

曹越男,刘涛,杨正龙,等,2020.海雾客观预报方法在精细化网格预报中的应用[J].气象,46(10):1320-1329. Cao Y N, Liu T, Yang Z L, et al, 2020. Application of sea fog objective prediction method in fine gridded weather forecasting[J]. Meteor Mon, 46 (10):1320-1329(in Chinese).

海雾客观预报方法在精细化网格预报中的应用^{*}

曹越男 刘涛 杨正龙 张增海 赵伟 王慧

国家气象中心,北京 100081

提 要: 为推进海洋气象精细化网格预报建设,国家气象中心从 2013 年开始研发海雾客观预报方法,对基于配料法建立的海雾客观预报方法不断进行改进,并研发了基于决策树方法的海雾预报方法和海雾预报指数预报产品,客观方法对我国北部海区主要海雾过程预报效果较好,对 2018 年我国北部海区有无雾的 24 h 预报 TS 评分平均为 0.25 左右。将海雾客观预报产品集成应用于海洋气象智能网格预报背景场的生成规则中,生成天气现象网格预报结果,为主观预报订正提供了有力的支撑。基于精细化网格预报生成的海雾主观预报结果对 2018 年黄海中部和南部大雾预报的 24 h TS 评分接近 0.25,对北部湾大雾预报的 24 h TS 评分在 0.15 左右。

关键词: 网格天气预报,海雾预报,配料法,海雾预报指数,决策树

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.10.006

Application of Sea Fog Objective Prediction Method in Fine Gridded Weather Forecasting

CAO Yuenan LIU Tao YANG Zhenglong ZHANG Zenghai ZHAO Wei WANG Hui

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: In order to promote the construction of fine gridded forecasting of marine meteorology, National Meteorological Centre began to develop the objective forecasting method of sea fog in 2013. The objective forecasting method of sea fog based on ingredients-based methodology has been continuously improved. The method of sea fog forecasting based on decision tree method and the product of sea fog forecast index forecasting have been developed. The main sea fog processes in the northern part of China offshore sea can be well forecasted based on objective methods. The average 24 h fog occurrence TS score of objective method in the northern part of China offshore sea in 2018 is about 0.25. Sea fog prediction method based on ingredients-based methodology was applied into the generation rules of weather phenomena background fields, and the objective method results have provided strong support for subjective forecasting. The 24 h dense fog TS scores of subjective sea fog prediction results in 2018 based on fine gridded prediction get close to 0.25 in the central and southern Yellow Sea, and 0.15 in the Beibu Gulf.

Key words: gridded weather forecasting, sea fog forecasting, ingredients-based methodology, sea fog forecast index, decision tree

^{*} 国家重点研发计划(2019YFC1510104)、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2015LASW-A11)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-141)共同资助

2019 年 10 月 6 日收稿; 2020 年 8 月 29 日收修定稿

第一作者:曹越男,主要从事海洋气象预报工作. E-mail: caoyan@cma.gov.cn

引言

随着公众对天气预报精细化的需求越来越高,传统的站点预报以及海区预报已经无法满足需求,目前无缝隙精细化网格气象预报已经成为国际主流趋势(金荣花等,2019)。我国无缝隙精细化网格预报业务技术起步于2014年,作为全球无缝隙网格天气预报业务的一部分,国家气象中心从2013年开始研发海洋气象网格预报相关技术及支撑平台,经过3年的研发工作,于2016年正式实现了由传统的海区预报向精细化格点预报的切换,其中对天气现象要素的预报需要较好的海雾预报产品来提供技术支撑,因此开展了海雾客观预报方法的研发工作。

海雾是受海洋的影响发生在海上或沿海地区底层大气中的凝结现象,是悬浮于大气边界层大量水滴或冰晶使大气水平能见度 $<1\text{ km}$ 的天气现象(王彬华,1983),其对海上船舶航行、捕捞、港口作业以及沿海地区的公路运输和电力输送等社会生活的方方面面都会产生重要影响。影响海雾形成与消散的因素很多,与大气、水文的各个条件密切相关,近几年国内学者在海雾的数值模拟方面取得了较大的进展(高山红等,2014;高小雨和高山红,2019;Huang et al,2019),但是海雾对模式初始场、海温以及参数化方案的高敏感性决定了集合预报是今后重点的研究方向(傅刚等,2016)。雾的集合预报方法在美国环境预报中心已经投入业务运行,但是我国业务中应用的仍然是单一海雾预报模式,其预报效果并不能满足现在的业务需求。结合数值预报和天气气候统计两种方法开发海雾的客观预报产品可以作为单一海雾预报模式的较好的补充,提供更多的海雾预

报产品供预报员参考,基于配料法和决策树方法研发的海雾客观预报方法在沿岸地区的海雾预报业务中得到了较好的应用(黄辉军等,2010,黄健等,2011,高荣珍等,2016),因此国家气象中心从2013年开始研发适用于中国近海的海雾客观预报方法。目前海雾客观预报方法对中国近海的海雾有较好的预报效果,可基本满足业务预报需求,在2018年春节琼州海峡大雾和2018年上海合作组织青岛峰会(任兆鹏等,2019)等气象服务中发挥了较好的作用。本文主要介绍了国家气象中心近几年研发的基于配料法和决策树方法的海雾客观预报方法,海雾预报指数的初步建立情况,以及这些客观方法的应用情况,并对未来进行展望。

1 海雾客观预报方法

1.1 国家气象中心海雾客观预报方法发展历程

国家气象中心从2013年开始进行海雾的客观方法研究,从最开始的简单配料法到机器学习的决策树方法,再到2019年的海雾预报指数方法,共进行了三次重大的改进(图1)。2013年,基于海雾的物理过程与预报员的预报经验选取预报因子,对最近10年的海雾过程进行分析,通过统计学方法和多元回归等数学方法细化因子的作用,确定满足性条件,在14个预报因子中有7个以上满足阈值条件即报雾。2014—2017年,通过加入沿岸站点观测资料、卫星反演资料,对海雾过程进行了更细致的分类统计,对预报因子的显著性进行了分析并确定了无雾的判断条件,在分类统计上进行了空间和时间的细化,对因子和阈值进行了调整并进行了预报试验。

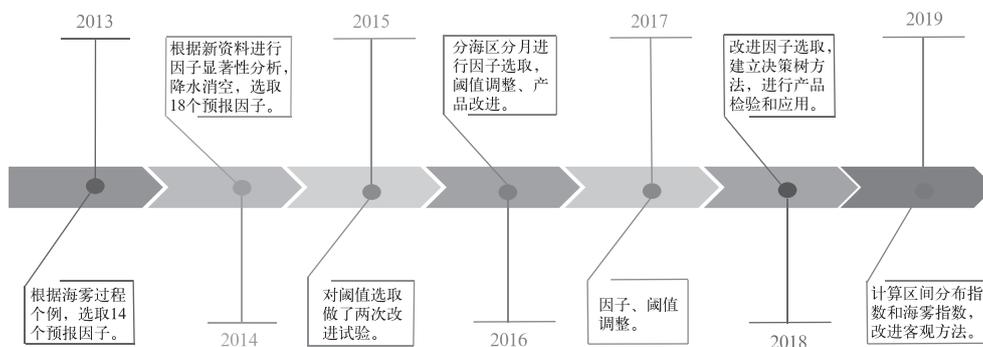


图 1 国家气象中心海雾客观预报方法主要发展
Fig. 1 Developing process of sea fog objective prediction method used in National Meteorological Centre

2018年,在继续改进原有方法的基础上,又针对渤海、黄海容易出雾的海区研发了决策树预报方法,为格点预报的背景场提供了又一个选择。2019年,根据实际预报中的需求,开发海雾预报指数产品,将中国近海分为5大海区,分别建立海雾预报指数。

1.2 数据

本文基于建立海雾历史检索数据库(黄彬等,2014)选用的86个中国沿海海雾监测代表站,选取1980—2012年共33年的地面人工观测资料,利用观测站的天气现象和大气水平能见度要素进行判别,来建立海雾样本库。天气现象为雾时,能见度 $< 10\text{ km}$ 且 $\geq 1\text{ km}$ 是轻雾,能见度 $< 1\text{ km}$ 且 $\geq 500\text{ m}$ 是大雾,能见度 $< 500\text{ m}$ 是浓雾。本文选取大雾及浓雾样本的观测作为有雾样本,天气现象无雾且无降水的观测为无雾样本。使用欧洲中期预报中心的再分析资料来计算样本的气象要素值,时间分辨率为6h,空间分辨率为 0.75° (Dee et al,2011)。在海雾预报指数方法中将中国近海有海雾的区域分成五部分,分别为北部海区:渤海、渤海海峡、黄海北部;东北海区:黄海中部和南部;东部海区:东海;东南海区:台湾海峡、台湾以东洋面;南部海区:北部湾、南海北部、琼州海峡。图2为中国近海有海雾的海区划分及沿海海雾监测站位置。

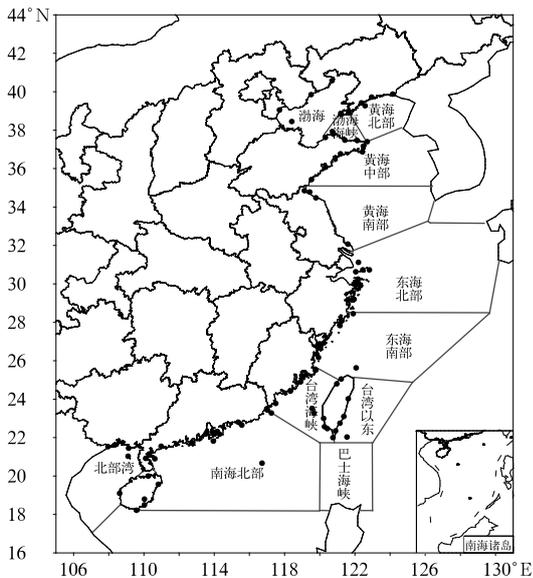


图2 中国近海有海雾的海区划分(实线)及沿海海雾监测站分布(圆点)

Fig. 2 Distribution of China offshore areas with sea fog (solid line) and coastal sea fog monitoring station (dot)

1.3 配料法

本方法首先基于海雾生成和消散的物理过程与预报员的预报经验,预选出可能对海雾造成影响各层共65个物理量作为初步预报因子(杨正龙等,2015)。将实况观测资料分为“有雾”和“无雾”两类,分别计算出所对应的各因子值,将其进行对比分析,以对海雾影响的相关性和显著性为依据进行第一次筛选。如图3所示,5月东北海区在有雾和无雾情况下700 hPa的相对湿度分布曲线相近不具有显著性,因此700 hPa的相对湿度因子没有入选;而10月北部海区在有雾和无雾情况下1000 hPa相对湿度具有明显的区别和特性,因此1000 hPa相对湿度因子入选。

结合地面观测和卫星反演云图挑选了2017年春季我国近海的6次主要海雾过程(王慧等,2017),对海雾发生时各预报因子分布范围与雾区的对应关系进行分析,对预报因子进行第二次筛选,最终留下18个预报因子,分别为相对湿度(1000、925和850 hPa)、风向和风速(10 m,1000、925和850 hPa)、2 m温度露点差($T - T_d$)、温度(1000、925和850 hPa),925~1000 hPa温度差($\Delta T_{925-1000}$),海表面温度以及海气温差。除这18个因子外,有降水出现以及海温过高时都不会出现海雾,因此将6 h累计降水量 $> 1\text{ mm}$ 以及海温 $> 25^\circ\text{C}$ 设为消空条件,只要

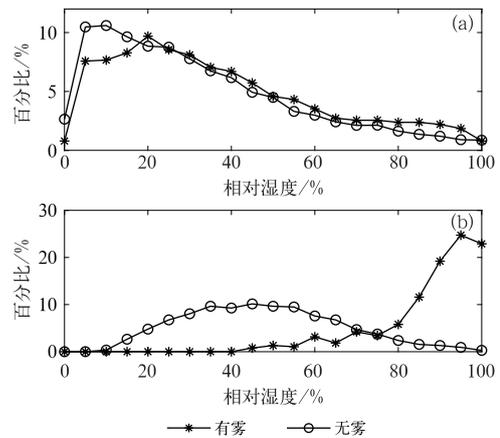


图3 5月东北海区700 hPa(a)和10月北部海区1000 hPa(b)有雾和无雾样本相对湿度的分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of relative humidity of foggy and non-foggy samples at 700 hPa over northeastern sea area in May (a) and at 1000 hPa over northern sea area in October (b)

满足这两个条件中的一个即判定无雾。

在预报因子的阈值设定上,分月份和海区将实况资料有雾时各因子的范围,去除 15%的极大值和 15%的极小值,取中间 70%作为可信阈值(代表低层湿度的 1000 和 925 hPa 相对湿度只去除极小值, 2 m 的 $T-T_d$ 只去除极大值)。当入选的 18 个因子中 n 个(通过检验得出最佳 n 值,不同海区 n 值不同)处于出雾阈值区间时,即判定当前格点有雾。将过去 30 年的再分析资料利用此算法进行回算并与历史实况资料进行对比检验,对有无雾的回算准确率为 93.9%,TS 评分为 0.24。

1.4 决策树方法

2018 年针对渤海、黄海的海雾样本采用分类与回归树(CART)方法建立了渤海、黄海的海雾决策树预报模型。图 4 为得到的误分率最小的分类树,含有 9 个终节点。图中最上端为节点 1(根节点),灰色框为终节点,每个节点框内信息依次为节点名称、类名称、当前节点下无雾和有雾分类记录数及所

占比例以及总记录数,每个方框上面的为分类变量及阈值。节点 1 包含全部样本共 220966 个记录,其中无雾记录数为 208602,占当前节点样本数的 94.4%,有雾样本记录数为 12364,占 5.6%。分类变量为 2 m 的 $T-T_d$,分类阈值为 2.8°C ,分裂出节点 2 和节点 5,其中节点 2 表示当 2 m 的 $T-T_d \leq 2.8^{\circ}\text{C}$ 时,包含样本 28306 个记录,其中有雾记录数为 10567,占当前节点样本数的 37.3%,无雾记录数为 17739,占 62.7%,节点 2 判断为有雾类。节点 5 表示当 2 m 的 $T-T_d > 2.8^{\circ}\text{C}$ 时,包含样本 192660 个记录,其中无雾记录数为 190863 个,占当前节点样本数的 99.1%,有雾样本记录数为 1797 个,占 0.9%,判断为无雾类。以此类推,最终出现 9 个终节点,其中有 2 个终节点是有雾分支,一个分支为当 $T-T_d \leq 2.8^{\circ}\text{C}$,海温 $\leq 25^{\circ}\text{C}$,1—7 月或 11—12 月, $\Delta T_{925-1000} \geq -2.5^{\circ}\text{C}$ 时,则判断有雾。另一个分支为当 $2.8^{\circ}\text{C} < T-T_d \leq 5.5^{\circ}\text{C}$,1—7 月或 11—12 月, 850 hPa 经向风 $\geq -1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 1000 hPa 相对湿度 $\geq 75\%$ 时,则判断为有雾。

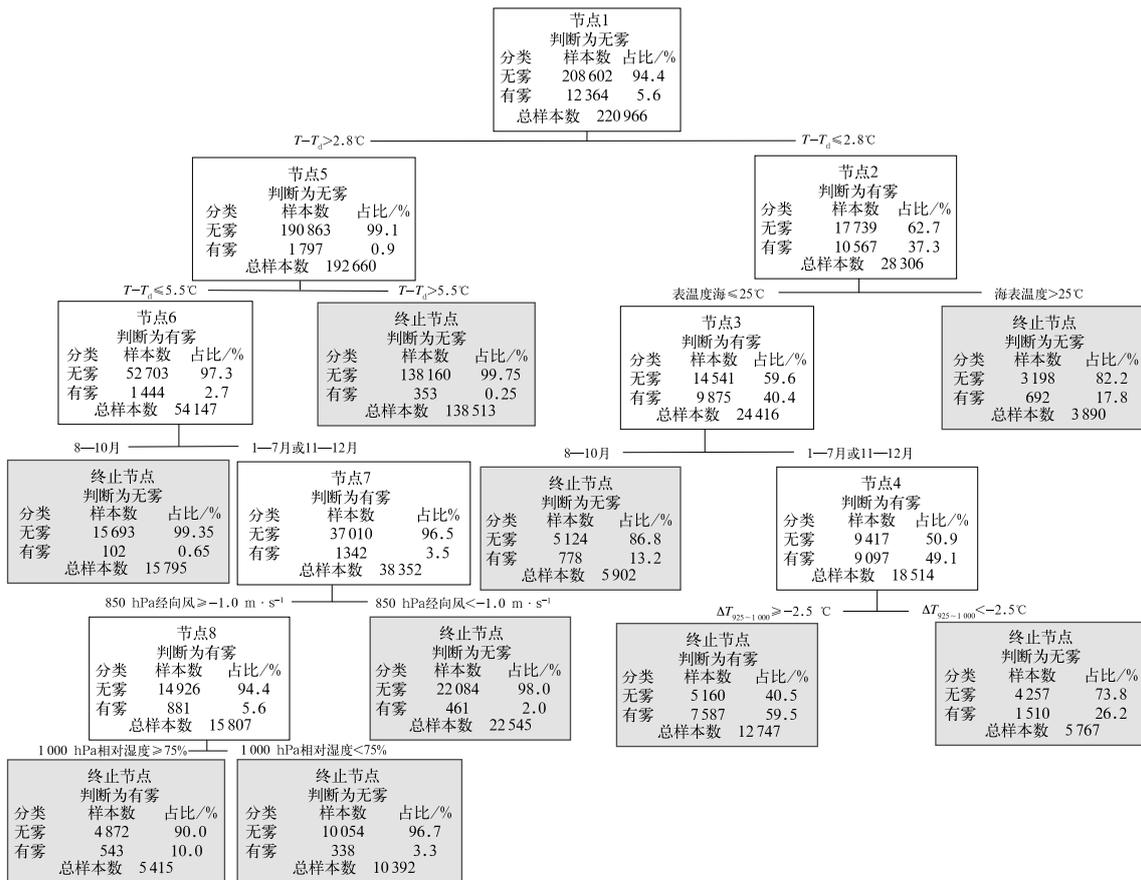


图 4 海雾决策树模型

Fig. 4 The decision tree model of sea fog prediction

通过决策树方法的建立发现,与渤海、黄海海雾相关性较大的预报变量有 2 m 的 $T-T_d$ 、海温、850 hPa 经向风、1000 hPa 相对湿度、 $\Delta T_{925-1000}$,而且渤海、黄海海雾有明显的季节变化,在秋季出现海雾的情况非常少。对于决策树而言,高层节点上的判别变量和阈值比低层节点上的判别变量和阈值更有价值(Breiman et al,1984)。可见, $T-T_d$ 以及海表温度在渤海、黄海海雾预报中最为关键,强调了水汽以及海温在海雾形成中的重要性,这和高荣珍等(2016)的研究结果一致。根据决策树方法的结果,建立了图 5 所示的决策树预报模型流程图。

1.5 预报试验:海雾预报指数

2019 年开始研发海雾预报指数的产品,根据预报经验挑选要素,通过计算每个要素的分指数对要素进行筛选,最后对筛选要素的分指数求和得到海雾预报指数,海雾预报指数越高,表示出雾的可能性越大。

分段统计不同海区各气象要素值落在不同区间的条件下雾天气出现概率相比气候态概率的倍数作为各要素值区间对应的分指数,该值越大表明雾天气出现概率越高。其中要素统计区间的划分方法如

下:将每个海区中的所有样本要素值排序,然后划分为 10 个区间,以满足落在各区间内的要素个数均占总个数的 10%,得到的区间划分用于分段统计。这样的区间划分方法保证了各区间有充分的、均匀的样本分布。张恒德等(2017)给出了分指数的具体计算公式。

以北部海区为例,图 6 为 2 m 的 $T-T_d$ 和 $\Delta T_{925-1000}$ 的分指数计算结果,当 $T-T_d < 3^\circ\text{C}$ 或者 $\Delta T_{925-1000} > -3^\circ\text{C}$ 时,分指数 > 1 ,即雾天气出现概率高于气候态概率。随着 $T-T_d$ 的降低和 $\Delta T_{925-1000}$ 的升高,分指数逐步增大,意味着雾天气出现概率逐步增大。表明 $T-T_d$ 和 $\Delta T_{925-1000}$ 在北部海区对雾天气的预报有较好的指示意义。在所有要素分指数计算的基础上,按照各要素分指数最大值和最小值的比值进行排序,该分指数比值越大表明要素对雾天气和无雾天气区分度越大,北部海区 $T-T_d$ 和 $\Delta T_{925-1000}$ 的分指数比值分别为 276 和 1095,表明这两个要素对有雾天气和无雾天气区分度很大。最终针对每个海区从大到小选取分指数比值排序前十的要素,对分指数求和得到海雾预报指数。按照上述客观方法筛选得到的北部海区海雾预报指数计算要素包括 $\Delta T_{925-1000}$ 、 T_{850} 、 $T-T_d$ 、 $T_{925\text{ hPa}}$ 、

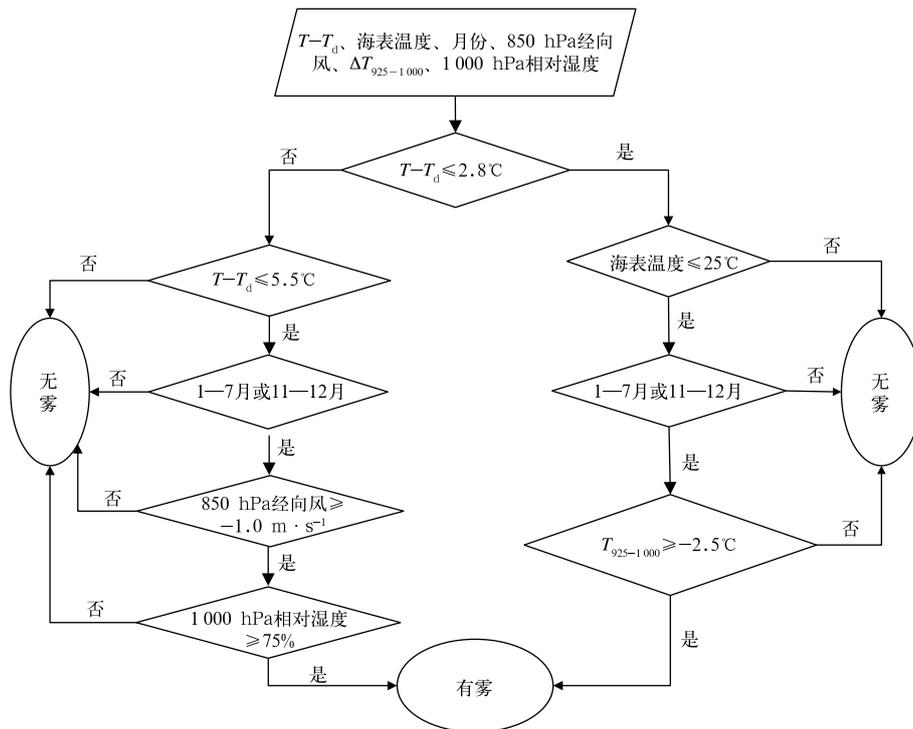


图 5 海雾决策树预报方法流程

Fig. 5 The decision-making procedure of sea fog forecasting

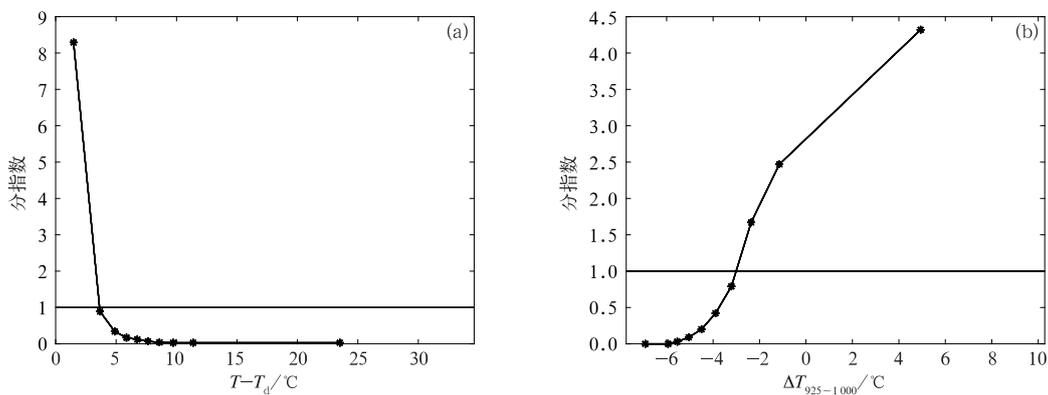


图 6 2 m 的 $T-T_d$ (a) 和 $\Delta T_{925-1000}$ (b) 在 10 个分布区间的分指数值

Fig. 6 Sub-indices of difference of the temperature and dewpoint at 2 m (a) and difference of temperature between 925 hPa and 1000 hPa (b) in 10 distribution intervals

1000 hPa 相对湿度、 T_{700} 、 T_{1000} 、10 m 经向风、850 hPa 经向风、 T_{500} 。根据选取的分指数制作查算表,查算表包括 10 个具体要素、要素值的区间划分和各区间对应的分指数。根据气象要素实况或模式预报值查找要素值所在区间的分指数,将 10 个要素的分指数求和就得到最终的海雾预报指数。

2 在精细化网格中的应用

海洋气象精细化网格的天气现象背景场是在模式降水、雾、云量、湿度等要素的基础上进行判断生

成的。其中雾的判断采用的是基于配料法的海雾客观预报方法生成的结果。对于模式预报没有降水而客观方法预报有雾的格点判断为大雾,天气代码为 57。预报员在生成的天气背景场的基础上使用格点编辑器进行修改,得到主观预报的天气现象格点产品(图 7)。由于目前的客观方法只能得到针对大雾“有”和“无”的预报,还没有雾的等级预报,因此预报员需要在客观方法的基础上根据预报经验做出雾的等级预报。24 h 内逐 6 h 制作天气现象的格点预报产品,然后基于格点产品生成近海海雾预报图,对公众发布。基于决策树和海雾指数开发的海雾预报产

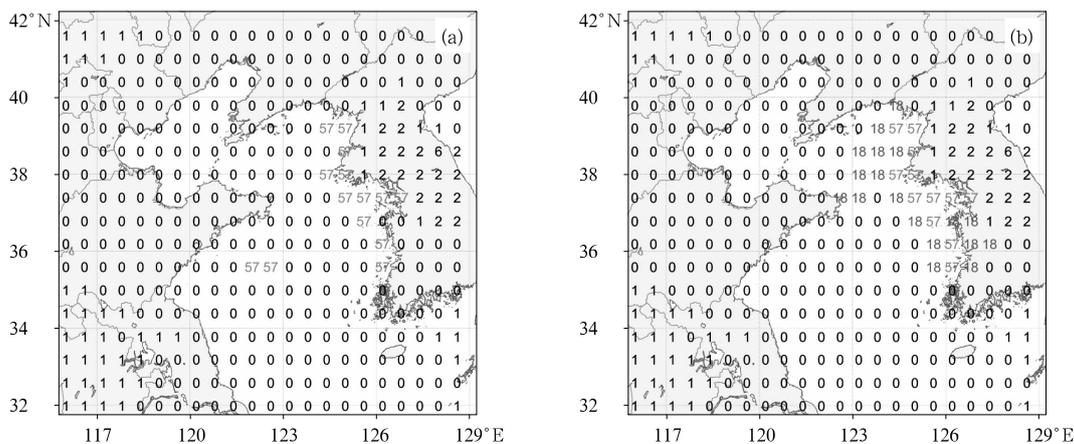


图 7 2019 年 3 月 25 日 08 时起的 26 日 02—08 时的天气现象格点预报

(a) 基于模式和客观方法分析结果, (b) 主观预报
 (0 为晴天, 1 为多云, 2 为阴天, 18 为轻雾, 57 为大雾)

Fig. 7 Weather phenomena grid forecast results for 02:00—08:00 BT 26 March run at 08:00 BT 25 March 2019

(a) result based on model and objective method, (b) subjective result
 (0: sunny, 1: cloudy, 2: overcast sky, 18: light fog, 57: dense fog)

品,还需要将预报区域扩展到整个海区,并进一步完善方法后,再应用于精细化网格系统,目前是提供预报结果给预报员做预报参考。3种客观产品的分辨率均为 0.1° ,产品形式均为图片和MICAPS数据,配料法和海雾指数方法的预报区域为图2中的中国近海有雾的海区,决策树方法的预报区域为渤海、渤海海峡、黄海。

3 检验

3.1 客观方法检验

由于决策树方法目前只是针对北部海区进行研发,所以利用海雾代表站的观测资料对2018年1—7月渤海、黄海区域的海雾预报结果进行检验,其有无雾预报的24 h TS评分平均为0.25左右(图8a),对黄海北部和中部大雾的预报效果相对较好,TS评分为0.1左右,对渤海和黄海南部海区大雾的预报效果较差,还需要继续改进(图8b)。客观

方法对大雾的24 h预报准确率在90%左右(图略)。

3.2 主观预报检验

利用海雾沿岸代表站,针对2018年预报员主观预报的天气现象格点产品中雾(大雾和浓雾)以上级别的预报进行检验,实况观测天气现象有雾且能见度为1 km以下认为实况为大雾天气,对海雾代表站进行一对一的TS评分检验,然后计算海区平均的TS评分结果。按照海区统计的TS评分结果(图9)显示,在黄海北部和中部海域、北部湾的TS评分结果较高,这几个海域也是大雾发生频率较高的海域,黄海北部和中部海域24 h的TS评分接近0.25,北部湾的TS评分在0.15左右。

3.3 个例检验

2019年3月25日凌晨至27日白天,黄海北部和中东部海域出现了能见度低于500 m的浓雾天气,一直持续到27日夜间有冷空气南下海雾才消散,能见度有所好转(张增海等,2019)。葵花8号卫

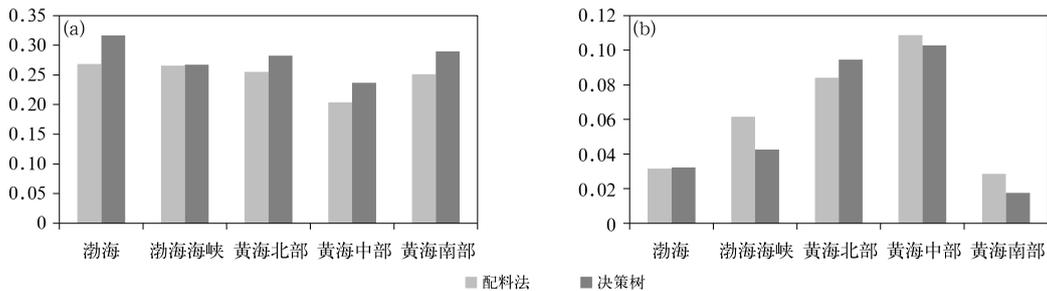


图8 海雾客观方法对中国近海海区24 h有无雾(a)和大雾(b)预报的TS评分结果

Fig. 8 24 h fog (a) and dense fog (b) TS scores of sea fog objective prediction methods over China offshore seas

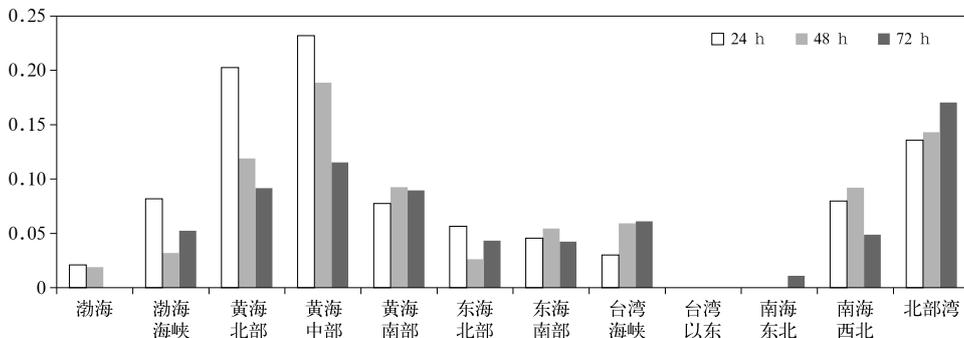


图9 各海区大雾以上级别的24、48、72 h TS评分结果

Fig. 9 The 24 h, 48 h and 72 h TS score results of dense fog on China offshore seas

星的可见光监测显示雾区从黄海北部向东南方向伸展,东侧边界与朝鲜半岛海岸线基本重合,雾区西侧边界非常清晰(图 10)。从图 11 可以看到基于配料法的海雾预报方法对这次海雾过程有较好的预报,25 日早晨时海雾区域较小,主要在黄海东北部沿岸,随后雾区向东南方向发展,雾区扩大,预报的区

域跟云图反演区域基本一致,客观预报方法的结果为海雾的主观预报提供了有力的支撑。图 12 为基于决策树方法的海雾预报结果,该方法对这次海雾过程的预报结果区域偏小,雾区主要位于黄海的东北部和中东部沿岸。

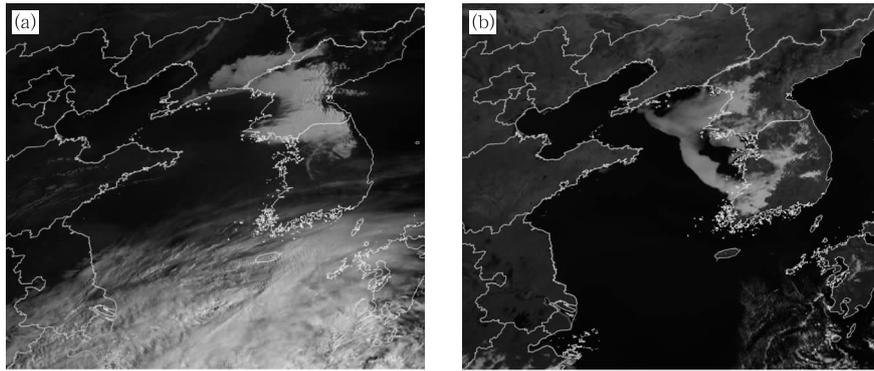


图 10 2019 年 3 月 25 日 08 时(a)和 26 日 08 时(b)葵花 8 号卫星可见光通道图像
Fig. 10 Visible channel image of Himawari-8 at 08:00 BT 25 (a) and 08:00 BT 26 (b) March 2019

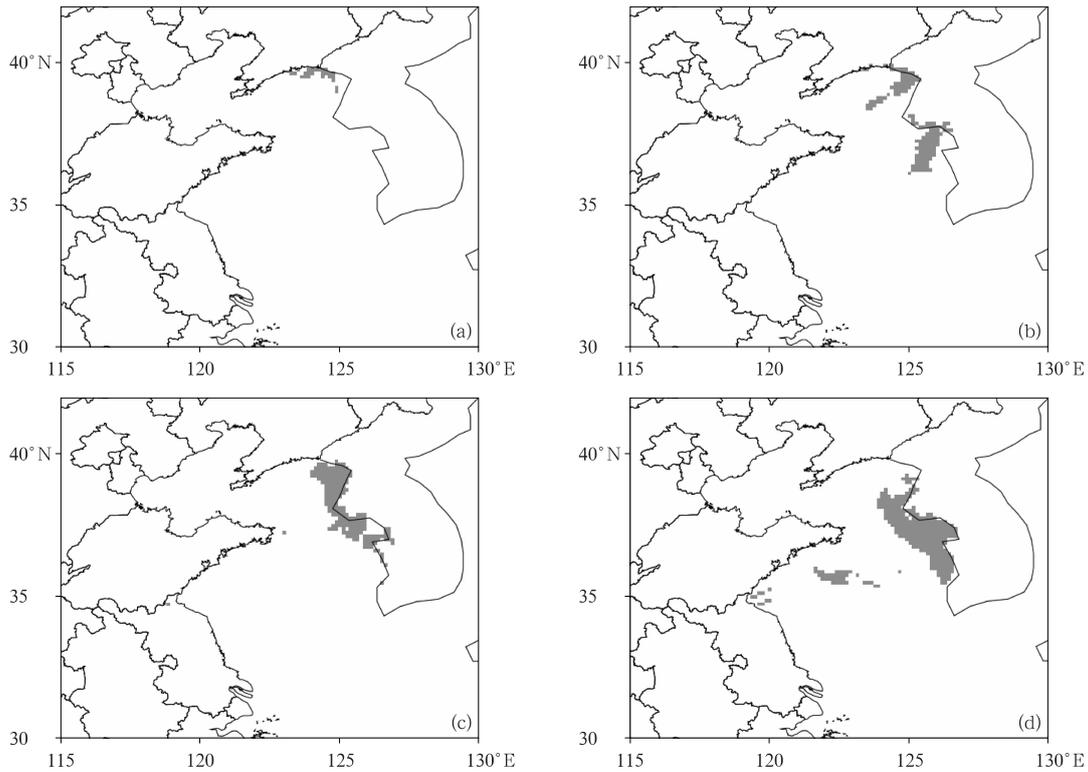


图 11 配料法 2019 年 3 月 24 日 20 时起报的(a)25 日 08 时,(b)25 日 20 时,
(c)26 日 02 时,(d)26 日 08 时海雾预报结果
Fig. 11 Forecast results of sea fog ingredients method run at 20:00 BT 24 March 2019
(a) 08:00 BT 25, (b) 20:00 BT 25, (c) 02:00 BT 26, (d) 08:00 BT 26 March 2019

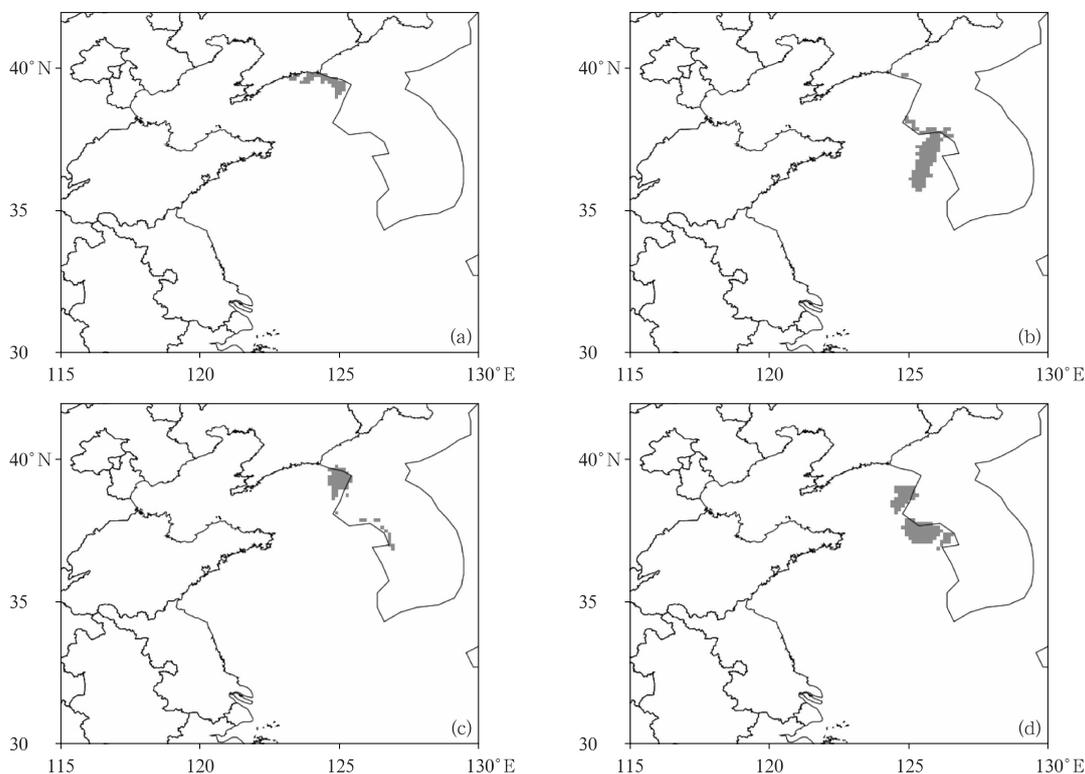


图 12 同图 11, 但为决策树方法

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for decision tree method

4 结论与展望

国家气象中心从 2013 年开始进行海雾的客观方法研究,经过几年的不断改进,逐步建立了基于配料法和决策树方法的海雾客观预报方法,初步研发了海雾预报指数产品,并将海雾客观预报产品集成应用于海洋气象智能网格预报背景场的生成规则中,生成天气现象网格预报结果,为主观预报订正提供了有力的支撑。基于精细化网格预报生成的海雾主观预报结果对 2018 年黄海中部和南部大雾预报的 24 h TS 评分接近 0.25,对北部湾大雾预报的 24 h TS 评分在 0.15 左右。客观方法虽然对我国北部海区主要海雾过程预报效果较好,但是对部分海区(渤海、黄海南部)大雾的预报效果较差,TS 评分较低,还需要继续改进。为了更好地满足业务需求,海雾客观预报方法的研发未来还将从以下几方面进行改进:

(1) 加强多元资料的应用。目前历史数据统计分析较多地依赖于沿岸代表站的观测资料,随着基于卫星云图的海雾反演技术的提高,未来要加强船

舶观测和卫星反演产品等多种观测资料在建模中的应用。

(2) 应用新型技术改进海雾客观方法。例如卷积神经网络方法,其作为深层神经网络中一种经典而广泛应用的架构,是目前机器深度学习的主要形式之一,已在目标检测、计算机视觉、语音识别等领域中成效卓然(周飞燕等,2017),可以尝试将该方法引入到海雾客观预报中。

(3) 增加数值模式集合预报产品的应用。海雾客观方法需要基于多个要素生成预报产品,每个要素的预报误差都会影响到最后的海雾预报结果,基于集合预报产品研发海雾客观方法可以有效地改进这一点,利用集合预报的结果,构建与海雾或能见度相关度较高的预报因子,依据当下集合预报与历史实况资料集里因子的相似度,利用历史观测来估计当下预报的结果。

参考文献

- 傅刚,李鹏远,张苏平,等. 2016. 中国海雾研究简要回顾[J]. 气象科技进展,6(2): 20-28. Fu G, Li P Y, Zhang S P, et al, 2016. A brief overview of the sea fog study in China[J]. Adv Meteor Sci

- Technol, 6(2):20-28(in Chinese).
- 高荣珍,李欣,任兆鹏,等. 2016. 青岛沿海海雾决策树预报模型研究[J]. 海洋预报, 33(4):80-87. Gao R Z, Li X, Ren Z P, et al, 2016. Study of the sea fog prediction by classification and regression tree (CART) analyses in Qingdao coastal area[J]. Mar Forecasts, 33(4):80-87(in Chinese).
- 高山红,王永明,傅刚. 2014. 一次黄海海雾的集合预报试验[J]. 中国海洋大学学报, 44(12):1-11. Gao S H, Wang Y M, Fu G, 2014. Ensemble forecast of a sea fog over the Yellow Sea[J]. Period Ocean Univ China, 44(12):1-11(in Chinese).
- 高小雨,高山红. 2019. 黄海海雾短时临近预报中云水路径的 EnKF 同化研究[J]. 海洋与湖沼, 50(2):248-260. Gao X Y, Gao S H, 2019. EnKF assimilation of cloud water path in nowcasting sea fog over the Yellow Sea[J]. Oceanol Limnol Sin, 50(2):248-260 (in Chinese).
- 黄彬,郭云谦,张增海. 2014. 海雾历史检索数据库的设计和实现[J]. 气象科技, 42(1):94-98. Huang B, Guo Y Q, Zhang Z H, 2014. Design and visualization of a sea fog historical search database [J]. Meteorol Sci Technol, 42(1):94-98(in Chinese).
- 黄辉军,黄健,刘春霞,等. 2010. 用 GRAPES 模式输出变量因子作广东沿海海雾预报[J]. 热带气象学报, 26(1):31-39. Huang H J, Huang J, Liu C X, et al, 2010. Prediction of sea fog of Guangdong coastland using the variable factors output by GRAPES model[J]. J Trop Meteor, 26(1):31-39(in Chinese).
- 黄健,黄辉军,黄敏辉,等. 2011. 广东沿岸海雾决策树预报模型[J]. 应用气象学报, 22(1):107-114. Huang J, Huang H J, Huang M H, et al, 2011. Decision tree forecasting models of sea fog for the coast of Guangdong Province[J]. J Appl Meteor Sci, 22(1):107-114(in Chinese).
- 金荣花,代刊,赵瑞霞,等. 2019. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 45(4):445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al, 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteor Mon, 45(4):445-457(in Chinese).
- 任兆鹏,高荣珍,时晓蒙,等. 2019. 2018 年 6 月青岛近岸一次海雾导致能见度变化的成因分析[J]. 海洋湖沼通报, (4):81-90. Ren Z P, Gao R Z, Shi X M, et al, 2019. Analysis of visibility variation caused by a sea fog event near Qingdao coast in June 2018 [J]. Trans Oceanol Limnol, (4):81-90(in Chinese).
- 王彬华, 1983. 海雾[M]. 北京:海洋出版社. Wang B H, 1983. Sea Fog[M]. Beijing: Marine Press (in Chinese).
- 王慧,杨正龙,许映龙,等. 2017. 2017 年春季海洋天气评述[J]. 海洋气象学报, 37(3):73-84. Wang H, Yang Z L, Xu Y L, et al, 2017. Spring 2017 marine weather review[J]. J Mar Meteor, 37(3):73-84(in Chinese).
- 杨正龙,刘涛,曹越男,等. 2015. 中国近海海雾动力统计学预报方法初探[J]. 天气预报, 7(4):74-77. Yang Z L, Liu T, Cao Y N, et al, 2015. Research on dynamic statistical sea fog forecasting method of China offshore seas[J]. Wea Forecast Rev, 7(4):74-77(in Chinese).
- 张恒德,张碧辉,吕梦瑶,等. 2017. 北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J]. 气象, 43(8):998-1004. Zhang H D, Zhang B H, Lü M Y, et al, 2017. Development and application of stable weather index of Beijing in environmental meteorology[J]. Meteor Mon, 43(8):998-1004(in Chinese).
- 张增海,刘涛,许映龙,等. 2019. 2019 年春季海洋天气评述[J]. 海洋气象学报, 39(3):1-10. Zhang Z H, Liu T, Xu Y L, et al, 2019. Spring 2019 marine weather review[J]. J Mar Meteor, 39(3):1-10(in Chinese).
- 周飞燕,金林鹏,董军. 2017. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机学报, 40(6):1230-1251. Zhou F Y, Jin L P, Dong J, 2017. Review of convolutional neural network[J]. Chin J Comput, 40(6):1230-1251(in Chinese).
- Breiman L, Friedman J H, Olshen R A, et al. 1984. Classification and regression trees[M]. Belmont: Wadsworth International Group: 358.
- Dee D P, Uppala D P, Simmons S M A J, et al. 2011. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 137(656):553-597.
- Huang H J, Huang B, Yi L, et al. 2019. Evaluation of the global and regional assimilation and prediction system for predicting sea fog over the South China Sea[J]. Adv Atmos Sci, 36(6):623-642.