

珠江口海雾天气气候特征及成因分析

周群¹, 黄焕卿¹, 邓小花¹, 张润宇¹, 陈越²

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 深中通道管理中心, 广东 中山 528400)

摘 要: 利用设立于珠江口海域具有较高时间分辨率的自动气象站的观测资料, 结合欧洲中期天气预报中心再分析逐日数据集 ERA-Interim, 对珠江口海雾的天气气候特征、环流场及相关的气象和水文因子进行分析研究。结果表明: 海雾日数月际变化显著, 海雾盛季为 2—4 月; 日变化特征表现为海雾多生成于夜间—凌晨时段, 多消散于早晨—上午时段。珠江口海雾发生的大尺度环流形势可分为冷锋型、均压场型、低压前部型和高压后部型 4 类, 其中冷锋型海雾属于混合雾, 其他均属于平流冷却雾。进一步的分析表明, 层结稳定且适宜的相对湿度、风速、风向及海—气温差等气象和水文条件, 有利于珠江口海雾过程的发生和发展, 这对做好海雾过程的预报具有一定的指导意义。

关键词: 珠江口; 海雾; 环流形势; 气象水文条件

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)01-0001-10

1 引言

海雾是在海洋与大气相互作用特定条件下出现在低层大气贴近下垫面的一种凝结现象, 是海上和沿海一带的灾害性天气之一^[1-2]。出现海雾时, 沿海地区的能见度显著降低, 较差的水平能见度会导致航行船只偏航、碰撞及触礁等事故, 较差的垂直能见度一方面严重影响飞行安全, 另一方面阻隔太阳辐射, 使海水水质恶化, 造成海水养殖的虾贝等大量死亡^[3-4]。以上均表明海雾会给我国海上交通运输、工农渔业生产及人类生活健康等带来极大危害, 因此海雾一直都是海洋气候学的研究重点之一。

我国近海海雾多集中在黄海和东海, 以平流雾为主, 这与黑潮暖流的作用密不可分^[4-6]。基于历史资料的气候统计结果, 许多研究得出我国各海域海雾的气候及年际变化特征, 并对相应的大气环流背景场予以分析^[7-10]。由于沿岸测站、海上浮标和船舶观测在覆盖范围和时段上均有限制, 卫星遥感数据则完善了我国海雾分布特征的系统研究^[11]。然而, 在有云系遮挡时, 目前的卫星遥感技术依然难以实

现对浅薄海雾的有效观测, 这也是利用卫星遥感资料的重要缺陷之一。新近的研究从建立数值模式入手, 探究海雾的生成机制^[12], 为海雾预报提供了一定的参考依据。

早在 20 世纪 80 年代, 王彬华^[7]分析发现, 南海雾日较少, 且相较于海区总面积来说雾区面积较小。事实上, 南海中南部海域由于水温常年偏高, 空气露点温度低于其下的海面温度, 空气难以达到饱和状态, 不能凝结成雾, 故而不利于海雾过程的发生。针对南海北部海雾的研究, 前人从个例分析和历史资料统计等角度出发, 揭示了南海北部海域的海雾多集中在近岸海域, 且主要出现冬、春季节, 并对海雾日数年际变化相关的水汽输送异常及成雾的典型天气形势做了较为深入的分析^[13-16]。然而, 这些研究大多利用沿岸海洋台站的能见度人工观测记录, 不但容易受观测方法和人为主观因素如经验或视觉阈值等的影响^[17], 而且每日 4 次的常规气象观测无法实现对海雾生消时刻等的细致刻画, 因此, 用客观仪器获取的能见度加密观测数据来研究海雾的天气气候特征更具有说服力。

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-03-24。

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2019B111105012)。

作者简介: 周群(1986-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事气候动力学及季风动力学方面的研究。E-mail: zhouqun1224@163.com

珠江口海域北靠欧亚大陆,南邻我国南海,受东亚大陆和热带海洋的交替影响,海雾过程频发,浓雾事件对海上船只航行和施工作业等都构成直接威胁。因此,提高对该海域海雾基本规律的认识,能更好地保障海事工程和交通运输的顺利开展,具有重要的学术意义和实践价值。已有的研究揭示了珠江口海雾具有年际和年代际等多时间尺度的复杂变化^[18],由于海洋探测手段及资料的限制,这些研究主要依赖于气象要素的常规人工观测。为此,本文利用近几年来具有较高时间分辨率的自动气象站的观测资料,研究珠江口海雾的天气气候特征并进行天气学分型,探讨成雾所需要的气象和水文因子配置,这将对提高珠江口海雾的预报水平、减少因海雾灾害造成的经济损失和人员伤亡带来帮助。

2 资料与方法

为满足港珠澳大桥岛隧工程施工作业区海洋环境预报保障的需求,提供数值模式研制和预报结果检验所需的高密度实时数据,2011—2012年国家海洋环境预报中心先后在珠江口海域建成了人工岛自动气象站和其南偏东15 km的牛头岛自动气象站。本文使用的观测资料来自珠江口内伶仃岛以南、赤蠟角以西的人工岛自动气象站(22.2°N, 113.8°E)资料包含风向、风速、气温、海温、相对湿度、能见度、降水和气压记录,时间分辨率为10 min一次。定义能见度小于1 km且持续时间在3 h以上为一个雾日^[10]。资料范围为2012年2月—2016年4月。

选取的再分析数据资料主要是欧洲中期数值预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)提供的自1979年1月至今的逐日再分析资料ERA-Interim,空间分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$,垂直方向从1 000~1 hPa共计37层,时间分辨率为每6 h一次。所用的变量包括位势高度、海平面气压、10 m高度经向风和纬向风、垂直速度、温度和相对湿度等资料,用于描述和计算与海雾生成相联系的大气环流异常情况。

按照惯例,将12月、次年1月和2月划为冬季,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季。本文首先分析了珠江口海雾的月际变化和日变化特

征,通过对典型的海雾过程的合成分析,将珠江口海雾进行天气学分类,在此基础上,分析各类型海雾的气象和水文要素特征。

3 珠江口海雾的天气气候特征

我们计算了月平均海雾日数占当月日数的百分比,得到珠江口海雾出现频率的月际变化。从统计结果来看,珠江口海雾从每年11月开始逐渐增多,冬、春季节是海雾频发的季节,其中以2—4月最多,4月海雾日数占当月日数的近20%(约6 d)。5月开始,海雾日数急剧减少,仅占约6%(约2 d),6—9月海雾过程较少,月平均海雾日数在1 d左右(见图1)。由此可见,珠江口海雾日数月际变化显著,这也与南海北部海雾特征的研究结果较为一致^[8, 14]。以能见度下降(恢复)到1 km以下(以上)的时刻定义为海雾生成(消散)时刻,将该时刻四舍五入计入整点,统计海雾生成(消散)时刻的逐时分布。根据逐小时海雾生成(消散)次数占海雾生成(消散)总次数的百分比,分析珠江口海雾生消的日变化情况。图2是珠江口海雾生成和消散时间的频率分

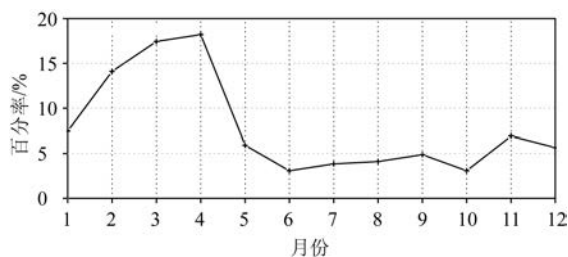


图1 珠江口海雾日数百分率的月际变化曲线

Fig.1 Monthly percentage of days of sea fog in the Pearl River Estuary

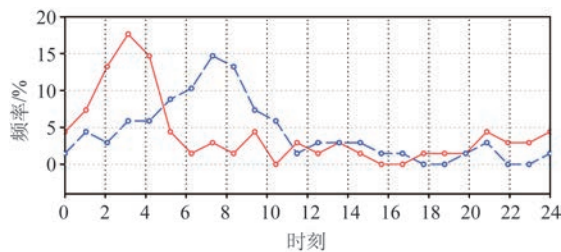


图2 珠江口海雾生成(红线)和消散(蓝线)时间的频率分布

Fig.2 Percentage of the formation (red line) and vanishing (blue line) time of sea fog over the Pearl River Estuary

布,从中可以清楚地看到,海雾多生成于夜间一凌晨时段,00—04时(北京时,下同)的生成频率最大,15—17时的生成频率最小;海雾多消散于清晨—上午时段,05—10时的消散频率最大,18—20时的消散频率最小。也就是说,珠江口海雾日变化显著,多见于午夜—上午时段,而下午—傍晚时段相对较少。

珠江口地处低纬,面临海洋。2—4月,低层来自海洋的西南水汽输送逐渐加强,与北方冷空气前锋易形成对峙形势,使得水汽凝结并发生以平流雾为主的海雾天气。这是珠江口区域其他月份所不具有的大气环流形势,与本文所用实测数据分析的月际变化结果一致(见图1),也验证了前人研究成果^[8,14]。辐射雾和平流雾是雾的两种主要形式,本文用实测数据分析日变化得到(见图2),00—04时雾生成频率最大,05—10时,即太阳出来后,随着地面温度上升,部分水汽蒸发,辐射雾逐渐消散,大气能见度好转($>1\text{ km}$)^[3,16]。

4 海雾天气过程的环流特征

海雾过程的发生与一定的大尺度环流形势密切相关^[4,9-10,13]。利用天气图资料结合观测数据,依据珠江口海雾生成时的海平面气压场的特征划分出珠江口海雾类型,从中选取冷锋型(2012年11月25—26日、2013年2月19日、2016年1月3—4日)、均压场型(2013年4月15日、2013年5月12日、2014年4月9日)、低压前部型(2013年4月17—19日、2014年3月18—20日)和高压后部型(2012年4月4日、2012年12月16—17日)的典型个例,分别对各类型海雾生成时对应的海平面气压场和生成前48 h对应的500 hPa位势高度场进行合成分析。一方面考察各类型海雾生成时刻的环流形势特征,另一方面得到未来48 h珠江口海域雾形成的高空形势,以期用于业务预报。

4.1 冷锋型

该类型海雾多见于冷空气活动较为活跃的秋、冬季节(11月—次年2月),雾日占珠江口年平均雾日总数的30%。海雾生成前48 h,500 hPa高度上,西北太平洋副热带高压呈东西带状,但强度较弱,中高纬度在西伯利亚地区为显著的高压脊覆盖,贝加尔湖附近冷涡不断分裂出西风槽并向东移动,贝

加尔湖以西存在明显的东西向横槽,在随后东移过程中逐渐转竖并加强(见图3a)。与之相对应,大陆上的冷高压范围不断向南扩展,较强冷空气自北向南影响我国,海雾生成时,冷空气前锋抵达珠江口海域,地表干冷空气与珠江口暖湿气流交会混合,形成海雾过程(见图3b—d)。

4.2 均压场型

该类型海雾多出现在春、秋过渡季节有势力较弱的冷空气影响时,雾日约占珠江口年平均雾日总数的8%。海雾生成前48 h,整个欧亚大陆地区以纬向环流为主,中高纬度西风带以短波槽活动为主,槽底较浅且强度较弱,西太副高偏强,控制南海大部海域,珠江口位于低层南海海域反气旋的北侧,主要受东—东北气流控制(见图4a和4c)。海雾出现时,珠江口海域气压梯度很小,风力明显减弱,台湾以东洋面有弱的低压倒槽,与其西侧弱的冷高压系统对峙,造成珠江口出现海雾和毛毛雨交错的天气,能见度较差(见图4b和4d)。

4.3 低压前部型

该类型海雾主要发生在春季有明显的南支槽活动的时候,雾日占珠江口年平均雾日总数的40%,这主要是由于该类型海雾持续时间较长所致。一般来说,南支槽秋季在孟加拉湾北部建立,冬季加强,春季活跃。研究表明,春季南支槽的发展变化对华南地区的天气和气候异常有显著作用^[19]。海雾生成前48 h,500 hPa高空场上,孟加拉湾附近地区存在南支槽活动(见图5a),随着其东移,在地面诱导产生中心位于我国西南地区的低压,低压前部西南气流将较低纬度的暖湿气流向我国近海输送,为珠江口成雾提供了有利的水汽条件(见图5b—d)。

4.4 高压后部型

该类型海雾多见于地面冷高压东移出海的冬、春季节,雾日约占珠江口年平均雾日总数的22%。相较于冷锋型,高压后部型海雾生成前48 h,中高纬地区高空冷涡位置偏东,中心位于鄂霍次克海附近,槽后西北风和上游高压脊前东北风形成的横槽位置也偏东,主要位于贝加尔湖以东地区(见图6a)。在地面图上,海雾生成时,冷高压中心位于长江口附近,此后逐渐东移入海,珠江口位于高压后

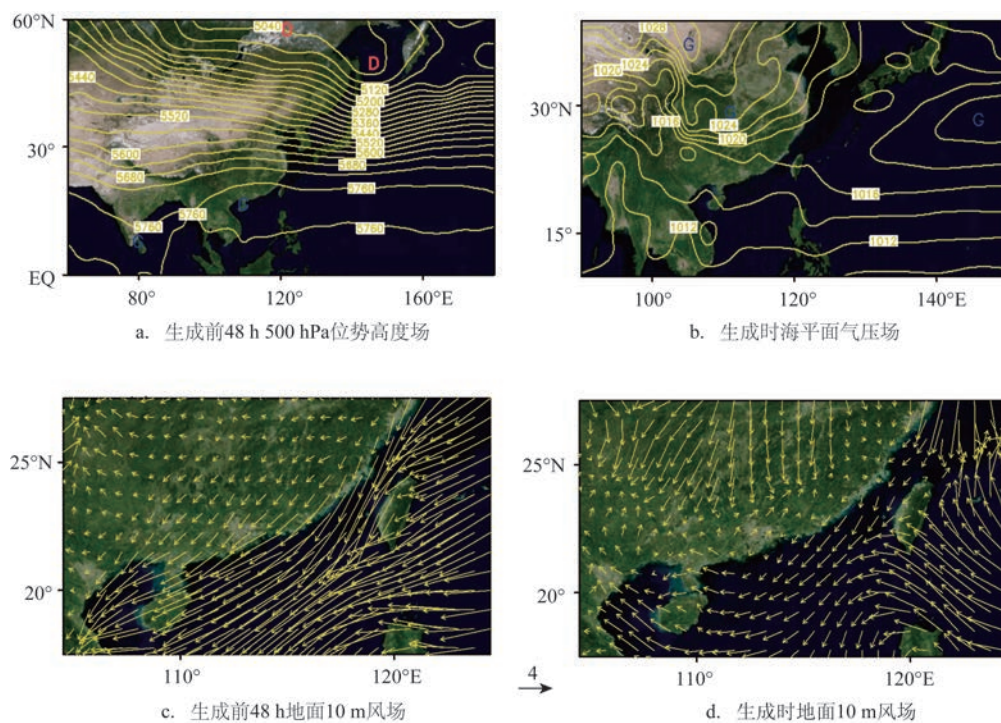


图3 冷锋型海雾生成前后大气环流形势分布(D和G分别表示低压和高压中心,下同)

Fig.3 Atmospheric circulation field before and after the formation of the cold-front type sea fog (D and G denote the center of low and high pressure, respectively, similarly hereinafter)

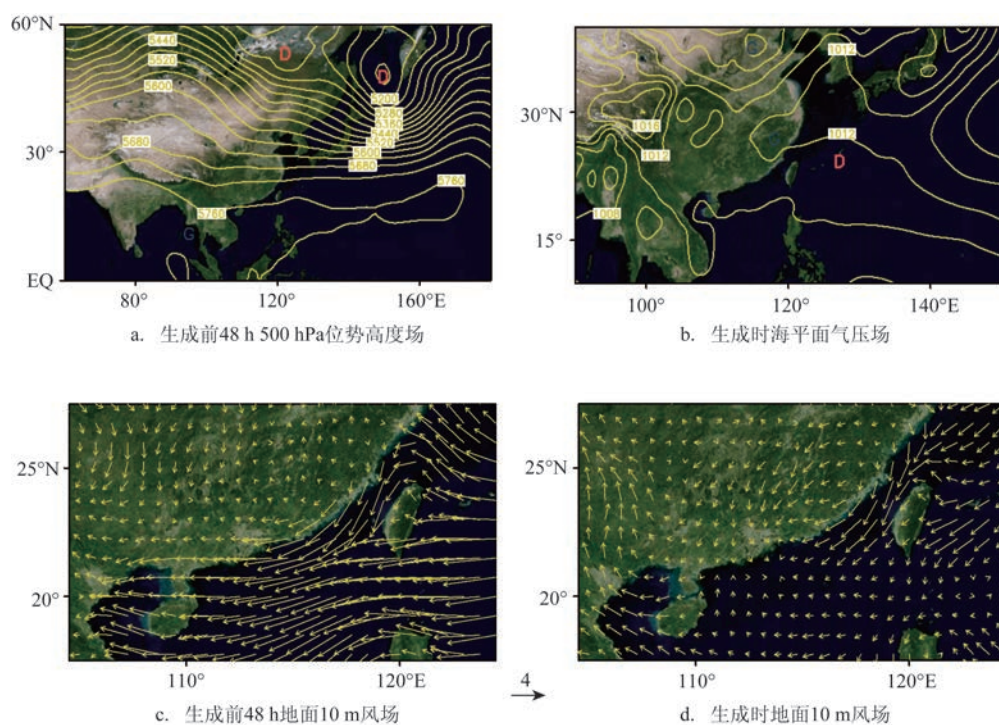


图4 均压场型海雾生成前后大气环流形势分布

Fig.4 Atmospheric circulation field before and after the formation of the uniform-pressure-field type sea fog

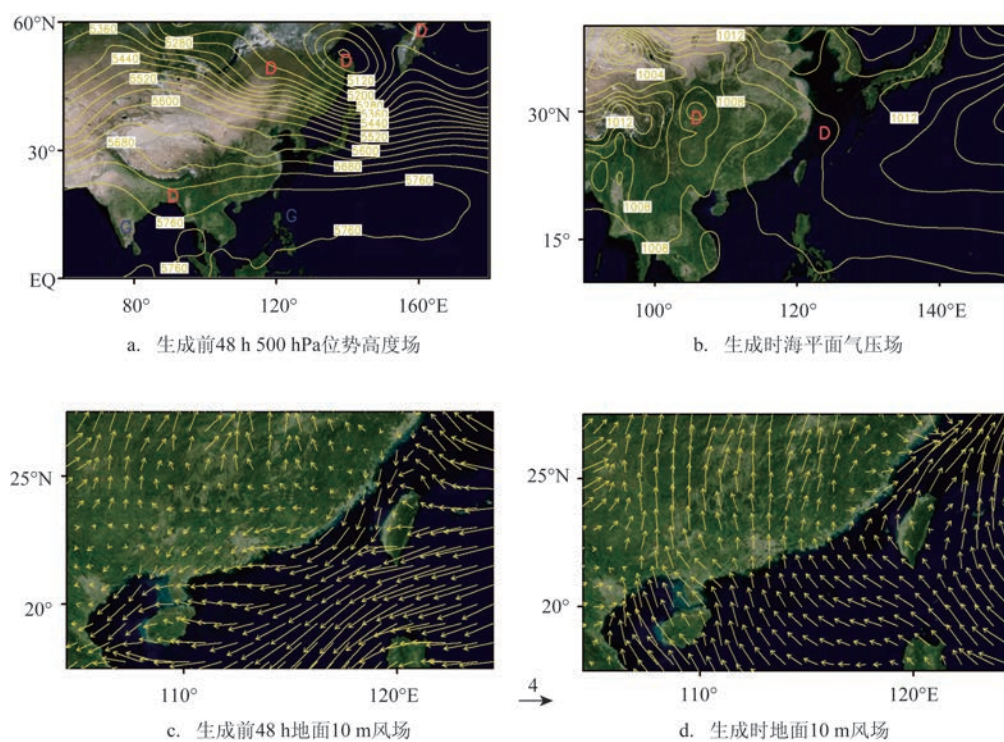


图5 低压前部型海雾生成前后大气环流形势分布

Fig.5 Atmospheric circulation field before and after the formation of the front-of-low-pressure type sea fog.

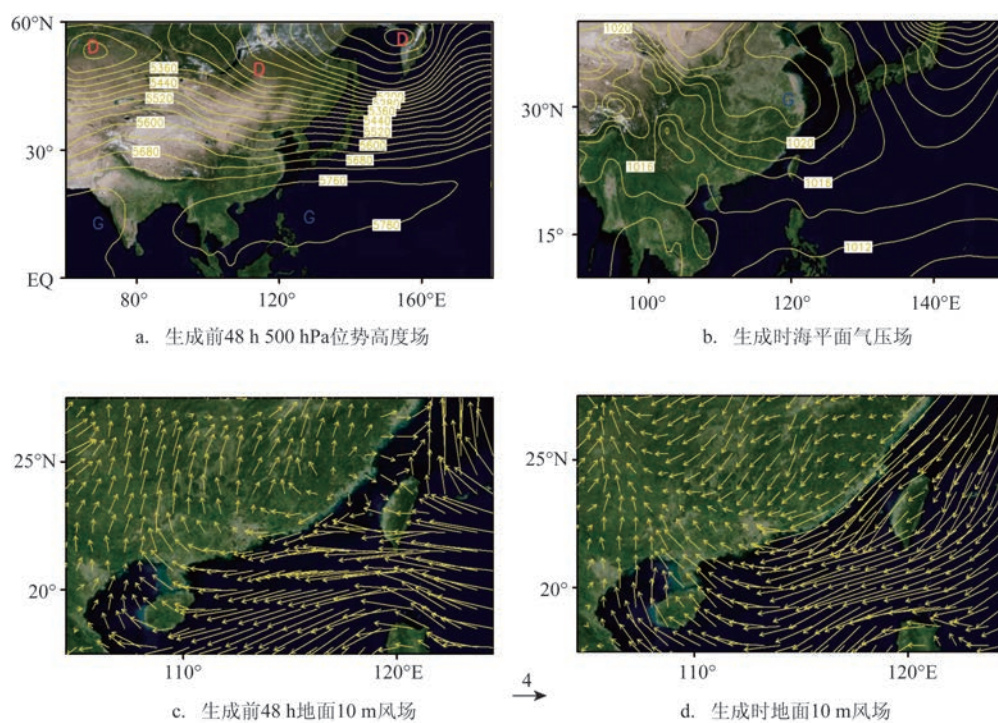


图6 高压后部型海雾生成前后大气环流形势分布

Fig.6 Atmospheric circulation field before and after the formation of the rear-of-high-pressure type sea fog

部,外海的暖湿空气吹向珠江口的冷海面,易于形成海雾过程(见图6b—d)。

5 讨论

以上,我们对珠江口海雾形成的天气形势特征进行了分析。事实上,海雾的生成不仅仅取决于天气形势,还与当时的稳定度条件和下垫面条件有密切的联系^[4, 16, 20],因此,有必要对各类型海雾发生发展过程中观测资料中的大气稳定层结状态、相对湿度、海-气温差及风场等气象和水文要素的平均情况进行详细分析。海雾是大气处于稳定层结状态下的凝结现象,在成雾过程中,低层大气通常存在逆(等)温层,这一特征在珠江口冷锋型海雾和低压前部型海雾过程中较为明显。从图7a和7c中可见,

边界层上部均存在一个有利于海雾长时间维持的逆(等)温稳定层结,垂直上升运动微弱,其中冷锋型海雾主要是由于陆上的冷空气从底部入侵海上暖气团,下层冷平流导致逆(等)温;而低压前部型海雾则是由于偏南暖湿气流平流到珠江口冷海面,偏南气流长时间作用,近海面湍流冷却和感热降温形成逆(等)温。在均压场型海雾过程中,低层上升运动略有加强,但温度露点差很小,珠江口海域低层良好的湿度条件有利于海雾的形成和维持(见图7b)。在高压后部型海雾过程中,大气低层温度露点差很小,空气近乎饱和,垂直上升运动明显;大气中层露点温度的垂直递减率很大,空气干燥,存在弱的下沉运动,故该类型海雾即使形成却难以维持,在4类海雾过程中持续时间最短(见图7d)。

近地面相对湿度的观测结果表明,珠江口海雾

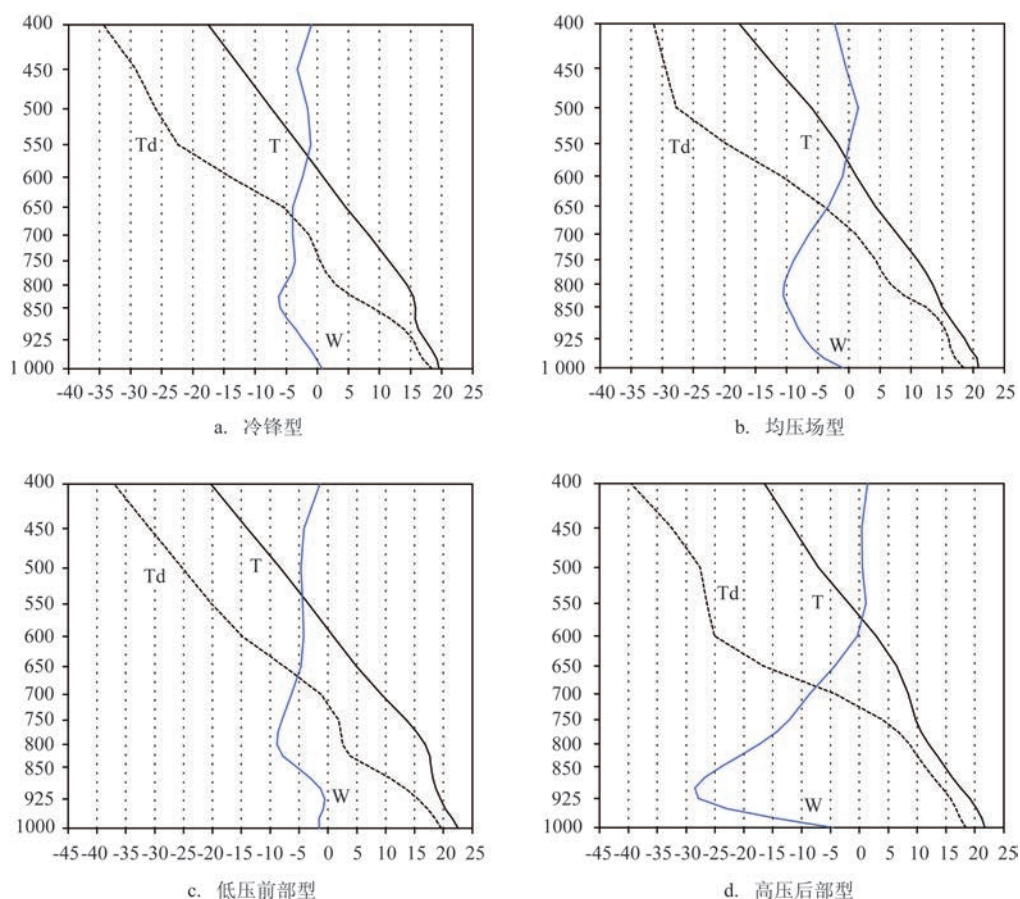


图7 各类型海雾过程中平均温度(黑色实线:℃)、露点温度(黑色虚线:℃)和垂直速度(蓝色实线:10⁻²m/s)随高度变化曲线

Fig.7 Vertical section of average temperature (black solid lines: ℃), dew point temperature (black dotted lines: ℃) and vertical velocity (blue solid lines: 10⁻² m/s) during different types of sea fog

过程发生时,近地面空气的相对湿度一般在85%以上,这主要是由于海雾发生时,近地面水汽大多处于饱和或接近饱和的状态(见表1)。众所周知,大气低层贴近下垫面的湍流热交换等与风速有直接关系,风速增强时,海面的动量交换增强,海雾易于消散或升高为低云。从表1中风向和风速的分析可以看到,珠江口海雾多发生在风速低于5 m/s的环境下,值得一提的是,均压场型海雾过程中,测得的东北向风速最小,一般不超过3 m/s,这与此时珠江口的气压梯度较小相一致(见图4b)。这里的结果与黄彬等^[4]提出的风速太小(<2 m/s)不利于黄海水雾生成发展的研究结论存在分歧,这是因为珠江口海域毗邻陆地,与广阔的外海相比,风速总体偏小。通过绘制风向玫瑰图(图略),我们发现各类型海雾对应风向存在明显差别,这主要是由不同的大气环流背景场所决定的。当珠江口位于地面低压前部时,南支槽前的引导气流造成风向以偏南为主;当其位于高压后部时,地面冷高压东移出海引起的回流使得此时风向以偏东为主。低压前部型和高压后部型海雾对应的海-气温差一般为负(见表1),这表明暖湿空气平流输送到表层水温较低的冷水海面,该过程中暖湿空气冷却达到饱和形成了平流冷却雾。与此不同的是,冷锋型海雾发生时,珠江口位于大陆高压前缘,西北向气流较弱,地面的干冷空气和海上的暖湿空气相遇,经混合达到饱和成雾,也称混合雾,这也与此时海-气温差明显成正值(0.54 ℃)相一致(见表1)。前人的结果证实,中国邻近海域的海雾以平流冷却雾为主^[8],这里的分析表明,由于珠江口海域毗邻陆地,在冷空气势力较强的秋、冬季节,也易于发生混合雾过程。

为了更好地揭示海雾发生和消亡前后的气象

表1 各类型海雾过程中平均相对湿度、风速风向及海-气温差统计

Tab.1 The average relative humidity, wind velocity, wind direction and sea-air temperature differences during different types of sea fog

海雾类型	相对湿度/%	风速/(m/s)	风向	海-气温差/℃
冷锋型	90.8	2.2	西北	0.54
均压场型	86.9	1.3	东北	-0.09
低压前部型	88.5	3.1	偏南	-0.21
高压后部型	95.3	1.8	偏东	-0.13

和水文要素特征变化,以期对珠江口海雾生消预报有一定的指示意义,图8给出了全部典型海雾个例中各要素随时间演变的合成分析,考察时段是海雾发生(红色实线所示)和消散(蓝色虚线所示)前后各2 h。从图8中可以清楚地看到,海雾发生前后海-气温差稳定波动,风速略有减小,相对湿度明显升高。众所周知,稳定的低风速、较小的海-气温差和较高的水汽含量均有利于海雾形成;与之相反,海雾消散前后海-气温差迅速上升到3 ℃以上、风速陡然增大到5 m/s以上且相对湿度在海雾消散之后迅速下降,成雾所需的水文和气象条件遭到破坏,导致珠江口海雾迅速消散。类似表1,我们对各类型海雾消散时各要素的特征分别予以分析(表略),

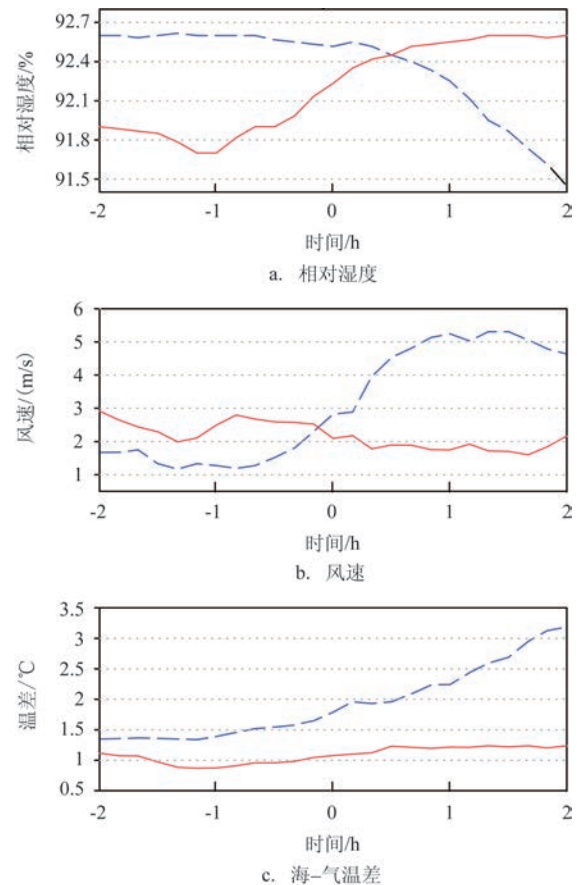


图8 珠江口海雾生成(红色实线)和消散(蓝色虚线)前后各2 h内各要素随时间的演变情况

Fig.8 The evolution of different factors of sea fog over the Pearl River Estuary from 2 hours before to 2 hours after the formation time (red solid lines) and vanishing time (blue dotted lines), respectively

统计发现珠江口海雾的消散大多伴随风速骤增(约占45%),而相对湿度显著降低常见于均压场型海雾的消散,风向的改变(西北风转东北风)则常见于冷锋型海雾的消散。由此可见,珠江口海雾的发生和消散与水文和气象条件密切相关。

6 结论

本文通过对时间分辨率较高的自动气象站观测资料和再分析资料的统计分析,研究了珠江口海雾的天气气候和大气环流特征,并对相关的气象和水文要素做了深入分析。主要结论如下:

(1)珠江口海雾集中发生在冬、春季节,以2—4月最多。5月开始海雾日数急剧减少,6—10月海雾过程较少。日变化特征表现为:海雾多生成于午夜—凌晨时段(00—04时),消散于清晨—上午时段(05—10时)。

(2)通过对典型海雾过程发生前48 h高空环流场分别进行合成分析,得到与珠江口海雾发生密切相关的大尺度环流形势主要有4种:冷锋型、均压场型、低压前部型和高压后部型。

(3)海雾过程发生时,珠江口海域近地面相对湿度大多在85%以上,风速一般不大于5 m/s。均压场型海雾发生时,风速最小(<3 m/s)。进一步分析表明,低压前部型(高压后部型)海雾为较低纬度(外海)而来的南—东南向(偏东向)的暖湿气流途经冷海面形成的平流冷却雾,相应的海—气温差小于0℃;相反,冷锋型海雾为冬季风盛行期间,干冷空气途经暖海面而形成的混合雾,此时海—气温差往往大于0℃,风向以西北向为主。进一步地诊断分析显示,珠江口冷锋型海雾和低压前部型海雾过程中,低层大气存在逆(等)温层,有利于海雾的长时间维持;而高压后部型海雾发生时,大气垂直上升运动明显,不利于海雾过程的维持。

(4)对关键的水文和气象因子随时间的演变进行分析,我们发现海雾生成(消散)前后海—气温差稳定波动(迅速上升),风速略有减小(陡然增大)且相对湿度明显升高(迅速下降)。珠江口海雾迅速消散或成雾与所需的水文和气象条件的变化密切相关。

需要说明的是,本研究只是根据2012—2016年

珠江口海域的观测资料,从统计角度出发分析该海域海雾的天气气候特征,并从大尺度环流形势和相对湿度、海—气温差和风速风向等要素进行的海雾分型说明。未来的研究还需要利用更长期的观测数据加以验证,更为重要的是,利用三维数值模式对海雾的发生发展过程进行模拟将是未来海雾研究工作与预报业务的必然发展趋势。

参考文献:

- [1] 周发琇. 第一讲海雾及其分类[J]. 海洋预报, 1988, 5(1): 78-84.
Zhou F X. Lecture one on the sea fog and its classification[J]. Marine Forecasts, 1988, 5(1): 78-84.
- [2] 赵永平, 陈永利, 王丕浩. 黄、东海海雾过程及其大气和海洋环境背景场的分析[J]. 海洋科学集刊, 1997(38): 69-78.
Zhao Y P, Chen Y L, Wang P G. Analysis of atmospheric and oceanic conditions for marine fog formation over the Yellow Sea and East China Seas[J]. Studia Marina Sinica, 1997, (38): 69-78, 252.
- [3] 安洁, 齐琳琳. 南海沿岸近海地区大气特征分析[J]. 海洋预报, 2014, 31(4): 54-62.
An J, Qi L L. Analysis of atmosphere character in the coastal area of the South China Sea[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(4): 54-62.
- [4] 黄彬, 毛冬艳, 康志明, 等. 黄前海雾天气气候特征及其成因分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(6): 920-929.
Huang B, Mao D Y, Kang Z M, et al. Synoptic and climatic characteristics of Yellow Sea fog and causation analysis[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(6): 920-929.
- [5] 周发琇, 王鑫, 鲍献文. 黄海春季海雾形成的气候特征[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 28-37.
Zhou F X, Wang X, Bao X W. Climatic characteristics of sea fog formation of the Huanghai Sea in spring[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(3): 28-37.
- [6] 王鑫, 黄菲, 周发琇. 黄海沿海夏季海雾形成的气候特征[J]. 海洋学报, 2006, 28(1): 26-34.
Wang X, Huang F, Zhou F X. Climatic characteristics of sea fog formation of the Huanghai Sea in summer[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(1): 26-34.
- [7] 王彬华. 中国近海海雾的几个特征[J]. 海洋湖沼通报, 1980(3): 9-20.
Wang B H. Some characteristics of sea fog along China coast and its vicinity[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1980 (3): 9-20.
- [8] 白彬人. 中国近海沿岸海雾规律特征、机理及年际变化的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
Bai B R. The character, mechanisms and interannual variation of China inshore sea fog[D]. Nanjing: Nanjing University of

- Information Science & Technology, 2006.
- [9] 林卫华, 蒋荣复, 王正廷. 湄洲湾海雾的发生规律和成因分析[J]. 海洋学研究, 2008, 26(3): 71-76.
- Lin W H, Jiang R F, Wang Z T. Analysis of the occurrence and origin of heavy fog in Meizhouwan Bay[J]. Journal of Marine Sciences, 2008, 26(3): 71-76.
- [10] 卢峰本, 黄滢, 覃庆第. 北部湾海雾气候特征分析及预报[J]. 海洋预报, 2006, 23(S1): 68-72.
- Lu F B, Huang Y, Qin Q D. Analysis of the climatic characteristics of sea fog in Beibuwan[J]. Marine Forecasts, 2006, 23(S1): 68-72.
- [11] 吴晓京, 李三妹, 廖蜜, 等. 基于20年卫星遥感资料的黄海、渤海海雾分布季节特征分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 63-72.
- Wu X J, Li S M, Liao M, et al. Analyses of seasonal feature of sea fog over the Yellow Sea and Bohai Sea based on the recent 20 years of satellite remote sensing data[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(1): 63-72.
- [12] 徐杰. 冬春季黄渤海海雾的观测分析与数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Xu J. An observational and numerical study on winter and spring sea fogs over the Yellow and Bohai Seas[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [13] 林晓能, 宋萍萍. 南海一次典型海雾过程的特征分析[J]. 海洋预报, 1990, 7(4): 75-78.
- Lin X N, Song P P. An analysis of the typical sea fog over the coast of Nantong[J]. Marine Forecasts, 1990, 7(4): 75-78.
- [14] 张朝锋. 粤东海区海雾的气候特征分析[J]. 广东气象, 2002(2): 20-21.
- Zhang C F. Climatic characteristic analysis of the sea fog over the coast of East Guangdong[J]. Guangdong Meteorology, 2002(2): 20-21.
- [15] 何云开, 黄健, 贺志刚, 等. 南海北部近岸春季海雾的年际变化[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(5): 6-11.
- He Y K, Huang J, He Z G, et al. Inter-annual variability of spring sea fog over northern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(5): 6-11.
- [16] 徐峰, 王晶, 张羽, 等. 粤西沿海海雾天气气候特征及微物理结构研究[J]. 气象, 2012, 38(8): 985-996.
- Xu F, Wang J, Zhang Y, et al. Analysis on the climatic and microphysical characteristics of sea fog over the coast of West Guangdong[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(8): 985-996.
- [17] 龙亚星, 李成伟. 能见度自动观测与人工观测数据对比分析[J]. 陕西气象, 2015(2): 32-35.
- Long Y X, Li C W. Comparative analysis of automatic and manual observation data of visibility[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2015(2): 32-35.
- [18] 潘蔚娟, 王婷, 郝全成. 珠江口以及粤东沿海海雾的多时间尺度变化特征[C]//中国气象学会2007年年会气候学分会论文集. 广州: 中国气象学会, 2007: 554-558.
- Pan W J, Wang T, Hao Q C. Characteristics of multi-time scale variations of the sea fog over the Pearl River Estuary and the coast of East Guangdong[C]//Proceedings of Climatology Session of the Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society in 2007. Guangzhou: Chinese Meteorological Society, 2007: 554-558.
- [19] 索渺清, 丁一汇. 冬半年副热带南支西风槽结构和演变特征研究[J]. 大气科学, 2009, 33(3): 425-442.
- Suo M Q, Ding Y H. The structures and evolutions of the wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(3): 425-442.
- [20] 张红岩, 周发琇, 张晓慧. 黄海春季海雾的年际变化研究[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(1): 36-42.
- Zhang H Y, Zhou F X, Zhang X H. Interannual change of sea fog over the Yellow Sea in Spring[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(1): 36-42.

The characteristics and causes analysis of sea fog over the Pearl River Estuary

ZHOU Qun¹, HUANG Huanqing¹, DENG Xiaohua¹, ZHANG Runyu¹, CHEN Yue²

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Shenzhen-Zhongshan Link Administration Center, Zhongshan 528400 China)

Abstract: Based on the observations of automatic weather stations with high temporal resolution in the Pearl River Estuary and the ERA-Interim daily reanalysis dataset of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), this paper analyzes the synoptic and climate characteristics of the sea fog in the Pearl River Estuary and related circulation patterns, meteorological and hydrological factors. It is found that the number of

days with sea fog shows significant monthly variation with the peak season from February to April. The characteristic of diurnal variation is that most sea fog forms at night before dawn and dissipates in the late morning. The large-scale circulation patterns causing sea fog in the Pearl River Estuary can be divided into four types: cold front, uniform pressure field, front of low pressure and rear portion of high pressure. The fog of the cold front type belongs to mixed fog, while the others belong to advection cooling fog. Further analysis indicates that appropriate meteorological and hydrological conditions including stable air stratification, suitable air relative humidity, wind speed and sea-air temperature differences favor the formation and development of the sea fog in the Pearl River Estuary. Therefore, the results found in this paper provide certain guiding significance for the prediction of sea fog over the Pearl River Estuary in the future.

Key words: Pearl River Estuary; sea fog; circulation pattern; meteorological and hydrological factors