

刘璐嘉,陈汉新,周明耀,等. 江苏地区富营养化水体浮萍修复技术应用研究[J]. 江苏农业科学,2014,42(5):320-323.

江苏地区富营养化水体浮萍修复技术应用研究

刘璐嘉¹, 陈汉新², 周明耀¹, 钱晓晴^{1,3}, 吴雪飞³, 蔡树美³, 周雄飞³

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 江苏省常州市水利局, 江苏常州 213003;

3. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

摘要:农业面源污染是引起水体富营养化的重要原因,放养浮萍作为富营养化水体修复的一种有效技术,得到越来越广泛的应用。介绍了江苏省农业面源污染状况,给出了江苏省内浮萍种质资源分布与生长环境的调查研究结果,介绍了江苏地区内浮萍在富营养化水体修复中的相关研究进展。示范试验研究结果表明,该项技术在江苏地区河、湖富营养化水体生态修复中具有广阔的应用前景。

关键词:江苏地区;浮萍;农业面源污染;富营养化;修复技术

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)05-0320-04

大量氮磷等营养物质、农药、重金属以及其他有机和无机污染物通过农田地表径流和地下渗漏进入江、河、湖泊等水体,引起水体富营养化,严重破坏了水域环境,导致一系列水生态环境问题^[1-2]。随着江苏地区农业的快速发展,由农业面源污染造成的水体富营养化问题日趋严重,导致难以估量的损失。加强水体富营养化的控制,采取有效措施逐步恢复水体原有功能,具有重要意义。与其他水生植物相比,浮萍科植物具有增殖快、高氮磷吸收能力、易收获、不易造成二次污染且具有经济价值等优势,是水体污染治理的优选方案,已经被许多国家应用于污染水体的处理^[3-6]。我国在该研究领域起步较晚,大部分研究仅限于实验室规模,实际应用研究比较缺乏。目前针对江苏省各地浮萍资源及水体修复的研究开展较少,限制了该地区浮萍在富营养化水体净化中的应用。本研究以江苏地区浮萍为研究对象,分析了江苏省农业面源污染及水体富营养化状况,结合江苏省内浮萍种质资源分布与生长环境的调查研究结果,介绍了浮萍在富营养化水体修复中的相关研究进展,通过示范应用成果阐述该项技术在江苏

地区水污染治理中的应用前景。

1 江苏省农业面源污染及水体富营养化状况

江苏省农业生产条件得天独厚,随着农业生产集约化及畜禽业规模的不断扩大,化肥、农药施用绝对量及施用强度增加迅速,加之比较薄弱的农业基础设施和粗放农业生产管理,致使农业面源污染问题愈加突出。2008年江苏省化肥施用总量达到340.8万t,化肥施用强度达到453.7 kg/hm²,远高于全国平均水平(335.3 kg/hm²),更是远远超过国家为防止化肥污染而制定的标准;2008年江苏省农田所施农药总量达到9.4万t,农业施用强度达到13 kg/hm²,同样远高于全国平均水平^[7]。农田施用的化肥、农药随农田排水、地表径流和地下渗漏进入水体,除此之外通过污染大气而后随降雨间接污染水体。

江苏省拥有丰富的水资源,在全省10.26万km²面积中,水面面积占1.73万km²。境内河川交错,水网密布,平原河网是江苏地区的主要地貌特征。农业面源污染给江苏省近一半的湖泊带来富营养化问题,并逐年加剧,甚至危及城乡居民饮用水的安全。根据《2012年江苏省环境状况公报》^[8],全省地表水环境质量总体处于轻度污染。在列入国家地表水环境质量监测网的83个国控断面中,I~Ⅲ类水质断面占43.4%,Ⅳ~Ⅴ类水质断面占54.2%,劣Ⅴ类水质断面占2.4%。地表水国控断面主要污染物高锰酸盐指数和氨氮平均浓度分别为4.1 mg/L和0.51 mg/L。太湖是我国长江中下游地区五大淡水湖之一,水面面积2338 km²,流域面积

收稿日期:2013-09-22

基金项目:江苏省自然科学基金重点项目(编号:BK2010041);江苏省水利科技项目(编号:2010012)。

作者简介:刘璐嘉(1989—),女,浙江舟山人,硕士研究生,主要从事农业水土环境方向的研究。E-mail:liulujia0516@126.com。

通信作者:周明耀,教授,博士生导师,主要从事农田灌溉排水理论与技术方向的研究。E-mail:myzhouyz@163.com。

[18]顾启华,赵林,谭欣. 铜绿微囊藻·螺旋鱼腥藻和水华束丝藻竞争优势的研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(7):1990-1991,2031.

[19]Khozin-Goldberg I, Cohen Z. The effect of phosphate starvation on the lipid and fatty acid composition of the fresh water euglenoid Monas subterranea [J]. Phytochemistry, 2006, 67(7): 696-701.

[20]薛凌展,陈小晨,黄种持,等. 温度和磷交互作用对铜绿微囊藻和小球藻生长的影响[J]. 安徽农学通报,2011,17(13):23-25,41.

[21]Liao C F H. The effect of nutrient enrichment on nitrogen fixation

activity in the Bay of Quinte, Lake Ontario [J]. Hydrobiologia, 1977, 56(3): 273-279.

[22]许秋瑾,高光,陈伟民. 从种群竞争的角度初步研究微囊藻的产毒机理[J]. 生物学杂志,2004,21(1):17-19.

[23]吕赞,王应军,冷雪,等. 稀土铈对水华鱼腥藻生理特性及藻毒素释放的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(9):1677-1683.

[24]黄道孝,肖军华,裴承新,等. 鱼腥藻毒素(Anatoxins)研究进展[J]. 中国海洋药物,2004(2):47-52.

[25]郑朔方,杨苏文,金相灿. 铜绿微囊藻生长的营养动力学[J]. 环境科学,2005,26(2):152-156.

36 500 km²^[9]。据调查,太湖流域 70% 的河湖受到污染,80% 河流水质达不到国家规定的Ⅲ类标准,全湖为富营养化状态,局部呈重富营养化状态^[10]。太湖流域地表水中的主要污染物铵态氮和总磷中来自于农业面源的分别为 57%、39%^[11]。2007 年江苏省无锡市发生了太湖蓝藻大规模暴发并引致水源地水质污染,出现水质性水资源危机。因此,采取有效措施控制河湖水污染,加强富营养化水体净化和生态修复已刻不容缓,利用浮萍进行富营养化水体净化处理成为近年来有效且易于推广应用的实用技术。

2 江苏省浮萍种质资源分布及生长环境

我国有浮萍科(Lemnaceae)植物 3 属 7 种,广泛分布于南北各省。江苏省浮萍品种丰富,有 3 属,常见的有 5 种,分别是紫萍属(*Spirodela* Schleid.)的紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)、少根紫萍(*Spirodela oligorrhiza*),浮萍属(*Lemna* L.)的青萍(*Lemna minor*)、稀脉浮萍(*Lemna perpusilla*),芜萍属(*Wolffia* Hork.)的芜萍(*Wolffia arrhiza*)^[12-13]。

为比较准确地掌握江苏地区浮萍种质资源的分布和生长情况,于 2012 年以江苏地区有关县(市、区)工业区、农田、生活区域内的河湖水体为对象,调查了夏季江苏地区的浮萍种类及其生长环境的水体质量状况。调查结果表明,浮萍主要生长在池沼、水田、湖泊或静止的河流等淡水水体中,稻田附近常见,流动的河流中少见;江苏地区夏季浮萍的主要品种为紫萍、青萍、芜萍和少根紫萍,调查中未发现稀脉浮萍与品藻,芜萍在自然水环境中常与其他萍种共存;浮萍生长的自然水体环境中氮、磷含量范围很广,铵态氮为 0~42 mg/L,硝态氮为 0.2~2.0 mg/L,总氮为 0.2~45 mg/L,总磷为 0.02~13 mg/L;紫萍和青萍分布广泛,常以共生的形式存在,在工业区劣 V 类水质的河湖中亦有发现,其生长的水体 pH 值(4.5~7.5)范围较大,在江苏地区建议考虑利用这 2 种浮萍去除水中氮、磷^[14]。

因此,在利用浮萍修复富营养化水体的时候,应充分考虑利用江苏地区当季的优势浮萍品种,并且针对不同污染程度的水体或在污水的不同处理阶段,往往需要考虑利用不同品种浮萍混合培养的方式,从而通过形成浮萍的最大生物量以实现富营养化水体中污染物的最大去除效果。

3 富营养化水体浮萍修复技术有关研究成果

浮萍是一种常见的小型水生植物,在适宜的环境条件下,能够在短时间内大量繁殖新的个体形成一定规模的种群及群落,植株生长繁殖过程中大量吸收利用富营养化水体中的氮、磷等营养物质,从而净化水体,使水体中污染物的去除问题简单地转化为水生植物的去除问题,而且浮萍容易打捞收获,富含蛋白质和淀粉,具有较高的后续利用价值,以它为主的污水净化系统逐渐形成并被越来越多地应用^[15-16]。本研究所指浮萍污水净化系统主要是浮萍与氧化塘的结合形式,浮萍处于系统的核心地位。近年来,扬州大学利用江苏地区范围内的主要浮萍种类开展富营养化水体植物修复技术的研究,主要研究内容和成果有以下几个方面。

3.1 江苏地区主要种类浮萍生长规律

了解不同品种浮萍的生长规律,进一步筛选出繁殖速度

快、污染耐受性强、生物量大的浮萍种类,有助于开发适于进行富营养化水体修复的浮萍品种。针对江苏地区分布较为广泛的主要种类浮萍开展了浮萍种群繁殖试验,探明了 Hoagland 和 Hutner 培养液中浮萍种群的生长规律,分析了稀脉浮萍、少根紫萍和紫萍等不同属浮萍的生长繁殖特性,进行了不同基因型浮萍的生长繁殖能力比较,结果发现 3 种浮萍在 Hoagland 培养液中的生长均优于 Hutner 培养液,稀脉浮萍的相对生长速率最高,少根紫萍次之,紫萍最低^[17]。

3.2 浮萍生长的适宜环境条件

浮萍通过繁殖在塘表面形成一个垫层,生长密度因环境条件不同而存在明显差异,且浮萍生物量的增长速率决定了其对氮、磷的去除能力。通过研究影响浮萍生长状况的各种环境因素,如水体 pH 值、温度、光照强度、生长密度等,最后设定一个最适宜的生长环境条件来获得浮萍最大的持续产量,实现对污水中氮、磷的高效去除。蔡树美等在研究光温条件以及 pH 值对浮萍生长及磷吸收的影响中发现,稀脉浮萍、少根紫萍生长及磷去除的最佳光强为 6 000 lx,最适气温为 25℃,最适 pH 值均在 5~6 范围内^[18]。紫萍、青萍在高温下生物量最高,为喜热品种;少根紫萍在中温时生物量最高,为喜温热品种;而稀脉浮萍在低温时生物量最高,为喜低温品种^[19]。

3.3 浮萍去除氮、磷能力的影响因素

浮萍的打捞、投放密度、不同品种浮萍混养、污水的组成及浓度等因素对浮萍氮、磷的去除能力均有不同程度的影响。周雄飞等研究了不同浮萍覆盖面积和浮萍混养体系对营养液中总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果,结果表明,单位投放密度的 TN、TP 去除率(去除率/投放密度)随着投放密度增加而下降;对 TN 去除效果最好的是稀脉浮萍和少根紫萍比例为 1:2, TN 去除率达 81.5%,对 TP 去除效果最好的是投放密度为 60% 的单种稀脉浮萍, TP 去除率达 78.2%^[20-21]。浮萍生长的最适磷浓度范围为 0.1~15.5 mg/L,在高磷浓度下紫萍对磷的去除有明显优势^[22]。

3.4 浮萍对自然和半人工水体的氮、磷去除效果

在实际情况下,不同的水体条件往往也直接影响浮萍脱氮除磷的能力,水体条件的不同包括水体中各种营养物质的组成及比例、COD、BOD 等的差异。目前,农村生态环境中最主要的污染源有集约化畜禽养殖场和农村城镇居民生活产生的氮、磷有机污水及农业废水。经济、有效和简便地处理生活污水、农业废水、景观用水等氮磷污水显得尤为重要。近年来,许多研究人员也已展开了多种浮萍对不同类型的氮磷污水净化效果的研究,研究结果表明,紫萍较适于修复高磷污染的生活污水和农业废水,而稀脉浮萍较适于低磷污染的景观水体修复^[23];在对夏季自然气候条件下少根紫萍和稀脉浮萍在污水处理厂二级出水中的生物量增长情况、浮萍体内的氮磷含量及氮磷净积累量的研究中发现,稀脉浮萍较适合氮磷污水的净化处理^[24]。

3.5 浮萍污水净化系统氮、磷去除机理

浮萍污水净化系统对污染物的去除途径主要有浮萍的直接吸收、微生物的降解及系统的物理化学作用,浮萍在系统中起到了直接或间接的作用。氮、磷等植物营养物质可被浮萍直接吸收,然后将其同化为自身的结构组成物质。氮的去除,

尽管有植物的吸收,但硝化、反硝化作用以及气态氮的挥发仍是主要的去除途径。国内外大量的研究证实,浮萍对铵态氮的吸收优先于硝态氮,这种对氮形态的偏好不仅体现在吸收顺序上,也体现在应用效率上^[25-26]。污水中可溶性的磷主要由浮萍直接吸收,含磷的固体颗粒则沉降成为底泥,最后通过收割浮萍以及挖掘底泥达到除磷的目的^[23]。

上述研究成果为富营养化水体修复提供了科学依据,为进一步进行富营养化水体浮萍修复技术示范奠定了基础。

4 富营养化水体浮萍修复技术示范应用

4.1 示范区基本情况

示范区位于江苏省常州市武进区前黄镇,示范浮萍塘位于 31.584 40°N, 119.969 70°E, 靠近农田, 占地约 0.24 hm², 南北长约 93 m, 东西宽约 25 m, 形状大致成矩形, 塘内水体条件除农田灌排水、降雨外, 无其他进出水。该地区属北亚热带季风性湿润气候区, 年平均气温 15.4 °C, 日照充足, 年平均日照时间 2 047.5 h, 雨量丰沛, 年平均降水量 1 071.5 mm。

4.2 示范过程

试验萍种为江苏省分布最广泛的紫背浮萍 (*Spirodela polyphiza*)。初始浮萍放养密度为 100%, 收割单位面积的浮萍, 称量并记录收割鲜重, 根据浮萍初始放养密度及水塘表面积估算覆盖整个水塘的初始浮萍生物量, 估算得浮萍初始生长密度为鲜重 1.62 kg/m², 浮萍生物总量为鲜重 3 875.04 kg。试验开始前, 采集一定量浮萍塘水样, 用分样筛(200 目)滤去污水中杂质及大颗粒悬浮物质, 测得其 pH 值为 6.8, 铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、TN 的浓度分别为 1.815、0.076、2.542 mg/L, 参照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》, 该水体属于 V 类水质。

试验从 2012 年 9 月开始, 将浮萍塘划分为面积相近的 5 块区域, 浮萍用漂浮索围栏框定均匀生长, 免受风吹影响, 并在塘的出水口处设置浮萍截留装置。考虑到浮萍水体净化效果以及打捞浮萍的经济效益, 当浮萍打捞周期较短时, 对浮萍的打捞过于频繁, 造成浮萍在水中停留时间较短, 不能进行充分地生长和对氮素的净化, 同时, 频繁打捞耗费人力、财力, 也不利于经济效益的获得, 因此设定打捞周期为 10 d, 即每隔 10 d 收割 20% 表面面积的浮萍生物量。同时采集水塘上游、中游、下游 3 处水样, 用分样筛(200 目)滤去污水中杂质及大颗粒悬浮物质, 进行 pH 值及 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN 的浓度测定, 记录浮萍塘水质的变化情况, 试验周期约 2 个月。

4.3 浮萍塘对富营养化水体中氮素的去除效果

4.3.1 水体中 NH₄⁺-N 的去除效果 浮萍塘水体 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度变化及去除率见图 1 和图 2 所示。从图 1、图 2 可知, 试验初期浮萍塘水体中的 NH₄⁺-N 浓度明显下降, 处理 10 d 时 NH₄⁺-N 浓度下降至 1.316 mg/L, 相应的去除率达到 27.49%。随着试验天数的增加, 水中 NH₄⁺-N 累计去除量也随之增加, 但变化速率较试验初期有所减缓。40 d 后, 水体中的 NH₄⁺-N 浓度下降至 0.997 mg/L, 累计去除率达到 45.04%。由于试验浮萍塘面积较大, 水量较多, 且野外浮萍生长自然环境难以人为控制, 试验后期所达到的 NH₄⁺-N 去除率较室内模拟试验略低。

4.3.2 水体中 NO₃⁻-N 的去除效果 由图 1、图 2 可知, 试验初期浮萍塘水体中的 NO₃⁻-N 浓度呈下降趋势, 在第 10 天时, NO₃⁻-N 浓度下降至 0.044 mg/L, 相应的去除率达到 41.48%。但是随着试验时间延长, 水体中 NO₃⁻-N 浓度先上升后下降。这一方面因为紫萍根系开始脱落、出现衰老死亡, 另一方面因为浅水体表面紫萍覆盖层在复氧作用下造成 NO₃⁻-N 浓度上升, 而后由于紫萍的生长, 水体中 NH₄⁺-N 被逐渐消耗, 紫萍开始吸收 NO₃⁻-N, 继而使 NO₃⁻-N 浓度下降。

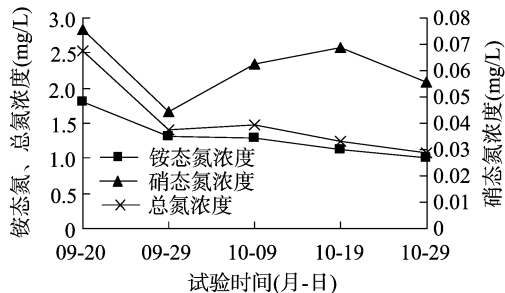


图1 浮萍塘水体氮素浓度变化情况

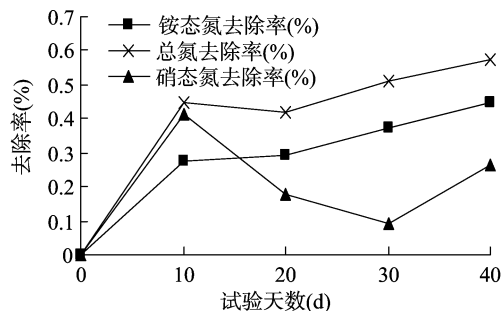


图2 浮萍塘水体氮素去除效果

对比图 1 中铵态氮和硝态氮的浓度变化情况可以发现, 水体中 NO₃⁻-N 浓度呈升高趋势, 而 NH₄⁺-N 浓度呈降低趋势, 主要是因为浮萍为喜 NH₄⁺-N 植物^[27], 浮萍吸收的 NH₄⁺-N 用于合成了氨基酸、蛋白质等, 而有一部分 NO₃⁻-N 则会储存在液泡中, 较容易释放。

4.3.3 水体中 TN 的去除效果 由图 1 可见, 浮萍塘水体 TN 浓度的变化具有一定的规律, 总体呈下降趋势, 且在试验初期的前 10 d 下降非常明显, 之后呈缓慢下降趋势。处理 10 d 时, TN 浓度下降至 1.410 mg/L, 相应的 TN 去除率达到 44.50% (图 2)。随着试验天数增加, 水体中 TN 浓度稍有上升, 主要是因为紫萍衰老死亡或根系脱落进入水体后发生分解作用, 向水体中释放一定量的氮素。随着浮萍的生长繁殖, 水体中 TN 浓度又下降, 40 d 后水体中的 TN 浓度下降至 1.086 mg/L, 累计去除率达到 57.26%。

5 结论

浮萍易生长在浅水坑、静水坑、静止的河流中以及稻田附近, 稻田附近常见, 流动的河流中较少见。江苏省浮萍品种丰富, 夏季的主要品种为紫萍、青萍(紫萍、青萍常以共生方式

存在),其次为茳茳、少根紫萍,未见稀脉浮萍和品藻。

江苏省水资源丰富,河湖众多,水体富营养化较严重,利用浮萍科植物治理受污染水体是简便、有效、易于推广的手段,不受地域、环境、水体条件等因素的限制。

富营养化水体浮萍修复技术示范应用的结果表明,浮萍塘的设置对富营养化水体有明显的净化效果,仅 40 d 水体中 TN 的去除率就达到 57.26%,且浮萍生长速率快,环境适应性强,易于收割,非常适合处理小城镇、农村等地区以氮磷为主的富营养化水体。

浮萍系统是一种低投资、低能耗、低处理成本和具有脱氮除磷功能的污水生态修复技术,能逐步修复并建立健康的水体生态系统,且收获的浮萍既可直接作为绿肥还田,也可经过开发作为优良的禽畜饲料、水产饵料、药材和生物质能源,具有较高的生态效应、经济价值和社会效益。因此,富营养化水体浮萍修复技术在江苏地区具有广阔的推广应用前景。

参考文献:

- [1]董克虞. 畜禽粪便对环境的污染及资源化途径[J]. 农业环境保护,1998,17(6):281-283.
- [2]宋家永,李英涛,宋宇,等. 农业面源污染的研究进展[J]. 中国农学通报,2010,26(11):362-365.
- [3]van der Steen P, Brenner A, van Buuren J, et al. Post-treatment of UASB reactor effluent in an integrated duckweed and stabilization pond system[J]. Water Research, 1999, 33(3):615-620.
- [4]El-Shafai S A, El-Gohary F A, Nasr F A, et al. Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(4):798-807.
- [5]Dalu J M, Ndamba J. Duckweed based wastewater stabilization ponds for wastewater treatment (a low cost technology for small urban areas in Zimbabwe)[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2003, 28(20/21/22/23/24/25/26/27):1147-1160.
- [6]曹蓉,王宝贞,彭剑锋. 东营生态塘氮磷去除机理[J]. 环境科学, 2005, 25(1):88-91.
- [7]葛继红. 江苏省农业面源污染及治理的经济学研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011:35-38.
- [8]2012 年江苏省环境状况公报[R]. 南京:江苏省环境保护厅, 2012:1-2.
- [9]孙顺才,黄漪平. 太湖[M]. 北京:海洋出版社, 1993:2-10.
- [10]刘兆德,虞孝感,王志宪. 太湖流域水环境污染现状与治理的新建议[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4):467-474.

- [11]胡必彬. 太湖流域水污染对太湖水质的影响分析[J]. 上海环境科学, 2003, 22(12):1017-1021, 1054.
- [12]印万芬. 我国主要浮萍科植物的综合开发利用[J]. 资源节约和综合利用, 1998(2):46-48.
- [13]江苏省植物研究所. 江苏植物志[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1982:321-328.
- [14]吴雪飞,刘璐嘉,马晗,等. 江苏省夏季浮萍种类及其生长水环境调查[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5):554-558.
- [15]Smith M D, Moelyowati I. Duckweed based wastewater treatment (DWWT): Design guideline for hot climates[J]. Water Science and Technology, 2001, 43(11):291-299.
- [16]程天友. 浮萍处理污水[J]. 世界科学, 1994, 32(50):37.
- [17]于斌. 浮萍对污水中氮、磷去除作用的初步研究[D]. 扬州:扬州大学, 2010:22-30.
- [18]蔡树美,张震,辛静,等. 光温条件和 pH 对浮萍生长及磷吸收的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6):63-66, 75.
- [19]吴雪飞. 浮萍去除和利用水体中不同形态氮的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2012:45-50.
- [20]周雄飞,史巍,吴晶,等. 不同投放密度的浮萍对水体氮磷去除效果的初步研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(11):161-163.
- [21]周雄飞,史巍,柏彦超,等. 浮萍混养体系对污染水体氮磷的去除效果[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(3):541-542.
- [22]张震,辛静,蔡树美,等. 不同磷浓度下浮萍生长和去除磷效率研究[J]. 江西农业学报, 2011, 23(7):160-162.
- [23]蔡树美. 不同条件下浮萍磷吸收效率及其作用机理[D]. 扬州:扬州大学, 2011:88-97.
- [24]辛静,蔡树美,张震,等. 浮萍在污水处理厂二级出水中的生长及氮磷含量研究[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(6):579-580.
- [25]毛杉杉,李岚,王敏雅,等. 6 株浮萍的污水处理能力与淀粉积累能力的差异性分析[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12):351-354.
- [26]Caicedo J R, van der Steen N P, Arce O, et al. Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) [J]. Water Research, 2000, 34(15):3829-3835.
- [27]Ran N, Agami M, Oron G. A pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel [J]. Water Research, 2004, 38(9):2240-2247.