

南水北调东线工程运行 3 年后东平湖浮游植物群落特征及环境驱动因子*

董贯仓^{1,2**}, 冷春梅^{1,2}, 丛旭日^{1,2}, 刘超^{1,2}, 朱士文^{1,2}, 孙鲁峰^{1,2}, 高云芳^{1,2}, 客涵^{1,2}, 李秀启^{1,2}

(1: 山东省淡水渔业研究院, 济南 250013)

(2: 山东省淡水水产遗传育种重点实验室, 济南 250117)

摘要: 为掌握东平湖浮游植物在南水北调东线工程运行后的群落结构变化特征及探究其环境驱动因子, 于通水运行 3 周年后的 2017 年分 4 个季节对东平湖的 18 个样点进行采样调查, 同步开展水环境调查。结果显示: 共检出浮游植物 191 种属(包括变种), 其中硅藻门、绿藻门、裸藻门、蓝藻门、金藻门、黄藻门、甲藻门和隐藻门分别为 64、57、28、22、8、5、4 和 3 种属; 优势种属包括蓝藻门的漂浮浮丝藻(*Limnothrix planctonica*) 和色球藻(*Chroococcus* sp.), 绿藻门的小球藻(*Chlorella vulgaris*) 以及硅藻门的小环藻(*Cyclotella* sp.)、舟形藻(*Naucula* sp.) 和针杆藻(*Synedra* sp.) 等(优势度 $Y > 0.02$); 全年密度和生物量分别为 6.74×10^6 cells/L 和 5.71 mg/L, 并呈现显著季节与空间差异。浮游植物密度季节变化为夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季, 生物量季节变化为夏季 > 冬季 > 秋季 > 春季; 春、夏、秋、冬季物种数分别为 71、78、53 和 125 种, Shannon-Wiener 多样性指数(H') 均值分别为 1.90、1.84、1.76 和 2.52, Margalef 丰富度指数(D) 均值为 3.07、3.98、2.79 和 4.75; 冗余分析与 Pearson 相关性分析结果显示, 水体综合营养状态指数、高锰酸盐指数、氨氮和水温是影响东平湖浮游植物群落结构的关键驱动因子。对比南水北调东线工程实施之前及通水初期的结果, 东平湖浮游植物优势种群无明显变化, 密度则较通水初期稍有升高。本研究分析了东平湖浮游植物群落的时空分布特征, 发现调水工程可能通过物质带入影响水质, 进而引起浮游植物量增加, 湖区养殖的退出及增殖放流的实施降低了富营养化风险, 但仍存在浮游植物生物量特别是蓝藻生物量升高的风险, 建议在调水管理中加强水域生态监测及生境调控技术研究, 保障调水水质安全。

关键词: 南水北调东线工程; 东平湖; 浮游植物; 群落特征; 驱动因子

Phytoplankton community and driving environmental factors in Lake Dongping after 3 years implementation of the east route of South-to-North Water Diversion Project*

Dong Guancang^{1,2**}, Leng Chunmei^{1,2}, Cong Xuri^{1,2}, Liu Chao^{1,2}, Zhu Shiwen^{1,2}, Sun Lufeng^{1,2}, Gao Yunfang^{1,2}, Ke Han^{1,2} & Li Xiuqi^{1,2}

(1: Shandong Freshwater Fisheries Research Institute, Jinan 250013, P.R.China)

(2: Shandong Provincial Key Laboratory of Freshwater Genetics and Breeding, Jinan 250117, P.R.China)

Abstract: In order to investigate the community characteristics of phytoplankton and the determining factors in Lake Dongping after implementation of the east route of South-to-North Water Diversion Project, seasonal samples of phytoplankton and aquatic environment from 18 sampling sites were collected in 2017. A total of 191 taxa of phytoplankton (genera or species) were identified with 64 taxa of Bacillariophyta, 57 taxa of Chlorophyta, 28 taxa of Euglenophyta, 22 taxa of Cyanophyta, 8 taxa of Chrysoophyta, 5 taxa of Xanthophyta, 4 taxa of Pyrrophyta and 3 taxa of Cryptophyta. The dominant taxa were *Limnothrix planctonica* and *Chroococcus* sp. of Cyanophyta, *Chlorella vulgaris* of Chlorophyta and *Cyclotella* sp., *Naucula* sp. and *Synedra* sp. of Bacillariophyta, etc ($Y > 0.02$). The phytoplankton density and biomass were 6.74×10^6 cells/L and 5.71 mg/L with the seasonal variation of density being

* 2021-05-06 收稿; 2021-06-11 收修改稿.

山东省自然科学基金项目(ZR2020MC193)、山东省重点研发计划项目(2019GSF109111)和山东省农业重大应用技术创新项目联合资助.

** 通信作者; E-mail: dgc3869676@163.com.

summer > autumn > winter > spring and that of biomass being summer > winter > autumn > spring, respectively. About the phytoplankton diversity in four quarters, the number of species was 71, 78, 53 and 125, while the averages of the Shannon-Wiener index were 1.90, 1.84, 1.76 and 2.52 and Margalef diversity index were 3.07, 3.98, 2.79 and 4.75, respectively. Meanwhile, the results of redundancy analysis and Pearson analysis for the relationship between phytoplankton and aquatic environment showed that the factors such as comprehensive nutrition state index, permanganate index, ammonia nitrogen concentration, and water temperature played a key role in affecting the structure and dynamics of the phytoplankton community in Lake Dongping. Compared with before implementation of the east route of South-to-North Water Diversion Project and the initial stage of it, although the density of phytoplankton showed a rise, there was no obvious response in their dominant genera. This study preliminarily verified the spatio-temporal distribution characteristics of the phytoplankton community in Lake Dongping. Total phytoplankton density was found to have increased with the change of water quality caused by the east route of South-to-North Water Diversion Project. The withdrawal of aquaculture and implementation of fishery enhancement and releasing had reduced the risk of eutrophication, but the proliferation of phytoplankton probably increased the risk of algal-bloom in Lake Dongping. Given the changes of phytoplankton community and water quality after water diversion, it is necessary to strengthen the ecological monitoring and controlling in the management of water quality safety and stability.

Keywords: The east route of South-to-North Water Diversion Project; Lake Dongping; phytoplankton; community characteristics; driving factor

东平湖(35°30′~36°20′N, 116°00′~116°30′E)位于山东省东平县境内,总面积 627 km²(其中新湖区 418 km²,老湖区 209 km²).其属浅水草型湖泊,大致经历了原始自然捕捞、1980s 起“以养为主”的“三网”养殖以及 2005 年同步增殖放流并于 2017 年后全面发展生态渔业 3 个渔业发展阶段^[1-2].目前,作为南水北调东线最后一个调蓄湖和山东省第二大淡水湖,东平湖承担着分滞黄河洪水和接纳大汶河水的重任,是“南水北调”的重要枢纽以及山东省的重要淡水渔业生产基地^[3].南水北调在实现水资源跨区域转移的同时,水体理化性质及沿线水体水文动力特征必将改变,并将会对水体生态系统造成复杂和不确定的影响.同时,《南水北调总体规划》对输水干线的水质要求达到地表水Ⅲ类标准,东平湖对保障华北和胶东用水安全至关重要.栗文佳等^[4]对近 40 年东平湖水质及驱动因素的分析认为,东平湖水质主要受入湖径流量、工业废水和城市污水、湖区网围养殖、流域农业面源污染、旅游业、水环境综合治理以及工程调水等影响.胡尊芳^[5]通过对调水通水前的 2012 年及通水后的 2015 年的不同水文时期的东平湖水环境的监测,认为工程调水有利于东平湖水环境的改善,但需加强湖区环境保护及污染源管控.随着南水北调东线工程 2013 年底的试通水及其后常态化调水,以及湖区渔业养殖的全面退出,东平湖水域环境的适时监测有助于进一步完善调水工程措施并保障下游用水安全.

浮游植物是湖泊水域生态系统的重要组成部分,作为水体中的主要初级生产者及水域食物链的基础,对维持水域生态系统的平衡、物质循环与能量流动具有十分重要的作用^[6-7];同时,作为鱼、虾、贝等水生动物的食物来源,与渔业生产关系密切;此外,浮游植物群落对环境变化敏感,其种类组成、群落结构和数量变化可反映水环境状况^[8-9],相比理化监测具有长期性和综合性等优点,能较好地反映出污染物的综合效应并客观、全面地反映水环境质量状况^[10],故被广泛应用于湖泊水域环境监测和评价.现有东平湖浮游植物群落的调查研究^[11-15],多发生在增殖放流后及调水工程通水前,并且集中于种类组成、生物量等群落结构调查;在调水工程通水后,则仅见冷春梅等^[16]于调水初期试运行阶段对浮游植物群落结构的调查.近年来,南水北调东线工程已实现调水常态化,东平湖水域的渔业生产方式、资源养护活动及水环境治理工程均发生较大转变,必然造成湖泊水域生境与浮游植物群落的变动.一方面,浮游植物群落可反映工程调水下东平湖水体理化性质的变动状况;另一方面,探究浮游植物群落变动的驱动因子有助于预测工程调水等人类活动对水域生境的影响,并对进一步完善调水保障措施和指导渔业生产具有重要作用.本研究通过 2017 年对东平湖浮游植物及水质的调查,分析调水工程运行后东平湖浮游植物群落结构变化特征及其环境驱动因子,以为合理评估东平湖水质状况及针对性地实施水质涵养措施提供科学依据,并将为保障南水北调用水安全与沿线水体综合管护增添基础资料.

1 材料与方法

1.1 位点设置

依据地理方位、水源汇入及湖区开发利用等状况,在东平湖内设置18个采样点(图1,其中D16、D17和D18分别为南水北调出湖口、入湖口及大汶河入湖口),基本涵盖了入湖河流、调水渠道、历史养殖区、自然保护区等水域,并分别于2017年3月初(冬季)、5月(春季)、8月(夏季)和11月(秋季)进行了调查采样。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 浮游植物 用有机玻璃采水器采集表水样(0.5 m),取1 L水样加入15 mL鲁哥试剂固定后带回实验室,静置沉淀24 h后浓缩镜检。镜检计数在10×40倍光学显微镜下进行,首先充分摇匀浓缩液,然后取出并放入0.1 mL计数框中,观察100个视野,每样品计数两次,若两片计数个数相差15%以上则进行第3片计数,取相近两片平均值换算成每升水样的细胞个数,即为浮游植物密度。根据形态相似的几何学方法计算浮游植物体积,并转换为生物量^[17],浮游植物种类鉴定参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[18]。

1.2.2 水质 透明度(SD)用塞式罗盘测定,水温(WT)、溶解氧(DO)、pH等采用YSI-MP556型水质仪现场测定;并参照《水与废水监测分析方法》^[19],主要测定高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)和总磷(TP)等指标。

1.3 数据处理

1.3.1 浮游植物群落结构 用物种数(S)、密度(d)、生物量(B)、优势度指数(Y)、Shannon-Wiener多样性指数(H')^[20]和Margalef丰富度指数(D)^[21]等,分析浮游植物群落特征,将优势度指数 $Y \geq 0.02$ 的藻类设为优势种^[22]。

1.3.2 水质状况评价 水体质量状况的评价主要参照《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》中的综合营养状态指数(TLI)法。

1.3.3 浮游植物群落结构与环境因子的相关性分析 所有数据通过Excel软件整理,使用SPSS 21.0软件进行差异显著性和Pearson相关分析。用CANOCO 4.5软件进行冗余分析(RDA),分析浮游植物物种信息与环境因子的相关关系,进入分析的物种需满足至少在一个采样点的相对密度 $\geq 1\%$ 并且出现频率 $\geq 30\%$ ^[23],去趋势分析(DCA)显示,各轴梯度长度最大的为1.3(小于3),故选用RDA。为保证数据的正态性,所有数据均进行 $\lg x$ 转换;RDA分析中,先对环境变量进行预选(forward selection),并检验各环境变量贡献率的显著性(蒙特卡罗置换检验, Monte Carlo permutation test, 499次),最后选取具有显著贡献的环境变量应用CanoDraw软件绘制RDA图。数据显著性水平确定为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 东平湖水域浮游植物群落特征

2.1.1 种类组成及优势种 东平湖调查中,共鉴定浮游植物191种属(包括变种),其中硅藻门、绿藻门、裸藻门、蓝藻门、金藻门、黄藻门、甲藻门和隐藻门分别为64、57、28、22、8、5、4和3种属,优势种属分别为蓝藻门的漂浮泽丝藻(*Limnithrix planctonica*)和色球藻(*Chroococcus* sp.),绿藻门的小球藻(*Chlorella vulgaris*),硅藻

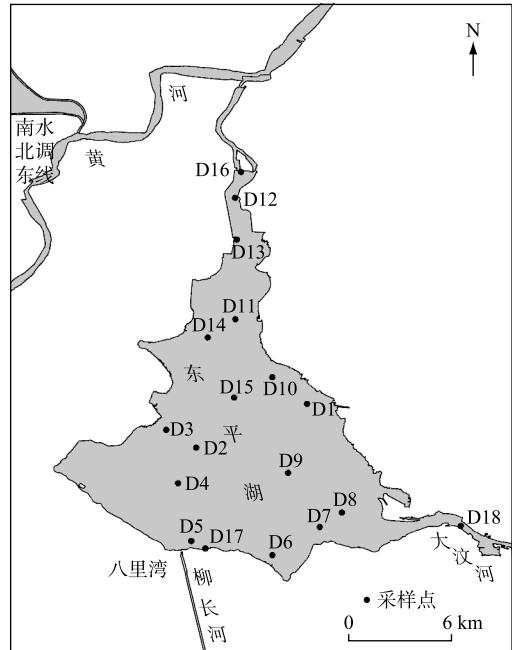


图1 东平湖调查站点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Dongping

门的小环藻 (*Cyclotella* sp.)、舟形藻 (*Naucula* sp.) 和针杆藻 (*Synedra* sp.) (表 1)。

表 1 东平湖不同季节浮游植物的优势度

Tab.1 Dominant species of phytoplankton in different seasons of Lake Dongping

门	优势种	优势度指数 (Y)				
		春季	夏季	秋季	冬季	2017 年
蓝藻门 Cyanophyta	色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	—	0.112	—	0.035	0.045
	颗粒常丝藻 <i>Tychonema bornetii</i>	0.075	—	—	—	—
	漂浮泽丝藻 <i>Limnothrix planctonica</i>	0.180	0.249	0.073	—	0.142
	胶质细鞘丝藻 <i>Leptolyngbya gelatinosa</i>	0.081	0.044	—	—	—
绿藻门 Chlorophyta	球衣藻 <i>Chlamydomonas globosa</i>	—	—	—	0.034	—
	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.047	0.040	0.147	0.056	0.063
硅藻门 Bacillariophyta	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.043	—	0.067	0.048	0.033
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	0.041	0.025	0.028	—	0.024
	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	—	—	—	0.095	—
	舟形藻 <i>Naucula</i> sp.	—	—	0.161	—	0.028
金藻门 Chrysophyta	圆筒锥囊藻 <i>Dinobryon cylindricum</i>	—	—	—	0.056	—
黄藻门 Xanthophyta	普通黄丝藻 <i>Tribonema vulgare</i>	—	—	0.032	—	—
隐藻门 Cryptophyta	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	—	—	—	0.029	—
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	—	—	—	0.059	—

从季节来看,物种数大小顺序为冬季>夏季>春季>秋季,其中冬季 125 种属,优势种为蓝藻门的色球藻,绿藻门的球衣藻 (*Chlamydomonas globosa*)、小球藻,硅藻门的小环藻、尖针杆藻 (*Synedra acus*),金藻门的圆筒锥囊藻 (*Dinobryon cylindricum*) 以及隐藻门的尖尾蓝隐藻 (*Chroomonas acuta*)、嗜蚀隐藻 (*Cryptomonas erosa*);夏季 78 种属,优势种为蓝藻门的色球藻、漂浮泽丝藻和胶质细鞘丝藻 (*Leptolyngbya gelatinosa*),绿藻门的小球藻以及硅藻门的针杆藻;春季 71 种属,优势种为蓝藻门的颗粒常丝藻 (*Tychonema bornetii*)、漂浮泽丝藻和胶质细鞘丝藻,绿藻门的小球藻以及硅藻门的小环藻和针杆藻;秋季 53 种属,优势种为蓝藻门的漂浮泽丝藻,绿藻门的小球藻,硅藻门的小环藻、针杆藻和舟形藻以及黄藻门的普通黄丝藻 (*Tribonema vulgare*)。

2.1.2 密度和生物量 东平湖不同季节不同站位的浮游植物密度变化范围为 $0.24 \times 10^6 \sim 27.42 \times 10^6$ cells/L (年平均值为 6.74×10^6 cells/L),呈现单峰模式并在夏季呈现峰值(图 2),全年最低值出现在秋季的 D9 站位和最大值出现在夏季的 D11 站位,其季节差异显著 ($P < 0.05$),但无显著空间差异 ($P > 0.05$);生物量变化范围为 0.20~38.25 mg/L (年平均值为 5.71 mg/L),亦呈现单峰模式并在夏季呈现峰值(图 3),全年最低值出现在春季的 D15 站位,最大值出现在秋季的 D5 站位,其季节差异显著 ($P < 0.05$),而空间差异仅 D5 显著高于 D1、D3、D4、D6、D7 和 D14 站位 ($P < 0.05$)。

2.1.3 多样性指数 本调查中,东平湖浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数呈现显著的时间差异 ($P < 0.05$),而基本无显著空间差异 ($P > 0.05$,图 4)。其中,Shannon-Wiener 多样性指数介于 0.63~2.99 之间,4 个季度均值分别为 1.90、1.84、1.76 和 2.52,不同站位均值介于 1~3 之间;Margalef 丰富度指数介于 0.68~6.37 之间,4 个季度均值分别为 3.07、3.98、2.79 和 4.75,不同站位均值介于 2.84~4.82 之间。

2.2 主要环境因子状况

东平湖 2017 年主要水环境因子的季节变化特征见表 2。调查期间,水温介于 8.81~31.20°C 之间,最高水温 (31.20°C) 出现在夏季。水体透明度介于 0.20~1.70 m 之间,最高值为春季 D15 的 1.70 m,最低值为春季调水期间调水工程入湖口 (D17) 的 0.20 m。pH 介于 7.65~10.27 之间,最高值出现在春季而最低值出现在秋季。DO 浓度介于 4.62~17.08 mg/L 之间,最高值出现在冬季而最低值出现在春季。NH₃-N 浓度在 0.0039~0.3044 mg/L 之间,冬季的 D15 站位全年最高而 D1 站位全年最低。TN 浓度在 0.5032~2.8609 mg/L 之间,夏季的 D18 站位全年最高而 D14 站位全年最低。TP 浓度在 0.0093~0.1262 mg/L 之间,夏季的 D12 站位全年

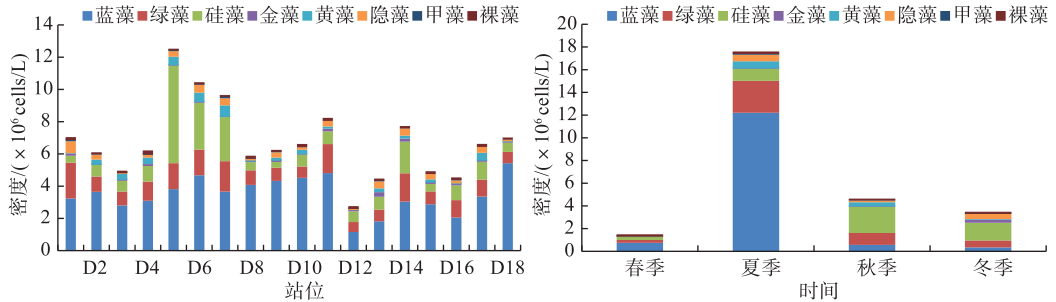


图2 2017年东平湖浮游植物密度的时空变化

Fig.2 Spatiotemporal variation of the density of phytoplankton in Lake Dongting in 2017

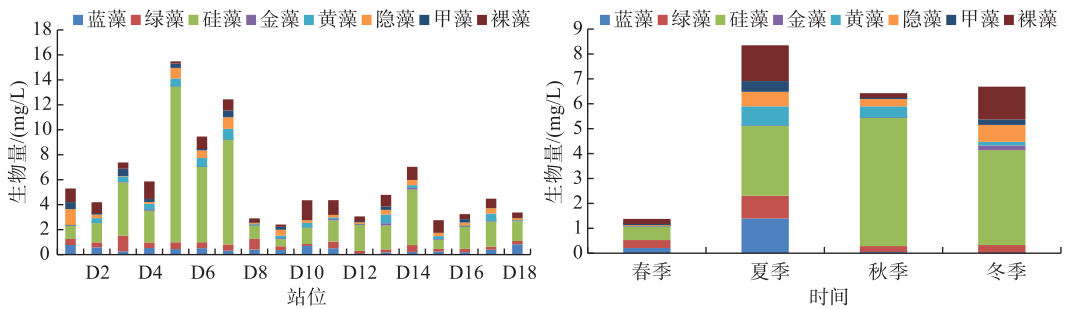


图3 2017年东平湖浮游植物生物量的时空变化

Fig.3 Spatiotemporal variation of the biomass of phytoplankton in Lake Dongting in 2017

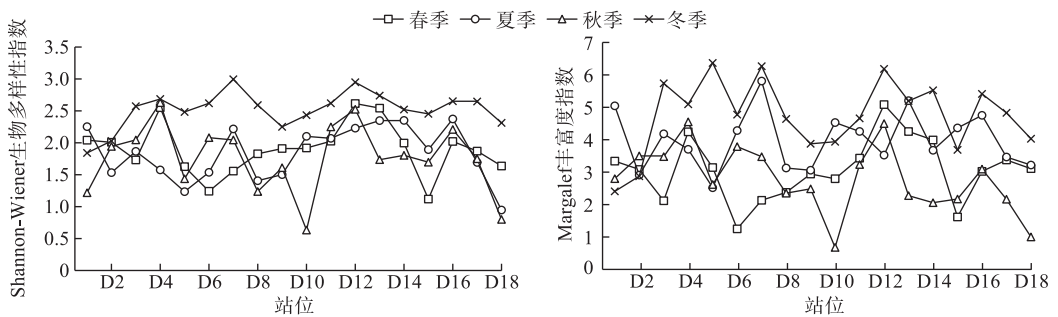


图4 2017年东平湖浮游植物生物多样性指数

Fig.4 Biodiversity index of phytoplankton in Lake Dongting in 2017

最高而冬季的D1 站点全年最低. COD_{Mn} 在 1.25~31.25 mg/L 之间,冬季的D12 站点全年最高而秋季的D8 站点全年最低. 此外,东平湖水体相关加权 TLI 介于 42.13~62.47 之间,总体属轻度富营养.

对不同环境因子时空分布的 ANOVA 分析结果显示,东平湖不同的水环境因子均呈现显著的时间差异 ($P<0.05$),但同时基本无显著空间差异 ($P>0.05$).

2.3 浮游植物群落对水环境因子的响应

2.3.1 Pearson 相关性分析 将不同季节的浮游植物物种数、生物量、密度、Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数与环境因子进行相关性分析,结果表明物种数与 NH_3-N 和 COD_{Mn} 浓度呈极显著正相关,与 TN 浓度呈显著正相关,与 SD 呈显著负相关;密度与 WT 、 TN 、 TP 、 $Chl.a$ 浓度及 TLI 呈极显著正相关,与

表 2 2017 年东平湖主要环境因子的季节变化*

Tab.2 Seasonal changes of major environmental factors of Lake Dongping in 2017

环境因子	春季	夏季	秋季	冬季	平均值
WT/°C	22.19±1.47 ^c	29.54±0.61 ^d	10.56±1.28 ^a	12.43±0.55 ^b	18.68±7.79
SD/m	0.85±0.37 ^b	0.46±0.18 ^a	0.50±0.09 ^a	0.77±0.30 ^b	0.65±0.30
pH	9.40±0.47 ^b	8.37±0.27 ^a	8.42±0.27 ^a	9.22±0.24 ^b	8.85±0.56
DO/(mg/L)	7.21±1.77 ^a	6.83±0.71 ^a	8.23±0.82 ^b	12.94±2.09 ^c	8.80±2.85
NH ₃ -N/(mg/L)	0.08±0.04 ^a	0.10±0.07 ^a	0.08±0.05 ^a	0.18±0.08 ^b	0.11±0.07
TN/(mg/L)	0.76±0.16 ^a	1.38±0.54 ^c	0.70±0.07 ^a	1.06±0.22 ^b	0.97±0.40
TP/(mg/L)	0.06±0.02 ^{bc}	0.07±0.02 ^c	0.06±0.02 ^b	0.04±0.01 ^a	0.06±0.02
<i>TLI</i>	48.88±3.74 ^b	58.65±2.58 ^d	52.51±3.23 ^c	46.66±3.16 ^a	51.68±5.54
COD _{Mn} /(mg/L)	6.29±1.84 ^a	11.69±3.25 ^b	3.42±1.39 ^a	15.90±7.67 ^c	9.33±6.44
Chl. <i>a</i> /(μg/L)	7.19±3.41 ^a	25.51±10.81 ^c	13.88±6.99 ^b	4.43±2.54 ^a	12.75±10.54

* 同一行中上标不同的小写字母表示不同季节差异显著($P<0.05$).

pH、SD 呈极显著负相关,与 DO 浓度呈显著负相关;生物量与 Chl.*a* 浓度呈极显著正相关,与 NH₃-N 及 *TLI* 呈显著正相关,与 pH 及 SD 呈显著负相关;Shannon-Wiener 多样性指数与 DO、NH₃-N 及 COD_{Mn} 浓度呈极显著正相关,与 pH 呈显著正相关,与 WT 和 Chl.*a* 浓度呈显著负相关;Margalef 丰富度指数与 NH₃-N 及 COD_{Mn} 呈极显著正相关,与 DO 浓度呈显著正相关(表 3).

表 3 东平湖浮游植物与环境因子的相关性矩阵

Tab.3 Correlation matrix of phytoplankton and environmental factors in Lake Dongping

	WT	SD	pH	DO	NH ₃ -N	TN	TP	<i>TLI</i>	COD _{Mn}	Chl. <i>a</i>
<i>S</i>	0.194	-0.248 *	-0.071	0.214	0.435 **	0.283 *	0.045	0.211	0.523 **	0.153
<i>B</i>	0.026	-0.247 *	-0.285 *	0.103	0.297 *	0.156	0.201	0.302 *	0.142	0.308 **
<i>d</i>	0.597 **	-0.387 **	-0.507 **	-0.252 *	0.022	0.497 **	0.404 **	0.714 **	0.162	0.739 **
<i>H'</i>	-0.241 *	-0.069	0.278 *	0.386 **	0.398 **	-0.125	-0.160	-0.224	0.379 **	-0.235 *
<i>D</i>	0.032	-0.213	0.053	0.284 *	0.443 **	0.157	-0.053	0.044	0.513 **	-0.028

** 表示相关性在 0.01 水平显著(双尾), * 表示相关性在 0.05 水平显著(双尾).

2.3.2 冗余分析 环境因子与浮游植物群落结构以及 13 个代表物种间的 RDA 分析结果(图 5)显示,共筛选出 5 个对浮游植物群落的结构多样性变化起重要作用的显著环境影响因子,即 *TLI*、COD_{Mn}、NH₃-N、pH、WT 和 DO,它们共同解释了 48.3%的浮游植物群落多样性信息,其中 *TLI* 解释率为 22% ($P=0.002, F=19.87$)、COD_{Mn} 为 11% ($P=0.002, F=11.69$)、NH₃-N 为 6% ($P=0.002, F=6.33$)、pH 为 5% ($P=0.002, F=5.36$)、WT 为 4% ($P=0.006, F=5.41$)、DO 为 3% ($P=0.002, F=3.69$). 从图 5 还发现,*TLI* 与 WT 呈显著正相关,二者具有协同影响作用,pH 与 DO 亦如此,且两组因子均主要对色球藻、漂浮绿丝藻、卵形衣藻、小球藻、双对栅藻、四尾栅藻、小型黄丝藻、针杆藻、蓝隐藻等代表物种的密度及浮游植物的密度 *d* 和 Shannon-Wiener 多样性指数 *H'* 等指标产生较高影响但相关性相反,表明了两组环境因子对群落截然相反的生态影响;COD_{Mn} 和 NH₃-N 亦具有协同作用,二者主要对小环藻、舟形藻、球藻和嗜蚀隐藻等代表物种的密度及浮游植物生物量 *B*、物种数 *S* 和 Margalef 丰富度指数 *D* 等指标产生较高正相关影响.

3 讨论

3.1 东平湖浮游植物群落结构的演替特征

本次调查中,东平湖共获得浮游植物 191 种属,优势种为蓝藻门的漂浮绿丝藻和色球藻,绿藻门的小球藻,硅藻门的小环藻、舟形藻和针杆藻,密度和生物量分别为 6.74×10^6 cells/L 和 5.71 mg/L. 以南水北调东线工程全线贯通并试通水的 2013 年度为界,东平湖浮游植物在调水前^[11-15]、调水初期^[16]及调水后的历年调查

情况见表4. 本次调查获得191种属,与路学堂^[15]2010—2012年调查到的207种(包括变种)相当,略高于Tian等^[14]2010—2011年的132种,明显高于冷春梅等^[16]2013年和郭沛涌等^[12]1994年的99种属以及冷春梅等^[13]2007年的83种属,远高于1980年的68种属^[11],表明了长期以来尤以21世纪以来浮游植物物种数的显著增加.

同时,东平湖浮游植物群落结构发生了较大改变,蓝藻门逐步占据浮游植物群落的优势地位. 1980年调查中,东平湖浮游植物优势种群主要为一些绿藻门、硅藻门、甲藻门和裸藻门种类^[11];至1994年,冷季仍以硅藻、绿藻和隐藻占据数量优势,但暖季蓝藻已逐步占据数量优势^[12];进入21世纪以来,历次调查特别是在夏、秋季节蓝藻门均为优势种群^[13-16].

此外,东平湖浮游植物密度和生物量的变化趋势与物种数相似,2010年以来虽稍波动,但在较长时间尺度上均显著升高. 本次调查浮游植物密度为 6.74×10^6 cells/L,近现代调查中仅稍低于2010—2012年的 9.65×10^6 cells/L^[15],而稍高于2010—2011年的 5.11×10^6 cells/L^[14]和2013年的 4.59×10^6 cells/L^[16],并显著高于相对久远的1994年的 1.21×10^6 cells/L^[12]和1980年的 2.40×10^6 cells/L^[11].

3.2 东平湖浮游植物群落的主要环境影响因子

一般而言,水体深度、温度^[24]、透明度、pH^[25]、DO^[26]、营养盐^[27]等水环境因子均影响浮游植物的群落组成、密度及分布. Pearson相关性分析结果表明,东平湖水体温度、pH、透明度、DO、NH₃-N、TN、TP、Chl. *a*及COD_{Mn}等水环境因子分别与不同的浮游植物群落结构特征指标呈较强的相关性(表3);RDA分析结果也显示,TLI、COD_{Mn}、NH₃-N、pH、WT和DO是浮游植物群落的显著环境影响因子,共同解释了48.3%的群落多样性信息(图5).

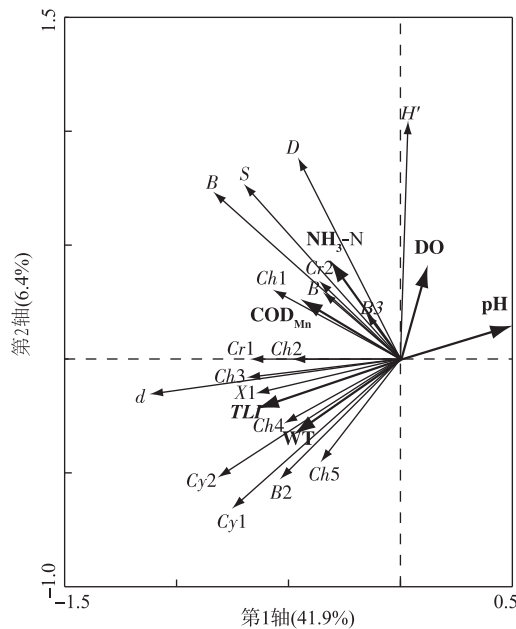


图5 东平湖浮游植物物种信息与非生物环境因子的RDA排序图

(Cy1:色球藻 *Chroococcus* sp.; Cy2:漂浮泽丝藻 *Limnothrix planctonica*; Ch1:球衣藻 *Chlamydomonas globosa*; Ch2:卵形衣藻 *Chlamydomonas ovalis*; Ch3:小球藻 *Chlorella vulgaris*; Ch4:双对栅藻 *Scenedesmus bijuga*; Ch5:四尾栅藻 *Scenedesmu quadricauda*; B1:小环藻 *Cyclotella* sp.; B2:针杆藻 *Synedra* sp.; B3:舟形藻 *Nauicula* sp.; X1:小型黄丝藻 *Tribonema minus*; Cr1:蓝隐藻 *Chroomomonas* sp.; Cr2:嗜蚀隐藻 *Cryptomonas erosa*)

Fig.5 Correlation plot of the redundancy analysis on the relationship between environmental factors and phytoplankton density in Lake Dongping

表4 近现代东平湖浮游植物群落结构特征

Tab.4 Community structure characteristics of phytoplankton in Lake Dongping at different periods

时间	物种数	优势种	密度/ ($\times 10^6$ cells/L)	生物量/ (mg/L)
1980年 ^[11]	7门35科68种属	绿藻门的卵囊藻属、纤维藻属、栅藻属, 硅藻门的直链藻属、菱形藻属、舟形硅藻属, 甲藻门的隐藻属、蓝隐藻属, 裸藻门的裸藻属和金藻门的单鞭金藻属	2.40	2.27
1994年 ^[12]	8门99属	暖季硅藻、隐藻、蓝藻数量最多, 占总量的72.33%; 冷季硅藻、绿藻、隐藻数量最多, 占总量的85.3%	1.21	—
2007年 ^[13]	8门83种属	优势种群的组成以蓝藻门为主, 色球藻和席藻为主要的优势种群, 蓝隐藻和隐藻在种群组成上也占有一定的优势	1.25	—
2010—2011年 ^[14]	8门72属132种	冬春季以硅藻为主, 夏秋季以蓝藻为主	5.11	—
2010—2012年 ^[15]	8门103属207种 (包括变种)	夏秋季为蓝藻门的湖泊伪鱼腥藻、依沙束丝藻; 春季为硅藻门的尖针杆藻、具星小环藻和隐藻门的尖尾蓝隐藻; 冬季为硅藻门的尖尾蓝隐藻和绿藻门的小球藻及微球衣藻	9.65	—
2013年 ^[16]	8门99种属	以针杆藻、小环藻和席藻为主的优势种群共20种属	4.59	3.33
2017年	8门191种属 (包括变种)	优势种分别为蓝藻门的漂浮泽丝藻和色球藻, 绿藻门的小球藻, 硅藻门的小环藻、舟形藻和针杆藻	6.74	5.71

首先, 营养盐作为浮游植物生长繁殖的必需物质, 影响着浮游植物的生长及生物量^[27-28]. *TLI* 体现了水体 N、P 营养物质的综合积累状况, 本研究的 RDA 分析表明 *TLI* 解释了 22% 的浮游植物群落信息, 并对 Cy1、Cy2、Ch2、Ch3、Ch4、Ch5、X1、B2、Cr1 等代表物种及浮游植物群落的密度产生较高正相关影响, 对 Shannon-Wiener 多样性指数产生较高负相关影响, 表明水体的富营养化会导致浮游植物密度的升高及群落多样性的降低. 同时, RDA 分析显示水体 TN 与 TP 浓度对浮游植物无显著影响. 雷沛等^[29] 研究认为, 当水体氮、磷浓度分别超过 0.2 和 0.02 mg/L 的临界浓度即可满足藻类的生长需要. 可能由于东平湖水体氮磷元素较丰富且相对均衡, 未表现出单一元素的限制作用. 此外, 浮游植物对于维持其新陈代谢所必需的氮元素多偏好氨氮盐类^[30], 营养盐类的存在形态对浮游植物也具有重要影响. Mengesha 等^[31] 研究发现, 氨氮占浮游植物摄取氮元素的 60% 以上. Zhang 等^[32] 对太湖的研究也发现, 氨氮是夏秋季蓝藻种群增长的重要驱动因子. RDA 分析中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 解释了 6% 的浮游植物群落信息, 并对 B1、B3、Ch1 和 Cr2 等代表物种的密度及浮游植物群落的生物量、物种数和 Margalef 丰富度指数等指标产生较高正相关影响, 表明氨氮盐类是浮游植物生物量的重要影响因子. 另外, COD_{Mn} 是水体有机污染的表现特征, 亦与浮游植物群落具有较大相关性, 其在浮游植物大量繁殖的水体中往往较高^[33]. 本研究中, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 具有协同作用, 均对 B1、B3、Ch1 和 Cr2 等代表物种的密度及浮游植物群落的生物量、物种数和 Margalef 丰富度指数等指标产生较高正相关影响, 表明氨氮盐类和 COD_{Mn} 共同促进浮游植物生物量及物种丰富度的升高.

同时, pH^[25]、DO^[26] 等水体理化状况对浮游植物群落结构及其分布也具有重要影响^[34-35]. 弱碱性环境有利于浮游植物吸收空气中的 CO_2 , 促进其光合作用从而具有较高的初级生产力; 而浮游植物在酸性水体中普遍生长较慢^[36]. 宋任彬等^[37] 对滇池的研究也发现, 水体 pH 值与浮游植物的光合作用强度呈显著正相关. 同时, DO 也是影响湖泊浮游植物群落的重要环境因子, 充足 DO 的水体中浮游生物密度、生物量和多样性指数一般较高, 大量研究即表明 DO 浓度与浮游植物的生长呈显著正相关^[38-39]. 本研究中, RDA 分析表明 pH 与 DO 浓度呈显著正相关, 均对 Cy1、Cy2、Ch2、Ch3、Ch4、Ch5、X1、B2、Cr1 等代表物种及浮游植物群落的密度产生较高负相关影响并对 Shannon-Wiener 多样性指数产生较高正相关影响, 其与浮游植物密度的关系与上述结果存在一定差异. 赵旭辉等^[40] 认为, 浮游生物的大量生长可能消耗水体 CO_2 , 进而引起了水体 pH 的升高. 同时, 赵海超等^[41] 对洱海水环境的研究表明, 浮游植物过量增加会成为 DO 浓度降低的“助推器”; 欧

阳潇然等^[42]对太湖梅州湾的研究也表明,浮游植物的呼吸作用及消亡后被降解是水体 DO 浓度降低的主要原因. 本研究中东平湖水体 pH 和 DO 浓度与浮游植物密度呈负相关关系,可能是东平湖大量浮游植物的生长代谢造成了水体 pH 和 DO 水平的差异.

另外,水温也可对浮游植物的种类和季节变化产生重要影响^[43]. 一般来讲,较高温度更适宜蓝藻的增殖,硅藻在低温更具竞争力以及绿藻对水温适应范围较广^[25]. 东平湖浮游植物的密度主要取决于蓝藻门、硅藻门和绿藻门类群(图2),其中蓝藻随水温上升在春季逐步占据优势并于夏季占据绝对优势,而硅藻虽在秋季和冬季占据优势但绿藻和硅藻数量的季节波动均较蓝藻小,故而夏季浮游植物密度最高但多样性指数较低. RDA 分析也表明,WT 解释了 4% 的浮游植物群落信息,并对 Cy1、Cy2、Ch2、Ch3、Ch4、Ch5、X1、B2、Cr1 等代表物种及浮游植物群落的密度产生较高正相关影响并对 Shannon-Wiener 多样性指数产生较高负相关影响. 同时,本研究 RDA 分析表明 WT 与 TLI 呈显著正相关,二者具有协同作用. 而水温变化主要与季节有关,也说明了东平湖水质在不同季节有明显变化且以高温的夏秋季水质较差,浮游植物多样性即随夏秋季富营养化程度的升高而呈下降趋势. 此外,全球气候变暖的趋势下,水温的升高会促进多数浮游植物的生长^[44],且因不同种类对温度变化响应的差异,在全球暖化下发生生态位的改变^[45]. 于东平湖浮游植物而言,季节温度变化下呈现以绿藻和硅藻向蓝藻占据绝对优势的演替趋势,并且在春季即已呈现出蓝藻优势. 在全球气候变暖的形势下,水温的上升可能会导致蓝藻优势时期的延长,并且调水过程中南水的汇入可能会提升受水水体水温以及将高温种提前带入,其是否加重蓝藻优势仍需进一步的验证分析.

3.3 南水北调工程等驱动因子的影响

除水体理化状况外,捕食压力^[46]、鱼类的丰度和群落组成^[47]以及水流流速、水团混合状况等水文和水体动力学特征^[48]也会影响湖泊水域浮游植物的生长及群落演替.

南水北调东线工程将水资源从长江流域向淮河、黄河流域的调度,被转移水体及沿线水体的理化状况及其水文、水动力学特征势必改变,该改变在一定程度上也将影响受水水域浮游植物群落特征的变化^[49]. 李庆等^[50]研究发现,调水水文脉冲影响下浮游植物群落在一个调水周期的优势种更替剧烈,并认为优势种的变动可能受调水与季节变化共同的影响. 赵立宾等^[51]对引黄济青棘洪滩水库近 15 年的调查分析却认为,温度和光照是水库浮游植物生长的主要驱动因子. 根据优势种的分布结果(表1),非调水期的夏季与调水期的春季及秋季的优势种重复率高于调水期间的冬季与春季以及秋季与冬季间的重复率,说明优势种的更替主要受季节变化引起的温度变化影响而非调水工程影响. 田家怡等^[52]调查发现南水北调东线输水沿线主要优势种特别是 12 种富营养化藻类分布广、密度高,而本调查中不同季节的优势种与调水前的 2007 年^[13]和调水初期的 2013 年^[16]基本一致,可能由于南水北调东线沿线湖区水体浮游植物种类的高度同质性,调水工程未造成东平湖浮游植物种类的剧烈变动. 同时,当前东平湖浮游植物的密度和生物量低于调水前^[15]而高于调水初期^[16],可能湖区养殖逐步撤除^[1]及流域内水质调控工程下湖区水质的逐步改善造成了调水前期浮游植物量的降低;而调水期间调水工程入湖口(D17)的水体营养物质浓度多高于大汶河入湖河段(D18)并均高于调水工程出湖口(D16),可能外源营养物质的汇入引起浮游植物量的再次升高,浮游植物密度 D18>D17>D16 及生物量 D17>D18>D16 亦验证了该点(图2,3). 2013 年南水北调东线工程通水以来,工程调水已成为东平湖重要的补给水源之一. 依据工程设计,东平湖具备年度调江水 14.67 亿 m³ 的能力,且截至 2018—2019 调水年度已累计调引长江水达 38.3 亿 m³^[53]. 除 2013 年试通水并运行调水 3400 万 m³^[15]外,东平湖年平均调水约 7.6 亿 m³. 而在调水工程前,大汶河为东平湖的主要补给水源,流域多年平均径流量为 11.49 亿 m³^[54]. 于调水工程后的东平湖而言,其年汇入水量已增加约 2/3,而本研究中工程调水水体(D17)的营养物质浓度多高于大汶河入湖河段(D18)并均高于出湖口(D16),南水北调的常态化运营下更多更高营养物质浓度水体的汇入,其带来的物质积累可能造成水体富营养化的加剧,增加夏、秋季主要优势种蓝藻的暴发风险,必然成为东平湖生态调控能力的巨大挑战,而其长期的复杂影响更有待进一步的监测及环境治理措施的持续加强实施. 此外,东平湖浮游植物的 Shannon-Wiener 多样性指数稍高于调水初期^[16]而显著低于调水前^[15],与李庆等^[50]发现的调水后南四湖浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数整体呈下降趋势的研究结果基本一致. 虽然目前调水工程尚未对东平湖浮游植物优势种更替造成剧烈影响,但可能已通过带入营养物质影响湖区水质并导致浮游植物密度和生物量的升高,其在更长时期的常态化运营后可能

会造成浮游植物群落结构的变化。

同时,渔业生产作为湖泊的重要功能之一,一方面无序的投饲养殖会造成营养物质的富集,另一方面增养殖鱼类也会直接摄食或间接影响浮游生物群落。东平湖自 1980s 起坚持“以养为主”的渔业,2005 年开始实施增殖放流,后随调水工程建设至 2017 年全部清退湖区养殖转而发展生态渔业。与之对应,1980 年浮游植物主要由绿藻门、硅藻门、甲藻门和裸藻门种类组成^[11],后随养殖业快速发展至 1994 年蓝藻在暖季占据一定数量优势^[12]。自 1990s^[55]特别是 21 世纪^[56]以来,湖区活跃的渔业生产及外源废污水的汇入造成水体营养物质的大量富集,蓝藻 2007 年^[13]及其后占据了浮游植物群落的主要优势。但是,浮游植物密度在 1994 和 2007 年却稍低于 1980 年^[11-13],其中 1994 年为湖泊养殖快速发展期及 2007 年为同步实施湖区增殖的快速发展期,可能湖区大规模网箱养殖及主要增殖的鲢鳙鱼有效控制了浮游植物的生长繁殖。Xiao 等^[46]研究即认为,一定放养密度的鲢鳙鱼可有效控制浮游植物的现存量。此外,东平湖浮游植物密度与生物量在 2010 年后呈波动升高并显著高于 2007 年以前,可能是由于随湖区养殖的逐步全部清退,虽然增殖放流稳定于较大规模但湖内鲢鳙鱼总量显著减少。由此可见,虽然湖区养殖的清退降低了水体营养物质积累及富营养化风险,但浮游植物生物量却存在一定程度的升高,渔业利用方式对湖区浮游植物群落的复杂影响也有待进一步研究。

综上所述,伴随南水北调东线工程的建成通水及近年来湖区渔业生产方式的巨大转变,东平湖水文条件、水环境质量已发生较大变化^[1],湖泊水生生态系统也在逐步改变^[16]。一方面,湖泊水域内营养物质的积累以及南水北调大量调水等外来水源的营养物质汇入,将是当前东平湖生态系统良好水质调控功能的巨大挑战,应通过加强调水上游的水质改善和湖区水质调控工程建设以及湖泊生境承载能力的跟踪监测,以防止湖泊水体的富营养化并保障下游用水安全;另一方面,伴随湖区渔业生产方式的转变,虽然湖区养殖的全面退出可在一定程度降低富营养化风险,但蓝藻尤在夏、秋季仍将长期占据东平湖浮游植物的主要优势,且养殖清退后湖区鲢鳙鱼总量的降低可能会引起浮游生物量的升高。由此可见,湖区渔业生产方式的改变、南水北调东线工程的大量调水、流域水体营养物质的汇入及全球气候的长期性变化,都会直接或间接影响东平湖浮游植物群落,而其种群组成、群落特征及其分布等响应变化也有待长期的跟踪分析。

4 结语

1) 东平湖共有浮游植物 191 种属,优势种主要为蓝藻门的漂浮泽丝藻和色球藻,绿藻门的小球藻以及硅藻门的小环藻、舟形藻和针杆藻,密度和生物量分别为 6.74×10^6 cells/L 和 5.71 mg/L;21 世纪以来蓝藻已逐步占据东平湖浮游植物的优势地位,调水工程通水以来浮游植物量稍有升高。

2) TLI 、 COD_{Mn} 、 NH_3-N 和 WT 为影响东平湖浮游植物生长的主要环境驱动因子。

3) 南水北调东线工程可能通过营养物质带入影响东平湖水质并引起浮游植物量的升高,但未对其优势种更替造成剧烈影响;湖区养殖的退出及增殖放流的实施,虽降低了水体营养物质积累与富营养化风险,但仍存在浮游植物生物量特别是蓝藻生物量升高的风险。

5 参考文献

- [1] Dong GC, Li XQ, Liu C *et al.* Analysis of water quality in fishery waters of Dongping Lake. *Chinese Journal of Fisheries*, 2018, **31**(4): 20-26. [董贯仓, 李秀启, 刘超等. 东平湖渔业水域水环境质量分析. 水产学杂志, 2018, **31**(4): 20-26.]
- [2] Gu XH, Mao ZG, Ding HP *et al.* Progress and prospect of lake fishery. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 1-14. DOI: 10.18307/2018.0101. [谷孝鸿, 毛志刚, 丁慧萍等. 湖泊渔业研究: 进展与展望. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 1-14.]
- [3] Chen ZK. A research on Dongping Lake district ecological economy development of East Route of South-to-North Water Transfer. *Ecological Economy*, 2009, **25**(11): 62-64. [陈兆开. 南水北调东线东平湖库区生态经济可持续发展研究. 生态经济, 2009, **25**(11): 62-64.]
- [4] Li WJ, Chen YY, Yu SY *et al.* Water environment changes of Dongping Lake in nearly 40 years and its driving factors. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(10): 48-52. DOI: 10.13205/j.hjgc.201810010. [栗文佳, 陈影影, 于世永等. 近 40 年来东平湖水环境变迁及驱动因素. 环境工程, 2018, **36**(10): 48-52.]
- [5] Hu ZF. Effect of East Route of South to North Water Transfer Project on Dongping Lake water environment. *Shandong Land and Resources*, 2017, **33**(10): 46-51. [胡尊芳. 南水北调东线工程对东平湖水环境的影响. 山东国土资源, 2017,

- 33(10): 46-51.]
- [6] Mwedzi T, Bere T, Mangadze T. Macroinvertebrate assemblages in agricultural, mining, and urban tropical streams: Implications for conservation and management. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(11): 11181-11192. DOI: 10.1007/s11356-016-6340-y.
- [7] Zhu WJ, Pang WT, You QM *et al.* Phytoplankton community structure and the evaluation of water quality in spring, Huaihe River Basin. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 637-645. DOI: 10.18307/2017.0312. [朱为菊, 庞婉婷, 尤庆敏等. 淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 637-645.]
- [8] Xie B, Zhang S, Li L *et al.* Community structure of phytoplankton in the sea farming of Haizhou Bay and its relationships with environmental factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 121-129. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0199. [谢斌, 张硕, 李莉等. 海州湾海洋牧场浮游植物群落结构特征及其与水质参数的关系. 环境科学学报, 2017, **37**(1): 121-129.]
- [9] Thomas MK, Fontana S, Reyes M *et al.* The predictability of a lake phytoplankton community, over time-scales of hours to years. *Ecology Letters*, 2018, **21**(5): 619-628. DOI: 10.1111/ele.12927.
- [10] Wang BL, Wang LQ, Zhang W *et al.* Phytoplankton community structure in constructed root-channel wetlands in summer. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(4): 2109-2121. [王宝玲, 王丽卿, 张玮等. 构筑根孔湿地夏季浮游植物群落结构特征. 环境工程学报, 2016, **10**(4): 2109-2121.]
- [11] Collaborating group of "Fishery resources in Yellow River system" ed. Fishery resources in Yellow River system. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1986. [黄河水系渔业资源调查协作组. 黄河水系渔业资源. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1986.]
- [12] Guo PY, Lin YZ, Li YX. Study on phytoplankton and evaluation of water quality in Dongping Lake. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1997, (4): 37-42. [郭沛涌, 林育真, 李玉仙. 东平湖浮游植物与水质评价. 海洋湖沼通报, 1997, (4): 37-42.]
- [13] Leng CM, Gong JX, Wang YN *et al.* Analysis of phytoplankton biological quantity in Dongping Lake in 2007. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2009, **40**(4): 513-516. [冷春梅, 巩俊霞, 王亚楠等. 东平湖2007年浮游植物调查及分析. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2009, **40**(4): 513-516.]
- [14] Tian C, Lu XT, Pei HY *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in Dongping Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(3): 2627-2645. DOI: 10.1007/s10661-012-2736-4.
- [15] Lu X. The research on phytoplankton community, driving environmental factors and the possibility of cyanobacterial bloom in Dongping Lake, China [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2013. [路学堂. 东平湖浮游植物群落结构与驱动因子及蓝藻水华可能性研究[学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.]
- [16] Leng CM, Dong GC, Wang YN *et al.* Phytoplankton community structure characteristics in Dongping Lake in initial stages of South-To-North Water Transfer Project. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, **32**(1): 22-27. [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. 水产学杂志, 2019, **32**(1): 22-27.]
- [17] Sun J, Liu DY, Qian SB. Study on phytoplankton biomass I. Phytoplankton measurement biomass from cell volume or plasma volume. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, **21**(2): 75-85. [孙军, 刘东艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究 I. 浮游植物生物量细胞体积转化法. 海洋学报: 中文版, 1999, **21**(2): 75-85.]
- [18] Hu W, Wei Y eds. The freshwater alga of China-systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006. [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统, 分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [19] Editorial Board of "Monitoring and analysis methods of water and wastewater", Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. Monitoring and analysis methods of water and wastewater; fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243-285. [国建环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-285.]
- [20] Shannon CE, Weaver W eds. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [21] Magalef DR ed. Inperspectives marine biology (A Buzzati-Traversoed). California: University of California Press, 1958: 323-347.
- [22] Xu ZL, Chen YQ. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea. *Chinese Journal of Ecology*, 1989, **8**(4): 13-15, 19. [徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系. 生态学杂志, 1989, **8**(4): 13-15, 19.]
- [23] Lin Q, You WH, Xu FJ *et al.* Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dishui

- Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(23): 6918-6929. [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. *生态学报*, 2014, **34**(23): 6918-6929.]
- [24] Bai NJ, Chen L, Jiang YN *et al.* Spatio-temporal characteristics of phytoplankton distribution and the identification of driving factors in the arsenic-contaminated Yangzong Lake. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 147-158. DOI: 10.18307/2019.0114. [白宁静, 陈丽, 蒋伊能等. 阳宗海砷污染背景下浮游植物的时空分布特征及其驱动因子解析. *湖泊科学*, 2019, **31**(1): 147-158.]
- [25] Jun S, Wang DB, Zhou JH *et al.* Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Lhasa River. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 787-798. DOI: 10.5846/stxb201806011225. [君珊, 王东波, 周健华等. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系. *生态学报*, 2019, **39**(3): 787-798.]
- [26] Kunlasak K, Chitmanat C, Whangchai N *et al.* Relationships of dissolved oxygen with chlorophyll-a and phytoplankton composition in tilapia ponds. *International Journal of Geosciences*, 2013, **4**(5): 46-53. DOI: 10.4236/ijg.2013.45b008.
- [27] Ma Y, Li GB, Li J *et al.* Seasonal succession of phytoplankton community and its relationship with environmental factors of North Temperate Zone water of the Zhalong Wetland, in China. *Ecotoxicology*, 2014, **23**(4): 618-625. DOI: 10.1007/s10646-014-1231-9.
- [28] Liu LF, Zhou XH, Gao J *et al.* Phytoplankton community structure and trophic status evaluation in Dajiuhe wetland of Shennongjia Alpine. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 417-430. DOI: 10.18307/2018.0213. [刘林峰, 周先华, 高健等. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 417-430.]
- [29] Lei P, Zhang H, Shan BQ. Dynamic characteristics of nitrogen and phosphorus in the representative input tributaries of Danjiangkou Reservoir. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3038-3045. DOI: 10.13227/j.hjxx.2012.09.042. [雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3038-3045.]
- [30] Dortch Q. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, **61**: 183-201. DOI: 10.3354/meps061183.
- [31] Mengesha S, Dehairs F, Elskens M *et al.* Phytoplankton nitrogen nutrition in the western Indian Ocean: Ecophysiological adaptations of neritic and oceanic assemblages to ammonium supply. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, **48**(5): 589-598. DOI: 10.1006/ecss.1999.0468.
- [32] Zhang XQ, Chen QW, Recknagel F *et al.* Wavelet analysis of time-lags in the response of cyanobacteria growth to water quality conditions in Lake Taihu, China. *Ecological Informatics*, 2014, **22**: 52-57. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2014.05.001.
- [33] Luo GY, Bu FP, Xu XY *et al.* Dynamics of TN and TP in the backwater region of the Linjiang River in the Three Gorge Reservoir. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2009, **31**(5): 106-111. [罗固源, 卜发平, 许晓毅等. 三峡库区临江河回水区总氮和总磷的动态特征. *土木建筑与环境工程*, 2009, **31**(5): 106-111.]
- [34] Xiong L, Liu DY, Wang JL *et al.* Phytoplankton community structure in Lake Taiping of Anhui Province. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 1066-1077. DOI: 10.18307/2016.0517. [熊莲, 刘冬燕, 王俊莉等. 安徽太平湖浮游植物群落结构. *湖泊科学*, 2016, **28**(5): 1066-1077.]
- [35] Niu Y, Kong XH, Yu H *et al.* Spatial distribution of phytoplankton community during summer stratification in Lake Fuxian. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(7): 1865-1871. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201607.019. [牛远, 孔祥虹, 余辉等. 抚仙湖夏季热分层时期浮游植物空间分布特征. *生态学杂志*, 2016, **35**(7): 1865-1871.]
- [36] Jakobsen HH, Blanda E, Staehr PA *et al.* Development of phytoplankton communities: Implications of nutrient injections on phytoplankton composition, pH and ecosystem production. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2015, **473**: 81-89. DOI: 10.1016/j.jembe.2015.08.011.
- [37] Song RB, He F, Guo YY *et al.* Study on characteristics and influencing factors of pH value variation in Dianchi Lake. *Environmental Science Survey*, 2020, **39**(2): 15-19. [宋任彬, 何锋, 郭艳英等. 滇池水体 pH 值变化特征及其影响因素初步分析. *环境科学导刊*, 2020, **39**(2): 15-19.]
- [38] Zhao HJ, Wang Y, Yang LL *et al.* Relationship between phytoplankton and environmental factors in landscape water supplemented with reclaimed water. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 113-121. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.03.033.
- [39] Zhang Y, Ma XF, Guo FF *et al.* Community structures of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahe Reservoir, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 902-910. DOI: 10.18307/2015.0517. [张云, 马徐发, 郭飞飞等. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 902-910.]
- [40] Zhao XH, Kong FX, Xie WW *et al.* Effect of enhanced CO₂ level on the physiology and ecology of phytoplankton. *Acta*

- Ecologica Sinica*, 2012, **32**(21): 6880-6891. DOI: 10.5846/stxb201109141345. [赵旭辉, 孔繁翔, 谢薇薇等. 全球CO₂水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展. 生态学报, 2012, **32**(21): 6880-6891.]
- [41] Zhao HC, Wang SR, Zhao M *et al.* Relationship between the DO and the environmental factors of the water body in Lake Erhai. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 1952-1959. DOI: 10.13227/j.hjkk.2011.07.026. [赵海超, 王圣瑞, 赵明等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系. 环境科学, 2011, **32**(7): 1952-1959.]
- [42] Ouyang XR, Zhao QH, Wei YZ. A preliminary exploration of dissolved oxygen based on FVCOM in Meiliang Bay, Lake Taihu and its influence mechanism. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 478-488. DOI: 10.18307/2013.0404. [欧阳潇然, 赵巧华, 魏瀛珠. 基于FVCOM的太湖梅梁湾夏季水温、溶解氧模拟及其影响机制初探. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 478-488.]
- [43] Trombetta T, Vidussi F, Mas S *et al.* Water temperature drives phytoplankton blooms in coastal waters. *PLoS One*, 2019, **14**(4): e0214933. DOI: 10.1371/journal.pone.0214933.
- [44] Eppley R. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fishery Bulletin*, 1972, **70**(4): 1063-1085.
- [45] Xiao WP, Wang L, Laws E *et al.* Realized niches explain spatial gradients in seasonal abundance of phytoplankton groups in the South China Sea. *Progress in Oceanography*, 2018, **162**: 223-239. DOI: 10.1016/j.pocean.2018.03.008.
- [46] Xiao LJ, Ouyang H, Li HM *et al.* Enclosure study on phytoplankton response to stocking of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in a eutrophic tropical reservoir in South China. *International Review of Hydrobiology*, 2010, **95**(4/5): 428-439. DOI: 10.1002/iroh.201011249.
- [47] Potthoff AJ, Herwig BR, Hanson MA *et al.* Cascading food-web effects of piscivore introductions in shallow lakes. *Journal of Applied Ecology*, 2008, **45**(4): 1170-1179. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2008.01493.x.
- [48] Deng JM, Qin BQ. A review on studies of effects of climate change on phytoplankton in freshwater systems. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2015.0101. [邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 1-10.]
- [49] Xue D, Xie J, Zhou JR *et al.* Distribution characteristics of *Synedra* and its relationship with environmental variables in storage lakes on the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(11): 1600-1607. [薛迪, 解军, 周建仁等. 南水北调东线湖泊针杆藻属分布特征及其与环境因子的关系. 环境科学研究, 2016, **29**(11): 1600-1607.]
- [50] Li Q, Wang GQ, Xie G *et al.* Characteristics of phytoplankton and macrozoobenthos communities in Nansihu Lake under the influence of hydrologic pulse. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2020, **56**(3): 454-461. [李庆, 王国强, 谢刚等. 水文脉冲影响下南四湖浮游植物和大型底栖动物群落的不同变化特征. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, **56**(3): 454-461.]
- [51] Zhao LB, Wan NX, Wei S *et al.* The variation of phytoplankton community in Jihongtan Reservoir during 2003-2018. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (10): 106-109, 116. [赵立宾, 万年新, 魏松等. 棘洪滩水库2003-2018年浮游植物群落结构变化研究. 中国农村水利水电, 2020, (10): 106-109, 116.]
- [52] Tian JY, Tian J, Shen BZ *et al.* Phytoplankton distribution and diversity along the east route of South-to-North Water Transfer Project. *Shandong Science*, 2008, **21**(1): 28-34. [田家怡, 田静, 申保忠等. 南水北调东线工程输水沿线浮游植物分布与多样性. 山东科学, 2008, **21**(1): 28-34.]
- [53] Li J, Cai JH, Chang MH. Application of South-to-North Water Diversion Project of water allocation in Shandong Province. *China Water Resources*, 2020, (13): 49-51. [李娟, 蔡家宏, 常明浩. 南水北调工程在山东水资源配置中的作用. 中国水利, 2020, (13): 49-51.]
- [54] Jing SH, Liu JZ, Chen YJ *et al.* Indicative function of hydrogen and oxygen stable isotopes on the water environment of Dongping Lake during dry period. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, **17**(1): 120-129, 149. [靖淑慧, 刘加珍, 陈永金等. 氢氧稳定同位素对东平湖枯水期水环境的指示作用. 南水北调与水利科技, 2019, **17**(1): 120-129, 149.]
- [55] Pang QJ, Qi J, Qi L *et al.* Aquatic bloccoenosis and water quality in Dongping Lake. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2007, **38**(2): 247-251, 256. [庞清江, 亓剑, 齐磊等. 东平湖水生物现状及水质分析. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2007, **38**(2): 247-251, 256.]
- [56] Wang ZZ, Wang QD, Chen SJ *et al.* Biodiversity of macrozoobenthos and environmental quality assessment in Dongping Lake. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, **38**(20): 120-123. [王志忠, 王钦东, 陈述江等. 东平湖大型底栖动物多样性及其环境质量评价. 广东农业科学, 2011, **38**(20): 120-123.]