

基于枝角类和桡足类多样性的白洋淀水环境监测与评价

孙泉琼, 崔铁峰, 李子竹, 王宏伟, 肖国华

Evaluation and monitoring of the water environment based on the diversity of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

SUN Xiaoqiong, CUI Tiefeng, LI Zizhu, WANG Hongwei, XIAO Guohua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20200403022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生态悬床技术对白洋淀水环境修复效果的研究

Effect of ecological suspended bed measures on water environment restoration in Baiyangdian Lake

渔业现代化. 2020, 47(6): 42 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9580.2020.06.007>

白洋淀水系结构连通性评价

Structural Connectivity Evaluation of the Baiyangdian Lake Water System

水生态学杂志. 2020, 41(5): 63 <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.2020.05.008>

白洋淀流域宽鳍遗传多样性及种群历史动态

Genetic diversity and population historical dynamics of *Zacco platypus* in Baiyangdian Basin

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 837 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200903178>

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

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

水生态学杂志. 2020, 41(5): 124 <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.2020.05.015>

基于信息化水环境监测的养殖水体调控技术

The aquaculture water control technology based on informationized monitoring technology of water environment

渔业现代化. 2015, 42(6): 31 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9580.2015.06.007>

基于InSAR的白洋淀湿地潜在水力阻碍物分布格局

Visualizing Potential Hydraulic Barriers in Baiyangdian Wetland Using InSAR

水生态学杂志. 2020, 41(5): 70 <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.2020.05.009>

文章编号: 1674-5566(2021)06-1013-11

DOI:10.12024/jsou.20200403022

基于枝角类和桡足类多样性的白洋淀水环境监测与评价

孙泉琼^{1,2}, 崔铁峰^{1,2}, 李子竹^{1,2}, 王宏伟^{1,2}, 肖国华³

(1. 河北大学 生命科学学院, 河北 保定 071002; 2. 河北大学 生命科学与绿色发展研究院, 河北 保定 071002; 3. 河北省海洋与水产科学研究院 河北省海洋渔业生态环境监测站, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 雄安新区的建立促使白洋淀水环境及生物资源监测与保护尤为重要。为研究白洋淀枝角类和桡足类群落结构时空变化特征及与水环境因子的相互关系, 运用典型相关分析 (canonical correlation analysis, CCA) 对 2019 年春季、夏季、秋季所测定的白洋淀枝角类和桡足类丰度、多样性指数及水环境因子进行多元统计分析。基于 DNA 条形码技术鉴定出白洋淀枝角类和桡足类共 8 科 17 属 26 种, 全年分布的优势种有筒弧象鼻溞 (*Bosmina coregoni*)、透明温剑水蚤 (*Thermocyclops hualinus*) 和胸饰外剑水蚤 (*Ectocyclops phaleratus*)。丰度和生物多样性指数特征存在时空差异, 主要表现为区域性分布变化大于季节性变化, 且在空间上均表现为南部区域大于北部区域。枝角类和桡足类与水环境相关性结果表明, 温度 (T)、透明度 (TMD)、营养盐等通过影响枝角类和桡足类生长发育、摄食、繁殖等活动来调节其丰度及群落组成结构特征, 而 S、Pb、Zn 为关键影响因子, 对枝角类和桡足类丰度呈显著负相关。对白洋淀进行长期的物种研究和生态环境监测及保护, 可以为水利工程实施和雄安新区建设提供参考, 实现资源可持续利用和发展。

关键词: 白洋淀; 枝角类; 桡足类; 群落组成结构; 环境相关性分析

中图分类号: X 52 **文献标志码:** A

白洋淀生态系统在社会生活生产和生物保护等多方面发挥着重要作用。浮游动物的群落组成结构以及地域性分布能够及时地反映环境的变化。国内外研究浮游动物多集中于群落结构时空变化, 并反映水环境状况, 同时应用到指示湖泊和河流水质状况及健康状况评价^[1]。枝角类和桡足类体型微小, 采集时易残缺, 导致调查出现误差, 故本研究将传统的形态学鉴定和 DNA 条形码技术相结合, 提高鉴定准确率^[2-3], 通过监测枝角类和桡足类丰度、生物多样性等指标及其与水环境因子的相关性来分析白洋淀枝角类和桡足类时空分布, 旨在为白洋淀水环境监测及生物资源保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样区域、时间与方法

2019 年春季 (5 月)、夏季 (8 月) 和秋季 (10

月) 对白洋淀 (115°28' ~ 116°42' E, 38°28' ~ 38°34' N) 进行 3 次综合调查, 根据上下游河流及淀区实地情况共设置 30 个采样位点, 如图 1 所示。

使用 13 号浮游生物网 (网格约 0.112 mm) 对浮游动物 (例如枝角类和桡足类) 进行定性样本采集, 在表层拖曳 1 ~ 3 min 然后采集, 打开阀门, 将样品倒入样品瓶中。将水过滤后, 将钢头中的水 (约 10 mL) 倒入约 50 mL 的样品瓶中, 加入过滤后的淀区水以稀释生物密度。枝角类和桡足类定量样品用 25 号浮游生物网 (孔径 0.064 mm) 过滤 20 L 混合水样, 定量至 50 mL 加入 25 mL 的 75% 乙醇固定保存带回实验室计数。现场使用水质分析仪测定水温 (WT)、溶解氧 (DO)、叶绿素 a (*Chl. a*) 等指标。采 1 L 水带回实验室 4 °C 保存测定总磷 (TP)、总氮 (TN) 等环境参数, 所有操作步骤均严格按照《湖泊调查技术规程》进行。浮游动物种类鉴定参照《中国动物志淡水桡

收稿日期: 2020-04-03 修回日期: 2020-08-26

基金项目: 教育部留学回国基金 (201808130270); 河北省自然科学基金 (C2019201390); 白洋淀水生生物资源环境调查与水域生态修复 (2130135); 河北大学实验创新项目 (sy202091)

作者简介: 孙泉琼 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水生生物环境监测与保护。E-mail: 919359761@qq.com

通信作者: 王宏伟, E-mail: wanghw6688@gmail.com

足类》和《中国动物志淡水枝角类》。

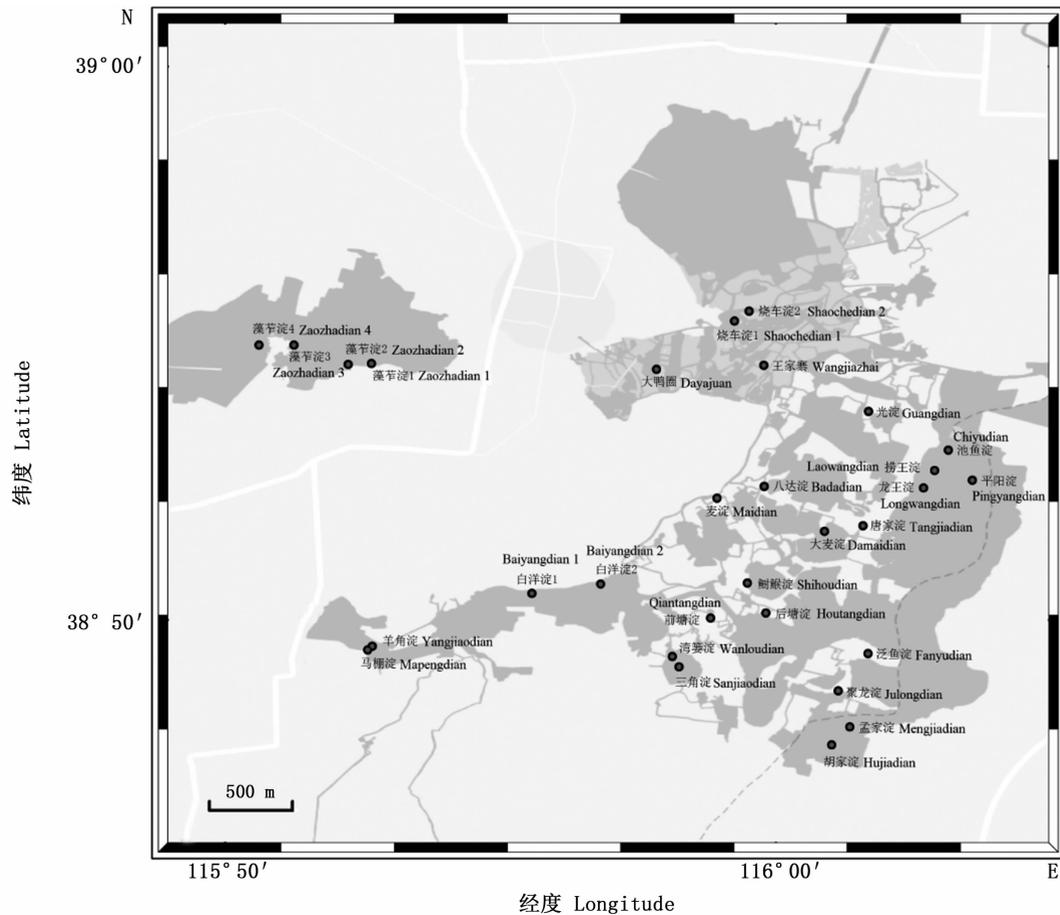


图 1 采样点站位

Fig. 1 Sampling sites in Baiyangdian Lake

1.2 DNA 条形码技术

用微量样品基因组 DNA 试剂盒 (DP316) 提取样本中枝角类和桡足类 DNA, 扩增其 *CO I* 基因。*CO I* (5'-3') 引物序列、50 mL 的 PCR 扩增体系及反应条件见表 1~3。配制质量浓度为 10 g/mL 的琼脂糖凝胶进行电泳, 检测是否成功扩增出目的基因。电泳缓冲液 1 × TAE (Trisbase,

Aceticacid EDTA), 电压 120 V, 电泳时间 20 min。取在 750 bp 左右出现的条带, 将对应的 PCR 产物送检苏州金唯智公司进行双向测序。编辑测序成功 DNA 片段, 并在 GenBank 中搜索比对, 找出其物种名称, 使用 MEGA X 构建系统发育树, 进行遗传距离分析^[3]。

表 1 PCR 反应引物序列

Tab. 1 PCR reaction primer sequences

引物 Primer	序列 Sequence	长度 Length/bp	退火温度 Annealing temperature/°C	来源 Source
HCO1490	GGTCAACAAATCATAAAGATATTGG	25	42	[4]
LCO2198	TAAACTTCAGCCTGACCAAAAAATCA	26	42	[4]

表 2 PCR 反应体系
Tab.2 PCR reaction system

试剂名称 Name of reagent	体积 Volume/ μL
PCR MIX	25
HCO1490	2
LCO2198	2
模版 Template	5
ddH ₂ O	16
合计 Total	50

表 3 PCR 反应条件
Tab.3 PCR reaction conditions

过程 Process	温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	时间 Time/s	循环 Cycle/次
预变性 Prevariability	95	60	
变性 Denaturation	95	40	
退火 Annealing	42	40	36
延伸 Extension	72	60	
再延伸 Further extension	72	300	
终止 Stop	4	∞	

1.3 数据处理

白洋淀春季、夏季和秋季枝角类和桡足类丰度、优势度 (Y)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (J) 等指标计算方法参考徐东会等^[5]的研究,将 $Y \geq 0.02$ 的种类作为优势种。具体公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$J' = H' / \log_2 S \quad (2)$$

$$d = \frac{N-1}{\log_2 N} \quad (3)$$

$$Y = \frac{n_i f_i}{N} \quad (4)$$

式中: P_i 为第 i 种的个体数与样品总个体数的比值; N 表示样品中个体总数; n_i 为第 i 种物种的个体数; S 为样品中物种的种类总数; f_i 为该物种的出现率。

采用 SPSS 20.0 软件分析丰度和多样性指数与环境因子的相关性。使用 Canoco 5 软件分析枝角类和桡足类分布与环境因子之间相关性,当 4 个轴中梯度长度 (lengths of gradient) 最大值大

于 3 时采用典型对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA),当 4 个轴中梯度长度最大值小于 3 时采用冗余分析 (Redundancy analysis, RDA)。柱状图和折线图使用 Origin7 进行绘制。不同采样位点枝角类和桡足类丰度、生物多样性指数图采用 surfer 12.0 绘制。

2 结果

2.1 物种组成及优势种

本调查鉴定枝角类和桡足类共 8 科 17 属 26 种。其中:剑水蚤科 (Cyclopidae) 种类最多,共 13 种,占总种数 50%;其次是溞科 (Daphniidae) 共 4 种,占总种数 15.38%;象鼻溞科共 3 种,占总种数 11.54%;仙达溞科共 2 种,占总种数 7.69%;其余裸腹溞科、盘肠溞科、胸刺水蚤科、老丰猛水蚤科各 1 种,各占总种类数 3.85%。调查种类季节变化明显,整体呈秋季 (18 种,桡足类 9 种,枝角类 9 种) > 春季 (17 种,桡足类 11 种,枝角类 6 种) > 夏季 (9 种,桡足类 5 种,枝角类 4 种),具体种类分布见表 4。

表 4 白洋淀枝角类和桡足类种类名录表
 Tab. 4 The species of Cladocera and Copepoda in Baiyangdian Lake

种类 Species	缩写 Abbreviation	季节 Seasons			鉴定手段 Identification techniques
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	
鳃足亚纲 Phyllopoda					
枝角目 Cladocera					
筒弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>	Boc	+	+	+	Tr
长额象鼻溞 <i>B. longirostris</i>	Bol	+	+	+	Tr
颈沟基合溞 <i>B. deitersi</i>	Bdr			+	Tr
溞状溞 <i>Daphnia pulex</i>	Dpl	+		+	DNA
透明溞 <i>D. hyalina</i>	Dhl	+	+	+	Tr
僧帽溞 <i>D. cucullata</i>	Des	+			DNA
网纹溞属 <i>Ceriodaphnia</i> sp.	Ces			+	Tr
长肢秀体溞 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>	Dlf		+	+	Tr
短尾秀体溞 <i>D. brachyurum</i>	Dib			+	Tr
微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>	Mmk			+	DNA
锐额溞属 <i>Alonella</i> sp.	Als			+	DNA
桡足亚纲 Copepoda					
剑水蚤目 Cyclopoida					
锯齿真剑水蚤 <i>Eucyclops macruroides denticulatus</i>	Emd	+			DNA
锯齿真剑水蚤 <i>E. serrulatus</i>	Eus	+			Tr
草绿刺剑水蚤 <i>Acanthocyclops viridis</i>	Acv			+	Tr
棘尾刺剑水蚤 <i>A. bicuspidatus</i>	Acb	+			Tr
等刺温剑水蚤 <i>Thermocyclops kawamurai</i>	Thk	+	+	+	Tr
透明温剑水蚤 <i>T. hvalinus</i>	Thh	+	+	+	Tr
台湾温剑水蚤 <i>T. taihokuensis</i>	Tht	+	+	+	Tr
英勇剑水蚤 <i>Cyclops strenuous</i>	Cys	+			Tr
近邻剑水蚤 <i>C. vicinus</i>	Cyv		+	+	DNA
跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>	Miv	+			DNA
白色大剑水蚤 <i>M. albidus</i>	Maa			+	Tr
广布中剑水蚤 <i>M. leuckarti</i>	Mel			+	DNA
胸饰外剑水蚤 <i>Ectocyclops phaleratus</i>	Ecp	+	+	+	Tr
哲水蚤目 Calanoida					
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	Sid	+		+	Tr
猛水蚤目 Harpacticoida					
模式有爪猛水蚤 <i>Onychocamptus mohammed</i>	Onm	+			Tr

注：“+”为出现在春季、夏季、秋季的物种。传统方法鉴定所得标记为 Tr，DNA 条形码方法所得标记为 DNA。

Notes: “+” is the species that appeared in spring, summer or autumn. Identification by traditional methods was marked with Tr, and identification by DNA barcoding was marked with DNA.

由表 5 可知白洋淀枝角类和桡足类各个季节优势种均为 5 种。春季优势种中，筒弧象鼻溞、透明温剑水蚤和等刺温剑水蚤占主要优势，优势度分别为 0.228、0.195 和 0.119；夏季优势种中，透明温剑水蚤和近邻剑水蚤占主要优势，

优势度分别为 0.448 和 0.151；秋季优势种中，透明温剑水蚤、胸饰外剑水蚤和近邻剑水蚤占主要优势，优势度分别为 0.305、0.223 和 0.105。筒弧象鼻溞、透明温剑水蚤、胸饰外剑水蚤在 3 个季节中均为优势种，但优势度表现有差异。

表 5 白洋淀枝角类和桡足类优势种及优势度

Tab. 5 Dominant species of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

种类 Species	春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn		
	丰度比 Percentage of abundance/%	出现率 Occurrence rate/%	优势度 Dominance/ %	丰度比 Percentage of abundance/%	出现率 Occurrence rate/%	优势度 Dominance/ %	丰度比 Percentage of abundance/%	出现率 Occurrence rate/%	优势度 Dominance/ %
筒弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>	28.5	80.0	22.8	5.6	36.7	0.021	6.8	76.7	5.2
长额象鼻溞 <i>B. longirostris</i>	11.7	60.0	7.0	-	-	-	-	-	-
长肢秀体溞 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>	-	-	-	13.9	60.0	0.083	4.6	46.7	2.1
等刺温剑水蚤 <i>Thermocyclops kawamurai</i>	14.3	80.0	11.5	-	-	-	-	-	-
透明温剑水蚤 <i>T. hvalinus</i>	27.8	70.0	19.5	46.3	96.7	0.448	32.7	93.3	30.5
近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i>	-	-	-	16.8	90.0	0.151	15.0	70.0	10.5
胸饰外剑水蚤 <i>Ectocyclops phaleratus</i>	4.8	46.7	2.24	10.2	73.3	0.075	27.9	80.0	22.3

2.2 枝角类和桡足类丰度时空分布特征

丰度大于 2% 的枝角类和桡足类季节分布及变化情况见图 2。枝角类和桡足类丰度年变化为 94.3 ~ 111.6 ind/L, 表现为夏季 > 秋季 > 春季, 年总丰度平均值为 99.14 ind/L。枝角类和桡足类季节变化不大且各个季节剑水蚤科对丰度的贡献值均为 45% 以上, 夏季最高, 贡献率为 68.24%, 占主要优势。

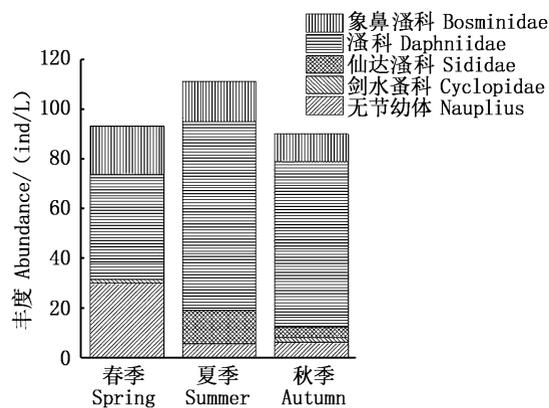


图 2 白洋淀各季节枝角类和桡足类组成

Fig. 2 Composition of Cladocera and Copepods in various seasons in Baiyangdian Lake

白洋淀不同季节枝角类和桡足类丰度区域性分布如图 3。枝角类和桡足类春季丰度表现较大的区域主要由两部分组成, 一是以前塘淀为中心所形成的南部区域, 另一是以王家寨为中心所形成的中部区域; 枝角类和桡足类夏季丰度较大的区域主要集中在以羊角淀和八大淀为中心的西南区域; 枝角类和桡足类秋季丰度较大的区域主要集中在以麦淀、白洋淀 1、泛鱼淀为中心的东南区域。总体看, 枝角类和桡足类在白洋淀南部区域采样位点较北部位点展现出较大丰度。

2.3 枝角类和桡足类多样性指数(生物多样性、丰富度、均匀度)时空分布特征

表 6 表明: 秋季生物多样性最丰富, 其次为春季, 夏季最低; 均匀度指数最高是春季, 其次为夏季, 秋季均匀度指数最低; 丰富度指数则展现秋季最高, 其次夏季, 春季最低。枝角类和桡足类生物多样性指数季节性变化不显著。

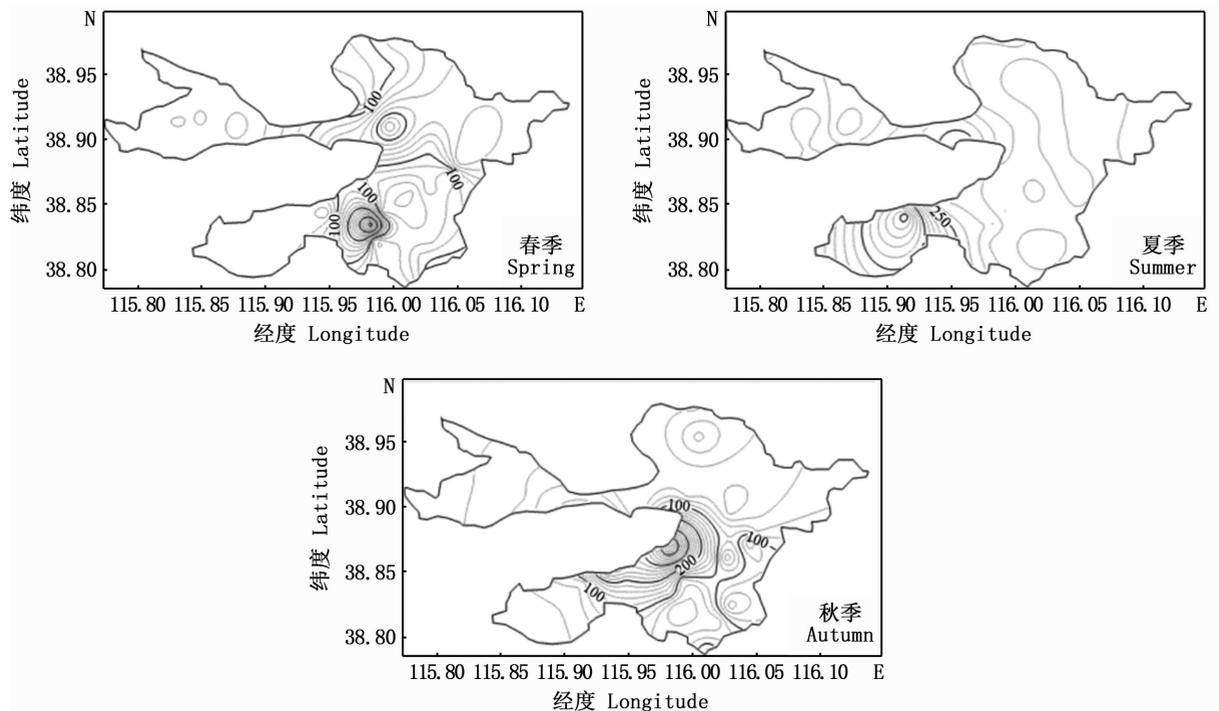


图3 白洋淀枝角类和桡足类丰度分布图

Fig. 3 Horizontal distribution and abundance of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

表6 白洋淀各季节枝角类和桡足类生物多样性指数

Tab. 6 Diversity index of Cladocera and Copepods for each season in Baiyangdian Lake

季节 Season	多样性指数 Diversity index		
	H'	J	D
春季 Spring	1.785	0.762	1.187
夏季 Summer	1.721	0.757	1.234
秋季 Autumn	1.872	0.734	1.837

根据不同季节各个采样点生物多样性指数绘制图4。从图4可看出:春季枝角类和桡足类生物多样性较高地区主要集中于西北的藻荇淀4个采样位点以及东南部以王家寨、聚龙淀为中心的区域;夏季主要集中于西北部藻荇淀4个采样位点以及中南部区域;秋季主要集中于以鲌淀和龙王淀为中心的南部地区。总体看,枝角类和桡足类生物多样性指数空间变化主要表现为南部区域大于北部区域。

2.4 枝角类和桡足类群落空间变化与环境因子的关系

调查期间,采样区域的平均水温为 (21.49 ± 5.32) °C,年水温最低为14.5 °C(春季,藻荇淀2),最高为31.6 °C(夏季,鲌淀)。pH变化范围为8~9,3个季节无显著性差异。但是DO和透明度在3个季节中表现出显著差异,春季所测的DO值与夏季和秋季具有显著性差异($P < 0.05$),透明度则表现为秋季与夏季和春季具有

显著性差异($P < 0.05$)。Chl. a的变化与营养盐N、P具有正相关性。

各个季节枝角类和桡足类丰度、Shannon-Wiener物种多样性指数、均匀度指数、丰富度指数与所监测22个环境指标的相关性分析见表7。从表7可看出:春季枝角类和桡足类分布具显著相关($P < 0.05$)的指标有Zn、水温(T)、石油烃(Ph)、Pb,具极显著相关($P < 0.01$)的指标有Cd、As和硫化物(S);夏季枝角类和桡足类分布具显著性相关($P < 0.05$)的指标有硫化物(S)和总磷(TP);秋季枝角类和桡足类分布具显著性相关($P < 0.05$)的指标有DO、As、透明度、Cd、Hg。年平均丰度、生物多样性指数与环境因子相关性分析中,具极显著相关($P < 0.01$)的指标有Pb、Zn,具显著相关($P < 0.05$)的指标有S。整体看,重金属环境因子对枝角类和桡足类分布具有较显著的影响。

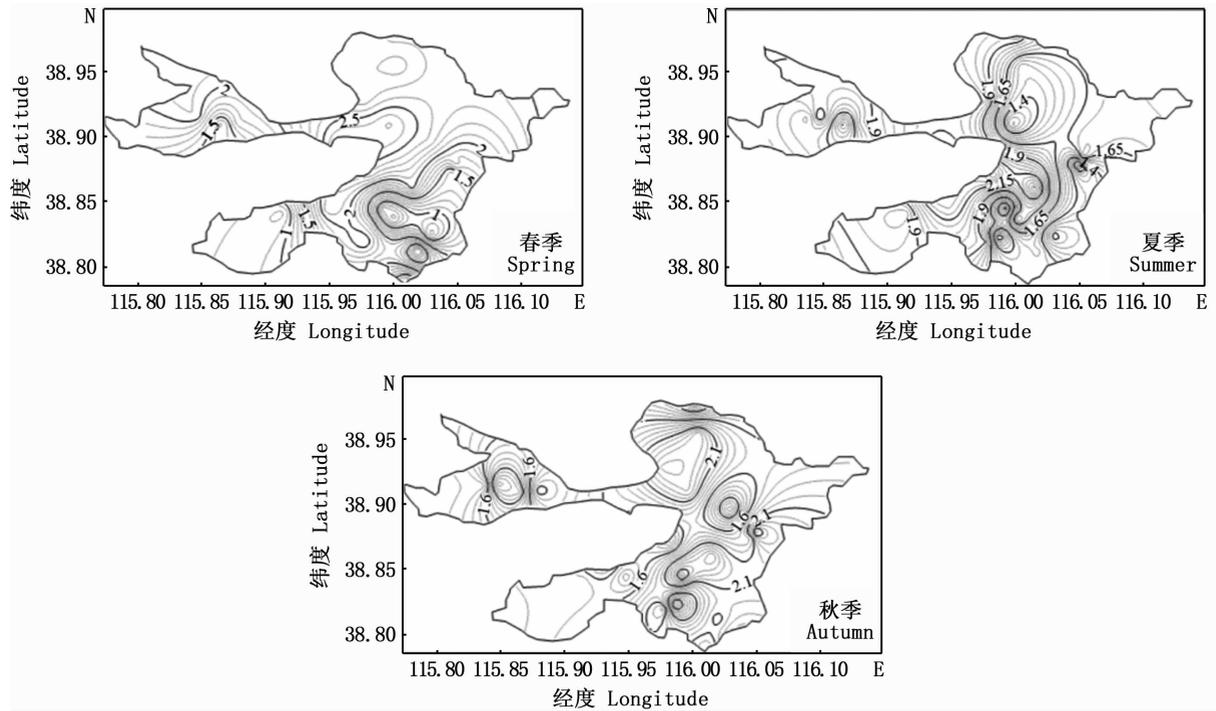


图 4 白洋淀枝角类和桡足类生物多样性分布图

Fig. 4 Horizontal distribution of biodiversity of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

表 7 白洋淀枝角类和桡足类丰度、多样性指数与环境相关性
Tab. 7 Correlation between environmental factors with diversity index and abundance of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

指标 Index	春季 Spring				夏季 Summer				秋季 Autumn			
	Abundance	H'	J	D	Abundance	H'	J	D	Abundance	H'	J	D
T	0.075	-0.405*	-0.289	0.083	0.006	-0.125	-0.258	0.012	0.184	0.124	0.145	0.194
TMD	0.116	0.026	-0.284	0.135	-0.209	-0.185	0	-0.222	-0.115	-0.206	-0.401*	-0.101
TP	-0.125	-0.319	-0.04	-0.129	0.333	0.222	-0.11	0.363*	-0.047	-0.031	0.022	-0.059
S	0.012	0.292	0.484**	0.002	-0.036	-0.337	-0.416*	-0.036	-0.073	0.234	0.206	-0.068
Ph	-0.043	0.374*	0.272	-0.042	0.192	-0.085	-0.242	0.186	-0.17	-0.314	-0.228	-0.175
DO	-0.117	-0.142	0.056	-0.124	0.189	-0.11	-0.15	0.194	0.426*	0.304	0.019	0.441*
As	-0.162	-0.481**	-0.229	-0.160	0.088	-0.175	-0.11	0.091	-0.107	-0.364*	-0.231	-0.108
Cd	0.024	0.093	0.201	0.027	0.295	-0.261	0.019	0.269	0.068	-0.246	-0.367*	0.070
Hg	-0.073	0.066	0.268	-0.064	0.316	-0.035	-0.002	0.294	0.124	-0.221	-0.381*	0.133
Zn	-0.362*	-0.296	-0.221	-0.345	-0.216	-0.068	0.072	-0.233	0.124	0.150	0.065	0.130
Pb	0.042	0.416*	0.224	0.059	-0.123	-0.252	0.061	-0.145	0.086	-0.153	-0.322	0.112

注: *. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; **. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Notes: *. Significant correlation at 0.05 level (bilateral); **. Significant correlation at 0.01 level (bilateral).

表 8 白洋淀枝角类和桡足类年平均丰度、多样性指数与环境相关性
Tab. 8 Environmental correlation between of Cladocera and Copepods annual abundance and diversity index in Baiyangdian Lake

指标 Index	S	Zn	Pb
Abundance	-0.199	-0.267	-0.185
H'	-0.423*	-0.469**	-0.472**
J	-0.161	-0.293	-0.216
D	-0.295	-0.443*	-0.331

注: *. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; **. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Notes: *. Significant correlation at 0.05 level (bilateral); **. Significant correlation at 0.01 level (bilateral).

根据表7 枝角类和桡足类丰度、多样性指数与环境因子指标相关性分析,选择与本季度枝角类和桡足类显著相关、极显著相关的环境因子指标与其在各样点分布情况做环境相关性分析绘制图5。春季枝角类和桡足类分布主要受 Pb、硫化物(S)和 As 的影响,优势种剑水蚤科主要与硫化物(S)、Cd 和 As 正相关;夏季枝角类和桡足类分布主要与硫化物(S)和总磷(TP)有关,除无节

幼体、长肢秀体溞外,其他枝角类和桡足类均与硫化物(S)呈负相关;秋季枝角类和桡足类分布主要受 DO、透明度(TMD)的影响,且大多与重金属(As、Hg、Cd)含量负相关。从表8 和图6 白洋淀枝角类和桡足类年平均丰度、多样性指数与环境因子相关性双序图可看出,Pb、Zn、S 与其明显负相关,也是影响其变化的关键因子。

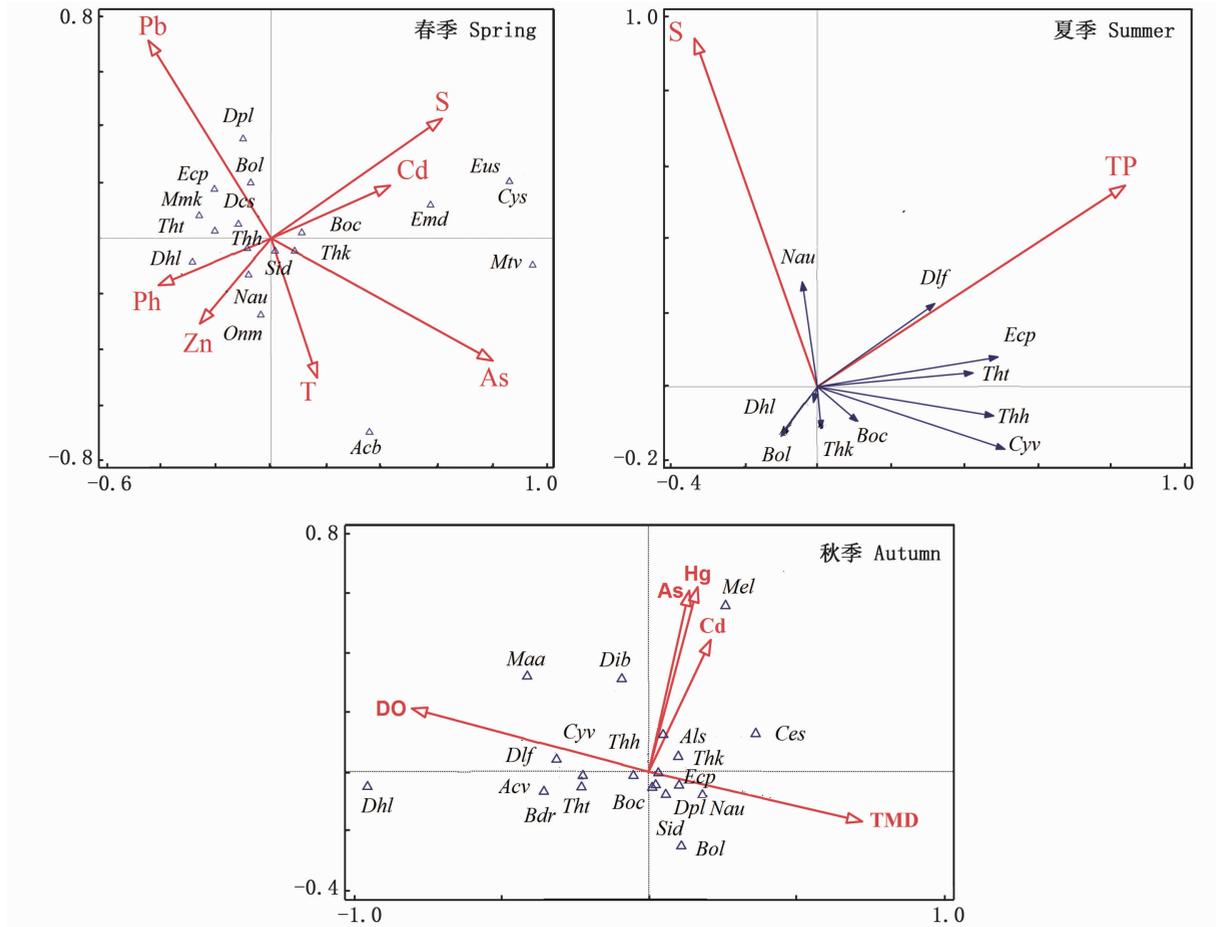


图5 白洋淀枝角类和桡足类群落结构与环境因子双序图
 Fig.5 Double sequencing diagram of environmental factors and community structure of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

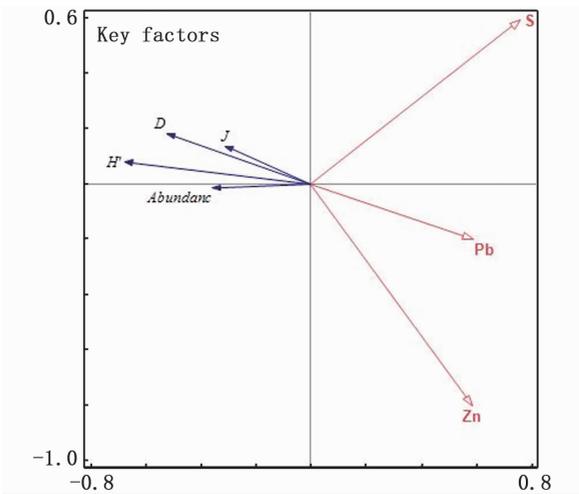


图6 白洋淀枝角类和桡足类年平均丰度、多样性指数与环境因子双序图

Fig. 6 Double sequencing diagram of environmental factors with annual abundance and diversity index of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

3 讨论

3.1 枝角类和桡足类群落组成与优势种

2019年3次调查共鉴定出5科7属11种枝角类和3科9属15种桡足类,与沈嘉瑞等^[6]枝角类39种、桡足类23种,许木启^[7]枝角类33种、桡足类17种,易磊等^[8]枝角类19种、桡足类16种相比种类数量偏低。总体来看,枝角类和桡足类种类数量下降。其原因主要是白洋淀历经几次干淀后蓄水使原水环境发生变化,且工业废水和生活用水的排放导致水体恶化,从而对水环境相对较敏感的枝角类和桡足类种类下降。但本次2019年春季共调查到枝角类6种、桡足类11种与张蒙等^[4]2018年春季调查到枝角类7种、桡足类5种相比,枝角类和桡足类种类数量上升。

3次调查中,桡足类在丰度上有绝对优势,主要集中于剑水蚤科。不同物种对水环境的敏感程度不同,剑水蚤主要集中于中污性水体^[9]。优势种中,等刺温剑水蚤、透明温剑水蚤、胸饰外剑水蚤处于营养性水环境,其分布与总氮和总磷含量正相关。不同季节枝角类和桡足类种类数量不同,主要表现为夏季种类数量少于春秋季节,此现象与HADA等^[10]和高文燕等^[11]研究结果相似。

3.2 枝角类和桡足类丰度、生物多样性指数的时空变化特征

枝角类和桡足类丰度季节性变化主要受水温影响,水温较高时,食物资源及生存环境对浮游动物的繁殖有益,所以相对春秋季节,夏季生物丰度较大。由于居民生产生活活动、出水口、进水口、旅游产业发展等因素,枝角类和桡足类丰度、生物多样性指数区域性分布变化幅度较大。多样性指数反映了物种组成及群落结构特点,空间异质性越大,种类越多,个体数量分布越均匀。其丰度出现地域性变化主要与捕食有关。枝角类和桡足类主要以微型浮游植物、有机碎屑、细菌、原生生物等为食。浮游植物作为初级生产者,能够通过上行效应影响浮游动物群落结构。丰富的氮和磷营养盐可以为浮游植物生长提供丰富的营养基础^[12],间接给枝角类和桡足类提供食物。且枝角类和桡足类丰度等值线图与总氮总磷的含量走向基本一致。由此分析,白洋淀总磷、总氮等营养盐存在点源污染。

总体来看,枝角类和桡足类丰度及生物多样性指数季节性变化不明显,区域性分布变化明显,主要是南部区域大于北部区域。

3.3 枝角类和桡足类与环境因子的关系

枝角类和桡足类的群落组成、丰度数量、多样性指数等与环境因子关系非常密切。重金属在春季和秋季对枝角类和桡足类分布较夏季影响显著,其原因主要为夏季水生植物生长茂盛,其根部对重金属具有吸附作用,如篦齿眼子菜、金鱼藻等;其次由于污水灌溉和农作施肥等管理因素^[13]。营养盐和Chl. a含量会影响浮游动物摄食,从而影响其丰度数量和群落结构组成。透明度在一定程度上能反映浮游植物数量,透明度越高,浮游植物数量少,影响其摄食活动,且枝角类和桡足类本身的趋光性也受其影响^[14]。通过分析,S、Zn、Pb为影响其丰度和多样性指数变化的关键因子。白洋淀石油烃和硫化物的影响主要来自于船只活动和底泥疏浚等所产生的人为干扰,从而改变水体环境。本次调查中,重金属含量与枝角类和桡足类的分布呈负相关,通过影响枝角类和桡足类的生长发育调节丰度和生物多样性指数等。水体中重金属含量并不高,处于

I类水标准,而沉积物中的Zn含量高于水体中Zn含量5倍,水体中Cu、Pb、Cd、Hg含量均低于沉积物中含量,主要原因是水环境中的重金属长时间沉积在沉积物中又向水体扩散^[15]。综上,应加强白洋淀保护,增加空间异质性,发挥其重要生态价值,实现生物资源可持续利用与发展^[16]。

参考文献:

- [1] 王乙震, 罗阳, 周绪申, 等. 白洋淀浮游动物生物多样性及水生态评价[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 94-100.
WANG Y Z, LUO Y, ZHOU X S, et al. Zooplankton biodiversity and water ecological evaluation in Baiyangdian Lake[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(6): 94-100.
- [2] LOZANO-SARDANETA Y N, PATERNINA L E, SÁNCHEZ-MONTES S, et al. DNA barcoding and fauna of phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae) from Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico[J]. Acta Tropica, 2020, 201: 105220.
- [3] 姜冰洁, 傅建军, 朱文彬, 等. 基于CO I基因分析7个罗非鱼群体的遗传变异[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(6): 827-834.
JIANG B J, FU J J, ZHU W B, et al. Genetic variation analysis of seven tilapia populations based on CO I gene[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(6): 827-834.
- [4] 张蒙, 孙泉琼, 方楠, 等. DNA条形码技术在白洋淀流域浮游动物调查中的应用[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 217-224.
ZHANG M, SUN X Q, FANG N, et al. Application of DNA barcode on survey of zooplankton in Baiyangdian Watershed[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2019, 39(2): 217-224.
- [5] 徐东会, 孙雪梅, 陈碧鹃, 等. 渤海中部浮游动物的生态特征[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(4): 7-18.
XU D H, SUN X M, CHEN B J, et al. The ecological characteristics of zooplankton in the central Bohai Sea[J]. Progress in Fishery Sciences, 2016, 37(4): 7-18.
- [6] 沈嘉瑞, 宋大祥. 河北省白洋淀的桡足类[J]. 动物学报, 1965, 17(2): 167-183.
SHEN J R, SONG D X. The freshwater copepods of the Baiyang-dian Lake, Hopeh province[J]. Acta Zoologica Sinica, 1965, 17(2): 167-183.
- [7] 许木启. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河-白洋淀水体的自净效果[J]. 水生生物学报, 1996, 20(3): 212-220.
XU M Q. Evaluation of self-purification efficiency of Fuhe stream-Baiyangdian Lake through zooplankton[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1996, 20(3): 212-220.
- [8] 易磊, 刘存歧, 邢晓光, 等. 白洋淀浮游甲壳动物的生物多样性研究[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(4): 38-43.
YI L, LIU C Q, XING X G, et al. The biodiversity of crustacean zooplankton in Lake Baiyangdian[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31(4): 38-43.
- [9] 王延洋, 李晓波, 吴波, 等. 上海滴水湖浮游动物研究初报[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2008, 37(2): 167-172.
WANG Y Y, LI X B, WU B, et al. Notes on zooplankton in Dishui Lake[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2008, 37(2): 167-172.
- [10] HADA A, UYE S I. Cannibalistic feeding behavior of the brackish-water copepod *Sinocalanus tenellus*[J]. Journal of Plankton Research, 1991, 13(1): 155-166.
- [11] 高文燕, 李培伦, 李喆, 等. 小龙虎泡浮游动物组成与环境因子相关性分析[J]. 水产科学, 2019, 38(6): 839-845.
GAO W Y, LI P L, LI Z, et al. Zooplankton community dynamics and relation to environmental factors in Xiaolonghupao Lake[J]. Fisheries Science, 2019, 38(6): 839-845.
- [12] PU X, CHENG H G, LU L, et al. Spatial profiling and assessing dominance of sources to water phosphorus burden in a shallow lake[J]. Water Resources Management, 2015, 29(3): 715-729.
- [13] 张慧. 白洋淀上游污灌区土壤养分和重金属时空分布规律研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2010.
ZHANG H. Study on temporal-spatial distribution evolution of soil nutrient and heavy metals of sewage irrigation region in Baiyangdian upstream[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010.
- [14] 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[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4): 896-901.
QIU X C, ZHAO H X, SUN X X. Relationships between zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake, Ningxia of northwest China: A multivariate analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(4): 896-901.
- [15] 薛培英, 赵全利, 王亚琼, 等. 白洋淀沉积物-沉水植物-水系统重金属污染分布特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1525-1536.
XUE P Y, ZHAO Q L, WANG Y Q, et al. Distribution characteristics of heavy metals in sediment-submerged macrophyte-water systems of Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1525-1536.
- [16] 熊泽秀, 唐议. 生态文明建设背景下退捕渔民参与渔业监督管理研究[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(1): 145-152.
XIONG Z X, TANG Y. Study on fishermen's participation in fisheries surveillance who have quit fishing in eco-civilization construction[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(1): 145-152.

Evaluation and monitoring of the water environment based on the diversity of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

SUN Xiaoqiong^{1,2}, CUI Tiefeng^{1,2}, LI Zizhu^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, XIAO Guohua³

(1. College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China; 2. Institute of Life Science and Green Development, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China; 3. Hebei Academy of Marine and Fishery Sciences, Hebei Marine Fishery Ecological Environment Monitoring Station, Qinhuangdao 066000, Hebei, China)

Abstract: It is very important to monitor and protect the water environment and biological resources in Baiyangdian Lake because of Xiong'an New Area. In order to investigate the spatial and temporal variation characteristics of the community structure of Cladocera and Copepods and their relationship with water environmental factors in Baiyangdian Lake, canonical correlation analysis (CCA) was used to analyze the abundance, diversity index and aquatic environmental factors of Cladocera and Copepods in Baiyangdian measured in May, August and October 2019. Based on the technology of DNA barcoding, 26 species of Cladocera and Copepods were identified belonging to 8 families, 17 genera. The dominant species are *Bosmina coregoni*, *Thermocyclops hualinus* and *Ectocyclops phaleratus* throughout the year 2019. The spatial and temporal characteristics of abundance and diversity index are different. The main expression is that the variation of regional distribution is greater than the seasonal variation, and it is greater in the southern region than in the northern region in space. Analysis of correlation between Cladocera and Copepods community structure and water environment, the results showed that temperature, transparency, nutrients and other environmental factors affected the growth, development, feeding and other activities of Cladocera and Copepods as the main environmental factors affecting their abundance and community structure characteristics. S, Pb and Zn are the key influencing factors, which have significant negative effects on Cladocera and Copepods. Therefore, the long-term ecological environment monitoring and species research in Baiyangdian Lake will provide reference for the implementation of water conservancy projects and construction of Xiong'an New Area.

Key words: Baiyangdian Lake; Cladocera; Copepods; community structure; environment correlation analysis