

赵文婧,贾晓楠,王 繁. 浮床模式下沉水植物净化富营养化水体效果[J]. 江苏农业科学,2021,49(1):197-201.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.01.036

# 浮床模式下沉水植物净化富营养化水体效果

赵文婧<sup>1</sup>, 贾晓楠<sup>1</sup>, 王 繁<sup>1,2</sup>

(1. 杭州师范大学生命与环境科学学院, 浙江杭州 311121; 2. 杭州师范大学生态系统保护与恢复杭州市重点实验室, 浙江杭州 311121)

**摘要:**采用3种常见沉水植物(金鱼藻、穗花狐尾藻、苦草)为试验对象,利用自然池塘自然水体和模拟氮磷水体,通过测定水体中总氮、总磷、氨氮的含量以及藻类含量变化,比较沉水植物种植浮床对自然水体(总氮含量为0.8 mg/L,总磷含量为0.05 mg/L)和模拟水体(总氮含量为5.0 mg/L,总磷含量为2.0 mg/L)2种富营养化水体的净化效果。结果表明,在人工浮床种植模式下,苦草、穗花狐尾藻和金鱼藻对自然水体中总氮的去除率分别为49.4%、55.9%和53.8%,总磷的去除率分别为15.0%、39.6%和47.8%;对模拟水体中总磷和氨氮去除率均达到了80%以上;对自然水体中蓝藻、硅藻的抑制效果相对较好,绿藻则不太明显。综合分析,沉水植物种植浮床生长模式可以有效净化处理不同程度的富营养化水体,表现出良好的适应性。

**关键词:**沉水植物;种植浮床;氮;磷;富营养化水体;金鱼藻;穗花狐尾藻;苦草

**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)01-0197-05

氮、磷等营养物质的累积是造成水体富营养化的主要原因<sup>[1]</sup>。近年来,植物修复技术与物理、化学等修复方法相比,具有投资少、处理效果好、操作简便等优点,被广泛应用于富营养化水体的修复<sup>[2-3]</sup>。目前,用于水体修复的水生植物包括挺水植物、浮水植物和沉水植物<sup>[4-5]</sup>,其中沉水植物生态修复技术已经在国内外的水体治理工程中取得了很好的修复效果<sup>[6-7]</sup>。沉水植物可以通过自身生长吸收降低水体的氮、磷含量,并且能增加水体溶解氧含量,抑制底泥再悬浮和污染物质释放等功能。已经开展水体修复研究的沉水植物主要包括苦草<sup>[8]</sup>、狐尾藻<sup>[9]</sup>、眼子菜<sup>[10]</sup>、金鱼藻<sup>[11]</sup>、黑藻<sup>[12]</sup>等。

曹欠欠等开展了苦草、轮叶黑藻、狐尾藻和金鱼藻在自然光和避光条件下的复氧试验,结果表明,沉水植物对水体氨氮具有较好的去除率,在自然光照条件下苦草、轮叶黑藻、金鱼藻和狐尾藻对污染物的去除率分别为95.05%、92.74%、89.45%和88.29%<sup>[13]</sup>。雷泽湘等研究了太湖梅梁湾流域大型水生植物对湖水富营养化的净化效果,结果表明苦草、眼子菜、轮叶黑藻等植物能有效去除水中的氮和磷,去除率达60%以上<sup>[14]</sup>。林春风等的研究结果也证明了不同沉水植物对富营养化水体均有较好的净化效果<sup>[15-18]</sup>。

目前,沉水植物多以水底固定种植模式为主,但当水体底部缺少固定介质时,便会限制沉水植物的生产。另外,当水位太深或水体浊度较高时,水下光线较弱,植物的光合作用受到抑制,沉水植物生长过程以及富营养化水体的净化效果也会受到显著影响<sup>[19-20]</sup>。沉水植物的种植浮床模式可以破解水体底部条件以及水体透光度限制,根据自然水

收稿日期:2019-12-09

基金项目:浙江省杭州市科委主动设计项目(编号:20162013A07)。

作者简介:赵文婧(1994—),女,河南济源人,硕士,主要从事湿地生态修复技术研究。E-mail:zzhaowenjing@126.com。

通信作者:王 繁,博士,副研究员,主要从事环境污染控制与生态修复技术研究。E-mail:wangfan@hznu.edu.cn。

[15] 杨宇峰,黄祥飞. 浮游动物生态学研究进展[J]. 湖泊科学, 2000,12(1):81-89.

[16] Dumont H J. Biogeography of rotifers[J]. Hydrobiologia,1983,104(1):19-30.

[17] 胡菊香,吴生桂,陈金生,等. 巢湖富营养化对轮虫的影响研究[J]. 环境科学与技术,2007,30(12):16-18,68.

[18] Ortega-Mayagoitia E, Armengol X, Rojo C. Structure and dynamics of zooplankton in a semi-arid wetland, the National Park

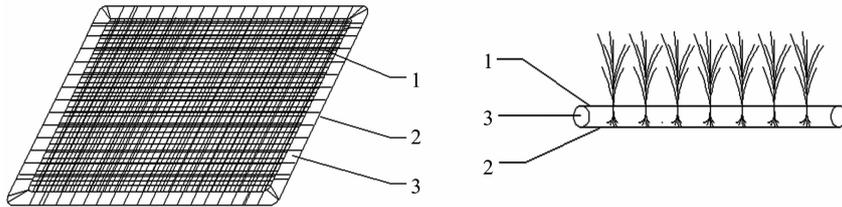
Las Tablas de Daimiel (Spain)[J]. Wetlands,2000,20(4):629-638.

[19] 郭刘超,吴苏舒,樊 旭,等. 高邮湖各生态功能区后生浮游动物群落特征及水质评价[J]. 水生态学杂志,2019,40(6):30-36.

[20] 姜磊娜,吴俊锋,任晓鸣. 高邮湖近年水质及富营养化分析[J]. 污染防治技术,2017,30(2):23-25.

[21] 魏文志,付立霞,陈日明,等. 高邮湖水质与浮游植物调查及营养状况评价[J]. 长江流域资源与环境,2010(增刊1):106-110.

体的深度和透明度调节种植浮床的水下位置,创建沉水植物良好的生态位,促进其发挥对水体的生物修复与净化功能。目前,已有一些研究提出了浮床模式下种植沉水植物修复水体的方法,但是其修复效果尚未十分明确。本试验以3种沉水植物——苦草、穗花狐尾藻和金鱼藻为试验对象,研究在种植浮床模式下沉水植物对自然水体(总氮含量为0.8 mg/L,总磷含量为0.05 mg/L)和模拟水体(总氮含量为5.0 mg/L,总磷含量为2.0 mg/L)2种富营养化水体的净化效果,为拓展沉水植物修复工程在浑浊水体的应用提供参考依据。



1—上层网片; 2—下层网片; 3—框架

图1 沉水植物种植浮床

## 1.2 沉水植物种植浮床模拟净化试验

1.2.1 沉水植物种类 本试验选取3种本土常见沉水植物,分别为金鱼藻、穗花狐尾藻、苦草<sup>[21-22]</sup>。

1.2.2 富营养化水体 试验富营养化水体设置了自然水体和模拟水体2种。自然水体为西溪湿地某池塘原水,总氮含量约为0.8 mg/L,总磷含量约为0.05 mg/L。模拟水体由池塘原水、氯化铵和磷酸钾溶液配制而成,模拟富营养化的总氮含量约为5.0 mg/L,总磷含量约为2.0 mg/L。

1.2.3 沉水植物种植方法 采用方形聚丙烯材质水槽和自制的种植浮床进行模拟种植试验。水槽容积约300 L,深约60 cm,水槽使用前用池塘原水浸泡3 d。使种植浮床正好固定在水槽底部以上10 cm处,保证沉水植物完全没入水中。沉水植物由上层网片的网孔植入浮床,合适的上层网孔大小可以保证沉水植物固定在浮床上。参照同类研究结果<sup>[23]</sup>,设置沉水植物的种植密度为1 000 g/m<sup>2</sup>鲜草,每种植物试验组设3个重复,另设1组空白对照。

1.2.4 水质指标与测试方法 种植试验于2019年6月在杭州师范大学室外温室大棚内进行,试验周期约15 d。试验过程中每隔3 d采集1次水样,测定水样的氮、磷含量(表1);利用浮游植物荧光仪(Phyto-PAM)测定自然水体中浮游植物蓝藻、绿藻、硅藻的含量。

## 1 材料与方法

### 1.1 沉水植物种植浮床的设计

PVC管浮床包括矩形PVC管框架、上层网片和下层网片。由图1可知,矩形PVC管框架采用管径为50 mm的PVC管,并在框架上分散打孔,以减少PVC管的浮力。其中上层网片为网孔边长1.5 cm的涂塑铁丝硬网,下层网片为网孔边长0.5 cm的软网。将上下网片包裹PVC浮床框架用扎带将四周缝合。

表1 水质指标及测定方法

序号	测定项目	测定方法
1	总氮含量(mg/L)	碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法
2	氨氮含量(mg/L)	流动分析仪测定法
3	总磷含量(mg/L)	过硫酸钾消解-钼蓝对比法
4	藻类叶绿素含量(μg/L)	Phyto-PAM水体叶绿素a分析仪

## 2 结果与分析

2.1 沉水植物种植浮床对富营养化水体中TN的去除效果

3种沉水植物种植床对水体总氮(TN)的去除效果如图2和图3所示。可以看出,各试验组TN浓度下降趋势基本一致。试验前期自然水体TN含量下降较快,后期水体中TN含量略有升高。原因是自然水体本身总氮浓度较低,试验前期各沉水植物不断生长,对总氮的吸附较快,试验后期水体无机养分负荷较低,植物生长受到限制,部分植物组织枯萎未及时处理,导致其腐烂于水体中,水体TN含量有所升高。试验前期模拟水体TN浓度下降较快,后期基本趋于平稳。这是由于植物处于试验初期的快速营养生长期,对氮的吸收利用较快,可快速降低水体中的总氮浓度。由于恢复时间的延长,

试验后期水体氮负荷降低,且植物营养生长相对缓慢,减少了植物对氮的吸收,导致水体总氮的去除速率缓慢<sup>[24]</sup>,去除效率降低。

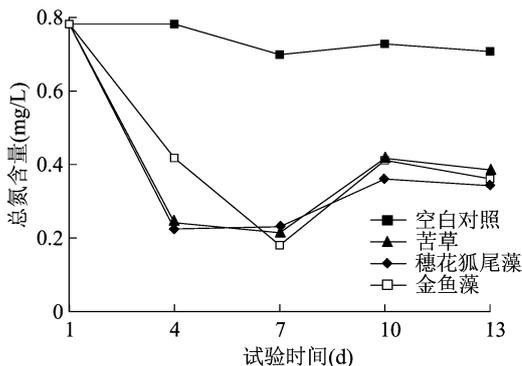


图2 沉水植物种植床对自然水体 TN 的去除效果

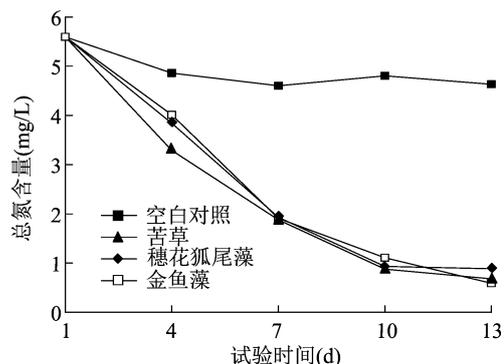


图3 沉水植物种植床对模拟水体 TN 的去除效果

从表2可以看出,3种沉水植物试验组对水体中TN均有较好的去除效果,但同时也存在一定的差异。在自然水体中,金鱼藻种植床和穗花狐尾藻种植床对水体中TN的去除率要高于苦草种植床;在模拟水体中,苦草种植床和金鱼藻种植床对水体中TN的去除率要高于穗花狐尾藻。

表2 3种沉水植物种植床对富营养化水体TN的去除效果

沉水植物	TN去除量(mg/L)		TN去除率(%)	
	自然水体	模拟水体	自然水体	模拟水体
苦草	0.386	3.793	49.4	84.8
穗花狐尾藻	0.437	4.097	55.9	82.3
金鱼藻	0.421	4.092	53.8	87.4

## 2.2 沉水植物种植浮床对富营养化水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

无机氮是植物的主要氮源,以硝酸盐和铵盐为主。植物吸收铵盐后,可直接用于合成氨基酸。因此,植物可通过阳离子交换吸附来吸收水体中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,从而去除水体中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。从图4和图5可以看出,3种植物的种植床对自然水体和模

拟水体中的氨氮均有较高的去除效果,但试验前期,穗花狐尾藻和苦草种植床对水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附速度要优于金鱼藻种植床。

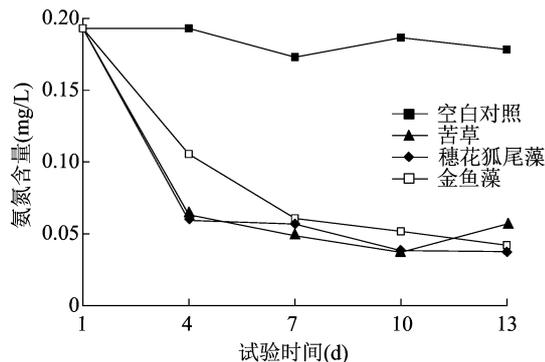


图4 沉水植物种植浮床对自然水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

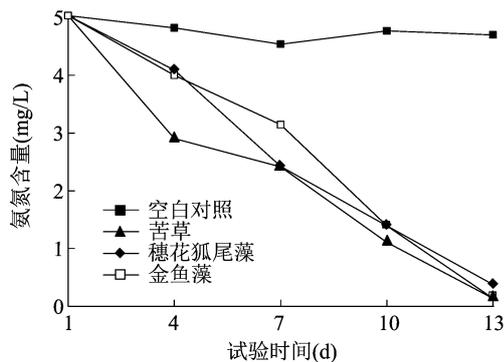


图5 沉水植物种植浮床对模拟水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

从表3可以看出,自然水体中3种植床的氨氮去除率为穗花狐尾藻>苦草>金鱼藻;模拟水体中3种植床去除率依次为苦草>金鱼藻>穗花狐尾藻。由此得出,当修复低 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的水体时,可以选取狐尾藻达到较好的快速净化效果;当修复中高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的水体时,根据实际情况,可选择苦草等耐寒、营养负荷高的植物,以达到稳定的净化效果。

表3 3种沉水植物种植床对富营养化水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

沉水植物	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除量(mg/L)		$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率(%)	
	自然水体	模拟水体	自然水体	模拟水体
苦草	0.153	0.992	79.1	99.2
穗花狐尾藻	0.155	0.984	80.1	98.3
金鱼藻	0.151	0.991	75.2	99.1

## 2.3 沉水植物种植床对富营养化水体中TP的去除效果

磷是核酸、核蛋白、磷脂、腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)以及多种酶等的重要组成成分。磷参与植物的各种代谢过程,对植物的正常生长起着重要作

用。在试验期间,3 种沉水植物种植床试验水体总磷 (TP) 含量随试验时间的变化情况如图 6 和图 7 所示。自然水体在试验开始前期的 TP 含量普遍变化不大,在试验后期 3 种沉水植物生长加速,试验水体的 TP 浓度均下降较快。

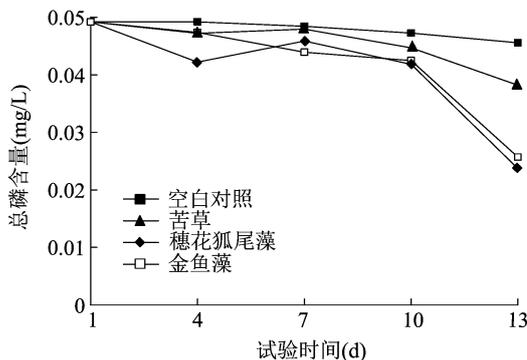


图6 沉水植物种植床对自然水体 TP 的去除效果

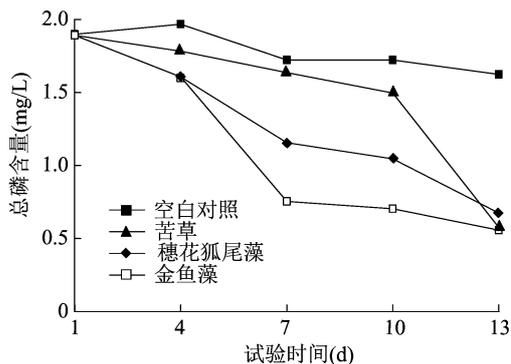


图7 沉水植物种植床对模拟富营养化水体 TP 的去除效果

模拟水体试验开始后,苦草种植床试验组水体 TP 浓度保持稳定的下降趋势,另外 2 种植物种植床试验组水体 TP 浓度迅速下降。试验初期,环境、温度和光照等适宜,水体无机养分充足,金鱼藻和穗花狐尾藻植物生长较快,故该阶段对于 TP 的吸收较快;而苦草试验初期适应较慢,在试验后期植物生长加速,水体中 TP 浓度下降迅速。在试验后期,由于水中氮负荷较低,植物生长受到限制,因此对 TP 的吸收变缓。

在自然水体和模拟水体中,3 种沉水植物对营养物质的吸收程度不同。由表 4 可知,当修复 TP 含量较低的水体时,根据实际情况优先选取金鱼藻或者穗花狐尾藻能达到较好的净化效果;当修复 TP 含量较高的水体时,可以优先选取苦草等耐高养分负荷的植物,以达到较好的净化修复效果。

## 2.5 沉水植物种植床对富营养化水体中藻类的抑制效果

水体富营养化会导致大量浮游植物和藻类的

表 4 3 种沉水植物种植床对富营养化水体 TP 的去除效果

沉水植物	TP 去除量 (mg/L)		TP 去除率 (%)	
	自然水体	模拟水体	自然水体	模拟水体
苦草	0.007	1.662	15.0	87.9
穗花狐尾藻	0.019	1.303	39.6	77.9
金鱼藻	0.024	1.424	47.8	78.5

生长,而沉水植物的存在可通过与浮游藻类竞争水体中的营养物质以及光热条件从而抑制藻类的生长。同时,沉水植物还能够分泌抑制藻类生长的化感物质,通过破坏藻类正常的生理代谢功能,致使藻类死亡<sup>[22]</sup>,控制富营养化水体藻类水华暴发。图 8 为试验自然水体中的叶绿素 a 含量总体变化情况。在沉水植物浮床种植试验前期,藻类叶绿素含量呈快速下降趋势,后期则略有回升并逐渐稳定。

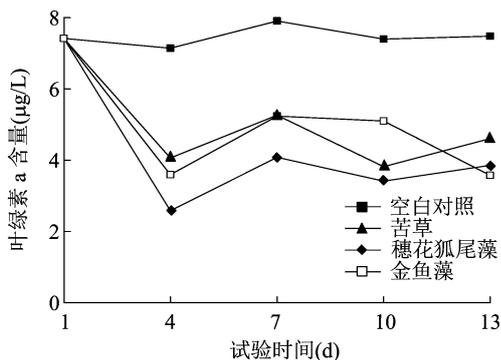


图8 沉水植物种植床对自然水体叶绿素的去除效果

图 8 中的叶绿素 a 含量表现为 3 种沉水植物对池塘原水中不同藻类的综合抑制结果,但是 3 种沉水植物对于不同藻类的抑制能力存在明显差异。从表 5 可以看出,相对空白对照水体,3 种沉水植物均表现出良好的抑藻效果,其中穗花狐尾藻对水体中蓝藻和绿藻的抑制效果较好,而金鱼藻对硅藻的抑制效果较好。不同沉水植物抑藻能力的差异,可能是由于沉水植物具有抑藻效果的化感物质类型和产量不同。

## 3 结论

在浮床种植模式下,比较了 3 种沉水植物对中高程度富营养化水体的净化效果。研究表明,苦草、金鱼藻和穗花狐尾藻 3 种常见沉水植物种植浮床对水体中的氮、磷均具有明显的净化效果,而且对水体中的蓝藻、硅藻和绿藻均具有一定的抑制效果。沉水植物种植浮床生长模式可以有效净化处理不同程度富营养化水体,通过调节浮床深度可

表5 3种沉水植物种植床对水体中藻类的抑制效果

沉水植物	蓝藻含量( $\mu\text{g/L}$ )			绿藻含量( $\mu\text{g/L}$ )			硅藻含量( $\mu\text{g/L}$ )		
	1 d	13 d	变化率(%)	1 d	13 d	变化率(%)	1 d	13 d	变化率(%)
空白对照	1.655	1.707	3.14	1.535	1.720	12.05	4.230	4.197	-0.78
苦草	1.655	1.183	-28.52	1.535	1.285	-16.27	4.230	2.157	-49.01
穗花狐尾藻	1.655	0.887	-46.40	1.535	0.560	-63.52	4.230	2.017	-52.32
金鱼藻	1.655	1.013	-38.79	1.535	0.773	-49.64	4.230	1.613	-61.87

以破解水体底质和透光条件对于沉水植物生长的限制,需要优化沉水植物浮床种植密度进一步提高净化效率。

#### 参考文献:

- [1]王昭洋. 城市湖库水体富营养化评价与水华治理决策方法研究[D]. 北京:北京工商大学,2016.
- [2]Madsen T V, Cedergreen N. Sources of nutrients to rooted submerged macrophytes growing in a nutrient - rich stream [J]. *Freshwater Biology*,2002,47(2):283-291.
- [3]曹萃禾. 水生维管束植物在太湖生态系统中的作用[J]. *生态学杂志*,1987(1):37-39.
- [4]赵德锋. 北京市河湖富营养化成因分析及治理技术的研究[D]. 北京:北京工业大学,2005.
- [5]李雄清. 水生植物先锋种组合净化富营养化水体模拟试验研究[D]. 南昌:南昌大学,2012.
- [6]蔺芳. 4种耐低温沉水植物对富营养化水体除磷去氮的研究[J]. *安徽农学通报*,2018,24(22):108-109.
- [7]张饮江,刘晓培,金晶,等. 沉水植物对水体净化的研究进展[J]. *科技导报*,2012,30(27):72-79.
- [8]石正驰,田丹,邹序安,等. 苦草对富营养化水体净化效应的示范研究[J]. *绿色科技*,2019(6):87-90.
- [9]马永飞. 粉绿狐尾藻对富营养化水体氮的去除作用及机制研究[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
- [10]张楠. 用于高盐度再生水富营养化控制的菹齿眼子菜克藻效应与机理研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [11]刘俊,张清东,马芸莹,等. 金鱼藻对富营养化水体营养源的净化作用[J]. *西南农业学报*,2012,25(1):257-260.
- [12]Wang S, Jin X, Zhao H, et al. Effects of *Hydrilla verticillata* on phosphorus retention and release in sediments [J]. *Water Air and Soil Pollution*,2007,181(14):329-339.
- [13]曹欠欠,于鲁冀,吕翠美,等. 四种沉水植物对城市污染水体的净化效果研究[J]. *人民黄河*,2017,39(5):76-80.
- [14]雷泽湘,谢贻发,徐德兰,等. 大型水生植物对富营养化湖水净化效果的试验研究[J]. *安徽农业科学*,2006,34(3):553-554.
- [15]林春风,曹国军,武鹏,等. 四种沉水植物对富营养化水体的净化效果研究[J]. *安徽农业科学*,2012,40(10):6083-6085.
- [16]吴强亮,谢从新,赵峰,等. 沉水植物苦草对沉积物中磷赋存形态的影响[J]. *湖泊科学*,2014,26(2):228-234.
- [17]姚瑶,黄立章,陈少毅,等. 不同沉水植物对水体氮磷的净化效果[J]. *浙江农业科学*,2011(4):789-792.
- [18]童昌华,杨肖娥,濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. *应用生态学报*,2004,15(8):1447-1450.
- [19]柳骅. 水生植物的净化作用及其在水体景观生态设计中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [20]濮培民,王国祥,李正魁,等. 健康水生态系统的退化及其修复——理论、技术及应用[J]. *湖泊科学*,2001,13(3):193-203.
- [21]李威. 6种湖南常见沉水植物对富营养化废水净化效果研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2018.
- [22]边归国,赵卫东,达来. 沉水植物化感作用抑制藻类生长的研究与应用[J]. *北方环境*,2012,24(1):59-64.
- [23]田琦,王沛芳,欧阳萍,等. 5种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究[J]. *水资源保护*,2009,25(1):14-17.
- [24]高岩,马涛,张振华,等. 不同生长阶段凤眼莲净化不同程度富营养化水体的效果研究[J]. *农业环境科学学报*,2014,33(12):2427-2435.