

鄱阳湖都昌自然保护区浮游甲壳动物群落时空分布特征及其驱动因子^{*}

于新平¹, 陈宇炜^{1**}, 王俊颉¹, 李瀚成¹, 邓枫¹, 徐光锋¹, 夏雨¹, 刘金福^{1,2}

(1:南昌工程学院,南昌 330099)

(2:江西省水利科学院,南昌 330029)

摘要: 江西省都昌候鸟省级自然保护区作为鄱阳湖流域内占地面积最大的自然保护区,承担着保护世界性和国家重点保护濒危越冬候鸟资源等重要责任。探究都昌候鸟自然保护区浮游甲壳动物群落结构及其主要影响因子,可为都昌自然保护区内鸟类栖息地的生境保护与动态评估提供科学依据。2019—2021年1、4、7和10月对都昌自然保护区内4个区域的浮游甲壳动物的密度、生物量和水环境因子进行采样调查,运用多样性指数、Pearson相关性和冗余分析(RDA)等对都昌保护区水质情况以及浮游甲壳动物与水环境因子和叶绿素a之间的关系进行解析。结果显示,调查期间共鉴定出浮游甲壳动物31种,其中枝角类(20种)和桡足类(11种)。都昌保护区浮游甲壳动物年均密度213.81 ind./L,年均生物量为1.51 mg/L。都昌保护区浮游甲壳动物群落结构时空变化较大,季节上,夏季或秋季浮游甲壳动物的生物量达到峰值,冬季浮游甲壳动物种类最少;空间上南矶一般区(D4)浮游甲壳动物密度和生物量较大,其次是撮箕湖一般区(D3),小矶山核心区(D1)和三山核心区(D2)差异较少。根据多样性指数和均匀度指数分析都昌保护区水质情况,结果表现为撮箕湖一般区(D3)水质环境最好,其次是小矶山核心区(D1),最后是三山核心区(D2)和南矶一般区(D4)。简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)作为都昌保护区优势种,这从侧面反映出都昌保护区水体呈富营养化,与调查期间发现局部出现蓝藻水华相吻合。都昌保护区浮游甲壳动物群落结构的时空演替主要是由总氮、叶绿素a、水位和水温等因素共同决定。不同季节影响浮游甲壳动物群落结构的主导因素也不相同,冬季主导因素主要是总氮、总磷和溶解氧;夏季主导因素是水位和叶绿素a;秋季主导因素主要是水温、水位、透明度、叶绿素a、溶解氧和总磷。

关键词: 鄱阳湖;候鸟栖息地;浮游甲壳动物;水质评价;群落结构;时空分布

Spatio-temporal distribution characteristics and driving factors of planktonic crustacean community in Duchang Nature Reserve of Lake Poyang^{*}

Yu Xinping¹, Chen Yuwei^{1**}, Wang Junjie¹, Li Hancheng¹, Deng Feng¹, Xu Guangfeng¹, Xia Yu¹ & Liu Jinfu^{1,2}

(1: Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, P.R.China)

(2: Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, P.R.China)

Abstract: As the largest nature reserve in the Lake Poyang Basin, Duchang Migratory Bird Provincial Nature Reserve in Jiangxi Province plays an important role in protecting worldwide and national key rare and endangered wintering migratory birds. Exploring the zooplankton community structure and its main influencing factors in Duchang Migratory Bird Nature Reserve can provide a scientific basis for the habitat protection and dynamic assessment of bird habitats in Duchang Nature Reserve. In January, April, July and October 2019–2021, the density, biomass and water environment factors of planktonic crustaceans in four areas in Duchang Nature Reserve were investigated, and the water quality in Duchang Nature Reserve and the relationship between floating animals and water environment factors and chlorophyll-a were analyzed by using biodiversity index, Pearson correlation and redundancy a-

* 2022-08-22 收稿;2022-09-13 收修改稿。

江西省教育厅科技项目(GJJ201905)、江西省水利科技项目(202022YBKT17)和江西省教育厅青年项目(GJJ211938)联合资助。

** 通信作者;E-mail: 976370923@qq.com。

nalysis (RDA). The results showed that 31 species of planktonic crustaceans were identified during the investigation, including 20 species of cladocera and 11 species of copepoda. The annual average density of planktonic crustaceans in Duchang Nature Reserve was 213.81 ind./L, and the annual average biomass was 1.51 mg/L. The community structure of crustacean plankton in Duchang Nature Reserve greatly changed across time and space. In seasons, the biomass of planktonic crustaceans peaked in summer or autumn, and the richness of crustacean plankton were the least in winter; Spatially, the density and biomass of planktonic crustaceans in the general area of Nanji (D4) were larger than the general area of Cuojihu (D3), and there was little difference between the core area of Xiaoqishan (D1) and the core area of Sanshan (D2). According to the diversity index and evenness index, the water quality of Duchang Nature Reserve was analyzed. The results showed that the water quality environment of the general area of Lake Zuoji (D3) was the best, followed by the core area of Xiaoqi Mountain (D1), and then the core area of Sanshan Mountain (D2) and the general area of Nanji (D4). *Bosmina coregoni* also reflected the gradual eutrophication of the water body in the Duchang Nature Reserve, which was consistent with the local occurrence of cyanobacteria bloom during the investigation. The temporal and spatial succession of planktonic crustacean community structure in the Duchang Nature Reserve was mainly determined by total nitrogen, chlorophyll-a, water level and water temperature. The dominant factors affecting crustacean plankton were different in seasons, i.e. total nitrogen, total phosphorus and dissolved oxygen in winter, water level and chlorophyll-a in summer, and water temperature, water level, transparency, chlorophyll-a, dissolved oxygen and total phosphorus in autumn, respectively.

Keywords: Lake Poyang; migratory bird habitat; planktonic crustaceans; water quality assessment; community structure; spatio-temporal distribution

江西省都昌候鸟省级自然保护区位于鄱阳湖流域北部,与鄱阳湖国家级自然保护区和南矶山国家级自然保护区相毗邻,是鄱阳湖流域内占地面积最大的自然保护区,为候鸟在东亚-澳大利西亚迁徙路上重要的栖息地^[1],同时也是长江流域生物多样性保护的重要生态屏障。由于都昌保护区周边经济不发达,部分群众“靠湖吃湖”的思想根深蒂固以及捕鱼捕鸟等行为导致越冬候鸟栖息地不断“瘦身”。栖息地的保护也逐渐成为鄱阳湖流域生态保护的焦点,而都昌保护区作为鄱阳湖候鸟重要栖息地,浮游甲壳动物的研究却鲜有报道。

浮游甲壳动物是水生态系统中的重要组成部分,在湖泊营养级中具有承上启下的作用。作为介于高级消费者和初级生产者之间的中间营养级,受上行效应和下行效应两种机制的影响^[2]。一方面,部分浮游甲壳动物可以摄食藻类^[3]及轮虫和原生动物,另一方面为鱼类提供饵料来源^[4],进而影响鸟类的食物来源。简言之,浮游甲壳动物种类和数量的变化直接或间接影响着初级生产者和其他消费者的群落结构,进而影响着整个生态系统的结构^[5]。并且,由于浮游动物对环境变化的敏感性和耐受性均各不相同,常常作为湖泊生态环境监测的指示物种^[6]。而由于栖息地保护区的有效保护,专家观测候鸟数量逐渐增加,可能导致鸟类粪便对栖息地水质造成影响^[7],并且鸟类对鱼类的捕食也会间接影响浮游甲壳动物的群落组成和现存量的变化。在分析浮游甲壳动物群落结构时,需要综合考虑各种因素对浮游动物的影响^[8],其中包括非生物因素(水化因子和水文因子)和生物因素(捕食和竞争)^[9]。目前国内外对浮游动物做了大量研究,研究表明不同湖泊水域,影响浮游动物的主导因素也各不相同,如:张佳敏等^[10]发现温度、叶绿素a和pH是以鲢、鳙放养为主的武山湖浮游动物群落结构的关键因子;而谈金豪等^[11]研究表明溶解氧、总磷、叶绿素a和氨氮是皖河口江豚主要栖息地浮游动物群落特征的主导因素;杨潇等^[12]则是针对鄱阳湖不同水文期进行调查分析,得出丰水期和枯水期浮游生物群落结构的主导因子不同的结论;洪泽湖浮游动物群落结构的时空变化与水位、总磷、水温和总氮等因素显著相关^[2];杨佳等^[9]发现太湖梅梁湾水体富营养化会影响浮游动物的群落结构;杜彩丽^[6]采用多元回归树模型和主坐标分析等方法研究分析淀山湖浮游动物群落时空变化的关键性因子。

浮游甲壳动物的群落特征可以作为水体生态系统的重要指示类群,其群落结构及物种组成可以部分反映水体状况及生态系统健康程度,并且浮游甲壳动物可以为鱼类提供食物来源,进而影响到候鸟的分布。所以本研究对都昌候鸟保护区浮游甲壳动物群落结构以及水环境进行调查分析,探究浮游甲壳动物群落结构演替特征以及影响因子,有利于深入贯彻“长江大保护”生态文明思想,守护好“一湖清水”,为未来候鸟栖息地保护与生态治理提供理论参考。

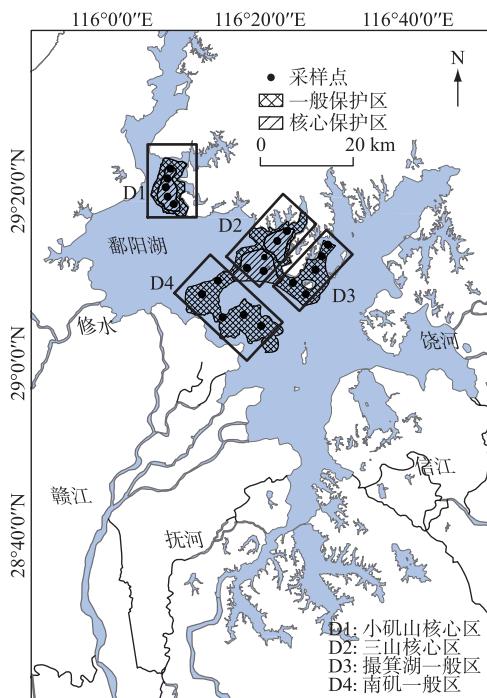


图 1 采样点位分布

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

测定水质指标,待显示读数稳定后记录下水体的水温(WT)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、电导率(Cond)、浊度(Tur)、光合有效辐射(PAR)、矿化度(TDS)等指标;透明度(SD)用塞式透明度盘测定;水深(WD)用水深仪测定。用烧杯将水样倒入样品瓶中,在冷藏的条件下进行保存并尽快带回实验室进行下一步的样品处理。使用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ Whatman GFF 玻璃纤维滤膜过滤样品采集叶绿素,定量抽滤过后,将含有叶绿素的一面用镊子向内对折两次装入写好信息的样品袋中,使用热乙醇^[13]萃取分光光度法测定叶绿素 a(Chl.a)浓度。其中总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)和正磷酸盐磷($\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$)等指标按照《湖泊富营养化调查规范》^[14]测定。水位(WL)数据来自于江西省水文监测中心官网。

1.2.2 浮游动物 浮游甲壳动物的样品采集和分析参照《淡水浮游生物研究方法》进行^[15]。水样采用有机玻璃采水器(UWITEC-WSC)采集上、中、下三层混合水样 10 L,随后将混合水样经 25#浮游生物网(孔径 $64\text{ }\mu\text{m}$)过滤将其保存在 50 mL 聚乙烯塑料瓶中,用 5% 的甲醛溶液固定。带回实验室后,在解剖镜下全部计数鉴定。浮游甲壳动物干重生物量,根据体重-体长回归方程“ $\lg W = b \lg L + a$ ”计算而得(式中 W 为体重,L 为体长;不同浮游动物的参数 a 和 b 可由文献^[15]查得)。

1.3 数据分析

生物多样性分析采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')^[16]、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 丰富度指数(D)和浮游动物优势度指数(Y), $Y>0.02$ 的物种为优势种,计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^s \left[\frac{N_i}{N} \times \log_2(N_i/N) \right] \quad (1)$$

$$J = H'/\ln S \quad (2)$$

$$D = (S - 1)/\ln N \quad (3)$$

$$Y = (N_i/N) \times f_i \quad (4)$$

式中, N_i 为样品中 i 种生物的总个体数; N 为样品中各生物的总个体数; f_i 为 i 种生物出现的频率; S 为所有样

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

江西省都昌候鸟省级自然保护区($28^{\circ}50'28''\sim 29^{\circ}10'20''\text{N}, 116^{\circ}2'24''\sim 116^{\circ}36'30''\text{E}$),与鄱阳湖国家级自然保护区和南矶山湿地国家级自然保护区毗邻,为“赣、抚、信、饶、修”五河之水汇聚之地,占地面积 411 km^2 ,为鄱阳湖区域内面积最大的自然保护区。江西省都昌候鸟省级自然保护区受到鄱阳湖的影响,具有气候温和、结冰期短和无霜期等特点,以广阔的水域面积、丰富的湿地资源和地处亚热带湿润性季风气候等一系列优势吸引许多珍稀越冬候鸟,与鄱阳湖国家级自然保护区和南矶山湿地国家级自然保护区共同构成鄱阳湖越冬候鸟栖息地。

调查以 2019—2021 年 1 月(枯水期)、4 月(涨水期)、7 月(丰水期)和 10 月(退水期)的 3 年生态野外数据为依据,根据保护区官方提供保护区区域图,将江西省都昌候鸟省级自然保护区划分为小矶山核心区(D1)、三山核心区(D2)、撮箕湖一般区(D3)和南矶一般保护区(D4),每个采样区域设置 5 个采样点,共计 20 个采样点。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 水质

使用 YSI 6600V2 多参数水质监测仪现场

品中的种属总数。生物多样性指数水质评价标准^[17]为:0<H'<1 为多污型,1<H'<2 为 α -中污型,2<H'<3 为 β -中污型,H'>3 为清洁—寡污型;J:0<J<0.3 为多污型,0.3<J<0.5 为中污型,0.5<J<0.8 寡污型,0.8<J<1.0 为清洁型。

本研究中 RDA 分析和空间分析为比较 4 个研究区域之间的差异,将各区域内 5 个点位作为平行样对待,取其平均值以作为各区域数据;时间分布主要是为分析整个保护区的年际变化,因此采用整个都昌保护区的平均值作为数据分析;此外,由于桡足类幼体所占比重较大,但桡足类幼体很难分类鉴定,因此数据处理时将桡足类幼体在生态学角度归于无节幼体进行计算。数据的整理在 Excel 中完成,采样点图和空间分布图在 ArcGIS 10.7 中完成,环境因子时空分布以及浮游动物时间分布在 Origin 2021 中完成。对浮游甲壳动物数据进行去趋势对应分析(DCA),DCA 结果显示最大梯度长度<3,故选择冗余分析(RDA),在 RDA 分析之前对物种数据进行 Hellinger 转换和对环境因子数据标准化,RDA 分析在 R 语言 vegen 中完成。

2 结果

2.1 都昌保护区环境因子变化趋势

江西省都昌候鸟升级自然保护区环境因子逐月变化如图 2 所示。各环境因子季节变化显著,其中 WT、WD 和 SD 呈现出先上升后下降的变化趋势,均在 7 月份达到峰值;TN、TP、COD 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在总体上呈现出周期性变化趋势,在 7 月份达到最小值; NO_3^- -N 随月份变化呈现线性递减的变化趋势;而 Chl.a 则呈现递增趋势,峰值出现在 7、10 月份;秋冬季 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 值高于春夏季;夏季 WT、WD 和 SD 值最高,其次是春季,冬季值最低;TN 和 NO_3^- -N 在冬季含量最高,随季节变化含量逐渐减少。

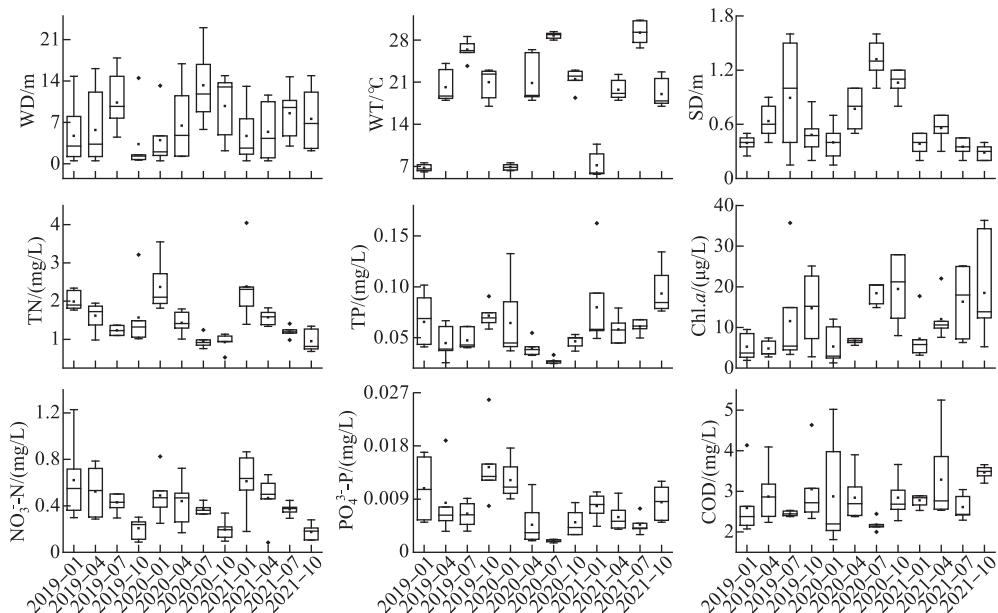


图 2 都昌候鸟省级自然保护区环境因子的逐月变化

Fig.2 Monthly changes in environmental factors of Duchang Migratory Bird Nature Reserve

2.2 浮游甲壳动物各群落物种的时空分布

本次调查的浮游甲壳动物定量样品中,鉴定出枝角类(Cladocera)和桡足类(Copepods)共计 31 种。其中枝角类 20 种和桡足类 11 种。春季都昌候鸟自然保护区浮游甲壳动物种类最多,为 25 种;冬季浮游甲壳动物种类最少,为 15 种。各季节均出现的枝角类有简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*),桡足类有汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)、中华原镖水蚤(*Eodiaptomus sinensis*)、球状许水蚤(*Schmackeria forbesi*)、广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)、无节幼体(Nauplii)、透明温剑水蚤(*Thermocyclops hyalinus*)和中华窄腹剑水蚤(*Lim-*

noithona sinensis)。就不同保护区域来看,三山核心区(D2)浮游甲壳动物总种类数最多,南矶一般区(D4)种类数与之相近,小矶山核心区(D1)次之,撮箕湖一般区(D3)最少。各区域均出现的枝角类为简弧象鼻溞、颈沟基合溞(*Bosminopsis deitersi*)、多刺裸腹溞(*Moina macrocopa*)、角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)、长刺溞(*Daphnia longispina*)、多刺秀体溞(*Diaphanosoma sarsi*)、短尾秀体溞(*Diaphanosoma brachyurum*)和微型裸腹溞(*Moina micrura*),桡足类为汤匙华哲水蚤、球状许水蚤、广布中剑水蚤、无节幼体和透明温剑水蚤。

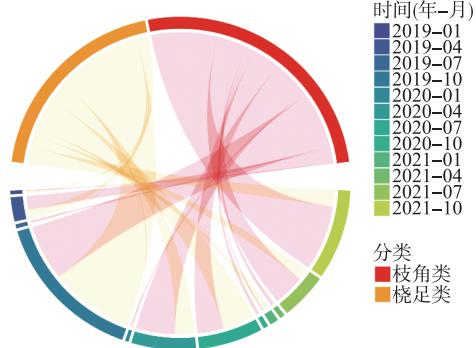


图3 浮游动物生物量时间分布

Fig.3 Temporal changes in zooplankton biomass

(D1)和三山核心区(D2),小矶山核心区(D1)较低;从浮游甲壳动物平均密度来看,南矶一般区(D4)大于撮箕湖一般区(D3),大于三山核心区(D2)和小矶山核心区(D1)。都昌自然保护区浮游甲壳动物平均生物量和平均密度各类群中枝角类占据优势地位。

2.3 浮游动物生物量与密度的时空变化规律

都昌候鸟省级自然保护区2019—2021年浮游甲壳动物年均密度为213.81 ind./L,以枝角类为主(占比52.75%),桡足类浮游动物略低(占比47.25%)。都昌候鸟省级自然保护区浮游甲壳动物年均生物量为1.51 mg/L,枝角类浮游动物占据微弱优势(占比57.01%),桡足类占比最低(占比42.99%)。浮游动物平均生物量时间分布如图3所示,浮游甲壳动物月均生物量在2019和2021年最高月份出现在10月(依次为1.47和0.86 mg/L),2020年则是4月和7月较高。在2019—2021年期间,浮游甲壳动物月均生物量均在1月份达到最低。年均生物量总体上呈现下降趋势。浮游动物平均生物量与密度空间分布如图4所示,整体上南矶一般区(D4)平均生物量最高,其次是撮箕湖一般区

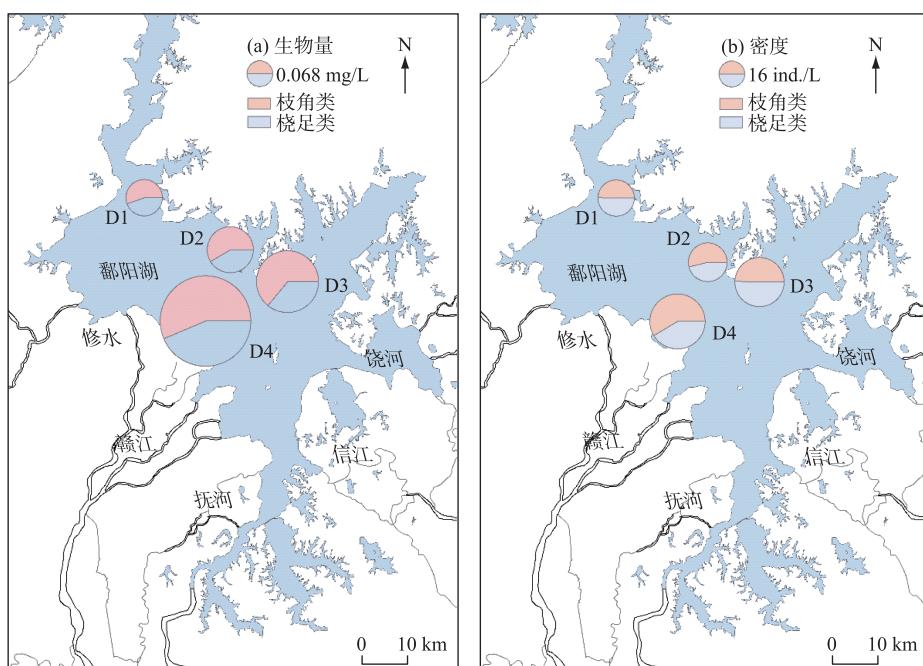


图4 浮游动物生物量(a)与密度(b)空间分布
(D1:小矶山核心区;D2:三山核心区;D3:撮箕湖一般区;D4:南矶一般区)

Fig.4 Spatial distribution of zooplankton biomass (a) and density (b)

2.4 都昌自然保护区浮游甲壳动物优势种

都昌自然保护区浮游动物优势种包括枝角类的简弧象鼻溞和颈沟基合溞;桡足类浮游甲壳动物优势种主要为无节幼体。随着季节的变化,都昌保护区的优势种随之发生变化,1月份(冬季)的优势种有枝角类的简弧象鼻溞,桡足类的广布中剑水蚤和无节幼体;4月份(春季)的优势种为枝角类的简弧象鼻溞和颈沟基合溞,桡足类的汤匙华哲水蚤和无节幼体;7月份(夏季)的优势种为枝角类的简弧象鼻溞、颈沟基合溞和短尾秀体溞,桡足类的广布中剑水蚤和无节幼体;10月份(秋季)的优势种为枝角类的简弧象鼻溞,桡足类的无节幼体和中华窄腹剑水蚤。枝角类的简弧象鼻溞和桡足类的无节幼体在各季节均为优势种,其他优势种无明显季节性变化。

2.5 浮游甲壳动物多样性指数及评价水质

都昌保护区 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 丰富度指数(D)时空变化如图 5 所示,2019 年均没有显著季节性变化,2020—2021 年 H' 和 J 在 1—7 月份呈现上升趋势,在 7 月出现峰值,7 月之后逐渐降低,降至翌年 1 月。 D 整体上呈现 1 和 4 月较高,1 月出现峰值,随后逐渐降低,7 和 10 月相对较低,10 月到翌年 1 月逐渐上升。空间上各区域 H' 、 J 和 D 没有表现出显著性差异。

根据 H' 和 J 对都昌保护区栖息地水质进行评价,评价结果如表 1 所示,以 H' 为依据,只有撮箕湖一般区(D3)在 2020 年为 β -中污型,其余 3 个区域在各年份均为 α -中污型。而根据 J 判断,小矶山核心区(D1)和南矶一般区(D4)由 2019 年的中污型状态逐步转变为 2020—2021 年的寡污型状态。三山核心区(D2)由 2019—2020 年的寡污型状态转变为 2021 年的中污型状态。撮箕湖一般区(D3)则一直为寡污型状态。就研究区域而言,取各区域多样性指数和均匀度指数均值进行比较分析,结果相一致,撮箕湖一般区(D3)水质环境最好,其次是小矶山核心区(D1),最后是三山核心区(D2)和南矶一般区(D4)。

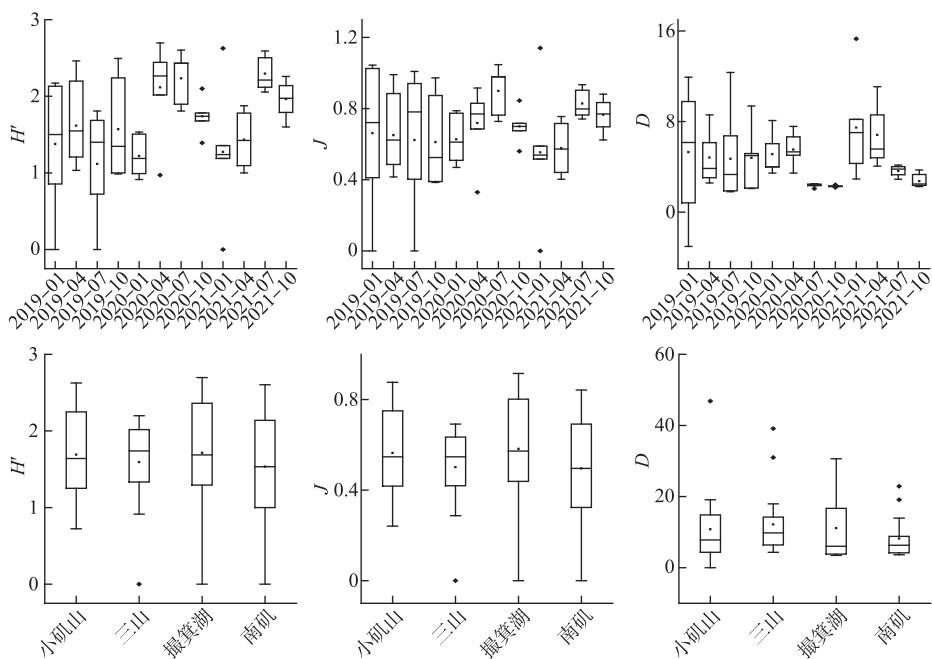


图 5 浮游动物多样性指数时空变化

Fig.5 Spatio-temporal changes in zooplankton diversity indices

2.6 浮游甲壳动物与环境因子的冗余分析

RDA 分析结果显示,RDA 前两轴累计解释率为 25%。根据图 6 可以看出,Chl.*a*、WT、WL 和 TN 对浮游甲壳动物群落结构影响较大,其次是 DO、TP 和 SD 对浮游动物群落结构影响相对较小。都昌自然保护区冬季浮游甲壳动物群落结构受到水化因子(TN 和 TP)影响较大,而夏秋两季水文因子(WL、WT 和 SD)影响较

表 1 浮游动物多样性指数水质评价结果
Tab.1 Water quality evaluation result of biodiversity indexes of zooplankton

研究区域	年份	H'	评价结果	J	评价结果
小矶山核心区	2019	1.19	α -中污型	0.40	中污型
	2020	1.89	α -中污型	0.63	寡污型
	2021	1.98	α -中污型	0.66	寡污型
三山核心区	2019	1.68	α -中污型	0.53	寡污型
	2020	1.67	α -中污型	0.52	寡污型
	2021	1.42	α -中污型	0.44	中污型
撮箕湖一般区	2019	1.63	α -中污型	0.55	寡污型
	2020	2.01	β -中污型	0.69	寡污型
	2021	1.49	α -中污型	0.51	寡污型
南矶一般区	2019	1.43	α -中污型	0.46	中污型
	2020	1.67	α -中污型	0.54	寡污型
	2021	1.54	α -中污型	0.50	寡污型

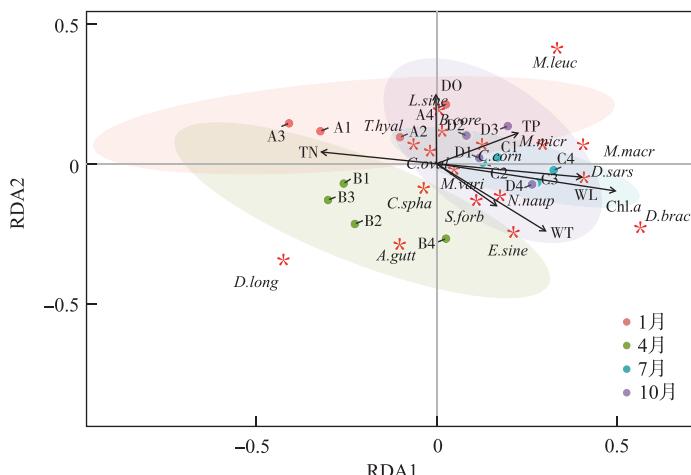


图 6 都昌保护区浮游甲壳动物与环境因子的冗余分析
(*B.core* 简弧象鼻溞、*C.ovale* 卵形盘肠溞、*C.spha* 圆形盘肠溞、*A.gutt* 点滴尖额溞、*M.macr* 多刺裸腹溞、*C.corn* 角突网纹溞、*D.long* 长刺溞、*D.sars* 多刺秀体溞、*D.brac* 短尾秀体溞、*M.micr* 微型裸腹溞、*E.sine* 中华原镖水蚤、*S.forb* 球状许水蚤、*M.leuc* 广布中剑水蚤、*M.vari* 跨立小剑水蚤、*N.Naup* 无节幼体、*T.hyal* 透明温剑水蚤、*L.sina* 中华窄腹剑水蚤；
A:1月、B:4月、C:7月、D:10月；1:小矶山核心区、2:三山核心区、3:撮箕湖一般区、4:南矶一般区)

Fig.6 Redundancy analysis of large zooplankton and environmental factors in Duchang Nature Reserve

大,其中夏季 Chl.*a* 浓度对浮游甲壳动物群落结构影响极大。就物种而言,中华窄腹剑水蚤和简弧象鼻溞与 DO、角突网纹溞与 TP、多刺秀体溞与 WL 和 Chl.*a*、中华原镖水蚤和无节幼体与 WT 和球状许水蚤与 SD 均呈正相关。

3 讨论

3.1 都昌保护区理化因子的变化

近年来,都昌候鸟自然保护区受到经济增长压力,人口膨胀等重重现实压力以及水利工程建设、人为污

染、过度捕捞等人类威胁,导致内陆湿地湖泊大量被“蒸发”,栖息地水质不断恶化,保护区内水体逐渐出现富营养化状态,并在野外采样期间发现局部蓝藻水华,这对栖息地生态环境造成不良影响,进而威胁到水鸟生存。将都昌保护区环境因子的变化主要分为4个时期进行分析,枯水期(1月)、涨水期(4月)、丰水期(7月)、退水期(10月)。首先,鄱阳湖作为长江流域的过水型、吞吐型和季节型重要湖泊,其透明度主要受到水体中悬浮颗粒物含量以及浮游植物浓度(Chl.a)的影响,其中涨水期和退水期过程中由于水体扰动强烈导致栖息地水体透明度下降。其次,都昌保护区水体中营养盐和 Chl.a 呈现出季节性变化,例如:总氮和硝态氮随1—10月季节变化浓度逐渐降低,总磷和正磷酸盐在1—10月呈现先减后增,在7月达到最小值以及叶绿素 a 在夏秋季相对于冬春季节浓度较高等特征。总氮和硝态氮等营养盐可能是由于夏秋两季温度较高,利于进行反硝化作用,使其水体中氮元素浓度下降^[18];前人研究总磷夏季浓度过高是由于藻类的奢侈消费^[19-20]、浮游植物的光合作用^[21-22]以及高温促进磷的内源释放^[2]等一系列原因,此处研究总磷夏季浓度最低可能是由鄱阳湖夏季处于丰水期阶段,“五河”以及长江与鄱阳湖水体混合,稀释了都昌保护区内水体中的营养盐,最终导致总磷浓度夏季偏低的结果。这也与前人研究结果相似,当外来水对湖水稀释时,水体的磷污染物也得到稀释,使其总磷浓度下降^[23];而叶绿素 a 在一定程度上可以代表浮游植物含量,水温是影响浮游植物生长的关键因子^[24],夏秋两季较高的温度导致都昌保护区浮游植物大量生长繁殖,从而呈现出夏秋两季 Chl.a 浓度高于春冬季。浮游植物通过吸收营养盐进行生长繁殖^[25],夏季高温导致浮游植物大量繁殖,进而增大对营养盐的需求,这也是丰水期营养盐浓度下降的主要原因之一。

3.2 浮游动物群落结构特征与环境因子的关系

水温被认为是影响浮游动物发育和繁殖的重要环境因子,也是影响浮游动物季节演替的重要因素^[25]。不同类群浮游动物适宜温度也各不相同,适宜的温度会加快浮游动物的繁殖。夏季温度的升高会加快浮游甲壳动物的繁殖,进而使浮游甲壳动物的数量在夏秋两季达到峰值。但是夏季有时过高水温也不宜于浮游甲壳动物的生长繁殖,可能会抑制大型溞(*Daphnia*)的出现,而且水温会加剧毒蓝藻对*Daphnia*种群的抑制作用^[26-27],这也可能是秋季浮游甲壳动物生物量和密度有时会高于夏季的原因之一。此外,水温还可以通过改变浮游植物的丰度进而改变浮游甲壳动物的摄食,以此改变其群落结构。

其次,叶绿素 a 的浓度是衡量水体中浮游植物生物量的主要指标,而浮游植物是浮游动物的食物来源之一,浮游甲壳动物通过对浮游植物的下行控制效应,也是控制浮游动物群落结构的重要因素之一。浮游甲壳动物生物量与密度均与叶绿素 a 呈极显著相关($P<0.01$),这也与前人的研究结果相似^[28]。本研究结果显示都昌保护区秋季叶绿素 a 浓度高于其他季节,充足的食物来源为浮游甲壳动物的生长和繁殖提供了有利条件,这也是都昌保护区出现浮游甲壳动物秋季高于其他季节的主要原因之一。反之,冬季温度较低,浮游植物生长缓慢,进而影响浮游甲壳动物群落结构,导致冬季浮游甲壳动物生物多样性指数较低的原因之一。

最后,水位波动也会对浮游甲壳动物群落结构演替产生影响。一方面,水位波动意味着流速不稳定,不利于浮游甲壳动物的生长和繁殖。另一方面,水位波动也会影响水质,进而影响浮游甲壳动物群落结构。丰水期都昌保护区湖面宽广,湖水流速缓慢,为浮游甲壳动物的生长和繁殖提供有利条件。枯水期都昌保护区流速加快,水体透明度降低,不利于浮游甲壳动物的生长繁殖。而溶解氧和透明度也会影响浮游甲壳动物群落结构,可能是由于DO是水体自净能力的指标之一,浮游甲壳动物在水体中活动和生长需要消耗氧气进行呼吸作用,因此DO会对浮游甲壳动物生物量造成影响^[29]。浊度也是影响浮游甲壳动物群落结构的显著影响因子^[30],高矿物浊度可能会降低水体透明度,通过限制光照因素影响以浮游植物为食物来源的浮游甲壳动物。

而浮游甲壳动物群落结构的影响因素不仅仅是非生物因素(水文和水化因素),还要考虑生物因素(捕食)。捕食也是影响浮游甲壳动物群落结构的一大重要因素。鄱阳湖都昌县在2022年投放4900万尾鲢、鳙鱼苗开展“养护水生生物,建设美丽中国”渔业增殖放流活动。但鲢、鳙鱼苗属于滤食性鱼类,会选择捕食大型浮游甲壳动物,降低小型浮游甲壳动物的生存压力,小型浮游甲壳动物借助其生长周期短及繁殖快等特点快速成为水域优势物种,可能导致浮游动物小型化。并且鱼类对于浮游动物的下行效应,可以通过浮游动物生物量(ZB)/浮游植物生物量(PB)的比值进行反映^[31],其中根据计算得小矶山核心区ZB/PB比率

最低,这表明该区域面临最高的捕食压力,其次是三山核心区和撮箕湖一般区,南矶一般区面临的捕食压力最小,这也与在都昌县投放鲢鳙鱼苗的结果相符合。

鄱阳湖独特的水文条件也导致都昌保护区浮游甲壳动物的影响因子与其他研究结果不同^[10-12],枯水期时鄱阳湖处于河流状态,都昌保护区水位低,虽然营养盐浓度较高,但是温度低、流速快和透明度较低等条件限制了浮游甲壳动物的生长和繁殖。反之,丰水期时鄱阳湖处于湖泊状态,流速较缓和透明度较高有利于浮游甲壳动物的生长和繁殖,都昌保护区水位升高,稀释了营养盐浓度,但较高的温度可以加快浮游甲壳动物对营养盐的吸收。因此,都昌保护区浮游甲壳动物与温度、透明度、叶绿素a和水位变化相一致,却与营养盐变化相反。而刘宝贵^[32]研究发现河流、湖泊和水库三种不同生境,浮游甲壳动物的优势种群也会发生变化,而本文研究的鄱阳湖都昌保护区,其生境类型在枯水期和丰水期发生显著变化,这也是导致都昌保护区与其他研究结果不同的主要原因之一。

3.3 浮游甲壳动物与都昌保护区候鸟的关系

本研究显示,都昌保护区作为鄱阳湖流域越冬候鸟重要栖息地,浮游甲壳动物与都昌保护区栖息地的关系主要分为两方面。其一,浮游甲壳动物对栖息地水体的指示作用。前人研究调查发现浮游甲壳动物中简弧象鼻溞等可以作为富营养化水体的指示物种,而简弧象鼻溞作为都昌保护区优势种^[33],这也从侧面反映出都昌保护区水体逐渐富营养化,这也与采样期间发现蓝藻水华相吻合。而栖息地水体富营养化改变了浮游甲壳动物群落结构以及破坏营养级之间的能量流动^[34],也有研究证明水体富营养化会破坏候鸟的生存环境以及影响候鸟多样性^[35]。其二,都昌保护区设立以后,人为干扰减少,鸟类生境得到保护,鸟类数量显著增加可能会导致鸟类粪便对栖息地水质产生影响。而且鸟类对鱼类的捕食,间接减轻了鱼类对浮游甲壳动物的捕食压力,这样也会影响到浮游甲壳动物的群落组成和现存量的变化。

4 结论

都昌保护区共鉴定出浮游甲壳动物31种,其中枝角类浮游动物20种,桡足类浮游动物11种。年均密度213.81 ind./L,年均生物量为1.51 mg/L。都昌保护区浮游甲壳动物群落结构时空变化较大,季节上,秋季浮游甲壳动物的生物量和密度达到峰值,冬季种类最少;空间上,南矶一般区(D4)浮游甲壳动物密度和生物量较大,其次是撮箕湖一般区(D3),小矶山核心区(D1)和三山核心区(D2)差异较少。根据多样性指数和均匀度指数分析都昌保护区水质情况,结果表现为撮箕湖一般区(D3)水质环境最好,其次是小矶山核心区(D1)。简弧象鼻溞作为都昌保护区优势种,这也从侧面反映出都昌保护区水体呈富营养化状态,这也与调查期间发现局部出现蓝藻水华相吻合。保护区浮游甲壳动物群落结构的时空演替主要是由总氮、叶绿素a、水位和水温等因素共同决定。不同季节影响浮游甲壳动物的主导因素也不相同,冬季主导因素主要是营养盐;夏季和秋季主导因素主要是水温、水位和叶绿素a。

致谢:本文得到中国科学院太湖湖泊生态系统研究站和中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站在样品分析和实验条件的大力支持。

5 参考文献

- [1] Cao KQ, Li YK, Wang Q et al. Spring migration routes and activity characteristics of populations of *Anser fabalis* wintering in Lake Poyang. *J Lake Sci.*, 2020, 32(2): 496-505. DOI: 10.18307/2020.0218. [曹开强, 李言阔, 王强等. 鄱阳湖湿地豆雁(*Anser fabalis*)越冬种群的春季迁徙路线及其活动特征. 湖泊科学, 2020, 32(2): 496-505.]
- [2] Chen Y, Peng K, Zhang QJ et al. Spatio-temporal distribution characteristics and driving factors of zooplankton in Hongze Lake. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3753-3762. DOI: 10.13227/j.hjkx.202010195. [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. 环境科学, 2021, 42(8): 3753-3762.]
- [3] Kim HW, Hwang SJ, Joo GJ. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated large river (Nakdong River, Korea). *Journal of Plankton Research*, 2000, 22(8): 1559-1577. DOI: 10.1093/plankt/22.8.1559.
- [4] Yang C, Lu XX, Ba QS et al. Plankton community structure in Jingpo Lake and the relationship with environmental factors. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(1): 116-128. DOI: 10.11693/hyz20180200040. [蔡阳, 陆欣鑫, 巴秋爽等. 镜泊湖春、夏两季浮游生物群落结构及其与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 2019, 50(1): 116-128.]
- [5] Wang WX, Chen FZ, Gu XH. Community structures of zooplankton and its relation to environmental factors in five medium reservoirs in

- Nanjing City. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 216-223. DOI: 10.18307/2017.0123. [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. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 216-223.]
- [6] Du CL, Yang L, Zhao Y et al. Temporal and spatial variation of zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4513-4522. DOI: 10.13227/j.hjkx.201903099. [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. 环境科学, 2019, **40**(10): 4513-4522.]
- [7] Zhang QJ, Zhang GS, Wan SX et al. Effects of herbivorous overwintering migratory birds' droppings on the decomposition of *Carex cinerascens* Kükenth and C, N, P release in Lake Poyang wetland. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 814-824. DOI: 10.18307/2019.0319. [张全军, 张广帅, 万松贤等. 鄱阳湖植食越冬候鸟粪便对洲滩湿地薹草枯落物分解过程及碳、氮、磷释放的影响. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 814-824.]
- [8] Zhang J, Xie P, Tao M et al. The impact of fish predation and cyanobacteria on zooplankton size structure in 96 subtropical lakes. *PLoS ONE*, 2013, **8**(10): e76378. DOI: 10.1371/journal.pone.0076378.
- [9] Yang J, Zhou J, Qin BQ et al. Long-term variation characteristics of zooplankton community structure in Meiliang Bay, Lake Taihu. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1246-1255. DOI: 10.13227/j.hjkx.201907054. [杨佳, 周健, 秦伯强等. 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.]
- [10] Zhang JM, Gao J, Yang C et al. Metazooplankton community structure in Wushan Lake stocked densely with planktivorous filter-feeding big-head and silver carp. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(8): 1848-1857. DOI: 10.11870/cjlyzyhj202108007. [张佳敏, 高健, 杨诚等. 以鲢, 鲢放养为主的武山湖后生浮游动物群落结构特征. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(8): 1848-1857.]
- [11] Tan JH, Lin DQ, Wang YP et al. Zooplankton community structure in main habitat of Yangtze finless porpoise, confluence of Wanhe River and the Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(1): 71-78. DOI: 10.15928/j.1674-3075.201912250329. [谈金豪, 蔺丹清, 王银平等. 皖河口江豚主要栖息地浮游动物群落结构特征. 水生态学杂志, 2022, **43**(1): 71-78.]
- [12] Yang X, Ma JS, Zhang H et al. Community structure and the water quality during different hydrological periods in Lake Poyang. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(5): 1093-1103. DOI: 10.7541/2021.2020.148. [杨潇, 马吉顺, 张欢等. 鄱阳湖不同水文期浮游生物群落结构特征和影响因素及水质评价. 环境科学, 2021, **45**(5): 1093-1103.]
- [13] Chen YW, Chen KN, Hu YW. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method. *J Lake Sci*, 2006, **18**(5): 550-552. DOI: 10.18307/2006.0519. [陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素a测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.]
- [14] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 科学出版社, 1990.
- [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.
- [16] Shannon CE, Weaver W, Blahut RE et al. The mathematical theory of communications. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [17] Lu WQ, Chen X, Li Z et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Lianhuan Lake. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(6): 9. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.06.011. [鲁万桥, 陈昕, 李喆等. 连环湖两水体浮游动物群落结构特征及水质评价. 水生态学杂志, 2020, **41**(6): 9.]
- [18] Paerl HW, Xu H, McCarthy MJ et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N & P) management strategy. *Water Research*, 2011, **45**(5): 1973-1983. DOI: 10.1016/j.watres.2010.09.018.
- [19] Ahn C, Chung A, Oh H. Rainfall, phycocyanin, and N:P ratios related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir. *Hydrobiologia*, 2002, **474**(1): 117-124. DOI: 10.1023/A%3A1016573225220.
- [20] Elrifi IR, Turpin DH. Steady-state luxury consumption and the concept of optimum nutrient ratios: A study with phosphate and nitrate limited *Seleniastrum minutum* (chlorophyta). *Journal of Phycology*, 1985, **21**(4): 592-602. DOI: 10.1111/j.0022-3646.1985.00592.x.
- [21] Xie LQ, Xie P, Tang HJ. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake. *Environmental Pollution*, 2003, **122**(3): 391-399. DOI: 10.1016/S0269-7491(02)00305-6.
- [22] Boers P. The influence of pH on phosphate release from lake sediments. *Water Research*, 1991, **25**(3): 309-311. DOI: 10.1016/0043-1354(91)90010-N.
- [23] Kang LJ, Ji PF, Xu H et al. Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze river. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4030-4041. DOI: 10.13227/j.hjkx.202002017. [康丽娟, 季鹏飞, 许海等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素. 环境科学, 2020, **41**(9): 4030-4041.]
- [24] Cetinić I, Viličić D, Burić Z et al. Phytoplankton seasonality in a highly stratified karstic estuary (Krka, Adriatic Sea). *Springer Netherlands*, 2006, **555**(1): 31-40. DOI: 10.1007/1-4020-4697-9_3.
- [25] Zhu XY, Huang W, Zeng JN et al. Effects of nitrogen and phosphorus ratios on phytoplankton community structure in winter. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19**(2): 293-299. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2013.00293. [朱旭宇, 黄伟, 曾江宁等. 氮磷比对冬季浮游植物群落结构的影响. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(2): 293-299.]

- [26] Claska ME, Gilbert JJ. The effect of temperature on the response of *Daphnia* to toxic cyanobacteria. *Freshwater Biology*, 1998, 39(2) : 221-232. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1998.00276.x>.
- [27] Hanazato H. Effects of a Chaoborus-released chemical on *Daphnia ambigua*: Reduction in the tolerance of the *Daphnia* to summer water temperature. *Limnology & Oceanography*, 1991, 36(1) : 165-177. DOI: 10.4319/lo.1991.36.1.0165.
- [28] 王松, 陈红, 刘清等. 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.
- [29] 周晓梅. 滴水湖及其外圈水体浮游动物群落结构比较研究[学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2010.
- [30] Matsumura-Tundisi T, Tundisi JG, Souza-Soares F et al. Zooplankton community structure of the lower Xingu River (PA) related to the hydrological cycle. *Brazilian Journal of Biology*, 2015, 75(3) : S47-S54. DOI: 10.1590/1519-6984.03814BM.
- [31] Liu B, Liu J, Jeppesen E et al. Horizontal distribution of pelagic crustacean zooplankton biomass and body size in contrasting habitat types in Lake Poyang, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018. DOI: 10.1007/s11356-018-3658-7
- [32] Liu BG, Liu X, Wu Y et al. Spatial and temporal distribution characteristics of planktonic crustaceans in Lake Poyang. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24) : 8205-8213. DOI: 10.5846/stxb201505070941. [刘宝贵, 刘霞, 吴瑶等. 鄱阳湖浮游甲壳动物群落结构特征. 生态学报, 2016, 36(24) : 8205-8213.]
- [33] Li Q, Tian H, Jiang M et al. Community structure of zooplankton and influencing factors in Dianshan Lake of Shanghai. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(4) : 69-77. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2015.04.010. [李强, 田华, 姜民等. 淀山湖浮游动物群落结构特征及其影响因子. 水生态学杂志, 2015, 36(4) : 69-77.]
- [34] 黄祥飞, 陈雪梅, 伍焯田等. 武汉东湖浮游动物数量和生物量变动的研究. 水生生物学集刊, 1984, 8(3) : 345-358.
- [35] He XF, Wu FQ, Zhou QH et al. Research on water birds community feature and its relationship with the eutrophication in Chenu wetland. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(9) : 1499-1506. DOI: 10.11870/cjlyzyhhj201509009. [何小芳, 吴法清, 周巧红等. 武汉沉湖湿地水鸟群落特征及其与富营养化关系研究. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9) : 1499-1506.]