

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220405001

http://www.yykxjz.cn/

杨冠林, 林军, 章守宇, 李娜. 基于拉格朗日法的海藻场有机碎屑离岸运输研究. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 49–60
YANG G L, LIN J, ZHANG S Y, LI N. Study on offshore transport of organic detritus in seaweed field based on Lagrange method. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 49–60

基于拉格朗日法的海藻场有机碎屑离岸运输研究*

杨冠林¹ 林 军^{1,2①} 章守宇^{1,2} 李 娜¹

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院 上海 201306;
2. 上海海洋大学海洋牧场工程技术研究中心 上海 201306)

摘要 海藻场在海藻凋落盛期向海洋输送大量有机碎屑, 为海藻场外围海域提供大量初级生产力, 并在沉降后实现碳汇功能。本研究采用具有拉格朗日质点追踪模块的三维海洋数值模式 (Estuarine Coastal Ocean Model, semi-implicit, ECOM-si), 结合潮位、流速及漂流浮标轨迹跟踪观测, 研究了枸杞岛西北侧天然海藻场有机碎屑运输与沉降的动力学机制及碳汇功能。结果显示, 海藻场对周边海域碳汇贡献的空间分布格局呈现为以海藻场为中心的高值区, 向西北–东南海域扩展分布并递减。水动力强弱和海藻碎屑粒径差异导致其沉降后的空间分布差异显著。大潮期间, 海藻场对邻近海域碳汇贡献最高为 699 g C/(hm²·d)。碎屑粒径越小、沉降速度越小的海藻碎屑对外围海域碳汇贡献范围越大。海藻场碳汇功能不局限于邻近海域, 不同粒径海藻碎屑每天为海藻场 5 km 外海域提供有机碳约 7.5~33.7 kg C; 小潮期间水动力较弱, 约 90% 以上的海藻碎屑沉降至 5 km 以内海域。海藻场碳汇功能集中于沿岸邻近海域, 对邻近海域有碳汇贡献的区域范围小, 但强度大, 最高为 817 g C/(hm²·d)。海藻碎屑脱落时的潮流方向和海藻场所处区位也是影响海藻场有机碎屑运输沉降和碳汇归趋的重要因素。赋予拉格朗日质点单位碳含量后, 拉格朗日法在海藻场有机碎屑离岸运输沉降机制研究中具有可行性, 可有效评估典型近岸海藻场对周边海域碳汇的贡献及主要动力学因子的作用。本研究可为我国海藻场本底调查及其生态辐射范围评估提供参考。

关键词 拉格朗日质点追踪; 天然海藻场; 有机碎屑; 海洋碳汇; 数值模型

中图分类号 P72 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)05-0049-12

海藻场是主要分布于大陆架海区硬质底上生长的大型底栖海藻与其他海洋生物群落所共同构成的一种近岸海洋生态系统, 也是主要的海洋初级生产贡献者之一(章守宇等, 2007)。大型海藻通过光合作用, 将大气中的 CO₂ 转化为有机碳储存在体内实现碳封存, 是重要的生物碳汇, 对于海洋碳汇扩增及我国双碳目标的实现具有重要意义(高亚平等, 2013; 李娇等,

2013)。海藻凋亡后在波浪潮流等冲刷作用下进入海洋, 并不断分解形成有机碎屑或溶解有机物(章守宇等, 2019), 其中, 约 80% 的有机碳以海藻碎屑的形式进入海洋。海藻碎屑随海流输运沉降至近岸或离岸的无海藻覆盖海域, 被底栖生物所摄食或被微生物分解利用进入生物地球化学循环过程(Steneck *et al*, 2002; Krumhansl *et al*, 2012)。海藻碎屑的输运沉降是连接不

* 国家自然科学基金(41876191)、国家重点研发计划资助(2018YFD0900905)和上海海洋大学科技发展专项基金(A2-2006-200207)共同资助 [This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41876191), National Key Research and Development Program of China (2018YFD0900905), and the Science and Technology Development Program of Shanghai Ocean University (A2-2006-200207)]. 杨冠林, E-mail: 979083323@qq.com

① 通信作者: 林 军, 副教授, E-mail: jlin@shou.edu.cn

收稿日期: 2022-04-05, 收修改稿日期: 2022-04-29

同沿海生境的重要生源要素循环形式之一,影响着海域初级生产力和次级生产力的时空分布格局。

目前,潜水摄影、碎屑标记、环境 DNA 采集等野外调查方法是研究海藻碎屑脱落进入海水后输运沉降过程的主要方法(Filbee-Dexter *et al*, 2018; Wernberg *et al*, 2018; Kaehler *et al*, 2006)。近岸海藻场有机碎屑的输运沉降受地形、潮流、波浪等动力因子时空变化的影响,野外调查对海藻碎屑时空分布的评估有明显的局限性。拉格朗日质点追踪法通过关注质点在空间中随时间变化的运动特征(陈毓敏等, 2019),可有效补充野外调查点位有限等不足,并可提供全域性评估依据。随着海洋数值模型发展成熟,数值模型中拉格朗日质点追踪法的应用也越来越广泛,目前已成功应用于海洋环流、锋面、水交换能力、溢油污染物质输运及浒苔等生物漂移路径等研究中(丁东生等, 2016; 俞露露等, 2020; 彭兆亮等, 2020; 冯依蕾等, 2020; 高丽萍等, 2021; Saidi *et al*, 2014; 范世平等, 2011)。上述研究多关注质点随海流的水平输运和扩散过程,而海藻碎屑在随海流水平运动的同时,还因其自身所受重力作用而发生明显的垂向沉降。

本研究以枸杞岛西北侧天然海藻场为例,建立考

虑浮筏式养殖设施阻力的水动力模型。基于拉格朗日质点追踪法,将静水试验获得的海藻碎屑沉降速度应用于模型的拉格朗日质点追踪模块,揭示天然海藻场海藻碎屑输运沉降过程的动力学机制,评估其对周边海域碳汇的贡献,以期为我国海藻场本底调查及其生态影响范围评估提供参考,并为进一步建立海藻场生态辐射模型打下基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域

模型计算区域包含长江口、杭州湾及邻近海域(图 1a),重点加密枸杞岛附近海域网格以保证对枸杞岛西北侧天然岩礁海藻场(图 1c)及外围大规模浮筏式贻贝养殖区的模拟精度,水动力观测站点见图 1b。模型采用 Arakawa C 型水平网格(Arakawa *et al*, 1977),即流速点与水位点相差半个网格距离的交错网格,水位点位于网格中心点上,水平流速点 u 、 v 则分别位于 y 向、 x 向网格线法向上。网格数为 336×256 ,最高分辨率约 70 m。垂向采用 Sigma 坐标,共分为 31 层,重点加密枸杞岛贻贝养殖筏架及贝串所在的深度(0~3.8 m),垂向最高分辨率为水深的 0.01 倍。

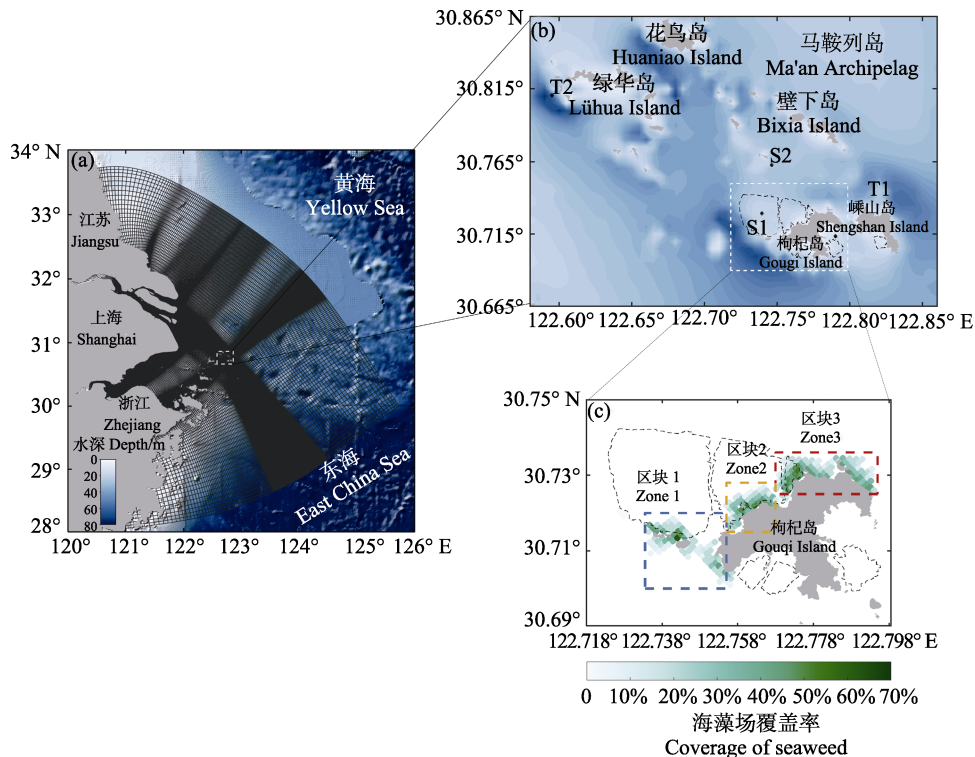


图 1 模型计算域(a)、观测站点分布(b)及天然海藻场初始覆盖率(c)

Fig.1 Model calculation domain (a), observation sites (b), and initial coverage of natural seaweed (c)

图 a 白色虚线: 重点加密区域; 图 b 黑色虚线: 贻贝养殖区范围; 图 c: 彩色虚线表示特征区块。
(a) white dotted line indicates focused encrypted areas; (b) Black dotted lines indicate borderlines of mussel farms;
(c) Colored dotted lines indicate feature zones.

模型由开边界的潮位驱动, 共考虑 16 个主要分潮, 潮边界的振幅和迟角数据由 TPXO 7.1 数据集插值得到, 该数据集在沿海的分辨率最高可达 $1/30^\circ$ (Egbert *et al.*, 2002; 温英等, 2022)。

1.2 拉格朗日质点追踪模型

1.2.1 水动力模型简介

本研究所使用的 ECOM-si 三维海洋数值模式 (estuarine coastal ocean model, semi-implicit) 由 POM (Princeton ocean model) 改进而来, 并发展为非正交坐标系模型 (朱建荣等, 2003; Wu *et al.*, 2010)。

枸杞岛西北侧海藻场外围存在大规模的贻贝浮筏式养殖设施, 其对水动力的改变不可忽视。本研究采用动量汇法实现对浮筏式养殖设施阻流效应的模拟, 即考虑浮筏式养殖阻流作用导致海水流速的部分动量损失, 在模型的动量方程组中添加计算这部分动量损失 (Yang *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2017), 实现对浮筏式养殖阻流效应的数值模拟 (温英等, 2022)。

1.2.2 拉格朗日质点追踪模块

拉格朗日质点追踪模块中质点的运动包括 3 个过程: 质点随模型流场的平流过程; 质点受湍流作用造成的随机运动; 质点因自身重量产生的垂向下沉运动。具体公式如下 (Ali *et al.*, 2013; Ju *et al.*, 2009):

$$L(x, y, z)_{t_0+\Delta t} = L(x, y, z)_{t_0} + \begin{pmatrix} u_{t_0} + \frac{\partial A_H}{\partial x} \\ v_{t_0} + \frac{\partial A_H}{\partial y} \\ w_{t_0} + \frac{\partial K_H}{\partial z} - w_L \end{pmatrix} \Delta t + \begin{pmatrix} \sqrt{2A_H} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2A_H} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2K_H} \end{pmatrix} \gamma_n \Delta t \quad (1)$$

式中, $L(x, y, z)_{t_0}$ 表示模型中质点释放的初始位置, $L(x, y, z)_{t_0+\Delta t}$ 表示质点在运动 Δt 时间后的空间位置。 u_{t_0} 、 v_{t_0} 、 w_{t_0} 表示质点在 t_0 时刻的运动速度, $-w_L$ 表

示自定义的质点下沉速度即海藻碎屑静水沉降速度, A_H 、 K_H 分别表示水平和垂直涡动扩散系数, γ_n 表示均值为 0, 标准差为 1 的高斯随机分布向量。

海藻碎屑静水沉降速度数据来自课题组前期研究, 以枸杞岛优势藻种孔石莼 (*Ulva lactuca* L.) 和舌状蜈蚣藻 [*Grateloupia livida* (Harv.) Yamada] (章守宇等, 2018) 碎屑为研究对象, 通过海藻碎屑室内静水沉降试验获得不同粒径大小海藻碎屑的沉降速度范围为 0.5~2.3 cm/s。本研究数值模拟试验取 0.5、1.4、2.3 cm/s 作为不同大小粒径海藻碎屑的沉降速度。各个试验设置质点运动至模型 0.98 倍水深时表示海藻碎屑沉底。

海藻场是具有周期性生长和凋落的生态系统, 6、7 月海藻生长旺盛, 8 月海藻生物量达到峰值后开始凋落, 释放大量有机碎屑进入海洋 (陈亮然等, 2015; 韩军军等, 2016)。数值模拟试验所用海藻场初始覆盖率数据源自 2018 年枸杞岛西北侧夏季天然海藻场调查结果, 藻场有效面积 S_0 约为 22.33 hm^2 , 平均覆盖率 F 约为 23.6% (贾慧明, 2020); 全球海藻生态系统平均固碳量 W 为 22.38 $\text{kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 约 79.5% 在海藻凋落期以有机碎屑的形式进入海洋 (Mateo *et al.*, 2006), 见表 1。模型试验设置枸杞岛西北侧天然海藻场向周边海域输送的碳汇源强 C_{mi} , 计算公式如下:

$$C_{mi} = (79.5\% \times W) \times S_0 \times F \quad (2)$$

式中, $(79.5\% \times W)$ 为海藻场凋落期有机碎屑脱落量, 计算得到海藻场向海洋输送的 C_{mi} 为 93.76 $\text{kg C}/\text{d}$ 。

数值试验依据图 1c 所示海藻场覆盖率, 在不同空间位置按比例释放不同数量的质点, 以体现海藻场向海洋输送有机碎屑源强的空间分布差异。每个位置间隔 1 h 连续释放 75 批海藻碎屑质点 (约 6 个 M_2 分潮历时) 以保证海藻场向海洋输送碎屑的连续性, 每批合计从不同位置释放共 1264 个海藻碎屑质点。根据碳汇源强 C_{mi} 换算单个海藻碎屑质点含碳量 C_0 约为 3.1 g。碳汇值 C_s 根据海藻碎屑质点在研究区域内访问不同区域的频率次数, 即拉格朗日指标 P_s (陈毓敏等, 2019) 计算。通过将研究区域划分为面积相等的网

表 1 海藻生态系统固碳量及有机碎屑侵蚀量

Tab.1 Carbon sequestration and organic detritus erosion in seaweed ecosystems

地区 Location	物种 Species	固碳量 Carbon sequestration /[$\text{kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]	侵蚀率 Erosion /%	有机碎屑脱落量 Loss of organic detritus /[$\text{kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]	来源 Source
日本 Japan	苔藓 <i>Ecklonia cava</i>	23.31	91.00	21.22	Hayashida, 1977
全球 Global	海藻 Seaweed	22.38	79.50	17.79	Mateo <i>et al.</i> , 2006
全球 Global	海带 Kelp	23.67	81.70	19.34	Krumhansl <i>et al.</i> , 2012

格,并统计每个网格内质点的数量可得 P_s , 计算公式如下:

$$P_s(x, y) = \frac{\sum N(x, y)}{S} \tag{3}$$

$$C_s(x, y) = P_s(x, y) \times C_0 \tag{4}$$

式中, $N(x, y)$ 为网格内海藻碎屑质点的沉降数量, S 表示计算拉格朗日指标的网格面积(本研究取 1 hm^2)。碳汇值 C_s 可表示海藻场在海藻凋落期对海洋碳汇的贡献。

1.2.3 拉格朗日漂流浮标 图 2 为拉格朗日漂流浮标(简称漂流瓶)的简易模型。漂流瓶高度为 30 cm, 含防水罩高约 10 cm, 入水部分约 20 cm。以稳定板为分界, GPS 密封于防水罩中, 露出水面接收反馈位置信息。下半部分用密度较大的沉子使漂流瓶大部分没入水中, 同时降低重心保证稳定性。漂流瓶通过室内静水试验, 调整沉子的质量, 保证漂流瓶入水后稳定板恰好与水面贴合, 随海流运动时保持姿态稳定, 达到兼顾信号反馈以及减少海表面风应力作用的效果。拉格朗日漂流浮标每隔 10 s 接收位置信息并反馈给终端, 取 10 min 平均位置信息, 统计其在不同时刻的位置。于 2021 年 5 月 21 日在枸杞岛西北侧海域依次投放 6 个漂流瓶(图 3)。

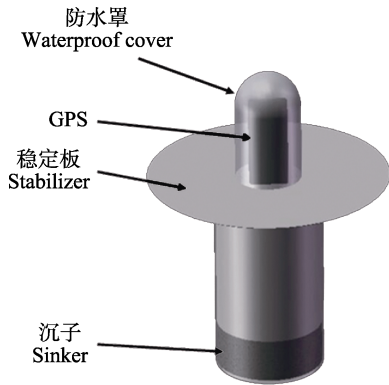


图 2 拉格朗日漂流浮标
Fig.2 Lagrangian drifting buoy

2 结果

2.1 潮位及潮流验证

利用嵎山站(T1)和绿华山站(T2) 2 个验潮站的观测数据验证模型输出的潮位时间序列, 结果显示模型精度较高(图 3)。表 2 所示相关性系数(r)、均方根误差(r_{ms})和 $Skill$ 值($Skill$)三种评价方法(Lin *et al.*, 2016; 林军等, 2020)反映的模型结果与实测值的吻合程度

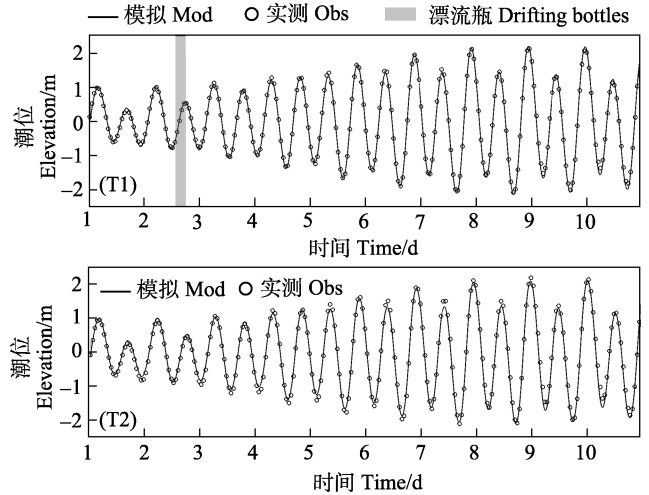


图 3 潮位时间序列验证
Fig.3 Time series of elevation

T1: 嵎山站; T2: 绿华山站
T1: Shengshan; T2: Lühua

表 2 潮位模拟误差值
Tab.2 Error of tidal elevation modeling

站点 Site	r_{ms}	r	$Skill$
嵎山 Shengshan T1	0.063	0.998	0.999
绿华山 Lühua T2	0.116	0.994	0.997

也为优良。

在贻贝浮筏式养殖场内的 S1 站点和场外的 S2 站点, 使用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)获取表层、中层和底层流速、流向实测资料用于模型值对比验证(图 4、图 5)。S1 和 S2 站点的流速差异主要表现为场内 S1 站点表层流速受贻贝养殖活动的阻碍而减小。S1 站点实测和模拟流速整体不超过 0.8 m/s, 表层流速不超过 0.2 m/s, 均呈现了表层流速小、中层和底层流速大的垂向结构。流向的模拟精度在中层和底层模拟较高, 因表层流速较小, 导致表层流向模拟精度一般。位于养殖场外的 S2 站点的流速流向模拟精度相对较高。综上所述, 本研究所建数值模型达到一定精度, 可为应用拉格朗日质点追踪法研究海藻碎屑输运沉降过程提供可靠的水动力基础。

2.2 海藻碎屑拉格朗日质点运动轨迹验证

设置模型中质点释放时间与漂流瓶释放时间一致, 利用实测漂流浮标轨迹对数模中拉格朗日质点代表的有机碎屑颗粒运动轨迹进行验证。模型质点释放位置以漂流瓶释放位置为中心, 等间距(间隔 100 m)选择 9 个位置释放质点, 每个位置释放 5 个拉格朗日质点, 共计释放 45 个质点。

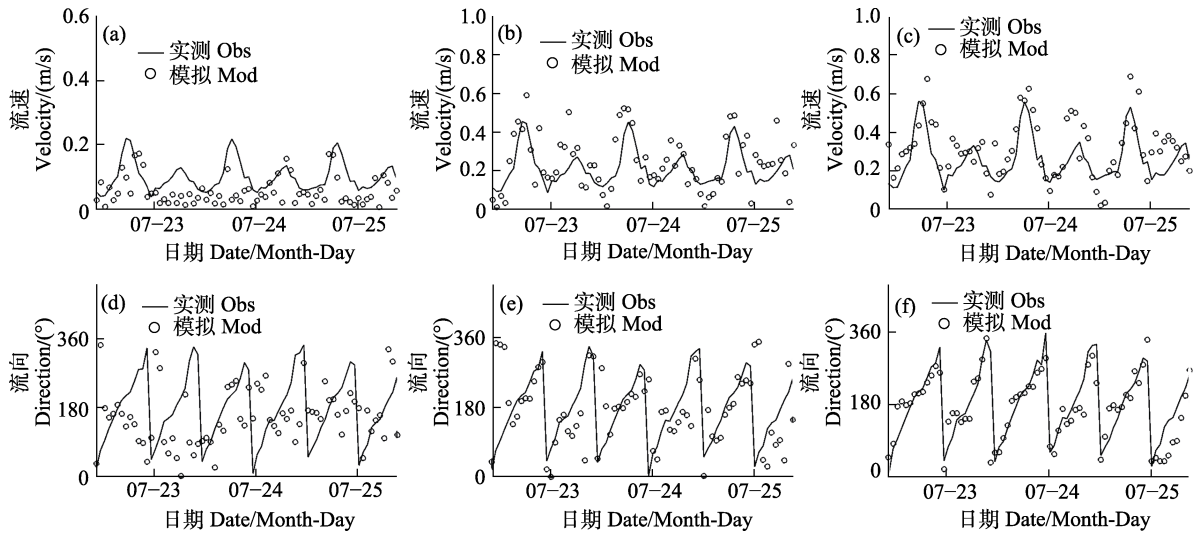


图 4 S1 站点流速和流向序列验证

Fig.4 Comparisons of velocity and direction of observation and model in S1 site

a、b、c 分别表示表、中、底层流速；d、e、f 分别表示表、中、底层流向
 a, b, and c represent the flow velocity of the surface, middle and bottom layer, respectively;
 d, e, and f represent the flow direction of the surface, middle and bottom layer, respectively

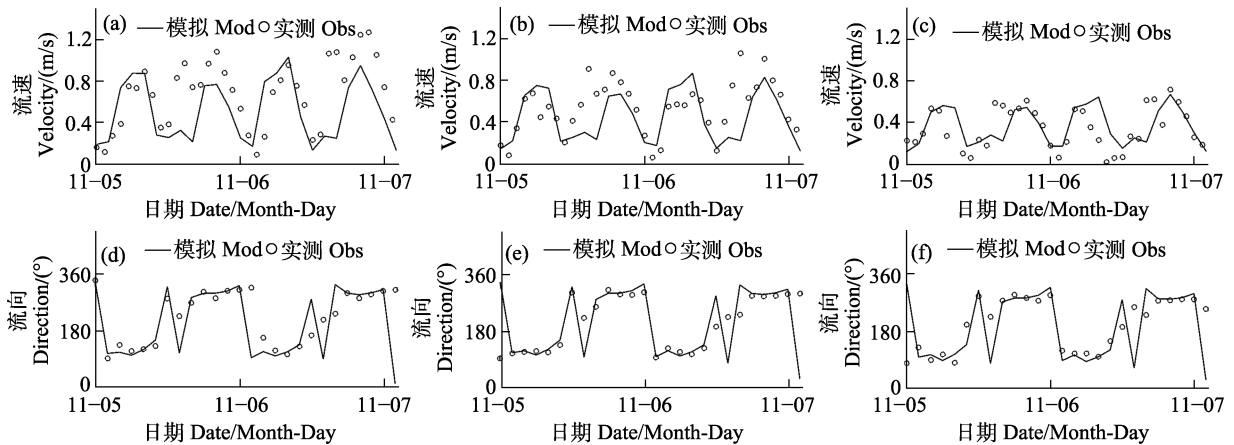


图 5 S2 站点流速和流向序列验证

Fig.5 Comparisons of velocity and direction of observation and model in S2 site

a、b、c 分别表示表、中、底层流速；d、e、f 分别表示表、中、底层流向
 a, b, and c represent the flow velocity of the surface, middle and bottom layer, respectively;
 d, e, and f represent the flow direction of the surface, middle and bottom layer, respectively

研究区域的潮汐是以半日分潮为主的混合潮, 远离岛屿的海域为顺时针旋转流, 岛间海域则为往复流, 潮流涨急和落急时刻流向为西北和东南向(温英等, 2022)。图 6 为模型质点和漂流浮标运动轨迹, 质点模拟与漂流瓶的运动时长相同。在涨潮流的作用下, 漂流瓶 a、b、c 及其模拟质点轨迹显示向西北运动, 而后随潮流发生转向, 漂流瓶及质点运动方向转向东及东南, 轨迹呈顺时针旋转特征。漂流瓶 d、e 与其模拟质点的运动轨迹呈现接近往复流的特征, 其运动区域在枸杞岛与其北部的壁下岛之间, 潮汐波动

受岛屿地形的制约较强, 故呈往复流特征。漂流瓶 f 与其模拟质点在落潮流作用下沿嵎山岛东侧运动, 继而随涨潮流从嵎山岛和枸杞岛南侧转向西运动。漂流瓶 a 在漂移约 6 h 时, 运动方向由正北异常转向西南, 因其位于主航道, 受人为或船只等因素影响, 模型质点对其后期运动轨迹模拟的偏差较大。模型对其他漂流瓶全时段的运动轨迹的模拟基本一致, 反映了枸杞岛及邻近海域潮流系统的基本特征。在不考虑风应力驱动的前提下, 数值模型拉格朗日质点追踪模块的模拟精度良好, 可用于海藻碎屑输运沉降过程的模拟。

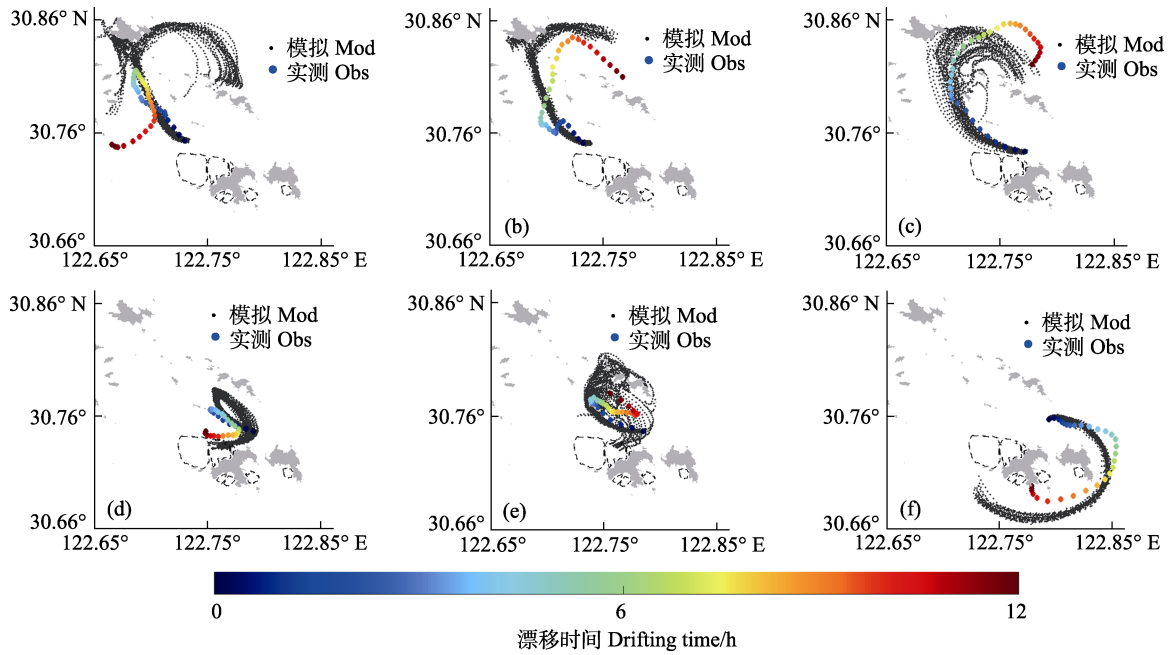


图 6 漂流瓶与质点漂移轨迹对比

Fig.6 Verification results of measured trajectories of Lagrangian drifting bottles and simulated trajectories of Lagrange particles

彩色实心点：漂流瓶轨迹；颜色：漂移时间；黑色实心点：模型拉格朗日质点轨迹。

Colored solid points indicate drift bottle trajectories. Different colors indicate different drifting time.

Black solid points indicate modeled Lagrange particle trajectories.

2.3 拉格朗日法在海藻碎屑输运沉降研究应用中的可行性

数值模型水动力模块的潮位、流速对定点实测资料的模拟精度良好，再现了枸杞岛天然海藻场及其邻近海域的水动力特征(温英等, 2022)，拉格朗日质点追踪模块也通过了漂流浮标轨迹资料的验证。通过设置不同粒径海藻碎屑的沉降速率不同，解决了大范围海域中难以测量碎屑输运沉降规律和碳汇分布等问题。此外，数值模型中拉格朗日质点设置为密度与水体相同，而漂流浮标密度与水体有较大差异，自由度高(陈毓敏等, 2019)，随水体的运动存在滞后或惯性作用。且漂流浮标有部分露出水面接收位置信号，会受海表面风的作用。而海藻碎屑密度小，与水体间的黏性比漂流浮标大，随水体的运动时有更加近似水质点的性质。综上所述，可以认为数值模型中设定的拉格朗日质点对海藻碎屑的模拟较漂流浮标更切合实际情况，拉格朗日质点追踪法应用于海藻碎屑输运沉降过程研究具有较高的可行性。

2.4 海藻碎屑输运沉降空间分布规律

潮流作为影响海洋物质输运的重要动力学因子，深刻影响海藻碎屑沉降分布的空间格局。海藻碎屑因

自重导致其在水平输运过程中发生显著的垂向沉降，也是影响海藻碎屑沉降分布空间格局的重要因素之一。本研究设置了不同质点释放时刻(大潮、小潮)、不同沉降速度(0.5、1.4 和 2.3 cm/s)条件下的 6 组数值试验，每个试验释放 94 800 个海藻碎屑质点。结果显示，海藻碎屑质点自进入海洋后，绝大多数在 24 h 内沉降至海底停止运动。图 7 统计了每公顷海藻碎屑质点累积沉降数量，结果显示，天然海藻场邻近海域是海藻碎屑沉降的高值区，分布特征沿海藻场离岸递减。海藻场西北侧是大面积的贻贝浮筏式养殖场，极大地削弱了水动力强度，加之近岸水深浅和海藻碎屑自身沉降过程的作用，海藻碎屑在进入开阔海域前便沉降至近岸海底。进入开阔海域后的海藻碎屑受涨落潮流的作用，沉降数量呈现以海藻场中心 5 km 左右范围内为高值区，并向西北-东南向递减的空间分布态势，与该海域涨落急方向及漂流浮标运动特征一致。近岸海域每公顷累计海藻碎屑质点沉底数量最高值范围在 549~813 ind./hm²之间，因水动力和沉降速度差异导致海藻碎屑质点沉降数量的空间分布差异显著(图 7 和表 2)。

表 3 统计了海藻碎屑沉底时距释放位置距离的不同占比。小潮期间，海水运动对海藻碎屑的输运能力弱，海藻碎屑主要沉降于海藻场邻近海域，输运距离多

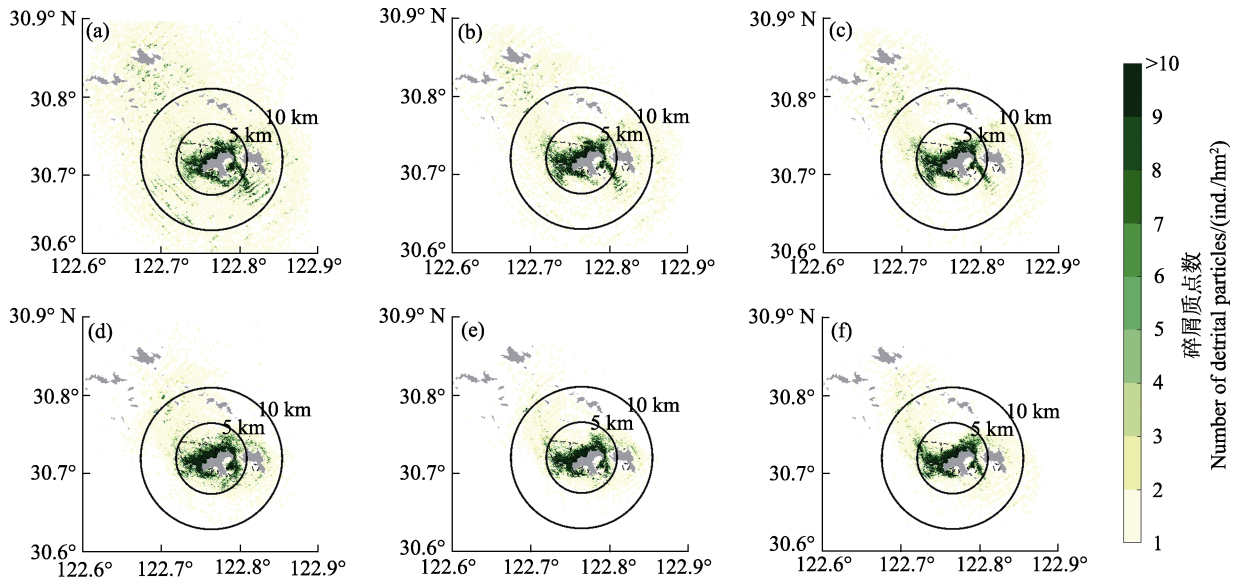


图 7 单位面积(hm^2)海藻碎屑质点沉降数量

Fig.7 Number of seaweed detritus particles settled per hectare

a、b、c: 大潮期间, 沉降速度为 0.5、1.4 和 2.3 cm/s 的海藻碎屑沉底数量分布;

d、e、f: 小潮期间, 沉降速度为 0.5、1.4 和 2.3 cm/s 的海藻碎屑沉底数量分布;

图中黑色圆圈分布表示距海藻场中心 5 km、10 km 的范围(下同)

a, b, and c represent settling velocities of 0.5, 1.4, and 2.3 cm/s during spring tide, respectively.

d, e, and f represent settling velocities of 0.5, 1.4, and 2.3 cm/s during neap tide, respectively.

The black circles indicate the range of 5 km and 10 km from the center of the seaweed field (the same below), respectively.

表 3 不同沉降速度下海藻碎屑的运输距离占比
Tab.3 Percentage of transport distance of seaweed detritus at different sedimentation rate

沉降速度 w (cm/s)	潮 Tide	运输距离 Transport distance /km		
		0~2 km	2~5 km	>5 km
0.5	小潮 Neap	70%	23%	7%
	大潮 Spring	47%	23%	29%
1.4	小潮 Neap	84%	13%	3%
	大潮 Spring	69%	20%	11%
2.3	小潮 Neap	83%	13%	4%
	大潮 Spring	74%	18%	8%

小于 5 km。如图 7d、e、f 所示, 海藻碎屑沉降高值区主要集中在距海藻场中心 5 km 内, 有超过 70% 以上的海藻碎屑运输距离小于 2 km (表 3), 而 5 km 以外海域单位面积海藻碎屑质点数基本不超过 10 ind./ hm^2 。大潮期间, 海水运输能力强, 沉降至外海域的海藻碎屑数量明显增加。沉降速度($w=0.5$ cm/s)较小时, 海藻场向周边海域输送碎屑沉降分布范围明显变大(图 7a), 5 km 以外海藻碎屑质点数量占总量的 29%, 10 km 以外占 14%。外围海域部分水深较浅区域, 单位面积海藻碎屑质点数量超过 10 ind./ hm^2 。沉降速度(w 为 1.4 和 2.3 cm/s)较大时, 海藻碎屑沉降分布范围缩小, 但仍有相当一

部分被输送至 5 km 和 10 km 以外海域(图 7b、c), 为外围海域碳汇提供一定贡献。

3 讨论

3.1 涨落潮和岛屿地形对碎屑运输的影响

海藻碎屑脱落进入海洋的时刻同样是影响其运输的因素之一。大潮期间, 有较多的海藻碎屑被运输沉降至较远的外围海域(图 7 和表 3)。因此, 对大潮期间涨潮和落潮时所脱落海藻碎屑的运输距离进行平均, 以讨论涨潮和落潮两个典型时刻对碎屑运输的影响。因落潮流受岛屿地形遮蔽作用, 导致碎屑的平均运输距离随着涨落潮呈波动变化, 运输峰值距离(5.5 km)出现在涨潮期间(图 8)。涨潮流将碎屑向西北较开阔海域输送, 碎屑粒径越小(沉降速率越小), 其沉入海底之前受潮流作用越久, 运输距离更远, 沉降范围更广。

海藻碎屑的离岸运输除受粒径大小(沉降速率不同)、水动力强弱及脱落时的涨落潮方向影响外, 海藻场的区位也非常重要。粒径越小的海藻碎屑沉降速率越小、运输距离越远, 沉降位置分布受海藻场区位的影响越显著。以沉降速度为 0.5 cm/s 的海藻碎屑

为例,分析了海藻场3个特征区块内(图1c)所脱落碎屑的沉降位置分布(图9)。

特征区块1位于枸杞岛西侧,潮流在受地形遮蔽作用相对较小的开阔位置。海藻碎屑沉降分布集中于海藻场西北侧,受涨潮流作用显著。小潮时,沉降分布集中于5 km以内海域。大潮时,沉降分布范围广,约25%的海藻碎屑沉降至10 km以外海域(图9a、d)。区块2位于枸杞岛西北侧中段,地形相对封闭,且外侧被大量养殖设施包围,水动力较弱。海藻碎屑主要沉降于沿岸海域,大潮时,仅有约8%海藻碎屑输运距离超过10 km(图9b)。区块3位于枸杞岛北侧沿岸,向西北的涨潮流被地形遮蔽,受落潮流作用明显,其沉降区分布更多集中于枸杞岛和嵛山岛之间及其南侧海域,以及嵛山岛东侧海域。综上所述,海藻场处于地形相对开阔、水流通畅的位置时,其生态辐射范围更大。

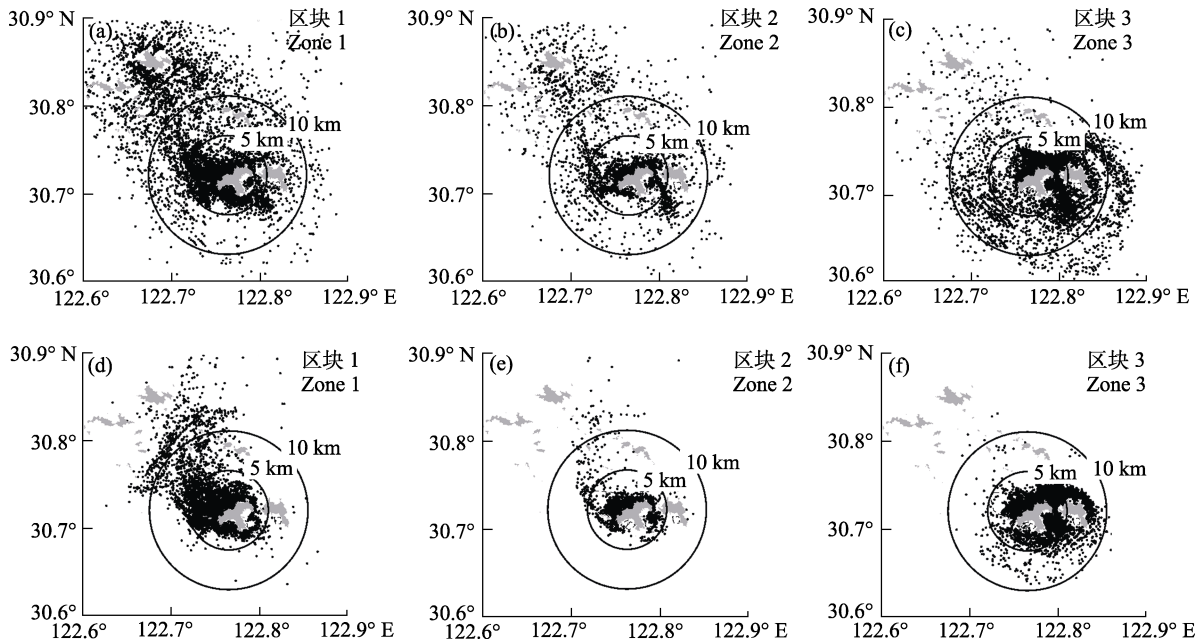


图9 海藻场不同特征区块海藻碎屑沉降分布($w=0.5$ cm/s)

Fig.9 Distribution of seaweed detritus sinking to the bottom in the characteristic block of seaweed during spring and neap tides($w=0.5$ cm/s)

a、b、c: 大潮时,特征区块1、2、3内海藻碎屑沉底分布; d、e、f: 小潮时,特征区块1、2、3内海藻碎屑沉底分布
a, b, and c are the distribution of seaweed detritus sinking in feature zone 1, 2 and 3 during spring tide, respectively. d, e, and f are distribution of seaweed detritus sinking in feature zone 1, 2 and 3 during neap tide, respectively.

3.2 天然海藻场对周边海域碳汇的贡献

如前文所述,枸杞岛西北侧天然海藻场在凋落盛期向周边海域输送的碳汇源强为 93.6 kg C/d。根据数值模拟试验海藻碎屑沉底数量统计结果(图7)并结合碎屑含碳量,可计算海藻场对周围海域单位面积日均

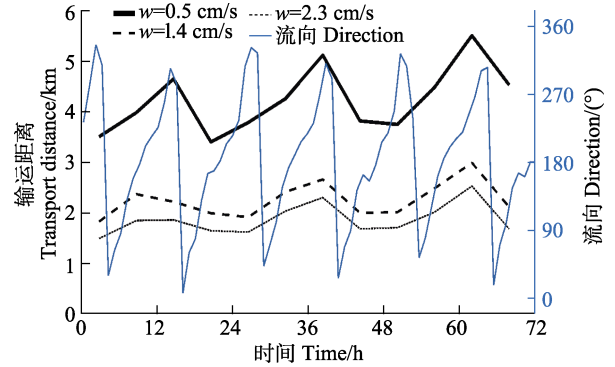


图8 涨落潮期间海藻碎屑输运距离平均值对比
Fig.8 Comparison of average transport distance of seaweed detritus during flood tide and ebb tide

黑色实线由粗到细表示0.5、1.4、2.3 cm/s的沉降速度;蓝色实线表示流向。

Solid black lines from thick to thin indicate settling velocities of 0.5, 1.4, and 2.3 cm/s, respectively. Solid blue lines indicate flow direction.

碳汇值 C_s ,反映海藻场对周边海域的碳汇贡献和生态辐射功能(图10)。

水动力和海藻碎屑重力是影响海藻场对周边海域碳汇贡献和生态辐射功能的重要因素(Krause-Jensen *et al*, 2016)。大潮期间,海藻场碳汇贡献不局限于近岸(图10a、b、c)。海藻场为5 km外海域贡献

约 7.5~33.7 kg C/d 碳汇。碎屑粒径越小, 输运距离越远(Kelly *et al*, 2012; Wernberg *et al*, 2008), 对外围海域碳汇贡献的范围越大。粒径较小的海藻碎屑 ($w=0.5$ cm/s), 约 14% (总碳含量约 13 kg C) 沉降至 10 km 以外海域。海藻场对外围海域的日均碳汇贡献不超过 10 g C/(hm²·d), 但辐射范围较广, 最远可达 20 km 左右。小潮期间水动力较弱, 海藻场对周边海域的碳汇贡献范围较小, 但单位面积的强度大。碳汇贡献集中分布于沿海岸藻场邻近海域, 且离岸递减

(Krumhansl *et al*, 2011)。5 km 以内海域日均碳汇总量约 84 kg C (图 10d、e、f)。碎屑粒径越大, 为近岸海域提供碳汇贡献越大, 最高约为 817 g C/(hm²·d), 而大潮时最高为 699 g C/(hm²·d)。受岛礁及贻贝养殖设施对潮流的遮蔽和削弱作用, 海藻场的碳汇分布呈以海藻场邻近海域为中心的高值区, 向西北-东南方向(涨落急潮流方向)递减的空间分布格局。涨潮流对外围海域碳汇贡献比落潮流显著。此外, 不同位置海藻场的碳汇贡献和生态辐射功能对涨落潮的响应不同(图 9)。

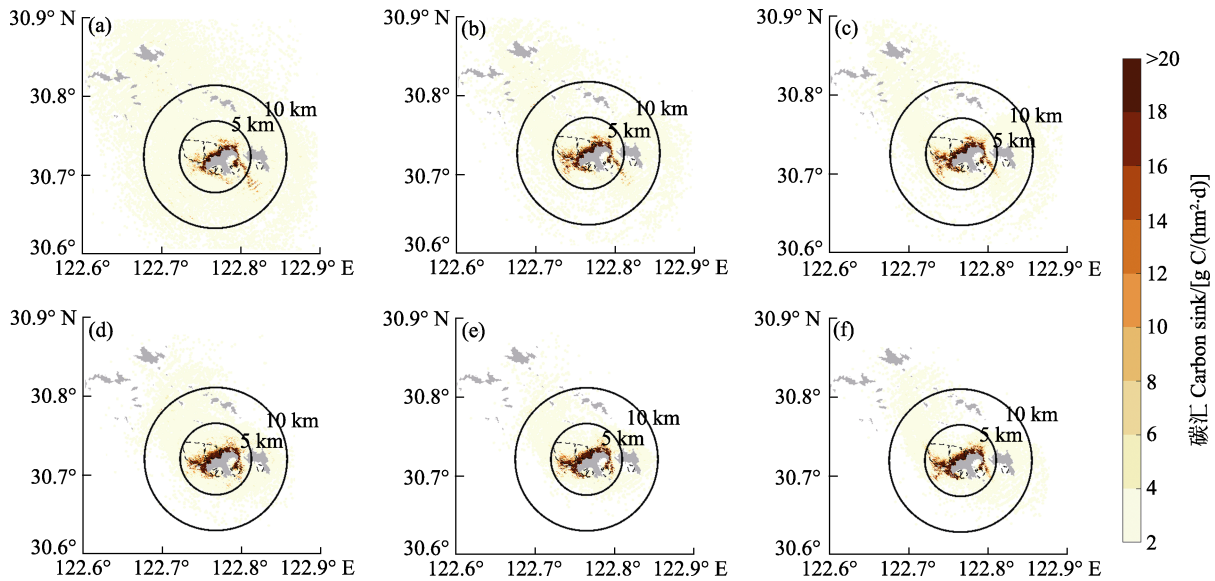


图 10 海藻场对周边海域碳汇贡献

Fig.10 Contribution of seaweed to carbon sink of surrounding sea area

a、b、c: 大潮, 沉降速度分别为 0.5、1.4、2.3 cm/s; d、e、f: 小潮, 沉降速度分别为 0.5、1.4、2.3 cm/s
a, b, and c: Settling velocities of 0.5, 1.4, and 2.3 cm/s during spring tide, respectively;
d, e, and f: Settling velocities of 0.5, 1.4, and 2.3 cm/s during neap tide, respectively.

本研究设置枸杞岛西北侧天然海藻场的平均固碳量为 22.4 kg C/(hm²·d), 约为海洋中浮游植物初级生产力 3.6 kg C/(hm²·d) 的 6 倍(Mateo *et al*, 2006; Krumhansl *et al*, 2012), 极大地提高了海域的初级生产力。但是, 近年来我国海藻场在全球气候变化、海洋酸化和人类活动等因素的干扰下, 有效面积越来越小(章守宇等, 2019), 初级生产力也在减弱。除在生长期促进海域初级生产力外, 海藻场在凋落期会释放大量有机碎屑, 海藻场的生态辐射功能对促进邻近海域碳汇和次级生产力也具有重要意义。大潮期间, 海藻场的生态辐射范围更广; 小潮期间, 输运距离较远的小粒径碎屑同样对外围海域有较强的碳汇贡献。海藻碎屑凋落后, 粒径较大的碎屑在输运过程中继续破碎分解为粒径更小的碎屑(Watanabs *et al*, 2009), 对外围海域碳汇贡献有很大的潜力。海藻场的生态辐射功能

不仅受水动力影响, 还与碎屑粒径大小、凋落时的涨落潮时刻及海藻场所处区位等有密切联系。海藻场向海洋输送有机碎屑的能力不仅与自身生物量有关, 还与所处海域潮振幅、波浪强度、风应力等有密切关系(Krumhansl *et al*, 2011)。后续研究应将海藻场对物理动力环境的响应、海藻碎屑生物量在输运过程中随时间的变化等加入到模型的计算中。此外, 本研究不同粒径海藻碎屑为含碳量相同的单一质点, 在后续研究中应增加不同海藻碎屑含碳量差异, 提高碳汇计算精度。

参 考 文 献

- ALI A, THIEM O, BERNTSEN J. Numerical simulation of flow and aquaculture organic waste dispersion in a curved channel. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(9/10): 1073–1082
ARAKAWA A, LAMB V R. Computational design of the basic

- dynamical processes of the UCLA general circulation model. *General Circulation Models of the Atmosphere*, 1977, 17: 173–265
- CHEN L R, ZHANG S Y, CHEN Y, *et al.* Life history and morphology of *Sargassum horneri* from the *Sargassum* seaweed bed of Gouqi Island. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1218–1229 [陈亮然, 章守宇, 陈彦, 等. 枸杞岛马尾藻场铜藻的生命史与形态特征. *水产学报*, 2015, 39(8): 1218–1229]
- CHEN Y M, XIANG J, DU H D, *et al.* Numerical simulation of Kuroshio path based on Lagrangian method. *Marine Forecasts*, 2019, 36(6): 22–28 [陈毓敏, 项杰, 杜华栋, 等. 基于拉格朗日方法对黑潮路径的数值模拟. *海洋预报*, 2019, 36(6): 22–28]
- DING D S, MA S S, CHEN B J, *et al.* Evaluation of the natural fishery resources loss caused by an oil spill accident in the central Bohai Sea based on Euler-Lagrange method. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(4): 36–42 [丁东生, 马绍赛, 陈碧鹃, 等. 基于欧拉–拉格朗日方法的某溢油事故天然渔业资源损失评估方法案例研究. *渔业科学进展*, 2016, 37(4): 36–42]
- EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183–204
- FAN S P, WANG Y F, FENG M Q, *et al.* Particle tracking random simulation on advection diffusion of pollutants. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(1): 32–36 [范世平, 王彦芳, 冯民权, 等. 污染物迁移扩散的质点追踪随机模拟. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(1): 32–36]
- FENG Y L, ZHANG X Q, YU J Z, *et al.* Study on material transport characteristics in Jiaozhou Bay based on Lagrangian method. *Marine Environment Science*, 2020, 39(1): 106–113 [冯依蕾, 张学庆, 于金珍. 基于拉格朗日方法的胶州湾物质输运特征研究. *海洋环境科学*, 2020, 39(1): 106–113]
- FILBEE-DEXTER K, WERNBERG T, NORDERHAUG K M, *et al.* Movement of pulsed resource subsidies from kelp forests to deep fjords. *Oecologia*, 2018, 187: 291–304
- GAO L P, FAN D J, SONG D H, *et al.* Numerical simulation of the migration path during the growth period of *Ulva prolifera* in the sea near northern Jiangsu and the thermohaline environment. *Haiyang Xubao*, 2021, 43(8): 1–16 [高丽萍, 范德江, 宋德海, 等. 苏北浒苔生长期运移路径及温盐环境的数值模拟. *海洋学报*, 2021, 43(8): 1–16]
- GAO Y P, FANG J G, TANG W, *et al.* Seagrass meadow carbon sink and amplification of the carbon sink for eelgrass bed in Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 17–21 [高亚平, 方建光, 唐望, 等. 桑沟湾大叶藻海草床生态系统碳汇扩增力的估算. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 17–21]
- HAN J J, BAI K Q, ZHAO M L, *et al.* Morphological observation of *Sargassum vachellianum* sexual reproduction and juvenile sporophyte development. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(6): 1215–1220 [韩军军, 白凯强, 赵明林, 等. 瓦氏马尾藻有性繁殖和幼孢子体发育的形态学观察. *水生生物学报*, 2016, 40(6): 1215–1220]
- HAYASHIDA F. On age and growth of a brown alga, *Ecklonia cava*. KJELLMAN, forming aquatic forest. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1977, 43(9): 1043–1051
- JIA H M. Assessment on seaweed beds resources based on BioSonics MX echosounder. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2020 [贾慧明. 基于 BioSonics MX 回声探测仪的海藻场藻类资源评估研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2020]
- JU L, JIANG W S, FENG S Z. A Lagrangian mean theory on coastal sea circulation with inter-tidal transports. *Numerical experiments. Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 28(1): 1–14
- KAEHLER S, PAKHOMOV E A, KALIN R M, *et al.* Trophic importance of kelp-derived suspended particulate matter in a through-flow sub-Antarctic system. *Marine Ecology Progress*, 2006, 316: 17–22
- KELLY J R, KRUMHANSL K A, SCHEIBLING R E. Drift algal subsidies to sea urchins in low-productivity habitats. *Marine Ecology Progress*, 2012, 452: 145–157
- KRAUSE-JENSEN D, DUARTE C M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 737–742
- KRUMHANSL K A, SCHEIBLING R E. Detrital production in Nova Scotian kelp beds: Patterns and processes. *Marine Ecology Progress*, 2011, 421: 67–82
- KRUMHANSL K A, SCHEIBLING R E. Production and fate of kelp detritus. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 467(10): 281–302
- LI J, GUAN C T, GONG P H, *et al.* Preliminary analysis of carbon sink mechanism and potential of artificial reef ecosystem. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 65–69 [李娇, 关长涛, 公丕海, 等. 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 65–69]
- LI X, LI M, MCLELLAND S J, *et al.* Modelling tidal stream turbines in a three-dimensional wave-current fully coupled oceanographic model. *Renewable Energy*, 2017, 114: 297–307
- LIN J, LI C, BOSWELL K M, *et al.* Examination of winter circulation in a northern Gulf of Mexico estuary. *Estuaries and Coasts*, 2016, 39(4): 879–899
- LIN J, WU X C, YANG W. Numerical modelling of sediment transport in artificial seamount under tidal current. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(12): 2087–2099 [林军, 吴星辰, 杨伟. 潮流作用下人工鱼礁山海域泥沙运输的数值模拟研究. *水产学报*, 2020, 44(12): 2087–2099]
- MATEO M, CEBRIAN, DUNTON K, *et al.* Carbon flux in seagrass ecosystems. AIP Publishing, 2006, 159–192
- PENG Z L, CHEN C R, WAN J, *et al.* Water particle tracking in inflow water for Hongze Lake and Lake Chaohu based on Lagrangian method. *Oceanologia et Limnologia Sinica*,

- 2020, 51(6): 1275–1287 [彭兆亮, 陈昌仁, 万骏, 等. 基于拉格朗日方法的洪泽湖与巢湖河流出入湖水体追踪计算. 海洋与湖沼, 2020, 51(6): 1275–1287]
- SAIDI M S, RISMANIAN M, MNOJEZI M, *et al.* Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches in predicting motion of micron-sized particles in laminar flows. *Atmospheric Environment*, 2014, 89: 199–206
- STENECK R M, GRAHAM M H, BOURQUE B J, *et al.* Kelp forest ecosystems: Biodiversity, stability, resilience and future. *Environment*, 2002, 29(4): 436–459
- WATANABE S, METAXAS A, SCHEIBING R E. Dispersal potential of the invasive green alga *Codium fragile* ssp. *fragile*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, 381(2): 114–125
- WEN Y, LIN J, YANG G L, *et al.* Study on hydrodynamic effect of suspended mussel aquaculture facilities and detritus transportation of epiphytic seaweed. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(3): 70–82 [温英, 林军, 杨冠林, 等. 贻贝浮筏养殖设施水动力效应及附生海藻碎屑运输的数值模拟. 上海海洋大学学报, 2022, 31(3): 70–82]
- WERNBERG T, FILBEE-DEXTER K. Grazers extend blue carbon transfer by slowing sinking speeds of kelp detritus. *Scientific Reports*, 2018, 8: 17180
- WERNBERG V T. Detached kelps from distant sources are a food subsidy for sea urchins. *Oecologia*, 2008, 157(2): 327–335
- WU H, ZHU J R. Advection scheme with 3rd high-order spatial interpolation at the middle temporal level and its application to saltwater intrusion in the Changjiang estuary. *Ocean Modelling*, 2010, 33: 33–51
- YANG Z, WANG T, COPPING A E. Modeling tidal stream energy extraction and its effects on transport processes in a tidal channel and bay system using a three-dimensional coastal ocean model. *Renewable Energy*, 2013, 50: 605–613
- YU L L, KUANG C P, GU J, *et al.* The comparative analysis of water exchange characteristics under artificial island by Eulerian and Lagrangian method. *Chinese Journal of Hydrodynamics(A)*, 2020, 35(4): 488–496 [俞露露, 匡翠萍, 顾杰, 等. 欧拉法和拉格朗日法比较分析人工岛工程下水体交换特性. 水动力学研究与进展(A), 2020, 35(4): 488–496]
- ZHANG S Y, LIU S R, ZHOU X J, *et al.* Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching. *Journal of fisheries of China*, 2019, 43(9): 2004–2014 [章守宇, 刘书荣, 周曦杰, 等. 大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨. 水产学报, 2019, 43(9): 2004–2014]
- ZHANG S Y, SUN H C. Research progress of seaweed field ecosystem and its engineering. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1647–1653 [章守宇, 孙宏超. 海藻场生态系统及其工程学研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1647–1653]
- ZHANG S Y, XIANG C, ZHOU X J, *et al.* Photosynthetic fluorescence characteristics of six macroalgae species in seaweed beds of Gouqi Island. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3441–3448 [章守宇, 向晨, 周曦杰, 等. 枸杞岛海藻场 6 种大型海藻光合荧光特性比较. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3441–3448]
- ZHU J R. Ocean numerical calculation method and numerical model. Beijing: China Ocean Press, 2003, 74–127 [朱建荣. 海洋数值计算方法和数值模式. 北京: 海洋出版社, 2003, 74–127]

(编辑 冯小花)

Study on Offshore Transport of Organic Detritus in Seaweed Field Based on Lagrange Method

YANG Guanlin¹, LIN Jun^{1,2}①, ZHANG Shouyu^{1,2}, LI Na¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract An important driver of coastal marine ecosystem processes involves seaweed photosynthesis converting atmospheric CO₂ into organic carbon and internally storing it to achieve carbon storage, which is of great significance for the realization of the goal of carbon neutrality and carbon peak in China. Seaweed fields transport a large amount of organic detritus to the ocean during

① Corresponding author: LIN Jun, E-mail: jlin@shou.edu.cn

the peak period of seaweed withering, providing primary productivity for the surrounding area and realizing the function of a carbon sink after settlement. The transport and settlement processes of seaweed detritus is one of the key dynamic processes connecting the circulation of important biogenic elements in different coastal habitats. It not only affects the primary productivity of the sea area around the seaweed field, but also affects the temporal and spatial distribution pattern of its carbon sink function.

In this study, a three-dimensional Ocean numerical model (Estuarine Coastal Ocean Model, semi-implicit, ECOM-si) coupled to a Lagrange particle tracking module were combined with tidal elevation, current velocity, and drift buoy trajectory to investigate the dynamic mechanism and carbon sink function of organic detritus transport and settlement processes in a natural seaweed field on the northwest of Gouqi Island. The model revealed the spatial distribution pattern of the organic detritus contributing to the carbon sink, which presents a high value area centered on the seaweed field and decreases in the northwest-southeast direction. The difference in the hydrodynamic conditions and particle size of the detritus leads to significant variation in the spatial distribution of the settlement. During spring tides, the highest carbon sink was $699 \text{ g C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ and the carbon sink contribution of seaweed detritus was not limited to the adjacent sea area. The smaller the particle size of the detritus, the larger its contribution range, contributing approximately $7.5 \sim 33.7 \text{ kg C}$ of organic carbon daily to the sea area 5 km away from the center of the seaweed area. During a neap tide (with lower flow velocity) the contribution of the seaweed area to the carbon sink was concentrated in the coastal area. The radiation range was relatively small, but the carbon sink intensity was high, reaching approximately $817 \text{ g C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$. The tidal current direction when seaweed detritus drops and the geographical location of the seaweed site are also important factors affecting the contribution of the seaweed field to the carbon sink and ecological radiation function. When the seaweed was located in relatively open terrain with less shielding by the tidal current, the settlement and distribution range of the organic detritus was wider and provided a greater contribution to the carbon sink in the surrounding sea area.

The Lagrange method is feasible for investigating the offshore transportation and settlement mechanism of organic detritus from a seaweed field. This method can effectively evaluate the contribution of a typical nearshore seaweed field to the carbon sink in the surrounding sea area and the role of the main dynamic factors. The research results reveal that the temporal and spatial characteristics of seaweed detritus transport and settlement and the carbon sink function are affected by many factors, such as tidal current magnitude, seaweed particle size (with different settlement velocities), detritus shedding time, and the geography of the location of the seaweed field. This research provides an important scientific reference for investigating seaweed fields and evaluating ecological radiation range in China.

Key words Lagrange particle tracking; Natural seaweed farm; Organic detritus; Marine carbon sink; Numerical model