洪泽湖底栖动物群落结构及影响因素研究

陈静[1] 潘保柱[2] 武大勇[3] 朱天顺[1] 申恒伦[1] 丁诚实[1] 蒋万祥[1,2,3]

(1．枣庄学院 生命科学学院，山东 枣庄 277160；2．西北旱区生态水利国家重点实验室西安理工大学 水利水电学院，陕西 西安 710048；3．河北省湿地生态与保护重点实验室(筹)，河北 衡水 053000)

【摘 要】: 2018 年 4 和 9 月对洪泽湖底栖动物群落结构及影响因子进行了系统研究。结果表明，共鉴定底栖动物 37 种，隶属 4 门、8 纲、13 目、19 科。霍甫水丝蚓、钩虾、寡鳃齿吻沙蚕、软铗小摇蚊、河蚬为研究区域优势物种，优势度分别为 0.108、0.068、0.054、0.037、0.020。物种丰富度、Margalef 多样性指数、香浓指数表现为 4 月高于 9 月。非度量多维标度排序和非参数方差分析表明两次调查期间底栖动物群落存在显著差异。指示物种分析表明，暗肩哈摇蚊、软铗小摇蚊、厚唇嫩丝蚓、石蠋虫、苏氏尾鳃蚓是造成两次调查底栖动物群落差异的指示物种。冗余分析表明，4 月底栖动物群落主要受电导、水温、叶绿素 a 和硅酸盐的影响；9 月主要受磷酸盐、水深和溶解氧的影响。上述结果为后续深入开展洪泽湖底栖动物生态学研究、评价跨流域调水对淡水生态系统的影响奠定了一定的数据基础。

【关键词】: 底栖动物 洪泽湖 指示物种 生物多样性

【中图分类号】:X174**【文献标识码】**:A**【文章编号】**:1004-8227(2022)02-0326-10

确保淡水资源的有效供应是一个重大的全球性战略问题[1,2],其中，淡水资源分布不均匀而引起的分布性缺水是造成很多国家水资源短缺的重要因素之一。跨流域调水(Inter-Basin Water Transfer)可有效地重新分配淡水资源，是协调水资源分布与人类需求间矛盾的有效途径[3]。然而，跨流域调水通常具有两面性：一方面，对水域生态环境有积极的影响，如可恢复受损生态系统，提高生物多样性；另一方面，工程的实施打破了原有的地域界限，流域间的各种物质发生转移、重新分配，使已经形成的平衡状态受到不同程度的干扰[4]。洪泽湖是我国第四大淡水湖泊，也是南水北调东线工程最大的调蓄湖泊，属过水性湖泊；其生态健康状况直接影响区域生态安全及南水北调工程能否顺利实施，因此，科学地评估洪泽湖水域生态状况意义重大。

大型底栖无脊椎动物(简称底栖动物)取食浮游生物、底栖藻类和有机碎屑等，本身又被鱼类、鸟类等生物所取食，直接影响其它物种的生存和繁殖[5,6],是整个生态系统物质循环和能量流动的重要环节，在一定程度上决定了物质循环和能量流动的方式[7,8]。底栖动物生命周期相对较长，迁移能力较弱，易于采集和鉴定，且不同物种对环境变化的敏感性差异较大，群落结构往往会随着水质的变化而改变[9],是指示淡水生态系统健康最为重要的类群之一[10,11,12]。此外，底栖动物由于移动能力弱，只能被动地

[1]**作者简介**：陈静(1981～),女，教授，主要研究方向为无脊椎动物分类及生态学.E-mail:chj218.2000@163.com;蒋万祥 E-mail:jiangwanxiang@uzz.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金(51979241;51809228;81703190);河北省湿地生态与保护重点实验室(筹)开放基金(hklk201906);山东省青创科技计划(2019KJE020,2020KJE008)

耐受环境变化的影响，因此，相比浮游动物、鱼类等，可以更好地反映干扰对生物群落或生态系统的影响[13]。

新世纪以来，随着洪泽湖周边地区经济的快速发展和人口的急剧增长，人类对自然资源的开发不断加剧(如水产养殖、渔业捕捞、采砂),使其生态环境逐渐恶化，富营养化进程加剧，水质呈不断下降趋势[14]。洪泽湖底栖动物相关研究较少，特别是南水北调东线工程运行以来，有关调水背景下洪泽湖底栖动物的系统研究更是鲜见报道。本研究基于 2018 年 4 月(枯水期)和 9 月(丰水期)洪泽湖底栖动物调查数据，就当前调水背景下洪泽湖底栖动物时空格局进行了研究。以期厘清如下基本问题：(1)阐明洪泽湖底栖动物区系组成；(2)解析底栖动物群落结构时空格局；(3)明确影响底栖动物群落结构的关键因子。以期为后续深入开展底栖动物生态学研究、湖泊健康评价及调蓄湖泊的科学管理提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及样点设置

洪泽湖(33° 06′ N～33° 40′ N,118° 10′ E～118° 52′ E)位于淮河中游，由成子湖湾、溧河湖湾、淮河湖湾三大湖湾组成，是我国第四大淡水湖，汛期或大水年份水位可高达 15.5m,积水面积达到 3500km^2;湖区平均水深 1.7m,湖盆平均高程为 10～11m,比东部平原高 4～8m[15]。入湖河流主要位于西南岸，其中，淮河是最大的入湖河流，占总流量的 87%[16]。自 2013 年 10 月以来，随着南水北调东线一期工程的运行，洪泽湖作为最大的蓄水水库和水道开始发挥作用[17,18]。为阐明工程运行后底栖动物分布格局，本研究采用网格布点的方式在整个湖区共设样点 26 个(HZ1～HZ26),就洪泽湖底栖动物分布格局进行了调查(图 1)。

1.2 底栖动物采集与鉴定

2018 年 4 月、9 月对洪泽湖底栖动物进行了调查。使用采样面积 0.0625m^2 的改良彼得森采泥器采集底栖动物，每个样点采集 1～2 次，用孔径为 40 目的筛网冲洗后，将网中剩余物质倒入自封袋，自封袋中加少量湖水放入装有冰块的保温箱。样品运回野外实验室后将底栖动物拣出，装标本瓶中，用 10%的福尔马林液固定。在显微镜和体视镜下参考相关资料对物种进行鉴定[19,20,21,22,23]、计数；用吸水纸吸干底栖动物表面水渍，置于万分之一天平称重(OHAUSEX324ZH)。

1.3 环境因子测定

水温(T)、水深(Dep)、pH 值(pH)、电导(Cond)、总溶解性固体(TDS)、盐度(Sal)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)用 YSIEXO-1 多参数水质分析仪现场测定；透明度(SD)用塞氏盘现场测定；总氮(TN)、硝态氮(NO_3-N)、氨氮(NH_3-N)、总磷(TP)、磷酸盐(PO_4-P)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、硅酸盐(Si)使用 SKALAR 公司 San++型连续流动分析仪(Continuous Flow Analyzer,CFA)测定。叶绿素 a(Chla)采用 90%丙酮提取，分光光度法测定[24]。

1.4 统计分析

优势度的计算公式为 $Y=(n_i/N)\times f_i$,式中 n_i 为第 i 种的总个体数；N 为所有物种的总个体数；f_i 为第 i 种在各站点出现的频率，以 Y≥0.2 的物种为优势种[25]。

生物多样性计算公式如下：

$$香浓指数 = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

$$Margalef\ 指数 = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (3)$$

$$均匀度指数 = 香浓指数 / 香浓指数_{max} \quad (4)$$

$$香浓指数_{max} = \ln S \quad (5)$$

$$物种丰度 = S \quad (6)$$

式中：S 为物种数目；N 为所有物种的数目之和；n_i 为第 i 个种的个体数目。

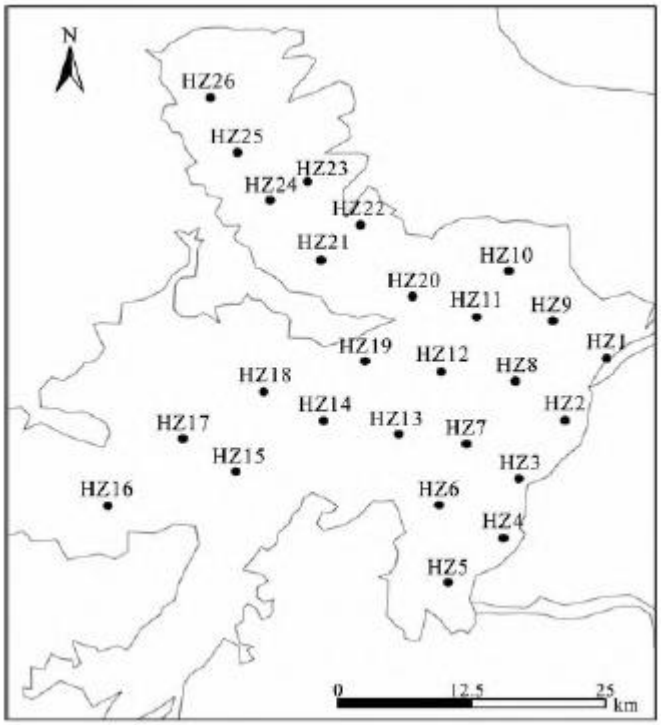

图 1 洪泽湖底栖动物采集站位图

曼-惠特尼 U 检验(Mann-Whitney U test)用于比较两次调查间环境因子；底栖动物密度、生物量和生物多样性采用配对样本 t 检验(Paired-Samples T Test)进行比较。非度量多维标度排序(Non-matric Multi-Dimentional Scaling,NMDS)和非参数多元方差分析(PerMANOVA)用于分析底栖动物群落的差异；本研究 NMDS 分析中解析压力值(stress)介于 0～100 间，解析压力值小于 20(如果 stress 范围为 0～1,则小于 0.2)可认为群落具备良好的区分度[26];指示物种分析(Indicator species analysis)用于筛选区分两次调查间群落差异的指示物种，指示值(Indicator values)大于 20 的物种定为指示物种[27];基于距离的冗余度分析(Distance-basedred undancy analysis,dbRDA)用于分析对底栖动物群落结构影响的主要环境因子。指示物种分析、非度量多维标度排序前均将群落数据转换为相对丰度。基于距离的冗余度分析过程中首先将物种数据和环境数据进行 log(x+1)转换，然后将转化后的数据分别基于 Bray-Curtis similarity,Euclidean distance 构建矩阵，基于矩阵构建生物群落-环境模型。

本研究中曼-惠特尼 U 检验、配对样本 t 检验使用的软件为 IBMSPSS19.0;非度量多维标度排序、非参数多元方差分析和指示物种分析使用的软件为 PC-ORD5;基于距离的冗余度分析使用的软件为 PRIMER 6 & PERMANOVA+;柱状图在 OriginPro8.0 中制作。

2 结果

2.1 环境因子

对两次调查期间水体理化指标进行比较(表 1),结果表明,测定的 17 个理化指标在两次调查期间均表现为差异显著($P<0.05$)。其中，高锰酸钾指数、氨氮、总磷、磷酸盐、硅酸盐、氧化还原电位、水温在 9 月显著高于 4 月($P<0.05$);其它指标表现为 4 月显著高于 9 月($P<0.05$)。

2.2 物种组成

共鉴定底栖动物 37 种，隶属 4 门、8 纲、13 目、19 科(表 2),霍甫水丝蚓、钩虾、寡鳃齿吻沙蚕、软铗小摇蚊、河蚬为研究区域优势物种，优势度分别为 0.108、0.068、0.054、0.037、0.020。其中，4 月优势物种为霍甫水丝蚓、软铗小摇蚊、斯必卡虫、寡鳃齿吻沙蚕、河蚬、厚唇嫩丝蚓,优势度分别为 0.113、0.066、0.059、0.037、0.025、0.022;9 月优势物种为钩虾、霍甫水丝蚓、寡鳃齿吻沙蚕，优势度分别为 0.119、0.099、0.076(表 3)。

表 1 两次调查期间洪泽湖水体理化指标比较

理化因子	4 月	9 月
高锰酸钾指数(mg/L)**	1.63±0.18	4.70±0.71
总氮(mg/L)**	2.12±0.52	1.20±0.40
硝态氮(mg/L)**	1.91±0.51	0.80±0.47
氨氮(mg/L)**	0.05±0.06	0.18±0.11
总磷(mg/L)**	0.03±0.01	0.07±0.03
磷酸盐(mg/L)**	0.02±0.01	0.07±0.03
硅酸盐(mg/L)**	2.11±0.52	3.65±1.76
叶绿素 a(mg/L)*	15.46±9.92	10.19±9.80
电导率(μs/cm)**	547.76±72.65	484.46±94.53
盐度(psu)**	0.27±0.04	0.23±0.05
总固体悬浮物(mg/L)**	356.02±47.22	313.40±56.61
溶解氧(mg/L)**	10.87±0.70	9.39±0.40
氧化还原电位(ORP)**	50.61±11.36	155.43±11.54
水温(℃)**	17.00±1.58	21.19±0.37

pH 值**	8.06±0.17	7.41±0.11
水深(m)**	2.58±0.28	2.06±0.86
透明度(cm)**	37.31±20.36	21.04±3.83

注：P<0.05,**P<0.01.

2.3 密度、生物量和生物多样性

对两次调查期间底栖动物密度、生物量和多样性进行比较(图 2),结果表明，4 月底栖动物密度介于 32～5024ind./m^2,均值为 715ind./m^2,HZ15、HZ24 密度较大，HZ6 密度最小；9 月密度介于 16～3792ind./m^2,均值为 553ind./m^2,HZ17、HZ24 密度较大，HZ4 密度较小。4 月生物量介于 0.06～393.05g/m^2,均值为 71.0g/m^2,HZ19、HZ16 最大，HZ8、HZ6 最小；9 月生物量介于 0.12～3238.05g/m^2,均值为 217.23g/m^2,HZ9、HZ23 最大，HZ13、HZ5 最小。

4 月物种丰富度介于 2～10,均值为 5.8,HZ15 最大,HZ6 最小;9 月介于 0～10,均值为 4.6,HZ24 最大,HZ4 最小。4 月 Margalef 多样性指数介于 0.58～2.47,均值为 1.53,最大值出现在 HZ11,最小值出现在 HZ24;9 月介于 0～1.87,均值为 1.31,HZ24 最大，HZ4 最小。4 月 Shannon 指数介于 0.34～1.79,均值为 1.25,HZ11 值最大，HZ15 最小；9 月介于 0～1.75,均值为 1.03,HZ9 值最大，HZ4 最小。4 月均匀度指数介于 0.15～1.0,均值为 0.76,HZ6 值最大，HZ15 最小；9 月介于 0～1,均值为 0.72,HZ21 最大，HZ4 最小。采用配对样本 T 检验对两次调查间上述变量的差异性进行比较，结果表明，两次调查间物种丰富度、Margalef 多样性指数、香浓指数表现为 4 月显著高于 9 月(P<0.1)。

表 2 洪泽湖底栖动物名录及各物种的密度、生物量和出现频率

底栖动物名录	密度(ind./m^2)	生物量(g/m^2)	出现频率
软体动物门			
长角涵螺	4.31	0.927	0.019
梨形环棱螺	15.38	22.674	0.154
光滑狭口螺	2.46	0.022	0.058
方格短沟蜷	3.08	0.947	0.058
中国淡水蛏	14.77	0.762	0.327
背角无齿蚌	1.23	167.385	0.038
河蚬	50.46	93.182	0.500
淡水壳菜	0.62	0.188	0.019
节肢动物门			
贝蠓属	0.62	0.000	0.019

红裸须摇蚊	1.23	0.015	0.038
直突摇蚊一种	3.08	0.001	0.019
Rheopelopia paramaculipennis	0.62	0.006	0.019
羽摇蚊	23.38	0.338	0.058
溪流摇蚊	0.62	0.001	0.019
喙隐摇蚊	1.23	0.002	0.038
暗肩哈摇蚊	13.54	0.005	0.115
多足摇蚊一种	0.62	0.000	0.019
软铗小摇蚊	129.85	0.062	0.365
钩虾属一种	179.69	0.327	0.481
太湖大螯蜚	20.92	0.151	0.154
沼虾属	0.62	0.109	0.019
日本拟背尾水虱	12.31	0.112	0.269
环节动物门			
小头虫科一种	16.00	0.131	0.231
石蠋虫属一种	8.00	0.048	0.192
寡鳃齿吻沙蚕	110.77	0.380	0.615
多毛纲一种	0.62	0.000	0.019
苏式尾鳃蚓	16.62	0.117	0.231
有栉管水蚓	3.69	0.000	0.038
霍夫水丝蚓	339.08	0.303	0.404
巨毛水丝蚓	7.38	0.016	0.135
克拉泊水丝蚓	7.38	0.004	0.058
正颤蚓	22.15	0.004	0.135
厚唇嫩丝蚓	33.85	0.007	0.231
颤蚓科一种	0.62	0.000	0.019
寡毛纲一种	3.08	0.000	0.058
斯必卡虫属一种	217.85	0.051	0.096

线形动物门			
线虫纲一种	0.62	0.000	0.019

表 3 洪泽湖底栖动物优势物种及其优势度

优势物种	调查期间	4 月	9 月
霍夫水丝蚓	0.108	0.113	0.099
钩虾	0.068		0.119
寡鳃齿吻沙蚕	0.054	0.037	0.076
软铗小摇蚊	0.037	0.066	
河蚬	0.020	0.025	
斯必卡虫		0.059	
厚唇嫩丝蚓		0.022	

2.4 群落结构比较

采用非度量多维标度排序(NMDS)对两次调查期间底栖动物群落进行比较，结果表明两次调查间底栖动物群落具备较强的区分度(stress=16.4)(图 3)。非参数多元方差分析(PerMANOVA)分析表明，两次调查间底栖动物群落差异显著($P<0.05$)。两次调查间同一样点底栖动物群落在程排序图上距离较远，表明底栖动物群落结构具有较大的季节差异性。

指示物种分析筛选出了造成两次调查期间底栖动物群落差异的关键物种(表 4)。具体为，4 月底栖动物群落指示物种为暗肩哈摇蚊、软铗小摇蚊、厚唇嫩丝蚓;9 月指示物种为石蠼虫、苏氏尾鳃蚓。

2.5 影响群落结构的关键因子

采用基于距离的冗余度分析(dbRDA)筛选影响底栖动物群落的环境因子(图 4,表 5),结果表明，4 月对底栖动物群落结构影响最大的环境因子为电导(Cond)、水温(T)叶绿素 a(Chla)和硅酸盐(Si)($P<0.1$);9 月底栖动物群落结构主要受磷酸盐(PO_4)、水深(Dep)和溶解氧(DO)影响($P<0.1$)。

3 讨论

理清跨流域调水调蓄湖泊底栖动物时空格局对区域生物多样性保护、生态系统健康评价等至关重要。自 20 世纪 90 年代以来，由于工农业、养殖业及城市化的快速发展，使得洪泽湖污染不断加重[28,29]。比较洪泽湖不同时期底栖动物优势类群组成可知(表 6),本世纪以来，底栖动物物种丰度和密度整体不高，体型较大的软体动物已从优势类群组成中逐渐消失。这和蔡永久等[30]的研究结果一致，即随着人类干扰的加剧(如富营养化),底栖动物群落逐渐被小个体的耐污种类所主导，且群落有趋于简单化的演替趋势。此外，大规模采砂活动也是促使区域底栖动物群落快速演替的重要因素。洪泽湖大规模的采砂作业始于 2012 年，到

2015 年 5 月，采砂船数量急剧增加到 600 艘；同时，为了提高产量，更大的钢挖泥船取代了之前的混凝土船，采集深度也从初期的 20～30m 增加到 40～50m[31,32],这种大规模采砂活动一直持续到 2017 年 3 月[33]。Zou 等[34]研究表明，大规模采砂活动导致洪泽湖水体营养盐、悬浮颗粒物、叶绿素 a 含量显著升高，底栖动物密度和生物量分别下降 89.80%和 99.54%。相比大规模采砂期间，本研究底栖动物物种数和密度均有较大幅度的提高，表明禁采后底栖动物物种丰度和密度正迅速恢复，但由于底质破坏、水深和悬浮颗粒物增加(影响底层光强和溶解氧含量)、水生植被尚未恢复等原因，前期大量死亡的软体动物(可认为是相对的 K 选择类群)短时间内恢复较为困难(图 5)。

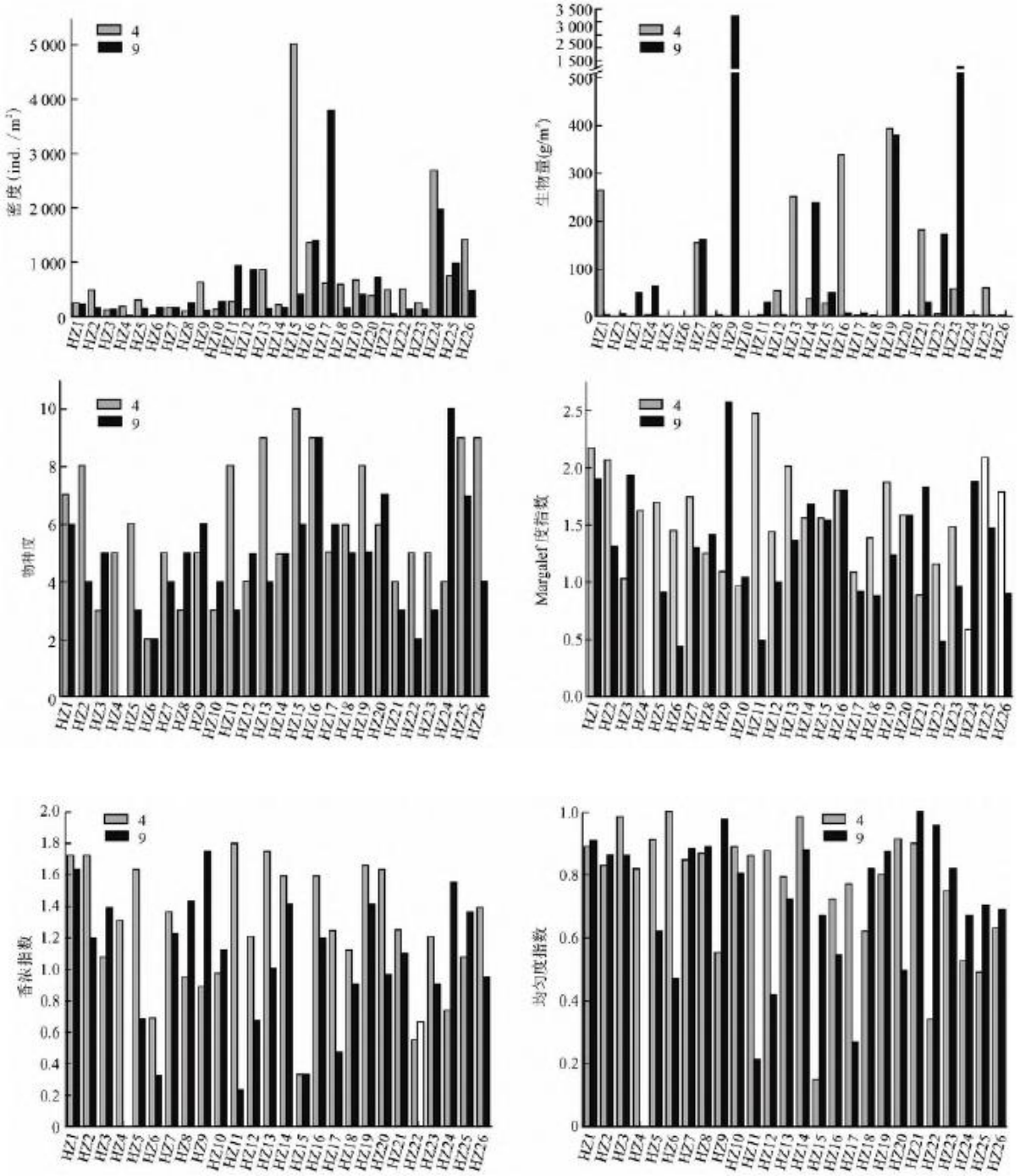

图 2 洪泽湖底栖动物密度、生物量和多样性指数空间格局

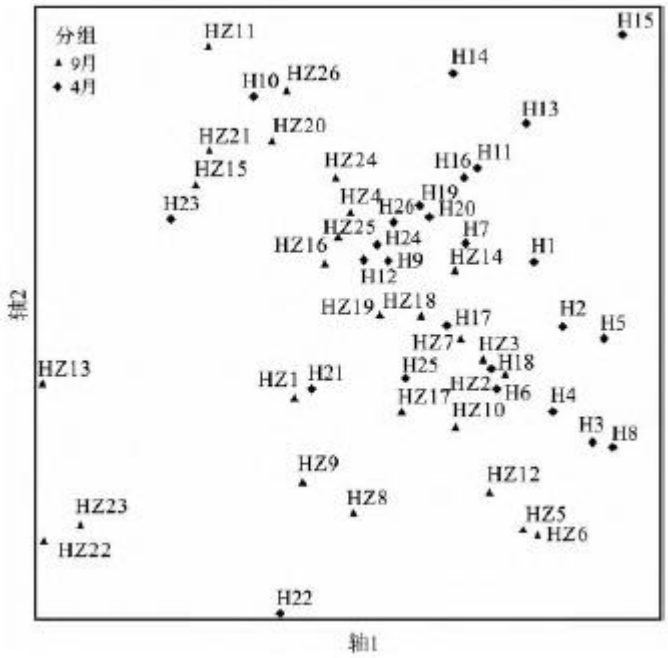

图 3 调查期间洪泽湖各样点底栖动物群落非度量多维标度排序(解析压力值=16.4)

表 4 两次调查间洪泽湖底栖动物群落指示物种

指示物种	最大值组	指示值	P 值
暗肩哈摇蚊	4 月	23.1	0.0246
软铗小摇蚊	4 月	36.3	0.0862
厚唇嫩丝蚓	4 月	46.2	0.0004
石蠋虫	9 月	32.0	0.0096
苏氏尾鳃蚓	9 月	34.2	0.0078

两次调查间底栖动物优势物种存在较大差异，如钩虾仅在 9 月被大量采集到。薛素燕等[37]研究表明，钩虾幼体孵化数量与温度密切相关，20℃时钩虾幼体孵化数量最多，存活率最高；生长速率 25℃时最大。本研究中，9 月水温显著高于 4 月(21.19±0.37VS17.00±1.58℃,P<0.05),因此，钩虾在 9 月被大量采集到。此外，一些季节性物种的存在也是造成群落差异的重要因素[38,39],如由于春季之后大量羽化，软铗小摇蚊(M.tener)丰度在 9 月明显减少。

表 5 基于距离的洪泽湖底栖动物群落冗余分析结果

环境因子	调查时间	Adj.R^2	Pseudo-F	P 值
电导(Cond)	4 月	0.092	3.55	0.003

水温(T)	4 月	0.138	2.28	0.026
叶绿素 a(Chla)	4 月	0.169	1.85	0.055
硅酸盐(Si)	4 月	0.219	1.75	0.070
溶解氧(DO)	9 月	0.094	3.59	0.002
水深(Dep)	9 月	0.152	1.92	0.055
磷酸盐(PO_4)	9 月	0.224	2.38	0.017

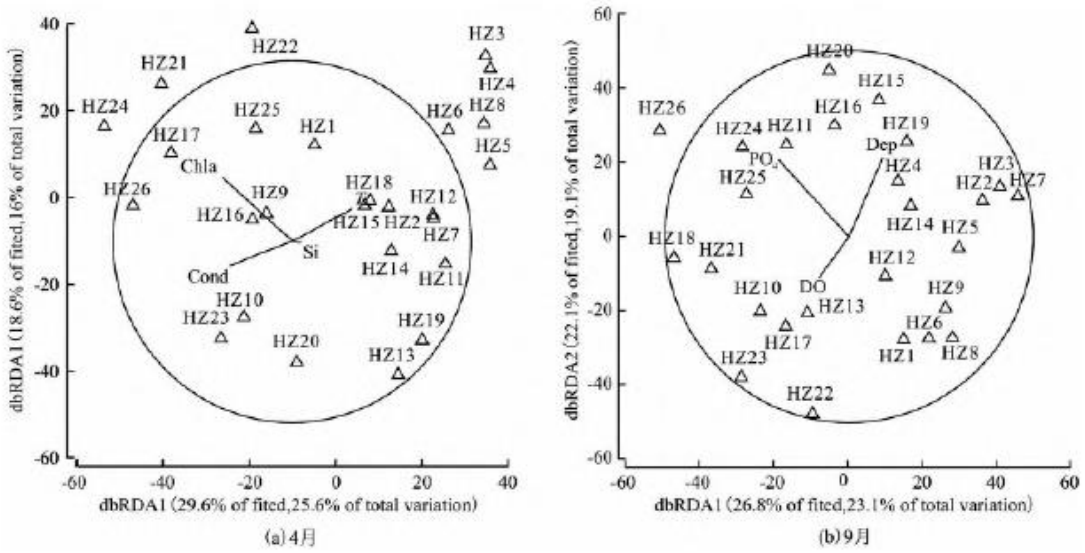

图 4 基于距离的底栖动物群落冗余度分析

4 月生物多样性指数显著高于 9 月，主要归因于：(1)4 月属于禁渔期，人为活动对湖泊底质的干扰相对较小；而 9 月大型拖网作业不仅严重破坏表层沉积物、降低了水体透明度，而且使得湖区水生植物生存空间丧失殆尽；(2)菹草等水生植物在 4 月大量生长，不仅增加了生境异质性，为无脊椎动物(底栖动物和浮游动物)提供生存和庇护场所(如腹足类主要附着在植物体上，以水生植物及其附着藻类为食),而且，可提高水体溶解氧含量和透明度，优化生境质量[39, 40]。(3)一些季节性物种在春、夏季的大量羽化，如摇蚊。

图 5 洪泽湖底栖动物样品中出现大量软体动物空壳

非度量多维标度排序(NMDS)从群落层面证实了两次调查期间底栖动物群落的差异性。通过排序可以看出，一方面，同一站位底栖动物群落于两次调查期间差异较大，另一方面，两次调查期间部分样点群落在排序图上表现出较强的相似性。这主要归因于：(1)环境因子的规律性变化(如季节变化)在进化过程中具有周期性和可预测性，因此，在底栖生物群落中有对这种干扰适应性的类群[41];(2)非季节性类群,尤其是其中一些优势类群，如霍甫水丝蚓,由于它们的生理适应性，在全年中均呈现较高的丰度，从而可不同程度地消除群落在时间尺度上的差异[42]。虽然生物参数和群落排序可以一定程度上反映广泛的生态模式或格局，但不同程度地掩盖了种间差异[43,44]。指示物种分析能够从物种层面揭示了造成群落差异的关键物种。暗肩哈摇蚊、软铗小摇蚊在 4 月大量被采集到主要受生活史影响。而石缨虫和苏氏尾鳃蚓相对丰度在 9 月显著升高，主要原因是：(1)季节性物种的大量羽化(主要是摇蚊);(2)经济性底栖动物被作为渔获物捕获(主要是软体动物);(3)一些类群由于环境变化迁移至采集深度以外，如喜冷物种红裸须摇蚊当水温高于 19℃时，绝大多数迁移至 20～40cm 的深度[45,46];本研究中厚唇嫩丝蚓、等非季节性物种在 9 月未被采集到，是否也是由于环境胁迫而迁移至采集深度以外，有待于进一步研究。

表 6 不同调查时间底栖动物群落指标比较

调查时间	物种数	密度(ind./m^2)	优势类群	参考文献
1987～1990 年	75			朱松泉等[35]
2005 年	8	288.3	河蚬、赤豆螺	严维辉等[36]
2008～2009 年	12	212.5	河蚬、寡鳃齿吻沙蚕、背蚓虫、苏式尾鳃蚓	Zou 等[34]
2010～2011 年	14	45.5	河蚬、苏式尾鳃蚓、羽摇蚊、霍甫水丝蚓	张超文等[14]
2016 年	16	137	寡鳃齿吻沙蚕、背蚓虫、大螯蜚	Zou 等[34]
2018 年	37	634	霍甫水丝蚓、斯必卡虫、钩虾、软铗小摇蚊、齿吻沙蚕	本研究

冗余度分析(dbRDA)明确了影响底栖动物分布的关键因子。电导率是水体离子浓度变化的反映，可以表征人类活动对湖泊生态系统的干扰强度，指示水体富营养化[47]及污染水平[48]。如 Li 等[49]对广东水库的研究表明，电导与氮、磷含量具有显著的相关性，且富营养化程度越高，氮、磷对电导的贡献率越高。洪泽湖入湖河流主要位于湖区的西部和南部(如淮河、怀洪新河、濉河、徐洪河等，这些河流入湖水量占总入湖水量的 95%以上),因此，污染物主要由西南部汇入湖区，从而使得电导率在空间分布上产生差异，影响底栖动物分布格局。营养盐(如磷酸盐)、叶绿素 a 是反映水体营养化水平的重要因子；而富营养化通常会引起一系列生态问题，如栖境同质化、植被覆盖度和溶解氧含量降低，从而降低底栖动物随机过程，促进群落同质化[50]。一些对营养盐富集和缺氧环境敏感的物种会消失，如河蚬[51],符合“生态位选择”和“生境过滤”理论。许多研究已经证实底栖动物不同类群对水深有着不同的适应性[52,53]。通常伴随水深的增加，其它相关指标也会发生相应的变化(如溶解氧、水温),如喜盐摇蚊喜生活在深水区(9.0～27.0m),而库蠓通常仅在浅水水体中生活(通常小于 0.5m)[52]。硅酸盐浓度对底栖动物群落影响显著，主要因为其能够直接决定硅藻生物量，对浮游植物群落构建及抑制水体富营养化具有重要作用(硅藻可抑制蓝、绿藻的生长)[54]。

综上，本研究系统分析了洪泽湖底栖动物群落格局，明确了造成调查期间底栖动物群落差异的关键物种，以及影响底栖动物群落的主要环境因子。但同时，一些科学问题仅依靠本研究尚不能解释，如厚唇嫩丝蚓(T.mastix)等非季节性物种在 9 月未被采集到，有必要更加深入地开展针对性调查研究。

参考文献：

[1]RODELL M,FAMIGLIETTI J S,WIESE D N,et al.Emerging trends in global freshwater availability[J].Nature,2018,557(7707):651-659.

[2]GOZLAN R E,KARIMOV B K,ZADEREEV E,et al.Status,trends,and future dynamics of freshwater ecosystems in Europe and Central Asia [J].Inland Waters,2019,9 (1):78-94.

[3]ZHAO X,LIU J,LIU Q,et al.Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112 (4):1031-1035.

[4]ZHUANG W.Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects:A review[J].Environmental Science and Pollution Research,2016,23 (13):12867-12879.

[5]龚志军，谢平，唐汇涓，等.水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响[J].水生生物学报，2001,25(3):210-216.

[6]鲍毅新，葛宝明，郑祥，等.温州湾天河滩涂大型底栖动物群落分布与季节变化[J].动物学报，2006,52(1):45-52.

[7]ODOUNTAN H,ABOU Y.Structure and composition of macroinvertebrates during flood period of the Nokoue Lake, Benin[J].Open Journal of Ecology,2016,6 (2):62-73.

[8]蒋万祥，贾兴焕，周淑婵，等.香溪河大型底栖动物群落结构季节动态[J].应用生态学报，2009,20(4):923-928.

[9]HEINO J,LOUHI P,MUOTKA T.Identifying the scales of variability in stream macroinvertebrate abundance, functional composition and assemblage structure [J].Freshwater Biology,2004,49 (9):1230-1239.

[10]FIERRO P,ARISMENDI I,HUGHES R,et al.A benthic macroinvertebrate multimetric index for chilean mediterranean streams[J].Ecological Indicators,2018,91:13-23.

[11]SANDERCOCK M.2013.The role of patterns of urban development in stream benthic index of biotic integrity score[J].International Journal of Hydrogen Energy,36 (13):7431-7442.

[12]慕林青，张海萍，赵树旗，等.永定河底栖动物生物完整性指数构建与健康评价[J].环境科学研究，2018,31(4):697-707.

[13]ROSENBERG2004,D.Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates[M].Chapman and Hall Press.1993.

[14]张超文，张堂林，朱挺兵，等.洪泽湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].水生态学杂志，2012,33(3):27-33.

[15]CHU E G.Analysis on hydrological characteristic for Hongze Lake[J].Hydrology,2001,21:56-59.

[16]WANG S,DOU H.Annals of Chinese lakes[M].Science Press,Beijing,1998.

[17]ZHANG S.The countermeasure research on the present condition and problems of fishery resources and

environment of the Hongze Lake [D].Soochow University,2010.

[18]GUO C,CHEN Y,LI W,et al.Food web structure and ecosystem properties of the largest impounded lake along the eastern route of china’s south-to-north water diversion project [J].Ecological Informatics,2017,43:174-184.

[19]EPLER J H.Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina [M].America:EPA,2001.

[20]MORSE J C,YANG L F,TIAN L X.Aquatic insects of China Useful for monitoring water quality [M].Nanjing:Hohai University Press,1994.

[21]BRINKHURST R O.Guide to the freshwater aquatic microdrile Oligochaetes of North America [M].Freshwater Science,1987,6 (1):1-259.

[22]刘月英，主编.中国经济动物志：淡水软体动物[M].北京：科学出版社，1979.

[23]王俊才，王新华.中国北方摇蚊幼虫[M].北京：中国言实出版社，2011.

[24]蔡庆华.水域生态系统观测规范[M].北京：中国环境科学出版社，2007.

[25]相华，朱中竹，商书芹，等.小清河济南段浮游动物群落结构空间变化特征[J].河北渔业，2020(1):38-43.

[26]ANDERSON M J,GORLEY R N,CLARKE K R.PERMANOVA+for PRIMER:Guide to software and statistical methods [M].UK:PRIMER-E,Plymouth,2008.

[27]DUFRÊNE M,LEGENDRE P.Species assemblages and indicator species:the need for a flexible asymmetrical approach [J].Ecological Monographs,1997,67,345-366.

[28]叶春，李春华，王博，等.洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨[J].湖泊科学，2011,23(5):725-730.

[29]舒卫先，张云舒，韦翠珍.洪泽湖浮游藻类变化动态及影响因素[J].水资源保护，2016,5:115-122.

[30]蔡永久，姜加虎，张路，等.长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性[J].湖泊科学，2010,22(6):811-819.

[31]严登余.洪泽湖采砂管理分析[J].江苏科技信息，2015,472(31):55-56.

[32]CAO Z G,DUAN H T,FENG L,et al.Climate-and human-induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales [J].Remote Sensing of Environment,2017,192:98-113.

[33]DUAN H T,CAO Z G,SHEN M,et al.Detection of illicit sand mining and the associated environmental effects in China’s fourth largest freshwater lake using daytime and nighttime satellite images [J].Science of the Total Environment,2018,647:606-618.

[34]ZOU W,TOLONEN K T,ZHU G,et al.Catastrophic effects of sand mining on macroinvertebrates in a large shallow lake with implications for management [J].Science of the Total Environment,2019,695:133706.

[35]朱松泉，窦鸿身.洪泽湖水资源和水生生物资源[M].合肥：中国科学技术大学出版社，1993.

[36]严维辉，潘元潮，郝忱，等.洪泽湖底栖生物调查报告[J].水生态学杂志，2007,27(3):65-66.

[37]薛素燕，赵法箴，方建光，等.温度和盐度对中华原钩虾幼体孵化、存活及生长的影响[J].水产学报，2012,36(7):1094-1101.

[38]HANCOCK M A,BUNN S E.Population dynamics and life history of Paratya australiensis kemp,1917 (Decapoda: Atyidae) in upland rainforest streams,south-eastern Queensland,Australia [J].Marine & Freshwater Research,1997,48 (4):361-369.

[39]DUBE T,DENECKER L,VAN VUREN J H J,et al.Spatial and temporal variation of invertebrate community structure in flood-controlled tropical floodplain wetlands [J].Journal of Freshwater Ecology,2017,32 (1):1-15.

[40]DECLERCK S,VANDERSTUKKEN M,PALS A,et al.Plankton biodiversity along a gradient of productivity and its mediation by macrophytes [J].Ecology,2007,88:2199-2210.

[41]JIANG X,XIONG J,XIE Z.Longitudinal and seasonal patterns of macroinvertebrate communities in a large undammed river system in southwest China [J].Quaternary International,2017,440:1-12.

[42]JOHNSON R C,CARREIRO M M,JIN H S,et al.Within-year temporal variation and life-cycle seasonality affect stream macroinvertebrate community structure and biotic metrics [J].Ecological Indicators,2012,13:206-214.

[43]MAGURRAN A E.Measuring biological diversity [M].Oxford:Blackwell Science Ltd,2004.

[44]WEISS J M,REICE S R.The aggregation of impacts:Using Species-Specific Effects to Infer Community-Level Disturbances [J].Ecological Applications,2005,15 (2):599-617.

[45]舒凤月，张承德，张超，等.南四湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J].生态学杂志，2014,33(1):184-189.

[46]ZOU W,CAI Y,TOLONEN K T,et al.The adaptations to tube-dwelling life of propsilocerus akamusi (Diptera: Chironomidae) larvae and its eutrophication-tolerant mechanisms [J].Limnologica Ecology & Management of Inland Waters,2019,77:125684.

[47]KIM J,FURUMAI H.Improved calibration of a rainfall-pollutantrunoff model using turbidity and electrical conductivity as surrogate parameters for total nitrogen [J].Water and Environment Journal,2013,27:79-85.

[48]WU T,ZHU G,ZHU M,et al.Use of conductivity to indicate long-term changes in pollution processes in lake Taihu,a large shallow lake [J].Environmental Science and Pollution Research,2020,27:21376-21385.

[49]李秋华，林秋奇，韩博平.广东大中型水库电导率分布特征及其受N、P营养盐的影响[J].生态环境，2005(1):16-20.

[50]CHASE J M.Drought mediates the importance of stochastic community assembly [J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2007,104:17430-17434.

[51]SALOOM M E,DUNCAN R S.Low dissolved oxygen levels reduce anti-predation behaviours of the freshwater clam Corbicula fluminea [J].Freshwater Biology,2020,50 (7):1233-1238.

[52]MENG X,JIANG X,XIONG X,et al.Mediated spatio-temporal patterns of macroinvertebrate assemblage associated with key environmental factors in the Qinghai lake area,China [J].Limnologica,2016,56:14-22.

[53]USLU U,DIK B.Vertical distribution of culicoides larvae and pupae [J].Medical and Veterinary Entomology,2010,20 (3):350-352.

[54]孙凌，金相灿，杨威，等.硅酸盐影响浮游藻类群落结构的围隔试验研究[J].环境科学，2017,28(10):24-29.