

白洋淀河湖系统轮虫群落结构时空动态及与环境因子的关系

付显婷¹, 杨薇¹, 苏梦², 罗义²

(1.北京师范大学环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;
2.河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000)

摘要:为了探究白洋淀河湖系统中轮虫群落结构时空动态及其与水环境因子的关系,2019 年春季(4 月)、夏季(6 月)和秋季(9 月),分别对白洋淀淀区及府河、孝义河和白沟引河 3 条入淀河流的轮虫群落及水环境因子开展采样调查。结果显示,调查期间共检出轮虫 30 种,隶属于 7 科、15 属,年均丰度为 $(1.43\pm 1.15)\times 10^3$ 个/L,年均生物量为 (0.67 ± 0.71) mg/L。Jaccard 群落相似性系数和 NMDS 综合分析表明,白洋淀河湖系统轮虫群落组成在季节和区域尺度上相似性均较低,针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、螺形龟甲轮虫无脊变种(*Keratella cochlearis tecta*)和异尾轮虫(*Trichocerca* sp.)是淀区和入淀河流的共同优势种,3 条入淀河流的优势种丰度占比均显著高于淀区。除孝义河外,淀区、府河和白沟引河轮虫群落的 Shannon-Wiener 和 Margalef 指数均存在显著的季节性差异,且均在夏季最高。生物多样性指数和轮虫营养状态指数(TSI_{ROT})表明,白洋淀河湖系统为中-富营养类型,处于中-重度污染状态;RDA 分析表明,营养物质总氮(TN)和总磷(TP)、透明度(SD)、溶解氧(DO)是影响白洋淀河湖系统轮虫群落结构的重要环境因子。

关键词:轮虫群落结构;时空动态;环境因子;白洋淀

中图分类号:Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)05-0124-12

轮虫是淡水生态系统浮游动物中的重要组成部分,其具有体型小、繁殖周期短、内禀增长率高等特点,是连接传统食物网和微型食物网的关键环节(Sharma, 2010);在湖泊、河流等水生生态系统物质循环和能量流动过程中发挥重要作用(Offem et al, 2009)。相较于甲壳动物,轮虫群落能更快地对环境变化作出响应,且每种轮虫具有特定生态位,对不同环境因子有一定的耐受范围和偏好,常被视为水体污染状况和营养状态等方面的敏感指示性生物(都雪等,2014)。掌握轮虫群落结构动态变化及其与环境因子关系,是了解水生生态系统结构功能和开展水生生态修复的关键。

国内外已有较多对淡水生态系统轮虫群落的研究(叶晓彤等,2020),其多侧重描述群落结构组成和优势种演替;也有学者研究生物多样性指数、轮虫生物指标如臂尾轮虫(*Brachionus*)和异尾轮虫(*Tri-*

chocerca)的种类比、龟甲轮虫(*Keratella valga*)指数等对水质的指示作用(Gopko & Telesh, 2013),阐释了水体理化性质对轮虫群落结构的影响(梁迪文等,2017)。刘存歧等(2010)调查了白洋淀轮虫群落结构,采用臂尾轮虫与异尾轮虫之比评价淀区营养状态;Ejsmont-Karabin(2012)提出了轮虫营养状态指数(TSI_{ROT})来指示水体营养状态,得到了许多学者的关注和实际应用。然而,上述研究多针对单一水体开展,缺乏针对河湖连通水体轮虫群落特征及评价研究。

白洋淀是我国华北平原最大的浅水草型湖泊,是支撑雄安新区蓝绿空间的重要水体,自 20 世纪 80 年代以来,人类活动日益加剧,水体富营养化日渐加重,上游 9 条入淀河流中,仅府河、孝义河和白沟引河常年有水,其余河流基本断流或季节性有水,白洋淀流域生态系统呈现退化趋势。本研究在对不同季节白洋淀淀区及 3 条主要入淀河流开展轮虫群落生态调查的基础上,分析了白洋淀河湖系统轮虫群落结构差异、优势种变化及轮虫生物指标,并采用多元统计方法分析河湖系统轮虫群落结构与水环境因子的关系,以期为深入研究白洋淀流域生态系统动态变化机制及雄安新区水生态环境修复等提供科学支撑。

收稿日期:2020-09-06
基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001);国家重点基础研发计划项目(2017YFC0404505)。
作者简介:付显婷,1995 年生,女,在读博士研究生,研究方向为湖沼生态水文。E-mail:201831180028@mail.bnu.edu.cn
通信作者:杨薇,女,副教授。E-mail:yangwei@bnu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 样点布设和采样时间

2019 年春季(4 月、平水期)、夏季(6 月、丰水期)和秋季(9 月、平水期)对白洋淀淀区及 3 条主要入淀河流(府河、孝义河和白沟引河)入淀口段开展

了轮虫群落采样调查和水环境指标监测,结合现场调查及前人研究(杨薇等,2019),在淀区布设 13 个典型采样点,包括烧车淀、杨庄子、枣林庄、光淀张庄、王家寨、寨南、鸳鸯岛、南刘庄、捞王淀、东田庄、采蒲台、圈头和端村;府河、孝义河和白沟引河入淀口段各布设 3 个采样点(图 1)。

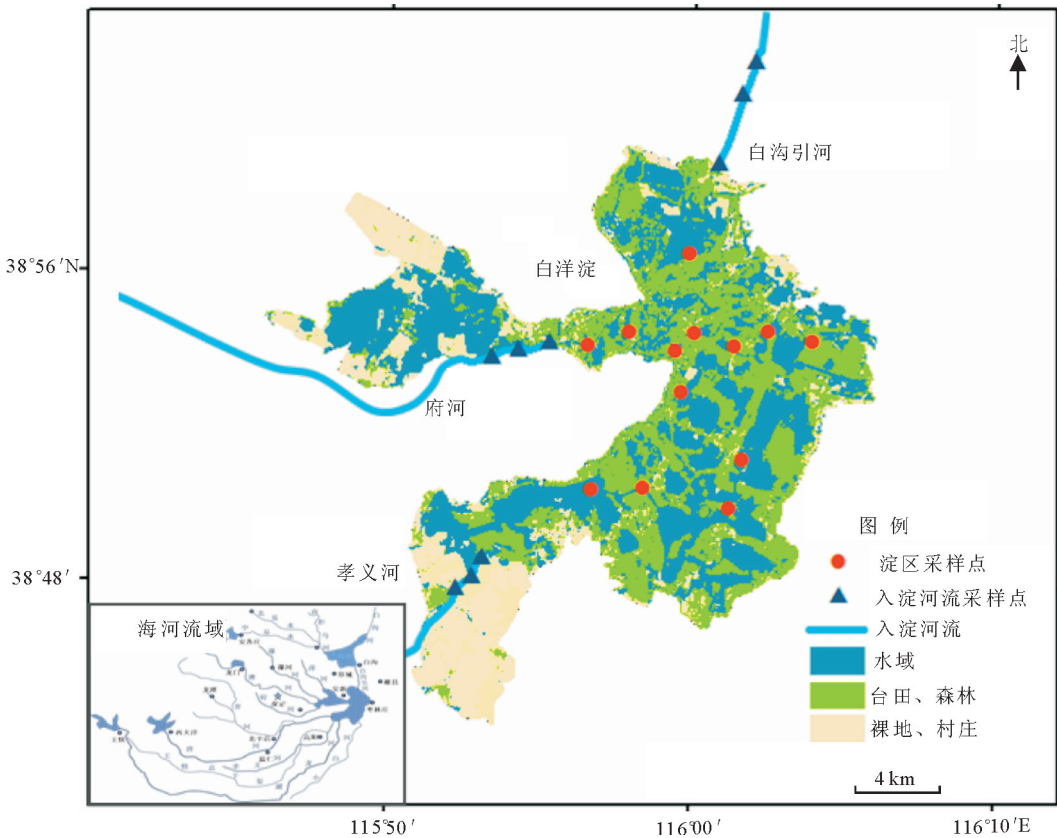


图 1 白洋淀及入淀河流采样点布设

Fig.1 Location of the sampling sites in the Baiyangdian Lake and its main tributaries

1.2 样品采集与分析

表层水(0.5 m 处)的 pH、溶解氧(DO)使用多参数水质分析仪(YSI6600)进行现场测定;水体透明度(SD)和水深(H)采用 Secchi Disk 透明度盘现场测定;3 条入淀河流入淀口段流速可忽略不计(约 0.001 m/s);对于其他指标,在各采样点表层(0.5 m 处)用 1 L 采水器采集水样 1 L,带回实验室低温保存(4℃)。其中,总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636 - 2012);总磷(TP)采用酸性钼酸铵分光光度法(GB 11893 - 89);氨氮(AN)采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535 - 2009);化学需氧量(COD_{Cr})采用重铬酸盐法(HJ 828 - 2017)。

轮虫定性样品采用孔径 20 μm 的浮游生物网在水体表层(0.5 m 处)作“∞”状拖动 5 min,将浓缩于网头的水样收集于 100 mL 聚乙烯瓶中,加入 4% 甲醛溶液现场固定保存。轮虫定量样品用采水器采

集混合水样 20 L,通过孔径 20 μm 浮游生物网,浓缩液收集至 100 mL 聚乙烯瓶中,加入 1% 鲁戈氏液固定,实验室静置 24 h 后,浓缩至 10 mL。每个样品重复 3 次。轮虫种类依据 Koste 分类系统(Koste, 1978)和《中国淡水轮虫志》(王家楫,1961)进行鉴定。将轮虫定量样品摇匀后取 1 mL 置于显微镜下计数框计数,每个样品计数 3 片取平均值(叶晓彤等,2020)。

1.3 相关生物指标计算

1.3.1 Jaccard 相似性系数 采用 Jaccard 群落相似性系数(S_J , Simpson, 1949)对两个不同季节采集到轮虫的相似程度进行分析,计算公式如下:

$$S_J = c / (a + b - c)$$
 (1)

式中: a , b 分别为两个不同季节轮虫物种数; c 为两季节共有轮虫物种数; S_J 为轮虫相似性指数, $0 \leq S_J < 0.25$ 时,为极不相似; $0.25 \leq S_J < 0.5$

时,为轻度相似; $0.5 \leq S_j < 0.75$ 时,为中等相似; $0.75 \leq S_j < 1$ 时,为极相似; $S_j = 1$ 时,为完全相似(Chao et al, 2005)。

1.3.2 优势度 采用优势度指数(Y)确定轮虫优势种(Mcnaughton, 1967),计算公式如下:

$$Y = (n_i / N) \times f_i \quad (2)$$

式中: n_i 为第 i 种轮虫的个体数; N 为样品中轮虫总个体数; f_i 为第 i 种轮虫在各采样点的出现频率, $Y \geq 0.02$ 的种类视为优势种。

1.3.3 多样性指数 采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H' , Shannon & Weaver, 1963)和 Margalef 丰富度指数(D , Margalef, 1951)评估轮虫群落多样性和水体污染等级,其公式分别为:

$$H' = -\sum P_i \cdot \ln P_i \quad (3)$$

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

式中: $P_i = n_i / N$, n_i 为样品中第 i 种轮虫个体数, N 为样品中所有轮虫总个体数; S 为样品中所有轮虫物种数。多样性指数评价分级标准包括 5 个等级:0~1 属重污染水体,1~2 为 α -中污染水体,2~3 为 β -中污染水体,3~4 为寡污水体,>4 为清洁水体(林青等,2014)。

1.3.4 轮虫营养状态指数 采用轮虫营养状态指数(TSI_{ROT})评估水体的营养状况(Ejsmont-Karabin, 2012),其计算公式为:

$$TSI_{ROT1} = 5.38 \ln(N) + 19.28 \quad (5)$$

$$TSI_{ROT2} = 5.63 \ln(B) + 64.47 \quad (6)$$

$$TSI_{ROT3} = 0.23BAC + 44.30 \quad (7)$$

$$TSI_{ROT4} = 0.187TECTA + 50.38 \quad (8)$$

$$TSI_{ROT5} = 3.85(B/N)^{-0.318} \quad (9)$$

$$TSI_{ROT6} = 0.203IHT + 40.0 \quad (10)$$

$$TSI_{ROT} = (TSI_{ROT1} + TSI_{ROT2} + TSI_{ROT3} + TSI_{ROT4} + TSI_{ROT5} + TSI_{ROT6}) / 6 \quad (11)$$

式中: N 为样品中轮虫总个体数; B 为样品中轮虫总生物量; BAC 为食菌者占轮虫总数百分比; $TECTA$ 为螺形龟甲轮虫无脊变种(*Keratella cochlearis tecta*) 在螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)中所占的比例; IHT 为指示高营养状态的物种占指示类群数量的比例。 $TSI_{ROT} < 35$, 湖泊为贫营养型,35~45 为中营养型,45~55 为中-富营养型,55~65 为富营养型, $TSI_{ROT} > 65$ 为超富营养型(Ejsmont-Karabin, 2012)。

1.4 数据统计与分析

使用 SPSS25.0 软件对白洋淀淀区及 3 条入淀河流各季节的水体理化因子和轮虫多样性指数进行

单因素方差分析(One-way ANOVA),判断其季节性差异。在 R 软件中基于 Bray-Curtis 距离进行非度量多维标度(Nometric Multidimensional Scaling, NMDS)和相似性分析(Analysis of Similarities, ANOSIM),确定白洋淀淀区和 3 条入淀河流间的轮虫群落结构相似性及显著性, $Stress < 0.2$ 时,排序结果比较理想, $Stress > 0.2$ 时,需考虑添加排序轴的数量。

通过 Canoco5 软件进行轮虫优势种和水环境因子的去趋势对应分析(DCA),在分析前需对轮虫物种数据及水环境数据进行 $\lg(x+1)$ 转换。根据分析结果,若 4 个轴中最大梯度长度小于 3,则使用冗余分析(RDA);超过 4 则使用典范对应分析(CCA),3~4 时两者均可。

2 结果与分析

2.1 白洋淀河湖系统轮虫群落结构

2.1.1 轮虫种类组成 白洋淀河湖系统春季、夏季和秋季 3 次采样调查所发现的轮虫名录见表 1。调查期间,共检测到轮虫 30 种,隶属于 7 科、15 属。淀区及 3 条入淀河流均检测到的轮虫仅 6 种,包括萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、螺形龟甲轮虫无脊变种(*Keratella cochlearis tecta*)、异尾轮虫(*Trichocerca* sp.)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)和曲腿龟甲轮虫(*Keratella valga*),占总种类数的 20%;其中,螺形龟甲轮虫无脊变种在所有水体的春季、夏季、秋季中均有出现。淀区共发现轮虫 23 种,占总种类数的 76.67%,春季、夏季、秋季分别检测到 12、18、20 种;府河共检测到轮虫 15 种,其中夏季有 12 种,春季和秋季均为 6 种;孝义河检测到的轮虫种类数最少,仅 14 种,其中夏季最高,为 12 种,春秋两季分别为 4 种和 8 种;白沟引河共检测到轮虫 18 种,仍是夏季最高,有 13 种,其次是秋季(9 种),春季最少,仅 5 种。

白洋淀淀区及 3 条入淀河流的轮虫群落种类组成存在明显的季节更替现象(表 2)。淀区季节间轮虫群落相似性系数 S_j 的变化范围为 0.52~0.73,为中等相似,其中夏、秋两季轮虫群落相似性最高,春、秋两季轮虫群落相似性最低;府河季节间轮虫群落相似性系数 S_j 的变化范围为 0.20~0.38,春、夏两季间和夏、秋两季间的轮虫群落均为轻度相似,春、秋两季轮虫群落为极不相似;孝义河季节间轮虫相似性系数 S_j 的变化与府河刚好相反,其春、秋两季

表 1 白洋淀河湖系统轮虫种类名录

Tab.1 Species composition of the rotifer community in Baiyangdian Lake and its main tributaries

种类	淀区			府河			孝义河			白沟引河		
	春	夏	秋	春	夏	秋	春	夏	秋	春	夏	秋
狭甲轮虫 <i>Colurella</i> sp.		+	+									
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	+	+	+					+			+	+
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	+	+	+		+	+		+				
大肚须足轮虫 <i>Euchlanis dilatata</i>				+							+	
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	+	+	+	+	+			+		+		
螺形龟甲轮虫无脊变种 <i>K. cochlearis tecta</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>	+											
鞍甲轮虫 <i>Lepadella</i> sp.			+									
腔轮虫 <i>Lecane</i> sp.			+				+	+	+	+	+	
尖趾腔轮虫 <i>L. closterocerca</i>			+									
晶囊轮虫 <i>Asplanchna</i> sp.	+	+	+			+						
异尾轮虫 <i>Trichicerca</i> sp.	+	+	+	+	+			+			+	+
对棘异尾轮虫 <i>T. stylata</i>	+	+	+					+	+		+	+
疣毛轮虫 <i>Synchaeta</i> sp.	+	+	+						+	+		
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	+	+	+	+	+							
角三肢轮虫 <i>F. cornuta</i>									+			
剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>		+	+		+						+	
裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>		+	+		+							+
浦达臂尾轮虫 <i>B. budapestiensis</i>		+			+			+				
方形臂尾轮虫 <i>B. quadridentatus</i>		+	+			+					+	
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>		+	+		+			+	+		+	+
囊形腔轮虫 <i>Lecane bulla</i>											+	
奥埃奥腔轮虫 <i>L. ohioensis</i>											+	
前翼轮虫 <i>Proales</i> sp.					+							
沟痕泡轮虫 <i>Pompholyx sulcata</i>		+						+				
须足轮虫 <i>Euchlanis</i> sp.			+									
圆筒异尾轮虫 <i>Trichocerca cylindrica</i>												+
盘镜轮虫 <i>Testudinella patina</i>												+

注:“+”表示该物种出现。

Notes: “+” denotes observed species.

表 2 不同季节间白洋淀河湖系统轮虫群落相似性系数

Tab.2 Seasonal Jaccard similarity index of the rotifer community in Baiyangdian Lake and its tributaries

季节	淀区			府河			孝义河			白沟引河		
	春	夏	秋	春	夏	秋	春	夏	秋	春	夏	秋
春	1	0.58	0.52	1	0.38	0.20	1	0.33	0.50	1	0.20	0.17
夏		1	0.73		1	0.29		1	0.43		1	0.38
秋			1			1			1			1

轮虫群落的相似性最高(0.50),为中等相似,春、夏两季轮虫群落的相似性最低(0.33),为轻度相似;白沟引河季节间轮虫相似性系数 S_J 在夏、秋两季最高(0.38),为轻度相似,春、夏两季间(0.20)和春、秋两季间(0.17)的轮虫群落均为极不相似。

2.1.2 轮虫丰度和生物量变化 白洋淀河湖系统轮虫年均丰度和生物量分别为 $(1.43 \pm 1.15) \times 10^3$ 个/L和 (0.67 ± 0.71) mg/L(图 2)。其中,淀区

轮虫丰度均值最高,为 $(1.71 \pm 1.16) \times 10^3$ 个/L;其次是白沟引河和孝义河,轮虫丰度均值分别为 $(1.35 \pm 1.34) \times 10^3$ 个/L 和 $(1.19 \pm 0.79) \times 10^3$ 个/L;府河的轮虫丰度均值最低,仅 $(0.54 \pm 0.77) \times 10^3$ 个/L。然而,轮虫平均生物量为孝义河>淀区>府河>白沟引河。从季节上看,淀区、府河和白沟引河的轮虫丰度和生物量,均在夏季达到最高;而孝义河的轮虫丰度和生物量则均在春季更高。

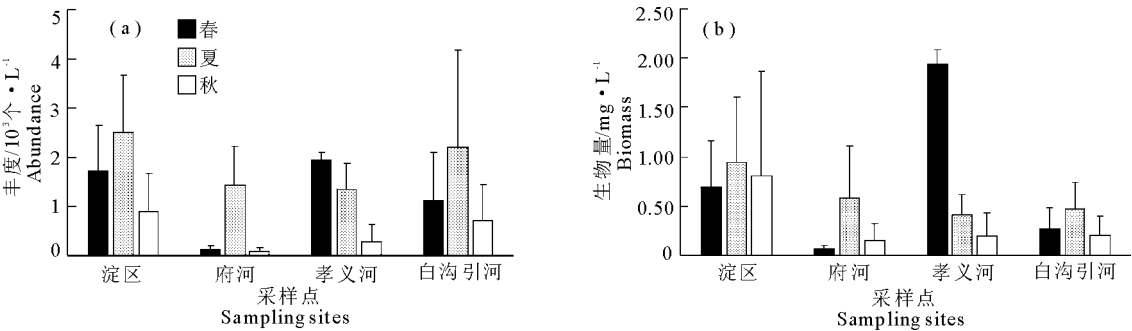


图2 白洋淀河湖系统轮虫平均丰度(a)和平均生物量(b)

Fig.2 Average abundance(a) and biomass(b) of rotifer community in Baiyangdian Lake and its tributaries

2.1.3 轮虫优势种及丰度占比差异 白洋淀淀区的轮虫优势种数略多于入淀河流,针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫无脊变种和异尾轮虫是4个水体共同的优势种,其分布存在明显的季节差异(图3)。春、夏、秋季,淀区轮虫的优势种分别为3、5、5种,春季轮虫优势种丰度占比最高(89.22%),其次是夏季(78.97%),秋季最低(74.49%);其中,针簇多肢轮虫是三季的共同优势种,其丰度占比以夏季最高(33.03%);螺形龟甲轮虫和螺形龟甲轮虫无脊变种是春秋两季的共同优势种。

府河轮虫优势种在春季、夏季、秋季分别为6、6、5种,轮虫优势种丰度占比依次为100%、85.92%、96.00%;其中,萼花臂尾轮虫在三季中始终为优势种,丰度占比在秋季(24.00%)明显高于春季(8.33%)和夏季(5.63%);异尾轮虫是春季和夏季的共同优势种,螺形龟甲轮虫无脊变种为春秋两

季的共同优势种。

孝义河轮虫优势种数在夏季最高(6种),秋季(4种)和春季(3种)较少,然而轮虫优势种丰度占比为春季>夏季>秋季,依次为99.48%、89.55%、86.21%;其中,针簇多肢轮虫在三季中始终为优势种,丰度占比最高值出现在秋季(53.45%);螺形龟甲轮虫无脊变种和萼花臂尾轮虫是春、秋两季的共同优势种。

白沟引河各季节的轮虫优势种数和孝义河一致,轮虫优势种丰度占比在春季最高(96.43%),夏季最低(89.09%);针簇多肢轮虫和螺形龟甲轮虫无脊变种是三季的共同优势种,裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*)和异尾轮虫在夏、秋两季中均为优势种。总体而言,白洋淀河湖系统的轮虫优势种数在夏季普遍更高,且春、夏、秋季3条入淀河流的轮虫优势种丰度占比均高于淀区。

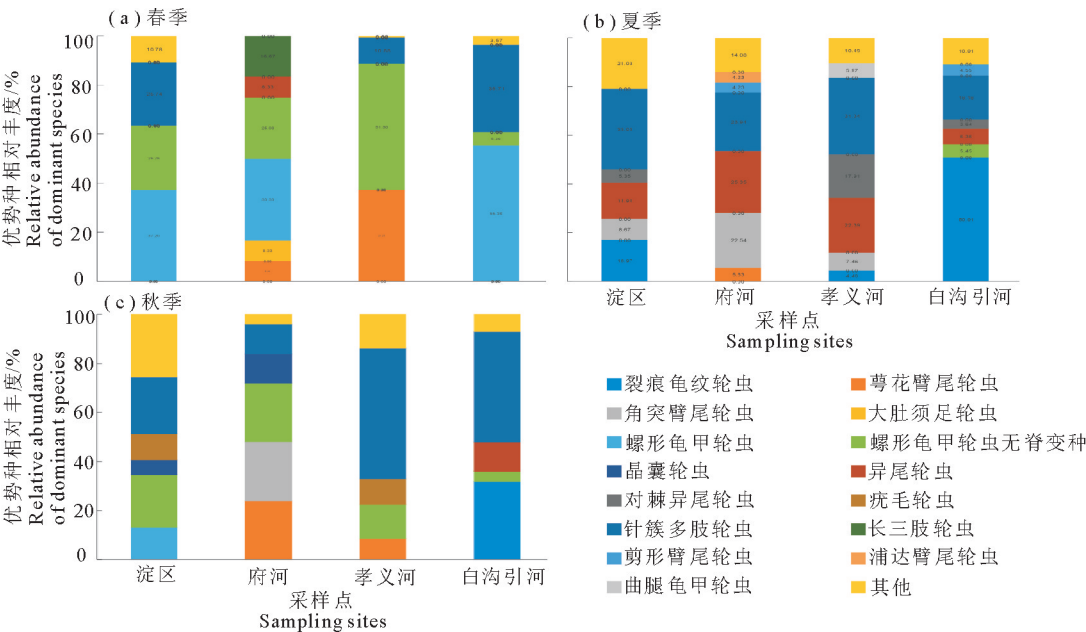


图3 白洋淀河湖系统轮虫优势种组成季节变化

Fig.3 Seasonal change of dominant rotifer species in Baiyangdian Lake and its tributaries

2.2 白洋淀河湖系统轮虫生物多样性指数变化

本次调查结果表明,白洋淀河湖系统的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Margalef 物种丰富度指数(D)变化范围分别为 0.54~2.21 和 0.21~1.51,淀区和 3 条入淀河流之间的 H' 和 D 差异均不显著($P>0.05$),淀区的年均 H' (1.49 ± 0.37) 和 D (0.83 ± 0.28) 最高;其次是府河, H' 和 D 分别为 (1.36 ± 0.38) 和 (0.70 ± 0.32);孝义河最低,分别为 (1.23 ± 0.43) 和 (0.59 ± 0.40)。

除孝义河外,淀区、府河和白沟引河的轮虫 H' 和 D 均在不同季节间差异显著($P<0.05$)。 H' 均在夏季达到最高,秋季次之,春季最低,且淀区和府

河各季节的 H' 均值均介于 1~2,表明其为 α -中污染状态;孝义河和白沟引河在春季处于重污染状态,夏季和秋季处于 α -中污染状态。除府河外,其它水体在夏季丰富度指数 D 值均出现最高值,秋季次之,春季最低,且均小于 1,可认为是重污染状态;府河的 D 值在夏季略高于 1,为 α -中污染状态,春季和秋季仍处于重污染状态。总体而言,白洋淀河湖系统处于 α -中污染至重污染水平。

轮虫营养状态指数 TSI_{ROT} 是评估浅水湖泊富营养状态的有效指标。结果显示,白洋淀河湖系统各季节 TSI_{ROT} 值大都在 45~55,表明其处于中-富营养状态。

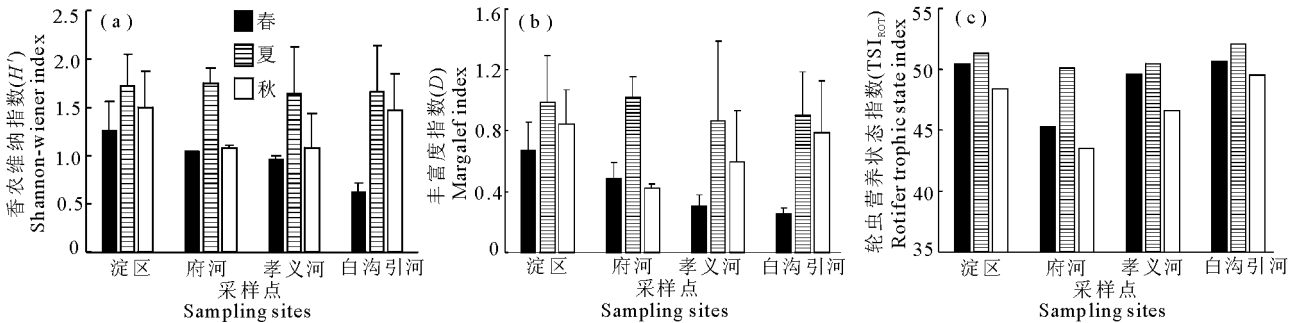


图 4 白洋淀河湖系统多样性指数及轮虫营养状态指数

Fig.4 Comparison among diversity indices and trophic state index of rotifer community in Baiyangdian Lake and its tributaries

2.3 白洋淀河湖系统轮虫优势种群落结构相似性

按全年和季节尺度分区域(淀区及 3 条入淀河流)对轮虫优势种群落数据进行非度量多维标度(NMDS)分析(图 5),除春季在二维空间上的应力值(Stress)小于 0.2 外,其它均大于 0.2,因此增加一维,即夏季、秋季及全年尺度均采用 3 轴后的 NMDS 分析,其应力值分别为 0.116、0.107 和 0.143,均达到较理想的排序水平。图中的点代表每个区域的点位,轮虫优势种所在位置距离某点位较近,表明该点位的这种轮虫优势种丰度可能较大。相似性(ANOSIM)分析表明,在全年及 3 个季节内,白洋淀淀区及 3 条入淀河流之间的轮虫群落组成均存在极显著差异($P<0.01$)。

通过前 2 轴排序图可以发现,春季 4 个区域分化较为明显,且 3 条入淀河流之间没有重叠,轮虫群落空间分布零散;淀区主要分布于 NMDS 图的中心,该类群中各样点间距离相对较近,且属于 3 条入淀河流之间的过渡类群,与这 3 条入淀河流之间均存在相同物种;其中,优势种疣毛轮虫(*Synchaeta* sp.)所在位置离白沟引河最近,优势种大肚须足轮虫(*Euchlanis dilalata*)、异尾轮虫、长三肢轮虫(*Filinia longiseta*)的丰度在府河较高,优势种萼花

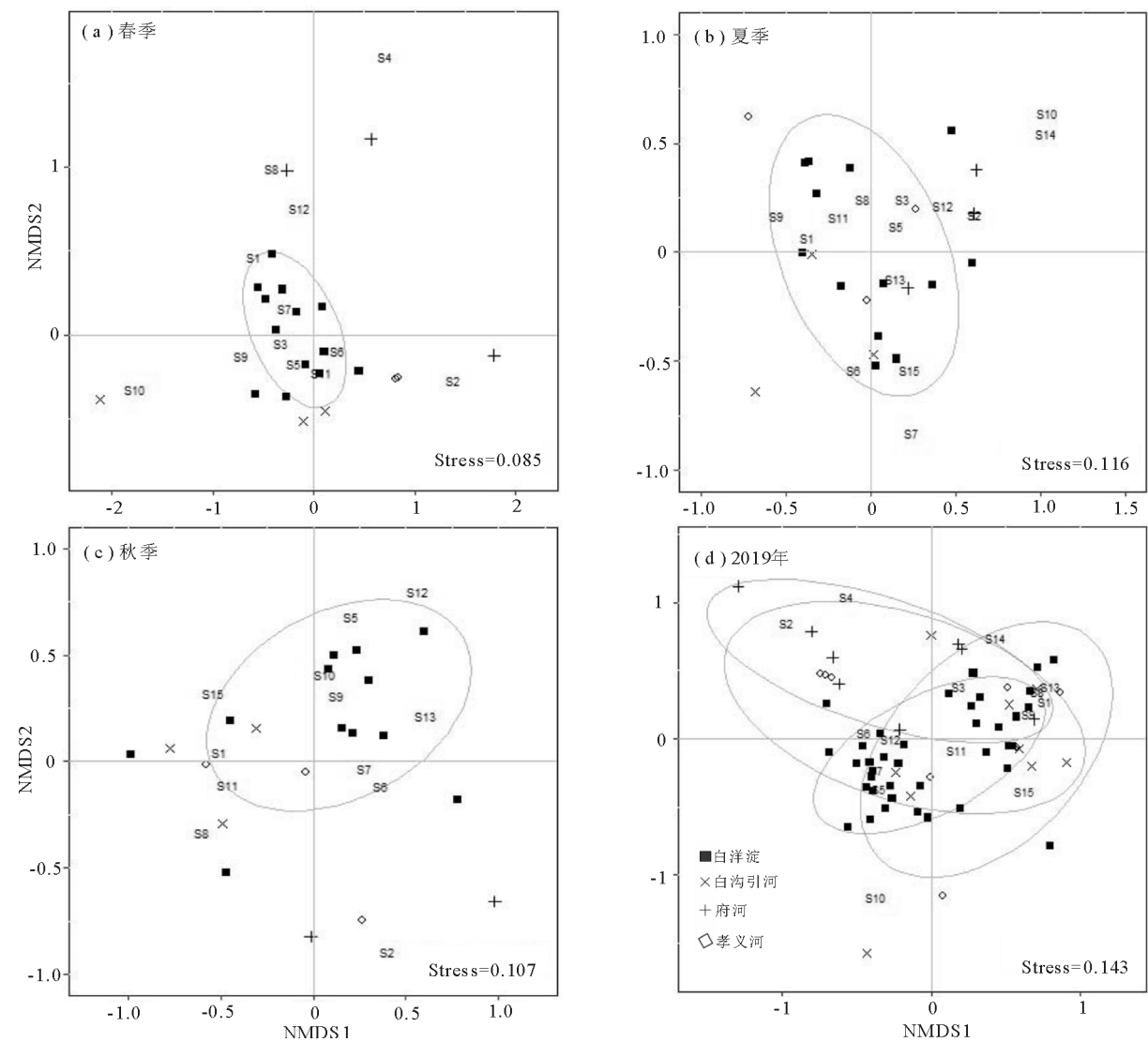
臂尾轮虫在府河和孝义河更高,其它优势种丰度均在淀区较高。夏季,3 条入淀河流均与淀区存在部分重叠,河流内空间分布零散。秋季,淀区主要分布在第 1 象限,3 条入淀河流样本存在交叉。在全年尺度上,淀区和白沟引河的点位均主要分布在第 1 和第 3 象限,府河和孝义河的点位均集中在第 1 和第 2 象限,样本之间存在一定的空间差异,说明白洋淀河湖系统的轮虫群落组成受到空间分布的影响。

2.4 轮虫优势种群落与环境因子的响应关系

2.4.1 白洋淀河湖系统理化环境特征 除 pH 值外,白洋淀淀区理化环境因子均存在显著季节差异($P<0.05$,图 6)。年均 pH 为(8.39 ± 0.30),水体呈弱碱性;淀区处水深范围为 1.28~4.20 m,透明度值较低,范围为 0.54~1.58 m。溶解氧浓度为 0.56~16.4 mg/L,白沟引河最高,均值为 (9.60 ± 3.17) mg/L;其次是淀区,为 (6.40 ± 3.38) mg/L。总氮均值高达 (3.00 ± 3.47) mg/L,府河最高,均值为 (3.91 ± 2.94) mg/L,且淀区、府河和孝义河的总氮浓度均在秋季最高,白沟引河总氮浓度则是春季更高;总磷含量为 0.01~0.25 mg/L,仍是府河最高,为 (0.08 ± 0.08) mg/L,同时,淀区、府河和白沟引河总磷污染最严重的季节均是秋季,孝义河总磷

污染夏季最高;氨氮含量均值为(0.25±0.24) mg/L,其在孝义河含量最高(0.38±0.43) mg/L;此外,淀区和孝义河的氨氮夏季达到最高,府河和白沟引河的最高氨氮均值分别出现在

秋季和春季;化学需氧量变化范围较广,为5.09~112.42 mg/L,白沟引河和孝义河的化学需氧量均值高于淀区和府河。



(S1:裂痕龟纹轮虫;S2:萼花臂尾轮虫;S3:角突臂尾轮虫;S4:大肚须足轮虫;S5:螺形龟甲轮虫;S6:螺形龟甲轮虫无脊变种;S7:晶囊轮虫;S8:异尾轮虫;S9:对棘异尾轮虫;S10:疣毛轮虫;S11:针簇多肢轮虫;S12:长三肢轮虫;S13:剪形臂尾轮虫;S14:浦达臂尾轮虫;S15:曲腿龟甲轮虫)

图5 白洋淀河湖系统轮虫优势种群落结构非度量多维标度

(S1: *Anuraeopsis fissa*; S2: *Brachionus calyciflorus*; S3: *Brachionus angularis*; S4: *Euchlanis dilalata*; S5: *Keratella cochlearis*; S6: *Keratella cochlearis tecta*; S7: *Asplanchna* sp.; S8: *Trichicerca* sp.; S9: *Trichocerca stylata*; S10: *Synchaeta* sp.; S11: *Polysarthra trigla*; S12: *Filinia longiseta*; S13: *Brachionus forficula*; S14: *Brachionus budapestiensis*; S15: *Keratella valgi*)

Fig.5 Ordination of nonmetric multidimensional scaling (NMDS) of dominant rotifer species in Baiyangdian Lake and tributaries

2.4.2 轮虫优势种群落与环境因子的冗余分析
白洋淀河湖系统主要优势轮虫群落和水环境因子的RDA分析结果显示,前两个排序轴共解释了轮虫群落结构总变异的35.06%,TN、TP、SD和DO是对白洋淀河湖系统轮虫优势种群落结构变化影响强度

较高的环境因子,AN、H与大多数轮虫优势种的相关性较强。驱动白洋淀河湖系统轮虫群落变化的主要环境因子存在季节和空间差异。春季,淀区和白沟引河轮虫群落主要受SD、pH和COD的影响,呈正相关,府河和孝义河轮虫群落均受TP和TN的

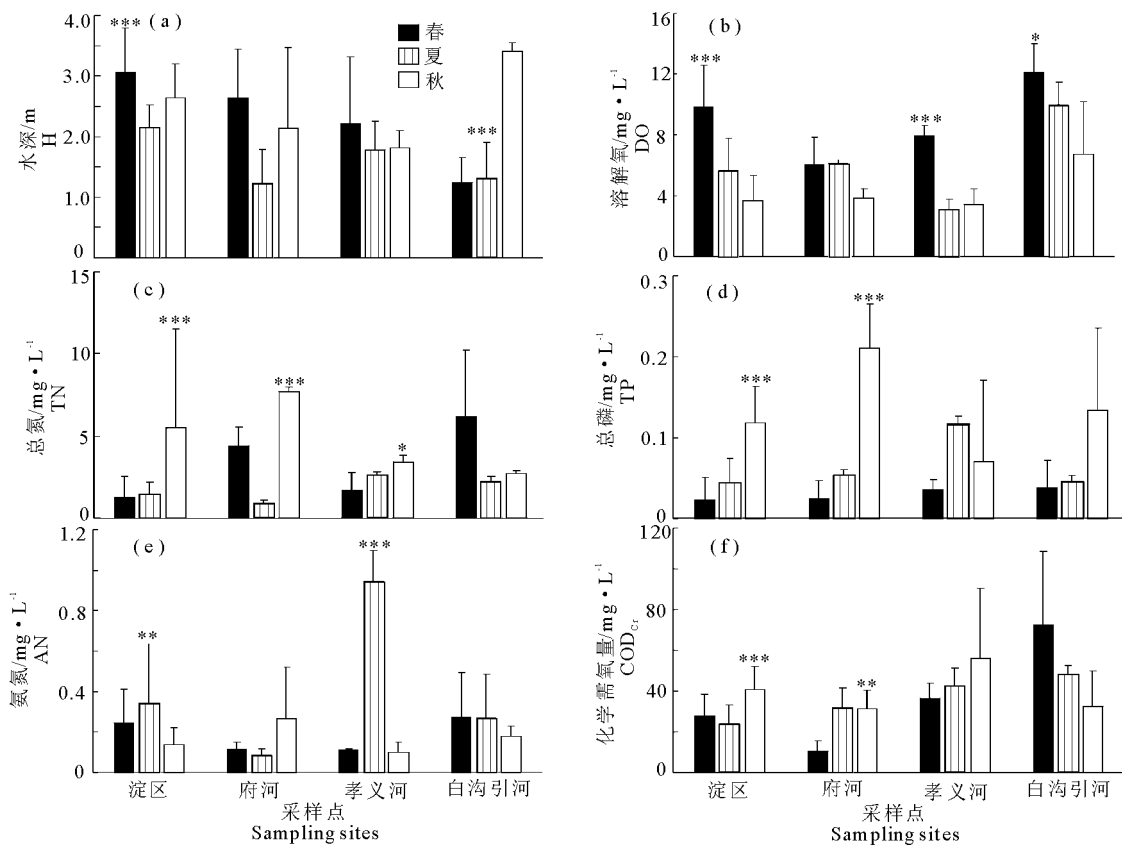


图 6 白洋淀河湖系统理化因子
(* $P<0.1$, ** $P<0.05$, *** $P<0.01$)

Fig.6 Physicochemical parameters of water body in Baiyangdian Lake and its tributaries

影响;夏季,淀区轮虫群落与 AN 呈正相关,与 TN、TP 呈负相关,3 条入淀河流轮虫群落均分布在第三象限,与 AN 呈正相关,与 H 呈负相关;秋季,淀区轮虫群落受 H 和 AN 影响,白沟引河与 SD、H 呈负相关,而与 TP、AN 呈正相关,孝义河和府河轮虫群落均与 TP 呈正相关,与 DO 呈负相关。

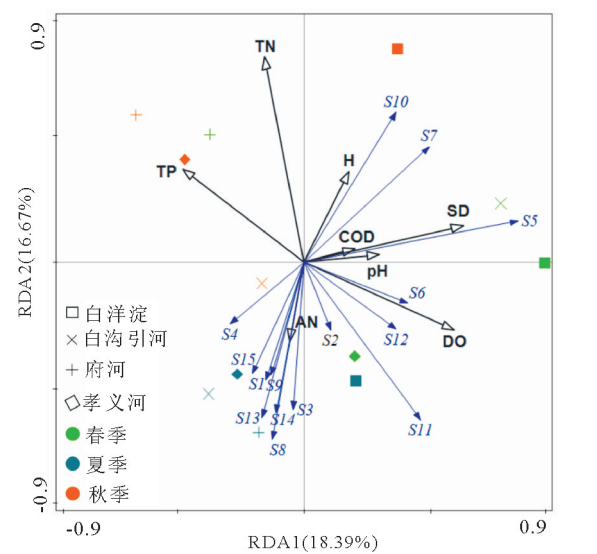
对于 4 个水体的共同优势种针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫无脊变种和异尾轮虫,它们在排序图中的位置比较近,其生态适应性存在一定的相似性。其中,针簇多肢轮虫受多种环境因子影响,与 DO、AN 呈正相关,与 TN、TP 呈负相关;螺形龟甲轮虫无脊变种与 DO、SD 呈正相关,与 TN、TP 呈负相关;对于异尾轮虫,AN 和 H 均是重要的影响因子,其可生存在 AN 浓度较高和 H 较浅的环境下。裂痕龟纹轮虫、萼花臂尾轮虫和螺形龟甲轮虫也是白洋淀河湖系统中重要的优势种,其中,裂痕龟纹轮虫与 AN 密切正相关,与 H、TN 负相关;萼花臂尾轮虫主要与 AN、DO 正相关,与 TN、TP 呈负相关;螺形龟甲轮虫主要受 SD、pH 和 COD 的影响,呈正相关。

3 讨论

3.1 水文波动是白洋淀轮虫减少的主要影响因子

本研究调查结果显示,白洋淀淀区轮虫丰度均值为 $(1.71 \pm 1.16) \times 10^3$ 个/L,最高值达 5.04×10^3 个/L,与梁迪文等(2017)对其他富营养型湖泊的研究结果相近。白洋淀河湖系统轮虫丰度季节变化明显,表现为夏季最高,春、秋季较低,可能以下几方面原因:(1)夏季水温较高,轮虫群落孵化和繁殖发育时间缩短,种群周转速率加快,形成丰度高峰;(2)夏季是蓝藻暴发时期,蓝藻死亡后繁殖的大量细菌是轮虫群落的重要食物来源;(3)夏季降雨量较多,冲刷的大量有机碎屑和营养物质通过入淀河流进入湖泊,有利于浮游藻类、细菌和原生动物的生长繁殖,进而为轮虫提供丰富的食物;(4)夏季白洋淀上游其他入淀河流(如唐河等)有水入淀,对白洋淀河湖系统轮虫丰度产生贡献。

多项研究表明,近 60 多年来白洋淀轮虫物种数总体呈不断降低的趋势(高芬,2008;杨盈,2011)。1958 年调查发现白洋淀轮虫 60 种,20 世纪 70 年代



(S1: 裂痕龟纹轮虫; S2: 萼花臂尾轮虫; S3: 角突臂尾轮虫; S4: 大肚须足轮虫; S5: 螺形龟甲轮虫; S6: 螺形龟甲轮虫无脊变种; S7: 晶囊轮虫; S8: 异尾轮虫; S9: 对棘异尾轮虫; S10: 疣毛轮虫; S11: 针簇多肢轮虫; S12: 长三肢轮虫; S13: 剪形臂尾轮虫; S14: 浦达臂尾轮虫; S15: 曲腿龟甲轮虫)

图7 白洋淀河湖系统轮虫优势种丰度和环境因子的 RDA 分析排序

(S1: *Anuraeopsis fissa*; S2: *Brachionus calyciflorus*; S3: *Brachionus angularis*; S4: *Euchlanis dilatata*; S5: *Keratella cochlearis*; S6: *Keratella cochlearis tecta*; S7: *Asplanchna* sp.; S8: *Trichocerca* sp.; S9: *Trichocerca stylata*; S10: *Synchaeta* sp.; S11: *Polyarthra trigla*; S12: *Filinia longiseta*; S13: *Brachionus forficula*; S14: *Brachionus budapestiensis*; S15: *Keratella valga*)

Fig.7 Redundancy analysis of rotifer dominant species and environmental factors among seasons and waters

初的干淀后,1975 年和 1980 年调查显示轮虫分别为 49 种和 26 种,1989 年白洋淀重新蓄水,河北大学生物系调查共发现轮虫 123 种,而 1993 年和 1996 年调查显示轮虫分别降低为 22 种和 26 种,刘存歧等(2010)于 2005 - 2006 年对白洋淀的 8 次调查显示,轮虫有 110 种,但 2007 年和 2009 年在白洋淀仅分别鉴定出轮虫 41 和 22 种(李凤超等,2011)。在本次三季调查中,白洋淀淀区共检出轮虫 23 种,同时,轮虫群落组成较重新蓄水历史年份(1989 年)也发生极大变化,有 109 种本次调查未发现,新发现 9 种,且长足轮虫、鬼轮属、单趾轮虫属等白洋淀历史年份存在的轮虫优势种消失,部分轮虫物种成为绝对优势种,采样点布设差异可能是原因之一,即本研究所获定性和定量轮虫样品均来自湖泊敞水带,难以获得较多的底栖性轮虫种类;此外,近年来白洋淀历经干涸、蓄水等水文波动过程,淀区沉水植物覆盖率下降及水体富营养化程度加剧,这些也是造成

轮虫物种数大幅降低,优势种类减少的主要原因(张敏等,2016)。

本研究中,白洋淀河湖系统轮虫优势种主要为臂尾轮属、异尾轮属、多肢轮属和龟甲轮属等。其中,针簇多肢轮虫和长三肢轮虫均具有较长的身体附属结构,在水中移动速度较快,有利于其捕食和逃避敌害,环境耐受性较强,是广布种;具备坚硬背甲的臂尾轮属轮虫及小个体轮虫如异尾轮虫和腔轮虫(*Lecane* sp.)等都可以有效地减少被捕食的概率(Brandl, 2005; Sarma & Nandini, 2007)。螺形龟甲轮虫是广布性种类,对水体富营养化具有较好的适应能力,在我国的洞庭湖(叶晓彤等,2020)和太湖(温超男等,2020)中也被发现是优势种。

3.2 轮虫指数表明白洋淀水环境为中-富营养状态

白洋淀具有复杂的淀中村分布格局,受人类活动影响频繁,生活及农业污水排放导致白洋淀淀区水体污染及富营养化严重。此外,自 20 世纪 60 年代以来,保定市工业迅速发展,工业废水和生活污水通过府河排入白洋淀,府河汛期入淀水体中,总磷和氨氮含量均劣于国家地表水环境劣 V 类,属重度污染,且孝义河和白沟引河入淀水体也存在富营养化问题。较多研究认为,多样性指数可定量反映轮虫群落结构变化的信息及评估水体污染状态,数值越大表示轮虫群落结构越复杂,水质越好(Mäemets, 1983)。本研究调查结果显示,白洋淀淀区和 3 条入淀河流的年均轮虫 Shannon-Wiener 指数和 Marglef 指数均小于 2,远低于国内其它湖泊或河流的多样性指数值(王晓萌等,2015),这可能是由于白洋淀河湖系统存在的优势种属(如臂尾轮虫属、龟甲轮虫属和异尾轮虫属等)可通过排斥其它种类进一步占据剩余的生态位,其相对丰度占比远高于其它轮虫种类(图 3),导致整个河湖系统的轮虫群落多样性指数值较低(钱方平等,2007)。孙悦等(2020)研究表明,冬季冰封期白洋淀河湖系统水体污染严重。本研究中,轮虫多样性指数表明春、夏、秋三季白洋淀河湖系统亦处于 α -中污染至重污染水平。

李娜等(2020)采用基于水质理化因子的综合营养状态指数(TLI_Σ)评价表明,白洋淀淀区处于富营养状态。湖泊营养状态的变化会导致轮虫群落发生多方面的演变,如丰度、生物量、小型食菌轮虫比例和高营养指示物种比例等。本研究采用的综合上述生物变化的轮虫营养状态指数(TSI_{ROT})评价结果显示,白洋淀河湖系统整体处于中-富营养状态,与上述理化因子的评价结果有较好的一致性。

3.3 白洋淀轮虫群落结构与水环境因子的关系

本研究中,Jaccard 群落相似性系数和 NMDS 群落相似性分析结果均表明,白洋淀河湖系统的轮虫群落结构具有明显的季节和空间差异。RDA 排序图很好地解释了轮虫群落结构与环境因子之间的关系,也反映出不同轮虫物种之间的生态位分化。

轮虫在水体中能否生存很大程度上取决于多种环境因子。冗余分析显示,白洋淀河湖系统轮虫群落结构变化整体上由 TN、TP、SD 和 DO 所主导,H、AN 与大部分轮虫优势种相关性较强。白洋淀河湖系统的主要轮虫优势种,如针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫无脊变种、螺形龟甲轮虫、异尾轮虫、裂痕龟纹轮虫、萼花臂尾轮虫等,一般认为存在于富营养水体中,在本研究中,它们均与 TN、TP 呈负相关,与相关研究结果一致(高原等,2014;温超男等,2020)。有研究表明,被认为是寡营养型指示种的轮虫种类,在中营养和富营养水体中都有分布,而被认为是富营养型指示种的轮虫种类同样在寡营养水体中也有分布(DeManuel & Armengol, 1993; Duggan et al, 2001);如螺形龟甲轮虫在广东省寡营养型水库中是绝对的优势种(林秋奇等,2005)。王晓辉等(2009)也认为,在富营养水体中,有寡营养水体指示种(如卵形无柄轮虫)成为其优势种。因此,不能简单地将水体轮虫组成与已发表的各种轮虫指示种类进行比较来判定水体营养水平及其相关性,而应从整个群落结构特征综合考虑。

许多研究表明,SD、DO 和 COD 是连通水系轮虫群落结构变化重要的影响因子(叶晓彤等,2020)。近年来白洋淀多次进行引水工程,水力滞留时间相对较短,因此白洋淀河湖系统轮虫群落结构及其与环境因子的关系和其它河湖系统的研究结果存在一定的差异。本研究结果显示,大部分轮虫优势种均与 SD 呈负相关,与饶利华等(2013)对杭州西湖的研究结果一致;水温升高导致蓝藻水华暴发,增加了水体有机物的呼吸作用,同时死亡藻类的分解进一步降低了水体中溶解氧,进而影响轮虫群落结构(李娜等,2020);淡水水体中 COD 含量在影响浮游植物群落的同时,也会对轮虫群落结构产生一定影响,这种影响作用通常是间接的(左其亭等,2017)。

综上所述,多项生态修复措施(如生态补水、污水截流、水生植被恢复等)均有利于促进轮虫群落环境条件如水位、富营养化和沉水植物覆盖度等的改善。通过揭示轮虫群落结构与环境因子的关系,可为白洋淀河湖系统的整体恢复提供科学理论支撑。

参考文献

- 都雪,王齐东,张超文,等,2014. 洪泽湖轮虫群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 26(2): 269-276.
- 高芬,2008. 白洋淀生态环境演变及预测[D]. 保定:河北农业大学.
- 高原,李新辉,赖子尼,等,2014. 珠江三角洲河网浮游轮虫的群落结构[J]. 应用生态学报, 25(7):2114-2122.
- 李凤超,赵玉娟,张强,等,2011. 白洋淀轮虫多样性及群落结构的初步研究[J]. 四川生物, 30(5):734-736.
- 李娜,周绪申,孙博闻,等,2020. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 32(3): 772-783.
- 梁迪文,王庆,魏南,等,2017. 广州市不同类型水体轮虫群落结构的时空变动及与理化因子间的关系[J]. 湖泊科学, 26(2): 269-276.
- 林青,由文辉,徐凤洁,等,2014. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 34(23):6918-6929.
- 林秋奇,赵帅营,韩博平,2005. 广东省水库轮虫分布特征[J]. 生态学报, 25(5):1123-1131.
- 刘存歧,邢晓光,王军霞,等,2010. 白洋淀轮虫群落结构特征[J]. 生态学报, 30(18): 4948-4959.
- 钱方平,席贻龙,温新利,等,2007. 湖泊富营养化对轮虫群落结构及物种多样性的影响[J]. 生物多样性, 15(4): 344-355.
- 饶利华,吴芝瑛,徐骏,等,2013. 杭州西湖轮虫的群落结构及与水体环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 25(1): 138-146.
- 孙悦,李再兴,张艺冉,等,2020. 雄安新区-白洋淀冰封期水体污染特征及水质评价[J]. 湖泊科学, 4(1): 952-963.
- 王家楫,1961.中国淡水轮虫志[M]. 北京:科学出版社.
- 王晓辉,望甜,林秋奇,等,2009. 南亚热带富营养化抽水型水库轮虫的组成与动态[J]. 湖泊科学, 21(1):101-109.
- 王晓萌,易齐涛,徐鑫,等,2015. 淮南采煤沉陷区小型塌陷湖泊轮虫群落结构特征[J]. 湖泊科学, 27(4): 657-666.
- 温超男,黄蔚,陈开宁,等,2020. 太湖滨岸带浮游动物群落结构特征与环境因子的典范对应分析[J]. 水生态学杂志, 41(2):36-44.
- 杨薇,田艺苑,张兆衡,等,2019. 近 60 年来白洋淀浮游植物群落演变及生物完整性评价[J]. 环境生态学, 1(8): 1-9.
- 杨盈,2011. 基于食物网营养动力学的白洋淀湿地生态蓄水研究[D]. 北京:北京师范大学.
- 叶晓彤,梁迪文,王庆,等,2020. 洞庭湖流域常德柳叶湖及其邻近水体轮虫群落结构变化及其对环境因子的响

- 应[J]. 湖泊科学, 32(4): 1126 - 1139.
- 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 等, 2016. 近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 15(1): 4780 - 4791.
- 左其亭, 陈豪, 张永勇, 等, 2017. 淮河中上游轮虫群落结构分析及水质评价[J]. 环境工程学报, 11(1): 165 - 173.
- Brandl Z, 2005. Freshwater copepods and rotifers: predators and their prey[J]. Hydrobiologia, 546(1): 475 - 489.
- Chao A, Chazdon R L, Colwell R K et al, 2005. A new statistical approach for assessing similarity of species composition with incidence and abundance data[J]. Ecology Letters, 8(2): 148 - 159.
- DeManuel J, Armengol J, 1993. Rotifer assemblages: a contribution to the typology of Spanish reservoirs [J]. Hydrobiologia, 255 / 256(1): 421 - 428.
- Duggan C, Green J D, Shiel R J, 2001. Distribution of rotifers in North Island, New Zealand, and their potential use as bioindicators of lake trophic state[J]. Hydrobiologia, 446/447(1): 155 - 164.
- Ejsmont-Karabin J, 2012. The usefulness of zooplankton as lake ecosystem indicators: Rotifer trophic state index [J]. Polish Journal of Ecology, 60(2): 339 - 350.
- Gopko M, Telesh I V, 2013. Estuarine trophic state assessment: New plankton index based on morphology of Keratella rotifers[J]. Estuarine Coastal & Shelfence, 130(3): 222 - 230.
- Koste W, 1978. Rotatoria[M]. Berlin: Gebrüder Borntraege.
- Mäemets A, 1983. Rotifers as indicators of lake types in Estonia[J]. Hydrobiologia, 104(1): 357 - 361.
- Margalef R, 1951. Diversidad de especies en las comunidades naturales[J]. Publicacions del Institute de Biologia Aplicada, 9(5): 5 - 27.
- Mcnaughton S J, 1967. Relationship among functional prosperities of California grassland[J]. Nature, 216: 168 - 169.
- Offem B O, Samsons Y A, Omoniyi I T, et al, 2009. Dynamics of the limnological features and diversity of zooplankton populations of the Cross River System SE Nigeria[J]. Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems, 32: 115 - 118.
- Sarma S S S, Nandini S, 2007. Small prey size offers immunity to predation: a case study on two species of Asplanchna and three brachionid prey (Rotifera) [J]. Hydrobiologia, 593(1): 67 - 76.
- Shannon C E, Weaver W, 1963. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press.
- Sharma B K, 2010. Rotifer communities of Deepor Beel, Assam, India: richness, abundance, and ecology[J]. Journal of Threatened Taxa, 2(8): 1077 - 1086.
- Simpson E H, 1949. Measurement of diversity[J]. Nature, 163: 688 - 688.

(责任编辑 万月华)

Temporal and Spatial Dynamics of the Rotifer Community and Relationship to Environmental Factors in Baiyangdian Lake and Primary Tributaries

FU Xian-ting¹, YANG Wei¹, SU Meng², LUO Yi²

(1.State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875,P.R.China;
2.Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000,P.R.China)

Abstract: Baiyangdian Lake is the largest shallow macrophytic lake on the North China Plain. Since the 1980s, the ecosystem of the Baiyangdian Lake basin has been declining because of the influence of human activities and eutrophication is increasing. In this study, we analyzed the spatiotemporal characteristics, dominant species dynamics and biological indicators of the rotifer community in Baiyangdian Lake and its three main tributaries (Fuhe, Xiaoyi and Baigouyin Rivers), and explored the relationships among rotifers and environmental factors. The objective was to study ecosystem dynamics in the Baiyangdian River basin to support restoration of the aquatic environment of Xiong'an New District. Rotifers were sampled and environmental factors were monitored in the spring, summer and autumn in 2019. A total of 30 rotifer species were collected during the three seasons, belonging to 15 genera and 7 families. The abundance and biomass of rotifer community were $(1.43\pm1.15)\times10^3$ ind./L and (0.67 ± 0.71) mg/L. The Jaccard similarity index of rotifers and non-metric multidimensional scaling (NMDS) analysis showed that the composition of the rotifer community displayed low spatial and seasonal similarity in the study area. *Polyarthra trigla*, *Keratella cochlearis tecta* and *Trichicerca* sp. were the dominant species both in the Baiyangdian Lake and the three tributaries. Further, the relative abundance of dominant species in the tributaries was higher than in Baiyangdian Lake. The Shannon-Wiener index and Margalef index showed seasonal variation in all tributaries and the lake, with the highest values all in summer, except for Xiaoyi River. The diversity indices and trophic state index (TSI_{ROT}) both indicated medium-heavy pollution and medium-eutrophic status at all sites. Redundancy analysis showed that nutrients (total nitrogen and total phosphorus), transparency and dissolved oxygen were the most four important environmental variables for explaining rotifer community dynamics in Baiyangdian Lake and primary tributaries.

Key words: rotifer community structure; spatiotemporal dynamics; water environmental factors; Baiyangdian Lake