

人工模拟不同种植密度下四种水生植物的生长状况及对氮、磷的去除

宋 超, 裘丽萍, 孟顺龙, 范立民, 胡庚东*

(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 内陆渔业生态环境和资源重点开放实验室, 无锡 214081)

摘 要:水产养殖中后期(每年9—11月)是水体污染排放最严重的阶段。通过构建池塘循环水养殖湿地,利用水生植物对养殖污水进行净化,是目前国内养殖污水处理广泛应用的一种技术。选取四种水生植物(聚草、菹草、金鱼藻和浮萍),在9—11月进行为期7周的人工模拟实验,比较了不同种植密度下各种植物对氮、磷的去除效果。结果发现,在整个实验阶段,浮萍和聚草的生物量与种植时间、种植密度均呈现明显的正相关关系,并表现出对总氮和总磷良好的去除效果;金鱼藻和菹草在实验前期也表现出上述现象,但是在实验最后一周,可能由于气温下降较大,开始死亡、破败,由于生物量下降,其对总氮和总磷的去除作用也停滞。多因子分析认为,时间对生物量和对总氮、总磷的去除贡献较种植密度和种类两个因子的影响大。研究表明,温度降低造成水生植物死亡势必会影响养殖末期污水处理的能力,聚草因其高净化能力、耐低温,优于其他3种水生植物;过高的种植密度并不会带来明显的净化效果。在人工湿地中选取合适的种植品种,保持合理的种植密度,以及对过量水生植物的及时收割显得非常重要。

关键词:密度;水生植物;生物量;总氮;总磷

中图分类号:Q178.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)01-0178-07 doi:10.11654/jaes.2014.01.023

Growth of Four Aquatic Plants and Their Removal of Total Nitrogen and Total Phosphorus in Eutrophication Water Under Different Plant Density: A Laboratory Experiment

SONG Chao, QIU Li-ping, MENG Shun-long, FAN Li-min, HU Geng-dong*

(Key Open Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: Aquatic plants, used to purify the waste water during fish farming period, play an important role in constructed wetlands of water circulating aquaculture pond systems. A simulated experiment was conducted from September to November for seven weeks to compare the growth of four aquatic plants, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton crispus*, *Lemna minor* L., and *Ceratophyllum demersum* L., and their removal of total nitrogen and total phosphorus in eutrophication water under different plant density. Biomass of *M. spicatum* and *L. minor* L. had a significant positive correlation with planting time and density, and showed good removals of total nitrogen and total phosphorus from water. *Potamogeton crispus* and *C. demersum* L. showed similar trends during the six weeks, but began to die and ceased removals of nitrogen and phosphorus at the 7th week due to sharp decline in air temperature. Multifactor analysis showed that growth time contributed most to biomass and nitrogen and phosphorus removals, compared with plant density and type. These findings indicate that *M. spicatum* has high purifying capacity and low temperature-tolerance and is the best aquatic plant in aquaculture constructed wetlands. Maintaining appropriate plant density is also critical for purification of eutrophication water.

Keywords: density; aquatic plants; biomass; total nitrogen; total phosphorus

收稿日期:2013-06-05

基金项目:国家科技支撑计划项目“淡水健康养殖关键技术与集成示范”(2012BAD25B00);现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-46)

作者简介:宋 超(1985—),男,助理研究员,从事渔业生态环境方面的研究工作。E-mail: songc@ffrc.cn

* 通信作者:胡庚东 E-mail: hugd@ffrc.cn

近年来,由于工业化水平的提高,生产耗能的加大,环境污染问题日益加重,全国河流、湖泊等主要水体出现不同程度和种类的污染,其中由氮、磷等植物性营养物质造成的富营养化现象已成为主要污染类别之一,传统的池塘养殖也因此在水质要求方面面临着前所未有的挑战^[1]。

池塘的高密度养殖,使水质难以控制,导致病害增多,在外部水源水质也无法得到良好的保证时,池塘养殖模式也在逐渐地发生着变化。对池塘养殖模式的升级就是要改变“进水渠+养殖池塘+排水渠”的形式,实现池塘的循环水养殖,使养殖废水得以净化,从而达到水资源循环使用、营养物质多级利用的目的,彻底实现淡水池塘养殖废水“零排放”的目的^[2]。

种植水生植物构成的湿地,是循环水养殖模式的关键组成部分,也是其他环境水体污染,如面源污染控制的重要手段之一。湿地植物包括挺水植物、沉水植物和浮水植物等,它们在净化水体中发挥着不同程度的作用^[3-5]。已有的文献将研究重点放在不同种类水生植物对氮、磷去除效果的比较,以期筛选出高效能吸收氮、磷的水生植物。但是除种类这一因子外,种植的密度、时间等因子同样也应加以考虑。特别是在池塘养殖的后期,养殖污染积累量达到最高的时候,此时段处于 9—11 月,污染加剧和气温降低的双重影响对循环水养殖模式中湿地水生植物的构成有着不同的要求^[2]。本文选取聚草、菹草、金鱼藻和浮萍等常用于循环水养殖湿地的四种水生植物为研究对象,研究了基于人工模拟不同种植密度条件下的 4 种水生植物在富营养化水体中的生长状况及对氮、磷的去除效果,以期为池塘循环水养殖湿地的构建提供基础的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

2012 年 8 月在无锡市蠡湖水域采集长势较好的聚草、菹草、金鱼藻和浮萍 4 种水生植物(表 1)的健壮个体,用去离子水清洗后,放入 Hoagland 营养液中培养 2 周左右,至长势稳定后用于正式试验。具体实验步骤是,将这 4 种水生植物分别以 1:2:4(重量比)的初始生物量(表 2)种植于容积为 80 L 的圆柱形容器中,容器中盛有 70 L 的 Hoagland 营养液配制的实验用水(表 3)。每种水生植物的每个密度组共有 3 个重复,并设有 3 个空白对照。实验选择在露天进行,雨天时用塑料布遮盖,以防雨水进入。期间用蒸馏水来

补充蒸发和蒸腾所消耗的水分以保持水位。

本模拟实验配置的初始富营养化水体中总氮和总磷实测值分别为 28.25、5.25 mg·L⁻¹。用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液或 0.1 mol·L⁻¹ HCl 溶液调节营养液 pH 值至 7.0,参照文献[6]。实验前将植物用去离子水冲洗干净,转入 0.1 mmol·L⁻¹ 的硫酸钙溶液中,预培养 24 h,以排除自由空间中残留氮素的影响。实验时间为 2012 年 9 月 19 日至 11 月 8 日,共计 7 周。此时段为华东地区养殖后期,池塘尾水排放频繁,污染较严重。

表 1 实验所用 4 种水生植物
Table 1 Four aquatic plants used in the experiment

水生植物	拉丁名	习性
聚草	<i>Myriophyllum spicatum</i>	小二仙草科狐尾藻属,又名穗状狐尾藻,多年生水草。根状茎生于泥中,节部生根。茎沉水性,苞片长圆形或穗状花序生于水上。
菹草	<i>Potamogeton crispus</i>	眼子菜科,眼子菜属,多年生沉水草本植物。生于池塘、湖泊、溪流中,静水池塘或沟渠较多。
浮萍	<i>Lemna minor</i> L.	浮萍科,浮萍属,浮水植物。适生于水田、池沼或其他静水水域,常与紫萍混生,形成密布水面的飘浮群落。
金鱼藻	<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	金鱼藻科,金鱼藻属,多年生沉水草本植物。无根,全株沉于水中。

表 2 4 种水生植物的初始生物量(g)
Table 2 Initial biomass of four aquatic plants at different densities

处理	聚草	菹草	金鱼藻	浮萍
低密度(1)	38.91±1.28	20.26±0.87	21.20±1.18	2.08±0.16
中密度(2)	81.80±1.55	40.54±0.76	41.15±1.12	4.07±0.16
高密度(4)	154.39±2.06	80.61±0.62	80.09±0.14	8.27±0.30

表 3 实验所用 Hoagland 营养液的配置方法
Table 3 The Hoagland nutrient solution

组分	用量	组分	用量
四水硝酸钙	945 mg·L ⁻¹	铁盐溶液:	
硝酸钾	506 mg·L ⁻¹	七水硫酸亚铁	2.78 g
硝酸铵	80 mg·L ⁻¹	EDTA Na	3.73 g
磷酸二氢钾	136 mg·L ⁻¹	蒸馏水	500 mL
硫酸镁	493 mg·L ⁻¹	pH	5.5
铁盐溶液	2.5 mL	微量元素:	
微量元素	5 mL	碘化钾	0.83 mg·L ⁻¹
pH	6.0	硼酸	6.2 mg·L ⁻¹
		硫酸锰	22.3 mg·L ⁻¹
		硫酸锌	8.6 mg·L ⁻¹
		钼酸钠	0.25 mg·L ⁻¹
		硫酸铜	0.025 mg·L ⁻¹
		氯化钴	0.025 mg·L ⁻¹

1.2 数据测定和处理

实验从0周开始,先后测定了第1~7周(以周数计)实验容器中水生植物生物量和水体中总氮、总磷的变化。生物量的测定方法是將水生植物从试验桶中取出,用吸水纸吸干水分后称重,单位为克(g)。如遇有水生植物破败、死亡情况,及时捞出,不计入生物量。总氮和总磷分别用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法(GB 11894—1989)和钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定,具体操作步骤参见《水和废水监测分析方法(第四版)》。

实验数据表示为平均值 $\pm$ 标准差($M\pm SD$)。利用Excel 2003进行数据输入和作图,利用JMP 7.0进行单因子的方差分析和多因子的因子刻画器表征。选取置信水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 水生植物生长状况

图1显示了4种水生植物生物量随时间的变化关系。在第1~7周,浮萍和聚草的生物量与种植时间、种植密度均呈现明显的正相关关系。在整个试验过程

中,这两种水生植物一直保持生长的势头,经过7周的生长,浮萍由于植株小,繁殖迅速,由最开始的占据塑料桶表面很少的面积到占满整个桶表面,低、中和高种植密度的7周生物量分别达到106.43、157.58、212.38 g;聚草植株明显长高,高种植密度的聚草达到了四种水生植物全生长周期的最大生物量,其值为443.05 g。在第1~6周,金鱼藻和菹草的生物量与种植时间、种植密度均呈现明显的正相关关系,而到了第7周,可能由于气温下降较大(图2),开始死亡、破败,其最终生物量分别为6.61、8.0、58.64 g和6.29、10.74、21.87 g(按低密度、中密度、高密度顺序),均低于初始生物量,有完全破败死亡的趋势。

2.2 4种水生植物对总氮和总磷的去除

图3和图4显示4种水生植物对总氮和总磷的去除随时间的变化。从图中可以看出,将4种水生植物移入人工配置的富营养化水体中种植,在第1~7周,水体中总氮、总磷的浓度与种植时间呈现明显的负相关关系。在第1~5周,总氮、总磷浓度与种植密度呈现良好的负相关关系,第6周后,种植密度对总氮、总磷的去除已无明显差异。至第7周,浮萍和聚草实

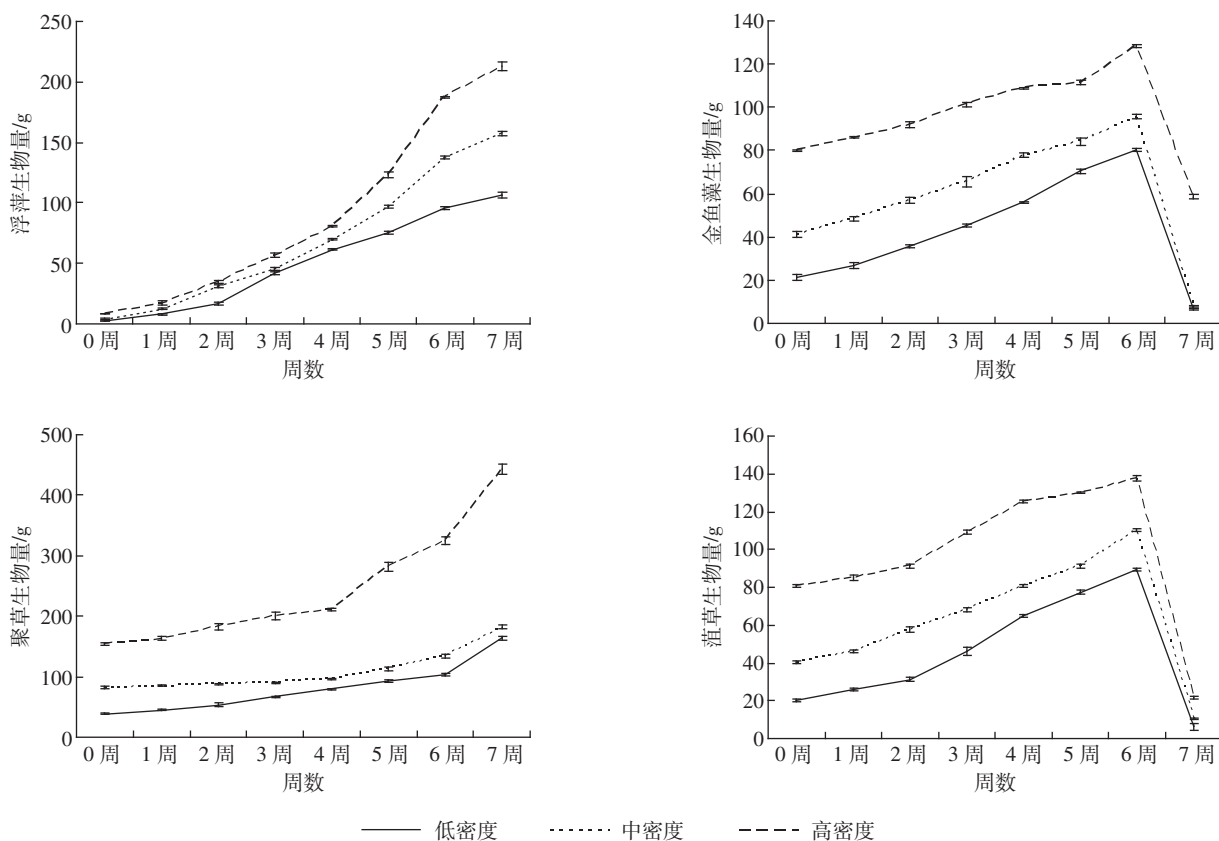


图1 4种水生植物的生物量随时间的变化

Figure 1 Changes in biomass of aquatic plants over planting time

验组中水体总氮的浓度分别降低至 0.32 、 0.53 、 0.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.67 、 2.33 、 2.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷的浓度分别降低至 0.16 、 0.22 、 0.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.35 、 0.24 、 0.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (按低密度、中密度、高密度顺序)。与第6周比较, 金鱼藻和菹草在最后一周去除总氮、总磷的作用不明显, 其水体中总氮浓度均维持在 7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 分别为 7.64 、 8.38 、 8.38 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 8.59 、 8.89 、 8.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷的浓度均维持在 1.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 分别为 1.85 、 1.85 、 2.23 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.99 、 2.23 、 2.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (按低密

度、中密度、高密度顺序)。这可能与最后一周温度降低幅度大, 造成这两种水生植物破败和死亡有关。

2.3 周数、密度和种类3种因子对生物量、总氮和总磷值的贡献比较

图5是周数、密度和种类3种因子对生物量、总氮和总磷的因子刻画器。比较因子对生物量的贡献, 从图中可以看出, 聚草对生物量的贡献最大, 其他3种水生植物的贡献无明显差异; 高密度对生物量贡献最大, 低密度和中密度的贡献无明显差异; 时间(周

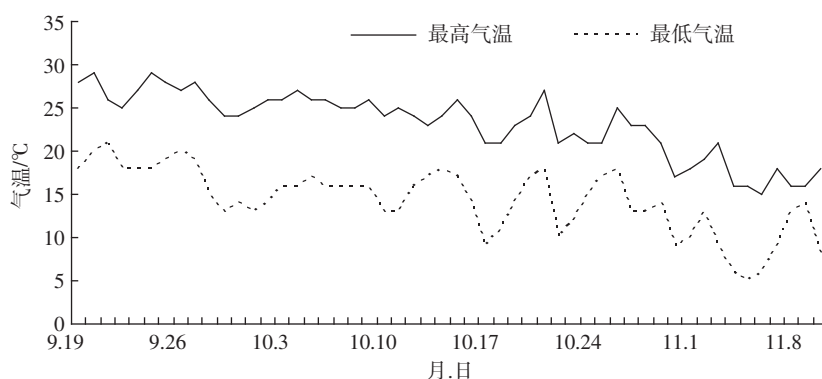


图2 实验期间气温的变化(来自网络)

Figure 2 Temperature during the experiment (from the internet)

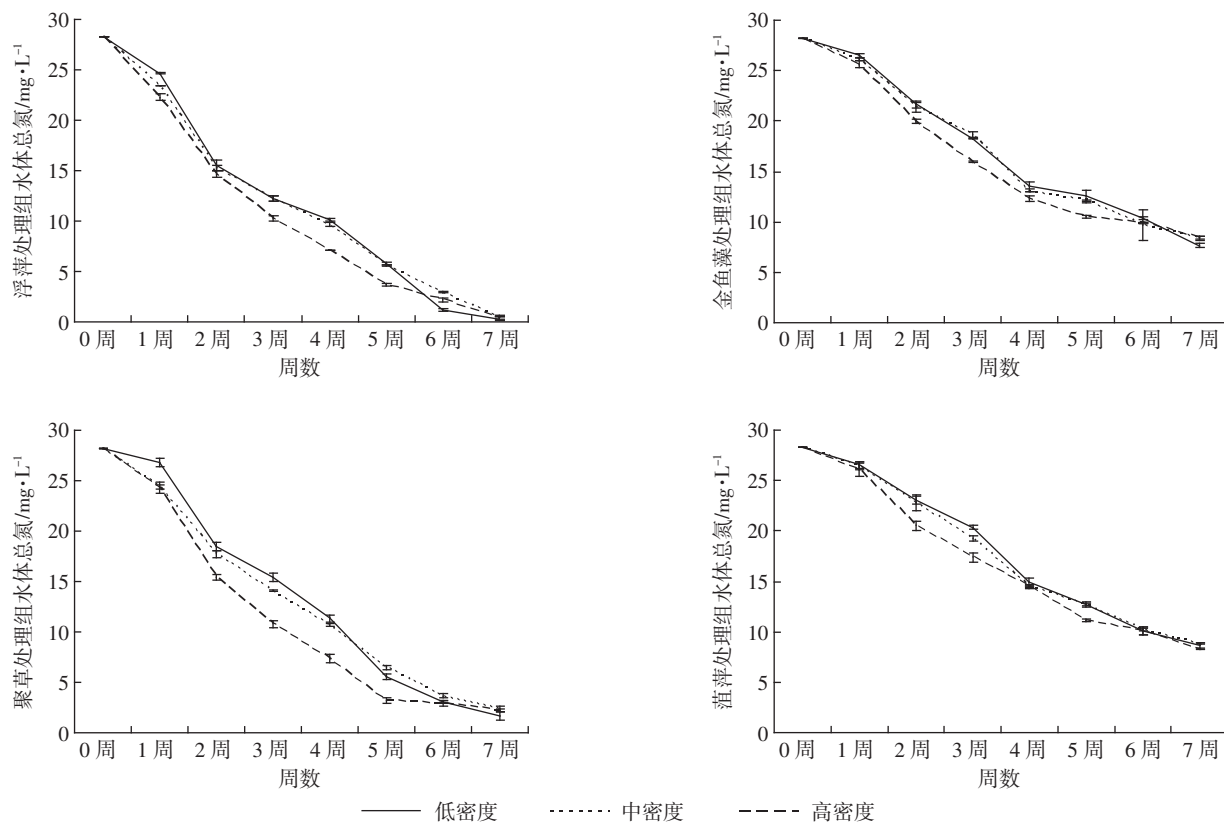


图3 4种水生植物移入后水体总氮随时间的变化

Figure 3 Changes in total nitrogen concentrations in waters planted with different aquatic plants

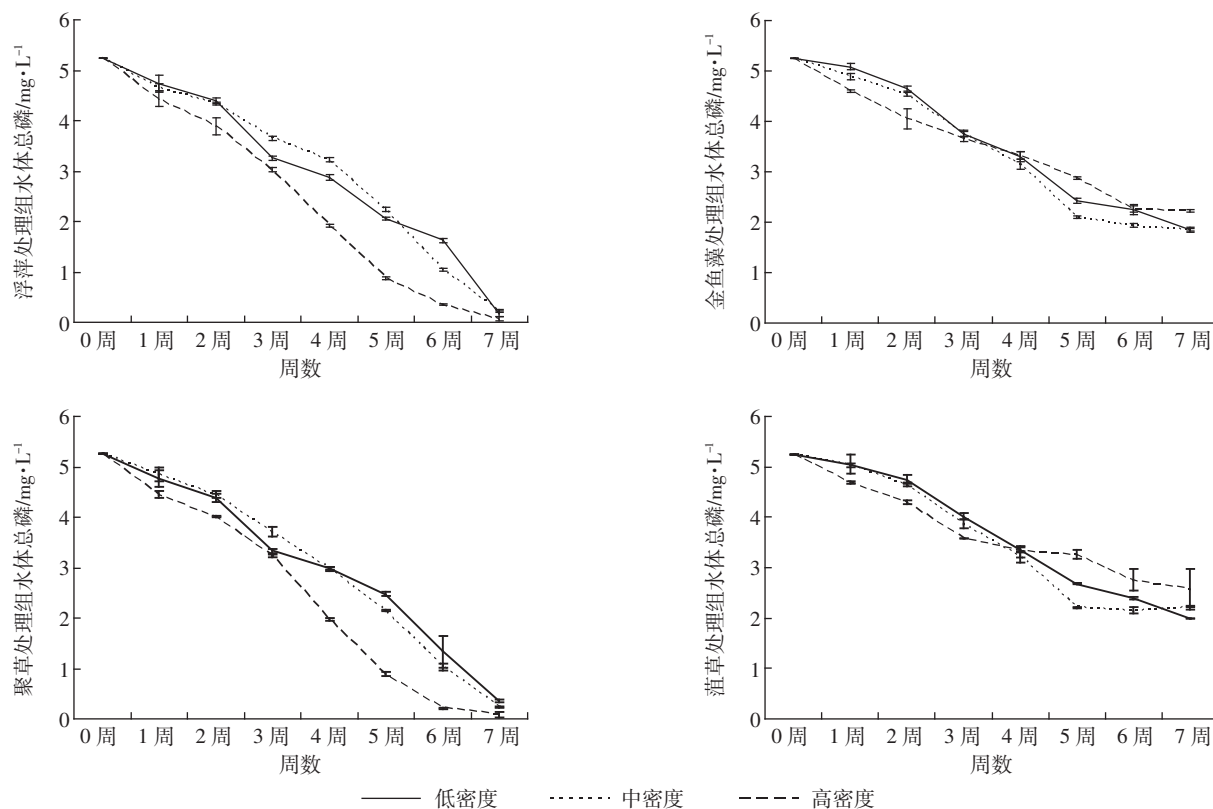


图4 4种水生植物移入后水体总磷随时间的变化

Figure 4 Changes in total phosphorus concentrations in waters planted with different aquatic plants

数)对生物量的高能贡献较其他两个因子影响大。

比较因子对总氮和总磷的贡献可知,时间的贡献远大于其他两个因子,种植密度对总氮和总磷去除的贡献无明显差异;金鱼藻和菹草的影响相同,浮萍和聚草的影响也相同。

3 讨论

人工湿地是模拟自然环境中湿地对水质的改善性能而人工构建的一种系统,一般由3部分构成:沙、石构建的底质,各种微生物和能够抵抗污染的植物。因其低成本、高效能和较好的生态服务性能,已成为我国最主要的污水处理的生态方法之一^[7]。在富营养化湖泊水体的生态修复中,水生植物仍然是发挥重要作用的修复主体^[8]。

筛选合适的水生植物,不仅需要考察其对水体污染的净化能力和效能,还要考虑水体的温度、光照、风浪、透明度等物理因素和营养盐水平、生物量等生物因素。植物对元素的吸收效率不单受动力学参数调控,植物根系形态、生物量、pH值、温度等因素也显著影响植物对养分离子的吸收^[9-11]。例如,在富营养化湖泊中,由于湖水对光照的强吸收作用,底部弱光条件

下水生植物的生长受到了大幅抑制。另外,在处理营养盐浓度较高的污水时,找到适合特定浓度范围的先锋物种是关键^[6]。

人工湿地被引入池塘养殖废水的生态处理,构建循环水养殖模式^[12],对我国水产养殖面源污染的控制起到了积极的作用,而用于池塘养殖废水处理的人工湿地有其自身的特点^[13]。首先,构建的表面流人工湿地虽然不需要考虑透明度、光照和风浪等湖泊富营养化水体修复中常见的关键因子,但在我国不同地区和不同鱼类品种的养殖池塘中,其营养盐水平也存在较大差异,特别是在养殖的中后期,营养盐水平已积累到很高的水平。因此,筛选高净化性能的水生植物仍然很重要。本文选取的4种水生植物均是得到养殖实践和理论证明的具有较高净化性能的水生植物。

将水生植物用于构建处理养殖废水的人工湿地,温度是必须考虑的物理因素之一,因为养殖后期已到11月份左右,因温度降低而死亡的水生植物势必会影响此阶段废水处理的能力^[14]。在这方面,聚草和浮萍显示了其优越性,而菹草和金鱼藻不可四季使用。因种植密度不同引起的生物量的差异也是必须考虑

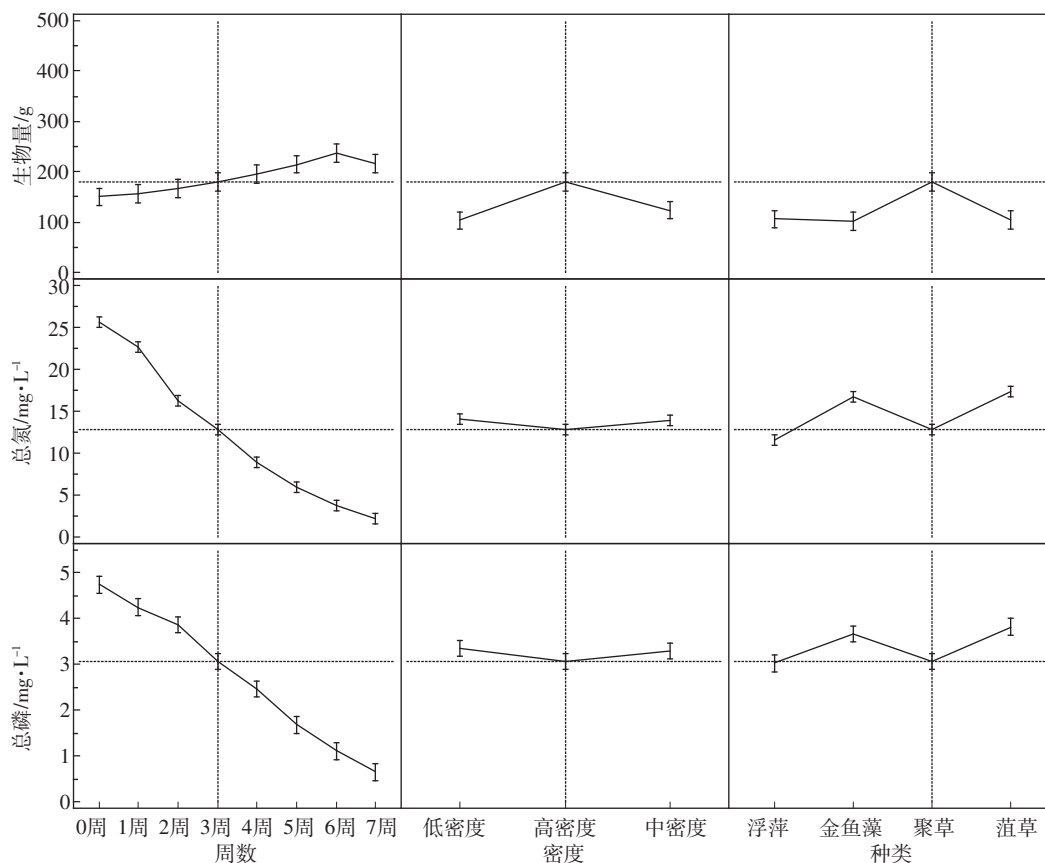


图5 周数、密度和种类对生物量、总氮和总磷的因子刻画

Figure 5 Predicted factor profiler of time(week), density, and plant type to biomass, total nitrogen, and total phosphorus

的因素之一^[8-9,15],因为过高的生物量会引起水体溶氧的降低,从此角度考虑,浮萍的小体积、高增长速率和表面的覆盖特性决定不能将其作为净化的主体植物。有学者对 17 种草本植物在轻度和重度富营养化水中净化能力及其与生物量的关系研究发现,在重度富营养化水体中,提高植物的生物量可大大提高对氮、磷的去除率;在轻度富营养化水中,同种植物不同生物量对各指标去除率的差异小于种类间净化能力的差异,选择高净化能力的种类更重要,这与本研究的结果一致。本研究认为,虽然在第 1~5 周,总氮、总磷浓度与种植密度呈现良好的负相关关系,但经 6 周后,种植密度对总氮、总磷的去除已无明显差异。而多因子比较分析的结果发现,对于总氮、总磷的绝对去除量,时间因子的贡献远大于密度和种类两个因子。综合考虑各种因素,聚草在养殖废水净化中,因其高净化能力、耐低温(可四季使用),优于其他 3 种水生植物;过高的种植密度并不会带来明显的净化效果,因此在人工湿地中保持合理的种植密度,及时对过量水生植物进行收割显得非常重要。

4 结论

(1)在第 1~7 周,浮萍和聚草的生物量与种植时间、种植密度均呈现明显的正相关关系,并表现出对总氮和总磷良好的去除效果;在第 1~6 周,金鱼藻和菹草呈现上述趋势,而到了第 7 周,可能由于气温下降较大,开始死亡、破败,此阶段总氮和总磷的去除效果也无明显变化,这与其生物量的降低有关。

(2)多因子的分析认为,时间对生物量和对总氮、总磷的去除贡献较种植密度和种类两个因子的影响大。

参考文献:

- [1] Cao L, Wang W, Yang Y, et al. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2007, 14(7):452-462.
 - [2] 胡庚东, 宋超, 陈家长, 等. 池塘循环水养殖模式的构建及其对氮磷的去除效果[J]. *生态与农村环境学报*. 2011, 27(3):82-86.
- HU Geng-dong, SONG Chao, CHEN Jia-zhang, et al. Modeling of water circulating pond aquaculture system and its N&P Removal effect[J].

- Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(3):82–86.
- [3] 葛 滢, 王晓月, 常 杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(6):690–692.
GE Ying, WANG Xiao-yue, CHANG Jie. Comparative studies on the purification ability of plant in different degree eutrophic water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(6):690–692.
- [4] 葛 滢, 常 杰, 王晓月, 等. 两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系[J]. 生态学报, 2000, 20(6):1050–1055.
GE Ying, CHANG Jie, WANG Xiao-yue, et al. Relationship between the physiological and purification ability of different plants in waters with two trophic levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6):1050–1055.
- [5] 迟 杰, 郝雪龙. 菹草(*Potamogeton crispus* L.)对酞酸酯污染沉积物的净化作用[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2):271–276.
CHI Jie, HAO Xue-long. Purification of sediments contaminated with phthalate acid esters by *Potamogeton crispus* L.[J]. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(2):271–276.
- [6] 张贵龙, 赵建宁, 刘红梅, 等. 不同水生植物对富营养化水体无机氮吸收动力学特征[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2):221–226.
ZHANG Gui-long, ZHAO Jian-ning, LIU Hong-mei, et al. Kinetics of nitrate and ammonium uptake from eutrophic waters by different hydrophytes[J]. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(2):221–226.
- [7] Borin M, Salvato M. Effects of five macrophytes on nitrogen remediation and mass balance in wetland mesocosms[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 46:34–42.
- [8] Zhang T, Xu D, He F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990–2010[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47:189–197.
- [9] Kearney M A, Zhu W. Growth of three wetland plant species under single and multi-pollutant wastewater conditions[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47:214–220.
- [10] Salvato M, Borin M, Doni S, et al. Wetland plants, micro-organisms and enzymatic activities interrelations in treating N polluted water[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47:36–43.
- [11] 钟爱文, 曹 特, 张 萌, 等. 光照和黑暗条件下苦草(*Vallisneria natans*)和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)对铵态氮的吸收[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2):289–294.
ZHONG Ai-wen, CAO Te, ZHANG Meng, et al. Uptake of ammonium by *Vallisneria natans* and *Myriophyllum Spicatum* under light and dark regimes[J]. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(2):289–294.
- [12] Zhang S Y, Li G, Wu H B, et al. An integrated recirculating aquaculture system(RAS) for land-based fish farming the effects on water quality and fish production[J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 45:93–102.
- [13] 陈家长, 何尧平, 孟顺龙, 等. 表面流人工湿地在池塘养殖循环经济模式中的净化效能研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5):1898–1904.
CHEN Jia-zhang, HE Yao-ping, MENG Shun-long, et al. Purification effect of free water surface constructed wetland on circular economy pattern of pond culture[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1898–1904.
- [14] 陈家长, 孟顺龙, 胡庚东, 等. 温度对两种蓝藻种间竞争的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3):454–459.
CHEN Jia-zhang, MENG Shun-long, HU Geng-dong, et al. Effect of temperature on interspecific competition between two blue-green algae[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3):454–459.
- [15] Crab R, Avnimelech Y, Defoirdt T, et al. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production[J]. *Aquaculture*, 2007, 270:1–14.