

# 福州沿海赤潮暴发的物理-生态耦合模拟研究

丁萍

(福建省海洋预报台, 福建 福州 350003)

**摘要:** 基于物理-生态耦合数值模型对2019年5月发生在福州连江黄岐半岛附近海域的赤潮事件进行研究, 采用时空分析和叶绿素变化率方程诊断的方法, 对该赤潮事件的形成过程和成因进行分析。结果表明: 冷空气减弱造成的垂向层化和闽江口附近海域的离岸流输运共同作用, 促进了此次赤潮的发生。

**关键词:** 赤潮; 冷空气; 分层; 离岸流输运

**中图分类号:** X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)02-0080-11

## 1 引言

福建沿岸海域是中国赤潮多发海区之一, 多发期在春夏季的4—7月<sup>[1-2]</sup>, 高发期为5—6月, 主要发生在宁德市、福州市和厦门市沿海海域<sup>[3]</sup>。福建沿岸海域位于台湾海峡西侧, 台湾海峡是连接中国东海和南海的经向海峡, 其环流系统如图1所示, 主要由亚热带季风控制。台湾海峡的春季(4—5月)是风向由东北季风逐渐向西南季风转换的时段, 随着东北季风的减弱, 由东北风驱动沿着中国沿岸流动的新鲜的、冷的和营养盐丰富的浙闽沿岸水影响的范围逐渐减弱, 而黑潮分支水和南海水组成的高温高盐混合水通过水道(如: 澎湖水道, 见图1)进入台湾海峡且影响的范围逐渐增大<sup>[4-6]</sup>。浙闽沿岸水带来了丰富的营养物质, 同时南海混合水进入台湾海峡引起表层水温上升, 有利于浮游植物生长, 从而有利于赤潮的暴发。前人通过统计分析和数值模拟等方式对福建沿海赤潮从多方面进行了研究。邓华等<sup>[7]</sup>和杨昀等<sup>[8]</sup>从水文气象、春季沿海温盐及环流结构方面对2012年5—6月福建沿海大规模米氏凯伦藻赤潮的原因和严重后果进行了研究。结果表明2012年5月呈强北风特性, 水体向岸堆积作用明显, 有利于藻类在近岸的堆积聚集和种群密度的

提高, 为藻类的生长提供了稳定的动力环境, 促进了赤潮的暴发, 这说明5月东北季风为赤潮暴发提供了必要的动力环境。张亚峰等<sup>[9]</sup>和林静柔等<sup>[10]</sup>研究认为南海台风引起水体的垂向混合, 深层富营养水被带到表层, 经充足的光照后形成赤潮, 这说明丰富的营养物质和充足的关照是赤潮形成的充分条件, 缺一不可。林佳宁等<sup>[11]</sup>针对赤潮对皱纹盘鲍的危害原因进行了研究, 结果认为赤潮发生时皱纹盘鲍短时间内的大量死亡与米氏凯伦藻本身的毒

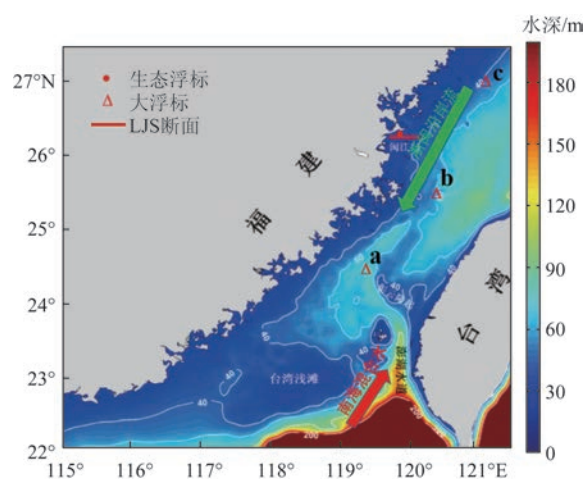


图1 研究区域及水深

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-07-09。

基金项目: “十三五”国家科技部重点专项(2017YFC1404800); 国家重点研发计划(2016YFE0202100)。

作者简介: 丁萍(1987-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋预报。E-mail: 756696314@qq.com

性效应有关,这揭示了赤潮会造成严重经济损失的机理。因此,如何利用现有技术来预测赤潮的发生成为当前研究的重要课题。张俊峰等<sup>[12]</sup>利用水文气象要素因子的变化趋势来预测赤潮的发生,认为赤潮生成前期日平均风速都在4级(7 m/s)以下,可作为判断有利于赤潮生成条件之一,且赤潮生物从初期繁殖到后期的爆发性繁殖,直至达到赤潮生物密度一般需要4~5 d。矫晓阳<sup>[13]</sup>通过叶绿素a对赤潮的预报原理进行探索,主要以叶绿素a大于某一基准值时连续2 d是否呈指数增长来判定未来1~3 d内是否会发生赤潮。结论指出多数种类赤潮时的叶绿素a在12~29 mg/m<sup>3</sup>之间,且调查数据显示夜光藻为赤潮的第一优势种时,叶绿素a约为5.1 mg/m<sup>3</sup>,这为预测赤潮的发生提供了有力的判断依据。

2019年5月福建沿岸海域发生多起赤潮事件,其中5月13—17日福州连江黄岐半岛附近海域赤潮的优势藻种为无毒夜光藻,面积约为1~3 km<sup>2</sup>(信息来源:福建省海洋与渔业局发布的《福建省赤潮灾害信息》)。此次连江黄岐半岛附近海域赤潮发生前期(5月7日)有冷空气影响,日平均风速14.7 m/s(7级),5月9日日平均风速降至7 m/s(4级)以下,冷空气带来高营养盐的浙闽沿岸水,风速降低后高温高盐的南海混合水通过水道进入台湾海峡。根据邓华<sup>[7]</sup>和杨昀等<sup>[8]</sup>的研究,此种条件有利于赤潮的发生,且与张俊峰等<sup>[12]</sup>研究中赤潮生物繁殖到爆发性繁殖并达到赤潮密度需要4~5 d的结论一致(即5月9日之后4 d即5月13日发现赤潮),但是其发生的具体原因尚未知。石晓勇等<sup>[14]</sup>研究指出台湾海峡水硝酸盐含量不高,造成了福建沿海常常产生“氮限制”。屠建波等<sup>[15]</sup>研究显示在长江口口门外无机氮异常丰富,浮游植物的生长主要受磷限制。由此可知,台湾海峡赤潮藻种暴发主要受氮限制,河口区域赤潮藻种暴发主要受磷限制,所以本文将采用主要考虑氮限制的物理-生态耦合模型来分析探讨此次赤潮发生的原因。

## 2 模型与验证

### 2.1 物理模式

本研究采用的是物理-生态耦合模式。物理模式为区域海洋模式系统(Regional Ocean Model

System, ROMS)<sup>[16]</sup>,在 Boussinesq 和垂向静压假定下,近似求解雷诺平均的 Navier-Stoke 方程。模拟区域包括西北太平洋,范围为 93.13°~147.68°E, 8.54°S~44.9°N(见图1),水平方向采用曲线正交网格,网格分辨率从开边界的40 km逐渐精细至台湾海峡的1.5 km。垂向分层采用S坐标系<sup>[17]</sup>,分为30层,网格点水深数据融合全球地形数据ETOPO1和福建沿海高精度水深(来源:中国人民解放军海军司令部航海保证部海图,分辨率100~300 m)。垂直混合系数采用 Mellor 等<sup>[18-19]</sup>的湍流闭合模型计算。

### 2.2 生态模式

生态模型源于模拟西北大西洋的海洋浮游生态系统模型(Nutrient Phytoplankton Zooplankton Detritus, NPZD)<sup>[20]</sup>。模型包括7个变量,变量及模型结构如图2所示。采用 Geider 等<sup>[21-22]</sup>的计算方法计算叶绿素与浮游植物生物量之间的关系,该方法考虑了光和营养条件的变化对浮游植物细胞内叶绿素量的影响。模式考虑了NH<sub>4</sub>对NO<sub>3</sub>吸收的抑制作用,将NO<sub>3</sub>(新生产力)与NH<sub>4</sub>(再生产力)的过程分开。有机大颗粒物和小颗粒物根据颗粒大小来区分。小颗粒物产生的源是浮游植物的死亡和浮游动物的低效摄食,大颗粒物是由小颗粒物与浮游植物聚合形成,颗粒物部分在水中再矿化为NH<sub>4</sub>,其余下沉至海底。

主要生物过程模型采用经典公式,如温度决定浮游植物的最大生产率<sup>[23]</sup>和光合作用与短波辐射的关系(P-I)<sup>[24]</sup>以及Holling-III类的S型曲线计算浮游动物对浮游植物的捕食率<sup>[25]</sup>。大多数生态参数值参考文献[21],其余精细化参数参考文献[6]。

### 2.3 模型设置

模型的驱动场采用的是福建省海洋预报台每日业务化运行的气象研究与预报(Weather Research and Forecasting, WRF)模式的预报产品。WRF模型的网格水平分辨率为20 km,边界场采用美国气象局环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)6 h间隔的全球预报系统(Global Forecast System, GFS)产品。目前基于WRF产品驱动的模式已成功开展应用<sup>[8, 26-28]</sup>。开边界场

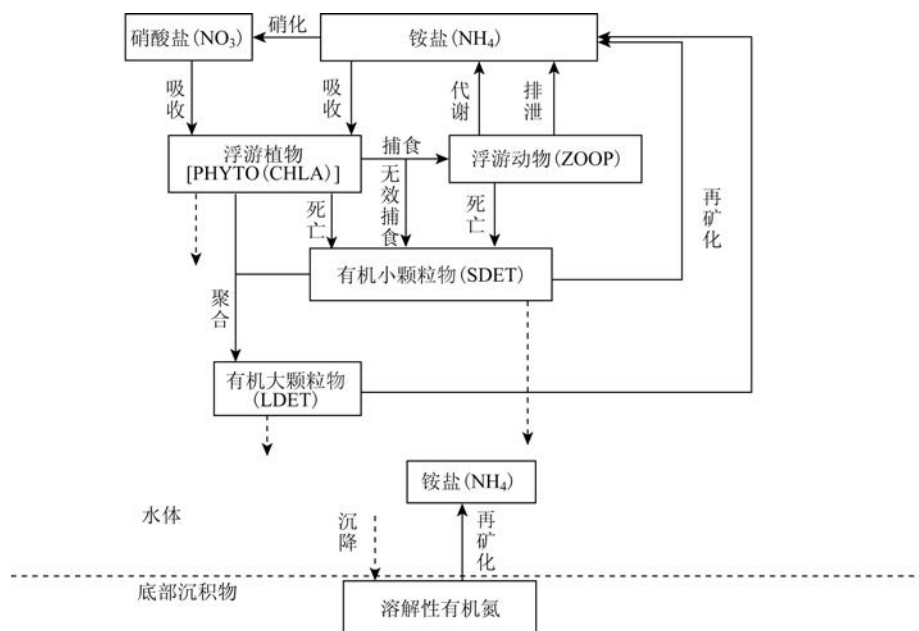


图2 生态模型结构示意图

采用法国麦卡托(Mercator)海洋中心的业务化产品,包含海表高度、温度、盐度和流。模型计算中的江河输入均以《中国海湾志》的主要河流各月多年平均流量代入。开边界潮汐引起的水位过程采用日本全球海洋潮汐预报模式(NAOTIDE)的天文潮调和常数,包含 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $P_1$ 、 $K_2$ 、 $Q_1$ 、 $M_1$ 、 $J_1$ 、 $OO_1$ 、 $2N_2$ 、 $Mu_2$ 、 $Nu_2$ 、 $L_2$ 和 $T_2$ ,共计16个分潮,以其5'网格分辨率的分析产品(NAO.99Jb)数据进行内插得到模型所需水位数据。生态模型生态初始场和边界场等见Wang等<sup>[6]</sup>的模型设置。模型调试稳定后,2016年9月1日开始在福建省海洋预报台每日业务化运行,生成未来7 d的数值预报产品。

## 2.4 模型验证

将生态浮标(图1中红色原点)实测数据与模型结果进行比较(见图3)来验证模型的可靠性。由图3所示,5月7—11日模型值低于观测值,11日之后模型值和观测值呈迅速增大趋势并于14日左右达到峰值,模型峰值略低于观测值,之后开始减弱。模型结果再现了2019年5月13日连江黄岐半岛附近海域暴发的赤潮过程,且模拟出了5月7日受冷空气影响及影响减弱后台湾海峡的流系及水温变化分布(见图4),因此模型结果可以用于此次赤潮暴发原因的进一步探究。因5月7—14日期间,风

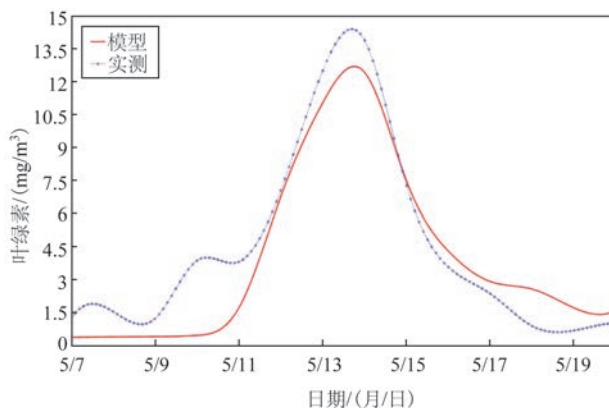


图3 5月7—20日实测与模型计算的叶绿素浓度

速明显减弱(见图5)而叶绿素浓度显著增大(见图3和图6),所以本文选择此段时间对赤潮发生原因进行研究。

## 3 结果与分析

### 3.1 模型叶绿素

模型表层叶绿素浓度如图6所示。由图5可知,因受冷空气影响5月7日东北风较强劲,日平均风速达14.7 m/s,图6a显示赤潮发生附近海域叶绿素浓度低于 $2 \text{ mg/m}^3$ ;当风速降到7 m/s以下时,图6h



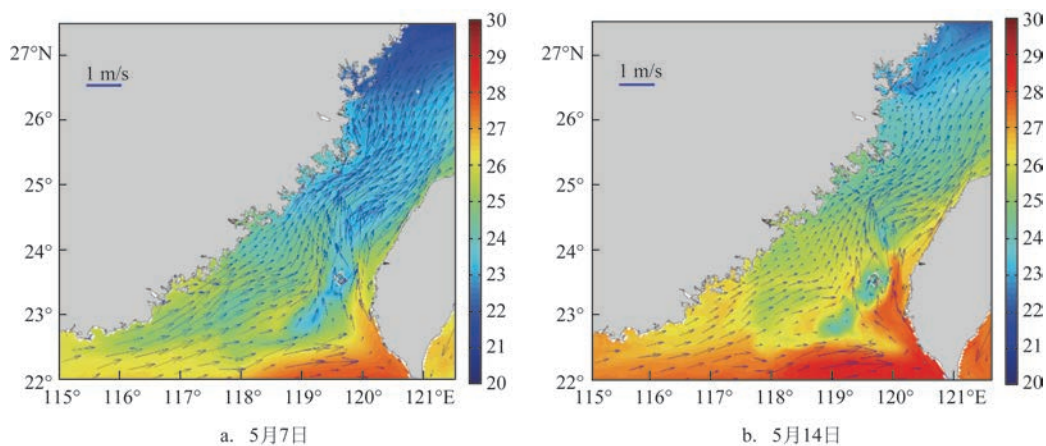


图4 5月7日和14日模型平均环流(箭头,单位:m/s)和海表温度(色度,单位:℃)

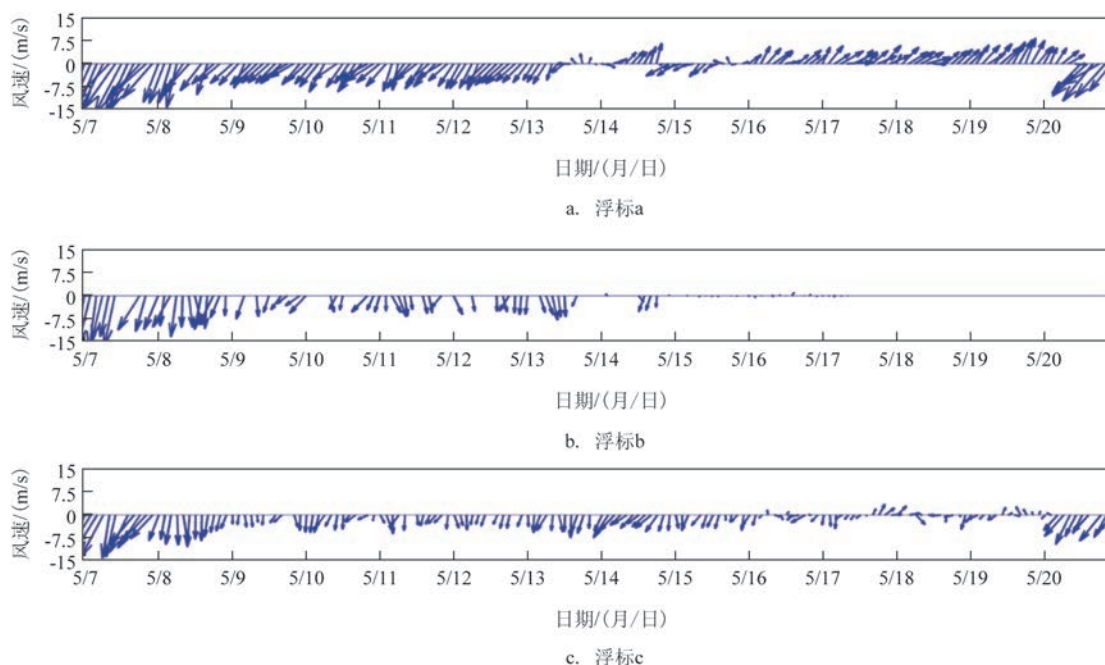


图5 5月7—20日大浮标风速及风向(浮标位置见图1)

显示赤潮发生区域(见图7a红色三角形处)叶绿素浓度明显增大,大于 $10 \text{ mg/m}^3$ ;在风速减弱的过程中,图6a—h显示闽江口附近叶绿素浓度逐渐增大且呈向外扩散趋势,14日赤潮发生海域附近的叶绿素浓度达到峰值约 $15 \text{ mg/m}^3$ ;图6i—k显示赤潮发生海域附近叶绿素浓度逐渐降低,因为16—17日福建沿海天气以小到中雨为主,天气形势不利于赤潮的维持(信息来源:福建省海洋与渔业局发布的《福建省赤潮灾害信息》)。综上可知叶绿素浓度时空变化与5月13日连江黄岐半岛海域发生的赤潮事

件时间基本一致,因此选取生态浮标海域的连江断面(Lianjiang Section, LJS)(位置见图1)对此次赤潮事件进行进一步的研究。

5月7日和14日LJS处的叶绿素和硝酸浓度分布如图8所示。14日LJS处表层的叶绿素和硝酸浓度较7日明显增大(见图8b和8d),并出现明显的分层,厚度小于5 m,垂向梯度增大;LJS处上层高叶绿素和硝酸浓度区域向外延伸,最远可达45 km处。由此可知,当风速减弱时,表层叶绿素浓度增大且向外延伸。

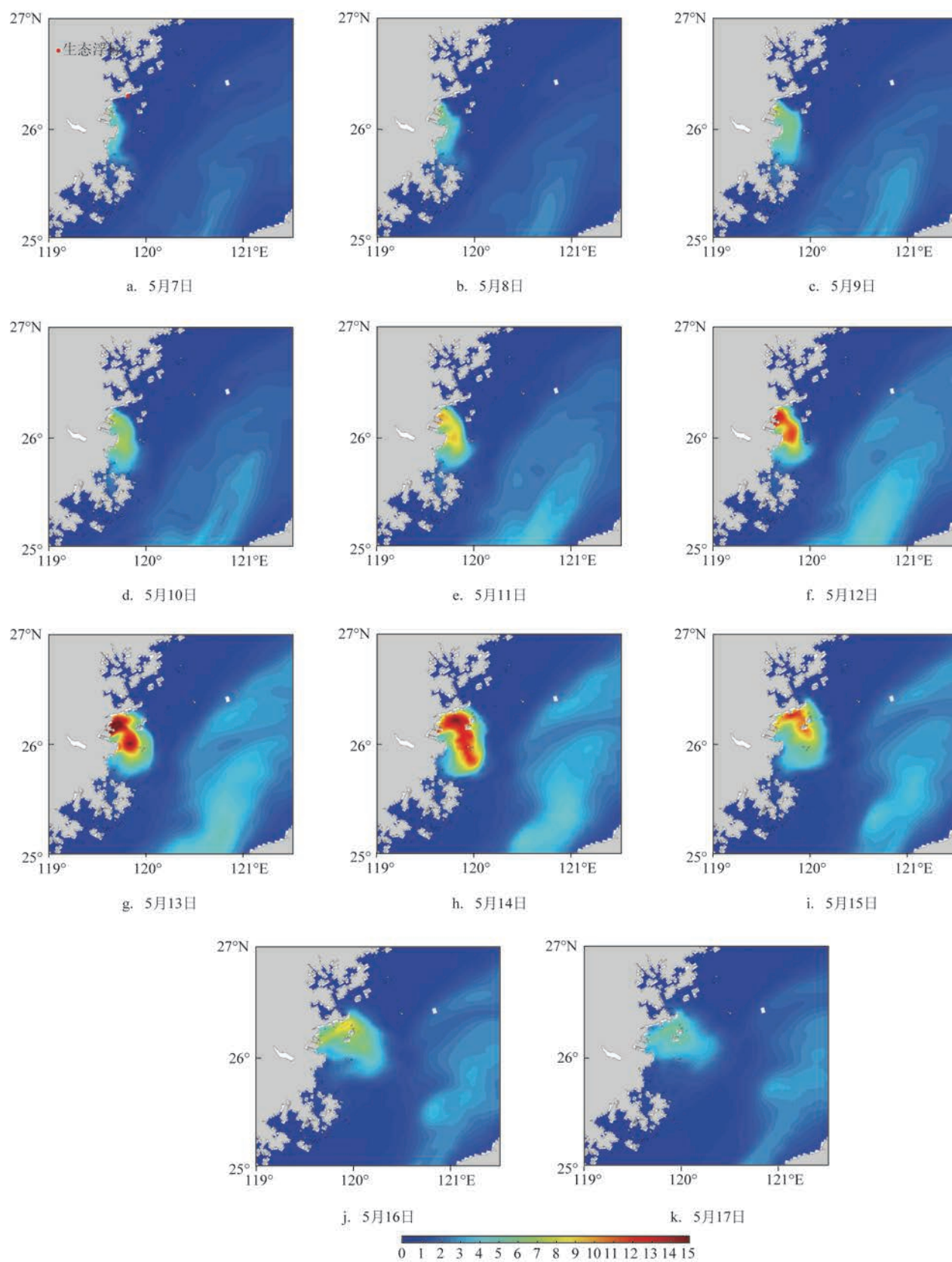


图6 5月7—17日模型海表叶绿素浓度分布(单位:mg/m<sup>3</sup>)

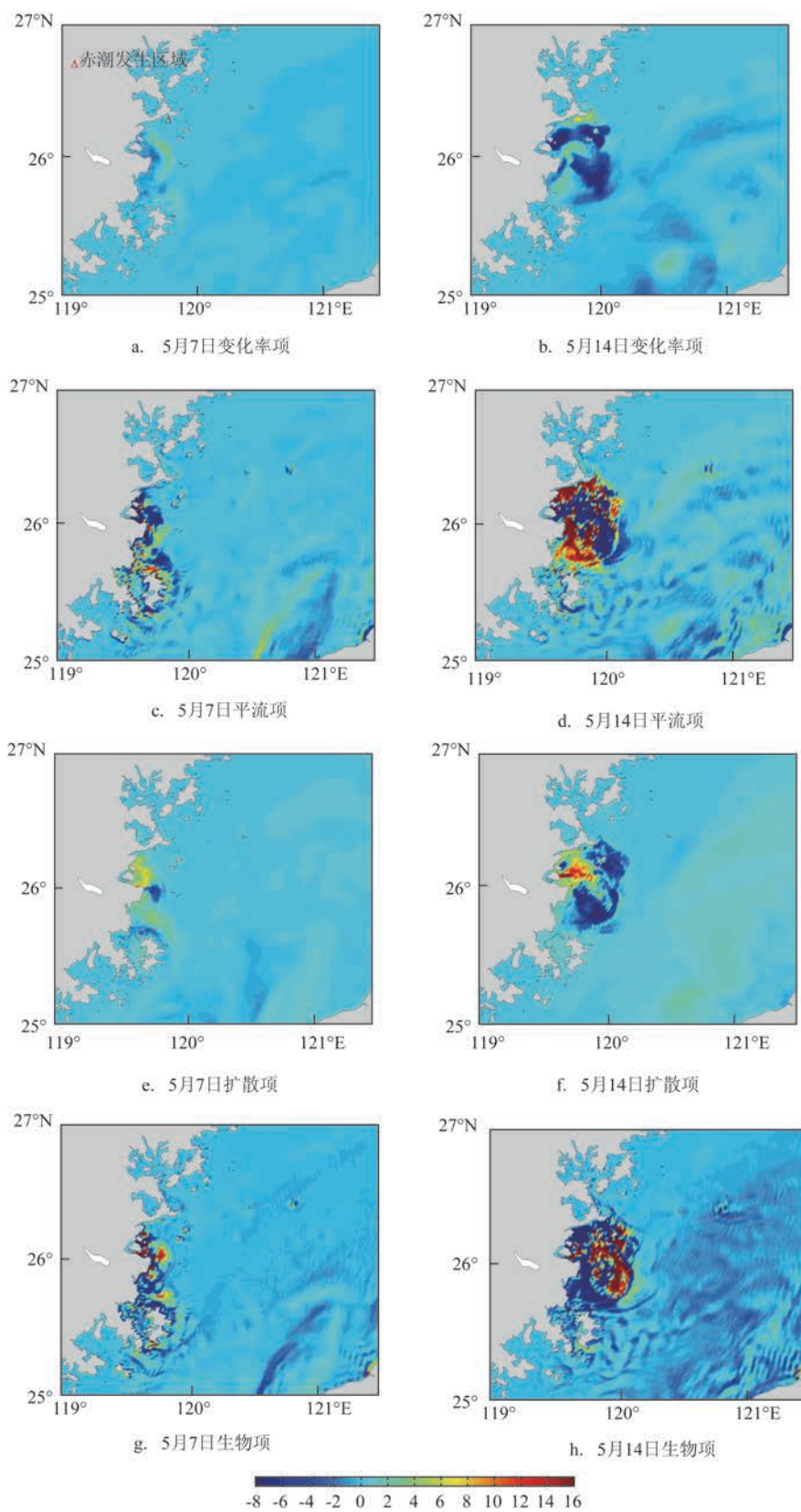


图7 5月7日和14日叶绿素变化方程诊断项的表层分布(单位: $\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ )



### 3.2 水动力过程

下面我们将对模型的水动力结果进行分析,探讨图6中叶绿素浓度分布及图8中对应LJS处叶绿素和硝酸浓度分布特征的成因。

#### 3.2.1 环流结构的变化

5月是台湾海峡季风转换的时段,从图4a可以看出5月7日受东北风影响,浙闽沿岸流较强,可将北部沿岸的低温低盐和高营养盐水向南运输到达厦门沿岸。5月14日风速较小,台湾海峡主要受高温高盐的南海混合水影响,北向流加强,水温整体上升。沿岸南下的浙闽沿岸水和海峡北上的暖水在生态浮标附近交汇,因此赤潮发生区域的海流较弱,这为赤潮的暴发提供了稳定的动力条件。

#### 3.2.2 分层和U方向流的加强

图9d和图9e显示在LJS处温度和盐度均出现明显的分层,水深小于5m的表层温度和盐度都具有较大的垂向梯度,水深大于5m区域则呈均匀分布。与图9a和9b相比可知风速较小时,台湾海峡较强的北向流将高温高盐的南海混合水往北运输,同时也阻挡了闽浙沿岸流的南下(见图4b)。浙闽

沿岸流带来的淡水密度小于南海混合水,因此淡水浮于表层形成分层,垂向梯度大,从而垂向混合作用减弱。

由图9c可知,5月7日风速较大,沿海为南向流,在科氏力作用下LJS处有较强的向岸流,流速可达0.24 m/s;5月14日风速较小,受径流和科氏力的作用,LJS处表现为较强的离岸流,流速可达0.26 m/s(见图9f)。从而解释了图6g—h和图8b中叶绿素浓度明显向外扩散的趋势。

综上可知,垂向分层和离岸流的共同作用促使了5月13日连江黄岐半岛附近海域赤潮的发生。

### 3.3 叶绿素变化的诊断分析

式(1)为叶绿素变化率方程。模型诊断结果可以清楚地反应物理和生物因素对叶绿素变化率(即模型根据计算出来的前后时刻的叶绿素浓度自行计算)的作用。方程左边是叶绿素的变化率,右边是物理和生物项,其中物理项包括平流、扩散和沉降;生物项包含浮游植物的生长和消耗,消耗是由浮游动物捕食、浮游植物死亡以及小颗粒物与浮游植物聚合3部分组成。

$$\begin{aligned} \frac{\partial[CHLO]}{\partial z} = & \underbrace{-\vec{u} \cdot \nabla[CHLO]}_{\text{平流}} + \underbrace{K_h \nabla^2[CHLO]}_{\text{扩散}} + \underbrace{\frac{\partial \left( K_m \frac{\partial[CHLO]}{\partial z} \right)}{\partial z}}_{\text{物理项}} - \underbrace{w \frac{\partial[CHLO]}{\partial z}}_{\text{沉降}} \\ & + \underbrace{\mu \cdot [CHLO]}_{\text{生物项}} + \underbrace{(-g \cdot [ZOOP] - m \cdot [CHLO] - \tau[CHLO])}_{\text{消耗}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:[CHLO]和[ZOO]分别表示叶绿素浓度和浮游动物浓度; $K_h$ 和 $K_m$ 分别表示水平和垂直扩散系数; $-\vec{u}$ 为速度; $\mu$ 为浮游植物生长率; $g$ 为浮游动物捕食率; $m$ 为浮游植物死亡率; $\tau$ 为浮游植物与小颗粒物聚合成大颗粒物的速率; $w$ 为浮游植物沉降速度。

图7中的诊断项包括叶绿素浓度的变化率、平流项、扩散项和生物项,其中浮游植物沉降项与其他项相比小两个数量级,忽略不计<sup>[6]</sup>。图7中色标的正值和负值分别对应各项对叶绿素增加和减少

的贡献。

闽江口附近海域的叶绿素变化率较低(见图7a),这与叶绿素浓度变化一致(见图6a—b)。5月7日式(1)的右侧项由图7c、7e和7g所示,低变化率是由于平流项(见图7c)、扩散项(见图7e)和生物项(见图7g)的抵消作用。5月14日闽江口附近海域叶绿素浓度变化率呈正负间隔现象(见图7b),赤潮发生附近区域叶绿素浓度变化率为正,这与叶绿素浓度变化相一致(见图6h)。赤潮发生附近区域叶绿素正的变化率(见图7b)是因为扩散项(图7f较图

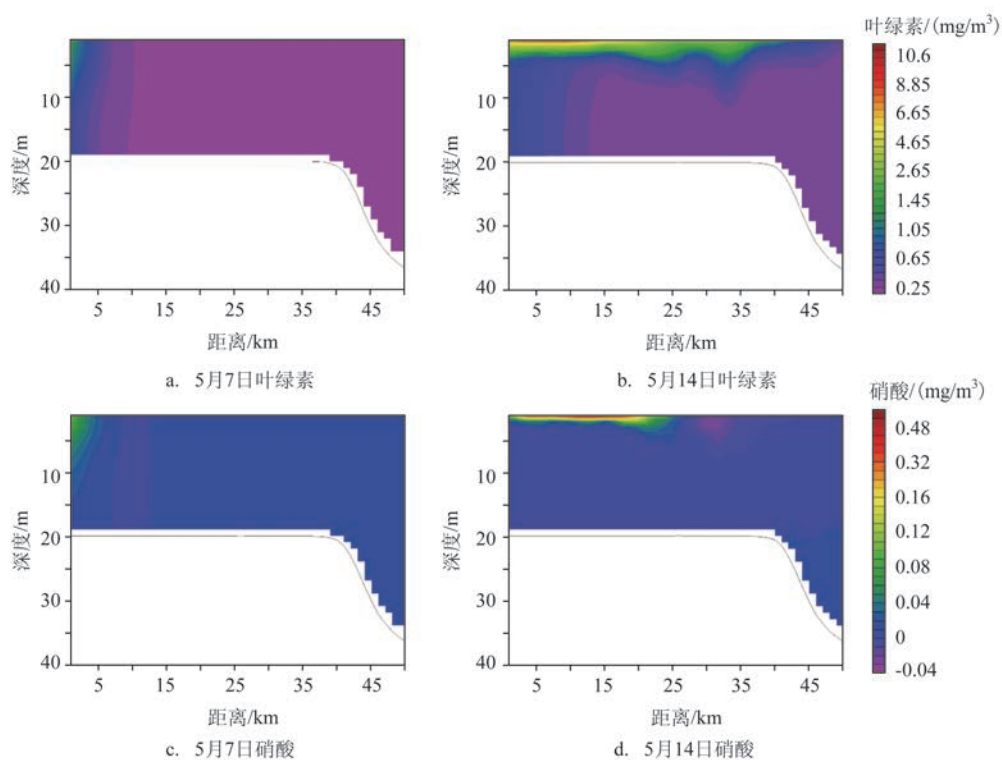


图8 5月7日和14日模型LJS处叶绿素和硝酸分布

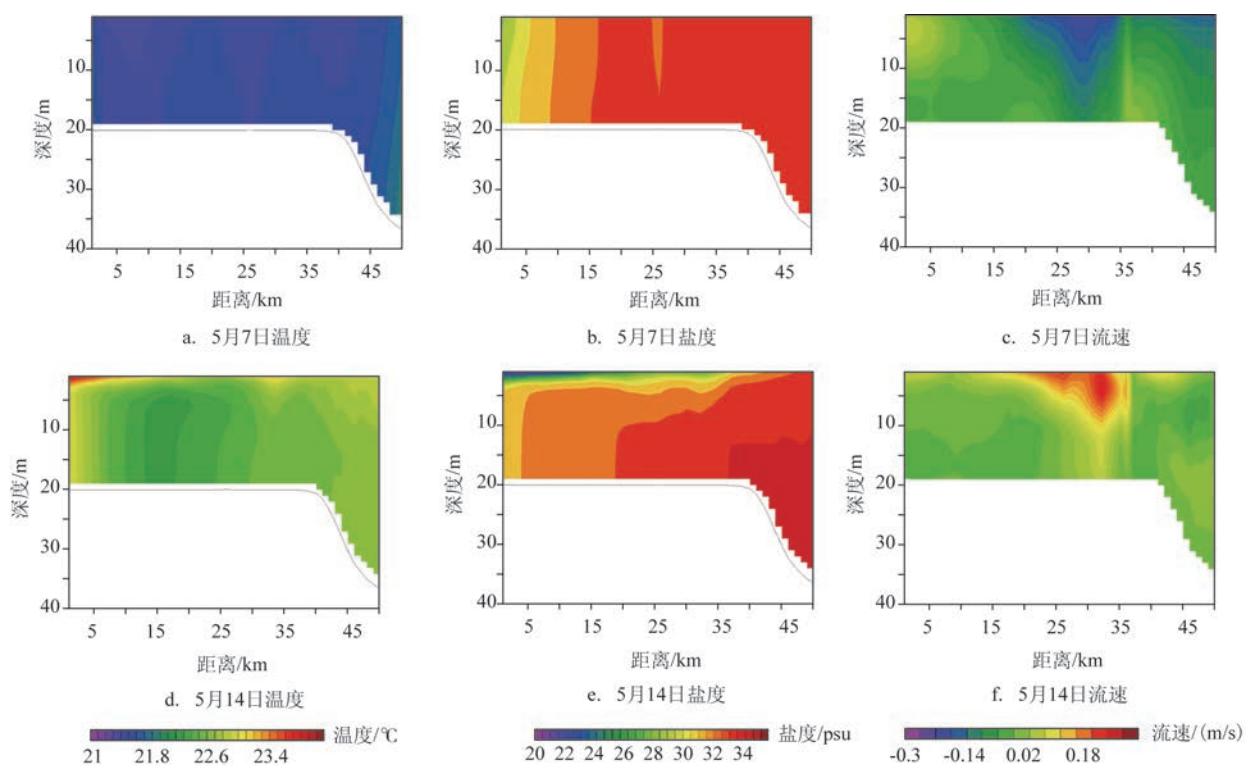


图9 5月7日和14日模型温度、盐度和U方向流速(正值表示正东方向)在断面处的垂向分布



7e)和生物项(图7h较图7g)在该区域减弱,而平流项(图7d较图7c)在该区域显著增强。也就是说平流项(图7d较图7c)的明显增强是赤潮发生附近区域表层叶绿素浓度增加的主要动力因素(见图6h),即平流项的显著增大是赤潮发生区叶绿素浓度上升的主要原因。

图10是LJS处的平流项、生物项及扩散项的垂

向分布,可用来进一步说明图7中表层叶绿素变化率分布是由扩散项的减弱和平流项的增强共同影响。生物项在14日出现明显的上下层结构(见图10c和10d),并且出现上层高值区与低值区并存的现象。上层生物项的明显增加是因为有了充足的光照和高营养盐,浮游植物光合作用效率提高,表层浮游植物的增长速率大于消耗,表层表现为叶绿

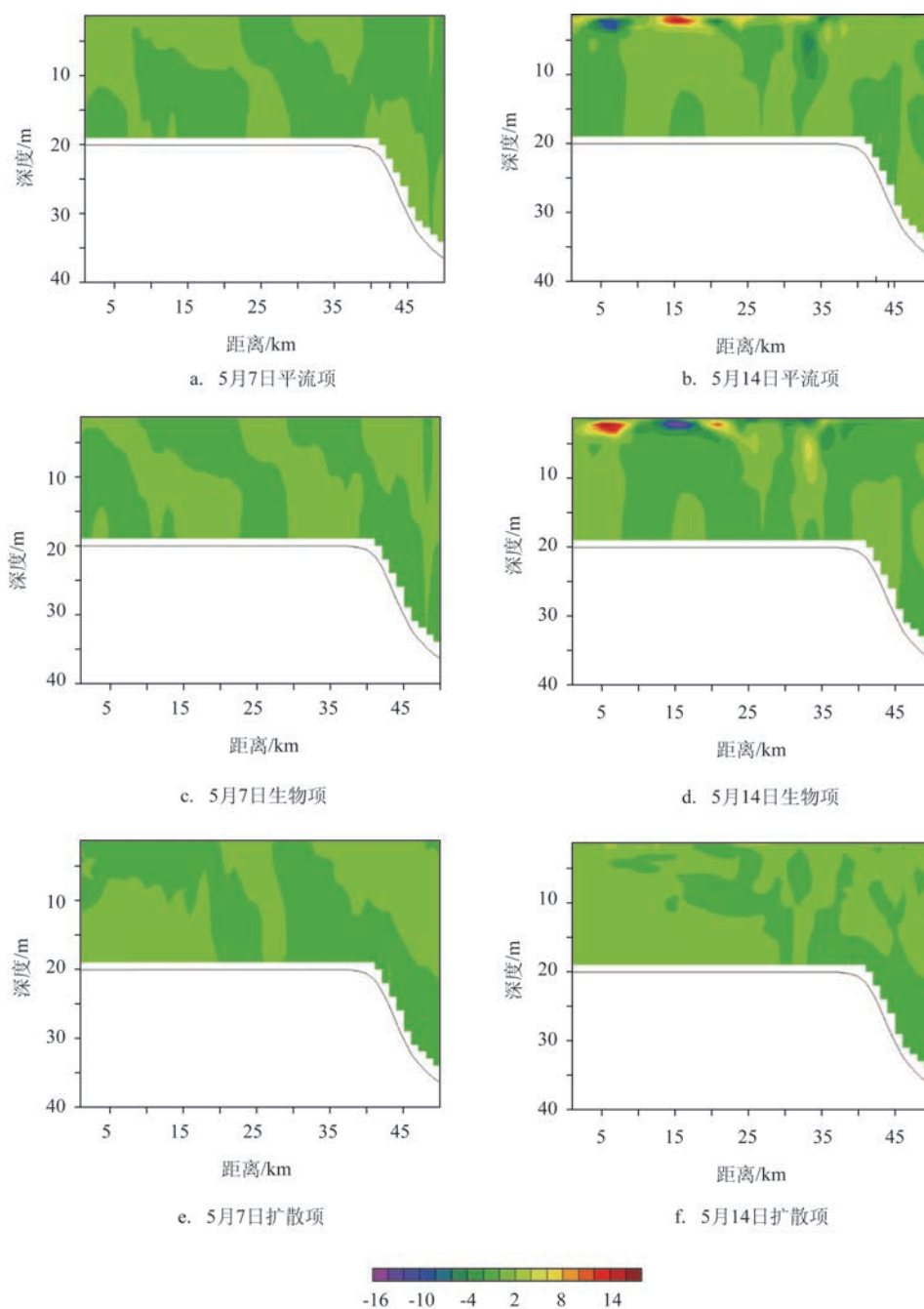


图10 5月7日和14日叶绿素变化方程中平流项、生物项和扩散项在断面处垂向分布(单位: $\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ )

素净增长(见图10c和10d中正值);虽然光在水体中随水深递减,但因为水深较浅,下层水体中叶绿素仍然表现为净增长,较上层相对较小(见图10c和10d中正值)。图10d中生物项出现上下层结构是由于垂向混合作用减弱形成的,上层表现为高低值相间并向外延伸,是由平流项的作用导致。平流项强的位置(见图10b正值较大区域)对应生物项表现较弱的位置(见图10d负值较小区域),二者表现为较好的反相位对应关系。

因此,浮游植物生长所产生的叶绿素在垂向混合和水平平流的作用下重新分配。平流项(见图10a)与生物项(见图10c)在LJS处几乎呈相反位相。图10a中平流项正值表明表层生物生长产生的叶绿素在水平平流的作用下被向外运输,叶绿素浓度向外扩散,与叶绿素浓度变化趋势(见图6a—h)一致,且图10a平流项和图10c生物项及图10b平流项和图10d生物项之间反位相的对应关系也支持上述解释。图10c生物项中负值表明浮游植物由于平流的作用被往外运输,导致此处的浮游植物量减少大于增多,即相当于此处浮游植物的生长降低。图10e上层扩散项的负值表示上层生物生长产生的叶绿素在垂向混合的作用下往下层运输,降低了表层叶绿素浓度,叶绿素浓度(见图8a)和硝酸浓度(见图8c)分布可以用来支持此解释。5月7—14日,随着风速的减弱,表层平流项的增大加强了表层叶绿素向外运输,图10c和10d生物项的分布可支持此结论;图10e和10f可以看出,扩散项的减弱减少了叶绿素向下运输,上层叶绿素表现为净增长,从而出现上下层结构(见图8b和10d)。

从叶绿素变化的诊断分析来看,5月7日在强东北风的作用下,表层生物生长产生的叶绿素由于扩散和水平平流作用被稀释,表现为叶绿素的低浓度。风速较小时(5月14日)扩散作用减弱,水平平流作用加强,表层浮游植物迅速繁殖且在平流作用下向外运输,从而出现叶绿素浓度高值区并向外延伸。

## 4 结论

2019年5月13日连江黄岐半岛发现赤潮,本文用物理-生态耦合模型揭示了冷空气及其减弱过程

中发生的物理过程是促使这次赤潮发生的重要因子。分层和离岸流是赤潮发生的两个重要因素,其中离岸流占主导作用。本研究揭示了福建沿海赤潮的发生原因和形成机制,有助于理解福建沿海同藻种赤潮在附近沿海先后出现的现象,为预测福建沿海赤潮的发生提供科学依据。但是赤潮发生是一个复杂的过程,要想更清楚地理解赤潮并实现准确预测,需要综合气象、水文、水动力、营养盐和藻种特点等要素来探讨分析。

## 参考文献:

- [1] 许翠姬, 黄美珍, 杜琦. 福建沿岸海域主要赤潮生物的生态学特征[J]. 台湾海峡, 2010, 29(3): 434-441.
- [2] 郭皓, 丁德文, 林凤翔, 等. 近20 a我国近海赤潮特点与发生规律[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(4): 547-558.
- [3] 李雪丁. 福建沿海近10 a赤潮基本特征分析[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2210-2216.
- [4] Jan S, Wang J, Chern C S, et al. Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait[J]. Journal of Marine Systems, 2002, 35(3/4): 249-268.
- [5] Hu J Y, Kawamura H, Li C Y, et al. Review on current and seawater volume transport through the Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography, 2010, 66(5): 591-610.
- [6] Wang J, Hong H S, Jiang Y W. A coupled physical-biological modeling study of the offshore phytoplankton bloom in the Taiwan Strait in winter[J]. Journal of Sea Research, 2016, 107: 12-24.
- [7] 邓华, 管卫兵, 曹振铁, 等. 2012年福建沿海大规模米氏凯伦藻赤潮暴发的水文气象原因探讨[J]. 海洋学研究, 2016, 34(4): 28-38.
- [8] 杨昀, 黄海龙, 曾银东, 等. 2012年大规模米氏凯伦藻赤潮前后年份春季福建沿海温盐及环流结构对比[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 553-562.
- [9] 张亚锋, 王旭涛, 殷克东. 南海台风引发藻华的生物机制[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5667-5678.
- [10] 林静柔, 唐丹玲, 娄全胜. 超级台风“南玛都”对南海北部叶绿素a、温盐及溶解氧的影响[J]. 生态科学, 2015, 34(4): 9-14.
- [11] 林佳宁, 颜天, 张清春, 等. 福建沿海米氏凯伦藻赤潮对皱纹盘鲍的危害原因[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(1): 27-34.
- [12] 张俊峰, 俞建良, 庞海龙, 等. 利用水文气象要素因子的变化趋势预测南海区赤潮的发生[J]. 海洋预报, 2006, 23(1): 9-19.
- [13] 矫晓阳. 叶绿素a预报赤潮原理探索[J]. 海洋预报, 2004, 21(2): 56-63.
- [14] 石晓勇, 李鸿妹, 王颢, 等. 夏季台湾暖流的水文化学特性及其对东海赤潮高发区影响的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(5): 1208-1215.
- [15] 屠建波, 王保栋. 长江口营养元素生物地球化学研究[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(4): 10-13.

- [16] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9(4): 347-404.
- [17] Song Y H, Haidvogel D. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, 115(1): 228-244.
- [18] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(4): 851-875.
- [19] Mellor G L. One-dimensional, ocean surface layer modeling: a problem and a solution[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(3): 790-809.
- [20] Fennel K, Wilkin J, Levin J, et al. Nitrogen cycling in the middle atlantic bight: results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): GB3007.
- [21] Geider R J, MacIntyre H L, Kana T M. A dynamic model of photoadaptation in phytoplankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(1): 1-15.
- [22] Geider R J, MacIntyre H L, Kana T M. Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and the chlorophyll a: carbon ratio to light, nutrient-limitation and temperature[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 148: 187-200.
- [23] Eppley R W. Temperature and phytoplankton growth in the sea[J]. *Fishery Bulletin*, 1972, 70(4): 1063-1085.
- [24] Evans G T, Parslow J S. A model of annual plankton cycles[J]. *Biological Oceanography*, 1985, 3(3): 327-347.
- [25] Gentleman W, Leising A, Frost B, et al. Functional responses for zooplankton feeding on multiple resources: a review of assumptions and biological dynamics[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(22/26): 2847-2875.
- [26] 郭民权, 曾银东, 李雪丁, 等. 平潭近岸海域浮游生物漂移轨迹及其数值模拟[J]. *应用海洋学学报*, 2014, 33(4): 449-454.
- [27] 曾银东. 平潭海域精细化三维温盐流业务化数值预报系统[J]. *海洋预报*, 2017, 34(6): 39-47.
- [28] Wang W, Wang J, Choi F M P, et al. Global warming and artificial shorelines reshape seashore biogeography[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(2): 220-231.

## Physical-ecological coupling simulation study on a red tide outbreak event along the coast of Fuzhou

DING Ping

(*Fujian Marine Forecasts, Fuzhou 350003 China*)

**Abstract:** Based on a coupled physical-ecological numerical model, the formation processes and causes of the red tide event occurred near the coast of Huangqi peninsula of Fuzhou in May 2019 is analyzed using temporal-spatial analysis and diagnosis of chlorophyll change rate equation. The results show that the vertical stratification caused by the weakening of cold air and the offshore transport near the Minjiang estuary contribute to the occurrence of the red tide event.

**Key words:** red tide; cold air; stratification; offshore transport