

DOI: 10.5846/stxb202004190939

徐雪,姚文佳,邢雨辉,张振华,时应征,胡超超,常青,陈建琴.苏州工业园区湖泊后生浮游动物群落结构及影响因子.生态学报,2021,41(10):4023-4035.

Xu X, Yao W J, Xing Y H, Zhang Z H, Shi Y Z, Hu C C, Chang Q, Chen J Q. Characteristics and influencing factors of metazoan zooplankton community structure in lakes of Suzhou Industrial Park. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10):4023-4035.

苏州工业园区湖泊后生浮游动物群落结构及影响因子

徐 雪¹,姚文佳¹,邢雨辉²,张振华³,时应征⁴,胡超超⁵,常 青¹,陈建琴^{3,*}

1 南京师范大学生命科学学院,南京 210023

2 南京师范大学中北学院,丹阳 212334

3 江苏第二师范学院生命科学与化学化工学院,南京 211200

4 苏州工业园区国土环保局,苏州 215028

5 南京师范大学分析测试中心,南京 210023

摘要:苏州工业园区地处长江流域下游,随着城市化进程的不断推进,园区水生态系统结构与功能的稳定面临严峻考验。浮游动物作为水生态系统的重要组成部分,探究其群落结构的形成机制对生物多样性保护及生态系统健康发展具有重要意义。为深入了解苏州工业园区五个主要湖泊后生浮游动物群落结构的动态变化及影响因子,于2018年7月至2019年6月进行4次调查。研究共检出后生浮游动物112种(轮虫65种、枝角类29种、桡足类18种),其中优势种12种(轮虫10种、枝角类和桡足类各1种)。Jaccard相似性分析表明,湖泊间后生浮游动物物种组成整体处于中等相似水平。后生浮游动物密度呈现出显著的季节和湖泊差异,而生物量、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数以及Margalef丰富度指数仅存在显著的季节差异。聚类分析结果表明,夏季和秋季后生浮游动物群落结构最为相似。RDA分析表明,水温、溶解氧和pH是影响园区湖泊后生浮游动物群落结构的主要环境因子。Pearson相关性分析表明,湖泊面积与后生浮游动物群落结构无显著相关关系,样点近岸距离与生物量具有显著的正相关关系。基于水质评价标准和物种多样性指数可知,园区湖泊水质整体处于轻-中度污染水平。研究表明苏州工业园区五大湖泊后生浮游动物群落结构表现出同质化趋势;季节变化、环境因子以及样点近岸距离是调控群落结构形成的主要因素。

关键词:苏州工业园区;后生浮游动物;群落结构;影响因子;水质评价

Characteristics and influencing factors of metazoan zooplankton community structure in lakes of Suzhou Industrial Park

XU Xue¹, YAO Wenjia¹, XING Yuhui², ZHANG Zhenhua³, SHI Yingzheng⁴, HU Chaochao⁵, CHANG Qing¹, CHEN Jianqin^{3,*}

1 School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Zhongbei College, Nanjing Normal University, Danyang 212334, China

3 School of Life Science and Chemical Engineering, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 211200, China

4 Land and Environmental Protection Agency, Suzhou Industrial Park, Suzhou 215028, China

5 Analysis and Testing Center, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: Suzhou Industrial Park is located in the lower reaches of the Yangtze River Basin. With the continuous progress of urbanization, the stability of structure and function of the aquatic ecosystem in the Park is facing severe challenges. Zooplankton, as an important part of the aquatic ecosystem, is of great significance for the biodiversity protection and

基金项目:国家自然科学基金项目(41271057)

收稿日期:2020-04-19; 网络出版日期:2021-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jqchen1102@126.com

healthy development of the ecosystem by researching the formation mechanism of its community structure. Moreover, zooplankton is very sensitive to environmental changes, and the water pollution status can be evaluated based on its community structure characteristics. To better understand the community structure and influencing factors of metazoan zooplankton in five lakes of Suzhou Industrial Park, four surveys were conducted from July 2018 to June 2019. At the same time, five physical and chemical factors of water body, lake area, and the closest distance from samples to the shore were measured. A total of 112 metazoan zooplankton species (including 65 species of Rotifera, 29 species of Cladocera, and 18 species of Copepoda) were detected in this study, in which 12 species were dominant species (including 10 species of Rotifera, 1 species of Cladocera, and 1 species of Copepoda). Jaccard similarity analysis indicated that the species compositions of metazoan zooplankton among lakes were moderately similar. The density of metazoan zooplankton showed the significant differences in different seasons and locations, while biomass, Shannon-Wiener diversity, Pielou evenness, and Margalef richness indexes only had significant differences in seasonal aspect. The results of cluster analysis suggested that the metazoan zooplankton community structure was the most similar in summer and autumn. It was revealed that temperature, dissolved oxygen, and pH were the main environmental factors affecting the community structure of metazoan zooplankton by redundancy analysis. Pearson correlation analysis indicated that there was no significant correlation between lake area and metazoan zooplankton community structure, while a significantly positive correlation between the distance from samples to the shore and metazoan zooplankton biomass was detected. Based on the water quality evaluation standard and species diversity indexes, the water quality of the lakes in the Park was at a light to moderate pollution level. Overall, the metazoan zooplankton community structure in the five lakes of Suzhou Industrial Park showed a trend of homogeneity, and the seasonal variation, environmental factors and the distance from samples to the shore were main factors regulating the formation of community structure. The results of metazoan zooplankton community structure could provide an effective reference for the restoration and development of lake water in the Park.

Key Words: Suzhou Industrial Park; metazoan zooplankton; community structure; influencing factors; water quality evaluation

浮游动物是水生食物网的关键枢纽,将能量从初级生产者传递给高级消费者,对维持水生态系统的物质循环和能量流动等生态过程的稳定具有重要作用^[1-2]。浮游动物对水环境变化十分敏感且迁移能力较弱,故可依据其群落结构特征有效反映水质的长期状态^[3-4],弥补水质理化监测的片面性和瞬时性^[5]。

已有研究表明,浮游动物群落结构的组成受气候条件、环境因子和人类活动等因素影响。Beaver 等^[6]通过研究北极地区气候变化对水生态系统的影响,提出冰期和水文连通性是导致浮游动物群落结构变化的重要因素;Van Egeren 等^[7]研究表明,美国威斯康星州(Wisconsin)东南部湖泊水体浮游动物群落结构的形成是初级生产力、湖泊形态和城市土地利用相互作用的结果。国内对浮游动物的相关研究日益增多,通过对水体浮游动物群落结构及多样性水平的分析,探讨了其与环境因子的关系^[8-9],并开展了水生态评价^[10]。研究也揭示随着水域周边人为干扰活动的增强,由污水排放、围网养殖等引起的水体富营养化对浮游动物的物种组成、数量变化和分布特征等产生了较大影响^[11-14]。

苏州工业园区地处长江下游,园区内有阳澄湖、金鸡湖、独墅湖、沙湖和白塘湖等主要湖泊。近年来,随着城市化进程的快速推进,园区水生态系统结构与功能的稳定面临严峻考验。例如,景观建设降低了园区生境的异质性;水调工程增强了分散水体的连通性;水体清淤和水产养殖等人类活动打破了湖泊原有的生态平衡。浮游动物作为水生态系统的重要组成部分,探究城市化背景下群落结构的动态变化及影响因子对生物多样性保护和生态系统健康发展具有重要意义。

本研究通过对园区 5 个主要湖泊后生浮游动物群落结构的调查,旨在探究群落结构的形成机制及湖泊水质的年际变化。现提出假设如下:(1)园区生境异质性降低以及水文连通性增强会导致各湖泊水体后生浮游

动物群落结构同质化;(2)后生浮游动物群落结构形成受季节变化、环境因子、湖泊面积和样点近岸距离等因子的综合影响;(3)随着园区建设和经济发展,湖泊水质受到较大干扰。

1 材料与方

1.1 样点设置

本研究选取阳澄湖、金鸡湖、独墅湖、沙湖和白塘湖作为研究区域对后生浮游动物群落结构进行调查。依据湖泊面积大小进行样点布设,共计设置 21 个样点,其中阳澄湖(YCH)8 个、金鸡湖(JJH)7 个、独墅湖(DSH)4 个、沙湖(SH)和白塘湖(BTH)各 1 个(图 1)。手持式 GPS(Garmin,MAP60CSX,中国)用于记录采样点位置。

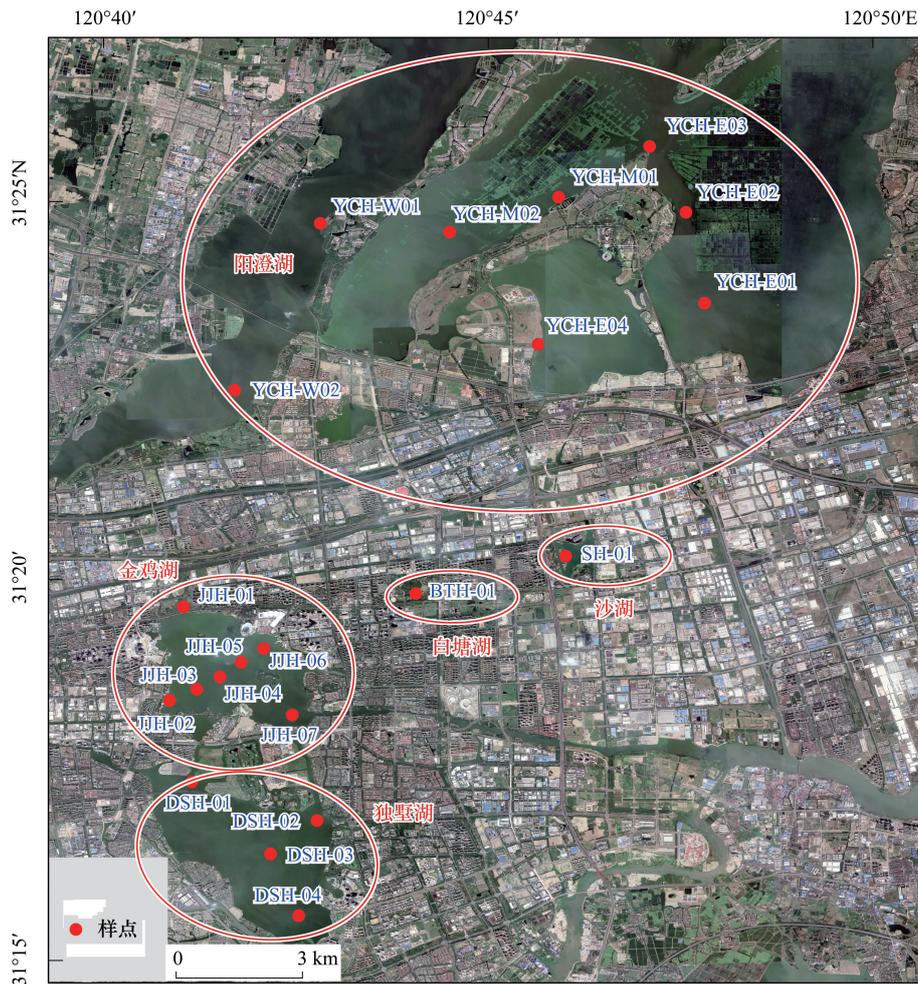


图 1 苏州工业园区湖泊水体样点分布图

Fig.1 Sampling sites in the lakes of Suzhou Industrial Park

YCH-E: 阳澄东湖; YCH-M: 阳澄中湖; YCH-W: 阳澄西湖; JJH: 金鸡湖; DSH: 独墅湖; SH: 沙湖; BTH: 白塘湖

1.2 样品采集与处理

本研究分别于 2018 年 7 月(夏)、2018 年 10 月(秋)、2019 年 1 月(冬)和 2019 年 4 月(春)各调查采样一次。后生浮游动物定性和定量样品的采集、固定和浓缩参考《淡水浮游生物研究方法》^[15]进行。样品浓缩后使用计数框在显微镜下进行物种鉴定与计数,物种鉴定参考相关书目^[16-21]。生物量按照相关书目^[22-23]提供的物种平均湿重数据进行计算。

1.3 环境因子测定

采用便携式溶解氧测定仪 (YSI, 550A, 美国) 测定溶解氧 (dissolved oxygen, DO); 便携式水质测定仪 (SINTEK, ST-723, 中国) 测定水温 (water temperature, WT)、总溶解固体量 (total dissolved solid, TDS) 和 pH; 萨氏盘 (SD-20, 中国) 测定透明度 (secchi depth, SD)。

1.4 数据处理与分析

(1) Shannon-Wiener 多样性指数 H' 、Pielou 均匀度指数 J 、Margalef 丰富度指数 d 使用 R 3.6.1 软件的 Vegan 包计算; 优势度 Y 使用自编函数计算, 优势度 $Y \geq 0.02$ 视为优势种^[24]。

(2) 运用 Jaccard 相似性系数 $K=c/(a+b-c)$ 比较各湖泊物种组成相似性, 式中: a 为样点 A 的物种数; b 为样点 B 的物种数; c 为样点 A、B 的共有物种数。根据 Jaccard 相似性原理, 当 K 为 0—0.25 时, 为极不相似; K 为 0.25—0.5 时, 为中等不相似; K 为 0.5—0.75 时, 为中等相似; K 为 0.75—1 时, 为极相似^[25]。

(3) 运用 Google Earth Pro 7.3.1 测量湖泊面积和样点近岸距离。

(4) 运用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 检验季节间、湖泊间后生浮游动物密度、生物量等参数是否有显著性差异, 若以上数据不服从正态分布或者方差不齐, 则采用多个独立样本比较的 Kruskal-Wallis H 检验。运用聚类分析比较不同季节后生浮游动物群落结构的相似性, 聚类方法采用组间连接法 (Between-groups linkage), 数据间距离采用欧氏距离 (Euclidean distance)。运用 Pearson 相关性分析探究湖泊面积和近岸距离与后生浮游动物群落结构的相关关系。以上分析均在 SPSS 23.0 中完成。

(5) 运用 Canoco 4.5 软件分析后生浮游动物优势种种群密度与水环境因子的关系。首先, 使用除趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA) 检验物种密度呈单峰还是线性分布。如果 DCA 分析结果中排序轴最大梯度长度大于 4, 则选择典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA); 反之, 则选择冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA)。

(6) 水质生物学评价

利用浮游生物多样性指数评价水质状况的标准见表 1^[10]。

表 1 基于浮游生物多样性指数的水质评价标准

生物多样性指数 Biodiversity index	清洁 Cleanliness	轻污染 Light pollution	β -中污染 β -Moderate pollution	α -中污染 α -Moderate pollution	重污染 Severe pollution
H'	> 4.5	4.5—3.0	3.0—2.0	2.0—1.0	< 1.0
J	> 0.8	0.8—0.5	0.5—0.3	0.3—0.1	< 0.1
d	> 6.0	6.0—4.0	4.0—2.0	2.0—1.0	1.0—0

H' : 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; J : 均匀度指数 Pielou evenness index; d : 丰富度指数 Margalef richness index

2 结果

2.1 后生浮游动物物种组成及优势种

共鉴定后生浮游动物 112 种 (不包括桡足幼体和无节幼体), 其中轮虫 65 种、枝角类 29 种、桡足类 18 种, 分别占物种总数的 58.0%、25.9% 和 16.1%。呈现出小型浮游动物物种数多, 大型浮游动物物种数少的群落结构特点。

优势种 12 种 (轮虫 10 种、枝角类和桡足类各 1 种), 具有明显的季节交替现象 (表 2)。其中, 针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*) 为全年优势种; 前节晶囊轮虫 (*Asplanchna priodonta*)、独角聚花轮虫 (*Conochilus unicornis*)、叉角拟聚花轮虫 (*Conochiloides dossuarius*) 和长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*) 仅为春季优势种; 裂痕龟纹轮虫 (*Anuraeopsis fissa*)、暗小异尾轮虫 (*Trichocerca pusilla*)、等刺异尾轮虫 (*T. similis*) 和奇异巨腕轮虫 (*Pedalia mira*) 仅为夏季优势种。

表 2 园区湖泊水体后生浮游动物优势种及其优势度

Table 2 Dominant species and dominance of metazoan zooplankton in the lakes

优势种 Dominant species	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>		0.07		0.04
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>		0.03		
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.05	0.07	0.35	
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>		0.17		
等刺异尾轮虫 <i>Trichocerca similis</i>		0.11		
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	0.10			
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	0.18	0.09	0.25	0.23
独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	0.25			
叉角拟聚花轮虫 <i>Conochiloides dossuarius</i>	0.03			
奇异巨腕轮虫 <i>Pedalia mira</i>		0.02		
长额象鼻蚤 <i>Bosmina longirostris</i>	0.02			
无节幼体 Nauplii		0.02	0.04	

2.2 后生浮游动物群落结构的同质性检验

湖泊间后生浮游动物物种组成的相似性系数如表 3 所示,金鸡湖与沙湖的物种组成相似度最低 ($K=0.48$);其它湖泊之间物种相似度均处于中等相似水平 ($0.50 \leq K < 0.75$),其中,金鸡湖与独墅湖的物种相似度最高 ($K=0.71$)。

各湖泊间仅密度 ($\chi^2 = 12.885$, $df = 4$, $P < 0.05$) 存在显著性差异,生物量 ($F_{4,79} = 0.901$, $P > 0.05$)、香农多样性指数 ($F_{4,79} = 2.457$, $P > 0.05$)、均匀度指数 ($F_{4,79} = 1.744$, $P > 0.05$) 以及丰富度指数 ($F_{4,79} = 1.192$, $P > 0.05$) 均无显著性差异 (图 2)。

表 3 园区湖泊间后生浮游动物物种相似性系数

Table 3 Similarity coefficients of species compositions of metazoan zooplankton in the lakes

Jaccard 相似性系数 Jaccard similarity coefficient	阳澄湖	金鸡湖	独墅湖	沙湖
金鸡湖	0.53 **			
独墅湖	0.53 **	0.71 **		
沙湖	0.50 **	0.48 *	0.51 **	
白塘湖	0.55 **	0.53 **	0.54 **	0.59 **

* : 中等不相似 Moderately dissimilar; ** : 中等相似 Moderately similar

2.3 季节变化对后生浮游动物群落结构的影响

园区湖泊后生浮游动物的密度 ($\chi^2 = 35.267$, $df = 3$, $P < 0.01$)、生物量 ($\chi^2 = 56.629$, $df = 3$, $P < 0.01$)、香农多样性指数 ($F_{3,80} = 27.318$, $P < 0.01$)、均匀度指数 ($\chi^2 = 10.987$, $df = 3$, $P < 0.05$) 以及丰富度指数 ($\chi^2 = 34.760$, $df = 3$, $P < 0.01$) 均表现出显著的季节差异 (图 3)。

以后生浮游动物物种数、密度、生物量和 3 种多样性指数为变量,采用欧氏距离进行系统聚类分析 (图 4)。结果显示,当欧氏距离 d 为 20 时,后生浮游动物可大致划分为三大类群:夏秋季类群、春季类群以及冬季类群。以上表明夏季和秋季后生浮游动物群落结构最为相似。

2.4 环境因子与优势种群密度的 RDA 分析

对园区湖泊水体 12 种优势种和相关环境因子进行 RDA 分析 (表 4、表 5、图 5)。排序轴一和排序轴二的特征值分别为 0.24 和 0.07,共解释了 31.0% 的物种信息量以及 88.8% 的物种-环境关系信息量。轴一的物种环境相关系数为 0.81,轴二的物种环境相关系数为 0.75,表明园区湖泊水体环境因子与浮游动物群落组成关系密切。两个物种排序轴之间的相关系数仅为 0.04,两个环境排序轴之间的相关系数为 0,表明排序结果可

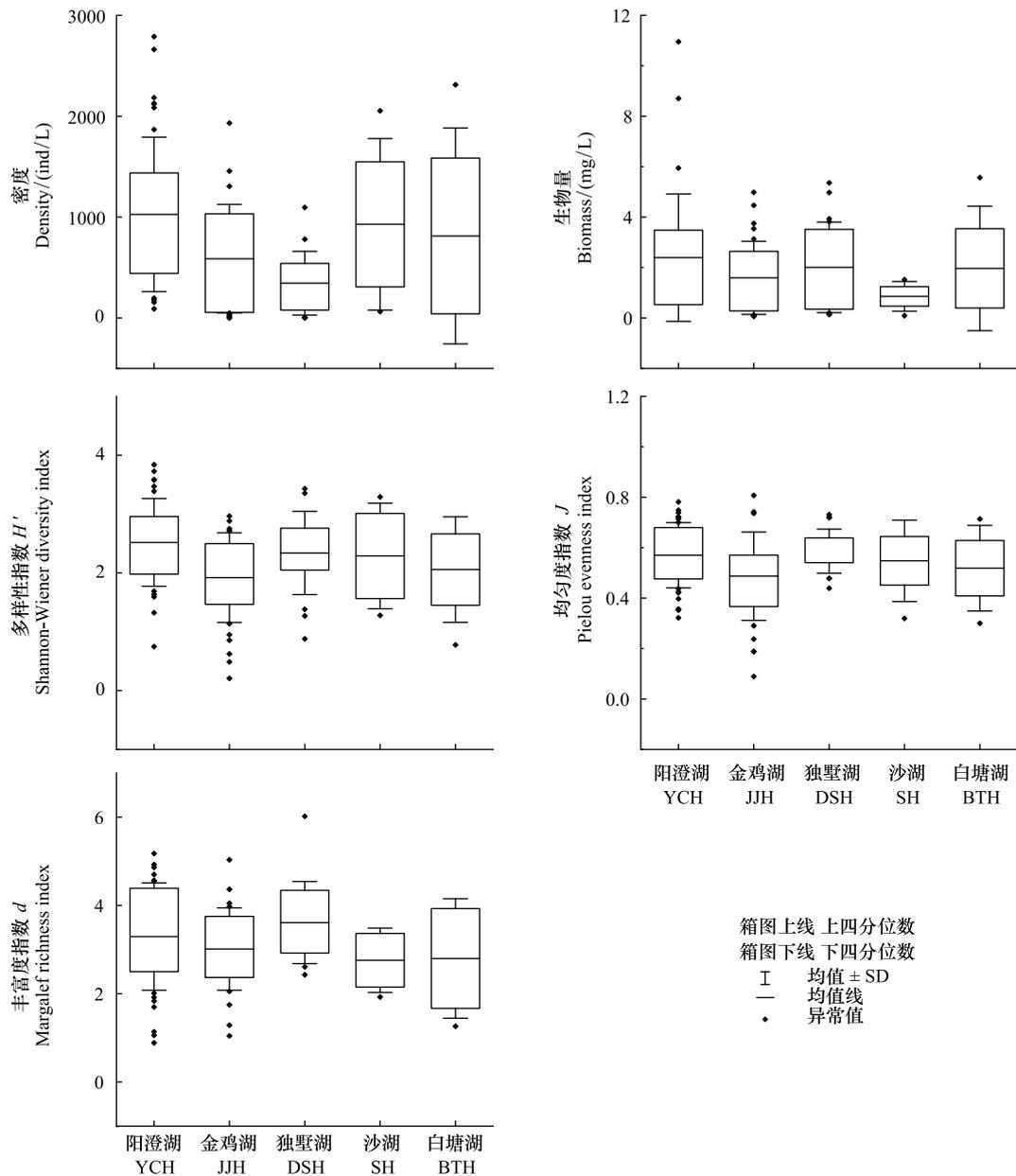


图2 园区湖泊水体后生浮游动物群落结构的时空变化

Fig.2 Spatial variation of metazoan zooplankton community structure in the lakes

靠。pH 和水温是 RDA 第一物种排序轴的重要影响因子,与其呈正相关,相关系数分别为 0.66 和 0.65。溶解氧是 RDA 第二物种排序轴的重要影响因子,与其呈负相关,相关系数为-0.53。

2.5 空间因素对后生浮游动物群落结构的影响

运用 Pearson 相关性分析探究湖泊面积、近岸距离与后生浮游动物群落结构的关系(表 6)。结果表明,湖泊面积大小与后生浮游动物群落结构无显著相关关系;样点近岸距离与生物量具有显著的正相关关系($R = 0.499$, $P < 0.05$)。

2.6 园区湖泊水质的生物学评价

基于水质评价标准和物种多样性可知(图 6),香农多样性指数 H' 和丰富度指数 d 对园区湖泊水质的评价结果较为一致,均显示湖泊水体处于中度污染状态;均匀度指数 J 显示湖泊水体处于轻-中度污染状态。

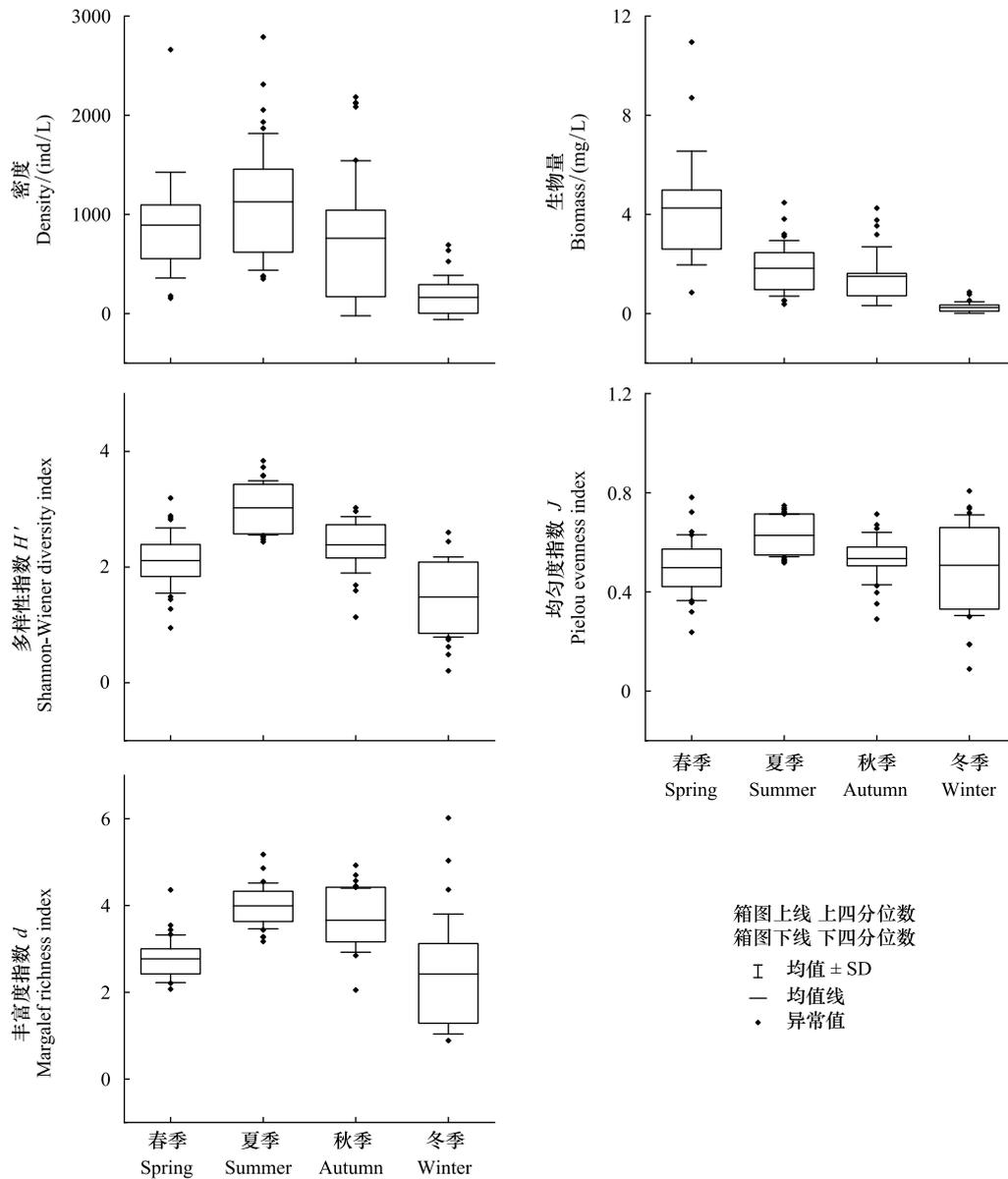


图 3 园区湖泊水体后生浮游动物群落结构的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of metazoan zooplankton community structure in the lakes

表 4 园区湖泊水体后生浮游动物优势种与环境因子间 RDA 分析的统计信息

Table 4 RDA analysis between dominant species of metazoan zooplankton and environmental factors in the lakes

排序轴 Axes	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.24	0.07	0.03	0.01
物种环境相关性 Species-environment correlations	0.81	0.75	0.43	0.41
物种变异累积百分数/% Cumulative percentage variance of species data	23.6	31.0	33.5	34.6
物种-环境变异累积百分数/% Cumulative percentage variance of species-environment relation	67.7	88.8	96.0	99.2
全部特征值总和 Sum of all eigenvalues	1			
全部典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues	0.35			

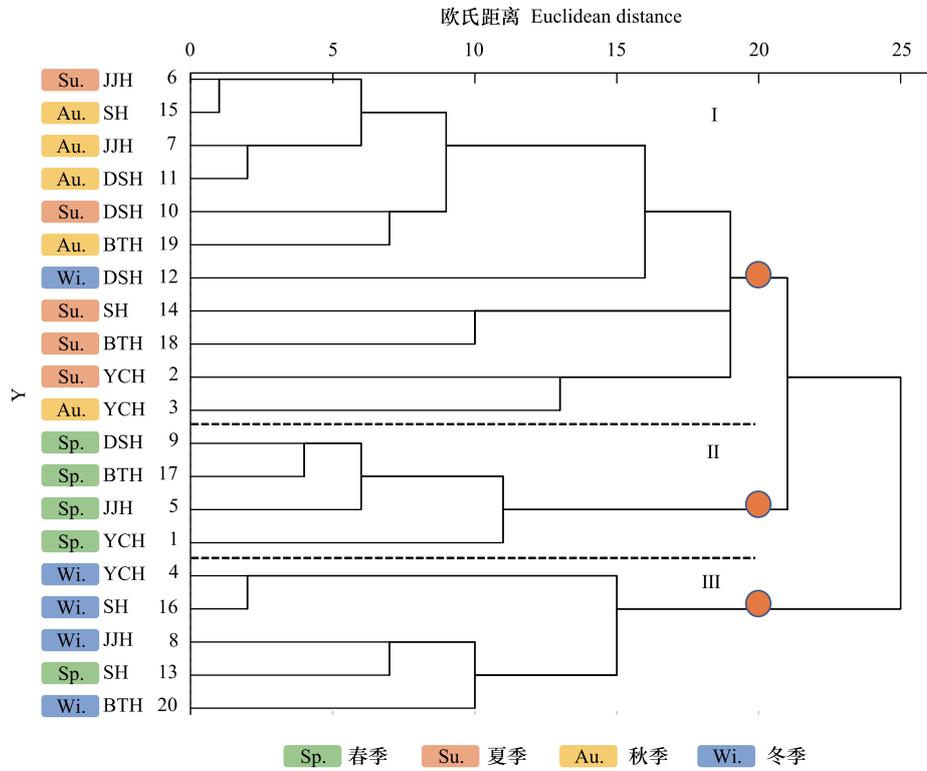


图 4 园区各季节后生浮游动物群落结构的聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of metazoan zooplankton community structure in each season of the Park

表 5 前 2 个排序轴和环境因子间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of environmental factors with the first two axes of RDA

	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2
SPEC AX1	1			
SPEC AX2	0.04	1		
ENVI AX1	0.81	0	1	
ENVI AX2	0	0.75	0	1
pH	0.66	0.11	0.81	0.14
WT	0.65	-0.23	0.80	-0.31
DO	-0.42	-0.53	-0.52	-0.70
SD	-0.21	0.10	-0.26	0.13
TDS	-0.31	-0.25	-0.39	-0.33

WT: 水温 Water temperature; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; SD: 透明度 Secchi depth; TDS: 总溶解固体量 Total dissolved solid; SPEC: 物种 Species; ENVI: 环境 Environment; AX: 排序轴 Axes

表 6 后生浮游动物群落结构与生境因子的 Pearson 相关性分析

Table 6 Pearson correlation analysis of metazoan zooplankton community structure and habitat factors

相关系数 Correlation coefficient	S	D	B	H'	J	d
湖泊面积	0.634	-0.134	0.515	0.521	0.404	0.756
样点近岸距离	-0.354	-0.093	0.499*	0.104	0.130	0.330

S: 物种数 Number of species; D: 密度 Density; B: 生物量 Biomass; H': 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; J: 均匀度指数 Pielou evenness index; d: 丰富度指数 Margalef richness index; *: 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

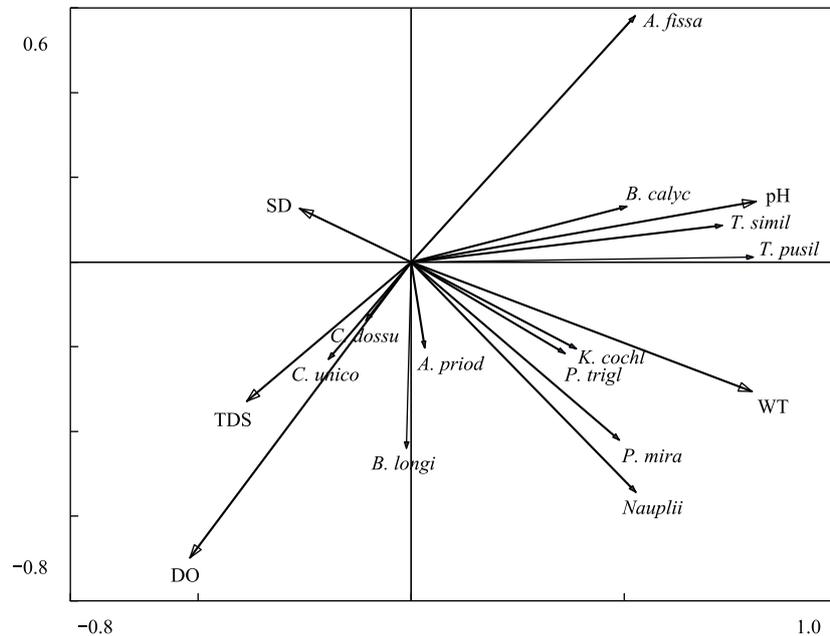


图5 园区湖泊水体后生浮游动物优势种与环境因子的 RDA 排序图

Fig.5 RDA biplot of dominant species of metazoan zooplankton and environmental factors in the lakes

B. calyc: 萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus*; *A. fissa*: 裂痕龟纹轮虫 *Anuraeopsis fissa*; *K. cochl*: 螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*; *T. pusil*: 暗小异尾轮虫 *Trichocerca pusilla*; *T. simil*: 等刺异尾轮虫 *Trichocerca similis*; *A. priod*: 前节晶囊轮虫 *Asplanchna priodonta*; *P. trigl*: 针簇多肢轮虫 *Polyarthra trigla*; *C. unico*: 独角聚花轮虫 *Conochilus unicornis*; *C. dossu*: 叉角拟聚花轮虫 *Conochiloides dossuarius*; *P. mira*: 奇异巨腕轮虫 *Pedalia mira*; *B. longi*: 长额象鼻蚤 *Bosmina longirostris*; *Nauplii*: 无节幼体 *Nauplii*; WT: 水温 Water temperature; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; SD: 透明度 Secchi depth; TDS: 总溶解固体量 Total dissolved solid;

3 讨论

3.1 后生浮游动物群落结构的动态变化

在淡水水体浮游动物各类群的组成研究中,林青等^[26]在上海市滴水湖检测到轮虫 45 种,枝角类 7 种,桡足类 9 种;李共国等^[13]在甬江干流检测到轮虫 72 种,枝角类 10 种,桡足类 13 种;王晓清等^[27]在湘江干流检测到轮虫 45 种,枝角类 17 种,桡足类 5 种。本研究结果表明,苏州工业园区湖泊水体后生浮游动物的物种组成主要以小型浮游动物轮虫为主,大型浮游动物枝角类和桡足类所占比例相对较少,这与上述湖泊和河流中浮游动物各类群的组成情况相同。

各湖泊水体后生浮游动物物种组成的相似性分析表明,金鸡湖与独墅湖的物种组成相似度最高 ($K = 0.71$)。近年来,调水引流工程增强了园区分散水体的连通性,而且湖泊之间互有河道连通,无疑增加了各湖泊浮游动物群落之间的交流。此外,风力和水鸟作为浮游动物及其休眠卵的传播媒介^[28],也促进了园区浮游动物群落结构同质化趋势的发展。金鸡湖位于园区中心,南与独墅湖相通,紧密相邻的地理位置使其物种交流最为频繁,浮游动物物种组成也最为相似。

从全年水平来看,园区湖泊水体后生浮游动物总密度受轮虫影响最大,轮虫密度占绝对优势(四季占比均达 90% 以上),浮游甲壳动物所占比例相对较小。园区湖泊水体中鲢鱼和鳙鱼等滤食性鱼类的存在是轮虫数量占优势的重要原因。滤食性鱼类对浮游动物的捕食具有明显的选择性,即鱼类在同等能耗条件下会优先捕食个体更大的浮游动物,以便获取更多能量用于支撑自身的生命活动^[29]。当滤食性鱼类密度较高时,大型浮游动物就会承受更大的捕食压力,致使其群落结构朝向小型化发展,轮虫等小个体浮游动物逐渐演变成优势种群^[30-32]。轮虫个体偏小,适应性更强,在适宜生存的环境中可通过孤雌生殖大量繁殖后代。此外,轮虫

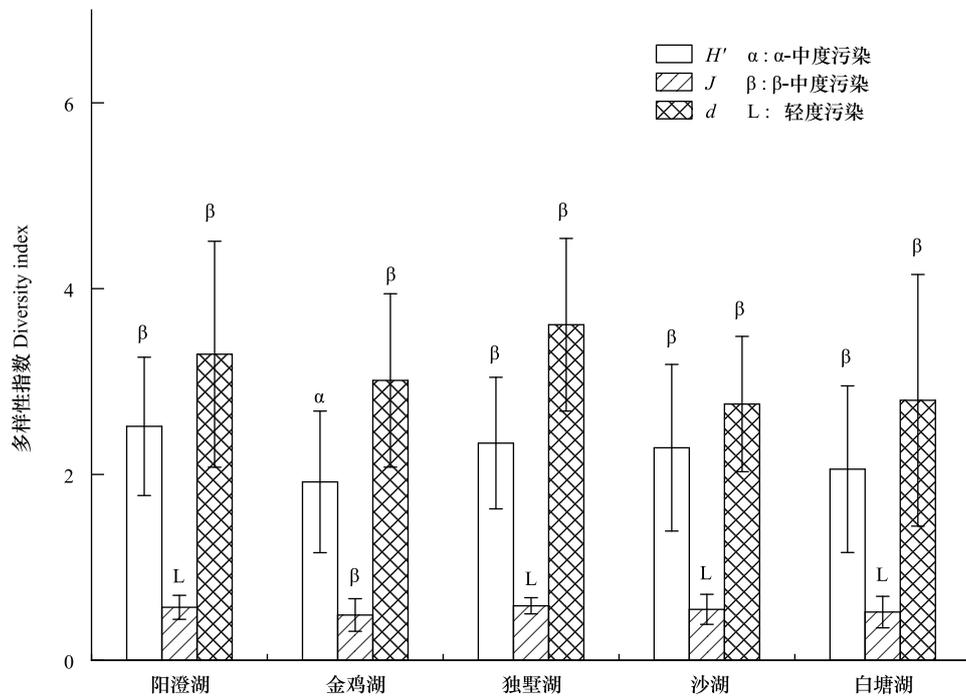


图6 园区湖泊水质的生物学评价

Fig.6 Biological evaluation of lake water quality in Suzhou Industrial Park

密度还受到浮游植物等饵料生物上行效应影响,轮虫多喜食绿藻,充足的食物资源可为其生长繁殖提供保障。

本研究中,后生浮游动物密度的季节变化表现为夏季最高,生物量则春季最高。生物量的高低不仅与物种数量有关,还与物种组成密切相关^[33]。前节晶囊轮虫作为春季优势种,相比其它轮虫,个体平均湿重更大,对春季总生物量有很大的贡献。统计结果显示,前节晶囊轮虫在春季的平均生物量占轮虫生物量的88.2%,占后生浮游动物生物量的比例高达40.7%。此外,春季湖泊水体中大型枝角类(如透明溞 *Daphnia hyalina*)的数量相对更多。因此,大型浮游动物的数量增多是总生物量提高的关键。

3.2 后生浮游动物群落结构与环境因子的关系

后生浮游动物群落结构的变化不仅受生物因素调控,还受水温、溶解氧、pH和透明度等环境因素影响。温度是决定浮游动物群落结构最主要的环境因子^[30],它不仅可以直接影响浮游动物自身的新陈代谢活动^[34-35],还可以通过改变鱼类等其它生物群落结构间接影响浮游动物的捕食压力和竞争强度。本研究中RDA排序结果显示,温度与第一物种排序轴有较强的相关性,相关系数为0.65,证明温度对苏州工业园区后生浮游动物群落结构具有重要影响。此外,不同种类的浮游动物对温度的响应机制不同,每一种浮游动物都有适宜其生长繁殖的最佳温度范围。黄祥飞等^[36]研究表明,一定范围内,随着温度升高轮虫卵的发育时间逐渐缩短,轮虫总数的高峰一般出现在20℃以上的水温,这与本研究中轮虫密度在平均水温20℃以上的夏季达到峰值的结果一致。

水体富营养化和气温升高均可导致水体溶解氧含量降低,低氧环境(溶解氧含量 $\leq 2\text{mg/L}$)会对水生生态系统结构与功能的稳定产生显著影响^[37-38]。本研究中冗余分析表明,溶解氧与物种排序轴具有明显的负相关关系,这可能与水体浮游动物数量较多,耗氧量增加导致溶解氧含量降低有关。当溶解氧含量低于某物种的耐受阈值时,会直接影响其正常的生存与繁殖,致使种群数量增长缓慢甚至消失,而耐受种的优势地位将逐渐显现。已有研究表明,低氧环境对浮游动物的间接影响主要是通过改变物种分布来实现的,即低氧环境下捕食者与被捕食者都将迁移至有限的高氧环境中,致使被捕食者的数量逐渐降低^[38]。随着时间推移,这些影响可能会使种群数量减少或物种优势转移,从而导致浮游动物群落结构发生变化。

本研究中,后生浮游动物数量在 pH 相对较高的夏季达到峰值。碱性水体环境更有利于浮游植物进行光合作用,浮游植物生产力的提高为浮游动物提供了充足饵料,从而促进浮游动物生长繁殖^[39]。此外,透明度能够直观反映水体叶绿素的含量高低,进而表征水体浮游植物的现存量,透明度越高的水体一般浮游植物生长越少,食物资源匮乏无疑将限制浮游动物的生长繁殖^[40]。

不同地区影响浮游动物群落结构形成的环境因子不尽相同^[41]。驱动渭河流域浮游动物群落结构形成的环境因子为水温、饱和度、流量和 pH^[42],水温、总磷、总氮、叶绿素 a 和 pH 是影响滴水湖浮游动物群落变化的重要因素^[26],而太湖滨岸带浮游动物分布主要与溶解性总氮、总磷、透明度、溶解氧及 pH 显著相关^[43],影响妫水河浮游动物群落结构变化的主要因子为水温、pH、溶解氧和氨氮^[39]。本研究中,水温、溶解氧和 pH 则是影响后生浮游动物群落结构的主要环境因子。

3.3 园区湖泊水质的生物学评价

正常水环境中,浮游动物群落结构处于相对稳定状态。当水环境受到污染后,群落中对污染物耐受度低的敏感种将逐渐减少甚至消失,而耐受度高的物种将存活下来并发展成为优势种,逐渐导致群落结构单一化^[44]。因此,浮游动物群落结构在一定程度上能够反映出水环境对生物产生的综合累积效应,相比理化监测手段更能体现出水体的长期状态^[45]。

不同种类浮游动物可以指示水体的不同污染程度^[46-48]。本研究中,园区水体主要优势种($Y \geq 0.1$)及其污染指示类型分别为:针簇多肢轮虫为 β -中污至 α -中污型指示种;暗小异尾轮虫、等刺异尾轮虫、前节晶囊轮虫为 β -中污型指示种;螺形龟甲轮虫为寡污至 β -中污型指示种;独角聚花轮虫为寡污型指示种。上述优势种多为中度污染指示种,表明园区水体已受到一定程度污染。

浮游动物多样性指数是反映生物群落结构复杂性和稳定性,以及表征群落物种内部和物种间分配均匀程度的指标,可作为评价水质优劣的标准^[5]。本研究运用 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数以及 Margalef 丰富度指数对园区水质进行初步评价。基于水质评价标准(表 1),香农多样性指数和均匀度指数均显示金鸡湖水质略差,这可能是由于近期金鸡湖的景观建设对水质产生了一定影响。金鸡湖景区作为一座开放式的亲水公园,游艇观光、浮筒船等水上娱乐项目的相继推出难免会对水体造成干扰,其水质状况将是园区重点关注和治理的对象。

从水质的生物学评价角度,园区湖泊水体整体处于轻-中度污染水平。与于婷婷等^[49]于 2012—2013 年对园区湖泊水质作出的生物学评价结果相比,水质已由轻度污染转变为轻-中度污染状态。由此可见,针对园区水体污染状况,应开展水体污染源调查,及时做好生态治理工作。

4 结论

(1) 园区湖泊水体共鉴定后生浮游动物 112 种,轮虫(65 种)占绝对优势,枝角类(29 种)和桡足类(18 种)所占比例较少。

(2) 五大湖泊后生浮游动物在物种组成、生物量和 α -物种多样性方面存在同质化趋势。

(3) 季节变化、环境因子以及样点近岸距离是影响园区湖泊后生浮游动物群落结构变化的主要因素。

(4) 基于生物学评价,园区湖泊水质由轻度污染(2012—2013 年)转变为轻-中度污染(2018—2019 年),应及时开展水体污染源调查并做好生态治理工作。

致谢:感谢课题组成员及苏州工业园区工作人员在野外采样过程中给予的帮助。

参考文献(References):

- [1] 冯世敏,吴明珠,熊莲,李东京,王俊莉,刘冬燕. 太平湖浮游动物动态演替与环境因子的相关性研究. 水生生物学报, 2017, 41(3): 700-711.
- [2] 窦勇,霍达,姜智飞,周文礼,乔之怡. 海河入海口表层水体浮游生物群落特征及与环境因子的相关性研究. 生态环境学报, 2016, 25

- (4): 647-655.
- [3] 王硕, 杨涛, 李小平, 陈佳. 渭河流域浮游动物群落结构及其水质评价. 水生生物学报, 2019, 43(6): 1333-1345.
- [4] Hessen D O, Faafeng B A, Smith V H, Bakkestuen V, Walseng B. Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes. *Ecology*, 2006, 87(2): 433-443.
- [5] 刘盼盼, 王龙, 王培, 王琦, 张霞, 周巧红, 吴振斌. 沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价. 水生生物学报, 2018, 42(2): 373-381.
- [6] Beaver J R, Arp C D, Tausz C E, Jones B M, Whitman M S, Renicker T R, Samples E E, Ordosch D M, Scotese K C. Potential shifts in zooplankton community structure in response to changing ice regimes and hydrologic connectivity. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2019, 51(1): 327-345.
- [7] Van Egeren S J, Dodson S I, Torke B, Maxted J T. The relative significance of environmental and anthropogenic factors affecting zooplankton community structure in Southeast Wisconsin Till Plain lakes. *Hydrobiologia*, 2011, 668(1): 137-146.
- [8] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征. 湖泊科学, 2015, 27(5): 932-940.
- [9] 邵倩文, 刘镇盛, 章菁, 孙栋, 林施泉. 长江口及邻近海域浮游动物群落结构及季节变化. 生态学报, 2017, 37(2): 683-691.
- [10] 王璐璐, 董芳, 李芳芳, 段梦, 朱琳. 大辽河水系夏季后生浮游动物群落结构及水生态评价. 生态学杂志, 2013, 32(2): 389-395.
- [11] 李喆, 王念民, 孙大江, 纪锋, 霍堂斌, 马波, 姜作发, 华振河. 五大连池浮游动物群落结构的时空分布特征. 生态学报, 2016, 36(4): 961-970.
- [12] 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥. 太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征(1997—2017年). 环境科学, 2020, 41(3): 1246-1255.
- [13] 李共国, 包薇红, 徐石林, 王艳, 谭大鹏, 黄平沙. 甬江干流浮游动物群落结构季节动态与水环境的关系. 水生生物学报, 2015, 39(1): 1-12.
- [14] 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫. 北京市河流秋季浮游动物群落特征分析. 环境科学, 2019, 40(8): 3568-3576.
- [15] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 358-388.
- [16] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961: 1-288.
- [17] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979: 1-297.
- [18] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水桡足类. 北京: 科学出版社, 1979: 1-450.
- [19] 向贤芬, 虞功亮, 陈受忠. 长江流域的枝角类. 北京: 中国科学技术出版社, 2015: 1-163.
- [20] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微生物与底栖动物图谱(第二版). 北京: 化学工业出版社, 2011: 303-363.
- [21] 赵文. 水生生物学(第二版). 北京: 中国农业出版社, 2015: 159-224.
- [22] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京: 农业出版社, 1991: 30-40.
- [23] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 247-251.
- [24] 骆鑫, 曾江宁, 徐晓群, 杜萍, 廖一波, 刘晶晶. 舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2016, 36(24): 8194-8204.
- [25] 高原, 赖子尼, 李捷, 王超, 曾艳艺, 刘乾甫, 杨婉玲. 连江浮游动物多样性的空间分布. 生物多样性, 2013, 21(6): 699-708.
- [26] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 俞秋佳, 余华光. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学报, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [27] 王晓清, 曾亚英, 吴含含, 熊钢, 张建国, 马晓, 陈丽婷. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析. 水生生物学报, 2013, 37(3): 488-494.
- [28] Liu P, Xu S L, Lin J H, Li H M, Lin Q Q, Han B P. Urbanization increases biotic homogenization of zooplankton communities in tropical reservoirs. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105899.
- [29] Yang Y F, Huang X F, Liu J K, Jiao N Z. Effects of fish stocking on the zooplankton community structure in a shallow lake in China. *Fisheries Management and Ecology*, 2005, 12(2): 81-89.
- [30] 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 徐镇, 金春华. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价. 水生生物学报, 2014, 38(4): 720-728.
- [31] 赵帅营, 韩博平. 基于个体大小的后生浮游动物群落结构分析——以广东星湖为例. 生态学报, 2006, 26(8): 2646-2654.
- [32] Korponai J, Mátyás K, Paulovits G, Tútrai I, Kovács N. The effect of different fish communities on the cladoceran plankton assemblages of the Kis-Balaton Reservoir, Hungary. *Hydrobiologia*, 1997, 360(1/3): 211-221.
- [33] 陶雪梅, 王先云, 王丽卿, 郑小燕, 张玮. 溛湖后生浮游动物群落结构研究. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 81-86.
- [34] 姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 刘宁, 何健龙, 程玲, 王月霞. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系. 生态学报, 2015, 35(22): 7308-7319.
- [35] Devreker D, Souissi S, Seuront L. Effects of chlorophyll concentration and temperature variation on the reproduction and survival of *Temora*

- longicornis* (Copepoda, Calanoida) in the Eastern English Channel. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 318(2): 145-162.
- [36] 黄祥飞, 胡春英, 伍焯田. 武汉东湖的轮虫. *水生生物学报*, 1985, 9(2): 129-143.
- [37] Slater W L, Pierson J J, Decker M B, Houde E D, Lozano C, Seuberling J. Fewer copepods, fewer anchovies, and more jellyfish: how does hypoxia impact the Chesapeake Bay zooplankton community? *Diversity*, 2020, 12(1): 35.
- [38] Keister J E, Winans A K, Herrmann B E. Zooplankton community response to seasonal hypoxia: a test of three hypotheses. *Diversity*, 2020, 12(1): 21.
- [39] 林海, 王源, 李冰. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价. *生态学报*, 2019, 39(20): 7583-7591.
- [40] 靳萍, 代克岩, 杨程, 郭萌, 徐婷婷, 蔺庆伟, 马剑敏. 牧野湖浮游动物群落结构及其与环境因子的相关性研究. *水生态学杂志*, 2013, 34(2): 53-61.
- [41] 夏品华, 马健荣, 李存雄, 林陶, 詹金心, 伍庆. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析. *环境科学研究*, 2011, 24(4): 378-386.
- [42] 白海锋, 赵乃锡, 殷旭旺, 鲁媛媛, 武玮, 徐宗学. 渭河流域浮游动物的群落结构及其与环境因子的关系. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(3): 260-266.
- [43] 温超男, 黄蔚, 陈开宁, 韦众, 吴涛. 太湖滨岸带浮游动物群落结构特征与环境因子的典范对应分析. *水生态学杂志*, 2020, 41(2): 36-44.
- [44] 吴卫菊, 王玲玲, 张斌, 廖琪, 王坎, 唐杰, 李扬. 洪湖水生生物多样性及水质评价研究. *环境科学与管理*, 2015, 40(10): 184-187.
- [45] 王松, 陈红, 刘清, 许江娟, 张国, 王在照. 汉城湖浮游动物群落结构特征及与水质关系. *生态科学*, 2018, 37(2): 114-123.
- [46] 鞠永富, 于洪贤, 于婷, 柴方营, 姚允龙, 张延成, 费滕, 夏凌云. 西泉眼水库夏季浮游动物群落结构特征及水质评价. *生态学报*, 2016, 36(16): 5126-5132.
- [47] 陈立婧, 顾静, 彭自然, 孔优佳, 花少鹏, 王武. 漏湖轮虫群落结构与水质生态学评价. *动物学杂志*, 2008, 43(3): 7-16.
- [48] 刘樵. 阳澄湖小型浮游动物群落结构特征与富营养化的关系[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- [49] 于婷婷, 朱雅, 徐琬, 赵磊, 钱文杰, 常青, 王国祥, 陈建琴. 苏州工业园区水体浮游甲壳动物群落特征及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2534-2542.