

周茂飞,郑建伟,关保华,等. 沉水植物在持续氮、磷负荷条件下对上覆水营养盐含量的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(3):234-237.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.03.059

沉水植物在持续氮、磷负荷条件下 对上覆水营养盐含量的影响

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

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 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, 江苏南京 210008)

摘要:在草型湖泊中,沉水植物能够降低水体中的营养盐含量并抑制浮游植物生长,从而维持水体清澈。但持续不断的外源污染会导致沉水植物衰退直至消失,引起水质恶化。为研究持续外源污染对草型水体水质的影响,本研究设置为期 80 d 的控制试验,每 3 d 添加 1 次氮、磷营养盐,比较研究有、无刺苦草系统上覆水营养盐含量的变化。结果发现,刺苦草组上覆水中各种形态氮、磷含量均低于无草组;pH 值显著高于无草组($P < 0.05$);浮游植物含量一开始低于无草组,20 d 后开始升高,30 d 左右高于无草组;附着藻含量一直显著低于无草组($P < 0.05$)。说明刺苦草能够有效缓解由外源负荷持续增加导致的上覆水营养盐升高和水体酸化,抑制浮游植物和附着植物的生长,但当外源污染持续 30 d 后对浮游植物不再具有抑制能力。这意味着在持续不断增加外源营养盐的情况下,浮游藻类暴发的可能性增加,草型水体可能会转变成藻型水体。因此,在水生态修复过程中最好完全切断外源污染。

关键词:沉水植物;持续氮、磷负荷;刺苦草;营养盐;水体酸化;浮游植物;附着植物;生态修复;外源污染

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)03-0234-04

水体富营养化是当前突出的环境问题,我国大部分湖泊、水库、河流都处于富营养化甚至超富营养化状态^[1]。富营养化破坏了水生态系统的结构,导致水体丧失自净能力,饮用水水质受到严重威胁^[2-4]。近年来,我国已经开展了大量工作,在流域范围内控制湖泊的外源污染,但很多湖泊依然存在持续不断的外源污染,导致湖泊水质难以好转甚至持续恶化^[5-6]。

沉水植物是水生态系统的重要组成部分^[7],能够通过促沉降、吸收营养盐、抑制沉积物释放营养盐并提高沉积物滞留营养盐能力等作用,降低水体营养盐含量,维持水体清澈,减少水体的内源负荷,是富营养化水体生态修复的关键工具种^[8-10]。但在水生态修复的过程中,是否需要完全切断外源污染依然存在争议^[11]。

由于大量草型湖泊和生态修复后的湖泊依然存在持续外源污染,沉水植物在持续外源污染条件下能否继续维持上覆水低营养盐是一个值得探讨的问题,因此本研究设置室外控制试验,分为刺苦草组与无草组,持续添加氮、磷营养盐,定期监测上覆水营养盐、浮游植物和附着植物的变化,分析持续氮、磷负荷对沉水植物系统上覆水营养盐含量和浮游植物的影响,为保护和修复水生态系统提供理论参考。

收稿日期:2016-09-30

基金项目:国家自然科学基金(编号:31270409)。

作者简介:周茂飞(1992—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事湖泊生态修复研究。E-mail:happyzhoumaofei@aliyun.com。

通信作者:郑建伟,副教授,主要从事水生植物以及湖泊生态修复研究。E-mail:jwzheng@163.com。

[8] 王金贵,王益权,徐 海,等. 农田土壤紧实度和容重空间变异性研究[J]. 土壤通报,2012,43(3):594-598.

[9] Nawaz M F, Bourrié G, Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013,33(2):291-309.

[10] Hernanz J, Peixoto H, Cerisola C, et al. An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth[J]. Journal of Terramechanics, 2000,37(4):167-184.

[11] 林剑辉,孙宇瑞,曾庆猛,等. 土壤圆锥指数、水分与容重耦合模型的试验比较研究——II. 水分与深度的影响[J]. 应用基础与工程科学学报,2009,17(1):62-68.

[12] 张立彬. 土壤含水量和土壤紧实度对土壤圆锥指数值影响的试验研究[J]. 农业工程学报,1993,9(2):41-44.

[13] Ayers P D, Perumpral J V. Moisture and density effect on cone index [J]. Transactions of the Asae, 1982,25(5):1169-1172.

[14] Upadhyaya S K, Kemble L J, Collins N E, et al. Cone index prediction equations for Delaware soils [A]. ASAE Paper, 1982, No. 82-154, ASAE. St. Joseph, MI 49085.

[15] Busscher W J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content [J]. Transactions of the Asae, 1990,33(2):519-524.

[16] 林剑辉,孙宇瑞,曾庆猛,等. 土壤圆锥指数、水分与容重耦合模型的试验比较——I. 模型性能的统计检验与容重预测[J]. 应用基础与工程科学学报,2008,16(6):779-786.

[17] 焦彩强,王益权,刘 军,等. 关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(3):7-12.

[18] 张兴义,隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报,2005,36(10):161-164.

[19] 格雷戈里 P J. 作物根系的发育与功能[M]. 陈 放,周桂梅,陈 浩,等译. 成都:四川大学出版社,1992.

1 材料与方法

1.1 试验设计及样品处理

试验于中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖 863 实验基地开展。将 8 个 52 L 蓝色塑料桶统一放置在一块土质平台上,下部埋入土 10 cm,用于固定试验桶并减缓试验水体温度过高。塑料桶上内径 41 cm,下内径 33 cm,桶高 56 cm。每个塑料桶中铺设 6 cm 沉积物,沉积物采自太湖梅梁湾的芦苇带,拣出沉积物中的蚬螺、杂物和植物残体,混匀后铺入塑料桶中。每个桶中加入 40 cm 深的水(水来自太湖,泵入湖边的水泥池中澄清 7 d 后使用),水体总氮含量为 0.8 mg/L,总磷含量为 0.1 mg/L。沉积物和水放入试验桶后,为避免附着和浮游藻类生长盖上桶盖遮光澄清 24 h。之后,在其中 4 个塑料桶中均匀种植 10 株来源相同、大小一致、由块茎萌发的刺苦草幼苗(平均生物量±标准差=0.060 5±0.008 g/株,平均高度±标准差=16.74±1.90 cm;平均叶数±标准差=7.6±0.81 张)。另外 4 个塑料桶中不种植植物作为无植物对照,并在水深 10 cm 处悬挂 80 cm² 的塑料片作为附着植物的附着基。采集试验桶 20 cm 深处水样和 0~3 cm 表层沉积物,测定初始总氮(TN)、总磷(TP)含量,并留取刺苦草草样。

设置 2 个试验处理(表 1),模拟太湖等湖泊外源负荷氮、磷含量^[12-13],处理组分别每 3 d 添加 1 次营养盐(NH₄Cl 与 KH₂PO₄),外源氮负荷量为 80 mg/(m²·d),外源磷负荷量为 4 mg/(m²·d),并在添加营养盐之前定时测定上覆水 pH 值和水温。试验过程中定期刷洗桶壁,避免附着生物生长;每隔 3 d 添加蒸馏水至试验桶中,弥补蒸发散失的水分,使水深保持 40 cm;下雨时,用雨布遮盖试验桶。

1.2 样品分析

每天测量上覆水的 pH 值,每 9 d 在水深 20 cm 处采 1 次水样,测总磷(TP)、总溶解磷(TDP)、磷酸盐(PO₄-P)、总氮

(TN)、总溶解氮(TDN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)和叶绿素 a 的含量,其中各形态氮、磷测定方法参照文献[14]。浮游植物和附着藻类生物量用水体中叶绿素 a 的含量表示。叶绿素 a 含量通过丙酮提取法测定,具体方法为用醋酸纤维膜抽滤 200 mL 上覆水水样,用丙酮在 4℃下提取 24 h 后,使用分光光度计测定叶绿素 a 含量。附着藻类生物量的测定:取刺苦草叶片和无草系统中悬挂的塑料片,测量面积,用自来水轻轻冲洗干净后,用毛刷刷下表面的附着生物,用醋酸纤维膜过滤刷下的水样后,同样用丙酮提取法测定叶绿素 a 含量。

表 1 试验处理

组别	添加氮含量 [mg/(m ² ·d)]	添加磷含量 [mg/(m ² ·d)]	种植刺苦 草株数(株)	桶中水深 (m)	桶中水体积 (L)
有草组	80	4	10	0.4	52
无草组	80	4	0	0.4	52

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 软件对所有数据进行统计分析,差异显著性检验采用单因素方差分析(one-way ANOVA)。当 P<0.05 时,表示有显著性差异;当 P>0.05 时,表示没有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 上覆水各形态氮含量的变化

在持续给予相同氮、磷负荷情况下,有草组的上覆水中各种形态的氮含量均低于无草组,到试验后期,这种差别越明显。除了铵态氮(NH₄⁺-N)无显著差异外(P>0.05),有草组其他几种形态的氮均显著低于无草组(P<0.05)。其中有草组的 TN、TDN、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₃⁻-N 平均低于无草组 19.54%、23.44%、33.58%、47.63%、28.61%(图 1)。

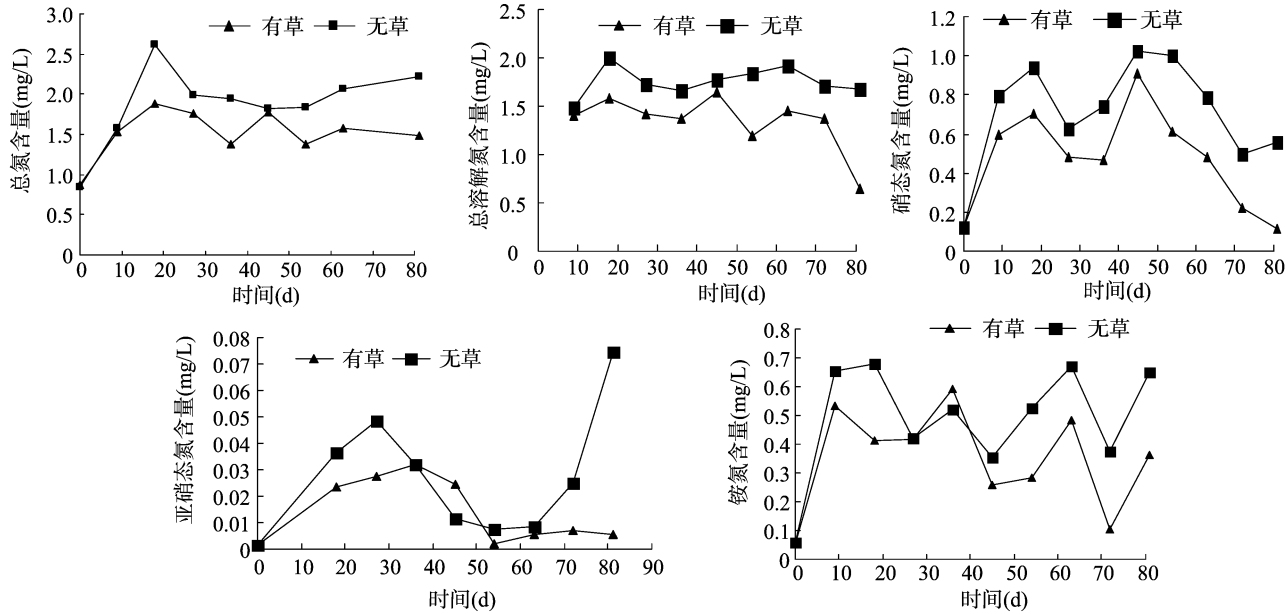


图1 持续氮磷负荷对刺苦草系统和无草系统各形态氮含量的影响

2.2 上覆水各形态磷含量的变化

与氮一样,种植刺苦草也能降低上覆水中各种形态磷的含

量,但与无草组无显著差异(P>0.05)。其中,有草组的 TP、TDP、PO₄-P 含量低于无草组 16.67%、36.33%、47.75%(图 2)。

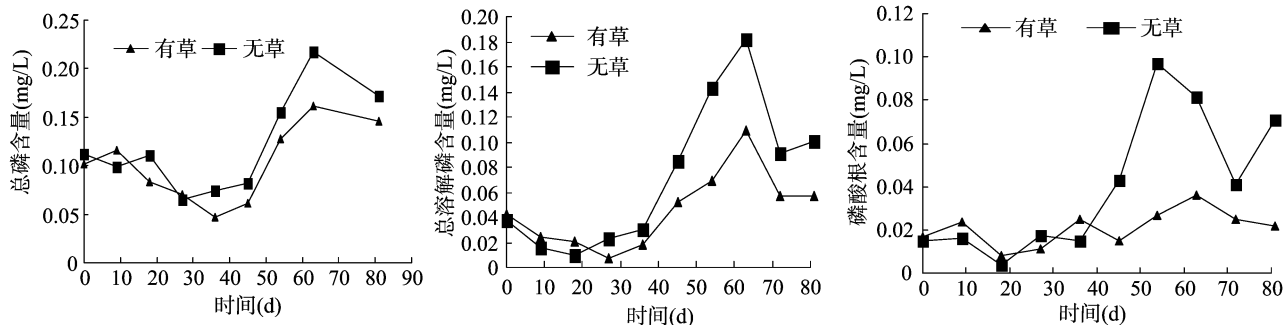


图2 持续氮磷负荷对刺苦草系统和无草系统各形态磷含量的影响

2.3 上覆水 pH 值的变化

在持续添加氮、磷负荷 20 d 内,刺苦草组上覆水中的 pH 值与无草组没有差别,此后则开始高于无草组(图 3),整个试验期间平均高出无草组 9.4%,整体显著高于无草组($P < 0.05$)。

2.4 浮游植物和附着植物的变化

刺苦草系统上覆水中浮游植物叶绿素 a 含量一开始低于无草组,但 20 d 后开始略高于无草组,试验后期高出较多(图 4),但二者并无显著差异($P > 0.05$)。刺苦草系统中附着植物叶绿素 a 含量显著低于无草组($P < 0.05$)。

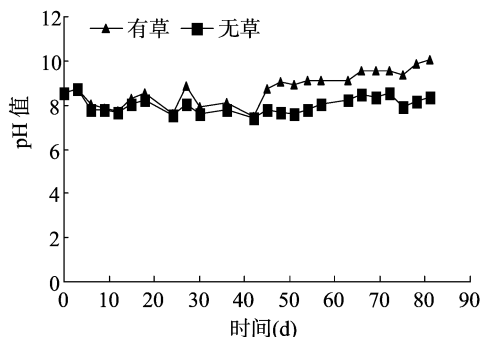


图3 持续氮磷负荷对刺苦草系统和无草系统 pH 值的影响

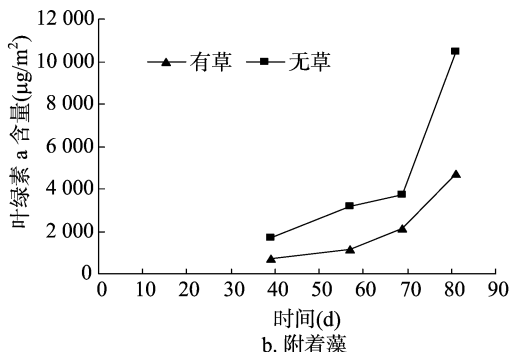
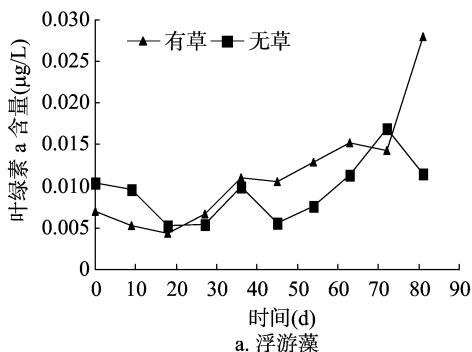


图4 持续氮磷负荷对刺苦草系统和无草系统浮游藻和附着藻叶绿素 a 含量的影响

3 讨论

“草清型”稳态的水体指沉水植物丰富、透明度高、水质较好的稳定水体状态,而“藻浊型”稳态的水体指藻类大量生长、浑浊、水质差的水体^[15-16]。富营养化导致许多浅水湖泊从“草清型”稳态转变为“藻浊型”稳态,在这个过程中,沉水植物消失和藻类暴发的先后顺序是一个值得研究的问题。从本试验结果来看,在总氮含量为 0.8 mg/L,总磷含量为 0.1 mg/L 的水体中(接近我国长江中下游大部分湖泊水体营养盐含量^[17]),持续添加氮、磷 80、4 mg/(m²·d) 负荷 20 d 后,沉水植物已经无法抑制浮游植物生长。可以预见,随着浮游植物的大量生长,遮蔽了沉水植物能够获得光照,从而导致沉水植物生长受限直至消失。因此,藻类的暴发可能是先于沉水植物消失的。

研究表明,沉水植物通过促进沉降、提高沉积物滞留能力以及吸收等作用,能显著降低富营养化水体中的营养盐含量^[18-20]。在本研究相同的氮、磷负荷情况下,刺苦草组上覆

水中各形态的氮、磷含量都低于无草组。因此,在富营养化水体的生态修复过程中,沉水植物常常作为工具种使用^[20-21];对自然湖泊的生态修复,也常常把促进沉水植物恢复作为水质恢复的必要前提^[22]。但是,在生态修复的过程中,很多水体依然有很高的营养盐含量^[23]。由于我国富营养化水体的营养盐本底值已经很高,外源营养盐的持续输入,将会在短期内破坏沉水植物构建的清水稳态,重新转变为浮游藻类占优势的浊水稳态,因此在富营养化水体的生态修复过程中必须严格切断外源负荷。

沉水植物对水体的 pH 值也会有影响^[24]。在本研究相同的氮、磷负荷情况下,刺苦草组上覆水中的 pH 值显著高于无草组,且越到后期越明显。赵联芳等研究表明,水体的 pH 值是由游离的 CO₂ 含量与碳酸之间的平衡决定的,其他条件不变,CO₂ 的含量越低,水体 pH 值就越高^[25-26]。刺苦草可以通过光合作用吸收水体中的 CO₂,从而提高水体的 pH 值。

沉水植物也可以影响水体的附着植物^[27]。在本试验的后期,有草组的叶绿素含量高出无草组,可见在持续氮、磷负

荷条件下,刺苦草并不能抑制浮游植物的生长,特别是在生长晚期,这主要是由于刺苦草分解释放的营养盐增加而导致浮游植物增加。刺苦草能显著抑制附着植物的生长,但这种抑制作用随氮、磷营养盐含量的不断增加和植物由盛到衰而大大降低。黄瑾等研究发现,高浓度营养盐的情况下,沉水植物对附着藻类有显著的抑制作用,但是不能抑制浮游植物^[28]。随着营养盐浓度的升高,沉水植物对浮游植物的营养竞争就会减弱,从而造成浮游植物大量生长^[29-31]。有研究学者推测,沉水植物向水体中分泌化感物质或者通过吸收富营养化水体中的氮、磷营养盐,从而抑制了附着藻类的生长,这有待于进一步研究^[32-34]。

4 结论

持续氮、磷负荷的情况下,刺苦草能够有效缓解外源负荷持续增加,从而导致上覆水营养盐升高和水体酸化。低浓度营养盐环境下,刺苦草能有效抑制浮游植物和附着植物生长,但当外源污染持续一段时间后,对浮游植物不再具有抑制作用。因此,在富营养化水体的生态修复过程中,为了保证修复效果,须要严格控制外源负荷。

参考文献:

- [1] 秦伯强,高 光,朱广伟,等. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报,2013,58(10):855-864.
- [2] 张振华,高 岩,郭俊尧,等. 富营养化水体治理的实践与思考——以滇池水生植物生态修复实践为例[J]. 生态与农村环境学报,2014,30(1):129-135.
- [3] Frumin G T, Gildeeva I M. Eutrophication of water bodies—a global environmental problem[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2014, 84(13):2483-2488.
- [4] Pavlidou A, Simboura N, Rousselaki E A, et al. Methods of eutrophication assessment in the context of the water framework directive; examples from the eastern mediterranean coastal areas[J]. Continental Shelf Research, 2015, 108:156-168.
- [5] 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[J]. 生态科学,2014,33(6):1041-1046.
- [6] Free C M, Jensen O P, Mason S A, et al. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 85(1):156-163.
- [7] 潘保原,杨国亭,穆立蕾,等. 3 种沉水植物去除水体中氮磷能力研究[J]. 植物研究,2015,35(1):141-145.
- [8] Steffens B, Steffen-Heins A, Sauter M. Reactive oxygen species mediate growth and death in submerged plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4:179.
- [9] 曹 磊,宋金明,李学刚,等. 滨海盐沼湿地有机碳的沉积与埋藏研究进展[J]. 应用生态学报,2013,24(7):2040-2048.
- [10] 董 悦,霍姮翠,谢文博,等. 上海后滩湿地沉水植物群落系统对底泥的生态修复效应[J]. 安全与环境学报,2013,13(2):147-153.
- [11] 董文龙,闵水发,杨杰峰,等. 湖泊富营养化防治对策研究[J]. 环境科学与管理,2014,39(11):82-85.
- [12] 张丹蓉,邵广文,管庆庆,等. 太湖流域河网地区湖泊氮磷污染负荷研究——以江苏常熟南湖荡为例[J]. 水资源保护,2016,32(2):106-110.

- [13] 章 铭,于谨磊,何 虎,等. 太湖五里湖生态修复示范区水质改善效果分析[J]. 生态科学,2012,31(3):240-244.
- [14] 程艳坤,闫志谦,伊丽丽,等. 水环境中氮、磷含量的测定及方法研究进展[J]. 河北化工,2008(1):77-78.
- [15] 毛国柱,侯长胜,柴立和,等. 基于最大流原理的草型与藻型湖泊富营养化驱动因子识别[J]. 环境工程学报,2016,10(2):768-774.
- [16] 程冬梅. 太湖草型/藻型湖区底栖微生物群落结构及其对碳源利用的比较研究[D]. 广州:暨南大学,2014.
- [17] 郭 娅,于 革. 长江中下游典型湖泊营养盐历史变化模拟[J]. 湖泊科学,2016,28(4):875-886.
- [18] 宋玉芝,杨美玖,秦伯强. 刺苦草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应[J]. 环境科学,2011,32(9):2569-2575.
- [19] Meerhoff M, Mazzeo N, Moss B, et al. The structuring role of free-floating versus submerged plants in a subtropical shallow lake[J]. Aquatic Ecology, 2003, 37(4):377-391.
- [20] 葛绪广,王国祥,陈成忠,等. 刺苦草生长对沉积物中磷迁移转化的影响[J]. 生态学报,2014,34(20):5802-5811.
- [21] 周彦珍,胡庚东,徐东坡,等. 水体营养水平对 3 种沉水植物吸收磷的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(7):390-394.
- [22] 谢雯颖. 沉水植物在水生生态恢复中的应用研究[J]. 中国农业信息,2014(12):62,64.
- [23] 毛 杰,管 超,黄文浩,等. 浅谈湖泊河道生态修复技术[J]. 资源节约与环保,2014(1):155.
- [24] Hood J A. The role of submersed macrophytes in river eutrophication and biogeochemical nutrient cycling[D]. Ontario: University of Waterloo, 2012.
- [25] 宋 红,陈 玮,何兴元,等. 三种水(湿)生植物对浑河水体氮去除能力研究[J]. 水生态学杂志,2014,35(2):14-19.
- [26] Minett D A, Cook P L, Kessler A J. Root effects on the spatial and temporal dynamics of oxygen in sand-based laboratory-scale constructed biofilters[J]. Ecological Engineering, 2013, 58(13):414-422.
- [27] Soana E, Bartoli M. Seasonal regulation of nitrification in a rooted macrophyte (*Vallisneria spiralis* L.) meadow under eutrophic conditions[J]. Aquatic Ecology, 2014, 48(1):11-21.
- [28] 黄 瑾,宋玉芝,秦伯强. 不同营养水平下苦草对附着和浮游藻类的影响[J]. 环境科学与技术,2010,33(11):17-21.
- [29] Cao J J, Ruan H H. Responses of the submerged macrophyte *Vallisneria natans* to elevated CO₂ and temperature[J]. Aquatic Biology, 2015, 23(2):119-127.
- [30] Bartoli M, Naldi M, Viaroli P, et al. Radial oxygen loss from roots of *Vallisneria spiralis* L.: biogeochemical implications in eutrophic aquatic ecosystems[D]. Italian: University of Parma Department of Life Science, 2013.
- [31] Arrigo K R, Perovich D K, Pickart R S, et al. Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice[J]. Science, 2012, 336(687):1408.
- [32] 胡凯泉,许振成,曾 东. 8 种水生生物对富营养化水体的净化效果[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):328-332.
- [33] 刘 喆,钱 新,高海龙,等. 沉水植物群落配置对太湖贡湖生态修复区的调水效果[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):480-483.
- [34] 李 佩,谢从新,何绪刚,等. 水体营养水平及附着藻类对刺苦草生长的影响[J]. 渔业现代化,2012(1):11-17.