

基于天气分型的赤潮预报方法研究 ——以福建沿海为例

何恩业¹, 李雪丁², 杨静¹, 高姗¹, 季轩梁¹

(1. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 2. 福建省海洋预报台, 福建 福州 350003)

摘要: 以2001—2012年我国沿海赤潮相关资料为依据,对福建沿海赤潮的时空分布特征进行了分析。结果显示:4月第6候—7月第1候是福建沿海赤潮暴发的最盛期,赤潮高发海域为闽东北沿海和厦门近海,大面积赤潮主要发生在三沙湾、厦门和平潭海域。在此基础上,利用NCEP再分析资料,从大气环流形势诱发赤潮的角度出发,基于典型天气形势场相似法构建了福建沿海5—6月赤潮定量化预报模型。敏感性试验和预报检验结果表明,该模型能够在赤潮大面预报中获得较为满意的效果,预报检验准确率达55.8%,可以在赤潮业务预报中予以应用。此外,对模型生成的4种最易诱发福建沿海赤潮的天气类型:西南季风扰动型、高压脊控制型、东亚低槽扰动型和西太平洋副热带高压控制型分别做了个例分析,以期对赤潮预报研究提供参考。

关键词: 赤潮; 赤潮预报; 天气分型; 相似算法; 福建沿海

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)02-0069-11

1 引言

近年来,以赤潮和绿潮为主要灾种的海洋生态灾害频发,成为与风暴潮灾害、海浪灾害和海冰灾害并列的几大海洋灾害之一。赤潮作为海洋生态灾害的主要灾种,其高频次的发生给我国沿海地区造成了巨大的经济损失,对海洋生态系统平衡构成严重威胁,有毒赤潮的发生还会给水产品食用安全保障带来一定的压力^[1-2]。若能对赤潮进行有效预测,为当地政府和渔民提前预警,并有针对性地提前部署防治措施和处置相关海域养殖的水产品,可以降低甚至消除赤潮带来的损失。

当前赤潮的预测预报还是一个国际难题,总体水平偏低,也未形成统一的预报检验评价标准^[2-3]。诱发赤潮的成因较多,既有生物因素,也涉及水力、气象和环境理化要素等因子,很难通过传统的统计方法或数值方法对赤潮过程进行准确模拟和

预测。国内学者从多角度开展了赤潮预报研究工作^[4-9],但大都是对赤潮个例开展分析或者基于多要素进行建模,这需要对大量和连续的观测数据为基础,在实际业务预报应用中难免遇到监测数据缺失问题。部分学者从气象条件引发赤潮的角度入手进行研究,但多以经验预报为主,预报员个人的经验、技巧和判断对预报结果影响较大,主观性较强,在实际赤潮预报业务中存在较大的局限性。以上问题的存在使得多数赤潮预报研究方法难以应用于实际预报业务,不利于对赤潮灾害开展及时准确的预测。本文从沿海赤潮业务预报的现实需求出发,利用稳定易获取的实时气象数据,基于天气分型的预报方法对赤潮进行建模预测。以福建沿海为示范区,利用2001—2012年福建沿海赤潮记录和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的再分析数据构建预报模型。敏感性试验和预报检验结果表明,该模

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-06-27。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401605、2016YFC1401800); 广东省海洋遥感重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)开放课题(2017B030301005-LORS2011)。

作者简介: 何恩业(1981-),男,助理研究员,学士,主要从事海洋生态环境、生态灾害和水文气象预报研究。E-mail: heenye@163.com

型具有较高的预报准确率,可以在实践中予以应用。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

赤潮数据来源于《沿海海洋赤潮专报》和《中国海洋灾害公报》中2001—2012年发生在福建沿海的赤潮灾害过程记录。数据包含历次赤潮的起止时间、发生海域、成灾面积(km²)、优势物种及密度和灾害损失情况等相关信息。本文以2001—2010年福建沿海赤潮过程作为建模所需的敏感性试验样本,以2011—2012年福建沿海赤潮过程作为预报检验样本。

气象数据来源于1981—2012年NCEP再分析数据资料,时间分辨率为4次/d,水平分辨率为2.5°×2.5°的全球格点数据。

2.2 研究方法

基于天气分型的预报研究方法多集中于气象方面^[10-14],赤潮方面较少。任湘湘等^[15]曾尝试将天气分型思想引入赤潮预报,通过经验分析方法总结了5种易引发珠江口赤潮的天气形势,并对其中的1种用相似法进行了检验。本文在前人工作的基础上,对基于天气分型的赤潮预报方法进行优化,采用全定量化的客观方案构建模型对容易诱发赤潮的天气形势进行分型,利用相似算法对赤潮进行预报。

基于天气分型的赤潮预报模型分为3层(见图1)。第一层为天气形势场数据信息输入层,第二层为天气分型运算层(包括天气场聚类分析模块、合成场试验模块和典型天气形势分型模块),第三层为结果输出层(模型对输入的天气场进行判别分类)。

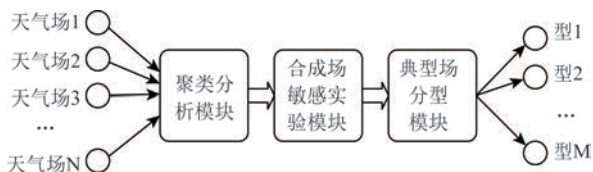


图1 基于天气分型的赤潮预报模型结构

聚类方法采用Pearson(皮尔森)相似算法,对样本集合历次赤潮首发日的天气形势场进行归类。合成天气场采用互为极强相关且为历次赤潮暴发首日的天气场作为合成样本集。

本研究利用Fortran、Grads、SPSS和Excel等软件处理分析数据及绘图,Pearson相似算法算式为:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(y_{ij} - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}} \quad (1)$$

式中: x 和 y 分别为天气形势场 A_i 和 B_i 的距平场(气候场基于1981—2010年的NCEP气象再分析数据); n 表示天气形势场区域内的格点数。

3 结果与分析

3.1 福建沿海赤潮时空分布特征

2001—2012年福建沿海年均赤潮约15.6次,年均累计面积约1 000 km²(见图2a)。其中,2001年、2009年和2011年赤潮暴发频次和规模较轻,赤潮年发频次均未超过6次,年累计面积均小于300 km²;2002年、2003年、2006年和2010年赤潮暴发频次和规模较重,赤潮年发频次均高于20次,年累计面积均超过1 500 km²。

福建毗邻北回归线,属亚热带海洋性季风气候,各属地自然特征差异明显,受海洋、大气环流和地形等综合影响,福建沿海赤潮也呈现出显著的季节变化和区域性分布特征。每年4月福建沿海进入赤潮多发季节,5—6月达到高峰时段,7月开始减弱,8月后发生频次大幅降低,赤潮进入低发期(见图2b)。2001—2012年,福建沿海共发生赤潮187次,累计面积约11 700 km²。其中,4月第6候—7月第1候是赤潮暴发最盛期,在此期间福建沿海共发生赤潮153起,累计面积10 386 km²,分别占12a总次数和总面积的81.8%和88.5%。

图3a为福建沿海10个预警海区划分。通过对赤潮发生地点的分析发现,12a间厦门近海(Ⅷ区)发生赤潮次数最多,为55次,占总次数的29.4%,年均赤潮4.6次;其次为三沙湾海域(Ⅰ区和Ⅱ区),为68次,占比36.4%;平潭海域(Ⅳ区)27次,占比

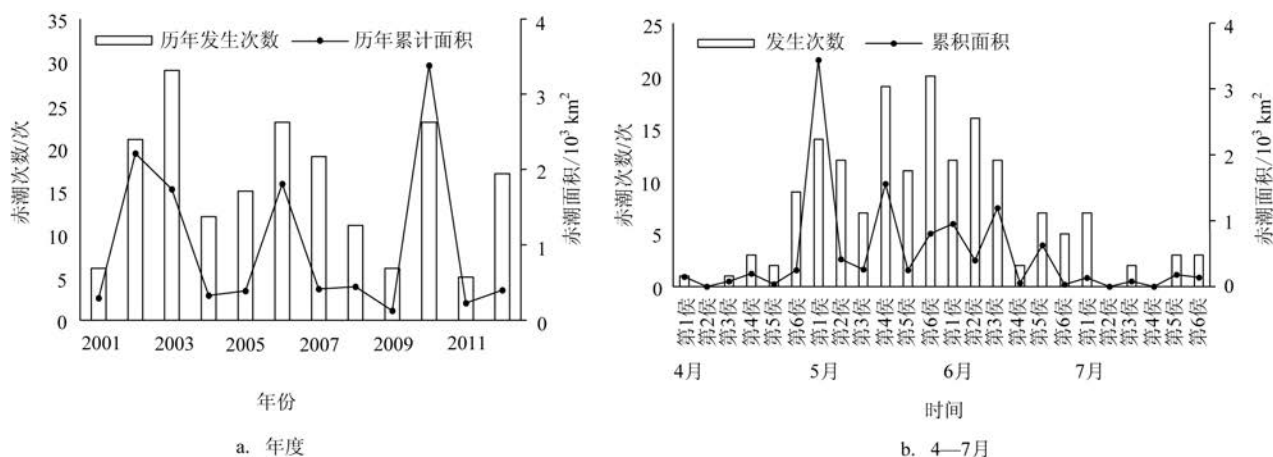


图2 2001—2012年福建沿海赤潮发生状况统计

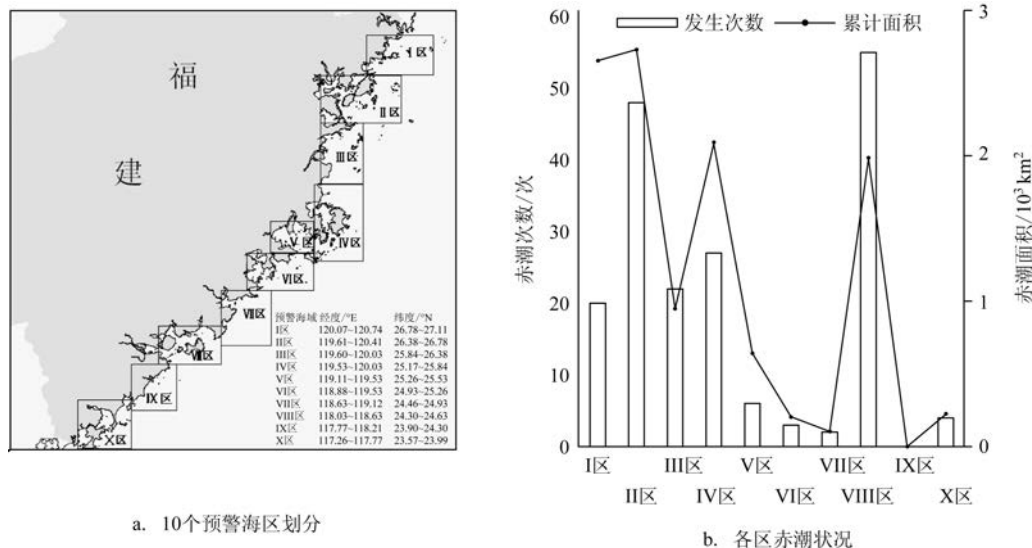


图3 福建沿海预警海区划分示意图和各区2001—2012年赤潮发生状况

14.4%; 闽江口海域(III区)22次, 占比11.8%; V区、VI区、VII区、IX区和X区赤潮发生概率较小, 合计发生15次, 占比只有8%(见图3b)。超过100 km²的大面积赤潮共有30次, 主要集中在三沙湾海域(14次)、厦门近海(5次)和平潭海域(4次)。

3.2 典型天气形势场的合成

3.2.1 天气分型模型参数初始化

天气分型模型参数初始化是对天气形势场的时空范围进行界定, 包含空间尺度和时间尺度参数, 前者是对天气场的垂直层次和水平尺度的范围界定, 后者是对天气分型定义的时间跨度区间的界定。

众多学者在大气环流对赤潮的影响方面进行了深入研究, 不同程度地揭示了高空大气环流对诱发中国沿海赤潮起到的关键性作用^[16-19]。本文以高空500 hPa位势高度场作为天气分型的垂直尺度参数。水平尺度参数的确定考虑到诱发赤潮需要一个稳定的天气形势, 范围选的太小不能把握天气尺度系统的持续稳定性, 范围太大又不具备反映区域性天气形势的典型特征。本文以水平尺度1 000~3 000 km、时间尺度1~3 d的天气系统作为参考系, 水平尺度参数设定在15°~35°N, 90°~135°E。

依据福建沿海赤潮高发时段, 本文将建模的时间尺度参数设定在4月26日—7月5日。此外, 考虑

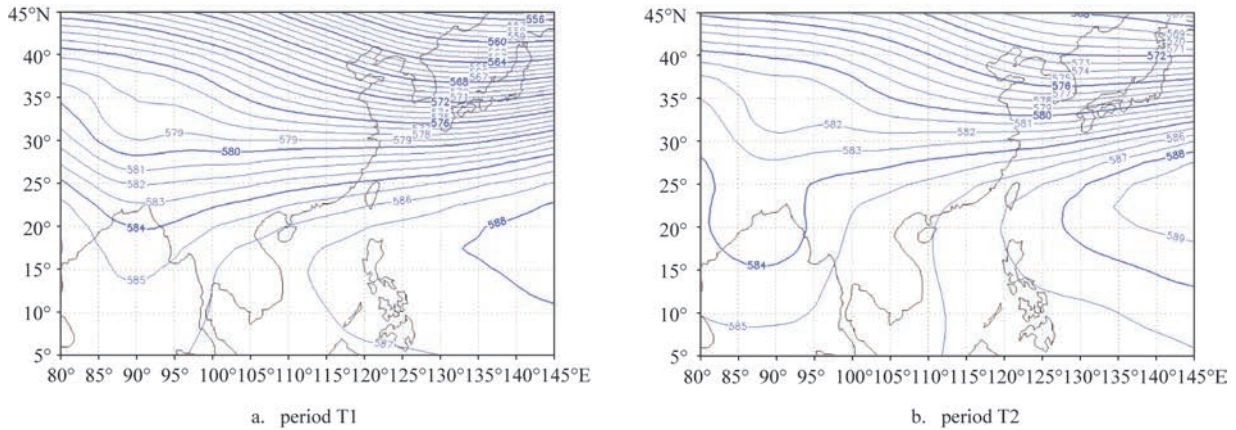


图4 两个时段 500 hPa 季节场

到西太平洋副热带高压(副高)的跳变规律造成我国天气系统在6月前后存在时空尺度和水汽输送上的季节性差异^[19],本文将模型的时间尺度参数细分为period T1(4月26日—5月31日)和period T2(6月1日—7月5日)两个时段分别作为季节尺度参数。两个时段的季节场具有不同的特征(见图4):period T1时段副高位置相对偏东和偏南,孟加拉湾上空的副热带南支西风槽结构特征比较稳定,福建沿海气候主要受来自孟加拉湾和南海北部的西-西南向气流影响;period T2时段副高明显西伸并北抬,福建沿海主体受副高外围控制,气候主要受来自南海的偏南向气流影响。

3.2.2 数据处理

小面积赤潮受水质、营养盐和水动力等局地因素影响较大^[13,20-22],若将其加入到模型中进行统计运算,会对天气分型结果造成不利影响;其次,同一日期在不同海域也会发生多起赤潮,若重复运算会增加其所占权重;再者,同一海区接连发生赤潮,诱发这些赤潮的天气形势具有一贯性,因此在统计运算时也需要考虑。以上客观因素的存在若不处理,会影响模型的执行效率及效果。为此,本文采用以下方案筛选敏感性试验样本:

(1)成灾面积超过 20 km²的赤潮事件计入样本集合^[20];

(2)成灾面积记录空白的赤潮事件作剔除处理;

(3)同期发生在不同海域的赤潮事件,因其对应的天气形势场相同,故取一处理;

(4)同区海域前后紧连且依次发生的赤潮,取最早暴发的赤潮事件作为样本。

处理后,period T1时段共择取敏感性试验样本 36 个,period T2时段共择取敏感性试验样本 26 个。对各赤潮样本首发日的 500 hPa 位势高度距平场进行交互式相似性运算,以其相关程度作为划分依据,将天气场进行聚类:

(1)将互为强相关($\rho \geq 0.6$)且通过 $P=0.05$ 显著性水平检验的天气场归为一类;

(2)对(1)形成的各类别中任一天气场,筛选与其相关度 $\rho \geq 0.5$ 的天气场划归此类。

结果显示,period T1时段天气场形成两类,共计样本 22 个,占该时间段样本集合的 60.2%;period T2时段形成两类,共计样本 19 个,占该时间段样本集合的 73.1%(见表 1)。其他剩余样本之间并无显著性的相关关系,不做归类处理。

表1 各赤潮首发日天气场的分类

天气场聚类	period T1时段		period T2时段	
	类 1	类 2	类 3	类 4
互为强相关的天气场数量/个	9	4	5	6
划分为本类的总样本数/个	16	6	12	7
该类别占该时段样本总数比例	44.4%	15.8%	46.2%	26.9%

3.2.3 典型天气形势场的合成

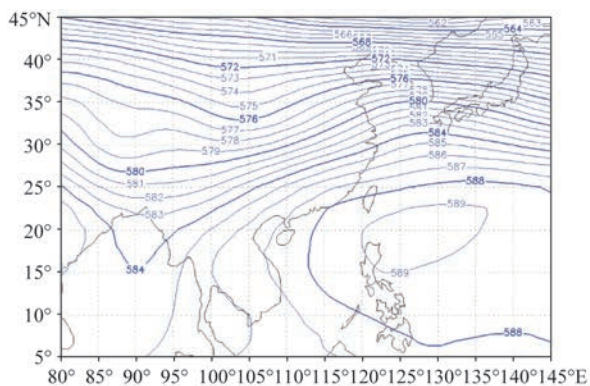
将各类样本集合中互为强相关的天气场样本进行合成处理,以期获取诱发赤潮的天气形势共性。初始合成场 s1—s4 见表 2。将生成的 4 个合成场分别与 2001—2010 年相应时段(period T1 和

period T2)的逐日天气形势场再次进行相似运算,若结果呈现极强相关($\rho \geq 0.8$)且当日确为赤潮事件首发日时间,则该天气形势计入该类别并作为新一次合成场的样本。如此反复试验,当合成场的样本集合不再发生变化时,则最终的合成场认定为最易诱发赤潮的典型天气形势场。

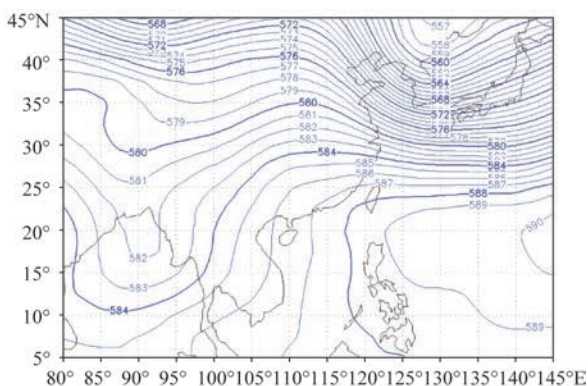
模型结果显示(见表2和图5):典型场 Type1 由13个天气形势场样本合成,为西南季风扰动型,其主要特征是福建沿海受副高西北部外围影响,海区等压线呈西南-东北向分布,近海以暖湿的海洋性西南气流为主;典型场 Type2 由5个样本合成,为高压脊控制型,主要特征是陆上高压脊与副高打通合并

表2 各类初始合成场和典型天气形势场样本集合

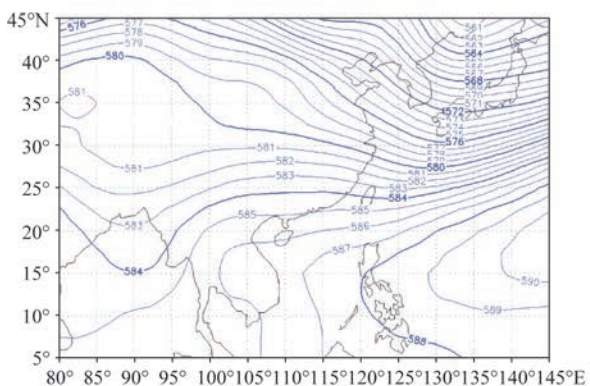
时段	天气场类别	天气场样本 (以日期表示)	样本数/个
period T1	初始合成场 s1	20020504, 20020508, 20020512, 20030512, 20040429, 20040502, 20040527, 20060520, 20100520	9
	典型场 Type1	20020504, 20020508, 20020512, 20030512, 20040429, 20040502, 20040525, 20040527, 20050516, 20050518, 20060509, 20060520, 20100520	13
	初始合成场 s2	20010515, 20070509, 20070529, 20090523	4
	典型场 Type2	20010515, 20070509, 20070529, 20090523, 20100526	5
period T2	初始合成场 s3	20020601, 20030606, 20070605, 20100601, 20100610	5
	典型场 Type3	20020601, 20030606, 20050612, 20060606, 20070605, 20100601	6
	初始合成场 s4	20010702, 20030702, 20050703, 20060621, 20070622, 20070703	6
	典型场 Type4	20030702, 20050703, 20060621, 20070622, 20070703	5



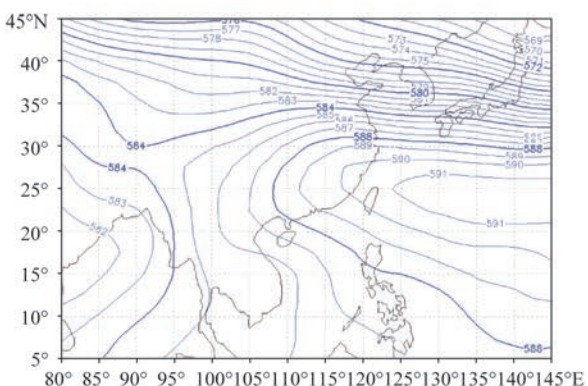
a. Type1



b. Type2



c. Type3



d. Type4

图5 诱发福建沿海赤潮的4种典型天气形势场

控制了我国大部分地区,福建沿海处于脊线前部,大部海域受来自南中国海的气流影响;典型场 Type3 由 6 个样本合成,为东亚低槽扰动型,主要特征是副高位置相对偏南和偏东,福建沿海处于东亚大槽后部,影响该海区的气流主要来自孟加拉湾海域;典型场 Type4 由 5 个样本合成,为副高控制型,主要特征是位于孟加拉湾上空的副热带南支西风槽已经消失,福建沿海完全处于强大的副高控制之下,影响近海的气流主要来自西北太平洋海域。

3.3 模型敏感性试验和预报应用与检验

3.3.1 模型敏感性试验

2001—2010 年赤潮天气分型敏感试验结果表明:若天气形势场与典型场相关系数连续 2 d 超过 0.5,则发生赤潮的概率较大。为了对试验结果进行定量化评价,本研究参考匡晓迪等^[23]在中尺度涡预报检验方面提出的评分方案,结合赤潮预报业务的客观实际,引进拟合准确率和预报准确率概念,设临界参数值为 0.5,定义各型典型场拟合准确率为:

$$\text{各型典型场拟合准确率} = (\text{准确拟合次数} + 0.5 \times \text{半对拟合次数}) / (\text{准确拟合次数} + \text{半对拟合次数} + \text{空报次数}) \quad (2)$$

式中:准确拟合是指连续 2 d 相关系数超过临界值,且该时段包含赤潮个例的首发日;半对拟合是指相关系数连续超过临界值的时间区间不含赤潮个例首发日,但与区间紧挨的下一日是赤潮事件首发日(考虑到赤潮监测受客观条件限制,赤潮实际暴发日可能早于发现日,即模型预报结果与实际吻合概率较大,故以半对计入统计);空报是指相关系数连续超过临界值的时间段不包含赤潮个例首发日,且排除半对拟合情况。此外,在敏感性试验中,由于不同分型的典型场只能预报本类别天气形势诱发的赤潮,对于其他不同类型天气形势诱发的赤潮不具有预报能力,因此本研究对各单一典型场敏感试验结果验证不考虑漏报情况。评价结果显示(见表 3),典型场的拟合准确率为 Type1 61.1%、Type2 65.0%、Type3 60.7% 和 Type4 64.7%。

3.3.2 模型预报应用与检验

2011 年福建沿海发生赤潮 5 次,是 12a 中次数最少的一年,其中 4 次发生在 period T1 时段, period

表 3 敏感性试验结果

典型场 种类	准确拟合 /次	半对拟合 /次	空报 /次	拟合 准确率/%
Type1	13	7	7	61.1
Type2	5	3	2	65.0
Type3	8	1	5	60.7
Type4	10	2	5	64.7

T2 时段未有赤潮发生;2012 年福建沿海发生赤潮 17 次,其中 12 次发生在 period T1 时段, 4 次发生在 period T2 时段(见表 4)。基于模型生成的 4 种典型场对 2011—2012 年福建沿海赤潮进行预报检验,定义模型综合预报准确率为:

$$\text{综合预报准确率} = (\text{准确预报次数} + 0.5 \times \text{半对预报次数}) / (\text{准确预报次数} + \text{半对预报次数} + \text{空报次数} + \text{漏报次数}) \quad (3)$$

检验结果显示(见表 4),2011—2012 年 20 次赤潮过程中,该模型成功预报了其中的 12 次,半对预报了 5 次,空报了 6 次,漏报了 3 次,综合预报准确率为 55.8%。分时段来看,period T1 时段(Type1 和 Type2)准确预报了 9 次,半对预报了 4 次,漏报了 3 次,空报了 3 次,综合预报准确率为 57.9%;period T2 时段(Type3 和 Type4)准确预报了 3 次,半对预报了 1 次,无漏报次数,空报了 3 次,综合预报准确率为 50.0%。结果还显示,典型场 Type2 准确预报了 8 次赤潮,关键原因是 2012 年 5 月 24—26 日福建沿海连续发生了 4 次赤潮,2012 年 5 月 30 日当天发生了 4 次赤潮,这 8 次赤潮首发日的天气形势都与典型场 Type2 呈现出较强的相关性。此外,在 2011—2012 年 period T2 时段与 Type3 和 Type4 呈现出较高相似度的天气场次数明显偏少,合计只有 7 次,而实际上 period T2 时段赤潮发生次数也明显偏少,合计只有 4 次。模型成功预报了其中的 3 次,剩余 1 次也为半对预报,显示出赤潮暴发频次的多寡受天气形势影响因素较大。该结果在一定程度上说明天气形势在诱发赤潮过程中起关键性作用,基于天气分型的赤潮预测模型能较准确地抓住诱发赤潮的天气形势主要特征,并且可以通过定量化的方法对赤潮的发生进行预测。

表4 基于天气分型的赤潮预报模型后报检验结果

序号	赤潮首发日	发生海域	成灾面积 /km ²	模型后报结果*(相关度)				综合预报 结果
				Type1	Type2	Type3	Type4	
1	20110429	平潭	16	0.56	0.11	—	—	漏报
2	20110511	福州长乐	15	<u>0.75</u>	<u>0.47</u>	—	—	正确
3	20110518	三沙湾	45	<u>-0.01</u>	0.33	—	—	半对
4	20110525	三沙湾	45	<u>0.30</u>	0.01	—	—	半对
5	20120427	三都岛	4	<u>0.28</u>	-0.40	—	—	半对
6	20120517	平潭	30	-0.34	0.44	—	—	漏报
7	20120518	三沙湾	130	0.06	0.28	—	—	漏报
8	20120524	湄洲湾	0.7	<u>0.60</u>	<u>0.52</u>	—	—	正确
9	20120525	莆田	2	<u>0.18</u>	<u>0.57</u>	—	—	正确
10	20120526	平潭	80	-0.06	<u>0.68</u>	—	—	正确
11	20120526	黄岐半岛	40	-0.06	<u>0.68</u>	—	—	正确
12	20120529	罗源吉壁	0.1	0.37	<u>0.35</u>	—	—	半对
13	20120530	福清东翰	6	0.38	<u>0.75</u>	—	—	正确
14	20120530	福州长乐	15	0.38	<u>0.75</u>	—	—	正确
15	20120530	莆田	32	0.38	<u>0.75</u>	—	—	正确
16	20120530	惠安	7	0.38	<u>0.75</u>	—	—	正确
17	20120605	罗源	10	—	—	<u>0.65</u>	-0.33	正确
18	20120607	莆田	1	—	—	<u>0.15</u>	0.17	半对
19	20120612	黄岐半岛	20	—	—	<u>0.74</u>	-0.87	正确
20	20120628	连江	3	—	—	-0.66	<u>0.91</u>	正确
准确预报/次				2	8	2	1	12
半对预报/次				4	2	1	0	5
漏报/次				—	—	—	—	3
空报/次				1	2	1	2	6
后报准确率				57.1%	75.0%	62.5%	33.3%	55.8%

注:*实线下划线数字表示正确预报本次赤潮过程,虚线下划线数字表示半对预报

3.4 诱发福建沿海赤潮的典型天气形势个例分析

3.4.1 典型场 Type1:西南季风扰动型

由该型天气形势诱发的福建沿海赤潮主要集中在4月底—5月底。2001—2012年,period T1时段共发生赤潮92次,其中44次与典型场 Type1 具有强相关性,占比达47.8%,平均每年约有3次赤潮过程与该类天气形势诱发有关。例如2002年5月4—14日发生在福鼎市和霞浦县东部海域面积为500 km²的赤潮。

2002年5月2—4日高空500 hPa位势高度场与典型场 Type1 的相关系数依次为0.90、0.92和0.94,连续多日达到极强相关程度,说明本次天气过程与典型场 Type1 高度相似,且极其稳定(见图6)。

500 hPa位势高度场上,西太副高588线压在了福建沿海,且588线包络了台湾省、巴士海峡以及菲律宾大部分地区,与此同时,位于孟加拉湾上空的副热带南支西风槽持续发展加深,受此影响,来自西南季风的暖湿气流源源不断地输送到我国东南部区域;近地面层,5月2—3日福建沿海处于低压倒槽之前,海区等压线连续多日呈西北-东南向,同时气压梯度力小,这种天气形势导致海区以高温和高湿的东南风为主,且风力较小,水体较稳定,为赤潮的酝酿和暴发提供了有利的气象条件。

3.4.2 典型场 Type2:高压脊控制型

由该型天气形势诱发的赤潮主要发生在5月中旬和下旬。period T1时段有18次与典型场 Type2 具有强相关性,占比19.6%,平均每年约有1~2次

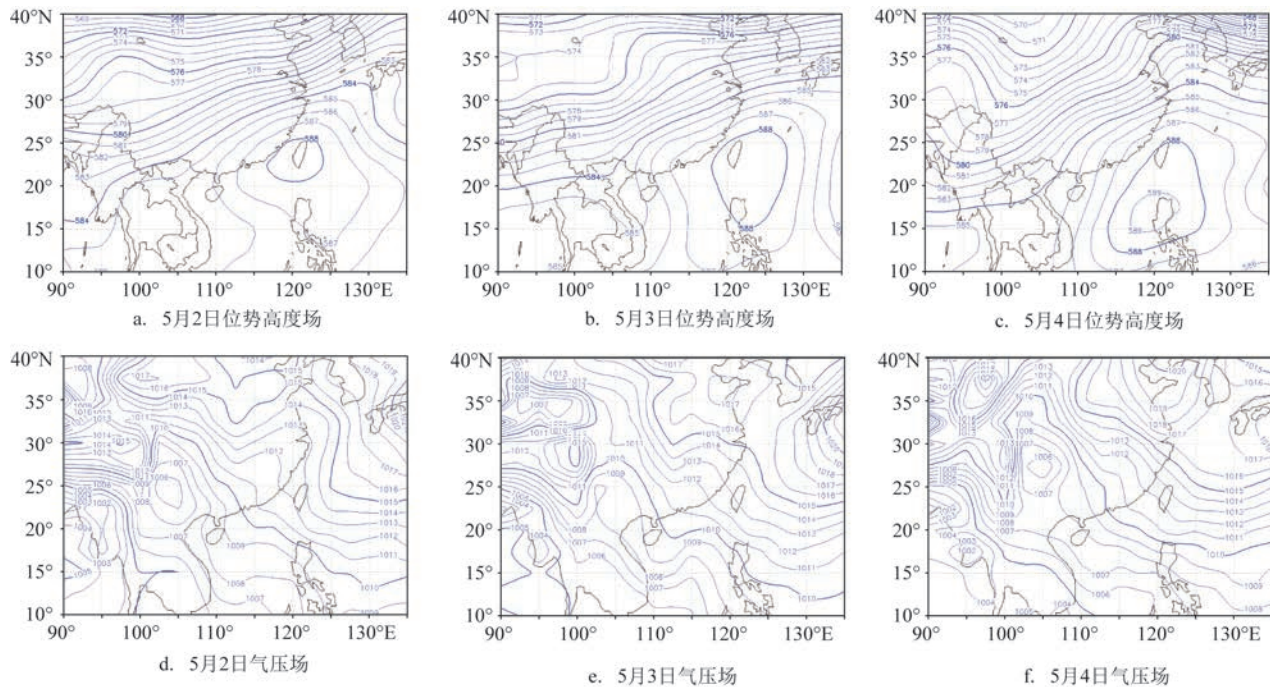


图6 2002年5月2—4日500 hPa位势高度场和近地面层气压场

赤潮过程与该类天气形势诱发有关,例如2007年5月29日—6月1日发生在同安湾海域面积为20 km²的旋链角毛藻赤潮。

2007年5月27—29日天气形势场与典型场Type2的相关系数依次为0.63、0.64和0.93,相关程度由强相关递增至极强相关(见图7)。5月27—28日,我国陆上西部高压脊开始发展东移,并逐渐影响我国华南和东南沿海,伴随西太副高的西伸北进,5月29日陆上高压脊与西太副高打通合并形成强大的阻塞高压,造成福建沿海地区出现极其稳定的晴好天气;在近地面层,持续多日的纵向等压线分布态势,迫使来自南中国海的暖湿气流持续不断地输送至福建沿海,良好的光照加之能量的持续积累,最终诱发了福建沿海水华。

3.4.3 典型场Type3:东亚低槽扰动型

由该型天气形势诱发的福建沿海赤潮主要发生在6月上旬和中旬。2001—2012年,period T2时段共发生赤潮61次,其中28次与典型场Type3具有强相关性,占比达到45.9%,平均每年约有2次赤潮过程与该类天气形势诱发有关。典型的赤潮事件如2006年6月11—14日发生在平潭赤潮监控区及周边海域的中肋骨条藻赤潮,成灾面积600 km²;

2006年6月12—13日,分别发生在深沪湾海域(成灾面积100 km²)、崇武半岛海域(成灾面积200 km²)和南日群岛海域(成灾面积150 km²)的赤潮。

2006年6月8—10日天气形势场与典型场Type3连续多日达到强相关程度,其相关系数依次为0.79、0.68和0.67(见图8)。在500 hPa位势高度场上东亚大槽不断加深,福建沿海处于低压槽末端影响之下,西太副高588线相对偏南和偏东,大体处于巴士海峡的东南部地区,受此影响福建沿海上升流比较活跃。对应近地面层,6月8—9日温带气旋东移过境,致使福建沿海地区出现气压降低和气流辐合的天气现象。该天气形势的配置易在近海域产生上升流,利于水体底层营养盐向表层输送,为赤潮生物的繁殖生长创造了有利的营养条件。6月10日后北部弱高压南下跟进控制了福建沿海,大气运动处于相对稳定状态,为触发水华提供了有利的气象条件,之后6月11—12日福建沿海发生多起赤潮。

3.4.4 典型场Type4:西太平洋副热带高压控制型

由该型天气形势诱发的赤潮主要发生在6月下旬和七月初。period T2时段有17次与典型场Type4具有强相关性,占比27.9%,平均每年约有1~2次

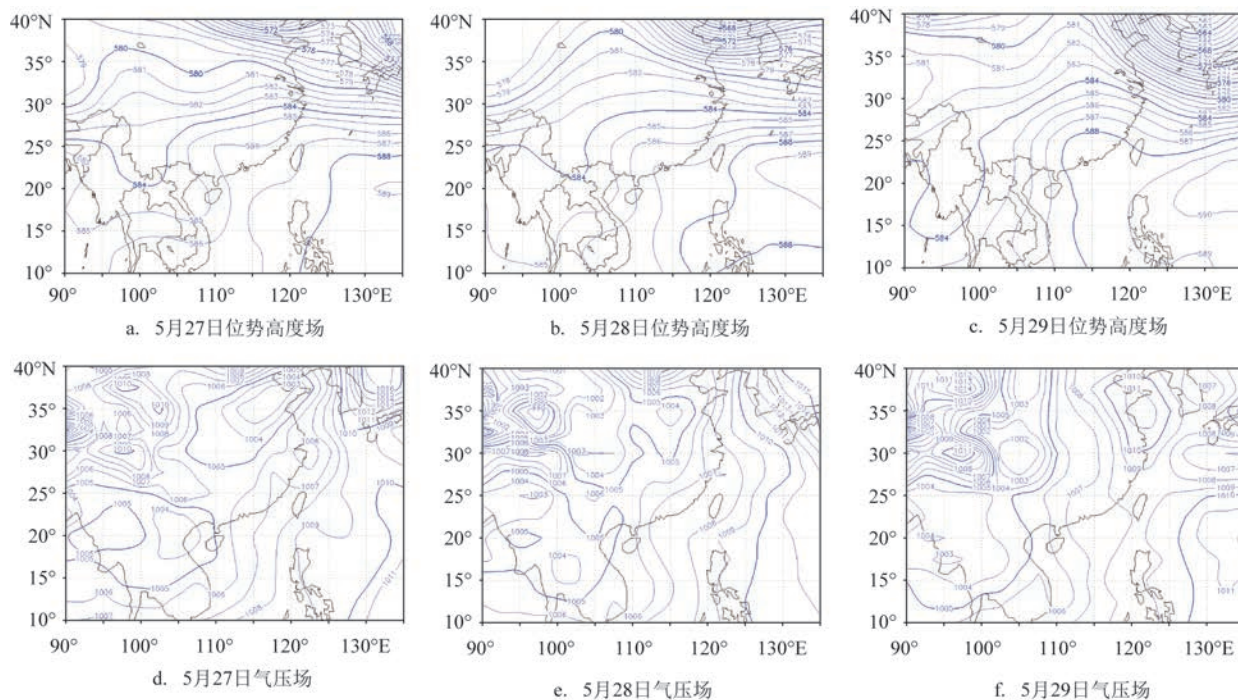


图7 2007年5月27—29日500 hPa位势高度场和近地面层气压场

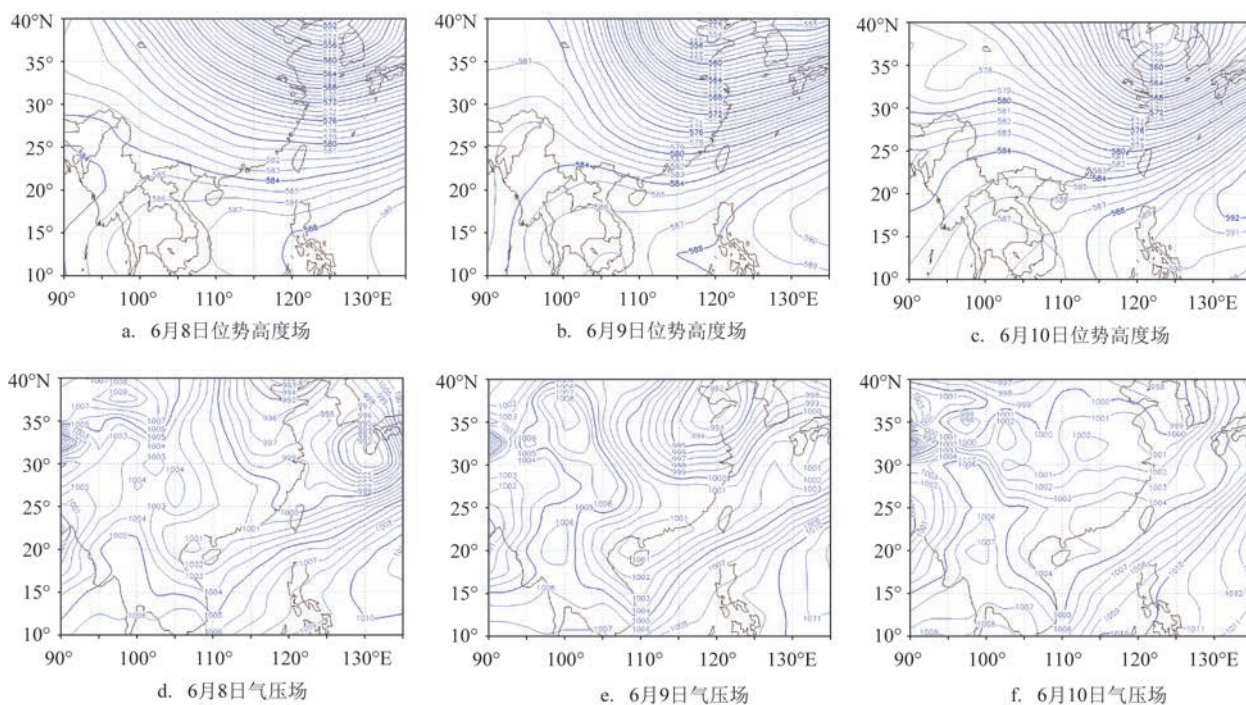


图8 2006年6月8—10日500 hPa位势高度场和近地面层气压场

赤潮过程与该类天气形势诱发有关。以2006年6月21—24日发生在东山湾海域面积为200 km²的日本星杆藻和旋链角毛藻赤潮为例,对诱发这次赤潮的天气过程进行分析。

2006年6月19—21日的天气形势场与典型场Type4连续多日达到极强相关程度,其相关系数依次为0.88、0.89和0.88(见图9)。500 hPa位势高度场上,西太副高588线西伸并北抬且持续控制浙江、

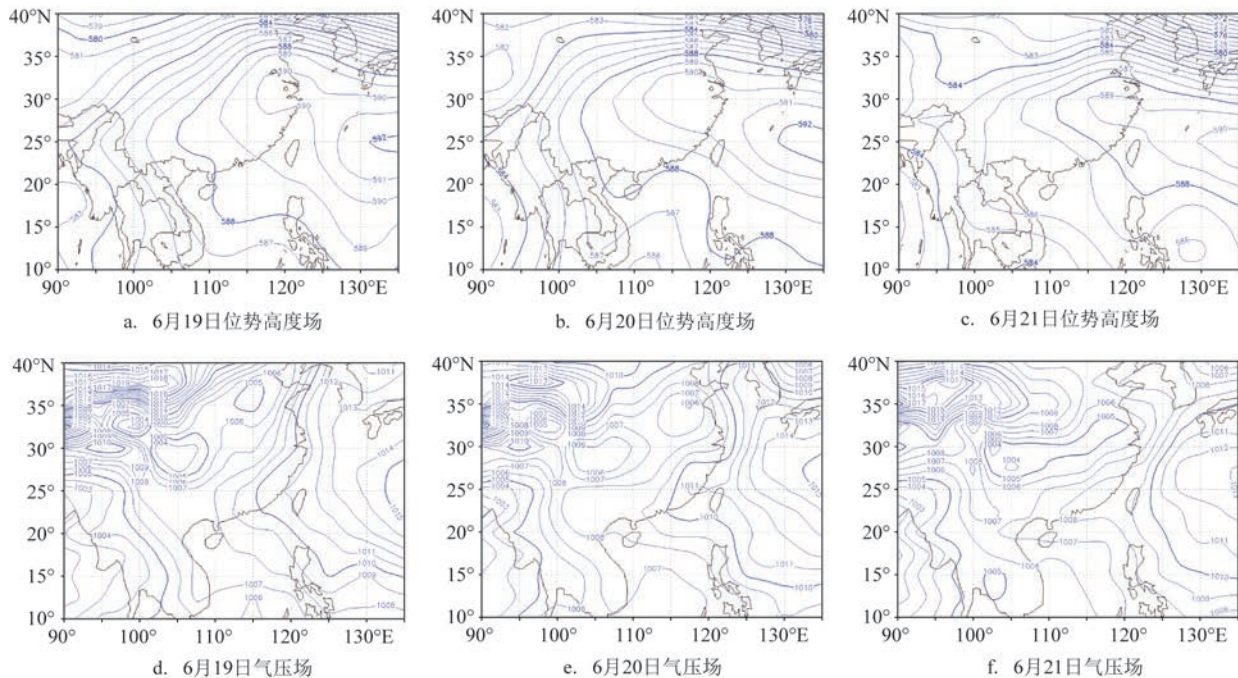


图9 2006年6月19—21日500 hPa位势高度场和近地面层气压场

福建和广东东部近海,造成沿海海域下沉气流运动较强,天气形势稳定,形成晴热高温天气;对应近地面层,福建沿海受海上高压长时间控制,暖湿的东南风持续,天气闷热,海温逐渐升高,这种天气形势容易诱发水体交换不畅的半封闭性海域赤潮。

4 结论

本文以2001—2012年我国沿海赤潮的相关数据,对福建沿海赤潮的时空分布特征进行分析。在此基础上,利用NCEP再分析资料,从大气环流诱发赤潮的角度出发,基于典型天气形势场相似法构建了福建沿海赤潮定量化预报模型,并对该模型进行了敏感性试验和预报检验。结果表明:

(1)2001—2012年,福建沿海共发生赤潮187次,累计面积约11 700 km²,年均赤潮约15.6次,年均面积约1 000 km²。其中,4月第6候—7月第1候是福建沿海赤潮暴发的鼎盛期,期间共发生赤潮153起,累计面积10 386 km²,占12a总次数的81.8%,占总面积的88.5%。从区域分布来看,闽东北海域和厦门近海是赤潮的高发海域,大面积赤潮主要集中在三沙湾海域、厦门近海和平潭海域。

(2)敏感性试验和预报检验结果表明:基于天

气分型的福建沿海赤潮预报模型能够在赤潮大面预报中获得较好的效果,其后报检验准确率为55.8%。其中,period T1时段(4月25日—5月31日)的综合预报准确率为57.9%;period T2时段(6月1日—7月5日)的综合预报准确率为50.0%。

(3)诱发福建沿海赤潮的主要天气形势分别为西南季风扰动型、高压脊控制型、东亚低槽扰动型和西太平洋副热带高压控制型。4月26日—7月5日期间,在福建沿海153次赤潮过程中,由该4种天气形势诱发的赤潮为107次,占比达69.9%,说明该模型抓住了诱发福建沿海赤潮环流形势的主要特征,具有较好的预报效果。

赤潮成因复杂,既有赤潮生物种自身的生物因素,也涉及到水动力、气象和环境理化要素等因子。本文只从气象条件对赤潮诱发的角度进行建模分析,在大面预报中效果较好,若在此基础上加入实时生态观测数据进行综合分析则可以做到更精细化的预报。总之,在当前赤潮生态动力学模型尚不成熟的阶段,基于天气分型的定量化预报方法具有较强的可操作性,为赤潮短期业务预报提供了一种新的途径。

参考文献:

- [1]王丹,刘桂梅,何恩业,等.有害藻华的预测技术和防灾减灾对策研究进展[J].地球科学进展,2013,28(2):233-242.

- [2] 俞志明, 陈楠生. 国内外赤潮的发展趋势与研究热点[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 474-486.
- [3] 谢宏英, 王金辉, 马祖友, 等. 赤潮灾害的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(3): 482-488.
- [4] 叶君武, 陈淑琴, 周丽琴, 等. 用欧氏距离系数预报舟山海域赤潮发生指数等级[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 108-111.
- [5] 张承慧, 钱振松, 孙文星, 等. 基于IOWA算子的赤潮LMBP神经网络组合预测模型[J]. 天津大学学报, 2011, 44(2): 101-106.
- [6] 吴玉芳. 赤潮高发期间厦门海域叶绿素值预报方程建立及应用于灾害性赤潮预报模式的研究[J]. 海洋预报, 2012, 29(2): 39-44.
- [7] 李天深, 蓝文陆, 卢印思, 等. 近岸海域自动监测浮标在赤潮预警中的应用及其缺陷[J]. 海洋预报, 2015, 32(1): 70-78.
- [8] 乾爱国, 王英伟, 林傑明, 等. 基于改进箱体模型的赤潮水动力学模拟研究[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 91-96, 101.
- [9] 杨响, 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.
- [10] 陈豫英, 刘还珠, 陈楠, 等. 基于聚类天气分型的KNN方法在风预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(5): 564-572.
- [11] 熊亚军, 廖晓农, 于波, 等. 基于天气分型的北京地区雷电潜势预报预警系统[J]. 灾害学, 2012, 27(2): 67-71, 81.
- [12] Hsu C H, Cheng F Y. Classification of weather patterns to study the influence of meteorological characteristics on PM_{2.5} concentrations in Yunlin County, Taiwan[J]. Atmospheric Environment, 2016, 144: 397-408.
- [13] Zhang W, Villarini G. On the weather types that shape the precipitation patterns across the U. S. Midwest[J]. Climate Dynamics, 2014, 53(7): 4217-4232.
- [14] 常炉予, 许建明, 瞿元昊, 等. 上海市臭氧污染的大气环流客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 169-179.
- [15] 任湘湘, 何恩业, 李海, 等. 珠江口赤潮生成的天气分型研究[J]. 海洋预报, 2007, 24(3): 46-58.
- [16] 张春桂, 任汉龙, 吴幸毓, 等. 福建沿海赤潮灾害气象预报[J]. 气象科技, 2010, 38(2): 253-258.
- [17] 彭模, 刘明, 潘锡山, 等. 长江口海域赤潮发生与天气形势关系浅析[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2015, 24(3): 88-92.
- [18] 符生辉. 2007-2012年浙南洞头沿海赤潮与气象关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [19] 何恩业, 王丹, 黄莉, 等. 西太平洋副热带高压的变动对我国赤潮发生的影响分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(4): 83-89.
- [20] 江天久, 佟蒙蒙, 齐雨藻. 赤潮的分类分级标准及预警色设置[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 2035-2040.
- [21] Yin K D, Song X X, Liu S, et al. Is inorganic nutrient enrichment a driving force for the formation of red tides?: a case study of the dinoflagellate *Scrippsiella trochoidea* in an embayment[J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 54-59.
- [22] 张志锋, 贺欣, 张哲, 等. 渤海富营养化现状、机制及其与赤潮的时空耦合性[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 465-468, 483.
- [23] 匡晓迪, 李竞时, 李云. 中尺度涡业务化检验方法探讨[J]. 海洋预报, 2019, 36(2): 1-8.

Study on the red tide prediction method based on weather patterns in the coastal area of Fujian Province

HE En-ye¹, LI Xue-ding², YANG Jing¹, GAO Shan¹, JI Xuan-liang¹

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Marine Forecasting Center of Fujian Province, Fuzhou 350003 China)

Abstract: This paper analyses the spatial and temporal distribution characteristics of red tides in the coastal area of Fujian province using the harmful algal blooms data from 2001 to 2012. The results show that the red tide most frequently occurs from the last pentad of April to the first pentad of July in the northeast coast of Fujian province and the Xiamen coastal area. Meanwhile, the red tides events covering large areas mainly occurs in Sansha Bay, Xiamen and Pingtan coastal area. A quantitative red tide forecast model for the Fujian coastal area in May and June is established based on typical weather patterns derived from the NCEP reanalysis data. The results of sensitive experiment and forecast validation show that the model is capable to forecast red tides events with a forecast accuracy of 55.8%. There are four typical weather patterns that are most favorable for the occurrence of red tide in the coastal area of Fujian province, which are southwest monsoon disturbance, high-pressure ridge control, East Asia low-pressure trough disturbance and West Pacific subtropical high control. A case study for each typical weather patterns is conducted, which provides a reference for the future study of red tide forecast.

Key words: red tide; red tide forecast; weather pattern; similarity algorithm; Fujian coastal area