菱植株($P < 0.05$),茎干质量则显著高于低磷基质中种植密度低的野菱植株($P < 0.05$);虽然在磷浓度不同的基质中种植密度高的野菱植株的叶干质量

都高于种植密度低的野菱植株,但随磷浓度的提高,在高种植密度状况下野菱叶干质量呈下降趋势,而在低种植密度状况下则呈上升趋势,因此在磷浓度

低的基质中种植密度高的野菱植株的叶干质量达到最高值,并显著高于低磷浓度和中磷浓度条件下种植密度低的野菱植株($P < 0.05$)。



LP: 低磷浓度 Low substratum phosphorus concentration $27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; MP: 中磷浓度 Median substratum phosphorus concentration $52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; HP: 高磷浓度 High substratum phosphorus concentration $115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

图1 在不同磷浓度基质中种植密度对野菱不同部位干质量及单株总干质量的影响($\bar{X} \pm SE$)
Fig. 1 Effects of planting density on dry weight of different parts and total dry weight per plant of *Trapa incisa* Sieb. et Zucc. in substrata with different phosphorus concentrations ($\bar{X} \pm SE$)

2.2 种植密度对野菱形态特征的影响

在磷浓度不同的基质中种植密度对野菱茎直径和叶数的影响见图2。由图2可见,种植密度的高低对野菱茎直径没有显著影响($P > 0.05$)。在低磷和中磷浓度基质中,种植密度高的野菱植株的茎直径略高于种植密度低的野菱植株;但在高磷浓度基质中则相反,种植密度高的野菱植株的茎直径略低于种植密度低的野菱植株。在3种磷浓度基质中,种植密度高的野菱植株的叶数都高于种植密度低的野菱植株,但差异不显著($P > 0.05$)。

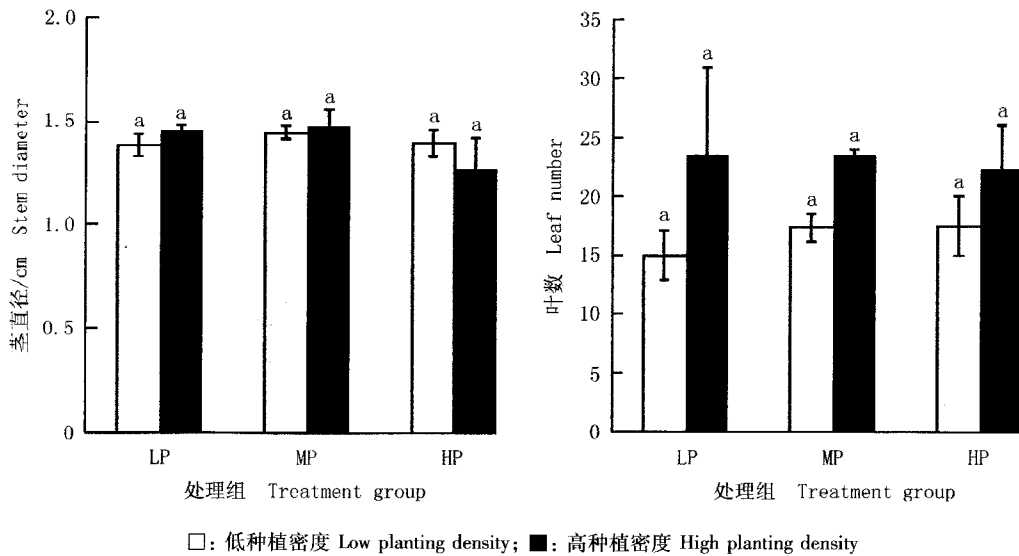
2.3 种植密度对野菱生物量分配的影响

在磷浓度不同的基质中种植密度对野菱生物量

分配的影响见图3。由图3可见,随基质中磷浓度的提高,种植密度高的野菱叶生物量比呈下降趋势,而种植密度低的野菱叶生物量比则呈上升趋势,因此,在低磷和中磷浓度基质中,种植密度高的野菱的叶生物量比高于种植密度低的野菱植株。

在3种磷浓度基质中,种植密度低的野菱的茎生物量比均高于种植密度高的野菱植株,但茎生物量比均随基质中磷浓度的增加呈下降趋势。

种植密度低的野菱植株的根生物量比随基质中磷浓度的提高而下降,而种植密度高的野菱植株的根生物量比随基质中磷浓度的提高而增加,因此,虽然在低磷基质中种植密度低的野菱植株的根生物量



LP: 低磷浓度 Low substratum phosphorus concentration $27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; MP: 中磷浓度 Median substratum phosphorus concentration $52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; HP: 高磷浓度 High substratum phosphorus concentration $115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

图 2 在不同磷浓度基质中种植密度对野菱茎直径和叶数的影响 ($\bar{X} \pm SE$)
Fig. 2 Effects of planting density on stem diameter and leaf number of *Trapa incisa* Sieb. et Zucc. in substrata with different phosphorus concentrations ($\bar{X} \pm SE$)

比高于种植密度高的野菱植株,但在中磷和高磷浓度基质中,种植密度低的野菱植株的根生物量比则低于种植密度高的野菱植株。

2.4 种植密度对野菱不同部位磷含量的影响

在磷浓度不同的基质中种植密度对野菱不同部位磷含量的影响见图 4。由图 4 可见,在 3 种基质中,种植密度低的野菱植株根中的磷含量都高于种植密度高的野菱植株,但茎中磷含量的变化则相反;在低磷和高磷基质中,种植密度高的野菱植株叶片中的磷含量也高于种植密度低的野菱植株。

3 讨 论

3.1 种植密度对野菱生长的促进作用

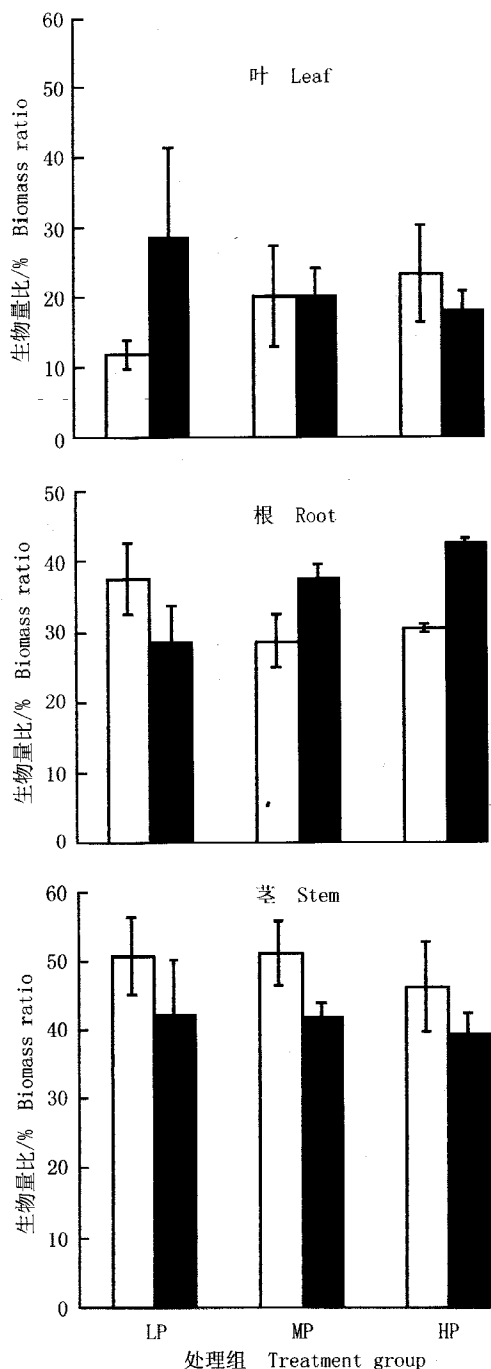
种植密度的改变对植物的生长有着重要的影响^[20-22]。在本实验所设置的低磷浓度 ($27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、中磷浓度 ($52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 和高磷浓度 ($115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 3 种基质中,野菱单株的根、茎和叶的干质量与单株总干质量及叶片数等指标均随种植密度的提高而增加,说明在本实验所设置的 3 种磷浓度基质中,种植密度的提高均能够促进野菱个体的生长。特别是在高磷浓度基质中,种植密度高的野菱根干质量和单株总干质量

显著高于在任一基质中种植密度低的植株 ($P < 0.05$);种植密度高的野菱的茎干质量也显著高于在低磷基质中种植密度低野菱植株 ($P < 0.05$),说明在本实验设置的磷浓度范围内,增加种植密度能够显著促进野菱个体的生长。

根生型水生植物主要由根部从基质中吸收氮和磷等营养盐,地上部位如叶片等也可以从水体中吸收营养盐,且营养盐可以在不同生长部位之间运输^[17, 23-24]。本研究中,在磷浓度高的栽培基质中,虽然种植密度低的野菱植株中根的磷含量高于种植密度高的植株,但茎和叶中的磷含量却低于种植密度高的植株,说明提高种植密度能够促进磷在野菱体内由根部向地上部位的运输。此外,在实验过程中发现,种植密度低的野菱植株常常遭受比较严重的虫害。

3.2 低种植密度条件下野菱的调节机制

植物个体通常能够改变其生长和生理特征以适应恶劣的环境条件^[25]。种植密度低的野菱植株也表现出了一些适应机制,将更多的生物量分配到叶片和茎,这将有助于加强叶片对水体中磷的吸收,缓解根部吸收的不足。在磷浓度高的条件下,种植密度低的野菱植株具有较粗的茎,这种茎粗和茎生物量比增加的现象有利于加强野菱植株地上部和根部

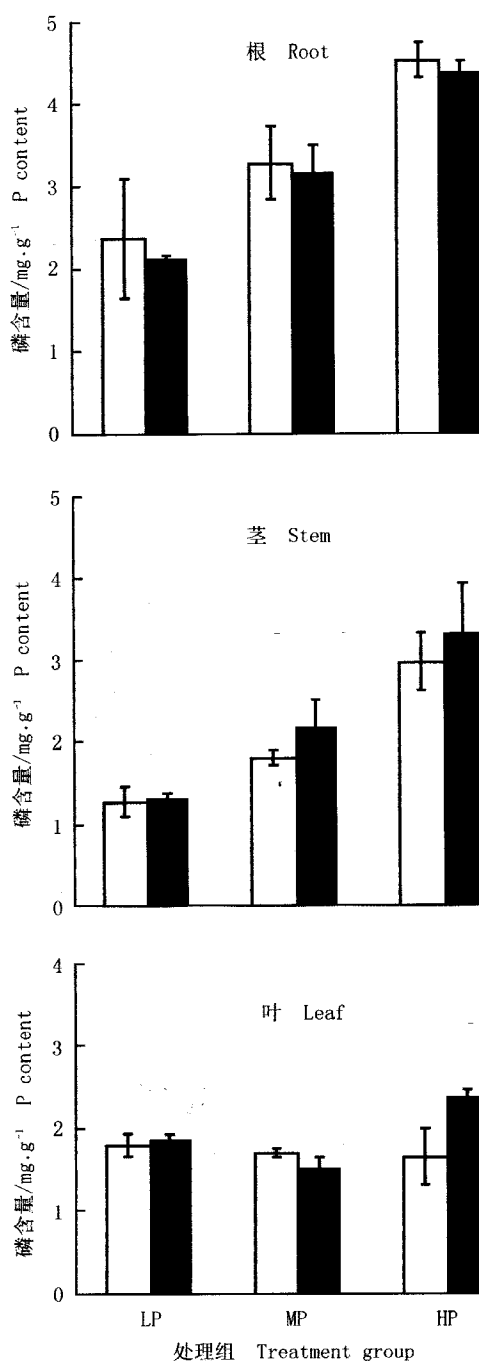


□: 低种植密度 Low planting density
 ■: 高种植密度 High planting density

LP: 低磷浓度 Low substratum phosphorus concentration $27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; MP: 中磷浓度 Median substratum phosphorus concentration $52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; HP: 高磷浓度 High substratum phosphorus concentration $115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

图3 在不同磷浓度基质中种植密度对野菱生物量分配的影响 ($\bar{X} \pm SE$)

Fig. 3 Effects of planting density on biomass allocation of *Trapa incisa* Sieb. et Zucc. in substrata with different phosphorus concentrations ($\bar{X} \pm SE$)



□: 低种植密度 Low planting density
 ■: 高种植密度 High planting density

LP: 低磷浓度 Low substratum phosphorus concentration $27.56 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; MP: 中磷浓度 Median substratum phosphorus concentration $52.85 \pm 1.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; HP: 高磷浓度 High substratum phosphorus concentration $115.61 \pm 2.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

图4 在不同磷浓度基质中种植密度对野菱植株不同部位磷含量的影响 ($\bar{X} \pm SE$)

Fig. 4 Effects of planting density on phosphorus content in different parts of *Trapa incisa* Sieb. et Zucc. in substrata with different phosphorus concentrations ($\bar{X} \pm SE$)

营养的运输与交流。

实验结果表明,在本实验所设置的种植密度范围内,无论是在低磷、中磷还是高磷浓度基质中,提高种植密度都能够促进野菱个体的生长以及磷盐在其体内的运输;种植密度低的野菱植株不但通过增加茎直径和茎生物量比来提高磷盐在体内的运输,而且还以提高叶生物量比的策略来达到更多地从水体中吸收营养盐的目的。然而,由于水生植物在水生生态系统中起着重要的界面作用^[11],影响水生植物生长的因素非常复杂,在自然状态下,种植密度对野菱生长的影响作用究竟如何,还需要大量的原位实验加以验证。

参考文献:

- [1] Schindler D W. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management[J]. *Science*, 1974, 184: 897 - 899.
- [2] Carpenter S R. Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(29): 10002 - 10005.
- [3] 张智, 刘亚丽, 段秀举. 湖泊底泥磷释放影响因素显著性试验分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2006, 15(2): 16 - 19.
- [4] Pip E. Ecogeographical tolerance range variation in aquatic macrophytes[J]. *Hydrobiologia*, 1984, 108: 37 - 48.
- [5] Vojtisková L, Munzarová E, Votrubová O, et al. Growth and biomass allocation of sweet flag (*Acorus calamus* L.) under different nutrient conditions[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 518: 9 - 22.
- [6] 马剑敏, 靳萍, 李益健. 富营养湖泊大型围隔和围栏中磷的动态[J]. *植物资源与环境学报*, 2001, 10(1): 44 - 47.
- [7] Best E P H. The aquatic macrophytes of Lake Vechten: species composition, spatial distribution and production [J]. *Hydrobiologia*, 1982, 95: 65 - 77.
- [8] 简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 湖北省海口湖、太白湖与武山湖水生植物多样性的比较研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1815 - 1824.
- [9] 彭映辉, 简永兴, 倪乐意, 等. 长湖水生植物多样性及其变化[J]. *云南植物研究*, 2003, 25(2): 173 - 180.
- [10] Cronin G, Lodge D M. Effects of light and nutrient availability on the growth, allocation, carbon/nitrogen balance, phenolic chemistry, and resistance to herbivory of two freshwater macrophytes [J]. *Oecologia*, 2003, 137: 32 - 41.
- [11] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes[J]. *Aquatic Botany*, 1986, 26: 341 - 370.
- [12] 张圣照, 王国祥, 濮培民. 太湖藻型富营养化对水生高等植物的影响及植被的恢复[J]. *植物资源与环境学报*, 1998, 7(4): 53 - 58.
- [13] Dvoak J, Best E P H. Macro-invertebrate communities associated with the macrophytes of Lake Vechten: structural and functional relationships[J]. *Hydrobiologia*, 1982, 95: 115 - 126.
- [14] Titus J E, Adams M S. Coexistence and the comparative light relations of the submersed macrophytes *Myriophyllum spicatum* L. and *Vallisneria americana* Michx. [J]. *Oecologia (Berl.)*, 1979, 40: 273 - 286.
- [15] 丁炳扬, 方云亿. 菱科[M]//裘宝林. 浙江植物志(第四卷). 杭州: 浙江科学技术出版社, 1993: 298 - 303.
- [16] 陈家宽, 周进. 湖北斧头湖浮叶水生植物群落学研究: I. 菱群落的结构[J]. *水生生物学报*, 1995, 19(1): 40 - 48.
- [17] Carignan R, Kalf J. Phosphorus sources for aquatic weeds: water or sediments?[J]. *Science*, 1980, 207: 987 - 989.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 71 - 76.
- [19] Hunt R. Plant Growth Analysis[M]. London: Edward Arnold, 1978.
- [20] Nagashima H, Terashima I, Katon S. Effects of plant density on frequency distributions of plant height in *Chenopodium album* stands: analysis based on continuous monitoring of height-growth of individual plants[J]. *Annals of Botany*, 1995, 75: 173 - 180.
- [21] Cipollini D F, Bergelson J. Plant density and nutrient availability constrain constitutive and wound-induced expression of trypsin inhibitors in *Brassica napus* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2001, 27(3): 593 - 610.
- [22] Schroeder M S, Janos D P. Phosphorus and intraspecific density alter plant responses to arbuscular mycorrhizas [J]. *Plant and Soil*, 2004, 264: 335 - 348.
- [23] Denny P. Sites of nutrient absorption in aquatic macrophytes[J]. *Journal of Ecology*, 1972, 60(3): 819 - 829.
- [24] DeMarte J A, Hartman R T. Studies of absorption of ³²P, ⁵⁹Fe and ⁴⁵Ca by water-milfoil (*Myriophyllum exalbescens* Fernald) [J]. *Ecology*, 1974, 55(1): 188 - 194.
- [25] Sultan S E. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history[J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 5(12): 537 - 542.