

人工湿地组合工艺对水体中浮游动物群落结构的影响

刘爱芬^{1,2}, 吴晓辉¹, 贺锋¹, 成水平¹, 吴振斌^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 研究了在不同水力负荷条件下 [$0.6 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, $0.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, $1.0 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 人工湿地组合工艺系统对浮游动物群落结构的影响和在相同的水力负荷下, 人工湿地组合工艺系统对浮游动物群落结构影响的季节性变化。结果表明, 在水力冲击负荷为 $0.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时对浮游动物群落结构的影响相对较大; 春、夏、秋季的作用强于冬季, 而秋季对浮游动物群落结构的影响最大; 对大型浮游动物的影响大 (去除率 $\geq 70\%$), 对小型浮游动物的影响相对小一些, 湿地出水中出现了一些进水中没有的种类; 稳定塘的存在对浮游动物的群落结构变化起到了缓解作用, 组合工艺 (下行流湿地 $\rightarrow$ 兼性塘) 的作用效果较弱, 下行流 $\rightarrow$ 上行流湿地 $\rightarrow$ 推流床湿地和下行流湿地 $\rightarrow$ 推流床湿地的作用效果较强, 对浮游动物的影响较大。

关键词: 人工湿地组合工艺; 浮游动物; 群落结构; 影响

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)02-0309-06

Effect of Different Combination System of Constructed Wetland on Zooplankton Community Structure

LIU Ai-fen^{1,2}, WU Xiao-hui¹, HE Feng¹, CHENG Shui-ping¹, WU Zhen-bin¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The effect of the different combination system of constructed wetland on zooplankton community structure was studied with different hydraulic loading [$0.6 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, $0.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, $1.0 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]. And the seasonal change of the effect was measured with the same hydraulic loading. The results show that different combination system with hydraulic loading $0.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ on zooplankton community structure is more effective than others; the effect in spring, summer and autumn are more notable than in winter, otherwise the effect in autumn is the most notable; the effect on macro-zooplankton is more obvious than on micro-zooplankton and there are some species in the effluent water of wetland but not in influent water. Ponds of the systems weaken the effects on zooplankton community structure and the effect of combination system (down-flow $\rightarrow$ aerobic and anaerobic pond) is the worst of all combination system, and in contrast to others down-flow $\rightarrow$ up-flow $\rightarrow$ horizontal-flow wetland and down-flow $\rightarrow$ horizontal-flow wetland present distinct effects on zooplankton.

Key words: constructed wetland combination system; zooplankton; community structure; effect

人工湿地是上世纪 70 年代发展起来的低投资、低能耗、低成本又具有景观生态效益的废水处理新工艺, 它的工程应用和净化机理等研究越来越受到人们的重视, 对污水的净化是物理、化学及生物共同作用的结果, 基质、植物、微生物是人工湿地发挥净化作用的 3 个主要因素。人工湿地不仅能有效去除污水中的悬浮物、有机污染物、氮和磷等, 而且能有效去除病原菌、重金属、藻类和藻毒素等外源生物活性物质, 被用于处理多种类型的废水, 如生活污水, 矿山排水, 农业废水, 养殖废水和富营养化水体等^[1~6]。应用人工湿地系统处理湖泊富营养化水体的研究正在展开。迄今为止, 对于人工湿地对浮游动物群落结构影响研究还未见报道, 本文就不同水力负荷条件下, 8 套不同的人工湿地小试组合工艺系统对浮游动物的影响做了初步研究; 并就不同季节人工湿地对浮游动物的影响进行了比较试验, 为人工湿地的设计、应用和作用效果评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验系统

试验系统由 8 套不同工艺流程的组合组成, 各系统的工艺流程如下所示:

- ①推流床湿地 (美人蕉) $\rightarrow$ 下行流 (薹苳) $\rightarrow$ 上行流湿地 (香蒲)
- ②下行流 (美人蕉) $\rightarrow$ 上行流湿地 (香蒲) $\rightarrow$ 推流床湿地 (薹苳)
- ③好氧塘 $\rightarrow$ 下行流湿地 (美人蕉)
- ④下行流湿地 (美人蕉) $\rightarrow$ 兼性塘
- ⑤推流床湿地 (美人蕉) $\rightarrow$ 下行流湿地 (香蒲)

收稿日期: 2006-03-02; 修订日期: 2006-05-08

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (39925007); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-SW-120-09); 国家“十五”重大科技专项 (2002AA601021)

作者简介: 刘爱芬 (1977 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境生物学, E-mail: laf123@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wuzb@ihb.ac.cn

- ⑥下行流湿地(香蒲)→推流床湿地(美人蕉)
- ⑦下行流(美人蕉)→上行流湿地(香蒲)
- ⑧推流床湿地(美人蕉)
- 推流床:长×宽=2 m×1 m,池深0.7 m
- 好氧塘:长×宽=2 m×1 m,水深0.4 m
- 兼性塘:长×宽=2 m×1 m,水深1.0 m

- 下行池:长×宽=2 m×1 m,池深0.55 m
- 上行池:长×宽=2 m×1 m,池深0.45 m
- 1.2 运行情况
- 系统进水为经初沉池沉淀后的东湖湖水,系统进水水质如表1所示.
- 1.3 水力冲击负荷试验

表1 系统进水水质							
Table 1 Water quality of influent sewage							
<i>t</i> /℃	pH	DO/mg•L ⁻¹	TSS/mg•L ⁻¹	BOD/mg•L ⁻¹	COD/mg•L ⁻¹	TN/mg•L ⁻¹	TP/mg•L ⁻¹
8.5~34.2	6.7~8.43	2.55~8.10	5.1~17.1	0~8.7	38.75~104.5	1.56~5.22	0.37~0.86

2002-10-28~2002-12-28 进行不同水力负荷下净化效果的比较研究试验,水力负荷分别为 $0.6\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $0.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $1.0\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,每个水力负荷的运行周期为1个月,采用间歇式进水,每天分8次进水,间隔时间3 h.浮游动物的采集时间在每个周期的中间,分别采集进出水的浮游动物样品.

1.4 运行效果的季节变化测试

2004~2005 年按照季节的变化春夏秋冬采样4次,水力负荷 $0.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,进水方式和频率同上.

1.5 分析测试和监测方法

pH 值测定采用 Cole Parmer 60648 型笔式 pH 计,溶解氧测定使用 UC-12 型便携式溶氧仪,水质理化指标测定参照文献[7];浮游动物的定性和定量采集和测定方法参照文献[8~15].

2 结果与分析

2.1 不同水力冲击负荷下人工湿地组合工艺对浮游动物群落结构的影响

进水中浮游动物多为东湖的常见种,桡足类剑水蚤(*Cyclops* sp.),枝角类隆腺溞(*Daphnia carinata*)、裸腹溞(*Moina* sp.)、尖额溞(*Alona* sp.)、低额溞(*Simocephlaus* sp.)和船卵溞(*Scapholeberis* sp.),轮虫类多为轮虫(*rotaria* sp.)、臂尾轮虫(*Brachionus* sp.)、晶囊轮虫(*Asplanchna* sp.)、叶轮虫(*Notholca* sp.)和单趾轮虫(*Monostyla* sp.)等,原生动物有变形虫(*Amoeba* sp.)、砂壳虫(*Diffugia* sp.)、草履虫(*Paramecium* sp.)、钟虫(*Vorticella* sp.)、吸管虫(*Trichophrya* sp.)和一些纤毛虫.从图1可以看出,在水力负荷为 $0.6\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,进水中浮游动物的种类数均为23种,而当水力负荷为1.0

$\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,则为14种.因为采样时间的变化,进水中的浮游动物种类数发生了变化.

出水中除了组合工艺④有大量的大个体桡足类和枝角类隆腺溞外,其他的组合工艺有少量的桡足幼体和无节幼体;小型枝角类裸腹溞、尖额溞、低额溞和船卵溞及其幼体;轮虫的种类没有太大的变化亦为臂尾轮虫和蛭态轮虫等,但在数量上明显减少;原生动物多为纤毛虫类.出水中还出现了一些营底栖或固着生活的种类如猛水蚤,鞍甲轮虫、长足轮虫等.从同一负荷下的出水比较,图1(a)显示有稳定塘的组合工艺③和④与进水基本持平外,其余的均明显降低;图1(b)显示组合工艺的出水比进水的种类有不同程度的减少;图1(c)显示组合工艺④的种类多于进水,其余的组合工艺的种类稍有下降.而就不同的组合工艺而言,组合工艺②、⑤和⑥作用效果最明显,对浮游动物的群落结构影响最大.

图2显示组合工艺对大型浮游动物枝角类和桡足类作用效果强,去除率一般都在70%以上;对小型浮游动物轮虫和原生动物的作用效果相对差一些.相对于图2(a)与图2(c),图2(b)水力负荷为 $0.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,组合工艺对不同类型浮游动物的影响最大,图2(a)中的组合工艺④的枝角类和图2(c)中的组合工艺③的桡足类和组合工艺④、⑤、⑥和⑧的枝角类去除率均出现负值,作用效果较差.3次不同的负荷条件下,对原生动物和轮虫的去除率都出现了不同程度的负值,组合工艺④和⑤对轮虫的去除率均为负值,组合工艺⑤对轮虫的影响比组合工艺④更甚.

图3显示组合工艺的生物量较进水的生物量明显降低,密度的变化趋势和生物量的变化趋势有些不一致.在水力冲击负荷 $0.6\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,出水的密度与进水相当或高于进水(组合工艺②、⑤、⑥

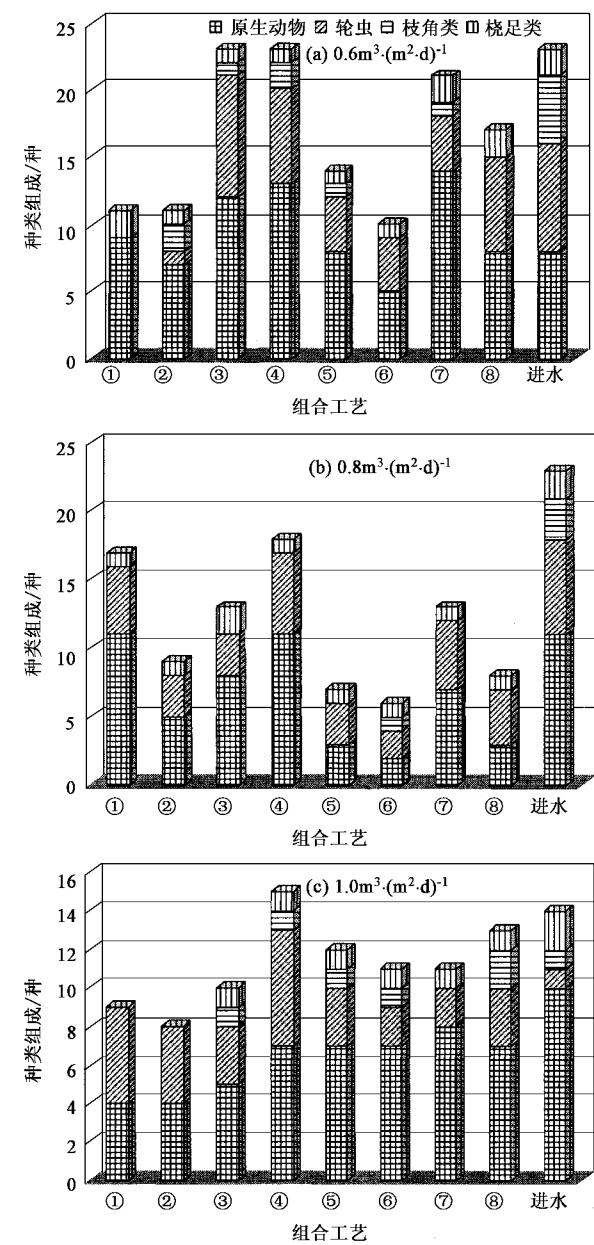


图 1 不同水力冲击负荷下进出水的浮游动物的种类组成
Fig.1 Species of zooplankton in influent and effluent water with different hydraulic loading

除外);在水力冲击负荷 $0.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,出水中浮游动物密度的变化幅度与进水比较不如生物量的变化幅度大,这主要是进水的大型浮游动物生物量大约占总生物量比例的 90% 以上,而出水的大型浮游动物生物量多数在 20% 以下(除组合工艺③为 43%);在水力冲击负荷 $1.0\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,出水的浮游动物变化趋势与水力冲击负荷 $0.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时基本相同,由于进水的原生动物密度的剧增,导致进水浮游动物的密度较前 2 次高.从图

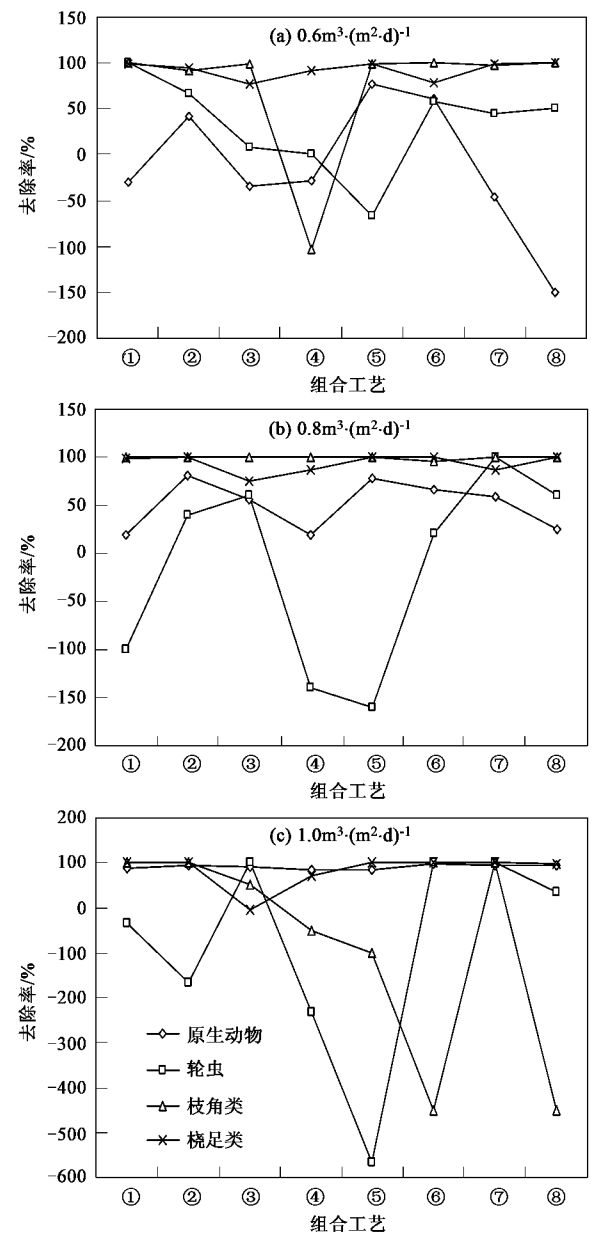


图 2 不同水力冲击负荷条件下组合工艺对浮游动物的去除率
Fig.2 Removal rates of zooplankton by combination systems with different hydraulic loading

3 看,不同的组合工艺对浮游动物的现存量的影响,组合工艺② > 组合工艺①,组合工艺③ > 组合工艺④,组合工艺⑥ > 组合工艺⑤,组合工艺⑦ > 组合工艺⑧,组合工艺②、⑥和⑦较其他的组合工艺作用效果更显著.结合图 4,从去除率的变化趋势看,当水力冲击负荷为 $0.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,对浮游动物的影响相对较大[除组合工艺①在水力冲击负荷 $1.0\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时影响较大外].
2.2 不同季节下人工湿地组合工艺对浮游动物群落结构的影响

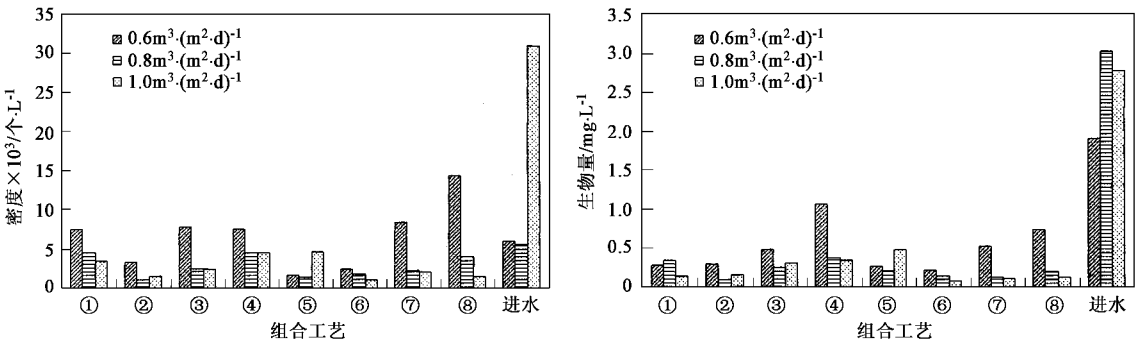


图 3 不同水力冲击负荷下进出水浮游动物的生物量和密度的变化

Fig.3 Change on biomass and density of zooplankton in influent and effluent water with hydraulic loading

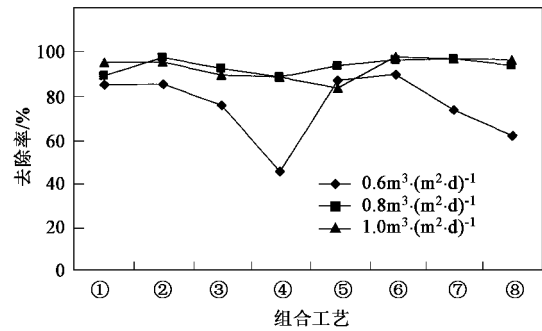


图 4 不同水力冲击负荷下组合工艺对浮游动物的去除率

Fig.4 Removal rates of zooplankton by combination system with different hydraulic loading

在水力负荷 $0.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 下,春、秋季节的进水中的种类丰富;冬、夏季种类相对较少.出水中多为小个体的纤毛虫类,蛭态轮虫,角突臂尾轮虫等和少量的沿岸型种类尖额溞,盘肠溞和底栖型种类猛水蚤以及无节幼体和桡足幼体.出水的种类与 2.1 节所述情况有很好地一致性.

进水浮游动物在不同的季节优势种有所变化,个体大小也有所不同,但出水的浮游动物密度和生物量以及组合工艺对浮游动物的去除都显示了作用效果的稳定性,如图 5 和图 6.图 5 出水中浮游动物密度和生物量的动态变化显示,秋季是作用效果最明显的季节;从图 6 去除率的变化看,春、夏和秋季的作用效果相当,都在 80% 以上或接近 100%,秋季稍好于其他季节.冬季的去除率较低(有负值出现外).在秋季,组合工艺对浮游动物的影响较大,二者具有较好的一致性.图 5 中组合工艺④生物量最高,而密度相对较小,主要是因为后置的兼性塘为浮游动物的生存繁殖提供了有利条件;组合工艺⑦和⑧的密度高,生物量低,是有大量的原生动物存在所致.

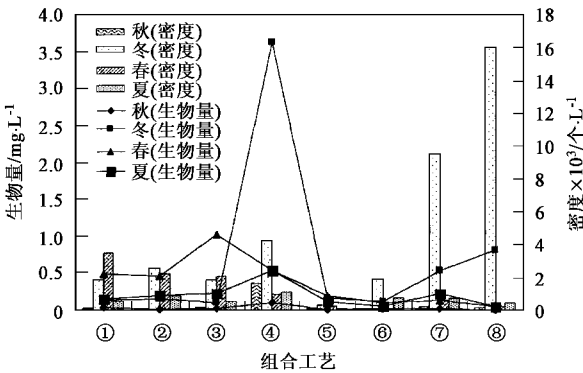


图 5 不同季节组合工艺作用下的浮游动物生物量和密度的变化

Fig.5 Change on biomass and density of zooplankton by combination system in different season

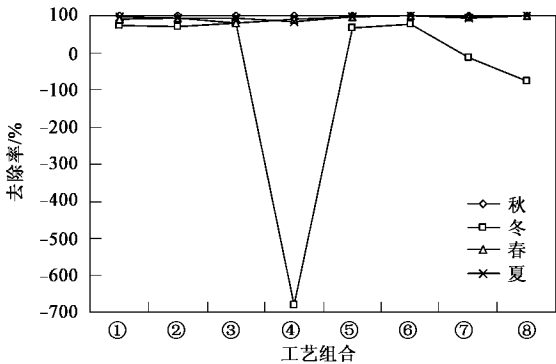


图 6 不同季节组合工艺对浮游动物的去除率

Fig.6 Removal rates of zooplankton by combination system in different seasons

3 讨论

人工湿地主要由人工基质(填料)和水生植物组成,利用系统中基质-水生植物-微生物的物理、化学、生物的重重协同作用,通过基质过滤、吸附、沉

淀、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对污水的高效净化^[16,17]。不同的水力冲击负荷,能够影响人工湿地的净化效果,王世和等研究表明,随水力负荷增大,SS 去除率增大,达到峰值后,去除率又随水力负荷的增大而减小。这是因为在低负荷下,湿地系统对污水中悬浮颗粒的拦截、过滤能力较强。而当水力负荷较大时,已截留的悬浮物重被冲起,使 SS 去除率下降^[18]。如同人工湿地对 SS 的去除机理,对浮游动物的作用主要是填料过滤和拦截作用的结果,微生物降解为非主要因素。在不同的水力冲击负荷条件下,组合工艺对浮游动物的去除率的变化趋势和上述研究基本相同。在水力冲击负荷为 $0.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,组合工艺对浮游动物的去除能力较强,即对浮游动物的影响相对较大。

组合工艺组合方式的不同对浮游动物可产生不同的影响,组合工艺①和②的工艺组合相同,湿地植物相同,流程路线不同,组合工艺②对浮游动物的影响大于组合工艺①,是所有的组合工艺中影响较大的 2 组,组合工艺③和④因为有好氧塘和兼性塘的存在,从去除情况看,变化相对小一些,但是种类发生了变化,因为组合工艺④的兼性塘提供了浮游动物生存和繁殖的环境;组合工艺③没有受到好氧塘太大的影响,可见下行流对浮游动物的作用很大;组合工艺⑤和⑥的作用效果和组合工艺①和②的作用效果相差无几,组合工艺⑥对浮游动物的影响强于组合工艺⑤,这可能是因为下行流湿地(香蒲)置于前面的作用效果会更好一些。组合工艺⑦和⑧主要是湿地类型不同,⑦是复合垂直流系统,⑧是推流床系统,⑦的作用效果明显好于⑧。吴振斌等对人工湿地去除效果的研究表明,对藻类的去除⑧推流床系统最差,但在推流床参与的系统中,推流床仍起了很大作用^[19]。陈德强等对不同组合工艺净化效果的研究表明:下行流湿地+上行流湿地+推流床湿地对 TSS、COD、BOD₅ 的去除效果最好;下行流湿地+氧化塘对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果最好,但氧化塘中的藻类容易导致出水中的 TSS 增加;上行流湿地有利于对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除;推流床湿地对各项指标的去除效果均比其他组合工艺差,将其后置可以增加出水的 DO 含量^[20]。人工湿地中填料的粒径大小影响系统的充氧作用和对 TSS 的去除效果。⑧推流床湿地的大粒径填料有利于充氧,但不利于 TSS 的去除,水中的溶解氧高有利于浮游动物的生存,故⑧推流床湿地的作用效果较差。而组合工艺②和⑥的推流床置于后面,作用效果好于①和⑤,原因可能是前面的下行流

和上行流对浮游动物的生存成了限制性因素,起了主要作用的结果。对浮游动物去除而言,推流床湿地置于前面没有起到很大的作用,反而提供了一个“温床”,有利于浮游动物的繁殖。组合工艺②对浮游动物的作用比⑦大,说明了推流床存在的作用。

湿地植物为多年生草本植物,冬天枯萎凋零,春季萌芽,植物根系在春季植物复苏时变得丰富,使得湿地的孔径变得细小,对浮游动物的过滤作用增强,同时湿地微型生物活跃起来,有助于生物降解。因为组合工艺的湿地植物相同,只存在季节性差异,所以冬季的去除效果较差,对浮游动物的影响相对小一些;春、夏、秋季的作用效果较好,对浮游动物的影响相对较大。

4 结论

(1)在不同的水力冲击负荷条件下,组合工艺对浮游动物的去除率(组合工艺①和⑧除外)随水力冲击负荷的增大而增大,达到峰值后,又随水力冲击负荷的增大而减小,水力冲击负荷为 $0.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,对浮游动物的影响最大。

(2)不同季节人工湿地组合工艺对浮游动物群落结构的影响不同。冬季的影响相对小些;春、夏和秋季的影响相对大些,秋季的影响大于春季和夏季。

(3)不同的人工湿地组合工艺的组合作用方式决定了对浮游动物的现存量影响大小。下行流湿地(美人蕉)→兼性塘、好氧塘→下行流湿地(美人蕉)和推流床湿地(美人蕉)对浮游动物的影响相对较小,好氧塘和兼性塘的存在,对浮游动物群落结构起到了稳定作用;下行流(美人蕉)→上行流湿地(香蒲)→推流床湿地(薹苳)和下行流湿地(香蒲)→推流床湿地(美人蕉)组合对浮游动物的影响相对较大,故而,下行流湿地置于组合工艺前对浮游动物群落结构的影响较大。

(4)人工湿地组合工艺系统对大型的浮游动物如枝角类和桡足类的影响(去除率 $\geq 70\%$)比对小型的浮游动物如轮虫和原生动物的影响(最低值 = -566.7%)大。人工湿地作为不同于水体的生态系统,有利于浮游动物中的一些沿岸型和底栖型种类生长繁殖,在出水中出现了一些进水中没有的种类如猛水蚤。人工湿地是否对整个水生态系统浮游动物的群落结构产生了影响,还需要进一步探讨。

致谢:感谢庄德辉、刘保元等先生的指导,梁威、周巧红、马剑敏等博士的帮助,钟非、张世羊、邓平等净化组成员在实验上的帮助。

参考文献:

- [1] Haberl R. Constructed wetlands : a chance to solve wastewater problems in developing countries [J]. Wat. Sci. Tech., 1999, **40** (3): 11 ~ 17.
- [2] 岳春雷, 常杰, 葛滢, 等. 复合垂直流人工湿地对低浓度养殖废水循环净化功能研究[J]. 科技通报, 2004, **20**(1): 15 ~ 17.
- [3] Mitsch, W J, Horne, A J, Nairn, R W. Nitrogen and phosphorous retention in wetlands: ecological approaches to solving excess nutrient problems[J]. Ecol. Eng., 2000, **14**(1 ~ 2): 1 ~ 7.
- [4] Alvord, H H, Kadlec, R H. Atrazine fate and transport in the Des Plaines Wetlands[J]. Ecol. Model. 1996, **90**: 97 ~ 107.
- [5] Batty L C, Atkin L, Manning D A. Assessment of the ecological potential of mine-water treatment wetlands using a baseline survey of macroinvertebrate communities[J]. Environmental Pollution, 2005, **138**: 412 ~ 419.
- [6] Ye Z H, Whiting S N, Lin Z Q, *et al.* Removal and distribution of iron, manganese, cobalt, and nickel within a Pennsylvania constructed wetland treating coal combustion by-product leachate[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(4): 1464 ~ 1473.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [8] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991.
- [9] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [10] 沈韞芬. 原生动物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [12] 大连水产学院主编. 淡水生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- [13] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [14] 蒋燮志, 堵南山. 中国动物志(淡水枝角类)[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [15] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志(淡水桡足类)[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [16] Drizo A, Frost C A, Grace J. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland system [J]. Wat. Sci. Tech., 1999, **33**(7): 3595 ~ 3602.
- [17] Greenway M. Nutrient content of wetland plants in constructed wetland receiving municipal effluent in tropical Australia[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, **35**(5): 135 ~ 142.
- [18] 王世和, 王薇, 俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, **33**(3): 359 ~ 362.
- [19] 吴振斌, 邓平, 吴晓辉, 等. 人工湿地小试系统藻类去除效果的变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(2): 229 ~ 232.
- [20] 陈德强, 吴振斌, 成水平, 等. 不同湿地组合工艺净化污水效果的比较[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(9): 12 ~ 15.