

# 大纵湖浮游植物群落结构特征 及其影响因子

张明明<sup>1</sup>, 刘耿炜<sup>1</sup>, 陈 刚<sup>1</sup>, 刘倩文<sup>1</sup>, 张小明<sup>2</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局盐城分局, 江苏 盐城 224051; 2. 江苏省水文水资源勘测局徐州分局, 江苏 徐州 221018)

**摘要:** 为了解大纵湖浮游植物群落结构特征及其与水质环境因子的关系, 于 2019 年 1 月、4 月、8 月、11 月对水质和浮游植物进行调查, 分析了浮游植物的群落结构特征, 利用典型冗余分析 (RDA) 研究了影响群落分布的环境因子, 同时运用丰度及多样性指数等进行了水质综合评价。

**关键词:** 浮游植物; RDA; 多样性; 均匀度

中图分类号: X824

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2020)08-0010-05

## Community structure characteristics of phytoplankton and related affecting factors in Dazhong Lake

ZHANG Mingming<sup>1</sup>, LIU Gengwei<sup>1</sup>, CHEN Jinggang<sup>1</sup>,  
LIU Qianwen<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>2</sup>

(1. Yancheng Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Yancheng 224051, China;  
2. Xuzhou Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Xuzhou 221018, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics of the phytoplankton community structure in the Dazong Lake and its relationship with water quality environmental factors, the water quality and phytoplankton were investigated in January, April, August, and November 2019, and the community structure characteristics of phytoplankton were analyzed. The RDA was used to study the environmental factors affecting the community distribution, and the abundance and diversity indexes were used to comprehensively evaluate the water quality.

**Key words:** phytoplankton; RDA; diversity; uniformity

众多湖泊、水库尤其是作为饮用水来源的水体的富营养化进程及生态健康状况引起了广泛关注, 通常进行化学及微生物方面的监测以确保饮用水安全<sup>[1-2]</sup>。浮游植物是淡水生态系中重要的初级生产者, 其群落结构的变化会引起系统中食物网结构的改变, 从而影响系统的能量流动、物质循环和信息传递。目前, 浮游植物群落结构、多样性、生态分布及其与环境影响因子是国内外研究的热点<sup>[3-6]</sup>。大纵湖是里下河地区的重要湖泊, 是盐城市市区重要的饮用水源地, 本文研究大纵湖浮游植物的种类

组成、丰度、多样性和均匀度指数, 并采用典型冗余分析 (RDA) 方法探讨环境因子与浮游植物群落结构变化之间的关系, 为大纵湖监测管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

大纵湖是江苏省级规划保护的重点湖泊之一, 地处里下河洼地中心地带。位于盐城市盐都区大纵湖镇和泰州市中堡镇交界处, 南北宽 5.5 km, 东西长 6 km, 总面积 36.67 km<sup>2</sup>。大纵湖略呈圆形, 湖

收稿日期: 2020-04-13

作者简介: 张明明 (1984—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水质监测及评价工作。Email: 237878043@qq.com

盆呈浅碟形,岸坡平缓,湖底高程大部分在 0.1 ~ 0.3 m,相当平坦;湖水较浅,多数地方常年水深为 1 m 左右,具有调蓄洪水、行洪、渔业养殖、生态环境、旅游等综合功能,是盐城市区重要的饮用水水源地。

## 1.2 采样点设置

根据大纵湖的形状和水质状况,在大纵湖选取 3 个采样点,分别在 2019 年 1 月冬季、4 月春季、8 月夏季、11 月秋季进行采样。

## 1.3 样品采集与处理

浮游植物定量样品用有机玻璃采水器在水深 0.5 m 处采集水样 1 000 mL,现场加入鲁哥试剂并摇匀。带回实验室静置沉淀 24 h 后进行沉淀和浓缩,用浮游植物计数框计数。

pH、DO、水温、水深采用现场测定。其他化学指标采集样品带回实验室分析测定。其中 TP 的测定采用钼酸铵分光光度法测定,  $\text{NH}_3\text{-N}$  采用纳氏试剂光度法测定, TN 采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  采用酸性高锰酸钾法测定, 叶绿素 a (Chl-a) 采用分光光度法测定。

## 1.4 数据处理与分析

### 1.4.1 多样性分析和均匀度指数分析

浮游植物的多样性指数是判断湖泊水库营养状况最常用的检测指标。根据浮游生物的 Pielou 均匀度指数、Shannon-Wiener 多样性指数<sup>[7]</sup> 对大纵湖水体的浮游生物生态学特征进行分析评价。上述各项指数的计算公式如下:

$$D = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$\text{其中, } P_i = \frac{n_i}{N}$$

$$J = \frac{D}{\log_2 S} \quad (2)$$

式中:  $D$  为多样性指数;  $J$  为均匀度指数;  $n_i$  为站点中  $i$  种的个数;  $N$  为站点中浮游植物总个数;  $S$  为站点中浮游植物总种数。

### 1.4.2 统计分析

统计分析可以客观有效的揭示群落、物种分布及其与环境因子之间的关系。本研究中,先将物种数据进行除趋势对应分析(DCA)<sup>[8]</sup>, 4 个排序轴中梯度长度最大值为 2.849, 小于 3, 因此本研究选取典型冗余分析方法 RDA, 筛选出相对丰度至少在一个站点大于 1% 且在各站点的出现频度 > 25% 的种类进行排序, 将浮游植物丰度值和理化数据进行  $\lg(x+1)$  转换处理<sup>[9]</sup>。DCA 和 RDA 都在 CANO-

CO4.5 软件下完成。

## 2 结果

### 2.1 种类组成及优势种

#### 2.1.1 种类组成

大纵湖各采样点全年浮游植物的种类组成见表 1。3 个采样点的样品中, 共观察到浮游植物 6 门, 66 种(属), 其中绿藻门的种类最多, 30 种(属), 占总数的 45.4%; 其次是硅藻门, 19 种(属), 占总数的 28.8%; 蓝藻门 10 种(属), 占总数的 15.2%; 裸藻门 5 种(属), 占总数的 7.6%; 隐藻门 1 种(属), 占总数的 1.5%; 金藻门 1 种(属), 占总数的 1.5%。

大纵湖浮游植物种类在 8 月达到最高, 为 42 种, 以绿藻、蓝藻、硅藻为主, 11 月种类最少, 为 17 种, 以硅藻和绿藻为主。蓝藻在 8 月份最多, 为 10 种; 绿藻在 8 月份最多, 为 18 种; 硅藻在 1 月份最多, 为 10 种。大纵湖富浮游植物的群落结构变化规律为: 春、秋、冬季呈绿藻—硅藻型, 夏季呈绿藻—蓝藻型。一般认为, 硅藻型的浮游植物群落是水质污染较轻水体的典型特征, 而蓝藻型则意味着水质富营养化程度比较高, 所以, 大纵湖春季、秋季、冬季的水质好于夏季。

#### 2.1.2 优势种

以优势度来表示水体中浮游植物的优势种群, 优势度的计算公式为:

$$Y = f_i P_i \quad (3)$$

式中:  $f_i$  为第  $i$  种浮游植物出现的频率,  $P_i$  为第  $i$  种浮游植物数量占浮游植物总数量的比例。当  $Y$  大于 0.02 时, 该种群即为优势种群<sup>[10]</sup>。

1 月份优势种为 4 种, 分别为硅藻门的等片藻、舟形藻, 绿藻门的小球藻、月牙藻, 4 月份优势种为 5 种, 分别为硅藻门的扁圆卵形藻、钝脆杆藻、舟形藻、绿藻门的小球藻、月牙藻, 8 月份优势种为 5 种, 分别为蓝藻门的湖泊伪鱼腥藻、色球藻、微囊藻、细丝藻、中华平裂藻, 绿藻门的小球藻, 11 月份优势种为 4 种, 分别为硅藻门的脆杆藻属、颗粒直链藻、舟形藻, 绿藻门的小球藻。

### 2.2 浮游植物丰度

DZH1 样点浮游植物的丰度在  $1.28 \sim 13.14 \times 10^6$  ind./L 之间, DZH2 样点浮游植物的丰度在  $0.58 \sim 8.67 \times 10^6$  ind./L 之间, DZH3 样点浮游植物的丰度在  $1.25 \sim 7.36 \times 10^6$  ind./L 之间。大纵湖各样点浮游植物的丰度均呈现秋冬季节减少, 春夏季

表 1 2019 年大纵湖各月浮游植物的细胞密度所占比例

| 月份   | 细胞密度所占比例/% |     |      |     |      |     |
|------|------------|-----|------|-----|------|-----|
|      | 硅藻门        | 金藻门 | 蓝藻门  | 裸藻门 | 绿藻门  | 隐藻门 |
| 1 月  | 48.5       | 0.0 | 0.0  | 1.5 | 50.0 | 0.0 |
| 4 月  | 35.6       | 2.5 | 2.5  | 3.0 | 55.4 | 1.0 |
| 8 月  | 9.5        | 0.0 | 58.2 | 3.0 | 26.9 | 2.4 |
| 11 月 | 57.0       | 0.0 | 0.0  | 2.6 | 40.4 | 0.0 |

节增多的趋势。由此可见,温度较高的夏秋季节比较有利于大纵湖浮游植物的生长。参照浮游植物细胞密度评价水质的标准<sup>[11]</sup>,浮游植物细胞密度不大于  $5 \times 10^5$  cells/L,水体为极贫养水体,  $5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$  cells/L 为贫营养,  $1 \times 10^6 \sim 9 \times 10^6$  cells/L 为贫中营养。根据富营养指数评价,大纵湖水质为贫中营养。

### 2.3 多样性指数和均匀度指数

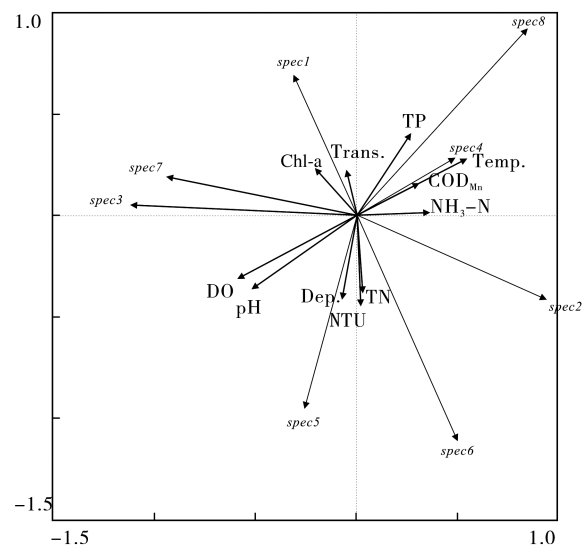
DZH1 样点 1 月、4 月、8 月、11 月的多样性指数分别为 2.79、2.62、3.23、1.52, DZH2 样点 1 月、4 月、8 月、11 月的多样性指数分别为 2.27、2.86、3.98、1.53, DZH3 样点 1 月、4 月、8 月、11 月的多样性指数分别为 3.18、3.23、3.70、3.24,各站点多样性指数均较高。

DZH1 样点 1 月、4 月、8 月、11 月的均匀度指数分别为 0.93、0.83、0.83、0.96, DZH2 样点 1 月、4 月、8 月、11 月的均匀度指数分别为 0.88、0.83、0.89、0.77, DZH3 样点 1 月、4 月、8 月、11 月的均匀度指数分别为 0.86、0.87、0.89、0.90。Shannon - Wiener 指数值为 0 ~ 1 时,水体为重污染;其值为 1 ~ 3 时,水体为中污染,其值大于 3 时,水体为清污染或者无污染<sup>[11]</sup>。Pielou 指数为 0 ~ 0.3 时,水体为重污染;其值为 0.3 ~ 0.5 时,中污染;其值大于 0.5 时,轻污染或无污染<sup>[11]</sup>。总体来说,大纵湖 3 个采样点的均匀性和多样性指数表明水体处于轻一中度污染状态。

### 2.4 水质参数对浮游植物群落格局的影响

对经过筛选的 8 种浮游植物及 9 个环境因子进行 RDA 分析,分析结果见表 2、图 1 ~ 3。本研究中 2 个物种排序轴和 2 个环境排序轴的相关系数都为 0,排序结果可靠<sup>[12]</sup>。轴 1 和轴 2 能反映 65.9% 的物种信息。

由图 1 可知,蓝藻门的平裂藻与水温、COD<sub>Mn</sub>有



Spec1:弓形藻 *Schroederia setigera* sp.; Spec2: 小环藻 *Cyclotella* sp.; Spec3: 舟形藻 *Navicula* sp.; Spec4: 小球藻 *Chlorella vulgaris* Beij. sp.; Spec5: 月牙藻 *Selenastrum bibrarianum* Reinsch; Spec6: 菱形藻 *Nitzschia* sp.; Spec7: 颗粒直链藻 *Aulacoseira granulata* Ralfs; Spec8: 平裂藻 *Merismopedia* sp. NTU: 浊度; NH<sub>3</sub>-N: 氨氮; COD<sub>Mn</sub>: 高锰酸盐指数; TP: 总磷; TN: 总氮; Chl-a: 叶绿素; Dep.: 深度; Trans.: 透明度; DO: 溶解氧。

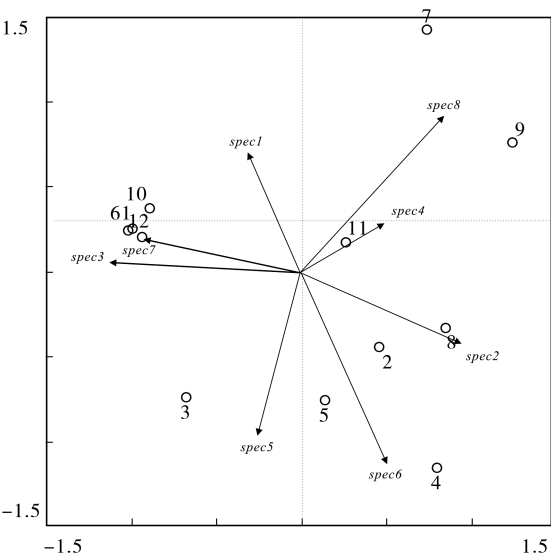
图 1 物种与环境因子的 RDA 排序

很大的正相关;绿藻门的弓形藻、硅藻门的舟形藻、颗粒直链藻与 Chl-a、SD 有很大的正相关;绿藻门的月牙藻与水深有很大的正相关;硅藻门的菱形藻与 TN 和浊度有很大的正相关;硅藻门的小环藻与 NH<sub>3</sub>-N 有很大的正相关,绿藻门的小球藻与水温、COD<sub>Mn</sub> 有很大的正相关。

由图 2 可知, DZH1 样点 4 月、DZH2 样点 1 月、4 月、8 月以硅藻门的小环藻、菱形藻为主, DZH1 样点 1 月、8 月、DZH3 样点 4 月、11 月以绿藻门的弓形藻、硅藻门的舟形藻、颗粒直链藻为主, DZH1 样点 8 月、DZH2 样点 11 月、DZH3 样点 8 月以绿藻门

表 2 大纵湖物种与环境因子 RDA 分析统计信息

| 类别           | 轴 Axis |       |       |       |
|--------------|--------|-------|-------|-------|
|              | 1      | 2     | 3     | 4     |
| 特征值          | 0.433  | 0.226 | 0.159 | 0.068 |
| 物种环境相关性      | 1.0    | 1.0   | 1.0   | 1.0   |
| 物种变异累计百分数    | 43.3   | 66.0  | 81.8  | 88.6  |
| 物种—环境变异累计百分数 | 43.3   | 66.0  | 81.8  | 88.6  |
| 全部特征值总和      | 1.0    |       |       |       |
| 全部典范特征值总和    | 1.0    |       |       |       |



1、4、7、10:站点 1(1 月、4 月、8 月、11 月);  
2、5、8、11:站点 2(1 月、4 月、8 月、11 月);  
3、6、9、12 站点 3(1 月、4 月、8 月、11 月)

图 2 样方与物种的 RDA 排序

的小球藻、蓝藻门的平裂藻为主,DZHZ 样点 1 月以绿藻门的月牙藻为主。

淡水水体中营养盐如氮、磷元素长期以来被认为是与浮游植物生长密切相关,其中磷被广泛认为是淡水浮游植物演替的影响因素,但在大纵湖 TP 并非影响浮游植物群落分布的主要驱动力。由图 3 可知,NH<sub>3</sub>-N 是排序轴 1 的主要影响因子,NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>、水温、TP、TN、NTU 与第一排序轴正相关,与其他环境因子负相关。TN、NTU 是排序轴 2 的主要影响因子,Chl-a、SD、TP、水温、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N 与第二排序轴正相关。水温和 COD<sub>Mn</sub> 有很大的相关性,TN 和 NTU 有很大的相关性。1 号站点春、冬季、2 号站点的冬季、3 号站点的春季物种差异性较小,影

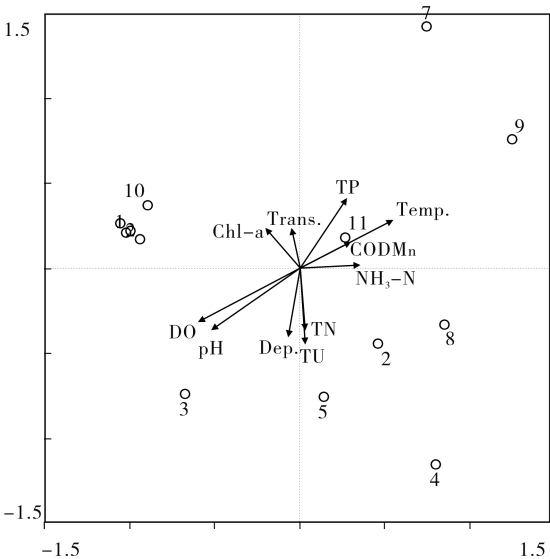


图 3 样方与物种的 RDA 排序

响因素为 Chl-a 和 SD;2 号站点的冬季、春季、夏季物种差异性较小,影响因素为 TN 和 NTU。

3 结 论

根据 2019 年 1 月、4 月、8 月、11 月的水质和浮游植物调查结果,分析了浮游植物的群落结构特征,利用典型冗余分析(RDA)研究了影响群落分布的环境因子,同时运用丰度及多样性指数等进行了水质综合评价。结论如下:

(1)2019 年,大纵湖浮游植物种类以绿藻、蓝藻和硅藻三大藻群为主。3 种藻类种数占藻类总种数的 89.4%。夏季为大纵湖浮游植物种类季节变化明显,冬季种类数最少,夏季最多。夏季以绿藻和蓝藻为优势藻,春、秋冬季以绿藻和硅藻为优势藻。浮游植物的组成有明显的季节变化,主要是受水环境因素的影响,水体不同季节的温度、光照、DO 和

营养盐水平等均有差异。

(2) 环境与浮游植物典型冗余分析表明,  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{NTU}$  是影响大纵湖浮游植物群落分布的主要驱动力。平裂藻与水温、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  有很大的正相关;弓形藻、舟形藻、颗粒直链藻与  $\text{Chl-a}$ 、 $\text{SD}$  有很大的正相关;月牙藻与水深有很大的正相关;菱形藻与  $\text{TN}$  和  $\text{NTU}$  有很大的正相关;小环藻与  $\text{NH}_3\text{-N}$  有很大的正相关,小球藻与水温、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  有很大的正相关。

(3) 3 个站点的多样性指数和均匀度指数均较高,表征大纵湖水体为中—轻度污染,大纵湖年平均丰度为  $3.56 \times 10^6$  cells/L,利用浮游植物丰度评价显示,大纵湖为贫中营养水平。

#### 参考文献:

- [1] CABECINHA E, CORTES R, CABRAL J A, et al. Multi-scale approach using phytoplankton as a first step towards the definition of the ecological status of reservoirs [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(2):240-255.
- [2] MATTHEWS R, HILLES M, PELLETIER G. Determining trophic state in Lake Whatcom, Washington (USA), a soft water lake exhibiting seasonal nitrogen limitation[J]. *Hydrobiologia*, 2002, 468(1-3):107-121.
- [3] CERMENO P, TEIXEIRA I G, BRANCO M, et al. Sampling the limits of species richness in marine phytoplankton communities[J]. *Plankton Research*, 2014(36):1135-1139.

- [4] 宋伦,宋广军,王年斌,等. 辽东湾网采浮游植物粒级结构的胁迫响应[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9):2764-2771.
- [5] 汪星,刘录三,李黎,等. 镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11):3403-3413.
- [6] 谭啸,孔繁翔,于洋,等. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(6):578-582.
- [7] 马威,孙军. 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(3):621-632.
- [8] 谭香,夏小玲,程晓莉,等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. *环境科学*, 2011, 32(10):2875-2882.
- [9] 杨亮杰,余鹏飞,竺俊全,等. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2):569-576.
- [10] LAMPITT R S, WISHNER K F, TURLEY C M, et al. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and roles as a food source for migrating plankton[J]. *Marine Biology*, 1993, 116(4):689-702.
- [11] 况琪军,马沛明,胡征宇,等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2005, 4(2):87-91.
- [12] 夏品华,林陶,李存雄,等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(9):1477-1485.

(上接第 9 页)

- [11] 林龙利,刘国光,吕文英.  $\text{TiO}_2$  光催化同步去除水体中重金属和有机物研究进展[J]. *科技导报*, 2011, 29(23):74-79.
- [12] 蒋文新,张天胜. 纳米二氧化钛光催化降解无机污染物的研究进展[J]. *天津科技大学学报*, 2004, 19(2):14-17.
- [13] 黄锦勇,刘国光,张万辉,等.  $\text{TiO}_2$  光催化还原金属离子的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(12):104-108.

- [14] 古国榜,柳松,李川,等.  $\text{TiO}_2$  光催化处理废水中重金属的研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(11):6-11.
- [15] 黄琮,王良焱,徐悦华,等.  $\text{TiO}_2$  光催化氧化有机物的研究现状及进展[J]. *化学世界*, 2002, 43(9):494-497.
- [16] 赵鸿云,刘珊,周成珊,等. 有机农药光催化降解机理研究进展[J]. *农学学报*, 2018, 8(8):27-31.