

周绪申, 李娜, 孙博闻, 等. 白洋淀浮游生物群落结构的季节变化及其与环境因子的关系 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(8): 110-119.

ZHOU Xushen, LI Na, SUN Bowen, et al. Seasonal variation of plankton community structure in the Lake Baiyangdian and the relationship with environmental factors [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(8): 110-119.

白洋淀浮游生物群落结构的季节变化及其与环境因子的关系

周绪申^{1,2}, 李娜¹, 孙博闻¹, 高学平¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 生态环境部 海河流域北海海域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 天津 300061)

摘要: 浮游生物是水生态系统的重要组成部分, 由于其对水环境状况的敏感性常被用来作为水环境优劣的指示生物。为研究白洋淀浮游生物群落特征及其与环境因子的关系, 于2018年春季(5月)、夏季(8月)和秋季(10月)分别对白洋淀淀区5个采样点的浮游生物及环境因子进行调查分析, 并采用 Pearson 相关性分析法分析白洋淀浮游生物群落结构变化和主要环境因子的相互关系。结果表明: 根据 TP、NH₃-N、COD_{Mn}、TN 等水质参数浓度值进行水体质量评价, 白洋淀水体夏季为 V 类水, 春季和秋季为 IV 类水。白洋淀研究区域共检出浮游植物 6 门 74 种, 浮游动物 3 门 22 种。白洋淀浮游生物的群落结构季节间变化显著, 两类浮游生物夏季丰度均达到最大值。浮游植物春、夏季以蓝藻门和绿藻门占绝对优势, 秋季则出现硅藻门、裸藻门、甲藻门和隐藻门等优势类群。浮游动物在各个季节均以轮虫为优势类群。根据浮游生物群落特征指数进行水质类别分析, 白洋淀在不同季节大部分指数显示为中污染。浮游生物多样性指数反映的水质污染状况与理化因子水质评价结果与季节变化趋势相对一致。浮游植物多样性指数与 TP、COD_{Mn} 和 DO 的相关性较大, 浮游动物多样性指数与 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TN 相关性较大。

关键词: 白洋淀; 浮游生物; 群落结构; 环境因子; 相关性分析; 水质评价; 水环境

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.08.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: Q958.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)08-0110-10



与作者互动
听语音 聊科研

Seasonal variation of plankton community structure in the Lake Baiyangdian and the relationship with environmental factors

ZHOU Xushen^{1,2}, LI Na¹, SUN Bowen¹, GAO Xueping¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Center of Eco-environmental Monitoring and Scientific Research, Administration of Ecology and

Environment of Haihe River Basin and Beihai Sea Area, Ministry of Ecology and

Environment of People's Republic of China, Tianjin 300061, China)

收稿日期: 2021-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51621092, 51609166)

作者简介: 周绪申(1982—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水生态学研究。E-mail: jnsszbp@163.com

通信作者: 孙博闻(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态水力学研究。E-mail: bwsun@tju.edu.cn

Abstract: Plankton is an important part of aquatic ecosystem and is often used as an indicator of water environment because of its sensitivity to water environment. Plankton and environmental factors were investigated at 5 sampling sites in the Lake Baiyangdian in spring (May), summer (August) and autumn (October) of 2018. Pearson correlation analysis was used to analyze the relationship between the changes of plankton community structure and the main environmental factors in the Lake Baiyangdian. Results showed that according to the concentration values of TP, $\text{NH}_3\text{-N}$, COD_{Mn} , TN and other water quality parameters, the water quality of Baiyangdian Lake is classified as class V water in summer and class IV water in spring and autumn. There were 74 species of phytoplankton and 22 species of zooplankton in Baiyangdian Lake. The community structure of phytoplankton in Baiyangdian Lake changed significantly during different season, and the abundance of the plankton reached the maximum in summer. Cyanophyta and Chlorophyta were dominant in spring and summer, while Eucaryophyta, Euglenophyta, Dinoflagellate and Cryptophyta were dominant in autumn. Rotifers were the dominant group of zooplankton in each season. The plankton diversity index showed that Baiyangdian Lake was moderately polluted, which were consistent with the seasonal trend by water quality assessment. The phytoplankton diversity index was highly correlated with TP, COD_{Mn} and DO, and the zooplankton diversity index was highly correlated with COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN.

Keywords: Lake Baiyangdian; plankton; community structure; environmental factors; correlation analysis; water quality assessment; water environment

0 引言

大型浅水湖泊是重要的淡水湿地生态系统, 具有独特的生态系统特征, 在保持自然生态平衡、改善自然资源条件和提供生态系统服务方面发挥着重要作用^[1-2]。近年来, 在气候变化和强人类活动的干扰影响下, 越来越多的湖泊正面临着水量减少、水体污染、生物多样性降低和生态服务功能衰退等危机^[3]。浮游生物是水域生态系统重要生物组分, 是鱼类等水生动物的天然饵料, 亦是水体营养物质生产和传输的重要环节^[4], 对维持食物网丰富性和稳定性具有重要作用^[5]。浮游生物具有生命力强、繁殖速度快、对环境变化反应灵敏等特点^[2, 6], 其群落结构的变化与周围环境因素的变化息息相关, 因而常被用作反映湖泊生态状态及水质评价的重要指标^[7]。例如 JIN 等^[8]研究了乌兰素海湖浮游植物功能群的主要影响因素, 并提出利用某些浮游植物功能群的存在来指示当前湖泊状况; 陈红等^[9]利用浮游生物群落结构、丰度、多样性指数及水体理化指标等对灞河城市段水质状况进行综合评价, 并探讨了其群落结构与环境因子之间的关系。此外, 由于空间环境差异性以及生物之间相互作用的复杂性, 影响浮游生物群落结构的关键因素在不同水体中存在较大差异。蔡阳等^[10]利用典范对应分析(CCA)研究发现水温和电导率是驱动镜泊湖水体浮游生物群落生态分布的关键因素; AFONINA 等^[11]用基于相关矩阵的方法研究发现影响俄罗斯 15 个盐湖浮游生物群落结构的关键因素是 pH 值、水温和水深; 程荣等^[12]利用冗余分析(RDA)研究发现化学需氧量是影响北运河浮游生物丰度的关键

因素, 并提出加强非点源污染的治理等措施改善北运河污染状况。因此探讨不同水体浮游生物群落特征及其与环境因子的关系有助于对水环境状况做出准确评估, 同时也能部分弥补理化监测评价的不足, 对于湖泊生态环境的监测管理以及生态系统修复和保护方案的制定调整具有重要意义。

白洋淀(113°40'E—116°20'E, 38°10'N—40°00'N)位于河北省雄安新区, 属海河流域大清河南支水系湖泊, 水域面积 366 km², 平均年蓄水量 13.2 亿 m³。白洋淀是雄安新区辖区内最重要的水体功能区, 也是华北地区最大的淡水湖, 有唐河、漕河、府河、萍河、白沟河等河流入淀。近年来, 随着经济的快速发展和人口的不断增加, 白洋淀水质状况逐渐恶化, 上游 9 条入淀河流仅府河、孝义河和白沟引河常年有水, 其余 6 条河流基本断流或季节性有水, 白洋淀流域生态系统呈现退化趋势。近年来, 我国学者在白洋淀开展了大量浮游生物^[13-17]、底栖动物^[1, 18]群落结构特征及其与环境因子关系的研究。例如李娜等^[14]研究了白洋淀浮游植物汛期与非汛期的群落结构变化及其汛期关键因素是总磷(TP)和溶解氧(DO); 孙泉琼等^[17]研究表明温度、透明度、营养盐等影响白洋淀枝角类和桡足类丰度及群落组成结构特征; 杨雨风等^[1]研究表明水环境因子中透明度、叶绿素 a、水深、水温、溶解氧、氨氮、硝氮和氧化还原电位是影响底栖动物分布的关键因素。以上虽然进行了较多的研究, 但仅限于单一的生物类群与环境因子之间的分析, 并未同时对浮游植物和浮游动物群落结构特征指数与水环境因子进行研究。此外 2018 年以来白洋淀

淀区由于雄安新区的建设以及数次生态补水, 淀区环境发生了一定变化, 因此探讨淀区浮游生物群落指标与环境因子的关系显得尤为重要。本研究于2018年5月、8月和10月分别对白洋淀的水质、浮游植物、浮游动物同时进行了样品采集及实验室分析, 并根据试验结果分析了浮游生物群落的时间动态变化, 通过分析白洋淀浮游生物群落结构与环境因子之间的相关关系, 根据浮游生物状况对白洋淀淀区水环境状况进行评价, 以期深入研究白洋淀流域生态系统动态变化机制及雄安新区水生态环境修复等提供一定的科学支撑。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

本研究于2018年春季(5月)、夏季(8月)和秋季(10月)对白洋淀进行了3次采样。在研究区域共设5个采样点, 分别是S1(泥李庄)、S2(王家寨)、S3(光淀张庄)、S4(圈头)和S5(端村)。其中S1位于府河、萍河等入淀口, S5位于唐河和孝义河入淀口, S2—S4位于淀区中心, 旅游业发达。采样点分布如图1所示。



图1 白洋淀采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in the Lake Baiyangdian

1.2 样品采集与处理

环境因子共7项, 包括水温(WT)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)和总氮(TN)。样品分析方法参照《水和废水监测分析方法》^[19]测定。

浮游植物定性样品用25号浮游生物网(200目), 在水下0.15 m处作“∞”字型拖曳3 min, 收集到的浮游植物装入100 mL标本瓶中, 加3 mL福尔马林固定带回分析; 浮游植物定量样品则取1 L水样于样品瓶中, 加15 mL鲁哥氏液固定, 带回实验室静置后分析。种类鉴定参照《中国淡水藻类—系统、分类及

生态》^[20], 通过0.1 mL浮游生物计数框计数。浮游动物定性样品用13号浮游生物网于水平、垂直方向按“∞”形缓慢拖网, 定量样品于每个采样点设上中下3层, 用5 L采水器采集水样, 每层采集20 L水样, 用25号浮游生物网现场过滤并装入塑料瓶中, 加入5%福尔马林溶液(甲醛)固定, 于实验室进行镜检。种类鉴定参考《中国淡水轮虫志》^[21]《中国动物志·淡水桡足类》^[22]《中国动物志·淡水枝角类》^[23], 通过1 mL浮游生物计数框计数。

1.3 数据分析

采用Shannon-Wiener多样性指数、Margalef物种丰富度指数、Pielou均匀度指数、生物丰度、密度及优势度对浮游植物的群落特征进行分析^[24-26], 各指数的计算公式及评价标准^[9, 27]如表1所列。

表1 群落特征指数及评价标准

Table 1 Community characteristic index and evaluation criteria

评价方法	计算公式	评价标准
Shannon-Wiener多样性指数 H'	$H' = -\sum P_i \ln P_i$	0~1 重污染; 1~2α-中污染; 2~3β-中污染; >3 轻污或无污染
Margalef物种丰富度指数 dM	$dM = (S-1) / \ln N$	0~1 重污染; 1~2α-中污染; 2~3β-中污染; >3 轻污或无污染
Pielou均匀度指数 J	$J = H' / \ln S$	0~0.3 重污染; 0.3~0.5 中污染; 0.5~0.8 轻污染; 0.8~1.0 无污染
优势度 Y	$Y = P_i \times f_i$	—

注: $P_i = n_i / N$, P_i 为第*i*个物种个体数量与个体总数量的比值, n_i 为第*i*个物种的个体总数, N 为所有物种的数量, S 为样品中浮游生物总种数, f_i 为样本个体的出现率, 当 $Y > 0.02$ 时的物种认定为优势种

通过Kolmogorov-Smirnov(K-S)正态分布检验, 判断环境因子是否符合正态分布。结果显示, 环境因子均符合正态分布。利用SPSS20.0统计软件对环境因子进行独立样本*t*检验。利用SPSS20.0统计软件对白洋淀浮游生物群落特征指数与环境因子进行Pearson相关性分析, 其中*R*值表示相关性大小, *P*值表示两个变量间的显著性, 一般要求 $P < 0.05$ 有意义, *R*的绝对值一般在0.7~1.0之间为强相关, 在0.3~0.7之间为弱相关, 0.3以下认为没有相关性。在相关性分析中, 由于群落多样性指数与环境因子的单位不统一, 因此需对群落多样性指数与环境因子数据进行标准差标准化处理。

2 结果与分析

2.1 白洋淀理化因子

本研究主要针对白洋淀的主要水环境因子进行检测, 调查期间白洋淀水体环境因子结果如表2所列,

环境因子季节性差异显著 ($P < 0.05$)。水体三个季节 pH 值分别为 8.60、8.22 和 8.88, 整体来看淀区内的水体偏碱性。DO、COD_{Mn} 和 TN 从春季到夏季下降, 从夏季到秋季上升, TP 则相反。NH₃-N 整体呈上升趋势。按照《地表水环境质量标准》^[28], 白洋淀水体夏季为 V 类水, 春季和秋季为 IV 类水。

表 2 白洋淀水体理化指标

Table 2 Physicochemical water quality parameters in the Lake Baiyangdian

时期	项目	WT /℃	pH 值	DO /mg · L ⁻¹	COD _{Mn} /mg · L ⁻¹	NH ₃ -N /mg · L ⁻¹	TP /mg · L ⁻¹	TN /mg · L ⁻¹
春季	平均值	21.30	8.60	10.76	6.56	0.22	0.11	1.85
	最大值	23.50	8.80	13.10	7.00	0.53	0.21	3.52
	最小值	19.10	8.40	7.57	6.20	0.07	0.05	1.08
	标准差	3.11	0.28	2.63	0.30	0.18	0.07	1.00
	平均值	30.54	8.22	2.67	6.40	0.56	0.16	1.25
夏季	最大值	31.00	8.60	4.75	7.80	1.19	0.35	2.19
	最小值	30.20	7.90	1.42	5.60	0.21	0.06	0.84
	标准差	0.31	0.26	1.32	0.85	0.39	0.13	0.54
秋季	平均值	16.06	8.88	7.40	6.94	0.81	0.13	2.08
	最大值	19.30	9.41	8.96	8.40	2.17	0.20	4.88
	最小值	15.00	8.40	5.36	6.20	0.29	0.06	0.98
	标准差	1.83	0.38	1.31	0.88	0.78	0.06	1.60

2.2 白洋淀浮游生物群落特征

2.2.1 种类组成及优势类群

白洋淀研究区域共检出浮游植物 6 门 74 种。其中绿藻门种类最多, 共 32 种, 占总种数的 43.24%, 其次是硅藻门, 共 19 种, 占 24.68%, 其余门类有蓝藻门 14 种, 占 18.92%, 裸藻门 4 种, 占 5.41%, 隐藻门 3 种, 占 4.05%, 甲藻门 2 种, 占 2.70%。由图 2 可以看出, 淀区浮游植物种类在夏季最少, 秋季最多。白洋淀浮游植物优势种春季为 11 种, 夏季为 8 种, 秋季为 19 种。春、夏季以蓝藻门和绿藻门占绝对优势, 秋季则出现硅藻门、裸藻门、甲藻门和隐藻门优势类群(见表 3)。

白洋淀共检出浮游动物 3 门 22 种, 其中轮虫门类有 16 种, 占总种数的 72.73%; 枝角门类有 4 种, 占总种数的 18.19%; 桡足门类有 2 种, 占总种数的 9.09%。由图 2 可以看出, 淀区浮游动物种类在夏季最多, 秋季最少。白洋淀浮游动物优势种春季为 9 种, 夏季为 11 种, 秋季为 8 种, 其中均以轮虫占据绝对优势。此外, 萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)、前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonta*) 和近邻剑水蚤(*Cyclops vicinus*) 在三个季节均为优势种, 出现频率较高(见表 3)。

表 3 白洋淀浮游生物优势种类

Table 3 Dominant species of plankton in the Lake Baiyangdian

门类	种类	春季	夏季	秋季
蓝藻门	点形平裂藻(<i>Merismopedia punctata</i>)			+
	铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)	+	+	
	微小平裂藻(<i>Merismopediatenuissima</i>)	+	+	
	类颤鱼腥藻(<i>Anabaena oscellarioides</i>)		+	+
	大螺旋藻(<i>Spirulina major</i>)		+	+
	小型色球藻(<i>Chroococcus minor</i>)	+		
	假鱼腥藻(<i>Pseudanabaena</i> sp.)			+
	细小平裂藻(<i>Merismopedia minima</i>)			+
小席藻(<i>Phormidium tenus</i>)	+	+		
浮游植物 绿藻门	小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)	+		
	四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)	+	+	+
	二形栅藻(<i>Scenedesmus dimorphus</i>)	+		+
	螺旋弓形藻(<i>Schroederia spiralis</i>)	+		
	四角十字藻(<i>Crucigenia quadrata</i>)	+		+
	直角十字藻(<i>Crucigenia roctangularis</i>)			+
	湖生卵囊藻(<i>Oocystis lacustris</i>)	+		
集星藻(<i>Actinastrum hantzschii</i>)		+	+	
硅藻门	尖针杆藻(<i>Synedra acusvar</i>)	+		
	链形小环藻(<i>Cyclotella catenata</i>)			+
	颗粒直链藻(<i>Melosira granulata</i>)			+
	短小舟形藻(<i>Navicula exigua</i>)		+	
	细小桥弯藻(<i>Cymbella pusilla</i>)			+
针形菱形藻(<i>Nitzschia acicularis</i>)			+	
甲藻门	裸甲藻(<i>Gymnodinium aerucyinosum</i>)			+
裸藻门	尖尾裸藻(<i>Euglena oxyuris</i>)			+
	静裸藻(<i>Euglena deses</i>)			+
隐藻门	具尾蓝隐藻(<i>Chroomonasv caudata</i>)			+
	啮蚀隐藻(<i>Cryptomonas erosa</i>)			+
浮游动物 轮虫	萼花臂尾轮虫(<i>Brachionus calyciflorus</i>)	+	+	+
	壶状臂尾轮虫(<i>Brachionus urceus</i>)		+	
	花筐臂尾轮虫(<i>Brachionus capsuliflorus</i>)		+	
	角突臂尾轮虫(<i>Brachionus angularis</i>)	+	+	+
	裂足臂尾轮虫(<i>Brachionus diversicornis</i>)		+	
	蒲达臂尾轮虫(<i>Brachionus budapestiensis</i>)	+		
	前节晶囊轮虫(<i>Asplanchna priodonta</i>)	+	+	+
	螺形龟甲轮虫(<i>Keratella cochlearis</i>)			+
	曲腿龟甲轮虫(<i>Keratella valga</i>)			+
	无甲腔轮虫(<i>Lecane lunainermis</i>)		+	
	圆筒异尾轮虫(<i>Tichocera cylindrica</i>)	+		
	针簇多肢轮虫(<i>Polyarthra trigla</i>)	+	+	
	长三肢轮虫(<i>Filina longiseta</i>)	+	+	
	枝角类	筒弧象鼻蚤(<i>Bosmina coregoni</i>)	+	
直额裸腹蚤(<i>Moina rectirostris</i>)			+	
桡足类	近邻剑水蚤(<i>Cyclops vicinus</i>)	+	+	+
	英勇剑水蚤(<i>Cyclops strenuus</i>)			+

注: 表中“+”表示物种为此季节优势种

2.2.2 浮游生物丰度

浮游植物春季全湖平均丰度为 403.50×10^5 cells/L, 变化范围在 $330.93 \times 10^5 \sim 454.21 \times 10^5$ cells/L 之间; 夏季全湖平均丰度为 701.81×10^5 cells/L, 变化范围在 $415.30 \times 10^5 \sim 1\,005.6 \times 10^5$ cells/L 之间; 秋季全湖

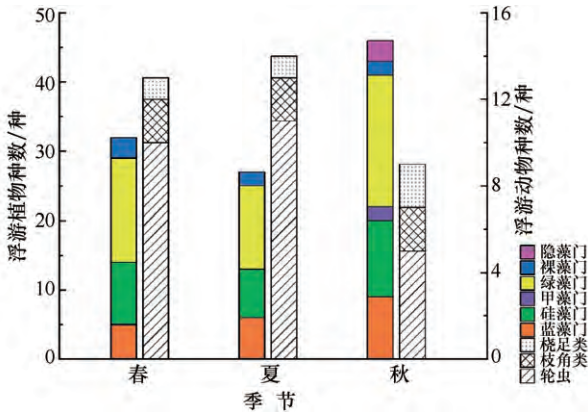


图2 白洋淀浮游生物种类季节分布

Fig. 2 Seasonal distribution of plankton species in the Lake Baiyangdian

平均丰度为 131.12×10^5 cells/L, 变化范围在 $85.20 \times 10^5 \sim 145.4 \times 10^5$ cells/L 之间(见图3)。蓝藻门和绿藻门的种类为春季的主要类群, 分别占据总丰度的 72.05% 和 24.07%, 蓝藻门在夏季占据绝对的优势, 占到总丰度的 90.07%, 秋季与春季类似, 蓝藻门和绿藻门为主要类群, 分别占 63.51% 和 14.77%。

浮游动物春季全湖平均密度为 1 238 Ind./L, 变化范围在 657~1 620 Ind./L 之间; 夏季全湖平均密度为 784 Ind./L, 变化范围在 250~1 610 Ind./L 之间; 秋季全湖平均密度为 586 Ind./L, 变化范围在 270~860 Ind./L 之间(见图3); 春季轮虫占据绝对优势, 为 93.60%, 夏季演替以轮虫与桡足类为主, 其所占比例分别为 83.16% 和 10.97%, 秋季桡足类比例增加为 29.19%, 轮虫所占比例下降为 60.74%。

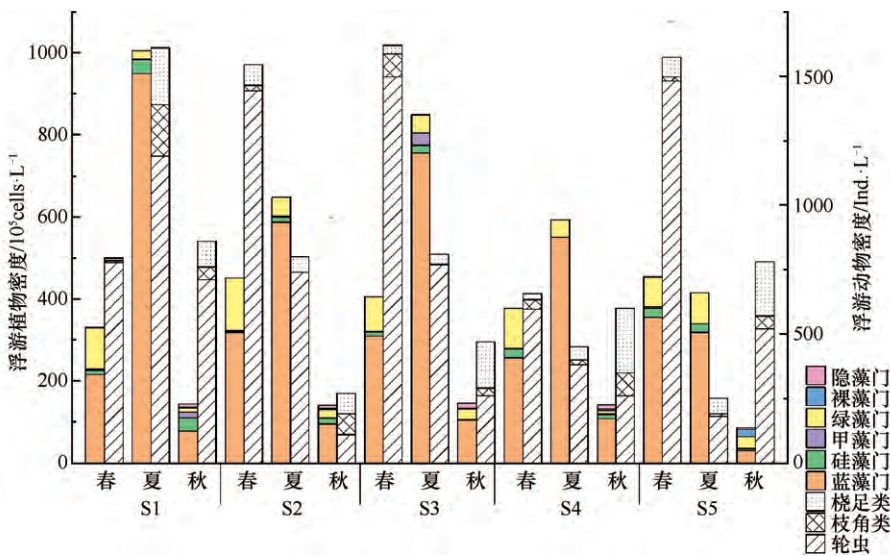


图3 白洋淀各采样点浮游生物丰度季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of plankton density at each sampling point in the Lake Baiyangdian

2.2.3 浮游生物群落特征指数及水质评价

浮游植物群落特征指数如图4所示。Shannon-Wiener 多样性指数春季均值为 1.490, 夏季为 1.226, 秋季为 2.036, 春、夏季污染等级均为 α -中污染, 秋季为 β -中污染。Pielou 均匀度指数春季均值为 0.531, 污染等级为轻污染, 夏季为 0.495, 污染等级为中污染, 秋季为 0.805, 污染等级为无污染。Margalef 物种丰富度指数春季均值为 2.290, 夏季为 1.500, 秋季为 2.563, 春、秋季污染等级均为 β -中污染, 夏季污染等级为 α -中污染。

浮游动物群落特征指数如图4所示。Shannon-Wiener 多样性指数春季均值为 1.556, 夏季为 1.863, 秋季为 1.359, 污染等级均为 α -中污染。Pielou 均匀度指数春季均值为 0.845, 夏季为 0.905, 秋季为 0.950, 污染等级均为无污染。Margalef 物种丰富度指数春季均值为 1.347, 夏季为 1.727, 春、夏季污染等级均为 α -中污染, 秋季为 0.630, 污染等级为重污染。

通过白洋淀浮游生物群落多样性指数反映的水质污染状况与白洋淀的理化因子水质评价结果相对一致, 在季节变化中反映的水质污染状况也与理化因子水质评价结果呈相似的变化趋势, 也说明多样性指数在水环境评价中具有较高的应用价值。

2.3 浮游生物群落结构与环境因子的关系

Pearson 相关性分析方法表明(见表4), 春季浮游植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均与 COD_{Mn} 、TP 呈现出显著正相关 ($P < 0.05$), Margalef 物种丰富度与 WT、TP 呈现出显著负相关 ($P < 0.05$)。夏季浮游植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与 TP 呈现出显著负相关 ($P < 0.05$), Margalef 物种丰富度与 pH 值、DO 呈现出显著负相关 ($P < 0.05$)。秋季 Margalef 物种丰富度与 DO、 COD_{Mn} 呈现出显著负相关 ($P < 0.05$)。

春季浮游动物群落 Shannon-Wiener 多样性指数与 COD_{Mn} 呈现出显著正相关 ($P < 0.05$), Margalef 物种丰富度与 NH_3-N 、TP 呈现出显著负相关 ($P < 0.05$), 与 TN 呈现极显著相关 ($P < 0.01$)。夏季浮游动物群落 Shannon-

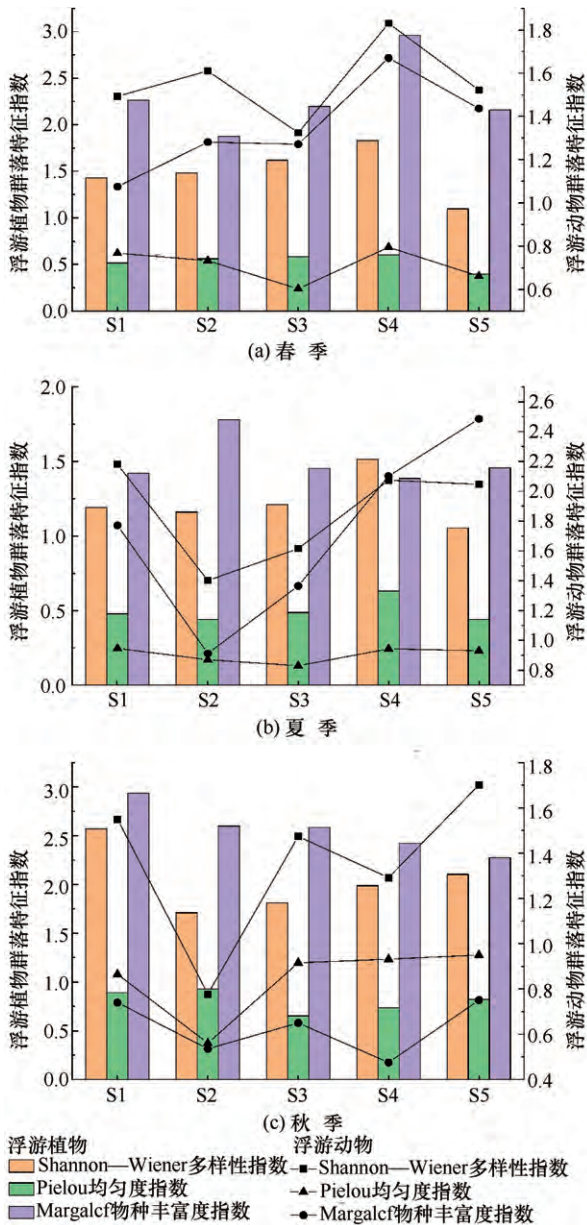


图4 白洋淀浮游生物群落特征指数

Fig. 4 Plankton community characteristic index in the Lake Baiyangdian

Wiener多样性指数与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 呈现出显著负相关 ($P < 0.05$)，Pielou 均匀度指数与 COD_{Mn} 呈现出显著正相关 ($P < 0.05$)，Margalef 物种丰富度与 DO 呈现出显著负相关 ($P < 0.05$)，与 TP 呈现出显著正相关 ($P < 0.05$)。秋季 Pielou 均匀度指数与 COD_{Mn} 呈现出显著正相关 ($P < 0.05$)。

本研究中浮游植物多样性指数与 TP、 COD_{Mn} 和 DO 的相关性最密切，分别有 4 次、3 次和 2 次显著相关；浮游动物多样性指数与 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 相关性最密切，分别有 3 次、2 次和 2 次显著相关。

3 讨论

3.1 白洋淀浮游生物群落结构分析

本研究中，白洋淀浮游生物的群落结构季节间变化显著。从浮游植物群落结构分析，夏季由于较高的营养盐含量以及适宜的温度有利于浮游植物的生长，浮游植物丰度达到较高水平，主要以蓝藻门为主。这是由于蓝藻对高温的耐受性强于其他藻类，其在高温下 ($25 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$) 通常以快速生长的 r 对策获得竞争优势^[29]；此外当水体中磷浓度小于 0.2 mg/L 时为蓝藻生长的限制营养盐^[30]，白洋淀夏季较高的磷浓度也促使了蓝藻的生长和繁殖。夏季蓝藻的快速繁殖也抑制了其他门类浮游植物的生长，导致浮游植物种类在夏季最少。优势种由春季的蓝、绿藻门及少量的硅藻门为主向夏季的蓝藻门及少量的绿藻门为主再向秋季的各门类较为均衡的群落结构演替，夏季群落结构更为单一，群落特征指数也体现了这一点，这与太湖浮游植物群落结构相似^[31]。

从浮游动物群落结构来看，春、夏、秋季种类组成类似，均以轮虫占据主导地位。轮虫具有个体小、周期短、发育快等特点，能快速适应水体中理化环境的改变和水文条件的变化，因此在河湖生境中轮虫常居优势地位^[6]。浮游动物对浮游植物有捕食关系，蓝藻营养价值低以及产生毒素不利于浮游动物的生长^[32]，但轮虫耐受性较高，因此夏季浮游动物种类最多，轮虫占有绝对优势，但密度相对较低。春季生长的浮游植物如裸藻、绿藻以及前一年水生生物死亡后形成的有机碎屑是轮虫喜食的饵料，而且捕食者在低温季节活力较低，因此轮虫在春季可大量繁殖形成峰值^[32]。此外枝角类种类数比桡足类多，但密度却相对最低，这与许多江河湖泊水体浮游动物类群分布研究结果相似^[33-35]。

3.2 白洋淀浮游生物群落与环境因子的关系

浮游生物群落结构受环境因子的综合影响，且不同水体中环境因子对群落结构的影响也存在差异^[9]。本研究通过白洋淀浮游生物群落多样性指数与主要环境因子的相关性分析，发现影响春季浮游植物群落特征的关键因素为 WT、 COD_{Mn} 和 TP，夏季为 pH 值、DO 和 TP，秋季为 DO 和 COD_{Mn} ，影响浮游动物群落特征的关键因素春季为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、TN 和 TP，夏季为 DO、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 TN，秋季为 COD_{Mn} 。各个季节的影响浮游生物群落特征的关键环境因素不同，说明在季节驱动下白洋淀环境因子发生了变化，而环境因子变化也会导致浮游生物群落结构

表 4 浮游生物群落指标与环境因子的相关性

Table 4 Correlation between plankton community indicators and environmental factors

浮游植物	春季			夏季			秋季		
	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 物种丰富度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 物种丰富度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 物种丰富度指数
WT	-0.458	-0.171	-0.954*	0.291	0.413	-0.642	0.069	0.033	-0.735
pH 值	-0.725	-0.758	-0.255	0.500	0.637	-0.806*	0.453	-0.587	-0.062
DO	0.213	0.318	-0.278	0.426	0.507	-0.761*	-0.697	-0.693	-0.976*
COD _{Mn}	0.894*	0.956*	0.366	0.100	0.232	-0.440	-0.043	-0.165	-0.856*
NH ₃ -N	-0.378	-0.411	-0.106	-0.055	-0.163	0.340	0.834	0.617	0.829
TP	0.999*	1.000*	-0.999*	-0.786*	-0.834*	0.662	0.347	0.812	0.077
TN	-0.510	-0.554	-0.156	0.026	-0.071	0.238	0.859	0.602	0.807
浮游动物	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 物种丰富度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 物种丰富度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 物种丰富度指数
WT	-0.420	-0.278	-0.621	0.386	0.491	-0.619	0.506	0.392	0.438
pH 值	-0.575	-0.316	-0.495	0.491	0.020	-0.211	0.609	0.85	-0.02
DO	0.511	-0.510	0.372	0.472	0.595	-0.729*	-0.177	0.259	-0.793
COD _{Mn}	0.779*	-0.253	0.526	0.552	0.783*	0.023	0.495	0.493*	0.265
NH ₃ -N	-0.449	0.374	-0.781*	-0.825*	-0.474	0.331	0.165	-0.118	0.498
TP	-0.175	0.325	-0.707*	-0.512	-0.603	0.740*	0.068	-0.326	0.595
TN	-0.577	0.457	-0.879**	-0.787*	-0.370	0.322	0.210	-0.075	0.524

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

发生变化。水温是影响浮游植物生长、发育、群落组成等重要的环境因子, 10~30 °C 硅藻均有出现, 绿藻在 18~30 °C 下均能生长良好, 蓝藻能在 40 °C 的高水温下生长^[36], 白洋淀在春夏秋三个季节温度范围为 19~31 °C, 适合浮游植物和浮游动物的繁殖和生长, 与白洋淀浮游生物种类繁多及丰度较大的特点一致。pH 值对浮游植物群落结构有重要影响, 碱性环境有利于浮游植物进行光合作用, 碱性水体具有较高的藻类生产力^[37]。磷作为藻体构成的重要营养元素, 被认为是浮游植物生长的重要限制因子之一^[38]。有研究表明, 绿藻比蓝藻更适合高氮磷比的环境^[39], 白洋淀三个季节磷浓度相似, 秋季氮浓度最高具有更高的氮磷比, 因此秋季绿藻门种数最高。COD_{Mn} 是反映水体受到有机污染物和还原性无机物污染程度的综合指标, 与浮游植物的生长成显著正相关关系^[40]。浮游动物的群落演替一般与食物、捕食和竞争有密切关系, 环境因子通过直接作用于浮游植物间接地影响浮游动物的群落结构。某些蓝藻藻种如微囊藻容易形成群体, 一些丝状蓝藻的粒径也相对较大, 不易被捕食^[32], 从而影响浮游动物的生长。此外有研究表明较高浓度的氨氮对一些浮游动物物种具有毒害作用, 会影响其生长和繁殖^[41-42]。XIANG 等^[41] 研究表明 NO₂-N 浓度超过 1 mg/L 时一些浮游动物即出现母体繁殖量减少等反应。本研究未测定 NO₂-N 的浓度, 但春季、夏季浮游动物群落特征指数与氮浓度成负相关可能与此相关。夏季水温升高促进浮游生物大量生

长、繁殖, 该过程中的耗氧则导致水中 DO 浓度降低, 因此浮游生物对溶解氧的竞争使溶解氧成为影响其群落结构的关键因素。影响浮游生物的关键因素在春夏季更为复杂, 主要受气候的影响春夏季雨水较多, 水文环境的频繁变化对环境因子以及浮游生物群落结构产生影响^[43], 浮游生物群落结构变化受多种因素共同作用。

3.3 白洋淀水质评价

白洋淀浮游植物优势种春、夏均以指示水体富营养状态的绿藻和蓝藻为主, 秋季优势种各门类较为平均, 水质好于春、夏季。浮游动物中角突臂尾轮虫、前节晶囊轮虫、蒲达臂尾轮虫、针簇多肢轮虫等均被认为是 α-中污带至 β-中污带以及富营养化水体的指示生物^[44]。此外, 根据 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 物种丰富度进行评价, 白洋淀春、夏季水体属于中污型, 秋季水体属于轻-中污型。

3.4 研究的局限性与不足

本研究在选择样点中延续了常规的样点, 有利于将来进一步开展相关研究及参照, 但全淀区仅布设 5 个样点, 样点相对较少, 相对于淀区生态环境的复杂性, 不能全面展示白洋淀的情况。由于时间上的限制, 未能开展更长时间序列的监测, 在季节变化及年际变化中也未能反映, 是本次研究的不足, 将来的研究将在更长时间延续、更多的样点、更多的水质及环境因子进行深入调查, 开展相关研究。

本研究在水质环境因子与浮游生物多样性相关性分析中忽略了环境因子之间的影响关系,如 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对 TN 浓度的影响和贡献率,浮游生物体也贡献大量的 TP、TN、 COD_{Mn} ,浮游植物光合作用及其他沉水植物是 DO 的产生者,DO 是受水生植物影响的环境因素,而不是驱动因素,在将来的研究中分析参数应加以区分及选择。

4 结 论

(1) 根据 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、TN 等水质参数浓度值进行水体质量评价,白洋淀水体夏季为 V 类水,春季和秋季为 IV 类水。

(2) 白洋淀研究区域共检出浮游植物 6 门 74 种,浮游动物 3 门 22 种。白洋淀浮游生物的群落结构季节间变化显著,两类浮游生物夏季丰度均达到最大值。浮游植物春、夏季以蓝藻门和绿藻门占绝对优势,秋季则硅藻门、裸藻门、甲藻门和隐藻门为优势类群。浮游动物在各个季节均以轮虫为优势类群。

(3) 根据浮游生物群落特征指数进行水质类别分析,白洋淀在不同季节大部分指数显示为中污染,少量为轻污染或重污染状况。浮游生物多样性指数反映的水质污染状况与理化因子水质评价结果与季节变化趋势相对一致。

(4) 浮游植物多样性指数与 TP、 COD_{Mn} 和 DO 的相关性较大,浮游动物多样性指数与 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 相关性较大。

参考文献(References):

[1] 杨雨风,易雨君,周扬,等.白洋淀底栖动物群落影响因子研究[J].水利水电技术,2019,50(2):21-27.
YANG Yufeng, YI Yujun, ZHOU Yang, et al. Habitat simulation of benthic macroinvertebrates in a shallow lake[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(2): 21-27.

[2] ZHANG N N, ZANG S Y. Characteristics of phytoplankton distribution for assessment of water quality in the Zhalong Wetland, China[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(11): 3657-3664.

[3] 林楚翘,易雨君,李春晖,等.白洋淀浮游生物群落动态变化与生物量模拟研究[J].水利水电技术,2020,51(12):169-179.
LIN Chuqiao, YI Yujun, LI Chunhui, et al. Dynamic change and biomass simulation of plankton community in Baiyangdian Lake[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12): 169-179.

[4] 安浩,谢在刚,王美儒,等.2016年春季碧流河水库浮游生物的群落结构分析[J].吉林水利,2018(2):39-44.
AN Hao, XIE Zaigang, WANG Meiru, et al. Community Structure Analysis on Plankton in Biliuhe Reservoir in Spring of 2016[J]. Jilin

Water Resources, 2018(2): 39-44.

[5] TANG C, YI Y, YANG Z, et al. Planktonic indicators of trophic states for a shallow lake (Baiyangdian Lake, China) [J]. Limnologia, 2019, 78: 125712.

[6] 王海邻,刘玉飞,任玉芬,等.北京市河流秋季浮游动物群落特征分析[J].环境科学,2019,40(8):3568-3576.
WANG Hailin, LIU Yufei, REN Yufen, et al. Analysis of river zooplankton community characteristics in autumn in Beijing[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3568-3576.

[7] 王振方,张玮,杨丽,等.异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J].环境科学,2019,40(5):2249-2257.
WANG Zhenfang, ZHANG Wei, YANG Li, et al. Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in different regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2019, 40(5): 2249-2257.

[8] JIN Y, YU R H, ZHANG Z Z, et al. Spatiotemporal variability of phytoplankton functional groups in a shallow eutrophic lake from cold, arid regions [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(6): 371. DOI: 10.1007/s10661-020-08349-4.

[9] 陈红,刘清,潘建雄,等.灞河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J].生态学报,2019,39(1):173-184.
CHEN Hong, LIU Qing, PAN Jianxiong, et al. Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 173-184.

[10] 蔡阳,陆欣鑫,巴秋爽,等.镜泊湖春、夏两季浮游生物群落结构及其与环境因子的关系[J].海洋与湖沼,2019,50(1):116-128.
CAI Yang, LU Xinxin, BA Qiushuang, et al. Plankton community structure in Jingpo Lake and the relationship with environmental factors[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(1): 116-128.

[11] AFONINA E Y, TASHLYKOVA N A. Plankton of saline lakes in Southeastern Transbaikalia: Transformation and environmental factors [J]. Contemporary Problems of Ecology, 2019, 12(2): 155-170.

[12] 程荣,陈惠鑫,亓畅,等.北运河流域沙河水库的浮游生物群落特征分析[J].环境科学学报,2021,41(1):239-246.
CHENG Rong, CHEN Huixin, YUAN Chang, et al. Characteristics of plankton community structure in Shahe Reservoir of the North Canal[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1): 239-246.

[13] 沈会涛,刘存歧.白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J].湖泊科学,2008,20(6):773-779.
SHEN Huitao, LIU Cunqi. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors in the Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(6): 773-779.

[14] 李娜,周绪申,孙博闻,等.白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2020,32(3):772-783.
LI Na, ZHOU Xushen, SUN Bowen, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(3): 772-783.

- [15] 王瑜, 刘录三, 舒俭民, 等. 白洋淀浮游植物群落结构与水质评价[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 575-580.
WANG Yu, LIU Lusan, SHU Jianmin, et al. Community structure of phytoplankton and the water quality assessment in Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(4): 575-580.
- [16] 付显婷, 杨薇, 苏梦, 等. 白洋淀河湖系统轮虫群落结构时空动态及与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(5): 124-135.
FU Xianting, YANG Wei, SU Meng, et al. Temporal and spatial dynamics of the rotifer community and relationship to environmental factors in Baiyangdian Lake and primary tributaries [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(5): 124-135.
- [17] 孙泉琼, 崔铁峰, 李子竹, 等. 基于枝角类和桡足类多样性的白洋淀水环境监测与评价[J]. 上海海洋大学学报, 2021(2): 1-13.
SUN Xiaoqiong, CUI Tiefeng, LI Zizhu, et al. The evaluation and monitoring of the aquatic environment based on the diversity of cladocera and copepods in Baiyangdian Lake [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021(2): 1-13.
- [18] 易雨君, 杨雨风, 张尚弘, 等. 浅水湖泊底栖动物栖息地模拟[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 90-96.
YI Yujun, YANG Yufeng, ZHANG Shanghong, et al. Habitat simulation of benthic macroinvertebrates in a shallow lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5): 90-96.
- [19] 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: 第4版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
“Water and Wastewater Monitoring and Analysis Method” Editorial Board of State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and Analysis Methods of Water and Wastewater [M]. 4th Ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [20] 胡鸿均, 魏印心. 中国淡水藻类——系统, 分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU Hongjun, WEI Yinxin. Freshwater algae in China—system, classification and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [21] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
WANG Jiayi. Freshwater rotifers of China [M]. Beijing: Science Press, 1961.
- [22] 沈嘉瑞. 中国动物志·淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
SHEN Jiarui. Chinese Academy of Sciences: Chinese Fauna Freshwater copepoda [M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [23] 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.
JIANG Xiezhì, DU Nanshan. Fauna of China (Freshwater Cladocera) [M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [24] WANG X, SUN M, WANG J, et al. Microcystis genotype succession and related environmental factors in Lake Taihu during cyanobacterial blooms [J]. Microb Ecol, 2012, 64(4): 986-999.
- [25] 龙振宇. 吉林西部中小型浅水湖泊大型底栖动物与水质响应关系研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2018.
LONG Zhenyu. Study on relationship between macrobenthos and water quality response of small and medium-sized shallow lakes in western Jilin Province [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2018.
- [26] 熊莲, 刘冬燕, 王俊莉, 等. 安徽太平湖浮游植物群落结构[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1066-1077.
XIONG Lian, LIU Dongyan, WANG Junli, et al. Phytoplankton community structure in Lake Taiping of Anhui Province [J]. Journal of Lake Science, 2016, 28(5): 1066-1077.
- [27] 吴天浩, 刘劲松, 邓建明, 等. 大型过水性湖泊: 洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 440-448.
WU Tianhao, LIU Jingsong, DENG Jianming, et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze [J]. Journal of Lake Science, 2019, 31(2): 440-448.
- [28] 国家环境保护总局. 中华人民共和国地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Environmental quality standard for surface water of the people's Republic of China: GB 3838—2002 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [29] NALEWAJKO C, MURPHY T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of Anabaena and Microcystis in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [J]. Limnology, 2001, 2(1): 45-48.
- [30] 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3020-3030.
MA Jianrong, DENG Jianming, QIN Boqiang, et al. Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3020-3030.
- [31] 夏莹霏, 胡晓东, 徐季雄, 等. 太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 134-146.
XIA Yingfei, HU Xiaodong, XU Jixiong, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 134-146.
- [32] 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 等. 淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 1-16.
DU Caili, YANG Li, ZHAO Yi, et al. Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 1-16.
- [33] 褚一凡, 赵闪闪, 李杲光, 等. 陈桥东湖浮游生物群落结构特征及水质评价[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 23-29.
CHU Yifan, ZHAO Shanshan, LI Gaoguang, et al. Plankton community structure and evaluation of water quality in Chenqiao East Lake Wetland [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 23-29.
- [34] 陈光荣, 钟萍, 张修峰, 等. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 351-356.
CHEN Guangrong, ZHONG Ping, ZHANG Xiufeng, et al. Zooplankton and its relationship with water quality in Huizhou West Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(3): 351-356.
- [35] 杨鸿雁, 杨劲, 刘毅, 等. 云贵高原富营养化湖泊杞麓湖浮游生物群落的季节演替及其驱动因子分析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(4): 876-884.

- YANG Hongyan, YANG Shao, LIU Yi, et al. Seasonal Succession of Plankton Community and the Driving Factors in Hypereutrophic Qilu Lake (Yunnan-Guizhou Plateau) [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(4): 876-884.
- [36] 方丽娟,刘德富,杨正健,等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(S2): 45-50.
FANG Lijuan, LIU Defu, YANG Zhengjian, et al. Effects of water temperature on the phytoplankton community structure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(S2): 45-50.
- [37] 赵秀侠,方婷,杨坤,等. 安徽沱湖夏季浮游植物群落结构特征与环境因子关系[J]. *植物科学学报*, 2018, 36(5): 687-695.
ZHAO Xiuxia, FANG Ting, YANG Kun, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and related environmental factors in summer in Tuohu Lake, Anhui, China [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2018, 36(5): 687-695.
- [38] 朱旭宇,黄伟,曾江宁,等. 氮磷比对冬季浮游植物群落结构的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(2): 293-299.
ZHU Xuyu, HUANG Wei, ZENG Jiangning, et al. Effects of nitrogen and phosphorus ratios on phytoplankton community structure in winter[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19(2): 293-299.
- [39] 侯秀丽,苑春刚,李学平,等. 滇池氮磷浓度变化对蓝、绿、硅藻年际变化的影响[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(1): 16-22.
HOU Xiuli, YUAN Chungang, LI Xueping, et al. Effect of nitrogen and phosphorus concentrations on the planktonic algae dynamics in Dianchi Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(1): 16-22.
- [40] 于洋,彭福利,孙聪,等. 典型湖泊水华特征及相关影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(2): 88-94.
YU Yang, PENG Fuli, SUN Cong, et al. Analysis on the characteristics and impact factors of water bloom in the lake [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(2): 88-94.
- [41] XIANG F, YANG W, CHEN Y, et al. Acute toxicity of nitrite and ammonia to daphnia similoides of different developmental stages: using the modified gaussian model to describe [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 84(6): 708-711.
- [42] MARTINS J, OLIVA TELES L, VASCONCELOS V. Assays with *Daphnia magna* and *Danio rerio* as alert systems in aquatic toxicology [J]. *Environment International*, 2007, 33(3): 414-425.
- [43] ZHAO K, SONG K, PAN Y, et al. Metacommunity structure of zooplankton in river networks: Roles of environmental and spatial factors [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 96-104.
- [44] 林志,万阳,徐梅,等. 淮南迪沟采煤沉陷区湖泊后生浮游动物群落结构及其影响因子[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1): 171-182.
LIN Zhi, WAN Yang, XU Mei, et al. Metazoan zooplankton community structure and environmental drivers of Digou coal mining subsided-lakes in Huainan [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1): 171-182.

(责任编辑 王海锋)