

刘少军,蔡大鑫,韩静,等.基于卫星遥感的南海真光层底颗粒有机碳输出通量时空特征研究[J].海洋气象学报,2022,42(1):32-38.

LIU Shaojun, CAI Daxin, HAN Jing, et al. Study on spatial-temporal characteristics of particulate organic carbon export flux at the bottom of euphotic zone in the South China Sea based on remote sensing[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(1): 32-38. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.01.004. (in Chinese)

基于卫星遥感的南海真光层底颗粒有机碳 输出通量时空特征研究

刘少军^{1,2}, 蔡大鑫^{1,2}, 韩静^{1,2}, 罗琪^{1,2}, 赵婷^{1,2}, 张廷龙^{1,2}

(1. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口 570203; 2. 海南省气象科学研究所, 海南 海口 570203)

摘要: 在加强海洋强国建设、实现我国碳达峰和碳中和愿景目标背景下准确掌握南海碳通量时空变化格局具有重要的现实意义。根据 2009—2018 年 10 a 有机碳通量月度数据集, 分析了南海真光层底颗粒有机碳通量变化特征。结果表明: (1) 南海区域多年真光层底有机碳输出通量年平均值为 $55.40 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 其值大小在空间上的分布存在近岸>陆架>海盆的趋势。(2) 从季节上看, 南海真光层底颗粒有机碳输出通量冬季最高, 春、秋季次之, 夏季最小; 真光层底颗粒有机碳输出通量 1、4、7、10 月平均值分别为 82.43、47.37、46.34、54.75 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。研究结果可为全面掌握南海碳循环过程和机制提供技术支撑。

关键词: 真光层; 颗粒有机碳; 通量; 遥感; 南海

中图分类号: P715.7; P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)01-0032-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.01.004

Study on spatial-temporal characteristics of particulate organic carbon export flux at the bottom of euphotic zone in the South China Sea based on remote sensing

LIU Shaojun^{1,2}, CAI Daxin^{1,2}, HAN Jing^{1,2}, LUO Qi^{1,2}, ZHAO Ting^{1,2}, ZHANG Tinglong^{1,2}

(1. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China; 2. Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou 570203, China)

Abstract It is of great significance to accurately learn the spatial and temporal variation pattern of the carbon flux in the South China Sea, especially under the background of the construction of strong maritime country and China's carbon peak and carbon neutralization strategy. The characteristics of the particulate organic carbon (POC) flux at the bottom of the euphotic zone in the South China Sea are analyzed based on the monthly data set of the organic carbon flux from 2009 to 2018. The results are shown as follows. (1) The annual mean POC export flux in the South China Sea is $55.40 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; the value of POC export flux in the South China Sea is high in the nearshore zone, medium in the continental shelf, and low in the sea basin. (2) The value of POC export flux at the bottom of the euphotic zone in the South China Sea is the highest in winter, followed by spring and autumn, and the lowest in summer; the mean values of POC export flux in January, April, July, and October are 82.43,

收稿日期: 2021-05-29; 修订日期: 2021-12-02

基金项目: 海南省重点研发计划项目 (ZDYF2021SHFZ062); 海南省自然科学基金项目 (421QN373, 421MS0811)

通信作者: 刘少军, 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为卫星遥感应用, cdutlsj@163.com。

47.37, 46.34, and 54.75 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. The results can provide technical support for comprehensively understanding the process and mechanism of the carbon cycle in the South China Sea.

Key words euphotic layer; particulate organic carbon (POC); flux; remote sensing; the South China Sea

引言

边缘海和开阔海构成了全球海洋,据不完全统计,全球边缘海占整个海洋面积的7%~8%,边缘海海水含碳约 3.1×10^{11} t,约占整个开阔海洋的1%;边缘海初级生产力占全球海洋的15%~30%,但约有50%的颗粒无机碳和90%的有机碳存在于边缘海中^[1]。真光层颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)输出通量代表了海洋“生物泵”的固碳能力,是衡量海洋生态系统对大气二氧化碳浓度调控的重要参数。海洋真光层中的浮游植物通过光合作用,每天从大气吸收的碳超过1亿t^[2]。南海总面积约为350万 km^2 ,是我国最大的边缘海,因此厘清南海的颗粒有机碳输出通量对掌握我国海洋的碳源汇格局具有重要的意义。

海洋固碳主要包括两个过程:首先是海水与大气交界面的 CO_2 交换过程;其次是碳在海水中的转换过程。根据调控机制不同,转换过程又可分为:一是物理因素起主导作用的过程,也被称为海洋固碳的“溶解度泵”;二是基于海洋浮游植物光合作用的“生物泵”过程^[1,3]。虽然浮游植物固碳量较大,但所形成的POC在沉降过程中会不断被降解,真正沉降出真光层的POC少于表层初级生产力的15%,而最后到达海底被埋葬的POC只有初级生产力的0.1%^[4]。海洋“生物泵”固碳代表了海洋有效的固碳过程,受浮游植物初级生产力水平的调控,与生源颗粒向真光层外的输出密切相关,悬浮物也可以通过影响真光层深度从而影响水体的初级生产力^[5-6]。因此,在定量研究海洋“生物泵”固碳能力时,可以采用初级生产力水平做大致评估,使用真光层POC输出通量表征海洋“生物泵”的实际固碳水平。传统船测调查中,POC输出通量的研究方法主要有两种:沉积物捕集器法和放射性同位素方法(^{234}Th - ^{238}U)。传统的船舶断面调查方法无法实现对海洋的大面积同步观测,而卫星遥感不仅能够获得大面积同步、长期连续的观测数据,同时在经济上相比船舶测量等方式具有较大的优势。卫星遥感的大范围、长时序观测优势,使其成为研究POC输出通量的必要手段之一^[7]。STRAMSKI

et al.^[8]于1999年提出可以利用水色遥感反演海水POC浓度。遥感反演海表POC浓度算法可分为三大类:一是基于叶绿素浓度、悬浮物与POC的经验关系,通过遥感反演叶绿素和悬浮物浓度间接估算POC;二是建立表观光学量(遥感反射比)与POC的经验关系;三是建立水体固有光学量(颗粒衰减系数、后向散射系数)与POC的经验关系^[9-12]。海洋水体环境不同将导致POC反演存在时空差异,因此需要考虑不同海区之间的时空变化差异,再确定POC和海水光学特征的定量关系,以构建针对不同传感器的POC遥感反演模型^[9-11]。随着卫星遥感技术的发展,可以通过卫星遥感数据来反演碳通量计算的相关参数,通过建立遥感模型,实现多时空尺度和长时间序列的海洋碳通量评估。如,唐世林等^[13]、朱钰等^[14]、TAN and SHI^[15]、陈蔚芳^[16]、许苏清和陈立奇^[17]、BAI et al.^[18]、崔万松^[19]、吕航宇^[20]、李腾^[1]等利用遥感技术开展了南海碳通量遥感反演相关工作。综上所述,前人在南海碳通量时空格局研究等方面已经开展了大量的工作。

由于受限于实测观测手段有限的时空覆盖率,目前南海碳通量的时空变化特征仍不明确,调控机制仍不清晰。整个中国南海碳通量的评估依然存在不确定性^[21-22]。在提升时空覆盖度的观测方面,遥感具有不可替代的优势,因此本研究利用卫星遥感数据分析南海真光层底颗粒有机碳输出通量变化特征,以期为政府碳达峰和碳中和、南海蓝色经济发展、近海生态保护及应对气候变化等提供决策依据。

1 数据和方法

本研究所用的南海海底地形数据采用全球海洋DEM-GEBCO数据(<https://download.gebco.net/>);2009—2018年基于MODIS的全球有机碳通量月度数据集^[23](<http://www.geodoi.ac.cn/>),该数据集反演的全球真光层底有机碳输出通量具有较高的精度和稳定性^[24]。该数据集的算法主要是根据遥感数据反演的海面温度、叶绿素浓度和真光层深度等数据,利用建立的真光层底颗粒有机碳通量反演模型(公式(1))来实现^[24]。

$$POC\ flux = e-ratio \times NPP \quad (1)$$

$$e-ratio = \max(0.04, \min(0.72, -0.0081 \times SST + 0.0668 \times \ln(\frac{Chl}{Z_{eu}}) + 0.426)) \quad (2)$$

其中 $POC\ flux$ 为颗粒有机碳通量; $e-ratio$ 为 POC 输出效率(固碳效率), 具体算法见公式(2)^[25]; Chl 为叶绿素浓度; Z_{eu} 为真光层深度; SST 为海面温度; NPP 表示真光层净初级生产力(单位: $mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), 具体算法见文献[26]。

以上数据的处理利用 ArcGIS 10.1 功能模块 Spatial Analyst Tools-cell statistics 来实现, 主要采用该模块中的取最大值算法提取 2009—2018 年南海区域每月真光层底颗粒有机碳通量和标准偏差值。

2 结果与分析

2.1 南海年平均颗粒有机碳输出通量分布特征

根据 2009—2018 年南海真光层底颗粒有机碳通量反演数据, 研究区内真光层底颗粒有机碳通量平均值为 $55.4\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 有机碳通量小于 $50\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 主要分布在南海的东部、南部的海盆海区; 有机碳通量 $50 \sim 100\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海的北部和西部; 有机碳通量 $100 \sim 150\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在靠近大陆架区域; 有机碳通量大于 $150\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海近岸区域(图 1)。主要原因在于南海陆架区真光层较浅且大粒径藻类较盆地多, 浮游植物光合作用的增加可以提高陆架区 POC 输出效率, 在陆架区再次通过浮游动物的摄食、大粒径藻类聚合等过程, 最终以颗粒物由海洋上层沉降到海底, 因此陆架区真光层有机碳输出通量较高。同时内陆架海区会受到陆源有机碳的影响, 颗粒有机碳输出通量较高; 随着深度的增加, 外陆架海区颗粒有机碳输出通量明显下降。

2.2 南海颗粒有机碳输出通量季度分布特征

由于南海真光层底颗粒有机碳输出通量月值变化在 1—3 月、10—12 月最为显著, 5—9 月变化则不明显, 按照每 3 个月的有机碳通量取平均值来代表季节分布, 有些区域的变化信息会因取平均值而被平滑掉, 为了更好地体现季节性变化规律和趋势, 选择 2009—2018 年 1、4、7、10 月的真光层底颗粒有机碳输出通量平均值来代表南海冬、春、夏、秋四个季节的真光层有机碳输出通量变化规律。根据 2009—2018 年南海真光层底颗粒有机碳输出通量月平均值, 计算了南海 1、4、7、10 月有机碳输出通量标准偏差值(图 2), 从图中可以看出, 南海近岸和

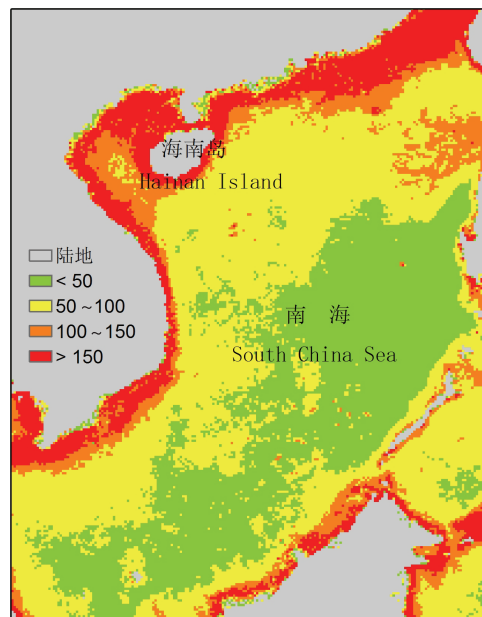


图 1 2009—2018 年年平均有机碳输出通量(单位: $mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)

Fig.1 Annual mean POC export flux (units: $mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) in the South China Sea from 2009 to 2018

陆架区域不同月份颗粒有机碳输出通量平均偏差值较大。1 月整个南海有机碳输出通量平均偏差值为 $27\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 4 月整个南海有机碳输出通量平均偏差值为 $13\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 7 月整个南海有机碳输出通量平均偏差值为 $16\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 10 月整个南海颗粒有机碳输出通量平均偏差值为 $19\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。

研究区内真光层底颗粒有机碳通量存在明显的季节性变化, 其中 1、4、7、10 月真光层底颗粒有机碳通量平均值为 82.43 、 47.37 、 46.34 、 $54.75\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。1 月颗粒有机碳通量小于 $50\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 范围较小, 分布在南海的中部、南部海区; 颗粒有机碳通量 $50 \sim 100\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海的中部和南部; 颗粒有机碳通量 $100 \sim 150\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海北部; 颗粒有机碳通量大于 $150\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海靠近陆地的沿海海岸带区域。4 月颗粒有机碳通量小于 $50\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海大部分海区, 颗粒有机碳通量 $50 \sim 100\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海的北部和中部, 颗粒有机碳通量 $100 \sim 150\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海的北部区域, 颗粒有机碳通量大于 $150\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海靠近陆地的沿海海岸带区域。7 月颗粒有机碳通量小于 $50\ mgC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 分布在南海大部分海区, 比 4 月覆盖面积有所扩大; 颗粒有机碳

通量 $50 \sim 100 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 分布在南海的北部、中部和西部;颗粒有机碳通量 $100 \sim 150 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 分布在南海的西南部;颗粒有机碳通量大于 $150 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 分布在南海靠近陆地的沿海海岸带区域。10月颗粒有机碳通量小于 $50 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 主要分布在南海的中东部、南部海区,比4、7月覆

盖面积有所减小;颗粒有机碳通量 $50 \sim 100 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 分布在南海的北部和西部,比4、7月覆盖面积有所扩大;颗粒有机碳通量 $100 \sim 150 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 分布在南海西南部靠近海岸带区域;颗粒有机碳通量大于 $150 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 分布在南海靠近陆地的沿海海岸带区域(图3)。

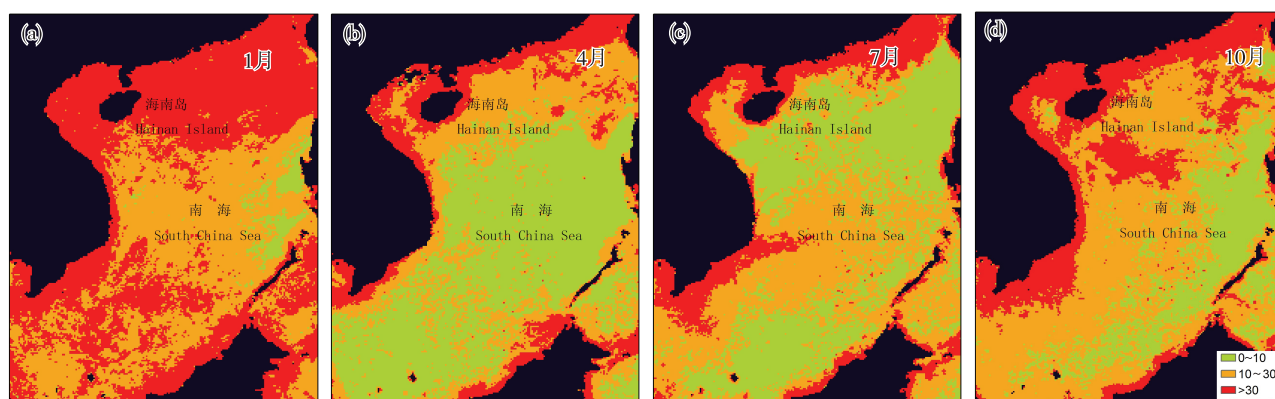


图2 南海颗粒有机碳输出通量标准偏差(a. 1月, b. 4月, c. 7月, d. 10月;单位: $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

Fig.2 Standard deviation of POC export flux (units: $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) in the South China Sea in January (a), April (b), July (c), and October (d)

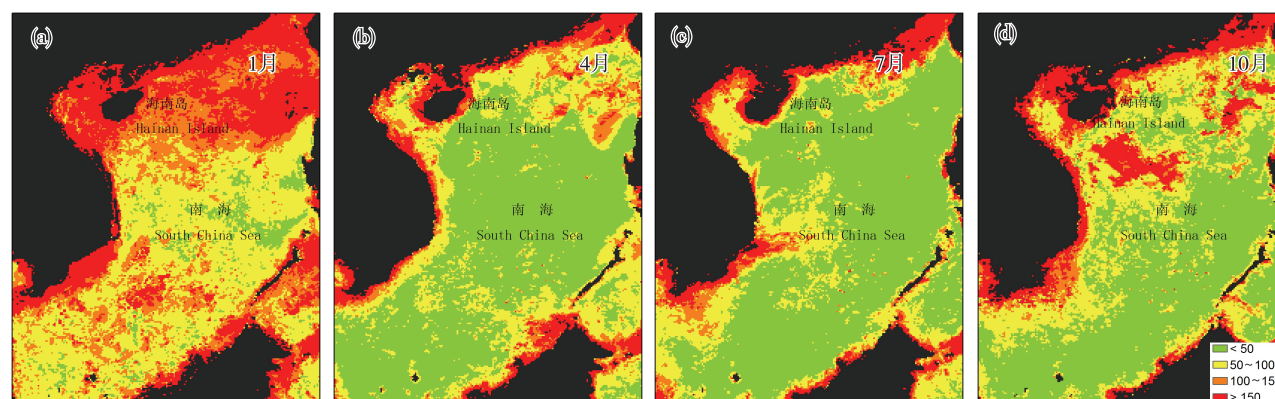


图3 南海颗粒有机碳输出通量(a. 1月, b. 4月, c. 7月, d. 10月;单位: $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

Fig.3 POC export flux (units: $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) in the South China Sea in January (a), April (b), July (c), and October (d)

总体而言,南海区域真光层底颗粒有机碳输出通量冬季最高,春、秋季次之,夏季最小。1、4、7、10月颗粒有机碳输出通量在时间和空间分布上存在较大差异。时间上,整体研究区颗粒有机碳输出通量呈现先降后升的趋势;空间上,真光层底颗粒有机碳输出通量1月高值区分布范围最大,随后逐渐缩小,10月真光层底颗粒有机碳输出通量开始再次出现增加趋势。内陆架海区会受到陆源有机碳的影响,颗粒有机碳输出通量较高。结合南海海底地形图(图4)可以看出,南海总体地形从周边向中央倾斜,海水深度由浅至深依次分布着大陆架和

岛架、大陆坡和岛坡、深海盆地等地貌类型。由于受珠江、湄公河等大河输入的影响,南海北部陆架的区域和南海东部的有机碳沉积速率远高于南海海盆区^[21,27-28];随着深度的增加,外陆架海区颗粒有机碳输出通量明显下降,并在深度超过2 000 m的水体中趋于稳定^[27]。研究表明南海浮游植物的季节性分布特征与季风驱动的中尺度现象有很好的耦合关系^[29],由于南海上层水平环流受季风影响,冬季的东北季风和夏季的西南季风直接强迫南海的表层海水运动,影响南海海水混合层的结构,季风通过改变营养跃层深度,改变海水中营养盐的

利用程度从而对南海浮游植物生产力产生影响^[30], 从而导致真光层底颗粒有机碳通量季节性变化差异。

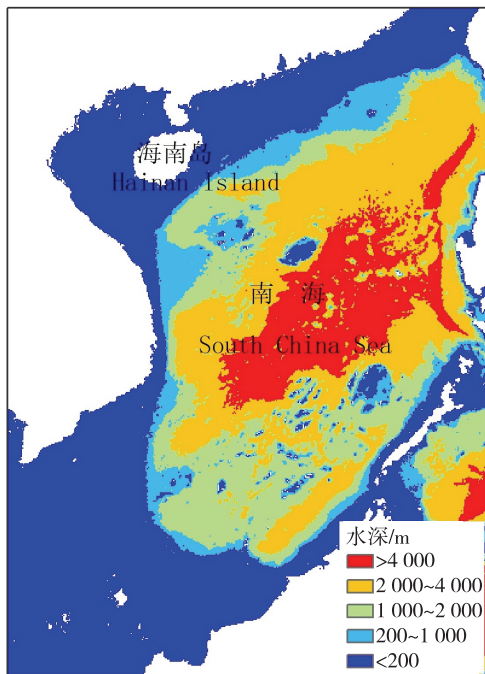


图4 南海海底地形

Fig.4 Submarine topography of the South China Sea

2.3 南海颗粒有机碳输出通量月变化规律

选取区域 A、B、C 分别代表南海北部、中部、南部海区, 根据 2009—2018 年南海真光层底颗粒有机碳通量反演数据, 可以看出南海不同海区的真光层底颗粒有机碳通量呈现明显的 U 形分布规律, 1 月真光层底颗粒有机碳通量呈现最高值, 8 月处于低值区, 10 月开始快速回升(图 5)。南海北部的 A 区域颗粒有机碳通量整体高于 B、C 区域颗粒有机碳通量, 但 6—9 月 A、B、C 区域颗粒有机碳通量值非

常接近。其中 A 区域颗粒有机碳通量在 1 月达到最高值, 颗粒有机碳通量平均值为 $164.9 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 7—9 月达到低值区, 颗粒有机碳通量平均值为 $26.3 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 10 月开始迅速上升, 颗粒有机碳通量平均值为 $60.91 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在南海中部的 B 区域, 1 月达到最高值, 颗粒有机碳通量平均值为 $53.69 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 8 月达到最低值, 颗粒有机碳通量平均值为 $24.5 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 10 月开始上升, 颗粒有机碳通量平均值为 $36.85 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在南海南部的 C 区域, 1 月达到最高值, 颗粒有机碳输出通量平均值为 $85.65 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 8 月达到低值, 颗粒有机碳输出通量平均值为 $30.9 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 10 月开始上升, 颗粒有机碳通量平均值为 $37.04 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。通过 A、B、C 区域遥感监测的真光层颗粒有机碳输出通量显示: 冬季最高, 春、秋季次之, 夏季最小, 导致其变化的原因主要是浮游植物的光合作用、洋流变化等。浮游植物的初级生产力决定了颗粒有机碳输出通量, 颗粒有机碳通量输出随着温度的增加而减小^[1]; 同时南海洋流的季节性变化也一定程度上影响颗粒有机碳输出通量^[31]。

3 结论与讨论

根据 2009—2018 年南海真光层底颗粒有机碳输出通量数据分析可以得到: (1) 南海近 10 a 年平均颗粒有机碳输出通量为 $55.4 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 从空间上看存在明显差异, 其通量分布存在近岸>陆架>海盆的趋势; (2) 从季节上看, 南海真光层底颗粒有机碳输出通量冬季最高, 春、秋季次之, 夏季最小, 主要原因在于冬季强东北季风带来的水体垂向混合作用增强, 混合层下的营养盐向表层的补充促

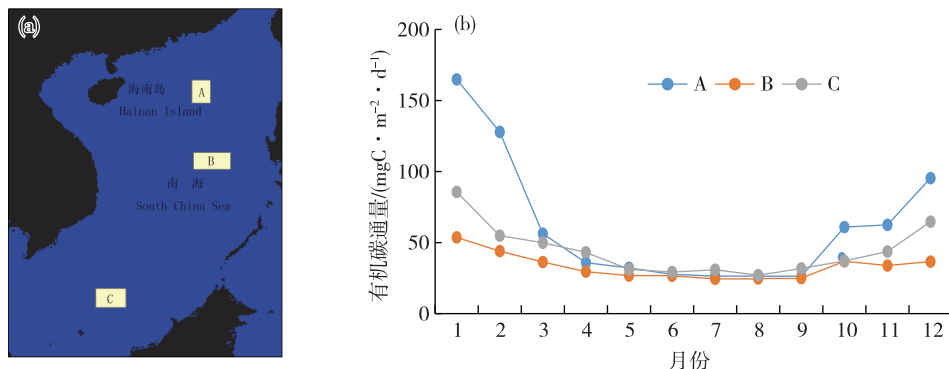


图5 南海 A、B、C 区域(a)颗粒有机碳输出通量(单位: $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)月分布规律(b)

Fig.5 Monthly distribution of POC export flux (units: $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) in A, B, and C regions (A/B/C in Fig.5a corresponds to blue/orange/gray solid line in Fig.5b) of the South China Sea

进了表层浮游植物的生长^[31-32]。南海属于边缘海,相对于开阔的海区,边缘海的生态系统较为复杂,这直接导致了真光层底颗粒有机碳输出通量的不稳定性^[1]。根据2009—2018年遥感数据的估算结论,整个南海1、4、7、10月有机碳输出通量平均偏差值范围为 $13 \sim 27 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,该误差范围与李腾^[1]的研究结果相接近,进一步验证了该数据反演的南海真光层底颗粒有机碳输出通量具有较高的精度^[24]。

南海真光层底颗粒有机碳输出通量与浮游植物光合作用、浮游植物群落结构、浮游动物摄食、藻华和海水温度和水体运动过程等均有密切关系^[1]。其中海水中的真光层底颗粒有机碳主要来源于浮游植物光合作用,浮游植物的初级生产力决定了有机碳输出通量,一般情况下有机碳通量输出效率会随着初级生产力的增加而上升,随着温度的增加而减小^[1]。浮游植物群落结构不仅影响海洋初级生产力,同时会影响到真光层底颗粒有机碳的下降速率,一般情况下大粒径藻类影响更明显。浮游动物摄食可以将下降速度慢的小型颗粒有机碳通过“打包效应”转化为沉降速度较快的颗粒有机碳^[33],同时浮游动物的昼夜迁移也可将表层的颗粒有机碳带入深海。藻华在爆发时快速增长的浮游植物可以为浮游动物提供大量的食物来源,颗粒有机碳输出通量可以提高到平时10倍以上^[32]。海水温度大于 15°C 以上可以提高颗粒有机碳输出效率。水体的运动,如中尺度涡旋可以增强颗粒有机碳输出通量等^[33]。

海洋固碳也称为碳封存^[1]。海洋固碳机理可分为“溶解度泵”固碳和“生物泵”固碳两种类型。“溶解度泵”固碳是将碳从海洋表面输送到海洋内部的物理化学过程,低温和高盐度表层海水在重力作用下将海气表面吸收的 CO_2 输入到深海,构成海洋储碳的“溶解度泵”。大气中排放大量 CO_2 后,大气中的 CO_2 分压增加,强迫大气中的 CO_2 向海洋中输入;一方面海水中吸收大量的 CO_2 后导致海水酸化;另外一方面,当人类减排措施发挥作用时,大气中的 CO_2 分压减小并小于海洋中 CO_2 分压时,溶解的 CO_2 会重返大气^[1],因此从长远看,“溶解度泵”固定的 CO_2 并不可靠。海洋固碳的重点在于“生物泵”上,“生物泵”固碳是将海洋浮游植物通过光合作用将海洋从大气中吸收的无机碳转换为有机碳,并通过浮游动物的摄食、大粒径藻类聚合等过程,最后以颗粒物由海洋上层沉降到海底,实现对大气

CO_2 的调控。海洋“生物泵”固碳代表了海洋有效的固碳过程,基于卫星遥感反演的真光层有机碳输出通量一定程度上定量表征海洋“生物泵”的实际固碳水平。由于受多种因素的影响,利用卫星数据反演的南海真光层底颗粒有机碳输出通量仍然存在很多不确定性。本文采用的真光层底颗粒有机碳输出通量数据集的算法是在Dunne估算模型^[25]的基础上实现,采用的遥感反演数据有海面温度、叶绿素浓度和真光层深度等,这些要素也同样存在一定程度的误差。因此下一步建立遥感反演真光层模型时,要考虑不同的海区建立反演模型,如近岸>陆架>海盆等分别建立对应的模型,同时也应考虑结合海洋动力学模型,建立更加精确的南海真光层底颗粒有机碳输出通量模型。由于南海属于边缘海,其颗粒有机碳通量变化具有很强的不确定性,受到南海天气气候和环境因子影响较大^[34-36],加上观测资料有限,本文仅从宏观上说明了南海区域真光层底颗粒有机碳输出通量特征差异,但也不排除局部区域与实际情况存在一定误差。同时,由于收集和整理的南海海上实测真光层POC输出通量数据有限,暂时未全面系统地开展不同季节和不同海区POC遥感反演结果和精度验证工作,下一步将重点开展此方面的工作。

参考文献:

- [1] 李腾.南海北部真光层颗粒有机碳输出通量的遥感估算研究[D].长沙:国防科学技术大学,2019.
- [2] BEHRENFELD M J, O'MALLEY R T, SIEGEL D A, et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity[J]. *Nature*, 2006, 444(7120): 752-755.
- [3] 宋金明.海洋碳的源与汇[J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(2): 75-80.
- [4] 焦念志.海洋固碳与储碳:并论微型生物在其中的重要作用[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(10): 1473-1486.
- [5] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响[J]. *水科学进展*, 2004, 15(5): 615-620.
- [6] 张运林,秦伯强,胡维平,等.太湖典型湖区真光层深度的时空变化及其生态意义[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2006, 36(3): 287-296.
- [7] 刘琼.东海上层海洋有机碳储量的遥感估算方法研究[D].武汉:武汉大学,2013.
- [8] STRAMSKI D, REYNOLDS R A, KAHRU M, et al. Estimation of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing[J]. *Science*, 1999, 285(5425):

- 239-242.
- [9] 丛丕福,曲丽梅,韩庚辰,等.海洋颗粒有机碳的遥感探测与应用分析[J].海洋环境科学,2012,31(2):300-304.
- [10] 王桂芬,曹文熙,殷建平,等.海洋颗粒有机碳浓度水色遥感研究进展[J].热带海洋学报,2012,31(6):48-56.
- [11] HU S B, CAO W X, WANG G F, et al. Empirical ocean color algorithm for estimating particulate organic carbon in the South China Sea [J]. Chin J Oceanol Limn, 2015, 33(3):764-778.
- [12] 王亚琪,王繁,陈迺岳.海洋水体颗粒有机碳遥感反演研究进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2017,16(2):205-212.
- [13] 唐世林,陈楚群,詹海刚,等.南海真光层深度的遥感反演[J].热带海洋学报,2007,26(1):9-15.
- [14] 朱钰,商少凌,翟惟东,等.南海北部夏季海表二氧化碳分压及其海气通量的遥感算法初探[J].自然科学进展,2008,18(8):951-955.
- [15] TAN S C, SHI G Y. Spatiotemporal variability of satellite-derived primary production in the South China Sea, 1998–2006[J]. J Geophys Res, 2009, 114(G3):G03015.
- [16] 陈蔚芳.南海北部颗粒有机碳输出通量、季节变化及其调控过程[D].厦门:厦门大学,2008.
- [17] 许苏清,陈立奇.利用卫星遥感技术估算区域性海-气CO₂通量研究综述[J].极地研究,2015,27(3):271-281.
- [18] BAI Y, CAI W J, HE X Q, et al. A mechanistic semi-analytical method for remotely sensing sea surface pCO₂ in river-dominated coastal oceans: A case study from the East China Sea [J]. J Geophys Res, 2015, 120(3):2331-2349.
- [19] 崔万松.南海北部真光层有机碳储量的遥感估算研究[D].杭州:国家海洋局第二海洋研究所,2017.
- [20] 吕航宇.基于遥感的南海海水CO₂分压时空变化及机制分析[D].南京:南京大学,2018.
- [21] 戴民汉,孟菲菲.南海碳循环:通量、调控机理及其全球意义[J].科技导报,2020,38(18):30-34.
- [22] 刘茜,郭香会,尹志强,等.中国邻近边缘海碳通量研究现状与展望[J].中国科学:地球科学,2018,48(11):1422-1443.
- [23] 谢富泰,周翔,陶醉,等.基于MODIS的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集(2003—2018)[J].全球变化数据学报,2021,5(1):11-18.
- [24] XIE F T, TAO Z, ZHOU X, et al. Spatial and temporal variations of particulate organic carbon sinking flux in global ocean from 2003 to 2018 [J]. Remote Sens, 2019, 11(24):2941.
- [25] DUNNE J P, ARMSTRONG R A, GNANADESIKAN A, et al. Empirical and mechanistic models for the particle export ratio [J]. Glob Biogeochem Cyc, 2005, 19(4):GB4026.
- [26] TAO Z, WANG Y, MA S, et al. A Phytoplankton class-specific marine primary productivity model using MODIS data[J]. IEEE J Stars, 2017, 10(12):5519-5528.
- [27] 焦念志,梁彦韬,张永雨,等.中国海及邻近区域碳库与通量综合分析[J].中国科学:地球科学,2018,48(11):1393-1421.
- [28] LEE CHEN Y L. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea [J]. Deep-Sea Res, 2005, 52(2):319-340.
- [29] NING X, CHAI F, XUE H, et al. Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea [J]. J Geophys Res, 2004, 109(C10):C10005.
- [30] 李丽,王慧,罗布次仁,等.南海北部4万年以来有机碳和碳酸盐含量变化及古海洋学意义[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(6):79-85.
- [31] ZHOU K B, DAI M H, KAO S J, et al. Apparent enhancement of ²³⁴Th-based particle export associated with anticyclonic eddies [J]. Earth Planet Sci Lett, 2013, 381:198-209.
- [32] MARTIN P, LAMPITT R S, PERRY M J, et al. Export and mesopelagic particle flux during a north Atlantic spring diatom bloom [J]. Deep-sea Res, 2011, 58(4):338-349.
- [33] BOYD P W, TRULL T W. Understanding the export of biogenic particles in oceanic waters: Is there consensus? [J]. Prog Oceanogr, 2007, 72(4):276-312.
- [34] 吴胜安,邢彩盈,朱晶晶.南海区域对流活动的气候特征及其与 ENSO 的关系 [J]. 海洋气象学报, 2019, 39(4):75-82.
- [35] 张萍,徐峰,涂石飞,等.1979—2017 年南海 SSTA 时空特征及其与沃克环流异常的相关 [J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1):15-25.
- [36] 林婷婷,李春. ENSO 与南海 SST 关系的年代际变化 [J]. 海洋气象学报, 2019, 39(2):68-75.