

Structure and Environmental Impact Factors of Summer Zooplankton Functional Groups in Taihu Wetland

Yuxi Zhao¹, Yongfu Ju², Hongxian Yu^{1*}

¹College of Wildlife Resources, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

²School of Geography and Tourism, Harbin University, Harbin Heilongjiang

Email: *zhaoyuxi@nefu.edu.cn

Received: Mar. 24th, 2019; accepted: Apr. 8th, 2019; published: Apr. 15th, 2019

Abstract

We classified the zooplankton functional groups in a freshwater ecosystem, the Taihu national wetland park, to determine the structure of zooplankton function group and the influence of water environment factors. In the summer of 2018 (August), zooplankton sampling was carried out at 11 sampling sites to systematically analyze the composition characteristics of functional groups of zooplankton. The results show that: The zooplankton functional groups in Taihu national wetland park are divided into 7 functional groups: RF, PF, SCF, MCF, LCF, MCC and LCC. Among them, the functional group RF dominates. Pearson correlation analysis and RDA multivariate statistical analysis showed that: Interaction of zooplankton functional groups and water environmental factors are the main factors affecting zooplankton functional groups in Taihu national wetland park. Due to food competition and predation, SCF, LCF, MCF, MCC and LCC functional groups have significant correlation, while RF and PF functional groups have no significant correlation. PH and NO₃-N were positively correlated with functional groups of zooplankton, TN and COD_{cr} were negatively correlated with functional groups of zooplankton. There was no significant correlation between other water environmental factors and zooplankton functional groups. Interspecific competition and upward effect of phytoplankton are the main factors affecting the structure and biomass of phytoplankton functional groups in marsh wetland in cold region.

Keywords

Zooplankton, Functional Group, Taihu, Wetland

太湖湿地夏季浮游动物功能群结构及其环境影响因子

赵予熙¹, 鞠永富², 于洪贤^{1*}

*通讯作者。

¹东北林业大学野生动物资源学院, 黑龙江 哈尔滨

²哈尔滨学院旅游与地理学院, 黑龙江 哈尔滨

Email: zhaoyuxi@nefu.edu.cn

收稿日期: 2019年3月24日; 录用日期: 2019年4月8日; 发布日期: 2019年4月15日

摘要

为了研究浮游动物在北方寒冷地区湿地生态系统中的功能以及水环境等因素的影响, 根据浮游动物的大小、摄食习性等因素将淡水浮游动物划分为各个功能群, 以北方沼泽型湿地泰湖国家湿地公园为例, 于2018年夏季(8月)对泰湖国家湿地公园设置11个采样点, 进行了浮游动物采样, 深入研究了该区浮游动物功能群的分布和结构特征。结果表明, 泰湖国家湿地公园夏季浮游动物共划分为7个功能群: RF、PF、SCF、MCF、LCF、MCC和LCC, 其中以功能群RF占优势。通过Pearson相关分析和RDA多元统计分析, 结果表明, 浮游动物功能群间的相互作用是影响泰湖国家湿地公园浮游动物功能群的主要因素, 部分水环境因子也产生一定影响。由于存在食物竞争和捕食关系, SCF、LCF、MCF、MCC和LCC功能群具有较显著的相关性, RF和PF功能群无明显相关性。pH和NO₃⁻-N同各浮游动物功能群呈正相关, TN和COD_{Cr}同各浮游动物功能群呈负相关, 其它水环境因子同浮游动物功能群不具有明显相关性。种间竞争和浮游植物上行效应是影响寒冷地区沼泽型湿地浮游动物功能群结构和生物量的主要因素。

关键词

浮游动物, 功能群, 泰湖, 湿地

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

浮游动物是水生生物的重要组成部分, 是水生态系统特征的重要标志。浮游动物作为天然水域食物链中重要的一环, 在能量传递、物质循环等过程中起着重要作用[1]。不同种类的浮游动物对水环境的敏感程度各有差异, 其群落结构演替、生物密度以及污染指示种的变化常用来表征水体的营养水平[2], 其物种组成、生物量和次级生产力的动态变化, 会直接或间接影响整个生态系统的变化, 如该区域初级生产者和高级消费者的产量、丰度和分布, 进而影响到湿地的生态功能。近年来, 水污染日趋严重, 水体富营养化等水域生态学问题日益突出, 而浮游动物是控制浮游植物的关键因素, 其生命周期短, 受环境影响反应明显, 当地水环境状况、发展趋势以及长期污染结果, 都可以显现在浮游动物群落结构与功能的变化上, 因此对水体当中浮游动物的深入研究越来越重要。传统的研究方法多以系统分类学为基础, 根据低分类等级将水生生物分为浮游植物、浮游动物、底栖动物和鱼类等大类群, 以此为单位进行研究以反应水质状况和生物多样性, 但是这种方法可能会忽略食物链中某些细小环节的不可缺失的作用, 难以突出水生生物在整个生态系统中独特的生态功能[3], 因此 Reynold *et al.* (2002)提出了功能群的概念, 根据生物大小、摄食习性等划分出功能群, 其中的物种特征具有同环境更为紧密的联系[3], 可以更直接地反应生态环境影响水生生物群落的生态过程, 更深入地理解水生态系统及其生物多样性状况[4], 为不

同地区水生生物资源的管理提供更科学的意见, 为发展和校验群落生态学理论提供些许助力, 也可以为运用模型进行定量化研究生态系统功能打下一定的基础[5] [6] [7]。目前, 国内对水生态系统功能群的研究多倾向于浮游植物、底栖动物和鱼类, 而关于浮游动物功能群的研究相对浅薄, 且主要集中于海洋生态系统[8], 对于淡水生态系统浮游动物功能群的划分以及分析开展甚少。

泰湖国家湿地公园位于黑龙江省齐齐哈尔市泰来县城东侧, 外形呈不规则圆形, 是黑龙江省内为数不多毗邻城区、生态环保的国家湿地公园之一。泰来地势西高东低, 泰湖就位于城区东部, 雨水、污水、工业废水都有向低处排放的特点, 一直以来, 泰湖就是泰来生活污水和工业废水接纳水体。20世纪90年代前, 泰来造纸厂污水直接排放进入泰湖, 导致其污染严重, 造纸厂被取缔后, 泰湖水质得到了一定改善。近年来由于旅游业的发展, 湿地公园内建设了许多景点、游客服务区, 并开设了许多游乐项目, 使泰湖湿地公园受到的人为干扰不断加重, 且公园毗邻城区, 周围持续受到来自附近居民活动、生活污水的影响。泰湖受外界干扰较大, 水体环境处于不稳定的状态。本文以泰湖湿地为例, 对该淡水生态系统浮游动物功能群进行划分并分析, 着重探讨湿地浮游动物功能群的结构及水环境, 为泰湖湿地的恢复及管理提供一定参考意见。

2. 材料与方法

2.1. 采样点设置

于2018年8月对泰湖国家湿地公园11个采样点进行野外布点, 如图1所示, 采样点设立原则为沿整个湿地流域尽可能均匀分布, 兼顾全流域的水系和道路格局, 使采集样品遍布全区, 具有全湿地的代表性, 每个采样点取水500毫升。

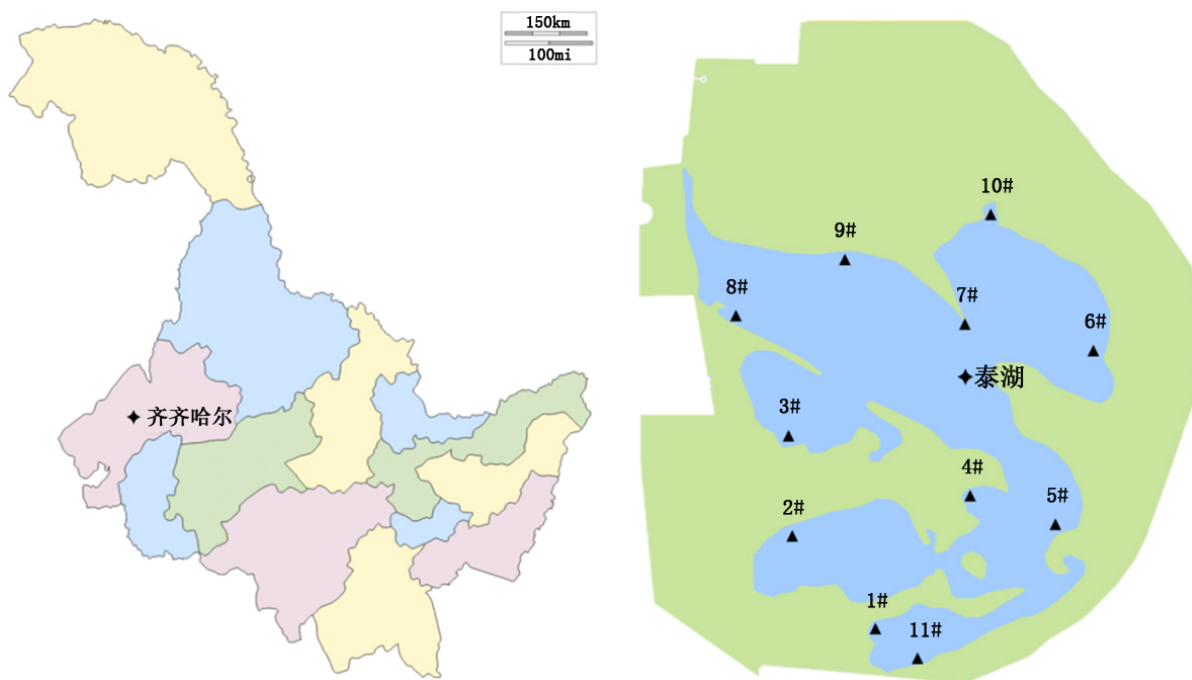


Figure 1. Map showing sampling locations in the Taihu national wetland park

图 1. 泰湖国家湿地公园浮游动物采样点设置图

2.2. 采样与处理

浮游动物定性样品采用13号浮游生物网在水中进行横“∞”字形捞取; 浮游动物定量样品用5L有机玻

璃采水器取上、中、下层混合水样 20 L, 然后用 13 号浮游生物网过滤浓缩, 立刻加入 4% 体积的甲醛溶液固定。在室内静置 48 h 后, 采用虹吸法除去上清液, 浓缩至 30 mL。原生动物定量取 0.1 mL 用浮游植物计数框在显微镜下全片计数, 轮虫定量取 1 mL 用浮游动物计数框在显微镜下全片计数, 枝角类和桡足类用浮游动物计数框在显微镜下观察计数[9]。分别根据《微型生物监测新技术》[10]、《中国淡水轮虫志》[11]、《中国动物志》(淡水枝角类) [12]和《中国动物志》(淡水桡足类) [13]来鉴定原生动物、轮虫类、枝角类和桡足类。按体积法统计来轮虫的生物量, 枝角类和桡足类生物量则分别按体长、体重回归方程式计算[9]。

按照《水监测分析方法》(第 4 版)(国家环保总局编委会, 2002)相关规定对理化指标 pH、总氮浓度(TN)、总磷浓度(TP)、氨态氮(NH_4^+ -N)、硝态氮(NO_3^- -N)、化学需氧量(COD_{Cr})、5 日生化需氧量(BOD_5)进行分析测试。其中, pH、氨态氮浓度、硝态氮浓度利用 YSI-6600 多功能水质分析仪现场测定, 结束后把样品冷藏带到室内按照上述方式进行其他理化指标的检测。利用这些指标的测量结果全面认识水质状况, 全方位反映太湖国家湿地公园整体和各个采样点水质特征。

2.3. 浮游动物功能群划分

如表 1 所示, 根据浮游动物的体长和摄食习性等, 将淡水生态系统浮游动物划分为 10 个浮游功能群: 原生动物滤食者 PF、原生动物捕食者 PC、轮虫滤食者 RF、轮虫捕食者 RC、小型浮游动物滤食者 SCF、小型浮游动物捕食者 SCC、中型浮游动物滤食者 MCF、中型浮游动物捕食者 MCC、大型浮游动物滤食者 LCF 和大型浮游动物捕食者 LCC [14]。

Table 1. Descriptor zooplankton functional groups in freshwater ecosystem

表 1. 淡水浮游动物功能群分类

| 功能群 Functional groups | 缩写 Abbreviation | 大小/mm Size | 摄食习性 Feeding habits |
|--|--------------------|---------------|--------------------------------|
| 原生动物滤食者 Protozoas filter feeders | PF | | 滤食者, 以细菌、藻类和有机质为食 |
| 原生动物捕食者 Protozoas carnivora | PC | | 捕食者, 以小型原生动物为食 |
| 轮虫滤食者 Rotifers filter feeders | RF | | 滤食者, 以细菌、藻类和有机质为食 |
| 轮虫捕食者 Rotifers carnivora | RC | | 捕食者, 以原生动物、其他轮虫和小型甲壳动物等为食 |
| 小型浮游动物滤食者 Small copepods and claocera filter feeders | SCF | <0.7 | 滤食者, 以细菌、藻类、有机质和原生动物为食 |
| 小型浮游动物捕食者 Small copepods and claocera carnivora | SCC | <0.7 | 捕食者, 以轮虫、枝角类、双翅目昆虫(摇蚊幼虫)和寡毛类为食 |
| 中型浮游动物滤食者 Middle copepods and claocera filter feeders | MCF | 0.7~1.5 | 滤食者, 以细菌、藻类、有机质和原生动物为食 |
| 中型浮游动物捕食者 Middle copepods and claocera carnivora | MCC | 0.7~1.5 | 捕食者, 以轮虫、枝角类、双翅目昆虫(摇蚊幼虫)和寡毛类为食 |
| 大型浮游动物滤食者 Large copepods filter feeders | LCF | >1.5 | 滤食者, 以细菌、藻类、有机质和原生动物为食 |
| 大型浮游动物捕食者 Large copepods carnivora | LCC | >1.5 | 捕食者, 以轮虫、枝角类、双翅目昆虫(摇蚊幼虫)和寡毛类为食 |

2.4. 数据分析

通过 $\log_{10}(x + 1)$ 进行理化数据处理, 使之更趋于正态分布, 而后采用 Pearson 相关分析研究不同浮游动物功能群之间的相互作用及其同水环境因子的关系。采用 Canoco for windows 4.5 软件进行 DCA 分析, 得出 SD 值小于 3 ($\text{SD} = 1.915$), 因此对物种数据和相关环境因子数据进行 RDA 分析[15]。

3. 结果

3.1. 太湖国家湿地公园夏季水环境特征

如表 2、表 3 所示, 对比《地面水环境质量标准》5 类水质标准, 本次调查中全部采样点均存在超过 V 类水质标准的指标, 故均为劣 V 类水。太湖国家湿地公园水体存在氮污染。 NO_3^- -N 指标的各个采样点全部为 V 类及劣 V 类, 这种状况说明在水中 NO_3^- -N 含量较高, 整体上水质普遍有较重化学污染; NH_4^+ -N 指标结果中也存在劣 V 类水质, 说明水大量氮在夏季高温作用下大多都经过氧化作用转化为硝态氮, 同时也有一部分在水分多的情况下还原转化为氨态氮; TN 指标的所有采样点均为 V 类和劣 V 类水质, 夏季雨水较多, 大量周围含氮废水大量涌入湿地, 可能是导致水体氮含量较高的原因, 此外, 太湖附近的污水处理厂所排入“中水”是造成目前太湖水质污染不可忽视的因素。TP 指标存在 3 个采样点为劣 V 类水质, TP 水平较高, 结合较高的 TN 浓度, 说明太湖水体富营养化程度较高。全部采样点水样 pH 值结果中, 仅#11 采样点水样 pH 值在《地面水环境质量标准》要求范围内, 其余采样点水样 pH 全部高于要求上限。整体碱性较强。水体 pH 较高可能与水体富营养化有关。大量藻类进行光合作用持续消耗水体中的 CO_2 , 使得水体 pH 值升高。

Table 2. Water quality evaluation standard table

表 2. 水质评价标准表

| 评价因子 | 分级标准 | | | | |
|---------------------------------|------|------|-----|------|-----|
| | I | II | III | IV | V |
| pH | 6~9 | | | | |
| NH_4^+ -N (mg/L) | 0.15 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 |
| NO_3^- -N (ug/L) | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| TN (mg/L) | 0.2 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 |
| TP (mg/L) | 0.02 | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |
| COD_{Cr} (mg/L) | 15 | 15 | 20 | 30 | 40 |
| BOD_5 | 3 | 3 | 4 | 6 | 10 |

Table 3. Water quality measurements of Taihu national wetland park

表 3. 太湖国家湿地公园水质测量结果

| 采样点 | pH | NH_4^+ -N (mg/L) | NO_3^- -N (ug/L) | TN (mg/L) | TP (mg/L) | COD_{Cr} (mg/L) | BOD_5 (mg/L) |
|-----|------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----------|---------------------------------|-----------------------|
| #1 | 9.01 | 0.802 | 0.614 | 5.264 | 0.244 | 37 | 1.1 |
| #2 | 9.41 | 0.455 | 0.647 | 4.942 | 0.107 | 21 | 0.2 |
| #3 | 9.5 | 0.314 | 0.726 | 3.960 | 0.113 | 1 | 0.5 |
| #4 | 9.52 | 0.291 | 0.752 | 4.893 | 0.106 | 1 | 1.1 |
| #5 | 9.52 | 0.274 | 0.785 | 4.718 | 0.082 | 1 | 2.5 |
| #6 | 9.38 | 0.291 | 0.71 | 4.511 | 0.106 | 33 | 1.9 |
| #7 | 9.43 | 0.264 | 0.746 | 5.024 | 0.075 | 2 | 2.1 |
| #8 | 9.46 | 0.260 | 0.716 | 4.729 | 0.084 | 1 | 1.6 |
| #9 | 9.52 | 0.226 | 0.855 | 4.620 | 0.094 | 1 | 3.8 |
| #10 | 9.32 | 0.221 | 0.737 | 4.831 | 0.081 | 2 | 2.7 |
| #11 | 8.26 | 0.457 | 0.525 | 5.504 | 0.327 | 1 | 2.2 |

3.2. 太湖国家湿地公园夏季浮游动物功能群划分

在太湖国家湿地公园 11 个采样点中, 共鉴定出原生动物 7 属 10 种, 轮虫 14 属 26 种, 枝角类 5 属 9 种, 桡足类 5 属 7 种, 总计 31 属 52 种。如表 4 所示, 因未发现原生动物捕食者 PC、轮虫捕食者 RC 和小型浮游动物捕食者 SCC, 因此共划分为 7 个功能群。如图 2 所示, 由生物量分布可见太湖国家湿地公园夏季浮游动物以 RF 功能群占显著优势。

Table 4. Descriptor of zooplankton functional groups in Taihu national wetland park

表 4. 太湖国家湿地公园浮游动物功能群

| 物种 Species | 门类 Class | 功能群 Functional groups |
|------------|---------------|-----------------------|
| 吻状四膜虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 梨形四膜虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 瓜形膜袋虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 苔藓膜袋虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 鞭膜袋虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 小口钟虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 钟形钟虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 多形喇叭虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 绿急游虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 旋回侠盗虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 湖沼拟铃虫 | 原生动物 Protozoa | PF |
| 椎尾水轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 爱德里亚狭甲轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 钝角狭甲轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 壶状臂尾轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 萼花臂尾轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 矩形臂尾轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 裂足臂尾轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 方形臂尾轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 曲腿龟甲轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 矩形龟甲轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 鳞状叶轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 瘤甲腔轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 月形腔轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 蹄形腔轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 月形单趾轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 囊形单趾轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |
| 尖趾单趾轮虫 | 轮虫 Rotifera | RF |

Continued

| | | | |
|--------|---|---------------|-----|
| 梨形单趾轮虫 | <i>Monostyla puriformis</i> | 轮虫 Rotifera | RF |
| 尾棘巨头轮虫 | <i>Cephalodella sterea</i> (Gosse) | 轮虫 Rotifera | RF |
| 卵形无柄轮虫 | <i>Ascomorpha ovalis</i> Bergebdal | 轮虫 Rotifera | RF |
| 暗小异尾轮虫 | <i>Trichicerca pusilla</i> | 轮虫 Rotifera | RF |
| 对棘同尾轮虫 | <i>Diurella stylata</i> | 轮虫 Rotifera | RF |
| 双齿同尾轮虫 | <i>Diurella bedens</i> Lucks | 轮虫 Rotifera | RF |
| 针簇多肢轮虫 | <i>Polyarthra trigla</i> Ehrenberg | 轮虫 Rotifera | RF |
| 长三肢轮虫 | <i>Filinia longiseta</i> Ehrenberg | 轮虫 Rotifera | RF |
| 微突镜轮虫 | <i>Testudinella Mucronata</i> (Gosse) | 轮虫 Rotifera | RF |
| 短尾秀体溞 | <i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Lieven) | 枝角类 Cladocera | MCF |
| 长肢秀体溞 | <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i> Fis | 枝角类 Cladocera | MCF |
| 大型溞 | <i>Daphnia magna</i> Straus | 枝角类 Cladocera | LCF |
| 透明溞 | <i>Daphnia hyaline</i> | 枝角类 Cladocera | LCF |
| 长刺溞 | <i>Daphnia longispina</i> | 枝角类 Cladocera | LCF |
| 老年低额溞 | <i>Simocephalus vetulus</i> (Muller) | 枝角类 Cladocera | LCF |
| 矩形尖额溞 | <i>Alona rectangularis</i> | 枝角类 Cladocera | MCF |
| 方形尖额溞 | <i>Alona quadrangularis</i> O.F.Muller | 枝角类 Cladocera | MCF |
| 圆形盘肠溞 | <i>Chydorus sphaericus</i> O.F.Muller | 枝角类 Cladocera | SCF |
| 细巧华哲水蚤 | <i>Sinocalanus tenellus</i> (Kikuchi) | 桡足类 Copepoda | MCF |
| 近邻剑水蚤 | <i>Cyclops vicinus</i> Ujjanin | 桡足类 Copepoda | LCF |
| 锯缘真剑水蚤 | <i>Eucyclops serrulatus</i> (Fischer) | 桡足类 Copepoda | MCF |
| 大型中镖水蚤 | <i>Sinodia ptomus sarsi</i> (Rylov) | 桡足类 Copepoda | LCC |
| 透明温剑水蚤 | <i>Thermocyclops hyalinus</i> (Rehberg) | 桡足类 Copepoda | MCC |
| 等刺温剑水蚤 | <i>Thermocyclops kawamurai</i> Kikuchi | 桡足类 Copepoda | MCC |

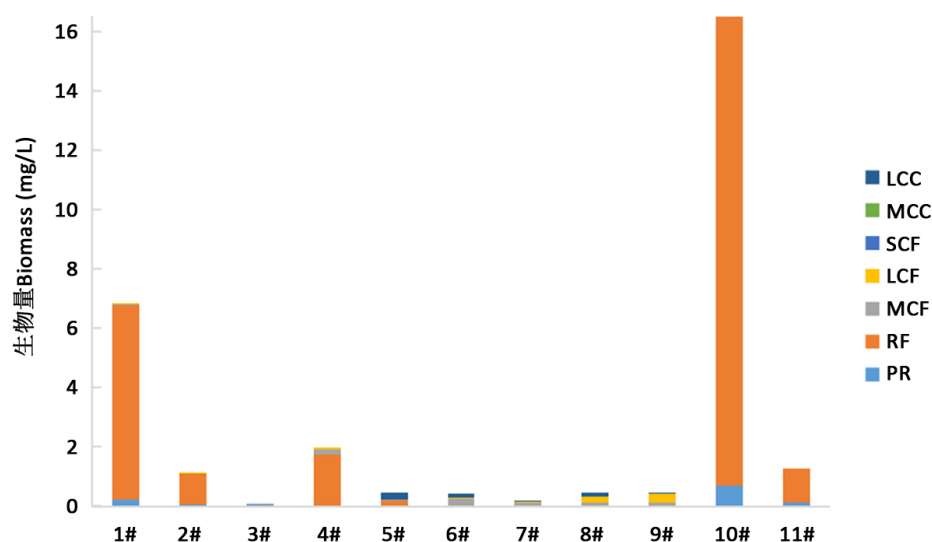


Figure 2. Distribution of zooplankton functional groups biomass in the Taihu national wetland park
 图 2. 太湖国家湿地公园浮游动物功能群生物量水平分布

3.3. 浮游动物功能群的作用关系及其与水环境因子的关系

3.3.1. 不同浮游动物功能群同其他功能群及水环境因子的 Pearson 相关性分析

由表 5、表 6 可见, 泰湖国家湿地公园夏季各浮游动物功能群生物量与水环境因子均不具有明显的相关性。而部分浮游动物功能群与功能群之间, 则存在较为明显的相关性, 其中功能群 RF 与功能群 PF 呈现显著正相关。

Table 5. Significant Pearson correlation between the biomass of zooplankton functional groups and environmental variables (n = 45)

表 5. 不同浮游动物功能群同水环境因子的 Pearson 相关性分析(n = 45)

| | MCF | PF | LCF | SCF | MCC | LCC |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| pH | 0.342 | -0.211 | 0.337 | 0.138 | 0.154 | 0.299 |
| 氨氮(mg/L) | -0.249 | 0.054 | -0.407 | -0.215 | -0.218 | -0.309 |
| 硝态氮(ug/L) | 0.351 | -0.149 | 0.541 | 0.116 | 0.015 | 0.329 |
| 生化需氧量(mg/L) | 0.134 | 0.188 | 0.517 | 0.106 | -0.019 | 0.263 |
| 化学需氧量(mg/L) | 0.287 | 0.002 | -0.312 | 0.179 | 0.274 | -0.041 |
| 总磷(mg/L) | -0.301 | 0.079 | -0.361 | -0.249 | -0.209 | -0.34 |
| 总氮(mg/L) | -0.149 | 0.19 | -0.168 | 0.001 | -0.243 | -0.224 |

*在 0.05 水平显著相关; **在 0.01 水平上显著相关。

Table 6. Significant Pearson correlation between the biomass of zooplankton functional groups (n = 45)

表 6. 不同浮游动物功能群同其它浮游动物功能群的 Pearson 相关分析

| | LCF | SCF | PF | RF | MCF | MCC | LCC |
|-----|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| LCF | 1 | -0.142 | -0.146 | -0.163 | 0.203 | 0.29 | 0.071 |
| SCF | -0.142 | 1 | -0.248 | -0.239 | 0.568 | 0.26 | 0.088 |
| PF | -0.146 | -0.248 | 1 | 0.979** | -0.421 | -0.215 | -0.328 |
| RF | -0.163 | -0.239 | 0.979** | 1 | -0.339 | -0.244 | -0.319 |
| MCF | 0.203 | 0.568 | -0.421 | -0.339 | 1 | 0.515 | 0.151 |
| MCC | 0.29 | 0.26 | -0.215 | -0.244 | 0.515 | 1 | 0.451 |
| LCC | 0.071 | 0.088 | -0.328 | -0.319 | 0.151 | 0.451 | 1 |

*在 0.05 水平显著相关; **在 0.01 水平上显著相关。

3.3.2. 浮游动物功能群同水环境因子的 RDA 分析

如表 7 所示, RDA 结果表明第一轴、第二轴共解释了属种累计方差值的 29.6%, 所有水环境理化因子也仅解释了 29.6%的功能群变化信息。如图 3 所示, 在第一轴, TN (-0.3975)为最主要负相关因子, 其次为负相关因子 BOD₅ (-0.3086), 正相关因子 pH (0.2307)也具有较明显的相关性; 在第二轴, NO₃⁻-N (-0.6702)为最主要负相关因子, 其次为正相关因子 TP (0.5634), 正相关因子 NH₄⁺-N (0.4870)也具有较明显相关性。pH 和 NO₃⁻-N 同各浮游动物功能群呈正相关, TN 和 COD_{Cr} 同各浮游动物功能群呈负相关,

其它水环境因子同浮游动物功能群不具有明显相关性。

Table 7. Redundancy analysis results for zooplankton functional groups
表 7. 浮游动物功能群 RDA 分析结果

| 轴序 Axes | 特征值 Eigenvalues | 种类-环境相关性 Species-environment correlations | 物种数据累计变化百分率/% Cumulative percentage variance of species data | 物种-环境相关性累计变化百分率/% Cumulative percentage variance of species-environment relation |
|------------|--------------------|--|---|---|
| 1 | 0.295 | 0.544 | 29.5 | 99.8 |
| 2 | 0 | 0.951 | 29.6 | 99.9 |
| 3 | 0 | 0.551 | 29.6 | 100 |
| 4 | 0 | 0.509 | 29.6 | 100 |

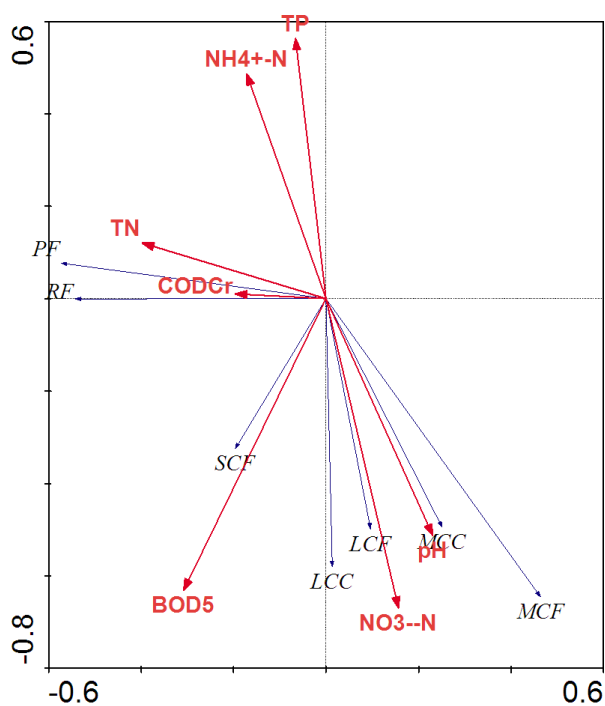


Figure 3. Zooplankton functional groups-environment biplot RDA
图 3. 浮游动物功能群与环境因子 RDA 分析双重图

4. 讨论

总的来看，浮游动物的多样性以及浮游动物功能群的分布，受水体温度、营养盐、浮游植物的上行效应、鱼类摄食的下行效应和种间竞争等因素影响[16] [17]，而在不同温度带地区，其主要影响因子则略有差异。在热带、亚热带地区受温度影响较小，生物多耐受高温，浮游植物季节变化不显著，其功能群变化主要由水体营养水平决定[8]，浮游动物生态过程受温度变化影响的几率较小，因此在这些地区高级消费者的摄食是影响浮游动物的主要因素；而在温带地区，温度和营养盐的变化更为明显，是影响浮游动物的主要环境因子[18]；而目前对于寒带地区浮游动物的影响因素则不甚清楚。太湖国家湿地公园属于寒区沼泽型湿地，经 RDA 分析结果，总磷和总氮是影响该地区浮游动物功能群的主要水环境因子，pH 和硝态氮同各浮游动物功能群呈正相关，总氮和化学需氧量同各浮游动物功能群呈负相关，其它水环境因子同浮游动物功能群不具有明显相关性。太湖国家湿地公园毗邻城区，周围持续受到来自附近居民活

动、生活污水的影响。泰湖受外界干扰较大, 水体环境处于不稳定的状态, 水体存在氮污染, 整体上水质普遍有较重化学污染, 在夏季高温作用下, 水中大量氮经氧化作用转化为硝态氮, 同时也有一部分在水分充沛的情况下还原为氨态氮。夏季雨水较多, 大量周围含氮废水涌入湿地, 也是导致水体氮含量较高的原因。总氮的升高会促进浮游植物的生长, 通过浮游植物的上行效应, 进而影响浮游动物的生长。TP 水平较高, 结合较高的 TN 浓度, 说明泰湖水体富营养化程度较高。富营养化使得夏季水体藻类大量繁殖, 功能群 RF 既可滤食浮游植物, 也可滤食细菌和碎屑[19], 因此在各个采样点功能群分布均占优势。

目前国内已有许多侧重于水环境因子对水生态系统中浮游动物影响的研究[20] [21] [22], 而浮游动物间的相互作用则甚少被提及。本次调查经 RDA 结果显示前 2 个轴系解释了位于寒冷地区的泰湖浮游动物功能群变化的 29.6%, 而苗藤等[20]在对热带水体惠州西湖的 RDA 研究结果显示为 34.6%, 这两个温度差异较大的地区其结果的相似性, 就说明不仅温度等水环境因子会影响浮游动物功能群, 同时还有其他因素, 对浮游动物功能群的结构与分布存在着不可忽视的影响[23], 据本文 Pearson 分析结果表明, 浮游动物间的相互作用如种间竞争, 也是影响浮游动物功能群的一个十分重要的因素。通过对浮游动物功能群的划分, 功能群 RF 和 PF 同其他浮游动物功能群并无显著相关性, 但功能群 SCF、LCF、MCF、MCC 和 LCC 间的相关性不可忽视, 习丽红等[24]对热带富营养水体的研究结果也表明轮虫类同枝角类间对于食物的竞争较弱, 所以功能群相关性也较弱。而功能群 SCF、LCF、MCF、MCC 和 LCC, 则由于存在食物竞争和捕食关系具有较显著的相关性。RF 和 PF 功能群虽同为捕食关系, 但由于水体富营养化, 夏季浮游植物丰富, 竞争强度相对较弱, 不呈现明显相关性。

5. 结论

1) 泰湖国家湿地公园夏季浮游动物调查中共发现浮游动物 31 属 52 种, 划分为 RF、PF、SCF、MCF、LCF、MCC 和 LCC 共 7 个浮游动物功能群, 其中功能群 RF 是最主要、最具代表性的功能群。本研究着重探讨了寒区沼泽型湿地夏季水环境以及浮游动物功能群结构, 对淡水生态系统浮游动物功能群划分和该类型水生态系统管理及恢复提供一定参考意见。

2) 浮游动物功能群间的相互作用和水环境因子是影响泰湖国家湿地公园浮游动物功能群的主要因素。由于存在食物竞争和捕食关系, SCF、LCF、MCF、MCC 和 LCC 功能群具有较显著的相关性, RF 和 PF 功能群无明显相关性。pH 和 NO_3^- -N 同各浮游动物功能群呈正相关, TN 和 COD_{Cr} 同各浮游动物功能群呈负相关, 其它水环境因子同浮游动物功能群不具有明显相关性。

基金项目

中央高校基金项目, 编号 2572019DF09。

参考文献

- [1] 陈立婧. 漏湖富营养化对浮游生物影响的生态学研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2008.
- [2] 郭刘超, 韩庚宝, 邓俊辰, 苏雨艳, 吴沛沛. 长荡湖浮游动物群落结构特征及影响因子分析[J]. 江苏水利, 2019(2): 1-5.
- [3] Hood, R.R., Laws, E.A., Armstrong, R.A., Bates, N.R., Brown, C.W., Carlson, C.A., Chai, F., Doney, S.C., Falkowski, P.G., Feely, R.A., Friedrichs, M.A.M., Landry, M.R., Moore, J.K., Nelson, D.M., Richardson, T.L., Salihoglu, B., Schartau, M., Toole, D.A. and Wiggert, J.D. (2006) Pelagic Functional Group Modeling: Progress, Challenges and Prospects. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **53**, 459-512.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.01.025>
- [4] Hoeinghaus, D.J., Winemiller, K.O. and Agostinho, A.A. (2007) Landscape-Scale Hydrologic Characteristics Differentiate Patterns of Carbon Flow in Large-River Food Webs. *Ecosystems*, **10**, 1019-1033.
<https://doi.org/10.1007/s10021-007-9075-2>

- [5] Le Quéré, C., Harrison, S.P., Prentice, I.C., Bultenhuis, E.T., Aumont, O., Bopp, L., Claustre, H., Da Cunha, L.C., Geider, R., Giraud, X., Klaas, C., Kohfeld, K.E., Legendre, L., Manizza, M., Platt, T., Rivkin, R.B., Sathyendranath, S., Uitz, J., Watson, A.J. and Wolf-Gladrow, D. (2005) Ecosystem Dynamics Based on Plankton Functional Types for Global Ocean Biogeochemistry Models. *Global Change Biology*, **11**, 2016-2040.
- [6] Araujo, J.N., Mackinson, S., Stanford, R.J., Sims, D.W., Southward, A.J., Hawkins, S.J., Ellis, J.R. and Hart, P.J.B. (2006) Modeling Food Web Interactions, Variation in Plankton Production, and Fisheries in the Western English Channel Ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, **309**, 175-187. <https://doi.org/10.3354/meps309175>
- [7] Ichinokawa, M. and Takahashi, M.M. (2006) Size-Dependent Carbon Flow in the Epipelagic Food Web of the Western Equatorial Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, **313**, 13-26. <https://doi.org/10.3354/meps313013>
- [8] Sun, S., Huo, Y.Z. and Yang, B. (2010) Zooplankton Functional Groups on the Continental Shelf of the Yellow Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **57**, 1006-1016. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.02.002>
- [9] 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.
- [10] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 顾曼如, 施之新, 魏印心. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [11] 王家楫, 中国科学院水生生物研究所. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [12] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志-节肢动物门甲壳纲淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [13] 沈嘉瑞, 戴爱云, 宋大祥. 中国动物志-节肢动物门甲壳纲淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [14] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [15] Xiao, L.J., Wang, T., Hu, R., Han, B.P., Wang, S., Qian, X. and Padisak, J. (2011) Succession of Phytoplankton Functional Groups Regulated by Monsoonal Hydrology in a Large Canyon-Shaped Reservoir. *Water Research*, **45**, 5009-5019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.07.012>
- [16] 卢慧斌, 陈光杰, 陈小林, 刘晓东, 顾兆炎, 张虎才, 赵帅营, 陈丽, 段立曾, 张自强. 上行与下行效应对浮游动物的长期影响评价——以滇池与抚仙湖沉积物象鼻溞(*Bosmina*)为例[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 67-75.
- [17] 杨宇峰, 王庆, 陈菊芳, 庞世勋. 河口浮游动物生态学研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 576-585.
- [18] 安睿. 三环泡湿地浮游动物功能群对浮游植物功能群的影响[J]. 防护林科技, 2018(8): 56-59.
- [19] Nilssen, J.P. (1984) Tropical Lakes-Functional Ecology and Future Development: The Need for a Process-Orientated Approach. *Hydrobiologia*, **113**, 231-242. <https://doi.org/10.1007/BF00026611>
- [20] 苗滕, 高健, 陈炳辉, 刘正文. 惠州西湖生态修复对浮游甲壳动物群落结构的影响[J]. 生态科学, 2013, 32(3): 324-330.
- [21] 王博, 廖剑宇, 刘全儒, 江源. 东江干流浮游动物群落结构特征及与水质的关系[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 608-612.
- [22] 李秋华, 温远志, 杨卫诚, 欧腾, 高廷进, 张垒, 魏刚. 贵州百花湖麦西河河口后生浮游动物群落结构及与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 531-538.
- [23] 刘忱, 黄燕, 刘瑜, 邵晓阳. 东苕溪夏季浮游动物群落结构及水环境的初步研究[J]. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2015, 14(5): 498-506.
- [24] 刁丽红, 李慧明, 林秋奇, 韩博平. 热带富营养水库敞水区浮游动物群落结构与季节变化: 以广东大沙河水库为例[J]. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1049-1058.