

外源氮磷负荷比增加对刺苦草 (*Vallisneria spinulosa*) 生长的影响*

张 雪^{1,2}, 郑建伟¹, 周茂飞^{1,2}, 殷春雨², 关保华^{2**}

(1: 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

(2: 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)

摘要: 磷(P)是水生态系统生产力的限制因子,因此,在水体富营养化治理的过程中,许多地方采取了有效的措施控制流域P的排放;但氮(N)来源复杂,难以有效控制,导致湖泊外源的N:P负荷比日益扩大.植物的生长需要合适的N:P比,因此,外源N:P负荷比的增加可能会对沉水植物的生长产生影响.采取控制实验,将刺苦草(*Vallisneria spinulosa*)栽种于塑料桶中,每隔3 d添加1次N、P营养盐,实验设置5个处理,P外源性负荷量固定为4 mg/(m²·d),N外源性负荷量分别为0、40、80、120、160 mg/(m²·d).实验周期为80 d.结果显示:随着N:P负荷比的增加,刺苦草的叶干重、植株总干重、根干重、叶N及总N含量、叶片数、叶P及总P含量等指标基本保持不变或略有增加,单株总根长、根茎长度、块茎干重和无性系小株数目则呈现下降趋势.结果表明:随外源N:P负荷比的增加,刺苦草个体生长指标总体呈现不变的趋势,但与种群扩张潜力相关的指标如根茎长度、块茎干重和无性系小株数目等则呈现下降趋势;刺苦草体内累积的N随外源N:P负荷比的增加而增加,但P的累积保持不变.说明N:P负荷比的增加对刺苦草个体生长影响不大,但对种群扩张不利;刺苦草对P的吸收也并不随N:P比的增加而改变.

关键词: 沉水植物;氮磷负荷比;生长;形态;种群扩张潜力;刺苦草

Effect of increasing nitrogen/phosphorus ratio in loading on the growth of *Vallisneria spinulosa*

ZHANG Xue^{1,2}, ZHENG Jianwei¹, ZHOU Maofei^{1,2}, YIN Chunyu² & GUAN Baohua^{2**}

(1: College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Phosphorus (P) is a limiting factor for productivity in aquatic ecosystems. In order to control lake eutrophication, many effective measures are taken to control the P effluent in the basin, but nitrogen (N) is difficult to control due to its complex sources. Thus, the situation of low P but yet high N effluent results in a high ratio of N:P in loading in many lakes. Plants need a suitable N:P ratio to sustain their growth, therefore, the increasing of the N:P ratio in effluents might affect the growth of submerged macrophytes. To acquire an insight into the influence of increasing N:P ratios on the submerged plants, we carried out an outdoor control experiment. *Vallisneria spinulosa* was planted in plastic buckets with N and P added to the buckets every 3 days. We set up five treatments with an unchanging P loading dose of 4 mg/(m²·d), with a range of nitrogen loading dose including 0, 40, 80, 120 and 160 mg/(m²·d). The experiment lasted for 80 days. Results showed that with an increase of the N:P ratio in the loading, some indicators were nearly stable, such as leaf dry weight, total plant dry weight, leaf N and total N content, leaf number, leaf P and total P content, while some other indicators, such as plant total root length, cloning stem length, stem dry weight and ramet numbers decreased. The results above revealed that with an increasing N:P ratio in loading, individual growth indicators of *V. spinulosa* would remain stable or exhibit a minor increase, but that the indicators of population expansion ability, such as cloning stem length, tuber dry weight and ramet numbers, would decline, while the P absorption would not change with increasing N:P ratio in loading.

* 国家自然科学基金项目(31270409)资助. 2016-05-18 收稿;2016-10-07 收修改稿. 张雪(1992~),女,硕士研究生;E-mail:evonnesary@163.com.

** 通信作者; E-mail:bhguan@niglas.ac.cn.

Keywords: Submerged macrophyte; N:P ratio in loading; growth; morphology; population expansion potential; *Vallisneria spinulosa*

湖泊富营养化成为日益严峻的环境问题^[1]. 人类活动导致的人湖营养盐增加是湖泊富营养化的主要诱因,大量含有氮(N)、磷(P)等营养物质的工业废水和生活污水排放到湖泊中,雨水冲刷和渗透使残留的化肥也进入湖泊水体,再加上江湖阻断使水流速度大幅减缓,水体滞留时间增长,更新缓慢,水体自净能力减弱^[2]. 湖泊富营养化的治理已经得到重视,外源污染控制是保障湖泊生态修复的前提^[3]. 目前国内外都重视对外源P的控制,但N的来源比较复杂,难以有效控制,因此湖泊外源的N:P负荷比日益扩大^[4]. 如鄱阳湖外源负荷中N越来越多,导致N:P负荷比值持续增加^[5]. 太湖地区无论是来自降雨的湿沉降还是入湖河流带来的外源污染,N含量都远远超过P^[6].

土壤中N:P比的改变会影响植物体内生命物质的合成,从而影响植物的生长速率和死亡率^[7-8]. 沉水植物除了通过根部从沉积物中吸收营养盐外,还能够通过叶片直接从上覆水中吸收营养盐^[9]. 因此,沉水植物的生长不但会受底泥N、P含量的影响,还会受到水体中N、P浓度的影响^[9-10]. 从生态化学计量学特征来看,沉水植物体内的N:P比低于浮游植物^[11],因此,水体中N:P比增加将不利于沉水植物生长但有利于浮游植物生长^[12]. 湖泊调查和研究发现,沉水植物能够在N、P浓度变化范围较大的湖泊出现,但N:P比值增加会导致沉水植物生长受到抑制直至消失^[13-15].

为了解N:P负荷比升高对沉水植物生长的影响,本实验参考太湖入湖河流负荷情况,通过每隔3d添加1次外源营养液,设置P负荷稳定在4 mg/(m²·d),而N负荷设置0、40、80、120和160 mg/(m²·d)梯度,测定刺苦草(*Vallisneria spinulosa*)的生长和种群扩张与维持潜力相关指标,揭示外源N:P负荷比增加对沉水植被的影响,为沉水植物保护和水生态修复提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 实验设计及处理

实验于2008年5月17日—8月6日在中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖“863”实验基地(31°28'19.19"N,120°13'28.14"E)开展. 将20只塑料桶统一放置在一块土壤平台上,桶底端埋入10 cm土,以保持其稳定. 塑料桶上内径41 cm、下内径35 cm(下底面积约0.1 m²)、深56 cm. 每只塑料桶中铺设6 cm沉积物;沉积物于5月17日前采自太湖梅梁湾的芦苇带,拣出沉积物中的螺蛳、杂物和植物残体,混匀后铺入塑料桶中. 每只桶中加入40 cm深的水(约40 L)(水来自太湖,泵入湖边的水泥池中澄清1周后使用). 沉积物和水放入实验桶中之后,盖上桶盖,遮光静置24 h,避免附着和浮游藻类生长. 实验桶放置在梅梁湾岸边的一处开阔平台上,处于自然光照和温度条件.

刺苦草是水鳖科苦草属沉水草本植物,在长江中下游湖泊中广泛分布^[16]. 随着长江中下游湖泊富营养化,刺苦草分布面积逐渐缩小^[17]. 实验开始时,在每只桶中种植10株来源相同、大小一致的刺苦草(干物质含量为0.0605±0.0080 g/株,叶片末端至根末端的长度为16.74±1.90 cm;叶片数8±1),刺苦草为块茎萌发的幼苗. 10株刺苦草均匀分配空间. 取刺苦草原苗测定初始总氮(TN)、总磷(TP)含量. 实验处理如表1所示,每组4个重复.

表1 实验处理

Tab.1 Experimental treatment

| | 处理组 | | | | |
|----------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|
| | 0N+4P | 40N+4P | 80N+4P | 120N+4P | 160N+4P |
| 每次添加N量/mg | 0 | 12 | 24 | 36 | 48 |
| 每次添加P量/mg | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 相当于N负荷量/(mg/(m ² ·d)) | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 |
| 相当于P负荷量/(mg/(m ² ·d)) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

本研究根据太湖等湖泊的外源负荷特征设置入湖 N、P 负荷量^[23-24]. 实验系统上覆水的氮本底浓度为 0.94 mg/L, 磷本底浓度为 0.11 mg/L. 每 3 d 添加 1 次营养盐(NH₄Cl 与 KH₂PO₄), 用 N、P 添加量除以实验桶底面积(0.1 m²) 和天数(3 d), 获得 N、P 入水负荷量. 实验分 5 个处理(表 1). 在添加营养盐之前定时测定水柱 pH 值和水温. 实验过程中每天刷洗桶壁, 避免附着生物生长; 定期添加蒸馏水补充蒸发掉的水分; 下雨时用雨布遮盖, 防止过多雨水进入引起溢水. 用塑料绳标记每桶中种入的 10 株刺苦草, 以便在实验后期与无性系分株区别开来.

1.2 样品分析

实验结束时, 将用塑料绳标记的刺苦草植物完整取出, 冲洗干净, 数叶片数目; 每桶随机取一棵整株, 另外随机取一株将根、叶以及根茎和块茎等部分分开, 将刺苦草的须根全部拔下, 等分成 4 份, 随机取一份测量每根的长度, 相加后乘以 4, 计算每株刺苦草的总根长. 整株和各部分分开后的样品放入 60℃ 烘箱中烘干至恒重, 测植物整株和各部分干重以及叶片和整株植物的 TN、TP 含量. 收获每桶中所有的刺苦草, 测量所有根茎的长度, 相加后除以 10, 获得每桶中单株刺苦草的根茎长. 同样的方法获得每桶中单株刺苦草的块茎干重和无性系小株数目.

1.3 数据处理

实验数据运用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析, 采用单因素方差分析, $P < 0.05$ 为差异性显著. 用平均值 ± 标准误在 Excel 软件中作图.

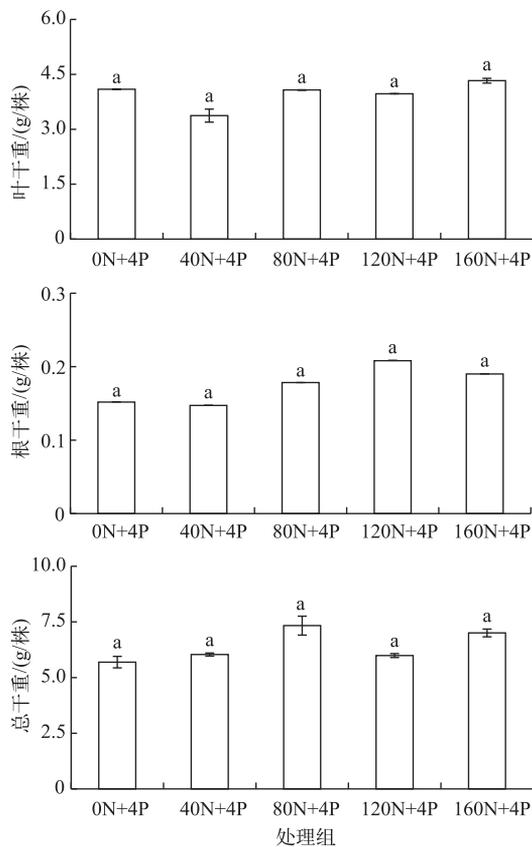


图 1 刺苦草生物量随 N:P 负荷比升高的变化

Fig.1 Changes of *V. spinulosa* biomass with increasing nitrogen and phosphorus ratio loading

2 结果

2.1 刺苦草生物量随 N:P 负荷比升高的变化

叶干重、总干重和根干重各处理组间无显著差异 ($P > 0.05$). 随着 N:P 负荷比的增加, 叶干重和总干重在变动中略呈增加趋势, 根干重的增加趋势比较明显(图 1).

2.2 刺苦草形态随 N:P 负荷比升高的变化

叶片数各处理间无显著性差异 ($P > 0.05$). 随着 N:P 负荷比的增加, 叶片数基本保持不变. 单株总根长 0N+4P 和 40N+4P 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 单株总根长随着 N:P 负荷比的升高呈现下降趋势(图 2).

2.3 刺苦草氮磷含量随 N:P 负荷比升高的变化

叶氮含量 160N+4P 处理组显著高于 0N+4P 处理组 ($P < 0.05$), 随着 N:P 负荷比的升高, 叶氮含量呈现上升趋势; 总氮含量 160N+4P 处理组显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 总体也呈现上升趋势. 叶磷含量和总磷含量各处理间无显著性差异 ($P > 0.05$), 总体保持不变趋势(图 3).

2.4 刺苦草种群扩张潜力随 N:P 负荷比升高的变化

根茎长度、块茎干重和无性系小株数各处理间均无显著性差异 ($P > 0.05$), 随着 N:P 负荷比的升高均呈下降趋势(图 4).

3 讨论

随着流域 P 排放措施的实施, 汇入湖泊的 P 含量逐步得到控制, N 含量相对较高, 外源 N:P 负荷

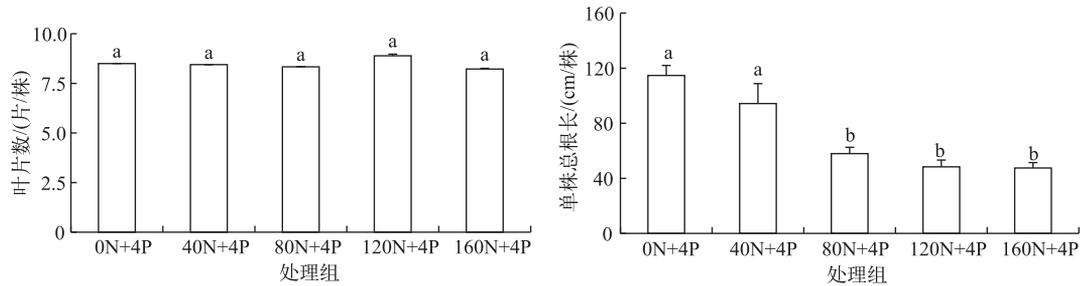


图2 刺苦草形态随 N:P 负荷比升高的变化

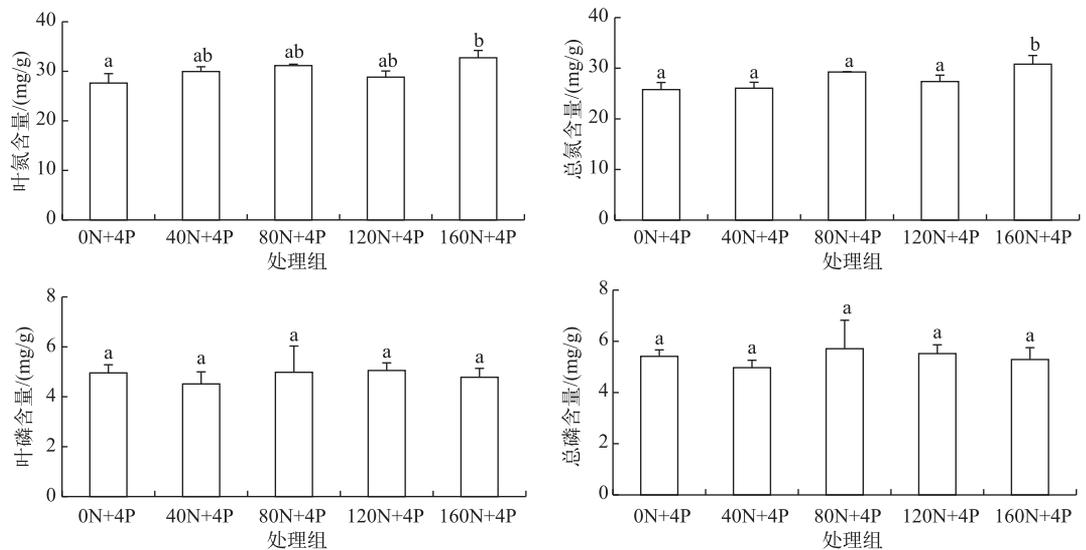
Fig.2 Changes of *V. spinulosa* morphology with increasing nitrogen and phosphorus ratio loading

图3 刺苦草氮磷含量随 N:P 负荷比升高的变化

Fig.3 Changes of nitrogen and phosphorus contents in *V. spinulosa* with increasing nitrogen and phosphorus ratio loading

比的升高导致许多湖泊的富营养化趋势越来越表现出 N:P 比升高的趋势^[4-6]。如天目湖 N:P 比由 2001—2002 年的 18 变为 2006 年的 25^[18]。鄱阳湖、巢湖和太湖水体入湖 N:P 负荷比近年也呈现出升高趋势^[5, 19-20]。水生植物体内的 N:P 比介于 4:1~13:1 之间,而浮游植物体内的 N:P 比值高达 16:1,因此,水体 N:P 比提高将会利于浮游植物生长^[11-12]。在本实验中,经过 90 d 持续不断的营养盐输入,0N+4P 和 40N+4P 处理组的实验水体 N:P 比低于 13:1,而其他外源 N:P 负荷比增加的处理组,最终上覆水中 N:P 比都超过 13:1(图 5)。吴红飞等^[21]研究发现,N:P 比升高会导致浮游和附着植物生物量增加,但对沉水植物个体生物量没有显著影响。这与本研究得到的结论相似。随外源 N:P 负荷比升高,刺苦草的叶干重、叶片数和植株总干重(主要由叶干重组成)等个体指标保持不变甚至略呈增加趋势。

但以往的研究对沉水植物繁殖方面的关注较少,因此把水体富营养化导致的沉水植物消失,归因于浮游植物大量生长后对水生植物生长的制约^[12]。实际上,由于沉水植物体内的 N:P 比不超过 13:1,因此,水体 N:P 比超过此值可能会不利于沉水植物生长。沉水植物以无性繁殖为主,其无性繁殖器官主要由茎及其衍生物形成^[22]。一般通过克隆生长,不断增加分枝或分株数目来扩大分布面积,维持种群数量;在生长末期,则形成休眠越冬繁殖体,等生长条件合适时发芽生长^[22-23]。因此,当沉水植物分枝或分株生长受到制约时,

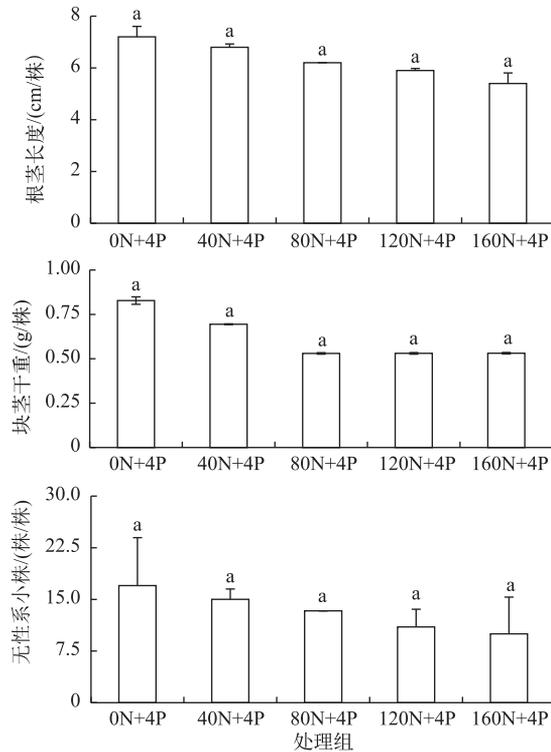


图4 刺苦草种群扩张潜力随 N:P 负荷比升高的变化

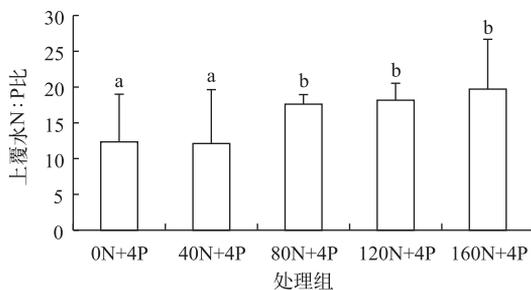
Fig.4 Changes of population expansion potential of *V. spinulosa* with increasing nitrogen and phosphorus ratio loading

图5 各处理组上覆水 N:P 比

Fig.5 Nitrogen and phosphorus ratio in overlying water in different treatments

种群扩张能力受到抑制^[24];而当休眠体生长受到制约时,未来的种群维持能力受到抑制^[25].刺苦草叶基生,无直立茎,生长季节集中在春、夏季,通过根状匍匐茎上分生多数无性系分株拓展分布区域;秋季开花结实,但种子发芽率不高,主要靠越冬块茎在来年发芽维持种群.随着水体 N:P 比升高,刺苦草无性系分株数量下降,地下块茎数量和质量(干重)都呈现下降趋势,导致其在长江中下游湖泊的分布面积大量萎缩^[16-17].

此外,随着外源 N:P 负荷比的升高,刺苦草干物质中 P 含量不变,但 N 含量提高,即刺苦草干物质中 N:P 比升高. N:P 比提高会导致植物出现 P

限制,植物倾向于分配较多的碳水化合物到根部去获取充足的 P,导致叶片中光合效能相对不足,叶片光合作用受到限制,影响植物的初级生产力,影响植物的种间关系和优势度,导致植物竞争力下降^[7-8,26].

沉水植物是维持浅水湖泊清水稳态的关键生物种类,沉水植物覆盖度降低或消失会导致水体从清水稳态向浊水稳态转换^[27].因此,在富营养化水体生态修复的过程中,大面积种植沉水植物是一个重要的手段^[28].刺苦草是长江中下游水生生态修复中常常使用的工具种^[27].外源 N:P 负荷比的提高会导致湖泊水体 N:P 比升高,促进浮游植物生长,抑制沉水植物的种群扩张潜力,不利于沉水植物建群和扩张分布面积;同时也促使沉水植物体内 N:P 比提高,影响植物光合作用和碳水化物流向.因此,控制 N 负荷、降低 N:P 负

荷比应该在湖泊保护和生态修复中引起关注.

4 参考文献

- [1] Qin Boqiang, Yang Liuyan, Chen Feizhou *et al.* The mechanism and control technology of lake eutrophication and its application. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **16**: 1857-1866. [秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, **16**: 1857-1866.]
- [2] Qin Boqiang, Gao Guang, Zhu Guangwei *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **10**: 855-864. [秦伯强, 高光, 朱广伟等. 湖泊富营养化及其生态系统响应. 科学通报, 2013, **10**: 855-864.]
- [3] Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW *et al.* Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, **323** (5917): 1014-1015.
- [4] Wu Yali, Xu Hai, Yang Guijun *et al.* Progress in nitrogen pollution research in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 19-28. DOI:10.18307/2014.0103. [吴雅丽, 许海, 杨桂军等. 太湖水体氮素污染状况研究进展. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 19-28.]
- [5] Hu Chunhua. The water environmental characteristic and its evolutionary trends of Poyang Lake [Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2010. [胡春华. 鄱阳湖水环境特征及演化趋势研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2010.]
- [6] Wang Xiaozhi, Yin Weiqin, Chan Yuhua *et al.* Nitrogen and phosphorus input from wet deposition in Taihu Lake region: A case study in Changshu ecological Experimental station. *Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(10): 2487-2492. [王小治, 尹微琴, 单玉华等. 太湖地区湿沉降中氮磷输入量——以常熟生态站为例. 应用生态学报, 2009, **20**(10): 2487-2492.]
- [7] Venterink H O, Güsewell S. Competitive interactions between two meadow grasses under nitrogen and phosphorus limitation. *Functional Ecology*, 2010, **24**(4): 877-886.
- [8] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New phytologist*, 2004, **164** (2): 243-266.
- [9] Denny P. Sites of nutrient absorption in aquatic macrophytes. *The Journal of Ecology*, 1972, **60** (3): 819-829.
- [10] Wang Bin, Li Wei. Physiological reactions of *Potamogeton malaianus* to different N and P concentrations in the growth medium. *Journal of Ecology*, 2002, **10**: 1616-1621. [王斌, 李伟. 不同 N、P 浓度条件下竹叶眼子菜的生理反应. 生态学报, 2002, **10**: 1616-1621.]
- [11] Xing Wei, Liu Han, Liu Guihua. Ecological stoichiometry in aquatic ecosystems: Studies and applications. *Journal of Plant Science*, 2015, (5): 608-619. [邢伟, 刘寒, 刘贵华. 生态化学计量学在水生态系统中的研究与应用. 植物科学学报, 2015, (5): 608-619.]
- [12] Sagrario G, María A, Jeppesen E *et al.* Does high nitrogen loading prevent clear-water conditions in shallow lakes at moderately high phosphorus concentrations? *Freshwater Biology*, 2005, **50**(1): 27-41.
- [13] Hu Mianhao, Yuan Juhong, Xiang Lücheng *et al.* Influence of different nitrogen: phosphorus on growth characteristic of perennial aquatic plant. *Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(11): 2487-2493. [胡绵好, 袁菊红, 向律成等. 不同氮磷比对多年生水生植物生长特性影响的研究. 环境工程学报, 2011, **5**(11): 2487-2493.]
- [14] James C, Fisher J, Moss B. Nitrogen driven lakes: The Shropshire and Cheshire Meres? *Archiv für Hydrobiologie*, 2003, **158**(2): 249-266.
- [15] Jensen JP, Kristensen P, Jeppesen E. Relationships between nitrogen loading and in-lake concentrations in shallow Danish lakes. International Association of Theoretical and Applied Limnology, Proceedings, 1990.
- [16] Chen Lei. Population dynamics and persistence of *Vallisneria spirulosa* in lakes of the middle-lower reaches of the Yangtze River revealed by molecular markers [Dissertation]. Wuhan: Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2007. [陈磊. 基于分子标记的刺苦草在长江中下游湖泊的种群动态与维持研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院武汉植物园, 2007.]
- [17] Meng Fanjuan. Effects of eutrofication and changing water level on biomass of submerged macrophytes [Dissertation]. Hefei: China University of Science and Technology, 2011. [孟凡娟. 湖泊富营养化和水位变化对沉水植被生物量的影响[学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.]
- [18] Gao Yongxia, Zhu Guangwei, He Ranran *et al.* Variation of water quality and trophic state of Lake Tianmu. *Environmental*

- Science, 2009, (3): 673-679. [高永霞, 朱广伟, 贺冉冉等. 天目湖水质演变及富营养化状况研究. 环境科学, 2009, (3): 673-679.]
- [19] Wang Shunli, Zhang Hongcai, Wei Hefen *et al.* Eutrophication current situation and research of the east-half of Chaohu Lake. *Journal of Biology*, 2016, (2): 13-17. [汪顺利, 张宏才, 魏荷芬等. 巢湖东半湖富营养化现状的研究. 生物学杂志, 2016, (2): 13-17.]
- [20] Zhu Guangwei. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2008, **20**(1): 21-26. DOI:10.18307/2008.0103. [朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 21-26.]
- [21] Wu Hongfei, Guan Baohua, Yao Sipeng *et al.* Influence of N:P ratio on primary producers of shallow lakes. *Ecological Science*, 2014, **33**(6): 1041-1046. [吴红飞, 关保华, 姚思鹏等. 氮磷负荷比对浅水湖泊初级生产者的影响. 生态科学, 2014, **33**(6): 1041-1046.]
- [22] Yuan Longyi, Xue Xinghua, Jing Bohan. Advances in the growth pattern and reproduction characteristics of aquatic plants. *Northern Gardening*, 2013, **24**: 191-195. [袁龙义, 薛兴华, 经博翰. 水生植物生长格局和繁殖特点研究进展. 北方园艺, 2013, **24**: 191-195.]
- [23] Grace JB. The adaptive significance of clonal reproduction in angiosperms: An aquatic perspective. *Aquatic Botany*, 1993, **44**(2/3): 159-180.
- [24] Wang Wei. Characteristics of reproduction and spread for *Aconitum leucostomum* Worosch population in Nalati Mountain Meadow [Dissertation]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2012. [王卫. 那拉提山地草甸草地白喉乌头种群繁殖及蔓延特性研究[学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.]
- [25] Jiao Dezhi, Me Lu, Huang Zhaoyue *et al.* Bud population dynamics of *Phragmites australis* in heterogeneous habitats of Northeast grassland. *Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(2): 404-410. [焦德志, 么璐, 黄翌月等. 东北草地异质生境芦苇芽种群动态. 应用生态学报, 2015, **26**(2): 404-410.]
- [26] Wang Qi, Xu Chengyang. Affects of nitrogen and phosphorus on plant leaf photosynthesis and carbon partitioning. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2005, (5): 59-62. [王琪, 徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响. 山东林业科技, 2005, (5): 59-62.]
- [27] Liu Zhengwen. Ecosystem recovery and water quality improvement of lakes. *China Water Conservancy*, 2006, **17**: 30-33. [刘正文. 湖泊生态系统恢复与水质改善. 中国水利, 2006, **17**: 30-33.]
- [28] Liu Congyu, Liu Pingping, Liu Zhengwen *et al.* Study on the functions of submerged macrophytes in ecological restoration and water quality improvement. *Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36**(7): 2908-2910. [刘从玉, 刘平平, 刘正文等. 沉水植物在生态修复和水质改善中的作用——以惠州南湖生态系统的修复与构建(中试)工程为例. 安徽农业科学, 2008, **36**(7): 2908-2910.]