

DOI: 10.5846/stxb202009222464

谈金豪, 蔺丹清, 代培, 张家路, 刘凯. 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. 生态学报, 2021, 41(16): 6494-6505.

Tan J H, Lin D Q, Dai P, Zhang J L, Liu K. Zooplankton community structure and its key factors of Yangtze Dolphin Nature Reserve in Jiangsu Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6494-6505.

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

谈金豪^{1,2}, 蔺丹清^{1,2}, 代培^{1,2}, 张家路^{1,2}, 刘凯^{1,2,*}

1 农业农村部长江下游渔业资源环境科学观测实验站, 无锡 214081

2 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 无锡 214081

摘要: 江苏镇江长江豚类省级自然保护区是长江下游江段长江江豚的最主要的栖息地之一。为了解江豚主要栖息地的浮游动物群落结构, 于 2016 年 1 月至 2018 年 10 月对保护区水域浮游动物进行了现状调查, 分析了浮游动物群落时空结构变化特征及其与环境因子的关系。研究共发现浮游动物 4 门 41 属 90 种, 其中原生动物种类数最多, 为 40 种, 其次为桡足类和枝角类, 而轮虫类较少。三年共确定优势种 8 种, 以食藻类原生动物为主要优势类群。保护区浮游动物群落小型化趋势明显。浮游动物密度和生物量季节性差异显著 ($P < 0.05$), 总体上呈现夏、秋季较春、冬季高的现象。Pearson 相关性和 RDA 分析结果显示, 水温、溶氧、pH 和氮营养盐是造成浮游动物群落显著差异的主要环境因子。根据浮游动物群落结构特征及渔产潜力综合评估结果显示, 与历史资料相比, 保护区水生态环境有所改善, 但渔业资源匮乏的局面没有得到根本性的改变, 江豚的食物资源状况依然不容乐观。本研究结果为镇江保护区江豚栖息地生态环境的监测和保护研究提供了数据资料和理论依据。

关键词: 镇江长江豚类省级自然保护区; 浮游动物; 群落结构; 渔产潜力; 长江江豚

Zooplankton community structure and its key factors of Yangtze Dolphin Nature Reserve in Jiangsu Province

TAN Jinhao^{1,2}, LIN Danqing^{1,2}, DAI Pei^{1,2}, ZHANG Jialu^{1,2}, LIU Kai^{1,2,*}

1 Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Lower Reaches of the Changjiang River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi 214081, China

2 Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China

Abstract: The Zhenjiang Yangtze Dolphin Nature Reserve in Jiangsu Province is the one of the primary habitats of the Yangtze finless porpoise habitat in the lower reaches of the Yangtze River. In order to understand the community characteristics of zooplankton (including protozoa, rotifer, cladocerans and copepods), a field investigation of zooplankton was conducted in the Zhenjiang Yangtze Dolphin Nature Reserve from January 2016 to October 2018. The temporal and spatial variations in zooplankton community structure and their relationship with environmental factors were analyzed. A total of 4 phyla, 41 genera, and 90 species of zooplankton were identified, which dominated mostly by protozoa (40 species), while rotifer, cladocerans and copepods were rather rare. A total of 8 dominant species were identified in all years, the zooplankton community in Zhenjiang nature reserve is generally miniaturized and dominated by protozoa (7 species) that feed on phytoplankton. The zooplankton density and biomass have significantly seasonal difference ($P < 0.05$), and the temporal variability showed a trend that highest in summer and autumn, lowest in spring and winter. Pearson correlation and

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (2019JBFZ05); 农业财政专项“长江渔业资源与环境调查” (CJDC-2017-22)

收稿日期: 2020-09-22; **网络出版日期:** 2021-05-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuk@ffrc.cn

RDA analysis showed that water temperature, dissolved oxygen, pH and total Nitrogen were main factors related to significant differences in zooplankton communities among seasons. The variations of zooplankton community characteristics and fish potential production estimation through zooplankton indicated that, the aquatic ecology environment of nature reserve has improved when compared with historic data, but the situation of lack of fishery resources has not been changed yet, and nutrition requirements for porpoise were not optimistic. The results of this study can provide a theoretical basis for ecology monitoring and protective research of porpoise habitat in Zhenjiang Nature Reserve.

Key Words: Zhenjiang Yangtze Dolphin Nature Reserve; zooplankton; community structure; fish potential productivity; Yangtze finless porpoise

浮游动物群落作为水生态系统中常见的生态类群,在水生食物网的物质和能量循环过程中起到了至关重要的作用^[1]。浮游动物的存在不仅影响到微生物和浮游植物的群落结构变化,而且作为鱼虾类的饵料生物,会通过“上行效应”影响渔业资源的变动^[2]。同时,研究表明浮游动物群落结构受水温、pH 及氮磷等水环境因素的制约^[1,3],对水体环境变化敏感。因此,对浮游动物群落结构进行研究和分析,可以客观地反映出水域生态环境的优劣。

江苏镇江长江豚类省级自然保护区位于长江镇江江段,范围自上而下包括润扬大桥以下世业洲洲尾、定易洲及焦北滩洲滩及主航道水域(南侧以焦北滩夹江为界)、和畅洲北汊洲滩、边滩及水域,总面积 57.3 km²,其中核心区面积约 14.9km²,缓冲区面积约 22.8km²。保护区地理位置独特,生态环境良好,渔业资源丰富,历来是长江江豚活动较为频繁的水域^[4-5]。随着长江江豚栖息地的日趋碎片化,镇江长江豚类省级自然保护区已经逐渐成为长江下游长江江豚群体间基因交流的重要生态走廊之一,对于维持长江下游长江江豚栖息地的完整性具有重要生态学意义。从保护区建成至今,已有代梨梨等^[6]在 2010 年对保护区浮游动物群落结构特征及长江江豚生存状况进行了评估,然而随着南京以下 12.5m 水航道整治工程的实施,保护区面临着更严峻的考验,开展浮游动物群落演替的长期跟踪监测和阶段性全面调查,对目前江豚栖息地的保护性研究至关重要。

本文于 2016—2018 年按季度对镇江长江豚类保护区浮游动物群落现状进行了调查,探究其群落结构和水环境因子的关系,结合过去的研究成果分析近年来浮游动物群落结构的演替特征,以期为镇江长江豚类省级自然保护区生境的保护和管理提供科学的依据与对策。

1 材料与方法

1.1 采样时间和采样断面

镇江长江豚类保护区浮游动物群落结构调查于 2016 年至 2018 年开展,每年按季节分别于春季(4 月)、夏季(6 月)、秋季(10 月)和冬季(1 月)各采样一次,三年共计采样 12 个频次。根据镇江长江豚类保护区水域特点,选取 6 个采样断面,具体采样点如图 1 所示。每个断面设置 3 个样点,即断面的南岸、北岸及中间(南、北岸样点距岸约 50m,各调查时期样点水深 0.6—15.6m,多数小于 10m,最大水深出现在 2018 年夏季的断面 3 南岸;江中间样点水深均大于 20m,介于 22.8—32.9m 之间),其中断面 1 至断面 3 位于保护区临近的主航道水域(图 1),断面 4 和断面 5 位于保护区核心区,断面 6 则位于保护区的实验区和缓冲区。

1.2 实验方法

1.2.1 浮游动物样品采集与分析

原生动物和轮虫类样本的定量采集,使用 5L 有机玻璃采水器,在各样点水体表层(0.5m)和底层(离底 0.5m)分别采水,取均匀混合水样 1L 后,加入 15mL 鲁哥试剂和 4%的甲醛溶液固定,带回实验室静置 48h 后,用虹吸管吸去上层清液,浓缩并定容至 50mL,保存等待镜检;枝角类和桡足类的样本则使用 5L 玻璃采水器,采集 20L 水样,经 25#浮游生物网过滤浓缩,放入 100mL 样本瓶,加入 4%的甲醛溶液固定,带回实验室等待

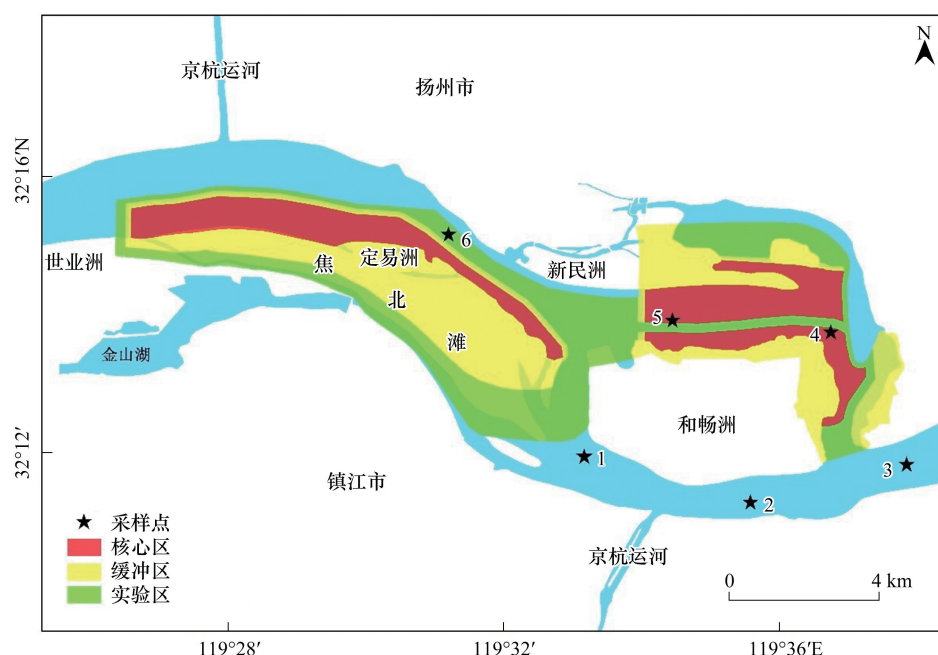


图1 镇江长江豚类保护区采样截面

Fig.1 Sampling sites in Zhenjiang Yangtze dolphin nature reserve

镜检。

参照《淡水浮游生物研究方法》、《原生动动物学》、《中国淡水轮虫志》、《中国动物志(淡水枝角类)》和《中国动物志(淡水桡足类)》等^[7-11]鉴定浮游动物种类,原生动物和轮虫均取 1mL 浓缩水样,采用 1mL 计数框计数,放置于 10×10 显微镜下每个样本重复计数 3—4 次,取其平均值进行数据统计;甲壳动物(枝角类和桡足类)则将浓缩水样中的个体全部计数。

浮游动物密度和生物量换算参考《淡水浮游生物研究方法》^[7],浮游动物生物密度计算公式为

$$N = (V_s \times n) / (V \times V_a)$$

式中 N 为 1 L 水中浮游动物的个体数(个/L), V_s 为浓缩样品的体积(mL), n 为计数所得的个体数, V 为采样体积(L), V_a 为计算体积(mL)。

浮游动物生物量计算公式为:

$$B = \sum_{i=1}^s (N_i \times W_i)$$

式中, B 为 1L 水样中浮游动物总生物量(mg/L), N_i 为 1L 水样中第 i 种浮游动物个体数, W_i 为第 i 中浮游动物重量系数。

1.2.2 水质理化因子测定

水温、酸碱度和溶解氧等指标使用便携式水质检测仪(HANNA HI 98703、HACH-HQ30D&2100Q)现场测定,透明度使用塞氏盘测定;总氮、总磷和叶绿素 a 等水质指标,按水样采集规范采集,在各样点水体表层(0.5m)和底层(离底 0.5m)分别采水 500mL,水样均匀混合后,存放于玻璃瓶中,放置在 4℃ 冷藏箱中带回实验室,在 24 小时内参照《水和废水监测分析方法》^[12] 进行测定。监测的水质数据按照《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)进行分析。

1.3 数据分析和处理

运用 Shannon-Wiener 指数(H')、Margalef 指数(D)^[13]评价保护区浮游动物群落结构的多样性,并评价保护区的水质状况^[14],优势度指数(Y)确定浮游动物群落中的优势种。

(1) Shannon-Wiener(H')指数

$$H' = -\sum (N_i/N) \log_2(N_i/N)$$

(2) Margalef(D)指数

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

(3) 优势度指数($Y>0.02$ 时,即为优势种)

$$Y = (N_i/N) \times F_i$$

式中, N 为样品中的总个体数量; N_i 为第 i 种的个体总数量; F_i 为第 i 物种出现的频率; S 为样品中种类总数。多样性指数的水质评价标准为:0—1 为多污型、1—2 为 α -中污、2—3 为 β -中污、3—4 为寡污型、>4 为清洁。

相关性分析:选取浮游动物的物种数、密度和生物量,以及水环境因子指标。对数据进行 $\log(X+1)$ 对数转化使之呈正态分布,利用 Pearson 相关性分析法分析浮游动物群落结构与环境因子的相关性。

冗余分析(RDA)分析:基于 canoco4.5 软件对浮游动物与环境因子进行 RDA 分析。在进行 RDA 分析前,进行去趋势对应性分析(DCA),若 DCA 排序结果小于 3.0,则选取 RDA 分析。

渔产力评估:通过浮游动物生物量来计算镇江保护区的渔产潜力(F),从而评估保护区江豚容纳量。

$$F = (b \times P/B \times a) / K$$

式中, b 为浮游动物平均生物量; P/B 指浮游动物现存量与生物量之间的比值; a 为鱼类对浮游动物的利用率; K 为鱼类摄食的饵料系数。参考相关文献^[6],确定 P/B 系数为 40, a 为 30%, K 为 10。

2 结果

2.1 环境因子分析

对保护区水域 2016—2018 年的调查结果显示(表 1),水温 7.6—25.9℃,均值为 18.2℃,均为夏季最高,冬季最低;pH 变幅为 7.42—8.49,均值为 8.04,保护区水体总体偏碱性。总氮(TN)、总磷(TP)和叶绿素 a(Chla)年度波动较大,其中 TN 变幅为 0.52—2.84mg/L,均值为 2.00mg/L;TP 变幅为 0.01—0.38mg/L,均值为 0.14mg/L;Chl-a 变幅为 0.75—15.93 mg/m³,均值为 3.88 mg/m³。各水环境指标季节性差异较为显著($P<0.05$)。

表 1 镇江保护区不同季节环境参数

Table 1 Environmental parameters of Zhenjiang nature reserve in different seasons

年份 Year	季节 Season	水温 WT/℃	溶解氧 DO/(mg/L)	酸碱度 pH	透明度 SD/cm	总氮 TN/(mg/L)	总磷 TP/(mg/L)	叶绿素 a Chla/(mg/m ³)
2016	春	19.97±0.1 c	7.31±0.06 c	7.94±0.12 a	17.67±3.46 b	1.93±0.45a	0.095±0.02 c	14.84±0.7 a
	夏	25.71±0.09 a	6.1±0.15 d	8.00±0.02 a	27.67±2.61 a	1.41±0.27 b	0.14±0.04 bc	8.44±0.36 b
	秋	21.76±0.09 b	7.86±0.05 b	7.99±0.03 a	30.11±4.9 a	0.95±0.1 b	0.17±0.02 b	7.47±0.39 c
	冬	7.72±0.11 d	11.33±0.03 a	7.46±0.03 b	15.56±1.64 b	1.37±0.13 b	0.38±0.19 a	1.61±0.19 d
2017	春	19.2±0.08 c	7.5±0.03 c	8.37±0.03 a	34.39±3.1 a	2.42±0.07 a	0.105±0.01 b	1.83±0.13 a
	夏	24.52±0.06 a	6.7±0.08 d	7.85±0.05 a	24.61±1.85 b	2.44±0.14 a	0.113±0.01 b	1.55±0.29 ab
	秋	19.52±0.16 b	8.78±0.05 b	8.32±0.13 b	35.00±1.79 a	2.43±0.07 a	0.15±0.01 a	1.27±0.34 ab
	冬	10.56±0.21 d	9.94±0.03 a	8.03±0.03 c	31.11±2.74 ab	2.31±0.13 a	0.12±0.02 b	1.62±0.09 b
2018	春	18.16±0.36 c	10.68±0.13 a	8.07±0.18 a	41.06±7.7 a	2.03±0.69 ab	0.09±0.04 b	1.98±0.63 ab
	夏	23.33±0.18 a	7.82±0.12 c	8.19±0.17 a	33.11±7.35 ab	2.39±0.07 a	0.112±0.01 ab	2.42±0.3 a
	秋	20.53±0.15 b	10.34±0.07 b	8.06±0.23 a	30.16±3.39 b	1.92±0.05 b	0.11±0.01 ab	1.72±0.19 b
	冬	9.41±0.23 d	10.38±0.08 b	8.23±0.06 a	28.78±4.64 b	2.41±0.06 a	0.13±0.01 a	1.78±0.09 b

WT: 温度 Water temperature; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; Chla: 叶绿素 a Chlorophyll a; SD: 透明度 Secchi depth; TP: 总磷 Total phosphorus; TN: 总氮 Total nitrogen; 表中上标字母表示有显著差异($P<0.05$)

根据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)评价镇江保护区水质,结果表明保护区水域 DO、pH 和 TP

等指标符合Ⅲ类的水质标准, TN 指标则大部分超出。综合而言, 镇江保护区水质达到Ⅲ类水质的功能标准, TN 成为主要制约因素。

2.2 浮游动物种类组成

2016—2018 年保护区江段共鉴定出浮游动物 90 种, 其中原生动物物种数最多, 共 40 种, 占浮游动物物种总数的比例为 43.01%; 其次为桡足类有 22 种, 占比 23.66%; 枝角类 15 种, 占 16.13%; 轮虫类最少, 仅 13 种, 占 13.98%。其中 2016 年鉴定出浮游动物 42 种, 夏季最多, 冬季最少; 2017 年 60 种, 秋季最多, 冬季最少; 而 2018 年共 41 种, 春季最多, 冬季最少。各年度浮游动物种类组成较稳定, 无明显差异, 总体表现为原生动物最多, 其次为桡足类, 轮虫类和枝角类占比较少。各年度种类数季节性差异较为显著(图 2), 而空间分布差异不明显(图 3)。

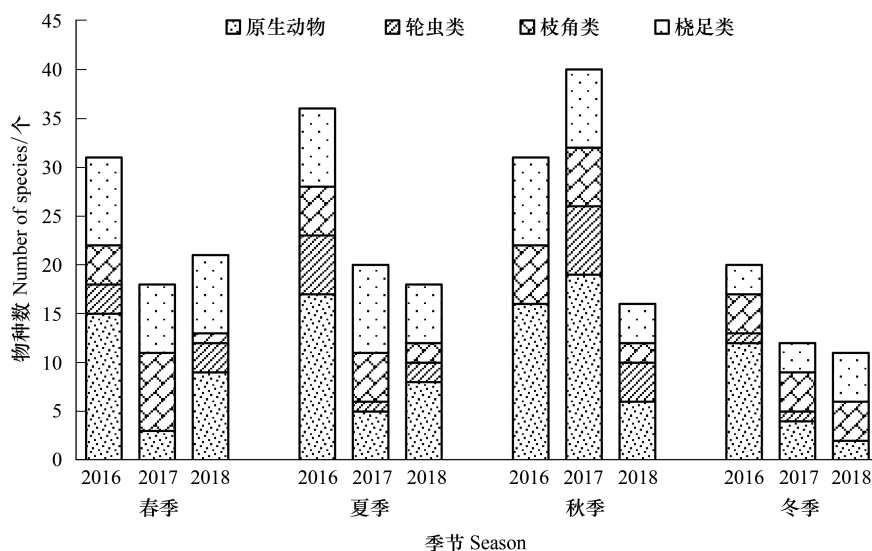


图 2 2016—2018 年保护区浮游动物物种数季节变化

Fig.2 Seasonal variation in species composition of zooplankton in Zhenjiang nature reserve from 2016 to 2018

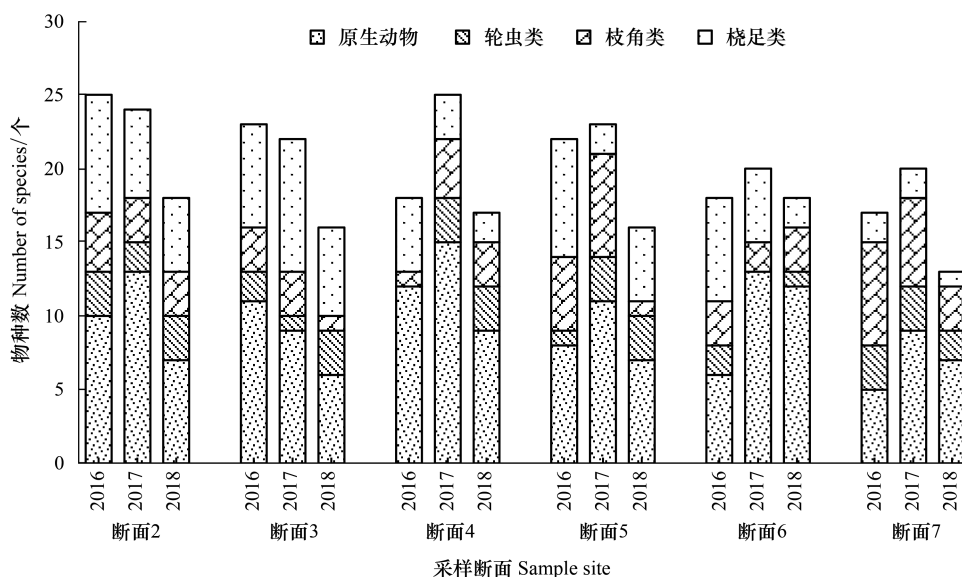


图 3 2016—2018 年保护区浮游动物物种数空间变化

Fig.3 Spatial variation in species composition of zooplankton in Zhenjiang nature reserve from 2016 to 2018

2.3 优势种

2016 至 2018 年镇江保护区浮游动物优势种类共计 8 种,包括 7 种原生动物和 1 种轮虫类。表 2 可见,从种类组成上看,原生动物中淡水麻铃虫 (*Leprotintinnus fluviatile*)、恩茨筒壳虫 (*Tintinnidium entzii*)、王氏似铃壳虫 (*Tintinnopsis wangi*) 和江苏似铃壳虫 (*Tintinnopsis kiangsuensis*) 连续三年都有出现,呈季节性变化,春季和冬季的主要优势种为王氏似铃壳虫和恩茨筒壳虫,而在夏季和秋季则是淡水麻铃虫和江苏似铃壳虫占优。根据原生动物和轮虫的水体营养类型指数种类表^[15-16],原生动物的优势种多为喜清洁水体类群,而 2018 年春季出现的轮虫优势种-针簇多肢轮虫,属于富营养水体指示种类。

表 2 保护区浮游动物优势种

Table 2 Dominant species of zooplankton in nature reserve

优势种 Dominant species	出现季节 Appearance season	指示类型 Indicative type	优势种 Dominant species	出现季节 Appearance season	指示类型 Indicative type
原生动物 Protozoa			王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	春、夏、冬	中营养
球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i>	夏	寡营养	江苏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis kiangsuensis</i>	夏、秋	寡营养
淡水麻铃虫 <i>Leprotintinnus fluviatile</i>	夏、秋	寡营养	雷殿似铃壳虫 <i>Tintinnopsis leidy</i>	冬	寡营养
恩茨筒壳虫 <i>Tintinnidium entzii</i>	春、冬	寡营养	轮虫类 Rotifer		
小筒壳虫 <i>Tintinnidium pusillum</i>	秋	寡营养	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	春	富营养

2.4 浮游动物密度和生物量

镇江保护区 2016—2018 年浮游动物的密度和生物量的季节变化和水平分布见图 4、图 5。2016 年浮游动物年均生物密度为 557.66 个/L,生物密度季节变化为秋季 (861.91 个/L) > 夏季 (778.92 个/L) > 春季 (295.29 个/L) > 冬季 (150.07 个/L),存在极显著的季节性变化 (ANOVA, $F=48.138$, $P<0.01$); 2017 年年均生物密度均值为 293.19 个/L,季节变化与 2016 年相一致,秋季显著高于其它季节,季度间存在极显著差异 (ANOVA, $F=93.232$, $P<0.01$); 2018 年年均密度最小,为 115.6 个/L,季节性差异显著 (ANOVA, $F=3.296$, $P<0.05$),生物密度的高峰在春季 (150.07 个/L),低谷出现在冬季 (64.44 个/L)。各年度生物密度样点间空间分布均无显著差异 ($P>0.05$)。

2016 年年均生物量为 0.06mg/L,夏季最高 (0.155mg/L),冬季最低 (0.01mg/L),季度差异极显著 (ANOVA, $F=15.711$, $P<0.01$); 2017 年生物量均值为 0.06mg/L,最大值为 0.18mg/L,出现在秋季,最小值出现在冬季为 0.003mg/L,生物量存在极显著的季节性差异 (ANOVA, $F=30.216$, $P<0.01$); 2018 年生物量的季节变化也较为显著 (ANOVA, $F=4.173$, $P<0.05$),从高到低依次为夏季 (0.067mg/L) > 秋季 (0.038mg/L) > 春季 (0.025mg/L) > 冬季 (0.006mg/L)。各年度生物量空间分布同样无显著差异 ($P>0.05$)。

总体来说,保护区浮游动物的密度组成中原生动物占绝对优势,占比超过 91%,其次为轮虫,占 8.5% 左右,而枝角类和桡足类占比 1% 都不到。从 2016 年到 2018 年浮游动物的密度和生物量均呈现逐年下降趋势,且都存在显著的季节性差异,高峰一般都出现在夏秋季节,而冬季的密度和生物量均处于最低。从空间特征来看,无论是保护区核心区、缓冲区,还是主航道之间,密度和生物量的差异都不显著。

2.5 多样性指数

对保护区 2016—2018 年各年度四季的浮游动物生物多样性指数进行了比较 (图 6, 7)。结果表明,2016 年 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 年均 0.88,秋季最高 (1.02),冬季最低 (0.78),存在显著的季节性差异 (ANOVA, $F=5.344$, $P<0.01$); 2017 年年均值 0.68,季节性差异极显著 (ANOVA, $F=8.761$, $P<0.01$),最大值出现在秋季,最小值在冬季; 2018 年 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 全年变化范围为 0.33—0.45,年均 0.4,季节变化为秋季最高,春季最低。

2016 年 Margalef 丰富度指数 D 变幅为 0.66—2.33,年均 1.13,季节变化特征为春季最高,冬季最低

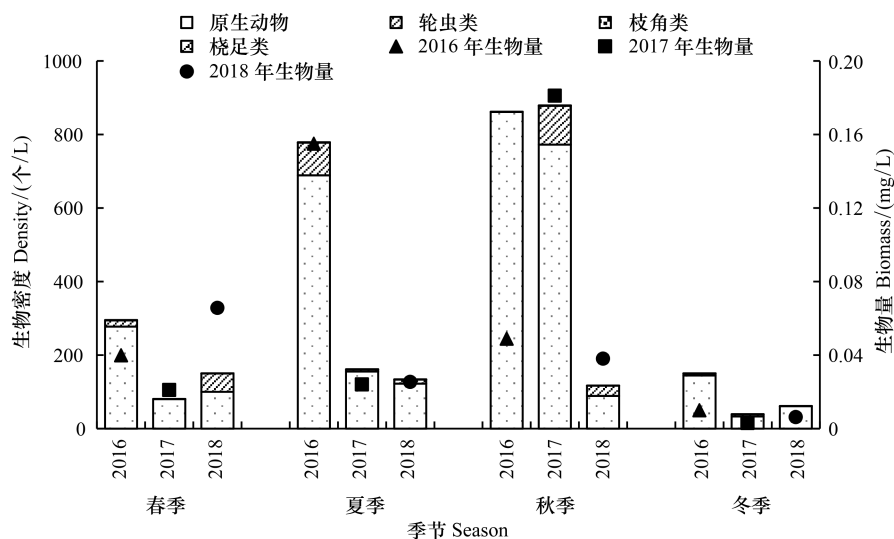


图4 2016—2018年保护区浮游动物密度和生物量季节变化

Fig.4 Seasonal variation in density and abundance of zooplankton in Zhenjiang nature reserve from 2016 to 2018

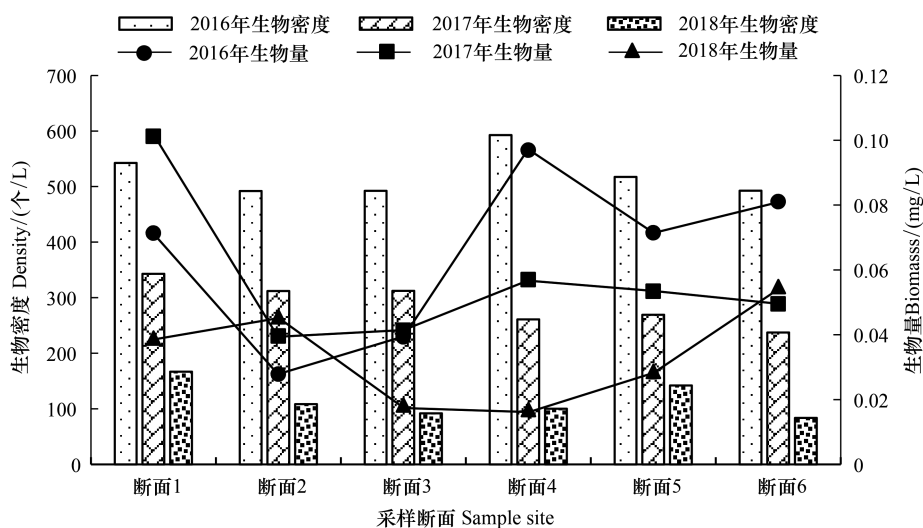


图5 2016—2018年保护区浮游动物密度和生物量空间变化

Fig.5 Spatial variation of zooplankton density and abundance in Zhenjiang nature reserve from 2016 to 2018

(ANOVA, $F=3.251$, $P<0.01$); 2017 年年均值为 1.29, 季节性变化与上年一致 (ANOVA, $F=4.313$, $P<0.01$); 2018 年 Margalef 丰富度指数 D 年均 2.37, 最大值则出现在冬季 (3.8), 最低值在秋季 (0.62)。

保护区浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 和 Margalef 丰富度指数 D 均存在显著的季节性差异, 而各样点间的差异则不大。根据多样性指数来评价保护区的水质, 春、冬季两属于中污-多污型, 夏、秋两季多属于中污型。总体而言, 保护区水质属于中污型。

2.6 浮游动物群落结构与环境因子的相关性分析

2.6.1 浮游动物与环境因子的相关性分析

当环境变量间的相关程度较高, 易导致系数估计的误差, 会影响到 Pearson 相关性分析的结果。因此, 在对保护区浮游动物群落与环境因子进行 Pearson 相关性分析之前, 对本文选取的水温 (T)、溶氧 (DO)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和叶绿素 a ($Chl-a$) 等 7 个环境数据进行共线性检验, $VIF>10$ 表现共线性显著, 若 VIF 介于

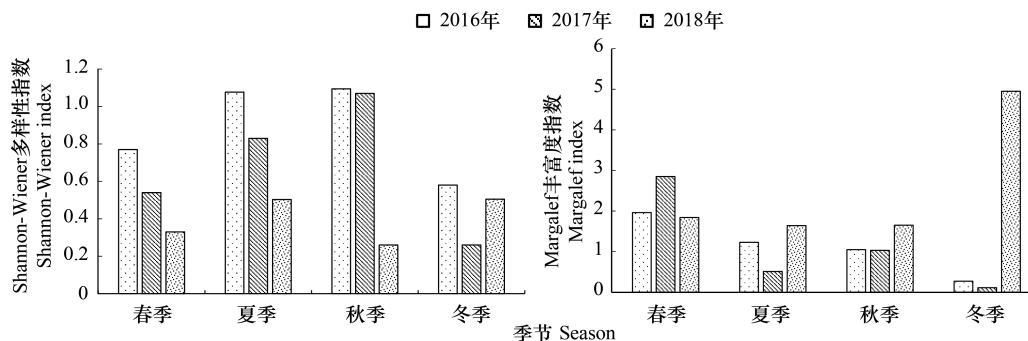


图 6 2016—2018 年保护区浮游动物多样性指数季节变化

Fig.6 Seasonal variation of zooplankton diversity index in Zhenjiang nature reserve from 2016 to 2018

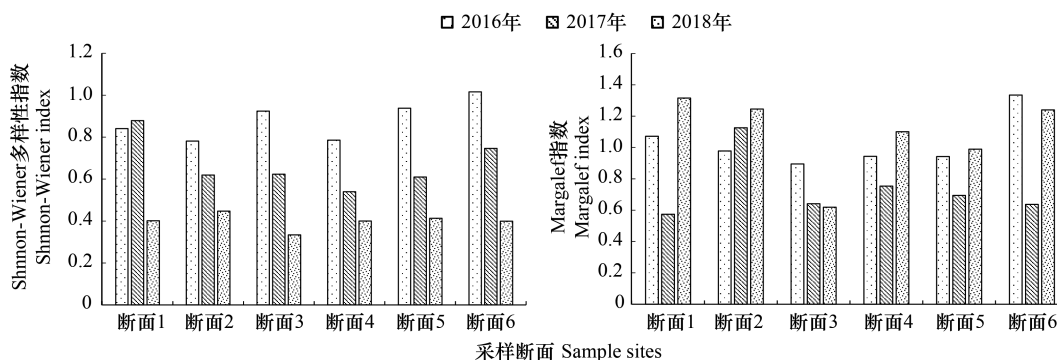


图 7 2016—2018 年保护区浮游动物多样性指数空间变化

Fig.7 Spatial variation of zooplankton diversity index in Zhenjiang nature reserve from 2016 to 2018

0—10 之间,则表示共线性不显著。检验结果如下表所示(表 3),结果显示选取的环境数据共线性并不显著,故本文选取的 7 个环境数据可以作为研究浮游动物密度变化的影响因子。

表 3 环境因子共线性诊断

Table 3 Collinear diagnosis of environmental parameters

环境因子 Environmental factor	t 值 t-value			方差膨胀系数 VIF		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
水温 WT	2.566	1.921	4.512	15.004	4.788	2.96
酸碱度 pH	1.211	1.071	0.055	5.221	5.196	1.435
溶氧 DO	1.004	1.606	-0.378	2.781	9.298	2.266
透明度 SD	-0.119	-1.534	2.199	5.517	4.743	1.75
总氮 TN	-0.678	0.887	-1.215	3.406	1.43	7.076
总磷 TP	0.28	-0.124	2.781	6.746	6.5	10.899
叶绿素 a Chla	-1.008	-0.229	-1.569	5.752	1.904	6.438

对镇江保护区环境因子与浮游动物的密度进行相关性分析,结果表明(表 4),浮游动物的物种数、密度和生物量,与水温、透明度、TN、TP 和叶绿素 a 呈显著正相关,与溶氧、pH 呈显著负相关。由此可见,浮游动物的密度和生物量会随着水温的升高,或是营养盐浓度的增加而增加,同时,叶绿素 a 和透明度的提高也会对浮游动物的生长起到一定促进作用。而水体碱性的提高,以及过高的溶氧,可能会导致浮游动物的数量有所下降。

表 4 保护区浮游动物与环境因子相关性分析

Table 4 Correlation analyses of zooplankton and environmental parameters of nature reserve								
年份 Year	相关系数 Correlation coefficient	水温 WT	酸碱度 pH	溶氧 DO	透明度 SD	总氮 TN	总磷 TP	叶绿素 a Chla
2016	浮游动物物种数	0.878 **	-0.869 **	—	0.55 **	—	0.609 **	0.845 **
	浮游动物密度	0.877 **	-0.841 **	—	—	0.44 *	—	0.52 **
	浮游动物生物量	0.602 **	-0.469 *	-0.664 **	0.572 **	—	0.454 *	—
2017	浮游动物物种数	0.744 **	-0.741 **	—	—	—	0.662 **	0.658 **
	浮游动物密度	0.607 **	-0.588 **	-0.434 *	—	0.557 **	0.435 *	—
	浮游动物生物量	—	-0.436 *	—	0.647 **	0.634 **	—	—
2018	浮游动物物种数	0.686 **	-0.415 *	—	0.503 **	0.449 *	—	—
	浮游动物密度	0.552 **	—	-0.444 *	—	0.453 **	—	—
	浮游动物生物量	—	-0.485 **	-0.42 *	—	—	0.549 **	—

“*”表示 $P<0.05$, “**”表示 $P<0.01$, “—”表示无显著相关性; VIF: Variance inflation factor

2.6.2 浮游动物与环境因子的 RDA 分析

为了进一步探究镇江保护区环境因子对浮游动物的影响,本文综合各年度调查中常见的物种,根据浮游动物密度在一个样点中至少 $\geq 1\%$,且出现频率 $\geq 25\%$,筛选出 14 种浮游动物进行 DCA 分析(表 5),结果显示,排序轴长度小于 3,故选择 RDA 进行典范对应性分析。RDA 分析结果显示,前两轴的特征值分别为 24.9% 和 17.09%,共解释了浮游动物群落整体的 74.78%,物种和浮游动物的相关性都达到 0.9,表明 RDA 排序图可以很好地反映环境因子对浮游动物的影响。

表 5 典范对应分析浮游动物代码

Table 5 Code of zooplankton species for RDA analysis			
种类 Species	代码 Code	种类 Species	代码 Code
球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i>	SP1	小多肢轮虫 <i>Polyarthra minor</i>	SP8
淡水麻铃虫 <i>Leprotintinnus fluviatile</i>	SP2	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	SP9
恩茨筒壳虫 <i>Tintinnidium entzii</i>	SP3	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	SP10
雷殿似铃壳虫 <i>Tintinnopsis leidyi</i>	SP4	小栉溞 <i>Daphnia cristata</i>	SP11
江苏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis kiangsuensis</i>	SP5	无节幼体 <i>Copepod nauplii</i>	SP12
王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	SP6	如愿真剑水蚤 <i>Eucyclops speratus</i>	SP13
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	SP7	球状许水蚤 <i>Schmackeria forbest</i>	SP14

物种与环境因子的 RDA 分析排序图显示(图 8),淡水麻铃虫、球形砂壳虫受水温的影响比较大,与之呈现密切的正相关关系,其密度会在夏、秋季较高。小多肢轮虫和针簇多肢轮虫与溶氧的正相关性较大,反之螺形龟甲轮虫偏向于溶氧较低的水体。小栉溞喜好在氮营养程度高,且偏碱性的水体中生存,与 TN 和 pH 密切相关。雷殿似铃壳虫则喜欢生活在透明度高的水体中。因此,水温、pH、透明度、TN 和溶氧是影响镇江保护区浮游动物群落的重要因素。RDA 分析排序图不仅能解释环境因子对浮游动物群落结构的影响,而且能反映出不同物种的生态适应性,比如恩茨筒壳虫和螺形龟甲轮虫在排序图中处于对立位置,表现出显著差异的环境需求;而小多肢轮虫和针簇多肢轮虫在排序图中的位置较为接近,说明两者的生态习性较为相似。

2.7 渔产力及江豚容纳量评估

根据 2016 至 2018 年浮游动物的年均生物量,通过渔产力公式计算分析可以得出(表 6),保护区各年的渔产潜力分别为 1163.96kg/km²、1026.03kg/km²和 610.22kg/km²,按每头长江江豚每年摄食 1500kg 计算,那么理论上保护区对长江江豚的容纳量范围在 23—44 头。然而,综合考虑到江豚适口鱼类资源的分布等环境因素的限制,实际上保护区内可以利用的渔产力将远远不足,江豚的容纳量也远小于最低值。同时,对三年的渔产力及江豚容纳量对比发现,两者呈现出逐年下降的趋势。

3 讨论

3.1 保护区浮游动物群落结构特征

通过 2016—2018 年连续三年对镇江保护区浮游动物群落的调查,结果显示 3 个年份浮游动物群落结构相对稳定,均以原生动物占优,而轮虫类、以及个体较大的枝角类和桡足类占比相对较少,发现的 8 种优势种也主要为食藻、食菌和碎屑功能类群原生动物。浮游动物密度和生物量构成中,原生动物是密度的主体,而生物量中则是枝角类和桡足类共同占有优势,密度和生物量存在显著的季节性变化,总体表现为夏、秋季高于春、冬季。相比于长江干流湖北段^[17]、江苏段^[18,19]而言,保护区江段物种数和生物量略少,其密度量要高,这可能与江心洲有关^[20],和畅洲作为长江下游典型的江心洲滩,洲滩附近水生植被丰富,水质稳定,为一些特定种类提供了良好的栖息环境。本次调查结果与代梨梨等^[6]对镇江保护区浮游动物群落结构特征的历史研究数据相比,原生动物、枝角类和桡足类占总数的比例结构类似,但轮虫类占比呈显著下降趋势。同时,与国内其他河流相比较,本研究与嫩江^[21]、富春江^[22]、松花江^[23]以耐污、喜富营养水体的轮虫类群为主的群落组成也有所不同。造成这种差异的主要原因可能是水文条件和水体营养状况的联合作用。一方面,和畅洲沿岸为航道整治修建的丁坝,导致镇江段水流速加大,泥沙量增加,透明度降低,不利于环境敏感性轮虫的发展^[24],比较而言,原生动物对此具有更强的适应性^[20]。另一方面,保护区周边自然生态良好,水体营养水平不高,在一定程度上影响到轮虫的生长和繁殖^[25],多数富营养化水体指示种无法形成优势类群。

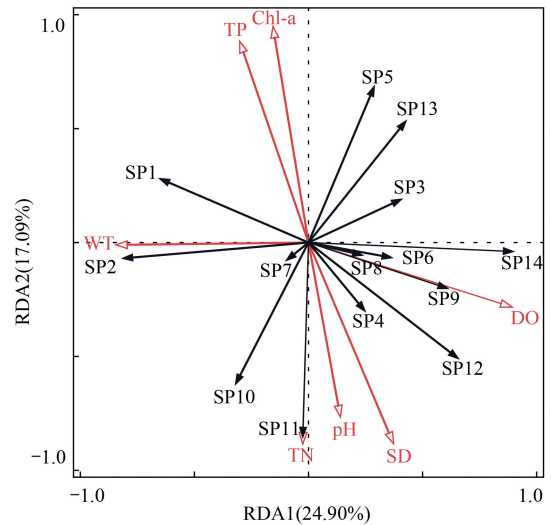


图 8 镇江保护区浮游动物与环境因子 RDA 分析

Fig.8 RDA analysis of zooplankton in Zhenjiang nature reserve

WT: 温度; DO: 溶解氧; Chla: 叶绿素 a; SD: 透明度; TP: 总磷; TN: 总氮; SP1: 球形砂壳虫 *Diffugia globulosa*; SP2: 淡水麻铃虫 *Leprotinnus fluviatile*; SP3: 恩茨筒壳虫 *Tintinnidium entzii*; SP4: 雷殿似铃壳虫 *Tintinnopsis leidy*; SP5: 江苏似铃壳虫 *Tintinnopsis kiangsuensis*; SP6: 王氏似铃壳虫 *Tintinnopsis wangi*; SP7: 螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*; SP8: 小多肢轮虫 *Polyarthra minor*; SP9: 针簇多肢轮虫 *Polyarthra trigla*; SP10: 长额象鼻溞 *Bosmina longirostris*; SP11: 小栉溞 *Daphnia cristata*; SP12: 无节幼体 *Copepod nauplii*; SP13: 如愿真剑水蚤 *Eucyclops speratus*; SP14: 球状许水蚤 *Schmackeria forbest*

表 6 保护区渔产潜力及江豚容纳量估算

Table 6 Fish potential production and Yangtze finless porpoise capacity of Zhenjiang nature reserve

年份 Year	年均生物量 Annual biomass/ (kg/km ²)	实际产量 Actual production/ (kg/km ²)	渔产潜力 Fish potential productivity/ (kg/km ²)	江豚容纳量 Capacity/头
2016	969.97±356.92	38798.76±14276.67	1163.96±428.3	44
2017	855.03±310.46	34201.08±12418.33	1026.03±372.55	39
2018	508.52±208.55	20340.84±8342.01	610.22±250.26	23

3.2 浮游动物群落结构变化与环境的关系

影响河流湖泊浮游动物群落结构的环境因素一直是淡水浮游动物生态学研究的重点,在阐释河流浮游动物群落的变化时,通常会探讨水温、营养盐、酸碱度(pH)等水体理化因素的影响。根据本研究浮游动物与环境因子的 Pearson 相关性和 RDA 分析结果显示,对镇江保护区浮游动物群落结构的影响较为显著的环境因子是水温、TN、pH 和溶解氧。温度通常被认为是影响浮游动物种类组成、数量和分布的最主要因素^[2,14]之一,在本次调查中,浮游动物密度和生物量的变化与水温的变化趋势基本一致,随着水温的升高,浮游动物繁殖速

度加快,种群数量会迅速增长,因此,密度和生物量在夏、秋季节达到顶峰。有研究表明^[26-27]水体中的氮等营养盐浓度变化,能够影响浮游动物群落的演替。聂雪等^[28]对鄱阳湖子湖浮游动物群落结构的研究结果显示,营养盐通过调控浮游植物来间接影响浮游动物群落结构,氮水平升高使得水体的营养化水平提高,造成浮游植物大量繁殖,浮游植物及其分解后的碎屑可以为浮游动物提供更为丰富的食物来源,从而促进浮游动物的生长繁殖。在本研究中 TN 与浮游动物密度的显著正相关关系,体现出 TN 对浮游动物密度增长的向作用。溶氧和 pH 也会影响浮游动物群落的变化,郭坤等在对湖北长湖^[29]的研究中发现,春、夏季节大部分优势种与酸碱度、溶氧呈负相关,较高的溶氧和 pH 抑制了一些轮虫和枝角类的生长。对比本研究中物种数量和密度与 pH、溶氧呈现的显著负相关性,可以推测保护区江段的大多数物种对偏碱性、高溶氧的水体具有良好的适应性。

相比与湖泊、水库等静态水体,河流是具有单一流向的线型生境,流动状态、水文状况、岸线类型等诸多条件,都会对河流浮游动物群落的形成产生重要影响^[30]。Pace 等^[31]对哈德逊河浮游动物群落的调查中发现河流的流动状态与浮游动物丰度存在密切的相关性,不同河流、湖泊之间水体滞留时间的差异,会导致浮游动物丰度的差异,即使是在同一条河流的不同河段,其浮游动物群落的丰度也不完全相同。与沿江一些湖泊相比^[32-33],本研究中浮游动物的低密度和生物量印证了这一观点。Matsumura 等^[34]在研究和对比了巴西兴谷河旱季和雨季前后的浮游动物的组成和丰度后认为,降水量、以及浊度和径流量也是浮游动物群落的显著影响因子。考虑到长江的汛期,保护区浮游动物的现存量在丰水期远高于枯水期,也可能与降水和径流量变化有关。近年来浮游动物与气候变化的关系成为热点^[35],但相关研究在国内涉及较少,在今后的研究中应予以探究。

除非生物因素外,鱼类捕食等生物因素也会造成浮游动物群落的变异^[24]。本研究浮游动物群落组成分析显示,保护区浮游动物以原生动物类群常年占优,浮游甲壳动物则较为罕见,总体上呈现小型化的现象。有研究表明,鲢、鳙作为滤食性物种,会优先摄食大型甲壳类浮游动物^[36]。同时,短颌鲚、鳊和贝氏鳊等小型鱼类对体型较大的浮游动物的摄食偏好^[37],降低原生动物等小型浮游动物的生存竞争压力。此外,对浮游动物生态位的相关研究发现^[38],群落物种间对有限资源或生存空间的竞争,也会促进浮游动物群落结构的改变。

3.3 渔产潜力及江豚容纳量分析

人类活动剧增及其产生的影响导致长江江豚生境日趋恶化,镇江保护区作为长江江豚适宜的栖息地之一,以往长期的渔业资源过度利用,导致渔业资源逐渐匮乏,长江江豚的饵料日益短缺^[5-6]。浮游动物作为水生生态系统食物链及生产力的基本环节,会影响到鱼类群落结构和分布特征,继而通过上行效应影响到长江江豚的种群分布和规模^[5, 24]。所以,通过浮游动物来评估镇江保护区的渔产潜力,有利于初步地评估江豚的生存状况^[6, 24]。本研究根据保护区的水域自然状况,估算出渔产潜力 610.22—1163.96 kg/km², 57.3 km²可容纳江豚 23—44 头。较 2010 年代梨等^[6]估算出的江豚容纳量仅 19 头的量略有提升,间接反映出保护区的渔业资源减少的状况得到一定的遏制,然而,2016 至 2018 年渔产力逐年下降的趋势,说明鱼类资源匮乏的现状依然没有改变。考虑到环境因素的限制,以及江豚的适口性鱼类为鳊和油鳊等中上层小型鱼类^[39-40],保护区中江豚可利用的渔业资源量将远不足理论值,食物匮乏的局面没有得到根本性的扭转。此外,本研究较为片面,仅分析了浮游动物及渔产潜力,实际影响鱼类资源的因素更加复杂(包括水生维管束植物、浮游动植物、有机碎屑以及底栖动物等)^[41]。因此,在往后的研究中需要对保护区江豚栖息地的水生生物及环境因素进行系统监测和评价,以更合理准确地评估长江江豚的生存状况,为镇江长江江豚类省级自然保护区渔业的可持续发展和长江江豚的保护研究提供更全面、科学的参考依据。

参考文献 (References):

- [1] Straškraba M, Tundisi J G, Duncan A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management//Straškraba M, Tundisi J G, Duncan A, eds. Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management. Dordrecht: Springer, 1993.
- [2] 陈光荣, 钟萍, 张修峰, 谢贻发, 李传红. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系. 湖泊科学, 2008, 20(3): 351-356.

- [3] Achenbach L, Lampert W. Effects of elevated temperatures on threshold food concentrations and possible competitive abilities of differently sized cladoceran species. *Oikos*, 1997, 79(3): 469-476.
- [4] Wang D, Liu R, Zhang X, Yang J, Wei Z, Zhao Q, Wang X. Status and conservation of the Yangtze finless porpoise. In: Reeves RR, Smith BD, Kasuya T (eds) *Biology and conservation of freshwater cetaceans in Asia*. Occas Pap IUCN SSC, 2000, 23: 81-84.
- [5] Zhao X J, Barlow J, Taylor B L, Pitman R L, Wang K X, Wei Z, Stewart B S, Turvey S T, Akamatsu T, Reeves R R, Wang D. Abundance and conservation status of the Yangtze finless porpoise in the Yangtze River, China. *Biological Conservation*, 2008, 141(12): 3006-3018.
- [6] 代梨梨, 龚迎春, 冯伟松, 余育和. 江苏镇江长江豚类保护区浮游动物群落结构特征及江豚生存状况评估. *水生态学杂志*, 2011, 32(5): 30-36.
- [7] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 232-232, 256-258.
- [8] 沈韞芬. 原生动物学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961: 20-21.
- [10] 中国科学院中国动物志编辑委员会. 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: 43-74.
- [11] 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: 27-27, 31-36.
- [12] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] Harris R. *ICES Zooplankton Methodology Manual*. London: Academic Press, 2000.
- [14] 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.
- [15] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩. 微生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [16] Sládeček V. Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiologia*, 1983, 100(1): 169-201.
- [17] 房冬梅. 长江中游宜昌至武穴江段浮游生物群落结构研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [18] 彭刚, 边文冀, 陈校辉. 长江江苏段浮游动物群落结构调查报告. *水利渔业*, 2008, 28(4): 109-111, 120-120.
- [19] 郭欧阳. 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[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.
- [20] 代培, 王银平, 匡箴, 蔺丹清, 杨彦平, 刘思磊, 刘凯. 长江安庆新洲水域浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系. *安徽农业大学学报*, 2019, 46(4): 623-631.
- [21] 霍堂斌. 嫩江下游水生生物多样性及生态系统健康评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [22] 王俊, 刘金殿, 张爱菊, 郝雅宾, 周志明. 富春江富阳段浮游动物群落结构时空变化及与环境因子的关系. *江苏农业科学*, 2020, 48(14): 283-290.
- [23] 鞠永富, 于洪贤, 于婷, 柴方营, 姚允龙, 于鹏. 松花江哈尔滨段浮游动物群落结构特征与水质评价. *湖泊科学*, 2017, 29(3): 646-653.
- [24] 张晓可, 刘凯, 万安, 陈敏敏, 刘志刚, 连玉喜, 于道平. 安庆西江浮游动物群落结构及江豚生存状况评估. *水生生物学报*, 2018, 42(2): 392-399.
- [25] 王汨, 杨柏贺, 孟云飞, 殷旭旺, 徐宗学. 北运河水系河流轮虫群落结构与水环境因子的关系. *暨南大学学报: 自然科学与医学版*, 2017, 38(6): 467-474.
- [26] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 896-901.
- [27] 冯世敏, 吴明妹, 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.
- [28] 聂雪, 胡旭仁, 刘观华, 金斌松, 秦海明. 鄱阳湖子湖"奎秋湖"过程中水位变化对浮游动物群落结构的影响. *水生生物学报*, 2019, 43(2): 402-414.
- [29] 郭坤, 彭婷, 罗静波, 杨德国, 何勇凤, 柴毅. 长湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *海洋与湖沼*, 2017, 48(1): 40-49.
- [30] Speirs D C, Gurney W S C. Population persistence in rivers and estuaries. *Ecology*, 2001, 82(5): 1219-1237.
- [31] Pace M L, Findlay S E G, Lints D. Zooplankton in advective environments: the Hudson river community and a comparative analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1992, 49(5): 1060-1069.
- [32] 李静, 崔凯, 卢文轩, 程云生, 蒋阳阳. 春季和夏季巢湖浮游生物群落组成及其动态分析. *水生生物学报*, 2015, 39(1): 185-192.
- [33] 吕乾, 胡旭仁, 聂雪, 欧阳珊, 王超, 秦海明. 鄱阳湖丰水期水位波动对浮游动物群落演替的影响. *生态学报*, 2018, 40(4): 1486-1495.
- [34] Matsumura-tundisi T, Tundisi J G, Souza-Soares F, Tundisi J E M. Zooplankton community structure of the lower Xingu River (PA) related to the hydrological cycle. *Brazilian Journal of Biology*, 2015, 75(3 Suppl 1): 47-57.
- [35] Richardson A J. In hot water: zooplankton and climate change. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, 65(3): 279-295.
- [36] 黄丹, 沈建忠, 胡少迪, 龚成, 周斌, 李霄, 王海生, 孙广文. 长江天鹅洲故道浮游动物群落结构及水质评价. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3): 328-334.
- [37] Zhang H, Wu G G, Zhang H, Xie P, Xu J, Zhou Q. Role of body size and temporal hydrology in the dietary shifts of shortjaw tapertail anchovy *Coilia brachygnathus* (Actinopterygii, Engraulidae) in a large floodplain lake. *Hydrobiologia*, 2013, 703(1): 247-256.
- [38] 付显婷, 杨薇, 赵彦伟, 徐菲. 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*, 2020, 39(6): 1271-1282.
- [39] 曹过, 李佩杰, 王媛, 杨彦平, 刘凯. 长江下游镇江和扬州北汉江段鱼类群落多样性研究. *水生态学杂志*, 2018, 39(6): 73-80.
- [40] 张晓可, 于道平, 王慧丽, 万安, 蒋泽球, 陈寿文. 长江安庆段江豚主要栖息地鱼类群落结构. *生态学报*, 2016, 36(7): 1832-1839.
- [41] 龚玉艳, 肖雅元, 徐姗楠, 刘永, 杨玉滔, 李纯厚. 陵水湾浮游动物群落结构特征及其季节变化. *中国水产科学*, 2019, 26(1): 71-81.