

## 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系\*

李娜<sup>1</sup>, 周绪中<sup>1,2</sup>, 孙博闻<sup>1\*\*</sup>, 高学平<sup>1</sup>, 崔文彦<sup>2</sup>

(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 300170)

**摘要:** 浮游植物和环境因子是水生态中重要的组成部分, 研究浮游植物与环境因子的相关关系可为白洋淀水资源管理及水生态保护提供理论基础. 本研究于2018年非汛期(5月)和汛期(8月)分别对白洋淀淀区8个采样点的浮游植物及环境因子进行调查分析. 采用Pearson相关性分析法筛选主要环境因子, 分析白洋淀浮游植物群落结构变化和主要环境因子的分布特征, 以及两者间的相互关系. 结果表明, 汛期主要环境因子为溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)和总磷(TP), 非汛期主要环境因子为DO、COD<sub>Mn</sub>、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和TP. 汛期和非汛期检出浮游植物分别为5门38种和6门43种, 浮游植物丰度分别为 $415.30 \times 10^5 \sim 1018.14 \times 10^5$  cells/L和 $249.62 \times 10^5 \sim 454.21 \times 10^5$  cells/L, 优势种分别为6种和10种, 且基本为蓝藻和绿藻. 浮游植物群落Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )、Margalef物种丰富度指数( $dM$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )和物种多样性阈值4项指数均表明汛期浮游植物多样性小于非汛期. 浮游植物群落特征与水质关联性较强, 水质较好区域(如淀区中心) $H'$ 和 $J$ 均较高, 反之在水质较差区域(如府河、孝义河等汇入口) $H'$ 和 $J$ 较低. TP和DO是影响汛期浮游植物群落特征的关键因素, COD<sub>Mn</sub>和TP是影响非汛期浮游植物群落特征关键因素. 水质评价结果表明白洋淀水质整体处于富营养状态, 与2005年以来对白洋淀进行的3次浮游植物生态调查结果相比, 淀区浮游植物多样性与均匀度显著下降, 表明淀区富营养化程度持续加深.

**关键词:** 白洋淀; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; Pearson相关性分析

## Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian\*

LI Na<sup>1</sup>, ZHOU Xushen<sup>1,2</sup>, SUN Bowen<sup>1\*\*</sup>, GAO Xueping<sup>1</sup> & CUI Wenyan<sup>2</sup>

(1: State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, P.R.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 300170, P.R.China)

**Abstract:** Phytoplankton and environmental factors were investigated at 8 sampling sites in the Lake Baiyangdian in May and August of 2018, to study their relationship which can provide theoretical basis for water resources management and aquatic ecological protection. The results of Pearson correlation analysis showed that the main environmental factors were dissolved oxygen (DO), permanganate index (COD<sub>Mn</sub>), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in flood season while those were DO, COD<sub>Mn</sub>, ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N) and TP in non-flood season. Phytoplankton species were detected in 5 phyla, 38 species in flood season and 6 phyla, 43 species in non-flood season, respectively. The density of phytoplankton was  $415.30 \times 10^5 \sim 1018.14 \times 10^5$  cells/L and  $249.62 \times 10^5 \sim 454.21 \times 10^5$  cells/L, respectively. The dominant species were 6 species and 10 species and were mainly cyanobacteria and green algae. The Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ), Margalef species richness index ( $dM$ ), Pielou evenness index ( $J$ ) and species diversity threshold of phytoplankton community all indicated that the diversity of phytoplankton in flood season was lower than that in non-flood season.  $H'$  and  $J$  were higher in areas with better water quality (such as the center of the Lake

\* 2019-07-30 收稿; 2019-10-28 收修改稿.

国家自然科学基金项目(51609166, 51621092)资助.

\*\* 通信作者; E-mail: bwsun@tju.edu.cn.

Baiyangdian), whereas  $H'$  and  $J$  were lower in areas with poor water quality (such as the entrance of Fuhe River and Xiaoyi River). TP and DO were the key factors affecting the characteristics of the phytoplankton community in flood season, while  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and TP were the key factors affecting the characteristics of the phytoplankton community in non-flood season. The results of water quality evaluation showed that the water quality of the Lake Baiyangdian was in eutrophication and the degree continued to deepen compared with the results of three ecological surveys of phytoplankton since 2005.

**Keywords:** Lake Baiyangdian; phytoplankton; community structure; environmental factors; Pearson correlation analysis

浮游植物是水环境中的初级生产者和食物链的基础环节,其群落结构包括种类组成、数量分布、优势种及群落特征等能对环境的变化做出最直接的响应,因而常被用作评价湖泊生态状态的重要指标<sup>[1]</sup>,常见方法有优势种评价法与种类多样性指数法. 浮游植物的群落结构受水体中温度、pH 和营养盐等环境因子的直接影响<sup>[2]</sup>. 此外在人类活动、水文条件及营养输入等因素影响下,各湖泊浮游植物群落结构的时空变化及主导因素各不相同. 严广寒等<sup>[3]</sup>研究表明西洞庭湖浮游植物多样性指数为三口水系<湖区<四口水系,影响浮游植物分布的关键因素是水温和 pH 值;钱奎梅等<sup>[4]</sup>研究表明鄱阳湖浮游植物群落季节变化显著,产生影响的主要环境因子为水位变化、水温、透明度、电导率、悬浮物浓度和亚硝态氮浓度. 因此深入研究浮游植物的时空变化特征及影响因素,对于湖泊的生态环境监测及管理具有重要意义<sup>[4]</sup>.

目前,分析浮游植物群落与环境因子间复杂关系的方法有很多,包括典型对应分析(CCA)、冗余分析(RDA)、主成分分析(PCA)、Pearson 相关性分析和协方差分析等<sup>[5-6]</sup>. Pearson 相关性分析用于衡量两个变量之间的相关关系,采用 Pearson 相关性分析法可以同时分析出影响生物群落指标的关键因素以及生物群落指标与环境因子的响应关系.

白洋淀(38°10'~40°00'N,113°40'~116°20'E)位于河北省雄安新区,水域面积 366 km<sup>2</sup>,为华北平原最大的淡水湖. 白洋淀作为雄安新区辖区内最重要的水体功能区,有利于新区生态城市建设,改善新区城市气候,为城市提供水资源,对未来新区城市的建设和发展具有不可忽视的作用. 近几十年来由于受气候变化和人类活动的影响,白洋淀淀区的生态环境发生了很大的变化,水源明显减少,污染严重,泥沙淤积严重,湖泊水域和湿地面积急剧萎缩<sup>[7]</sup>. 已有资料显示,白洋淀淀区水体表现为严重的富营养化,水生态也发生了改变甚至破坏,具体表现为耐污物种出现和生物多样性破坏等. 比如最早是冯建社<sup>[8]</sup>于 1996 年在白洋淀鉴定出浮游植物 8 门 170 种;之后沈会涛等<sup>[9]</sup>于 2006 年在白洋淀共观察到浮游植物 8 门 155 种,优势种以蓝藻、绿藻和隐藻为主,此时淀区已表现出一定程度的浮游植物种类减少的趋势;王瑜等<sup>[10]</sup>于 2009 年在白洋淀共检出浮游植物 8 门 133 种,优势种以蓝藻和绿藻为主,物种多样性持续下降. 近年来,关于白洋淀浮游植物的相关调查研究鲜有报道,但白洋淀淀区由于雄安新区的建设以及数次生态补水,浮游植物生存的外部条件发生了一定程度变化,因此对淀区浮游植物群落指标与水环境因子的研究显得尤为重要. 本研究基于 2018 年 5 月和 8 月白洋淀的水文、水质以及浮游植物数据,分析浮游植物群落结构和环境因子的时空分布,通过 Pearson 相关性分析得到白洋淀浮游植物群落结构与环境因子相关关系,并对白洋淀淀区水质及富营养化程度进行评价,以期对白洋淀水资源管理及水生态保护提供理论基础.

## 1 材料与与方法

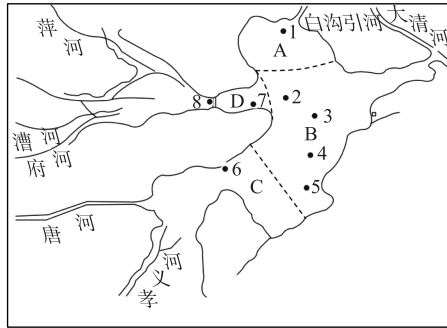
### 1.1 样点布设与采样时间

在白洋淀共设置了 8 个采样点,分别是留通、王家寨、光淀张庄、圈头、采蒲台、端村、泥李庄和安新桥(图 1). 于 2018 年非汛期(5 月)和汛期(8 月)对白洋淀的 8 个点进行 2 次采样.

### 1.2 样品采集与处理

环境因子共 11 项,包括水温(WT)、酸碱度(pH)、透明度(SD)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、总磷(TP)、总氮(TN)和叶绿素  $a$  (Chl.  $a$ ). 样品分析方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[11]</sup>.

浮游植物采样方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[11]</sup>,浮游植物定性样品用 25 $\mu\text{m}$  浮游生物网(200 目),在水下 0.15 m 处作“ $\infty$ ”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



采样点	汛期	非汛期	区域
1 (留通)	V	III	A区
2 (王家寨)	V	IV	B区
3 (光淀张庄)	IV	IV	
4 (圈头)	IV	IV	
5 (采蒲台)	IV	IV	
6 (端村)	V	V	C区
7 (泥李庄)	劣V	劣V	D区
8 (安新桥)	劣V	劣V	

图1 白洋淀采样点分布及分区示意

Fig.1 Distribution and zoning of sampling sites in the Lake Baiyangdian

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。

浮游植物镜检在蔡司 Scope A1 显微镜下进行,定性样品分类主要依据形态学分类方法,种类鉴定参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》<sup>[12]</sup>;定性样品带回实验室静置 24 h,然后浓缩至 30 mL,用浮游生物计数框对其进行计数,根据浓缩倍数计算藻细胞丰度。

### 1.3 数据分析

1.3.1 白洋淀环境因子相关性分析 通过 Kolmogorov-Smirnow (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,水环境因子均符合正态分布。因而利用 SPSS 20.0 统计软件对白洋淀淀区水环境因子的时空变化进行 *t* 检验;通过 Pearson 相关性分析法对环境因子进行分析,相关性较强的 2 个环境因子只保留其中 1 个。根据筛选出的环境因子对采样点进行水质评价,并对 8 个采样点进行分区。

1.3.2 白洋淀淀区浮游植物群落特征指标 采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 物种丰富度指数、Pielou 均匀度指数、物种多样性阈值、生物丰度和优势度对浮游植物的群落特征进行分析<sup>[13-16]</sup>,各指数的计算公式列于表 1。

表 1 群落特征指数\*

Tab.1 Community characteristic index

评价方法	计算公式	参考文献
Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )	$H' = -\sum P_i \cdot \ln P_i$	[13]
Margalef 物种丰富度指数( $dM$ )	$dM = (S-1)/\ln N$	[14]
生物丰度	已有资料分析	[15]
Pielou 均匀度指数( $J$ )	$J = H'/\ln S$	[16]
物种多样性阈值( $Dv$ )	$Dv = H' \cdot J$	[14]
优势度 $Y$	$Y = P_i \cdot f_i$	[14]

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

1.3.3 白洋淀淀区浮游植物群落特征与水环境因子的响应分析 通过 Pearson 相关性分析方法利用 SPSS 20.0 统计软件进行相关性分析,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。相关性分析时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。

1.3.4 综合营养状态指数评价 参考湖泊富营养化评价方法及分级标准<sup>[17]</sup>,根据 Chl.  $a$ 、TP、TN、SD 和  $COD_{Mn}$  的测定结果,运用综合营养状态指数法对白洋淀生态系统健康状况进行评价。综合营养状态指数计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

式中,  $TLI(\Sigma)$  表示综合营养状态指数;  $TLI(j)$  代表第  $j$  种参数的营养状态参数;  $W_j$  为第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重, 详细计算公式见参考文献[17].

参考《中国水资源公报》<sup>[18]</sup> 中湖泊、水库富营养化评分与分类标准将湖泊营养状态分成 5 级, 同一营养状态下, 指数值越高, 其营养程度越严重: 贫营养,  $TLI(\Sigma) < 30$ ; 中营养,  $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$ ; 轻度富营养,  $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$ ; 中度富营养,  $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$ ; 重度富营养,  $TLI(\Sigma) > 70$ .

## 2 结果

### 2.1 白洋淀环境因子相关性分析

白洋淀水体 DO、NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>、COD、TP 和 TN 在汛期的平均浓度分别为 2.57、0.82、6.50、22.40、0.23 和 1.56 mg/L, 非汛期的平均浓度分别为 9.91、0.20、6.10、20.20、0.10 和 1.85 mg/L (表 2). 环境因子在汛期与非汛期存在显著差异, NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>、COD 和 TP 浓度在汛期高于非汛期, DO 和 TN 浓度在汛期低于非汛期.  $t$  检验分析结果 (表 2) 显示白洋淀环境因子存在显著的空间异质性. 在汛期各采样点水体的 DO、COD<sub>Mn</sub>、COD、TN 浓度存在极显著差异 ( $P < 0.01$ ), NH<sub>3</sub>-N 和 TP 浓度存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); 在非汛期各采样点水体的 DO、COD<sub>Mn</sub>、COD、TP 和 TN 浓度存在极显著差异 ( $P < 0.01$ ), NH<sub>3</sub>-N 浓度存在显著差异 ( $P < 0.05$ ).

汛期白洋淀水体各环境指标的 Pearson 分析结果 (附录 I) 显示, DO 浓度仅与 SD 呈现显著相关性, 由于 DO 是衡量水体自净能力的一个较为重要的指标<sup>[19]</sup>, 因此保留. COD 与 pH、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub> 呈现出极显著相关, 其中 COD、COD<sub>Mn</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 均可反映水体受污染程度, 故本文保留 COD<sub>Mn</sub>. TN 与 NH<sub>3</sub>-N 浓度呈极显著相关, 与 WT 呈现显著相关性, 与 DO 浓度等无显著相关性, 故保留. TP 浓度仅与 SD 呈现显著相关性, 因此予以保留. 汛期, 共筛选出 DO、COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 浓度 4 个主要环境因子.

非汛期白洋淀水体各环境指标的 Pearson 分析结果 (附录 II) 显示, DO 浓度与其他环境因子均无相关性, 故保留. COD<sub>Mn</sub> 与 COD 呈现出极显著相关性, 因此本文保留 COD<sub>Mn</sub>. Chl. *a* 是浮游植物进行光合作用的主要色素, 对浮游植物的生长起到重要作用, 与 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 浓度均呈显著正相关, 并且 NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 浓度三者间呈现出极显著相关性, 因此保留 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 浓度. 非汛期, 共筛选出 DO、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 浓度 4 个主要环境因子.

### 2.2 白洋淀区域划分

根据我国《地表水环境质量标准》以及筛选出的主要环境因子, 用单因子评价法对白洋淀淀区不同时期不同地点的水质进行分级评价, 结果如图 1 所示. 按照水质评价结果对 8 个采样点进行分区, 留通水质汛期为 V 类, 非汛期为 III 类, 汛期和非汛期水质评价结果差异较大, 且非汛期水质较优, 故为 A 区; 光淀张庄、采蒲台、圈头和王家寨水质大体为 IV 类水, 评价结果相近, 在所有采样点中水质处于中等, 故为 B 区; 端村为 V 类水, 故为水质较差区即 C 区; 安新桥和泥李庄水质最差, 达到劣 V 类, 故为水质差区即 D 区, 分区示意如图 1 所示.

### 2.3 白洋淀浮游植物的群落结构

2.3.1 白洋淀汛期和非汛期浮游植物的种类组成 白洋淀研究区域汛期共检出浮游植物 5 门 38 种, 其中以绿藻门种类最为丰富, 为 16 种, 占藻种总数的 42.1%; 其次是硅藻门有 11 种, 占 29.0%. 另外, 蓝藻门 7 种, 占 18.4%, 裸藻门 3 种, 占 7.9%, 甲藻门 1 种, 占 2.6% (图 2).

非汛期共检出浮游植物 6 门 43 种, 其中以绿藻门种类最为丰富, 为 20 种, 占藻种总数的 46.5%; 其次是硅藻门有 12 种, 占 27.9%. 另外, 蓝藻门 6 种, 占 14.0%, 裸藻门 3 种, 占 7.0%, 甲藻门 1 种, 占 2.3%, 金藻门 1 种, 占 2.3% (图 2).

2.3.2 白洋淀浮游植物丰度及优势种 汛期浮游植物的丰度在  $415.30 \times 10^5 \sim 1018.14 \times 10^5$  cells/L 之间, 非汛期浮游植物丰度在  $249.62 \times 10^5 \sim 454.21 \times 10^5$  cells/L 之间, 不同时空的浮游植物绝对丰度及相对组成呈现显著差异 (图 3).

优势种群通过汛期和非汛期两个时期不同地点不同浮游植物所占百分比以及所有地点的出现率共同分析, 即优势度 ( $Y$ ), 认为  $Y > 0.02$  为优势种. 汛期和非汛期不同地点的浮游植物优势种及优势度详见表 3.

表 2 2018 年 5 月和 8 月白洋淀 8 个采样点水体理化指标  
 Tab.2 Physical and chemical indexes of 8 sampling sites in the Lake Baiyangdian in May and August, 2018

时期	地点	WT/ ℃	pH	DO/ (mg/L)	SD/ m	COD <sub>Mn</sub> / (mg/L)	COD/ (mg/L)	BOD <sub>5</sub> / (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	Chl. <i>a</i> / (μg/L)
2018 年 8 月 (汛期)	留通	29.6	8.1	0.94	0.85	7.1	22.7	2.4	0.41	0.65	0.98	—
	王家寨	30.2	7.9	1.64	0.58	6.1	18.8	2.1	0.61	0.23	1.15	—
	光淀张庄	30.3	8.3	4.75	0.40	6.5	20.5	2.0	0.25	0.07	0.84	—
	圈头	30.6	8.6	2.63	0.68	7.8	33.0	2.7	0.21	0.06	1.07	—
	采蒲台	31.0	8.5	4.89	0.49	7.6	27.8	2.4	0.36	0.07	1.18	—
	端村	31.0	8.2	1.42	0.51	6.0	20.8	2.1	0.54	0.10	1.02	—
	泥李庄	30.6	8.1	2.89	0.53	5.6	19.6	2.1	1.19	0.35	2.19	—
	安新桥	28.0	8.0	1.36	0.74	4.9	16.3	2.1	2.95	0.33	4.07	—
	均值	30.2	8.2	2.57	0.60	6.5	22.4	2.2	0.82	0.23	1.56	—
	<i>P</i>	0	0	0.002	0	0	0	0	0.040	0.015	0.005	—
2018 年 5 月 (非汛期)	留通	23.5	8.4	13.82	—	5.7	16.9	—	0.07	0.05	0.88	10.01
	王家寨	—	—	12.67	—	6.2	19.0	—	0.16	0.15	1.98	23.96
	光淀张庄	—	—	7.57	—	7.0	21.5	—	0.07	0.05	1.08	11.97
	圈头	—	—	8.26	—	6.5	22.1	—	0.12	0.07	1.16	9.83
	采蒲台	—	—	7.93	—	7.2	24.8	—	0.05	0.04	1.01	2.81
	端村	19.1	8.8	13.10	—	6.7	20.1	—	0.21	0.08	1.51	24.61
	泥李庄	—	—	12.19	—	6.4	17.1	—	0.53	0.21	3.52	58.19
	安新桥	—	—	3.76	—	3.3	<10.0	—	0.42	0.13	3.69	7.91
	均值	21.3	8.6	9.91	—	6.1	20.2	—	0.20	0.10	1.85	23.96
	<i>P</i>	—	—	0	—	0	0	—	0.014	0.003	0.002	0.020

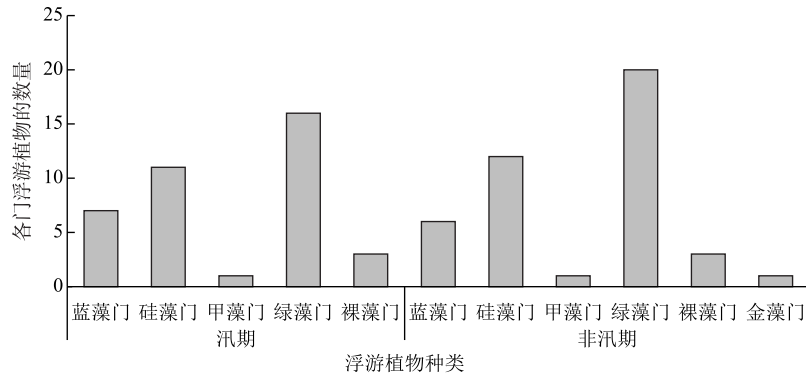


图2 白洋淀浮游植物物种组成

Fig.2 Phytoplankton species composition in the Lake Baiyangdian

经统计汛期浮游植物优势种群共有 6 种,分别为铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、微小平裂藻 (*Merismopedia tenuissima*)、类颤鱼腥藻 (*Anabaena oscellarioides*)、集星藻 (*Actinastrum hantzschii*)、大螺旋藻 (*Spirulina major*) 和四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*),其中圈头最多有 4 种,铜绿微囊藻在 8 个研究地点均有出现,微小平裂藻出现了 6 次;非汛期浮游植物优势种群共有 10 种,分别为铜绿微囊藻、四角十字藻 (*Crucigenia quadrata*)、二形栅藻 (*Scenedesmus dimorphus*)、湖生卵囊藻 (*Oocystis lacustris*)、小型色球藻 (*Chroococcus minor*)、四尾栅藻、微小平裂藻、小席藻 (*Phormidium tenue*)、尖针杆藻 (*Synedra acus* var) 和小球藻 (*Chlorella vulgaris*),其中光淀张庄最多有 7 种,铜绿微囊藻出现 8 次,四角十字藻出现 5 次. 汛期与非汛期优势种主要是  $\beta$ -中营养型、 $\alpha$ - $\beta$ -中富营养型、 $\alpha$ -富营养型指示种<sup>[20]</sup>.

总体而言,从时间上看,汛期浮游植物丰度除端村外均大于非汛期,汛期优势种以蓝藻为主,有少量绿藻;非汛期优势种以蓝、绿藻居多,有少量的硅藻. 从空间上看,在汛期 D 区浮游植物丰度最大,C 区最小,其中端村丰度最小,安新桥丰度最大;在非汛期 C 区浮游植物丰度最大,A 区最小,B、D 区处于中等,其中留通丰度最小,端村的丰度最大. 各区域优势种情况相似,均以蓝、绿藻为主(图 3).

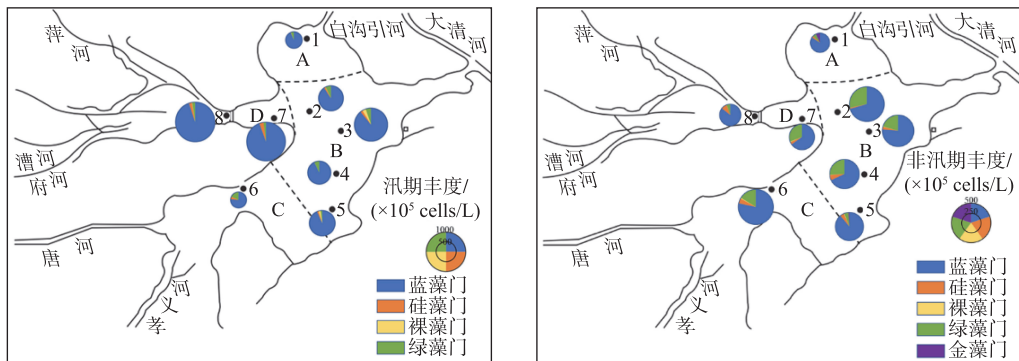


图3 白洋淀浮游植物丰度的时空分布(甲藻门在该区域数量极少,较难定量测量,但在汛期的安新桥以及非汛期的泥李庄、光淀张庄、采蒲台等地均有出现)

Fig.3 Spatial and temporal distribution of phytoplankton density in the Lake Baiyangdian

2.3.3 白洋淀浮游植物群落特征指数及水质评价 白洋淀浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数汛期在 0.584~1.514 之间,均值为 1.115,非汛期在 0.709~1.828 之间,均值为 1.258(图 4). 根据 Shannon-Wiener 多样性指数评价等级<sup>[21]</sup>:0~1 为重污型;1~3 为中污型;>3 为清洁-寡污型. 因此,白洋淀淀区均处于中污染状态.

表 3 白洋淀不同地点浮游植物优势种及优势度

Tab.3 Dominant phytoplankton species and dominance degree at different sites in the Lake Baiyangdian

时期	安新桥	泥李庄	留通	光淀张庄	王家寨	圈头	采蒲台	端村
汛期	铜绿微囊藻 (0.63)	铜绿微囊藻 (0.43)	铜绿微囊藻 (0.89)	微小平裂藻 (0.42)	铜绿微囊藻 (0.62)	铜绿微囊藻 (0.42)	铜绿微囊藻 (0.51)	铜绿微囊藻 (0.75)
	微小平裂藻 (0.21)	微小平裂藻 (0.39)		铜绿微囊藻 (0.40)	微小平裂藻 (0.23)	微小平裂藻 (0.29)	微小平裂藻 (0.34)	四尾栅藻 (0.06)
	类颤鱼腥藻 (0.05)	类颤鱼腥藻 (0.03)		集星藻 (0.03)		类颤鱼腥藻 (0.05)		
						大螺旋藻 (0.03)		
非汛期	铜绿微囊藻 (0.86)	铜绿微囊藻 (0.62)	铜绿微囊藻 (0.73)	铜绿微囊藻 (0.60)	铜绿微囊藻 (0.60)	铜绿微囊藻 (0.56)	铜绿微囊藻 (0.84)	铜绿微囊藻 (0.77)
	尖针杆藻 (0.03)	四角十字藻 (0.13)	微小平裂藻 (0.07)	微小平裂藻 (0.04)	四角十字藻 (0.14)	四角十字藻 (0.09)		四角十字藻 (0.04)
		四尾栅藻 (0.06)		小席藻 (0.04)	小型色球藻 (0.03)	小席藻 (0.04)		小球藻 (0.03)
		湖生卵囊藻 (0.04)		四角十字藻 (0.04)	二形栅藻 (0.03)	二形栅藻 (0.04)		
				二形栅藻 (0.04)	四尾栅藻 (0.03)			
				小型色球藻 (0.03)				

\* 括号外为优势种,括号内为优势度.

白洋淀浮游植物 Pielou 均匀度指数汛期在 0.228~0.631 之间,均值为 0.450,非汛期在 0.395~0.645 之间,均值为 0.522(图 4). 按照 Pielou 均匀度指数评价等级<sup>[21]</sup>:0~0.3 为重污型;0.3~0.5 为中污型;0.5~0.8 为清洁—寡污型;0.8~1.0 为清洁型. 因此,白洋淀淀区在汛期处于中污染状态下,在非汛期处于清洁—寡污状态下.

白洋淀浮游植物物种多样性阈值汛期在 0.133~0.956 之间,均值为 0.527,非汛期在 0.358~1.097 之间,均值为 0.666(图 4).

白洋淀浮游植物 Margalef 物种丰富度指数汛期在 1.229~1.782 之间,均值为 1.518,非汛期在 1.874~2.959 之间,均值为 2.236(图 4). 按照 Margalef 物种丰富度指数评价等级<sup>[21]</sup>:0~1 为重污染型;1~2 为中污染型;2~3 为轻污染型;>3 为清洁型. 因此,白洋淀淀区在汛期处于中污染状态下,在非汛期处于轻污染状态下.

总体而言,汛期浮游植物群落特征指数均值均小于非汛期,汛期处于中污染状态下,非汛期处于轻污染状态下. 从空间上看,汛期 A 区即留通的物种多样性和均匀度最低,B 区最高,其中圈头的物种多样性和均匀度最高,C、D 区处于中等;非汛期 B 区物种多样性和均匀度最高,其余区域相似.

#### 2.4 白洋淀浮游植物群落特征与水环境因子的响应关系

Pearson 相关性分析结果(表 4)表明,汛期浮游植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、物种多样性阈值与 TP 浓度均呈显著负相关( $P<0.05$ ),Margalef 物种丰富度与 DO 浓度呈显著负相关( $P<0.05$ );非汛期浮游植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、物种多样性阈值均与  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TP 浓度呈显著正相关( $P<0.05$ ),Margalef 物种丰富度与 TP 浓度呈显著负相关( $P<0.05$ ).

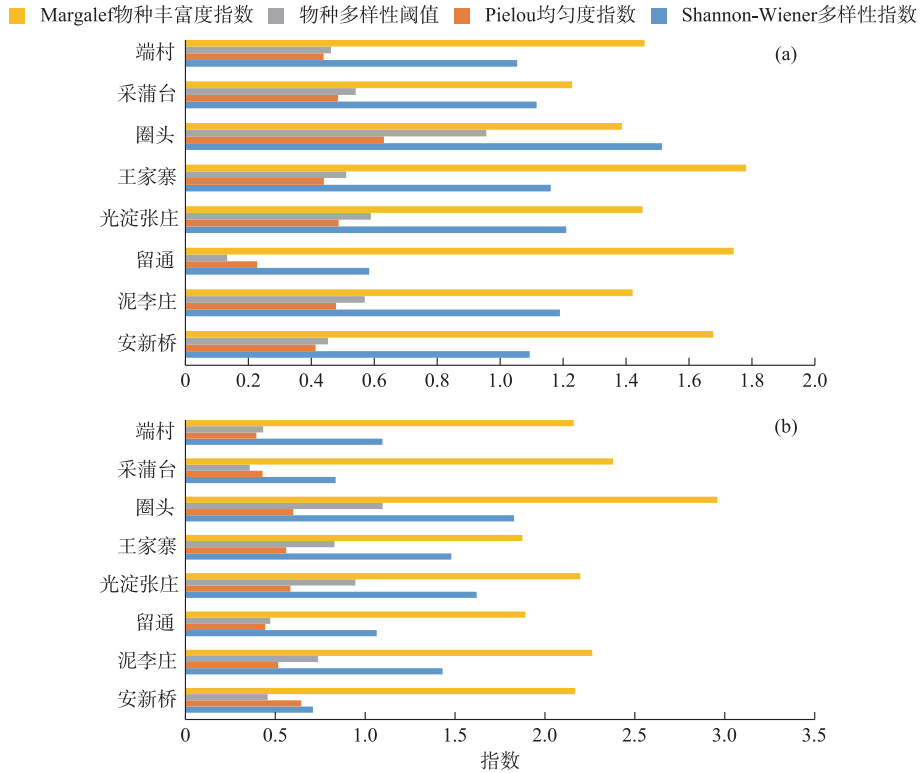


图 4 汛期 (a) 和非汛期 (b) 白洋淀浮游植物群落特征指数

Fig.4 Index of phytoplankton community characteristics in the Lake Baiyangdian in flood season (a) and non-flood season (b)

表 4 白洋淀浮游植物群落指标与环境因子的相关性

Tab.4 Correlation between phytoplankton community index and environmental factors in the Lake Baiyangdian

时期	指标	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	物种多样性阈值	Margalef 物种丰富度指数
汛期	DO	0.426	0.507	0.424	-0.761 *
	COD <sub>Mn</sub>	0.100	0.232	0.288	-0.440
	TP	-0.786 *	-0.834 *	-0.752 *	0.662
	TN	0.026	-0.071	-0.086	0.238
非汛期	DO	0.213	0.318	0.159	-0.278
	COD <sub>Mn</sub>	0.894 *	0.956 *	0.880 *	0.366
	TP	0.999 *	1.000 *	0.999 *	-0.999 *
	NH <sub>3</sub> -N	-0.378	-0.411	-0.395	-0.106

\* 在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关, \*\* 在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关.

### 3 讨论

#### 3.1 白洋淀浮游植物群落结构分析

浮游植物群落结构受水体营养盐浓度、水动力学特征、浮游动物觅食压力、水文动态的直接作用, 除此之外, 时间与地理空间变化的影响也不容忽视<sup>[2]</sup>. 从时间来看, 2018 年白洋淀汛期共观察到浮游植物 5 门 38 种, 非汛期共观察到 6 门 43 种. 在非汛期浮游植物的种类及门类高于汛期, 非汛期出现了汛期未出现的



金藻门,且群落组成也存在较大差异.白洋淀浮游植物丰度与优势种在汛期与非汛期也表现出明显不同.白洋淀汛期各采样点浮游植物群落组成以蓝藻门及少量的绿藻门占优势,其中主要优势种为蓝藻门的铜绿微囊藻和微小平裂藻,二者相对丰度之和为 85.8%,非汛期各采样点浮游植物群落组成以蓝、绿藻门及少量的硅藻门占优势,其中主要优势种为蓝藻门的铜绿微囊藻和绿藻门的四角十字藻,二者的相对丰度之和为 74.7%,汛期优势种相对丰度更高.从绝对数量上说,汛期主要优势种丰度大于非汛期.可见汛期与非汛期的浮游植物群落结构存在着一定的差异,造成这些差异的原因可能与两个时期的环境差异有关:首先,水温是影响浮游植物生长、发育、群落组成和丰度变化等重要的环境因子<sup>[22]</sup>,在 10~30℃条件下硅藻均有出现,绿藻在 18~30℃下均能生长良好,蓝藻能在 40℃的高水温下生长<sup>[23]</sup>.白洋淀非汛期和汛期的平均水温分别为 21.3 和 30.2℃,随着水温升高,浮游植物由非汛期的蓝、绿藻门为主向汛期的蓝藻门为主转变,汛期浮游植物丰度大于非汛期,优势种相对丰度更高.此外,水温增加会使 DO 浓度降低并促进沉积物中氮、磷等营养物质释放,导致浮游植物群落结构变化.其次,水位波动可以调节浮游植物群落结构,汛期比非汛期水位波动频繁,可能会抑制某些浮游植物的生长<sup>[4]</sup>,导致汛期浮游植物种类少于非汛期.最后,水量对浮游植物有重要影响.汛期水量增加,会冲刷土壤中的营养盐或者造成沉积物中的营养物质再悬浮,从而导致营养盐浓度升高影响浮游植物群落结构的变化.

从空间来看,4 个区域浮游植物的群落结构与水质关联性较强. D 区域为入淀河流汇入口,接受来自府河、萍河等排放的城市尾水和安新县的工业及生活尾水,水体富营养化程度高,汛期、非汛期均为劣 V 类. C 区域端村为淀区养鱼区,由于水体停留时间长,长期积累的营养物质导致端村水质较差,汛期和非汛期均为 V 类水.以上两个区域水质均较差,浮游植物群落结构也比较相似,多样性和均匀度数值相近. A 区汛期水质为 V 类水,物种多样性和均匀度在所有采样点中最差,非汛期水质为 III 类水,水质较汛期变好,物种多样性指数和均匀度也有所提高,两个时期的差异可能是由于汛期入淀河流携带营养物质过多引起的. B 区处于淀区中心,旅游业发达,受人类活动影响较大,水质总体处于 IV 类水,但水质优于 C 区和 D 区,物种多样性和均匀度也相应较高.可见水质是影响浮游植物的群落结构的重要因素,上游水系是白洋淀水域的主要污染来源之一.

### 3.2 白洋淀浮游植物群落与环境因子的关系

浮游植物群落结构在不同水体具有不同的特征,其演替规律是众多环境因子在时间和空间上相互影响的结果<sup>[24]</sup>.影响水体中浮游植物群落结构的环境因子很多,国内学者陆续开展关于白洋淀浮游植物与环境因子的相关性研究:沈会涛等<sup>[9]</sup>在 2006 年通过对白洋淀浮游植物数据和环境因子数据进行典范相关分析,发现 pH 和 TP 浓度是影响浮游植物分布的关键因素;李亚蒙等<sup>[25]</sup>通过典型对应分析方法得出 2008 年 TP 浓度和 pH 是影响白洋淀硅藻种群分布的关键因素;王瑜等<sup>[10]</sup>在 2009 年对白洋淀浮游植物细胞丰度与环境因子进行 Pearson 相关性分析,得出 DO、Chl. *a* 和 TP 浓度是关键因素;金磊等<sup>[26]</sup>在 2013 年根据白洋淀典型水域的浮游植物出现的相对频度和相对丰度进行冗余分析,发现 TP、TN、pH 和 DO 浓度是影响浮游植物分布的关键因素.本研究通过 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、物种多样性阈值和 Margalef 物种丰富度 4 个浮游植物群落特征指数与主要环境因子进行 Pearson 相关性分析,发现白洋淀汛期与非汛期的关键因素存在差异,影响汛期浮游植物群落特征的关键因素为 TP 和 DO 浓度,影响非汛期浮游植物群落特征的关键因素为 COD<sub>Mn</sub> 和 TP 浓度.不同研究所选取的浮游植物指标以及分析方法的不同可能导致研究结果的不同,但可以发现 TP 浓度均为影响浮游植物的关键因素.磷是浮游植物群落发展的关键因子,磷的供给促进了浮游植物的生长.有实验结果表明,在磷浓度较高时绿藻占优势,随着磷浓度降低,硅藻逐渐占优势<sup>[27]</sup>.汛期 TP 浓度高于非汛期,促进了绿藻的生长,不利于硅藻的发展,从而导致汛期浮游植物物种多样性、均匀度与丰富度降低.由前述可知,非汛期 Chl. *a* 浓度与 TP 浓度呈现出显著正相关,Chl. *a* 是浮游植物生长状况的直接体现指标,因此非汛期 TP 浓度对浮游植物的生长起到促进作用,这与上述结论相符.汛期水温较高有利于浮游植物生物量增加,其繁殖、生长过程中的耗氧则导致水中 DO 浓度降低,因此浮游植物对 DO 的竞争使 DO 成为影响浮游植物群落结构的关键因素. COD<sub>Mn</sub> 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,与浮游植物的生长呈显著正相关关系<sup>[28]</sup>,非汛期 COD<sub>Mn</sub> 低于汛期,成为浮游植物生长的限制因素.因此可以通过控制有机污染物和磷的排放改善白洋淀的水质.

### 3.3 白洋淀水质评价

根据 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 物种丰富度指数进行评价,白洋淀汛期水质处于中污染状态,非汛期处于轻污染状态。根据优势种评价法,白洋淀淀区汛期与非汛期优势种均以指示水体富营养状态的绿藻和蓝藻为主。根据 Reynolds 浮游植物功能类群的划分<sup>[29]</sup>:铜绿微囊藻属于 M,适合的生境为低纬度的小型富营养湖;微小平裂藻和小型色球藻属于 Lo,该类群具有广适性;类颤鱼腥藻属于 H1,适合的生境为富营养分层浅水湖泊;大螺旋藻属于 S2,适合的生境为浅浑浊混合层;集星藻、四尾栅藻、四角十字藻和二形栅藻属于 J,适合的生境为混合的高富营养的浅水水体;小席藻属于 S1,适合的生境为透明度较低的混合水体;湖生卵囊藻和小球藻属于 F,适合的生境为中富营养型湖泊;尖针杆藻属于 D,适合的生境为较浑浊的浅水水体。这些优势类群的广泛分布也说明了白洋淀水体的富营养化程度较高,水体较浑浊,透明度较低。但单一的浮游植物评价方法不够全面,故结合综合营养状态指数( $TLI(\Sigma)$ )进行评价。白洋淀大部分检测点  $TLI(\Sigma)$  值均在 50 分以上,平均值为 52,处于中度富营养化水平。综合几种评价方法,可以看出白洋淀水体处于富营养化状态。

将白洋淀 2005 年以来的浮游植物调查资料进行对比(表 5),其中 2005—2006 年<sup>[30]</sup>和 2009 年<sup>[10]</sup>调查资料均为白洋淀汛期与非汛期的平均数据,发现 2018 年浮游植物丰度大幅度上升,分别是 2006 年和 2009 年的 10.3 倍和 2.6 倍。由于本次采样时间处于藻类的生长繁殖期,温度升高以及水体营养盐的增加均可促进浮游植物的生长;但浮游植物门类减少,且指示水质清洁的黄藻门未检测到,说明白洋淀水质恶化,富营养化程度加深;此外,指示水体富营养化的隐藻门也未检测到,物种数显著减少,与 2009 年相比减少了 0.6 倍,表明浮游植物的物种多样性降低,Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 物种丰富度等指标的显著下降也证实了这一点。因此从浮游植物群落结构的角度来看,相比 2009 年,白洋淀水体富营养化有逐年加重的趋势。这可能是由于白洋淀近年来降水量减少、泥沙淤积、河湖连通性被破坏,导致水体停留时间较长、交换缓慢,此外围淀造田、围淀养鱼、尾水排放等均导致水体有机质不断累积,淀区富营养化持续加深。

表 5 白洋淀浮游植物群落结构变化\*

Tab.5 Changes of phytoplankton community structure in the Lake Baiyangdian

年份	种类组成	丰度/ ( $\times 10^5$ cells/L)	优势类群	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 物种丰富度指数
2005	8 门 152 种	66.4	蓝、绿藻	3.846	—	2.883
2006	8 门 155 种	51.8	蓝、绿藻	3.613	—	3.055
2009	8 门 133 种	208.5	蓝、绿藻	2.295	0.650	3.495
2018	6 门 57 种	533.1	蓝、绿藻	1.187	0.486	1.877

\* 表中 2005—2006 年数据来自文献[30],2009 年数据来自文献[10]。

## 4 结论

1) 白洋淀研究区域汛期共检出浮游植物 5 门 38 种,非汛期共检出浮游植物 6 门 43 种,均以绿藻门种类最为丰富。汛期浮游植物优势种群共有 6 种,分别为蓝藻门的铜绿微囊藻、微小平裂藻、类颤鱼腥藻、大螺旋藻以及绿藻门的集星藻、四尾栅藻;非汛期浮游植物优势种群共有 10 种,分别为蓝藻门的铜绿微囊藻、小色球藻、微小平裂藻、小席藻,绿藻门的四角十字藻、二形栅藻、湖生卵囊藻、四尾栅藻、小球藻以及硅藻门的尖针杆藻。白洋淀汛期浮游植物的丰度在  $415.30 \times 10^5 \sim 1018.14 \times 10^5$  cells/L 之间,非汛期浮游植物丰度在  $249.62 \times 10^5 \sim 454.21 \times 10^5$  cells/L 之间。

2) 汛期 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、物种多样性阈值和 Margalef 物种丰富度均值分别为 1.115、0.450、0.527 和 1.518,非汛期分别为 1.258、0.522、0.666 和 2.236。浮游植物多样性的时间规律为汛期<非汛期。

3) 浮游植物群落特征与水质关联性较强,水质较好区域(如淀区中心)物种多样性指数和均匀度均较高,反正在水质较差区域(如府河、孝义河等汇入口)物种多样性指数和均匀度较低。

4) 影响汛期浮游植物群落特征的关键因素为 TP 和 DO 浓度, 影响非汛期浮游植物群落特征的关键因素为  $COD_{Mn}$  和 TP 浓度, 因此不同时期需对不同环境因子予以关注, 以保证淀区浮游植物多样性及水生态健康.

5) 白洋淀水质整体处于富营养化状态, 并且富营养化程度持续加深, 因此需采取措施保护水质, 防治水污染, 控制污染物排放总量.

## 5 附录

附录 I ~ II 见电子版 (DOI: 10.18307/2020.0317).

## 6 参考文献

- [ 1 ] Wang ZF, Zhang W, Yang L *et al.* Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in different regions of Yilong Lake, Yunnan province, China. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2249-2257. DOI: 10.13227/j.hjlx.201810157. [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. 环境科学, 2019, **40**(5): 2249-2257.]
- [ 2 ] Yang SQ, Zu TX, Wang HB *et al.* Relationship between the structure of phytoplankton community and environmental factors in the Zhangye section of Heihe River. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 159-170. DOI: 10.18307/2019.0115. [杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 159-170.]
- [ 3 ] Yan GH, Yin XY, Wang X *et al.* Effects of environmental factors on the composition of phytoplankton community in Sankou of the Yangtze River and the Western Dongting Lake. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2532-2540. [严广寒, 殷雪妍, 汪星等. 长江三口-西洞庭湖环境因子对浮游植物群落组成的影响. 中国环境科学, 2019, **39**(6): 2532-2540.]
- [ 4 ] Qian KM, Liu BG, Chen YW. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009-2016. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1035-1044. DOI: 10.18307/2019.0402. [钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009-2016年). 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1035-1044.]
- [ 5 ] Xu J, He P, Wang Q *et al.* Relationship between distribution of submerged macrophyte and water environment factors in Baiyangdian Lake in summer. *Wetland Science*, 2013, **11**(4): 488-494. [徐杰, 何萍, 王钦等. 夏季白洋淀沉水植物分布与水环境因子的关系. 湿地科学, 2013, **11**(4): 488-494.]
- [ 6 ] Zhang B, Zhang JT, Suriguga *et al.* A comparison of co-inertia analysis and canonical correspondence analysis in plant community ordination. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, **33**(5): 842-851. [张斌, 张金屯, 苏日古嘎等. 协惯量分析与典范对应分析在植物群落排序中的应用比较. 植物生态学报, 2009, **33**(5): 842-851.]
- [ 7 ] Zhang MY. Research on ecological environment change in Baiyangdian watershed based on RS, GIS and landscape pattern analysis [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2004. [张明阳. 基于RS、GIS和景观格局分析的白洋淀流域生态环境变化研究[学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2004.]
- [ 8 ] Feng JS. Phytoplankton and water quality assessment in the Lake Baiyangdian. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 1999, (2): 27-29. [冯建社. 白洋淀浮游植物与水质评价. 江苏环境科技, 1999, (2): 27-29.]
- [ 9 ] Shen HT, Liu CQ. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors in the Lake Baiyangdian. *J Lake Sci*, 2008, **20**(6): 773-779. DOI: 10.18307/2008.0616. [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. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 773-779.]
- [ 10 ] Wang Y, Liu LS, Shu JM *et al.* Community structure of phytoplankton and the water quality assessment in Lake Baiyangdian. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 575-580. DOI: 10.18307/2011.0413. [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. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 575-580.]
- [ 11 ] Editorial board of "monitoring and analysis methods of water and wastewater", Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China eds. *Monitoring and analysis methods of water and wastewater*; 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2005. [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. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.]
- [ 12 ] Hu HJ, Wei YX eds. *Chinese freshwater algae—System, classification and ecology*. Beijing: Science Press, 2006. [胡鸿均, 魏印心. 中国淡水藻类——系统, 分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [ 13 ] Wang X, Sun M, Wang J *et al.* *Microcystis* genotype succession and related environmental factors in Lake Taihu during cyanobacterial blooms. *Microb Ecol*, 2012, **64**(4): 986-999.

- [14] Long ZY. Study on relationship between macrobenthos and water quality response of small and medium-sized shallow lakes in western Jilin Province [Dissertation]. Changchun: Northeast Normal University, 2018. [龙振宇. 吉林西部中小型淡水湖泊大型底栖动物与水质响应关系研究[学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2018.]
- [15] Cai JL, Su Y, Wen H *et al.* Characteristics of macrozoobenthic assemblages and their relationship with aquatic environmental factors in streams of Lake Dianchi watershed in the flood season. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 982-989. DOI: 10.13227/j.hjlx.2011.04.002. [蔡佳亮, 苏玉, 文航等. 滇池流域入湖河流汛期大型底栖动物群落特征及其与水环境因子的关系. 环境科学, 2011, **32**(4): 982-989.]
- [16] 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.]
- [17] Wang MC, Liu XQ. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49. [王明翠, 刘雪芹. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.]
- [18] The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China ed. China water resource bulletin. Beijing: China Water & Power Press, 2005. [中华人民共和国水利部. 中国水资源公报. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.]
- [19] Liu LF, Xu ZX, Yin XW *et al.* Response of aquatic organism richness to physiochemical factors at different regions in Jinan City. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 998-1011. DOI: 10.18307/2019.0406. [刘麟菲, 徐宗学, 殷旭旺等. 济南市不同区域水生生物与水环境因子的响应关系. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 998-1011.]
- [20] Kuang QJ, Hu ZY, Zhou GJ *et al.* Investigation on phytoplankton in Xiangxi river watershed and the evaluation of its water quality. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, (6): 507-513. [况琪军, 胡征宇, 周广杰等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价. 武汉植物学研究, 2004, (6): 507-513.]
- [21] Wu TH, Liu JS, Deng JM *et al.* Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 440-448. DOI: 10.18307/2019.0213. [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. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 440-448.]
- [22] Li Y, Li QH, Chen WS *et al.* Dynamic changes of metazooplankton community structure in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province. *J Lake Sci*, 2016, **28**(2): 340-349. DOI: 10.18307/2016.0214. [李钊, 李秋华, 陈文生等. 贵州三板溪水库后生浮游动物群落结构的动态变化. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 340-349.]
- [23] Fang LJ, Liu DF, Yang ZJ *et al.* Effects of water temperature on the phytoplankton community structure. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 45-50. [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. 环境科学与技术, 2014, **37**(S2): 45-50.]
- [24] 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. [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其与环境因子的关系. 生态学报, 2019, **39**(3): 787-798.]
- [25] Li YM, Zhao Q, Feng GP *et al.* The diatom assemblages and their response to different environments of Baiyangdian Lake, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(17): 4559-4570. [李亚蒙, 赵琦, 冯广平等. 白洋淀硅藻分布及其与水环境的关系. 生态学报, 2010, **30**(17): 4559-4570.]
- [26] Jin L, Li LY, Zhou Y *et al.* Phytoplankton community and water quality analysis of three typical waters in Baiyangdian Lake. *Journal of Hebei University: Natural Science Edition*, 2017, **37**(3): 329-336. [金磊, 李林钰, 周杨等. 白洋淀三大典型水域浮游植物群落及水质评价. 河北大学学报: 自然科学版, 2017, **37**(3): 329-336.]
- [27] Liu JP, Qu L, Liu XQ *et al.* Effects of different nutrient conditions on the growth of algae in surface water. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(S1): 407-410. [刘俊鹏, 屈亮, 刘信勇等. 不同营养条件对地表水藻类生长的影响. 环境工程, 2016, **34**(S1): 407-410.]
- [28] Yu Y, Peng FL, Sun C *et al.* Analysis on the characteristics and impact factors of water bloom in the lake. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(2): 88-94. [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. 中国环境监测, 2017, **33**(2): 88-94.]
- [29] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [30] Chen HT. The ecological study of phytoplankton community in the Baiyangdian Lake [Dissertation]. Baoding: Hebei University, 2007. [沈会涛. 白洋淀浮游植物的群落生态学研究[学位论文]. 保定: 河北大学, 2007.]

附录 I 汛期白洋淀环境因子间的相关性矩阵

Appendix I Correlation matrix between environmental factors in the Lake Baiyangdian in flood season

	WT	pH	DO	SD	COD <sub>Mn</sub>	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TP	TN
WT	1									
pH	0.491	1								
DO	0.472	0.595	1							
SD	-0.619	-0.211	-0.729 *	1						
COD <sub>Mn</sub>	0.552	0.783 *	0.394	0.023	1					
COD	0.516	0.911 **	0.346	0.048	0.906 **	1				
BOD <sub>5</sub>	0.203	0.717 *	0.012	0.455	0.804 *	0.907 **	1			
NH <sub>3</sub> -N	-0.825 *	-0.474	-0.367	0.331	-0.789 *	-0.599	-0.369	1		
TP	-0.512	-0.603	-0.607	0.740 *	-0.240	-0.380	-0.031	0.295	1	
TN	-0.787 *	-0.370	-0.286	0.322	-0.723 *	-0.500	-0.280	0.988 **	0.261	1

\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

附录 II 非汛期白洋淀环境因子间的相关性矩阵

Appendix II Correlation matrix between environmental factors in the Lake Baiyangdian in non-flood season

	DO	NH <sub>3</sub> -N	COD <sub>Mn</sub>	COD	TP	TN	Chl. <i>a</i>
DO	1						
NH <sub>3</sub> -N	-0.103	1					
COD <sub>Mn</sub>	0.444	-0.507	1				
COD	0.215	-0.677	0.934 **	1			
TP	0.154	0.870 **	-0.309	-0.512	1		
TN	-0.263	0.958 **	-0.648	-0.761 *	0.858 **	1	
Chl. <i>a</i>	0.495	0.708 *	0.148	-0.162	0.826 *	0.554	1

\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关.