

苏州城区河道后生浮游动物群落结构 与环境因子的关系

刘同琳 陈皓若 洪陈聪 张健 马婕 陈立婧*

上海海洋大学水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海海洋大学海洋动物系统分类
与进化上海高校重点实验室 上海 201306

摘要: 2018年1月至11月对苏州城区8个片区23个监测点的河道断面进行每两月一次的后生浮游动物(轮虫、枝角类、桡足类)定量采集和分析,共鉴定出后生浮游动物127种,其中,轮虫48种,枝角类41种,桡足类38种。苏州城区河道后生浮游动物的年度优势种共24种,优势种生态位宽度变化范围在0.25~0.84之间,不同片区之间的生境异质性导致优势种生态位重叠指数差异较大。各片区的年均后生浮游动物总密度为 (315.2 ± 161.4) ind/L,年均后生浮游动物总生物量为 (0.77 ± 0.27) mg/L。不同片区间的生境异质性导致后生浮游动物现存量存在差异,轮虫在各片区的密度占比均达85.3%以上,成为绝对优势类群。典范对应分析(CCA)表明,电导率、水温、溶解氧、透明度、叶绿素a、总氮和总磷是影响后生浮游动物群落结构的重要环境因子。

关键词: 浮游动物; 群落结构; 环境因子; 生境异质性

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263(2021)05-674-12

Relationship between Metazooplankton Community Structure and Environmental Factors in Suzhou Urban River

LIU Tong-Lin CHEN Hao-Ruo HONG Chen-Cong ZHANG Jian
MA Jie CHEN Li-Jing*

*Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai Universities Key
Laboratory of Marine Animal Taxonomy and Evolution, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*

Abstract: In order to explore the relationship between metazooplankton (Rotifers, Cladocera and Copepod) community structure and water environmental factors in Suzhou urban river, bimonthly quantitative collection and analysis of metazooplankton were carried out at 23 monitoring points in 8 urban areas of Suzhou City from January to November 2018 (Fig. 1), and the water environmental factors were determined. Metazooplankton were collected according to the national standard method and identified under microscope. A

基金项目 “十三五”水专项-苏州区域水质提升与水生态安全保障技术及综合示范项目(No. 2017ZX07205);

* 通讯作者, E-mail: ljchen@shou.edu.cn;

第一作者介绍 刘同琳,男,硕士研究生;研究方向:浮游动物生态学;E-mail: 764409127@qq.com。

收稿日期: 2020-11-18, 修回日期: 2021-04-27 DOI: 10.13859/j.cjz.202105005

total of 127 species of zooplankton were identified, including 48 species of Rotifers, 41 species of Cladocera and 38 species of Copepod. The number of species in Shantang area was the highest, with 81 species, while in Western of the city the number was the lowest, with 49 species (Fig. 2). The water environmental factors were determined according to the national standards (Table 1), and it was found that there were some differences among different regions ($P < 0.05$). Using the formula to calculate the dominance (Y) of metazooplankton in Suzhou urban river, 24 species of annual dominant species ($Y \geq 0.02$) were identified (Table 2). Using the formula to calculate the niche breadth (B_i) and niche overlap (Q_{ik}) of dominant species, it was found that the niche breadth was 0.25 - 0.84 (Table 2). According to this, the dominant species of metazooplankton in Suzhou urban river were divided into three niche groups, and the habitat heterogeneity between different areas led to a large difference in niche overlap (Fig. 3). The average annual total density of metazooplankton in each area was 124.1 - 626.4 ind/L (Fig. 4), with the highest in Western of the city and the lowest in Ganjiang area. Rotifers account for more than 85.3% of the total metazooplankton density in each area, making them an absolute dominant group. The annual total biomass of metazooplankton in each area was 0.49 - 1.12 mg/L (Fig. 5), with the highest in Western of the city and the lowest in Southern of the ancient city. The variation law of metazooplankton biomass in each area is not completely consistent with the change of density. Different habitats in different regions lead to differences in the current stock of metazooplankton. The metazooplankton community composition and environmental factors were subjected to detrended correspondence analysis (DCA), because the maximum gradient was more than 3, so the final selection canonical correspondence analysis (CCA) was selected for the constrained sequencing. Canonical correspondence analysis shows that electrical conductivity, water temperature, dissolved oxygen, transparency, chlorophyll a, total nitrogen and total phosphorus are important environmental factors affecting the metazooplankton community structure in Suzhou urban river.

Key words: Zooplankton; Community structure; Environmental factor; Habitat heterogeneity

浮游动物分布广泛、繁殖迅速、种类多样，是水体中重要的功能生态类群，对于维持水生生态系统的物质循环和能量流动发挥着承上启下的重要推动作用（林志等 2018）。后生浮游动物包括轮虫、枝角类和桡足类，它们对环境变化敏感，可以作为水体质量状况的指示物种，水环境条件的变化会对后生浮游动物的群落结构产生较显著的影响（袁雅琴等 2017，潘超等 2018），因此探究后生浮游动物群落结构与水体环境因子的关系，对水环境保护与水生态修复具有重要意义。大量研究表明，浮游动物群落结构和生物多样性会受到众多环境因子如水温、pH、溶解氧浓度、电导率、营养盐和水深等因子，以及众多生物因子如捕食、竞争、浮游植物、水生植物的多寡等因子的影响（邱小

琮等 2012，陈磊等 2016，郭欧阳 2018，王硕等 2019）。

苏州是我国著名的水网地区，城区内河道交错，是全国河流最密集的地区。苏州城区河道由于地形地势等自然因素的影响和内部闸门等人为因素的控制，因此水体流向不定，水情十分复杂，导致不同区域的河道生境异质性较大。有研究发现，由于生境的差异和变化，浮游动物的群落结构存在较大差异（Massicotte et al. 2014，杜彩丽等 2019）。本研究根据苏州城区河道分布地理位置划分成 8 个水体片区，各片区间由于周边土地利用类型不同、城市功能区不同、人类活动干扰不同、河道水文不同等因素导致生境呈现异质性，加之苏州地处北亚热带湿润季风气候地区，湿润

多雨，降雨增加了地表径流，致使河道中冲入大量周边土地的多种陆源物质，进而加剧了生境异质性。

目前对苏州城区河道的研究多集中在物理、化学指标和浮游植物群落演替方面（付江波等 2019，马婕等 2021）。本研究于 2018 年 1 月至 11 月通过对苏州城区 8 个片区的河道水环境因子和后生浮游动物群落结构进行调查，讨论不同片区后生浮游动物（以下简称浮游动物）群落结构差异和原因，以期为苏州城区河道水环境污染防治和水生态修复提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 采样点设置

根据苏州城区的水系图，结合苏州城区内

河道的地理位置、河道数目、周边环境和水流的流向特征等因素，并参考前期对苏州河道的研究结果和区域划分方法（张立 2015，魏攀龙等 2019，马婕等 2021），将苏州城区河道划分为 8 个片区，选取其中 23 个具有代表性的监测断面进行样品采集，具体为城北片区（S1、S2）、山塘片区（S3、S4、S5、S6）、古城西北区（S7、S8、S9）、古城东北区（S10、S11、S12）、干将沿线（S13、S14）、古城南片区（S15、S16、S17、S18、S19）、城西片区（S20、S21、S22）以及城南片区（S23）（图 1）。

1.2 样品采集与测定

2018 年的 1 月、3 月、5 月、7 月、9 月和 11 月的下旬各采集 1 次样品。浮游轮虫用 5 L 的采水器，从水面下 0.5 m 处取水 10 L，摇匀后取 1 L 水样，加入 4% 福尔马林和鲁哥氏碘液

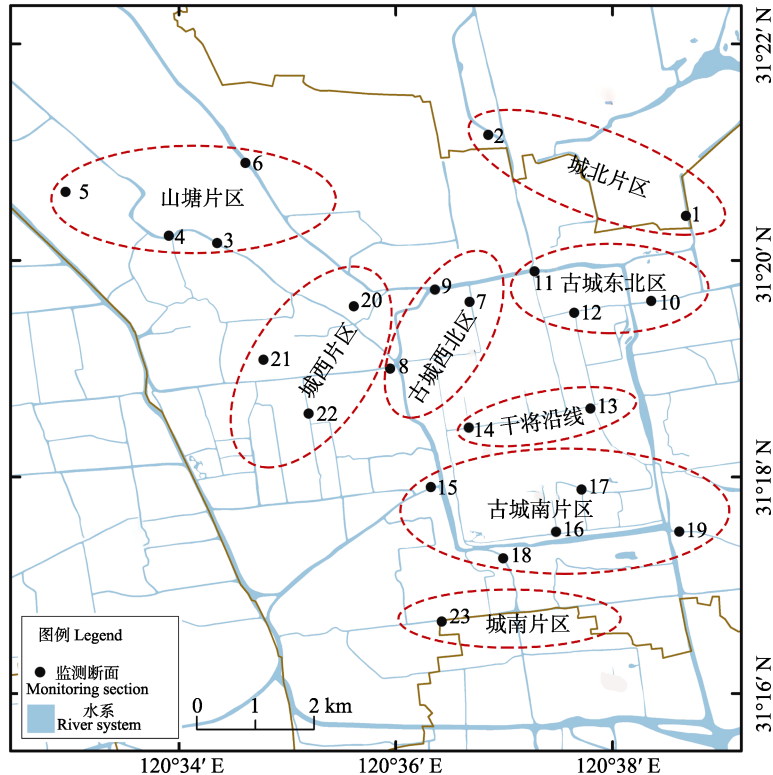


图 1 苏州城区河道监测断面

Fig. 1 Monitoring section in Suzhou urban river

城北片区. Northern of the city; 山塘片区. Shantang area; 古城西北区. Northwestern of the ancient city; 古城东北区. Northeastern of the ancient city; 干将沿线. Ganjiang area; 古城南片区. Southern of the ancient city; 城西片区. Western of the city; 城南片区. Southern of the city

固定, 静置 48 h 后, 用虹吸法吸去上清液, 将最终剩余的 50 ml 样品作为浓缩液, 置于 50 ml 样品瓶中。浓缩液充分摇匀后吸取 1 ml 置于计数框中, 于显微镜下鉴定计数。浮游枝角类及桡足类从水面下 0.5 m 处取水 20 L, 将 20 L 水经过 13 号浮游生物网过滤, 收集最终过滤后的 50 ml 样品到样品瓶中, 加入 4% 福尔马林固定, 在显微镜下对全瓶样品进行鉴定计数。

水体理化指标的测定: 透明度(transparency, SD) 利用普利特 SD20 塞氏盘(北京普利特仪器有限公司)测定, 水深(depth, D)采用 Hondex PS-7FL 声纳测深仪(南京铭奥仪器设备有限公司)测定, 水温(water temperature, WT)、pH 值、电导率(electric conductivity, Ec)和溶解氧(dissolved oxygen, DO)采用哈希 HQ40d 便携式多参数水质分析仪[哈希水质分析仪器(上海)有限公司]进行现场测定。另取 500 ml 水样低温保存, 在实验室按照国家标准(国家环境保护总局 2002)测定叶绿素 a(chlorophyll a, Chl a)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)和氨氮(ammonia nitrogen, NH₃-N)含量。

1.3 数据处理与分析

计算浮游动物的优势度指数(Y), $Y = (n_i/N) f_i$, 式中, n_i 为物种 i 的个数, N 为物种总个数, f_i 为样品中物种 i 出现的频率, 当 $Y \geq 0.02$ 时, 该种为优势种(尹丽平等 2018)。生态位宽度(B_i)(焦海峰

等 2011) 计算公式为 $B_i = -\frac{1}{\lg r} \sum_{j=1}^r P_{ij} \lg P_{ij}$, 生

态位重叠指数(Q_{ik}) 计算公式 $Q_{ik} =$

$$\frac{\sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{kj}^2}}$$

取值范围 $[0, 1]$, Q_{ik} 为生态位重叠指数, P_{ij} 为种 i 在第 j 个资源状态下的个体数占该种所有个体数的比例, P_{kj} 为种 k 在第 j 个资源状态

下的个体数占该种所有个体数的比值, r 为资源总数, 本研究为 23 个采样点 6 次调查中总共采集的样品数, 取值为 138。

使用 SPSS 22.0 软件对不同片区间的环境因子进行单因素方差分析。使用 Canoco 5 软件对浮游动物优势种和环境因子之间的关系进行具体分析, 首先需要对浮游动物数据和环境因子进行对数 $[\lg(x+1)]$ 数据标准化转换, 采用去趋势对应分析法(detrended correspondence analysis, DCA)对浮游动物数据进行分析, 以确定应采用线性排序或单峰排序方法, 采用蒙特卡罗模拟方法, 剔除对浮游动物群落影响不显著的环境因子。

2 结果与分析

2.1 环境因子

苏州城区河道水体的水温、pH 值以及电导率在各片区间差异性不显著($P > 0.05$); 水深在各片区呈现一定的差异性($P < 0.05$), 古城南片区显著高于其他片区; 山塘片区的透明度显著高于干将沿线和城北片区两个区域($P < 0.05$); 城西片区的溶解氧显著低于山塘片区($P < 0.05$); 总磷、总氮和氨氮的浓度在所有片区都具有较高水平, 并且城西片区显著高于其他片区($P < 0.05$); 城西片区的叶绿素 a 浓度显著高于其他片区($P < 0.05$) (表 1)。

2.2 后生浮游动物种类组成

2018 年苏州城区河道共鉴定出浮游动物 127 种, 其中, 轮虫 48 种, 约占总种类 37.8%; 枝角类 41 种, 约占总种类 32.3%; 桡足类 38 种, 约占总种类 29.9%。物种数 11 月份最少, 为 40 种, 9 月份最多, 为 65 种。从空间分布来看, 城南片区最少, 为 49 种, 山塘片区最多, 为 81 种(图 2)。

2.3 后生浮游动物优势种及生态位

2018 年苏州城区河道浮游动物优势种共 53 种, 其中, 轮虫 20 种, 枝角类 12 种, 桡足类 21 种, 区域和时间变化大。鉴于优势种数较多, 本文仅列出年度优势种及其优势度和生态

表 1 苏州城区河道环境因子年均值

Table 1 Annual mean value of Environmental factors in Suzhou urban river

环境因子 Environmental factors	片区 Area								
	城北片区 Northern of the city	山塘片区 Shantang area	古城西北区 Northwestern of the ancient city	古城东北区 Northeastern of the ancient city	干将沿线 Ganjiang area	古城南片区 Southern of the ancient city	城西片区 Western of the city	城南片区 Southern of the city	
水深 Depth (m)	1.69 ^a	1.81 ^{ab}	1.79 ^{ab}	1.89 ^{ab}	1.82 ^{ab}	2.40 ^c	1.56 ^a	2.20 ^{bc}	
透明度 (m) Transparency	0.33 ^a	0.46 ^b	0.43 ^{ab}	0.40 ^{ab}	0.32 ^a	0.45 ^{ab}	0.42 ^{ab}	0.43 ^{ab}	
水温 (°C) Water temperature	19.64 ^a	20.00 ^a	19.52 ^a	19.54 ^a	19.58 ^a	19.56 ^a	18.53 ^a	19.88 ^a	
溶解氧 (mg/L) Dissolved oxygen	7.32 ^{ab}	7.97 ^a	6.21 ^{ab}	6.06 ^{ab}	5.76 ^{ab}	6.37 ^{ab}	5.69 ^{ab}	4.41 ^b	
pH	7.95 ^a	7.73 ^a	8.06 ^a	8.21 ^a	7.80 ^a	7.96 ^a	7.33 ^a	8.00 ^a	
电导率(μS/cm) Electric conductivity	527.00 ^a	538.33 ^a	464.00 ^a	474.08 ^a	479.33 ^a	496.80 ^a	494.61 ^a	514.67 ^a	
总磷 (mg/L) Total phosphorus	0.28 ^a	0.31 ^a	0.26 ^a	0.23 ^a	0.32 ^a	0.28 ^a	0.71 ^b	0.26 ^a	
总氮 (mg/L) Total nitrogen	3.68 ^a	3.55 ^a	2.79 ^a	3.14 ^a	3.48 ^a	3.39 ^a	6.09 ^b	3.46 ^a	
氮磷比 Nitrogen / phosphorus ratio	13.40 ^{ab}	11.45 ^{ab}	13.45 ^{ab}	15.16 ^{ab}	12.27 ^{ab}	13.43 ^{ab}	10.01 ^a	14.86 ^b	
氨氮 (mg/L) Ammonia nitrogen	1.41 ^a	3.35 ^a	1.45 ^a	2.05 ^a	1.35 ^a	1.53 ^a	5.17 ^b	1.97 ^a	
叶绿素 a (μg/L) Chlorophyll a	20.49 ^a	27.72 ^a	12.17 ^a	16.29 ^a	16.25 ^a	17.35 ^a	267.16 ^b	10.56 ^a	

同行数据相比，不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，有 1 个字母相同另一个字母不同时，表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

Compared with peer data, different letters indicated significant difference ($P < 0.05$), while the same one letter and different one letter indicated no significant difference ($P > 0.05$).

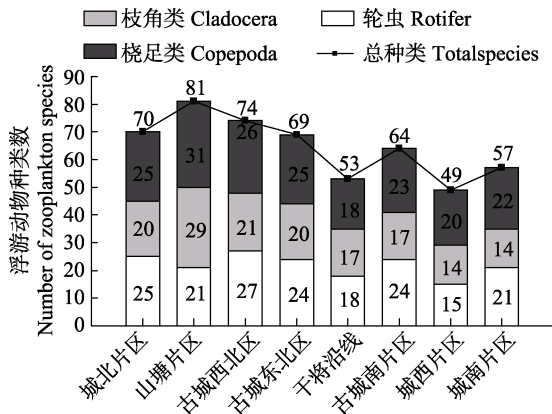


图 2 苏州城区河道浮游动物种类数

Fig. 2 Number of zooplankton species in Suzhou urban river

城北片区. Northern of the city; 山塘片区. Shantang area; 古城西北区. Northwestern of the ancient city; 古城东北区. Northeastern of the ancient city; 干将沿线. Ganjiang area; 古城南片区. Southern of the ancient city; 城西片区. Western of the city; 城南片区. Southern of the city

位宽度 (表 2)。萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calycifloru*)、广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*)、针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*)、长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*) 为全年优势种，长肢多肢轮虫 (*P. dolichoptera*) 和模式有爪猛水蚤 (*Onychocamptus mohammed*) 仅为 1 月份河道中的优势种。此外每个采样月份还有大量的无节幼体和桡足幼体分布。

苏州城区河道浮游动物优势种的生态位宽度 B_i 变化范围在 0.25 ~ 0.84 之间 (表 2)。根据 B_i 值可以将苏州城区河道浮游动物优势种群划分为 3 类。第一类是广生态位种群 ($B_i > 0.6$)，代表性种类有长肢秀体溞 (*Diaphanosoma leuchtenbergianum*)、针簇多肢轮虫、长额象鼻溞和广布中剑水蚤等 15 种，这一类优势种通常出现时间较长且在大部分站位都有较高的出现频率。第二类是中生态位种群 ($0.4 \leq B_i \leq 0.6$)，如螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*)、

表 2 苏州城区河道浮游动物优势种的
优势度及生态位宽度

Table 2 Dominance and niche breadth of the
dominant zooplankton species in Suzhou urban river

物种 Species	优势度指数 (Y) Dominance index	生态位宽度 (B_i) Niche breadth
轮虫 Rotifer		
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calycifloru</i>	0.11	0.65
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	0.02	0.25
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	0.05	0.66
螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>	0.02	0.57
长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra dolichoptera</i>	0.02	0.28
针簇多肢轮虫 <i>P. trigla</i>	0.15	0.66
真翅多肢轮虫 <i>P. euryptera</i>	0.05	0.40
枝角类 Cladocera		
长肢秀体溞 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>	0.08	0.71
短尾秀体溞 <i>D. brachyurum</i>	0.04	0.69
微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>	0.05	0.72
近亲裸腹溞 <i>M. affinis</i>	0.06	0.69
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	0.33	0.84
颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>	0.05	0.33
桡足类 Copepoda		
中华哲水蚤 <i>Sinocalanus sinensis</i>	0.02	0.62
汤匙华哲水蚤 <i>S. dorrii</i>	0.03	0.78
右突新镖水蚤 <i>Neodiaptomus schmackeri</i>	0.03	0.36
模式有爪猛水蚤 <i>Onychocamptus mohammed</i>	0.02	0.48
中华窄腹剑水蚤 <i>Limnoithona sinensis</i>	0.02	0.63
锯缘真剑水蚤 <i>Eucyclops serrulatus</i>	0.05	0.82
英勇剑水蚤 <i>Cylops strenuus</i>	0.04	0.59
跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>	0.03	0.61
广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>	0.20	0.77
北碚中剑水蚤 <i>M. pehpeiensis</i>	0.02	0.49
短尾温剑水蚤 <i>Thermocyclops brevifurcatus</i>	0.10	0.71

模式有爪猛水蚤、北碚中剑水蚤 (*Mesocyclops pehpeiensis*)、真翅多肢轮虫 (*Polyarthra euryptera*) 和英勇剑水蚤 (*Cylops strenuus*)。第三类是窄生态位种群 ($B_i < 0.4$)，如长肢多肢轮虫、颈沟基合溞 (*Bosminopsis deitersi*)、角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*) 和右突新镖水蚤 (*Neodiaptomus schmackeri*)，这一类群通常丰度较少，分布不均匀或者只在个别月份出现。

浮游动物优势种的生态位重叠指数 (Q_{ik}) 变化范围为 0.00 ~ 0.93，差异较大 (图 3)。窄生态位的长肢多肢轮虫和真翅多肢轮虫均与其他大部分优势种的生态位重叠较小，甚至没有重叠 ($Q_{ik} < 0.3$)。颈沟基合溞、右突新镖水蚤、跨立小剑水蚤 (*Microcyclops varicans*) 和北碚中剑水蚤均与 7 种轮虫优势种的生态位重叠较小 ($Q_{ik} < 0.3$)，表明它们与轮虫优势种对水资源的利用差异性大；长肢秀体溞、短尾秀体溞 (*D. brachyurum*)、微型裸腹溞 (*Moina micrura*) 和近亲裸腹溞 (*M. affinis*) 4 种之间的生态位重叠均较高 ($Q_{ik} > 0.6$)，表明它们对水资源利用和生境适应性较相似，并且中华窄腹剑水蚤 (*Limnoithona sinensis*)、广布中剑水蚤和短尾温剑水蚤 (*Thermocyclops brevifurcatus*) 也分别与这 4 种优势种的生态位重叠较高 ($Q_{ik} > 0.6$)；短尾温剑水蚤与广布中剑水蚤之间的生态位重叠最高 ($Q_{ik} = 0.93$)。

2.4 后生浮游动物现存量

苏州城区河道各片区的年均浮游动物总密度为 124.1 ~ 626.4 ind/L，平均密度为 302.2 ind/L，片区间存在较大差异，浮游动物密度由高到低为城西片区 (626.4 ind/L)、城南片区 (417.5 ind/L)、城北片区 (355.9 ind/L)、古城东北区 (352.2 ind/L)、山塘片区 (269.4 ind/L)、古城南片区 (210.6 ind/L)、古城西北区 (165.7 ind/L)、干将沿线 (124.1 ind/L) (图 4)。轮虫密度为 105.8 ~ 608.7 ind/L，在各片区的密度占比均达 85.3% 以上，并决定了各片区浮游动物总密度的分布水平。枝角类在各片区的密度为

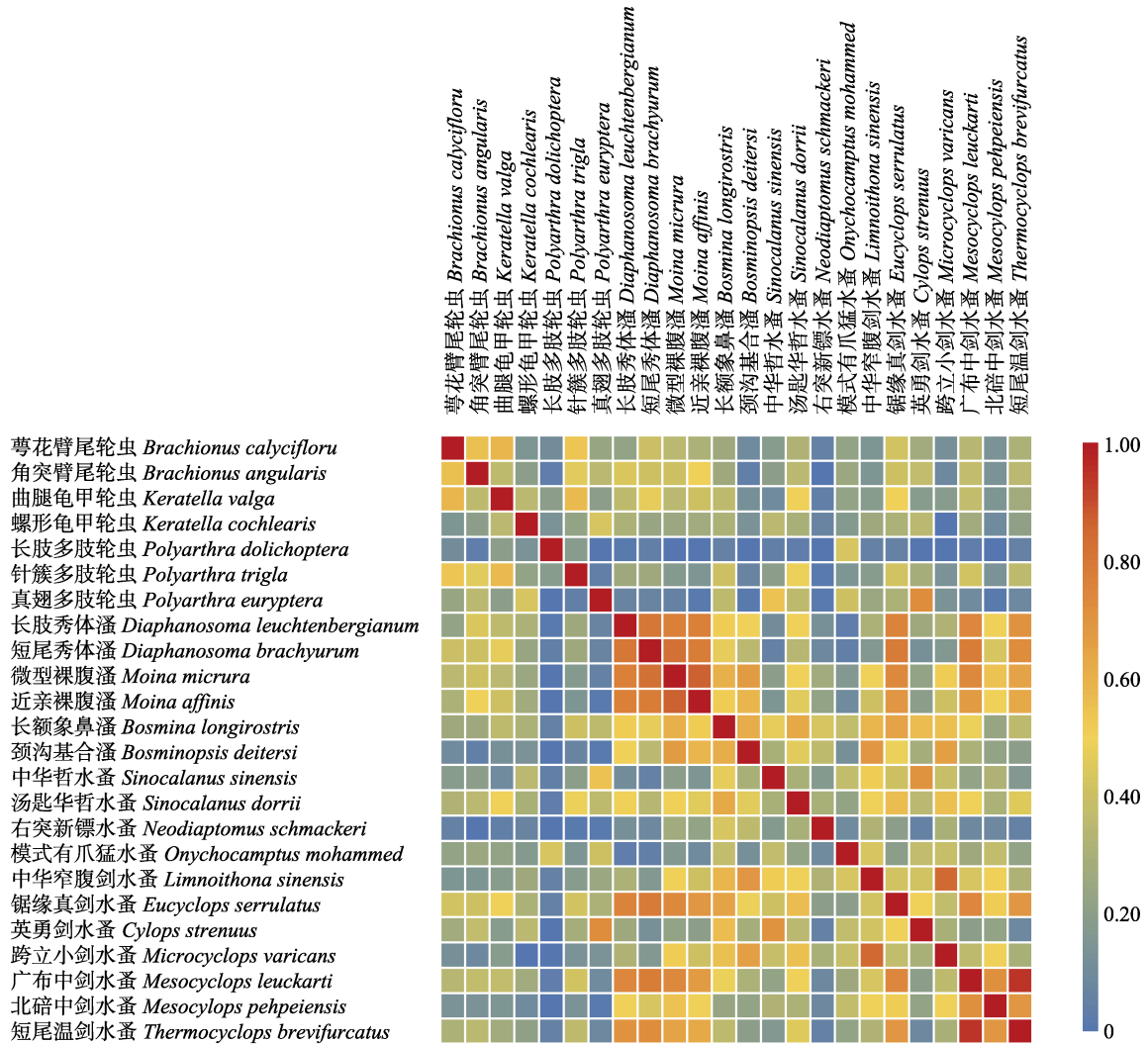


图3 苏州城区河道浮游动物优势种生态位重叠指数

Fig. 3 Niche overlap of the dominant zooplankton species in Suzhou urban river

1.3 ~ 3.4 ind/L, 密度最高值出现在山塘片区, 最低值出现在城北片区, 其他 6 个片区之间密度差异不大, 在所有片区的密度占比均低于 2.1%, 对浮游动物总密度的影响不大。桡足类密度为 7.1 ~ 18.4 ind/L, 密度最高值也出现在山塘片区, 最低值出现在城北片区, 在干将沿线的密度占比最高达 12.7%。

苏州城区河道各片区的年均浮游动物总生物量为 0.49 ~ 1.12 mg/L, 平均生物量为 0.77 mg/L, 浮游动物生物量由高到低为城西片区 (1.16 mg/L)、山塘片区 (1.12 mg/L)、城北片

区 (0.94 mg/L)、古城西北区 (0.70 mg/L)、干将沿线 (0.65 mg/L)、城南片区 (0.61 mg/L)、古城东北区 (0.49 mg/L)、古城南片区 (0.48 mg/L) (图 5)。轮虫生物量为 0.05 ~ 0.95 mg/L, 最高值出现在城西片区, 最低值出现在干将沿线。枝角类生物量为 0.04 ~ 0.13 mg/L, 最高值出现在山塘片区, 最低值出现在古城西北区。桡足类生物量为 0.20 ~ 0.51 mg/L, 最高值出现在干将沿线, 最低值出现在城北片区。不同种类的浮游动物生物量差异很大, 密度较少的枝角类和桡足类对总生物量的贡献相对较大, 例如

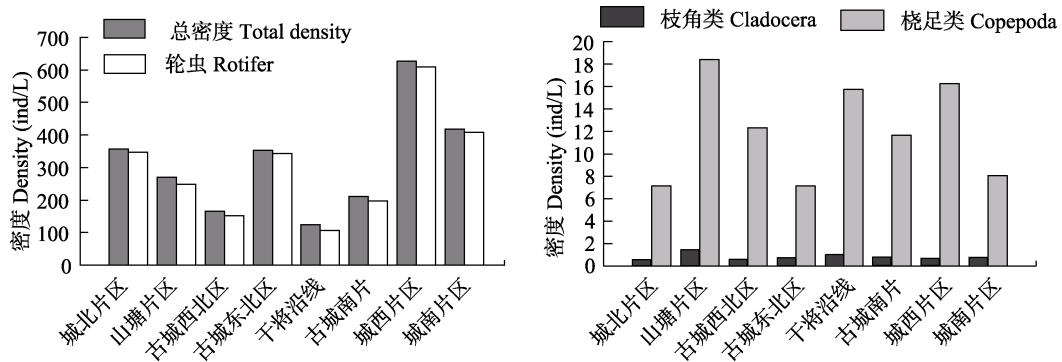


图 4 苏州城区河道浮游动物密度年均值

Fig. 4 Average annual density of zooplankton in Suzhou urban river

城北片区. Northern of the city; 山塘片区. Shantang area; 古城西北区. Northwestern of the ancient city; 古城东北区. Northeastern of the ancient city; 干将沿线. Ganjiang area; 古城南片区. Southern of the ancient city; 城西片区. Western of the city; 城南片区. Southern of the city

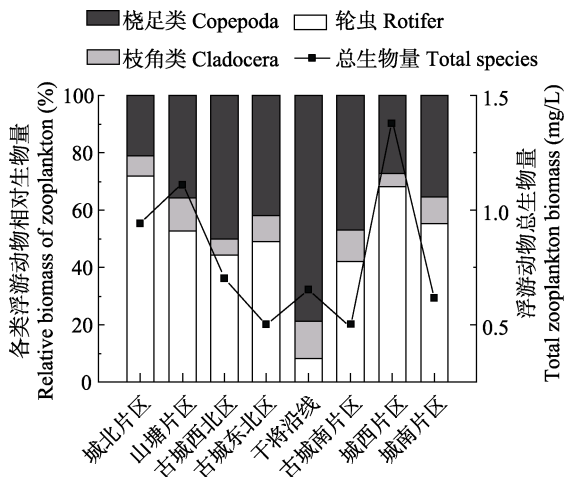


图 5 苏州城区河道浮游动物生物量年均值

Fig. 5 Average annual biomass of zooplankton in Suzhou urban river

城北片区. Northern of the city; 山塘片区. Shantang area; 古城西北区. Northwestern of the ancient city; 古城东北区. Northeastern of the ancient city; 干将沿线. Ganjiang area; 古城南片区. Southern of the ancient city; 城西片区. Western of the city; 城南片区. Southern of the city

干将沿线占总密度 85.3%的轮虫其生物量仅占 8.1%，而占总密度 14.7%的枝角类和桡足类的生物量却占到 91.9%。

2.5 后生浮游动物与环境因子

结合全年 6 次调查的浮游动物优势种及物

种出现的频率,选取 24 种年度浮游动物优势种 (表 2) 进行去趋势对应分析,其最大梯度 4.38, 大于 4, 因此采用典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA)。并对 11 个环境因子进行蒙特卡洛检验, 最终筛选出 7 个环境因子进行排序分析 (图 6)。典范对应分析显示, 轴一、轴二的特征值为 0.213 和 0.078, 共解释了 29.1% 的浮游动物的丰度变化, 水温、电导率与轴一呈负相关, 溶解氧、透明度与轴一呈正相关, 叶绿素 a 与轴二呈正相关, 总氮与轴二呈负相关。萼花臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、长肢多肢轮虫、模式有爪猛水蚤与溶解氧和透明度呈正相关, 曲腿龟甲轮虫 (*Keratella valga*) 与总氮和总磷呈正相关, 北碚中剑水蚤、短尾温剑水蚤、广布中剑水蚤、长肢秀体溞、短尾秀体溞、微型裸腹溞、近亲裸腹溞、锯缘真剑水蚤 (*Eucyclops serrulatus*) 与水温、电导率和总磷呈正相关, 螺形龟甲轮虫、真翅多肢轮虫、颈沟基合溞、长额象鼻溞、汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*)、右突新镖水蚤、中华窄腹剑水蚤、跨立小剑水蚤与叶绿素 a 呈正相关, 中华哲水蚤 (*Sinocalanus sinensis*)、英勇剑水蚤与总氮呈负相关, 角突臂尾轮虫与环境因子相关性不显著。

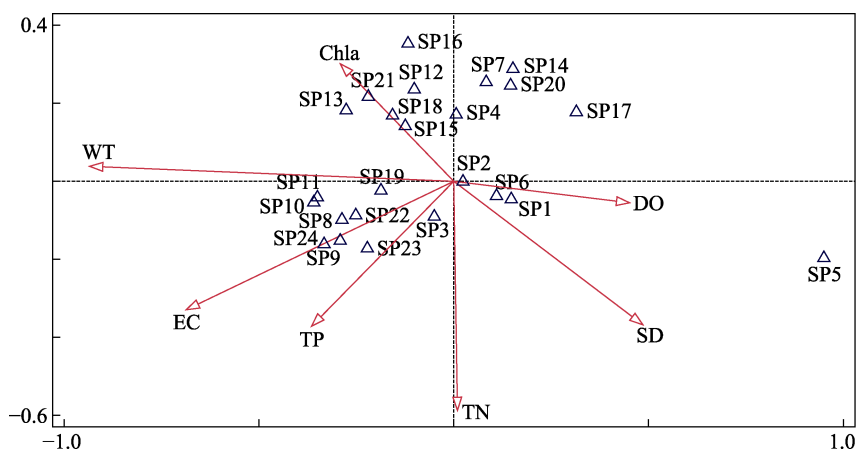


图 6 浮游动物优势种与环境因子的典范对应分析

Fig. 6 Canonical correspondence analysis (CCA) for the relationship between dominant zooplankton species and environmental factors

SP1. 萼花臂尾轮虫; SP2. 角突臂尾轮虫; SP3. 曲腿龟甲轮虫; SP4. 螺形龟甲轮虫; SP5. 广布多肢轮虫; SP6. 针簇多肢轮虫; SP7. 真翅多肢轮虫; SP8. 长肢秀体溞; SP9. 短尾秀体溞; SP10. 微型裸腹溞; SP11. 近亲裸腹溞; SP12. 长额象鼻溞; SP13. 颈沟基合溞; SP14. 中华哲水蚤; SP15. 汤匙华哲水蚤; SP16. 右突新镖水蚤; SP17. 模式有爪猛水蚤; SP18. 中华窄腹剑水蚤; SP19. 锯缘真剑水蚤; SP20. 英勇剑水蚤; SP21. 跨立小剑水蚤; SP22. 广布中剑水蚤; SP23. 北碚中剑水蚤; SP24. 尾温剑水蚤; Chla. 叶绿素 a; WT. 水温; EC. 电导率; TP. 总磷; TN. 总氮; SD. 透明度; DO. 溶解氧

SP1. *Brachionus calycifloru*; SP2. *Brachionus angularis*; SP3. *Keratella valga*; SP4. *Keratella cochlearis*; SP5. *Polyarthra dolichoptera*; SP6. *Polyarthra trigla*; SP7. *Polyarthra eurypetra*; SP8. *Diaphanosoma leuchtenbergianum*; SP9. *Diaphanosoma brachyurum*; SP10. *Moina micrura*; SP11. *Moina affinis*; SP12. *Bosmina longirostris*; SP13. *Bosminopsis deitersi*; SP14. *Sinocalanus sinensis*; SP15. *Sinocalanus dorrii*; SP16. *Neodiantomus schmackeri*; SP17. *Onychocamptus mohammed*; SP18. *Limnoithona sinensis*; SP19. *Eucyclops serrulatus*; SP20. *Cyclops strenuus*; SP21. *Microcyclops varicans*; SP22. *Mesocyclops leuckarti*; SP23. *Mesocyclops pehpeiensis*; SP24. *Thermocyclops brevifurcatus*; Chla. Chlorophyll a; WT. Water temperature; EC. Electric conductivity; TP. Total phosphorus; TN. Total nitrogen; SD. Transparency; DO. Dissolved oxygen

3 讨论

3.1 后生浮游动物与环境因子关系

浮游动物运动能力弱, 对环境反应敏感, 水环境的变化对浮游动物群落结构影响较明显。由图 6 分析可知, 水温、溶解氧、叶绿素 a、透明度、氮磷营养盐等因子是影响苏州城区河道浮游动物群落结构的重要环境因子, 这与大量其他研究发现的现象相一致 (Sarma et al. 2005, Marques et al. 2006, 王松等 2018, 胡艺等 2020)。本研究发现, 水温是影响苏州城区河道浮游动物群落结构的主要因素之一, 有多种浮游动物与水温呈正相关, 这是因为水温对

浮游动物生长繁殖以及群落的演替发挥了重要作用 (Sarma et al. 2005), 并影响浮游动物的摄食效率 (Holste et al. 2006), 此外水温对浮游植物群落结构也有显著影响 (王振方等 2019), 从而影响以浮游植物为食的浮游动物。本研究发现, 溶解氧可以对浮游动物群落结构产生影响, 因为溶解氧作为水生生物的必要生存条件之一, 其含量的高低可以直观表征生物的生活环境状况 (周莹 2016), 这也与杜明敏等 (2013) 发现溶解氧会对浮游动物产生较大影响的研究结果相一致。本研究发现, 苏州城区河道的多数浮游动物与叶绿素 a 呈正相关, 叶绿素 a 标志着水体的初级生产力, 反映了浮游植物在水

体中的状况，其含量与浮游植物丰度密切相关（陈光荣等 2010），而浮游植物可以通过上行效应影响到浮游动物的丰度。苏州城区河道透明度与多种浮游动物呈负相关，而透明度越高浮游植物数量越少（蒋嫣红等 2012），因此间接影响浮游动物。水体中的氮、磷含量通常会影响到浮游植物群落，从而间接影响到浮游动物群落（邱小琮等 2012），苏州城区河道受到周边地区生活污水、建筑垃圾和工厂废液等多种营养物质输入，氮磷营养盐充足，因此对浮游动物群落结构影响较大。

3.2 后生浮游动物群落结构分析

苏州城区河道浮游动物生物量各片区间变化并不完全与密度变化一致，原因在于密度与浮游动物个体数目有关，而生物量与浮游动物个体的大小有关，苏州城区河道的浮游动物群落特征为体型较小的轮虫丰度较高，体型较大的枝角类、桡足类丰度低但生物量相对较高。浮游动物群落结构以小型个体物种为主，这种现象在江河、湖泊、城市河道等不同水体中均有发现（姜作发等 2006，王凤娟等 2006，范可章等 2012）。轮虫与枝角类具有生存资源的竞争，枝角类的种类和丰度低时，轮虫受到的竞争压力小（杨亮杰等 2014），苏州城区河道枝角类种类、丰度较低，对轮虫的抑制作用较小。苏州城区河道纵横交错，闸门众多，水流顺逆不定，水情复杂，而轮虫因其独特的孤雌生殖方式，繁殖速度快，发育时间短，可以迅速适应快速变换的水生态环境，形成优势类群（吴利等 2011）。有研究表明，随着富营养化程度加剧，轮虫种数和数目都增多，甲壳类的种类将减少（王凤娟 2007），苏州城区河道由于生活污水、工业废水和地表径流的汇入，各区域氮磷营养盐皆达到富营养化水平，可能是导致轮虫丰度高的原因。苏州城区河道中蓝藻属于浮游植物优势种群（马婕等 2021，其会限制枝角类和桡足类的生长（Zhang et al. 2013）。

3.3 生境异质性对后生浮游动物群落结构的影响

苏州城区河道各片区间的生境差异来源比较复杂，地理位置、周边环境、水体的水文条件和理化因子等因素均对其产生影响，不同的生境导致浮游动物群落结构有一定空间异质性。调查期间发现城西片区含有最高浓度的总氮和总磷，此区域在实地采样时发现周边有拆迁建筑垃圾堆放，有研究发现建筑垃圾等颗粒物易于磷化合物吸附，随降雨径流进入河道（吴蓓等 2007），导致河道氮磷营养盐丰富，富营养化严重。此片区的浮游动物丰度最高，而种类最少，这与富营养型水体中发现的浮游动物表现为数量多种类少的结果相符（胡艺等 2020）。城南片区浮游动物丰度为第二高，此片区处于苏州河道下游，地势平坦，河道较小，水流缓慢，利于浮游动物生存，同时由于汇集了上游大量生活污水等有机物污染（魏攀龙等 2019），微生物大量繁殖溶解氧较低，浮游动物种类多为耐污种。城北片区浮游动物丰度和种类数均较高，此区河道与阳澄湖交汇，河道宽广，流速缓慢，营养物质丰富，利于浮游动物生存。古城东北区靠近城北片区，与城北区的外塘河和新开河属同一水系，两区河道水流相通且地理位置接近，生境较相似，因此浮游动物丰度和种类数均较接近。山塘片区临近虎丘湿地公园，水生植物种类和数量多，岸边多绿植，能够给浮游动物提供多样化的栖息空间，而且多是上游干流河道，水质较好，因此浮游动物种类数最多，丰度相对较低。古城南片区浮游动物丰度较低，因为此区紧邻外城河，由于外城河为水路主干道，水体深度大，游船较多，搅动水体波浪较大，水流较快，浮游动物游泳能力弱，不能抵抗水流随波逐流，因此这一生境不是浮游动物的理想栖息处。古城西北区处于十字洋河、山塘河和外城河等大河交汇处，此区水情复杂，水流不稳定，水体受到一定程度的干扰，浮游动物可稳定栖息的生境较少，丰度低。干将沿线区位于干将公路旁，往

来汽车较多,将路面上大量的泥土粉尘以及排放的有毒气体、重金属和烟尘微粒等物质吹到河道里,严重危害到浮游动物生存,可能是导致此生境中浮游动物丰度最低的原因。

浮游动物的生态位在一定程度上反映出物种栖息生境类型的多样性以及资源的利用情况(高原等 2019),而生境的差异使得苏州城区河道浮游动物的动态分布具有复杂性,各优势种生态位宽度值也存在差异。生态位宽的优势种,往往具有更强的耐污能力和生态适应性,对生境要求低,利用资源能力强(付显婷等 2020)。生态位窄的优势种,对环境的适应能力较差,环境因素会对其分布范围产生很大程度的约束(Pandit et al. 2009)。有研究表明,广生态位物种主要对空间因素作出响应,窄生态位物种主要对环境因素作出响应(付显婷等 2020)。萼花臂尾轮虫、长额象鼻溞、广布中剑水蚤等优势种的生态位宽度均较高,在各片区都是优势种,表现出更强的生境适应能力。生态位较窄的颈沟基合溞、右突新镖水蚤与叶绿素呈正相关,在叶绿素含量高的城西片区大量分布。总体来看,苏州城区河道生态位重叠指数小的浮游动物占多数,表明种群之间利用资源的互补性较强,有利于减少物种对有限资源或生存空间的竞争,这也与各片区在空间尺度上的多样化及各优势种对生境适应能力的差异有关。

参 考 文 献

- Holste L, Peck M A. 2006. The effects of temperature and salinity on egg production and hatching success of Baltic *Acartia tonsa* (Copepoda: Calanoida): a laboratory investigation. *Marine Biology*, 148(5): 1061–1070.
- Marques S C, Azeiteiro U M, Marques J C, et al. 2006. Zooplankton and Ichthyoplankton communities in a temperate estuary: spatial and temporal patterns. *Journal of Plankton Research*, 28(3): 297–312.
- Massicotte P, Frenette J J, Proulx R, et al. 2014. Riverscape heterogeneity explains spatial variation in zooplankton functional evenness and biomass in a large river ecosystem. *Landscape Ecology*, 29(1): 67–79.
- Pandit S N, Kolasa J, Cottenie K. 2009. Contrasts between habitat generalists and specialists: an empirical extension to the basic metacommunity framework. *Ecology*, 90(8): 2253–2262.
- Sarma S S S, Nandini S, Gulati R D. 2005. Life history strategies of Cladocerans: comparisons of tropical and temperate taxa. *Hydrobiologia*, 542(1): 315–333.
- Zhang J, Xie P, Tao M, et al. 2013. The impact of fish predation and Cyanobacteria on zooplankton size structure in 96 Subtropical Lakes. *PLoS One*, 8(10): e76378.
- 陈光荣, 雷泽湘, 谭镇, 等. 2010. 环境因子对广东城市湖泊后生浮游动物的影响. *水生态学杂志*, 31(4): 28–32.
- 陈磊, 高东泉, 舒凤月, 等. 2016. 南四湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系. *动物学杂志*, 51(1): 113–120.
- 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 等. 2019. 淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系. *环境科学*, 40(10): 4513–4522.
- 杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等. 2013. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化. *生态学报*, 33(17): 5407–5418.
- 范可章, 杨家新, 王荣, 等. 2012. 阜阳城区水体浮游动物群落周年结构特征及其与水质的关系. *城市环境与城市生态*, 25(5): 16–21.
- 付江波, 赵文信, 胡红勇, 等. 2019. 苏州市古城区河道水质时空变化分析与评价. *水利科技与经济*, 25(2): 22–27.
- 付显婷, 杨薇, 赵彦伟, 等. 2020. 白洋淀浮游动物群落结构与水环境因子的关系. *农业环境科学学报*, 39(6): 1271–1282.
- 高原, 王超, 刘乾甫, 等. 2019. 珠三角河网不同水文期浮游动物优势种及生态位. *水生态学杂志*, 40(6): 37–44.
- 郭欧阳. 2018. 长江下游干流浮游动物群落结构及其与环境因子相关性的研究. 上海: 上海师范大学硕士学位论文.
- 国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 88–285.
- 胡艺, 李秋华, 何应, 等. 2020. 贵州高原水库浮游动物分布特征及影响因子——以阿哈水库为例. *中国环境科学*, 40(1): 227–236.
- 姜作发, 唐富江, 董崇智, 等. 2006. 黑龙江水系主要江河浮游动物种群结构特征. *东北林业大学学报*, 34(4): 64–66.
- 蒋嫣红, 程婧蕾, 王丽卿. 2012. 公园水体浮游植物与环境因子的关系. *生态学杂志*, 31(3): 606–613.

- 焦海峰, 施慧雄, 尤仲杰, 等. 2011. 渔山岛岩礁基质潮间带大型底栖动物优势种生态位. 生态学报, 31(14): 3928–3936.
- 林志, 万阳, 徐梅, 等. 2018. 淮南迪沟采煤沉陷区湖泊后生浮游动物群落结构及其影响因子. 湖泊科学, 30(1): 171–182.
- 马婕, 申利亚, 何培民, 等. 2021. 苏州城区河道浮游植物功能群演替特征及其对环境因子的响应. 上海海洋大学学报, 30(1): 103–112.
- 潘超, 刘林峰, 高健, 等. 2018. 神农架大九湖后生浮游动物群落结构和水质评价. 长江流域资源与环境, 27(3): 564–573.
- 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪. 2012. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析. 生态学杂志, 31(4): 896–901.
- 王凤娟. 2007. 巢湖东半湖浮游生物与水质状况及营养类型评价. 合肥: 安徽农业大学硕士学位论文.
- 王凤娟, 胡子全, 汤洁, 等. 2006. 用浮游动物评价巢湖东湖区的水质和营养类型. 生态科学, 25(6): 550–553.
- 王硕, 杨涛, 李小平, 等. 2019. 渭河流域浮游动物群落结构及其水质评价. 水生生物学报, 43(6): 1333–1345.
- 王松, 陈红, 刘清, 等. 2018. 汉城湖浮游动物群落结构特征及与水质关系. 生态科学, 37(2): 114–123.
- 王振方, 张玮, 杨丽, 等. 2019. 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 40(5): 2249–2257.
- 魏攀龙, 潘杨, 戴天杰, 等. 2019. 采用水体表观污染指数法评价苏州城市水体表观质量. 环境工程, 37(4): 12–16.
- 吴蓓, 汪翔, 黄玮, 等. 2007. 苏州城区不同功能区地表径流污染特征. 水资源保护, 23(2): 57–59, 63.
- 吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 2011. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 23(4): 619–625.
- 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 等. 2014. 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, 38(4): 720–728.
- 尹丽平, 夏昇, 顾静, 等. 2018. 上海青草沙水库浮游甲壳类群落结构的特征. 上海海洋大学学报, 27(6): 864–874.
- 袁雅琴, 周春丽, 高海燕, 等. 2017. 太湖典型入湖河流莲花荡浮游动物群落季节演替及其环境指示意义初步研究. 动物学杂志, 52(5): 812–823.
- 张立. 2015. 城市缓流水体表观质量评价与分类研究. 苏州: 苏州科技学院硕士学位论文.
- 周莹. 2016. 水生生物对水体溶解氧日变化规律影响. 沈阳: 沈阳师范大学硕士学位论文.