

近 20 年台风事件对黄渤海颗粒有机碳 季节性的影响*

王秀君¹ 王晓雯¹ 尤再进^{2,3} 石洪源³

(1. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院 北京 100875; 2. 大连海事大学港口与航运安全协创中心 辽宁大连 315100; 3. 鲁东大学港口与海岸灾害研究中心 山东烟台 264025)

摘要 边缘海初级生产力普遍较高, 有机碳在沉积物中的埋藏高达全球的 80%。黄渤海是位于我国东部的一个半封闭的温带陆架边缘海, 在近 20 年中, 黄渤海经历的台风事件频率不断增大, 对碳循环关键过程发生多重影响。文章利用多组卫星及再分析资料, 围绕 2003~2020 年期间夏季台风过境对黄渤海关键环境变量的影响, 分析生物和非生物过程对不同海域水体中颗粒有机碳的贡献。结果表明, 夏季台风过境一次、两次对黄渤海叶绿素的影响没有明显差异, 叶绿素浓度增加主要在渤海西南部和南黄海约 50% 的海域。总体上看, 台风过境对渤海、北黄海大部分海域水体中颗粒有机碳影响不大, 但两次台风过境引起了南黄海约 80% 的离岸海域颗粒有机碳浓度的显著增加。南黄海中部分海域水体中颗粒有机碳与叶绿素的比值在台风过后明显降低, 表明该海域颗粒有机碳浓度的提高主要是由生物固碳过程的增强引起。台风过境加剧了黄海与渤海、近岸与离岸的水流交换, 此过程增强了高营养盐和有机物水向南黄海尤其是中部海域的输送, 因而提高了南黄海大部分海域颗粒有机碳浓度。除了光合作用等生物过程及水流交换对颗粒有机碳有影响外, 黄渤海水体中颗粒有机碳浓度还受到沉积物再悬浮、陆源有机碳输入等过程的影响。台风过境可以加剧沉积物再悬浮和陆源有机物的输入, 进一步提高黄渤海近岸及离岸海域颗粒有机碳的浓度。

关键词 叶绿素; 颗粒有机碳; 季节变化; 台风事件; 黄渤海

中图分类号 P734 doi: 10.11693/hyhz20211200328

随着全球气候变化的加剧, 极端气候事件的发生更加频繁。热带风暴潮、台风的频繁出现, 不仅严重影响低纬度海域, 还对中纬度海域环境产生不同程度的影响。而对中纬度边缘海而言, 其影响除了台风事件带来的强风、暴雨对海水物理过程的直接作用, 还有因台风过境引起的风暴浪或者传播到海域的台风涌浪对海岸的强烈冲刷以及暴雨对沿岸表层土壤的冲洗和进而引起的近岸海水的污染。这些水文过程不仅使得台风过境期间海域环境条件发生剧烈变化, 还可能在较长时间对海水的生物地球化学过程产生一系列的影响。

台风带来的强风会引起海水强烈的垂直混合, 使得营养盐丰富的亚表层水进入有光层(Pan *et al*,

2018; Liu *et al*, 2019), 因而促使浮游植物快速生长, 提高初级生产力(Chen *et al*, 2017)。另外, 风暴浪/涌浪和暴雨也会将含有多种养分的陆源物质带入近岸海水, 对浮游植物的生长起到促进作用(Herbeck *et al*, 2011)。有大量研究报道, 边缘海海表在台风过境期间或者台风过后出现不同程度的水华(Liu *et al*, 2019; Ning *et al*, 2019; Hernandez *et al*, 2020)。但另一方面, 有研究报道, 由于大量雨水输入或者低营养盐海水的涌入所造成的稀释作用以及沉积物再悬浮对表层水中光渗透的负面影响, 使得边缘海部分海域浮游植物生物量有所下降(Wetz *et al*, 2008; Hung *et al*, 2010; Huang *et al*, 2011; Wiegner *et al*, 2013)。

由台风事件引发的水文过程, 不仅对边缘海物

* NSFC-山东联合重点基金, U1806227 号。王秀君, 博士生导师, 教授, E-mail: xwang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-12-16, 收修稿日期: 2022-05-02

理和生物过程产生极大影响,还会对海岸带及河口碳循环过程产生多方面的影响,进而影响近岸水体中各形态碳的储量,但有关这方面的研究较少。根据对一组长达 20 年的数据分析发现,美国纽斯河口水体中总有机碳含量在气旋事件过后有明显增加,其原因归咎于初级生产力的增加和陆源有机碳的输入 (Paerl *et al.*, 2020)。另有研究显示,台风事件引起了近岸水体中颗粒有机碳 (particulate organic carbon, POC) 浓度的增加,其原因包括浮游植物快速生长中产生了大量的 POC (Chen *et al.*, 2011), 台风过境引起的陆源有机碳的输入 (Liu *et al.*, 2007), 以及由强烈的再悬浮和近岸上升流输入的底层沉积物 (Shiah *et al.*, 2000)。由此可见,边缘海碳循环对台风事件的响应具有明显的时空异质性特征。

边缘海仅占全球海洋总面积的 7%~10%,但其初级生产力却为全球的 30%,有机碳在沉积物中的埋藏高达全球的 80% (Bauer *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2018)。21 世纪以来,中纬度边缘海受台风事件影响频率明显增加,但有关台风对边缘海碳循环方面的研究较为鲜见。黄渤海是位于我国东部的一个半封闭

的温带陆架边缘海,受到海岸带、河口径流和海洋环流的共同影响,具有复杂的水动力过程和生物地球化学过程。在近 20 年中,黄渤海经历的台风事件频率不断增大,过去 10 年中平均每年有两次台风过境。本文利用多组卫星及再分析资料,围绕 2003~2020 年期间夏季台风过境对黄渤海关键环境变量的影响,分析生物和非生物过程对水体中颗粒有机碳的调控机制,为明确极端气候条件对黄渤海碳循环的影响机理、深入认识中纬度边缘海碳源汇关键过程及其主控因素提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文的研究区域为黄渤海,位于北太平洋西部,三面环陆,为典型的半封闭型陆架边缘海(图 1),沿岸人口密集、河流众多,人类活动和地表变化对黄渤海的影响十分突出。黄渤海总面积约为 46 万 km²,分为渤海、北黄海、南黄海三大海域,平均水深分别为 18、38、44 m。黄渤海的海岸线长约 7 000 km,注入河流主要包括黄河、滦河、辽河、沂河等,每年向黄

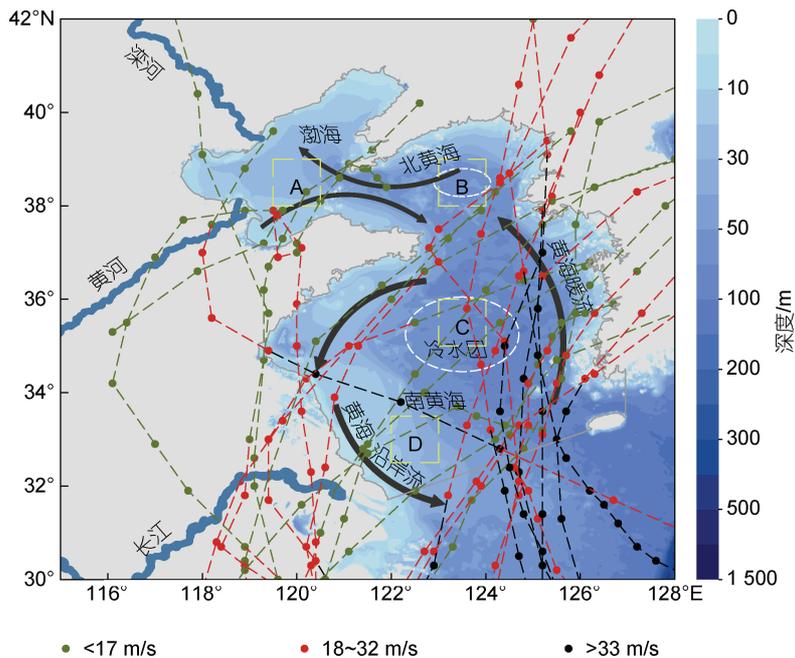


图 1 黄渤海水深、环流系统、2004~2020 年间过境台风的路径(图中彩色折线)及四个代表性区域: 黄河口(A)、北黄海中
部(B)、黄海冷水团上层(C)、古黄河口(D)

Fig.1 Bathymetry and current system in the Yellow-Bohai Sea, the tracks of typhoons during 2004-2010, and the four representative regions: the Huanghe (Yellow) River estuary (A), the center of the North Yellow Sea (B), the center of South Yellow Sea (C) and the submarine delta (D)

注: 测深数据来自 ETOPO1 全球地形模型 (Amante *et al.*, 2009), 河流数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=221>), 台风路径数据来自日本国立信息学研究所 (<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>)

渤海输入约 1.04×10^9 t 的陆源物质(<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb/>)。其中黄河的输沙量最大, 年均输沙量为 6.74×10^8 t, 每年大约携带 3.89×10^5 t POC 进入渤海(Wang *et al.*, 2012)。

黄渤海的水文条件较为复杂, 北向的黄海暖流和南向的黄海沿岸流等黄渤海的主要海流具有“冬强夏弱”的特点。除此之外, 在黄海中心底层海域的“黄海底层冷水团”在一年四季都具有低温特征, 由于“黄海底层冷水团”的两个冷中心分别分布在南黄海和北黄海的中心海域, 夏季黄海水体垂直分层的现象十分显著, 呈现出底层低温高盐、表层高温低盐的温盐分布情况(Oh *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2016)。

2003~2020 年期间, 黄渤海海域有 12 年在 6~10 月期间受到台风过境事件的影响, 其中有 6 年每年仅有一次台风过境, 另外 6 年有两次台风过境。由于黄渤海位于中纬度, 多数台风进入黄渤海时, 风速已经明显减弱, 尤其是经过黄渤海西部或有登陆的台风均已减弱为热带低压(<17 m/s)、热带风暴(18~32 m/s), 而经过黄渤海东部的台风仍保持一定强度(图 1)。为简化起见, 并便于比较两次台风过境和一次台风过境的影响, 本文在图表及结果描述中统一用“台风”这一定义。

1.2 数据来源与处理

本研究使用的海面风场及降水数据来自全球气候的欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据(ERA5), 空间分辨率为 27 km, 时间分辨率为 1 d。叶绿素(chl)和 POC 数据为卫星数据, 由搭载在 Aqua、Terra 两个卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)获取, 为 Level 3 SMI 产品, 空间分辨率为 4 km, 时间分辨率为 1 d, 在我国近海的海洋环境研究中有一定的可信度(Wu *et al.*, 2016; Fan *et al.*, 2018; 田洪阵等, 2019; Zhao *et al.*, 2019)。本文筛选 2003~2020 年间的春季(3~5 月)及夏季(6~8 月)的有关数据来分析台风事件对黄渤海物理环境及生物化学过程的影响。由于数据缺失, ERA5 数据的时间跨度为 2003~2019 年。

由于黄渤海属于边缘海, 近岸海域海水较浅, 海底的反射率会严重影响相应水域的光学性质, 因此我们只对水深为 5 m 以上的区域进行分析。由 MODIS 直接获得的 chl 数据(公式 1~4)、POC 数据(公式 5)的算法如下:

$$\text{chl}_s = \begin{cases} \text{chl}_{\text{Cl}} & \text{chl}_{\text{Cl}} \leq 0.25 \\ \text{chl}_{\text{com}} & 0.25 < \text{chl}_{\text{Cl}} \leq 0.3, \\ \text{chl}_{\text{oc3}} & \text{chl}_{\text{Cl}} > 0.3 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{chl}_{\text{Cl}} = 10^{-0.4909 + 191.659 \left\{ R_{555} - \left[R_{443} + \frac{(555-443)(R_{667} - R_{443})}{667-443} \right] \right\}}, \quad (2)$$

$$\text{chl}_{\text{oc3}} = 10^{0.2424 + \sum_{i=1}^4 a_i \left[\log_{10} \left(\frac{R_{443}}{R_{547}} \right) \right]}, \quad (3)$$

$$\text{chl}_{\text{com}} = 20\text{chl}_{\text{oc3}}(\text{chl}_{\text{Cl}} - 0.25) + 20\text{chl}_{\text{Cl}}(0.3 - \text{chl}_{\text{Cl}}), \quad (4)$$

$$\text{POC} = 203.2 \left(\frac{R_{443}}{R_{547}} \right)^{-1.034}, \quad (5)$$

其中, R_{443} 、 R_{555} 、 R_{547} 、 R_{667} 分别代表中心波长为 443、555、547、667 nm 波段的遥感反射率, $a_1 \sim a_4$ 的值分别为 -2.742 3、1.801 7、0.001 5、-1.228, chl_{Cl} 代表使用海色指数算法[即式(2)]算得的海表 chl 浓度, chl_{oc3} 代表使用 OC3 算法[即式(3)]算得的海表 chl 浓度, chl_{com} 代表结合两种算法[即式(4)]算得的 chl 浓度, chl_s 代表使用 MODIS 标准算法得到的海表 chl 浓度。用此方法估算的 chl 仅能反映海表的浓度, 不能体现黄海冷水团区域存在的次表层 chl 浓度。

由于黄渤海海域属于典型的二类水体, 其光学性质同时受到浮游植物和其他悬浮物质的影响, 进行海色遥感反演时可能会造成 chl、POC 等指标的高估。比如, Wei 等(2019)的研究报道, 遥感获得的 POC 对中国近海陆架的 POC 估计存在较大的误差。但是, 也有研究显示, 黄渤海夏季实测 POC 浓度大约在 $320 \sim 500 \text{ mg/m}^3$ (王雪景等, 2018), 与 MODIS 的夏季 POC 估值范围($240 \sim 415 \text{ mg/m}^3$)相近(Fan *et al.*, 2018)。针对 MODIS-POC 数据中可能存在的异常高值, 参照前期有关研究方法(Wang *et al.*, 2021), 将 1 000 设为阈值, POC 值高于 1 000 的像素点被作为异常点去除, 不参与后续的计算及分析。

前期, Sun 等(2019)提出一种新的应用于黄渤海的 chl 反演算法(chl_l):

$$\text{chl}_l = 0.965e^{-5.931 \log_{10} \left(\frac{R_{488}}{R_{555}} \right)}, \quad (6)$$

其中, R_{488} 代表中心波长为 488 nm 波段的遥感反射率。有分析发现, 用 chl_l 算法反演的 chl 结果在黄渤海比较接近实测数据(He *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2019)。因此, 本研究的结果分析主要采用 chl_l 反演获得的数据, 同时也利用 MODIS 直接获得的 chl 数据分析生物过程对台风事件的响应, 并与 chl_l 反演数据相比较。

1.3 分析方法

在 2003~2020 年的 18 年间, 黄渤海有 12 年出现过台风过境事件, 主要发生在夏季 6~8 月。其中, 发

生一次台风年为 2004、2005、2007、2008、2009 和 2015 年, 发生两次台风的年为 2011、2012、2014、2018、2019 和 2020 年, 无台风年为 2003、2006、2010、2013、2016 和 2017 年。由于黄渤海的物理、生物化学等过程有明显的季节性和年际变化特征, 为了排除年际变化的影响, 本文重点分析比较有台风和无台风年风场、降雨、chl、POC 等指标由春季(3~4 月)到夏季(7~8 月)的季节性变化。

在本研究中, 数据获取和处理工作在 Google Earth Engine (GEE) 平台上完成, 统计分析利用 Matlab 进行, 图形制作利用 Spyder 等软件完成。

2 结果分析

2.1 台风过境对黄渤海风场和降雨的影响

黄渤海的风场在正常年份有明显的空间异质性及季节性特征, 春季的风场在南黄海中心海域(<0.6 m/s)处显著低于其他区域($\sim 1\sim 3$ m/s)(图 2a), 而夏季风场在位于南黄海西南部的长江冲淡水区域最高(>3 m/s), 向东北方向逐渐减弱, 北黄海和渤海多数海域风速为 $1\sim 2$ m/s (图 2b)。总体上看, 黄渤海夏季平均风场在正常年份和有台风过境年份没有明显的变化(图 2d, 2e, 2f); 但有台风过境的年份春季风速在多数海域显著大于无台风年份, 其中, 有一次台风过境年

份的风速高于两次台风过境年份(图 2a, 2b, 2c)。

图 3 显示, 黄渤海夏季降雨约为 $3\sim 10$ mm/d, 显著高于春季($1\sim 3$ mm/d); 在无台风年份, 南黄海降雨量要高于北黄海和渤海。春季降雨在有台风年份与无台风年份的差异总体上不大(图 3d, 3e), 而夏季降雨在大部分海域表现为有台风年份大于无台风年份(图 3i, 3j); 一次台风过境年份黄海大部分海域夏季降雨增加(图 3i, 3n), 而两次台风过境年份渤海夏季降雨增加(图 3j, 3o)。

2.2 台风过境对黄渤海叶绿素和颗粒有机碳季节性的影响

黄渤海海表叶绿素存在明显的季节性和空间异质性(图 4)。很明显, 海表叶绿素在近岸海域(约 $1.5\sim 4$ mg/m^3)显著高于离岸海域(多为 $0.5\sim 2$ mg/m^3), 其空间差异在夏季要远大于春季。叶绿素的季节性变化在有台风年份和无台风年份存在一定相似性, 总体上看, 渤海大部分海域叶绿素在夏季高于春季, 但北黄海和南黄海除了近岸以外的海域叶绿素在春季明显高于夏季。夏季台风过境在不同程度上增加了黄渤海夏季叶绿素的浓度, 一次台风过境年份夏季叶绿素在大部分近岸海域有一定程度的增加(图 4i, 4n), 而两次台风过境年份夏季叶绿素在南黄海中部冷水团处有明显增加(图 4j, 4o)。

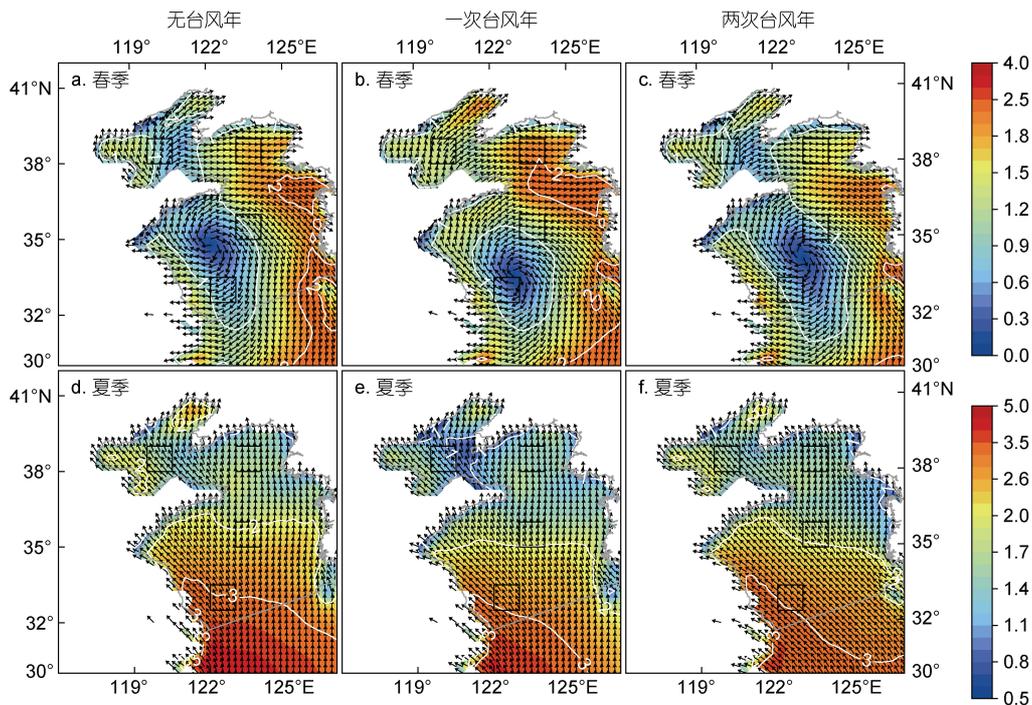


图 2 黄渤海无台风、一次台风、两次台风年份春季和夏季平均风速(m/s)

Fig.2 Mean wind speed (m/s) in spring and summer in the years with zero, one, and two typhoons per year

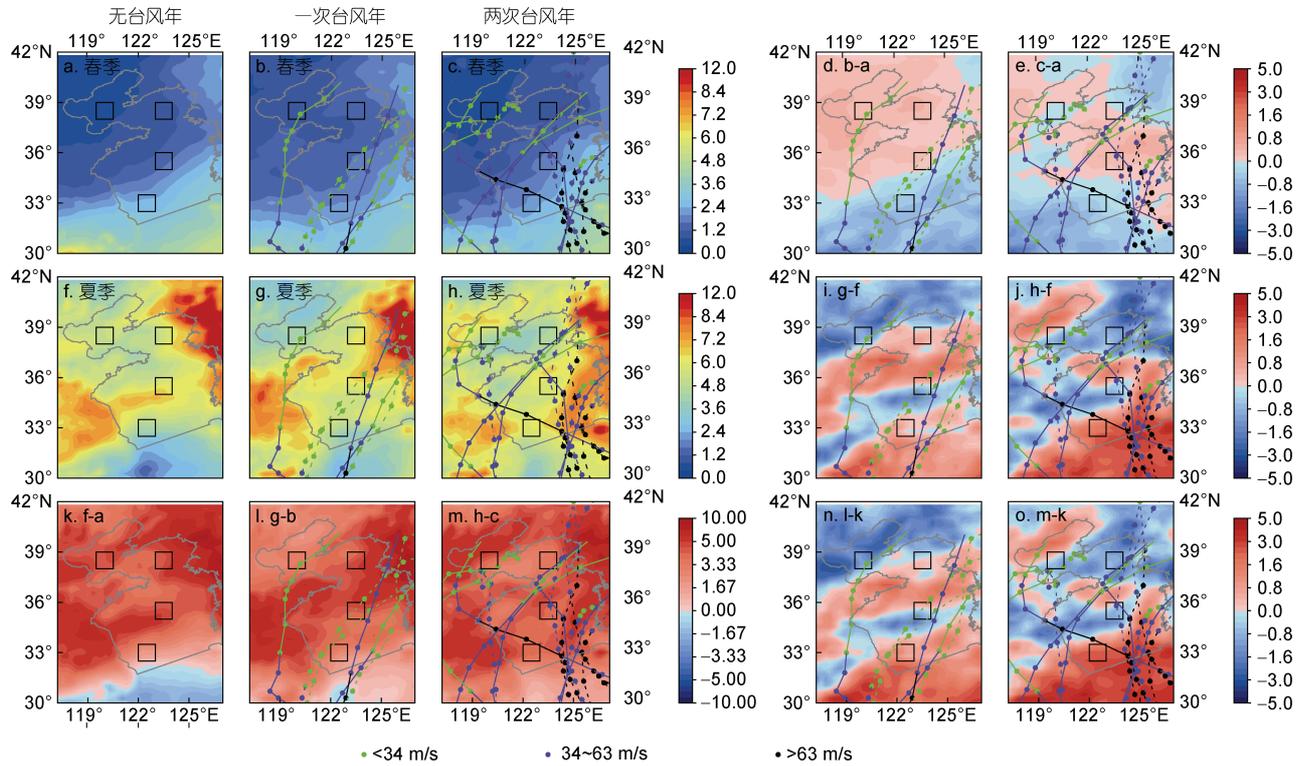


图 3 黄渤海无台风、一次台风、两次台风年份春季和夏季平均降雨量(mm/d)及其季节差异
 Fig.3 Mean precipitation (mm/d) in spring and summer of years with zero, one, and two typhoons per year

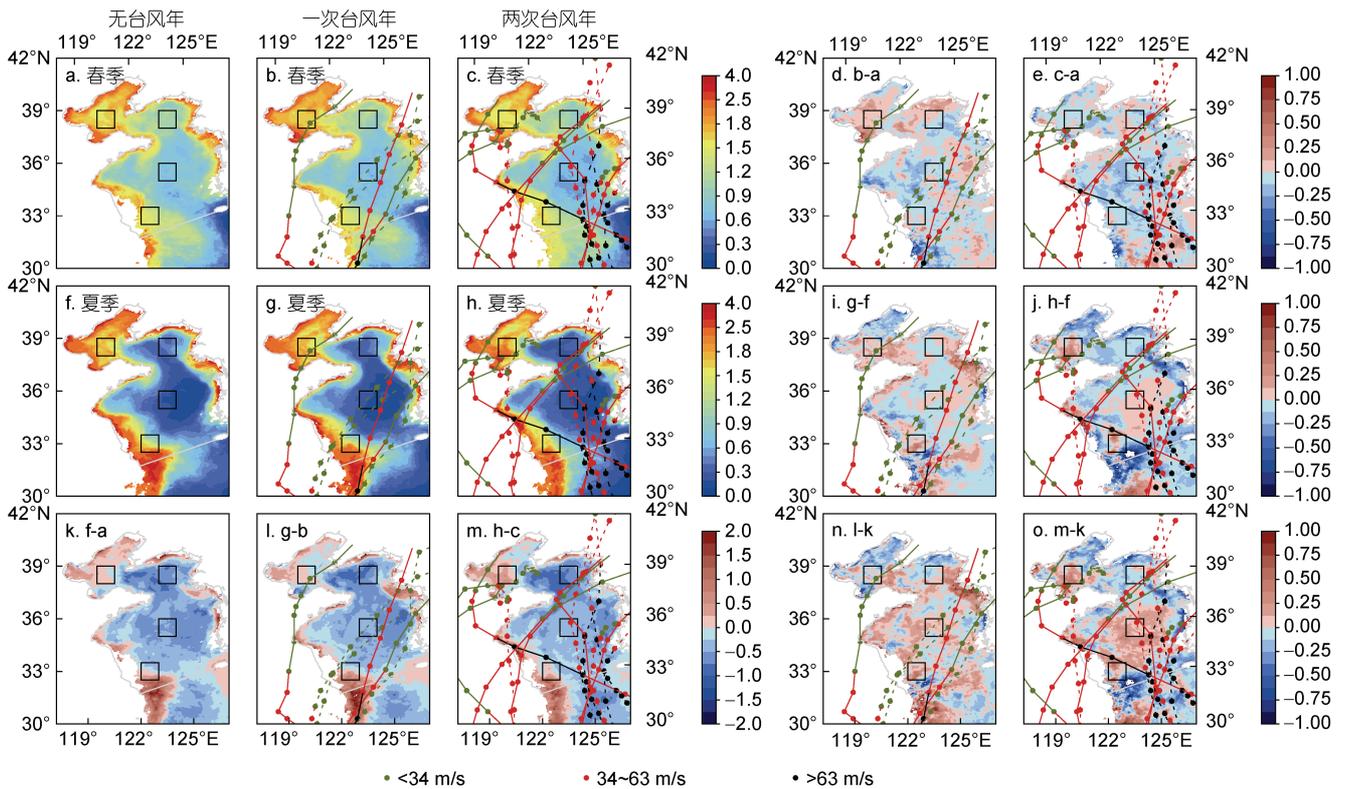


图 4 黄渤海无台风、一次台风、两次台风年份春季和夏季平均叶绿素浓度(mg/m³)及其季节差异
 Fig.4 Mean chlorophyll (mg/m³) in spring and summer of the years with zero, one, and two typhoons per year

黄渤海颗粒有机碳的空间变化及季节性特征均十分明显(图 5)。与叶绿素相似,颗粒有机碳在近岸海域($>400 \text{ mg/m}^3$)也明显高于离岸海域(约 $200\sim 400 \text{ mg/m}^3$),其空间差异在夏季也远大于春季(图 5)。很明显,就无台风年而言,除了渤海的部分海域和古黄河口浅水区以外,黄渤海其他海域颗粒有机碳在

春季显著高于夏季,其季节差达 200 mg/m^3 以上(图 5k)。台风过境降低了渤海、北黄海大部分海域夏季颗粒有机碳的浓度,但在不同程度上提高了南黄海近 50% 海域的夏季颗粒有机碳的浓度,并减小了季节性差异,其中,两次台风过境年份南黄海颗粒有机碳的变化最为明显(图 5n, 5o)。

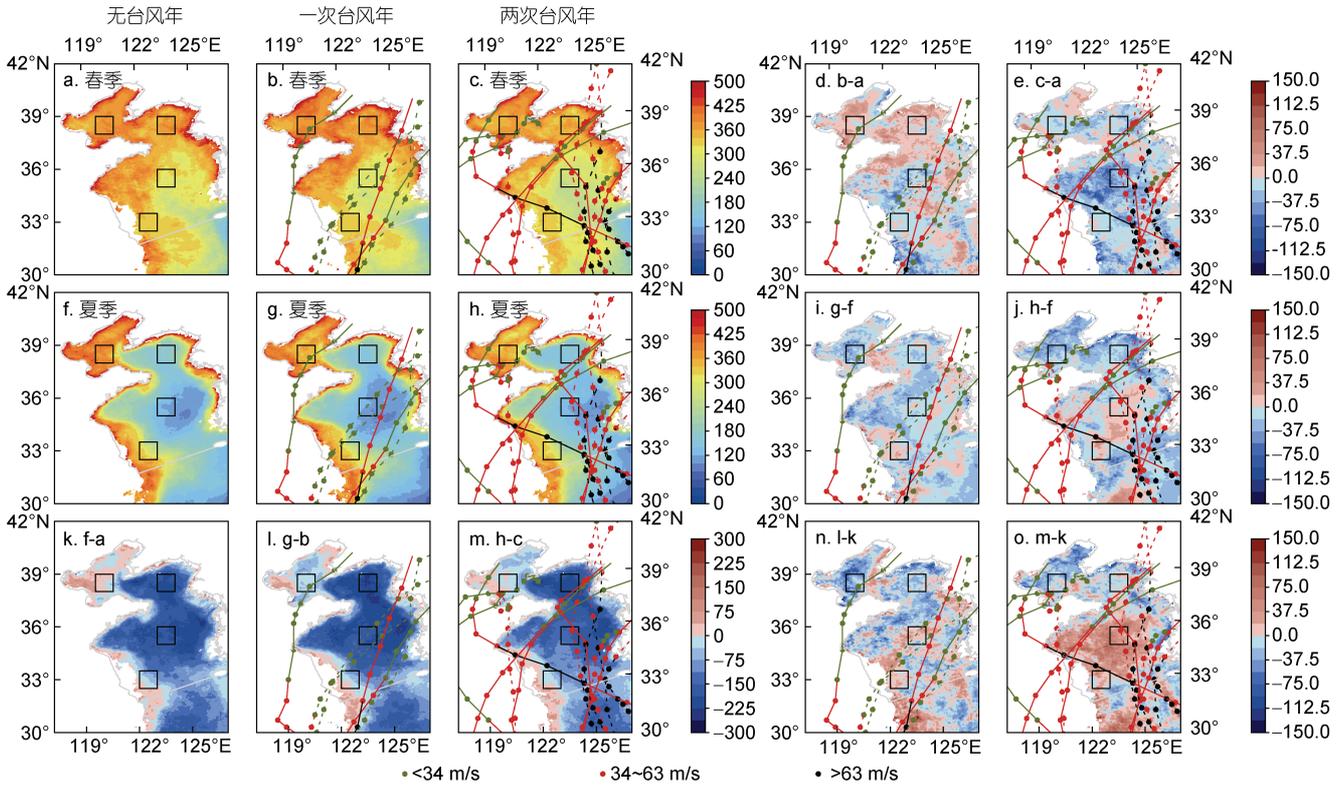


图 5 黄渤海无台风、一次台风、两次台风年份春季和夏季平均颗粒有机碳浓度(mg/m^3)及其季节差异
Fig.5 Mean particulate organic carbon (mg/m^3) in spring and summer of the years with zero, one, and two typhoons per year

2.3 台风过境对黄渤海颗粒有机碳与叶绿素比值的影响

如图 6 所示,黄渤海海表颗粒有机碳与叶绿素的比值(POC/chl)呈现出明显的空间变化及季节性的特征。就离岸海域而言,POC/chl 在渤海的值及其范围都最小,约为 $150\sim 200 \text{ g/g}$,北黄海次之,大约在 $300\sim 400 \text{ g/g}$ 范围内,南黄海最大,为 $300\sim 900 \text{ g/g}$ 。在无台风年份,除了近岸以外的黄渤海海域,夏季 POC/chl 比春季高 $100\sim 300 \text{ g/g}$ (图 6k)。在有台风年份,渤海及黄海近岸的一些海域夏季 POC/chl 比春季低约 100 g/g ,而北黄海和南海海的离岸海域夏季 POC/chl 比春季高 $150\sim 300 \text{ g/g}$ (图 6l, 6n),其季节性差异在有两次台风过境年份更加明显(图 6n)。总体而言,一次台风过境降低了黄渤海大部分离岸海域的

POC/chl,其中影响最大的是南黄海中部海域(图 6n);而两次台风过境仅降低了整个渤海和南黄海中部小部分海域的 POC/chl,南黄海其他海域和整个北黄海的 POC/chl 均呈现不同程度的增加(图 6o)。

3 讨论

3.1 不同叶绿素反演数据的比较

用不同的反演方法所获得的叶绿素数据之间会存在一定程度的差异。很明显,由 MODIS 反演所获得的叶绿素浓度在整个黄渤海远高于用中国近海反演模型计算的叶绿素,其中,在渤海的差异最为显著(表 1)。然而,本研究的重点是评估台风对黄渤海颗粒有机碳时空分布的影响机制,分析叶绿素的目的是明确生物过程变化对颗粒有机碳的相对贡献。表 1

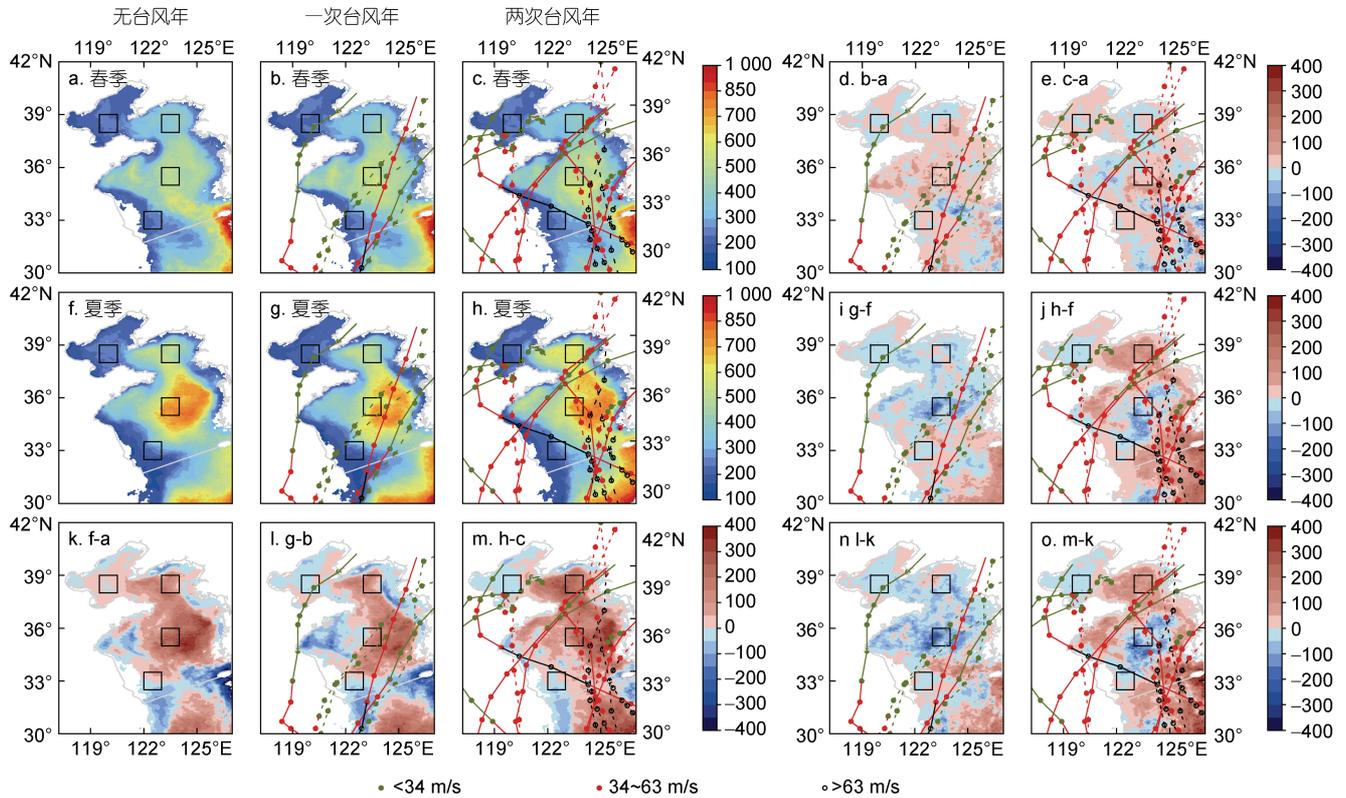


图 6 黄渤海无台风、一次台风、两次台风年份春季和夏季颗粒有机碳与叶绿素平均比值及其季节差异

Fig.6 Mean ratio of particulate organic carbon vs chlorophyll in spring and summer of the years with zero, one, and two typhoons per year

表 1 由 MODIS 反演方法(chl_1)和中国近海反演模型(chl_s)所获得的渤海、北黄海、南黄海在无台风、有台风年份春季和夏季的平均叶绿素浓度以及颗粒有机碳与叶绿素的比值(POC/ chl)

Tab.1 Mean chlorophyll concentrations from MODIS and an model for China's marginal seas and particulate organic carbon vs chlorophyll ratio (POC/ chl) in spring and summer of non-typhoon and typhoon years.

		渤海		北黄海		南黄海	
		无台风	台风年	无台风	台风年	无台风	台风年
chl_1 (mg/m^3)	春季	1.85±0.40	1.85±0.40	1.25±0.40	1.23±0.30	1.00±0.50	0.96±0.50
	夏季	1.91±0.50	1.91±0.50	0.85±0.70	0.79±0.60	0.80±0.70	0.77±0.70
	差值	0.06±0.30	0.07±0.30	-0.4±0.40	-0.44±0.40	-0.23±0.30	-0.21±0.30
chl_s (mg/m^3)	春季	4.13±0.90	4.16±0.90	2.87±0.90	2.85±0.80	2.31±1.00	2.22±1.00
	夏季	4.53±1.40	4.49±1.50	1.99±1.60	1.83±1.50	1.84±1.60	1.75±1.70
	差值	0.39±0.90	0.34±1.10	-0.88±1.00	-1.02±0.90	-0.54±0.80	-0.50±0.80
POC/ chl_1 (g/g)	春季	222±24	225±23	337±55	337±54	412±139	412±141
	夏季	223±30	212±24	386±100	404±113	457±194	460±187
	差值	1±15	-13±16	49±60	67±70	50±113	49±88
POC/ chl_s (g/g)	春季	100±11	101±11	145±21	144±21	163±41	164±42
	夏季	97±13	93±11	159±34	163±36	172±52	174±52
	差值	-3±7	-8±8	13±19	19±20	11±25	11±20

显示, 两套数据在黄渤海各区域叶绿素的季节性变化及其对台风事件的响应程度十分相近。比如, 在渤海和南黄海, 夏季与春季叶绿素浓度差在无台风、有台风年份没有明显差别。就北黄海而言, 两套数据均

显示, 夏季与春季叶绿素浓度差在有台风年份比无台风年份大约 10%, 即 Δchl_s (夏季 chl_s 和春季 chl_s 的差值)分别为 -0.44、-0.4 mg/m^3 , 而 Δchl_1 (夏季 chl_1 和春季 chl_1 的差值)分别为 -1.02、-0.88 mg/m^3 。

水体中 POC/chl 经常被用于分析颗粒有机碳的来源(Hung *et al*, 2010; Yu *et al*, 2019)。虽然, 由于两套叶绿素数据的差异导致了 POC/chl 上的差异, 但二者比值的空间分布特征、季节性变化及其对台风的响应却是一致的(表 1)。比如, 两套数据 POC/chl 在北黄海、南黄海均为夏季高于春季; 此外, 两套数据均显示, 台风过境降低了渤海夏季 POC/chl 的比值, 提高了北黄海 POC/chl, 但对南黄海 POC/chl 没有影响。由此可见, 用 MODIS 反演方法和用中国近海反演模型所得的叶绿素来分析生物过程对台风的响应, 所得出的结论是一致的。

3.2 台风对边缘海环境条件及生物过程的影响

台风过境带来的强风和暴雨对边缘海产生多方面的影响。强风通常会增大沿岸海域的上升流及海水垂直混合的强度, 而暴雨也会在一定程度上增强海水的垂直混合; 暴雨同时也会加剧海岸带的水土流失, 使得富含多种养分及有机物的陆源物质流入近海(Shiah *et al*, 2000; Paerl *et al*, 2020)。这些过程都将提高近海海域表层海水中营养盐的浓度(Zheng *et al*, 2007; Liu *et al*, 2019)。最近的研究发现, 2019 年夏季的利奇马台风过境, 使得北黄海水体中氮素营养盐提高了 90% (卢龙飞等, 2020)。

一般而言, 营养盐的增加会促进海水中浮游植物的生长。有研究显示, 台风过境显著提高了边缘海水体中叶绿素的浓度(Shiah *et al*, 2000)。然而, 台风过境对边缘海叶绿素的影响存在明显的空间异质性。前期研究发现, “利奇马”台风过境后一周, 黄海大部分海域叶绿素有不同程度的提高, 但渤海海域叶绿素总体却呈现了下降的趋势(Wang *et al*, 2021)。一般而言, 在上升流及海水垂直混合增强的海域, 因为营养盐浓度的增加能够促进水体中浮游植物的生长, 因而提高叶绿素的浓度; 而在受到大量降雨影响的海域, 由于稀释作用引起营养盐浓度的下降, 会导致叶绿素浓度降低(Huang *et al*, 2011; Wiegner *et al*, 2013)。

本研究发现, 在那些仅有一次台风过境的年份, 台风在进入黄渤海时已减弱为热带低压或者热带风暴, 黄海水体中叶绿素浓度增加幅度不大($<0.2 \text{ mg/m}^3$); 而在两次台风过境的年份, 台风在进入黄渤海时仍然保持一定强度(为热带风暴或者台风), 对黄渤海水体中叶绿素的影响较大, 比如南黄海冷水团上层的叶绿素浓度显著提高($>0.25 \text{ mg/m}^3$)。就黄渤海正常年份而言, 只有黄河口海域夏季叶绿素比春季高, 但其

余大部分海域叶绿素是春季高于夏季。因而, 夏季台风过境的影响不仅体现在对夏季叶绿素的影响, 还会反映在叶绿素的季节变化上。很明显, 二次台风过境显著提高了黄河口、古黄河口和南黄海冷水团海域夏季叶绿素浓度, 而一次台风过境仅对古黄河口和南黄海冷水团海域夏季叶绿素产生显著的正面效应(表 2)。总体上看, 台风过境事件对黄渤海水体中叶绿素的影响程度远不如对其他边缘海的影响。早期研究显示, 台风过境使得南海北部的叶绿素提高了约 50%~100% (Lin *et al*, 2003; Zheng *et al*, 2007)。

3.3 台风对边缘海碳循环过程的影响

有研究报道, 台风过境可以显著提高边缘海水体中的颗粒有机碳浓度, 其原因除了与浮游植物的快速生长有关以外(Hung *et al*, 2010), 还与增强的陆源有机碳输入及沉积物再悬浮有关(Shiah *et al*, 2000; Fu *et al*, 2016; D'Sa *et al*, 2019)。本研究发现, 黄海水体中颗粒有机碳对台风过境的响应与叶绿素的响应在很大程度上具有的相似性, 尤其是在南黄海的中部, 二者的增加都最为显著(图 4o, 5o), 说明在黄海的大部分海域生物过程对颗粒有机碳贡献的重要性。然而在渤海, 颗粒有机碳对台风过境的响应与叶绿素的响应存在较大差异, 渤海的大部分海域在有台风事件的年份显示叶绿素从春季到夏季有所增加(图 4o), 但颗粒有机碳除了近岸海域以外的海域均显示降低(图 5o), 这是由于台风过境加剧了渤海与北黄海的水交换过程所致(Wang *et al*, 2021)。进一步对黄渤海典型海域的分析发现, 夏季台风过境对黄河口、北黄海中部海域颗粒有机碳的影响不明显, 但显著提高了古黄河口和南黄海冷水团海域颗粒有机碳浓度(表 2)。

渤海、黄海水体中夏季颗粒有机碳对台风过境的响应差异可能源于几个方面。其一, 生物过程的季节性在不同海域有所不同。渤海的叶绿素在夏季高于春季, 即光合作用在夏季较强, 因而夏季台风过境引起的营养盐浓度的增加能够促进了光合作用及其他生物过程对该海域颗粒有机碳的贡献(Wang *et al*, 2021)。而在黄海离岸海域, 多数年份光合作用在春季比夏季强, 这与其水深相对较深、夏季垂直混合弱所导致的营养盐浓度相对偏低有关。北黄海在过去 20 年仅发生过数次热带低压、热带风暴事件, 直接受影响的海域仅为其东南部, 然而这类事件明显降低了北黄海夏季初级生产力(图 4o)和颗粒有机碳浓度(图 5o), 这可能是由于增强了的黄海暖流致使营养盐和

表 2 典型海域在无台风、有台风年份春季、夏季叶绿素(chl)、颗粒有机碳(POC)浓度
Tab.2 Mean chlorophyll and particulate organic carbon (POC) concentrations in spring and summer of non-typhoon and typhoon years

	chl (mg/m ³)			POC (mg/m ³)		
	无台风	一次台风	两次台风	无台风	一次台风	两次台风
黄河口						
春季	1.62 ^b	1.70 ^a	1.61 ^b	390 ^{ab}	392 ^a	372 ^b
夏季	1.73 ^a	1.72 ^a	1.85 ^a	376 ^a	353 ^a	350 ^b
差值	0.11 ^b	0.03 ^b	0.26 ^a	-16 ^a	-38 ^a	-21 ^a
北黄海						
春季	1.09 ^a	1.09 ^a	1.02 ^a	393 ^{ab}	414 ^a	368 ^b
夏季	0.37 ^a	0.36 ^a	0.29 ^b	172 ^a	158 ^a	146 ^b
差值	-0.71 ^a	-0.74 ^a	-0.74 ^a	-223 ^a	-251 ^b	-226 ^a
冷水团						
春季	0.77 ^a	0.67 ^{ab}	0.64 ^b	325 ^a	329 ^a	282 ^b
夏季	0.20 ^b	0.19 ^b	0.23 ^a	117 ^a	108 ^b	120 ^a
差值	-0.57 ^c	-0.48 ^b	-0.43 ^a	-213 ^b	-222 ^b	-168 ^a
古黄河口						
春季	1.38 ^a	1.33 ^{ab}	1.29 ^b	337 ^a	326 ^b	319 ^b
夏季	1.32 ^a	1.42 ^a	1.40 ^a	288 ^a	282 ^a	295 ^a
差值	-0.07 ^b	0.08 ^a	0.09 ^a	-51 ^b	-47 ^b	-28 ^a

注: 均值后有相同字母表示 chl 或 POC 浓度在无台风、有台风年份之间的差异在 $P < 0.05$ 水平上不显著

颗粒有机碳浓度偏低的水由南黄海涌入, 对北黄海的水起到稀释作用。相反, 台风过境不仅促进南黄海西部海域生物固碳, 提高该海域颗粒有机碳浓度, 还可能通过增强了的水交换过程向南黄海中部输入大量的营养盐及颗粒有机碳, 进而提高冷水团海域颗粒有机碳的浓度。

用 POC/chl 或者颗粒有机物中碳氮比(POC/PON)可以区分水体中生物固碳、非生物过程或者陆源有机碳输入对颗粒有机碳的贡献(Shiah *et al.*, 2000; Hung *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2019)。一般而言, POC/chl、POC/PON 越大, 表明水体中生物过程对颗粒有机碳的贡献越小, 而外源输入的贡献越大。前期有观测数据显示, POC/chl 在黄海离岸海域相对偏高(王雪景等, 2018), 说明离岸海域生物过程对颗粒有机碳的贡献比近岸海域小。这是因为近岸海域有较丰富的营养盐, 浮游植物生长较旺盛, 因而水生生物过程对颗粒有机碳的贡献较大。本研究发现, 在一次台风过境年份, 黄渤海大部分海域的 POC/chl 比无台风年份的低(图 6n), 而在两次台风过境的年份, 整个渤海和南黄海中部海域 POC/chl 偏低, 但北黄海 POC/chl 明显偏高(图 6o)。这些结果进一步表明, 台风过境提高了渤海和南黄海中部海域生物过程对颗粒有机碳的贡献,

但对北黄海而言, 台风过境增大了非生物过程对该海域颗粒有机碳的贡献。早期研究显示, 台风过境显著提高了边缘海水体中颗粒有机碳、有机氮的浓度, 但二者的增涨并不同步, 颗粒有机氮浓度由近岸到离岸呈现增加趋势, 但颗粒有机碳浓度在近岸海域明显高于离岸海域, POC/PON 在近岸海域最高, 说明台风过境增加了陆源有机碳的输入(Shiah *et al.*, 2000)。而后期在美国一些近海的研究发现, 入海河水、洪水中颗粒有机碳浓度在台风过境后提高了 2 倍以上(Paerl *et al.*, 2001; D'Sa *et al.*, 2019), 反映了台风过境带来的暴雨会通过河流和海岸线将更多的陆源有机物输入到近岸海域。就黄渤海这样的边缘浅海而言, 沉积物再悬浮是海水中颗粒有机碳浓度高的另一个原因(Fan *et al.*, 2018), 而台风过境会加剧近岸海域沉积物再悬浮(Fu *et al.*, 2016), 增加非生物过程对黄渤海颗粒有机碳的贡献。

4 结论

黄渤海夏季平均风场在正常年份和有台风过境年份没有明显的差异, 但有台风过境的年份春季风速在多数海域显著大于无台风年份。相反, 春季降雨在有台风年份与无台风年份的差异总体上不大, 而

夏季降雨在大部分海域表现为有台风年份大于无台风年份。夏季台风过境增加了渤海部分海域、南黄海西部和中部冷水团上层水体中叶绿素的浓度。夏季台风过境降低了渤海颗粒有机碳的浓度,但在不同程度提高了南黄海约 50% 海域颗粒有机碳的浓度。黄渤海 POC/chl 呈现明显的季节性和空间异质性,总体上,在夏季偏高。夏季台风过境明显降低了渤海和南黄海中部水体中 POC/chl,其原因在于叶绿素的增长程度超过了颗粒有机碳,说明该海域颗粒有机碳的增加主要受生物过程的影响;而在黄海大部分海域,POC/chl 在有二次台风过境年份增大,说明非生物过程对该海域颗粒有机碳贡献增大。

参 考 文 献

- 王雪景, 金春洁, 王丽莎, 等, 2018. 2016 年夏季黄、渤海颗粒有机碳的分布特征及影响因素[J]. 海洋学报, 40(10): 200-208.
- 卢龙飞, 常丽荣, 肖露阳, 等, 2020. 台风对桑沟湾, 爱莲湾表层海水的影响探究[J]. 环境保护前沿, 10(1): 39-48
- 田洪阵, 刘沁萍, Joaquim I. Goes, 等, 2019. 近 20 年渤海叶绿素 a 浓度时空变化[J]. 海洋学报, 41(08): 131-140.
- AMANTE C, EAKINS B W, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis [R]. NOAA Technical Memorandum.
- BAUER J E, CAI W J, RAYMOND P A, *et al*, 2013. The changing carbon cycle of the coastal ocean [J]. *Nature*, 504(7478): 61-70.
- CHEN D X, HE L, LIU F F, *et al*, 2017. Effects of typhoon events on chlorophyll and carbon fixation in different regions of the East China Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 194: 229-239.
- CHEN Y Q, TANG D L, 2011. Remote sensing analysis of impact of typhoon on environment in the sea area south of Hainan island [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 10: 1621-1629.
- D'SA E J, JOSHI I D, LIU B Q, *et al*, 2019. Biogeochemical response of Apalachicola bay and the shelf waters to hurricane Michael using ocean color semi-analytic/inversion and hydrodynamic models [J]. *Frontiers in Marine Science*, 6: 523, doi: 10.3389/fmars.2019.00523.
- FAN H, WANG X J, ZHANG H B, *et al*, 2018. Spatial and temporal variations of particulate organic carbon in the Yellow-Bohai Sea over 2002-2016 [J]. *Scientific Reports*, 8(1): 7971.
- FANG Y, CHEN Y J, TIAN C G, *et al*, 2018. Cycling and budgets of organic and black carbon in coastal Bohai Sea, China: impacts of natural and anthropogenic perturbations [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(6): 971-986.
- FU D Y, LUAN H, PAN D L, *et al*, 2016. Impact of two typhoons on the marine environment in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 34(4): 871-884.
- GUO J, ZHANG H, CUI T W, *et al*, 2016. Remote sensing observations of the winter Yellow Sea warm current invasion into the Bohai Sea, China [J]. *Advances in Meteorology*, 2016: 8170296, doi: 10.1155/2016/8170296.
- HE X, BAI Y, PAN D, *et al*, 2013. Satellite views of the seasonal and interannual variability of phytoplankton blooms in the eastern China seas over the past 14 yr (1998-2011) [J]. *Biogeosciences*, 10(7): 4721-4739.
- HERBECK L S, UNGER D, KRUMME U, *et al*, 2011. Typhoon-induced precipitation impact on nutrient and suspended matter dynamics of a tropical estuary affected by human activities in Hainan, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(4): 375-388.
- HERNANDEZ W J, ORTIZ-ROSA S, ARMSTRONG R A, *et al*, 2020. Quantifying the effects of hurricanes Irma and Maria on coastal water quality in Puerto Rico using moderate resolution satellite sensors [J]. *Remote Sensing*, 12(6): 964.
- HUANG W R, MUKHERJEE D, CHEN S S, 2011. Assessment of Hurricane Ivan impact on chlorophyll-a in Pensacola Bay by MODIS 250 m remote sensing [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(3): 490-498.
- HUNG C C, GONG G C, CHOU W C, *et al*, 2010. The effect of typhoon on particulate organic carbon flux in the southern East China Sea [J]. *Biogeosciences*, 7(10): 3007-3018.
- LIN I, LIU W T, WU C C, *et al*, 2003. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(13): 1718, doi: 10.1029/2003gl017141.
- LIU K K, KAO S J, WEN L S, *et al*, 2007. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter and biogeochemical processes in the eutrophic Danshuei Estuary in northern Taiwan [J]. *Science of the Total Environment*, 382(1): 103-120.
- LIU Y P, TANG D L, EVGENY M, 2019. Chlorophyll concentration response to the typhoon wind-pump induced upper ocean processes considering air-sea heat exchange [J]. *Remote Sensing*, 11(15): 1825.
- NING J, XU Q, FENG T, *et al*, 2019. Upper ocean response to two sequential tropical cyclones over the northwestern Pacific ocean [J]. *Remote Sensing*, 11(20): 2431.
- OH K H, LEE S, SONG K M, *et al*, 2013. The temporal and spatial variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in the southeastern Yellow Sea, 2009-2011 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(9): 1-10.
- PAERL H W, BALES J D, AUSLEY L W, *et al*, 2001. Ecosystem impacts of three sequential hurricanes (Dennis, Floyd, and Irene) on the United States' largest lagoonal estuary, Pamlico Sound, NC [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(10): 5655-5660.
- PAERL H W, HALL N S, HOUNSHELL A G, *et al*, 2020. Recent increases of rainfall and flooding from tropical cyclones (TCs) in North Carolina (USA): implications for organic matter and nutrient cycling in coastal watersheds [J]. *Biogeochemistry*, 150(2): 197-216.

- PAN J Y, HUANG L, DEVLIN A T, *et al*, 2018. Quantification of typhoon-induced phytoplankton blooms using satellite multi-sensor data [J]. *Remote Sensing*, 10(2): 318.
- SHIAH F K, CHUNG S W, KAO S J, *et al*, 2000. Biological and hydrographical responses to tropical cyclones (typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait [J]. *Continental Shelf Research*, 20(15): 2029-2044.
- SUN D Y, HUAN Y, WANG S Q, *et al*, 2019. Remote sensing of spatial and temporal patterns of phytoplankton assemblages in the Bohai Sea, Yellow Sea, and east China sea [J]. *Water Research*, 157: 119-133.
- WANG X C, MA H Q, LI R H, *et al*, 2012. Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: the Yellow River and Changjiang (Yangtze) River [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(2): GB2025, doi: 10.1029/2011gb004130.
- WANG X W, WANG X J, YOU Z J, 2021. Variations of chlorophyll-a and particulate organic carbon in the Yellow-Bohai Sea: in response to the Typhoon Lekima event [J]. *Geoscience Letters*, 8(1): 30.
- WEI X D, SHEN F, PAN Y Q, *et al*, 2019. Satellite observations of the diurnal dynamics of particulate organic carbon in optically complex coastal oceans: the continental shelf seas of China [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7): 4710-4726.
- WETZ M S, PAERL H W, 2008. Estuarine phytoplankton responses to hurricanes and tropical storms with different characteristics (Trajectory, Rainfall, Winds) [J]. *Estuaries and Coasts*, 31(2): 419-429.
- WIEGNER T N, MEAD L H, MOLLOY S L, 2013. A comparison of water quality between low-and high-flow river conditions in a tropical estuary, Hilo Bay, Hawaii [J]. *Estuaries and Coasts*, 36(2): 319-333.
- WU X, DUAN H Q, BIN S, *et al*, 2016. Interannual and seasonal variation of chlorophyll-a off the Yellow River Mouth (1997-2012): dominance of river inputs and coastal dynamics [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 183: 402-412.
- YU J, WANG X J, FAN H, *et al*, 2019. Impacts of physical and biological processes on spatial and temporal variability of particulate organic carbon in the North Pacific Ocean during 2003-2017 [J]. *Scientific Reports*, 9(1): 16493.
- ZHAO N, ZHANG G L, ZHANG S, *et al*, 2019. Temporal-spatial distribution of chlorophyll-a and impacts of environmental factors in the Bohai Sea and Yellow Sea [J]. *IEEE Access*, 7: 160947-160960, doi: 10.1109/access.2019.2950833.
- ZHENG G M, TANG D L, 2007. Offshore and nearshore chlorophyll increases induced by typhoon winds and subsequent terrestrial rainwater runoff [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 333: 61-74, doi: 10.3354/meps333061.

IMPACTS OF TYPHOON EVENTS ON THE SEASONAL VARIATION OF PARTICULATE ORGANIC CARBON IN THE YELLOW-BOHAI SEA IN THE PAST TWO DECADES

WANG Xiu-Jun¹, WANG Xiao-Wen¹, YOU Zai-Jin^{2,3}, SHI Hong-Yuan¹

(1. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 315100, China; 3. Centre for Ports and Coastal Disaster Mitigation, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract Typhoon events have large impacts on marginal seas' environmental conditions with implications for carbon cycling. However, little is known about the responses of particulate organic carbon (POC) to typhoon events in the Yellow-Bohai Sea (YBS). In this study, we utilized satellite-derived datasets of chlorophyll (chl) and POC, together with key physical parameters, to analyze their responses to the typhoon events during 2003~2020. In the past 18 years, there were 6 years experiencing 1 typhoon event and another 6 years having 2 typhoons, between June and October with weakened wind (lower than category 3 in intensity) and heavy rainfall. Result shows that Chl-*a* was increased in summer of typhoon years in the western Bohai Sea (BS) and western/central South Yellow Sea (SYS), especially in the upper layer of Yellow Sea Cold Water Mass, but decreased in most parts of the North Yellow Sea (NYS). POC is increased in the western/central SYS (by ~50%) and decreased in the BS and most parts of the YYS. In addition, POC/chl ratio was decreased in the BS and central SYS in typhoon years, indicating that elevated POC was largely resulted from enhanced phytoplankton growth. Some coastal regions in the YBS showed an increase in POC/chl ratio, suggesting that there were other POC sources rather than biological contribution, such as sediment resuspension and terrestrial runoff. This study highlights the complex impacts of typhoon on the carbon cycle in marginal seas.

Key words chlorophyll; particulate organic carbon; seasonal variation; typhoon events; Yellow-Bohai Sea