

东平湖浮游动物对南水北调东线运行的时空响应

高雯琪^{1,2}, 辛未¹, 夏文彤^{1,2}, 屈霄^{1,2}, 刘晗^{1,2}, 陈宇顺^{1,2}

1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 东平湖是南水北调东线工程输水线路下游的最后一个调蓄湖泊。为探究调水后的东平湖浮游动物时空响应, 于 2016—2017 年对东平湖浮游动物进行了涵盖春(4 月)、夏(7 月)、秋(10 月)、冬(1 月)的 4 次调查, 共检出浮游动物 3 类 72 种(属), 其中, 轮虫 51 种(70.83%)、枝角类 11 种(15.28%)、桡足类 10 种(13.89%)。东平湖不同区域优势种的季节演替明显; 进水区夏季前三位优势种均为桡足类, 即剑水蚤(*Cyclops* sp.)、真剑水蚤(*Eucyclops* sp.)、桡足幼体(Copepodid); 湖中区及出水区秋季前三位优势种相同, 均为枝角类及桡足类, 即真剑水蚤、剑水蚤和直额裸腹溞(*Moina rectirostris*); 各区域其余季节均主要为轮虫。浮游动物密度、Shannon-Wiener 多样性指数与 Marglef 丰富度指数在不同季节间均差异显著, 在不同区域间无显著差异。进水区与出水区浮游动物密度均为夏季最高、冬季最低, 湖中区浮游动物密度为秋季最高、冬季最低。浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数与 Marglef 丰富度指数的季节变化规律一致, 进水区为秋季最高、冬季最低, 湖中区及出水区均为夏季最高、冬季最低。调水在一定程度上影响了东平湖浮游动物的群落结构, 是东平湖浮游动物出现小型化趋势的可能原因之一, 同时调水也有利于东平湖的水质改善。

关键词: 南水北调东线; 东平湖; 浮游动物; 群落结构; 生态响应

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2022)01-0114-10

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2022.01.11

Spatio-Temporal Responses of Zooplankton to the Operation of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project in Dongping Lake

GAO Wenqi^{1,2}, XIN Wei¹, XIA Wentong^{1,2}, QU Xiao^{1,2}, LIU Han^{1,2}, CHEN Yushun^{1,2}

1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Dongping Lake is the last regulating lake in the downstream of the Eastern Route of China's South-to-North Water Diversion Project. To assess the responses of spatio-temporal patterns of zooplankton to the water diversion, seasonal studies (spring, summer, fall and winter) were conducted in Dongping Lake from April 2016 to January 2017. A total of 72 species (genera) of zooplankton were identified, of which 51 species belonging to rotifers (70.83%), 11 species belonging to cladocerans (15.28%) and 10 species belonging to copepod (13.89%). Seasonal succession of dominant species was significant in different regions of Dongping Lake. The top three dominant species in the inflow area in summer were copepod, which were *Cyclops* sp., *Eucyclops* sp., Copepodid. And the top three dominant species in the middle and outflow areas in autumn were cladocerans and copepod, which were *Eucyclops* sp., *Cyclops* sp., *Moina rectirostris*, while the rest of the season was mainly rotifers in each region. Zooplankton density, Shannon-Wiener diversity index and Marglef richness index varied significantly among seasons but not among regions. Zooplankton density was the highest in summer and the lowest in winter in the inflow and outflow areas, and zooplankton density was the highest in autumn and the lowest in winter in the middle area. Seasonal variations of Shannon-Wiener diversity index were consistent with those of Marglef richness index. The Shannon-Wiener diversity index and Marglef richness index in the inflow area were the highest in autumn and the lowest in winter, the middle area and the outflow area were both the highest in summer and the lowest in winter. The zooplankton community structure in Dongping Lake was affected to some extent by the water diversion, the size of zooplankton had a tendency towards miniaturization, and the water diversion was beneficial to water quality improvements in Dongping Lake.

Keywords: Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project; Dongping Lake; zooplankton; community structure; ecological responses

收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-10-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901203); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDB-SSW-SMC041)

第一作者简介: 高雯琪(1996-), 女, 河南驻马店人, 在读博士研究生。

通讯作者: 陈宇顺

南水北调工程是一项规模宏大、涉及面广的非常复杂的系统性水利工程,旨在解决中国日益严峻的区域水资源短缺问题^[1]。东平湖是南水北调东线工程输水线路上的最后一个调蓄湖泊,其水环境质量直接关系到下游受水地区的用水安全。在南水北调东线工程投入运行后,调蓄湖泊的水位将有所提高,湖泊水体交换加强,从而影响到湖区生态环境,各类水生生物资源也会发生一定变化^[2]。浮游动物是淡水生态系统中重要的生物组成部分,在淡水生态系统的物质转化和能量流动等过程中起着重要作用^[3-4]。作为水体中的敏感指示生物,浮游动物在淡水湖泊监测上具有重要作用,不仅可以作为指示种指示水体污染水平^[5-6],同时也是反映人类活动干扰的理想指标^[7]。因此,对浮游动物进行跟踪研究有助于了解和预测湖泊生态系统的长期变化。目前,对于南水北调东线调蓄湖泊的水生态学研究主要涉及重金属^[8]、水质^[9]、鱼类群落^[10]、浮游生物^[11-15]等方面,针对浮游动物的前期研究主要围绕群落结构与水质评价。林育真等^[11-13]调查了东平湖浮游动物的种类组成;王志忠等^[16]调查了东平湖浮游动物的群落结构,并利用浮游动物评价了东平湖水质,结果为富营养类型;陈磊等^[15]研究了南四湖浮游动物的群落结构及其与水质的相关性。但以上研究都是在南水北调东线工程运行之前开展的,调水后的调蓄湖泊浮游动物群落结构变化研究较少。DIVYA 等^[17]比较了东线调水后的两个调蓄湖泊(南四湖和洪泽湖)浮游动物群落的变化情况,而关于东线最后一个调蓄湖泊(东平湖)在调水后的浮游动物动态研究还未有报道。随着南水北调东线工程的持续推进,东平湖生态系统发生了一系列变化,水生生物的种类组成及群落结构也随之改变。本研究主要针对南水北调东线运行后的东平湖浮游动物群落结构时空格局,结合前期的相关报道,分析东平湖浮游动物对调水的生态响应。一方面,可以提供南水北调东线工程运行后的东平湖浮游动物基础数据;另一方面,可为后续东平湖水生生物资源开发利用以及生态环境保护提供科学的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域与样点布设

东平湖(35°30'~36°20'N, 116°00'~

116°30'E)是位于山东省东平县西部的一个浅水湖泊,总面积 627 km²,容水量 40 亿 m³,常年平均水面 124 km²,平均水深 2.5 m,是山东省第二大淡水湖^[18-19]。大汶河是东平湖的主要注入河流,由东南方流入东平湖,经调蓄后向北注入黄河。南水北调东线一期工程 2013 年 11 月通水后,自南向北将引配水输送到江苏、山东等地。东平湖作为东线输水线路上的最后一个调蓄湖泊,常年蓄水^[20]。

选取浮游动物调查样点时,参照《淡水浮游生物研究方法》^[21]以及《湖泊生态调查观测与分析》^[22]中的样点布设方法与原则。结合东平湖生境特征、主要出入湖河流及南水北调东线调水线路情况,在东平湖湖区共设置 15 个采样点。根据东平湖的水文特征(即主要的出入湖河流以及南水北调东线调水线路)和本文的研究主旨,将 15 个采样点分为 3 个空间区域,即:出水区(1[#]、2[#]、3[#]、4[#])、湖中区(5[#]、6[#]、7[#]、8[#]、9[#]、10[#]、11[#])及进水区(12[#]、13[#]、14[#]、15[#])。进水区 12[#]、13[#]点位靠近南水北调东线输水线路进水口,14[#]、15[#]点位靠近东平湖主要注入河流大汶河的入水口;出水区 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]点位分布于南水北调东线输水线路出水区域及东平湖流向黄河的湖口区域。于 2016 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)以及 2017 年 1 月(冬季)在东平湖开展了 4 次浮游动物调查监测,详细调查浮游动物的群落结构与数量特征,具体采样点分布如图 1 所示。

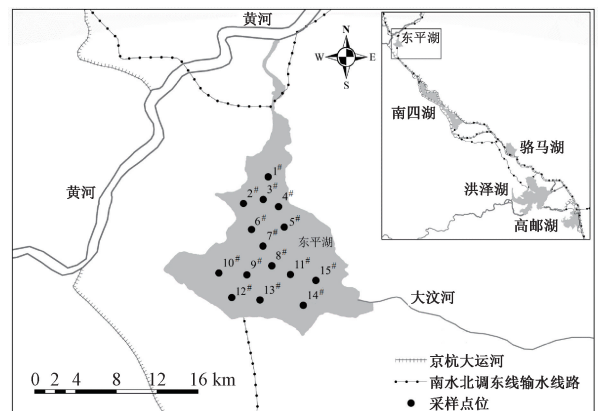


图 1 东平湖浮游动物采样点分布

Fig. 1 Distribution of zooplankton sampling sites in Dongping Lake

1.2 浮游动物样品采集与分析

采集浮游动物定性样品时,用 25 号浮游生物网在水面做“∞”形循环,缓慢拖动 3~5 min 后,

将采集到的样品收集于 50 mL 离心管中,加入 5% 的福尔马林溶液固定待检。采集浮游动物定量样品时,用 5 L 有机玻璃采水器等量取上、中、下层水样共 20 L。混合后的水样经 13 号浮游生物网过滤并收集于 50 mL 离心管中,加入 5% 的福尔马林溶液固定待检。在实验室借助显微镜对浮游动物样品进行种类鉴定及定量计数。轮虫按《中国淡水轮虫志》^[23] 鉴定种类及计数,枝角类按《中国动物志 淡水枝角类》^[24] 鉴定种类及计数,桡足类按《中国动物志 淡水桡足类》^[25] 鉴定种类及计数。

1.3 数据处理

计算浮游动物的 Shannon-Wiener 多样性指数^[26]、Pielou 均匀度指数^[27]、Marglef 丰富度指数^[28]以及物种优势度(Y)^[29]。当 $Y > 0.02$ 时,该物种为群落中的优势种^[29]。利用浮游动物多样性指数计算结果对东平湖水体营养状态进行生物学评价^[30]。

使用双因素方差分析法(Two-Way ANOVA)分析季节和区域两个因素对浮游动物密度、多样性指数的影响有无交互作用。采用单因素方差分析法(One-Way ANOVA)分析不同季节和区域的浮游动物密度、多样性指数的差异。若方差具有同质性,则进行 LSD(The Least Significant Difference)检验;若方差不具同质性,则采用非参数 Games-Howell 检验^[31-32]。当浮游动物密度数据不满足正态分布时,对数据进行 $\lg(x+1)$ 转换。所有统计分析的显著性水平定为 0.05。数据处理及图形绘制使用 SPSS 24.0 及 EXCEL 2016 软件完成。

2 结果分析

2.1 种类组成及优势种

本研究共检出浮游动物 3 类 21 科 72 种(属)。轮虫种类数最多,有 51 种,占 70.83%;枝角类 11 种,占 15.28%;桡足类 10 种(含桡足幼体和无节幼体),占 13.89%。浮游动物的种类组成在不同季节和区域之间存在差异。不同季节的浮游动物种类数由高到低排列依次为夏季 48 种、春季 43 种、秋季 34 种、冬季 16 种;不同区域的浮游动物种类数由高到低排列依次为湖中区 59 种、进水区 53 种、出水区 44 种。进水区及湖中区的浮游动物种类数均为夏季最多,其次为春季、秋季,

冬季最少;出水区的浮游动物种类数为春季最多,其次为秋季、夏季,冬季最少(图 2)。

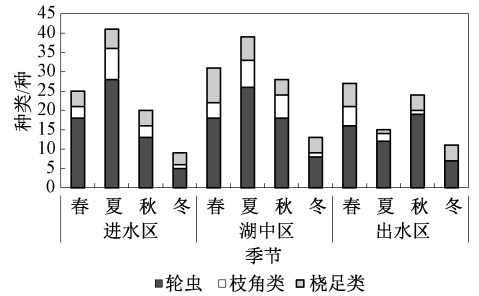


图 2 东平湖浮游动物种类组成的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of zooplankton species composition in Dongping Lake

东平湖各区域的浮游动物优势种主要为轮虫。优势种的季节变化规律同浮游动物种类数的季节变化规律一致,即:进水区和湖中区夏季最多,出水区春季最多,3 个区域均为冬季最少(图 3)。东平湖各区域主要优势种的季节演替明显:进水区春季前三位优势种为桡足幼体(Copepodid)($Y = 0.21$,下同)、裂足臂尾轮虫(*Brachionus diversicornis*)(0.17)、须足轮虫(*Euchlanis* sp.)(0.15),夏季为剑水蚤(*Cyclops* sp.)(0.18)、真剑水蚤(*Eucyclops* sp.)(0.16)、桡足幼体(0.10),秋季为真剑水蚤(0.13)、剑水蚤(0.10)、四齿单趾轮虫(*Monostyla quadridentata*)(0.09),冬季为角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)(0.22)、异尾轮虫(*Trichocerca* sp.)(0.21)、方块鬼轮虫(*Trichotria tetractis*)(0.03);湖中区春季前三位优势种为直额裸腹溞(*Moina rectirostris*)(0.18)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)(0.06)、剑水蚤(0.06),夏季为角突臂尾轮虫(0.23)、镰状臂尾轮虫(*Brachionus falcatus*)(0.15)、剑水蚤(0.10),秋季为真剑水蚤(0.24)、剑水蚤(0.20)、直额裸腹溞(0.19),冬季为异尾轮虫(0.24)、角突臂尾轮虫(0.23)、剑水蚤(0.11);出水区春季前三位优势种为桡足幼体(0.25)、蒲达臂尾轮虫(*Brachionus budapestiensis*)(0.15)、方形臂尾轮虫(*Brachionus capsuliflorus*)(0.09),夏季为角突臂尾轮虫(0.59)、镰状臂尾轮虫(0.18)、方块鬼轮虫(0.10),秋季为真剑水蚤(0.24)、剑水蚤(0.20)、直额裸腹溞(0.19),冬季为真剑水蚤(0.24)、异尾轮虫(0.21)、角突臂尾轮虫(0.21)。

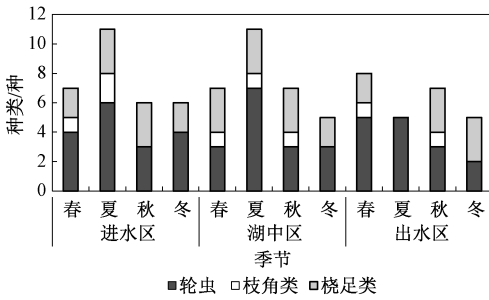


图3 东平湖浮游动物优势种组成的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of zooplankton dominant species composition in Dongping Lake

2.2 密度组成与时空格局

东平湖浮游动物年平均密度为 163.08 ind./L。浮游动物的全年密度组成显示:轮虫占浮游动物总密度的比例最大,为 48.73%;桡足类次之,为 34.75%;枝角类最小,为 16.52%。对东平湖浮游动物密度做季节和区域的双因素方差分析,结果显示:东平湖浮游动物密度在季节间的差异极显著 ($P < 0.001$),在区域间的差异不显著 ($P > 0.05$),季节和区域两个因素对浮游动物密度的影响无交互作用(表 1)。

表 1 季节及区域对浮游动物密度影响的双因素方差分析结果

Table 1 Results of two-way ANOVA of seasonal and regional effects on zooplankton density

参数	变异来源	df	F	P
密度	季节	3	37.146	0.000***
	区域	2	1.997	0.147
	季节×区域	6	2.145	0.065

注:“***”表示 $P < 0.001$ 。

进一步对东平湖浮游动物密度做季节间的单因素方差分析,结果显示:东平湖同一空间区域的浮游动物密度在不同季节间差异显著。进水区浮游动物密度为冬季最低,显著低于春季和夏季,而

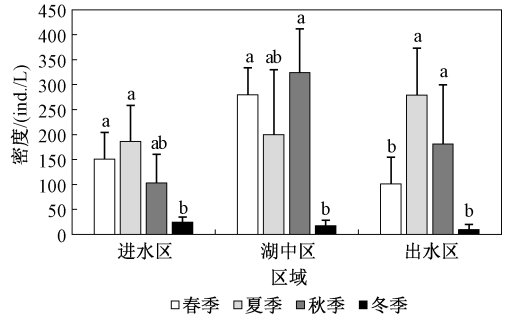
表 2 季节及区域对浮游动物多样性指数影响的双因素方差分析结果

Table 2 Results of two-way ANOVA of seasonal and regional effects on zooplankton diversity indices

参数	变异来源	df	F	P
Shannon-Wiener 多样性指数	季节	3	10.634	0.000***
	区域	2	0.930	0.402
	季节×区域	6	5.461	0.000***
Marglef 丰富度指数	季节	3	23.199	0.000***
	区域	2	1.850	0.168
	季节×区域	6	7.325	0.000***
Pielou 均匀度指数	季节	3	2.209	0.099
	区域	2	0.749	0.478
	季节×区域	6	1.694	0.143

注:“***”表示 $P < 0.001$ 。

与秋季无明显差异;湖中区浮游动物密度为秋季最高,其次为春季、夏季,冬季最低,春季和秋季的浮游动物密度显著高于冬季;出水区浮游动物密度为夏季最高,其次为秋季、春季,冬季最低,夏季和秋季的浮游动物密度显著高于春季和冬季(图 4)。东平湖同一季节的浮游动物密度在不同区域间差异不显著。春季为湖中区最高,其次为进水区,出水区最低;夏季为出水区最高,其次为湖中区,进水区最低;秋季为湖中区最高,冬季为进水区最高,两季节均为出水区最低。



注:图中标有不同字母时,表示该区域各季节之间差异显著;反之,则差异不显著。

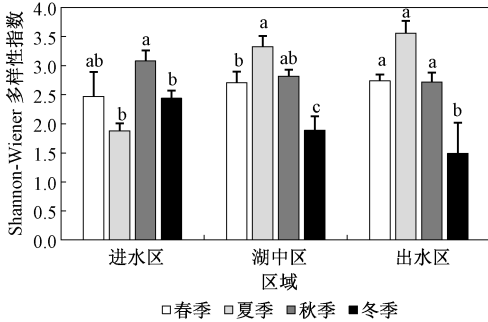
图 4 东平湖浮游动物密度的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of zooplankton density in Dongping Lake

2.3 生物多样性指数

对东平湖浮游动物多样性指数做季节和区域的双因素方差分析,结果显示:东平湖浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数与 Marglef 丰富度指数均在季节间差异极显著 ($P < 0.001$),在区域间差异不显著 ($P > 0.05$),季节和区域两个因素对浮游动物多样性指数的影响有交互作用;而 Pielou 均匀度指数在季节和区域间的差异均不显著,且季节和区域两个因素无交互作用(表 2)。

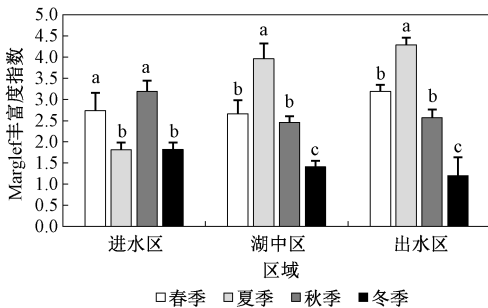
进一步对东平湖浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数与 Marglef 丰富度指数做季节间的单因素方差分析,发现东平湖浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数与 Marglef 丰富度指数的季节变化规律一致。进水区浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数和 Marglef 丰富度指数在秋季最高,显著高于夏季和冬季;湖中区 and 出水区浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数和 Marglef 丰富度指数在夏季最高,显著高于冬季(图 5、图 6)。



注:图中标有不同字母时,表示该区域各季节之间差异显著;反之,则差异不显著。

图 5 东平湖浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of zooplankton Shannon-Wiener diversity index in Dongping Lake



注:图中标有不同字母时,表示该区域各季节之间差异显著;反之,则差异不显著。

图 6 东平湖浮游动物 Marglef 丰富度指数的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of zooplankton Marglef richness index in Dongping Lake

根据 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Marglef 丰富度指数对东平湖水体营养状态进行生物学评价^[30]。根据 Shannon-Wiener 多样性指数,除湖中区夏季、出水区夏季、进水区秋季的水质类型为寡污型外,各区在其余季节均属于中污型;根据 Marglef 丰富度指数,出

水区春季和夏季、湖中区夏季、进水区秋季的水体状态为轻污染或清洁状态,各区在其余季节均为中度污染状态;根据 Pielou 均匀度指数,东平湖各区域在 4 个季节的水体状态均处于轻污染或清洁状态。综合来看,Shannon-Wiener 多样性指数和 Marglef 丰富度指数对东平湖营养状态的评价结果较一致。

3 讨论

3.1 东平湖浮游动物群落结构变化

湖泊中浮游动物的群落结构及其季节性动态变化受到诸多因子的综合调控,湖泊形态、水文特性、水体营养状态、水生生物状况以及人类活动等都可以影响浮游动物的物种组成和丰富度^[33-36]。本研究检出的浮游动物种类数低于 1994 年林育真等^[11-13]和庞清江等^[37]在东平湖检出的轮虫 52 种、枝角类 21 种、桡足类 15 种的检出结果,而高于 2007 年王志忠等^[16]在东平湖检出的轮虫 33 种、枝角类 8 种、桡足类 13 种,以及 2011—2015 年陈秀丽等^[38]在东平湖检出的轮虫 38 种、枝角类 9 种、桡足类 4 种的检出结果。对比浮游动物物种组成可知,历年来的东平湖浮游动物种类组成均以轮虫占优势地位,不同年份的浮游动物物种组成有所变化。

2000 年以后,东平湖周边工农业发展迅速,渔业捕捞和水产养殖活动日益增多,工程建设活动大规模兴起,频繁的人类活动干扰以及气候变化等多种因素对东平湖水质、水生生物和其他相关生态因子造成了严重影响。浮游动物群落结构的时空变化特征与其所处的环境关系密切。南水北调东线调水工程使东平湖形成活性流动水体,从而引起东平湖水位不断变化。水位是湖泊生态系统的重要影响因素之一,对浮游动物群落结构及其动态变化具有显著影响^[39]。DIVYA 等^[17]对调水后的南四湖和洪泽湖浮游动物群落结构进行研究后发现,调水导致的水文变化是影响浮游动物物种组成的主要因素,且该变化有助于提高原生动物和轮虫的多样性。相较于南水北调东线其他调蓄湖泊,东平湖浮游动物种类数高于高邮湖的 47 种^[40]、洪泽湖的 63 种^[14]、骆马湖的 67 种^[41],而低于南四湖的 163 种^[15]。南四湖生境多样性较高,水生植被分布广,能容纳更多的浮游生物,给浮游生物提供更多的生存与繁殖空间。

洪泽湖属于中度富营养化湖泊,且换水周期短,换水周期和富营养化水平共同影响着洪泽湖的浮游动物群落结构与物种多样性^[14]。

东平湖枝角类和桡足类大型浮游动物的物种数量呈下降趋势。王志忠等^[16]在2007年调查东平湖浮游动物后指出,东平湖优势种群为原生动物,且浮游动物有向小型化转变的趋势。陈秀丽等^[38]在2012—2015年调查后得出,东平湖优势种群为枝角类和桡足类等大型浮游动物,表明东平湖浮游动物小型化趋势有所缓解。但本次调查显示:东平湖浮游动物在物种组成和密度组成上均是以小型浮游动物(轮虫)占优势地位,仍然存在向小型化转变的趋势;而且在同一类群内也存在一定的小型化现象,如在优势种中,相对同类型浮游动物来说,枝角类的筒弧象鼻溞、桡足类的桡足幼体和无节幼体均是体型较小的浮游动物种类。郭刘超等^[40]在2016年对高邮湖浮游动物群落特征进行研究后发现,高邮湖浮游动物群落结构特征也表现为小型浮游动物(轮虫)为优势种,其占比相较于大型浮游动物(甲壳类)更高。

国内外众多研究表明,许多湖泊的浮游动物物种组成均是以轮虫为主,枝角类和桡足类等个体较大的种类占比较小^[42]。这可能是由于轮虫属于孤雌生殖,个体小、繁殖快、发育时间短,能快速适应周围环境,从而不断生长繁殖^[43]。在涉及水产养殖的湖泊中,枝角类和桡足类的群落结构主要受鱼类捕食的影响^[44]。浮游动物食性的鱼类会优先捕食大型的枝角类,其次是逃跑能力相对较强的桡足类,最后是体型较小的轮虫。鱼类对浮游动物的捕食压力会改变浮游动物的生物量和密度。东平湖中大量的围网养殖增加了鱼类对浮游动物的摄食压力,导致枝角类和桡足类种类减少、密度降低。与此同时,东平湖自2005年开始每年人工增殖放流鲤(*Cyprinus carpio*)、鳊(*Hypophthalmichthys nobilis*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)等苗种。鲢、鳊等滤食性鱼类会优选捕食枝角类、桡足类,加大了对大型浮游动物的捕食压力,从而降低了轮虫等小型浮游生物的生存压力^[45],使轮虫的种类及数量得到了发展。此外,还可能与南水北调东线工程调水有关。调水期间的进水和排水过程会引起水体浑浊,对甲壳类浮游动物的滤食器官造成损害^[46]。上述这些因素都可能导致东平湖枝角类和桡足类种类数下

降,浮游动物类群以小型轮虫为主。

3.2 东平湖浮游动物时空格局及响应

东平湖浮游动物种类和密度存在季节性演替,浮游动物密度的季节间差异显著。夏季浮游动物种类最多,此时的进水区和出水区浮游动物密度显著高于冬季,湖中区和出水区 Shannon-Wiener 多样性指数及 Marglef 丰富度指数也显著高于冬季。水温是影响浮游动物生长、发育、群落组成和数量变化等的极为重要的环境因子,也是影响浮游动物季节分布的重要因素之一^[47]。各类浮游动物的生长季节不同,其种类和数量的季节变化也存在差异。轮虫在夏秋季的种类和数量较为丰富,在春冬季有所减少;枝角类和桡足类在一年四季均有出现,种类变化幅度不大,但数量变化很大,以秋季的数量为最多。东平湖地区属温带大陆性季风气候,四季分明。夏季水温升高时,浮游动物新陈代谢速度加快,导致其生长速率加快,从而影响到浮游动物群落结构的变化,因此,夏季的浮游动物多样性相比其他季节更高。

东平湖不同区域的浮游动物密度差异不显著,湖中区的浮游动物种类最多。各区域浮游动物优势种的季节演替不同,进水区夏季前三位优势种主要为桡足类。进水区水文变化最明显,受调水影响最大。调水会引起水位上升、水体透明度降低、水体营养盐浓度增加等^[17],这些因素都有可能造成进水区浮游动物群落变化的原因。吕乾等^[48]研究发现,鄱阳湖水位剧烈波动导致的水环境的快速变化,会对某些种类的浮游动物的生长繁殖活动造成影响,从而引发浮游动物群落的快速演替。浮游动物对水环境变化极其敏感,不同采样区域间的差异来源较为复杂,周边人类活动的频繁程度及所在湖区的水深等因素均对其有显著影响。

浮游动物对水体环境变化及污染极为敏感,在水生态系统中起着至关重要的作用,是湖泊生态系统食物链及生物生产力的基本环节,也是水体中的敏感指示生物。2007年王志忠等^[16]对东平湖浮游动物的调查研究显示,东平湖水质总体属富营养类型,且随着时间的推移,富营养化加重;冷春梅等^[49]在2013年南水北调东线工程通水初期对东平湖浮游植物进行调查研究后提出,东平湖水质处于中度污染水平;陈秀丽等^[38]在2011—2015年对东平湖浮游动物进行了调查分析,得出东平湖水质在2011—2012年为 α 中污

型,在2013—2015年为 β 中污型的结论;胡尊芳等^[50]在2015年对东平湖水质进行了评价,评价结果为东平湖水质处于中营养水平,且水质状态存在一定的季节性波动。结合本次调查结果(东平湖水质处于寡污~中污水平)可以发现,自2013年南水北调东线工程通水后,东平湖水质状况呈现好转趋势。南水北调东线工程所调取的水为扬州段的长江水,其水质较好,进入东平湖后对东平湖水体污染产生稀释作用,因此,南水北调东线工程通水后,东平湖水质有所改善^[51]。

4 建议

随着南水北调东线工程的实施以及近年来政府部门对东平湖的综合治理,东平湖水质得到了明显提高^[9],但湖周围仍存在一些污染源,其水质遭受污染的风险仍然存在,还需进一步加大对东平湖的保护力度。一方面,要继续加大力度落实政府的监管职责,控制周边河流、湖区污染及非点源污染,加强对周边城镇污水处理厂的监管,减少氮、磷等营养盐的入湖排放量,严禁超标排污,严防不合理行为造成的湖泊污染。大汶河是东平湖的主要注入河流,控制大汶河流域的污染负荷也是防止东平湖水质恶化的重要途径^[52]。另一方面,要加强宣传教育,提高群众的生态环保意识。湖区生态环境与当地群众的生活息息相关,公众参与在生态环境恢复重建中的作用至关重要。因此,建议积极采取措施,加强生态环境保护宣传教育,从而提高当地居民与游客的环保意识和科学素质,减少不合理的湖泊资源开发和利用,全面提升东平湖生态环境质量。

东平湖浮游动物群落受到了包括渔业生产在内的多种人类活动的干扰,呈现出小型化的趋势。建议进一步加强渔业管理,采取生态渔业发展模式,严格控制湖区围网养殖的方式及规模,限制过度养殖,进一步规范东平湖的渔业资源开发利用。充分发挥渔业对生态系统的调控功能,合理计划渔业捕捞活动,科学管理和调控鱼类增殖放流,合理搭配鲢、鳙、草鱼等滤食性、草食性鱼类,以鱼抑藻、以鱼控草。菹草(*Potamogeton crispus*)是东平湖水生维管束植物中的优势种群,其腐烂分解时容易导致湖水缺氧,严重时甚至会导致鱼类大量死亡,加剧湖泊生态环境恶化^[53]。建议通过投放草食性鱼类,以鱼治草,同时建议选取秋季作为最

佳投放季节^[54]。

建议充分利用大型水生植物净化和改善东平湖水质。近年来,东平湖水生植物物种多样性明显下降,沉水植物群落结构呈现单一化的发展趋势^[55]。建议在湖滨带种植本土挺水植物,吸收地表径流污染,减小风浪扰动,使水体悬浮物得到沉降;补种沉水植物,不仅为微生物和浮游动物提供繁育和庇护场所,还可以吸收水体中的氮、磷等营养盐^[56],减弱水体扰动产生的不利影响,提高悬浮物沉降速度和水体透明度,修复污染水体。要科学地构建水生植物修复机制,充分考虑沉水植物的物种多样性,确保在不同时期都能保持一定的生物量^[57]。同时,要及时对沉水植物进行收割和管控,防止过量沉水植物衰亡残体腐烂分解造成的水体二次污染。

参考文献(References):

- [1] 赵存厚. 南水北调工程概述[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(6): 5-9.
ZHAO Cunhou. Overview of China's South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2021, 41(6): 5-9.
- [2] 赵世新, 张晨, 高学平, 等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 125-133.
ZHAO Shixin, ZHANG Chen, GAO Xueping, et al. The Impact of the Operation of Eastern Route Project of the South-to-North Water Diversion Project on Water Quality in Lake Nansi [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 125-133.
- [3] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 401.
- [4] 杨宇峰, 黄祥飞. 浮游动物生态学研究进展[J]. 湖泊科学, 2000, 12(1): 81-89.
YANG Yufeng, HUANG Xiangfei. Advances in Ecological Studies on Zooplankton [J]. Journal of Lake Sciences, 2000, 12(1): 81-89.
- [5] JEPPESEN E, NÖGES P, DAVIDSON T A, et al. Zooplankton as Indicators in Lakes: A Scientific-Based Plea for Including Zooplankton in the Ecological Quality Assessment of Lakes According to the European Water Framework Directive (WFD) [J]. Hydrobiologia, 2011, 676(1): 279-297.
- [6] AZEVÊDO D J S, BARBOSA J E L, GOMES W I A, et al. Diversity Measures in Macroinvertebrate and Zooplankton Communities Related to the Trophic Status of Subtropical Reservoirs: Contradictory or

- Complementary Responses? [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 50: 135-149.
- [7] STEMBERGER R S, LARSEN D P, KINCAID T M. Sensitivity of Zooplankton for Regional Lake Monitoring [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(11): 2 222-2 232.
- [8] GUO C B, CHEN Y S, XIA W T, et al. Eutrophication and Heavy Metal Pollution Patterns in the Water Supplying Lakes of China's South-to-North Water Diversion Project [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 711: 134543.
- [9] QU X, CHEN Y S, LIU H, et al. A Holistic Assessment of Water Quality Condition and Spatiotemporal Patterns in Impounded Lakes Along the Eastern Route of China's South-to-North Water Diversion Project [J]. *Water Research*, 2020, 185: 116275.
- [10] GUO C B, CHEN Y S, GOZLAN R E, et al. Patterns of Fish Communities and Water Quality in Impounded Lakes of China's South-to-North Water Diversion Project [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136515.
- [11] 林育真, 李玉仙. 山东省东平湖轮虫种类组成研究 [J]. *齐鲁渔业*, 1997(2): 21-23.
LIN Yuzhen, LI Yuxian. Study on the Composition of Rotifers in Dongping Lake, Shandong Province [J]. *Shandong Fisheries*, 1997(2): 21-23.
- [12] 林育真, 李玉仙. 山东省东平湖枝角类初步研究 [J]. *动物学杂志*, 1998(2): 3-6.
LIN Yuzhen, LI Yuxian. A Preliminary Study of Cladocera in Dongping Lake, Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1998(2): 3-6.
- [13] 林育真, 李玉仙. 山东省东平湖桡足类的初步研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 1997(4): 32-36.
LIN Yuzhen, LI Yuxian. A Preliminary Study of Copepoda in Dongping Lake, Shandong Province [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1997(4): 32-36.
- [14] 于波, 李娣. 洪泽湖浮游动物群落结构调查 [J]. *中国科技纵横*, 2015(4): 18, 210.
YU Bo, LI Di. Investigation on the Community Structure of Zooplankton in Hongze Lake [J]. *China Science & Technology Panorama Magazine*, 2015(4): 18, 210.
- [15] 陈磊, 高东泉, 舒凤月, 等. 南四湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *动物学杂志*, 2016, 51(1): 113-120.
CHEN Lei, GAO Dongquan, SHU Fengyue, et al. Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Nasi Lake [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2016, 51(1): 113-120.
- [16] 王志忠, 巩俊霞, 陈金萍, 等. 东平湖浮游动物群落特征与水体营养类型评价 [J]. *广东农业科学*, 2012, 39(7): 172-174.
WANG Zhizhong, GONG Junxia, CHEN Jinping, et al. Community Characteristics of Zooplankton and the Assessment of Eutrophication Types in Dongping lake [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(7): 172-174.
- [17] DIVYA K R, ZHAO S S, CHEN Y S, et al. A Comparison of Zooplankton Assemblages in Nansi Lake and Hongze Lake, Potential Influences of the East Route of the South-to-North Water Transfer Project, China [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2021, 39: 623-636.
- [18] 王钦东, 冷春梅, 王俊鹏, 等. 东平湖生态修复研究 [J]. *齐鲁渔业*, 2008, 25(11): 47-49.
WANG Qindong, LENG Chunmei, WANG Junpeng, et al. Ecological Restoration Study of Dongping Lake [J]. *Shandong Fisheries*, 2008, 25(11): 47-49.
- [19] 苑俊敏, 邓焕广, 张磊. 东平湖沉积物有效磷空间分布特征及其环境意义研究 [J]. *广东化工*, 2021, 48(9): 184-185, 187.
WAN Junmin, DENG Huanguang, ZHANG Lei. Spatial Distribution Characteristics of Available Phosphorus and Environmental Significance of Sediments in Dongping Lake [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(9): 184-185, 187.
- [20] 贺顺德, 李荣容, 李保国. 南水北调东线一期工程东平湖水量调度方案 [J]. *人民黄河*, 2014, 36(2): 52-54.
HE Shunde, LI Rongrong, LI Baoguo. Dongping Lake Water Regulation Scheme of the East Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. *Yellow River*, 2014, 36(2): 52-54.
- [21] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [22] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [23] 王家揖. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [24] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志 淡水枝角类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [25] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究. 中国动物志 淡水桡足类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [26] SHANNON C E, WEAVER W, BLAHUT R E, et al. *The Mathematical Theory of Communication* [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

- [27] PIELOU E C. Species-Diversity and Pattern-Diversity in the Study of Ecological Succession[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10(2):370-383.
- [28] 黄丹,沈建忠,胡少迪,等. 长江天鹅洲故道浮游动物群落结构及水质评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3):328-334.
HUANG Dan, SHEN Jianzhong, HU Shaodi, et al. Zooplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Tian-e-zhou Oxbow of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(3):328-334.
- [29] MCNAUGHTON S J. Relationships among Functional Properties of Californian Grassland[J]. *Nature*, 1967, 216(5 111):168-169.
- [30] 林青,由文辉,徐凤洁,等. 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*, 2014, 34(23):6 918-6 929.
LIN Qing, YOU Wenhui, XU Fengjie, et al. Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dishui Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23):6 918-6 929.
- [31] 张映雪,王瑞,屈霄,等. 不同鱼类养殖方式对长江中游湖泊浮游植物群落的影响及其季节动态[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(10):2 260-2 269.
ZHANG Yingxue, WANG Rui, QU Xiao, et al. Effects of Fish Culture on Phytoplankton Communities and Seasonal Dynamics in Lakes Along the Middle Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(10):2 260-2 269.
- [32] 屈霄,郭传波,熊芳园,等. 梯级开发下金沙江下游鱼类群落结构特征及环境驱动因子[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(6):46-56.
QU Xiao, GUO Chuanbo, XIONG Fangyuan, et al. Characterization of the Fish Community and Environmental Driving Factors During Development of Cascaded Dams in the Lower Jinsha River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(6):46-56.
- [33] FRYER G. Crustacean Diversity in Relation to the Size of Water Bodies; Some Facts and Problems[J]. *Freshwater Biology*, 1985, 15(3):347-361.
- [34] DODSON S. Species Richness of Crustacean Zooplankton in European Lakes of Different Sizes[J]. *SIL Proceedings*, 1991, 24(2):1 223-1 229.
- [35] GASITH A, GAFNY S. Effects of Water Level Fluctuation on the Structure and Function of the Littoral Zone[C]// TILZER M M, SERRUYA C. *Large Lakes: Ecological Structure and Function*. Berlin: Springer-Verlag, 1990:156-171.
- [36] HAN B P, ARMENGOL J, GARCIA J C, et al. The Thermal Structure of Sau Reservoir (NE; Spain): A Simulation Approach[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 125(2/3):109-122.
- [37] 庞清江,亓剑,齐磊,等. 东平湖水生生物现状及水质分析[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2007, 38(2):247-251.
PANG Qingjiang, QI Jian, QI Lei, et al. Aquatic Biocoenosis and Water Quality in Dongping Lake[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2007, 38(2):247-251.
- [38] 陈秀丽,秦玉广,张金路,等. 东平湖浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(2):115-120.
CHEN Xiuli, QIN Yuguang, ZHANG Jinlu, et al. Study on Community Characteristics of Zooplankton and Assessment of Water Quality in Dongping Lake[J]. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science)*, 2017, 32(2):115-120.
- [39] ROMARE P, BERG S, LAURIDSEN T, et al. Spatial and Temporal Distribution of Fish and Zooplankton in a Shallow Lake[J]. *Freshwater Biology*, 2003, 48(8):1 353-1 362.
- [40] 郭刘超. 高邮湖各生态功能区后生浮游动物群落特征及水质评价[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(6):30-36.
GUO Liuchao. Community Structure of Metazoan Zooplankton and Water Quality Evaluation in Different Ecological Zones of Gaoyou Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(6):30-36.
- [41] 葛家春. 骆马湖浮游动物生态特性研究[J]. *江西水产科技*, 2002(4):14-20.
GE Jiachun. Study on the Ecological Characteristics of Zooplankton in Luoma Lake[J]. *Jiangxi Fishery Science and Technology*, 2002(4):14-20.
- [42] 龚勋,封圆圆,赵海涛,等. 倒天河水库和碧阳湖夏秋轮虫群落结构特征及水质评价[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(12):104-107.
- [43] GONG Xun, FENG Yuanyuan, ZHAO Haitao, et al. Structural Characteristics of Rotifer Community and Water Quality Evaluation in Daotianhe Reservoir and Biyang Lake in Summer and Autumn[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(12):104-107.
- [43] 饶利华,吴芝瑛,徐骏,等. 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*, 2013, 25(1):138-146.
RAO Lihua, WU Zhiying, XU Jun, et al. Relationship Between Environmental Factors of the Water and Rotifer Community Structure in West Lake, Hangzhou

- [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25 (1): 138-146.
- [44] LI Y R, MENG J, ZHANG C, et al. Bottom-up and Top-down Effects on Phytoplankton Communities in Two Freshwater Lakes [J]. *PLoS One*, 2020, 15 (4): e0231357.
- [45] 赵玉宝. 鲤鱼种和鲢鳙对池塘浮游生物的影响 [J]. *生态学报*, 1993, 13 (4): 348-355.
ZHAO Yubao. Impacts of Carp Fingerling and Silver and Bighead Carp on Pond Plankton [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13 (4): 348-355.
- [46] 董显坤, 赵文, 任剑申, 等. 南水北调后密云水库浮游动物多样性及水生态环境评价 [J]. *吉林水利*, 2020 (6): 1-6, 11.
DONG Xiankun, ZHAO Wen, REN Jianshen, et al. Evaluation of Zooplankton Biodiversity and Water Ecological Environment in Miyun Reservoir After the Implementation of South to North Water Diversion Project [J]. *Jilin Water Resources*, 2020 (6): 1-6, 11.
- [47] 金琼贝, 盛连喜, 张然. 温度对浮游动物群落的影响 [J]. *东北师大学报 (自然科学版)*, 1991 (4): 103-111.
JIN Qiongbei, SHENG Lianxi, ZHANG Ran. The Influence of Temperature on Zooplankton Community [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science)*, 1991 (4): 103-111.
- [48] 吕乾, 胡旭仁, 聂雪, 等. 鄱阳湖丰水期水位波动对浮游动物群落演替的影响 [J]. *生态学报*, 2020, 40 (4): 1 486-1 495.
LYU Qian, HU Xuren, NIE Xue, et al. Impact of Water Level Fluctuations on the Succession of Zooplankton in Pongyang Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (4): 1 486-1 495.
- [49] 冷春梅, 董贯仓, 王亚楠, 等. 南水北调运行初期东平湖浮游植物群落特征分析 [J]. *水产学杂志*, 2019, 32 (1): 22-27.
LENG Chunmei, DONG Guancang, WANG Yanan, et al. Phytoplankton Community Structure Characteristics in Dongping Lake in Initial Stages of South-to-North Water Transfer Project [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, 32 (1): 22-27.
- [50] 胡尊芳, 宋印胜, 孙建峰, 等. 东平湖枯水期水质健康风险评价 [J]. *水电能源科学*, 2016, 34 (9): 31-34.
HU Zunfang, SONG Yinsheng, SUN Jianfeng, et al. Water Quality Health Risk Assessment of Dongping Lake in Dry and Wet Seasons [J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34 (9): 31-34.
- [51] 胡尊芳. 南水北调东线工程对东平湖水环境的影响 [J]. *山东国土资源*, 2017, 33 (10): 46-51.
HU Zunfang. Effect of East Route of South to North Water Transfer Project on Dongping Lake Water Environment [J]. *Shandong Land and Resources*, 2017, 33 (10): 46-51.
- [52] LU M, LIU J Z, CHEN Y J. Analysis on the Influencing Factors and Comprehensive Management of Environmental Problems in Dongping Lake [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2011, 2 (S1): 68-71.
- [53] 刘双爽, 陈诗越, 姚敏, 等. 水生生物群落所揭示的湖泊水环境状况——以东平湖为例 [J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23 (2): 318-323.
LIU Shuangshuang, CHEN Shiyue, YAO Min, et al. Water Environment Revealed by Aquatic Communities of Lakes: A Case Study on Dongping Lake [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23 (2): 318-323.
- [54] 贾凤聪, 吴亚斌, 赵进勇, 等. 沉水植物菹草生长习性与治理方法研究进展 [J]. *人民珠江*, 2021, 42 (6): 47-51.
JIA Fengcong, WU Yabin, ZHAO Jinyong, et al. Research Progress on the Growth Habits and Control Methods of Submerged Plant *Potamogeton crispus* [J]. *Rearl River*, 2021, 42 (6): 47-51.
- [55] 田翠翠, 吴幸强, 冯闪闪, 等. 东平湖沉水植物分布格局及其与环境因子的关系 [J]. *环境科学与技术*, 2018, 41 (11): 15-20.
TIAN Cuicui, WU Xingqiang, FENG Shanshan, et al. Relationship Between the Distribution of Submerged Plants and Environment Factors in Dongping Lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41 (11): 15-20.
- [56] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14 (8): 1 351-1 353.
WU Zhenbin, QIU Dongru, HE Feng, et al. Effects of Rehabilitation of Submerged Macrophytes on Nutrient Level of a Eutrophic Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (8): 1 351-1 353.
- [57] 罗希, 马俊超. 关于浅水湖泊沉水植物覆盖度设计依据的探讨 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38 (3): 20-24.
LUO Xi, MA Junchao. Discussion on the Coverage Design of Submerged Vegetation in Shallow Lakes [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38 (3): 20-24.