

DOI: 10.20103/j.stxb.202407311807

张祖强, 刘博毅, 毛雪茹, 张润雨, 曾晨军, 朱琳, 施文卿. 行船扰动对京杭运河镇江段浮游动物群落的影响. 生态学报, 2025, 45(10): 5012-5024.
Zhang Z Q, Liu B Y, Mao X R, Zhang R Y, Zeng C J, Zhu L, Shi W Q. Study on the impact of shipping-related disturbances on the zooplankton community in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 5012-5024.

行船扰动对京杭运河镇江段浮游动物群落的影响

张祖强¹, 刘博毅¹, 毛雪茹¹, 张润雨¹, 曾晨军², 朱琳¹, 施文卿^{1,*}

1 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044

2 广东省水利水运科学研究所, 广州 510635

摘要: 浮游动物作为初级消费者之一, 在维持水生态系统健康发挥着关键作用。内河航运作为一种常用的运输方式之一, 其带来的水生态环境影响日益引起关注。通过对比京杭运河镇江段干流及其自然支流, 探究了行船扰动对河流浮游动物群落的影响。结果表明, 行船扰动不仅显著降低了河流浮游动物密度和生物量 ($P < 0.05$), 而且改变了其群落季节特征。与自然支流相比, 航运干流浮游动物的密度和生物量分别下降 79.7% 和 82.0%; 多样性季节变化变弱, Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数季节变异系数降低。此外, 行船扰动还改变了浮游动物的季节演替规律, 主要优势种由“长额象鼻溠-颈沟基合溠-无节幼体-角突臂尾轮虫”的春夏秋冬季节演替规律转变为了“无节幼体-无节幼体-无节幼体-角突臂尾轮虫”。研究结论不仅为京杭运河水生态系统保护与修复提供理论支持, 也为内河航运的生态环境效应评估提供依据。

关键词: 京杭运河; 浮游动物; 航运; 多样性; 优势种

Study on the impact of shipping-related disturbances on the zooplankton community in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal

ZHANG Zuqiang¹, LIU Boyi¹, MAO Xueru¹, ZHANG Runyu¹, ZENG Chenjun², ZHU Lin¹, SHI Wenqing^{1,*}

1 School of Environment Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China

Abstract: Zooplankton, as primary consumers, are essential for maintaining aquatic ecosystem health and function. Inland waterway transportation has garnered increasing attention due to its significant ecological impacts on aquatic ecosystems. This study examined shipping-induced water column disturbances on zooplankton communities along the Beijing-Hangzhou Grand Canal, comparing the shipping-affected mainstream with two undisturbed tributaries. Results demonstrated significant reductions in zooplankton density and biomass ($P < 0.05$), along with altered seasonal community composition patterns. The density and biomass of zooplankton, respectively, were 79.7% and 82.0% lower in the disturbed mainstream than in the tributaries. Mainstream diversity exhibited suppressed seasonal variation, evidenced by reduced seasonal variation coefficients in the Shannon-Wiener, Pielou evenness, and Margalef richness indices relative to tributaries. Additionally, ship disturbances changed the seasonal succession patterns of zooplankton, with the main dominant species shifting from a seasonal cycle of “*Bosmina longispina*-*Bosminopsis deitersi*-*Nauplius*-*Brachionus angularis*” in spring, summer, autumn, and winter to “*Nauplius*-*Nauplius*-*Nauplius*-*Brachionus angularis*.” These findings offer theoretical foundations for Beijing-Hangzhou Grand Canal conservation and restoration, while establishing an assessment framework for inland waterway shipping impacts.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42277060)

收稿日期: 2024-07-31; 网络出版日期: 2025-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wqshi@nuist.edu.cn

Key Words: Beijing-Hangzhou Grand Canal; zooplankton; shipping activities; diversity; dominant species

浮游动物是漂浮或游动在水中的微小动物群体,是河流生态系统的重要组成部分^[1-2]。它们不仅是浮游植物的主要消费者,也是许多鱼类和其他大型水生生物的食物来源,作为食物链中的关键生物,其种类和数量对水生生态系统的平衡与稳定具有重要影响^[3-5]。此外,浮游动物对水环境因子的变化敏感,其群落结构能够指示水环境的变化^[6]。因此,深入了解浮游动物群落结构特征,对于评估河流生态系统的健康具有重要意义。

在河流生态系统中,浮游动物生长与繁殖受到多种环境因子的调节,包括水体营养水平、温度、光照、盐度和浊度等环境因子,同时也受到水动力等物理条件的影响^[7-8]。Visser 等(2002)研究表明,当水体超过某一临界流速,其产生的紊动能显著降低浮游动物捕食成功率,从而抑制其生长^[9]。内河航运因其价格低、运载能力大等优势,在世界各地被广泛应用,对区域经济发展发挥着重要作用。船舶行驶过程中,螺旋桨高速旋转带来的剧烈扰动产生的生态环境影响日益引起关注。Huang 等(2022)研究表明,航运产生的波浪和湍流对岸线产生严重侵蚀作用^[10]。行船扰动不仅改变了河流物理状态,而且改变了水环境条件,可能会影响浮游动物的生长繁殖,从而引起浮游动物群落结构的变化。Gascón 等(2007)研究表明,水文扰动破坏了浮游动物栖息地环境,导致浮游动物多样性的下降^[11]。虽然有研究报道了运河中浮游动物群落特征^[12-15],但目前仍缺少行船扰动对其影响的分析,这制约了内河航运生态环境效应的评估。

本研究以浮游动物为对象,通过对比京杭运河镇江段航运干流和邻近自然支流的浮游动物密度、生物量、物种组成、优势种、多样性等关键指标,探究行船扰动对河流浮游动物群落结构的影响特征;结合理化因子分析,揭示行船扰动对浮游动物群落结构的影响机制。研究结果有望为内河航运的生态环境效应评估和运河生态系统的保护与治理提供一定理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究区域为京杭大运河镇江段及其邻近支流。京杭大运河是世界上最长的人工运河,全长 1797 km,宽度为 50—200 m,深度为 2—5 m。它地跨 8 省 24 市,每年运输超过 5 亿 t 的货物,是连接中国南北经济交流的重要通道^[16]。本研究区域位于经济发达的江苏省境内,属于最为繁忙的河段之一。由于频繁的航运活动(约 45 艘船/小时),该河段水面始终处于湍流状态,其水面波平均振幅为 0.15 m,而其邻近支流处于静水状态,平均振幅仅为 0.04 m^[17]。研究区域河段沿岸居民区和工业企业集中,排放大量生活污水和工业尾水,水质处于Ⅲ—Ⅳ类水质标准^[18-19]。本研究区域属于亚热带季风气候,年平均气温为 17°C,年降水量约为 1000—1400 mm。

1.2 样品采集

本研究共开展春(2022 年 5 月)、夏(2022 年 8 月)、秋(2022 年 11 月)、冬(2023 年 1 月)四个季节野外调研。采样点共有 17 个,包括京杭运河干流 9 个(JH1—JH9)和自然支流 8 个(JZ1—JZ8)(图 1)。

水样使用有机玻璃采水器采集,当水深<2 m 时,在表层下 0.5 m 采集;水深为>2 m 时,分别在表层下 0.5 m 和底层上 0.5 m 各采一次,然后充分混匀^[20]。将 500 mL 水样装入 500 mL PET 材质的采集瓶保存,用于水质分析。浮游动物定性样品采用 25#(孔径 0.064 mm)浮游生物网在水中呈“∞”字型拖动 3—5 min,将滤去水后的样品装入 100 mL 样品瓶中,现场加入 4%的甲醛溶液固定。浮游动物定量样品在各采样点取样 1 L,现场加入 10 mL 鲁哥试剂固定,用于分析轮虫;采集 20 L 水样,经 25#浮游生物网过滤后装入 100 mL 样品瓶中并加入 4%的甲醛溶液固定,用于分析枝角类和桡足类。

1.3 样品分析

浮游动物定性样品参照《淡水微型生物与底栖动物图谱》(第二版)^[21]、《淡水浮游生物研究方法》^[22]、

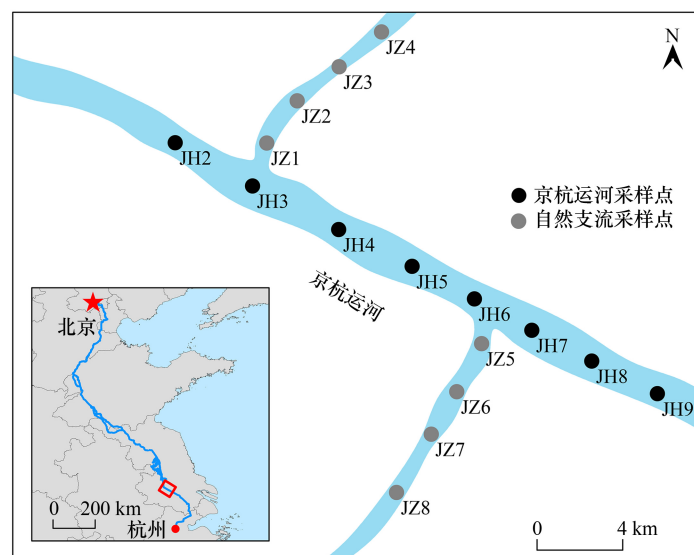


图1 采样点位示意图

Fig.1 The location of sampling sites

JH: 京杭干流;JZ: 京杭支流

《中国淡水轮虫志》^[23]、《中国动物志淡水枝角类》^[24]、《中国动物志淡水桡足类》^[25],在光学显微镜(Axio Imager 4.2, Carl Zeiss AG, German)下进行鉴定。

轮虫定量样品带回实验室后静置 48 h,用虹吸管吸取上清液并浓缩定容至 30 mL,在显微镜下对轮虫进行鉴定。鉴定前将样品充分摇匀,用 1 mL 计数框全片计数,每瓶样品计数两片,取平均数,每片结果与平均数之差不超过 $\pm 15\%$,若超过 $\pm 15\%$ 则进行第 3 片计数,最后将 2 个相似的平均数作为计算结果。枝角类和桡足类定量样品鉴定前用移液枪吸取上清液至样品体积为 30—40 mL,并充分混匀样品后,在显微镜下对枝角类和桡足类进行鉴定,用 5 mL 计数框计数全部计数^[26]。

水温、溶解氧和浊度采用便携式多参数分析仪(HQ40D, Hach Company, USA)和便携式浊度仪(2100Q, Hach Company, USA)进行现场测定。水体总氮、总磷是根据《水和废水监测分析方法》(第四版)分别采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法和过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法进行测定^[27]。

1.4 浮游动物分析

1.4.1 生物量计算

常见的浮游动物个体湿重参照《淡水浮游生物研究方法》^[22]、《湖泊富营养化调查规范》(第二版)^[28]和《湖泊生态调查观测与分析》^[29],其他浮游动物用与其形态相似的几何体积公式求体积,再乘以水的密度估算其个体湿重^[1]。

1.4.2 优势种与多样性分析

浮游动物优势种以优势度(Y)指数判断,当 $Y \geq 0.02$ 认定为优势种。浮游动物多样性分析采用 Shannon-Wiener 指数(H')^[30]、Pielou 均匀度指数(J)^[31]和 Margalef 丰富度指数(D)^[32]。各指标计算如下:

$$Y = (N_i/N)f_i \quad (1)$$

$$H' = - \sum (N_i/N) \log_2(N_i/N) \quad (2)$$

$$J = H'/\log_2 S \quad (3)$$

$$D = (S-1)/\log_2 N \quad (4)$$

式中, N_i 为第 i 种生物的个体数, N 为所有种类的总个体数, f_i 为第 i 种生物在采样点出现的频率, S 为总物种数量。

浮游动物 H' 、 J 、 D 指数四个季节变异系数(V_σ)计算如下:

$$V_\sigma = \sigma/\mu \tag{5}$$

式中, σ 为标准差, μ 为平均值。

1.5 数据统计分析

利用双因素方差分析和最小显著性差异法对环境因子、浮游动物密度、浮游动物生物量进行时空差异显著性分析,显著性水平设为 0.05。采用 Pearson 相关性分析法分析了浮游动物生物量和密度与环境因子的关系。相关统计分析采用 Origin 2023 软件进行处理。浮游动物物种与环境因子的主成分分析(PCA)采用 Canoco 5.0 软件完成。在进行 PCA 分析之前,首先通过趋势对应分析(DCA)确定排序轴的梯度。当 DCA 分析结果显示排序轴中最大梯度小于 3 时,选择 PCA 分析进一步探讨浮游动物物种与环境因子之间的关系^[33]。

2 结果

2.1 水体基本理化指标

不同季节京杭运河镇江段干流与支流水温、溶解氧、浊度、总氮和总磷等理化指标分析如表 1 和表 2 所示。水温和溶解氧均具有显著季节差异($P<0.05$),但干流与支流无显著差异($P>0.05$);水温春夏季高于秋冬季,水体溶解氧含量春夏低于秋冬季。水体浊度具有显著季节差异($P<0.05$),其中夏季浊度最低,同时干流浊度显著高于支流浊度($P<0.05$)。水体总氮在季节和区域上均无明显变化($P>0.05$)。水体总磷在季节上有显著差异($P<0.05$),其中,冬季总磷最高,而干流与支流无显著差异($P>0.05$)。

表 1 不同季节京杭运河镇江段干流与支流水体理化指标

Table 1 Water physiochemical parameters of the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries in different seasons						
季节 Season	区域 Region	水温 WT/(℃)	溶解氧 DO/(mg/L)	浊度 Turb/(NTU)	总氮 TN/(mg/L)	总磷 TP/(mg/L)
春季 Spring	干流	22.8±0.9	6.6±0.7	53.5±16.5	2.8±0.3	0.3±0.0
	支流	24.9±1.3	9.1±3.3	30.9±18.0	3.0±1.6	0.5±0.3
夏季 Summer	干流	29.8±0.7	5.5±0.4	17.1±10.3	2.4±0.3	0.1±0.0
	支流	29.3±0.7	4.2±1.2	9.8±7.3	2.9±1.1	0.2±0.0
秋季 Autumn	干流	17.2±3.3	9.8±2.2	62.5±17.3	2.5±1.5	0.1±0.0
	支流	15.7±2.5	8.5±3.7	18.0±6.8	3.9±1.9	0.2±0.1
冬季 Winter	干流	9.7±0.5	8.9±0.7	44.4±12.7	3.3±0.3	0.6±0.7
	支流	8.4±1.6	12.3±4.2	28.9±13.6	4.1±1.0	0.3±0.1

WT:水温 Water temperature;DO:溶解氧 Dissolved oxygen;Turb:浊度 Turbidity;TN:总氮 Total nitrogen;TP:总磷 Total phosphorus

表 2 京杭运河镇江段干流与支流环境因子双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of environmental factors in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries						
指标 Index	季节 Season			区域 Region		
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
水温 WT/(℃)	3	307.373	<0.0001	16	0.726	0.754
溶解氧 DO/(mg/L)	3	23.702	<0.0001	16	1.012	0.461
浊度 Turb/(NTU)	3	14.142	<0.0001	16	4.566	<0.0001
总氮 TN/(mg/L)	3	2.668	0.058	16	1.217	0.290
总磷 TP/(mg/L)	3	5.976	0.002	16	0.928	0.545

df:自由度 Degree of freedom

2.2 浮游动物密度和生物量

与支流相比,干流浮游动物密度和生物量显著降低($P<0.05$,表 3),平均分别下降了 79.7%和 82.0%。干支流浮游动物密度和生物量表现出明显季节特征($P<0.05$,表 3)。干流浮游动物密度和生物量呈现出春季>

秋季>夏季>冬季的季节变化,而支流密度呈现出春季>夏季>冬季>秋季,生物量呈现出春季>夏季>秋季>冬季的季节变化(图2)。春季,干支流密度分别为(87.8±59.3)个/L和(645.3±778.3)个/L,生物量分别为(2.4±2.5)mg/L和(12.4±14.5)mg/L;夏季,干支流密度分别为(40.3±33.3)个/L和(276.9±310.3)个/L,生物量分别为(0.4±0.6)mg/L和(7.9±9.1)mg/L;秋季,干支流密度分别为(41.9±33.9)个/L和(43.8±23.3)个/L,生物量分别为(0.7±0.5)mg/L和(1.5±1.1)mg/L;冬季,干支流密度分别为(11.1±11.6)个/L和(118.1±194.2)个/L,生物量分别为(0.1±0.1)mg/L和(0.2±0.2)mg/L。

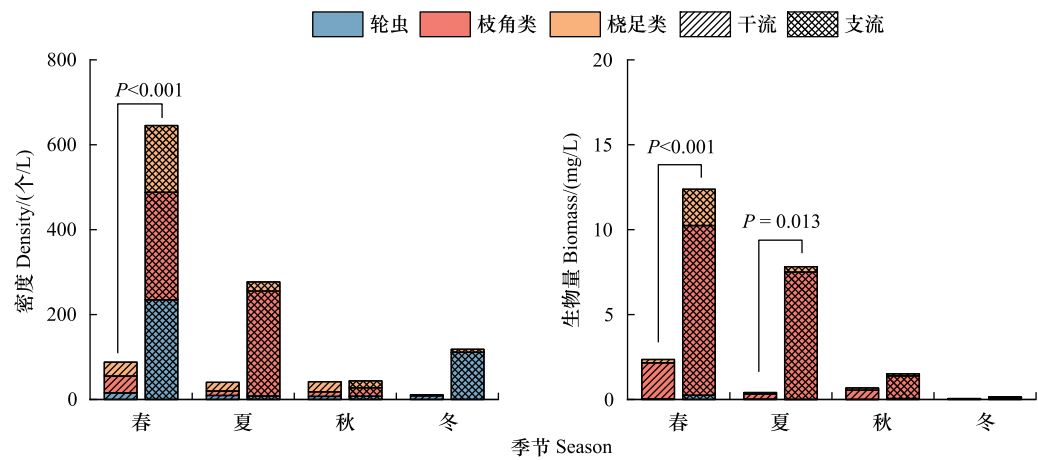


图2 不同季节京杭运河镇江段干流与支流水体浮游动物密度和生物量

Fig.2 Zooplankton density and biomass in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries in different seasons

表3 京杭运河镇江段干支流浮游动物密度和生物量双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA of Zooplankton density and biomass in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries

指标 Index	季节 Season			区域 Region		
	df	F	P	df	F	P
密度 Density/(个/L)	3	4.523	0.007	16	2.738	0.004
生物量 Biomass/(mg/L)	3	4.819	0.005	16	2.011	0.032

2.3 浮游动物种类组成

研究区域共检出浮游动物3大类61种,其中轮虫种类最为丰富,有26种,占比42.6%,枝角类次之,占比31.1%,桡足类最少,占比26.2%(图3)。总体上,与支流相比,干流轮虫种类占比增加,桡足类种类占比下降,但桡足类密度表现出增加(图3)。春季,干支流浮游动物种类分布均匀;夏季干流类轮虫较多,占比为64.7%,支流较为平均;秋季干流种类占比较为平均,支流种类枝角类占比较多,为42.9%;冬季干支流则都是轮虫种类较多,分别占66.7%和65%(图3)。春秋季轮虫、枝角类与桡足类密度相对平均;夏季干流桡足类占比最高,为50.3%,支流则是枝角类占绝对优势,占比89.3%;冬季轮虫占主要优势,干流为81.7%,支流为94.0%(图3)。

2.4 浮游动物优势种和多样性

除夏季干流和支流优势种类数相同外,春、秋、冬季支流优势种类数均多于干流(表4)。春季,干流优势种为长额象鼻溞(*Bosmina longispina*)、汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)和无节幼体(*Nauplius*),支流优势种为角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)、壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceus*)、长额象鼻溞、颈沟基合溞(*Bosminopsis deitersi*)、中剑水蚤(*Mesocyclops* sp.)和无节幼体;夏季,干流和支流优势种均为长额象鼻溞、颈沟基合溞、广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)和无节幼体;秋季,干流优势种与夏季相同,支流优势种为晶囊轮虫(*Ashlanchna* sp.)、长额象鼻溞、角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)、多刺裸腹溞(*Moina macrocopa*)、老年低

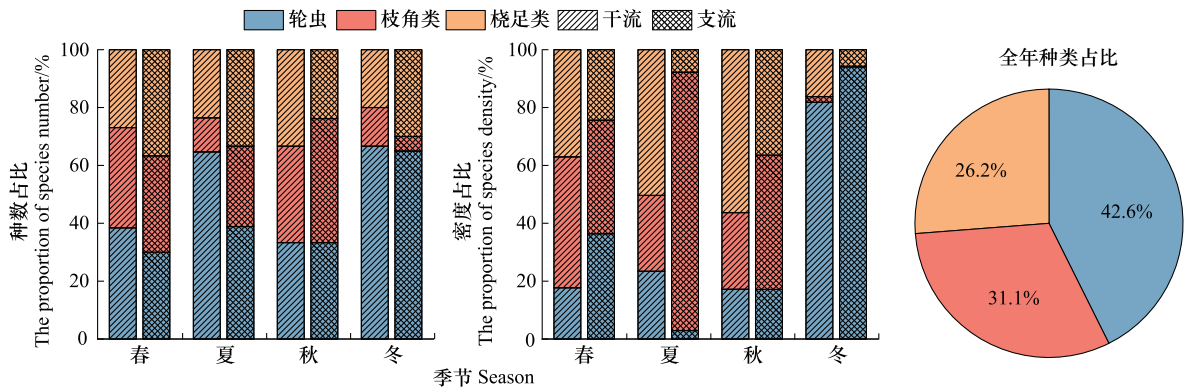


图 3 不同季节京杭运河镇江段干流与支流浮游动物种类组成

Fig.3 Composition of zooplankton communities in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries in different seasons

额蚤(*Simocephalus vetulus*)、广布中剑水蚤和无节幼体;冬季,干流优势种为角突臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、长三支轮虫(*Filinia longiseta*)和无节幼体,支流优势种为角突臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、疣毛轮虫(*Synchaeta* sp.)和无节幼体(表 4)。浮游动物名目详见附表 1。

表 4 不同季节京杭运河镇江段干流与支流浮游动物优势种

Table 4 Dominant species of zooplankton in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries in different seasons									
类别 Categories	种属名 Species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
		干流	支流	干流	支流	干流	支流	干流	支流
轮虫 Rotifer	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>		0.04					0.36	0.66
	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>		0.12						0.05
	晶囊轮虫 <i>Ashlanchna</i> sp.						0.04		
	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>							0.03	0.03
	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>								0.06
	疣毛轮虫 <i>Synchaeta</i> sp.								0.05
	长三支轮虫 <i>Filinia longiseta</i>							0.02	
枝角类 Cladocera	长额象鼻溞 <i>Bosmina longispina</i>	0.23	0.16	0.11	0.03	0.07	0.03		
	颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>		0.03	0.05	0.53	0.02			
	角突网纹溞 <i>Ceriodaphnia cornuta</i>						0.05		
	多刺裸腹溞 <i>Moina macrocopa</i>						0.04		
	老年低额溞 <i>Simocephalus vetulus</i>						0.08		
桡足类 Copepoda	广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>			0.03	0.02	0.03	0.02		
	中剑水蚤 <i>Mesocyclops</i> sp.		0.03						
	汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	0.04							
	无节幼体 <i>Nauplius</i>	0.27	0.10	0.43	0.03	0.38	0.21	0.09	0.04

优势度指数 $Y \geq 0.02$ 为优势种

与支流相比,干流浮游动物多样性季节性特征不明显,支流中 H' 、 J 、 D 指数变异系数(V_e)高于干流。干流中 H' 、 J 、 D 指数变异系数分别为 0.13、0.08、0.15,支流分别为 0.51、0.47、0.20。支流夏冬季多样性低而春秋高。支流春、夏、秋、冬 H' 分别为 2.54、0.75、2.61 和 1.34; J 分别为 0.75、0.26、0.86 和 0.53, D 分别为 3.57、2.21、3.41 和 2.77。干流中,春、夏、秋、冬 H' 分别为 2.27、1.99、2.15 和 1.67; J 分别为 0.70、0.70、0.74 和 0.62, D 分别为 3.75、2.72、2.87 和 3.04。

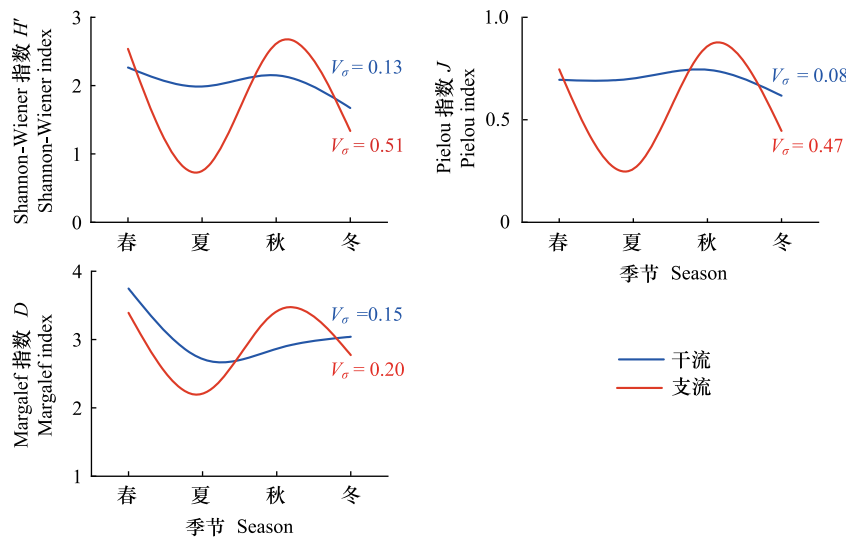


图4 京杭运河镇江段干流与支流浮游动物多样性

Fig.4 Zooplankton diversity in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries

2.5 浮游动物密度和生物量与环境因子的相关性

Pearson 相关性分析结果表明,干流中,浮游动物密度和生物量与水温等环境因素呈正相关,与溶解氧等环境因素呈负相关,但均不显著(图5),而自然支流浮游动物密度和生物量与水温 and 总磷显著正相关($P < 0.01$,图5)。

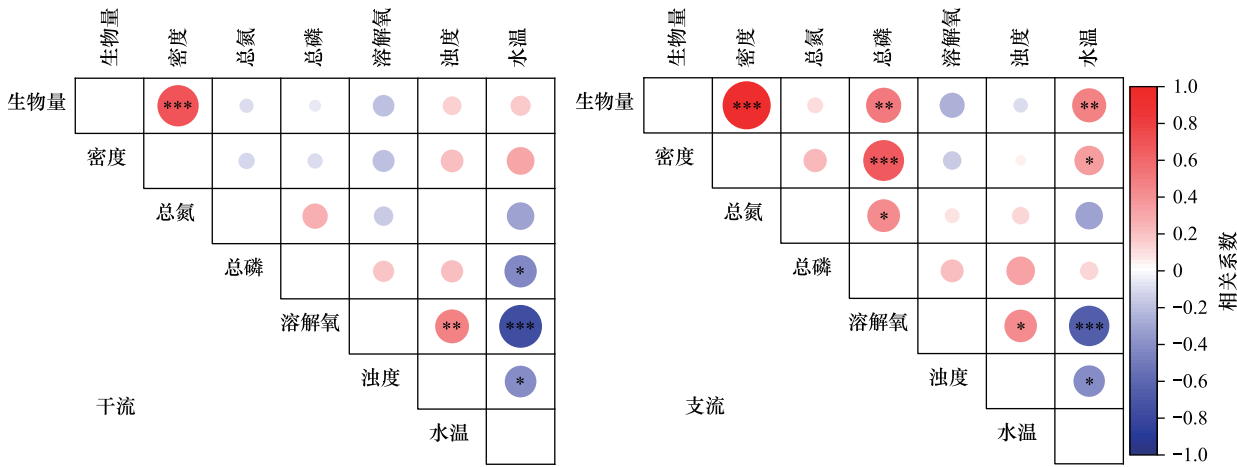


图5 京杭运河镇江段干流与支流浮游动物密度和生物量与环境因子的相关性

Fig.5 Correlation between zooplankton density as well as biomass with environmental factors in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries

“*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.01$, “***”表示 $P < 0.001$

通过对浮游动物密度数据进行 DCA 分析,发现排序轴中梯度最大值小于 3。因此,选择 PCA 分析以进一步探究环境因子对浮游动物群落的影响,得到 PCA 二维排序结果如图 6 所示。第一主轴和第二主轴的特征值分别为 62.16%和 30.38%,累计解释率为 92.54%。分析表明,轮虫与总氮和总磷相关性最大,呈正相关,而枝角类和桡足类则与浊度和溶解氧相关性最大,呈负相关。

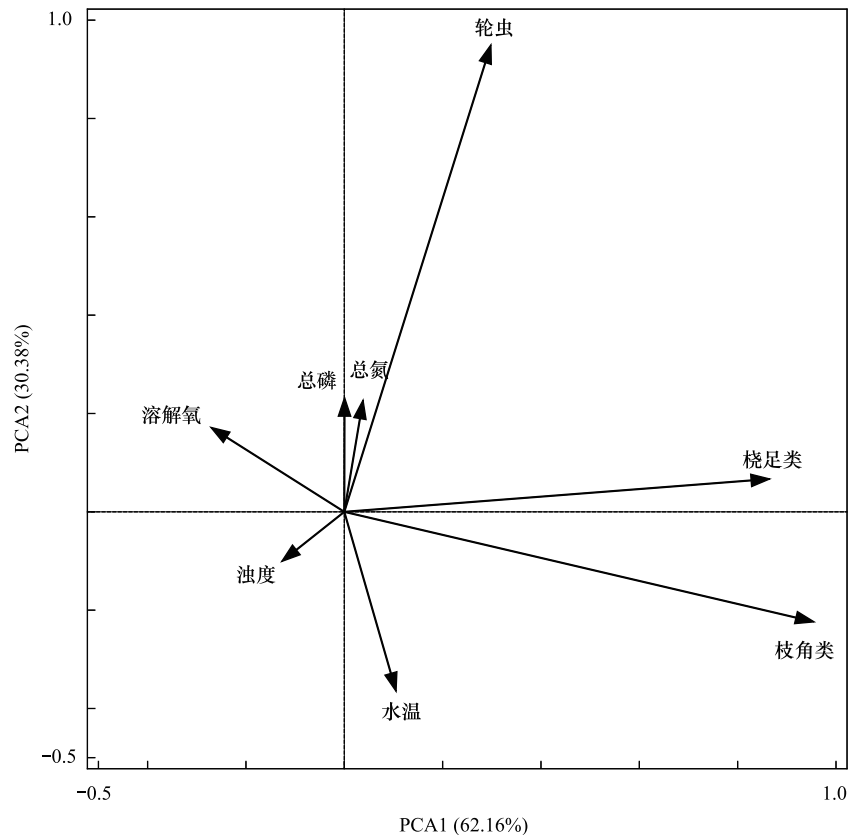


图6 研究区域浮游动物与环境因子的PCA分析

Fig.6 Principal components analysis of zooplankton abundance and environmental factors in this study area

PCA:主成分分析 Principal Components Analysis

3 讨论

3.1 行船扰动对河流浮游动物密度与生物量的影响

与山区河流相比^[34—35],本研究区域浮游动物密度与生物量相对较高,这可能与水体富营养水平较高有关(表1)^[7]。总体上,研究区域浮游动物密度和生物量表现出春夏季高、秋冬季低的季节特征^[36—37]。这主要因为,与秋冬季相比,春夏季较高水温(表1)有利于浮游动物生长和繁殖,生物量和密度也因此与水温表现出显著正相关($P<0.01$,图5)。另外,春夏季较强的光照也能促进浮游植物生长,为浮游动物提供了充足的食物来源^[38—39]。有研究表明,本研究区域水体春夏季是浮游植物大量繁殖的季节^[40—41]。

运河通常分布于平原地区,主要原因是平原地势平坦、水源丰富、经济发达。平原地区河流若未受行船影响往往表现出静水湖沼状态,这有利于浮游动物生长与繁殖^[42—43]。与支流相比,航运干流浮游动物密度与生物量明显下降($P<0.05$,表3)。这主要是因为,行船螺旋桨高速旋转导致运河始终处于湍流状态,不利于浮游动物生长与繁殖^[44]。Philippe等(2014)研究表明,在均质和稳定的生态环境中,浮游动物群落具有较高的生物量,在异质和不稳定的栖息地中则具有较低的生物量^[45]。另外,行船扰动引起运河沉积物再悬浮,导致水体浑浊,干流水体浊度四个季节均高于支流(表1)。浑浊度的增加可能抑制浮游植物的生长,从而间接影响浮游动物的摄食效率^[46]。未来的研究应进一步探讨食物链中各环节的相互作用,以更全面地理解行船扰动对浮游动物的影响。这种影响存在季节差异,尤以春季最为显著($P<0.001$,图2),这是因为,在春季温度相对适宜的条件下,行船扰动成为影响浮游动物密度和生物量的主要因子。

3.2 行船扰动对河流浮游动物季节演替和多样性的影响

研究区域水体浮游动物种类以小型轮虫为主,大型的枝角类和桡足类相对较少,其中冬季轮虫占比较高,该结果和许小红等(2009)对该区域附近水体的研究结果类似,这与本区域气候和水环境有关^[47]。冬季轮虫占比较高可能与高富营养化水平有关,有研究表明,富营养化水平较高有利于轮虫生长繁殖^[48-49],与本研究 PCA 分析结果相同(图 6)。与支流相比,受行船扰动的干流中,轮虫的种类占比增加,而桡足类的种类占比下降(图 3),这可能是因为,小型轮虫能够更好地适应高扰动、高浊度水体,而中大型枝角类和桡足类则偏好静水环境^[50-51]。进一步分析表明,扰动显著改变了干流优势种(表 4)。与支流相比,在长额象鼻溞、颈沟基合溞、广布中剑水蚤、角突臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫和无节幼体的优势种基础上,出现了新的优势种,如汤匙华哲水蚤和长三肢轮虫,而角突网纹溞、多刺裸腹溞、老年低额溞、晶囊轮虫、壶状臂尾轮虫、针簇多肢轮虫和疣毛轮虫不再作为优势种。相应地,优势种季节性演替发生了改变,主要优势种由“长额象鼻溞-颈沟基合溞-无节幼体-角突臂尾轮虫”的春夏秋冬变化规律转变为了“无节幼体-无节幼体-无节幼体-角突臂尾轮虫”。较强的扰动条件能够显著影响浮游动物个体的行为,尤其是体型较大的枝角类和桡足类。当它们感应到较强的紊流时,会产生明显的应激反应,长期的行船扰动不利于它们的生长与繁殖^[52-54],这与本研究 PCA 分析结果一致(图 6)。因此,在受行船扰动的干流中,体型较小的无节幼体成为主要优势种。在扰动强、浊度高的水体中,常观察到无节幼体占据优势地位^[55-58]。

本研究区域干流浮游动物多样性指数平均值为 2.02(图 4),与水质清澈,受人为污染少的大兴安岭根河源国家湿地公园河流相比(多样性指数平均值为 2.25),浮游动物多样性较差^[59]。受温度等影响,河流浮游动物多样性往往表现出明显季节特征(图 4)。本研究区域浮游动物多样性表现出春秋高、夏冬低特征。原因是,与春秋适宜的温度相比,夏冬季过高或过低的温度不利于一些浮游动物种类的生长繁殖,因此降低了浮游动物多样性^[60-61]。行船扰动改变了运河浮游动物多样性季节特征,导致季节变化不明显, H' 、 J 和 D 指数季节变异系数下降(图 5)。这可能是由于行船扰动对浮游动物产生的胁迫削弱了温度对浮游动物的影响,具体过程和机制尚需未来进一步研究。

3.3 生态学意义

浮游动物作为河流生态系统重要组成部分,在维持水生态系统健康与稳定中扮演着不可或缺的角色。内河航运作为当今一种常用的运输方式之一,对区域经济发展发挥着重要作用,但其对河流生态环境的影响日益引起关注。本研究发现,行船扰动不仅直接改变了运河浮游动物的栖息环境,而且调控了水环境条件,从而影响了浮游动物群落组成和季节演替。研究结论不仅为内河航运的生态环境效应评估提供依据,也为运河生态系统保护与修复提供一定理论支持。另外,行船过程中漏油、船员生活污水与垃圾等产生的水体污染也可能对浮游动物群落产生影响,未来可通过长期水质观测,并结合对浮游植物等浮游动物食物资源及鱼类等浮游动物捕食者的分析,全面解析行船扰动对河流浮游动物群落的影响。

参考文献(References):

- [1] 陈越,潘保柱,吴利,胡恩,赵耿楠,张森. 渭河干流与其秦岭北麓典型支流浮游动物群落结构及影响因素. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1630-1641.
- [2] 濮梦圆,徐锦前,胡恺源,彭凯,龚志军,蔡永久,项贤领. 洪泽湖湖滨带浮游动物群落结构及驱动因素. 湖泊科学, 2023, 35(2): 610-623.
- [3] Barneche D R, Hulatt C J, Dossena M, Padfield D, Woodward G, Trimmer M, Yvon-Durocher G. Warming impairs trophic transfer efficiency in a long-term field experiment. *Nature*, 2021, 592(7852): 76-79.
- [4] 周健,杨桂军,秦伯强,张光生,王丽君,高映海,李鸿毅,陈满意,钟春妮. 后生浮游动物摄食对太湖夏季微囊藻水华形成的作用. 湖泊科学, 2013, 25(3): 398-405.
- [5] Wei W Z, Chen R M, Wang L F, Fu L X. Spatial distribution of crustacean zooplankton in a large river-connected lake related to trophic status and fish. *Journal of Limnology*, 2017, 76(3): 546-554.
- [6] Heneghan R F, Everett J D, Blanchard J L, Sykes P, Richardson A J. Climate-driven zooplankton shifts cause large-scale declines in food quality

- for fish. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 470-477.
- [7] 商书芹, 贾丽, 王帅帅, 殷旭旺, 白海锋. 济南济西湿地公园浮游动物功能类群及其对环境因子的响应. *水生态学杂志*, 2023, 44(6): 113-121.
- [8] 周健, 秦伯强. 风浪对湖泊浮游生物影响的研究进展. *水科学进展*, 2018, 29(2): 293-300.
- [9] Visser A W, Stips A. Turbulence and zooplankton production: insights from PROVESS. *Journal of Sea Research*, 2002, 47(3/4): 317-329.
- [10] Huang Z Y, Ouahsine A, Du P, Ding D. Computational fluid dynamics predictions of critical hydrodynamics thresholds in the erodibility of inland waterway bank by ship-induced waves. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112825.
- [11] Gascón S, Brucet S, Sala J, Boix D, Quintana X D. Comparison of the effects of hydrological disturbance events on benthos and plankton salt marsh communities. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(3): 419-428.
- [12] 李学军, 鲍战猛, 高彩凤, 毛战坡. 北运河浮游动物调查及水质评价. *生态学杂志*, 2014, 33(6): 1559-1564.
- [13] 许木启. 京密运河-北京排污河浮游动物群落变化与水质关系的研究. *环境科学学报*, 1993, 13(3): 347-354.
- [14] Shadrin N, Yakovenko V, Moseychenko I, Anufrieva E. Zooplankton in the technogenic aquatic ecosystem of the north Crimean canal, the longest in Europe. *Water*, 2023, 15(13): 2327.
- [15] Kolarova N, Napiórkowski P. The influence of locks on zooplankton in canals (the Bydgoszcz Canal and the Noteć Canal, Poland). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2024, 24(3): 599-607.
- [16] Chen M, Wang J C, Sun J, Ye F, Zhang H Y. Spatio-temporal distribution characteristics of intangible cultural heritage and tourism response in the Beijing-Hangzhou grand canal basin in China. *Sustainability*, 2023, 15(13): 10348.
- [17] Liu B Y, Li Z Q, Wang J Y, Zhang X Z, Kong L W, Zhu L, Shi W Q. Thin boundary layer model underestimates greenhouse gas diffusion from inland waterways. *Environmental Research*, 2023, 233: 116472.
- [18] 肖代, 夏栩. 京杭运河镇江段水质污染调查及治理对策研究. *中国水运*; 下半月, 2011, 11(6): 171-173, 175.
- [19] 李想, 高月香, 陈婷, 徐豪杰, 严若孟, 张毅敏. 京杭大运河江苏段水环境现状与保护措施. *当代化工研究*, 2022(6): 66-68.
- [20] 沈玉莹, 程俊翔, 徐力刚, 李仁英, 游海林, 杨海. 极端水文干旱下鄱阳湖浮游动物群落结构特征及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(24): 10399-10412.
- [21] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2011: 303-363.
- [22] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 358-388.
- [23] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961: 1-288.
- [24] 中国科学院中国动物志编辑委员会. 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: 1-297.
- [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: 1-450.
- [26] 李刚, 潘保柱, 丁一桐, 孙长顺, 王晓涛, 杨子杰. 无定河流域浮游动物群落结构特征及水质生物评价. *中国环境监测*, 2024, 40(3): 181-196.
- [27] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-257.
- [28] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 245-252.
- [29] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000: 1-247.
- [30] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [31] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10(2): 370-383.
- [32] Margalef R. Information theory in ecology. *International Journal of General Systems*, 1958, 3: 36-71.
- [33] 高原, 赖子尼, 杨婉玲, 曾艳艺. 2014—2015 年珠江春季禁渔前后浮游动物群落变化. *生态环境学报*, 2017, 26(9): 1562-1569.
- [34] 张灿, 梁静, 孔德芳, 陈涛. 黄河流域典型山区河流水生生物群落调查评价——以大峪河为例. *环境科技*, 2024, 37(3): 52-57.
- [35] 魏营, 解宜兴, 毛盼, 田明珠, 廖巍, 向华, 袁鸿, 吴小丽. 湖南张家界大鲵国家级自然保护区河流浮游动物群落特征. *湖南林业科技*, 2023, 50(3): 59-65.
- [36] 刘俏, 刘智暘, 王江滨, 廖传松, 李俊锋, 郭超, 王靖斌, 熊满堂, 张堂林, 郭传波, 刘家寿. 福建山美水库浮游动物群落结构时空特征及其影响因子分析. *湖泊科学*, 2022, 34(6): 2055-2073.
- [37] 王松波, 余俊爽, 曹艳敏, 吴来燕. 光照和营养盐对浮游动物和浮游植物生物量及其营养联系的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(6): 1122-1127.
- [38] Williamson C E, Overholt E P, Pilla R M, Wilkins K W. Habitat-mediated responses of zooplankton to decreasing light in two temperate lakes undergoing long-term browning. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 73.
- [39] 谢静, 苏宇亮, 吴斌, 张依, 肖利娟, 顾继光. 华南热带水库丰水期浮游植物群落对氮、磷、铁加富的响应——以广东大沙河水库为例. *湖泊科学*, 2024, 36(1): 43-51.
- [40] 朱广伟, 金颖薇, 任杰, 夏明芳, 许海, 朱梦圆, 费国松, 陈伟民. 太湖流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析. *湖泊科学*,

- 2016, 28(1): 9-21.
- [41] Wei Q, Xu Y F, Ruan A D. Spatial and temporal patterns of phytoplankton community succession and characteristics of realized niches in Lake Taihu, China. *Environmental Research*, 2024, 243: 117896.
- [42] 白海锋, 王怡睿, 宋进喜, 徐文瑾, 吴琼, 张妍. 渭河陕西段浮游动物群落结构时空特征及其驱动因子. *生态学杂志*, 2022, 41(8): 1602-1610.
- [43] Saunders J F III, Lewis W M Jr. Zooplankton abundance in the lower Orinoco river, Venezuela. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(2): 397-409.
- [44] 陈伟民, 陈宇炜, 秦伯强, 高锡芸, 高光, 季江, 许秋瑾. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验. *湖泊科学*, 2000, 12(4): 343-352.
- [45] Massicotte P, Frenette J J, Proulx R, Pinel-Alloul B, Bertolo A. Riverscape heterogeneity explains spatial variation in zooplankton functional evenness and biomass in a large river ecosystem. *Landscape Ecology*, 2014, 29(1): 67-79.
- [46] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 高光, 陈宇炜. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响. *水科学进展*, 2004, 15(5): 615-620.
- [47] 许小红, 张波, 吴春笃, 张先宝. 镇江内江浮游生物多样性与水质灰色关联分析. *环境与健康杂志*, 2009, 26(10): 888-890.
- [48] Gannon J E, Stemberger R S. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. *Transactions of the American Microscopical Society*, 1978, 97(1): 16.
- [49] 朱浩, 刘兴国, 陈晓龙, 刘云飞, 石磊, 叶少文. 鲢鳙浮游动物群落特征及水质评价. *水生生物学报*, 2020, 44(6): 1313-1321.
- [50] 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.
- [51] 王司权, 潘保柱, 杨子杰, 胡恩, 张鑫, 李刚, 赵丹, 胡竞翔. 泾河流域浮游动物群落特征及优势种种间关系. *应用生态学报*, 2025, 36(2): 587-595.
- [52] Alcaraz M, Calbet A, Estrada M, Marrasé C, Saiz E, Trepát I. Physical control of zooplankton communities in the Catalan Sea. *Progress in Oceanography*, 2007, 74(2/3): 294-312.
- [53] Pernica P, Wells M G, Sprules W G. Internal waves and mixing in the epilimnion of a lake affects spatial patterns of zooplankton in a body-size dependent manner. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 2013, 3(1): 279-294.
- [54] Seuront L, Yamazaki H, Souissi S. Hydrodynamic disturbance and zooplankton swimming behavior. *Zoological Studies*, 2017, 43: 376-387.
- [55] Thorp J H, Black A R, Haag K H, Wehr J D. Zooplankton assemblages in the Ohio River: seasonal, tributary, and navigation dam effects. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51(7): 1634-1643.
- [56] Thomas B, Per-Arne A. Effects of invading vendace (*Coregonus albula* L.) on species composition and body size in two zooplankton communities of the Pasvik River System, northern Norway. *Journal of Plankton Research*, 1998, 20(2): 243-256.
- [57] Bass J A B, Pinder L C V, Leach D V. Temporal and spatial variation in zooplankton populations in the River Great Ouse: an ephemeral food resource for larval and juvenile fish. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13(3): 245-258.
- [58] 贺树杰, 苟金明, 尹娟, 邱小琮, 赵睿智. 黄河干流宁夏段浮游动物群落结构及其与水环境因子的关系. *水电能源科学*, 2022, 40(10): 66-69, 18.
- [59] 王慧博, 侯文久, 马成学, 于洪贤, 高健, 白明荣, 韩磊, 刘军. 根河源国家湿地公园浮游动物分布研究. *湿地科学*, 2017, 15(1): 99-106.
- [60] 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.
- [61] Devreker D, Souissi S, Seuront L. Effects of chlorophyll concentration and temperature variation on the reproduction and survival of *Temora longicornis* (Copepoda, Calanoida) in the Eastern English Channel. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 318(2): 145-162.

附表 1 不同季节京杭运河镇江段干流与支流浮游动物组成

Table S1 Composition of zooplankton in the Zhenjiang section of Beijing-Hangzhou Grand Canal and its tributaries in different seasons

类别 Categories	种属名 Species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
		干流	支流	干流	支流	干流	支流	干流	支流
轮虫 Rotifer	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	+	+	+	+	+		+	+
	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	+	+	+		+		+	+
	尾突臂尾轮虫 <i>Brachionus caudatus</i>		+			+			
	红臂尾轮虫 <i>Brachionus rubens</i>		+						
	方形臂尾轮虫 <i>Brachionus quadridentatus</i>	+						+	+
	矩形龟甲轮虫 <i>Keratella quadrata</i>	+					+		
	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	+							+
	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	+	+	+			+	+	+
	蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestinensis</i>								+
	长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>							+	+
	腔轮虫 <i>Lecane</i> sp.	+						+	+
	独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	+							
	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>		+	+	+				
	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	+	+					+	+
	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>		+		+	+		+	
	前节晶囊轮虫 <i>Ashlanchna priodonta</i>	+	+					+	+
	纵长异尾轮虫 <i>Trichocerca elongata</i>			+			+		
	尖趾单趾轮虫 <i>Monostyla clostercerca</i>			+	+		+		
	月形单趾轮虫 <i>Monostyla lunaris</i>			+					
	月形腔轮虫 <i>Lecane luna</i>			+	+		+		
	疣毛轮虫 <i>Synchaeta</i> sp.				+		+	+	+
	椎尾水轮虫 <i>Epiphanes senta</i>			+		+			
	剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>				+	+			
	大肚须足轮虫 <i>Euchlanis dilatata</i>			+					
	盘状鞍甲轮虫 <i>Lepadella patella</i>								+
	单趾轮虫 <i>Monostyla</i> sp.								+
	晶囊轮虫 <i>Ashlanchna</i> sp.			+			+		
枝角类 Cladocera	长额象鼻溞 <i>Bosmina longispina</i>	+	+	+	+	+	+		
	圆形盘肠溞 <i>Chydorus sphaericus</i>		+			+	+		
	短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	+							
	长肢秀体溞 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>	+	+		+				
	平直溞 <i>Pleuroxus</i> sp.		+						
	直额弯尾溞 <i>Camptocercus rectirostris</i>		+				+		
	颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>	+	+	+	+	+	+		
	透明薄皮溞 <i>Leptodora Kindti</i>	+							
	蚤状溞 <i>Daphnia pulex</i>	+							
	僧帽溞 <i>Daphnia cucullata</i>	+							
	微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>		+						
	直额裸腹溞 <i>Moina rectirostris</i>	+	+						
	矩形尖额溞 <i>Alona rectangular</i>	+	+			+	+		
	老年低额溞 <i>Simocephalus vetulus</i>		+				+		
	角突网纹溞 <i>Ceriodaphnia cornuta</i>				+	+	+		
	方形尖额溞 <i>Alona quadrangularis</i>				+	+	+		
	多刺裸腹溞 <i>Moina macrocopa</i>						+		
	筒弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>							+	

续表

类别 Categories	种属名 Species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
		干流	支流	干流	支流	干流	支流	干流	支流
桡足类 Copepoda	尖额溞 <i>Alona</i> sp.					+	+		
	指状许水蚤 <i>Schmackeria inopinus</i>	+	+		+	+			+
	英勇剑水蚤 <i>Cyclops strenuus</i>		+						
	大剑水蚤 <i>Macrocyclus</i> sp.		+						
	中剑水蚤 <i>Mesocyclops</i> sp.	+	+					+	
	汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	+	+		+	+	+		
	近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i>	+	+		+	+			+
	温剑水蚤 <i>Thermocyclops</i> sp.		+	+	+				
	球状许水蚤 <i>Schmackeria forbesi</i>		+						
	锯缘真剑水蚤 <i>Eucyclops serrulatus</i>	+	+				+		
	猛水蚤 <i>Calanoida</i>		+	+					+
	哲水蚤 <i>Calanus</i> sp.	+							+
	无节幼体 <i>Nauplius</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
	真剑水蚤 <i>Eucyclops</i> sp.								+
	剑水蚤 <i>Cyclops</i> sp.							+	
	广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>			+	+	+	+		
	棕色大剑水蚤 <i>Macrocyclus fuscus</i>					+			

“+”表示有分布