

DOI: 10.5846/stxb201910282257

陈佳琪, 赵坤, 曹玥, 吴波, 庞婉婷, 尤庆敏, 王全喜. 鄱阳湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学报, 2020, 40(18): 6644-6658.

Chen J Q, Zhao K, Cao Y, Wu B, Pang W T, You Q M, Wang Q X. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Poyang Lake. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6644-6658.

鄱阳湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系

陈佳琪¹, 赵 坤¹, 曹 玥², 吴 波¹, 庞婉婷¹, 尤庆敏¹, 王全喜^{1,*}

¹ 上海师范大学生命科学学院, 上海 200030

² 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200030

摘要: 数量庞大、体积微小、高度多样化的浮游生物对淡水生态系统功能具有重要影响。为探究中国第一大淡水湖——鄱阳湖浮游动物(包括轮虫、枝角类和桡足类)群落特征及其与环境因子之间的关系,在鄱阳湖设置 50 个采样点,分别于 2017 年 8 月(夏季)、11 月(秋季)、2018 年 2 月(冬季)和 5 月(春季)进行浮游动物群落与生境调查,统计分析结果表明:鄱阳湖浮游动物共记录 43 属 99 种,其中轮虫 31 属 83 种,枝角类 8 属 11 种,桡足类 4 属 5 种,春夏季节种类较为丰富。浮游动物平均丰度为 1155.29 个/L,具有极显著的季节差异($P < 0.01$),夏季(3150.37 个/L)显著高于其他三季。四季共确定优势种 14 种,轮虫中优势度最高的为广生多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*),浮游甲壳动物中仅有筒弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)在秋季形成优势。优势种的季节更替明显,夏秋季节间的更替率(86.00%)高于其他季节(77.00%, 66.67%)。优势种、多样性和均匀度的结果均显示鄱阳湖浮游动物群落结构较复杂,具有较好的稳定性。聚类分析(Cluster analysis)和分类回归树分析(Classification and regression trees, CART)表明,每个季节均有多种群落类型,其中春夏两季中浮游动物群落类型的划分与叶绿素 a(Chlorophyll a, Chla)密切相关,化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)是影响秋季群落划分的关键环境因子。非度量多维尺度分析(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)结果表明,温度(Water Temperature, WT)、Chla、电导率(Conductivity, Cond)是造成四季浮游动物群落显著差异的最主要环境因子。冗余分析(Redundancy analysis, RDA)显示,除 Chla 外,总氮(Total Nitrogen, TN)、总固体悬浮物(Total Suspended Solids, TSS)和酸碱度(Hydrogen ion concentration, pH)也是影响浮游动物群落结构和优势种分布的重要因素。

关键词: 浮游动物; 群落类型; 非度量多维尺度分析; 聚类分析; 环境因子; 鄱阳湖

Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Poyang Lake

CHEN Jiaqi¹, ZHAO Kun¹, CAO Yue², WU Bo¹, PANG Wanting¹, YOU Qingmin¹, WANG Quanxi^{1,*}

¹ College of Life Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200030, China

² School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200030, China

Abstract: Plankton, with large quantity, small size and high diversity, have an important impact on the function of freshwater ecosystem. To explore the community characteristics of zooplankton (including rotifers, cladocerans and copepods) in Poyang Lake, the largest freshwater lake in China, and their relationships with environmental factors, 50 sample sites were set up in Poyang Lake. Zooplankton community and environmental survey were conducted in August (Summer) and November (Autumn) in 2017, February (Winter) and May (Spring) in 2018, respectively. The statistical results showed that 99 taxa belonging to 43 genera were identified, of which 83 species in Rotifera belonged to 31 genera, 11 species in Cladocera belonged to 8 genera, and 5 species in Copepoda belonged to 4 genera. Species were abundant in

基金项目: 环境保护部生物多样性保护专项(2017HB2096001006)

收稿日期: 2019-10-28; 网络出版日期: 2020-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Wangqx@shnu.edu.cn

spring and summer. Zooplankton abundance in four seasons were significantly different with a mean abundance of 1155.29 ind./L. Zooplankton abundance in summer (3150.37 ind./L) was significantly higher than that in other seasons. A total of 14 dominant species were identified in all seasons. The most dominant species in rotifers was *Polyarthra vulgaris*, and *Bosmina coregoni* in crustaceans was dominant only in autumn. The dominant species obviously shifted among seasons and the seasonal turnover rate from summer to autumn (86.00%) was higher than that in other seasons (77.00%, 66.67%). The results of dominant species composition, diversity and evenness indexes suggested that zooplankton community structure in Poyang Lake was complex and stable. Cluster analysis and classification and regression trees (CART) showed that there were several community types in each season, among which the division of zooplankton community types in both spring and summer was closely related to Chla, and chemical oxygen demand (COD) was the key factor affecting community division in autumn. Non-metric multidimensional scaling (NMDS) and redundancy analysis (RDA) indicated that Water temperature (WT), Chla, Conductivity (Cond) were main factors related to significant differences in zooplankton communities among seasons. Redundancy analysis (RDA) showed that Total Nitrogen(TN), Total Suspended Solids(TSS) and pH were also important factors affecting zooplankton community structure and distribution of dominant species.

Key Words: zooplankton; community type; non-metric multidimensional scale analysis; cluster analysis; environmental factors; Poyang Lake

浮游动物是水生生态系统中的重要组成成分,在生态系统的能量流动、物质循环和信息传递等方面具有重要作用。作为食物链中的初级消费者,浮游动物以细菌、碎屑和浮游植物为食^[1],在一定程度上可以改变浮游植物的群落结构,通过浮游植物-浮游动物-鱼类(Phytoplankton-Zooplankton-Fish, P-Z-F)的营养级联关系进一步影响水生生态系统功能。另一方面,浮游动物具有个体小,世代周期短,发育快的特点^[2],可以作为经济类鱼虾的饵料。同时浮游动物通过排泄和分泌作用,参与到水体有机质的循环中^[1]。一些浮游动物对环境变化敏感^[3],通常可作为水质状况的指示物种,并且浮游动物的群落结构也会对水环境条件的变化产生较大的响应^[4-6],因此探究浮游动物群落与水体环境因子的关系,对水生生态系统健康和水质监测与维护具有重要意义。

鄱阳湖位于江西省北部,是我国第一大淡水湖泊,因受到五大入湖河流和长江的双重影响,周年内水位、湖泊形态变化显著^[7],是一个过水性、吞吐型、季节性的湖泊^[8]。近年来由于周边人为活动频繁,湖泊生态系统结构和功能严重退化^[9]。20世纪80年代至90年代,王金秋等^[10]、谢钦铭等^[11-13]对鄱阳湖浮游动物种类组成及现存量季节变化进行了调查;之后刘宝贵等^[14]通过研究鄱阳湖浮游甲壳动物的群落分布特征,认为不同的水文条件导致浮游甲壳动物分布的差异性;聂雪等^[15]利用生物指数评价法对子湖泊的水质进行评价,结果显示在高水位期水质好于低水位期。这些研究均为鄱阳湖浮游生物多样性和水质评价提供有价值的参考。近年来国内有关浮游动物与环境因子的关系已有大量研究。大多数静水湖泊中浮游动物群落结构的季节差异主要与温度、叶绿素 a,营养盐水平有关^[16-20],河流水体中浮游动物的分布则主要与温度、pH 值、叶绿素 a、流速、浊度和悬浮物含量的相关性较强^[21-24]。鄱阳湖水文情况复杂,湖泊形态多变,不同水期可能同时兼具湖泊、浅滩、河流多种水体形态,在同一水期,常常可划分为静水区和流水区,因此探讨影响鄱阳湖浮游动物空间分布和动态变化的环境因子颇显独特。

本文基于对鄱阳湖浮游动物的季节性调查,研究了鄱阳湖浮游动物群落结构四季的空间分布特征及季节动态变化,评估浮游动物群落稳定性,并探究其与环境因子之间的关系,以期找出影响鄱阳湖浮游动物群落的关键因子,为鄱阳湖生态系统健康保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置及采样时间

本研究根据鄱阳湖水文特点,将其划分为五大区域进行采样点设置,共设置 50 个,具体采样点如图 1 所

示。其中北部通江湖区(Ⅰ)设置 1—15 号采样点(图 1, Ⅰ), 蚌湖口河口区(Ⅱ)设置 16—20 号采样点(见图 1, Ⅱ), 撮箕湖湖区(Ⅲ)设置 44—50 号采样点(图 1, Ⅲ), 南部中心湖区(Ⅳ)设置 21—33、41—43 号采样点(图 1, Ⅳ), 三江口河口区(Ⅴ)设置 34—40 号采样点(图 1, Ⅴ)。分别于 2017 年 8 月(夏季)、2017 年 11 月(秋季)、2018 年 2 月(冬季)和 2018 年 5 月(春季)进行 4 次标本采集, 由于鄱阳湖四季水位变化大, 低水位时期有些采样点无法采集。

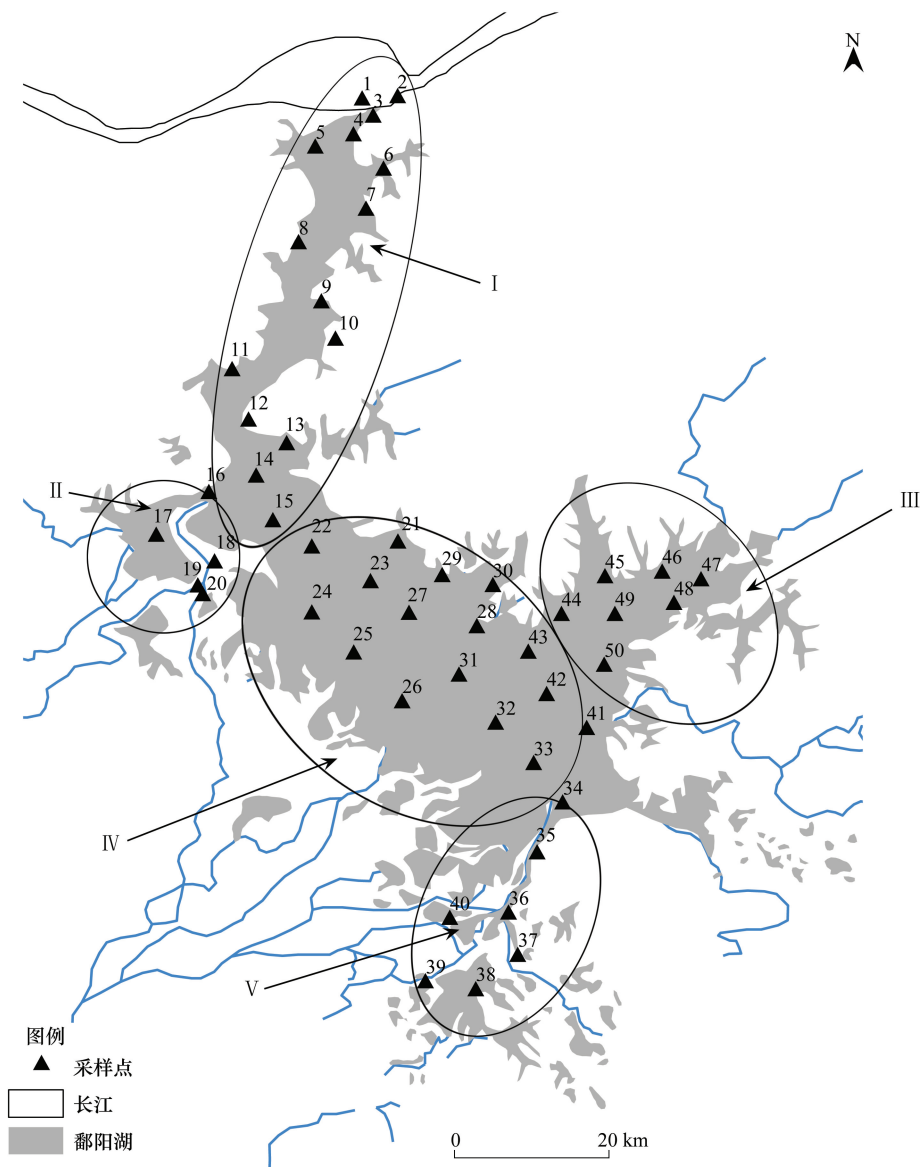


图 1 鄱阳湖浮游动物采样点分布图

Fig.1 Distribution of zooplankton sampling points of Poyang Lake

Ⅰ:北部通江湖区;Ⅱ:蚌湖口河口区;Ⅲ:撮箕湖湖区;Ⅳ:南部中心湖区;Ⅴ:三江口河口区

1.2 标本采集及观察

1.2.1 定性标本

定性标本用 25 号浮游生物网(孔径 64 μm)在上层水体呈“ ∞ ”字拖取 3—5 min 进行采集,并将滤取的样品放入标本瓶,现场加 4% 甲醛溶液进行固定。浮游动物的种类在 Nikon 50i 显微镜下观察,并参照书籍文献^[25-27]进行鉴定。

1.2.2 定量标本

轮虫定量样品:用 1 L 的有机玻璃采水器在水下 0.5 m 处采集,并当场用鲁哥试剂固定。样品带回实验室经两次沉淀 48 h 后浓缩至 50 mL,加甲醛永久保存。吸取 1 mL 的浓缩液注入 1 mL 的计数框中,在 10×10 的放大倍数下进行全片镜检(至少 3 次重复),观察并记录轮虫数量,生物量采用标准方法计算^[28]。

浮游甲壳纲动物:在各个采样点水面以下 0.5 m 处,采集 10 L 水样,并用 13 号浮游生物网过滤,再用装有纯净水的洗瓶对网孔进行清洗,清洗液直接流入样品瓶中,现场加 4% 甲醛溶液进行固定。室内在计数框中重复计数或使用倒置显微镜对整个样品镜检计数。

1.3 水质环境因子的测定

用 SEBA-Checker(德国,SEBAsn3476)便携式多参数水质测量仪现场测定水质环境因子:水温(Water Temperature, WT)、电导率(Conductivity, Cond)、pH、溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)、浊度(Turbidity, Turb)、总固体悬浮物(Total Suspended Solids, TSS)、叶绿素 a(Chlorophyll a, Chla)。在水下 0.5 m 处采集 1 L 水样,并及时带回室内测定化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, CODMn)、总氮(Total Nitrogen, TN)、总磷(Total Phosphorus, TP)。CODMn 测定方法为高锰酸钾指数法。TP 和 TN 的测定按照国家标准方法(GB11893-89; GB11894-89)进行。

1.4 数据处理

本研究采用 Mchoughton 优势度指数(Y)、优势种季节更替率(R)、Shannon-wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)分析鄱阳湖浮游动物群落的多样性,计算公式如下:

$$\text{Mchoughton 优势度指数}^{[29]}(Y): Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

$$\text{优势种季节更替率}^{[30]}(R): R = \frac{a + b - 2c}{a + b - c} \times 100\%$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数}^{[31]}(H'): H' = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}^{[32]}(J): J = \frac{H'}{\ln S}$$

$$\text{生物多样性阈值}^{[33]}(D_y): D_y = H' \times J$$

式中: N 为群落中物种的总密度; n_i 为第 i 个物种的密度; f_i 为该种在各采样点出现的频率以优势度指数 $Y \geq 0.02$ 确定浮游动物优势种。 S 代表总种类数; a 与 b 分别为相邻两季节的优势种的数目; c 为相邻两季节共有的优势种的数目。

根据生物多样性阈值的大小可将其分为 5 级^[34],具体标准如表 1 所示。

表 1 生物多样性阈值分级评价标准^[33]

Table 1 Evaluation standard for the biodiversity threshold

评价等级 Order of evaluation	阈值 Threshold value	等级描述 Level description	评价等级 Order of evaluation	阈值 Threshold value	等级描述 Level description
I	<0.6	多样性较差	IV	2.6—3.5	多样性丰富
II	0.6—1.5	多样性一般	V	>3.5	多样性非常丰富
III	1.6—2.5	多样性较好			

采用 R 语言进行数据统计与分析;根据去趋势分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)的结果(前两轴轴长<3),选择线性模型——冗余分析(Redundancy analysis, RDA)来探讨优势种与环境因子的关系,并通过前项选择(Forward selection)选出与各季节优势种显著相关的环境因子;采用非度量多维尺度分析(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)研究浮游动物群落的季节差异及与其影响因子。采用聚类分析(Cluster

analysis) 和分类回归树分析 (Classification and regression trees, CART) 探究造成每个季节中存在不同群落类型的主要环境因子。

2 结果与分析

2.1 浮游动物群落结构

2.1.1 浮游动物种类组成

通过对鄱阳湖四季浮游动物的调查研究,共鉴定浮游动物 99 种,隶属于 3 门 43 属。其中轮虫是鄱阳湖浮游动物种类的主要组成部分,有 31 属 83 种,占浮游动物动物总种类数的 84%,以臂尾轮属 (14%)、腔轮属 (13%) 和异尾轮属 (9%) 的种类为主,3 个属的种类数在春夏秋季差异不大,冬季各属种类均较少。枝角类 8 属 11 种,占 11%,以象鼻溞属 (2%)、裸腹溞属 (2%) 和秀体溞属 (2%) 的种类为主;桡足类 4 属 5 种,占 5%,以广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*) 为主。

如图 2 所示,四季种类数有所差异。春季和夏季浮游动物种类数较为丰富 (分别 71 种和 68 种),秋季次之 (60 种),冬季最少 (38 种),各季节种类组成差异显著 ($P < 0.01$)。空间上,五个区域浮游动物种类组成无显著差异 (图 2),主要由臂尾轮属、异尾轮属、象鼻溞属组成。南部中心湖区 (IV) 和北部通江湖区 (I) 种类数较多,均为 81 种;三江口河口区 (V) 次之 (73 种),撮箕湖湖区 (III) 和蚌湖口河口区 (II) 相对较少,分别为 65 种和 62 种。

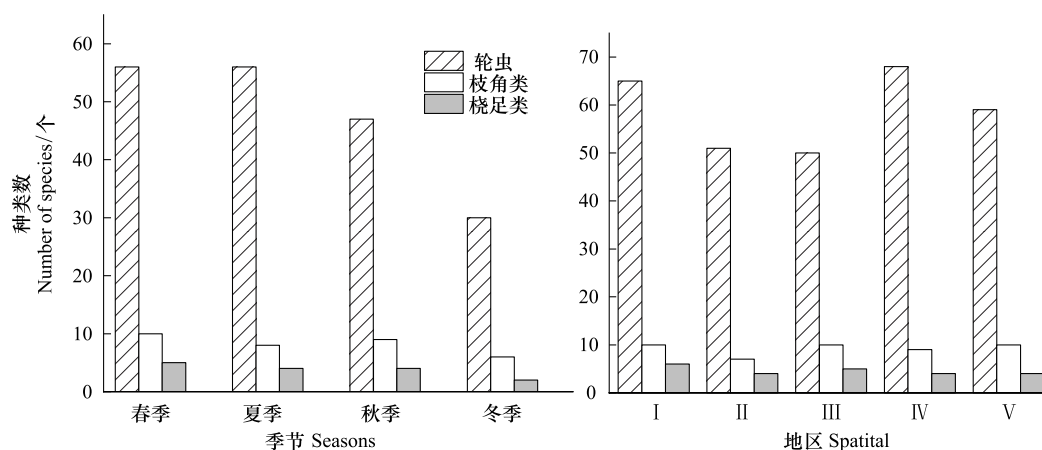


图 2 鄱阳湖浮游动物种类数季节及空间变化

Fig.2 Seasonal variation in zooplankton species richness in Poyang Lake

I: 北部通江湖区; II: 蚌湖口河口区; III: 撮箕湖湖区; IV: 南部中心湖区; V: 三江口河口区

2.1.2 浮游动物丰度的时空变化

鄱阳湖浮游动物四季平均丰度为 (1155.29 ± 117.41) 个/L, 以轮虫为主 (占比 96%), 枝角类和桡足类的丰度很低 (约占 4%)。浮游动物丰度的季节差异极显著 ($P < 0.01$), 空间分布差异较小。季节上, 浮游动物丰度从高到低分别为夏季 (3150.37 个/L)、秋季 (835.92 个/L)、春季 (484.76 个/L)、冬季 (145.86 个/L), 轮虫和枝角类与之变化一致, 而桡足类丰度较低, 夏秋季节 (43.32 个/L) 高于冬春季节 (6.3 个/L)。空间上, 各季节浮游动物丰度均呈现由南向北逐渐减少的趋势 (图 3), 三江口河口区 (V) 丰度较高 (1937.02 个/L), 北部通江湖区 (I) 和蚌湖口河口区 (II) 丰度较低, 分别为 779.52 个/L 和 751.04 个/L。轮虫丰度的空间变化与浮游动物的变化趋势一致, 大型浮游甲壳动物的空间分布差异显著 ($P < 0.05$), 多集中分布在撮箕湖区域 (III) 和南部中心湖区 (IV), 其他区域丰度均很低。

2.1.3 浮游动物优势种

四季共确定浮游动物优势种 14 种, 其中轮虫 13 种, 浮游甲壳动物仅检出筒弧象鼻溞 (表 2)。优势种组

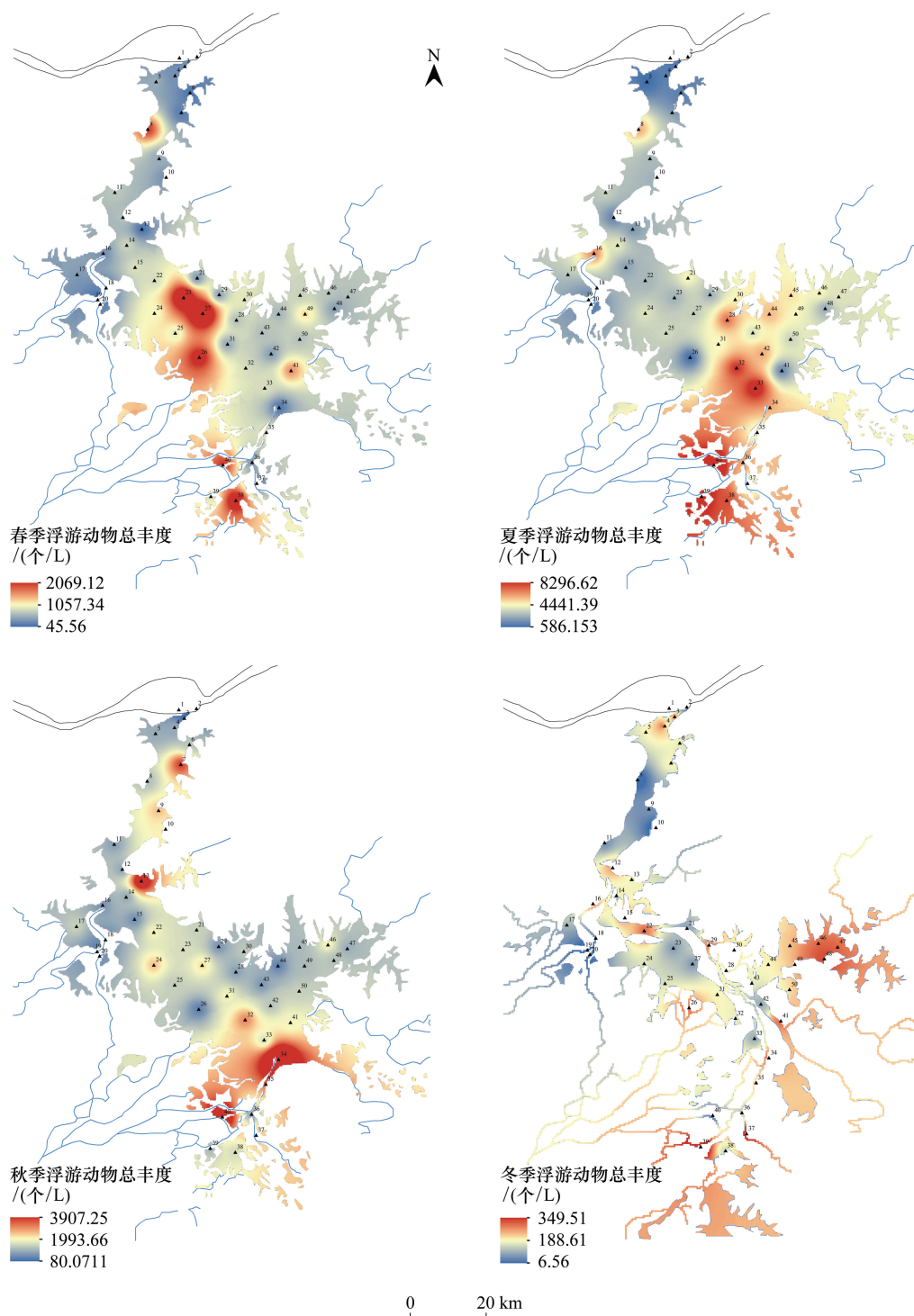


图 3 鄱阳湖浮游动物丰度变化

Fig.3 Variety in zooplankton abundance in Poyang Lake

成存在季节差异,夏季优势种结构复杂,其他季节较简单。春季共确定 5 种优势种,广生多肢轮虫 ($Y=0.40$) 优势度远高于其他优势种;夏季优势种结构最为复杂,有 11 种,以广生多肢轮虫 ($Y=0.38$) 为主,其中裂痕龟纹轮虫 (*Anuracopsis fissa*)、前节晶囊轮虫 (*Asplanchna priodonta*)、角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*)、剪形臂尾轮虫 (*Brachionus forficula*)、奇异六腕轮虫 (*Hexarthra mira*)、等棘异尾轮虫 (*Trichocerca similis*)、叉角拟聚

花轮虫 (*Conochiloides dossuarius*) 仅在夏季成为优势种, 但优势度均较低; 与其他三季不同, 秋季优势种结构虽然也相对简单, 但优势度均较大、相互之间差异较小, 以螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*) 的优势度最高 ($Y=0.33$)。冬季优势种结构最简单, 也是以广生多肢轮虫 ($Y=0.39$) 为主, 无特有优势种。

优势种的季节更替率较大。春夏季节之间的更替率为 77.00%, 由春季至夏季的演替过程中优势种群落结构趋于复杂; 夏秋季节之间的更替率为 86.00%, 第一优势种由广生多肢轮虫演替为螺形龟甲轮虫, 并且优势种结构由复杂趋向于简单化; 秋冬季节的优势种群较为简单相似, 其主要优势种均为广生多肢轮虫, 更替率有所降低, 为 66.67%; 在冬季到春季之间, 优势种演替明显, 优势种的种类增加, 同时各种类的优势度降低, 优势种的结构变得相对复杂, 小型轮虫开始成为优势种, 此阶段的优势种更替率是 66.67%。

表 2 鄱阳湖浮游动物优势种

Table 2 The dominant species of zooplankton in Poyang Lake

优势种 Dominant species	优势度 Degree of dominance			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuracopasis fissa</i>		0.04		
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>		0.03		
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>		0.03		
剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>		0.02		
长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>		0.03		0.04
奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>		0.07		
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.08		0.33	
广生多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>	0.40	0.38	0.20	0.39
尖尾疣毛轮虫 <i>Synchaeta stylata</i>	0.02		0.17	0.06
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	0.04	0.09		
等棘异尾轮虫 <i>Trichocerca similis</i>		0.02		
独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	0.02	0.02	0.02	
叉角拟聚花轮虫 <i>Conochiloides dossuarius</i>		0.02		
简弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>			0.03	

2.1.4 浮游动物多样性

如图 4 所示, 鄱阳湖浮游动物 Shannon-Weiner 多样性指数的季节和空间变化均极显著 ($P<0.01$), Pielou 均匀度指数具显著的季节变化 ($P<0.05$), 空间变化不明显。浮游动物 Shannon-Weiner 多样性指数平均为 1.65 (变幅 0—2.62), 其季节变化与浮游动物丰度变化一致, 表现为夏季最高 ($H'=2.19$), 秋 ($H'=1.73$)、春 ($H'=1.52$) 季节次之, 冬季 ($H'=1.10$) 最低。空间上以撮箕湖区 (Ⅲ, $H'=2.04$)、南部中心湖区 (Ⅳ, $H'=1.79$) 和三江口河口区 (Ⅴ, $H'=1.73$) 明显高于蚌湖口河口区 (Ⅱ, $H'=1.34$) 和北部通江湖区 (Ⅰ, $H'=1.42$)。Pielou 均匀度指数平均为 0.73 (变幅 0.11—1), 其季节变化与浮游动物丰度变化相反, 冬季 Pielou 均匀度指数最高 ($J=0.80$), 其次是秋季 ($J=0.78$) 和春季 ($J=0.75$), 夏季最低 ($J=0.72$)。而各个区域的均值在 0.74—0.79 的范围内, 空间差异不大。

2.2 浮游动物与环境因子的相关性

2.2.1 鄱阳湖水环境因子

鄱阳湖水环境因子呈现明显的季节变化 (表 3)。水温四季差异显著 ($P<0.01$), 夏季最高, 冬季最低。电导率、浊度和总固体悬浮物的季节变化一致, 均为冬季最高, 春秋季节次之, 夏季最低。鄱阳湖水体呈弱碱性, 夏季 pH 值较其他季节高。溶解氧的季节变化表现为春季最高, 夏秋季节次之, 冬季最低。Chla 在夏季高于其他季节。水体 TP 在秋季明显高于其他季节, 夏季最低; TN 冬季最高, 其他季节差异不大; COD 四季变化不明显。

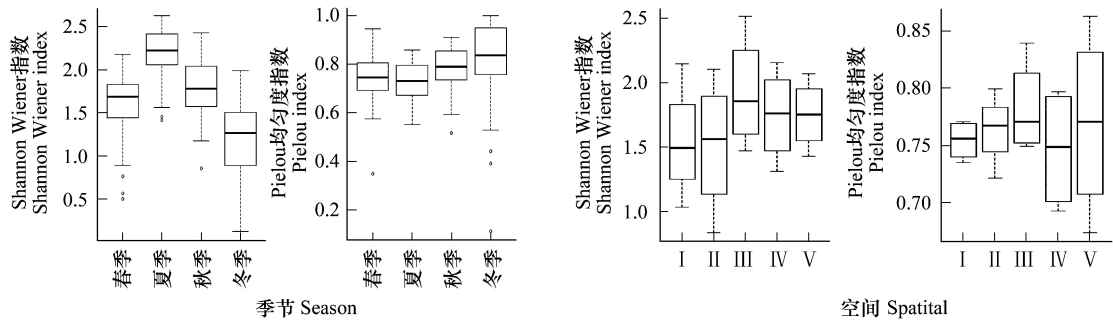


图 4 鄱阳湖浮游动物 Shannon Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的季节及空间变化

Fig.4 Seasonal and spatial variation of zooplankton diversity and evenness index in Poyang Lake

I :北部通江湖区; II :蚌湖河口口区; III :撮箕湖湖区; IV :南部中心湖区; V :三江口河口区

表 3 鄱阳湖水理化指标季节变化(平均值及变化范围)

Table 3 Seasonal changes of physical and chemical indicators of Poyang Lake (average and variation range)

环境因子 Environmental factor	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
WT/℃	22.79(19.97—24.61)	32.23(27.18—35.02)	18.44(15.6—20.23)	6.35(4.32—8.80)
Cond/(ms/cm)	0.13(0.007—0.37)	0.11(0.008—0.159)	0.17(0.091—0.7)	0.23(0.027—0.87)
pH	7.48(6.87—8.13)	8.34(6.44—9.4)	7.84(7.27—8.69)	7.56(6.74—9.26)
DO/(mg/L)	5.81(4.89—6.44)	7.34(0.02—9.74)	9.08(8.41—9.83)	11.12(10.1—11.92)
Turb(NTU)	41.44(14.39—147.2)	22.89(7.72—81.22)	34.76(15.33—93.05)	71.44(16.36—208)
TSS/(g/L)	0.23(0.058—3.389)	0.10(0.018—0.537)	0.27(0.059—6.26)	0.29(0.065—0.832)
Chla/(mg/L)	4.90(1.04—12.39)	8.41(1.904—18.1)	5.60(1.501—19.39)	3.51(2.027—7.786)
TP/(mg/L)	0.19(0.12—0.33)	0.08(0.005—0.126)	0.31(0.06—0.73)	0.14(0.073—0.82)
TN/(mg/L)	1.61(0.8—3.7)	1.85(0.5—4.9)	1.67(0.7—3.7)	3.10(0.8—7.1)
COD/(mg/L)	6.89(2.7—15.5)	6.61(3.3—12.3)	6.98(1.6—13.4)	6.90(3.5—9.7)

WT:温度 Water temperature; Cond:电导率 Conductivity; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; Turb:浊度 Turbidity; TSS:总溶解固体 Total suspended solids; Chla:叶绿素 a Chlorophyll a; TP:总磷 Total phosphorus; TN:总氮 Total nitrogen; COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand

2.2.2 浮游动物与环境因子的多元分析

浮游动物群落季节差异显著,与几种环境因子的综合影响有关。NMDS 分析结果显示(图 5),四季浮游动物群落主要沿主轴 1 分布,轴的左、中、右侧分别分布着冬季、春秋季、夏季的群落,其中夏季和冬季之间的群落差异性最大($P<0.01$)。从单个季节群落的二维分布来看,夏季和秋季采集到的群落分别较为聚集,相似性高。春、秋季的群落重叠较多,群落结构较为相似。排序图显示,WT、Chla、pH 是造成夏季群落不同于其他季节群落的主要环境因子,Cond、DO、TN、TP、是影响冬季浮游动物群落结构的主要因子。

聚类分析将每个季节的群落划分群落类型,各类型群落特征见表 4。春季划分为 Sp- I—Sp- III 三组群落类型(图 6),群落 Sp- I 为广布中剑水蚤型群落,其平均丰度最低,仅检出广布中剑水蚤。群落 Sp- II 为广生多肢轮虫型,浮游动物丰度和多样性最高,优势种结构也相对复杂。群落 Sp- III 为广生多肢轮虫-螺形龟甲轮虫型,其 Pielou 均匀度指数最高。分类回归树分析最优模型得出(图 6),Chla 是划分春季浮游动物群落的关键因子。

夏季浮游动物群落划分为 Su- I—Su- IV 四组(图 7)。群落 Su- I 为广生多肢轮虫型群落,其群落结构简单,丰度、多样性均最低。群落 Su- II 为广生多肢轮虫-暗小异尾轮虫-裂痕龟纹轮虫型,其 Pielou 均匀度指数、Shannon-Weiner 多样性指数最高,且甲壳纲筒弧象鼻溞形成优势。群落 Su- III 为广生多肢轮虫型,为夏季丰度最高的类型。群落 Su- IV 为广生多肢轮虫-暗小异尾轮虫型,优势种结构较复杂。分类回归树结果表明

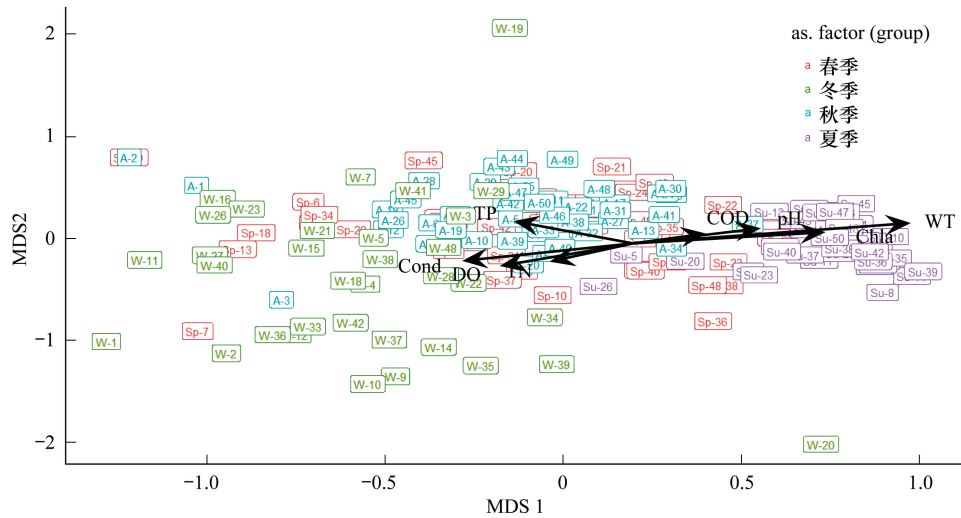


图 5 基于浮游动物丰度的 NMDS 排序图

Fig.5 NMDS sequencing map based on zooplankton abundance in Poyang Lake

WT: 温度 Water temperature; Cond: 电导率 Conductivity; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; Chla: 叶绿素 a Chlorophyll a; TP: 总磷 Total phosphorus; TN: 总氮 Total nitrogen; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand

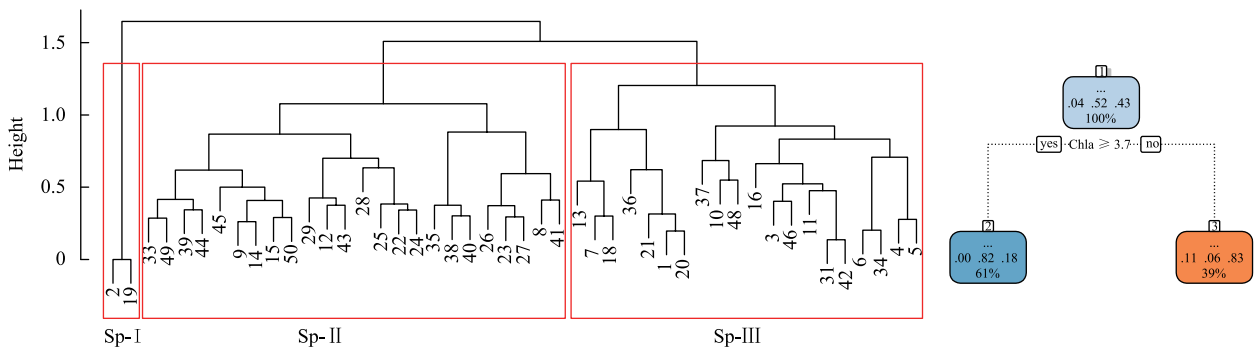


图 6 春季浮游动物群落聚类分析和分类回归树分析

Fig.6 Cluster analysis and classification and regression tree analysis of zooplankton community in spring

(图 7), Chla 和 TP 是划分夏季浮游动物群落类型的重要因子。

秋季群落被划分为四组类型 (Au-I—Au-IV) (图 8), 四组类型存在显著差异 ($P < 0.01$) (表 4)。群落 Au-I 为螺形龟甲轮虫型, 其多样性最低 (仅 1 种)、优势种结构也最简单且优势度很高。群落 Au-II 为螺形龟甲轮虫-广生多肢轮虫-独角聚花轮虫型, 其 Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均为最高, 优势种结构最为复杂。群落 Au-III 和群落 Au-IV 均为螺形龟甲轮虫-广生多肢轮虫-尖尾疣毛轮虫型, 但优势度分配差异较大, 前者种类丰富度最高 (33 种)。浮游动物丰度表现为 $Au-III > Au-II > Au-IV > Au-I$ 。各组优势种有一定的差异, 除 I 组外, 其他三组均以螺形龟甲轮虫优势度最高, 分类回归树结果表明 (图 8), COD 是秋季浮游动物群落划分的重要因子。

浮游动物优势种与环境因子的 RDA 分析结果显示, 春季, 排序图前两轴累计解释率 36%, 其中 TN 和 Chla ($P < 0.01$) 的贡献较大 (图 9), Chla 与各优势种均呈现极显著的正相关, 与广生多肢轮虫、暗小异尾轮虫 (*Trichocerca pusilla*) 的相关性较强; TN 与广生多肢轮虫、暗小异尾轮虫呈极显著的负相关, 与其他优势种的分布呈现正相关关系。夏季, 前两轴累计解释率 31%, 优势种的分布主要与 pH 和 Chla 显著相关 ($P < 0.01$) (图 9), 其中奇异六腕轮虫、广生多肢轮虫、长三支轮虫 (*Filinia longiseta*)、等棘异尾轮虫、叉角拟聚花轮虫和前节

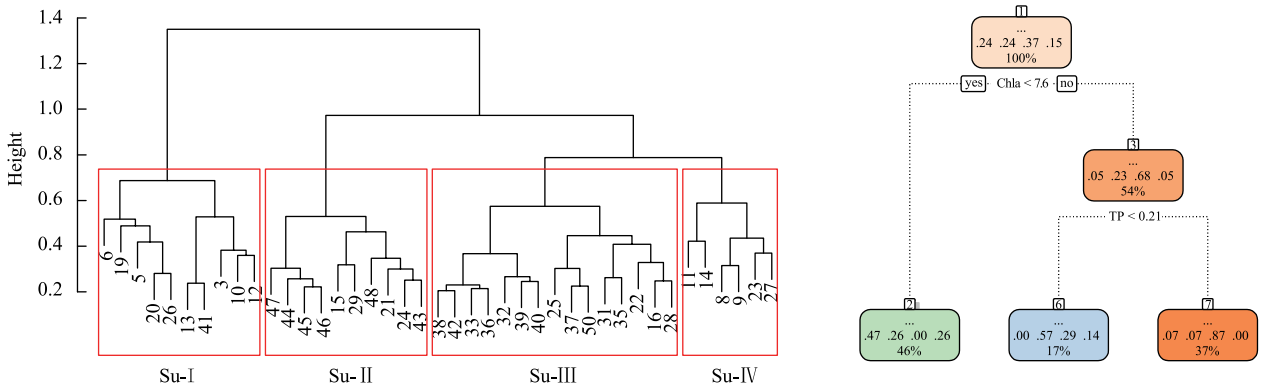


图 7 夏季浮游动物群落聚类分析和分类回归树分析

Fig.7 Cluster analysis and classification and regression tree analysis of zooplankton community in summer

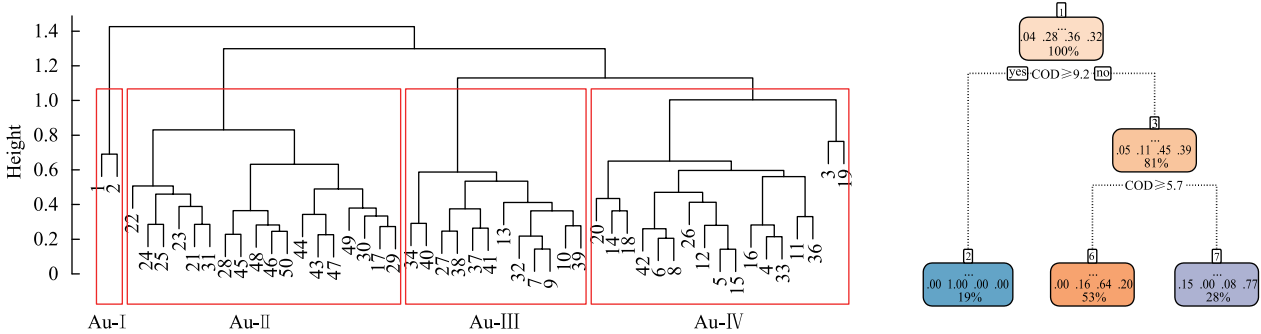


图 8 秋季浮游动物群落聚类分析和分类回归树分析

Fig.8 Cluster analysis and classification and regression tree analysis of zooplankton community in autumn

晶囊轮虫的分布受 Chla 的正影响较大,而裂痕龟纹轮虫、暗小异尾轮虫、角突臂尾轮虫、独角聚花轮虫与 pH 的正相关性较大。秋季,前两轴累计解释率 15%,对优势种影响较大的因子是 TSS 和 TN($P<0.05$) (图 9),TN 主要与独角聚花轮虫和筒弧象鼻蚤呈显著负相关关系,TSS 则与广生多肢轮虫、尖尾疣毛轮虫 (*Synchaeta stylata*)、螺形龟甲轮虫等小型轮虫优势种的相关性较强。而冬季优势种在各点位间丰度变化小,无显著相关的环境因子。

3 讨论

3.1 鄱阳湖浮游动物群落分布特征

鄱阳湖浮游动物群落结构表现为种类组成及丰度均以小型轮虫为主的特征,而大型的枝角类和桡足类相对较少,这与国内大多数大型淡水湖泊、水库等研究结果相似^[35-38]。浮游动物丰度的季节变化显著,表现为夏高于秋、春高于冬季,与郭坤等人对长湖浮游动物丰度变化的研究结果相同^[39]。本次调查结果与鄱阳湖浮游动物的历史数据相比^[11],轮虫的丰度明显升高,有所不同的是谢钦铭等对鄱阳湖浮游动物的调查中轮虫现存量最高值出现在秋季(3665 个/L),而在本次调查中轮虫现存量的最大值出现在夏季(8300 个/L);桡足类的现存量与之前相比^[13]有所降低,相同的是桡足类丰度的季节变动一致,秋季>夏季>春季>冬季。从空间分布来看,浮游动物丰度呈现从南到北逐渐降低的趋势。鄱阳湖不同区域的水体流速差异较大,表现为北部湖区>南部湖区>东部湖区^[40],在南部的三江口河口区,信江、抚河以及赣江南支三条支流由该区域汇入鄱阳湖,带来了丰富的营养盐,进入鄱阳湖后流速减缓,水体的物理性质发生改变,如冲刷力降低、泥沙沉降、水体透明度升高,为浮游动物丰度的增长提供了良好的环境。而位于松门山以北的北部通江湖区(I)为一

表 4 群落类型特征

Table 4 Characteristics of the four community types

群落特征 community characteristics	春季 Spring			夏季 Summer				秋季 Autumn			
	Sp- I	Sp- II	Sp- III	Su- I	Su- II	Su- III	Su- IV	Au- I	Au- II	Au- III	Au- IV
种类丰富度/个 Species richness	1	35	25	36	41	43	38	1	25	32	24
香农威纳多样性指数 Shannon Weiner	0	1.69	1.46	1.91	2.47	2.12	2.34	0	1.93	1.82	1.63
Pielou 均匀度指数 Pielou		0.71	0.79	0.7	0.78	0.68	0.78		0.82	0.73	0.79
丰度/(ind/L) Abundance	2.5	751.94	226.96	1121	2980.25	4745.33	2828.75	27.5	661.92	1450.74	449.26
优势种及优势度 Dominant species and degree of dominance											
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuracopsis fissa</i>					0.09	0.03	0.03				
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>						0.04	0.04				
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>			0.02		0.03	0.02	0.09				
剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>					0.03		0.04				
长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>						0.05	0.04				
奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>				0.04	0.07	0.09	0.05				
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>		0.08	0.13 *					1 *	0.27 *	0.39 *	0.3 *
热带龟甲轮虫 <i>Keratella tropoic</i>					0.02						
广生多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>		0.43 *	0.38 *	0.48 *	0.25 *	0.46 *	0.23 *		0.19 *	0.21 *	0.23 *
尖尾疣毛轮虫 <i>Synchaeta stylata</i>		0.04		0.03			0.05		0.07	0.22 *	0.2 *
圆筒异尾轮虫 <i>Trichocerca cylindrical</i>							0.03				
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>		0.06	0.02	0.06	0.13 *	0.06	0.12 *			0.03	
等棘异尾轮虫 <i>Trichocerca similis</i>				0.04		0.04					
独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>		0.06			0.09				0.12 *		
叉角拟聚花轮虫 <i>Conochiloides dossuarius</i>						0.03	0.03				
广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>	1 *								0.07		
筒弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>					0.03				0.07		

表格中数字标“*”的为各组群落中优势度指数高于0.1的种类; Sp- I :春季第一组群落群类型; Sp- II :春季第二组群落群类型; Sp- III :春季第三组群落群类型; Su- I :夏季第一组群落群类型; Su- II :夏季第二组群落群类型; Su- III :夏季第三组群落群类型; Su- IV :夏季第四组群落群类型; Au- I :秋季第一组群落群类型; Au- II :秋季第二组群落群类型; Au- III :秋季第三组群落群类型; Au- IV :秋季第四组群落群类型

条狭长的入江水道,鄱阳湖经此汇入长江,此区水体深度大,流速较快,浮游动物游泳能力弱,不能抵抗水流随波逐流,因此这一区域不是浮游动物的理想栖息处^[41]。大型浮游甲壳动物集中分布在撮箕湖及南部中心湖区的部分区域,撮箕湖区域位于鄱阳湖的东部,同时该区域为营养盐浓度较高,且属于水流较缓的内湾区

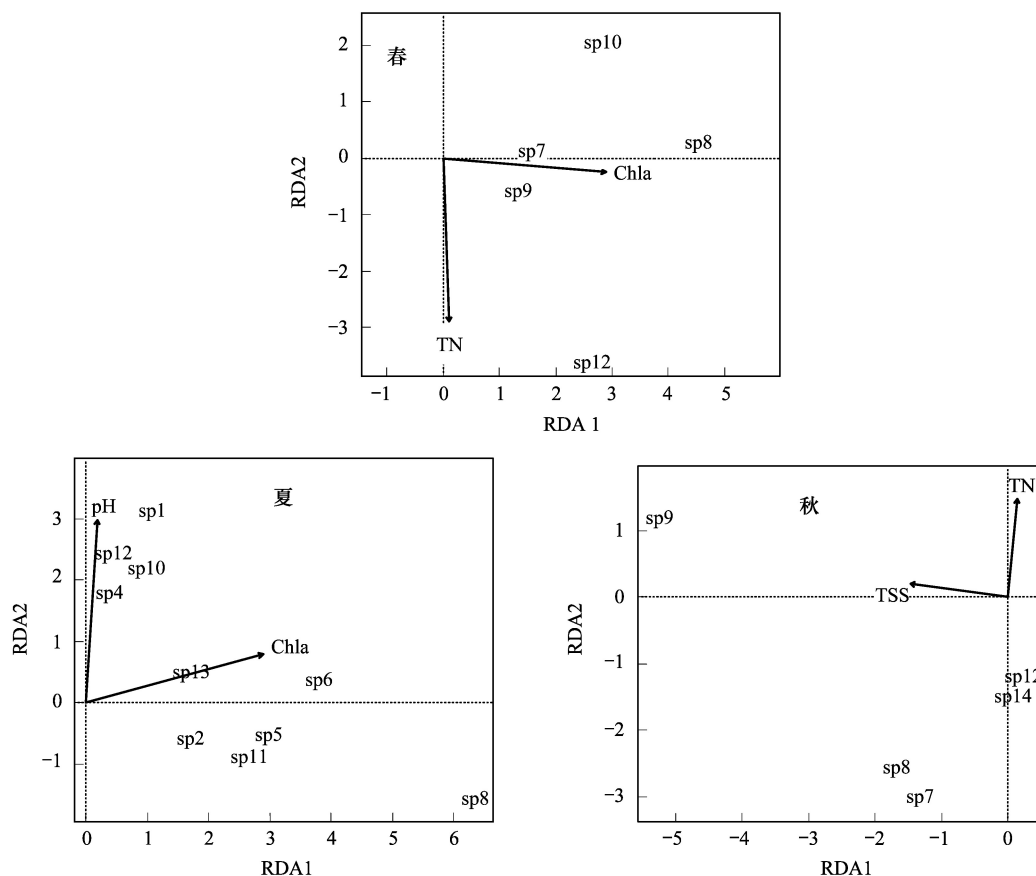


图9 鄱阳湖浮游动物优势种与环境的 RDA 排序图

Fig.9 RDA sequence of dominant species and environment in Poyang Lake

TSS:总溶解固体 Total suspended solids; sp1:裂痕龟纹轮虫 *Anuracopsis fissa*; sp2:前节晶囊轮虫 *Asplanchna priodonta*; sp3:角突臂尾轮虫 *Brachionus angularis*; sp4:剪形臂尾轮虫 *Brachionus forficula*; sp5:长三支轮虫 *Filinia longiseta*; sp6:奇异六腕轮虫 *Hexarthra mira*; sp7:螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*; sp8:广生多肢轮虫 *Polyarthra vulgaris*; sp9:尖尾疣毛轮虫 *Synchaeta stylata*; sp10:暗小异尾轮虫 *Trichocerca pusilla*; sp11:等棘异尾轮虫 *Trichocerca similis*; sp12:独角聚花轮虫 *Conochilus unicornis*; sp13:叉角拟聚花轮虫 *Conochiloides dossuarius*; sp14:筒弧象鼻溞 *Bosmina coregoni*

域^[42]。在这个区域,水体平静,营养盐浓度高,适合浮游甲壳动物栖息。

3.2 鄱阳湖浮游动物群落结构的多样性与稳定性

浮游动物群落优势种结构对群落结构的稳定性有重要的影响,优势种的数目越多且优势度越低,说明群落结构越复杂、稳定^[43]。全年变化中,夏季的优势种较多,且各个种类优势度不高,表明夏季浮游动物群落比较复杂且更稳定,春秋冬三季节的优势种较少且优势度高,尤其是冬季,因此在春秋冬三季节浮游动物群落结构较不稳定。浮游动物的优势种在季节之间既有交叉又有演替,且演替较为明显,说明浮游动物群落在同一水体中随着生态环境的变化随之产生不同的群落特征^[44]。

生物多样性是衡量一个区域内生物资源丰富程度的指标,用于评价群落中物种组成的稳定程度及数量分布的均匀程度,是衡量群落规模和重要性的基础^[43,45]。均匀度指数也是体现群落结构特征的一个重要指标,能够反映出各个物种数目分配的均匀程度^[43]。一般来说,较为稳定的群落具有较高的多样性和均匀度。基于生物多样性阈值分级评价标准(表1),鄱阳湖浮游动物多样性阈值存在时空差异。从季节变化看,夏季的生物多样性阈值较高,介于Ⅱ—Ⅲ级之间,有66%的采样点位属于Ⅲ级。其次是秋季,秋季有9%的采样点位属于Ⅲ级,其余采样点位均为Ⅱ级。春季有9%采样点位属于Ⅲ级,80%的样点为Ⅱ级,剩余样点属于Ⅰ级。冬季生物多样性阈值最低,只有9%的样点属于Ⅲ级,66%的样点属于Ⅱ级,17%的样点属于Ⅰ级,还有3个采

样点只检出一种浮游动物,无法计算阈值。在本次调查中,Shannon-Weiner 多样性指数四季变化明显,并且 Shannon-Weiner 多样性指数的季节变化与水位变化一致,这与聂雪等^[46]的研究结果一致。夏季高水位的条件下,流速相对低水位时期缓慢,适宜浮游动物的生长繁殖;冬季低水位时期,温度低,流速快,同时水体浑浊,影响其食物来源浮游植物的生长,均对浮游动物的生长发育产生影响^[47]。

从空间变化分析,鄱阳湖五大区域的生物多样性阈值也有明显的差异。位于湖体南部的撮箕湖区(Ⅲ)、南部中心湖区(Ⅳ)和三江口河口区(Ⅴ)与湖体北部的北部通江湖区(Ⅰ)和蚌湖口河口区(Ⅱ)存在明显差异。湖体南部 29% 的点位于Ⅲ级,69% 的点位于Ⅱ级,仅有 2% 的点位于Ⅰ级;湖体北部 17% 的点位于Ⅲ级,63% 的点位于Ⅱ级,11% 的点位于Ⅰ级,还有 9% 的点只检出一种浮游动物,无法计算阈值。湖体南部的 Shannon-Weiner 多样性指数也高于湖体北部。这样的差异可能和湖盆构造有一定的关系,鄱阳湖湖盆主要由水道和洲滩组成,湖盆由南向北,由东向西倾斜^[48],南部为湖泊主体区域,五河入湖形成的洲滩也位于南部,湖面宽且浅,使得水面及底层的营养盐混合更充分,加之该区域流速较缓,这些均为浮游动物共存提供合适的生境,因此湖体南部浮游动物的多样性更高,群落结构也更稳定。而北部为入江水道,湖面窄且深,且流速更快,则浮游动物多样性相对较低。

鄱阳湖各季节以及各区域浮游动物 Pielou 均匀度指数基本都高于 0.6,最高值接近于 1,说明鄱阳湖浮游动物均匀度较高。与 2011 年张婷等^[49]对蚌湖的多样性调查比较,蚌湖在 2011 年时的浮游动物 Shannon-Weiner 多样性指数 H' 值小于 1, Pielou 均匀度指数 J 值也仅为 0.09,在本次的调查中蚌湖的 Shannon-Weiner 多样性指数 H' 值为 1.34, Pielou 均匀度指数 J 值为 0.77,与之前的调查结果相比较生物多样性与均匀度均有提高。整体来看,在此次调查期间鄱阳湖浮游动物多样性和均匀度均较高,显示鄱阳湖浮游动物群落结构处于比较复杂、稳定的状态。

3.3 水体非生物因素对浮游动物的影响

浮游动物的群落结构受许多因素影响,环境是其中之一,且在不同的水体中环境因素对群落结构的影响也存在差异。夏季浮游动物群落结构与温度、Chla、pH 呈极显著正相关,冬季群落结构与之呈现极显著的负相关。研究表明,水温是影响浮游动物生长发育、繁殖周期以及物种组成的重要因子,也是影响浮游动物季节演替的关键因子^[19,50]。在本次调查中,浮游动物总丰度的变化与温度的变化基本一致,且四季均以轮虫为主。随着温度的升高,浮游动物发育的时间缩短,生长繁殖速度加快,丰度及生物量迅速升高,因此,从春季到夏季,浮游动物丰度明显提升。四季检出的物种均以广温性物种为主,也有一些和温度相关的特征物种,如僧帽溞(*Daphnia cucullata*)为嗜冷性物种^[51],在冬季生物量明显增加,在夏季没有观察到;一些嗜暖性物种如微型裸腹溞(*Moina micrura*)、长肢秀体溞(*Diaphanosoma leuchtenbergianum*)多在春夏季节出现,冬季几乎没有^[51-52]。

水体中的氮、磷含量一般通过影响浮游植物群落,从而间接影响浮游动物的分布^[53]。鄱阳湖低水位时期的氮盐浓度要明显高于高水位时期的氮盐浓度,而磷盐受水位波动影响较小^[47]。所以在高水位期,出现 N/P 较低的情况,在缺氮的条件下,会引起固氮类蓝藻在鄱阳湖的大量生长,从而引起叶绿素浓度增加^[54],浮游动物在温度等条件适宜的情况下又有丰富的食物供给,因而丰度较高。TN 在春季和秋季与独角聚花轮虫的分布有较强的相关性。Cond 是指水体中的大小离子浓度的大小,也可以反映水中营养盐浓度。鄱阳湖冬季 Cond 高,夏季 Cond 低,与季节温度变化呈负相关。可能是在低水位期,水体流速快,由于沉积物的再悬浮作用大,造成富营养程度高的现象。COD 是秋季群落类型划分的关键因子,在此阶段,浮游甲壳动物的丰度变化与 COD 具有显著正相关的关系。COD 的大小通常作为评判水体营养水平的标准,秋季撮箕湖及其附近区域 COD 高,加上水文、湖盆构造等的综合作用下,浮游甲壳动物丰度较高。

水体酸碱度(pH)与浮游动物的丰度变化及种类组成也有密切的关系。轮虫、桡足类更适宜生活在偏碱性水体中,枝角类则在酸性、中性及微碱性水体中生活的更好^[24]。在调查期间,大部分点位 pH 值范围在 7—9 之间,夏季的 pH 与其他季节相比较高,浮游动物的丰度也明显高于春、秋、冬季。pH 对夏季优势种裂腹龟

纹轮虫、暗小异尾轮虫、独角聚花轮虫等小型轮虫的分布也有重要的影响。

3.4 生物因素对浮游动物的影响

Chla 是衡量水体中浮游植物生物量的主要指标。浮游动物作为水生生态系统中的初级消费者,浮游植物是其主要食物来源,水体中浮游植物密度的高低与浮游动物的生长繁殖密切相关。陈光荣等^[55]对广东城市湖泊后生浮游动物的研究结果显示浮游动物丰度与 Chla 浓度呈显著正相关。Chla 对春夏季节浮游动物群落结构类型的划分和浮游动物的分布均具有重要的影响,春夏季节温度较高,是浮游生物重要的繁殖期,浮游植物密度的迅速增长及群落结构的改变,也会影响浮游动物的种类组成。春夏季节 Chla 主要影响小型轮虫优势种的分布,如广生多肢轮虫、暗小异尾轮虫、等棘异尾轮虫、长三肢轮虫和奇异六腕轮虫均与 Chla 呈极显著的正相关。

4 结论

本研究基于对鄱阳湖浮游动物的调查,着重分析了浮游动物的时空动态、群落类型及其与环境因子的关系。鄱阳湖浮游动物群落结构以小型轮虫为主,浮游动物丰度的季节、空间变化均差异显著,且较历史数据有所增加。浮游动物群落多样性较高,群落结构较为复杂、群落较完整且稳定。每个季节的群落类型多样,春夏季节浮游动物群落类型与 Chla 密切相关,COD 是秋季群落类型划分的关键因子。造成四季浮游动物群落显著差异的最主要环境因子是 WT、Chla、Cond,此外 TN、TSS 和 pH 对浮游动物群落结构以及优势种分布也具有重要作用。

参考文献 (References):

- [1] 杨宇峰,黄祥飞. 浮游动物生态学研究进展. 湖泊科学, 2000, 12(1): 81-89.
- [2] 李超伦,王克. 植食性浮游桡足类摄食生态学研究进展. 生态学报, 2002, 22(4): 593-596.
- [3] 胡笑妍,徐杭英,谢曙光,于海燕,周胜利,杜波. 浦阳江流域浮游动物群落结构及其评价水质健康状况的研究. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 549-554.
- [4] 袁雅琴,周春丽,高海燕,史宏艺,成小英. 太湖典型入湖河流莲花荡浮游动物群落季节演替及其环境指示意义初步研究. 动物学杂志, 2017, 52(5): 812-823.
- [5] 赵坤,吴波,尤庆敏,任晶,王全喜. 长江口九段沙附近水域浮游动物时空分布及其与环境因子的关系. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 374-379.
- [6] Sládeček V. Rotifers as indicators of water quality. Hydrobiologia, 1983, 100(1): 169-201.
- [7] 闵骞. 鄱阳湖水位变化规律的研究. 湖泊科学, 1995, 7(3): 281-288.
- [8] 张本. 鄱阳湖研究. 上海:上海科学技术出版社, 1988.
- [9] 刘新,许梦文,赵珍,蒋豫,蔡永久,唐晓岚. 鄱阳湖蝶形湖泊水体氮磷等的变化及污染初步评价. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1189-1198.
- [10] 王金秋,吴建平,於燕斌,王天宇,成功. 春秋两季鄱阳湖浮游动物的编目、数量分布与变动. 湖泊科学, 2003, 15(4): 345-352.
- [11] 谢钦铭,李长春. 鄱阳湖桡足类的群落组成与现存量季节变动的初步研究. 江西科学, 1998, 16(3): 42-49.
- [12] 谢钦铭,李长春,彭赐莲. 鄱阳湖原生动物群落生态的初步研究. 江西科学, 2000, 18(1): 40-44.
- [13] 谢钦铭,李云,李长春. 鄱阳湖轮虫种类组成与现存量季节变动的初步研究. 江西科学, 1997, 15(4): 235-242.
- [14] 刘宝贵,刘霞,吴瑶,钟正,陈宇炜. 鄱阳湖浮游甲壳动物群落结构特征. 生态学报, 2016, 36(24): 8205-8213.
- [15] 聂雪,胡旭仁,刘观华,秦海明. 鄱阳湖子湖泊浮游动物多样性及水质生物评价. 南昌大学学报:理科版, 2018, 42(2): 161-167.
- [16] 周义道. 太湖浮游动物群落结构及环境相关性研究[D]. 上海:上海师范大学, 2019.
- [17] 代培,刘凯,周彦锋,周游,徐跑. 太湖五里湖湖滨带浮游动物群落结构特征. 水生态学杂志, 2019, 40(1): 55-63.
- [18] 杜彩丽,杨丽,赵诣,吴晓敏,徐慕,王丽卿,张伟. 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.
- [19] 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.
- [20] 吴利,冯伟松,张堂林,徐昊,余育和. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2011, 23(4): 619-625.

- [21] 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.
- [22] 张昊. 嫩江下游浮游动物群落结构动态特征及其与水环境因子的相关分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [23] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征. 湖泊科学, 2015, 27(5): 932-940.
- [24] 高原, 赖子尼, 李捷, 王超, 曾艳艺, 刘乾甫, 杨婉玲. 连江浮游动物多样性的空间分布. 生物多样性, 2013, 21(6): 699-708.
- [25] 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.
- [26] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961.
- [27] 蒋燮志, 堵南山. 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.
- [28] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [29] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, Angel M V. Marine snow studies in the northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton. Marine Biology, 1993, 116(4): 689-702.
- [30] Yang G M, He D H, Wang C S, Miao Y T, Yu H H. Study on biological oceanography characteristics of planktonic copepods in waters North of Taiwan II. Community characteristics. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 19(3): 139-152.
- [31] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1949: 25-56.
- [32] Pielou E C. Ecological Diversity. New York: John Wiley & Sons Inc, 1975.
- [33] 陈秀丽, 秦玉广, 张金路, 董贯仓, 杜兴华. 东平湖浮游动物群落结构特征及水质评价. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2017, 32(2): 115-120.
- [34] 陈清潮, 黄良民, 尹建强. 南沙群岛海区浮游动物多样性研究//中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究 I. 北京: 海洋出版社, 1994: 42-50.
- [35] 李怀国, 杨长明, 王育来. 巢湖水质现状及浮游生物群落结构特征. 安徽农业科学, 2017, 45(22): 13-16.
- [36] 高子涵, 张健, 皮杰, 张婷, 李德亮, 肖调义. 湖南省大通湖浮游动物群落结构及其与环境因子关系. 生态学杂志, 2016, 35(3): 733-740.
- [37] 习丽红, 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. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1049-1058.
- [38] 刘歆璞, 王丽卿, 张宁, 陶雪梅, 马文华. 青草沙水库后生浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1238-1248.
- [39] 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.
- [40] 欧阳千林, 王婧. 鄱阳湖河湖两相下湖流和水质变化特征研究. 江西水利科技, 2018, 44(5): 356-362.
- [41] 吴利, 冯伟松, 陈小娟, 舒凤月, 梁小民. 新疆伊犁地区夏季浮游动物群落结构特征. 应用生态学报, 2008, 19(1): 163-172.
- [42] 钱奎梅, 刘霞, 段明, 陈宇炜. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析. 中国环境科学, 2016, 36(1): 261-267.
- [43] 陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 胡庚东, 瞿建宏, 吴伟, 范立民, 马晓燕. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1358-1367.
- [44] Suikkanen S, Laamanen M, Huttunen M. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 71(3): 580-592.
- [45] 姚少慧, 于红兵, 王霞, 孙宗勋. 湛江港夏秋季浮游动物群落结构的分布与变化. 广东农业科学, 2012, 39(13): 192-196.
- [46] 聂雪, 胡旭仁, 刘观华, 金斌松, 秦海明. 鄱阳湖子湖“壑秋湖”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.
- [47] 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰. 鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应. 环境科学, 2016, 37(6): 2141-2148.
- [48] 吴桂平, 刘元波, 范兴旺. 近 30 年来鄱阳湖湖盆地形演变特征与原因探析. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1168-1176.
- [49] 张婷, 马行厚, 王桂苹, 李德亮, 金斌松, 秦海明. 鄱阳湖国家级自然保护区浮游生物群落结构及空间分布. 水生生物学报, 2014, 38(1): 158-165.
- [50] Lenz P H, Hower A E, Hartline D K. Temperature compensation in the escape response of a marine copepod, *Calanus finmarchicus* (Crustacea). The Biological Bulletin, 2005, 209(1): 75-85.
- [51] 郭菲菲, 李慧明, 顾杨亮, 林秋奇, 韩博平. 大沙河水库浮游甲壳类动物群落特征. 生态科学, 2015, 34(5): 8-15.
- [52] 陈绵润, 赵帅营, 林秋奇, 韩博平. 广东省水库枝角类组成特征的初步研究. 湖泊科学, 2007, 19(1): 77-86.
- [53] 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.
- [54] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes. Hydrobiologia, 2000, 438(1/3): 1-12.
- [55] 陈光荣, 雷泽湘, 谭镇, 刘正文. 环境因子对广东城市湖泊后生浮游动物的影响. 水生态学杂志, 2010, 3(4): 28-32.