

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

引用本文:

冯优, 陈庆锋, 李金业, 等. 水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2397-2408.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2409-2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>

农田汇水河道水生植物原位净化工程处理效果分析

张迎颖, 闻学政, 姚一丹, 杨非, 王岩, 刘海琴, 张志勇

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1607-1615 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1429>

同步硝化反硝化菌(*Alcaligenes faecalis* WT14)养殖污水脱氮效果研究

陈均利, 张树楠, 戴桂金, 张苗苗, 吴金水, 刘锋

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1811-1817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0325>

狐尾藻净化生猪养殖场沼液的研究

吴晓梅, 叶美锋, 吴飞龙, 黄薇, 林代炎

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 796-803 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1188>

La和Fe改性木芙蓉和龙牙花树枝粉对畜禽废水中磷的吸附

曾臻瑶, 张世熔, 王新月, 冯灿, 王亚婷

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1828-1836 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0167>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

冯优, 陈庆锋, 李金业, 等. 水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2397–2408.

FENG You, CHEN Qing-feng, LI Jin-ye, et al. Comparison of purification ability of aquatic plants under different concentrations of nitrogen and phosphorus in tailrace of livestock wastewater[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2397–2408.



开放科学 OSID

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优¹, 陈庆锋^{1,2*}, 李金业¹, 郭贝贝¹, 刘婷¹, 李磊¹

(1. 山东省大型精密分析仪器应用技术重点实验室, 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省分析测试中心, 济南 250014; 2. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014)

摘要: 为了筛选适用于不同氮磷浓度畜禽养殖尾水的生态浮岛优势物种, 选取水芹、凤眼莲、鸢尾、再力花、黄菖蒲 5 种挺水植物和狐尾藻、伊乐藻、金鱼藻 3 种沉水植物, 通过模拟实验考察了这 8 种植物在不同氮磷浓度条件下的生长特征及其对水中氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总磷(TP)、COD 的去除效率, 并对其进行曲线回归及主成分分析, 综合评价不同水生植物对畜禽养殖废水中氮磷的净化功能。结果表明: 凤眼莲、再力花在较低氮磷水平($\text{NH}_4\text{-N}$ 80~120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 8~16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下的去除能力明显高于其他水生植物; 水芹和黄菖蒲在较高氮磷水平($\text{NH}_4\text{-N}$ 180~220 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 30~35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下的去除效果较好, 并具有良好的适应能力; 沉水植物中狐尾藻净化效果较好, 生物量增长显著($P<0.05$); 凤眼莲在实验过程中虽净化能力良好, 但易引发次生环境问题, 应谨慎选择, 因地制宜。

关键词: 水生植物; 生态浮岛; 氮磷; 净化能力; 畜禽养殖废水

中图分类号: X173; X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)10-2397-12 doi:10.11654/jaes.2020-0816

Comparison of purification ability of aquatic plants under different concentrations of nitrogen and phosphorus in tailrace of livestock wastewater

FENG You¹, CHEN Qing-feng^{1,2*}, LI Jin-ye¹, GUO Bei-bei, LIU Ting¹, LI Lei¹

(1. Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Analysis and Test Center, Key Laboratory for Applied Technology of Sophisticated Analytical Instrument of Shandong Province, Jinan 250014, China; 2. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: In order to screen the dominant species of ecological floating island suitable for different concentrations of nitrogen and phosphorus in tailrace of livestock and poultry wastewater, 5 kinds of effluents, such as *Oenanthe javanica*, *Eichhornia crassipes*, *Iris sibirica*, *Thalia dealbata*, and *Iris pseudacorus* and 3 kinds of submerged plants, such as *Myriophyllum verticillatum*, *Elodea nuttallii*, and *Ceratophyllum demersum* were selected. The growth characteristics of these 8 plants under different concentrations of nitrogen and phosphorus and their removal efficiency of ammonia nitrogen, total phosphorus, and chemical oxygen demand (COD) in water were investigated using simulation experiments. Curve regression and Principal Component Analysis were carried out to obtain the comprehensive evaluation of plant purification function. Results showed that the removal ability of *Eichhornia crassipes* and *Thalia dealbata* was significantly higher than that of other aquatic plants at low concentration of nitrogen and phosphorus ($\text{NH}_4\text{-N}$: 80~120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP: 8~16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). *Oenanthe javanica* and *Iris pseudacorus* had significant advantages in removing high concentration of nitrogen and phosphorus ($\text{NH}_4\text{-N}$: 180~220 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP: 30~35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and also had good adaptability. *Myriophyllum verticillatum* had better purification effect on submerged plants, and its biomass increased significantly ($P<0.05$). Although *Eichhornia crassipes* has good purification capacity, it can easily cause secondary environmental problems; therefore, it is advisable to choose carefully and adjust measures according to local conditions.

Keywords: aquatic plants; floating island; nitrogen and phosphorus; purification ability; livestock wastewater

收稿日期: 2020-07-16 录用日期: 2020-09-16

作者简介: 冯优 (1994—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 从事生态浮岛技术污染控制研究。E-mail: fengyou1012@163.com

*通信作者: 陈庆锋 E-mail: chensden@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0801403)

Project supported: National Key R&D Program of China (2017YFD0801403)

随着我国人口增长和经济发展,畜禽养殖业规模飞速壮大,由畜禽养殖废水中氮、磷等营养盐所造成的水环境污染愈发严重,已成为世界性的环境难题。据调查,2015我国畜禽粪尿产生量高达 1.91×10^9 t,猪、牛、羊、禽粪尿资源中氮、磷产生量分别为 1.229×10^7 t和 2.046×10^6 t^[1],畜禽养殖业废水已成为农业面源污染的重要污染源^[2]。畜禽养殖废水具有污染重、处理难度大、技术工艺要求高等特点^[3],其COD、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)浓度高,如不加以处理直接排放将严重危害地表水及地下水,破坏周边的生态环境^[4-5]。为了减轻畜禽养殖废水对水环境的污染,国内对养殖废水的前期处理主要采用物化法和生物法等不同处理技术和组合工艺^[6-7],但上述技术措施存在运营投资费用高、运行复杂等问题,因此在尾水的深度处理上探索耗能低、效果好、环境风险低的生态修复技术可降低整体成本,缓解技术压力。

生态浮岛技术是一种新兴的生态修复技术,主要用于建设可持续的生态系统,提高生物多样性^[8]。该技术在污染河流、湖泊、水库的治理中取得了较好的效果^[9-11],与人工湿地技术相比,其具有节省空间的优势^[12-15]。生态浮岛技术主要是利用水生植物根系的吸收作用富集水体中的氮磷,以及通过微生物降解污染物^[16-18],从而达到净化水质的目的。目前,国内针对集约化畜禽养殖废水深度处理的水生植物筛选研究还比较匮乏。本研究选取了可用于生态浮岛的水芹、凤眼莲、鸢尾、再力花、黄菖蒲以及狐尾藻、伊乐藻、金鱼藻等8种常见水生植物进行室内模拟实验,比较其对畜禽养殖废水中氮磷吸收能力的差异性以及在不同氮磷水平水体中的净化效果,筛选出净化效果好的优势物种,为集约化畜禽养殖废水的深度处理和生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取水芹、凤眼莲、鸢尾、再力花、黄菖蒲等5种挺水植物和狐尾藻、伊乐藻、金鱼藻等3种沉水植物,种苗由江苏省盛乐园艺场提供。本实验在室内温室条件下进行,培养条件为14 h光照,10 h黑暗,光照强度 $300\sim 330\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,温度25℃左右,相对湿度50%~70%,先在实验室内对这8种植物幼苗用霍格兰营养液驯化两周,使其适应水环境。

共用实验水培箱135个,水培箱规格为40 cm×22 cm×15 cm,如图1所示。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计

采用模拟浮岛法进行实验,供试水样采用人工配制。在自来水中加入一定量的氯化铵、磷酸二氢钾和葡萄糖等配制而成的模拟处理尾水,以《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)中的浓度和集约化畜禽养殖废水的污染物浓度^[9]为参考值,从中均匀取5个浓度(C1~C5),各组指标如表1所示。

预培养后,选取生长良好、叶片完整、株型大小和生物量较为接近的植物,10株为1组,每组总质量基

表1 模拟养殖尾水的5个氮磷水平($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 1 5 levels of nitrogen and phosphorus in tailrace of livestock wastewater($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

处理 Treatments	NH_4^+-N	TP	COD
C1	80	8	400
C2	120	16	400
C3	140	24	400
C4	180	30	400
C5	220	35	400

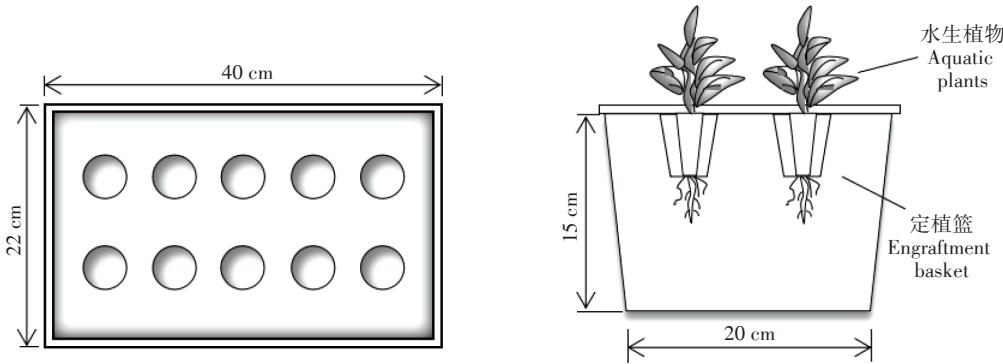


图1 植物生态浮岛装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of plant ecological floating island device

本相同,蒸馏水冲洗根部3次,用吸水纸吸干水分,称取鲜质量、株高、根长;在水培箱中放置10 L配制好的模拟水样,标记水位;箱体上方放置开有10孔的塑料板,配以种植篮固定10株同一种植物。8种植物,5个氮磷水平的模拟尾水,每个处理设置3个重复,共设置120组;用等量5个氮磷水平的模拟尾水的无植物水培箱作为对照(CK),重复3次,共15组对照。实验期间每隔7 d对水培箱中的水进行测定,即在模拟尾水中的停留时间分别为0、7、14、21、28 d,因蒸发、植物蒸腾和采样等作用造成的水分消耗,取样前需用蒸馏水补充至水位。实验结束时对各种植物进行鲜质量、株高和根长的测定并记录。生态浮岛系统中植物所吸收的营养成分在生长过程中转化为植物组分,植物生物量的变化能够表征其吸收、去除废水中氮磷等营养物质的水平。由于沉水植物长期沉于水下,仅在开花时花柄、花朵才露出水面,根系不发达,因此只测量沉水植物茎叶的鲜质量。

1.2.2 分析方法

实验水体的水质指标监测参考国家环境保护局《水和废水监测分析方法》(第四版), NH_4^+-N 监测方法采用纳氏试剂分光光度法;TP测定采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法;COD测定采用国家标准酸性重铬酸钾法。

根据实验数据,对模拟水体污染物浓度和处理时间进行回归分析,可以得到单位质量的水生植物在不同浓度下的污染物浓度与时间关系的回归方程。 NH_4^+-N 、TP、COD与时间(t)的回归方程式通式为 $y=ae^{-bx}$ ($a>0, b>0$),其中 y 为浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), x 为时间(d)。在此回归方程中, a 值表征浓度变化幅度,当 a 值一定时, b 值可决定 y 的大小,因此 b 值可以表征每个植物去除能力的差异。

1.2.3 数据统计

经过Microsoft Excel 2015和SPSS 17.0软件进行数据统计、方差分析和主成分分析,比较不同处理间在0.05水平的显著性,采用Origin 2017进行图表制作。

相对增长率表达式为:

$$y=(Z_{28}-Z_0)/Z_0\times 100\% \quad (1)$$

$$y=(L_{28}-L_0)/L_0\times 100\% \quad (2)$$

$$y=(M_{28}-M_0)/M_0\times 100\% \quad (3)$$

式中: Z_0 、 L_0 、 M_0 分别代表实验植物开始时根长(cm)、株高(cm)和鲜质量(g); Z_{28} 、 L_{28} 、 M_{28} 分别为28 d实验结束时植物的根长(cm)、株高(cm)和鲜质量(g)。

去除率表达式为:

$$\eta=(C_0-C_{28})/C_0\times 100\% \quad (4)$$

式中: C_0 为所配模拟尾水中污染物的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_{28} 为28 d实验结束时的污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 不同水生植物的生长特征

实验期间,各植物在C1、C2、C3组均呈现较好的长势,生长茂盛,植株高度和叶片数量明显增加,以水芹、再力花和狐尾藻较为突出,再力花根系延伸性良好,但茎部细长,发生倒伏。C4、C5两组长势最好的植物为狐尾藻、黄菖蒲、水芹和凤眼莲,再力花长势不好,出现叶片发黄、凋落现象,金鱼藻和伊乐藻两种沉水植物生长缓慢,抗逆性与挺水植物相比较差。

由图2a、图2b可见,水芹和黄菖蒲的根长和株高的相对增长率在C3、C4、C5组中高出其他植物约100%~350%,且相对C1、C2组也至少有100%~200%的增幅。各挺水植物根系特征图像见图3,可以看出凤眼莲主根上长有较多的绒状须根,再力花和水芹根系具有良好的延伸性;黄菖蒲萌生很多新根,根部发达,并有新芽生长,水芹长势茂盛,长出较多匍匐茎。表2~表4为各植物生长参数变化,通过实验可以初步判断:植物在不同氮磷水平水体中的生长状况可以间接反映植物的耐污能力,水芹、黄菖蒲和凤眼莲可以在不同氮磷浓度的废水中正常生长,水芹的适应能力最强,可作为人工浮岛的备选优势物种。

由图2d可见,3种沉水植物中,狐尾藻在5个处理组中均生长良好,生物量显著增加,鲜质量相对增长率最高为241.63%,明显高于伊乐藻和金鱼藻。

2.2 不同水生植物对模拟尾水中 NH_4^+-N 的去除效果

根据实验所得数据,对模拟水体 NH_4^+-N 浓度和处理时间进行回归分析,得到各水生植物在不同浓度下的 NH_4^+-N - t 回归方程见表5,可以看出每种水生植物在不同浓度下对水中 NH_4^+-N 浓度的相关性均呈现显著水平,水中 NH_4^+-N 浓度与处理时间呈显著负相关,即随着处理时间的增加,水体中 NH_4^+-N 浓度呈负指数形式降低。根据 b 的大小可以得出结论,各组去除 NH_4^+-N 能力从大到小依次为C1:凤眼莲>再力花>黄菖蒲>水芹>鸢尾,狐尾藻>金鱼藻>伊乐藻;C2:黄菖蒲>再力花>凤眼莲>水芹>鸢尾,狐尾藻>金鱼藻>伊乐藻;C3:鸢尾>水芹>凤眼莲>黄菖蒲>再力花,狐尾藻>伊乐藻>金鱼藻;C4:水芹>鸢尾>黄菖蒲>凤眼莲>再力

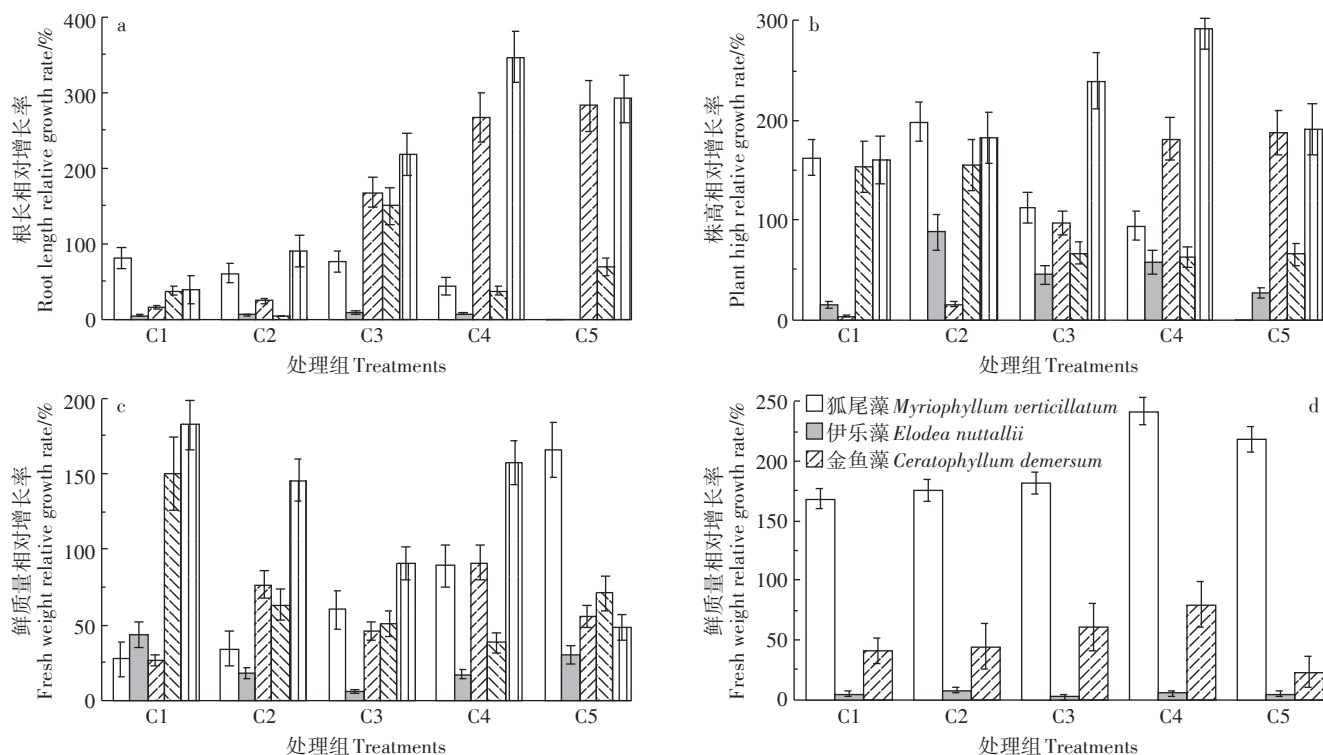


图2 植物在各处理组中的生长特征

Figure 2 Growth characteristics of plants in each treatment group



图3 凤眼莲(a)、鸢尾(b)、黄菖蒲(c)、再力花(d)和水芹(e)根部图像

Figure 3 Images of *Eichhornia crassipes* (a), *Iris sibirica* (b), *Iris pseudacorus* (c), *Thalia dealbata* (d) and *Oenanthe javanica* (e) roots

花,伊乐藻>狐尾藻>金鱼藻;C5:黄菖蒲>凤眼莲>鸢尾>水芹>再力花,狐尾藻>金鱼藻>伊乐藻。5种挺水植物中,凤眼莲和再力花较其他3种植物在C1、C2组去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能力良好,在C3、C4、C5中,鸢尾和水芹表现更为突出;而3种沉水植物中,狐尾藻净化能力整体较好,金鱼藻和伊乐藻较差。

从表6可以看出,各植物在不同浓度处理下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率有所差异。从均值上看,黄菖蒲、凤眼莲和再力花去除率最高,最高分别为97.99%、85.48%和90.26%,但峰值出现位置均处于C1、C2低浓度处理组。这3种植物受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化影响波动较大,最小值分别为48.44%、44.44%、45.12%;水芹和鸢尾 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率和稳定性均次之,最高为74.15%、74.93%;伊乐藻和金鱼藻这两种沉水植物去除率最小,最小仅为7.03%、10.89%。综上可知,凤眼莲和再力花在较低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下生长,才能发挥出最大净化能力,水芹和黄菖蒲整体上适应能力较强,无论是在低浓度还是高浓度均能保持良好的去除率。通过比较同种植物在不同浓度下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率,可以确定其净化效率最高的条件和最适宜的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。研究表明,在一定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度范围内(80~220

表2 各植物的株高

Table 2 Stem length of each plant

处理 Treatments	植物 Plants	初始株高 Beginning/cm	结束株高 End/cm	相对增长率 Relative growth rate/%
C1	凤眼莲	8.71±0.45	22.62±0.44	162.70±18.01
	鸢尾	15.29±0.81	18.15±0.79	14.68±2.93
	黄菖蒲	45.59±2.38	48.01±2.34	3.37±0.99
	再力花	17.33±0.91	45.94±8.90	153.40±24.19
	水芹	12.30±0.65	32.53±0.64	160.65±24.19
C2	凤眼莲	8.91±0.74	26.31±0.74	198.37±19.90
	鸢尾	15.81±1.31	30.12±3.35	87.66±17.55
	黄菖蒲	46.53±3.86	53.63±3.92	15.59±2.31
	再力花	18.33±1.52	47.57±7.55	155.51±25.28
	水芹	12.54±1.04	34.86±1.05	182.12±25.28
C3	凤眼莲	8.29±0.69	17.42±0.69	112.67±15.34
	鸢尾	25.18±2.09	36.87±5.09	44.98±9.01
	黄菖蒲	24.77±2.05	48.42±2.04	97.02±11.83
	再力花	23.94±1.98	40.29±5.96	66.60±10.84
	水芹	13.27±1.10	44.38±1.06	239.17±28.18
C4	凤眼莲	8.39±0.70	16.09±0.73	94.03±14.39
	鸢尾	26.95±2.23	43.13±5.33	58.20±11.65
	黄菖蒲	24.05±1.99	67.03±2.03	181.42±21.76
	再力花	24.47±2.03	40.09±5.07	62.29±10.12
	水芹	12.75±1.06	49.60±1.08	292.60±20.93
C5	凤眼莲	20.97±1.74	16.42±1.71	-20.18±9.69
	鸢尾	25.25±2.09	32.27±6.07	26.98±5.40
	黄菖蒲	22.00±1.82	62.66±3.80	187.62±22.49
	再力花	23.94±1.98	40.05±5.99	65.65±10.68
	水芹	16.06±1.33	45.98±1.31	190.47±25.71

表3 各植物的根长

Table 3 Root length of each plant

处理 Treatments	植物 Plants	初始根长 Beginning/cm	结束根长 End/cm	相对增长率 Relative growth rate/%
C1	凤眼莲	7.44±0.97	13.20±0.68	81.09±13.76
	鸢尾	12.03±1.57	12.58±1.75	4.32±0.86
	黄菖蒲	12.70±1.66	14.58±1.65	15.36±2.29
	再力花	14.88±1.95	20.51±3.52	36.34±5.91
	水芹	6.60±0.86	8.89±0.38	39.54±18.67
C2	凤眼莲	7.37±0.96	11.55±0.56	59.95±12.76
	鸢尾	12.13±1.59	12.77±1.59	5.04±1.00
	黄菖蒲	10.52±1.37	12.94±1.41	23.76±3.25
	再力花	11.34±1.48	11.79±1.61	3.78±0.61
	水芹	7.28±0.95	13.45±0.34	90.15±20.62
C3	凤眼莲	9.40±1.23	16.15±0.82	75.33±13.48
	鸢尾	13.58±1.77	14.76±1.77	8.25±1.65
	黄菖蒲	6.48±0.85	17.05±1.41	167.51±20.12
	再力花	5.33±0.70	13.63±3.02	149.89±24.40
	水芹	6.79±0.89	21.11±0.91	218.00±27.15
C4	凤眼莲	8.36±1.09	11.72±0.54	43.33±12.01
	鸢尾	11.59±1.52	12.34±1.52	6.15±1.23
	黄菖蒲	6.37±0.83	22.96±1.81	266.87±21.81
	再力花	6.10±0.80	8.45±1.45	36.98±6.02
	水芹	5.43±0.71	23.77±1.33	346.41±34.21
C5	凤眼莲	12.67±1.66	12.05±0.59	-2.35±10.24
	鸢尾	10.66±1.39	10.65±1.39	-0.10±0.01
	黄菖蒲	6.25±0.82	23.43±1.84	282.10±23.60
	再力花	6.16±0.81	10.63±2.05	69.64±11.37
	水芹	5.64±0.74	21.63±1.11	291.48±21.14

mg·L⁻¹),随着浓度升高其吸收量逐渐变大;但超过一定浓度后,则植物生长受到抑制,植物的吸收也趋于饱和,在高浓度条件下,对NH₄⁺-N的去除率下降。

2.3 不同水生植物对模拟尾水中TP的去除效果

植物TP-*t*回归方程式及相关系数列于表7,其中*y*为TP浓度(mg·L⁻¹),*x*为时间(d)。根据*b*的大小可以得出结论,去除TP能力从大到小依次为C1:凤眼莲>再力花>水芹>黄菖蒲>鸢尾,狐尾藻>伊乐藻>金鱼藻;C2:再力花>凤眼莲>鸢尾>水芹>黄菖蒲,狐尾藻>伊乐藻>金鱼藻;C3:黄菖蒲>水芹>鸢尾>凤眼莲>再力花,狐尾藻>伊乐藻>金鱼藻;C4:黄菖蒲>水芹>鸢尾>凤眼莲>再力花,狐尾藻>伊乐藻>金鱼藻;C5:黄菖蒲>凤眼莲>水芹>鸢尾>再力花,狐尾藻>金鱼藻>伊乐藻。由此可见,整体上挺水植物对比沉水植物具有更强的除磷能力,从5种挺水植物去除TP的表现上看,凤眼莲、再力花在C1、C2组表现较好,黄菖蒲

在C3、C4、C5组表现较好;而在3种沉水植物中,狐尾藻在5组中的除磷表现始终优于伊乐藻和金鱼藻。

比较同种植物在不同浓度处理下TP的去除率,可以确定其净化效率最高的条件下,最适宜的TP浓度。实验结束时,各植物的TP去除率如表8所示,在TP浓度为8~35 mg·L⁻¹时,8种植物在不同浓度下TP的去除率有所差异,但一致的是,各植物去除率峰值除再力花外均出现在低浓度组中(C1、C2)。凤眼莲、水芹、狐尾藻、伊乐藻和金鱼藻5种植物的去除率随着浓度的升高呈现降低的趋势,说明模拟尾水中磷浓度的升高对其净化能力产生抑制。凤眼莲和再力花在低浓度组(C1、C2)中具有较高的去除率,均在80%以上,水芹稍差,在70%以上,此3种植物适合低磷水平下的养殖废水处理;而黄菖蒲在5组中的去除率表现较为平稳,在中、高浓度组(C3、C4、C5)中也能保持在60%以上,说明其受污染物浓度抑制作用较小,适

表4 各植物的鲜质量

Table 4 Fresh weight of each plant

处理 Treatments	植物 Plants	初始质量 Beginning/g	结束质量 End/g	相对增长率 Relative growth rate/%
C1	凤眼莲	26.74±2.22	33.69±0.67	27.87±11.36
	鸢尾	17.79±1.48	25.81±3.67	43.67±8.74
	黄菖蒲	13.06±1.08	16.45±1.00	26.50±3.57
	再力花	17.06±1.41	43.25±7.61	149.78±24.38
	水芹	10.60±0.88	29.67±0.97	182.37±16.21
	狐尾藻	40.60±2.03	109.40±9.14	168.57±9.02
	伊乐藻	43.38±0.38	45.33±1.35	4.48±2.23
	金鱼藻	38.97±0.68	54.99±3.22	41.45±10.62
	凤眼莲	28.47±2.36	37.72±0.62	34.42±11.63
	鸢尾	19.37±1.61	23.00±2.60	18.15±3.63
C2	黄菖蒲	13.23±1.10	23.24±1.18	76.81±9.46
	再力花	21.22±1.76	35.04±5.02	63.50±10.33
	水芹	12.80±1.06	31.15±0.94	145.60±14.08
	狐尾藻	40.47±2.02	111.91±9.35	175.63±9.26
	伊乐藻	43.24±0.35	46.52±1.34	7.57±2.18
	金鱼藻	38.85±0.65	56.05±6.99	44.58±19.30
	凤眼莲	15.70±1.30	24.86±0.15	60.48±12.78
	鸢尾	25.68±2.13	27.27±2.56	5.98±1.19
	黄菖蒲	28.71±2.38	41.87±2.30	46.63±5.92
	再力花	22.50±1.87	34.20±4.62	50.70±8.25
C3	水芹	17.90±1.48	33.87±0.85	91.04±11.06
	狐尾藻	39.79±1.99	112.60±9.41	182.04±9.48
	伊乐藻	42.51±0.36	43.47±1.33	2.21±2.25
	金鱼藻	38.20±0.42	61.17±7.16	60.48±20.27
	凤眼莲	9.34±0.77	17.46±0.09	89.33±14.16
	鸢尾	26.74±2.22	31.62±3.55	17.69±3.54
	黄菖蒲	25.27±2.09	47.96±2.40	91.24±11.16
	再力花	19.69±1.63	27.46±3.46	38.47±6.26
	水芹	16.35±1.36	41.66±1.30	157.05±14.74
	狐尾藻	41.19±2.06	141.35±11.81	242.00±11.49
C4	伊乐藻	44.01±0.38	46.36±1.46	5.30±2.20
	金鱼藻	39.55±0.69	70.91±6.59	79.71±18.75
	凤眼莲	13.66±1.13	35.97±0.66	166.27±18.20
	鸢尾	22.76±1.89	29.79±3.81	29.93±5.99
	黄菖蒲	39.90±3.31	61.92±3.29	56.12±7.03
	再力花	17.72±1.47	30.68±4.53	71.30±11.60
	水芹	22.05±1.83	32.44±0.66	48.57±8.90
	狐尾藻	41.36±2.07	132.04±11.04	218.15±10.69
	伊乐藻	44.20±0.40	46.20±1.38	4.50±2.22
	金鱼藻	39.71±0.98	48.70±4.53	22.92±12.82

表5 各植物的NH₄⁺-N-*t* 回归方程及相关参数(*P*<0.05)

Table 5 NH₄⁺-N-*t* regression equation and related parameters of each plant (*P*<0.05)

处理 Treatments	植物 Plants	公式 The formula	<i>b</i>	<i>R</i> ²	显著性水平 Significance level
C1	凤眼莲	$y = 96.278e^{-0.071\ 1x}$	0.071 1	0.840 6	显著
	鸢尾	$y = 87.251e^{-0.033\ 6x}$	0.033 6	0.895 6	显著
	黄菖蒲	$y = 90.953e^{-0.044\ 1x}$	0.044 1	0.920 2	显著
	再力花	$y = 88.120e^{-0.050\ 9x}$	0.050 9	0.813 5	显著
	水芹	$y = 88.996e^{-0.039\ 9x}$	0.039 9	0.848 6	显著
	狐尾藻	$y = 70.418e^{-0.077\ 9x}$	0.077 9	0.984 7	显著
	伊乐藻	$y = 64.314e^{-0.064\ 4x}$	0.064 4	0.878 8	显著
	金鱼藻	$y = 70.534e^{-0.065\ 0x}$	0.065 0	0.795 5	显著
	凤眼莲	$y = 138.271e^{-0.063\ 8x}$	0.063 8	0.972 6	显著
	鸢尾	$y = 139.336e^{-0.037\ 6x}$	0.037 6	0.951 4	显著
C2	黄菖蒲	$y = 197.767e^{-0.122\ 8x}$	0.122 8	0.883 5	显著
	再力花	$y = 165.222e^{-0.078\ 9x}$	0.078 9	0.881 9	显著
	水芹	$y = 123.191e^{-0.045\ 7x}$	0.045 7	0.989 8	显著
	狐尾藻	$y = 104.615e^{-0.058\ 5x}$	0.058 5	0.955 1	显著
	伊乐藻	$y = 86.484e^{-0.038\ 6x}$	0.035 6	0.948 1	显著
	金鱼藻	$y = 79.220e^{-0.037\ 8x}$	0.037 8	0.918 7	显著
	凤眼莲	$y = 140.334e^{-0.035\ 5x}$	0.035 5	0.925 6	显著
	鸢尾	$y = 167.385e^{-0.054\ 7x}$	0.054 7	0.956 0	显著
	黄菖蒲	$y = 125.903e^{-0.028\ 2x}$	0.028 2	0.980 7	显著
	再力花	$y = 135.191e^{-0.027\ 4x}$	0.027 4	0.949 1	显著
C3	水芹	$y = 140.531e^{-0.039\ 0x}$	0.039 0	0.989 6	显著
	狐尾藻	$y = 144.563e^{-0.055\ 7x}$	0.055 7	0.939 8	显著
	伊乐藻	$y = 125.950e^{-0.047\ 3x}$	0.047 3	0.790 9	显著
	金鱼藻	$y = 120.197e^{-0.036\ 5x}$	0.036 5	0.857 7	显著
	凤眼莲	$y = 161.312e^{-0.023\ 3x}$	0.023 3	0.905 7	显著
	鸢尾	$y = 178.277e^{-0.025\ 0x}$	0.025 0	0.843 7	显著
	黄菖蒲	$y = 166.705e^{-0.024\ 6x}$	0.024 6	0.997 7	显著
	再力花	$y = 185.130e^{-0.022\ 7x}$	0.022 7	0.785 6	显著
	水芹	$y = 169.681e^{-0.027\ 0x}$	0.027 0	0.969 6	显著
	狐尾藻	$y = 145.896e^{-0.042\ 8x}$	0.042 8	0.953 3	显著
C4	伊乐藻	$y = 137.066e^{-0.045\ 0x}$	0.045 0	0.949 1	显著
	金鱼藻	$y = 152.561e^{-0.042\ 2x}$	0.042 2	0.976 0	显著
	凤眼莲	$y = 208.759e^{-0.026\ 0x}$	0.026 0	0.885 4	显著
	鸢尾	$y = 197.351e^{-0.024\ 7x}$	0.024 7	0.729 5	显著
	黄菖蒲	$y = 192.022e^{-0.033\ 6x}$	0.033 6	0.835 2	显著
	再力花	$y = 218.514e^{-0.021\ 2x}$	0.021 2	0.999 6	显著
	水芹	$y = 215.223e^{-0.022\ 3x}$	0.022 3	0.901 8	显著
	狐尾藻	$y = 198.122e^{-0.046\ 5x}$	0.046 5	0.984 8	显著
	伊乐藻	$y = 211.298e^{-0.037\ 1x}$	0.037 1	0.856 6	显著
	金鱼藻	$y = 192.810e^{-0.042\ 5x}$	0.042 5	0.906 4	显著

合于高磷浓度废水处理,尤其在进水磷浓度变化不稳定的废水处理系统中具有巨大优势。另外,狐尾藻相对于其他两种沉水植物具有显著的去磷能力,去除

率最高可达58.76%。

2.4 不同水生植物对模拟尾水中COD的去除效果

不同水生植物 COD-*t* 回归方程式见表9,各处理

表6 各植物生长28 d后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率(%)Table 6 Removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in each treatment after 28 days of growth (%)

处理 Treatments	凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	鸢尾 <i>Iris sibirica</i>	黄菖蒲 <i>Iris pseudacorus</i>	再力花 <i>Thalia dealbata</i>	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i>	伊乐藻 <i>Elodea nuttallii</i>	金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	空白 CK
C1	85.48±3.43	58.63±4.77	71.40±5.62	78.32±6.07	69.06±5.47	23.84±2.09	9.30±1.21	10.89±1.30	13.87±1.47
C2	85.71±2.53	64.33±5.14	97.99±7.36	90.26±6.85	74.15±5.89	23.81±2.01	14.39±1.50	13.31±1.44	10.19±1.26
C3	63.44±2.03	74.93±5.83	59.23±4.83	53.90±4.49	67.36±5.36	23.83±2.35	20.68±2.01	14.13±1.49	16.39±1.62
C4	44.44±1.70	47.09±4.03	48.44±4.14	45.97±3.95	54.51±4.53	15.23±1.55	17.48±1.69	15.58±1.57	13.67±1.46
C5	52.11±1.83	54.07±4.47	62.64±5.05	45.12±3.93	46.40±4.01	10.79±1.29	7.03±1.09	12.73±1.41	16.87±1.65
平均	67.04±2.30	59.81±4.85	67.94±5.40	62.71±5.06	62.29±5.05	19.50±1.86	13.78±1.50	13.33±1.44	14.19±1.49

表8 各植物生长28 d后TP的去除率(%)

Table 8 Removal rate of TP in each treatment after 28 days of growth (%)

处理 Treatments	凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	鸢尾 <i>Iris sibirica</i>	黄菖蒲 <i>Iris pseudacorus</i>	再力花 <i>Thalia dealbata</i>	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i>	伊乐藻 <i>Elodea nuttallii</i>	金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	空白 CK
C1	88.17±4.77	65.75±3.56	74.62±4.04	80.54±6.36	77.42±5.19	58.76±4.18	50.48±3.73	26.26±1.42	12.88±0.70
C2	82.57±4.45	75.73±4.10	41.19±2.23	89.88±4.86	73.29±3.97	24.48±2.33	18.29±1.99	15.09±0.82	12.06±0.65
C3	54.53±2.95	58.64±3.17	75.90±4.11	50.42±3.73	73.43±4.86	27.17±1.44	12.93±1.50	11.48±1.23	13.03±0.71
C4	39.41±2.13	43.79±2.37	69.09±3.74	25.58±2.35	62.00±3.36	25.02±2.47	14.31±0.51	13.27±2.36	13.38±1.20
C5	51.64±2.80	40.72±2.20	75.17±5.07	35.80±2.94	46.32±2.51	9.86±1.53	9.44±1.41	5.81±1.32	11.59±0.68
平均	63.26±3.42	56.93±3.08	67.19±3.84	56.44±6.74	66.49±3.98	29.06±	17.31±2.39	14.38±1.48	12.58±0.79

中COD的浓度均随实验时间的延长而降低,呈显著负相关。根据 b 值大小可以判断,各植物在不同处理下去除COD能力的差异,同时结合表10中不同水生植物生长28 d后COD的去除率可知,凤眼莲和黄菖蒲在各处理中表现突出,最大去除率可达87.74%和87.83%;而伊乐藻和金鱼藻表现较差,可能是生长过程中枝叶脱落死亡,进入水体分解,增加了水体中COD浓度。

2.5 不同处理水生植物的净化能力综合评价

对实验数据进行主成分分析, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率、TP去除率、COD去除率和鲜质量增长率分别记做 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ,主成分特征向量、贡献率和表达式见表11。由表11可见,5个处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均达到60%以上,TP去除率达20%以上,二者累计贡献率达到了90%以上,已涵盖了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率、TP去除率、COD去除率和鲜质量增长率等4个指标的绝大部分信息。将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率和TP去除率进行得分分析,考虑其权重对8种水生植物的主成分进行得分加权求和,结果(表12)可见,5种挺水植物和3种沉水植物在不同浓度下的综合净化能力由强到弱排名,挺水植物在C1组中为凤眼莲>再力花>水芹;C2组中为水芹>凤眼莲>再力花;C3组中为水芹>黄菖蒲>鸢尾;C4组中为水芹>黄菖蒲>凤眼莲;C5组中为黄菖蒲>凤眼莲>

鸢尾。3种沉水植物中狐尾藻综合净化能力最强,金鱼藻和伊乐藻净化能力较弱。

3 讨论

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除机理主要是植物根系通过对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收进行本身生物量的积累^[20-21]。水生植物依靠营养元素生长和繁殖, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为一种必不可少的营养物质,被水生植物吸收合成体内的蛋白质和有机氮,最终转化为生物量。同时,水生植物的茎部和根部也可微生物附着提供良好的基质和栖息地,进行硝化和反硝化^[22-23]。生态浮岛系统中磷的去除主要是靠水生植物的吸收作用和物理化学吸附作用,芽孢杆菌等微生物也可将不溶的磷分解为可溶性的磷酸盐,被植物直接吸收。水生植物的根系分泌物还能促进聚磷菌的生长,从而间接提高净化效率。水生植物可将吸收的磷转化为ATP、DNA、RNA等成分^[24],当水生植物收获后,这些污染物即随植物一起从水环境中被带走。本实验以集约化畜禽养殖废水二级处理出水为研究对象,出水中氮、磷基本以可溶态存在,实验装置未添加基质材料,故水体中TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的降低主要是由于植物吸收作用,因此,与无植物生长的空白组相比,有植物的处理组更有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的去除。

表7 各植物的TP-*t* 回归方程相关参数($P<0.05$)

Table 7 TP-*t* regression equation and related parameters of each plant($P<0.05$)

处理 Treatments	植物 Plants	公式 The formula	<i>b</i>	R^2	显著性水平 Significance level
C1	凤眼莲	$y = 11.019e^{-0.0698x}$	0.069 8	0.840 6	显著
	鸢尾	$y = 10.002e^{-0.0370x}$	0.037 0	0.895 6	显著
	黄菖蒲	$y = 9.977e^{-0.0472x}$	0.047 2	0.920 2	显著
	再力花	$y = 10.859e^{-0.0536x}$	0.053 6	0.813 5	显著
	水芹	$y = 10.726e^{-0.0503x}$	0.050 3	0.848 6	显著
	狐尾藻	$y = 8.547e^{-0.0945x}$	0.094 5	0.984 7	显著
	伊乐藻	$y = 6.626e^{-0.0597x}$	0.059 7	0.878 8	显著
	金鱼藻	$y = 7.055e^{-0.0313x}$	0.031 3	0.795 5	显著
C2	凤眼莲	$y = 16.526e^{-0.0644x}$	0.064 4	0.972 6	显著
	鸢尾	$y = 18.207e^{-0.0567x}$	0.056 7	0.951 4	显著
	黄菖蒲	$y = 13.584e^{-0.0217x}$	0.021 7	0.883 5	显著
	再力花	$y = 21.396e^{-0.0987x}$	0.098 7	0.881 9	显著
	水芹	$y = 15.516e^{-0.0449x}$	0.044 9	0.989 8	显著
	狐尾藻	$y = 15.676e^{-0.0219x}$	0.021 9	0.955 1	显著
	伊乐藻	$y = 15.345e^{-0.0174x}$	0.017 4	0.948 1	显著
	金鱼藻	$y = 15.078e^{-0.0147x}$	0.014 7	0.918 7	显著
C3	凤眼莲	$y = 21.622e^{-0.0280x}$	0.028 0	0.925 6	显著
	鸢尾	$y = 24.460e^{-0.0321x}$	0.032 1	0.956 0	显著
	黄菖蒲	$y = 22.153e^{-0.0488x}$	0.048 8	0.980 7	显著
	再力花	$y = 22.906e^{-0.0236x}$	0.023 6	0.949 1	显著
	水芹	$y = 23.036e^{-0.0451x}$	0.045 1	0.989 6	显著
	狐尾藻	$y = 21.713e^{-0.0285x}$	0.028 5	0.939 8	显著
	伊乐藻	$y = 21.090e^{-0.0180x}$	0.018 0	0.790 9	显著
	金鱼藻	$y = 21.619e^{-0.0174x}$	0.017 4	0.857 7	显著
C4	凤眼莲	$y = 28.293e^{-0.0193x}$	0.019 3	0.905 7	显著
	鸢尾	$y = 27.180e^{-0.0201x}$	0.020 1	0.843 7	显著
	黄菖蒲	$y = 29.840e^{-0.0425x}$	0.042 5	0.997 7	显著
	再力花	$y = 29.786e^{-0.0138x}$	0.013 8	0.785 6	显著
	水芹	$y = 27.799e^{-0.0318x}$	0.031 8	0.969 6	显著
	狐尾藻	$y = 28.221e^{-0.0208x}$	0.020 8	0.953 3	显著
	伊乐藻	$y = 28.679e^{-0.0140x}$	0.014 0	0.949 1	显著
	金鱼藻	$y = 29.596e^{-0.0128x}$	0.012 8	0.976 0	显著
C5	凤眼莲	$y = 34.446e^{-0.0289x}$	0.028 9	0.885 4	显著
	鸢尾	$y = 32.932e^{-0.0199x}$	0.019 9	0.729 5	显著
	黄菖蒲	$y = 42.507e^{-0.0534x}$	0.053 4	0.835 2	显著
	再力花	$y = 36.922e^{-0.0178x}$	0.017 8	0.999 6	显著
	水芹	$y = 39.980e^{-0.0248x}$	0.024 8	0.901 8	显著
	狐尾藻	$y = 36.748e^{-0.0187x}$	0.018 7	0.984 8	显著
	伊乐藻	$y = 38.484e^{-0.0100x}$	0.010 0	0.856 6	显著
	金鱼藻	$y = 38.476e^{-0.0148x}$	0.014 8	0.906 4	显著

表9 各植物的COD-*t* 回归方程相关参数($P<0.05$)

Table 9 COD-*t* regression equation and related parameters of each plant($P<0.05$)

处理 Treatments	植物 Plants	公式 The formula	<i>b</i>	R^2	显著性水平 Significance level
C1	凤眼莲	$y = 420.109e^{-0.0663x}$	0.066 3	0.957 4	显著
	鸢尾	$y = 399.198e^{-0.0339x}$	0.033 9	0.992 9	显著
	黄菖蒲	$y = 453.949e^{-0.0447x}$	0.044 7	0.947 1	显著
	再力花	$y = 475.075e^{-0.0578x}$	0.057 8	0.970 2	显著
	水芹	$y = 386.793e^{-0.0451x}$	0.045 1	0.974 8	显著
	狐尾藻	$y = 526.356e^{-0.0575x}$	0.057 5	0.798 0	显著
	伊乐藻	$y = 421.955e^{-0.0451x}$	0.045 1	0.988 4	显著
	金鱼藻	$y = 384.436e^{-0.0416x}$	0.041 6	0.923 2	显著
C2	凤眼莲	$y = 458.762e^{-0.0506x}$	0.050 6	0.948 9	显著
	鸢尾	$y = 471.662e^{-0.0405x}$	0.040 5	0.941 3	显著
	黄菖蒲	$y = 536.236e^{-0.0595x}$	0.059 5	0.905 3	显著
	再力花	$y = 488.891e^{-0.0374x}$	0.037 4	0.891 7	显著
	水芹	$y = 482.242e^{-0.0419x}$	0.041 9	0.801 5	显著
	狐尾藻	$y = 397.233e^{-0.0524x}$	0.052 4	0.990 8	显著
	伊乐藻	$y = 385.975e^{-0.0430x}$	0.043 0	0.959 0	显著
	金鱼藻	$y = 379.284e^{-0.0277x}$	0.027 7	0.898 6	显著
C3	凤眼莲	$y = 329.643e^{-0.0676x}$	0.067 6	0.769 2	显著
	鸢尾	$y = 362.639e^{-0.0527x}$	0.052 7	0.955 3	显著
	黄菖蒲	$y = 346.390e^{-0.0523x}$	0.052 3	0.887 8	显著
	再力花	$y = 451.224e^{-0.0633x}$	0.063 3	0.928 9	显著
	水芹	$y = 377.666e^{-0.0464x}$	0.046 4	0.939 1	显著
	狐尾藻	$y = 395.010e^{-0.0480x}$	0.048 0	0.977 5	显著
	伊乐藻	$y = 416.273e^{-0.0349x}$	0.034 9	0.863 6	显著
	金鱼藻	$y = 379.284e^{-0.0277x}$	0.027 7	0.898 6	显著
C4	凤眼莲	$y = 399.284e^{-0.0709x}$	0.070 9	0.986 9	显著
	鸢尾	$y = 384.177e^{-0.0579x}$	0.057 9	0.920 6	显著
	黄菖蒲	$y = 381.112e^{-0.0524x}$	0.052 4	0.976 8	显著
	再力花	$y = 431.749e^{-0.0660x}$	0.066 0	0.930 4	显著
	水芹	$y = 424.446e^{-0.0717x}$	0.071 7	0.910 8	显著
	狐尾藻	$y = 415.324e^{-0.0673x}$	0.067 3	0.995 3	显著
	伊乐藻	$y = 437.977e^{-0.0255x}$	0.025 5	0.860 3	显著
	金鱼藻	$y = 428.863e^{-0.0274x}$	0.027 4	0.982 0	显著
C5	凤眼莲	$y = 406.462e^{-0.0625x}$	0.062 5	0.968 8	显著
	鸢尾	$y = 409.246e^{-0.0613x}$	0.061 3	0.967 0	显著
	黄菖蒲	$y = 433.559e^{-0.0776x}$	0.077 6	0.994 8	显著
	再力花	$y = 392.861e^{-0.0395x}$	0.039 5	0.988 9	显著
	水芹	$y = 351.229e^{-0.0433x}$	0.043 3	0.925 3	显著
	狐尾藻	$y = 394.022e^{-0.0532x}$	0.053 2	0.933 6	显著
	伊乐藻	$y = 428.825e^{-0.0338x}$	0.033 8	0.980 3	显著
	金鱼藻	$y = 410.807e^{-0.0286x}$	0.028 6	0.865 4	显著

在低氮磷水平($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 80~120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 8~16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)中,凤眼莲、再力花净化效果明显优于其他水

生植物,鸢尾净化能力较差;在高氮磷水平($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 180~220 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 30~35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),水芹和黄菖蒲净

表 10 各组各植物生长 28 d 后 COD 的去除率(%)

Table 10 Removal rate of COD in each treatment after 28 days of growth(%)

处理 Treatments	风眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	鸢尾 <i>Iris sibirica</i>	黄菖蒲 <i>Iris pseudacorus</i>	再力花 <i>Thalia dealbata</i>	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i>	伊乐藻 <i>Elodea nuttallii</i>	金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	空白 CK
C1	86.74±2.73	62.49±4.41	70.43±5.03	79.02±5.56	73.87±5.28	41.64±2.98	29.36±2.10	25.55±2.86	21.99±2.84
C2	77.03±3.55	66.40±4.13	79.53±5.65	59.52±4.23	73.14±5.23	46.39±3.32	38.68±3.76	23.32±2.67	27.87±2.26
C3	54.53±4.14	58.64±3.19	75.90±4.43	50.42±1.20	73.43±4.23	43.11±3.24	28.67±2.05	24.47±1.75	13.03±1.25
C4	87.73±3.21	84.33±6.05	77.81±5.53	86.94±6.21	89.56±6.40	48.85±4.49	20.76±2.48	18.16±3.10	16.77±2.47
C5	84.92±2.70	79.51±5.68	87.83±6.23	67.84±4.85	72.94±5.31	51.14±3.66	29.47±3.11	22.20±1.59	15.88±2.14
平均	78.18±3.27	70.27±4.69	78.30±5.37	68.74±4.41	76.58±5.29	46.22±3.54	29.38±2.70	22.74±2.39	19.10±2.20

表 11 主成分的特征向量、贡献率及表达式

Table 11 Matrix ,contribution rate and expression of principal component analysis

处理 Treatments	因子Factor	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	表达式 Expression
C1	第 1 主成分	3.053	0.892	0.089	0.003	75.818	75.818	$F = 3.053X_1 + 0.892X_2 + 0.089X_3 + 0.003X_4$
	第 2 主成分	-0.079	-0.204	0	20.214	21.939	97.758	$F = -0.079X_1 - 0.204X_2 + 20.214X_4$
C2	第 1 主成分	0.596	0.937	1.697	0	65.768	65.768	$F = 0.596X_1 + 0.937X_2 + 1.697X_3$
	第 2 主成分	0	0	-0.241	3.536	25.330	91.098	$F = -0.241X_3 + 3.536X_4$
C3	第 1 主成分	0.589	0.951	2.851	-1.459	71.153	71.153	$F = 0.589X_1 + 0.951X_2 + 2.851X_3 - 1.459X_4$
	第 2 主成分	0	0.172	-0.403	12.794	25.902	97.055	$F = 0.172X_2 - 0.403X_3 + 12.794X_4$
C4	第 1 主成分	0.595	0.924	1.714	0	66.267	66.267	$F = 0.595X_1 + 0.924X_2 + 1.714X_3$
	第 2 主成分	-0.130	0	0.298	7.409	26.429	92.696	$F = -0.130X_1 + 0.298X_3 + 7.409X_4$
C5	第 1 主成分	0.578	0.956	3.805	0.928	71.797	71.797	$F = 0.578X_1 + 0.956X_2 + 3.805X_3 + 0.928X_4$
	第 2 主成分	0.091	-0.150	-0.490	7.608	26.172	97.969	$F = 0.091X_1 - 0.150X_2 - 0.490X_3 + 7.608X_4$

化效果优势最明显,而再力花净化能力较差。说明不同类型的植物对模拟尾水中的磷去除能力有所差异,同种植物在不同浓度的模拟尾水下去除能力也有所不同。另外,上述植物发达的根系对污染物的去除产生了积极作用,发达的根系不仅有利于对NH₄⁺-N、TP的吸收,也有利于微生物的附着和生物膜的形成,从而间接提高了净化能力。

挺水植物中水芹在各组均能适应生长,但并不是所有品种水芹都具有良好的适应性,此次实验所选的尖叶水芹对环境和气候要求要低于圆叶水芹^[25],因此工程应用时应注意水芹品种的选择,以免造成不必要的经济损失;黄菖蒲同样具有较强的适应性,在C3、C4、C5组均居前列,并在抗逆性和美化景观方面的优势要远高于水芹^[26];沉水植物中狐尾藻净化能力优势显著,耐受性强,而且可吸收废水中的重金属元素(如镉、铅、铬等)^[27],具有较强的净化水质功能。因此在实际应用中,选择物种时应考虑到生态浮岛系统运行的水域、气候和净化目标,是否有景观美化的需求和经济需求。

尽管生态浮岛的净化主体为水生植物,但实际设计时,在选择优势物种的同时还需考虑到植物之间优化组合。张泽西等^[28]对比了10种植物组合对去除氮磷效果的差异,确定多种植物组合的人工浮岛对水中氮磷污染物的去除效果都要优于种植单一植物的人工浮岛。汪秀芳等^[29]研究了冬季低温环境下不同水生植物组合对富营养化水体的净化效果,发现常绿水生鸢尾+羊蹄+金叶“金钱蒲”+反曲灯心草“蓝箭”组合相比单一植物更适合冬季环境下种植。

另外在工程应用时,基质作为浮岛的重要组成部分,不仅能为植物生长提供载体,同时能吸附水体中的污染物。近年来出现了一些新型人工合成材料基质用于畜禽养殖废水处理,其去除氮磷的效果均优于自然基质,如凹凸棒吸附剂(土:稻壳=9:1)用于吸附处理养殖废水中NH₄⁺-N最高去除率可达87%^[30];3种红色黏土对畜禽养殖废水中TP的去除率高达85%~90%^[31]。

综上,经实验筛选出净化能力较好的优势物种需注意其季节性,如果应用于工程中可考虑植物品

表12 各处理第1、2主成分得分及综合评价
Table 12 Score of Print 1, Print 2 and synthetic assessment of each group

处理 Treatments	植物 Plants	第1主成分 The first principal component		第2主成分 The second principal component		综合评价 Comprehensive evaluation	
		得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking
C1	凤眼莲	1.794	1	0.965	1	1.608	1
	鸢尾	0.132	5	0.071	3	0.119	5
	黄菖蒲	0.731	4	0.393	2	0.655	4
	再力花	1.666	2	0.896	5	1.493	2
	水芹	1.357	3	0.730	4	1.216	3
	狐尾藻	-0.781	1	-0.420	1	-0.700	1
	伊乐藻	-2.109	2	-1.135	2	-1.890	2
	金鱼藻	-2.790	3	-1.501	3	-2.501	3
C2	凤眼莲	1.525	1	-0.552	4	0.947	2
	鸢尾	0.717	5	-0.922	5	0.261	5
	黄菖蒲	1.091	4	0.054	2	0.803	4
	再力花	1.247	2	-0.247	3	0.832	3
	水芹	1.139	3	1.166	1	1.147	1
	狐尾藻	-1.320	1	1.864	1	-0.435	1
	伊乐藻	-1.953	2	-0.916	3	-1.665	2
	金鱼藻	-2.445	3	-0.448	2	-1.890	3
C3	凤眼莲	0.692	4	0.036	2	0.517	4
	鸢尾	1.256	3	-1.008	5	0.652	3
	黄菖蒲	1.769	2	-0.103	3	1.269	2
	再力花	0.260	5	-0.183	4	0.142	5
	水芹	1.770	1	0.679	1	1.479	1
	狐尾藻	-1.367	1	2.063	1	-0.452	1
	伊乐藻	-2.001	2	-1.174	3	-1.781	2
	金鱼藻	-2.379	3	-0.310	2	-1.827	3
C4	凤眼莲	0.937	3	-0.051	3	0.655	3
	鸢尾	0.902	4	-0.935	5	0.378	4
	黄菖蒲	1.524	2	0.015	2	1.094	2
	再力花	0.444	5	-0.779	4	0.096	5
	水芹	1.809	1	0.790	1	1.518	1
	狐尾藻	-1.260	1	2.087	1	-0.306	1
	伊乐藻	-2.122	2	-0.952	3	-1.788	3
	金鱼藻	-2.233	3	-0.176	2	-1.647	2
C5	凤眼莲	1.423	2	1.084	1	1.333	2
	鸢尾	0.967	3	-0.625	5	0.541	3
	黄菖蒲	2.204	1	-0.557	4	1.467	1
	再力花	0.394	5	-0.050	2	0.275	5
	水芹	0.769	4	-0.372	3	0.464	4
	狐尾藻	-1.349	1	2.038	1	-0.444	1
	伊乐藻	-2.156	2	-0.788	3	-1.790	2
	金鱼藻	-2.252	3	-0.731	2	-1.846	3

种之间进行组合搭配以提高对环境和气候的适应能力,也可在满足净化需求的同时种植如水芹等经济型作物,达到环境和经济效益的双赢。另外,生态浮岛基质不仅能为水生植物生长提供载体,也能对污染物起到一定的吸附作用,从而进一步提高生态浮岛的净化能力。

生态浮岛的应用中应注意以下问题:

(1)沉水植物中狐尾藻在5个浓度水平下均可良好生长,生物量显著增加,鲜质量相对增长率最高达241.63%,而伊乐藻和金鱼藻生长非常缓慢,生物量增长不明显。该实验所选金鱼藻和伊乐藻未在实验中表现出良好的生长特性及净化能力,可能是因为它们存在较强的季节性,温度较高导致生长缓慢。伊乐藻能在0℃以下以营养体形式越冬,但金鱼藻和狐尾藻不能越冬生长^[32]。若植物死亡腐解还会向水体释放有机质,产生二次污染,因此应用在生态浮岛上时需特别注意当地气候条件。筛选耐寒性植物,探究植物净化能力随季节变化规律,有利于生态浮岛在北方的应用推广。

(2)凤眼莲在供试水生植物中属外来物种,其生物量随着NH₄⁺-N、TP含量的增加而增长显著($P<0.05$),在实验浓度范围内没有发生因氮磷浓度过高而产生的生长抑制现象,其净化能力在C1、C2中表现较好,生长速度很快,在适宜的环境中每平方米水面上可生长60 kg以上^[33]。因此,在工程应用上应注意凤眼莲的适用条件,以免造成繁殖失控,引发次生环境问题。

(3)生态浮岛系统的净化作用是水生植物、微生物等因素共同影响的结果,本实验主要研究不同水生植物的水质净化功能,而微生物对脱氮除磷的贡献尚需实验探究,并进一步研究浮岛系统中存在的植物及微生物群落与对浮岛水体的净化机制以及两者之间的响应关系。

4 结论

(1)在低氮磷水平,可选择凤眼莲、再力花作为生态浮岛优势物种;在高氮磷水平,可选择水芹和黄菖蒲。工程应用时可根据养殖处理尾水的氮磷浓度水平进行合理的选择和优化配置。

(2)水芹、黄菖蒲、凤眼莲可以在不同氮磷浓度的废水中正常生长,耐污力较强。生长旺盛的狐尾藻相比生长缓慢的伊乐藻和金鱼藻,具有较强的净化能力。由此可知,发达的根系、良好的适应性和生长特

征是筛选具备良好净化能力的植物的重要考察指标。

参考文献:

- [1] 武淑霞, 刘宏斌, 黄宏坤, 等. 我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 103-111.
WU Shu-xia, LIU Hong-bin, HUANG Hong-kun, et al. Analysis on the amount and utilization of manure in livestock and poultry breeding in China[J]. *Engineering Sciences*, 2018, 20(5): 103-111.
- [2] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [3] 唐凯. 国内畜禽养殖废水处理技术的研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(10): 2274-2278.
TANG Kai. Research progress in domestic livestock and poultry wastewater treatment technology[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(10): 2274-2278.
- [4] Sanchez E, Borja R, Travieso L, et al. Effect of influent substrate concentration and hydraulic retention time on the performance of down-flow anaerobic fixed bed reactors treating piggery wastewater in a tropical climate[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(2): 817-829.
- [5] 马浩天, 李润植, 张宏江, 等. 基于微藻培养处理畜禽养殖废水的研究进展[J]. 生物技术通报, 2018, 34(11): 83-90.
MA Hao-tian, LI Run-zhi, ZHANG Hong-jiang, et al. Research progress on the treatment of wastewater from poultry and livestock breeding based on the microalgae cultivation[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2018, 34(11): 83-90.
- [6] Wang L, Xu W, Jiang H, et al. Response of denitrobacteria involved in nitrogen removal for treatment of simulated livestock wastewater using a novel bioreactor[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 147: 105762.
- [7] 曾慧卿, 刘强, 肖丛亮, 等. 响应面法优化藻菌共生体系深度处理畜禽养殖废水工艺研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1368-1379.
ZENG Hui-qing, LIU Qiang, XIAO Cong-liang, et al. Optimization of microalgae-bacteria symbiosis system for the advanced treatment of livestock wastewater using response surface methodology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1368-1379.
- [8] Ware J, Callaway R. Public perception of coastal habitat loss and habitat creation using artificial floating islands in the UK[J]. *PLoS ONE*, 2019, 14(10): 1-16.
- [9] Kong L, Wang Lu, Wang Q, et al. Study on new artificial floating island removing pollutants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(11): 1-11.
- [10] 吕家展, 农喻佳, 杨正委, 等. “生态浮岛+”对黑臭水体的净化效果与机制研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(5): 547-550.
LÜ Jia-zhan, NONG Yu-jia, YANG Zheng-wei, et al. Study on purifying effect and mechanism of “eco-floating island+” on black-odorous water[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(5): 547-550.
- [11] 李秋华, 刘送平, 林陶, 等. 贵州某入库河口段水质改善工程的设计与分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(4): 47-49.
LI Qiu-hua, LIU Song-ping, LIN Tao, et al. Design and analysis of ecotechnological engineering for improving water quality at an estuary into reservoir in Guizhou Province[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(4): 47-49.
- [12] Mark T B, Treavor B, Sindelar R J, et al. A floating island treatment system for the removal of phosphorus from surface waters[J]. *Engineering*, 2018, 4(5): 597-609.
- [13] Li X N, Song H L, Li W, et al. An integrated ecological floating bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(1): 382-390.
- [14] 程冰冰. 水培湿地植物根系系统对有机物和氨氮的去除能力研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 15-20.
CHENG Bing-bing. Study on removal ability of root system of wetland plants in hydroponics to organics and ammonia[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016: 15-20.
- [15] Liu G, He T Y, Liu Y H, et al. Study on the purification effect of aeration-enhanced horizontal subsurface-flow constructed wetland on polluted urban river water[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(13): 12867-12880.
- [16] Sun L P, Liu Y, Jin H. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(1): 135-140.
- [17] Kong L W, Wang L, Wang Q R, et al. Study on new artificial floating island removing pollutants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(17): 17751-17761.
- [18] Hubbard R K, Anderson W F, Newton G L, et al. Plant growth and elemental uptake by floating vegetation on a single-stage swine wastewater lagoon[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(3): 837-845.
- [19] 畜禽养殖业污染治理工程技术规范[C]. 中国畜牧业协会, 2008: 97-124.
Technical specifications for pollution treatment projects of livestock and poultry farms[C]. China Animal Agriculture Association, 2008: 97-124.
- [20] Yeh N, Yeh P, Chang Y H. Artificial floating islands for environmental improvement[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47(7): 616-622.
- [21] 王世和. 人工湿地废水处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 35-39.
WANG Shi-he. Theory and technology of constructed wetland sewage treatment[M]. Beijing: Science Press, 2007: 35-39.
- [22] Zuo X J, Zhang H S, Yu J. Microbial diversity for the improvement of nitrogen removal in stormwater bioretention cells with three aquatic plants[J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125626.
- [23] Waki M, Abe K, Yasuda T, et al. Tolerance of anammox reactor packed with zeolite to partial supply of nitrite or ammonium using purified livestock wastewater[J]. *Environmental Technology*, 2020, 41

- (11):1411-1418.
- [24] Seo D C, Cho J S, Lee H J, et al. Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland[J]. *Water Research*, 2005, 39(11):2445-2457.
- [25] 朱丽娜. 水生蔬菜水芹栽培技术[J]. 乡村科技, 2016(33):17.
- ZHU Li-na. Cultivation techniques of aquatic vegetable *Oenanthe javanica*[J]. *Xiangcun Keji*, 2016(33):17.
- [26] 黄洁慧, 梅凯. 人工浮岛植物的筛选及其去污效果的实验研究[J]. 污染防治技术, 2015, 28(6):34-39, 47.
- HUANG Jie-hui, MEI Kai. Screening plants planting on the artificial floating rafts and the purification effects of waste water by the plant system[J]. *Pollution Control Technology*, 2015, 28(6):34-39, 47.
- [27] 林海, 陈思, 董颖博, 等. 黑藻、狐尾藻对重金属铅、镉、铬、钒污染水体的修复[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(1):178-186.
- LIN Hai, CHEN Si, DONG Ying-bo, et al. Phytoremediation on heavy metal-polluted water of Pb, Cd, Cr and V by *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum*[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(1):178-186.
- [28] 张泽西, 刘佳凯, 张振明, 等. 种植不同植物及其组合的人工浮岛对水中氮、磷的去除效果比较[J]. 湿地科学, 2018, 16(2):273-278.
- ZHANG Ze-xi, LIU Jia-kai, ZHANG Zhen-ming, et al. Comparison of removal efficiency of nitrogen and phosphorus by artificial floating islands with different plants[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(2):273-278.
- [29] 汪秀芳, 许开平, 叶碎高, 等. 四种冬季水生植物组合对富营养化水体的净化效果[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2):401-406.
- WANG Xiu-fang, XU Kai-ping, YE Sui-gao, et al. Purification efficiency of four combinations of aquatic macrophytes on eutrophic water body[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2):401-406.
- [30] 于鹊鹏, 钱运华, 胡涛. 新型凹凸吸附剂去除养殖废水中的氨氮的研究[J]. 广州化工, 2009, 37(7):140-161.
- YU Que-peng, QIAN Yun-hua, HU Tao. Research on adsorbent conditions of a new adsorbent for ammonia nitrogen waste water with palygorskite[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2009, 37(7):140-161.
- [31] 杭小帅, 王伟, 张镭, 等. 红色黏土对模拟及畜禽养殖废水中磷的去除[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6):1399-1405.
- HANG Xiao-shuai, WANG Wei, ZHANG Lei, et al. Phosphorus removal from synthetic and actual livestock/poultry farm wastewater by red clay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(6):1399-1405.
- [32] 王琪, 周兴东, 罗菊花, 等. 考虑生活史的太湖沉水植物优势种遥感监测[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5):953-961.
- WANG Qi, ZHOU Xing-dong, LUO Ju-hua, et al. The remote sensing monitoring of dominant species of submerged vegetation of Lake Taihu with the consideration of their living histories[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5):953-961.
- [33] Ganguly A, Chatterjee P K, Dey A. Studies on ethanol production from water hyacinth: A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1):966-972.