

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*

杨 昀^{1,2} 黄海龙² 曾银东³ 管卫兵^{1,2} 李雪丁³ 郭民权³

(1. 浙江大学 海洋学院 舟山 316021; 2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室 自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012;
3. 福建省海洋预报台 福州 350003)

摘要 近岸海域营养物质普遍充足, 因此水文气象过程往往成为赤潮暴发最重要的控制因素。基于福建海洋预报台提供的模式数据, 通过对比分析 2011—2013 年 3—5 月福建近岸的温度、盐度、环流和上升流结构, 阐述了 2012 年春季福建近岸米氏凯伦藻赤潮暴发的特殊水文结构特征, 并通过经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析方法探讨了此次赤潮暴发的主要水文原因。结果表明: (1)与其他年份相比, 2012 年 3 月福建近岸浙闽沿岸流偏强, 海温偏低, 不利于东海原甲藻的生长。(2)3 月下旬福建近岸温度较其他年份升高迅速, 与台湾暖流强度变化有关。(3)3 月底—5 月 18 日赤潮暴发前, 福建近岸海域整体偏暖, 持续的东北风带来稳定的水体向岸流动, 水平和垂向上各项要素变化较弱, 为米氏凯伦藻赤潮暴发提供了稳定、适宜的环境条件。(4)5 月 18 日赤潮暴发后一周内, 赤潮优势种由东海原甲藻转变为米氏凯伦藻以及米氏凯伦藻赤潮整体稍向东迁移的过程, 与近岸水温上升至 24°C, 且东北风转为西南风引起较弱的水体离岸流动有一定关联性。

关键词 福建沿岸; 赤潮; 米氏凯伦藻; 经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyh20180700178

赤潮是指海洋中浮游生物在一定环境下爆发性增殖或聚集而引起海水变色, 包括所有能使海水颜色变化的有毒藻类和无毒藻类, 以及虽然不能改变海水颜色但是有毒性的藻类(刘志国等, 2014)。中国及世界各地沿岸都存在着有害赤潮暴发次数增多, 规模变大的趋势, 在造成巨大经济损失的同时, 也危害着人类的身体健康(Vanhoutte-Brunier *et al*, 2008)。在我国近岸海域, 米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)分布广泛, 是典型的鱼毒性赤潮藻。福建海域是东海米氏凯伦藻赤潮的主要发生区。李雪丁(2012)收集了 2001—2010 年近 10 年共 161 起在福建沿岸暴发的赤潮资料, 主要赤潮生物分别为东海原甲藻、夜光藻、中肋骨藻等, 其中米氏凯伦藻赤潮事件为 6 起。2012 年 5 月 18 日—6 月 8 日, 福建沿岸海域共发现 10 次

米氏凯伦藻为优势种的藻华, 累计面积 323km², 直接经济损失 20.11 亿元(中国海洋灾害公报, 2012)。赤潮的发生与水温、盐度、气象、水动力、营养盐等环境条件密切相关(许翠娅等, 2010)。针对 2003 年 5—6 月福建连江海域暴发的米氏凯伦藻赤潮, 龙华等(2005)认为强降雨、充足光照、稳定的气温和良好的海况是其发生和发展的必要条件, 其中米氏凯伦藻赤潮的适宜水温范围是 20.5—24°C, 最高的细胞密度出现在 23°C 附近, 适宜盐度范围为 27.9—30.5。相同海域也常常出现以不同藻类为优势种的赤潮。姚炜民等(2007)研究了 2005 年 5 月底发生在浙江海域的米氏凯伦藻赤潮, 结果表明米氏凯伦藻生长最适水温为 23.4—23.8°C, 而 24°C 左右的气温和良好的海况是赤潮发生及维持的重要因素。朱德弟等(2009)讨论

*国家重点研发计划项目, 2017YFC1404300 号; “全球变化与海气相互作用”专项, GASI-IPOVAI-04 号; 卫星海洋环境动力学国家重点实验室自主项目, SOEDZZ1805 号, SOEDZZ1803 号。杨昀, 博士研究生, E-mail: yuriyy@126.com

通信作者: 管卫兵, 研究员, E-mail: gwb@sio.org.cn

收稿日期: 2018-07-23, 收修改稿日期: 2018-11-10

了 2005 年春初浙江近海的低温特征对东海原甲藻赤潮发生的影响,认为前期的海温异常对后期藻类的生长有重要影响。而对于另一东海赤潮高发区的甲藻赤潮主要优势种东海原甲藻,赵水东(2006)认为适合东海原甲藻生长的盐度范围是 25—35,最适盐度为 30。沈盎绿(2014)通过不同温度梯度下共同培养实验得到,东海原甲藻最适生长温度为 20°C,而在低温条件下(16—20°C)与米氏凯伦藻的竞争中海原甲藻占据一定的优势。丁光茂和张树峰(2016)分析了 2012 年春末夏初福建三沙湾海域米氏凯伦藻赤潮期间的气象、水文等情况,同时结合室内模拟培养实验认为米氏凯伦藻细胞生长的最适温度和盐度分别为 22.0—25.0°C 和 26.0—30.0,且稳定的水文和气象条件等是此次米氏凯伦藻赤潮形成和维持的重要条件之一。邓华等(2016)从 2012 年春季的温度变化、气候态风场及降水等水文气象条件出发,对 2012 年福建沿岸春季米氏凯伦藻赤潮大规模暴发的原因进行了探讨,认为迅速升高的气温是促成米氏凯伦藻成为优势种的直接原因,同时向岸风和降雨带来的营养盐则分别为米氏凯伦藻的生长提供了稳定的动力环境和适宜的化学环境。在利用遥感追踪米氏凯伦藻漂移痕迹的基础上(Davidson *et al.*, 2009), Gillibrand 等(2016)为研究 2006 年苏格兰沿海暴发的米氏凯伦藻赤潮的输运和扩散机制建立了一个物理-生物模式,主要针对初始种群分布,藻类生长和死亡率,水温,通过日照和涡旋扩散引起的垂向运动,大陆架边缘和沿海流的相对作用以及风强迫作用等水动力控制条件进行了模拟分析,所得模拟结果与多个沿海监测站的遥感等资料基本一致。

考虑到 2011 和 2013 年福建沿海无米氏凯伦藻本种赤潮暴发(中华人民共和国自然资源部, 2011, 2013),本文根据三维数值模式结果,通过对比米氏凯伦藻大规模旺发的 2012 年春季及前后两年同期福建海域水体温度、盐度和三维流场,分析讨论 2012 年赤潮暴发前后福建沿海的温、盐及环流结构特征,并运用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析方法探讨引起米氏凯伦藻赤潮大规模暴发的主要水动力因素。

1 数据来源和计算方法

本文结果以福建海洋预报台提供的模式数据为基础进行分析。该模式基于 ROMS(Regional Oceanic Modeling System)建立了三维数值模型,采用多源融合水深,利用欧洲 MyOcean 业务化预报产品作为温、

盐、流及环流水位资料边界条件,日本 NAOTIDE 的潮汐调和常数为边界潮汐条件,年平均流量为河流输入,国家海洋预报中心 WRF(Weather Research and Forecasting)产品的风场资料为上边界条件。该模型采用大小网格嵌套方法,大区域网格范围为 95—147.9°E, 9—40.01°N。大小网格均采用曲线正交网格,大网格开边界网格距为 45km,到台湾海峡为 1.5km。小网格在大网格中以 1:11 或 1:7 加密,福建沿海网格距可达 150—200m。大、小网格垂向均取 30 层,最大水深 5500m,最小水深 10m,采用对数形式垂向分层,海表分层加密,海底分层较疏。此外,模型利用大量台湾海峡观测数据和卫星数据进行四维变分同化。目前基于该模式的数值模拟结果已发表文章数篇,模式数据可靠性高(李雪丁等, 2014; 郭民权等, 2014; Wang *et al.*, 2016)。

本文以福建沿海(图 1)米氏凯伦藻赤潮大暴发的海域为主要研究区域,首先将该区域内的模式数据进行月平均计算,对不同年份的海水月平均特征进行初步的区域平面、垂向断面和定点剖面对比分析,然后分别对区域内的温度、流速及模式使用的风场数据进行 EOF 分析,详细对比各场要素在 2011—2013 年间的第 1 模态及第 1 模态时间序列,进一步分析探讨 2012 年春季福建沿海水文环境为米氏凯伦藻大暴发提供的特殊水动力条件。自 20 世纪 50 年代以来, EOF 分析法将复杂的时空场分解为空间模态和与之相应的时间变化系数,成为一种分析矩阵数据中的结构特征和提取主要数据特征量的方法,在气象、海洋及其他学科中已得到了广泛的应用(曾广恩等, 2006; Hannachi *et al.*, 2007)。

2 2012 年福建米氏凯伦藻大暴发过程简介

2012 年 5 月福建沿岸米氏凯伦藻暴发过程如下(福建沿海赤潮灾害预测预警, 2012): 5 月 18 日在三沙湾海域发现赤潮,赤潮生物优势种为东海原甲藻; 5 月 24 日赤潮已漂移至三沙湾以东海域; 5 月 26 日三沙湾海域东海原甲藻赤潮伴生米氏凯伦藻,平潭海域发生以米氏凯伦藻为第一优势种的有毒赤潮; 5 月 28 日米氏凯伦藻大面积暴发于福建沿岸北部海域; 米氏凯伦藻赤潮一直持续到 6 月 3 日,此后连江海域、莆田海域米氏凯伦藻密度低于赤潮发生的基准密度,优势种转为中肋骨条藻; 6 月 6 日三沙湾海域、平潭海域赤潮面积减小,优势种为米氏凯伦藻; 6 月 8 日赤潮基本消亡。

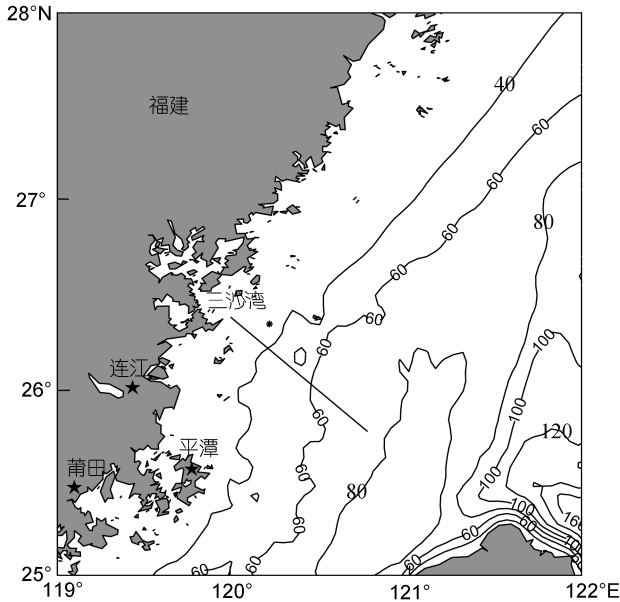


图 1 研究区域示意图及水深分布(单位: m)

Fig.1 Map of research area and the bathymetry(unit: m)

注: 直线表示剖面位置, *表示定点剖面时间序列分析位置

3 2011—2013 年春季温盐环流结构对比

3.1 表层温度和流场

根据 2011—2013 年 3 月和 5 月海表面月平均温度和表层流速的分布情况显示: 2012 年 3 月浙闽沿岸流的核心温度偏低, 16°C 的低温水体影响区域偏大, 浙闽沿岸呈现明显的低温水舌, 且浙闽沿岸流与台湾暖流之间的温度锋面偏强(图 2b); 相应地, 此时福建沿岸浙闽沿岸流流速比 2011 和 2013 年 3 月明显偏大(图 3b), 且流幅较宽。3 月较强的浙闽沿岸流带来的大范围低温海水对早期福建近岸甲藻赤潮优势种东海原甲藻的成长起到抑制作用, 削弱了其后期成为赤潮优势种的竞争力, 间接为米氏凯伦藻暴发提供了有利条件(赵水东, 2006)。

2012 年 5 月福建沿岸浙闽沿岸流已消亡(图 3e), 台湾暖流强度偏强, 三沙湾外海月平均温度为 $23.5\text{--}24^{\circ}\text{C}$ (图 2e), 比前后两年同期月平均温度(图 2d 和图 2f)高出约 1°C 左右; 在流速上, 三沙湾外海平均流速整体偏小, 福建近岸水体水平运动相对较弱, 而台湾暖流与沿岸之间的弱流带相比前后两年同期(图 3d 和图 3f)更为明显。5 月福建近岸较高的水温和较为稳定的水体为喜暖的米氏凯伦藻暴发提供了适宜的生长环境。

3.2 断面温度、盐度和流场

为进一步分析证实 2012 年米氏凯伦藻暴发的水

文情况, 在三沙湾外海取一断面(位置如图 1 示), 做出 2011—2013 年春季三个月垂直岸线流速(离岸方向为正)、沿岸流速(东北方向为正)、垂向流速(向上为正)、温度和盐度的月平均垂直断面分布(图 4)。对比 2011—2013 年 3 月断面各要素的分布情况, 2011 和 2013 年浙闽沿岸流沿岸西南向最大流速值分别为 0.21m/s 和 0.12m/s , 而 2012 年 3 月该流速值为 0.24m/s , 且其出现位置向东延伸至 120.2°E 附近。流速较强、流幅较广的浙闽沿岸流使得近岸低温、低盐水体的影响范围更大, 同时温度和盐度在垂向上梯度也偏大。在断面外侧部分, 沿岸东北向流速 2012 年最大为 0.20m/s , 对比 2011 和 2013 年的最大流速均为 0.24m/s , 表明 2012 年台湾暖流偏弱。

2012 年 4 月, 台湾暖流的沿岸东北向流速在整个断面范围内大于前后两年同期流速, 近岸表层西南向的浙闽沿岸流与前后同期相比则提前消亡。在断面外侧底层, 向岸西北向流速较大, 表明台湾暖流向岸堆积作用较为显著。较强的台湾暖流将高温水体提前带到近岸海域, 使 2012 年 4 月断面近岸温度比前后两年同期温度高 2°C 左右, 整个断面范围内温度变化小, 同时水体盐度垂向梯度变化较大, 盐度层化作用较强, 与 2011 和 2013 年 4 月相比其温、盐更为适宜。

2012 年 5 月, 断面范围内水平沿岸和向岸方向的速度分量与前后年同期相比整体较小, 垂向流速在断面内无负值, 上升流流速也较小, 表面水体垂向混合作用较弱。在 4 月提前升温后, 5 月整个断面范围内水体温度偏高, 但温度水平和垂向的变化较小, 近岸水温均匀且基本保持在 $23.7\text{--}23.9^{\circ}\text{C}$ 之间, 处于米氏凯伦藻赤潮最适水温范围内(姚炜民等, 2007); 盐度水平梯度变化较弱, 近岸至外海的盐度变化范围较小。因此, 2012 年 5 月福建沿岸水温较高, 流场偏弱, 为赤潮暴发提供了稳定的水文环境。

另外, 2012 年 6 月相比前后两年同期在垂向环境要素上略显稳定, 使米氏凯伦藻暴发过程得以持续到 6 月上旬。但此时福建沿海已渐入夏季, 故各年份上述水文特征的整体趋势上已不能满足米氏凯伦藻形成和暴发的最佳条件。

3.3 定点剖面时间序列分析

为了解此次米氏凯伦藻赤潮整个过程形成的具体时间节点情况, 在三沙湾外取一定点剖面(120.22°E , 26.35°N , 位置如图 1 所示), 做出垂直岸线流速(离岸方向为正)、沿岸流速(东北方向为正)、垂向速度(向上为正)、温度和盐度随时间变化的分布图

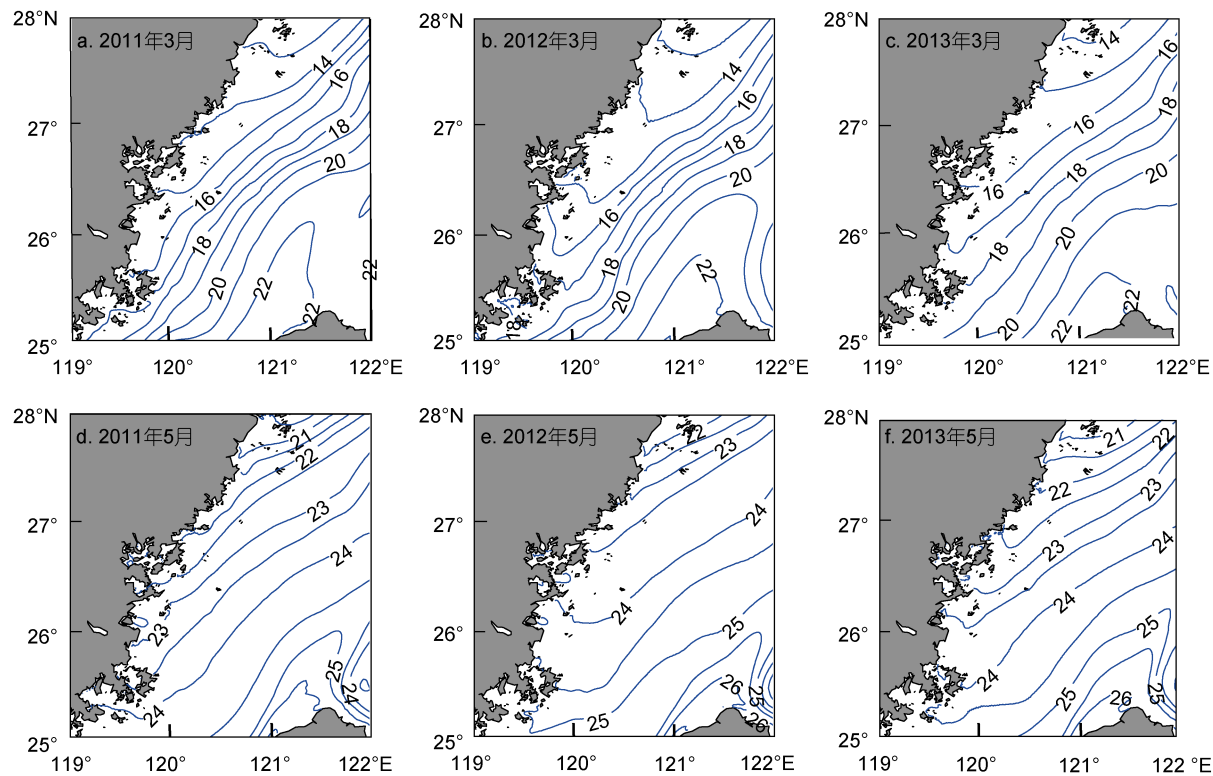


图 2 2011—2013 年 3 月和 5 月月平均表层温度分布
Fig.2 Distribution of monthly average sea surface temperature in March and May from 2011 to 2013

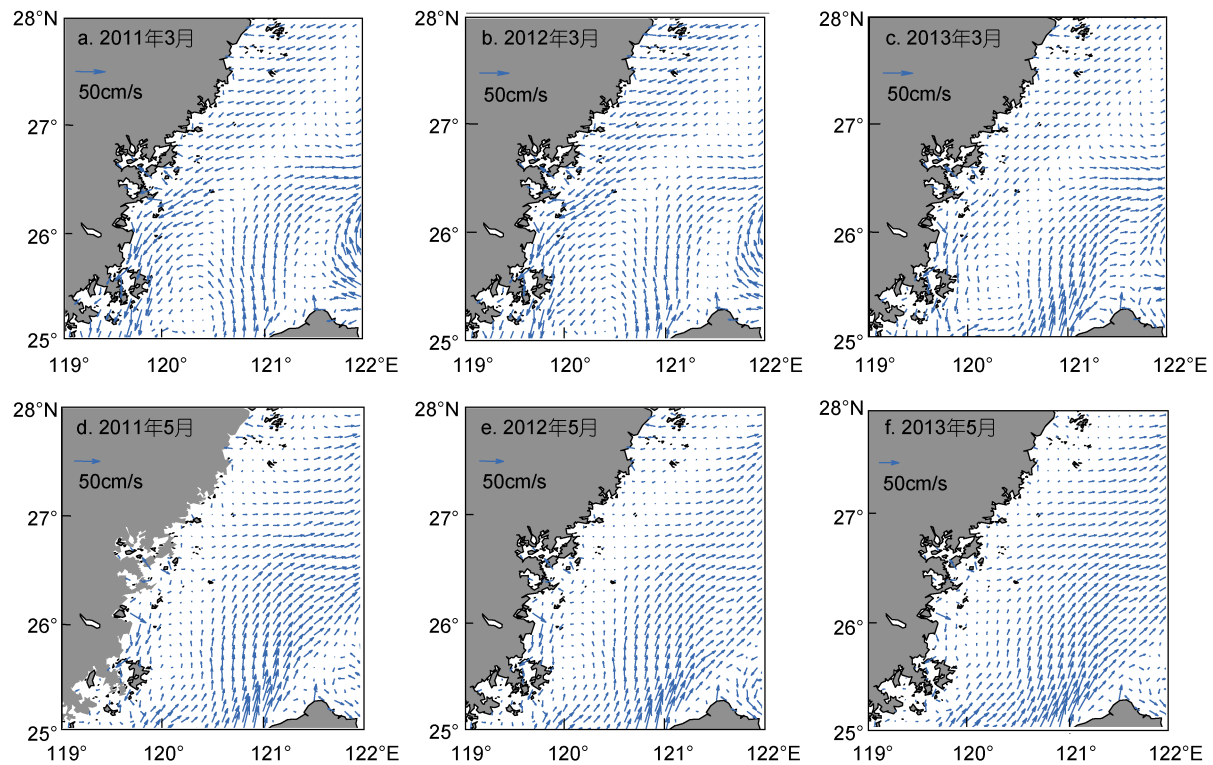
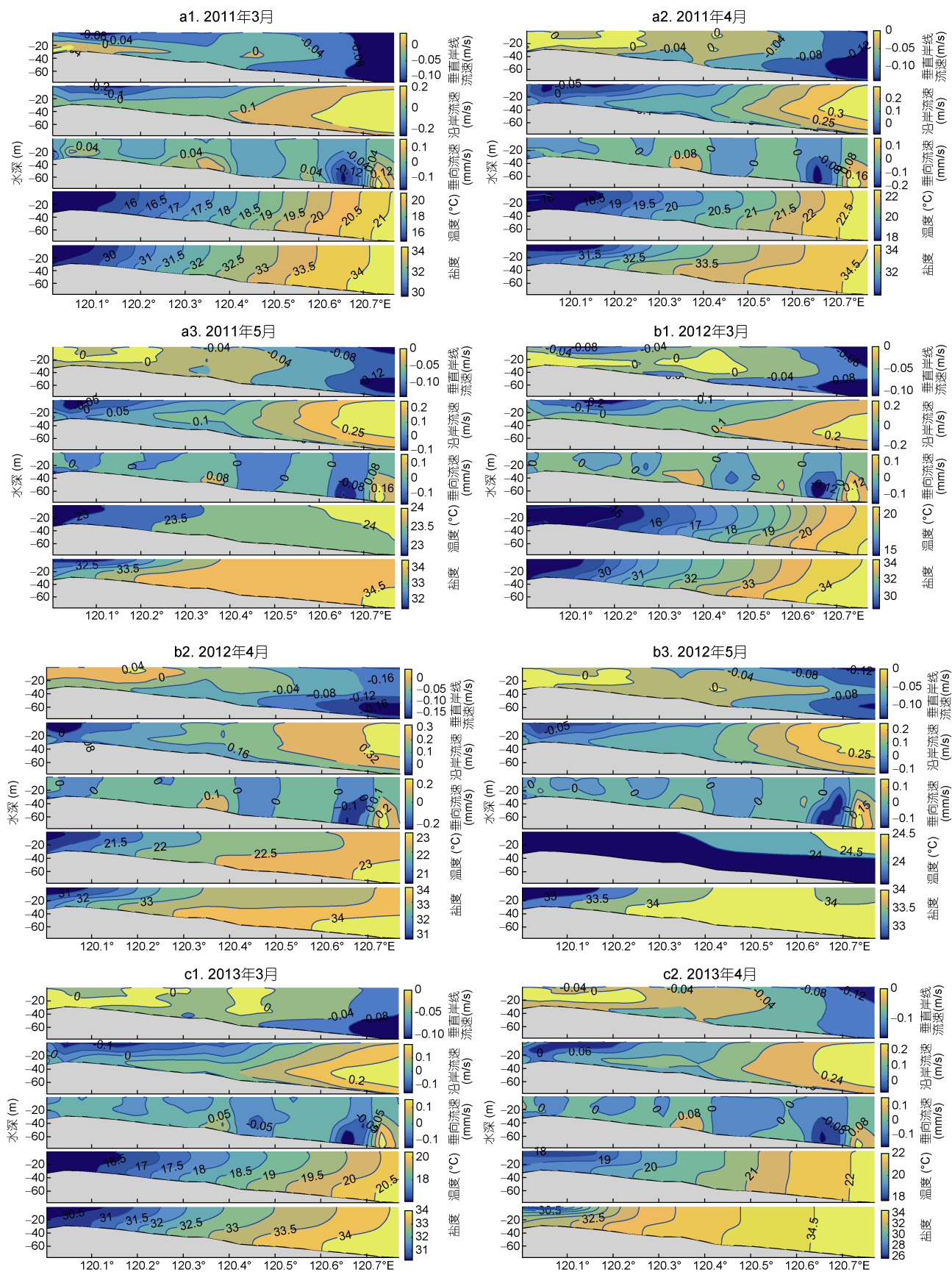


图 3 2011—2013 年 3 月和 5 月月平均表层流速分布
Fig.3 Distribution of monthly average sea surface velocity in March and May from 2011 to 2013



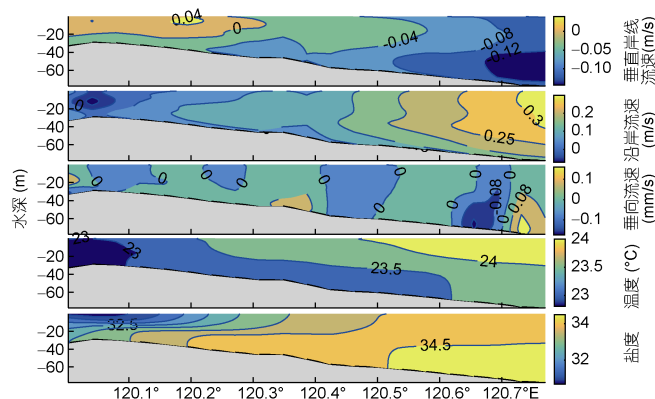


图4 2011—2013年3—5月月平均垂直断面分布

Fig.4 Monthly average sectional distributions from March to May in 2011—2013

(图5)。由温度和盐度分布可知,在2012年3月底之前(图5b),定点海域附近一直受浙闽沿岸流的控制,温度和盐度持续较低。3月下旬,沿岸东北向流速出现首次正值为0.2m/s,此时对应地温度从16°C上升至19°C,盐度从29.5升高到31.5。由此猜测,这是台湾暖流的突然增强而引发的高温高盐水体入侵,从而导致了浙闽沿岸流势力的减弱和近岸水体温度、盐度的迅速升高。4月上旬,水温达到适宜米氏凯伦藻生长的20.5°C(龙华等,2005),对应此时垂向流速恰好出现极大值,推测该垂向扰动将底层的营养盐带到表层,为米氏凯伦藻输送了有利生长的营养物质。4月底,沿岸东北向流速分量、向岸西北向流速分量出现了极大值,同时表层盐度出现低盐水入侵,此时水体开始由底至表升温。在5月1日附近由一次垂向混合使整层水温达到23°C,之后水温一直保持至5月18日三沙湾海域暴发以东海原甲藻为优势种的赤潮后一周左右,水温才再次平缓上升至24°C,与以往文献中米氏凯伦藻赤潮适宜生长温度相符(龙华等,2005;姚炜民等,2007),而该时间点恰好对应三沙湾海域东海原甲藻赤潮开始伴生米氏凯伦藻(2012年5月24日)和平潭海域发生以米氏凯伦藻为第一优势种有毒赤潮事件(2012年5月26日)。6月上旬,剖面水温上升0.5°C达到24.5°C,与6月6日三沙湾海域、平潭海域赤潮面积减小的米氏凯伦藻赤潮过程相对应。此后,水温继续上升至25°C,米氏凯伦藻种群数开始衰减,最终此次米氏凯伦藻赤潮大规模暴发于6月8日趋向消亡。

4 2011—2013年 EOF 分析

4.1 海表面温度对比

因本文重点关注2012年米氏凯伦藻赤潮的形成

和大暴发,为进一步探讨关键水文要素的影响,对2011—2013年3—5月间海表面温度分别展开EOF分析,得到3年的海表面温度第一模态方差贡献率分别为96.19%、97.24%和96.34%(图6)。时间序列(图7)中曲线代表温度变化过程,对比分析三年不同的时间序列曲线发现2012年春季海表面温度的变化主要可分为三个阶段:前期(3月下旬前),海表面温度明显低于前后两年同期温度,且在3月中旬前水温无明显升高,抑制了东海原甲藻的生长;中期(3月下旬至5月初),迅速显著升温,其中3月下旬—4月上旬的海表温度增速达到17.3%(2011和2013年同期海表温度增速分别为3.8%和1.9%),并从4月上旬起超过前后两年同期水平,福建近岸海表面温度整体偏暖,有利于米氏凯伦藻的繁殖;后期(5月初之后),海表面温度趋势较前后年份温度变化更为平缓,使温度在较长时间内保持在一定范围内,为米氏凯伦藻的暴发提供了较适宜的温度条件。显然这一系列特殊的水温变化过程是诱发米氏凯伦藻生长并暴发的主要水文因素之一。因此,探寻影响中期迅速升温的控制因素十分关键。

4.2 向岸流速对比

针对2012年3月下旬海表面温度迅速升高的情况,猜测其是由向岸流动分量增强,引起水体向岸堆积所致。为验证猜测,对前后三年春季间海表面流速做向岸分量(垂直离岸方向为正)的EOF分析,得到2011—2013年的第一模态方差贡献率分别为52.2%、54.1%、49.0%(图8)。在第一模态时间序列中(图9),时间序列大于0表示为向岸流动,发现2012年3月下旬存在较强的由负到正的变化,即流动分量由离岸转为向岸。该流动异常与前文定点剖面时间

序列 3 月下旬温度和盐度迅速升高过程相互对应(图 5b), 表明此时海表面温度变化进入中期阶段(图 7)。

2012 年 3 月下旬至 5 月初的向岸流速 EOF 时间变化系数平均值稳定在正值, 并在 4 月底附近出现极大值。对比 2011 年 3 月下旬时间变化系数短暂维持在负值发现, 时间序列维持在正值时说明该向岸流动保持稳定的增长趋势, 其存在的时间区间与 2012

年春季海表温度变化中期阶段时间长度相符。5 月初后, 向岸流速 EOF 时间变化系数平均值仍为正, 但其值逐渐变小, 对应此时海表温度上升变缓, 直至 2012 年 5 月 18 日三沙湾海域东海原甲藻赤潮暴发节点处附近, 时间变化系数均值在 0—0.5 左右, 对应此时近岸向岸方向流速分量无明显异常流动, 表明此时该海域附近流场较为稳定。

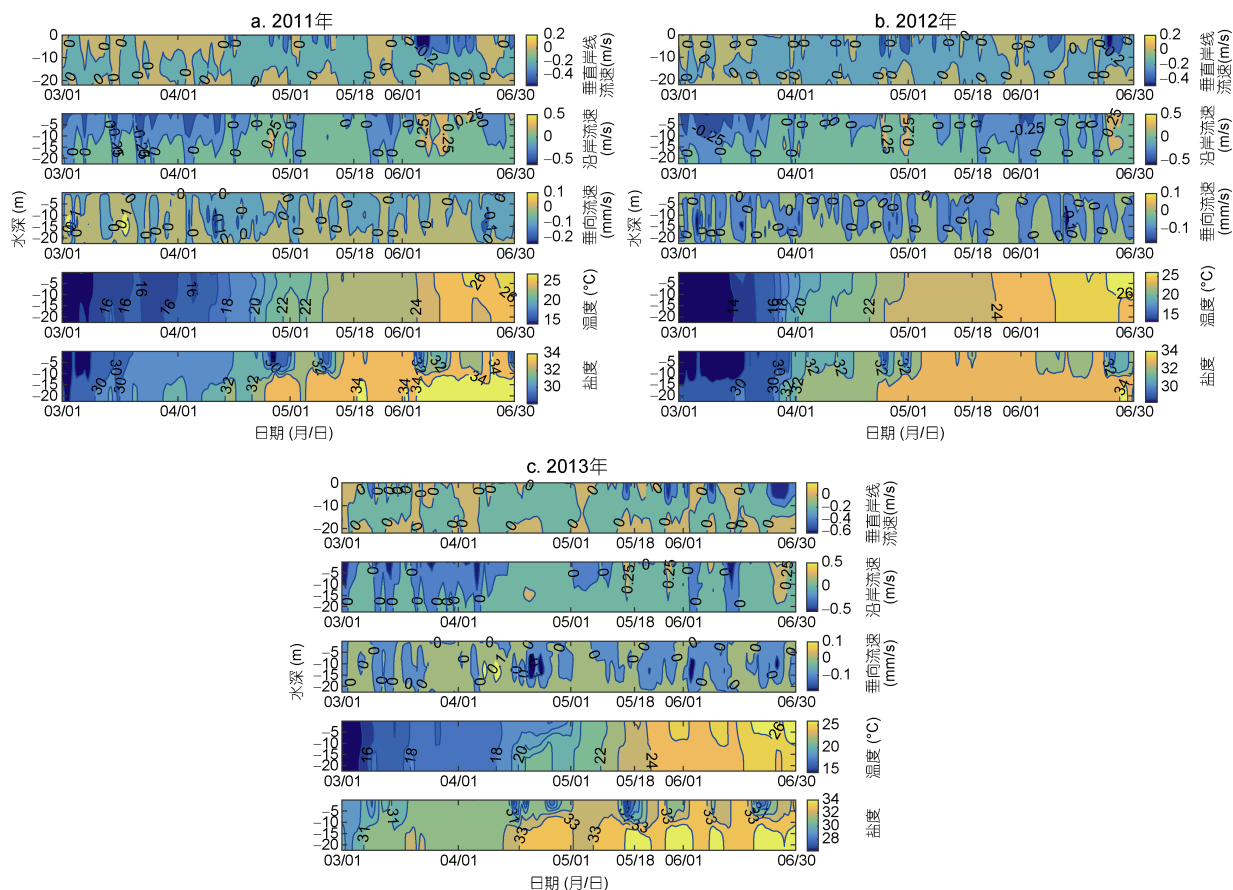


图 5 2011—2013 年 3—6 月定点剖面时间序列分布

Fig.5 Distribution in time series at fixed-point profile from March to June in 2011—2013

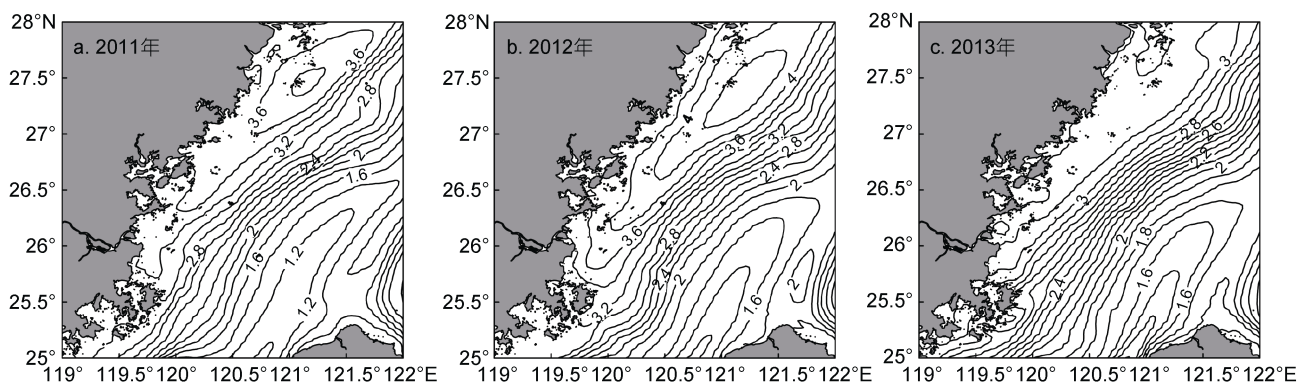


图 6 2011—2013 年 3—5 月海表面温度 EOF 分析第一模态(单位: °C)

Fig.6 First EOF mode of sea surface temperature from March to May in 2011—2013(unit: °C)

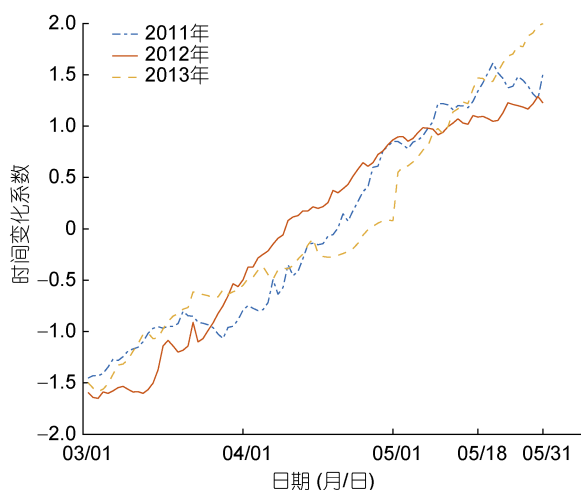


图7 2011—2013年3—5月海表面温度 EOF 分析第一模态的时间变化系数

Fig.7 The time varying coefficients of first mode by EOF analysis for sea surface temperature from March to May in 2011—2013

此后,垂直岸线方向上流动先转为离岸向,后时间变化系数均值逐渐减弱至0附近,这时距离5月18日恰好一周左右,对应三沙湾海域以及平潭海域开始暴发米氏凯伦藻赤潮的时间节点。从中可知,离岸流动与赤潮向东的传播轨迹相符,且当米氏凯伦藻暴发当日,流场相对较弱。综上,向岸流速的 EOF 分析有效地体现了福建沿海垂直岸线方向流动的变化情况,证实了该流动变化是米氏凯伦藻生长和暴发过程中重要的动力因素,且与近岸海水温度、盐度的变化密切相关。

4.3 2012年东北风与向岸流对比

根据 Ekman 输运关系,北半球水体输运与海表风向夹角为向右 90° ,故东北风能引起水体的向岸堆

积。又据文献描述(邓华等,2016),2012年春季东北季风强于多年平均值。因此对于产生向岸水体堆积的原因,本文首先考虑是东北季风的作用。对2012年春季海表面日平均10m层风速的沿岸东北风分量进行 EOF 分析(沿岸西南风为正),得到第一模态方差贡献率为96.4%(图10)。将10m层风速第一模态时间序列与同期向岸流速第一模态时间序列进行对比(图11),其中风速时间变化系数小于0时表示东北风的风速分量,流速时间变化系数大于0时表示向岸流动。总体上东北向风速分量与向岸流的时间序列呈相反状态,对应较好。3月初西南风分量较强,引起的离岸方向流速分量较大,是导致浙闽沿岸流水体表层低温、低盐水体影响范围较大的直接原因。3月下旬西南风分量迅速减弱,东北风开始逐步增强,与向岸流分量时间变化系数的正向变化相对应,但此时东北风势力较弱。结合同时期定点由底至表的温盐剖面变化,认为3月底的这次较强水体向岸流动还与台湾暖流扰动加强引起的海水向岸堆积有关。4月下旬东北风分量稳定,且在4月底出现极大值,此时向岸流速分量同样稳定且同时有极大值,这与海表面温度的稳步持续升高相对应。5月18日,沿岸风由东北风转为西南风,引发较弱的水体离岸流动,与此时赤潮水体向东迁移相对应。由上可知,2012年4—5月中旬期间,强而稳定的东北风为水体向岸堆积提供持续的上层强迫,对米氏凯伦藻的生长和暴发产生有利的作用;利用 EOF 分析法可发现5月18日附近短暂而较弱的西南风作用,与邓华等(2016)对2012年5月气候态风场的分析重点关注了整个月强东北风向趋势相比,EOF 分析法在反映数据细节上则更具优势。

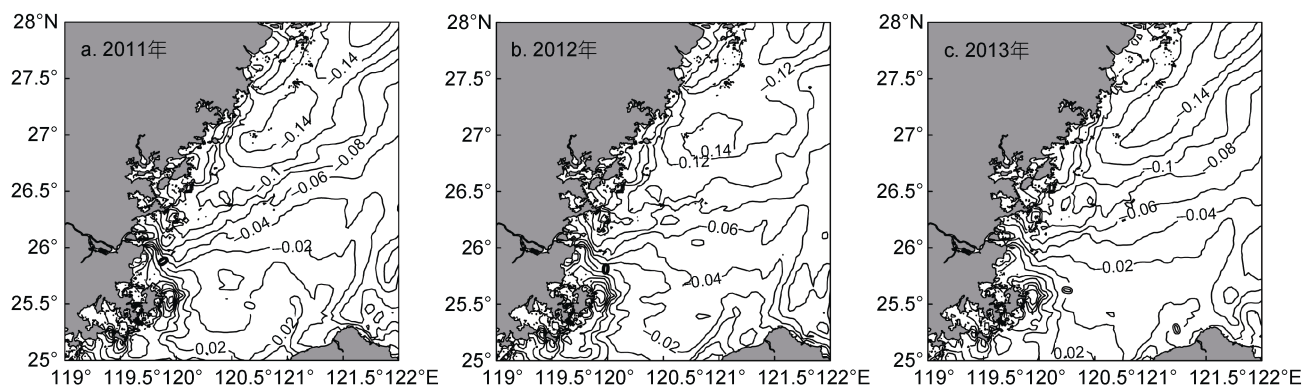


图8 2011—2013年3—5月向岸流速 EOF 分析第一模态(单位: m/s)

Fig.8 First EOF mode of shoreward current speed from March to May in 2011—2013(unit: m/s)

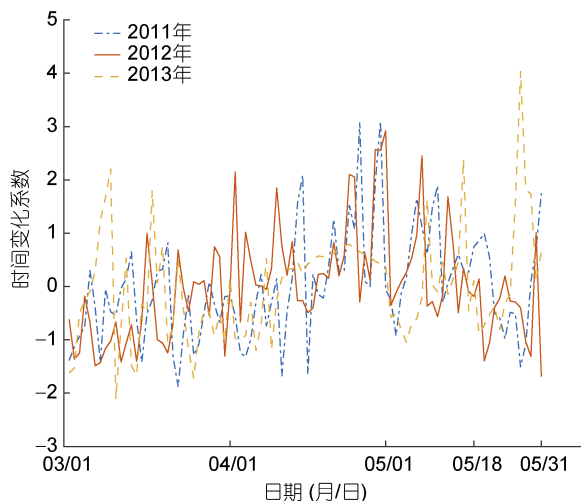


图 9 2011—2013 年 3—5 月向岸流速 EOF 分析第一模态的时间变化系数

Fig.9 The time varying coefficients of first mode by EOF analysis for shoreward current speed from March to May in 2011—2013

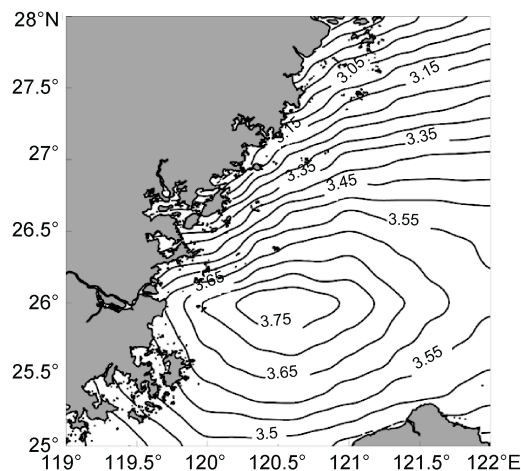


图 10 2012 年 3—5 月沿岸风速 EOF 分析第一模态(单位: m/s)

Fig.10 First EOF mode of longshore wind speed from March to May in 2012(unit: m/s)

5 结论

本文利用福建省海洋预报台提供的三维温、盐、流业务化预报模型计算结果, 对 2011—2013 年 3—5 月的温、盐和环流结构进行对比分析, 得到 2012 年福建沿海大规模赤潮暴发的温、盐及环流特征主要如下:

2012 年 3 月初浙闽沿岸流较强, 在西南风作用下偏低影响范围较大, 导致沿岸水体温盐值偏低, 抑制了东海原甲藻的前期孕育; 3 月下旬起福建近岸浙闽沿岸流的迅速削弱, 向岸流动增强, 水体温盐迅速上升, 为米氏凯伦藻的繁殖提供了先决条件; 3 月底—5

月 18 日赤潮暴发前, 福建近岸水温高于前后两年同期, 水平和垂向上温、盐及流场变化较前后两年同期偏弱, 向岸流动稳定且持久, 为米氏凯伦藻大规模暴发提供了适宜的温盐条件和稳定的水体环境; 5 月 18 日后 1 周左右, 福建近岸水温由 23°C 升至 24°C , 水体呈较弱的离岸流动, 与 5 月 24 日、5 月 26 日东海原甲藻开始消亡, 而米氏凯伦藻在相关海域附近伴生并成为赤潮第一优势种的时间节点吻合, 并与赤潮整体稍向东迁移相符。

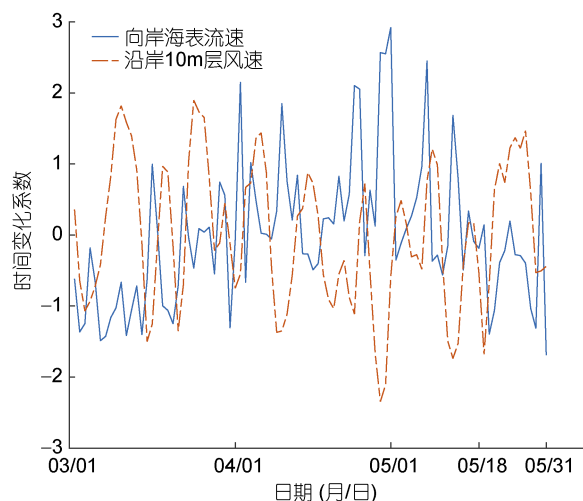


图 11 2012 年 3—5 月向岸流速和沿岸风速 EOF 分析第一模态的时间变化系数

Fig.11 The time varying coefficients of first mode by EOF analysis for shoreward current speed and longshore wind speed from March to May in 2012

结合 EOF 方法分析以上特征可知, 水体垂直岸线方向的流动情况与各阶段米氏凯伦藻赤潮适宜生存环境的形成密切相关, 其中 2012 年 3 月下旬水体向岸流动增强与台湾暖流的加强有关; 中期持续向岸输送的春季东北风是形成稳定向岸流动的关键因子; 而赤潮暴发后较弱的离岸流动则主要受到同期西南风的影响。

致谢 本研究得到了厦门大学李炎教授的悉心指导, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 邓 华, 管卫兵, 曹振轶等, 2016. 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. 海洋学研究, 34(4): 28—38
- 丁光茂, 张树峰, 2018. 2012 年三沙湾米氏凯伦藻赤潮的生态特征及成因分析. 海洋学报, 40(6): 104—112
- 福建省海洋与渔业厅. 2012 年福建沿海赤潮灾害预测预警.

- http://hytyt.fujian.gov.cn/xxgk/tzgg/
- 郭民权, 曾银东, 李雪丁等, 2014. 平潭近岸海域浮子漂移轨迹及其数值模拟. 应用海洋学学报, 33(4): 449—454
- 中华人民共和国自然资源部, 2011, 2013. 中国海洋灾害公报. <http://m.lc.mlr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgb/zghyzhgb/>
- 李雪丁, 2012. 福建沿海近 10a 赤潮基本特征分析. 环境科学, 33(7): 2210—2216
- 李雪丁, 曾银东, 任在常等, 2014. 福建省赤潮预警系统研究与应用. 海洋预报, 31(4): 77—84
- 刘志国, 王金辉, 蔡 贡等, 2014. 米氏凯伦藻分布及其引发赤潮的发生规律研究. 国土与自然资源研究(1): 38—41
- 龙 华, 杜 琦, 2005. 福建沿海米氏凯伦藻赤潮的初步研究. 福建水产(4): 22—26
- 沈盎绿, 2014. 东海原甲藻和米氏凯伦藻种间竞争对海水温度变化的响应机制. 华东师范大学, 上海.
- 许翠娅, 黄美珍, 杜 琦, 2010. 福建沿岸海域主要赤潮生物的生态学特征. 应用海洋学学报, 29(3): 434—441
- 姚伟民, 潘晓东, 华丹丹, 2007. 浙江海域米氏凯伦藻赤潮成因的初步研究. 水生态学杂志, 27(6): 57—58
- 曾广恩, 练树民, 程旭华等, 2006. 东、黄海海表面温度季节内变化特征的 EOF 分析. 海洋科学进展, 24(2): 146—155
- 赵水东, 2006. 温度、盐度和营养盐对东海原甲藻生长的影响. 暨南大学, 广州.
- 朱德弟, 陆斗定, 王云峰等, 2009. 2005 年春浙江近海的低温特征及其对大规模东海原甲藻赤潮发生的影响. 海洋学报: 中文版, 31(6): 31—39
- Davidson K, Miller P, Wilding T *et al*, 2009. A large and prolonged bloom of *Karenia mikimotoi* in Scottish waters in 2006. Harmful Algae, 8(2): 349—361
- Gillibrand P, Siemering B, Miller P *et al*, 2016. Individual-based modelling of the development and transport of a *Karenia mikimotoi* bloom on the North-West European continental shelf. Harmful Algae: 118—134
- Hannachi A, Jolliffe I, Stephenson D, 2007. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. International Journal of Climatology, 27(9): 1119—1152
- Vanhoutte-Brunier A, Fernand L, Ménesguen A *et al*, 2008. Modelling the *Karenia mikimotoi* bloom that occurred in the western English Channel during summer 2003. Ecological Modelling, 210: 351—376
- Wang J, Hong H, Jiang Y, 2016. A coupled physical-biological modeling study of the offshore phytoplankton bloom in the Taiwan Strait in winter. Journal of Sea Research, 107: 12—24

COMPARISON IN TEMPERATURE, SALINITY AND CIRCULATION STRUCTURES DURING SPRING OF THE YEARS BEFORE AND AFTER *KARENIA MIKIMOTOI* BLOOM ALONG FUJIAN COAST IN 2012

YANG Yun^{1,2}, HUANG Hai-Long², ZENG Yin-Dong³, GUAN Wei-Bing^{1,2}, LI Xue-Ding³, GUO Min-Quan³

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China; 3. Fujian Marine Forecasts, Fuzhou 350003, China)

Abstract There is a general abundance of nutrients in the coastal waters, therefore hydrometeorological processes often become the most important controlling factor for the outbreaks of red tide. Based on numerical modeling results provided by the Fujian Marine Forecasts, China, we compared and analyzed the temperature, salinity, circulation and upwelling structures in the Fujian coast, Southeast China, from March to May in 2011-2013, which illustrated the special hydrological structures of *Karenia mikimotoi* bloom in 2012 along the Fujian coast, and further studied the main hydrological factors of the bloom event using EOF analysis. The results show that, compared with normal years, the Zhe-Min Coastal Current in 2012 was stronger at the beginning of March than that of normal years, resulting in colder sea temperature and lower salinity, which was not favorable for the growth of *Prorocentrum donghaiense*. The earlier and rapider increase of sea temperature in late March was related to the intensity change of the Taiwan Warm Current. From the end of March to May 18, the sea temperature of the overall coastal waters in the Fujian coast was warmer than that of normal years. The steady northeast wind drove the water flowing stably shoreward, and all the hydrological elements varied slightly in both horizontal and vertical directions, which provided stable and suitable hydrodynamic environmental conditions for the outbreak of *Karenia mikimotoi* red tide. One week after the red tide outbreak, the red tide dominant species changed from *P. donghaiense* to *K. mikimotoi*. Meanwhile, the *K. mikimotoi* red tide began moving slightly eastward. These processes were related to the warm inshore water (24°C) and to the change of wind direction from northeasterly to southwesterly, causing a weak offshore flow.

Key words Fujian coast; red tide; *Karenia mikimotoi*; EOF(empirical orthogonal function)