

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.007

里下河腹部地区典型湖泊浮游动物 演替特征及水质评价

王亚宁¹,徐明²,许静波²,徐剑斌²,杨俊杰²,
李一平¹,朱立琴³,唐春燕¹

(1. 河海大学环境学院,江苏南京 210098; 2. 江苏省泰州引江河管理处,江苏泰州 225321;
3. 河海大学马克思主义学院,江苏南京 210098)

摘要:为探究大纵湖浮游动物群落演替特征和驱动因素,综合评价输水工程稳定运行后其水环境状况,于2017年1月至2019年12月在位于里下河腹部地区的大纵湖开展为期3 a的浮游动物及环境因子逐月调查。调查结果表明,调查期间在大纵湖共鉴定出浮游动物49种,其中轮虫、枝角类及桡足类分别为33种、9种和7种;种间联结性检验统计量表明,大纵湖优势种总体上呈显著正关联,且关联性逐年增长,浮游动物群落结构趋于稳定;浮游动物平均密度为623.17个/L,呈下降趋势,平均生物量为1.63 mg/L,呈上升趋势,相较于轮虫,枝角类和桡足类的比重逐渐上升。冗余分析结果表明,叶绿素a、总氮和水温是影响大纵湖浮游动物物种演替的重要因子。采用Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielou均匀度指数评价大纵湖污染情况,结果均为寡污,B/T指数与TLI富营养评价结果相符合,大纵湖处于中-富营养状态;浮游动物对大纵湖水温、营养盐和叶绿素a的变化有良好的响应。

关键词:浮游动物;受水区;小型湖泊;种间联结性;水质评价;里下河

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)05-0049-09

Zooplankton succession characteristics and water quality evaluation of typical lakes in the hinterland of Lixia River

WANG Yaning¹, XU Ming², XU Jingbo², XU Jianbin²,
YANG Junjie², LI Yiping¹, ZHU Liqin³, TANG Chunyan¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Taizhou Yinjiang Cannal Administration of Jiangsu Province, Taizhou 225321, China;
3. College of Marxism, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This study conducted a three-year monthly survey of zooplankton and environmental factors in typical Dazong Lake from January 2017 to December 2019, in order to explore the succession characteristics and driving factors of zooplankton community in Dazong Lake and comprehensively evaluate its water quality after the stable operation of water delivery project. The results show that 49 species of zooplankton were identified in Dazong lake during the survey, including 33, 9 and 7 species of rotifers, cladocerans and copepods respectively. The interspecific connectivity statistics show that the dominant species in Dazong Lake showed a significant positive correlation overall, and the correlation increased year by year, which meant the zooplankton population structure tended to be stable. Average density was 623.17 per liter, showing a downward trend, and the average biomass was 1.63 mg/L, showing an upward trend. Compared with rotifers, the proportion of cladocerans and stilt gradually increased. The results of RDA redundancy analysis show that chlorophyll a, total nitrogen and water temperature were important factors affecting the succession of zooplankton species in Dazong Lake. The organic pollution of Dazong Lake was evaluated by Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index and

基金项目: 泰州引江河——里下河地区输水干线生态调度研究(2020035);国家自然科学基金重点项目(52039003);中央高校基本科研业务费专项(B200204014)

作者简介: 王亚宁(1998—),女,硕士研究生,主要从事水环境综合治理研究。E-mail: wyncandice@163.com

引用本文: 王亚宁,徐明,许静波,等.里下河腹部地区典型湖泊浮游动物演替特征及水质评价[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):49-57.

WANG Yaning, XU Ming, XU Jingbo, et al. Zooplankton succession characteristics and water quality evaluation of typical lakes in the hinterland of Lixia River [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 49-57.

Pielou evenness index. The results were low pollution and the B/T index was consistent with the results of TLI eutrophication evaluation, thus Dazong Lake was in a medium eutrophic state. Zooplanktons have a good response to the changes of environmental factors in Dazong Lake, which can be applied to the evaluation of water ecological status in the lake area.

Key words: zooplankton; water receiving area; small-sized lake; interspecific connectivity; water quality assessment; Lixia River

浮游动物是水生态系统中的次级生产者,它们不仅通过摄食浮游植物影响浮游植物的多样性和丰度^[1],而且是鱼类等水生脊椎动物的重要生物饵料,在水生态系统中发挥了承上启下的重要作用^[2-3]。浮游动物与水环境因子关系密切,是水体中重要的指示生物^[4],因此被广泛应用于水质评价、水污染治理等方面^[5-6]。明确浮游动物的群落结构特征及驱动因素是水生态评价的基础,不同水体其主要影响因素各不相同^[7-9]。对于一般水体,除常规的理化因子外,浮游植物作为食物源对浮游动物的生长繁殖有较大的影响^[10]。对于保护区河流,河流的流动状态、水文状况、岸线类型等也会对浮游动物产生重要的影响^[11]。对于过水性湖泊,陈业等^[12]研究发现水位波动是影响浮游动物群落结构的最显著因素。对于城市水体,营养盐和重金属影响较为突出^[13]。浮游动物具有生活周期短、繁殖能力强等特点,对环境变化非常敏感,相较于浮游植物和大型底栖动物,对环境因子变化的响应更为迅速,更适合应用于小型湖泊的水生态状况评价^[14]。

里下河腹部地区($119^{\circ}8' E \sim 120^{\circ}56' E, 32^{\circ}12' N \sim 34^{\circ}10' N$)位于江苏省中部长江、淮河两大水系交融地带,河网密集、湖荡众多^[15],总面积约 $695 km^2$,对降低区域洪峰、保护生物多样性、促进周边经济绿色发展具有重要作用。然而随着城市化进程的加快、人类活动增强,水体富营养化、湿地功能退化等多重环境问题的胁迫日益显著^[16-19]。孟顺龙等^[20]研究了里下河河网区浮游动物及其在水质评价中的应用,结果表明,里下河腹部地区典型水体在枯水期基本处于清洁状态,而在丰水期基本处于中度污染状态,该研究重点区域为河网区,而河网区与湖荡区水体理化性质及受水响应特征均有较大差异,对于湖荡区典型湖泊浮游动物群落结构特征及水生态健康状况还需要进一步研究。

本文选取里下河腹部地区典型湖泊——大纵湖,对其水质因子及浮游动物开展了为期 3 a(2017—2019 年)的逐月监测调查,通过优势种生态位特征和种间联结性系统分析了大纵湖浮游动物群落结构,结合 RDA 冗余分析探讨了浮游动物与环境因子间的响应关系,并采用水质生物学指标综合评价大纵湖水质状况,以期为里下河腹部地区水资源合理开发和生态调度提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样点设置

大纵湖湖面呈椭圆形,总面积约 $37 km^2$,其中自由水面面积约 $10 km^2$,其余为圈圩和围网面积。大纵湖湖底平坦,平均水深约为 1 m。大纵湖的主要入湖河流为南部湖区的鲤鱼河和中引河,主要出湖河流为北部湖区的蟒蛇河。为了减少近岸围网养殖区人类活动的干扰对采样结果造成的偶然影响,在大纵湖敞水区共布设 3 个监测点(采样点 1、2、3)(图 1),于 2017 年 1 月至 2019 年 12 月开展了为期 3 a 的逐月采样,采样时间为每月月底。

1.2 样品采集与处理

水质指标(浊度、叶绿素 a、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮、总氮(TN)和总磷(TP))参考 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的测定方法测定。

浮游动物采样时,枝角类、桡足类用有机玻璃采水器采集 10 L 水样,经 25 号浮游生物网过滤,放入加入 7% 甲醛的小方瓶中固定,回到实验室静置沉淀 24 h 后浓缩定容到 30 mL。轮虫用有机玻璃采水器采集 1 L 混合水样,加入 10 ~ 15 mL 鲁哥氏液固定,回实验室静置 48 h 后吸取上清液浓缩定容至 30 mL。

浮游动物的观察计数用 1 mL 浮游动物计数框在 10×10 倍光学显微镜下进行,每个样品计数两片,最终结果为两片平均值;若两片的计数结果相差达到 15%,需要额外进行第 3 片取值,取个数更相近的两片求平均值,作为最终的计数结果,再换算成每升水样中浮游动物的个数,即为浮游动物密度。

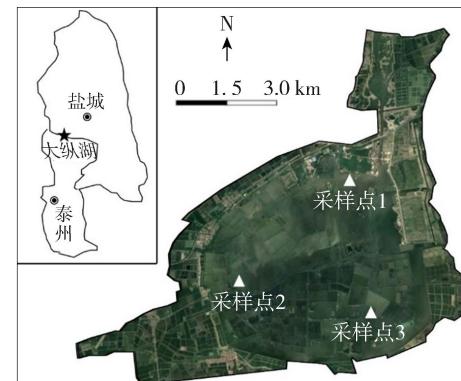


图 1 研究区域及监测点位布置

Fig. 1 Study area and monitoring site arrangement

浮游动物鉴定参照文献[21-25]。生物量的计算中,枝角类根据体长-体重回归方程换算^[26],桡足类根据外形的几何形状换算^[27],轮虫根据平均湿重进行换算^[26]。

1.3 统计分析

根据优势度指数 $Y>0.02$ 确定大纵湖浮游动物优势种,采用经 Colewell 等进行加权的生态位宽度(B_i)、生态位重叠指数差(ΔO_{ik})和生态响应速率(R)分析大纵湖浮游动物优势种的生态位特征,并采用 Schluter 的方差比率(V)法判断物种间的总体关联性^[28]:

$$Y = (N_i/N) f_i \quad (1)$$

$$B_i = 1 / \left(n \sum_{j=1}^n P_{ij}^2 \right) \quad (2)$$

$$\Delta O_{ik} = \sum_{j=1}^n P_{ij} P_{kj} / \sum_{j=1}^n P_{ij}^2 \quad \Delta O_{ik} = \sum_{k=1}^S O_{ik} - \sum_{i=1}^S O_{ik} \quad (3)$$

$$R = B_i / \Delta O_{ik} \quad (i = k) \quad (4)$$

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i (1 - P_i)^2 \quad S_T^2 = (1/n) \sum_{j=1}^n (T_j - t)^2 \quad R = S_T^2 / \delta_T^2 \quad (5)$$

其中

$$P_{ij} = n_{ij}/N_i \quad P_i = n_i/n$$

式中: N_i 为样点中某种生物的总个体数; N 为样点中各生物的总个体数; f_i 为某物种出现的频率; P_{ij} 为第 i 个优势种在第 j 个样点出现的个体数占该物种所有个体数的比例; S 为浮游动物优势种总种数; n 为样点总数; n_i 为物种 i 出现的样点数; T_j 为样点 j 内出现的优势种类数; t 为各样点中优势物种数的平均数; δ_T 为总体样本方差,即所有物种出现频度的方差; S_T 为所有采样点物种数的方差。当 $V<1$ 时,优势物种间总体为负协变关系;当 $V>1$ 时,总体为正协变关系,采用检验统计量 $W=Vn$ 检验 V 值偏离 1 的显著程度。

采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)和 B/T 指数($Q_{B/T}$)分别从有机污染和富营养状态进行大纵湖水质生物学评价:

$$H' = - \sum_{i=1}^S [(N_i/N) \log_2(N_i/N)] \quad (6)$$

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (7)$$

$$J = H' / \ln S \quad (8)$$

$$Q_{B/T} = B/T \quad (9)$$

式中: B 为臂尾轮虫属(富营养型种)的种数; T 为异尾轮虫属(贫营养型种)的种数。 $Q_{B/T}<1$ 为贫营养型湖泊; $1 \leq Q_{B/T} \leq 2$ 为中营养型湖泊; $Q_{B/T}>2$ 为富营养型湖泊,其余生物学评价标准见表 1^[29]。

基于 R 语言对浮游动物与环境因子进行冗余分析(RDA)。在进行冗余分析前,进行去趋势对应性分析(DCA),DCA 排序结果小于 3,表明可以对浮游动物与环境因子进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 大纵湖环境因子的变化

大纵湖环境因子逐月变化情况如图 2 所示。各环境因子呈现季节性变化规律,其中浊度和 TN 呈现冬春季上升、夏秋季下降的变化趋势,于 3 月达到年峰值;COD_{Mn}、TP、氨氮和叶绿素 a 则呈现出春夏季上升、秋冬季下降的变化趋势,于 6—9 月达到年峰值。2017—2019 年浊度和 TP 成上升趋势,高锰酸盐指数呈下降趋势,与 2018 年相比(4.43~10.95 μg/L),叶绿素 a 月平均值波动范围缩小(6.86~8.39 μg/L)。

2.2 优势种生态位特征与种间联结性

大纵湖 2017—2019 年逐月调查的定量样点中,共鉴定出浮游动物 49 种,其中轮虫 33 种,占 67.35%;枝角类 9 种,占 18.37%;桡足类 7 种,占 14.29%。根据优势度大于 0.02 确定 2017 年大纵湖浮游动物优势种

表 1 生物指数与水质等级标准

Table 1 Biological index and water quality grade standard

污染程度	H'	D	J
寡污	>3	>3	>0.5
β -中污	>2~3	>2~3	>0.4~0.5
α -中污	>1~2	>1~2	>0.3~0.4
重污	0~1	0~1	0~0.3

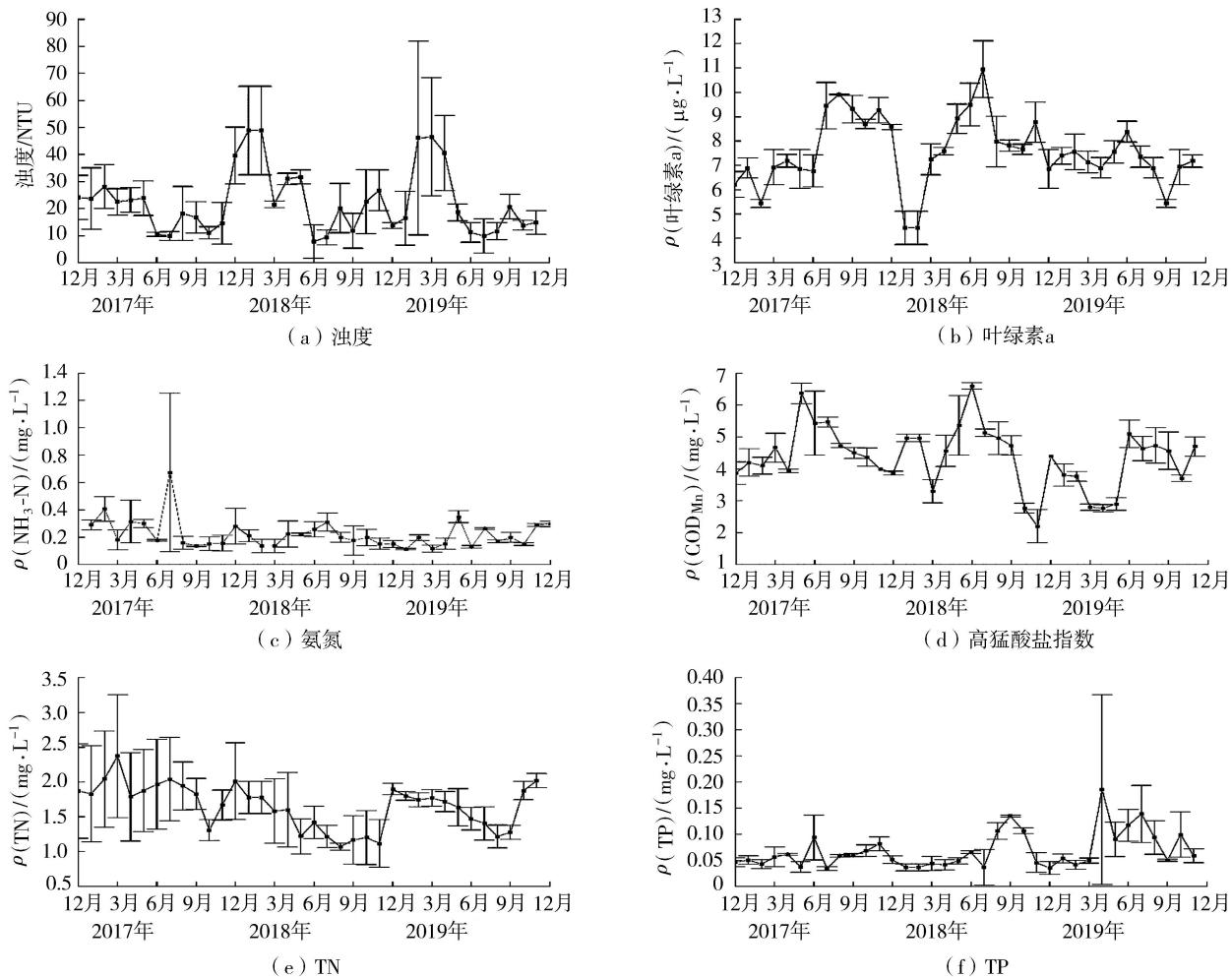


图 2 大纵湖环境因子的逐月变化

Fig. 2 Monthly changes of environmental factors in Dazong Lake

有 7 种: 莲花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus* Pallas)、方形臂尾轮虫 (*Brachionus quadridentatus*)、晶囊轮虫 (*Asplanchnidae*)、曲腿龟甲轮虫 (*Keratella valga* Ehrenberg)、针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla* Ehrenberg) 和真翅多肢轮虫 (*Polyarthra euryptera*)。2018 年优势种有 9 种, 方形臂尾轮虫和真翅多肢轮虫不再是优势种, 独角聚花轮虫 (*Conochilus unicornis*)、迈氏三肢轮虫 (*Filinia maio*) 和脾状四肢轮虫 (*Tetramastix opoliensis*) 成为新增加的优势种。在 2018 年的基础上, 2019 年新增优势种 2 种, 分别为剪形臂尾轮虫 (*Brachionus forficula*) 和螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*)。

由表 2 可知, 2017 年晶囊轮虫有最大的发展前景 ($\Delta O_{ik} = 0.063$), 而真翅多肢轮虫的发展受到极大限制 ($\Delta O_{ik} = -1.796$), 到 2018 年已不再是优势种。2018 年针簇多肢轮虫 ($\Delta O_{ik} = 0.172$) 发展最为可观, 独角聚花轮虫的发展空间受到限制 ($\Delta O_{ik} = -0.310$), 2018 年优势种生态位重叠指数差波动最小, 而 2019 年部分物种生态位重叠指数差达 3 a 的最大值与最小值, 如脾状四肢轮虫 ($\Delta O_{ik} = 7.603$) 和剪形臂尾轮虫 ($\Delta O_{ik} = -11.028$)。综合 3 a 的优势种发展趋势, 莲花臂尾轮虫、脾状四肢轮虫、曲腿龟甲轮虫和针簇多肢轮虫属于较为稳定的发展型浮游动物, 方形臂尾轮虫、独角聚花轮虫、剪形臂尾轮虫和迈氏三肢轮虫属于衰退型浮游动物。大纵湖 2017—2019 年方差比率 (V) 值均大于 1, 且检验统计量 (W) 均大于 $\chi^2_{0.05}$ (表 3), 表明浮游动物优势种间总体上呈显著正关联, 且关联性逐年增长, 说明浮游动物群落结构逐渐趋于稳定^[30]。

2.3 浮游动物密度与生物量

大纵湖 2017—2019 年浮游动物平均密度为 623.17 个/L, 呈下降趋势, 从 720.15 个/L(2017 年)减少到 456.43 个/L(2019 年)。而平均生物量为 1.63 mg/L, 呈上升趋势, 从 0.93 mg/L(2017 年)上升到 2.07 mg/L(2019 年)。大纵湖浮游动物生物量和密度的变化特征均为夏季大于秋季大于春季大于冬季(图 3),

表2 大纵湖2017—2019年优势种生态位宽度、生态位重叠指数差和生态响应速率
Table 2 Niche width, niche overlap difference and ecological response rate of dominant species in Dazonghu Lake from 2017 to 2019

优势种	Y			B _i			ΔO _{ik}			R		
	2017年	2018年	2019年	2017年	2018年	2019年	2017年	2018年	2019年	2017年	2018年	2019年
独角聚花轮虫	<0.02	0.036	0.032	—	0.922	0.898	—	-0.310	-1.904	—	-2.974	-0.471
萼花臂尾轮虫	0.027	0.087	0.045	0.905	0.982	0.947	0.101	0.118	4.912	8.989	8.341	0.193
方形臂尾轮虫	0.054	<0.02	<0.02	0.918	—	—	0.266	—	—	3.448	—	—
剪形臂尾轮虫	<0.02	<0.02	0.020	—	—	0.827	—	—	-11.028	—	—	-0.075
晶囊轮虫	0.044	0.058	0.107	0.979	0.936	0.928	0.663	-0.205	0.146	1.477	-4.564	6.355
螺形龟甲轮虫	<0.02	<0.02	0.031	—	—	0.902	—	—	-1.442	—	—	-0.625
迈氏三肢轮虫	<0.02	0.050	0.045	—	0.965	0.885	—	-0.006	-4.371	—	-172.239	-0.202
脾状四肢轮虫	<0.02	0.060	0.031	—	0.984	0.951	—	0.134	7.603	—	7.353	0.125
曲腿龟甲轮虫	0.037	0.026	0.043	0.903	0.979	0.983	0.237	0.097	6.051	3.813	10.051	0.162
针簇多肢轮虫	0.087	0.080	0.068	0.958	0.990	0.930	0.530	0.172	0.034	1.807	5.770	27.397
真翅多肢轮虫	0.046	<0.02	<0.02	0.575	—	—	-1.796	—	—	-0.320	—	—

注:表中“<0.02”和“—”表示在所指年份下,所指物种为非优势物种。

其中2018年密度峰值最高,出现在8月(1905.67个/L),2017年和2019年密度峰值均出现在9月(1699.67个/L和1114个/L)。各年度的生物量最高值均出现在9月,最低值均出现在1月。从不同类型的浮游动物分类占比来看,轮虫是浮游动物密度的重要贡献者(占比95.58%),而桡足类(占比2.31%)和枝角类(占比2.11%)密度较低(图4),2017—2019年轮虫密度的降低是浮游动物平均密度呈下降趋势的主要原因;枝角类是浮游动物生物量的重要贡献者(占比48.87%),桡足类(占比41.25%)其次,轮虫(占比9.88%)生物量较低,2017—2019年枝角类生物量的上升是浮游动物平均生物量呈上升趋势的主要原因。

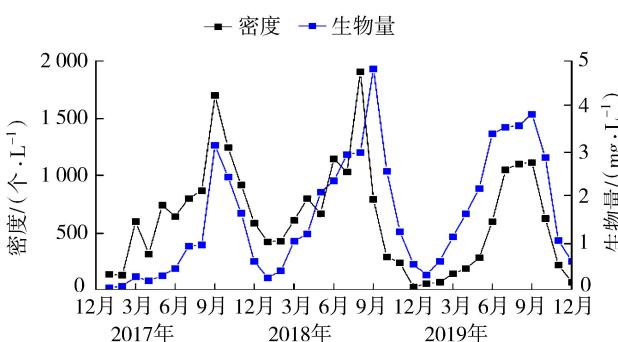


图3 大纵湖浮游动物密度和生物量逐月变化

Fig.3 Monthly variation in density and biomass of zooplankton in Dazong Lake

2.4 浮游动物与环境因子冗余分析

由于2018年有较全的环境因子数据(包括温度和水位等),为增加冗余分析的可信度,选取2018年的浮游动物特征值进行消除趋势的对应分析,具体包括轮虫优势种、枝角类和桡足类优势度排名前两位的物种(表4),结果显示第一排序轴长度为2.59,小于3,故可以进行冗余分析。冗余分析排序图(图5)显示,前两轴的特征值分别为43.98%和20.86%,前两轴的解释率占总解释率的64.84%,其中叶绿素a与第一轴呈显著负相关关系,浊度、水温和高锰酸盐指数与第一轴呈显著正相关关系,电导率与第二轴呈显著正相关关系,总氮与第二轴呈显著负相关关系。曲腿龟甲轮虫与氨氮和水位呈正相关关系,在夏季水位最高时曲腿龟甲轮虫密度会出现峰值。萼花臂尾轮虫、迈氏三肢轮虫和脾状四肢轮虫与总氮和高锰酸盐指数正相关性较大,喜好在氮营养程度高的水体中生存^[31],由于夏季很少出现,反而到秋冬季节时密度达到峰值,近邻剑水蚤

表3 大纵湖2017—2019年浮游动物优势种总体关联性

Table 3 Overall correlation of zooplankton dominant species in Dazong Lake from 2017 to 2019

年份	V	W	自由度	$\chi^2_{0.95}$	$\chi^2_{0.05}$	校验结果
2017	1.372	16.460	5	11.07	1.15	显著正关联
2018	1.157	13.882	6	12.59	1.64	显著正关联
2019	3.369	40.425	8	15.51	2.73	显著正关联

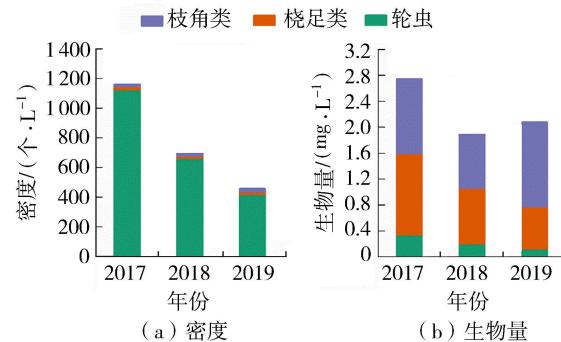


图4 大纵湖不同种类浮游动物密度和生物量年际变化

Fig.4 Interannual variation in density and biomass of different species of zooplankton in Dazong Lake

表 4 大纵湖冗余分析浮游动物代码

Table 4 Code of zooplankton species for RDA in Dazong Lake

种类	学名	代码	种类	学名	代码
独角聚花轮虫	<i>Conochilus unicornis</i>	sp 1	针簇多肢轮虫	<i>Polyarthra trigla Ehrenberg</i>	sp 7
萼花臂尾轮虫	<i>Brachionus calyciflorus Pallas</i>	sp 2	近邻剑水蚤	<i>Cyclops vicinus Uijanin</i>	sp 8
晶囊轮虫	<i>Asplanchnidae</i>	sp 3	广布中剑水蚤	<i>Mesocyclops leuckarti</i>	sp 9
迈氏三肢轮虫	<i>Filinia maio</i>	sp 4	微型裸腹溞	<i>Moina micrura Kutz</i>	sp 10
脾状四肢轮虫	<i>Tetramastix opoliensis</i>	sp 5	简弧象鼻溞	<i>Bosmina coregoni Baird</i>	sp 11
曲腿龟甲轮虫	<i>Keratella valga Ehrenberg</i>	sp 6			

微型裸腹溞与水温呈明显的负相关关系。夏季和秋季节点位比较密集,说明此时浮游动物群落结构较为稳定,更多的受营养盐因素的影响,冬季和春季点位比较松散,受叶绿素 a 的影响更为显著。

2.5 水质生物学评价

采用 H' 、 D 和 B/T 指数进行大纵湖水质生物学评价(图 6)。2017—2019 年采用全湖 H' 、 D 和 J 评价大纵湖有机污染情况,结果均为寡污,且 H' 与 J 的值还在逐年增加,说明大纵湖水质状况较优。采用全湖 B/T 指数评价大纵湖营养状态,结果均为中营养且几乎无年际变化,综合富营养指数从 2017 年富营养(TLI 值为 50.147)到 2019 年中营养接近富营养(TLI 值为 49.909),综合说明大纵湖处于中-富营养状态。

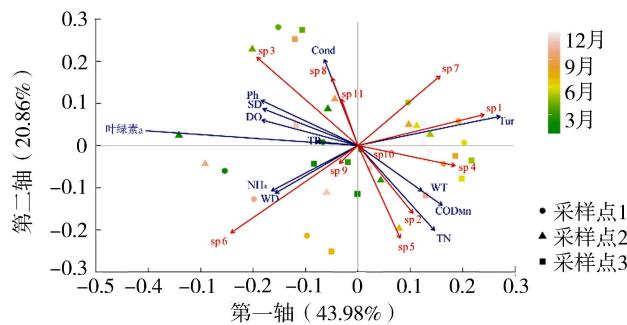


图 5 大纵湖浮游动物与环境因子冗余分析

Fig. 5 RDA analysis of zooplankton and environmental factors in Dazong Lake

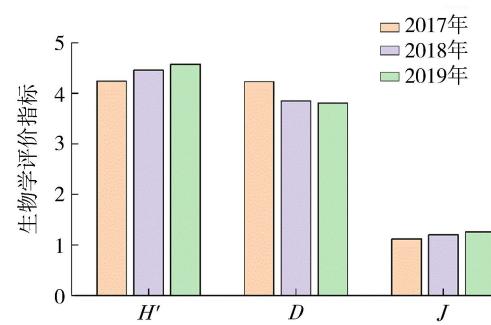


图 6 大纵湖水质生物学评价指标年际变化

Fig. 6 Interannual variation of biological assessment indexes of water quality in Dazong Lake

3 讨 论

3.1 与里下河腹部地区临近水体浮游动物群落结构比较

孟顺龙等^[20]于 2014 年丰水期(7 月)和枯水期(12 月)在里下河腹部地区典型河网区共鉴定出浮游动物 21 种,丰水期浮游动物平均密度为 44.4 个/L,枯水期浮游动物密度平均为 61.3 个/L,本文大纵湖浮游动物 2017—2019 年平均密度为 623.17 个/L。许静波等^[29]于 2016—2017 年对里下河腹部地区另一湖泊射阳湖的研究表明,射阳湖浮游动物平均密度为 1 165.9 个/L,由此可见里下河腹部地区河网区浮游动物密度低于湖荡区,这与严广寒等^[32]的结论相符合。浮游动物游动能力较弱^[32],因此在流速较快的河网区,浮游动物密度低于流速较慢的湖荡区。其次,河网区与湖荡区浮游动物的季节性变化规律存在差异,河网区浮游动物密度呈现冬季大于夏季的特点,而湖荡区刚好相反^[29],这较大程度上受到浮游植物密度的影响^[33]。浮游动物密度和浮游植物密度呈显著正相关,河网区冬季浮游植物密度高于夏季,相比之下湖荡区夏季浮游植物密度较高^[34],浮游动物食物资源丰富,因此在夏季密度达到峰值。

3.2 环境因子对大纵湖浮游动物群落结构的影响

大纵湖浮游动物与环境因子冗余分析结果显示,叶绿素 a、总氮和水温是对浮游动物密度和生物量影响比较显著的环境因子。温度直接影响浮游动物的新陈代谢活动^[35],在食物充足的情况下,随着水温逐渐升高,浮游动物新陈代谢和繁殖的速度加快,发育时间缩短,种群数量呈显著增长趋势。已有研究表明,轮虫密度的峰值一般出现在水温 20℃ 以上时^[4],本文轮虫是大纵湖浮游动物密度的主要贡献者,与大纵湖的浮游动物密度在夏季达到峰值的情况相符合。

在浅水湖泊中,电导率和氮磷均可以反映水体的营养状况^[36],营养盐不仅通过渗透和离子调节机制直

接影响浮游甲壳动物的生长繁殖^[37],而且通过调控浮游植物间接影响浮游动物群落结构^[38]。氮盐作为调节浮游植物生长的营养元素之一,对浮游植物的生长有一定的促进作用^[39],从而间接促进了浮游动物的生长,如尊花臂尾轮虫和脾状四肢轮虫等与总氮有较明显的正相关关系。但是另一方面,浮游植物的生长繁殖会消耗溶解性无机氮,导致湖泊夏季和秋季氮磷比低于春季和冬季^[34],近邻剑水蚤和微型裸腹溞等枝角类以及桡足类浮游动物与总氮有较明显的负相关关系。

湖内过水通道的建设能增加水体的交换速率^[40],降低富营养化湖泊浮游植物密度并减轻聚集生长的状况^[41]。大纵湖活水工程实施后,夏季叶绿素a质量浓度有降低趋势(图2),浮游动物的食物资源较前两年相对不足,和轮虫相比,枝角类的滤食效率较高,所以资源利用性竞争发生时,枝角类倾向于具有更大的竞争优势^[42],因此枝角类的所占比重呈现上升趋势。

3.3 大纵湖浮游动物水质生物学评价

2017—2019年运用全湖H'、D和J评价大纵湖污染情况,结果为寡污,且H'与J的指数逐年增大,说明大纵湖浮游动物多样性水平不断提高,相对应的浮游动物优势种从2017年的7种增加到2018年9种,到2019年已有11种。2017—2019年浮游动物优势种间总体上呈显著正关联,且关联性逐年增长,说明浮游动物群落结构有利于进一步发展^[43]。

2017—2019年TLI评价指标维持稳定,臂尾轮虫属(富营养型种)的种数与异尾轮虫属(贫营养型种)种数的比值均保持一致,均指示为中营养,临界富营养状态。2018年大纵湖富营养指标有小范围下降,优势种中指示富营养的臂尾轮虫属中方形臂尾轮虫不再是优势种,生态位重叠指数差为负,发展受到限制。2019年富营养指标有所回升,剪形臂尾轮虫成为新增长的优势种。

湖泊富营养化的进程中,浮游动物的多样性一般呈现先上升后下降的趋势,在湖泊为中营养水平时,浮游动物群落结构复杂,多样性高;在湖泊为超富营养水平时,浮游动物群落结构简单,多样性低^[44]。大纵湖水体呈中营养水平、富营养化的临界区间,浮游动物多样性水平处于上升阶段。浮游动物对大纵湖环境因子变化有良好的响应,可应用于湖荡区的水生态状况评价。虽然目前大纵湖总体TLI评价指标维持稳定,富营养情况还未发生,但是TN为需要控制的主要环境因子,需要进一步加强里下河腹部地区面源污染的治理,从源头上减少外源营养盐的输入。

4 结 论

a. 2017—2019年,大纵湖共鉴定出浮游动物49种,其中轮虫、枝角类和桡足类分别为33种、9种和7种,占浮游动物总种类的67.35%、18.37%和14.29%。

b. 浮游动物优势种间总体上呈显著正关联,且关联性逐年增长,浮游动物群落结构逐渐趋于稳定。浮游动物2017—2019年平均密度为623.17个/L,呈下降趋势,而平均生物量为1.63 mg/L,呈上升趋势。

c. 叶绿素a、总氮和水温是影响大纵湖浮游动物的主要水质指标,夏季和秋季浮游动物更多地受营养盐因素的影响,冬季和春季受叶绿素a的影响更为显著。

d. 采用H'、D和J浮游动物水质生物学指标评价大纵湖有机污染情况,结果均为寡污,B/T指数与TLI富营养指标评价富营养状态相符合,大纵湖处于中-富营养状态。

参考文献:

- [1] 杜彩丽,杨丽,赵旨,等.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[J].环境科学,2019,40(10):4513-4522. (DU Caili, YANG Li, ZHAO Yi, et al. Temporal and spatial variation of zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai[J]. Environmental Science, 2019, 40 (10): 4513-4522. (in Chinese))
- [2] AKARIA H Y. Article review:lessepsian migration of zooplankton through Suez Canal and its impact on ecological system[J]. Egyptian Journal of Aquatic Research,2015,41(2):129-144.
- [3] SOTTON B, GUILLARD J, ANNEVILLE O, et al. Trophic transfer of microcystins through the lake pelagic food web: evidence for the role of zooplankton as a vector in fish contamination[J]. Science of the Total Environment,2014,466-467: 152-163.
- [4] 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. (XU Xue, YAO Wenjia, XING Yuhui, et al. Characteristics and influencing factors of metazoan zooplankton community

- structure in lakes of Suzhou Industrial Park[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 4023-4035. (in Chinese))
- [5] DUGGAN I C, GREEN J D, SHIEL R J. Distribution of rotifers in North Island, New Zealand, and their potential use as bioindicators of lake trophic state[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 446/447: 155-164.
- [6] JEPPESEN E, NØGES 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: 279.
- [7] SOMMER U, ADRIAN R, DOMIS L D S, et al. Beyond the plankton ecology group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43: 429-448.
- [8] 叶晓彤, 梁迪文, 王庆, 等. 洞庭湖流域常德柳叶湖及其邻近水体轮虫群落结构变化及其对环境因子的响应[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(4): 1126-1139. (YE Xiaotong, LIANG Diwen, WANG Qing, et al. Variation of the rotifer community structure and its responses to environmental factors in Lake Liuye and its adjacent waters in Changde City, Lake Dongting Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 1126-1139. (in Chinese))
- [9] 赵坤, 陈皑, 庞婉婷, 等. 不同类型景观水体浮游动物群落差异及其影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 2149-2157. (ZHAO Kun, CHEN Kai, PANG Wanting, et al. Characteristics of zooplankton community in different types of landscape waters and their influencing factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 2149-2157. (in Chinese))
- [10] 陈莎, 谢青, 付梅, 等. 三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2303-2312. (CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, et al. Structural characteristics of zooplankton and phytoplankton communities and its relationship with environmental factors in a typical tributary reservoir in the three gorges reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2303-2312. (in Chinese))
- [11] 谈金豪, 蔺丹清, 代培, 等. 镇江长江豚类省级自然保护区浮游动物群落结构特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 1-12. (TAN Jinhao, LIN Danqing, DAI Pei, et al. Zooplankton community structure and its key factors of Yangtze dolphin nature reserve in Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(16): 1-12. (in Chinese))
- [12] 陈业, 彭凯, 张庆吉, 等. 洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, 43(8): 3753-3762. (CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qingji, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and driving factors of zooplankton in Hongze Lake [J]. *Environmental Science*, 2021, 43(8): 3753-3762. (in Chinese))
- [13] 陈红, 刘清, 潘建雄, 等. 瀑河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, 39(1): 173-184. (CHEN Hong, LIU Qing, PAN Jianxiong, et al. Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 173-184. (in Chinese))
- [14] 苏小妹, 薛庆举, 万翔, 等. 小型湖泊修复区与未修复区对生态修复的响应与评价[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 302-312. (SU Xiaomei, XUE Qingju, WAN Xiang, et al. Responses and assessment of water ecological status in restored and unrestored areas of a small urban lake after ecological restoration[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(1): 302-312. (in Chinese))
- [15] 王雅君, 傅国圣, 蒋陈娟, 等. 江苏省里下河腹部水质时空变化特征分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(5): 68-73. (WANG Yajun, FU Guosheng, JIANG Chenjuan, et al. Analysis on temporal and spatial variation characteristics of water quality in Lixiahe abdominal area, Jiangsu Province[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(5): 68-73. (in Chinese))
- [16] 傅国圣, 周佳楠, 李云中, 等. 基于熵权法的里下河腹部典型区综合水质评价[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(5): 79-82. (FU Guosheng, ZHOU Jianan, LI Yunzhong, et al. Comprehensive water quality evaluation in typical Lixiahe abdominal area based on entropy-weight method[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2021, 39(5): 79-82. (in Chinese))
- [17] 燕文明, 温茂增, 麻林, 等. 小型浅水湖泊氨氧化细菌分布特征及其对氮素垂向分布的响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 521-527. (YAN Wenming, WEN Maozeng, MA Lin, et al. Distribution characteristics of ammonia-oxidizing bacteria of small shallow lakes and its response to vertical distribution of nitrogen [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(6): 521-527. (in Chinese))
- [18] 冷辉, 张凤太, 王腊春, 等. 湖泊形态健康内涵及其集对分析评价:以大纵湖为例[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(5): 514-519. (LENG Hui, ZHANG Fengtao, WANG lachun, et al. Implication of lake's healthy morphology and its assessment through set pair analysis: a case study of Dazong Lake[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(5): 514-519. (in Chinese))
- [19] 朱苏葛, 刘凌, 罗娟, 等. 里下河地区典型湖泊大型底栖动物与环境因子的相关性分析[J]. *水资源保护*, 2016, 32(3): 99-104. (ZHU Suge, LIU Ling, LUO Juan, et al. Correlation analysis between macrozoobenthos and environmental factors in lakes of Lixia River area[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(3): 99-104. (in Chinese))
- [20] 孟顺龙, 肖代, 陈小丽, 等. 丰、枯水期里下河腹地典型水体浮游动物群落结构与水质评价[J]. *水生态学杂志*, 2016, 37

- (6):76-83. (MENG Shunlong, XIAO Dai, CHEN Xiaoli, et al. Zooplankton community structure and water quality assessment in typical water bodies of the Lixia River Basin in dry and wet seasons [J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(6): 76-83. (in Chinese))
- [21] 王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [22] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志: 淡水枝角类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 陈非洲. 关于淡水浮游动物和原生动物分开研究的建议 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 691. (CHEN Feizhou. Suggestions on the separation of freshwater zooplankton and protozoa [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3): 691. (in Chinese))
- [26] 赵文. 水生生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [27] 陈雪梅. 淡水桡足类生物量的测算 [J]. 水生生物学报, 1981, 7(3): 397-408. (CHEN Xuemei. Biomass calculation of freshwater copepoda [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1981, 7(3): 397-408. (in Chinese))
- [28] 杨文焕, 申涵, 周明利, 等. 包头南海湖浮游植物优势种生态位及种间联结性季节分析 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 383-391. (YANG Wenhuan, SHEN Han, ZHOU Mingli, et al. Seasonal variation analysis of the niche and interspecific association with respect to the dominant phytoplankton species in Nanhai Lake [J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 383-391. (in Chinese))
- [29] 许静波, 徐明, 刘军, 等. 射阳湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子相关性研究 [J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(2): 27-31. (XU Jingbo, XU Ming, LIU Jun, et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Sheyang Lake [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, 32(2): 27-31. (in Chinese))
- [30] 刘凌, 朱良珍, 叶键, 等. 张福河浮游植物群落结构及生态位特征 [J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 7-12. (LIU Ling, ZHU Liangzhen, YE Jian, et al. Community structure and niche characteristics of phytoplankton in Zhangfu River [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 7-12. (in Chinese))
- [31] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 等. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6918-6929. (LIN Qing, YOU Wenhui, XU Fengjie, et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dishui Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 6918-6929. (in Chinese))
- [32] 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 等. 长江三口-西洞庭湖环境因子对浮游动物群落组成的影响 [J]. 水生态学杂志, 2021, 42(2): 23-32. (YAN Guanghan, YIN Xueyan, WANG Xing, et al. Effects of environmental factors on zooplankton community composition in the three outlets of Yangtze River to west Dongting Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(2): 23-32. (in Chinese))
- [33] 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. (CHEN Jiaqi, ZHAO Kun, CAO Yue, et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Poyang Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6644-6658. (in Chinese))
- [34] 何欣霞, 陈诚, 董建玮, 等. 江苏里下河腹部地区湖泊湖荡春季浮游植物群落结构和营养状态 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(8): 2626-2634. (HE Xinxia, CHEN Cheng, DONG Jianwei, et al. Phytoplankton community structure and trophic status of lakes in the Lixia River hinterland of Jiangsu Province in spring [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(8): 2626-2634. (in Chinese))
- [35] 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. (DU Xue, WANG Qidong, ZHANG Chaowen, et al. Community structure of rotifers in relation to environmental factors in Lake Hongze [J]. Journal of Lake Science, 2014, 26(2): 269-276. (in Chinese))
- [36] 田晶, 郭生练, 王俊, 等. 汉江中下游干流水华生消关键因子识别及阈值分析 [J/OL]. 水资源保护: 1-11 [2022-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20211008.1553.018.html>. (TIAN Jing, GU Shenglian, WANG Jun, et al. Identification and threshold analysis of key factors of water bloom in the middle and lower reaches of Han River [J/OL]. Water Resources Protection: 1-11 [2022-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20211008.1553.018.html>. (in Chinese)).
- [37] 王文侠, 陈非洲, 谷孝鸿. 南京市 5 座中型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 216-223. (WANG Wenxia, CHEN Feizhou, GU Xiaohong. Community structures of zooplankton and its relation to environmental factors in five medium reservoirs in Nanjing City [J]. Journal of Lake Science, 2017, 29(1): 216-223. (in Chinese))
- [38] 杜萍, 徐晓群, 刘晶晶, 等. 象山港春、夏季大中型浮游动物空间异质性 [J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2308-2321. (DU Ping, XU Xiaoqun, LIU Jingjing, et al. Spatial heterogeneity of macro-and meso-zooplankton in Xiangshan Bay in spring and summer [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2308-2321. (in Chinese))

- Zhongyuan, XU Changjie, CHEN Ran, et al. Three dimensional numerical simulation of tidal bore impacting row pile groin [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2014, 48(3): 504-513. (in Chinese)
- [16] 倪兴也, 黄世昌, 冯卫兵. 基于 SPH 方法的波浪与沙滩相互作用数值模拟研究 [C] // 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京: 海洋出版社, 2019: 479-486.
- [17] 戚蓝, 肖厅厅, 张芝永, 等. 涌潮水流 CFD 数值模拟 [J]. 水利水运工程学报, 2019(3): 32-40. (QI Lan, XIAO Tingting, ZHANG Zhiyong, et al. CFD numerical simulation of tidal bore flow [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 32-40. (in Chinese))
- [18] ADRIEN B, BRUNO S, ANTHONY B, et al. Flow fields and particle trajectories beneath a tidal bore: a numerical study [J]. International Journal of Sediment Research, 2018, 33(3): 351-370.
- [19] CHANSON H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena: a survey of experimental results [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2009, 28(2): 191-210.
- [20] 黄君宝, 肖厅厅, 孙志林, 等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 441-446. (HUANG Junbao, XIAO Tingting, SUN Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 441-446. (in Chinese))
- [21] 杨火其, 潘存鸿, 周建炯, 等. 涌潮水力学特性试验研究 [J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 136-138. (YANG Huoqi, PAN Cunhong, ZHOU Jianjiong, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of tidal bore [J]. Hydropower Energy Science, 2008, 26(4): 136-138. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-09 编辑: 胡新宇)

(上接第 57 页)

- [39] 刘凌, 朱燕, 李博韬, 等. 基于 MBFG 分类法的长江江苏段浮游植物生物完整性评价 [J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 13-20. (LIU Ling, ZHU Yan, LI Botao, et al. Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 13-20. (in Chinese))
- [40] 吴时强, 戴江玉, 石莎. 引水工程湖泊水生态效应评估研究进展 [J]. 南昌工程学院学报, 2018, 37(6): 14-26. (WU Shiqiang, DAI Jiangyu, SHI Sha. Progress in assessment of hydro-ecological effects in lakes induced by water diversion [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2018, 37(6): 14-26. (in Chinese))
- [41] 李港, 陈诚, 何欣霞, 等. 湖泊藻类动态模型数据同化模式的改进 [J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 156-165. (LI Gang, CHEN Cheng, HE Xinxia, et al. Modify of data assimilation model for lake algae dynamic model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 156-165. (in Chinese))
- [42] HUANG L, XI Y L, WANG X L, et al. Competitive outcome between the rotifer *Brachionus calyciflorus* and the cladoceran *Moina macrocopa* depends on algal density but not temperature [J]. Annales de Limnologie-International Journal of Limnology, 2014, 50(2): 109-119.
- [43] 吴佳梦, 徐娜娜, 张文珺, 等. 浙江舟山定海护城河浮游植物优势种生态位与种间联结性季节性分析 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 429-439. (WU Jiameng, XU Nana, ZHANG Wenjun, et al. Seasonal analysis of the niche and interspecific association of dominant species of phytoplankton in the Dinghai Moat, Zhoushan City [J]. Journal of Lake Science, 2019, 31(2): 429-439. (in Chinese))
- [44] 杨威, 孙雨琛, 张婷婷, 等. 富营养化对小型湖泊浮游甲壳动物群落结构及多样性的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4874-4882. (YANG Wei, SUN Yuchen, ZHANG Tingting, et al. Impact of eutrophication on the community structure and species diversity of crustacean zooplankton in small lakes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4874-4882. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-08 编辑: 胡新宇)