

江苏泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区 后生浮游动物群落结构及影响因子

陈建琴¹, 孙婉², 钱薇雅², 邢雨辉³, 张振华¹,
张晨岭¹, 汪俊琦², 常青², 胡超超²

(1.江苏第二师范学院生命科学与化学化工学院,江苏 南京 211200)

(2.南京师范大学生命科学学院,江苏 南京 210023)

(3.南京师范大学中北学院,江苏 丹阳 212334)

[摘要] 浮游动物在水生态系统的物质循环、能量流动和信息传递过程中起着重要作用。为探究江苏泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区后生浮游动物现状,研究于 2020 年 8 月—2021 年 7 月对保护区水域的后生浮游动物进行了 4 次调查。研究发现后生浮游动物 62 属 112 种,其中轮虫 32 属 67 种,枝角类 17 属 31 种,桡足类 13 属 14 种。后生浮游动物平均密度为 1 636.31 ind./L,季节变化对密度有极显著的影响,空间变化对其有显著影响。研究发现,洪泽湖保护区共有 15 种优势种,优势种生态位宽度指数为 0.14~0.84,生态位重叠指数为 0.22~0.95,生态位重叠程度总体较高。Permanova 分析结果表明,pH、水温(WT)、总氮(TN)、透明度(SD)是影响保护区后生浮游动物群落结构的主要环境因子。使用物种多样性指数评价水质,结果显示保护区水体处于轻度-中度污染水平。本研究可为洪泽湖湿地国家级自然保护区生态环境监测、保护及管理提供基础资料和科学依据。

[关键词] 后生浮游动物,群落结构,环境因子,江苏泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区

[中图分类号]X176 **[文献标志码]**A **[文章编号]**1001-4616(2024)03-0072-09

Characteristics and Influencing Factors of Metazoan Zooplankton Community Structure in Jiangsu Sihong Hongze Lake Wetland National Nature Reserve

Chen Jianqin¹, Sun Wan², Qian Weiya², Xing Yuhui³, Zhang Zhenhua¹,
Zhang Chenling¹, Wang Junqi², Chang Qing², Hu Chaochao²

(1.College of Life Science and Chemical Engineering,Jiangsu Second Normal University,Nanjing 211200,China)

(2.School of Life Sciences,Nanjing Normal University,Nanjing 210023 China)

(3.Nanjing Normal University Zhongbei College,Danyang 212334,China)

Abstract: Zooplankton is the link between primary producers and other trophic levels. It plays an important role in material circulation, energy flow and information transmission of aquatic ecosystem. In order to explore the status and the dynamics of metazoan zooplankton community structure in Jiangsu Sihong Hongze Lake Wetland National Nature Reserve, 4 surveys were conducted in the reserve from August 2020 to July 2021. The study analyzed the metazoan zooplankton community structure, niche characteristics of dominant species and water quality in the reserve. A total of 112 species of metazoan zooplankton belonging to 62 genera were identified, including 67 species of Rotifera belonging to 32 genera, 31 species of Cladocera belonging to 17 genera, and 14 species of Copepoda belonging to 13 genera. The average density of metazoan zooplankton was 1636.31 ind./L, with significant seasonal and spatial differences. A total of 15 dominant species of metazoan zooplankton were identified in 4 seasons. The composition of dominant species showed seasonal replacement, in which the structure of dominant species in summer was complex and the structure of other seasons was simple. The niche breadth index of the dominant species ranged from 0.14 to 0.84. According to the niche width of each dominant species in different seasons, the dominant species of metazoan zooplankton in the reserve were divided into 3 groups, wide niche,

收稿日期:2023-07-10.

基金项目:国家自然科学基金项目(41271057).

通讯作者:陈建琴,硕士,教授,研究方向:动物地理学和水生生物学. E-mail:jqchen1102@126.com

middle niche and narrow niche, and most species are middle niche. The niche overlap index ranged from 0.22 to 0.95 and the niche overlap index of some species was more than 0.90. The niche overlap degree of dominant species in different seasons varied greatly, and the overall overlap degree was high. The changes of water environment played a leading role in the distribution of metazoan zooplankton community structure. Permanova analysis showed that pH, water temperature (WT), total nitrogen (TN) and secchi depth (SD) were the main environmental factors affecting the community structure of metazoan zooplankton in the reserve. In this study, the main factors affecting the community structure of metazoan zooplankton in the reserve were discussed from the perspective of water physical and chemical factors. All in all, this study showed that the community structure of metazoan zooplankton in the reserve was characterized by a higher proportion of small metazoan zooplankton (Rotifera) than large metazoan zooplankton (Cladocera and Copepoda). Shannon-wiener diversity index, Margalef richness index and Pielou evenness index were used to evaluate the water quality of the reserve, which indicated that the water quality of the Hongze Lake Reserve was at a light to moderate pollution level. The water quality of the reserve still needs to be paid attention to, and ecological management needs to be strengthened. This study can provide basic data and scientific basis for ecological environment monitoring, protection and management in Jiangsu Sihong Hongze Lake Wetland National Nature Reserve.

Key words: metazoan zooplankton, community structure, environmental factors, Hongze Lake Wetland National Nature Reserve

浮游动物是水生态系统食物链的消费者,以浮游植物、细菌等为食,又是滤食性鱼类的饵料生物^[1],在水生态系统中起着重要作用^[2].浮游动物个体微小、迁移能力弱且对环境改变能快速做出反应,是优秀的生态指示生物^[3-4].因此探究浮游动物群落结构及其影响因子,对生境监测及湿地生态系统保护等具有重要意义.

洪泽湖是南水北调东线工程的重要调蓄库,在防洪、灌溉、水产养殖、旅游休闲等方面起着极其重要的作用^[5-6].江苏泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区位于洪泽湖西北部,地处南暖温带与北亚热带的过渡地带,湿地类型主要有滨海湿地、浅滩沼泽湿地、河流湿地等,依据生态功能定位及保护目标划为核心区、缓冲区和实验区三类生态功能区.湖区四季分明,生物多样性丰富,地理位置特殊,是长江中下游地区具有代表性的湿地^[7].随着近年来退渔还湿、增殖放流、十年禁渔等生态保护措施的推行,洪泽湖湿地生态环境得到加强^[8],后生浮游动物可能发生较大变化.目前有关保护区的研究多集中于水鸟及水生植物的群落分布^[8-10],而针对保护区后生浮游动物群落的相关研究较少.

本研究在2020年8月—2021年7月对保护区后生浮游动物物种组成、密度、物种多样性及生态位变化等开展调查,旨在:(1)分析保护区后生浮游动物群落结构在不同季节、不同生态功能区下的动态变化,并探究影响群落结构的主要环境因子;(2)评估近年来生态保护措施推行后,保护区水质情况,以期保护区生态环境监测、保护及管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样时间与采样点位

本研究从2020年8月—2021年7月,按季度共分4次进行采样:2020年8月(夏季)、2020年10月(秋季)、2021年1月(冬季)以及2021年4月(春季).依据洪泽湖水文特性并结合地形地貌,在保护区范围内共设置8个断面(S0-S7)和1个单独样点(P1),共计25个样点(图1).

1.2 样品采集与处理

水体理化因子采用SD-20赛氏盘测定透明度(secchi depth, SD),SD 5000便携数字水深计测定水深(water depth, WD),ST-723便携式水质测定仪测定水温(water temperature, WT)、总溶解固体量(total dissolved solid, TDS)、盐度(salinity, SAL)、电导率(conductivity, Cond)及pH值等.在各采样点水面下约0.5 m处采集水样1 L,低温保存48 h内带回实验室,测定总氮(total nitrogen, TN)、硝氮(nitrate nitrogen, NO₃-N)及叶绿素a(chlorophyll a, Chl a)等.

浮游动物定性、定量样品的采集、固定与浓缩方法参照《淡水浮游生物研究方法》^[11],样品浓缩后带回实验室进行种类鉴定和计数.

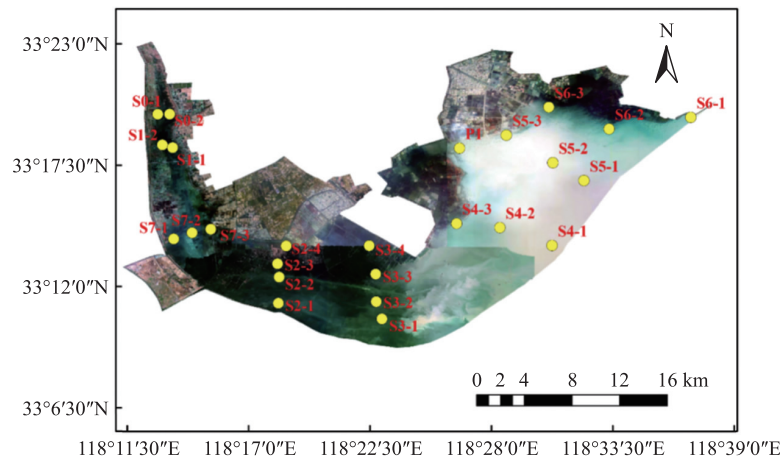


图 1 洪泽湖保护区采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Hongze Lake Nature Reserve

1.3 数据处理与分析

(1) 优势度(Y)计算公式^[12]:

$$Y = (n_i / N) \times f_i,$$

式中, n_i 为第 i 种的个体数, N 为所有种类的总个体数, f_i 为第 i 种出现的频率, $Y > 0.02$ 为优势种, $Y > 0.1$ 为主要优势种.

(2) Shannon-Wiener 多样性指数(H')计算公式^[13]:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i,$$

Pielou 均匀度指数(J)计算公式^[14]:

$$J = H' / \ln S,$$

Margalef 丰富度指数(d)公式为^[15]:

$$D = (S - 1) / \ln N,$$

式中, H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数, J 为 Pielou 均匀度指数, d 为 Margalef 丰富度指数, P_i 代表第 i 种密度占总密度的比例, S 为浮游动物种类数, N 为浮游动物个体总数.

采用后生浮游动物物种多样性指数评价保护区水质的标准^[16]:

① H' 值在 0~1 为重污染,1~2 为 α -中污染,2~3 为 β -中污染,3~4.5 为轻污染,>4.5 为清洁水体;

② J 值 0~0.1 为重污染,0.1~0.3 为 α -中污染,0.3~0.5 为 β -中污染,0.5~0.8 为轻污染,>0.8 为清洁水体;

③ d 值 0~1 为重污染,1~2 为 α -中污染,2~4 为 β -中污染,4~6 为轻污染,>6 为清洁水体.

(3) 生态位宽度(B_i)计算公式^[17]:

$$B_i = 1 / r \sum_{j=1}^r P_{ij}^2,$$

生态位重叠指数(O_{ik})计算公式^[18]:

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^r (P_{ij} P_{kj}) / \sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{kj}^2},$$

式中, B_i 为种的生态位宽度, O_{ik} 为生态位重叠指数, P_{ij} 为种 i 在第 j 个样点的个体数占该种所有个体数的比例, P_{kj} 为种 k 在第 j 个样点的个体数占该种所有个体数的比值, r 为采样点数.

使用 SPSS 26.0 软件对后生浮游动物密度、物种多样性指数进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA),若数据不服从正态分布或方差不齐,则采用多个独立样本比较的 Kruskal-Wallis H 检验. 若 $P < 0.05$,认为差异显著; $P < 0.01$,认为差异极显著.使用 R 软件中 vegan 包的 adonis2 函数进行 Permanova 分析,检验群落与环境之间的关系. 优势度、物种多样性指数、生态位宽度、生态位重叠指数使用 Excel 2019 和 R 4.0.3 计算;样点图使用 ArcGIS 10.0 制作.

2 结果与分析

2.1 后生浮游动物物种组成及优势种

本研究共鉴定后生浮游动物 3 类 62 属 112 种(不包括桡足幼体和无节幼体)。其中,轮虫 67 种,隶属于 10 科 32 属,占后生浮游动物总物种数的 59.82%,以臂尾轮科(Barchionidae)和鼠轮科(Trichocercidae)为主;枝角类 31 种,隶属于 6 科 17 属,桡足类 14 种,隶属于 6 科 13 属,分别占总物种数的 27.68%和 12.50%。

共确定优势种 15 种,其中轮虫 13 种,枝角类 1 种,桡足类 1 种.优势种组成出现季节更替现象,夏季优势种结构复杂,其他季节结构较简单(表 1)。前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonala*)、简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)为春季特有优势种;卵形彩胃轮虫(*Chromogaster ovalis*)、暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*)、罗氏异尾轮虫(*Trichocerca rousseleti*)为夏季特有优势种;巨头轮虫属一种(*Cephalodella* sp.)、长圆疣毛轮虫(*Synchacta oblonga*)、长三肢轮虫(*Filinia longisela*)为冬季特有优势种.针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)为夏、秋、冬季共有优势种,螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)为春、秋、冬季共有优势种。

表 1 后生浮游动物优势种及优势度

Table 1 Dominant species and dominance of metazoan zooplankton

编码	优势种	春季	夏季	秋季	冬季
SP1	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	—	0.03	—	0.03
SP2	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	—	0.03	—	0.05
SP3	裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	—	0.13	0.03	—
SP4	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	—	0.02	0.03	—
SP5	卵形彩胃轮虫 <i>Chromogaster ovalis</i>	—	0.03	—	—
SP6	暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	—	0.12	—	—
SP7	罗氏异尾轮虫 <i>Trichocerca rousseleti</i>	—	0.03	—	—
SP8	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	—	0.30	0.21	0.32
SP9	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.17	—	0.37	0.12
SP10	巨头轮虫属一种 <i>Cephalodella</i> sp.	—	—	—	0.02
SP11	长圆疣毛轮虫 <i>Synchacta oblonga</i>	—	—	—	0.07
SP12	长三肢轮虫 <i>Filinia longisela</i>	—	—	—	0.05
SP13	前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonala</i>	0.04	—	—	—
SP14	简弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>	0.02	—	—	—
SP15	无节幼体 <i>Nauplii</i>	0.04	—	0.03	—

注:“—”表示该物种在该季节不是优势种。

2.2 后生浮游动物密度的时空变化

保护区后生浮游动物平均密度为 1636.31 ind./L,不同类群分布密度依次为:轮虫>桡足类>枝角类.后生浮游动物密度变化如图 2 所示,季节变化差异极显著($P<0.01$),空间变化差异显著($P<0.05$)。平均密度季节变化为:夏季(2787.63 ind./L)>秋季(1870.21 ind./L)>冬季(1147.80 ind./L)>春季(729.40 ind./L);空间变化为:核心区(1731.15 ind./L)>缓冲区(1623.42 ind./L)>实验区(1428.01 ind./L)。

2.3 后生浮游动物优势种生态位宽度及重叠指数

后生浮游动物优势种生态位宽度值(B_i)变化范围为 0.14~0.84(图 3)。其中,夏季的暗小异尾轮虫生态位宽度值最高,冬季的长三肢轮虫生态位宽度值最低.根据各优势种在不同季节的生态位宽度,可将保护区后生浮游动物优势种分为广生态位($B_i>0.60$)、中生态位($0.3\leq B_i\leq 0.6$)和窄生态位($B_i<0.30$)三大类群^[19]。其中夏季的暗小异尾轮虫和秋季的无节幼体为广生态位,春季的螺形龟甲轮虫和前节晶囊轮虫、夏季的卵形彩胃轮虫、秋季的裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*)和冬季的角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)、螺形龟甲轮虫和长三肢轮虫为窄生态位,其余均为中生态位。

优势种生态位重叠指数(O_{ik})变化范围为 0.22~0.95(图 4),不同季节优势种生态位之间的重叠程度差异较大.其中,冬季的螺形龟甲轮虫和角突臂尾轮虫生态位重叠指数最大,秋季的无节幼体与裂痕龟纹轮虫、冬季的长三肢轮虫和长圆疣毛轮虫生态位重叠指数最小.根据 Wathne 等^[20]的划分标准:当 $O_{ik}>0.6$ 时,种对间为高度重叠;当 $0.3\leq O_{ik}\leq 0.6$ 时,为中度重叠;当 $O_{ik}<0.3$ 时,为低度重叠.保护区优势种属于低度、中度、高度重叠的种对分别占总种对数的 6.15%、35.38%和 58.46%。

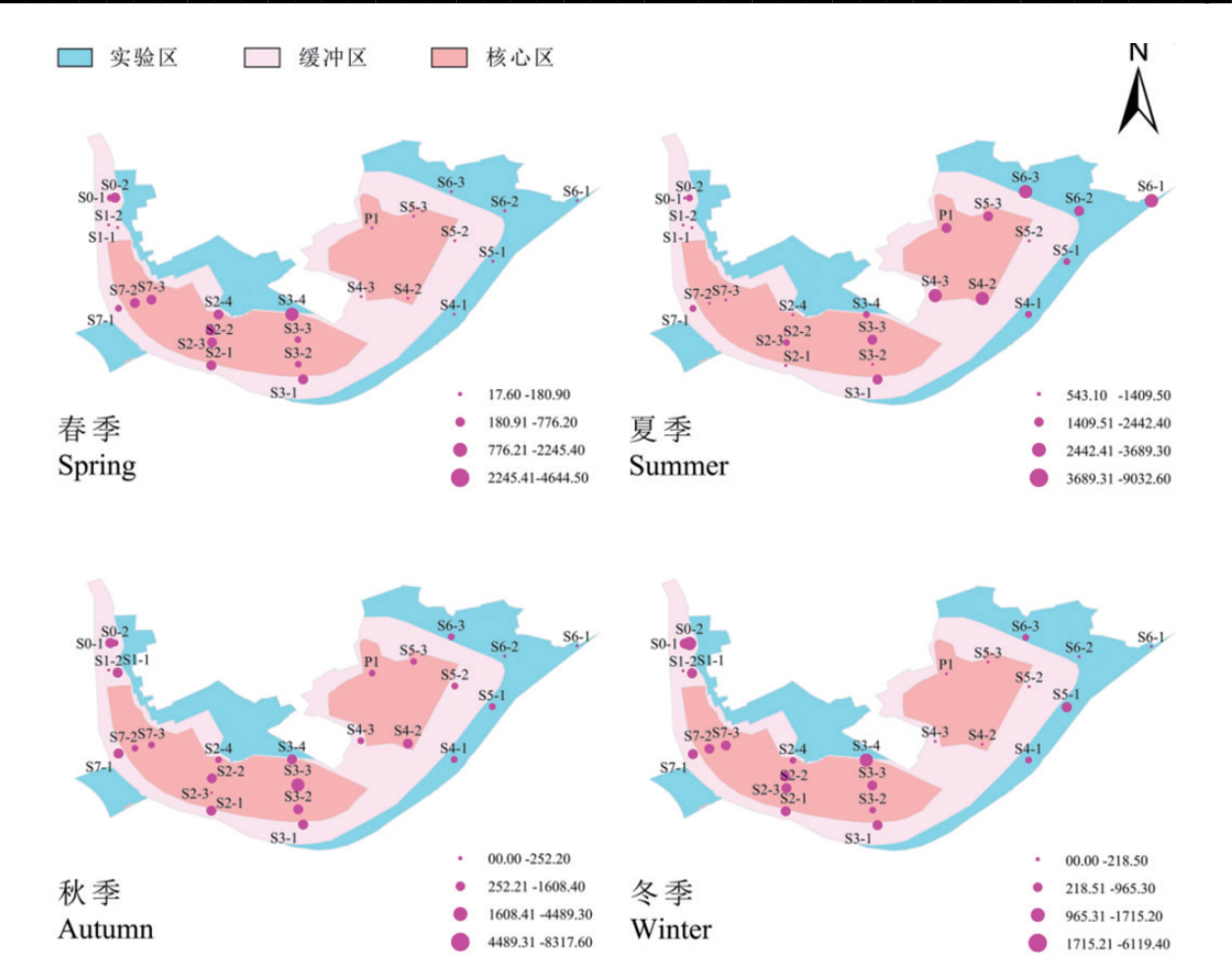


图 2 后生浮游动物密度的时空变化

Fig. 2 Seasonal and spatial variation of metazoan zooplankton community structure

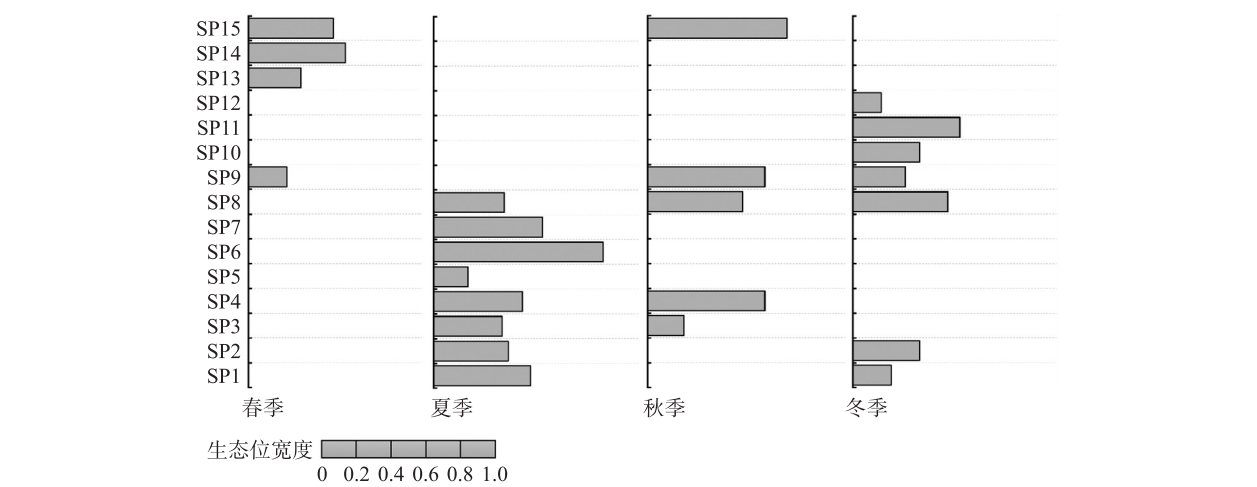


图 3 优势种生态位宽度

Fig. 3 Niche breadth of dominant species

2.4 后生浮游动物多样性指数

后生浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 为 0.55~2.75; Pielou 均匀度指数 (J) 为 0.32~0.81; Margalef 丰富度指数 (d) 为 0.82~5.56. Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数变化季节差异极显著 ($P<0.01$), Pielou 均匀度指数变化季节差异显著 ($P<0.05$); Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数及 Pielou 均匀度指数变化空间差异不显著 ($P>0.05$) (图 5).

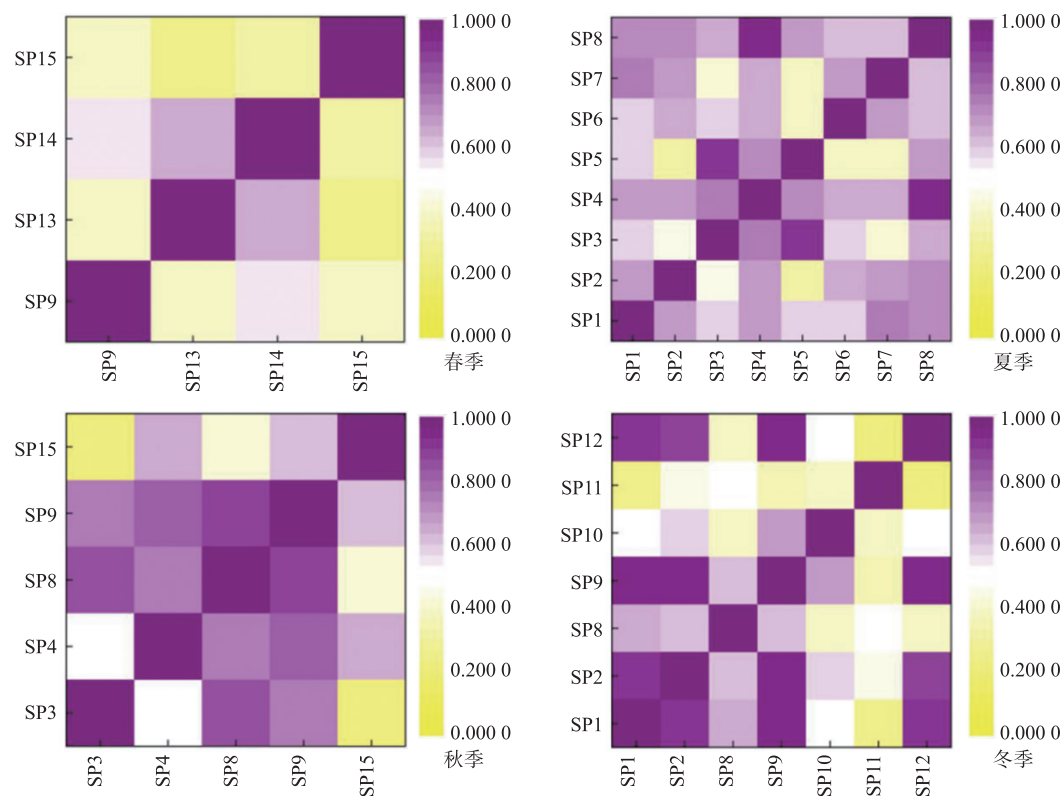


图 4 优势种生态位重叠指数
Fig. 4 Niche overlap of dominant species

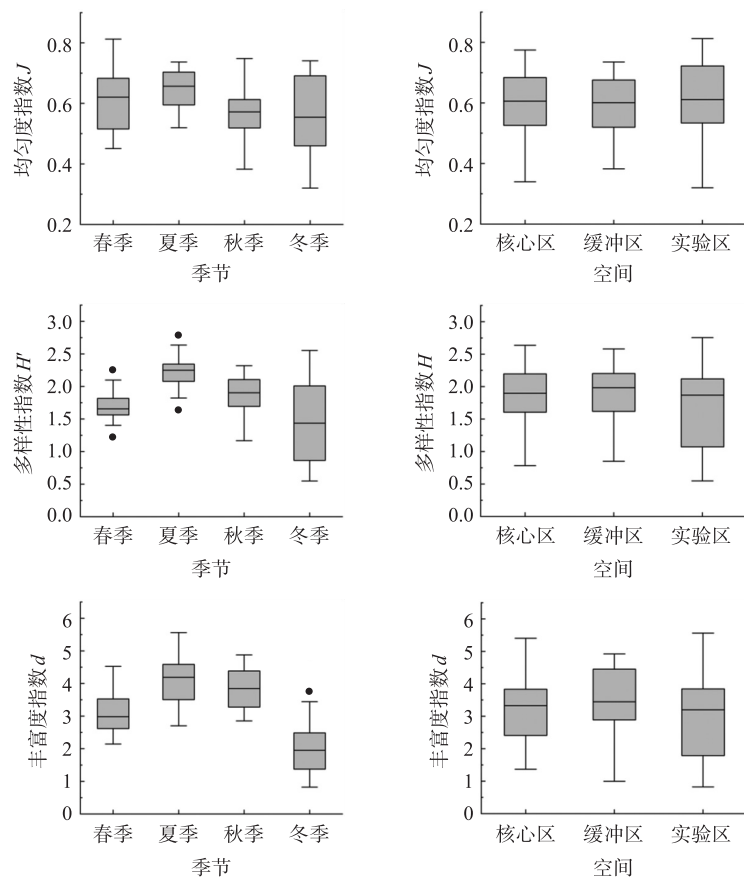


图 5 后生浮游动物多样性指数
Fig. 5 Diversity index of metazoan zooplankton

2.5 后生浮游动物群落与环境因子的关系

为了探究保护区后生浮游动物与环境因子的关系,基于 R 软件对 15 种优势种与 10 个环境因子进行 Permanova 分析,结果发现,pH($R^2=0.023, P<0.01$)、水温(WT)($R^2=0.125, P<0.01$)、透明度(SD)($R^2=0.040, P<0.01$)和总氮(TN)($R^2=0.085, P<0.01$)与后生浮游动物优势种显著相关,因此 pH、水温、透明度和总氮对群落结构的影响最大。

3 讨论

3.1 后生浮游动物群落结构特征

保护区后生浮游动物种类组成表现为小型浮游动物轮虫种类数较多,大型的枝角类和桡足类种类数较少的特点,与国内鄱阳湖^[21]、高邮湖^[22]等研究中浮游动物的种类特征相似。本次调查结果较保护区历史数据^[7],后生浮游动物的密度有所升高;全年变化中,轮虫密度四季占比均为物种密度的 90% 以上,对总密度影响最大。枝角类和桡足类个体较大,易受到滤食性鲢、鳙鱼类和杂食性鱼类的摄食,而轮虫个体小、发育快、生命周期短,能以较快速度抢占生态系统中空的生态位,因而处于优势地位^[23-24]。密度的季节变化差异显著,表现为夏秋高、冬春低,可能与温度有关:夏季水温越高,提供的食物和环境越有利于后生浮游动物的繁殖,因而密度最大。从空间上看,核心区后生浮游动物密度远高于缓冲区和实验区,分析原因主要是核心区内湿地生态系统保存良好,营养物质丰富,有利于水生植物和微生物的繁殖,为浮游动物的生存创造了有利的环境。

后生浮游动物优势种变化影响其群落结构,优势种数量越多、优势度越小,群落结构越复杂、稳定^[25]。从全年水平来看,保护区优势种出现季节更替现象,夏季群落结构最复杂、最稳定。本研究发现后生浮游动物优势种生态位与季节变化有关,保护区优势种由广、中、窄生态位种组成,广生态位种暗小异尾轮虫在夏季所有采样点均有分布且数量较多,生态位宽度值最大,表明其利用环境资源较多,对生境的适应性强^[26]。冬季螺形龟甲轮虫、长三肢轮虫和突臂尾轮虫物种间生态位重叠程度极高,可能是由于这些物种均喜富营养水体^[27],资源需求相似性高。此外,相关研究表明重叠指数较大的种对可以通过生态位分化降低物种间的竞争,维持生态系统的多样性^[28-29]。

3.2 水体环境因子对群落结构的影响

浮游动物的移动能力较弱,会随着洋流漂流,因此浮游动物群落结构变化与水体环境有关^[30],但不同地区浮游动物群落结构的影响因子存在异同。影响鄱阳湖浮游动物群落结构的关键因子是温度、叶绿素 a、电导率、总氮、总固体悬浮物和 pH^[21];透明度、水温和溶解氧为太平湖浮游动物群落结构的主要环境影响因子^[24];太湖流域浮游动物优势种群落结构与总磷、总氮显著正相关^[31]。本研究中,洪泽湖保护区影响后生浮游动物群落的主要环境因子是 pH、水温、总氮与透明度。

本研究中 Permanova 结果表明,水温对后生浮游动物群落结构变化的解释度最高,表明温度对保护区后生浮游动物群落结构具有重要影响。大量研究证明,温度是影响后生浮游动物群落结构的重要因子,Sopanen^[32]认为枝角类卵的发育时间取决于温度:温度的升高减小了卵孵化所需的时间。Ekvall 等^[33]认为繁殖率与水温有关,在较高的温度下,生长发育速度较快。本研究中,后生浮游动物密度与水温变化基本一致,受季风环流影响,保护区湖区四季分明,夏季水温显著高于其他季节,后生浮游动物大量繁殖,物种密度达到峰值。透明度及与水体富营养化有关的 TN、NO₃-N 等化学元素也会影响群落结构,透明度变化会对后生浮游动物被捕食的风险产生影响^[34];而 TN、NO₃-N 等化学元素则是通过影响固氮类浮游植物,从而间接影响浮游动物丰度^[35]。另外,pH 的变化可以间接改变物种的相互作用,导致物种分布和密度的变化,从而影响群落结构^[36]。轮虫可以耐受广泛的 pH 值,其峰值出现在 pH4.5~pH8.5^[37],大多桡足类生活在偏碱性的环境中,枝角类在酸性、中性及微碱性的环境中生存^[38]。保护区水体属于偏碱性水体,pH 在 6.76~8.84,为浮游动物提供了合适的生活环境。

3.3 保护区水质评价及生态治理建议

浮游动物对水体变化反应灵敏,其群落结构能在一定程度上反映出水体水质情况。本研究中后生浮游动物主要优势种为:寡污指示种裂痕龟纹轮虫、寡污至 β -中污型指示种螺形龟甲轮虫、 β -中污型指示种暗小异尾轮虫、 β -中污至 α -中污型指示种针簇多肢轮虫^[39],指示保护区水体受到一定程度的污染。采

用物种多样性指数对水质进行评价,Shannon-Wiener 多样性指数指示水质处于 β -中污染至重污染水平, Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数指示水质处于轻污染至 α -中污染水平. 空间变化上来看,不同生态功能区水质情况差异不大,但实验区除均匀度指数外均值最低,该区域为保护区外围,水体环境受人类干扰多且部分区域靠近西部的淮河入湖口,淮河作为洪泽湖最重要的入湖河流,其较差的水质对实验区水体产生影响.综合来看,保护区水体处于轻-中度污染水平,仍需重点关注水质情况,加强生态治理工作.

江苏泗洪洪泽湖保护区是洪泽湖湿地生态系统中保存最完整的一个区域,其功能区根据生态功能定位及保护目标,兼顾分布特点、地理位置、社区环境等因素进行划分^[40].核心区在维持湿地生物多样性方面具有重要作用,缓冲区对于恢复湿地生态系统、改善湿地良好环境具有重要意义^[22].通过对保护区不同生态功能区后生浮游动物调查,结果表明保护区目前生态治理及保护工作实施与其生态功能区划相符:实验区受干扰强度最大,后生浮游动物密度及多样性指数相对较低,而核心区和缓冲区后生浮游动物群落结构稳定,生态情况较好.此外,核心区作为保护区湿地生态系统中最重要保护区域,需加强管理力度,调查显示核心区后生浮游动物平均密度或多样性指数较低的 S2-4、S3-2、S5-3 样点均位于核心区边缘,因此后续生态治理应提高对核心区与缓冲区交界区域水体情况的关注.同时对各功能区合理采取不同生态措施,按照“分区管理,突出重点”的原则,严格控制核心区人为活动,降低缓冲区人为干扰强度,减少实验区人为破坏影响,提升保护区生态系统的完整性和物种多样性,促进保护区的可持续发展.

4 结论

本研究通过对江苏泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区后生浮游动物群落结构时空变化及影响因子的分析,发现保护区后生浮游动物种类组成表现为小型浮游动物轮虫(67种)种类数较多,大型的枝角类(31种)和桡足类(14种)种类数较少的特点.密度在不同季节差异极显著,不同功能区差异显著,且平均物种密度较历史数据有所增加.后生浮游动物优势种由广、中、窄生态位种组成,生态位重叠程度总体较高. pH、水温(WT)、总氮(TN)、透明度(SD)是影响其群落结构的主要环境因子.采用物种多样性指数评价水质,显示保护区水体处于轻-中度污染水平.综合分析保护区后生浮游动物现状,建议加强核心区管理力度,同时对各功能区合理采取不同生态措施,促进保护区的可持续发展.

[参考文献]

- [1] JEPPESEN E, NGES P, DAVIDSON T A, et al. Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive(WFD)[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 676(1): 279-297.
- [2] BRAGHIN L D S M, ALMEIDA B D A, AMARAL D C, et al. Effects of dams decrease zooplankton functional β -diversity in river-associated lakes[J]. *Freshwater biology*, 2018, 63(7): 721-730.
- [3] FRANCIS O A, HENRY E O, UNIQUE N K, et al. Exploring spatio-temporal patterns of plankton diversity and community structure as correlates of water quality in a tropical stream[J]. *Acta ecologica sinica*, 2018, 38(3): 216-223.
- [4] 鞠永富,于洪贤,于婷,等.小兴凯湖浮游动物丰度和水质评价[J].*湿地科学*, 2015, 13(5): 649-652.
- [5] 都雪,王齐东,张超文,等.洪泽湖轮虫群落结构及其与环境因子的关系[J].*湖泊科学*, 2014, 26(2): 269-276.
- [6] WU Y, DAI R, XU Y F, et al. Statistical assessment of water quality issues in Hongze lake, China, related to the operation of a water diversion project[J]. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1885-1897.
- [7] 王国祥,马向东,常青,等.洪泽湖湿地:江苏泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区科学考察报告[M].北京:科学出版社, 2014.
- [8] 李成之,陆上岭,黄元国,等.洪泽湖湿地保护区冬季雁鸭类群落分布及年际变化[J].*江苏林业科技*, 2020, 47(6): 14-18.
- [9] 王思路,张曼玉,陈泰宇,等.泗洪洪泽湖湿地国家级自然保护区雁鸭类群落组成及其季节动态[J].*湿地科学*, 2022, 20(6): 801-809.
- [10] 南楠.江苏泗洪洪泽湖湿地保护区植被多样性及其对水质的净化效应研究[D].南京:南京林业大学, 2008.
- [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] 钱迎倩.生物多样性研究的原理与方法[M].北京:中国科学技术出版社, 1994.

- [13] SHANNON C E. A mathematical theory of communications[J]. The bell system technical journal, 1948(27):379-423.
- [14] PIELOU E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of theoretical biology, 1966, 10(2):370-383.
- [15] MARGALEF R. Pathfinding in ecology. (Book reviews: perspectives in ecological theory) [J]. Science, 1969, 164(3881):817.
- [16] 王璐璐, 董芳, 李芳芳, 等. 大辽河水系夏季后生浮游动物群落结构及水生态评价[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2):389-395.
- [17] COLWELL R K, FUTUYMA D J. On the measurement of niche breadth and overlap[J]. Ecology, 1971, 52(4):567-576.
- [18] PIANKA E R. The structure of lizard communities[J]. Annual review of ecology and systematics, 1973, 4:53-74.
- [19] 张皓, 宋昌民, 闫启仑, 等. 辽河口春、夏季浮游动物空间生态位的比较[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6):920-925.
- [20] WATHNE J A, HAUG T, LYDERSEN C. Prey preference and niche overlap of ringed seals *Phoca hispida* and harp seals *P. groenlandica* in the Barents Sea[J]. Marine ecology progress series, 2000, 194(1):233-239.
- [21] 陈佳琪, 赵坤, 曹玥, 等. 鄱阳湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2020, 40(18):6644-6658.
- [22] 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.
- [23] YANG Y F, HUANG X F, LIU J K, et al. Effects of fish stocking on the zooplankton community structure in a shallow lake in China[J]. Fisheries management and ecology, 2005, 12(2):81-89.
- [24] 冯世敏, 吴明妹, 熊莲, 等. 太平湖浮游动物动态演替与环境因子的相关性研究[J]. 水生生物学报, 2017, 41(3):700-711.
- [25] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5):932-940.
- [26] 高原, 王超, 刘乾甫, 等. 珠三角河网不同水文期浮游动物优势种及生态位[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(6):37-44.
- [27] 王站付, 吴波, 罗永婷, 等. 西太湖流域浮游动物群落结构及分布调查研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(6):150-156.
- [28] CHALONER T M, GURR S J, BEBBER D P. Geometry and evolution of the ecological niche in plant-associated microbes[J]. Nature communications, 2020, 11(1):1-9.
- [29] 侯朝伟, 孙西艳, 刘永亮, 等. 烟台近海浮游动物优势种空间生态位研究[J]. 生态学报, 2020, 40(16):5822-5833.
- [30] 付显婷, 杨薇, 赵彦伟, 等. 白洋淀浮游动物群落结构与水环境因子的关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1271-1282.
- [31] 严航, 夏霆, 陈宇飞, 等. 太湖流域平水期水生态功能区浮游动物群落结构特征[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11):2641-2650.
- [32] SOPANEN S. The effect of temperature on the development and hatching of resting eggs of non-indigenous predatory cladoceran *Cercopagis pengoi* in the Gulf of Finland, Baltic Sea[J]. Marine biology, 2008, 154(1):99-108.
- [33] EKVALL M K, HANSSON L A. Differences in recruitment and life-history strategy alter zooplankton spring dynamics under climate-change conditions[J]. PLoS ONE, 2012, 7(9):e44614.
- [34] JONES S, PERISSINOTTO R, CARRASCO N K, et al. Impact of a flood event on the zooplankton of an estuarine lake[J]. Marine biology research, 2016, 12(2):158-167.
- [35] HAI X, PAERL H W, QIN B, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in Eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnology and oceanography, 2010, 55(1):420-432.
- [36] LOCKE A, SPRULES W G. Effects of acidic pH and phytoplankton on survival and condition of *Bosmina longirostris* and *Daphnia pulex*[J]. Hydrobiologia, 2000, 437:187-196.
- [37] BĒRZINŠ B, PEJLER B. Rotifer occurrence in relation to pH[J]. Hydrobiologia, 1987, 147(1):107-116.
- [38] 高原, 赖子尼, 李捷, 等. 连江浮游动物多样性的空间分布[J]. 生物多样性, 2013, 21(6):699-708.
- [39] 徐雪, 姚文佳, 邢雨辉, 等. 苏州工业园区湖泊后生浮游动物群落结构及影响因子[J]. 生态学报, 2021, 41(10):4023-4035.
- [40] 翟水晶, 钱谊, 侯建兵. 洪泽湖湿地生态服务功能分区及其效益分析[J]. 农村生态环境, 2005, 21(3):71-73.

[责任编辑:黄敏]