

DOI: 10.5846/stxb201406121218

左倬, 陈煜权, 成必新, 胡伟, 朱雪诞, 仓基俊, 王鹏. 不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2016, 36(4): - .

Zuo Z, Chen Y Q, Cheng B X, Hu W, Zhu X D, Cang J J, Wang P. Ecological characteristics of macrobenthic communities in SFWs of different hydrophytes and their relationships with environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落特征及其 与环境因子的关系

左倬^{1,*}, 陈煜权¹, 成必新¹, 胡伟¹, 朱雪诞¹, 仓基俊², 王鹏¹

1 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434

2 盐城市水利科学研究所, 盐城 224002

摘要:大型底栖动物在人工湿地生态系统的物质循环和能量流动过程中发挥着重要作用,是保持湿地结构稳定、高效运行的重要因素。为了解大型底栖动物在人工湿地内的群落特征,于2013年8月—2014年5月对盐龙湖芦苇(*Phragmites communis*)、茭草(*Zizania latifolia*)、狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)表流人工湿地的大型底栖动物群落进行调查。结合相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)、多样性指数(Shannon-Wiener 多样性指数, Pielou 均匀度指数, Margalef 丰富度指数)与相关性分析等手段,研究了不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落特征及其与环境因子的关系。调查共采集到大型底栖动物14种,主要优势物种为纹沼螺(*Parafossarulus striatulus*)、霍普水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、长角涵螺(*Alocinma longicornis*)、摇蚊幼虫(*Tendipes* sp.),但不同植物配置下优势物种有所差别。芦苇、茭草及狭叶香蒲湿地的年均大型底栖动物密度分别为285 ind/m²、330 ind/m²、266 ind/m²,年均生物量分别为25.6 g/m²、104.0 g/m²、32.3 g/m²。茭草湿地的大型底栖动物群落在物种数量、均匀程度上要高于芦苇及狭叶香蒲湿地,而后两者多样性水平相当。茭草湿地底栖动物群落生物量与软体动物密度呈极显著($P<0.01$)正相关,总密度与水深呈显著($P<0.05$)负相关,环节动物的密度与STN、SOM之间分别呈极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)正相关。本研究为今后人工湿地生态系统的设计、管护以及长效运行提供新的思路。

关键词:大型底栖动物; 表流人工湿地; 水生植物; 环境因子; 盐龙湖

Ecological characteristics of macrobenthic communities in SFWs of different hydrophytes and their relationships with environmental factors

ZUO Zhuo^{1,*}, CHEN Yuquan¹, CHENG Bixin¹, HU Wei¹, ZHU Xuedan¹, CANG Jijun², WANG Peng¹

1 Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co. LTD, Shanghai 200434, China

2 Yancheng Institute of Hydrotechnical Research, Yancheng 224002, China

Abstract: Macrobenthic communities play vital roles in the processes of material circulation and energy flow of constructed wetland ecosystems. These roles are also critical for sustaining the structural stability and operational efficiency of such systems. Hydrophytes are one of the most obvious biological components of constructed wetland ecosystems. However, little information is available on the differences in the macrobenthic communities that occupy different hydrophyte monoculture configurations. In the present study, a series of quarterly investigations on macrobenthic communities was carried out from August 2013 to May 2014 in surface flow wetland (SFW) monocultures of *Phragmites communis*, *Zizania latifolia*, or *Typha angustifolia*, Yanlong Lake, in China. The aim of this study was to explore the ecological characteristics of

基金项目:江苏省水利科技项目(2014068)

收稿日期:2014-06-12; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zz@sidri.com

macrobenthic communities in SFWs of different hydrophytes and their relationships with environmental factors. Relative importance analysis, diversity index (Shannon, Pielou, Margalef) analysis, and correlation analysis were used in this study. Fourteen macrobenthic species were found (i.e., mollusk: 7, arthropod: 4, and annelida: 3). *Parafossarulus striatulus*, *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Alocinma longicornis*, and *Tendipes* sp. were the predominant species in the study areas. The population density and biomass of these species varied according to the major hydrophyte in each SFW. The annual average density of macrobenthos in the SFWs of *P. communis*, *Z. latifolia*, and *T. angustifolia* was 285 ind/m², 330 ind/m², and 266 ind/m², respectively, and the annual average biomass was 25.6 g/m², 104.0 g/m², and 32.3 g/m², respectively. The highest number of species and greatest evenness among species of the macrobenthic community were found in the SFWs of *Z. latifolia*. These were significantly higher than those found in the SFWs of *P. communis* and *T. angustifolia*. However, there were no significant differences in the macrobenthic diversity between the SFWs of *P. communis* and *T. angustifolia*. In the SFWs of *Z. latifolia*, the macrobenthic biomass was significantly and positively correlated to the density of mollusks ($P < 0.01$), and the total density was significantly and negatively correlated to water depth ($P < 0.05$); the density of annelida was significantly and positively correlated to both STN ($P < 0.01$) and SOM ($P < 0.05$). This study is helpful for improving our understanding of the ecological characteristics of the macrobenthic communities in constructed wetlands and provides new insights into SFW design, management, and long-term operation.

Key Words: macrobenthos; surface flow wetland; hydrophyte; environmental factor; Yanlong Lake

大型底栖动物一般指个体大于 500 μm , 生活史的全部或大部分时间在水体底部的无脊椎动物, 主要包括水生昆虫、甲壳类、软体动物、环节动物等^[1]。作为湿地生态系统的一个重要组成部分, 大型底栖动物在物质循环和能量流动过程中发挥着重要作用^[2-3], 可以促进湿地中植物碎屑、土壤有机质分解, 加速泥水界面的物质交换和水体的自净过程, 是维持健康生态系统的关键成员^[4-5], 也是保持功能型湿地结构稳定、高效运行的重要因素。

国内外关于不同类型的自然湿地, 如河流、湖泊、海湾等的大型底栖动物的研究已有大量报道^[5-10], 但针对人工湿地所开展的研究很少。目前国内已见报道的仅有胡忠军、张饮江、张皓等^[11-13]针对城市公园景观湿地所开展的相关研究, 然而这些研究并没有结合湿地的植物配置进行。水生植物是人工湿地、尤其是表流湿地构建的核心与特色所在^[14], 也是湿地系统最明显的生物特征^[15], 在不同水生植物配置下的人工湿地生态系统中, 大型底栖动物群落的生态特征是否有所区别, 其群落特征与哪些环境因子息息相关, 目前尚未有明确答案。

我们于 2013 年 8 月—2014 年 5 月期间, 对江苏省盐龙湖生态净化工程中分别以芦苇 (*Phragmites communis*)、茭草 (*Zizania latifolia*)、狭叶香蒲 (*Typha angustifolia*) 等 3 种常见植物所构建的表流人工湿地 (surface flow wetlands, SFWs) 下的大型底栖动物群落按季度进行了调查, 对不同湿地大型底栖动物的种类组成、密度、生物量、多样性进行对比分析, 并初步探讨了环境因素对人工湿地大型底栖动物群落的影响, 以期在今后人工湿地的设计、管护及长效运行提供新的思路。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

盐龙湖位于江苏省盐城市龙冈镇境内蟒蛇河南岸 (33°20'11"N, 120°1'19"E), 于 2012 年 6 月建成运行, 是目前我国规模最大的饮用水源地原水生态净化工程。其总占地面积 3343 亩, 按水流方向依次由预处理区、湿地生态净化区 (挺水植物区、沉水植物区) 以及深度净化区组成。本文的研究对象为该工程的挺水植物区, 该区占地规模约 630 亩, 由多个表流湿地单元并联而成, 不同单元之间的植物配置与水深条件有所不同。表流湿地的基本情况及研究期间的进水水质条件见表 1。

表 1 表流人工湿地基本情况

土壤质地 Soil texture	水生植物 Hydrophyte	水深条件 Water depth	研究期间进水水质情况 Water quality situation during the research (mg/L)				
			TN	NH ₃ -N	TP	COD _{Mn}	DO
轻粉质壤土、粉质粘土 Light silty loam, silty clay	芦苇、茭草、 狭叶香蒲	0.3—0.5m	1.72 ±0.60	0.46 ±0.34	0.20 ±0.09	6.10 ±1.39	4.90 ±2.88

1.2 样地设置与样品采集

分别于 2013 年 8 月(夏季)、11 月(秋季),以及 2014 年 2 月(冬季)、5 月(春季)对表流湿地进行大型底栖动物取样调查。每次取样选择 12 个样地(图 1、表 2),涵盖了不同植物与不同水深的的所有情况,并分别有一个对应平行样地。底栖动物取样采用 1/32 m²改良 Peterson 采泥器,其中茭草、狭叶香蒲每个样地取 3 个样点,芦苇每个样地取 5 个样点,以避免样地相对较少而带来的取样误差。泥样带回实验室后,经 60 目尼龙筛清洗,剩余物倒入解剖盘中将底栖动物活体逐一挑出、鉴定记录,用滤纸擦拭干净后称重,最终结果折算成单位面积的密度(ind/m²)和生物量(g/m²)。

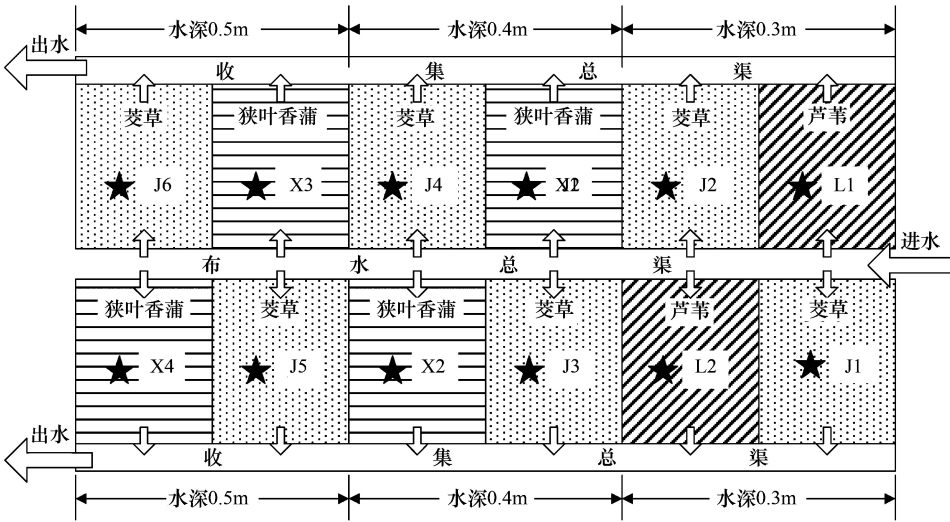


图 1 盐龙湖表流人工湿地及取样地位置示意

Fig. 1 Sketch map of The Yanlong Lake surface flow wetlands (SFWs) and sampling sites positions

表 2 样地设置情况说明

样地 Sampling sites	基本情况 Basic information	样地 Sampling sites	基本情况 Basic information
L1、L2	芦苇,水深 0.3m	J5、J6	茭草,水深 0.5m
J1、J2	茭草,水深 0.3m	X1、X2	狭叶香蒲,水深 0.4m
J3、J4	茭草,水深 0.4m	X3、X4	狭叶香蒲,水深 0.5m

1.3 环境因子的测定

在大型底栖动物取样调查期间同步记录湿地水深,并于 2013 年 11 月并采集各样地的土壤样品,将新鲜土样内的石粒和植物根系等拣出,平摊于室内通风处使其自然风干。土样风干后,经压碎、碾细,过筛处理,采用常规方法^[16]测定土壤全氮(Soil total nitrogen, STN)、全磷(Soil total phosphorus, STP)及有机质(Soil organic matter, SOM)。

1.4 数据分析与处理

采用相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)^[6]确定大型底栖动物群落内的优势种类:

$$IRI = (W + N) \times F \quad (1)$$

式中 W 为相对生物量,即某一物种的生物量占大型底栖动物总生物量的百分比; N 为相对丰度,即该物种的丰度占大型底栖动物总丰度的百分比; F 为该物种出现的频率。

采用 K-优势曲线^[17],同时结合 Shannon-Wiener 多样性指数(H),Pielou 均匀度指数(J)以及 Margalef 丰富度指数(d)对各采样点的底栖动物的多样性进行分析。

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \cdot \ln P_i \quad (2)$$

$$J = H / \ln S \quad (3)$$

$$d = (S - 1) / \ln S \quad (4)$$

式中 P_i 代表第 i 个物种的相对丰度, S 为物种数, N 代表所有物种的个体数之和。

人工湿地大型底栖动物群落与环境因子之间的相关分析采用 SPSS19 软件进行。

2 结果与分析

2.1 种类组成与优势物种

周年的采样调查共鉴定出大型底栖动物 14 种(表 3),隶属于 3 门 6 纲 12 科,其中软体动物有 6 科 7 属 7 种,节肢动物有 4 科 4 属 4 种,环节动物 2 科 3 属 3 种。对于不同湿地而言,芦苇、茭草及狭叶香蒲湿地的大底栖动物种类数分别为 10 种、14 种及 11 种。

根据相对重要性指数判断各湿地大型底栖动物的优势物种。结果显示,芦苇湿地大底栖动物群落中的优势物种依次为:纹沼螺、霍普水丝蚓、长角涵螺,三者的相对重要性指数远高于其它物种,表现出绝对的优势;茭草湿地大底栖动物群落中的优势物种依次为:长角涵螺、霍普水丝蚓、纹沼螺;狭叶香蒲湿地大底栖动物群落中的优势物种依次为:摇蚊幼虫、霍普水丝蚓、长角涵螺。

表 3 不同湿地大型底栖动物种类组成及相对重要性指数

Table 3 Species composition of macrobenthos in different SFWs and the index of relative importance (IRI)

种名 Species	科属 Family& Genus	相对重要性指数 Index of relative importance (IRI)		
		芦苇湿地 <i>P. communis</i>	茭草湿地 <i>Z. latifolia</i>	狭叶香蒲湿地 <i>T. angustifolia</i>
一、软体动物 Mollusc				
纹沼螺 <i>Parafossarulusstriatulus</i>	豆螺科沼螺属	4881	934	743
长角涵螺 <i>Alocinmalongicornis</i>	斛螺科涵螺属	3670	2790	1695
扁卷螺 <i>Planorbidae trumpet</i>	扁卷螺科扁卷螺属	97	121	243
中国圆田螺 <i>Cipangopaludinachinensis</i>	田螺科圆田螺属	0	322	378
绘环棱螺 <i>Bellamyalimnophila</i>	田螺科环棱螺属	39	19	8
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	椎实螺科萝卜螺属	90	133	9
背角无齿蚌 <i>Anodontawoodiana</i>	蚌科无齿蚌属	0	795	0
二、节肢动物 Arthropod				
摇蚊科 1 种 <i>Tendipes sp.</i>	摇蚊科	202	566	2400
黄蜻 <i>Pantalaflavescens</i>	蜻科黄蜻属	0	11	0
食蚜蝇科 1 种 <i>Scaeva sp.</i>	食蚜蝇科	0	1	4
日本沼虾 <i>Macrobrachiumnipponense</i>	长臂虾科沼虾属	442	85	0
三、环节动物 Annelida				
霍普水丝蚓 <i>Limnodrilushoffmeisteri</i>	颤蚓科水丝蚓属	4065	2669	2287
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiurasowerbyi</i>	颤蚓科尾鳃蚓属	22	299	87
扁舌蛭 <i>Glossiphoniaacomplanata</i>	舌蛭科舌蛭属	358	272	122

2.2 密度及生物量

芦苇、茭草及狭叶香蒲湿地的年均大型底栖动物密度分别为 285 ind/m^2 、 330 ind/m^2 、 266 ind/m^2 (图 2)。四个季度中 3 种湿地大型底栖动物的密度大体表现为冬、春季高于夏、秋季,其中芦苇湿地、狭叶香蒲湿地大型底栖动物密度在春季分别达到 365 ind/m^2 、 453 ind/m^2 ,茭草湿地在冬季密度达到 548 ind/m^2 ;秋季芦苇湿地、茭草湿地大型底栖动物密度在全年处于最低水平,分别仅为 170 ind/m^2 、 211 ind/m^2 ,狭叶香蒲湿地在夏季的密度仅为 183 ind/m^2 。对各类湿地不同季节的优势物种进行分析,芦苇湿地在不同季节中均以软体动物与环节动物为主,摇蚊幼虫等节肢动物不喜栖息;与之相反的是,狭叶香蒲湿地似乎更吸引摇蚊幼虫等节肢动物,在不同季节下其数量比例均要高于其它湿地,但软体动物出现相对较少;茭草湿地在夏季以软体动物为主,但秋季以来以寡毛类为主的环节动物比例开始增加,至次年春季环节动物已占绝对优势。

芦苇、茭草及狭叶香蒲湿地的大型底栖动物生物量在不同季节下变动较大(图 3),3 种湿地的年均生物量分别为 25.6 g/m^2 、 104.0 g/m^2 、 32.3 g/m^2 。其中芦苇湿地生物量表现为夏>秋>春>冬;茭草湿地生物量表现为夏>春>冬>秋;狭叶香蒲湿地生物量表现为春>夏>秋>冬。软体动物的存在与否及其数量的多少,对各湿地中大型底栖动物群落生物量起到了决定性作用,在不同季节其对总体生物量的贡献率均占 95% 以上。茭草湿地软体动物数量较多,其大型底栖动物的生物量在大多数季节均显著高于芦苇及狭叶香蒲湿地,尤其在夏季其生物量达到了 221.0 g/m^2 ,为全年所有湿地中的最高水平。

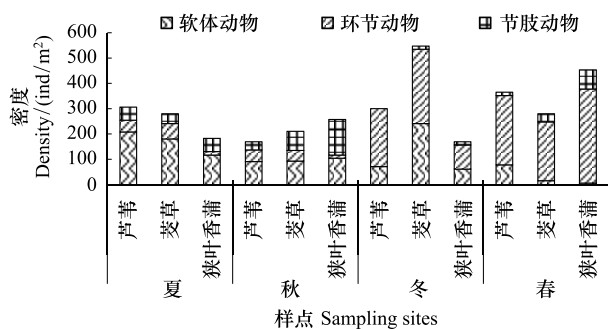


图 2 不同季节大型底栖动物在 3 种湿地中的密度

Fig. 2 Density of macrobenthic community of 3 SFWs in different seasons

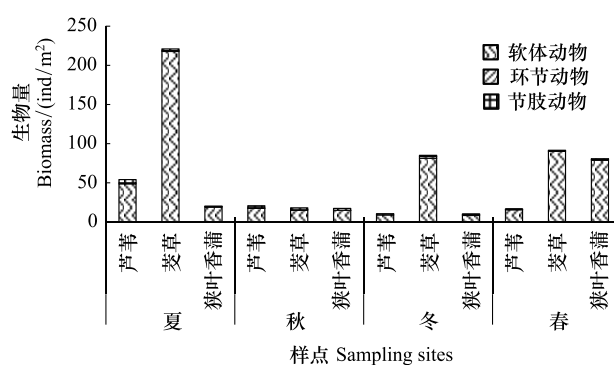


图 3 不同季节大型底栖动物在 3 种湿地中的生物量

Fig. 3 Biomass of macrobenthic community of 3 SFWs in different seasons

2.3 生物多样性

利用 K-优势曲线及多样性指数来比较分析芦苇、茭草及狭叶香蒲湿地大型底栖动物群落的多样性。将上述 3 种湿地的大型底栖动物各物种的年均相对丰度排序后采用累积曲线作图(图 4),可以看出茭草湿地的 K-优势曲线位于芦苇、狭叶香蒲湿地之下,且曲线相对长而平缓,这说明茭草湿地中的大型底栖动物在物种数量、均匀程度上要高于芦苇、狭叶香蒲湿地。芦苇与狭叶香蒲湿地中的大型底栖动物年均多样性水平相当。

进一步对芦苇、茭草及狭叶香蒲湿地大型底栖动物群落不同季节条件下的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J') 以及 Margalef 丰富度指数 (d') 进行分析(表 4)。3 种湿地大型底栖动物群落多样性在不同季节表现出的总体趋势为夏季>秋、冬季>春季。其中在夏秋季茭草湿地的多样性指数均高于芦苇、

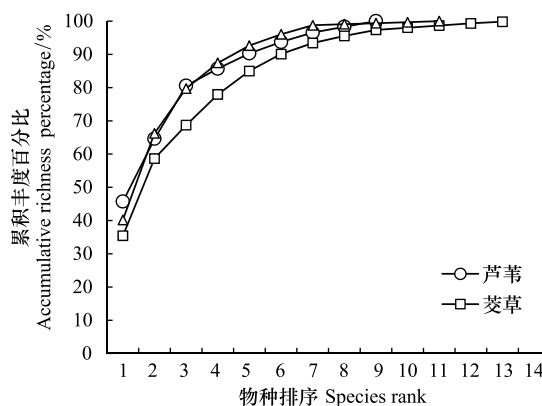


图 4 3 种人工湿地大型底栖动物 K-优势曲线

Fig. 4 K-dominant curves of macrobenthos for 3 SFWs

狭叶香蒲湿地;而冬、春季多样性指数相对较高的湿地分别为狭叶香蒲湿地、芦苇湿地。

表 4 不同季节 3 种人工湿地大型底栖动物多样性比较
Table 4 Species diversity of macrobenthic community between 3 SFWs in different seasons

季节 Seasons	芦苇湿地 <i>P. communis</i> SFW			茭草湿地 <i>Z. latifolia</i> SFW			狭叶香蒲湿地 <i>T. angustifolia</i> SFW		
	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>d</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>d</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>d</i>
夏 Summer	1.74	0.84	1.82	2.19	0.88	2.26	1.54	0.79	1.49
秋 Autumn	1.47	0.92	1.23	1.87	0.85	1.75	1.28	0.66	1.37
冬 Winter	1.24	0.69	1.31	1.58	0.66	1.81	1.90	0.87	2.02
春 Spring	0.87	0.54	0.99	0.76	0.39	1.23	0.66	0.41	0.81

2.4 人工湿地环境因子与底栖动物群落的相关性分析

以秋季茭草湿地调查成果为例,采用相关分析方法探讨人工湿地环境因子对大型底栖动物群落的影响。由于所选取的样地的底质、水质条件基本一致,因此环境因子主要选取湿地水深,土壤 STN、STP、SOM 等理化因子。相关分析(表 5)显示:底栖动物群落生物量与软体动物密度呈极显著正相关($P<0.01$),总密度与水深呈显著负相关($P<0.05$),环节动物密度与 STN、SOM 之间分别呈极显著、显著正相关($P<0.01$, $P<0.05$)。

表 5 茭草湿地大型底栖动物群落特征与环境因子间的相关性矩阵
Table 5 Correlation matrix among macrobenthos community characteristics and environmental factors in *Z. latifolia* SFW

分析因子 Analytic factors	生物量 Biomass	总 ρ Total ρ	软体动物 ρ Mollusc ρ	环节动物 ρ Annelida ρ	节肢动物 ρ Arthropod ρ	水深 Water depth	土壤全氮 Soil total nitrogen	土壤全磷 Soil total phosphorus	土壤有机质 Soil organic matter
生物量 Biomass	1.00	0.64	0.98 **	0.31	-0.39	-0.40	0.49	-0.43	0.75
总 ρ Total ρ		1.00	0.63	0.40	0.41	-0.91 *	0.54	-0.13	0.72
软体动物 ρ Mollusc ρ			1.00	0.12	-0.31	-0.37	0.31	-0.51	0.62
环节动物 ρ Annelida ρ				1.00	-0.18	-0.035	0.93 **	0.43	0.82 *
节肢动物 ρ Arthropod ρ					1.00	-0.59	-0.16	0.13	-0.19
水深 Water depth						1.00	-0.42	0.21	-0.64
土壤全氮 Soil total nitrogen							1.00	0.42	0.82 *
土壤全磷 Soil total phosphorus								1.00	-0.09
土壤有机质 Soil organic matter									1.00

** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

3.1 不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落特征

盐龙湖人工湿地大型底栖动物群落在物种组成、生物量上与张皓,刘操等分别对常州公园湿地、永定河人工湿地的相关研究结论^[13,18]相似,但软体动物的数量相对较多,这可能于湿地的运行时间尚短,且处理水体水质相对清洁有关。总体而言,不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落的变化有共同的特点,即:软体动物在夏季密度较大,这与螺类在夏季大量繁殖有关;以寡毛类为主的环节动物表现为夏秋季较少而冬春季数量急剧增加,与湿地植物生长周期相反,这是由于植物枯萎后能形成有机碎屑,适合喜有机质丰富的寡毛类生存^[19-20];以摇蚊幼虫为代表的节肢动物在秋、春两季出现较多,而在夏冬季相对较少,符合我国多数地区摇蚊

生殖季节的规律。

水生植物为底栖动物提供了更加多样的栖息、繁殖场所,也有利于底栖动物逃避其他动物的捕食,从而增加了可供更多底栖动物生存的生境空间^[7,21]。目前,我国常被运用于人工湿地植物已有数十种^[15],但不同湿地植物的根系形态、输氧能力、对土壤有机物的积累贡献等方面有很大不同,这直接或间接地影响着湿地的底栖动物群落。

在本文所研究的三种湿地植物中:(1)芦苇属浅根散生型植物,具有很强的根系泌氧能力^[22],可满足螺类等对溶解氧要求较高的软体动物呼吸需要。芦苇在湿地中生长密度较大,对水体中细微的悬浮物可起到良好的拦截沉淀作用,使湿地表层淤积底泥趋于细腻,这有利于寡毛类的生存繁衍。然而芦苇茎叶不易分解^[23],有机碎屑的产生量相对较少,因此各类底栖动物在密度及生物量上不及茭草湿地。(2)狭叶香蒲属深根散生型植物,植株分散独立,其根系泌氧能力不及芦苇^[22],因此在湿地中螺类分布较少,而对溶解氧耐受性较强的摇蚊幼虫却由于湿地水面相对开阔而更易于进入。狭叶香蒲在生长期内凋落物很少,因此有机碎屑的产生量也相对较少,这成为了底栖动物群落的限制因素。(3)茭草也为浅根型植物,具有强大的分蘖能力与粗壮的匍匐茎,根系泌氧性强于狭叶香蒲^[24],且在生长期内不断有老叶凋落,为各类底栖动物提供了多样的微生境与庇护场所、充足的有机碎屑及溶解氧,这可能是茭草湿地内底栖动物,尤其是软体动物的密度及生物量明显高于其它两种植物湿地的关键所在。

需要指出的是,本研究是基于盐龙湖工程的野外条件下开展的,虽然涵盖了该工程所有的湿地类型,但不同植物样地之间仍有些许在环境条件及数量上的差异。建议今后结合不同湿地植物的吸收净化能力、管护的便捷程度等研究成果,寻求最佳的人工湿地植物配置模式。

3.2 环境因子对人工湿地大型底栖动物群落的影响

生境的复杂性是决定底栖动物多样性的关键因子,国内外关于环境因子与底栖动物多样性关系的研究较多,认为底栖动物群落结构空间分布与水质、底质、水文条件等环境因子有关^[10,19,25]。水深条件影响着水底溶解氧水平、湿地植物的地上及地下生物量的分布等,而底质是底栖动物的生长繁殖等一切生命活动的必备条件,底质的颗粒大小、稳定程度、表面构造和营养成分等都对底栖动物有很大的影响^[19]。

本研究发现,尽管表流人工湿地水深条件通常不超过 50 cm,但底栖动物群落的密度对此反映较为敏感,随着水位加深,密度有显著降低的趋势。此外,环节动物的密度还与土壤的 STN、SOM 呈显著正相关,这是由于以寡毛类为主的环节动物更喜底质细腻,有机物含量丰富的环境^[26]。然而湿地中软体动物、节肢动物的分布并没有表现出与水深、土壤理化性质的直接相关关系,说明人工湿地对底栖动物分布的影响还有其它关键环境因子存在。

目前,在我国现行的《人工湿地污水处理技术导则》(RISN-TG 006-2009)、《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005-2010)等指导性文件中,人工湿地设计手法主要是基于水力停留时间、水力及污染负荷等参数提出,并未考虑湿地环境因子及植物配置对土壤环境及底栖动物的影响。底栖动物的存在是维持人工湿地结构稳定、高效运行的重要因素,建议今后应深入开展相关研究,使人工湿地生态系统的设计趋于完善。

4 结论

(1)芦苇、茭草及狭叶香蒲湿地中共鉴定出大型底栖动物 14 种,隶属于 3 门 6 纲 12 科,主要优势物种为纹沼螺、霍普水丝蚓、长角涵螺、摇蚊幼虫,在不同植物配置下,人工湿地大型底栖动物群落的优势物种有所差别。

(2)芦苇、茭草及狭叶香蒲湿地的年均大型底栖动物密度分别为 285 ind/m²、330 ind/m²、266 ind/m²,年均生物量分别为 25.6 g/m²、104.0 g/m²、32.3 g/m²。大型底栖动物的密度表现为冬春季高于夏秋季,其中夏秋季密度较高的类群分别为软体动物及摇蚊幼虫,冬春季为寡毛类。

(3)茭草湿地的大型底栖动物群落在物种数量、均匀程度上要高于芦苇及狭叶香蒲湿地,芦苇与狭叶香

蒲湿地中的大型底栖动物年均多样性水平相当。不同季节三类湿地大型底栖动物群落多样性表现出的总体趋势为夏季>秋、冬季>春季。

(4) 茭草湿地底栖动物群落生物量与软体动物密度呈极显著正相关($P<0.01$), 总密度与水深呈显著负相关($P<0.05$), 环节动物的密度与 STN、SOM 之间分别呈极显著、显著正相关($P<0.01$, $P<0.05$)。

参考文献(References):

- [1] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2nd ed. Washington D C: U. S. Environmental, Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [2] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *BioScience*, 1999, 49(2): 119-127.
- [3] Devine J A, Vanni M J. Spatial and seasonal variation in nutrient excretion by benthic invertebrates in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 2002, 47(6): 1107-1121.
- [4] Novitzki R P, Smith R D, Fretwell J D. Restoration, creation, and recovery of wetlands: wetland functions, values and assessment. U. S. Geological Survey Water Supply, 1997, 16(3): 2425.
- [5] 王银东, 熊邦喜, 杨学芬. 武汉市南湖大型底栖动物的群落结构. *湖泊科学*, 2005, 17(4): 327-333.
- [6] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物的群落结构. *生态学报*, 2004, 24(3): 531-537.
- [7] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性. *生物多样性*, 2010, 18(1): 50-59.
- [8] 马秀娟, 沈建忠, 孙金辉, 王海生, 张凯. 天津于桥水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2356-2364.
- [9] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 白海锋, 武玮, 宋进喜. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 218-226.
- [10] 谢志才, 张君倩, 陈静, 马凯, 刘瑞秋, 汪亚平, 蔡庆华. 东洞庭湖保护区大型底栖动物空间分布格局及水质评价. *湖泊科学*, 2007, 19(3): 289-298.
- [11] 胡忠军, 王思卿, 张饮江, 张颖, 刘其根, 查玉婷. 上海世博园后滩湿地底栖动物群落特征与水质评价. *环境科学学报*, 2013, 33(4): 1080-1088.
- [12] 张饮江, 黄薇, 罗坤, 杜佳沐, 徐姗楠, 陈立婧, 何培民. 上海世博园后滩湿地大型底栖动物群落特征与环境分析. *湿地科学*, 2007, 5(4): 326-333.
- [13] 张皓, 沈丽娟, 张红高, 张翔. 不同类型城市人工湿地底栖动物多样性的比较研究. *环境科学与管理*, 2013, 38(10): 180-184.
- [14] 左倬, 胡伟, 朱雪诞, 陈煜权, 郭萧. 不同季节表流湿地对微污染原水的净化效果分析. *人民长江*, 2013, 44(19): 91-95.
- [15] 吴建强, 阮晓红, 王雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择. *水资源保护*, 2005, 21(1): 1-6.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [17] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Biology*, 1986, 92(4): 557-562.
- [18] 刘操, 杜桂森, 黄炳彬, 孟庆义, 李慧敏, 王子健, 宋福. 永定河水系人工湿地系统中的生物多样性与水质变化. *生态学报*, 2007, 27(9): 3670-3677.
- [19] 王银东, 熊邦喜, 陈才保, 胡宏胜. 环境因子对底栖动物生命活动的影响. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2005, 24(3): 253-257.
- [20] 纪炳纯, 王新华, 秦保平, 孙韧. 引滦入津流域底栖动物研究及水质评价. *南开大学学报: 自然科学版*, 2002, 35(2): 106-112.
- [21] Soszka G J. Ecological relations between invertebrates and submerged macrophytes in the lake littoral. *Ekologia Polska*, 1975, 23(3): 393-415.
- [22] 吴海明, 张建, 李伟江, 张波. 人工湿地植物泌氧与污染物降解耗氧关系研究. *环境工程学报*, 2010, 4(9): 1973-1977.
- [23] 叶碧碧, 曹德菊, 储昭升, 庞燕, 李浩, 肖蓬蓬. 洱海湖滨带挺水植物残体降解特征及其环境效应初探. *环境科学研究*, 2011, 24(12): 1364-1369.
- [24] 刘志宽, 牛快快, 马青兰, 白晓华, 苏刘选. 8 种湿地植物根部泌氧速率的研究. *贵州农业科学*, 2010, 38(4): 447-450.
- [25] Shostell J M, Williams B S. Habitat complexity as a determinate of benthic macroinvertebrate community structure in cypress tree reservoirs. *Hydrobiologia*, 2007, 575(1): 389-399.
- [26] Takamura N, Ito T, Ueno R, Ohtaka A, Wakana I, Nakagawa M, Ueno Y, Nakajima H. Environmental gradients determining the distribution of benthic macroinvertebrates in Lake Takkobu, Kushiro wetland, northern Japan. *Ecological Research*, 2009, 24(2): 371-381.