

生长不同根冠比沉水植物的实验水体对磷输入的响应比较研究*

陈德元 谢贻发 刘正文**

暨南大学生态学系与水生生物研究中心 广州 510632

摘要 沉水植物是维持浅水湖泊清水型生态系统的关键因子。沉水植物可以从水和沉积物中吸收营养盐,但具有不同根冠比的种类有明显的差异,因此对生态系统的影响可能存在差异。以根冠比不同的两种常见沉水植物——苦草 (*Vallisneria natans*) 和轮叶黑藻 (简称黑藻) (*Hydrilla verticillata*) 为研究对象,通过建立实验水体,比较不同磷负荷条件下沉水植物生物量、水和沉积物中磷含量的变化,以探讨具有不同沉水植物种群的水体对外源营养盐负荷的响应特征。结果显示:随着磷负荷增加,苦草生物量降低,而黑藻生物量上升;苦草的根冠比显著高于黑藻,且两种沉水植物的根冠比都随磷负荷增加而降低。与没有沉水植物的结果比较显示:苦草和黑藻在不同磷负荷条件下,都能显著降低水和沉积物中磷的含量;苦草对沉积物中磷含量的影响大于黑藻,而黑藻对水中磷含量的影响大于苦草。因此,在外源营养盐负荷较高时,黑藻比苦草能更有效地削减水中磷浓度,从而更有利于维持浅水湖泊清水型生态系统;但沉积物扰动较强时,苦草和黑藻对水体的影响尚需进一步研究。(图3 表4 参24)

关键词 沉水植物;磷;根冠比;苦草;轮叶黑藻;浅水湖泊

CLC X524 : X17

The response to external phosphorus loadings of experimental aquatic systems with submerged plants of different root to shoot ratios*

CHEN Deyuan, XIE Yifa & LIU Zhengwen**

Department of Ecology and Research Center of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract Owing to their capability to take nutrients from both water and sediments, submerged macrophytes play an important role in maintaining the clear-water ecosystems in shallow lakes. Species with different root to shoot ratios may have different effects on lake ecosystems. In order to explore the responses of aquatic ecosystems with different submerged macrophytes to external nutrient loadings, this study, we established experimental ecosystems inhabited with two submerged macrophyte species *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata*, and compared their biomass, the phosphorus (P) concentrations in water and in sediments under different phosphorus loadings. The results showed that with the increase of P loadings the biomass of *V. natans* decreased and that of *H. verticillata* increased; the root to shoot ratio was higher in *V. natans* than in *H. verticillata*, though both decreased during the experiment. Compared with the control without submerge macrophytes, the water and sediments of both *V. natans* and *H. verticillata* had lower P contents. *V. natans* had more significant effects than *H. verticillata* on sediment P contents. In contrast, the effect on water P concentrations was more significant in *H. verticillata* than in *V. natans*. Thus, our study suggests that in higher external nutrient loadings, *H. verticillata* is more sufficient to reduce P concentrations in waters than *V. natans*. However, the effect of *V. natans* and *H. verticillata* on aquatic ecosystems need further study when there is a strong sediment resuspension.

Keywords submerged macrophyte; phosphorus; root to shoot ratio; *Vallisneria natans*; *Hydrilla verticillata*; shallow lake

富营养化是我国湖泊尤其是浅水湖泊面临的主要环境问题,而磷(P)是控制富营养化的关键因子^[1-2]。在一定营养盐浓度范围内,浅水湖泊生态系统可能存在两种具有不同生态特征的状态:一种以浮游植物为优势初级生产者,水体浑浊,水质较差,富营养化严重时可能暴发蓝藻水华,即

浑水型生态系统;一种以沉水植物为优势初级生产者,水体清澈,水质较好,即清水型生态系统^[3-4]。因此,在湖泊治理实践中沉水植物群落的重建或恢复成为湖泊治理是否成功的关键^[1]。苦草 (*Vallisneria natans*) 和轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) (以下简称黑藻)是淡水水体中常见的沉水植物,广布于热带、亚热带地区和温带。国内诸多湖泊恢复工程实践中均展开了沉水植物的群落重建,这两种沉水植物也都得到了应用。

国内外有关沉水植物对湖泊生态系统影响及其机

收稿日期 Received: 2016-04-04 接受日期 Accepted: 2016-06-21

*国家自然科学基金项目(41471086)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41471086)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: zliu@niglas.ac.cn)

理的研究很多,包括沉水植物对营养盐的吸收^[6-7]、对沉积物再悬浮和营养盐释放的影响^[8-9]、对食物网结构的影响^[10]和对浮游植物的化感作用^[11-12]等。沉水植物生长时同时吸收沉积物和水中的营养盐,影响水和沉积物中营养盐的含量^[13]。而不同沉水植物种类由于生态性状不一样,如苦草的根冠比大于黑藻,其从沉积物和水中的吸收营养盐的能力不同^[14]。因此,生长有黑藻和苦草的水体对营养盐输入的响应可能不同,从而应用在湖泊修复中也会产生不同的水质效果。在不同生态性状的沉水植物的影响下,磷等营养盐进入水体后,沉水植物、水和沉积物中营养盐的响应不同,这对沉水植物群落结构对湖泊生态系统的影响和湖泊修复中沉水植物种类的选择有重要的意义。本研究选择我国常见沉水植物苦草和黑藻,探讨生长有两种沉水植物的实验水体对磷输入的影响,并对磷的归趋进行分析,从而为富营养化湖泊中沉水植物群落修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

试验于 2007年7-10月(共12周)在珠海大镜山水库边露天进行。实验水体为直径60 cm、高75 cm的塑料水桶。沉水植物苦草和黑藻取自广东省惠州市西湖。沉积物采自珠海郊区鱼塘的表层沉积物(0-10 cm),混匀后分别置于实验桶中,厚度为15 cm,注水沉淀7 d后,采集水样进行分析后种植沉水植物,种植前进行称重,以获得初始生物量。

实验分3组,即苦草、黑藻和空白对照(无沉水植物);两个磷营养负荷水平,即高负荷组和低负荷组。因为磷增加了,氮(N)可能成为水中浮游植物生长的限制因子,所以为了减少氮的影响,添加时按20:1的N:P质量比添加氮。添加的氮、磷分别为KNO₃和KH₂PO₄,添加量为:(1)高负荷组,每两周添加1 mg/L(N)或50 μg/L(P);(2)低负荷组,每两周添加0.2 mg/L(N)或10 μg/L(P)。共有6个实验组合(表1),每种组合3次重复,共18个实验水体(水桶)。

表1 实验设计处理表
Table 1 Treatments of the experiment

处理组别 Treatment group	苦草组 <i>V. natans</i>	黑藻组 <i>H. verticillata</i>	对照组 Control
低负荷 Low nutrient loading	L.N. + V	L.N. + H	L.N. + C
高负荷 High nutrient loading	H.N. + V	H.N. + H	H.N. + C

实验种植的苦草为高度10-15 cm的幼苗,黑藻为长10-15 cm的断枝,每个实验桶种植的沉水植物均为5株,每种沉水植物另取未种植入实验桶中的5株作为实验初的沉水植物样品。水样的初次采集即为实验开始,实验期间通过添加大镜山水库水来补充蒸发和采样所耗的水分,以维持实验水体的水位。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 水样采集与分析 水样共采集两次,分别在实验桶注水沉淀7 d后的实验初(2007年7月26日)与12周后的实验末(2007年10月21日)两日的早间9:00-10:00进行。水样用采水器

采集距水面20 cm深处的水样,低温保存后带回实验室测定水化指标。水体中总磷(TP)、总溶解性磷(TDP)的测定采用钼酸铵分光光度法。

1.2.2 沉水植物样品采集与分析 沉水植物样品采集只在实验结束后进行,在水样采集后,将实验桶水位排低至底泥部分裸露,小心分离植株根系及匍匐茎附近土体后整株系挖出,尽量保留根系完整不破坏。自实验桶中取出的样品在现场预先轻微过水洗去大块泥土,后用封口袋包装带回实验室。在实验室中用装有蒸馏水的洗瓶缓缓冲洗植株附着泥土后,装入开孔袋置于烘箱烘干后用于生物量干重与TP的测定。

沉水植物TP的测定采用H₂SO₄-H₂O₂消煮法预处理,再采用钼锑抗比色法测定。

1.3 数据分析

实验测得各项数据,除实验初黑藻与苦草的沉水植物样品为1组1次无重复外,其余各组水样及沉水植物样品每组均有3次重复。不同处理之间差异比较用方差分析进行统计分析,多重比较采用SNK法,用SPSS Statistics 20软件完成。

2 结果

2.1 营养盐负荷对沉水植物生物量、磷含量和水中磷浓度的影响

实验结束后两种沉水植物在不同营养盐负荷处理组的生物量增加并呈现显著差异(图1)。苦草在低负荷组生长较好,其生物量显著高于高负荷组($P < 0.05$);与苦草不同,黑藻生物量在高负荷组显著高于低负荷组($P < 0.05$)。

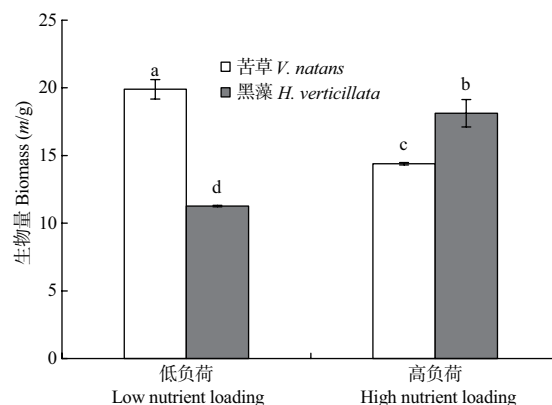


图1 营养盐添加12周后苦草和黑藻生物量增加量(DW)。不同字母表示不同沉水植物间差异统计性显著($P < 0.05$)。

Fig. 1 Increment of the biomass of *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata* after 12-week nutrients addition. The lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

两种植物根冠比在低负荷组中均显著高于高负荷组($P < 0.05$),苦草的差异高于黑藻(图2)。

实验过程中苦草TP含量有所增加,高负荷组显著高于实验前($P < 0.05$)(表2),与初始值相比,分别增加了0.3%和17.5%。黑藻TP含量的变化趋势与苦草相似,与初始相比,分别增加了1.3%和35.8%。黑藻TP含量较苦草更易受到营养负荷的影响,黑藻初始值和低负荷组中的TP含量比苦草低

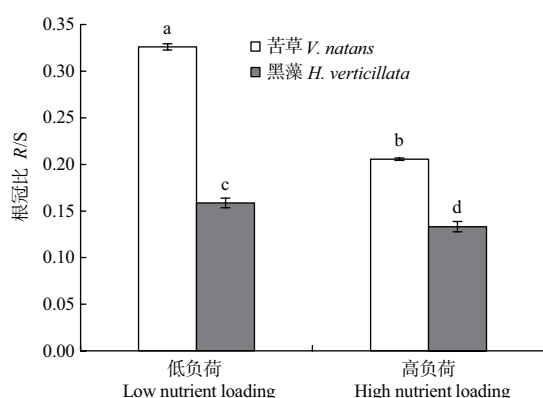


图2 营养盐添加12周后苦草和黑藻根冠比。不同字母表示不同沉水植物间差异统计性显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 2 The root / shoot ratio of *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata* after 12-week nutrients addition. The lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

($P < 0.05$), 而在高负荷组黑藻的TP含量高于苦草, 但差异统计性不显著 ($P > 0.05$)。

表2 营养盐添加12周前后苦草和黑藻的总磷 (TP) 含量 ($\mu\text{g g}^{-1}$, DW; mean $\pm$ SD)

Table 2 Concentration of total phosphorus (TP) in *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata* at the beginning and end of 12-week nutrients addition ($\mu\text{g g}^{-1}$, DW; mean $\pm$ SD)

植物种类 Plant species	实验前 Beginning of the experiment	实验后 End of the experiment	
		低负荷 Low nutrient loading	高负荷 High nutrient loading
苦草 <i>V. natans</i>	2.85 ± 0.05^a_b	2.86 ± 0.05^a_b	3.35 ± 0.10^a_a
黑藻 <i>H. verticillata</i>	2.57 ± 0.04^b_b	2.61 ± 0.07^b_b	3.49 ± 0.11^a_a

上标表示同列之间的差异统计性, 下标表示同行之间的差异统计性。不同小写字母表示组间差异统计性显著 ($P < 0.05$)。

Superscript letters indicate significant difference in the same column; subscript letters indicate significant difference in the same row ($P < 0.05$).

实验前后各处理组水中磷浓度有显著变化 (表3)。实验后, 与没有沉水植物的对照组相比, 不论是苦草或黑藻, 水中TP浓度都较低 ($P < 0.05$)。在实验过程中, 对照组和苦草组在低负荷时水中的TP浓度显著下降 ($P < 0.05$), 而在高负荷时TP浓度升高 ($P < 0.05$)。在黑藻组中水体TP浓度都显著降低 ($P < 0.05$)。

2.2 不同沉水植物对磷归趋的影响

磷进入有沉水植物的实验水体后的归趋主要是3个“磷库”: 一是沉水植物, 磷被吸收利用后部分储存于沉水植物的生物量中; 二是以不同形态滞留在水中, 这也是影响水质

的关键; 三是沉积物, 磷通过沉降等途径进入沉积物中。在没有沉水植物的水体中则只有水和沉积物两个“磷库”。

苦草和黑藻生物量中TP持有量随植物生物量和植物中TP含量的增加而增加。实验结束时, 苦草生物量中TP增加量在低负荷组较高, 达到56.91 mg, 在高负荷组其TP增加量为48.25 mg ($P < 0.05$)。黑藻的TP持有量则在高负荷组较高, 为63.32 mg, 在低负荷组为29.36 mg ($P < 0.05$)。同时, 在低负荷组中, 苦草生物量中的TP增加量显著高于黑藻 ($P < 0.05$), 在高负荷组中苦草生物量的TP增加量则显著低于黑藻 ($P < 0.05$) (图3)。

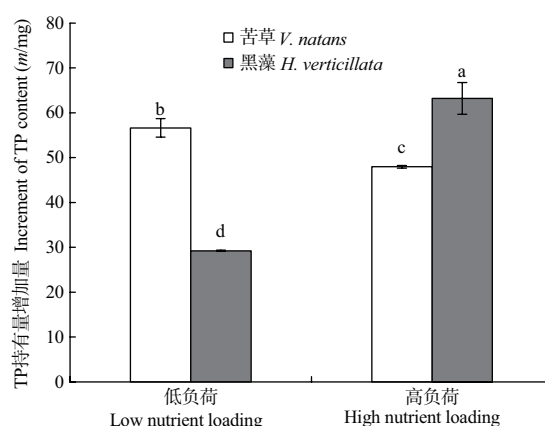


图3 营养盐添加12周后沉水植物生物量TP增加量。不同字母表示不同沉水植物间差异统计性显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 3 Increment of TP content of the submerged macrophyte biomass at the end of 12-week nutrients addition. Lowercase letters indicated significant difference ($P < 0.05$).

实验前后水中的TP总量随浓度的变化而变化。在苦草组中, 低营养盐负荷处理中TP浓度下降, 水中持有的TP也减少, 在高营养盐负荷时水中TP浓度增加, 因此水中持有的TP是增加的。在黑藻组中, 无论是低负荷还是高负荷, 水中TP浓度都是降低的, 因此水中TP持有量的变化均为负值 (表4)。而没有沉水植物的对照组水中TP总量在低负荷时下降 (增量为负值), 而在高负荷时增加 (表4)。

沉积物中TP在沉水植物组中是减少的 (表4)。与高负荷处理相比, 苦草组沉积物中TP在低负荷处理下降较多。黑藻组中沉积物TP下降比苦草组少, 而且与苦草组相反, 在高负荷处理中沉积物TP下降较多。而没有沉水植物的对照组表层沉积物中TP总量是增加的 (表4)。

表3 营养盐添加12周前后各处理组水中TP浓度均值 ($\mu\text{g L}^{-1}$, DW; mean $\pm$ SD)

Table 3 Concentration of TP ($\mu\text{g L}^{-1}$; mean $\pm$ SD) in the water at the beginning and end of 12-week nutrients addition

处理组别 Treatment group	低负荷 Low nutrient loading		高负荷 High nutrient loading	
	实验前 Beginning of the experiment	实验后 End of the experiment	实验前 Beginning of the experiment	实验后 End of the experiment
对照组 Control	172.62 ± 3.58^b_b	152.1 ± 4.95^c_c	172.62 ± 3.58^b_b	305.68 ± 4.95^a_a
苦草组 <i>V. natans</i>	182.54 ± 10.18^a_b	92.65 ± 20.62^c_c	172.53 ± 22.31^a_b	201.66 ± 7.57^b_b
黑藻组 <i>H. verticillata</i>	177.83 ± 14.65^a_a	10.08 ± 2.86^b_b	181.62 ± 2.69^a_a	19.98 ± 2.86^b_b

上标字母表示同列之间的差异统计结果比较, 下标字母表示同行之间的差异统计结果比较。不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

Superscript letters indicate significant difference in the same column; subscript letters indicate significant difference in the same row ($P < 0.05$).

表4 营养盐添加12周前后磷的变化 (mg; mean $\pm$ SD)Table 4 Changes in total phosphorus (mg; mean $\pm$ SD) at the beginning and end of 12-week nutrients addition

处理组别 Treatment group	低负荷 Low nutrient loading			高负荷 High nutrient loading		
	对照组 Control	苦草组 <i>V. natans</i>	黑藻组 <i>H. verticillata</i>	对照组 Control	苦草组 <i>V. natans</i>	黑藻组 <i>H. verticillata</i>
添加量 Nutrients added	6.00 $\pm$ 0.00	6.00 $\pm$ 0.00	6.00 $\pm$ 0.00	30.00 $\pm$ 0.00	30.00 $\pm$ 0.00	30.00 $\pm$ 0.00
水 Waters	-2.05 $\pm$ 0.85	-8.99 $\pm$ 1.81	-16.77 $\pm$ 1.18	13.31 $\pm$ 0.73	4.56 $\pm$ 2.48	-16.16 $\pm$ 0.51
沉积物 Sediments	8.05 $\pm$ 0.85	-41.64 $\pm$ 1.57	-6.46 $\pm$ 1.04	16.69 $\pm$ 0.72	-22.53 $\pm$ 2.59	-17.04 $\pm$ 3.97
沉水植物 Submerged macrophytes	0.00 $\pm$ 0.00	56.63 $\pm$ 2.06	29.24 $\pm$ 0.14	0.00 $\pm$ 0.00	47.97 $\pm$ 0.29	63.20 $\pm$ 3.52

负值表明减少, 正值表明增加。

Negative values indicate decreases; positive values indicate increases.

3 讨论

本研究结果显示, 沉水植物对水、沉积物中磷含量以及磷的归趋有显著影响, 而且不同种类的影响不同。沉水植物能显著降低水和沉积物中磷含量, 苦草对沉积物中磷的影响大于黑藻, 而黑藻对水中磷的影响大于苦草。对磷影响的差异与沉水植物的生长速度(生物量)、根冠比等生态性状有关。

营养盐负荷增加会降低苦草的生长速度, 但会提高黑藻的生长速度(图1)。沉水植物可以同时从沉积物和水体中吸收营养^[15-16], 植物利用两种来源营养盐的比例随沉积物和水体中营养盐可得性的变化而有所变化^[17-18]。同时, 具有不同生态性状的沉水植物对沉积物或水体中营养盐的依赖程度不同。苦草属于草甸型种类(Meadow-forming species)生物量分布主要在水体中下层。黑藻属于冠层种类(Canopy-forming species), 生物量分布主要在水体中上层^[19-20]。前者与后者相比根冠比较高, 从而更多地从沉积物中吸收营养盐, 相比之下, 后者更多地从水中吸收营养盐^[13]。在营养盐负荷较低时, 水质较好, 透明度较高, 光照条件好, 苦草又能较多地从沉积物获得营养盐, 因此生长较好。与苦草相比, 黑藻的生长更多地依赖于水中的营养盐, 因而在负荷较低、水中营养盐较少时, 生长速度不如苦草。然而, 当营养盐负荷增加时, 黑藻能获得较多的营养盐。同时, 营养盐负荷增加可能使水中浮游植物增殖, 从而降低了水体的透明度, 影响光照, 而黑藻在水上层生物量较多, 不容易受到光照的影响。苦草则不同, 分布于水体中下层的生物量较多, 水中营养盐增多后浮游植物增加, 使苦草生长受光的限制, 生长速度降低, 生物量变少。本研究也显示, 沉水植物的形态对营养盐有一定的适应性变化。尤其是苦草在水中营养盐较低时根冠比较高(图2), 这样能使植物更好地从沉积物中吸收营养盐。Denny (1972)对6种大型水生植物的研究^[21]发现, 沉积物的营养盐提高后, 美国苦草(*Vallisneria americana*)和黑藻的生长速度均有提高, 黑藻的生长速度提高倍率显著高于苦草。而Van等(1999)对美国苦草和黑藻的研究也发现, 提高沉积物营养盐含量, 苦草和黑藻都会减少对根生长的投入, 尤其是黑藻, 主要投资于巨大冠层的营造以提高光的竞争力; Van等同时发现, 水体营养盐的增加同样会提高黑藻的竞争力, 在富营养化水体中黑藻更容易成为优势种群^[22]。因此, 黑藻较苦草在富营养化水体中的竞争优势明显。

本研究中, 苦草组和黑藻组中沉积物的磷含量有所下降, 也说明两种沉水植物不同程度地利用了沉积物中的

磷。苦草组沉积物磷下降幅度在不同负荷处理组中都大于黑藻组, 说明苦草对沉积物磷的利用多于黑藻(表4)。然而, 黑藻对水中营养盐的影响大于苦草(表4)。Angelstein和Schubert (2008)发现属于冠层型的沉水植物伊乐藻(*Elodea nuttallii*)主要从水体吸收营养盐^[23]。在低营养盐负荷时, 虽然黑藻生物量低于苦草(图1), 生物量所固定的磷也少于苦草(图3), 但黑藻组水中磷浓度却低于苦草组(表3), 这可能与黑藻主要从水中吸收营养盐有关。当营养盐负荷增加后, 苦草生长受到抑制, 同时从水中吸收的磷可能更少, 因此对水中磷的影响显著低于黑藻。

已有研究显示, 苦草对沉积物再悬浮的抑制能力高于冠层型沉水植物伊乐藻, 从而更有效地降低水体内部源负荷和水中磷的浓度^[24]。本研究中由于没有鱼类扰动的影响, 由于体积小风浪引起的扰动也很小。因此, 在存在外源营养盐负荷和沉积物扰动时, 苦草和黑藻对浅水湖泊生态的影响有待进一步研究。

参考文献 [References]

- Wetzel RG. Limnology: Lake and River Ecosystems [M]. London: Academic Press, 2001
- 杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 中国湖泊现状 & 面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22 (6): 799-810 [Yang GS, Ma RH, Zhang L, Jiang JH, Yao SC, Zhang M, Zeng HA. Lake status, major problems and protection strategy in China [J]. *J Lake Sci*, 2010, 22 (6): 799-810]
- Scheffer M. Multiplicity of stable states in freshwater systems [J]. *Hydrobiologia*, 1990, 200-201 (1): 475-486
- Scheffer M, van Nes EH. Shallow lakes theory revisited: Various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 584 (1): 455-466
- Søndergaard M, Moss B. Impact of submerged macrophytes on phytoplankton in shallow freshwater lakes [M]//Lennart P, Larry BC. The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes. New York: Springer-Verlag, 1998: 115-132
- 王立志. 两种沉水植物对间隙水磷浓度的影响[J]. 生态学报, 2015, 35 (4): 1051-1058 [Wang LZ. Influence of two submerged macrophytes on pore water phosphorus concentration [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35 (4): 1051-1058]
- Kufel L, Kufel I. Chara beds acting as nutrient sinks in shallow lakes—a review [J]. *Aquat Bot*, 2002, 72 (3-4): 249-260
- 包先明, 陈开宁, 范成新. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分

- 布及界面释放的影响[J]. 湖泊科学, 2006, **18** (5): 515-522 [Bao XM, Chen KN, Fan CX. Effects on nitrogen and phosphorus distribution in interstitial water and sediment-water nitrogen and phosphorus release with growing of submerged macrophytes [J]. *J Lake Sci*, 2006, **18** (5): 515-522]
- 9 Barko JW, James WF. Effects of submerged aquatic macrophytes on nutrient dynamics, sedimentation, and resuspension [M]//Lennart P, Larry BC. The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes. New York: Springer-Verlag, 1998: 197-214
- 10 Jeppesen E, Lauridsen TL, Kairesalo T, Perrow MR. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton interactions in lakes [M]//Lennart P, Larry BC. The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes. New York: Springer-Verlag, 1998: 91-114
- 11 Van Donk E, van de Bund WJ. Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto- and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms [J]. *Aquat Bot*, 2002, **72** (3-4): 261-274
- 12 孙志伟, 邱丽华, 段舜山, 蔡卓平, 李卓佳, 文国樑. 化感作用抑制有害藻类生长的研究进展[J]. 生态科学, 2015, **34** (6): 188-192 [Sun ZW, Qiu LH, Duan SS, Cai ZP, Li ZJ, Wen GL. Research progress on allelopathic effects for algae control [J]. *Ecol Sci*, 2015, **34** (6): 188-192]
- 13 莫家勇, 钟萍, 刘正文. 生态修复对浅水湖泊沉积物磷形态特征及湖水磷浓度的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22** (2): 320-325 [Mo JY, Zhong P, Liu ZW. Effects of ecological restoration on the sediment phosphorus form and the water phosphorus concentration in a shallow lake. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22** (2): 320-325]
- 14 Zhang LY, Li KY, Liu ZW, Middelburg JJ. Sedimented cyanobacterial detritus as a source of nutrient for submerged macrophytes (*Vallisneria spiralis* and *Elodea nuttallii*): an isotope labeling experiment using ¹⁵N [J]. *Limnol Oceanogr*, 2010, **55** (5): 1912-1917
- 15 Eugelink A. Phosphorus uptake and active growth of *Elodea canadensis* michx. and *Elodea nuttallii* (planch.) st. John [J]. *Water Sci Technol*, 1998, **37** (3): 59-65
- 16 Madsen TV, Cedergreen N. Sources of nutrients to rooted submerged macrophytes growing in a nutrient-rich stream [J]. *Freshwater Biol*, 2002, **47** (2): 283-291
- 17 Carignan R. An empirical model to estimate the relative importance of roots in phosphorus uptake by aquatic macrophytes [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1982, **39** (2): 243-247
- 18 Pelton DK, Levine SN, Braner M. Measurements of phosphorus uptake by macrophytes and epiphytes from the LaPlatte River (vt) using ³²P in stream microcosms [J]. *Freshwater Biol*, 1998, **39** (2): 285-299
- 19 Duarte CM, Kalff J. Biomass density and the relationship between submerged macrophyte biomass and plant growth form [J]. *Hydrobiologia*, 1990, **196** (1): 17-23
- 20 Herb WR, Stefan HG. Seasonal growth of submersed macrophytes in lakes: the effects of biomass density and light competition [J]. *Ecol Modell*, 2006, **193** (3-4): 560-574
- 21 Denny P. Sites of nutrient absorption in aquatic macrophytes [J]. *J Ecol*, 1972, **60** (3): 819
- 22 Van TK, Wheeler GS, Center TD. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria americana* as influenced by soil fertility [J]. *Aquat Bot*, 1999, **62** (4): 225-233
- 23 Angelstein S, Schubert H. *Elodea nuttallii*: uptake, translocation and release of phosphorus [J]. *Aquat Biol*, 2008, **3**: 209-216
- 24 吴红飞, 魏小飞, 关保华, 刘正文. 沉水植物对鱼类扰动引起的沉积物再悬浮的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, **43** (4): 369-371 [Wu HF, Wei XF, Guan BH, Liu ZW. The effect of submerged macrophytes on sediment resuspension induced by fish disturbance [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2015, **43** (4): 369-371]