

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20241024001 CSTR: 32062.14.AJE.1673-5897.20241024001

韩丽君, 魏君, 刘西汉, 等. 2021—2022年夏季滦河口—北戴河海域浮游植物群落结构及年际变化研究[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(2): 189-203.
HAN L J, WEI J, LIU X H, et al. Phytoplankton community and annual variations in the Luanhe-Beidaihe coastal waters in the summers of 2021–2022 [J]. Asian journal of ecotoxicology, 2025, 20(2): 189-203.

2021—2022年夏季滦河口—北戴河海域浮游植物群落结构及年际变化研究

韩丽君¹, 魏君¹, 刘西汉^{2,3,4,*}, 赵怡聪¹, 郑灵巧¹, 程林^{2,3}, 高翔^{2,3}, 李磊⁵, 王毅波^{4,6}

1. 河北省生态环境监测中心, 石家庄 050030
2. 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050011
3. 河北省地理信息开发应用技术创新中心, 石家庄 050011
4. 河北省海洋动力过程与资源环境重点实验室, 秦皇岛 066004
5. 石家庄学院, 石家庄 050035
6. 河北科技师范学院海洋科学研究中心, 秦皇岛 066004

收稿日期: 2024-10-24 录用日期: 2024-12-15

摘要: 滦河口—北戴河海域具有重要的海洋生态系统保护价值和经济社会发展服务功能, 近年来面临较大赤潮灾害风险。浮游植物是引发赤潮的主要生物类群, 阐明浮游植物群落空间、年际变化及环境驱动关系, 对认识赤潮发生机制, 防范生态风险具有重要意义。本研究围绕滦河口—北戴河海域于2021年和2022年夏季开展2个航次调查环境因子和网采浮游植物群落。结果表明, 共鉴定得到浮游植物3门37属87种, 以硅藻为主, 甲藻和金藻较少。2021年浮游植物平均丰度($1.671.16 \times 10^4$ cells·m⁻³)较2022年($1.47.81 \times 10^4$ cells·m⁻³)高一个数量级, 但Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数平均值(分别为2.35和0.55)均低于2022年(分别为2.73和0.64)。2021年优势种主要为旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)等, 2022年主要为距端假管藻(*Pseudosolenia calcar-avis*)、大洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)等。聚类分析表明, 2次调查浮游植物群落均大致以39.55°N~39.65°N为界分为北侧、南侧海域。Spearman相关性和冗余分析表明, 氮磷比、悬浮颗粒物和扇贝滤食是影响2021年浮游植物群落空间变化的关键因子, 2022年则为盐度、磷酸盐。浮游植物丰度基本为波动年际变化, 降雨、入海水量、种间竞争等是其年际变化的主要影响因素。浮游植物优势种基本为广温广盐物种, 2013年后中肋骨条藻多次成为主要优势种, 可能与降雨量和入海水量增加以及氮磷比降低有关, 2022年距端假管藻、大洋角管藻等暖水种成为主要优势种, 与当年夏季出现海洋热浪有关。滦河口—北戴河海域赤潮监测工作宜重点关注降水、营养盐浓度及比例的影响。

关键词: 滦河口—北戴河; 浮游植物; 空间变化; 年际变化; 环境因子

文章编号: 1673-5897(2025)2-189-15 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Phytoplankton Community and Annual Variations in the Luanhe-Beidaihe Coastal Waters in the Summers of 2021–2022

HAN Lijun¹, WEI Jun¹, LIU Xihan^{2,3,4,*}, ZHAO Yicong¹, ZHENG Lingqiao¹, CHENG Lin^{2,3},

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22373301D, 23373301D); 河北省重大科技支撑计划项目(242S3301Z); 河北省科学院重点学科提升工程项目(23A15, 24A15); 河北省海洋动力过程与资源环境重点实验室开放基金项目(HBHY04)

第一作者: 韩丽君(1986—), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为海洋环境监测, E-mail: hanlijun.0527@163.com

* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: xihanigs@petalmail.com

GAO Xiang^{2,3}, LI Lei⁵, WANG Yibo^{4,6}

1. Hebei Province Ecology and Environmental Monitoring Center, Shijiazhuang 050030, China

2. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China

3. Hebei Technology Innovation Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050011, China

4. Hebei Key Laboratory of Ocean Dynamics, Resources and Environments, Qinhuangdao 066004, China

5. Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China

6. Research Center for Marine Science, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066004, China

Received 24 October 2024 accepted 15 December 2024

Abstract: The Luanhe-Beidaihe coastal waters are of significant importance for marine ecosystem protection and economic-social development. Nevertheless, in recent years, they have been imperiled by the recurrent occurrence of red tides. Phytoplankton, being a major inducer of red tides, understanding the spatial and annual dynamics of its community and the driving environmental forces is essential for deciphering red tide mechanisms and averting ecological disasters. In this study, two surveys were conducted in the summers of 2021 and 2022 to gather environmental and net-phytoplankton data. A total of 87 phytoplankton species from 3 phyla and 37 genera were identified, predominantly diatoms, with relatively fewer dinoflagellates and chrysophytes. The average abundance of phytoplankton in 2021 ($1\ 671.16 \times 10^4$ cells \cdot m⁻³) was an order of magnitude higher than in 2022 (147.81×10^4 cells \cdot m⁻³), while the Shannon-Wiener diversity and Pielou evenness indices were lower in 2021 (2.35 and 0.55, respectively) than in 2022 (2.73 and 0.64, respectively). In 2021, *Chaetoceros curvisetus* and *Skeletonema costatum* were the dominant species, and in 2022, *Pseudosolenia calcar-avis* and *Cerataulina pelagica* took the lead. Cluster analysis showed similar patterns in both years, with the northern and southern areas clustering separately around 39.55° N ~ 39.65° N. Spearman correlation and redundancy analysis indicated that in 2021, nitrogen-to-phosphorus ratio (N/P), suspended particulate matter, and scallop filtering were key spatial influencers, and in 2022, salinity and dissolved inorganic phosphorus played principal roles. The annual phytoplankton abundance fluctuated, largely related to precipitation, river discharge, and interspecific competition, among others. The dominant species were mainly eurythermal and euryhaline. Since 2013, *S. costatum*'s repeated dominance may stem from increased precipitation, river discharge, and a lower N/P. The prevalence of warm water species like *P. calcar-avis* and *C. pelagica* in 2022 might be due to the summer marine heatwave. For red tide monitoring in the Luanhe-Beidaihe coastal waters, more focus should be on precipitation, nutrient levels, and their ratios.

Keywords: Luanhe-Beidaihe; phytoplankton; spatial variation; annual variation; environmental factors

0 引言

浮游植物作为海洋生态系统中最重要初级生产者^[1], 可被桡足类、双壳类等生物摄食, 支撑物质和能量向高营养级流动, 为维持海洋生态系统功能和稳定发挥了关键作用^[2]。浮游植物通常具备较强的环境敏感性, 其群落结构可因高温、水体污染等自然或人为因素出现显著变化^[3], 可作为指示生物评估海洋生态系统健康, 分析气候变化、人类活动的生态效应^[3-4]。在富营养等条件下, 浮游植物还可能过度增殖引发赤潮灾害, 导致沿海旅游、养殖等产业遭受经济损失, 因此对防范海洋生态风险、保障沿海地区发展也具有重要意义^[4-5]。

滦河口—北戴河海域位于渤海西岸, 具备重要

的海岸海洋生态系统和生物多样性保护价值, 南侧七里海附近设有昌黎黄金海岸国家级自然保护区, 是国家二级保护动物白氏文昌鱼青岛亚种 (*Branchiostoma belcheri tsingtauense*) 的重要栖息地^[6]。该区域也是秦皇岛重要的经济社会发展空间, 北戴河是国际知名滨海旅游地, 洋河口以南至滦河口附近海域是我国最大的海湾扇贝 (*Argopecten irradians*) 养殖区之一^[7]。近年来, 滦河口—北戴河海域赤潮频发, 2009—2015年曾连续7年出现大面积抑食金球藻 (*Aureococcus anophagefferens*) 褐潮^[5]。2022年秦皇岛海域出现10次赤潮, 其中7次涉及北戴河附近及以南海域^[8]。此外, 低氧、海洋热浪在近年来也广受关注。秦皇岛外侧海域是渤海2个季节性底层低

氧区之一,底层水体溶解氧最低浓度接近 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与浮游植物生产活动存在密切联系^[9]。渤海范围海洋热浪发生频次较低,但强度较高^[10],目前其对浮游植物群落产生何种影响尚了解较少。值得注意的是,赤潮、低氧和海洋热浪均存在显著年际、季节变化,夏季往往是高发或危害较为严重的时期^[9-13]。因此,为保护滦河口—北戴河海域生态系统健康,保障沿海经济社会发展,有必要聚焦夏季研究浮游植物群落结构及年际变化,进一步认识赤潮等生态风险的发生机制及影响。

本研究利用滦河口—北戴河海域2021年8月、2022年8月2次调查资料,分析浮游植物群落结构、空间变化及其与环境因子的关系,结合同海域历史调查资料,分析浮游植物群落年际变化规律,有助于进一步认识该海域浮游植物群落时空变化规律及环境影响因素,为保护该海域生态系统健康,防范海洋生态风险提供科学依据。

1 材料与方法

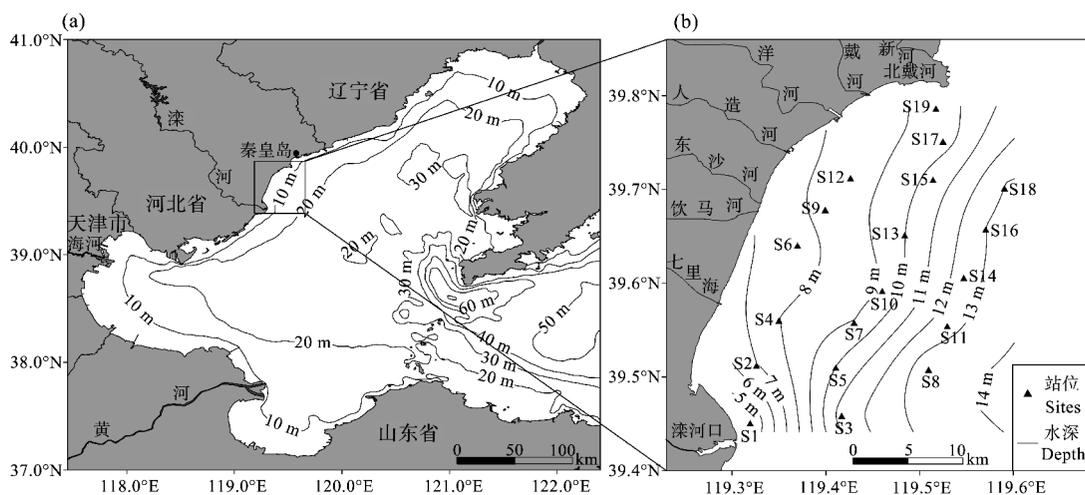
1.1 研究海域概况

滦河口—北戴河海域($119.30^{\circ}\text{E} \sim 119.60^{\circ}\text{E}$, $38.43^{\circ}\text{N} \sim 39.78^{\circ}\text{N}$)位于渤海西岸,毗邻秦皇岛北戴河新区,平均水深约10 m,总面积接近900 km^2 ,自北向南分布着戴河、洋河、饮马河、滦河等中小型河流。该海域属温带大陆性季风气候,多年平均降水为642.3 mm,其中夏季降水量占全年的61.4%^[14]。

8月海水温度达到全年最高值(26.8°C),盐度达到最低值(29.8 psu)^[15]。近岸潮流以东北—西南方向的往复流为主,夏季余流流速为 $0.5 \sim 1.9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[16]。本研究围绕滦河口—北戴河海域分别于2021年和2022年夏季(8月)开展航次,每个航次均布设19个站位(图1)。

1.2 样品采集与处理

样品采集与处理过程主要参照《海洋监测规范第4部分:海水分析》^[17]和《海洋监测规范第7部分:近海污染生态调查与生物监测》^[18]。海水环境因子共8项,包括水温(temperature, T)、盐度(salinity, S)、酸碱度(potential of hydrogen, pH)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、悬浮颗粒物(suspended particle matter, SPM)、溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)和溶解磷酸盐(dissolved inorganic phosphorus, DIP)。氮磷比(N/P)为DIN与DIP物质的量的比。浮游植物样品采用浅水Ⅲ型浮游生物网从海底至海面垂直拖取采集,现场按5%比例加入甲醛进行固定,返回实验室将样品静置24 h,浓缩至适当体积后取0.1 mL亚样品于计数框中,在Olympus CX31型显微镜下参考《海藻学》^[19]、《中国海域常见浮游硅藻图谱》^[20]和《中国近海赤潮生物图谱》^[21]进行物种鉴定和计数。叶绿素a(chlorophyll a, Chl-a)采用分光光度法测定。



注:基于审图号为GS(2016)2556和冀S(2020)030的标准地图制作,底图无修改,下同。

Note: This map was based on the standard map with the drawing review No.GS(2016)2556 and Hebei No. S(2020)030, and the base map had not been modified; the same below.

图1 研究区域水深及采样站位

Fig. 1 Sampling sites and bathymetry of study area

1.3 数据处理与分析

参照魏君等^[22]采用优势度指数(Y)判别优势种($Y>0.02$),采用香农-威纳指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)分析浮游植物群落多样性,其公式为:

$$Y = n_i \cdot f_i / N \quad (1)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N}\right) \times \log_2\left(\frac{n_i}{N}\right) \quad (2)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (3)$$

式中: N 为调查海域浮游植物的总丰度, S 为总种类数, n_i 为第*i*种的丰度, f_i 为该物种在站位中的出现频率。

在 SPSS 25 中采用 Shapiro-Wilk 方法检验环境因子和浮游植物参数的正态性,采用 Levene 方法检验方差齐性。所有环境因子均不符合正态分布或方差齐性,因此采用 Kruskal-Wallis 非参数方法检验环境因子在 2 次调查之间差异显著性。浮游植物参数多不符合正态分布,同时由于养殖活动(扇贝养殖区内、外分别定义为“1”“0”)为分类参数,因此采用 Spearman 方法分析浮游植物与环境因子之间相关性。浮游植物丰度年际变化与环境因子的相关性分析采用了 Pearson 方法。采用排序分析研究浮游植物群落与环境因子的关系,首先筛选优势度排名前 10 的物种,将环境因子和筛选后的浮游植物群落分别进行标准化和 Hellinger 转化,去趋势分析结果表明排序轴梯度均小于 3,表明适合采用冗余分析(redundancy analysis, RDA),按照方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)大于 10 的原则去除存在共线性的环境因子,采用前向选择筛选通过蒙特卡洛置换检验($P<0.05$)的环境因子,最终进行 RDA 分析。采用聚类分析研究浮游植物群落空间格局,利用全部物种数据按照欧氏距离方法进行聚类,采用置换多因素方差分析(permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA)对不同聚类进行显著检验,采用相似性百分比分析(similarity percentage, SIMPER)计算不同物种对差异的贡献度。以上分析均在 R 软件中采用 Vegan 包^[23]进行。

2 结果

2.1 环境因子概况

如图 2 所示,2 次调查海水温度、盐度、pH、SPM、DIN 和 DIP 具有显著差异($P<0.01$)。2021 年海水温度(25.2 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$ 显著低于 2022 年(26.4 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$,其盐度(30.08 ± 0.21)显著高于 2022 年(28.66 ± 0.64)。2022 年调查期间盐度较低与 2022 年 8 月降

水(320.1 mm)^[24]相比 2021 年同期(190.2 mm)^[24]多 68% 有关。2021 年夏季 pH(8.18 ± 0.04)、SPM(14.3 ± 1.7) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、DIN(3.32 ± 3.40) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 DIP(0.01 ± 0.01) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 均显著低于 2022 年夏季(pH: 8.25 ± 0.05 ; SPM: $(35.0\pm 7.9)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DIN: $(6.60\pm 2.86)\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; DIP: $(0.06\pm 0.02)\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)。2 次调查 N/P 具有显著差异($P<0.05$),2021 年($1\ 024\pm 1\ 245$)高于 2022 年(115 ± 60)。2 次调查 DO 和 COD 未呈现显著差异($P>0.05$)。

2.2 浮游植物群落结构特征

2.2.1 种类组成

2 次调查共鉴定得到浮游植物 3 门 37 属 87 种,其中硅藻门 29 属 71 种,是浮游植物群落主要类群,其次为甲藻门和金藻门,分别为 7 属 15 种和 1 属 1 种。2021 年和 2022 年浮游植物群落较为相似,均以硅藻为主,但总物种数存在较大差异,分别鉴定得到 73 种和 47 种,主要是硅藻物种数差异较大,分别为 63 种和 36 种,甲藻和金藻物种数基本一致。

2.2.2 丰度

2021 年夏季,浮游植物平均丰度为($1\ 671.16\pm 1\ 471.22$) $\times 10^4\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$,高值区分布在北侧海域,见图 3(a),细胞丰度在 $3\ 000\times 10^4\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,滦河口北侧近岸海域细胞丰度也较高,在 $2\ 000\times 10^4\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右。硅藻丰度与浮游植物总丰度的空间分布规律较为相似,同样在北侧海域出现了较高丰度,见图 3(b)。甲藻丰度高值区出现在远岸局部海域,见图 3(c),丰度超过 $100\times 10^4\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$,另外也在北戴河附近海域存在较高丰度。

2022 年夏季,浮游植物平均丰度为(147.81 ± 94.01) $\times 10^4\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$,主要在七里海外侧海域出现了较高丰度,见图 3(d),与硅藻空间分布规律基本一致,见图 3(e)。甲藻则主要出现在近岸海域,七里海附近海域丰度达到 $100\times 10^4\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$,北戴河附近海域也出现了较多甲藻,见图 3(f)。

2.2.3 优势种

2021 年夏季,浮游植物优势种均为硅藻(表 1),包括旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、尖刺拟菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)和洛氏角毛藻(*C. lorenzianus*)共 4 种。旋链角毛藻是最主要优势种,优势度达到 0.547,主要分布在北戴河附近及滦河口北侧近岸海域,见图 4(a)。中肋骨条藻主要出现在北侧海域,见

图 4(b)。尖刺拟菱形藻在 S16 等少数远岸站位出现了较高丰度,见图 4(c)。

2022 年夏季,浮游植物优势种包括 4 种硅藻和 1 种甲藻,包括:距端假管藻(*Pseudosolenia calcar-avis*)、大洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)、尖刺拟菱形藻、柔弱拟菱形藻(*P. delicatissima*)和叉状角藻(*Ceratium furca*)。距端假管藻和大洋角管藻的空间分布较为相似,主要出现于七里海外侧海域,见图 4(d)和 4

(e)。叉状角藻主要出现在滦河口北侧以及北戴河近岸海域,见图 4(f)。

2.2.4 多样性

2021 年夏季,浮游植物群落 H' 的范围为 1.30 ~ 3.24,平均值为 2.35 ± 0.55 , J 的范围为 0.27 ~ 0.93,平均值为 0.55 ± 0.17 。空间上呈斑块分布特征,滦河口、东沙河口等附近海域多样性相对较高, H' 和 J 分别在 2.5 和 0.6 以上,见图 5(a)和 5(b)。

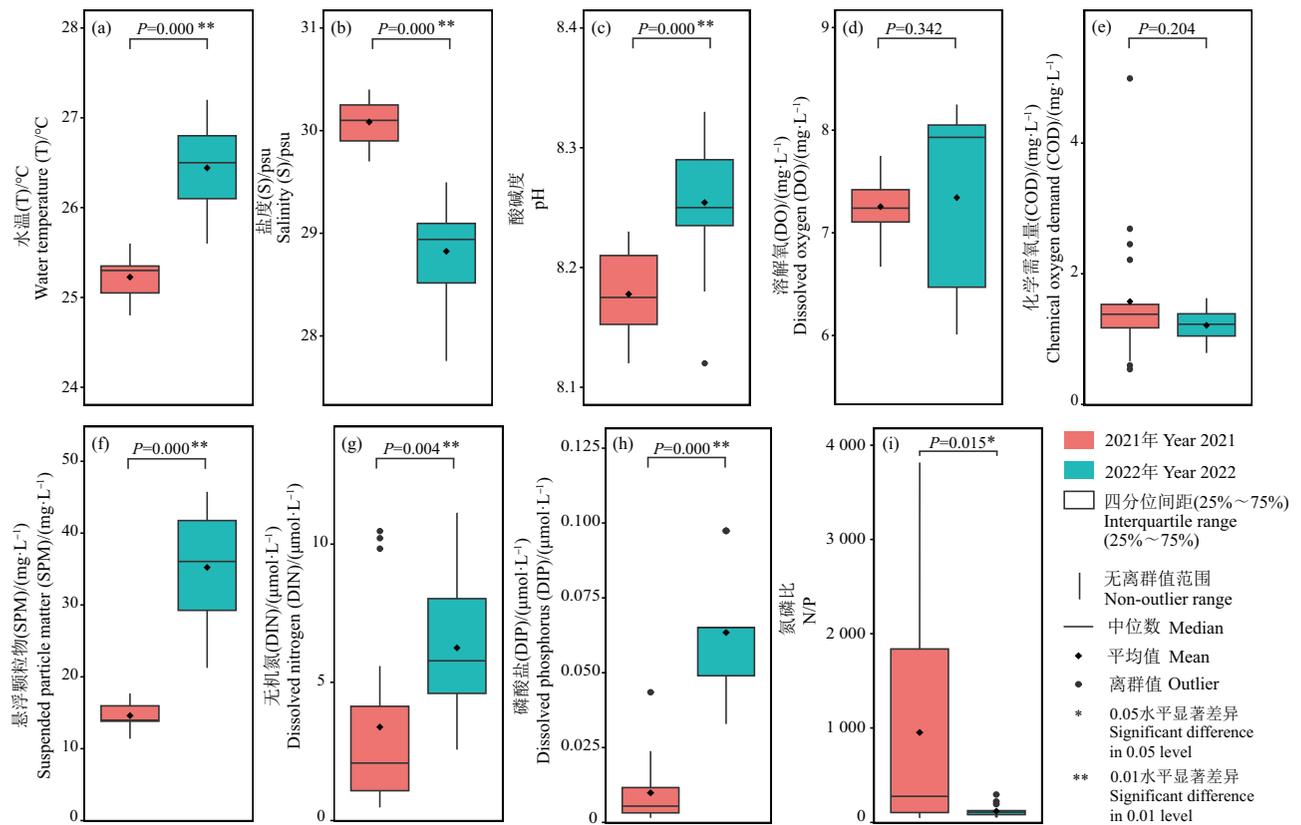


图 2 环境因子及差异显著检验

Fig. 2 Environmental factors and Kruskal-Wallis test

表 1 浮游植物优势种

Table 1 Dominant phytoplankton species

门 Phylum	优势种 Dominant species	优势度(Y) Dominance (Y)	
		2021	2022
硅藻门 Bacillariophyta	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	0.547	
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	0.111	
	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	0.064	0.026
	洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	0.058	
	距端假管藻 <i>Pseudosolenia calcar-avis</i>		0.106
	大洋角管藻 <i>Cerataulina pelagica</i>		0.085
	柔弱拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>		0.023
甲藻 Pyrrophyta	叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>		0.068

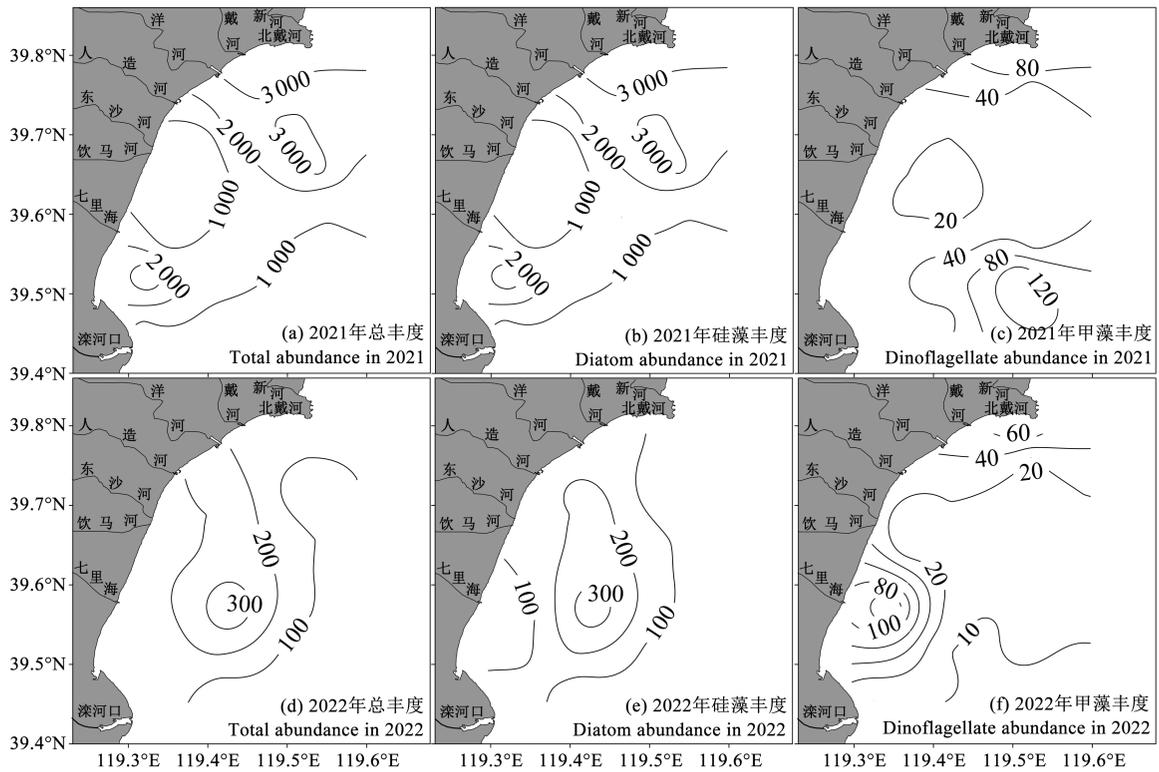


图3 浮游植物丰度 ($\times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of phytoplankton abundance ($\times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$)

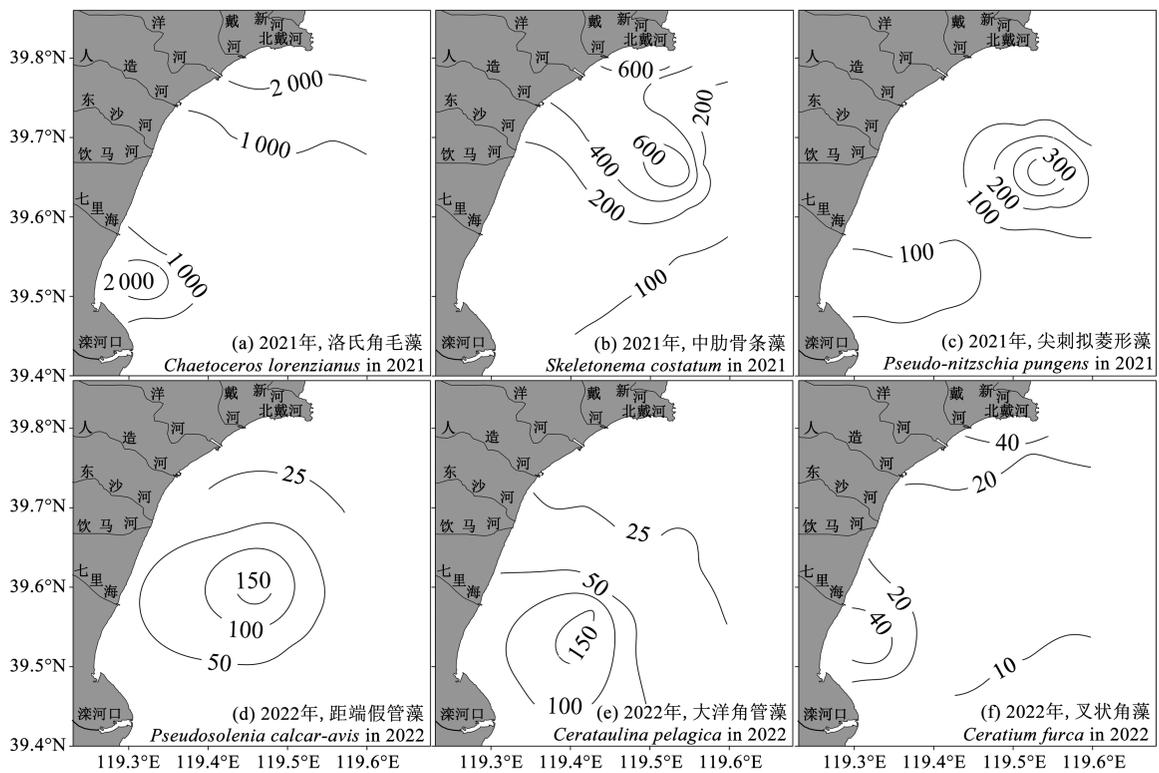


图4 浮游植物主要优势种丰度 ($\times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the abundance ($\times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$) of major phytoplankton dominant species

2022 年夏季,浮游植物群落 H' 范围为 1.40 ~ 4.15,平均值为 2.73 ± 0.82 , J 的范围为 0.38 ~ 0.87,平均值为 0.64 ± 0.15 ,均相对 2021 年较高。空间上呈南北两侧海域较高,中间海域较低的分布特征,见图 5(d)和 5(e),北侧海域 H' 和 J 达到 4.0 和 0.8,南侧海域 H' 和 J 分别为 2.5 和 0.6,而中间海域 H' 和 J 则可低于 2.0 和 0.5。

2.3 Chl-a

2021 年夏季,Chl-a 浓度范围为 $3.03 \sim 9.54 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $(5.80 \pm 2.13) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,北戴河南侧海域、七里海南侧近岸海域 Chl-a 浓度普遍较高,可达 $8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,东沙河—七里海东侧海域 Chl-a 浓度相对较低,基本为 $4 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,见图 5(c)。

2022 年夏季,Chl-a 浓度范围为 $0.70 \sim 5.80 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $(2.93 \pm 1.43) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,空间分布与 2021 年夏季大致相反,见图 5(f),七里海外侧部分海域 Chl-a 浓度较高,可达 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,七里海附近海域 Chl-a 浓度则较低,在 $2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,北戴河及其东南侧海域 Chl-a 浓度基本位于 $1 \sim 3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 相关分析

2021 年夏季,浮游植物群落与盐度、DO、SPM、

DIN、DIP、N/P 和养殖活动存在相关性,见图 6(a)。浮游植物总丰度、硅藻丰度与养殖活动显著负相关 ($P < 0.001$),与 DIP 显著正相关 ($P < 0.01$),另外与盐度、SPM 和 N/P 也具有显著相关性 ($P < 0.05$)。甲藻与金藻丰度分别与 SPM 正相关、负相关,均达到显著水平 ($P < 0.001$)。 H' 和 J 主要与盐度正相关 ($P < 0.05$ 或 0.01),与 SPM 负相关 ($P < 0.001$ 或 0.01)。硅甲藻比主要与 DIP、N/P 分别具有正相关、负相关关系,均达到显著水平 ($P < 0.001$),同时也与 DIN、养殖活动显著负相关 ($P < 0.01$)。Chl-a 主要与 DO 显著正相关 ($P < 0.001$),其次与扇贝养殖显著负相关 ($P < 0.01$),另外与 SPM、DIN 存在显著正相关关系 ($P < 0.05$)。

2022 年夏季,浮游植物群落与盐度、DO、COD、DIN 和 N/P 存在相关关系,见图 6(b)。浮游植物总丰度主要与 DIN 显著负相关 ($P < 0.01$),甲藻丰度与盐度显著负相关 ($P < 0.001$),硅藻和金藻丰度与环境因子相关性未达到显著水平 ($P > 0.05$)。 H' 和 J 主要与 DIN 显著正相关 ($P < 0.01$),与盐度、DO 和 N/P 存在一定相关关系 ($P < 0.05$)。硅甲藻比与盐度显著正相关 ($P < 0.05$)。Chl-a 主要与 DIN 显著负相关 ($P < 0.01$),也与 COD、N/P 分别呈正相关、负相关 ($P < 0.05$)。

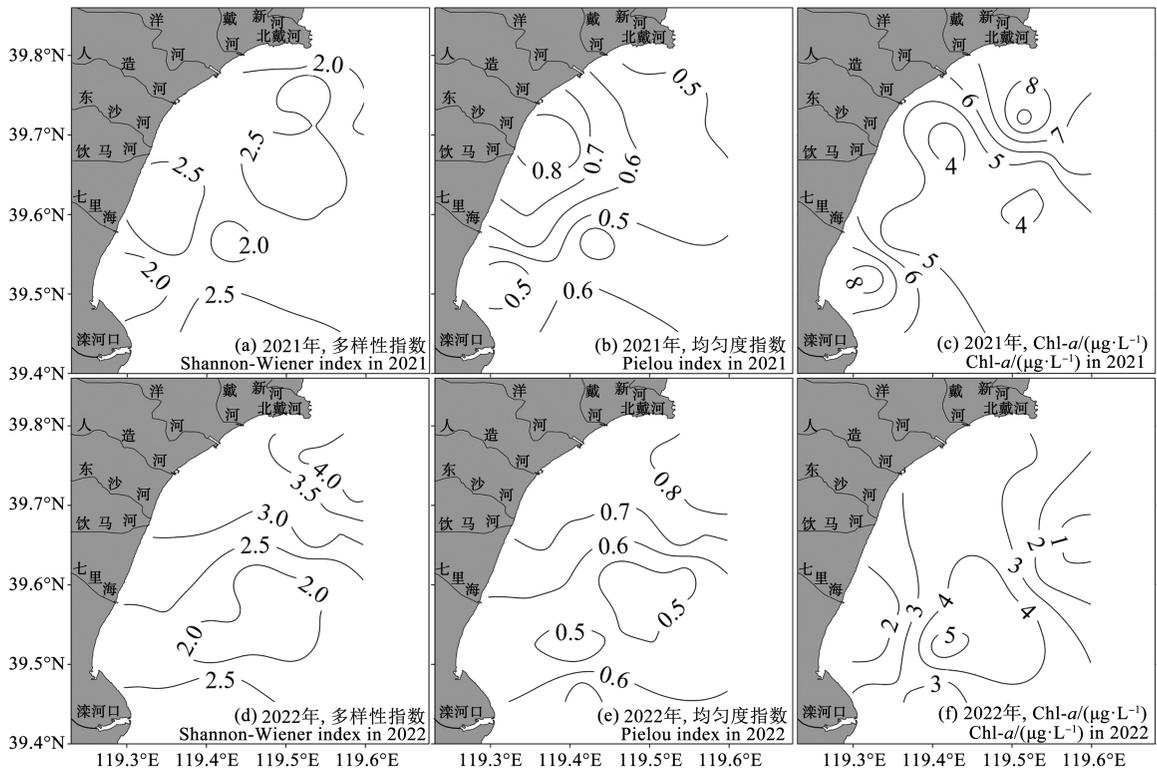


图 5 多样性指数和 Chl-a 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of diversity index and Chl-a

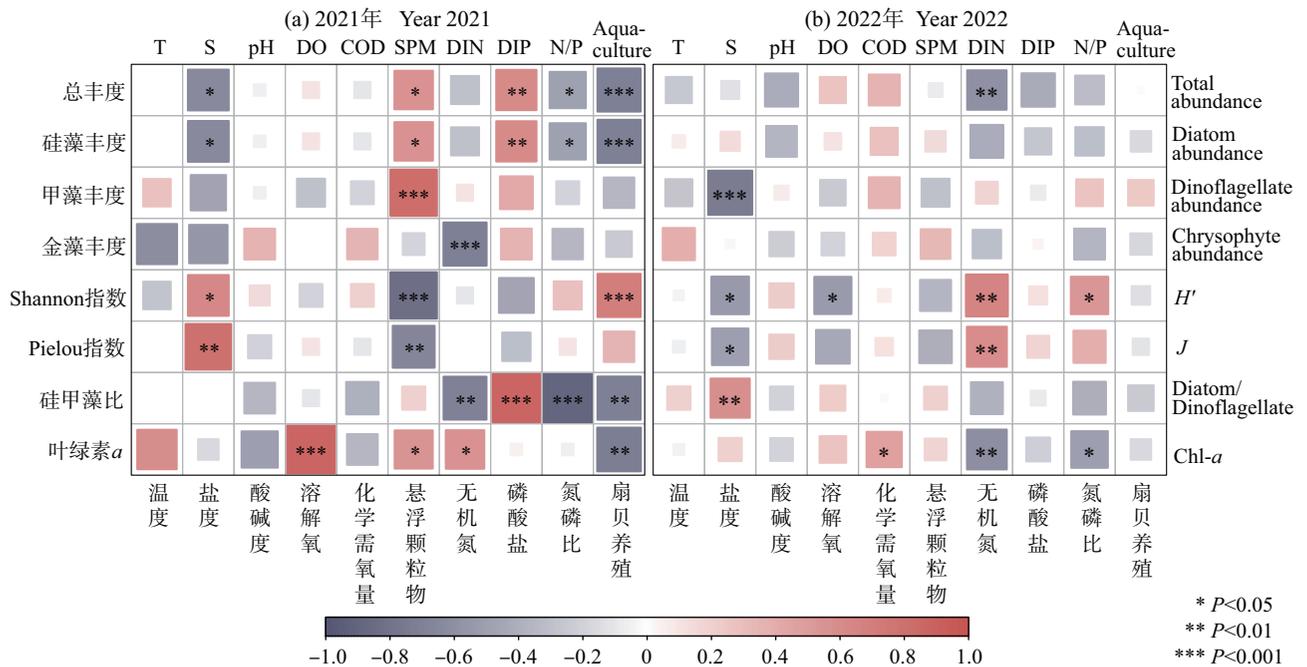


图6 浮游植物群落与环境因子的 Spearman 相关性分析

Fig. 6 Spearman correlation between phytoplankton community and environmental factors

2.5 聚类分析

2021年夏季,全部站位形成2个聚类,见图7(a)。聚类I包括10个站位,均位于39.55°N以北海域,聚类II包括9个站位,其中大部分站位(S1、S2、S3、S5、S7、S8和S11)位于39.55°N以南海域,仅S9和S19位于东沙河口或北戴河附近海域。如图7(b)所示,根据SIMPER分析,中肋骨条藻是聚类I和II游植物群落差异的主要贡献物种,其贡献率达到8.4%,洛氏角毛藻、旋链角毛藻的贡献率位于7%~8%之间,小细柱藻(*Leptocylindrus minimus*)、冕孢角毛藻(*Chaetoceros diadema*)等其他物种也对聚类I和II群落差异存在一定贡献。中肋骨条藻、洛氏角毛藻、小细柱藻等大部分物种均在聚类I中具有较高丰度,而旋链角毛藻、伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)、柔弱拟菱形藻和圆海链藻(*Thalassiosira rotula*)则主要出现在聚类II中。

2022年夏季,调查站位形成2个聚类,见图7(c)。聚类I包括10个站位,其中大部分站位(S9、S12、S15、S16、S17、S18和S19)均位于39.65°N以北海域,个别站位(S2、S4和S7)位于滦河口—七里海附近海域,聚类II包括9个站位,基本均位于39.65°N以南海域。如图7(d)所示,根据SIMPER分析,距端假管藻对聚类I和II浮游植物群落差异的贡献最大,达到9.2%,其次为大洋角管藻,贡献率为7.1%,

叉状甲藻、柔弱拟菱形藻等其他物种的差异贡献率在6%以下。叉状角藻、柔弱拟菱形藻、尖刺拟菱形藻、柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)和菱软几内亚藻(*Guinardia flaccida*)在聚类I中存在较高丰度,距端假管藻、大洋角管藻等其他物种在聚类II中存在较高丰度。

2.6 RDA分析

2021年夏季,VIF小于10且通过蒙特卡洛置换检验($P < 0.05$)的环境因子为N/P和SPM,见图8(a)。RDA第一排序轴解释了17.67%,第二排序轴解释了12.12%,总解释率达到29.79%,可以较好解释浮游植物群落差异($P < 0.01$)。N/P对浮游植物群落变化的影响较大,主要与旋链角毛藻、柔弱拟菱形藻正相关,与中肋骨条藻、小细柱藻等其他大部分物种负相关。SPM主要与旋链角毛藻、浮动弯角藻(*Eucampia zodiacus*)正相关,与尖刺拟菱形藻、柔弱拟菱形藻负相关。

2022年夏季,VIF小于10且通过蒙特卡洛置换检验($P < 0.05$)的环境因子为S和DIP,见图8(b)。RDA第一排序轴解释了20.47%,第二排序轴解释了9.03%,总解释率达到29.50%,对浮游植物群落差异的解释程度较好($P < 0.05$)。盐度是影响浮游植物群落变化的重要环境因子,主要与距端假管藻、大洋角管藻等正相关,与尖刺拟菱形藻、柔弱拟菱形藻

负相关。DIP 主要与距端假管藻、柔弱角毛藻正相关,与大洋角管藻、印度鼻状藻(*Proboscia indica*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、叉状角藻等负相关。

2.7 浮游植物群落年际变化

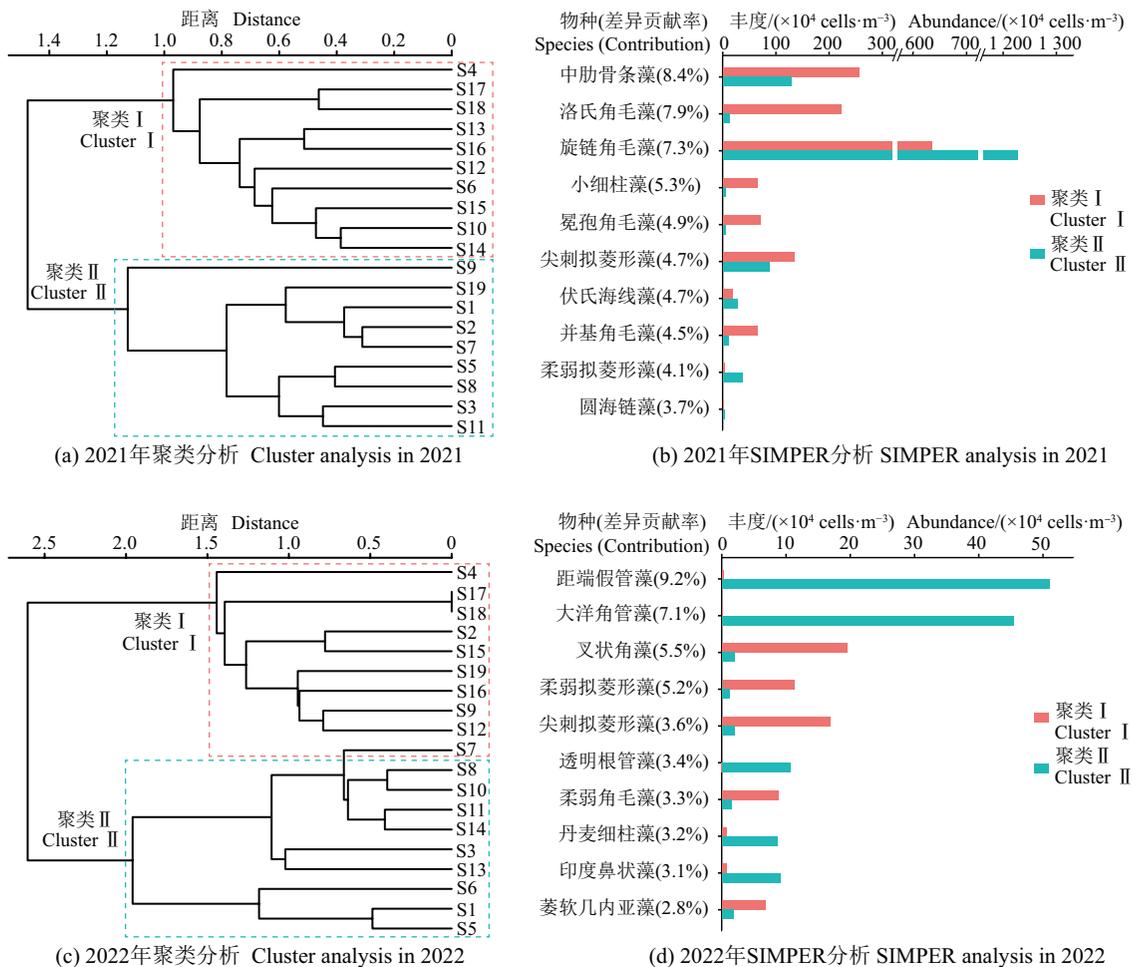
滦河口—北戴河海域浮游植物群落历史调查资料中有部分研究仅覆盖饮马河以南海域。相关性分析表明滦河口—北戴河海域浮游植物丰度与饮马河以南海域浮游植物丰度具有显著相关性($r=0.977$, $P=0.000$),表明可以一并分析浮游植物丰度年际变化,见图 9(c)。2000 年以来,浮游植物丰度基本在 $(40.80 \sim 31\ 779.50) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内呈波动变化,2000—2002 年、2006—2008 年、2015—2018 年以及 2021 年是细胞丰度相对较高的时期,普遍在 $10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,最高丰度出现在 2018 年,其他年

份细胞丰度相对较低,基本在 $10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,最低丰度出现在 2009 年。浮游植物优势种基本为近岸常见广温广盐种类,其中旋链角毛藻、洛氏角毛藻、尖刺拟菱形藻和刚毛根管藻在近年来持续成为主要优势种,绕孢角毛藻、柔弱角毛藻等 9 个优势种类主要出现于 2011 年前,大洋角管藻、缢缩角毛藻等 6 个优势种主要出现于 2013 年后,中肋骨条藻出现频次尤其较高,见图 9(d)。

3 讨论

3.1 浮游植物群落空间分布与环境因子的关系

浮游植物空间分布与海水温度、盐度、营养盐浓度及比例、光照、摄食等多种因素有关^[2-4]。2021 年夏季,浮游植物群落空间变化主要受 SPM、N/P 和扇贝养殖活动影响,见图 6(a)、图 8(a)。浮游植物最适

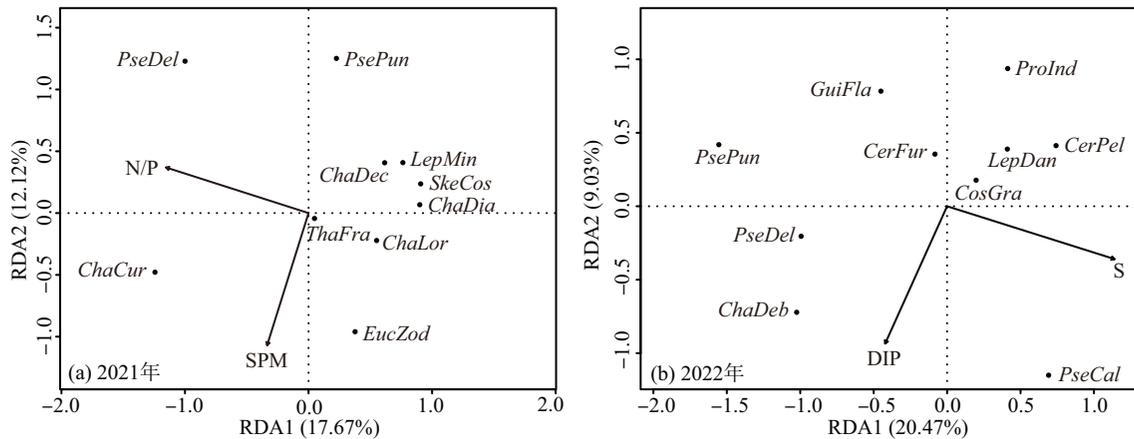


注:只显示对差异贡献率排名前 10 的物种。

Note: Only showing top 10 species contributing to differences.

图 7 浮游植物群落聚类和 SIMPER 分析

Fig. 7 Clustering and SIMPER analysis of phytoplankton community



注: *CerFur* 表示叉状角藻, *CerPel* 表示大西洋角管藻, *ChaCur* 表示旋链角毛藻, *ChaDeb* 表示柔弱角毛藻,

ChaDec 表示并基角毛藻, *ChaDia* 表示冕孢角毛藻, *ChaLor* 表示洛氏角毛藻, *CosGra* 表示格氏圆筛藻, *EucZod* 表示浮动弯角藻,

GuiFla 表示菱软几内亚藻, *LepDan* 表示丹麦细柱藻, *LepMin* 表示小细柱藻, *ProInd* 表示印度鼻状藻, *PseCal* 表示距端假管藻,

PseDel 表示柔弱拟菱形藻, *PsePun* 表示尖刺拟菱形藻, *SkeCos* 表示中肋骨条藻, *ThaFra* 表示伏氏海线藻。

Note: *CerFur* indicates *Ceratium furca*, *CerPel* indicates *Cerataulina pelagica*, *ChaCur* indicates *Chaetoceros curvisetus*, *ChaDeb* indicates

Chaetoceros debilis, *ChaDia* indicates *Chaetoceros diadema*, *ChaLor* indicates *Chaetoceros lorenzianus*, *CosGra* indicates *Coscinodiscus granii*,

EucZod indicates *Eucampia zodiacus*, *GuiFla* indicates *Guinardia flaccida*, *LepDan* indicates *Leptocylindrus danicus*, *LepMin* indicates

Leptocylindrus minimus, *ProInd* indicates *Proboscia indica*, *PseCal* indicates *Pseudosolenia calcar-avis*, *PseDel* indicates *Pseudo-nitzschia delicatissima*,

PsePun indicates *Pseudo-nitzschia pungens*, *SkeCos* indicates *Skeletonema costatum*, *ThaFra* indicates *Thalassionema frauenfeldii*.

图8 浮游植物与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 8 RDA ordination of phytoplankton community and environmental factors

N/P 基本在 8.2 ~ 45.0 范围内^[28]。刘东艳等^[29]对中肋骨条藻的培养实验表明其在 N/P 为 16 : 1 的水体中生长最好, N/P 超过 16 : 1 情况下越高, 细胞生长速率越慢。本次调查期间 N/P 处于 42 ~ 3 855 范围内(图 2), 导致中肋骨条藻等多数物种与 N/P 呈现负相关关系。柔弱拟菱形藻、尖刺拟菱形藻均属羽纹纲种类, 对 P 的需求相对中心纲种类较低^[30-31], 因此与 N/P 正相关或无相关关系。SPM 包括悬浮于水体中的泥沙、无机物絮凝体等无机颗粒以及浮游植物、有机碎屑物、有机胶体等有机颗粒^[32]。WANG 等^[33]基于实测和遥感数据的研究表明秦皇岛海域浮游植物对总 SPM 贡献较大, 叶绿素与 SPM 的年际变化具有较强相关性。2021 年夏季 SPM 平均浓度 ($14.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 相对 2020 年夏季 ($27.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[22] 和 2022 年夏季 ($34.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 图 2) SPM 平均浓度低 50% 左右, 但浮游植物平均丰度 ($1.671.16 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$) 却分别高 4.39 倍 (2020 年: $309.94 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$)^[22] 和 10.31 倍 (2022 年: $147.81 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$), Chl-a 平均浓度 ($5.80 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 分别高 0.93 倍 (2020 年: $3.00 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)^[22] 和 0.98 倍 (2022 年: $2.93 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 表明 2021 年夏季总 SPM 可能主要由浮游植物构成, 无机颗粒占比较低。旋链角毛藻在浮游植物群

落中占据绝对优势地位(表 1), 因此与 SPM 具有正相关关系。此外, 扇贝滤食对浮游植物丰度的下行控制作用也不可忽视。扇贝养殖活动主要分布在 39.7°N 以南海域^[7], 因此浮游植物丰度与扇贝养殖活动显著负相关, 见图 6(a)。中肋骨条藻、洛氏角毛藻等多个物种丰度均呈现南侧海域较低、北侧海域较高的空间变化规律(图 7), 北戴河附近海域成为浮游植物丰度高值区, 见图 3(a)。旋链角毛藻除了在北戴河附近海域存在高值区外, 还在滦河口北侧 S2 站位存在较高丰度, 见图 4(a), 可能与该处海域高浓度 DIN ($10.15 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 图 2) 刺激有关。

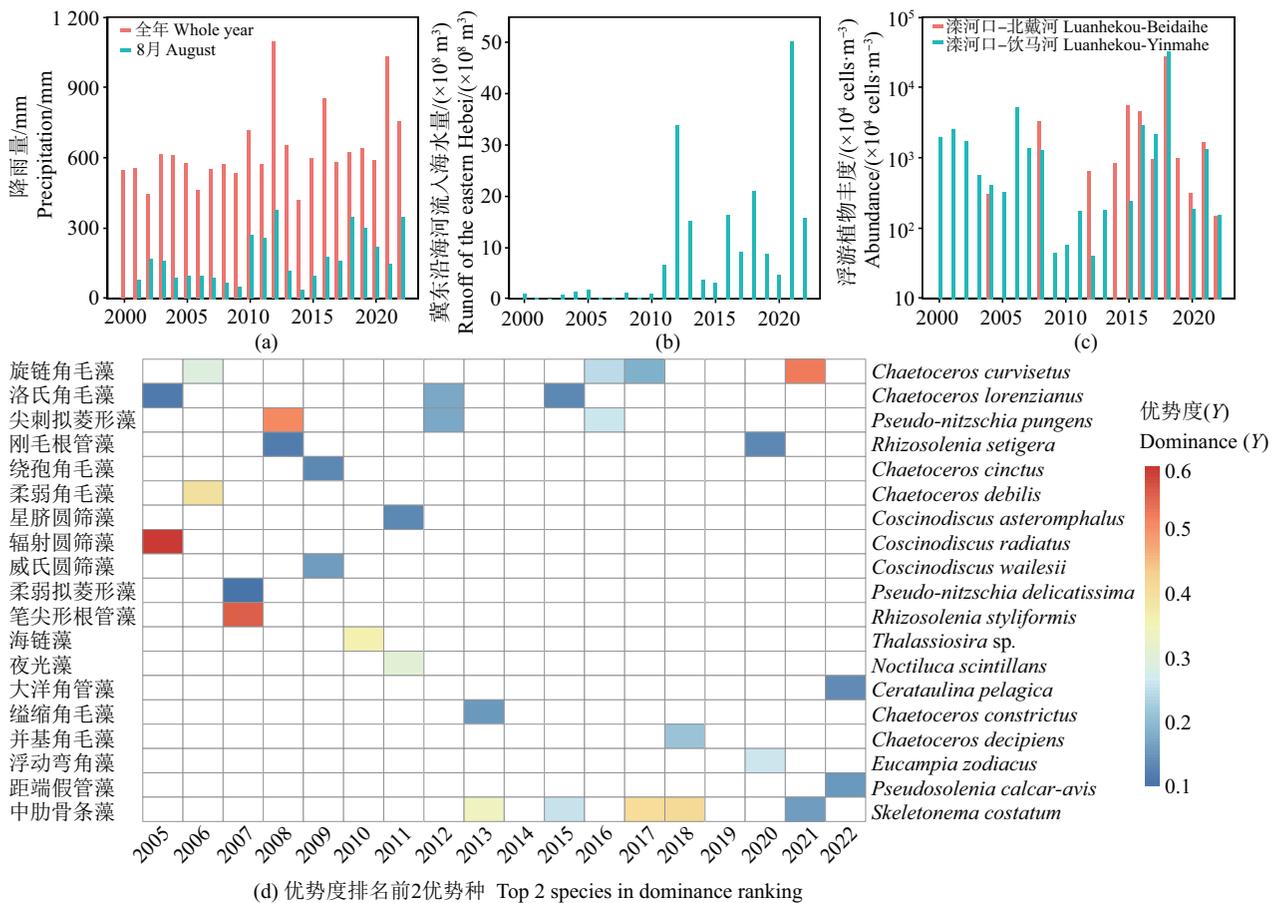
2022 年夏季, 浮游植物群落空间变化主要受盐度、DIP 影响。盐度的影响主要体现为与距端假管藻、大西洋角管藻等正相关, 与尖刺拟菱形藻、柔弱拟菱形藻等负相关。距端假管藻、大西洋角管藻多出现在黑潮、台湾暖流等高温高盐水体中^[34-36], 在渤海夏、秋季偶有出现, 频次不高^[5]。马旺^[37]对唐山京唐港温排水的研究中, 大西洋角管藻成为优势种, 且与盐度正相关, 这与本研究较为相似。尖刺拟菱形藻、柔弱拟菱形藻的适宜盐度范围基本为 10 ~ 30^[38-39]。本次调查期间盐度处于 27.07 ~ 29.50 范围(图 2), 接近上述物种适宜范围的上限, 因此与该物种呈现负

相关关系。秦皇岛海域夏季降水较多,硅酸盐浓度达到周年最高值,硅限制程度减弱或消失,磷成为限制浮游植物生长的主要因子^[40]。DIP 与印度鼻状藻、菱软几内亚藻、大洋角管藻等大多数种类负相关,即与磷相对不足,浮游植物生长消耗较多 DIP 有关。

3.2 浮游植物群落年际变化及影响因素

降水和径流是近海营养物质的重要来源,对浮游植物生长具有关键作用^[44]。2012 年、2021 年是典型丰水年,如图 9(a)所示,相对邻近年份均出现了浮游植物丰度高,2015—2018 年间入海水量持续较多,如图 9(b)所示,浮游植物丰度也连续出现高峰。然而,降雨量或入海水量的增多幅度与浮游植物丰度的升高幅度并不一致,如 2021 年入海水量达到近年来最高值,但浮游植物丰度仅为相对较高。相关性分析表明,浮游植物丰度与降雨量($R=0.303$, $P=0.339$)、入海水量($R=0.115$, $P=0.722$)未达到显著

相关,表明其年际变化机制较为复杂,可能与种间竞争、藻类阶段性暴发增殖等其他因素有关。秦皇岛海域在 2009—2015 年间曾连续 7 年出现抑食金球藻褐潮,每年影响面积几乎覆盖整个秦皇岛海域,持续时间从春末到秋初可达数月之久^[5,12]。抑食金球藻细胞直径约 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ ^[42],不能被浅水 III 型浮游生物网(孔径 $76 \mu\text{m}$)采集,其在褐潮暴发期间与硅藻等其他类群浮游植物间存在强烈竞争关系,因此 2010—2014 年间尽管降雨量和入海水量均较多,但网采浮游植物丰度却相对较低。秦皇岛海域是渤海范围赤潮高发区之一,浮游植物较易出现阶段性暴发增殖,2006 年 8 月柔弱角毛藻和旋链角毛藻优势度合计高达 0.664 ^[25],2008 年 8 月尖刺拟菱形藻优势度高达 0.530 ^[26]。HE 等^[43]在逐日时间尺度的研究表明秦皇岛海域浮游植物暴发增殖过程十分迅速,在 1 d 左右就可能细胞丰度 $1 \sim 2$ 个数量级的



注:降雨量和入海水量数据参考[24],浮游植物群落数据参考[25—27]。

Note: Data of precipitation and river discharge were referenced from [24], while those of phytoplankton community were referenced from [25—27].

图 9 浮游植物群落年际变化

Fig. 9 Annual variations of phytoplankton community

变化,因此近海调查采样可能受浮游植物阶段性暴发增殖影响,造成个别年份细胞丰度较高。由此可见,秦皇岛海域浮游植物群落对环境变化极为敏感,在降水等因素将营养物质输入近岸水体的影响下,有较大可能出现暴发增殖甚至赤潮。因此,建议北戴河赤潮监测工作宜重点关注降水过程对海水水质和赤潮的影响。

2013年以来,中肋骨条藻成为主要优势种的频次明显提高,从2005—2012年间0次增长为2013—2022年间5次,与渤海2011—2020年间中肋骨条藻密度升高现象较为一致^[44]。2013—2022年,秦皇岛地区年均降雨量为675.0 mm,相对2005—2011年增加18%,同期河流入海水量在降雨量增加、水资源保护等因素影响下的增多幅度更大,相对2005—2011年增加778%。中肋骨条藻最适盐度为14~20^[45],较多淡水输入有利于其在浮游植物群落中占据优势地位。WANG等^[44]认为渤海近年来N/P降低对中肋骨条藻优势地位升高具有重要作用。本研究同样表明N/P与中肋骨条藻具有负相关关系,见图8(a),降水、入海水量增多可能通过输入较多磷酸盐,降低近岸水体N/P的方式对中肋骨条藻生长产生影响。大洋角管藻、距端假管藻作为典型暖水种,于2022年首次成为主要优势种。2022年夏季,中国近海出现一次大范围海洋热浪过程,从6月底至9月初持续75 d,渤海局部海域最大强度超过3℃,滦河口—北戴河海域最大强度在1.5℃左右^[46]。从现场调查数据看,2022年夏季该海域平均水温为26.4℃(图2),相对于2020年(24.4℃)^[22]和2021年(25.3℃,图2)分别偏高2.0℃和1.1℃。距端假管藻、大洋角管藻成为当年主要优势种,即可能是浮游植物群落对海洋热浪事件^[47]的响应。值得注意的是,近年来渤海持续波动升温,8月表层海水温度在2013年发生跃迁,2013—2019年相对1994—2012年整体升高1.37℃,但不同海域升温幅度存在较大差异,天津、沧州附近海域升温幅度最大,可达2℃以上,秦皇岛及渤海湾湾口海域升温幅度较小,基本在1℃左右^[47]。本研究浮游植物优势种并未在2013年后出现暖水种增多趋势,即可能与秦皇岛海域升温幅度相对较小存在一定联系^[47]。另外,渤海不只2022年夏季出现了海洋热浪,如2017—2019年夏季也出现了一定强度的海洋热浪^[48]。相对我国其他海域,渤海夏季海洋热浪发生强度较高,但出现频次和持续时间较低^[10,49],这就造成夏季开展调查

时期(3~4 d)是否恰处于海洋热浪发生时期存在一定不确定性。目前,渤海海洋热浪研究较少分析其过程尺度上的时空变化,对阐明浮游植物群落对海洋热浪的响应特征存在一定制约。

4 结束语

综上所述,滦河口—北戴河海域夏季浮游植物群落由硅藻、甲藻和金藻组成,细胞丰度、主要优势种及空间分布均存在明显年际差异,与盐度、磷酸盐、氮磷比、悬浮颗粒物和扇贝滤食等因素综合影响有关,反映了浮游植物群落与水质、气候和养殖活动等环境因素之间存在紧密联系。赤潮监测工作宜关注降水、营养盐浓度及比例等因素的阶段性变化,而近海生态系统保护需进一步关注气候、养殖活动等因素的长期变化。

通信作者简介:刘西汉(1987—),男,博士,副研究员,主要研究方向为海洋生态环境评价。

5 参考文献

- [1] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science*, 1998, 281 (5374): 237-240.
- [2] REYNOLDS C S. *The ecology of phytoplankton* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006: 1-38.
- [3] LALLI C M, PARSONS T R. *Biological oceanography: an introduction* [M]. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997: 39-72.
- [4] 孙松. 中国区域海洋学-生物海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 1-488.
- [5] 陈楠生, 黄海龙. 中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究进展(一): 渤海[J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52 (2): 346-395.
CHEN N S, HUANG H L. Advances in the study of biodiversity of phytoplankton and red tide species in China (I): The Bohai Sea[J]. *Oceanologia et limnologia sinica*, 2021, 52(2): 346-395.
- [6] 刘亚柳. 昌黎黄金海岸国家级自然保护区范围调整的原因、影响及发展方向[J]. *环境与发展*, 2019, 31(1): 212-213.
LIU Y L. The causes, impacts and development direction of the adjustment of the Changli gold coast national nature reserve[J]. *Environment and development*, 2019, 31 (1): 212-213.
- [7] 徐雯佳. 基于高分卫星影像的秦皇岛近海浮筏养殖分

- 布遥感监测[J]. 河北渔业, 2020(4): 32-34, 63.
- XU W J. Remote sensing monitoring of floating raft culture distribution in Qinhuangdao offshore based on high-resolution satellite images[J]. Hebei fisheries, 2020(4): 32-34, 63.
- [8] 河北省自然资源厅. 2022年河北省海洋灾害公报[R]. 石家庄: 河北省自然资源厅, 2023: 9-10
- [9] WANG H Z, ZHANG H Y, WEI H, et al. Temporal variations of the two oxygen depleted zones in the Bohai Sea [J]. Frontiers in marine science, 2023, 10: 1247579.
- [10] LI Z J, WAN L Y, LIU Y, et al. Analysis of marine heat-waves in China's coastal seas and adjacent offshore waters[J]. Atmosphere, 2023, 14(12): 1738.
- [11] 张万磊, 马新, 张永丰, 等. 2000年~2016年秦皇岛海域赤潮特征分析[J]. 海洋湖沼通报, 2020, 42(5): 48-55. ZHANG W L, MA X, ZHANG Y F, et al. An analysis of red tide characteristics in Qinhuangdao coastal seawater [J]. Transactions of oceanology and limnology, 2020, 42(5): 48-55.
- [12] LI X Y, YU R C, RICHARDSON A J, et al. Marked shifts of harmful algal blooms in the Bohai Sea linked with combined impacts of environmental changes [J]. Harmful algae, 2023, 121: 102370.
- [13] 徐金涛, 姚远, 杨雯, 等. 2022年秦皇岛近岸海域赤潮成因初探[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 817-826. XU J T, YAO Y, YANG W, et al. Preliminary investigation on the causes of red tides in Qinhuangdao coastal areas in 2022[J]. Chinese journal of applied ecology, 2024, 35(3): 817-826.
- [14] 苏万磊. 基于 Mann-Kendall 的秦皇岛市降水多时间尺度分析[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(11): 23-26.
- [15] 傅圆圆, 杨超, 张坤兰, 等. 河北省沿岸表层温盐特征分析[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(1): 94-98. FU Y Y, YANG C, ZHANG K L, et al. Characteristics of sea surface temperature and salinity at tidal gauge stations along Hebei coast[J]. Marine environmental science, 2022, 41(1): 94-98.
- [16] 赵骞, 陈玥, 陈元, 等. 秦皇岛海域海流特征及规模化养殖对其影响的观测研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(6): 23-36. ZHAO Q, CHEN Y, CHEN Y, et al. Current characteristics and its response to large-scale mariculture in Qinhuangdao coastal area based on *in situ* observation [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(6): 23-36.
- [17] 国家海洋局. 海洋监测规范第4部分: 海水分析: GB/T 17378.4—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 57-120
- [18] 国家海洋局. 海洋监测规范第7部分: 近海污染生态调查和生物监测: GB/T 17378.7—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 3-12
- [19] 钱树本. 海藻学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2014: 1-822.
- [20] 杨世民, 董树刚. 中国海域常见浮游硅藻图谱[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2006: 1-267.
- [21] 郭皓. 中国近海赤潮生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 1-107.
- [22] 魏君, 韩丽君, 唐小坤, 等. 滦河口—北戴河海域夏、秋季浮游植物群落时空变化及影响因素[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(6): 247-260. WEI J, HAN L J, TANG X K, et al. Temporal and spatial variations of phytoplankton community and their controlling factors in the Luanhe-Beidaihe coastal waters in summer and autumn[J]. Asian journal of ecotoxicology, 2024, 19(6): 247-260.
- [23] OKSANEN J, BLANCHET F G, FRIENDLY M, et al. Vegan: community ecology package [EB/OL]. [2024-10-24]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>, 2017
- [24] 河北省水利厅. 2001-2022年河北省水资源公报[R]. 石家庄: 河北省水利厅, 2022: 1-41.
- [25] 梁晓林, 杨阳, 王玉良, 等. 昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1317-1325. LIANG X L, YANG Y, WANG Y L, et al. Yearly changes of phytoplankton community in the ecology-monitoring area of Changli, Hebei in summer[J]. Environmental science, 2015, 36(4): 1317-1325.
- [26] 李莉, 陈武军, 张永丰, 等. 滦河口—北戴河海域夏季浮游植物群落变化研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6): 896-901. LI L, CHEN W J, ZHANG Y F, et al. Variation characteristics of phytoplankton communities structure in Luanhe-Beidaihe estuary in summer[J]. Marine environmental science, 2013, 32(6): 896-901.
- [27] CHEN Y, WANG L, LIU Z L, et al. Biodiversity and interannual variation of harmful algal bloom species in the coastal sea of Qinhuangdao, China[J]. Life, 2023, 13(1): 192.
- [28] KLAUSMEIER C A, LITCHMAN E, DAUFRESNE T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton[J]. Nature, 2004, 429(6988): 171-174.
- [29] 刘东艳, 孙军, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比对中肋骨条藻生长特性的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2002, 24(2): 39-44.

- LIU D Y, SUN J, CHEN Z T, et al. Effect of N/P ratio on the growth of a red tide diatom *Skeletonema costatum*[J]. Transaction of oceanology and limnology, 2002, 24(2): 39-44.
- [30] 孙军, 刘东艳, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比率对青岛大扁藻、新月柱鞘藻和米氏凯伦藻生长影响及其生存策略研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2122-2126.
- SUN J, LIU D Y, CHEN Z T, et al. Growth of *Platymonas helgolandica* var. *tsingtaoensis*, *Cylindrotheca closterium* and *Karenia mikimotoi* and their survival strategies under different N/P ratios[J]. Chinese journal of applied ecology, 2004, 15(11): 2122-2126.
- [31] 胡章喜, 徐宁, 李爱芬, 等. 氮磷比率对3种典型赤潮藻生长的影响[J]. 水生生物学报, 2008, 32(4): 482-487.
- HU Z X, XU N, LI A F, et al. Effects of different N : P ratios on the growth of pseudo-*Nitzschia pungens*, *Prorocentrum donghaiense* and *Phaeocystis globosa* [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2008, 32(4): 482-487.
- [32] 岳建权, 姜玲玲, 王林, 等. 不同季节秦皇岛近岸水体颗粒物粒径分布特征研究[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(4): 586-594.
- YUE J Q, JIANG L L, WANG L, et al. Characteristics of particle size distribution in the coastal waters of Qinhuangdao during different seasons[J]. Marine environmental science, 2022, 41(4): 586-594.
- [33] WANG L, WANG X, MENG Q H, et al. Retrieval and spatiotemporal variation of total suspended matter concentration using a MODIS-derived hue angle in the coastal waters of Qinhuangdao, China[J]. Frontiers in marine science, 2024, 11: 1434225.
- [34] 江志兵, 陈全震, 寿鹿, 等. 象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5813-5824.
- JIANG Z B, CHEN Q Z, SHOU L, et al. Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay[J]. Acta ecologica sinica, 2012, 32(18): 5813-5824.
- [35] 孙振皓, 盛留洋, 江新琴, 等. 2017年夏季长江口浮游植物暖水种增多现象分析[J]. 海洋学研究, 2021, 39(4): 82-90.
- SUN Z H, SHENG L Y, JIANG X Q, et al. An analysis on the phenomenon of increasing warm-water species abundance of phytoplankton in the Changjiang (Yangtze River) Estuary during summer of 2017[J]. Journal of marine sciences, 2021, 39(4): 82-90.
- [36] 栾青杉, 康元德, 王俊. 黄海浮游植物群落的长期变化(1985—2015)[J]. 中国水产科学, 2020, 27(1): 1-12.
- LUAN Q S, KANG Y D, WANG J. Long-term changes within the phytoplankton community in the Yellow Sea (1985 - 2015)[J]. Journal of fishery sciences of China, 2020, 27(1): 1-12.
- [37] 马旺. 唐山京唐港电厂温排水对浮游植物群落的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(3): 69-73.
- MA W. Influence of Tangshan Jingtanggong power plant's thermal drainage on marine phytoplankton community[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2022, 50(3): 69-73.
- [38] THESSSEN A E, DORTCH Q, PARSONS M L, et al. Effect of salinity on pseudo-*Nitzschia* species (Bacillariophyceae) growth and distribution1 [J]. Journal of phycology, 2005, 41(1): 21-29.
- [39] 徐宁. 中国沿海典型赤潮藻的生态位研究[D]. 广州: 暨南大学, 2006: 26-29.
- [40] 许歆. 秦皇岛近海浮游植物群落结构变化及其组学研究[D]. 青岛: 中国科学院大学, 2017: 27-60.
- [41] NING X R, LIN C L, SU J L, et al. Long-term environmental changes and the responses of the ecosystems in the Bohai Sea during 1960 - 1996[J]. Deep sea research part II: topical studies in oceanography, 2010, 57(11/12): 1079-1091.
- [42] 雷蕾, 姚鹏. 抑食金球藻褐潮环境影响因素研究进展[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(4): 635-640.
- LEI L, YAO P. Advances in the environmental factors of brown tide of *Aureococcus anophagefferens* [J]. Marine environmental science, 2016, 35(4): 635-640.
- [43] HE Y K, CHEN Z Y, FENG X, et al. Daily samples revealing shift in phytoplankton community and its environmental drivers during summer in Qinhuangdao coastal area, China[J]. Water, 2022, 14(10): 1625.
- [44] WANG Y B, LIU Z L, QI Y P, et al. Response of phytoplankton communities to environmental changes in the Bohai Sea in late summer (2011 - 2020)[J]. Acta oceanologica sinica, 2024, 43(10): 107-120.
- [45] 陈楠生, 崔宗梅, 徐青. 中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究进展(四): 长江口[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(2): 402-452.
- CHEN N S, CUI Z M, XU Q. Advances in the study of biodiversity of phytoplankton and red tide species in China(IV): the Changjiang estuary[J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2021, 52(2): 402-452.
- [46] TAN H J, CAI R S, BAI D P, et al. Causes of 2022 summer marine heatwave in the East China Seas[J]. Advances

- in climate change research, 2023, 14(5): 633-641.
- [47] 郭世安, 张海彦, 魏皓, 等. 2013—2019年渤海夏季高温现象及机制分析[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(2): 269-277.
- GUO S A, ZHANG H Y, WEI H, et al. Summer high temperature phenomenon and its mechanisms in the Bohai Sea from 2013 to 2019[J]. *Oceanologia et limnologia sinica*, 2022, 53(2): 269-277.
- [48] YUAN C Y, KUANG X D, XU J B, et al. Phase variations of the summer and winter seasons in the Bohai Sea during the last four decades[J]. *Frontiers in marine science*, 2023, 10: 1095792.
- [49] 蔡榕硕, 谭红建. 中国近海变暖和海洋热浪演变特征及气候成因研究进展[J]. 大气科学, 2024, 48(1): 121-146.
- CAI R S, TAN H J. Progress on the evolutionary characteristics and climatic causes for warming and marine heatwaves in the coastal China Seas[J]. *Chinese journal of atmospheric sciences*, 2024, 48(1): 121-146. ◆