

2019年秦皇岛海域海洋卡盾藻赤潮与 理化因子关系研究

陈作艺^{1,2}, 张甲波^{1,2}, 王刚^{1,2}, 刘会欣^{1,2}, 王建艳³

(1.河北省海洋地质资源调查中心, 河北 秦皇岛 066000; 2.河北省海洋岸线生态修复与智慧海洋监测工程研究中心, 河北 秦皇岛 066000; 3.北京自然博物馆科学研究部, 北京 100050)

摘要:2019年7月23日至7月29日, 河北秦皇岛海域暴发了一次小规模海洋卡盾藻 (*Chattonella marina*) 赤潮 (最高浓度达 2.22×10^6 cell/L)。本文对该次赤潮进行了监测, 同时选取当期海域浮标在线监测数据 (表层海水温度、降雨量、盐度、浊度、pH、溶解氧、叶绿素 *a* 和营养盐等) 进行了海洋卡盾藻赤潮与环境要素变化规律的分析。分析结果表明, 7月23日的强降雨是此次海洋卡盾藻赤潮的关键诱因, 降雨带来的陆源营养盐使海水中营养盐的浓度与组成比例发生变化, 表现在 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 DIP 含量增高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 在 DIN 中占比提高, 为海洋卡盾藻赤潮的形成提供了良好的营养基础。海洋卡盾藻的密度变化与溶解氧和 pH 两项浮标数据变化的趋势呈正相关 (相关系数 *r* 分别为 0.85 和 0.77, $0.01 < p < 0.05$), 验证了浮标在线监测理化数据在赤潮跟踪预警中的有效性。此次海洋卡盾藻赤潮期间, 调查站位的浮游植物优势种群经历了丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*)、双突角毛藻 (*Chaetoceros didymus*)——丹麦细柱藻、海洋卡盾藻——海洋卡盾藻 3 个阶段的演替过程, 卡盾藻不同于硅藻的营养吸收策略和生殖策略可能是其在浮游植物群落中获得竞争优势, 形成赤潮的原因。

关键词: 秦皇岛; 赤潮; 卡盾藻; 环境因子; 浮标监测

中图分类号: X17; X55 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2022)04-0595-08

Studies on the relationship between *Chattonella marina* blooms and physicochemical parameters in Qinhuangdao coastal area in 2019

CHEN Zuo-yi^{1,2}, ZHANG Jia-bo^{1,2}, WANG Gang^{1,2},
LIU Hui-xin^{1,2}, WANG Jian-yan³

(1. Hebei Center of Marine Geological Resources Survey, Qinhuangdao 066000, China; 2. Marine Ecological Restoration and Smart Ocean Engineering Research Center of Hebei Province, Qinhuangdao 066000, China; 3. Department of Science Research, Beijing Museum of Natural History, Beijing 100050, China)

Abstract: From July 23rd to July 29th, 2019, a *Chattonella marina*-dominated algae bloom was detected in the Qinhuangdao coastal area. We investigated the relationship between *C. marina* abundance and environmental parameters such as rainfall, water temperature, salinity, turbidity, pH, dissolved oxygen (DO), chlorophyll *a*, and dissolved inorganic nutrients in this study. The data revealed that rainfall on July 23rd was the most

收稿日期: 2021-05-10, 修订日期: 2022-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1407905); 北京市自然科学基金资助项目 (8194059); 国家自然科学基金项目 (41906112)

作者简介: 陈作艺 (1988-), 男, 广东肇庆人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为赤潮生物学和海洋生态学, E-mail: chenzuo-yi288688@163.com

通讯作者: 王建艳 (1985-), 女, 山东临沂人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为海洋生物学/海洋生态学, E-mail: wjy198530@163.com

important component for the bloom's formation. Inflows changed the concentration and structure of nutrients significantly after the rain. Inflows enhanced the concentrations of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, dissolved phosphate, and the ratio of $\text{NO}_3\text{-N}$ to total dissolved nitrogen in the seawater, allowing *C. marina* to proliferate. Furthermore, Spearman rank correlation analysis revealed that the abundance of *C. marina* was positively correlated with DO ($r = 0.85$) and pH ($r = 0.77$), significantly ($0.01 < p < 0.05$). The results indicated that using environmental elements sensed by buoys to monitor algal blooms is a viable option. The dominating species of phytoplankton communities during the bloom changed from *Leptocylindrus danicus* and *Chaetoceros didymus* to *Leptocylindrus danicus* and *C. marina*, and subsequently to *C. marina*. We hypothesized that the distinct reproductive and nutrient assimilation strategies between *C. marina* and diatoms facilitated the bloom of *C. marina*.

Key words: Qinhuangdao; algal bloom; *Chattonella* spp.; environmental factors; buoy monitoring

海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)隶属于针胞藻纲(Raphidophyceae)卡盾藻目(Chattonellales)卡盾藻科(Chattonellaceae)卡盾藻属(*Chattonella*),是一种鱼毒性赤潮藻。海洋卡盾藻在世界多地海域,如中国、日本、韩国、印度、新西兰、澳大利亚等都有分布并引发赤潮^[1]。在我国台湾、南海大鹏湾及大亚湾、秦皇岛、大沽口等地也暴发过海洋卡盾藻赤潮^[2]。海洋卡盾藻为有毒种,可产生神经性毒素、溶血性毒素和血凝性毒素,形成赤潮时可造成养殖鱼、虾和贝类等大量死亡,给海水养殖业带来严重的经济损失^[3-4]。

秦皇岛市近岸海域是河北省赤潮灾害的多发海域,也是受赤潮致灾影响较为严重的海域^[5-7]。据统计,1990—2019年,秦皇岛海区共发生赤潮50余起,其中,赤潮肇事藻类为30种(有毒藻类5种)。海洋卡盾藻/古老卡盾藻(*Chattonella antique*)是该海域有毒、有害赤潮藻类之一,分别于2002年、2011年、2016年和2018年在秦皇岛海域暴发赤潮。

2019年7月23日至7月29日,河北秦皇岛海域暴发了一次海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)小型赤潮,本文对该次赤潮进行了监测,选取同期该海域的浮标在线监测数据(表层海水温度、降雨量、盐度、浊度、pH、溶解氧、Chl *a*和营养盐等),进行了海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)赤潮与环境要素变化规律的分析,以研究卡盾藻赤潮生消与环境因子的关系。

1 材料与方法

1.1 站位选择

数据主要来源于秦皇岛海域浅水湾浮标的

监测数据,浮标位于浅水湾海域,水深约为9 m,离岸距离约为3 km,距汤河和小汤河入海口约5.5 km;浮标监测水深为水下0.5 m。

1.2 海域环境参数的测定

浮标的水质监测传感器为美国YSI公司的EXO2型多参数水质监测仪,营养盐分析仪为意大利SYSTEAL公司的WIZ原位营养盐分析仪,传感器在海上运行期间均定期(每月1至2次)进行维护、校准和数据比对(采用检定后的仪器进行现场比对)。浮标各传感器的维护和数据校正按照《海洋环境监测浮标运行维护管理技术指南》(HY/T 0287—2020)^[8]执行。水质及水文气象仪器监测频率均为1次/30 min,主要用于收集水温、盐度、pH、DO、Chl *a*、降雨量、浊度等参数;浮标营养盐分析仪监测频率为1次/4 h,监测参数包括硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨盐($\text{NO}_2\text{-N}$)和磷酸盐(DIP)。溶解无机氮(DIN)为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 三者之和,由计算而得。

1.3 样品采集

赤潮期间,海水取样位置为距汤河和小汤河入海口正南方向约1.5 km处金梦海湾的人工浮桥,由岸边向海50 m处。浮游植物样品的采集、固定和分析严格按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)进行。海洋卡盾藻的细胞密度采用直接计数法将样品置于莱卡全自动荧光倒置显微镜(DMi8)下分析鉴定。

1.4 数据分析

使用软件R语言(3.4.4版本)对调查期间的理化因子进行主成分分析(principal component analysis, PCA),对海洋卡盾藻数量与环境因子的

关系进行斯皮尔曼 (spearman) 相关性分析。以 $0.01 < p < 0.05$ 作为显著性水平, $p < 0.01$ 作为极显著水平。

2 结果与讨论

2.1 海洋卡盾藻赤潮发生情况

赤潮发生前期: 2019年7月21日至7月22日, 所设采样站位的海水样品中优势种分别为丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*, 密度为 1.96×10^5 cell/L) 和双突角毛藻 (*Chaetoceros didymus*, 密度为 8.20×10^5 cell/L), 此时海水颜色呈浅黄色, 无明显异常。赤潮形成至发展期: 2019年7月23日, 水体呈浅褐色, 海洋卡盾藻为海水样品中的优势种, 密度为 7.32×10^5 cell/L。7月24日, 海区出现了高密度的海洋卡盾藻和丹麦细柱藻, 藻密度分别为 9.03×10^5 cell/L、 2.92×10^5 cell/L, 后者达到赤潮基准。7月25日, 水体颜色加深, 呈褐色, 海洋卡盾藻密度为 1.04×10^6 cell/L, 达到赤潮基准^[9]。赤潮维持期: 7月25日后, 海洋卡盾藻密度持续增高, 至7月27日达到高值 (2.22×10^6 cell/L)。随后, 海洋卡盾藻密度开始下降, 7月29日下降至 3.86×10^5 cell/L (图1), 水体呈黄褐色。

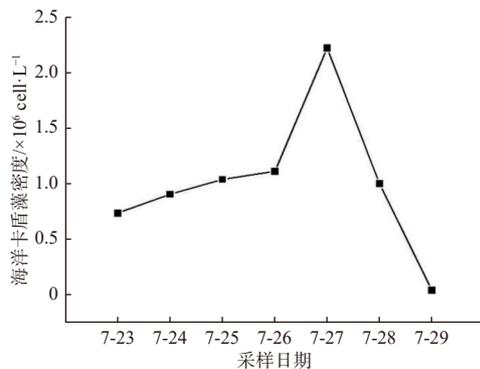


图1 海洋卡盾藻丰度变化

Fig. 1 Variation of the cell abundance of *Chattonella marina*

调查期间, 站位表层海水中 Chl *a* 的浓度变化如图2所示。赤潮前期表层海水中 Chl *a* 的浓度较低, 均值为 $1.08 \mu\text{g/L}$ 。7月21日2:00时至12:00时, Chl *a* 出现小幅增高, 9:00时出现当日高值, 为 $4.5 \mu\text{g/L}$ 。赤潮期间, Chl *a* 浓度每日呈

波动性变化, 约12:00时出现当日叶绿素最高值, 至18:00时都维持在相对较高的水平, 随后叶绿素浓度迅速下降 (图2b), 这可能与海洋卡盾藻响应光强变化以及昼夜垂直迁移导致的节律有关。Chl *a* 浓度在7月24日11:00时达到调查期间的最高值 ($52.90 \mu\text{g/L}$), 此时海区出现了高密度的海洋卡盾藻和丹麦细柱藻, 藻密度分别为 9.03×10^5 cell/L、 2.92×10^5 cell/L。7月29日, Chl *a* 浓度急剧降低, 无明显日变化, 日均值为 $0.49 \mu\text{g/L}$ 。7月30日, Chl *a* 整体水平较低, 于7:30时至15:00时出现小幅波动 ($0.80 \sim 2.00 \mu\text{g/L}$), 日均值为 $0.86 \mu\text{g/L}$ 。赤潮后期, Chl *a* 平均值为 $0.78 \mu\text{g/L}$ 。

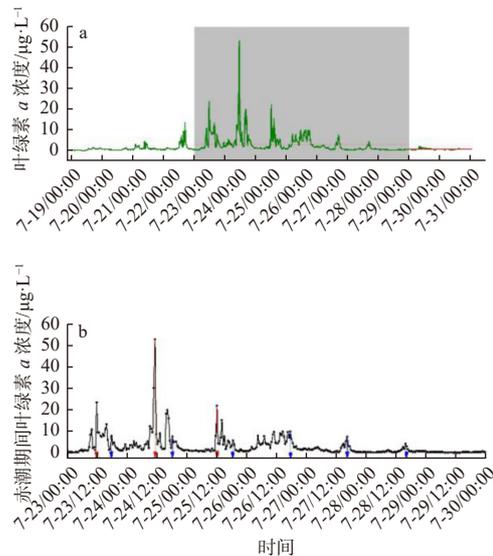


图2 7月19日至7月31秦皇岛浅水湾叶绿素 *a* 的变化趋势和海洋卡盾藻赤潮期叶绿素 *a* 变化

Fig. 2 Chlorophyll *a* variation in Qianshui bay, Qinhuangdao from July 19th to July 31st and throughout the *Chattonella marina* bloom period

2.2 赤潮期间环境要素变化规律

2.2.1 气温和风速

7月19日至20日, 海域气温较低, 随后气温升高, 7月21日16:30时气温达到最高值 $33.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。之后, 气温开始下降。赤潮期间, 气温平均水平低于赤潮前期后期, 平均值分别为 $26.03 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $26.41 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $26.99 \text{ }^\circ\text{C}$ 。赤潮期内出现了两个明显的气温低值, 即7月24日7:00时的 $23.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和7月26日4:30时的最低值 $21.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。赤潮后期,

气温再次回升。调查期间风速处于波浪变化,赤潮前期和赤潮期风速较低,平均值分别为 3.50 m/s 和 3.17 m/s,赤潮后风速增高,平均值为 4.88 m/s。两个风速高值分别出现在降雨的 7 月 23 日和 7 月 25 日,依次为 9.2 m/s 和 11.9 m/s(图 3)。

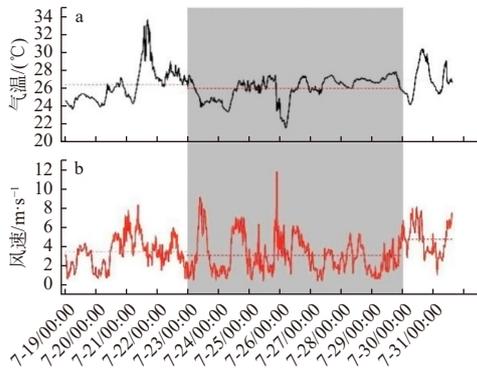


图3 2019年7月19日至7月31日秦皇岛浅水湾气温和风速变化趋势

Fig. 3 Variation of air temperature and wind velocity in Qianshui bay, Qinhuangdao from July 19th to July 31st

2.2.2 水温、降雨量、盐度、浊度

2019年7月19日至7月31日海水表层水温处于连续波动状态,无明显规律(图4)。水温最低值出现在7月23日11:30时,为23.88℃,此后整个赤潮期气温稳定上升,最高值达到28.2℃。7月30日赤潮结束后,水温显著回落。赤潮期间的水温均值(26.07℃)略高于赤潮暴发前(25.86℃)和赤潮暴发后(25.42℃)的海水表层水温平均值。此次赤潮暴发前,秦皇岛地区已连续多日无降雨。7月23日5:00时—13:00时该地区连续降雨,最高降雨量达12.6mm,在7月25日早晨(7:00时)和夜间(21:00时—22:00时)再次出现降雨。这两次降雨导致海水表层盐度显著下降,在7月24日零点达到最低值28.38。两次降雨导致赤潮期间海水表层盐度明显降低,平均值为30.08;赤潮前、后期盐度接近,平均值分别为30.46和30.31。

表层海水浊度在赤潮前期保持相对稳定的水平,7月23日至7月26日海水浊度波动性增高,随后降低至平稳期。自7月23日至7月26日,每日约12:00时都有一个高值出现,这可能与水体中赤潮藻类密度增大,增加了海水浊度

有关(图4d)。赤潮期的海水浊度平均值为1.56,稍高于赤潮前期(1.31)和后期(1.41)。

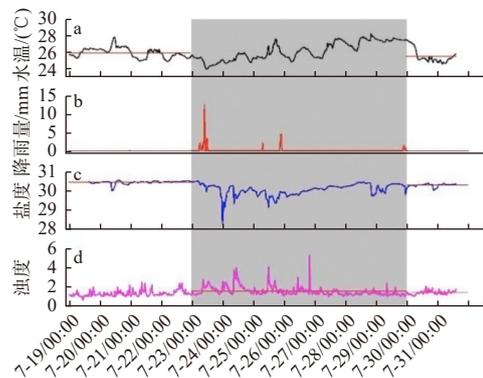


图4 7月19日至7月31日秦皇岛浅水湾海水表层水温、降雨量、盐度和浊度变化趋势

Fig. 4 Variation of surface seawater temperature, precipitation, salinity, and turbidity in Qianshui bay from July 19th to July 31st

室内实验发现,日本海域海洋卡盾藻和古老卡盾藻的生长温度范围为15℃~30℃,盐度范围为10~35。海洋卡盾藻的最适生长温度和盐度组合为25℃×20,古老卡盾藻的最大生长速率出现在25℃×25组合组^[10]。徐艳红等^[11]的数据表明,当温度为25℃时,海洋卡盾藻(日本株)的细胞增长最快。也有研究认为,温度和盐度对海洋卡盾藻(广东大亚湾株)藻细胞生长影响不显著^[12]。在野外条件下,日本海域海洋卡盾藻和古老卡盾藻可生存的温度范围分别为18.8℃~28.0℃和19.2℃~28.8℃^[13]。海洋卡盾藻一般在温带海域的夏季发生赤潮。卡盾藻在我国大亚湾海域的密度峰值出现在水温为21.8℃~26.5℃、盐度为20~30的环境^[14];在渤海四十里湾海域,海洋卡盾藻赤潮期间水温为24℃~26.5℃、盐度为30~35^[15]。此次秦皇岛海域的海洋卡盾藻赤潮发生期间,温度和盐度分别为23.88℃~28.22℃、28.31~30.53,前期温度和盐度分别为24.77℃~27.70℃、30.01~30.56,这与已有的报道一致,均为适于海洋卡盾藻生长的温度和盐度条件。

2.2.3 pH和溶解氧

海水表层pH和溶解氧在调查期间的变化规律非常相似,均表现为赤潮前期较低,赤潮期明

显升高, 赤潮后期急剧下降(图5)。pH在赤潮前期、中期和后期的平均值分别为7.87、8.07和7.89。赤潮前期溶解氧平均值为6.36 mg/L; 赤潮期间溶解氧含量显著升高, 至7月25日12:00时达到最高值(16.61 mg/L); 赤潮后期溶解氧浓度急剧下降(均值5.60 mg/L)。值得注意的是, 7月24日12:00时和7月25日12:00时叶绿素出现高值时, pH和溶解氧也相应出现了高峰。

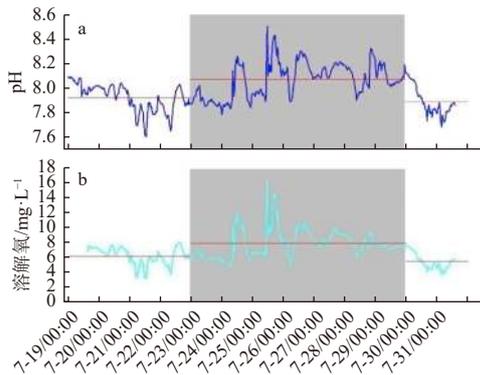


图5 2019年7月19日至7月31日秦皇岛浅水湾pH和溶解氧的变化趋势

Fig. 5 Variation of pH and dissolved oxygen in Qianshui bay from July 19th to July 31st

在赤潮暴发期, 赤潮生物大量、快速生长, 通过光合作用大量吸收水体中的 CO_2 并释放氧气, 导致水体中DO含量升高, pH升高; 赤潮后期, 赤潮生物大量死亡并被藻际微生物降解代谢, 此过程消耗水体中大量的 O_2 并产生 CO_2 , 致使水体中DO浓度降低、pH降低。在日本Isahaya海湾, 研究者多次观察到, 卡盾藻赤潮期间该海域出现低氧或缺氧, 并伴随大量养殖蛤仔死亡^[16]。赤潮后期, 赤潮生物大量降解引发的低氧甚至缺氧环境也是卡盾藻赤潮导致养殖鱼类死亡的原因之一^[17]。

2.2.4 营养盐

调查期间, 调查站位DIP的浓度范围为13.20~76.40 $\mu\text{g/L}$ (图6)。7月19日至7月20日, DIP浓度较低, 约为20 $\mu\text{g/L}$ 。7月21日起, DIP浓度开始增高, 7月24日11:00时剧增至最高值76.4 $\mu\text{g/L}$, 随后开始降低。总体来看, 赤潮期调查站位的DIP平均浓度显著(27.49 $\mu\text{g/L}$)高于赤潮前期(23.46 $\mu\text{g/L}$)和后期(22.30 $\mu\text{g/L}$)的浓

度。DIP和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 均在7月24日3:00时左右出现高值, 这可能与7月23日连续降雨带来的陆源水体有关。

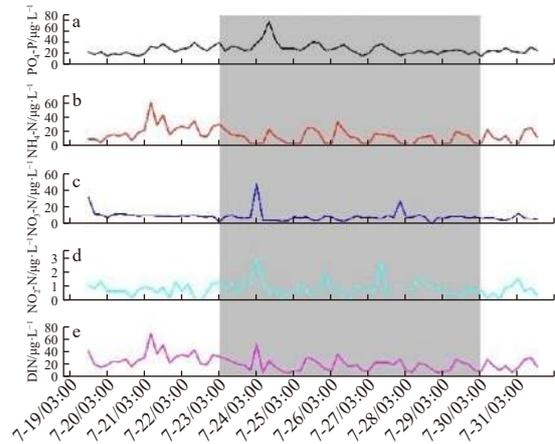


图6 2019年7月19日至7月31日秦皇岛浅水湾表层海水营养盐因子变化趋势

Fig. 6 Variation of dissolved inorganic nutrients in Qianshui bay from July 19th to July 31st

赤潮前期的DIN浓度(平均值为33.14 $\mu\text{g/L}$)显著高于赤潮期和赤潮后期DIN的浓度(分别为21.08 $\mu\text{g/L}$, 20.26 $\mu\text{g/L}$)(图7)。其中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在赤潮前期的平均值最高(分别为20.99 $\mu\text{g/L}$ 和11.38 $\mu\text{g/L}$), $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度赤潮期(0.94 $\mu\text{g/L}$)稍高于赤潮前期(0.78 $\mu\text{g/L}$)和后期(0.74 $\mu\text{g/L}$)。在7月24日3时均出现一个高值(48.80 $\mu\text{g/L}$ 和3 $\mu\text{g/L}$)。分析三种形态氮在总氮中所占的比例可见, 此次调查期间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 是海域DIN的主要组成成分, $\text{NO}_2\text{-N}$ 的占比较低。调查开始时, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的占比略高于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的占比, 随后 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的占比迅速提高; 至赤潮期, $\text{NO}_3\text{-N}$ 占比开始增高, 与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的占比处于上下波动状态, 两者在DIN中的百分比相差不多, 平均值分别为45.96%和48.91%; 赤潮后期, $\text{NH}_4\text{-N}$ 占比高于 $\text{NO}_3\text{-N}$, 平均值分别为52.98%和42.57%。整个调查期间因表层海水中DIN浓度较低导致N/P值(摩尔比)很低, 不高于6(图7)。

此次赤潮前期, 秦皇岛地区7月23日出现一次强降雨, 降雨量最高可达12.6 mm。降雨导致表层海水盐度急剧下降, 至调查时达到最低值(28.38)。同时, 陆源营养盐的输入使海水中营

养盐的数量与组成比例发生变化。其中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 DIP 均在降雨后的 7 月 24 日出现了调查期间的最高值。氮盐是影响海洋卡盾藻生长的显著因子, 海洋卡盾藻在高氮条件下的比生长速率显著提高^[18]。对日本近海的卡盾藻种群动态及其赤潮生消的调查研究表明, 自冬季到春季天气回暖, 当海域温度高于 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 卡盾藻孢囊会萌发成营养细胞。营养细胞以低浓度水平分布在水体中, 当雨季到来时, 借助强降雨带来的丰富营养盐快速生长, 形成赤潮^[19-20]。阴雨期间的低光照条件, 更适合低光照的海洋卡盾藻生长, 而不利于光补偿点高的硅藻生长。在烟台四十里海域、山东乳山湾等地也多次发生阴雨天气后暴发海洋卡盾藻赤潮的事件^[21]。在我国大亚湾海域, 卡盾藻高频、高密度出现的 4 月, 海区也多以阴雨天气为主^[14]。可见, 降雨为卡盾藻生长提供了良好的气象条件和营养基础, 这是此次秦皇岛卡盾藻赤潮的关键诱因。

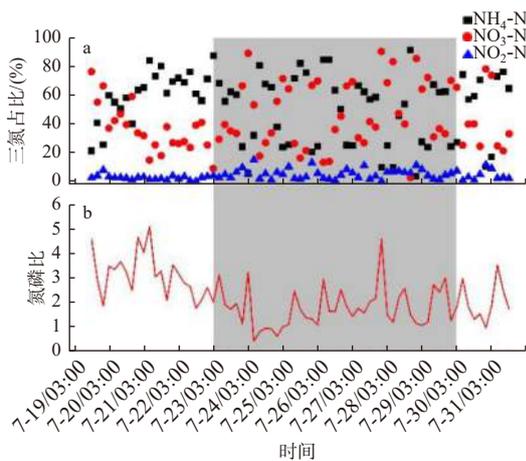


图7 2019年7月19日至7月31日秦皇岛浅水湾表层海水中三氮(氨盐、硝酸盐和亚硝酸盐)在总无机氮中的占比以及氮磷比变化规律

Fig. 7 Variation of the percentage of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ in the total DIN (a), and N:P (b) in Qianshui bay from July 19th to July 31st

2.3 海洋卡盾藻赤潮与环境因子的关系

2.3.1 环境因子主成分分析

对采样点的 15 项理化环境因子(水温、盐度、降雨量、浊度、Chl *a*、溶解氧、pH、DIN、DIP、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、N/P 等)进行主成分分析(图 8)。PCA 两轴分别解释了环境因子

数据承载量的 45.19% 和 22.00%。第一轴主要解释的环境变量为水温、气温、Chl *a*、浊度、DIP; 第二轴主要解释的环境变量为降雨量、盐度、DIN、N/P、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、溶解氧。7 月 23 日样品主要表现为降雨导致陆源河流入海通量增多, 海水中 DIN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量升高。7 月 24 日样品主要表现为海水 Chl *a* 浓度、浊度、DIP 升高。7 月 25 日、7 月 26 日样品表现为各个环境因子无显著高值。7 月 27 日、7 月 28 日、7 月 29 日海水样品主要表现为气温、水温逐渐增高, 而 Chl *a* 浓度、DIP 浓度、海水浊度逐渐降低。

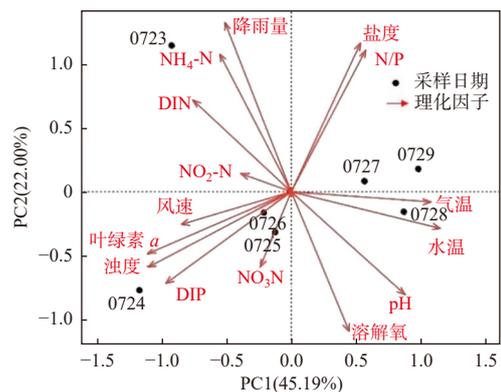


图8 海洋卡盾藻赤潮期间理化环境因子 PCA 分析

Fig. 8 Principal components analysis (PCA) of environmental parameters during the *Chattonella marina* bloom

2.3.2 海洋卡盾藻丰度与环境因子相关性分析

海洋卡盾藻浓度变化与 15 个环境因子的相关性分析如图 9 所示。此次赤潮, 海洋卡盾藻浓度与 pH 和溶解氧有显著的正相关关系, 相关系数分别为 0.85 和 0.77 ($0.01 < p < 0.05$)。海洋卡盾藻浓度与降雨量和盐度呈较强的负相关关系, 相关系数分别为 -0.51 和 -0.43, 但是未达到显著性差异水平 ($p > 0.05$)。海洋卡盾藻浓度与其他环境因子无明显的相关性。Chl *a* 的浓度与浊度变化显著相关 ($p \leq 0.01$), 与水温 and 气温显著负相关 ($p \leq 0.01$)。

2.4 卡盾藻与硅藻间的种群竞争

在营养盐丰富的条件下, 小型硅藻可在与海洋卡盾藻的种间竞争中占据优势, 硅藻暴发生长后, 导致营养盐含量急剧下降时, 可能有利于非硅藻类的生长^[22]。廖姿蓉^[23]发现, 当海洋卡盾

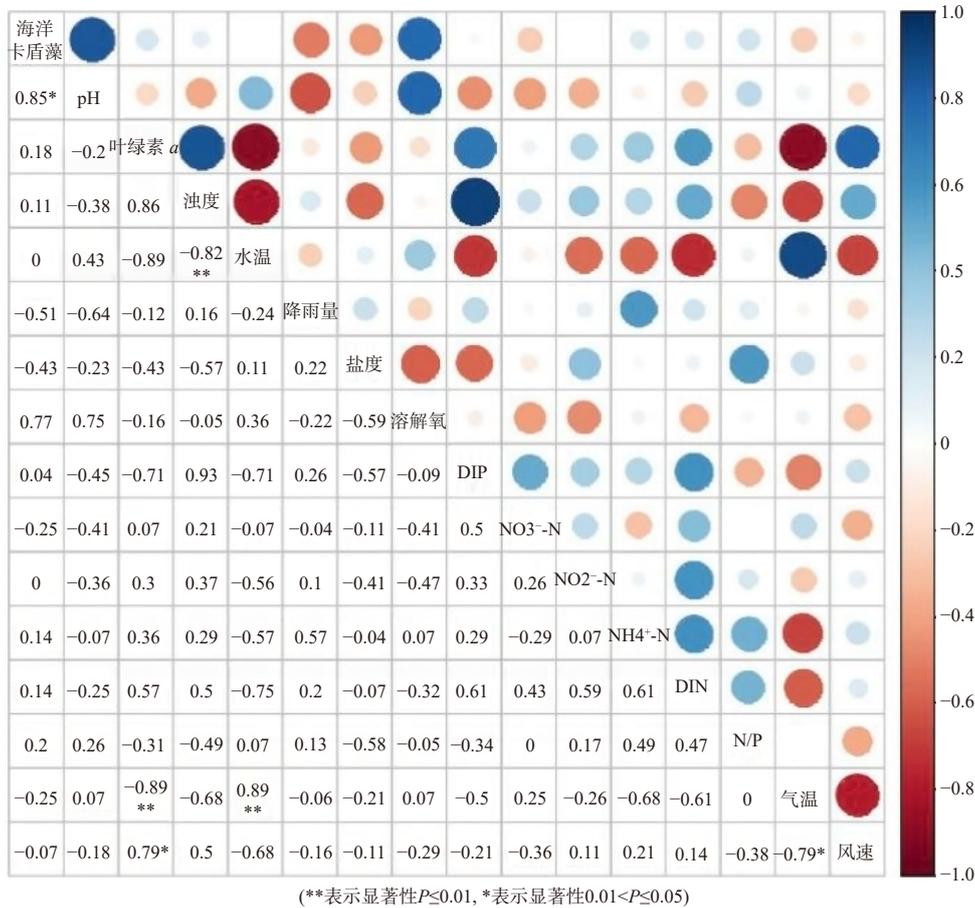


图 9 海洋卡盾藻丰度与环境因子相关性分析

Fig. 9 Spearman rank correlation between the abundance of *Chattonella marina* and environmental factors

藻与三种典型硅藻(旋链角毛藻 *Chaetoceros curvisetus*、三角褐指藻 *Phaeodactylum tricornerutum*、中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*) 在 f/2 培养基(富营养条件)中混合培养时,硅藻能显著抑制海洋卡盾藻的生长,在共培养后期海洋卡盾藻密度逐渐下降直至细胞全部死亡。李斌^[24]研究发现,相对于高氮磷比条件,低氮磷比更适于海洋卡盾藻的生长,且最佳氮磷比为 8 : 1。与米氏凯伦藻 (*Karenia mikimotoi*)、红色赤潮藻 (*Akashiwo sanguinea*) 等赤潮藻相比,卡盾藻仅需要非常低的 N、P 就可以达到赤潮预警的浓度^[25]。此次赤潮期间,海水中的 DIN 浓度偏低,调查站位的氮磷比不高于 6 : 1,低氮条件可能使丹麦细柱藻、双突角毛藻等硅藻失去竞争优势,间接促进海洋卡盾藻形成赤潮。

3 结论

(1) 7 月 23 日出现的强降雨是此次秦皇岛海

洋卡盾藻赤潮的关键诱因。此次降雨带来的陆源营养盐的输入使海水中营养盐的含量与组成比例发生变化,表现在 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 DIP 含量增高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 在 DIN 中占比增高,为海洋卡盾藻的发生提供了良好的营养基础。

(2) 此次海洋卡盾藻赤潮期间,调查站位浮游植物的优势种经历了丹麦细柱藻、双突角毛藻——丹麦细柱藻、海洋卡盾藻——海洋卡盾藻三个阶段的演替过程。卡盾藻不同于硅藻的营养吸收策略和生殖策略(昼夜垂直迁移、对营养盐限制具有较强的耐受能力、更适于低氮磷比),或是其获得竞争优势,形成赤潮的原因。

参考文献:

[1] MARSHALL J A, HALLEGRAEFF G M. Comparative ecophysiology of the harmful alga *Chattonella marina* (Raphidophyceae) from South Australian and Japanese waters[J]. *Journal of Plankton Research*, 1999, 21(10): 1809-

- 1822.
- [2] 齐雨藻, 黄长江. 南海大鹏湾海洋卡盾藻赤潮发生的环境背景[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28(4): 337-342.
- [3] AOKI K, ONITSUKA G, SHIMIZU M, et al. Variability of factors driving spatial and temporal dispersion in river plume and *Chattonella antiqua* bloom in the Yatsushiro Sea, Japan[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 81(1): 131-139.
- [4] IMAI I, YAMAGUCHI M. Life cycle, physiology, ecology and red tide occurrences of the fish-killing raphidophyte *Chattonella*[J]. *Harmful Algae*, 2012, 14: 46-70.
- [5] 安鑫龙, 李雪梅, 李志霞. 河北省近海有害藻华灾害分级、时空分布和优势藻华生物变化特征[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(1): 69-75.
- [6] 翟伟康, 许自舟, 张健. 河北省近岸海域赤潮灾害特征分析[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(2): 243-246, 251.
- [7] 安鑫龙, 齐遵利, 李雪梅, 等. 河北省沿海赤潮研究20年[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(31): 13787-13788, 13861.
- [8] HY/T 0287—2020, 海洋环境监测浮标运行维护管理技术指南[S].
- [9] HY/T 069—2005, 赤潮监测技术规程[S].
- [10] 山口峰生, 今井一郎, 本城凡夫. 有害赤潮ラフイド藻 *Chattonella antiqua* と *C. marina* の増殖速度に及ぼす水温、塩分および光強度の影響[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1991, 57(7): 1277-1284.
- [11] 徐艳红, 吴霓, 陈文静, 等. 海洋卡盾藻 (*Chattonella marina*) 日本株的生长特性[C]//中国藻类学会第八次会员代表大会暨第十六次学术讨论会论文摘要集. 上海: 中国海洋湖沼学会, 2011: 1.
- [12] 黄娟, 杨维东, 刘洁生, 等. 温度、盐度、光照对海洋卡盾藻生长和产毒的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1190-1195.
- [13] 小野知足, 吉松定昭, 吉田陽一. 播磨灘南西域における *Chattonella antiqua* の高密度発生と水質、気象要因等との関係[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1999, 65(4): 665-672.
- [14] 王朝晖, 齐雨藻, 陈菊芳, 等. 大亚湾春季卡盾藻种群动态及其赤潮成因分析[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(4): 394-398.
- [15] 王文君. 2014年四十里湾一次海洋卡盾藻赤潮发展过程及其成因研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(15): 66-72.
- [16] 平野慶二, 日向野純也, 中田英昭, 等. 諫早湾のアサリ養殖場における夏季大量へい死対策——底層溶存酸素の改善試験[J]. *水産工学*, 2010, 47(1): 53-62.
- [17] WADA M, TAKANO Y, NAGAE S, et al. Temporal dynamics of dissolved organic carbon (DOC) produced in a microcosm with red tide forming algae *Chattonella marina* and its associated bacteria[J]. *Journal of Oceanography*, 2018, 74(6): 587-593.
- [18] 刘望鹏, 黄娟, 杨维东, 等. 营养盐对海洋卡盾藻生长与产毒的影响[J]. *生态毒理学报*, 2010, 5(3): 394-401.
- [19] KATANO T, YOSHINO K, MATSUBARA T, et al. Wax and wane of *Chattonella* (Raphidophyceae) bloom with special reference to competition between *Skeletonema* (Bacillariophyceae) in the Ariake Sea, Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68(4): 497-507.
- [20] ONITSUKA G, AOKI K, SHIMIZU M. Meteorological conditions preceding *Chattonella* bloom events in the Yatsushiro Sea, Japan, and possible links with the East Asian monsoon[J]. *Fisheries Science*, 2015, 81(1): 123-130.
- [21] 宋秀凯, 袁廷柱, 孙玉增, 等. 山东乳山近海海洋卡盾藻 (*Chattonella marina*) 赤潮发展过程及其成因研究[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(3): 425-430.
- [22] 廖姿蓉, 王朝晖. 海洋卡盾藻与三种典型海洋硅藻的种间竞争研究[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(3): 321-327.
- [23] 廖姿蓉. 三种典型海洋硅藻与海洋卡盾藻及锥状斯氏藻的种间竞争研究[D]. 广州: 暨南大学, 2019: 14-17.
- [24] 李斌. 氮、磷等环境因子对有害赤潮生物海洋卡盾藻的生理生态效应[D]. 广州: 暨南大学, 2009: 8-17.
- [25] IMAI I, YAMAGUCHI M, HORI Y. Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan[J]. *Plankton and Benthos Research*, 2006, 1(2): 71-84.