



# 环境科学研究

Research of Environmental Sciences

## 干旱和洪涝条件下长江口海域浮游植物群落对氮磷营养盐的响应

杨依兰 王新艳 彭嘉玉 徐香勤 程全国 雷坤

### Response of Phytoplankton Community to Nitrogen and Phosphorus in the Yangtze River Estuary during Drought and Flood Events

YANG Yilan, WANG Xinyan, PENG Jiayu, XU Xiangqin, CHENG Quanguo, LEI Kun

在线阅读 View online: <https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2025.08.07>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于环境DNA技术与生态网络分析的长江口春季浮游植物群落研究

Study on the Eukaryotic Phytoplankton Community in the Yangtze River Estuary in Spring Using Environmental DNA Technology and Ecological Network Analysis

环境科学研究. 2025, 38(7): 1407–1417. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2025.06.14>

#### 2016—2021年长江口海域营养盐时空变化特征及其影响因素研究

Spatiotemporal Characteristics of Nutrients in the Yangtze River Estuary from 2016 to 2021 and Their Influencing Factors

环境科学研究. 2024, 37(2): 221–232. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.10.04>

#### 长江口2022年水动力及营养盐时空分布规律模拟研究

Numerical Modelling of Spatiotemporal Evolution of Hydrodynamics and Nutrients in the Yangtze Estuary in 2022

环境科学研究. 2025, 38(2): 272–281. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.10.12>

#### 2009—2021年夏季长江口海域浮游生物群落结构时空分布特征及其影响因素研究

Spatiotemporal Distribution of Plankton Community Structure in the Yangtze River Estuary in the Summer of 2009–2021 and Its Influencing Factors

环境科学研究. 2024, 37(2): 233–245. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.08.21>

#### 长江口海域生态环境状况及保护对策

Ecological Environment of the Yangtze Estuary and Protection Countermeasures

环境科学研究. 2020, 33(5): 1197–1205. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.03.29>

#### 鸭绿江口海域浮游植物粒级结构的环境差异响应

Environmental Stress Responses in the Size-Fractionized Phytoplankton in the Yalu River Estuary Waters

环境科学研究. 2025, 38(1): 78–89. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.11.03>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 干旱和洪涝条件下长江口海域浮游植物群落对氮磷营养盐的响应

杨依兰<sup>1,2</sup>, 王新艳<sup>2</sup>, 彭嘉玉<sup>2</sup>, 徐香勤<sup>2</sup>, 程全国<sup>1\*</sup>, 雷坤<sup>2\*</sup>

1. 沈阳大学, 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110044

2. 中国环境科学研究院, 生态环境部河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012

**摘要:** 近年来, 全球气候变化导致干旱、洪涝等现象频发, 对河口海域生态系统产生了深远影响。长江口海域作为我国重要的生态系统, 其浮游植物群落的结构和功能正面临气候变化和人类活动的双重挑战。干旱和洪涝引起的河口径流量剧变, 通过调控河口海域氮磷营养盐的输入, 深刻影响着浮游植物的生长和分布格局。为探究长江口海域浮游植物对干旱和洪涝条件的响应, 本研究基于 2020 年 (洪涝年) 和 2022 年 (干旱年) 夏季的长江口生态环境监测数据, 分析了洪涝和干旱条件下浮游植物群落对氮磷营养盐的响应规律。结果表明: ①与干旱年相比, 洪涝年长江丰富的径流量携带了大量营养盐进入海域, 使盐度降低 44%, 溶解性无机氮 (DIN) 和磷酸盐 (PO<sub>4</sub>-P) 浓度分别升高 41.3% 和 21.8%。②与洪涝年相比, 干旱年的浮游植物物种数量下降 3.6%, 生物多样性指数下降 1.5%, 但浮游植物细胞密度呈现相反趋势, 增幅达 44 倍。③不同浮游植物类群对营养盐的响应存在差异, DIN 和 PO<sub>4</sub>-P 浓度变化对蓝藻和甲藻生长影响更显著, 而盐度变化对硅藻和绿藻的生长调控作用更强。研究显示, 洪涝和干旱条件主要通过调控河口海域的营养盐输入, 驱动浮游植物群落组成和生长情况的适应性变化。本研究结果将为深入理解气候变化对近岸海域生态系统的影响提供重要依据, 并为未来水资源管理和生态保护策略的制定提供理论支撑。

**关键词:** 长江口; 干旱和洪涝; 浮游植物群落; 营养盐

中图分类号: X55 文章编号: 1001-6929(2025)10-2207-10

文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2025.08.07

## Response of Phytoplankton Community to Nitrogen and Phosphorus in the Yangtze River Estuary during Drought and Flood Events

YANG Yilan<sup>1,2</sup>, WANG Xinyan<sup>2</sup>, PENG Jiayu<sup>2</sup>, XU Xiangqin<sup>2</sup>, CHENG Quanguo<sup>1\*</sup>, LEI Kun<sup>2\*</sup>

1. Key Lab of Eco-Restoration of Regional Contaminated Environment Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang 110044, China

2. Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Ministry of Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** In recent years, global climate change has led to frequent occurrences of drought and flood events, exerting profound impacts on estuarine and marine ecosystems. As an important ecosystem in China, the structure and function of phytoplankton communities in the Yangtze River estuary face increasing challenges due to the combined effects of climate change and anthropogenic activities. Nitrogen and phosphorus are key nutrients influencing the growth and distribution of phytoplankton. Droughts and floods cause significant changes in estuarine runoff, which regulate the input of nitrogen and phosphorus into nearshore waters, thereby affecting phytoplankton growth and distribution. This study, based on monitoring data from the Yangtze River estuary during the summers of 2020 (a flood year) and 2022 (a drought year), analyzed the response patterns of phytoplankton communities to nitrogen and phosphorus under flood and drought conditions. The results showed that: (1) Compared to the drought year, the abundant runoff of the Yangtze River in the flood year carried a large amount of nutrients into the sea, reducing salinity by 44%, while the concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and

收稿日期: 2025-03-25 修订日期: 2025-07-20

作者简介: 杨依兰 (2001-), 女, 山西大同人, yilanyang0310@163.com

\* 责任作者: ①程全国 (1966-), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士, 博导, 主要从事环境可持续发展与规划研究, chengqg2011@163.com; ②雷坤 (1973-), 女, 内蒙古锡林浩特人, 研究员, 博士, 主要从事流域水环境管理研究, leikun@craes.org.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2021YFC3101700); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (No.2024YSKY-04)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2021YFC3101700); Fundamental Research Funds for the Central Public-Interest Scientific Institution, China (No.2024YSKY-04)

phosphate ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) increased by 41.3% and 21.8%, respectively. (2) Compared with the flood year, the number of phytoplankton species in the drought year decreased by 3.6%, and the biodiversity index dropped by 1.5%. However, the density of phytoplankton cells showed the opposite trend, increasing by 44 times. (3) Different phytoplankton groups exhibited different responses to nutrient changes. Changes in inorganic nitrogen and phosphate concentrations had a more significant impact on the growth of cyanobacteria and dinoflagellates, while salinity changes exerted a stronger regulatory effect on the growth of diatoms and green algae. Flood and drought conditions primarily influence nutrient dynamics in estuarine waters, leading to adaptive changes in phytoplankton community composition and growth. The findings of this study provide important insights into the impacts of climate change on coastal ecosystems and offer a theoretical basis for future water resource management and ecological conservation.

**Keywords:** the Yangtze River Estuary; drought and flood events; phytoplankton community; nutrients

近年来,受人类活动和全球气候变暖等多重因素的影响,干旱和洪涝等气候事件频发,对全球近岸海域物质与能量的迁移转化过程产生了复杂而深远的影响<sup>[1-2]</sup>。河口海域作为陆海交互作用的过渡带,其生态系统对洪涝和气象干旱事件表现出高度敏感性<sup>[3]</sup>。在洪涝事件中,流域降水量的异常增加及径流量的上升,往往导致大量营养盐输入河口海域;而气象干旱则通过减少降水量和径流量,引发海域水质恶化、溶解氧不足等一系列生态问题<sup>[4]</sup>。因此,深入探究干旱和洪涝现象对河口海域生态系统的影响,揭示气候变化对生态系统功能发挥的潜在威胁,是全球气候变化研究与环境保护领域的重要科学议题<sup>[5]</sup>。

浮游植物不仅是海洋食物链的基础,还在水体自净化和碳循环中发挥着重要作用。浮游植物群落结构主要受水体物理、化学特性和水动力条件等环境因子的影响,其中营养盐(氮、磷等)是影响浮游植物生长的关键环境因子。研究<sup>[6-7]</sup>表明,干旱和洪涝事件会显著改变河口海域生态系统中浮游植物的群落结构。一方面,洪涝引发的径流量增加会向河口海域输入大量氮、磷营养盐,促进浮游植物生长<sup>[8]</sup>;另一方面,降水不足会引发气象干旱,导致径流量减少,使得河口海域盐度升高而营养盐浓度降低,这不仅会抑制浮游植物的光合作用效率和生物量积累,还可能引发群落结构变化(如优势种演替或多样性下降),从而对河口生态系统的物质循环和能量流动产生影响<sup>[9-10]</sup>。然而,研究表明部分耐受性较强的物种(如蓝藻和绿藻)在营养盐浓度波动环境中表现出较强的适应性和竞争优势,并逐渐演替为群落优势种。这种优势种的更替不仅提高了浮游植物群落的细胞密度,还在一定程度上维持了生态系统的初级生产力<sup>[11]</sup>。因此,浮游植物对氮磷营养盐的利用策略是其应对干旱、洪涝等极端气候事件的关键因素,并且不同类群浮游植物对营养盐的吸收和利用存在差异。部分物种可能更倾向于快速吸收高浓度的营养盐,而另一些物种可能更适应低浓度、长期波动的营养环境<sup>[9]</sup>。在

研究气候变化对浮游生态系统的影响时,深入分析营养盐动态与浮游植物群落优势种演替的关联机制,有助于揭示浮游植物群落结构变化的内在机理。

在全球气候变化和人类活动的双重影响下,长江径流量的季节分配模式发生显著改变,干旱和洪涝事件也进一步影响了长江输送的陆源物质的通量与组成特征。为探究干旱和洪涝条件下长江口海域浮游植物群落对氮磷营养盐的响应机制,本研究选取2020年(洪涝年)和2022年(干旱年)的监测数据,系统分析了长江口海域营养盐浓度以及浮游植物群落的时空分布特征及其相关性,以期阐明干旱和洪涝事件对河口生态系统的影响过程及其内在作用机制。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

研究区域为长江口海域,位于 $30^{\circ}30'\text{N}\sim 31^{\circ}50'\text{N}$ 、 $121^{\circ}05'\text{E}\sim 123^{\circ}15'\text{E}$ 之间,研究区监测站点如图1所示。长江口区域属于亚热带季风气候区,具有温和湿润的气候特点,区域降水丰沛,年均降水量为1149 mm,其中70%集中在4—9月。长江口受多流系混合作用影响,河口东南部有高温、高盐、低营养盐的台湾暖流北上,北部有南下的苏北沿岸流,复杂的海流与充沛的冲淡水混合,上游下泄的泥沙与下游上溯的泥

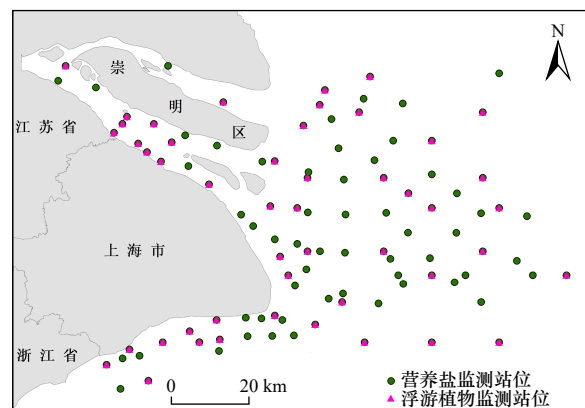


图1 研究区域与监测站位

Fig.1 Map of the study area and monitoring stations

沙在此集聚, 伴随咸淡水混合絮凝并下沉, 在口门处形成了最大浑浊带, 该区域营养盐含量丰富, 富营养化较为严重<sup>[12-14]</sup>。

## 1.2 数据来源

### 1.2.1 样品采集

本文收集了 2020 年和 2022 年夏季 (7—8 月) 长江口海域生态环境监测数据, 主要包括盐度、磷酸盐 ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )、硅酸盐 ( $\text{SiO}_3\text{-Si}$ )、溶解性无机氮 (DIN) 以及浮游植物监测数据。采样及测试方法参考 GB/T 12763—2007《海洋监测规范》<sup>[15]</sup>。水质采样要求: 水深 < 10 m 时, 采表层样; 水深  $\geq 10$  m 时, 采表层、底层混合样。浮游植物采用浅水 III 型浮游生物网垂直拖网, 不区分表底层。水质数据采用表层数据进行分析, 其中,  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度采用分光光度法测定;  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度采用硅钼蓝法测定; DIN 浓度为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度的总和,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度采用靛酚蓝分光光度法测定,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度采用盐酸萘乙二胺分光光度法测定,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度采用镉柱还原法测定。

### 1.2.2 径流量数据收集

长江口入海径流量数据采用长江流域徐六泾水文站的月均流量数据, 徐六泾水文站是长江下游干流的入海控制站, 流量数据来源于 2018—2023 年的《长江水文年鉴》。

## 1.3 典型水文年选取

2018—2023 年长江口上游徐六泾水文站的年均径流量变化如图 2 所示。由图 2 可见: 2020 年的年均径流量为  $34\,983\text{ m}^3/\text{s}$ , 较 2019 年显著 ( $p < 0.01$ ) 增加 (42.6%), 达到研究时段内最大增幅; 2022 年的年

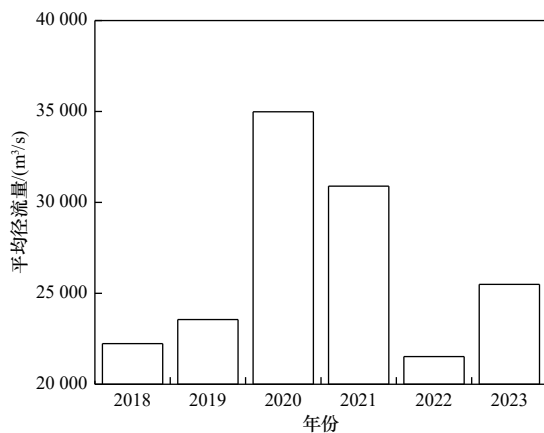


图 2 2018—2023 年长江口上游徐六泾水文站的年均径流量变化

Fig.2 Trend of annual average runoff at the Xuliujing Hydrological Station in the upper reaches of the Yangtze River Estuary from 2018 to 2023

均径流量为  $23\,523\text{ m}^3/\text{s}$ , 较 2021 年显著 ( $p < 0.05$ ) 下降 (18.6%), 为研究时段最低值。根据《上海市水情通报》数据, 2020 年上海地区经历了超强降雨、超长梅雨、超标洪水、超高水位的特殊天气, 全市累计年降雨量较常年偏多 (增加 34.3%), 为洪涝年; 2022 年, 上海市全年降水量为  $1\,071.9\text{ mm}$ , 比 2021 年低 10%, 长江流域在汛期发生了罕见的高温干旱事件, 属于旱年。因此, 本研究选定 2020 年和 2022 年作为典型的洪涝年和旱年进行后续研究。

## 1.4 生物多样性分析

运用优势度指数 ( $Y$ )、Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、Margalef 丰富度指数 ( $d$ ) 和 Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 来计算浮游植物生物多样性特征。其中, 优势度指数 [见式 (1)] 可以反映区域内群落的优势种, 且优势度指数  $Y \geq 0.02$  的物种定为浮游植物优势种; Shannon-Wiener 多样性指数 [见式 (2)(3)] 可以反映物种多样性; Pielou 均匀度指数 [见式 (4)] 可直观反映出各群落个体数目分配的均匀程度; Margalef 丰富度指数 [见式 (5)] 可以反映物种丰富情况。

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$P_i = n_i/N \quad (3)$$

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

$$d = (S - 1) / \ln N \quad (5)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  个物种的个数,  $f_i$  为第  $i$  个物种的出现频率,  $N$  为所有物种的总个数,  $P_i$  为第  $i$  个物种的个数占该监测站位总个数的比例,  $S$  为总种数。

## 1.5 统计分析

对 2020 年和 2022 年的氮磷营养盐及浮游植物的物种数量、细胞密度等数据进行统计分析。使用相关性分析、线性拟合和主成分分析 (PCA) 方法, 检验径流量、营养盐等环境因子与浮游植物群落物种数量、细胞密度特征的相关关系。统计分析图采用 Origin 软件进行绘制, 空间分布图采用 ArcGIS 10.2 软件进行绘制, 插值方法采用反距离加权算法。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流量及盐度变化

2020 年和 2022 年长江口海域各月经流量的变化如图 3 所示。由图 3 可见, 2020 年洪涝年各月经流量在  $12\,200 \sim 77\,600\text{ m}^3/\text{s}$  之间, 平均值为  $34\,983\text{ m}^3/\text{s}$ ; 2022 年旱年各月经流量在  $9\,020 \sim 50\,600\text{ m}^3/\text{s}$  之间,

平均值为  $21\,523\text{ m}^3/\text{s}$ 。洪涝年的径流量显著高于干旱年 ( $p<0.05$ ), 表明长江口径流输入受到流域降水变化的影响。

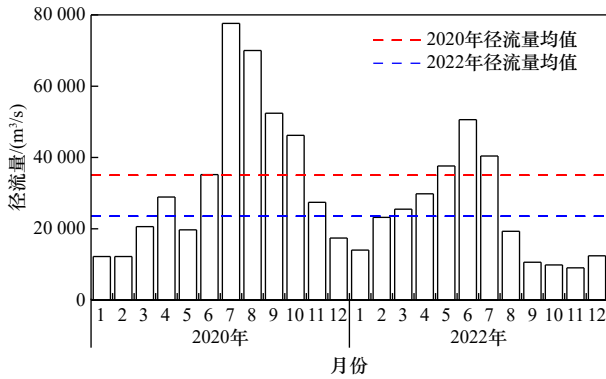


图3 2020年和2022年长江口海域各月径流量的变化

Fig.3 Monthly runoff of the Yangtze River Estuary in 2020 and 2022

夏季长江口海域盐度的时空分布特征如图4所示, 2020年夏季各站位盐度范围为  $0.14\text{‰}$ ~ $30.02\text{‰}$ , 平均值为  $7.83\text{‰}$ , 2022年夏季各站位盐度范围为  $0.06\text{‰}$ ~ $31.60\text{‰}$ , 平均值为  $13.97\text{‰}$ 。时间变化上, 洪涝年夏季的盐度平均值显著 ( $p<0.05$ ) 低于干旱年 (降低44%), 表明洪涝导致的大量径流输入显著降低了长江口海域的表层盐度。2020年和2022年夏季盐度均呈现由近岸到外海逐渐升高的趋势, 但2020年盐度受大量径流量输入的影响, 低盐度 ( $<5\text{‰}$ ) 范围向外海扩张。

## 2.2 营养盐变化分析

2020年和2022年夏季长江口海域  $\text{PO}_4\text{-P}$  和 DIN 浓度的空间分布特征如图5和图6所示。2020年夏季各站位  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度范围为  $0.020\text{--}0.071\text{ mg/L}$ , 平均值为  $0.046\text{ mg/L}$ , DIN 浓度范围为  $0.009\text{--}1.652\text{ mg/L}$ , 平均值为  $0.831\text{ mg/L}$ ; 2022年夏季各站位  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度

范围为  $0.001\text{--}0.052\text{ mg/L}$ , 平均值为  $0.027\text{ mg/L}$ , DIN 浓度范围为  $0.037\text{--}1.262\text{ mg/L}$ , 平均值为  $0.650\text{ mg/L}$ 。2022年干旱夏季的 DIN 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度相比于洪涝年显著 ( $p<0.05$ ) 降低 (分别为41.3%和21.8%), 特别是 DIN 浓度差异较大。这表明, 洪涝导致的长江冲淡水输入显著增加了海域营养盐浓度。空间变化上, 2020年和2022年 DIN 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度均呈现近岸高、外海低的梯度特征, 但2020年洪涝年的高营养盐浓度 (DIN 浓度  $>1.2\text{ mg/L}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度  $>0.05\text{ mg/L}$ ) 范围向外海扩张。

2020年和2022年夏季长江口海域氮磷比 (DIN 与  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度比) 的空间分布特征如图7所示。2020年夏季各站位氮磷比范围为  $12.07\text{--}88.47$ , 平均值为  $50.27$ ; 2022年夏季各站位氮磷比范围为  $3.35\text{--}176.49$ , 平均值为  $89.92$ , 显著高于2020年 ( $p<0.05$ )。空间分布上, 氮磷比空间分布异质性较大, 2020年氮磷比高值区主要集中在外海区, 2022年的高值区集中在长江口北部海域。

根据营养盐潜在限制区域判断法则<sup>[12]</sup>, 氮磷比  $<10$  为氮限制, 氮磷比  $>22$  为磷限制。2020年和2022年营养盐限制点位分布如图8所示, 均以磷限制为主, 点位基本重合; 2020年未出现氮限制点位, 而2022年存在少量氮限制点位。空间变化上, 长江口海域磷限制多发生在口门及河口近岸区域, 氮限制大多发生在外海区域, 这与前人研究中河口区浮游植物生长主要受到磷限制、外海区主要受到氮限制的结果<sup>[16-18]</sup>相符合。

## 2.3 浮游植物群落结构变化

### 2.3.1 物种数量

2020年夏季长江口海域共鉴定出浮游植物165种, 2022年共鉴定出159种, 2022年物种数量相比2020年略微下降 (下降3.6%), 差异不显著。空间分布上,

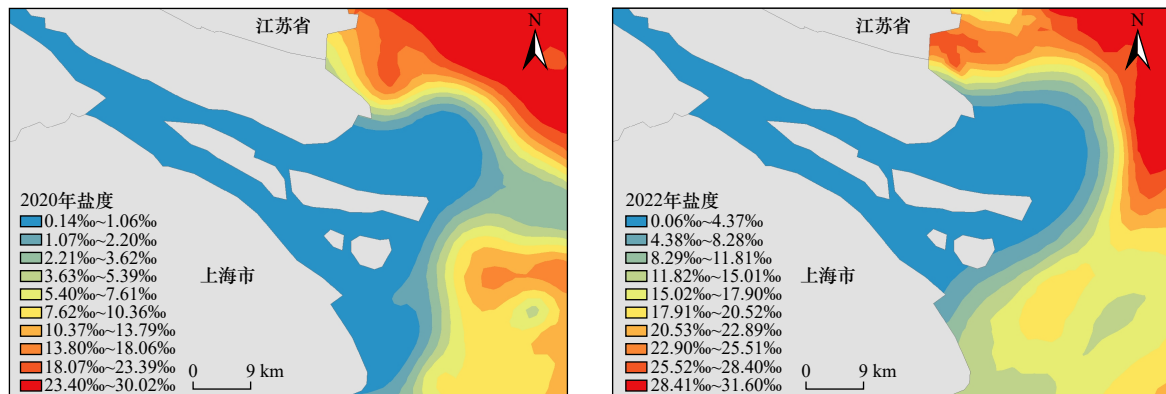


图4 2020年和2022年夏季长江口海域盐度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of salinity in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

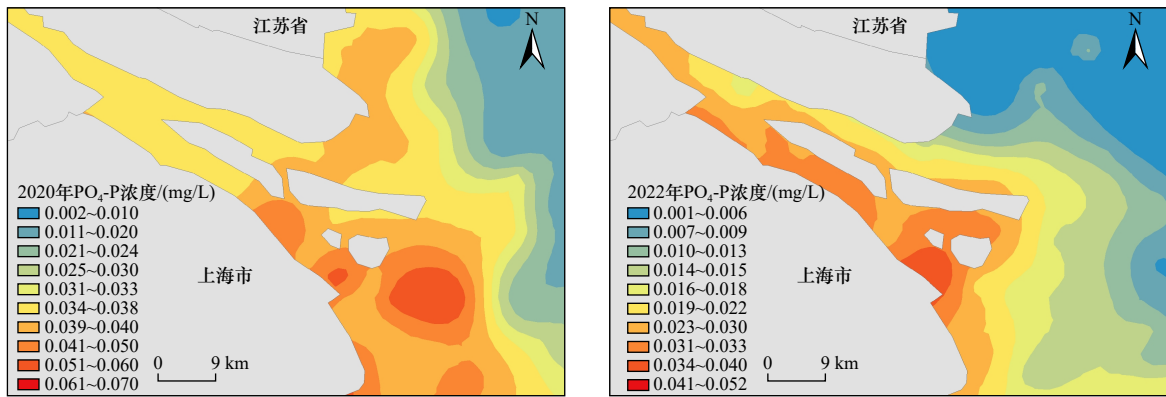


图 5 2020 年和 2022 年夏季长江口海域 PO<sub>4</sub>-P 浓度的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of PO<sub>4</sub>-P concentrations in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

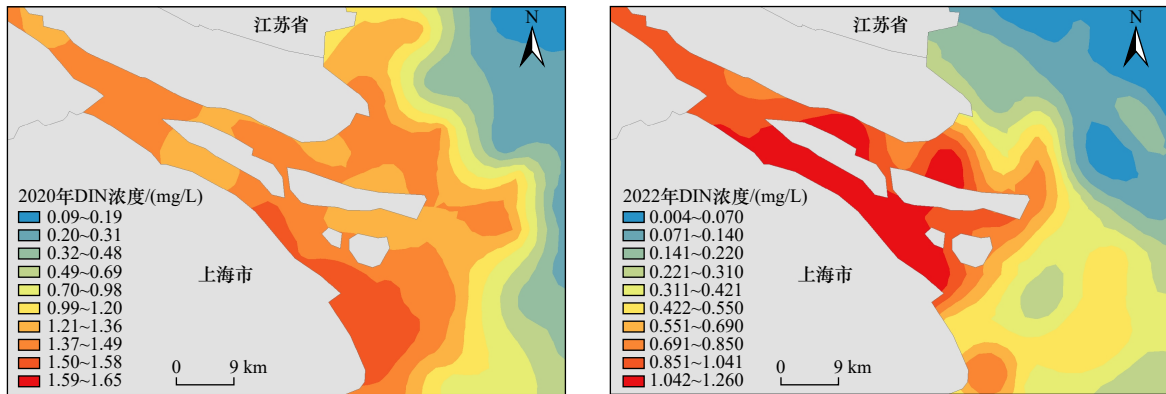


图 6 2020 年和 2022 年夏季长江口海域 DIN 浓度的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of DIN concentrations in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

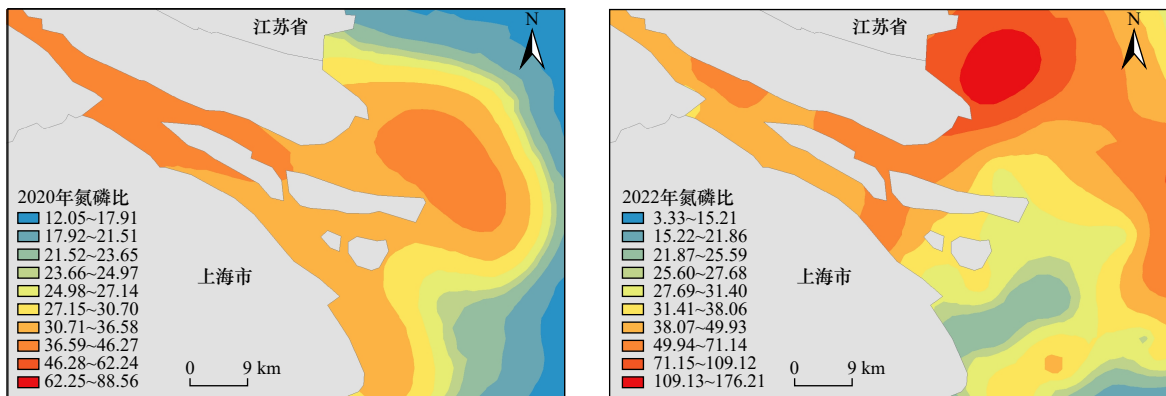


图 7 2020 年和 2022 年夏季长江口海域氮磷比的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the nitrogen-phosphorus ratio in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

浮游植物物种数量呈现近岸至外海逐渐递增的趋势(见图 9)。浮游植物群落组成如图 10 所示, 分为七个门类, 其中硅藻在两个年份均占绝对优势。浮游植物的群落结构组成发生了显著变化, 其中 2020 年浮游植物种类中硅藻占比和 2022 年相比差异较小, 甲藻占比高于 2022 年, 蓝藻和绿藻占比低于 2022 年。

### 2.3.2 细胞密度

2020 年夏季长江口海域浮游植物细胞密度平均值为 114 086 个/m<sup>3</sup>, 2022 年夏季平均值为 5 136 282 个/m<sup>3</sup>, 增幅为 44 倍, 时间变化上有显著差异 ( $p < 0.01$ )。如图 11 所示, 2020 年浮游植物细胞密度高值区集中在外海区的舟山群岛海域附近, 2022 年浮游植物细胞密度高值区集中在北部海域附近, 区域氮磷比均较高。由图 12 可见, 甲藻与硅藻在各年份浮游植物种

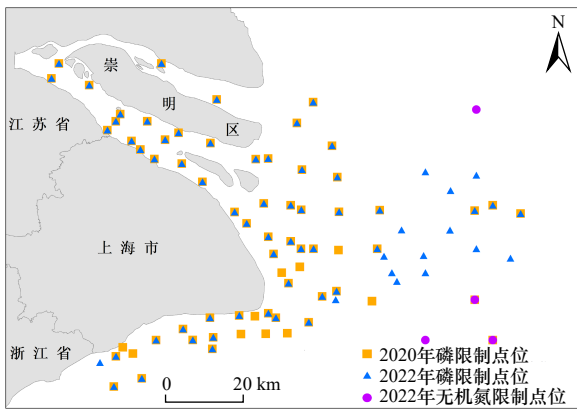


图 8 2020 年和 2022 年夏季长江口海域营养盐限制点位分布

Fig.8 Spatial distribution of nutrient limitation sites in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

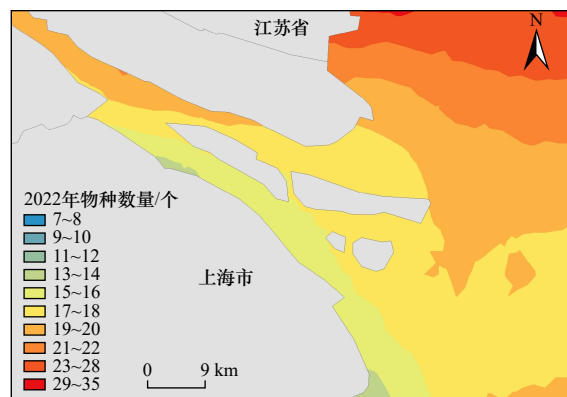
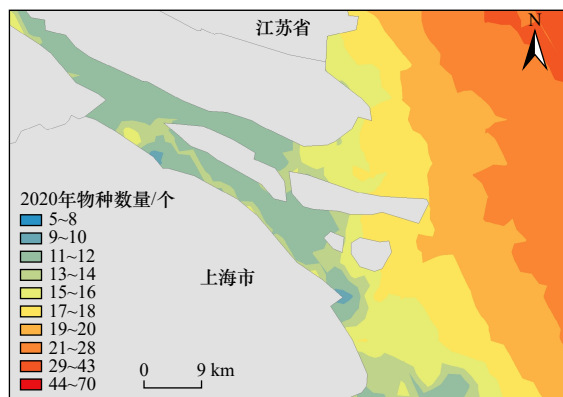


图 9 2020 年和 2022 年夏季浮游植物物种数量的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of phytoplankton species abundance in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

空间分布上, 2020 年和 2022 年 Margalef 丰富度指数高值区均集中在外海区, 2022 年口门内区域也

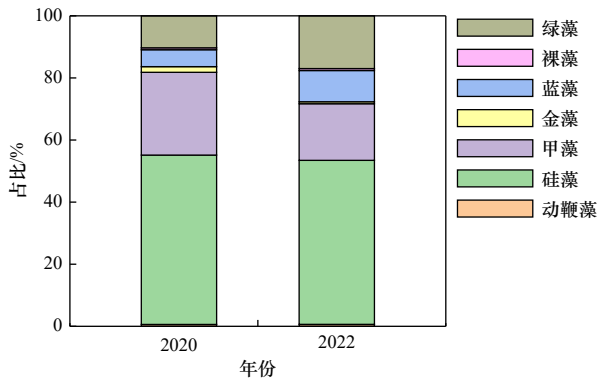


图 10 2020 年和 2022 年夏季长江口海域浮游植物群落组成

Fig.10 Community composition of phytoplankton in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

类组成上占绝对优势, 2022 年硅藻细胞密度相比 2020 年大幅上升, 蓝藻和绿藻的细胞密度也略有增加, 而甲藻细胞密度降低, 这表明部分蓝藻和绿藻对低营养盐生长环境耐受能力更强<sup>[19-22]</sup>。

2.3.3 生物多样性

2020 年和 2022 年夏季浮游植物生物多样性空间分布如图 13 所示。2020 年夏季浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数平均值依次为 1.06、0.37、1.44; 2022 年夏季浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数平均值依次为 1.05、0.39、1.15。时间变化上, 生物多样性指数无显著性变化, 洪涝年仅上升 1.5%( $p>0.01$ ), 2020 年的 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均略高于 2022 年, Pielou 均匀度指数略低于 2022 年。

存在小范围高值区; 2020 年 Shannon-Wiener 多样性指数高值区集中在口门外东北部海域, 2022 年 Shannon-Wiener 多样性指数高值区集中在口门内和外海区; 2020 年 Pielou 均匀度指数高值区集中在中部海域咸淡水交汇处, 2022 年 Pielou 均匀度指数高值区则与 Shannon-Wiener 多样性指数一致, 集中在口门内和外海区。

2.3.4 优势种

2020 年和 2022 年夏季浮游植物优势种的变化情况如表 1 所示。2020 年夏季长江口海域共出现了 4 种优势种, 平均优势度为 0.15, 2022 年共出现了 2 种, 平均优势度为 0.35, 均属于硅藻门。其中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 和尖刺拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*) 在两年间占绝对优势, 特别是中肋骨条藻一直为第一优势种。2020—2022 年, 优势种类别降低, 这表明长江口海域浮游植物群落处于不稳

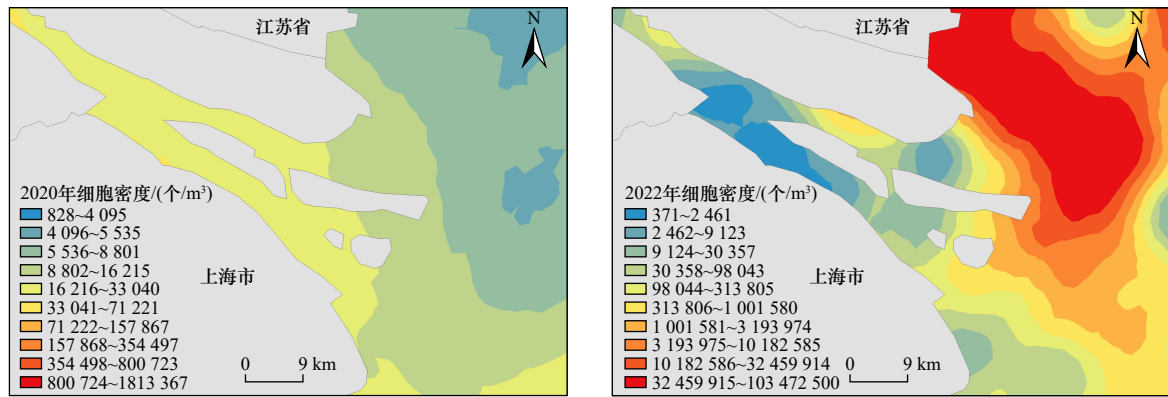


图 11 2020 年和 2022 年夏季长江口海域浮游植物细胞总数量的空间分布

Fig.11 Spatial distribution of cell density of phytoplankton in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

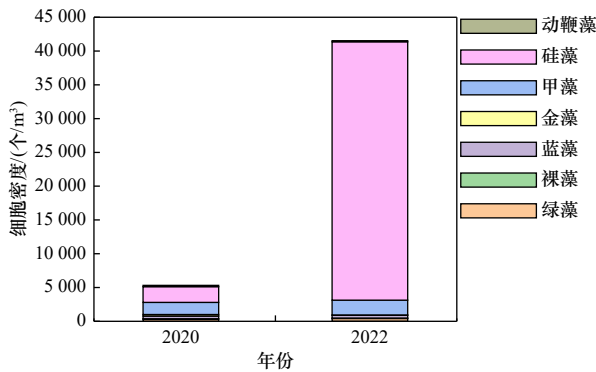


图 12 2020 年和 2022 年夏季长江口海域浮游植物优势类群的细胞密度

Fig.12 Cell density of dominant species of phytoplankton in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

定的状态,且结构趋于简单。

### 2.4 浮游植物群落结构特征变化的影响因素

浮游植物 4 种优势类群的细胞密度与环境因子的主成分分析结果如图 14 所示。由图 14 可见,蓝藻细胞密度与氮磷比呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ),与 TP 浓度呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ),高氮磷比环境促进蓝藻生长;硅藻细胞密度与盐度呈正相关,高盐度环境可能更利于硅藻生存;绿藻细胞密度与盐度和  $PO_4\text{-P}$  浓度均表现出正相关关系,甲藻细胞密度则与  $DIN$ 、 $PO_4\text{-P}$  浓度和径流量均呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ),磷元素对其生长有更明显的促进作用。时间变化上,2020 年与 2022 年夏季数据存在部分重叠,但 2022 年浮游植物细胞密度呈现更明显的区域集中特征。总的来看,径流量变化引起的营养盐 ( $DIN$ 、 $PO_4\text{-P}$ )、氮磷比和盐度变化

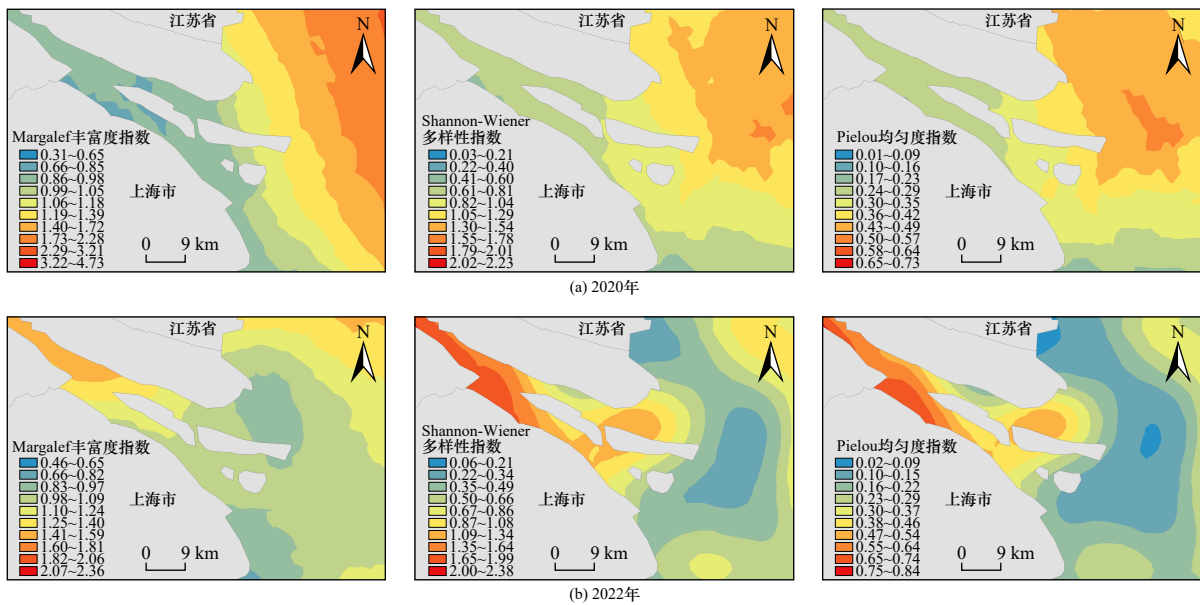


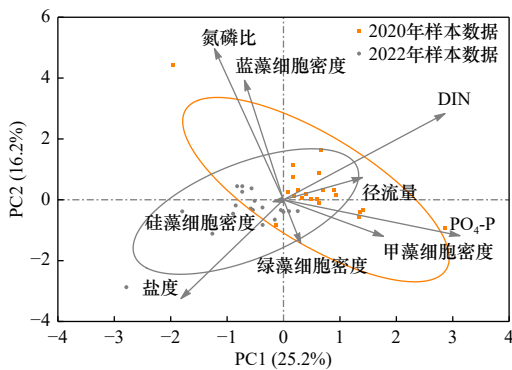
图 13 2020 年和 2022 年夏季长江口海域浮游植物生物多样性指数的空间分布

Fig.13 Spatial distribution of phytoplankton biodiversity index in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

表1 2020年和2022年夏季浮游植物的优势种及其优势度  
Table 1 Dominant species and dominance of phytoplankton in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

年份	优势种名称	优势度	平均优势度
2020	中肋骨条藻	0.504	0.15
	颗粒直链藻极变种	0.049	
	佛氏海毛藻	0.025	
	尖刺拟菱形藻	0.024	
2022	中肋骨条藻	0.667	0.35
	尖刺拟菱形藻	0.037	

共同调控浮游植物群落的结构,其中DIN和 $PO_4\text{-P}$ 浓度变化对蓝藻和甲藻生长影响更显著,而盐度变化对硅藻和绿藻的生长调控作用更强。



注: DIN、 $PO_4\text{-P}$ 均表示其浓度。

图14 2020和2022年夏季浮游植物不同类群细胞密度与环境因子的主成分分析  
Fig.14 Principal component analysis (PCA) of the cell density of phytoplankton and environmental factors in the Yangtze River Estuary during the summer of 2020 and 2022

### 3 讨论

#### 3.1 径流量变化对近岸海域氮磷营养盐浓度影响

干旱和洪涝等极端气候事件,例如,以往关于长江流域的研究表明,在50年一遇的极端降雨条件下,长江上、中、下游代表性子流域的日均径流变化率分别为6200%、21%和15%,月均径流变化率分别为355%、5%和1.3%,年均变化率分别为78%、1%和0.24%<sup>[20]</sup>。而在100年一遇的极端降雨条件下,长江上、中、下游代表性子流域的日均径流变化率分别增至8000%、25%和17%,月均径流变化率分别为437%、7%和1.5%,年均变化率分别为96%、1.2%和0.28%<sup>[20]</sup>。在洪涝事件中,流域降水量的异常增加及径流量的上升,往往伴随着大量营养盐输入河口海域,而干旱事件则引起营养盐向河口海域输入的减少<sup>[21-25]</sup>。本研究主成分分析结果也表明,径流量与氮磷营养盐浓

度存在显著正相关关系,海域水质营养盐因子指标如TN、 $NH_4^+\text{-N}$ 和TP浓度均随着径流量的大量输入而出现不同程度的上升趋势,这与已有的研究结论<sup>[21-25]</sup>一致。

#### 3.2 氮磷营养盐对浮游植物群落结构特征变化的影响

与干旱年相比,洪涝年丰富的径流量携带了大量营养盐进入长江口海域,使海域盐度降低,营养盐浓度升高<sup>[26]</sup>。水质因子的改变引起浮游植物群落结构的响应,引起浮游植物物种数量和优势种数量升高,浮游植物细胞密度降低,其主导驱动因素可能为营养盐浓度变化引发的浮游植物群落组成的适应性调整。在干旱年份,营养盐输入减少导致海域营养盐浓度降低,浮游植物细胞密度相应下降;然而,由于群落中优势种(如蓝藻和绿藻)对低营养盐环境具有较强的耐受性,浮游植物群落的物种数量及优势种数量反而升高<sup>[27]</sup>。蓝藻和绿藻相较于硅藻和甲藻来说,对低营养盐环境的耐受性更强<sup>[28-30]</sup>,干旱年夏季 $PO_4\text{-P}$ 浓度较洪涝年降低,为蓝藻、绿藻提供了有利的生长环境条件,蓝藻在低磷的环境下更具生长优势<sup>[31-34]</sup>。此外,蓝藻细胞密度与氮磷比的变化密切相关,高氮磷比环境促进蓝藻生长;而甲藻的细胞密度与DIN和 $PO_4\text{-P}$ 浓度的相关性更强,当DIN和 $PO_4\text{-P}$ 浓度升高时,甲藻的细胞密度随之增大。通常情况下浮游植物细胞密度与氮磷营养盐浓度呈正相关,营养盐为浮游植物生长繁殖提供有利条件,但由于2022年干旱年径流量骤减,陆源输入的营养盐浓度也随之降低,蓝藻相比硅藻对低营养盐的环境适应能力更强。以往的研究也表明,当外源性和内源性磷均不足时,蓝藻会通过降低代谢水平来节约磷的消耗<sup>[35-38]</sup>。根据浮游植物各类群物种数量和细胞密度的空间分布特征,2022年蓝藻细胞密度高值区主要集中在河口区,为低营养盐范围,与已有研究结果<sup>[38-40]</sup>相符。

### 4 结论

a) 干旱和洪涝对长江口海域的营养盐变化具有较大的影响。2020年洪涝年丰富的径流量携带了大量营养盐进入长江口海域,缓解了营养盐限制的情况。

b) 干旱年和洪涝使长江口海域的浮游植物群落结构特征产生显著变化,洪涝年浮游植物群落的物种数量和优势种数量均高于干旱年,但浮游植物细胞密度低于干旱年,生物多样性的年际差异较小。

c) 干旱和洪涝通过调控河口海域的营养盐输入,驱动浮游植物群落组成和生长情况的适应性变化。蓝藻和绿藻相较于硅藻和甲藻来说,对低营养盐环境

的耐受性更强。干旱年长江口海域  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度较洪涝年降低, 蓝藻和绿藻在低营养盐的环境下更具生长优势。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] CHEN X K, GUO Y H, FENG Y, et al. Impact of great flood on phytoplankton assemblages and their succession: a case study of Gaozhou Reservoir, Guangdong Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 137-146.
- [ 2 ] FURTAK K, WOLIŃSKA A. The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture: a review [J]. *CATENA*, 2023, 231: 107378.
- [ 3 ] SELEZNEVA A, SELEZNEV V. Influence of weather conditions on the dynamics of summer phytoplankton in the Kuibyshev reservoir [J]. *E3S Web of Conferences*, 2024, 510: 03019.
- [ 4 ] COSTA M R A, CARDOSO M M L, SELMECZY G B, et al. Phytoplankton functional responses induced by extreme hydrological events in a tropical reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2024, 851(4): 849-867.
- [ 5 ] CLOERN J E, JASSBY A D, THOMPSON J K, et al. A cold phase of the East Pacific triggers new phytoplankton blooms in San Francisco Bay [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(47): 18561-18565.
- [ 6 ] HEDBERG P, OLSSON M, HÖGLANDER H, et al. Climate change effects on plankton recruitment from coastal sediments [J]. *Journal of Plankton Research*, 2024, 46(2): 117-125.
- [ 7 ] DORY F, NAVA V, SPREAFICO M, et al. Interaction between temperature and nutrients: how does the phytoplankton community cope with climate change? [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167566.
- [ 8 ] HOU T Y, LU S C, SHAO J, et al. Assessment of planktonic community diversity and stability in lakes and reservoirs based on eDNA metabarcoding: a case study of Minghu National Wetland Park, China [J]. *Environmental Research*, 2025, 271: 121025.
- [ 9 ] FU S K, ZHAO L, QIAO Z, et al. Development of ecosystem health assessment (EHA) and application method: a review [J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 11838.
- [ 10 ] LOSCHI M, D'ALELIO D, CAMATTI E, et al. Planktonic ecological networks support quantification of changes in ecosystem health and functioning [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 16683.
- [ 11 ] 杨鸿雁, 杨劭, 刘毅, 等. 云贵高原富营养化湖泊杞麓湖浮游生物群落季节性演替及其驱动因子分析 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(4): 876-884.
- YANG H Y, YANG S, LIU Y, et al. Seasonal succession of plankton community and driving factors in hypereutrophic Qilu Lake (Yunnan-Guizhou Plateau) [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(4): 876-884.
- [ 12 ] YU W W, ZHANG D, LIAO J J, et al. Linking ecosystem services to a coastal bay ecosystem health assessment: a comparative case study between Jiaozhou Bay and Daya Bay, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108530.
- [ 13 ] 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 等. 嘉兴南湖不同湖区浮游动植物群落结构特征与环境因子关系 [J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 3106-3117.
- WANG Y W, LI Y H, ZHANG B, et al. Structural characteristics of zooplankton and phytoplankton communities and its relationship with environmental factors in different regions of Nanhu Lake in Jiaxing City [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6): 3106-3117.
- [ 14 ] 陈莎, 谢青, 付梅, 等. 三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2303-2312.
- CHEN S, XIE Q, FU M, et al. Structural characteristics of zooplankton and phytoplankton communities and its relationship with environmental factors in a typical tributary reservoir in the Three Gorges Reservoir Region [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2303-2312.
- [ 15 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378—2007: 海洋监测规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [ 16 ] BISINICU E, HARCOTA G E. Baseline assessment of black sea food web integrity using a zooplankton-based approach under the marine strategy framework directive [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, 13(4): 713.
- [ 17 ] LI Z X, MA C, SUN Y N, et al. Ecological health evaluation of rivers based on phytoplankton biological integrity index and water quality index on the impact of anthropogenic pollution: a case of Ashi River Basin [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 942205.
- [ 18 ] CHOI Y, OH H J, LEE D H, et al. Current utilization and further application of zooplankton indices for ecosystem health assessment of lake ecosystems [J]. *Sustainability*, 2023, 15(14): 10950.
- [ 19 ] HARTWICK M A, BERENSON A, WHISTLER C A, et al. The seasonal microbial ecology of plankton and plankton-associated *Vibrio parahaemolyticus* in the northeast United States [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2021, 87(15): e0297320.
- [ 20 ] 高爽, 遆超普, 汤水荣, 等. 长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应 [J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 4853-4862.
- GAO S, TI C P, TANG S R, et al. Runoff simulation and its response to extreme precipitation in the Yangtze River Basin [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 4853-4862.
- [ 21 ] 吕含雪, 刘丹丹, 李春华, 等. 基于着生藻类的河流水生态系统健康评价: 以黑龙江为例 [J]. *环境工程技术学报*, 2025. doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20250121.
- LV H X, LIU D D, LI C H, et al. Health assessment of river water ecosystem based on periphytic algae: taking Heilongjiang River as an example [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025. doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20250121.
- [ 22 ] TANG H S, WANG L, WANG Y. Spatial and temporal variation characteristics of vegetation cover in the Tarim River Basin, China, and analysis of the driving factors [J]. *Sustainability*, 2025, 17(4): 1414.

- [23] 赵兴赞,张强,杨方社,等.基于 XGBoost-SHAP 方法的陕西省 PM<sub>2.5</sub> 影响因素分析 [J].环境科学研究,2025,38(5):990-999.  
ZHAO X Y,ZHANG Q,YANG F S,et al.Analysis of influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in Shaanxi Province based on XGBoost-SHAP method[J].Research of Environmental Sciences,2025,38(5):990-999.
- [24] de VARGAS C,Le BESCOT N,POLLINA T,et al.Plankton planet: a frugal,cooperative measure of aquatic life at the planetary scale [J].*Frontiers in Marine Science*,2022,9:936972.
- [25] SHANNON C E.A mathematical theory of communication[J].*The Bell System Technical Journal*,1948,27(3):379-423.
- [26] PIELOU E C.Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J].*Journal of Theoretical Biology*,1966, 10(2):370-383.
- [27] LI S Y,XIA X L,TAN X,et al.Effects of catchment and riparian landscape setting on water chemistry and seasonal evolution of water quality in the upper Han River basin,China[J].*PLoS One*, 2013,8(1):e53163.
- [28] ITODO A U,UBIMAGO M,WUANA R A.Environmental impact of abandoned asphalt production site on soil,water and vegetables from near farmlands[J].*Journal of Geoscience and Environment Protection*,2018,6(4):107-122.
- [29] 郭旭东,王雨春,曾艳,等.长江干流南京段浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J].环境科学研究,2025,38(7):1418-1429.  
GUO X D,WANG Y C,ZENG Y,et al.Plankton community structure characteristics and relationship with environmental factors in the Nanjing section of the mainstream Yangtze River[J]. Research of Environmental Sciences,2025,38(7):1418-1429.
- [30] SUN T,XU J,YANG Z F.Environmental flow assessments in estuaries based on an integrated multi-objective method[J].*Hydrology and Earth System Sciences*,2013,17(2):751-760.
- [31] LIU X H,ZHANG M L,WANG Z L,et al.Assessment of bivalve carrying capacities and seeding densities in aquaculture areas of Jiaozhou Bay,China,using ecological modeling and the food balance[J].*Journal of the World Aquaculture Society*,2021,52(6): 1178-1193.
- [32] OSTLE C,PAXMAN K,GRAVES C A,et al.The plankton lifeform extraction tool:a digital tool to increase the discoverability and usability of plankton time-series data[J].*Earth System Science Data*,2021,13(12):5617-5642.
- [33] DINER R E,KAUL D,RABINES A,et al.Pathogenic *Vibrio* species are associated with distinct environmental niches and planktonic taxa in southern California (USA) aquatic microbiomes [J].*mSystems*,2021,6(4):e0057121.
- [34] 王松波,余俊爽,曹艳敏,等.光照和营养盐对浮游动物和浮游植物生物量及其营养联系的影响 [J].生态环境学报,2018,27(6): 1122-1127.  
WANG S B,YU J S,CAO Y M,et al.Light and nutrients as determinants of zooplankton and phytoplankton biomass and their impacts on pelagic trophic linkage[J].*Ecology and Environmental Sciences*,2018,27(6):1122-1127.
- [35] 赵卫红,王江涛,李金涛,等.长江口及邻近海域冬夏季浮游植物营养限制及其比较 [J].海洋学报,2006,28(3):119-126.  
ZHAO W H,WANG J T,LI J T,et al.Contrast of nutrient limiting phytoplankton growth in the Changjiang River Estuary and the adjacent areas between summer and winter[J].*Acta Oceanologica Sinica*,2006,28(3):119-126.
- [36] 周淑青,沈志良,李峥,等.长江口最大浑浊带及邻近水域营养盐的分布特征 [J].海洋科学,2007,31(6):34-42.  
ZHOU S Q,SHEN Z L,LI Z,et al.Distribution features of nutrients in the maximum turbid zone of the Changjiang estuary and its adjacent sea areas[J].*Marine Sciences*,2007,31(6):34-42.
- [37] 杨进腊,温雯雯,胡潇芮,等.云南九大高原湖泊 2013—2022 年水质变化趋势及其成因分析 [J].环境科学研究,2025,38(6):1300-1311.  
YANG J L,WEN W W,HU X R,et al.Spatiotemporal variations and driving mechanisms of water quality in nine plateau lakes of Yunnan from 2013 to 2022[J].Research of Environmental Sciences,2025,38(6):1300-1311.
- [38] 陶玉林,邵帅,李茂生,等.长江口及其毗邻海域真菌群落时空特征 [J].海洋与湖沼,2024,55(4):905-915.  
TAO Y L,SHAO S,LI M S,et al.Spatio-temporal characteristics of fungal communities in the Changjiang River Estuary and its adjacent sea area[J].*Oceanologia et Limnologia Sinica*,2024, 55(4):905-915.
- [39] 张军涛,韩祁祺.黄河流域农业碳排放时空演变特征及影响因素研究 [J].环境科学研究,2025,38(4):754-766.  
ZHANG J T,HAN Q Q.Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in the Yellow River Basin[J].Research of Environmental Sciences,2025, 38(4):754-766.
- [40] 梁翠,钱薇薇,沈志良.近十几年间长江口春季无机氮和磷含量分布变化特征及影响因素分析 [J].中国海洋大学学报(自然科学版),2016,46(3):82-90.  
LIANG C,XIAN W W,SHEN Z L.Analysis of trends and influencing factors of nitrogen and phosphate in the Yangtze River Estuary in spring over the last few years[J].*Periodical of Ocean University of China*,2016,46(3):82-90.

(责任编辑:张蕊)