

周福, 钱燕珍, 金靛, 等. 2015. 宁波海雾特征和预报着眼点. 气象, 41(4): 438-446.

宁波海雾特征和预报着眼点^{*}

周 福¹ 钱燕珍² 金 靛³ 孙军波⁴

1 宁波市气象局, 宁波 315012

2 宁波市气象台, 宁波 315012

3 浙江省象山县气象局, 象山 315700

4 浙江省慈溪市气象局, 慈溪 315300

提 要: 本文用 1971—2011 年石浦站资料及 NCEP 再分析资料, 统计分析宁波各种强度海雾特征和合成分析其出现的天气背景。统计表明: 海雾多发生于 4—6 月, 主要出现在 23 时至次日 11 时, 其中 23 时至次日 02 时最多, 11 时后消散。风力在 2~3 级的西南或东北风有利于海雾的发生。相对湿度在 90%~95%, 本站气压在 990~1002 hPa 时, 海雾发生概率随着湿度的增加及气压的减小而增加, 但对于能见度 ≤ 50 m 的强浓雾来说, 相对湿度和本站气压范围分别为 92%~95% 和 990~999 hPa, 且强浓雾随湿度及气压的增加而增加。宁波海雾通常出现在江淮气旋、冷空气影响前和梅雨锋中低涡东移前。合成分析表明: 锋面雾一般形成于系统过境前 2~3 d, 局地上空西南暖湿气流影响时; 或静止锋南侧, 局地上空风速较小, 且前期有充足水汽汇聚并导致湿层增厚; 平流雾形成时空位于西南涡前部, 长时间西南暖湿气流输送, 形成一定厚度和范围的湿度层, 在该天气背景下, 下垫面的气-海温差维持在 0~1.5℃ 左右, 露点-海表温差在 -0.5~0℃ 上下。浓雾(强浓雾)的形成需在稳定的大气层结下, 长时间深厚的暖湿气流里, 同时来自北方的冷海流不断注入宁波沿海。此外, 雾的强度与暖平流及海表冷平流的强度有较大关系。这些对宁波海雾及其强度的预报有较好指导作用。

关键词: 宁波, 海雾, 统计特征, 合成分析, 预报

中图分类号: P426, P457

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.04.006

Characteristics and Forecasting Focus of Sea Fog in Ningbo

ZHOU Fu¹ QIAN Yanzhen² JIN Liang³ SUN Junbo⁴

1 Ningbo Meteorological Bureau of Zhejiang, Ningbo 315012

2 Ningbo Meteorological Observatory of Zhejiang, Ningbo 315012

3 Xiangshan Meteorological Office of Zhejiang, Xiangshan 315700

4 Cixi Meteorological Office of Zhejiang, Cixi 315300

Abstract: Based on conventional meteorological data of Shipu Station from 1971 to 2011 and NCEP reanalysis data, characteristics of atmospheric environmental elements and weather backgrounds during the sea fog generation in Ningbo was analyzed. The results show that in most cases, the sea fog occurs in the period from April to June, mainly between 23:00 BT and the next 11:00 BT (especially from 23:00 BT to the next 02:00 BT), usually dissipating after 11:00 BT every day. The southwest and northeast winds in 2—3 grades are greatly conducive to the occurrence of sea fog. When relative humidity is 90%—95% and station pressure is 990—1002 hPa, frequency of sea fog increases with the increase of humidity and the decrease of pressure. However, when it comes to severe dense fog (visibility ≤ 50 m), relative humidity is 92%—95% and station pressure is 990—999 hPa, and the frequency increases with the increase of

* 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2013M21)、浙江省气象局项目(2012YB10)和宁波市气象局项目(NBQX2013004B)共同资助

2014 年 8 月 4 日收稿; 2015 年 1 月 4 日收修定稿

第一作者: 周福, 从事天气预报、服务及管理. Email: zhoufu0311@sohu.com

humidity and pressure. Weather systems including Jianghuai cyclone, Meiyu front and cold air can influence the occurrence and development of sea fog. Frontal fog usually occurs 2—3 days before weather system transits the area and when the upper air in the local area is influenced by southwest warm wet air. The upper air is in front of the southwest vortex when advection fog occurs. Under this condition, temperature difference between sea and air is $0-1.5^{\circ}\text{C}$ and $-0.5-0^{\circ}\text{C}$ between dew-point and sea underlying surfaces. Severe dense fog or dense fog occur under stable atmospheric stratification and in long-standing and thick warm wet air flows, and meanwhile, cold ocean current from north continuously pours into the sea near Ningbo. Besides, sea fog intensity is related to warm advection and cold ocean current to some extent. All the above discussed perform an important role for the forecasting of sea fog and its intensity in Ningbo.

Key words: Ningbo, sea fog, statistical characteristics, composite analysis, forecasting

引言

海雾是指发生在海上、岸滨和岛屿上空低层大气中,由于水汽凝结而产生的水滴或冰晶使得水平能见度小于 1000 m 的危险性天气现象(曹祥村等, 2012)。统计表明约 70% 的海上灾害事故是由海雾造成的(吕洪伟等, 2008)。2004 年 2 月 18—20 日受海雾影响,短短三天内在宁波的石浦海域就发生了五起海事事故。侯伟芬等(2004)指出浙江沿海属于我国沿海海雾多发区,其中 4—6 月最多,大多发生在一天中的 04—06 时。宁波近海位于浙江的多雾中心范围内,海雾对宁波沿海交通运输、港口作业等有较大影响。因此,针对宁波沿海地区海雾发生的天气特征的分析及预报有非常重要的意义。

关于海雾的特征和成因分析,相关的专家已经做了许多工作。海雾的天气学研究主要包括三方面:一是海雾出现的统计规律;二是海雾发生的气象条件分析;三是天气形势分析(张苏平等, 2008)。许多研究人员均针对具体区域海雾的发生开展了相关研究,王婷等(2010)对珠江口持续性雾生消的环流特征和成因进行了分析;苏鸿明(1998)对台湾海峡出现海雾进行了气候统计和分析;徐燕峰等(2002)对舟山海域春季海雾的发生规律和成因进行了分析,黄彬等(2011; 2014)分析了黄海、黄渤海海雾的特征及其成因;曲平等(2014)统计分析渤海湾海雾特征,探讨了其形成的机理。侯伟芬等(2004)研究显示浙江沿海海雾的季节性差异主要受海气温度、湿度及季风等影响;李沛等(2012)分析了造成低能见度天气的可能原因,认为近地面温度露点差、地面风速等因子对雾的形成有重要指示意义;杨棋等(2013)用风向、风速、气温、气温海温差和相对湿度

等要素作为预报海雾的因子。近年来也有一些关注海雾结构的研究,并在数值试验等方面开展了相关工作(刘梅等, 2014; 张舒婷等, 2013; 吕晶等, 2014; 陆雪等, 2014; 王益柏等, 2014)。由上可见,利用统计方法、天气分型、诊断方法和数值试验等已经做了很多关于海雾的细致工作,但是海雾的发生存在着明显的区域特征,目前还没有针对宁波沿海的海雾特征分析,同时也少有针对性影响较大的浓雾和强浓雾的出现规律和预报的分析。

本研究除了通过统计和天气分析方法研究海雾,还通过合成分析方法,分析了解宁波沿海海雾的发生发展特征和成因,针对持续时间较长,影响较大的浓雾和强浓雾进行了分析,进而得到相应的预报着眼点,为宁波沿海海雾预报服务提供更好的参考。

1 资料和方法

海雾分为不同的类型,如平流雾、混和雾、辐射雾、锋面雾、蒸汽雾和地形雾等,最常见的海雾是暖湿气流经冷海面发生凝结而形成的平流雾(王彬华, 1983)。但由于观测的记录里面没有区分雾的种类,因此本文相关分析是针对所有的海雾。

采用石浦站 1971—2011 年共 41 年的地面观测资料和 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料,根据海雾出现时的能见度临界值,确定每日 24 小时内观测记录出现过海雾为一个海雾日,统计出宁波海雾日频数,并根据能见度将海雾分为 3 个等级:雾:能见度 ≤ 1000 m; 浓雾:能见度 ≤ 500 m; 强浓雾:能见度 ≤ 50 m,针对海雾的不同等级统计分析环境要素场的特征。然后,对 4—6 月海雾发生频数较高季节的几次海雾发生过程的物理场,分影响系统采用合成分析的方法进行重点分析,对海雾发生机理进行诊断。分析海雾的水汽来

源,讨论有利于海雾生成的环流形势。在此基础上深入探讨雾、浓雾及强浓雾过程中海雾生消的物理机制,为宁波地区海雾的预报提供参考。

分类选用的个例包括:冷空气影响前出现雾的过程 2008 年 5 月 30 日 08 时、2009 年 4 月 13 日 08 时和 2011 年 4 月 16 日 08 时 3 个冷锋过境前 24 h 的合成;冷锋过境前 6 h 左右当时还处于暖区的过程有 2007 年 4 月 15 日 08 时、2009 年 4 月 13 日 08 时和 2010 年 4 月 11 日 08 时 3 个冷空气过境前夕的过程合成;梅雨锋影响期间的雾过程选取 2010 年 6 月 16 日 08 时、2010 年 6 月 24 日 08 时和 2011 年 6 月 14 日 08 时 3 个过程合成;气旋影响前 24 h 选取的过程包括 2008 年 4 月 6 日 08 时、2009 年 4 月 20 日 08 时和 2010 年 4 月 20 日 08 时;用于浓雾分析的过程有 2009 年 4 月 20 日 08 时、2010 年 6 月 15 日 08 时和 2010 年 6 月 24 日 08 时 3 个过程的合成;用于强浓雾分析的过程有 2008 年 4 月 6 日 08 时、2008 年 6 月 9 日 08 时和 2010 年 4 月 20 日 08 时 3 个过程合成。对这些分类合成的结果进行诊断分析。

2 海雾特征及环流背景

2.1 海雾的多时间尺度变化特征

2.1.1 年际变化特征

宁波沿海累年的平均雾日为 55.63 d,但年际差异显著,1993 年最多为 80 d,2007 年最少仅有 36 d。另外由 1971—2011 年海雾的年际变化特征(图 1)可见,20 世纪 90 年代初之前雾日基本呈上升趋势,90 年代中后期至 2007 年前后明显下降,近 5 年略有上升。

2.1.2 季节变化特征

研究表明,我国沿海地区海雾集中出现时段由

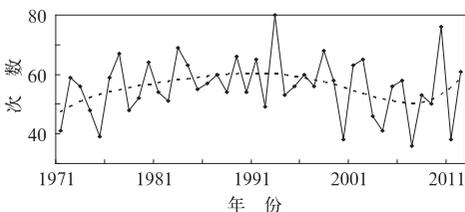


图 1 1971—2011 年石浦站雾的年平均日数(实线)及变化趋势线(虚线)

Fig. 1 Annual mean fog days at Shipu Station during 1971—2011 (solid line) and its trend (dotted line)

南往北,有先后出现的趋势:广西海雾多出现在 12 月至次年 4 月(孔宁谦,1997),广东沿海集中在 2—4 月(徐峰等,2012),台湾海峡集中出现于 3—5 月(苏鸿明,1998),浙江沿海地区是 4—6 月(侯伟芬等,2004),大连海雾多发生在 5—7 月(汤鹏宇等,2013)。近 41 年统计资料显示(图 2),宁波沿海全年均有海雾出现,以 3—6 月居多,其中 4、5、6 三个月平均每月有 1/3 左右为雾日,1977 年 5 月达 20 d。最少的月份是 8—9 月,平均每月不足 1 d。进一步统计发现,强浓雾仅在 4—6 月出现,而浓雾在 4—6 月出现概率占这一阶段雾日的 75%。因此以下主要研究 4—6 月发生且影响较大的雾,对秋冬季的雾以后再讨论。

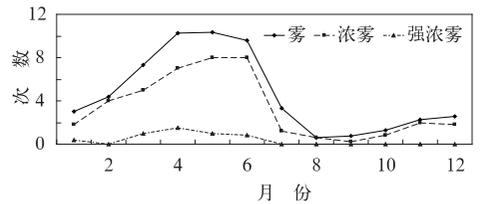


图 2 1971—2011 年石浦站雾日的月际变化
Fig. 2 Monthly variation of fog days at Shipu Station during 1971—2011

2.1.3 日变化特征

我国沿海地区存在着明显不同的海雾日变化,广西海雾多集中在 02—05 时(孔宁谦,1997),广东集中在 02—08 时(徐峰等,2012),台湾海峡 05—07 时最多(苏鸿明,1998),浙江沿海地区是 04—06 时最为集中(侯伟芬等,2004),大连海雾多发生在 05

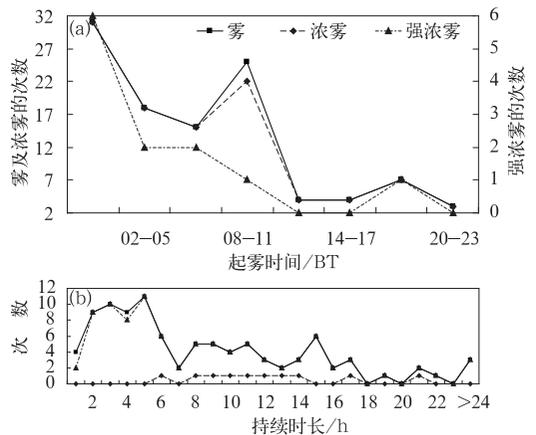


图 3 1971—2011 年 4—6 月石浦站不同浓度雾的日变化特征(a)和持续时间(b)
Fig. 3 Diurnal variation (a) and duration (b) of fogs with different concentrations at Shipu Station from April to July during 1971—2011

—08 时(汤鹏宇等, 2013)。由图 3 可以看出, 4—6 月全天各个时段宁波都有海雾出现的可能, 但起雾时段主要集中于半夜至上午(23 时至次日 11 时), 其中半夜前后(23 时至次日 02 时)发生海雾的概率最大, 而消散时段一般在 11 时之后。这一点在强浓雾上表现得更为显著。海雾持续时间不定, 一般来说持续 2~6 h 的概率较大, 但对于能见度在 50 m 以内的强浓雾, 持续 8~14 h 的概率较大。

分析造成海雾日变化的原因: 夜间海水降温较慢, 气温下降较快, 当空气贴近偏暖的海面后受热气, 形成海雾, 而到了白天辐射增温作用, 海雾趋于

消散, 特别是 14—17 时左右湍流作用增强, 不利于海雾形成。

2.2 海雾与气象要素之间的相关性

2.2.1 与风向的关系

统计不同能见度条件下海雾与风向的关系(图 4), 可见: 海雾发生时多为西南风和东北风, 偏北风及偏东风也有一定比例, 结合海雾发生期间的形势场分析, 可以认为海雾发生时, 宁波可能位于倒槽前部受西南暖湿气流影响, 或位于高压东部, 受偏北到东北气流影响。

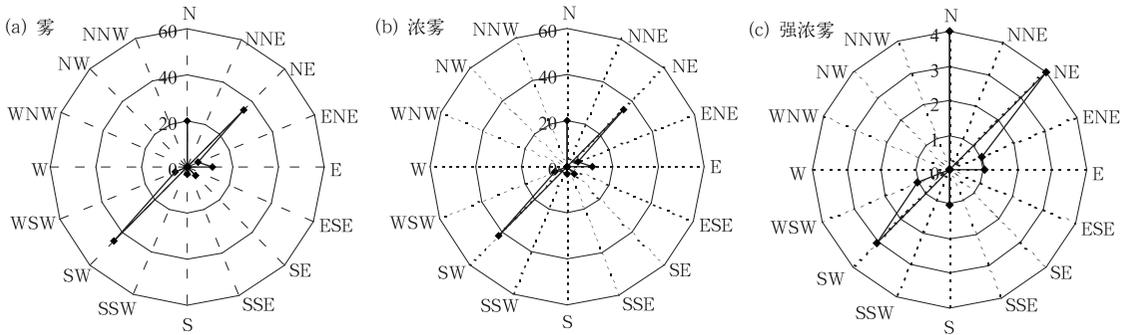


图 4 石浦站不同浓度的雾与风向的关系
(a)雾, (b)浓雾, (c)强浓雾

Fig. 4 The relationship between fogs with different concentrations and wind direction at Shipu Station
(a) fog, (b) dense fog, (c) severe dense fog

2.2.2 与风速的关系

由图 5 可以看出, 海雾发生时风速通常在 $1.6 \sim 5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (1~4 级风), 集中在 $2.1 \sim 5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (2~3 级), 最大不超过 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对于浓度 $\leq 50 \text{ m}$ 的强浓雾来说风速相对偏小, 即 1 级风时所占的比例有所增加, 而 4 级风时基本不发生。

综合风向及风速的统计表明, 风向为西南或东北风, 风力在 2~3 级时最有利于海雾的发生, 说明一定的风速有利于暖湿气流被输送至较冷的海面, 风速过小不利于平流输送, 过大又会加强底层湍流

交换, 不利于海雾形成。而强浓雾出现时风力相对偏小, 且偏北风、东北风及西南风条件下均有可能发生, 说明强浓雾的形成需要更稳定的大气条件。

2.2.3 与湿度及气压的关系

海雾的发生与湿度及气压有关(图 6), 一般来说, 相对湿度在 90%~95%, 本站气压在 990~1002 hPa 时, 海雾发生概率随着湿度的增加而增加, 随着气压的减小而增加, 并在湿度为 95%、气压为 990~993 hPa 时达到峰值。当相对湿度 $< 90\%$ 、气压 $< 990 \text{ hPa}$ 或 $> 1002 \text{ hPa}$ 时, 海雾很少发生。强浓雾形成所要求的大气环境条件更高, 即相对湿度 $> 92\%$, 本站气压在 990~999 hPa 时, 强浓雾发生概率随气压的升高而升高, 并在 996~999 hPa 达到峰值。

2.3 海雾发生时的影响系统

海雾发生发展主要和江淮气旋、梅雨锋及冷气等的活动有关。江淮气旋过境前夕(通常是指气旋过境 24 h 之前), 宁波位于气旋或倒槽前部, 受系

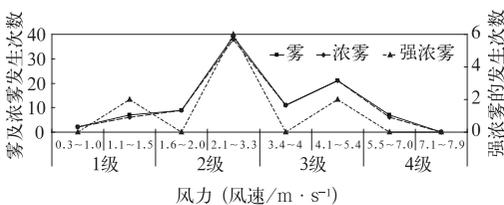


图 5 石浦站不同浓度的雾与风速的关系
Fig. 5 Relationship between fogs with different concentrations and wind speed at Shipu Station

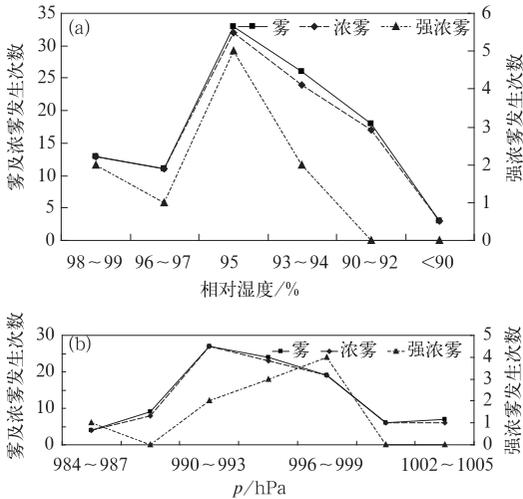


图6 石浦站不同浓度的雾与相对湿度(a)及本站气压(b)的关系

Fig. 6 Relationship between fogs with different concentrations and relative humidity (a), and the station pressure (b) at Shipu Station

统左前方西南气流或系统过境时的东北气流影响,出现海雾占20%,主要发生在4—5月,其中一半的过程连续雾日可持续3 d以上,且出现强浓雾的概率超过35%;梅雨期间宁波市位于静止锋南侧,西南涡的一次次东移有时会造成海雾,梅雨期间的海雾仅在6月出现,其几率占45%,其中超过半数的过程雾日持续3 d以上,且有强浓雾出现的过程可达20%;锋面系统在春、秋、冬三季均可能出现,但海雾基本上仅在4—6月出现,当局地上空正好位于锋前暖湿气流之中,或冷空气刚过境时南、北气流转换的静风期,海雾有可能出现。进一步研究发现,冷空气影响前出现海雾的概率仅次于梅雨锋,达30%

左右,但这种情况下海雾的持续时间较短,其中85%以上的过程连续雾日不超过2 d,且无强浓雾的出现。

3 影响海雾的天气形势及预报着眼点

3.1 海雾发生时的天气形势

3.1.1 与低压有关的海雾

水汽是海雾形成并维持的重要条件,从图7可见,低压系统影响宁波前24 h左右,水汽通量大值中心主要集中在两湖盆地,并通过西南急流的作用,将暖湿空气输送至宁波沿海上空。比较图7a和7b可得:江淮气旋影响前西南急流偏强,水汽通道长,主要来自于菲律宾沿海,西南急流将湿空气源源不断地向北输送,长江以南上空有大范围的水汽维持。其中29°N低空湿区明显,高湿中心正好位于121°~122°E附近,相对湿度超过95%(图略),深厚的暖湿气层为海雾的形成和持续提供有利条件。梅雨锋影响期间西南急流相对偏弱,水汽通量源地包括菲律宾沿岸及孟加拉湾,水汽相对丰富。相比江淮气旋影响期间,高湿区更加深厚,从近地面直达对流层中层(图略),有利近地面水汽的聚集,为海雾发生发展提供条件。通常海雾出现在低压和锋面前1~2 d且水汽输送充分的时候。

3.1.2 与冷空气活动有关海雾

上述分析表明,低压系统影响期间,海雾的生成发展主要与西南急流携暖湿空气影响局地上空湿层厚度或范围有关。冷空气影响海雾生成,主要发生

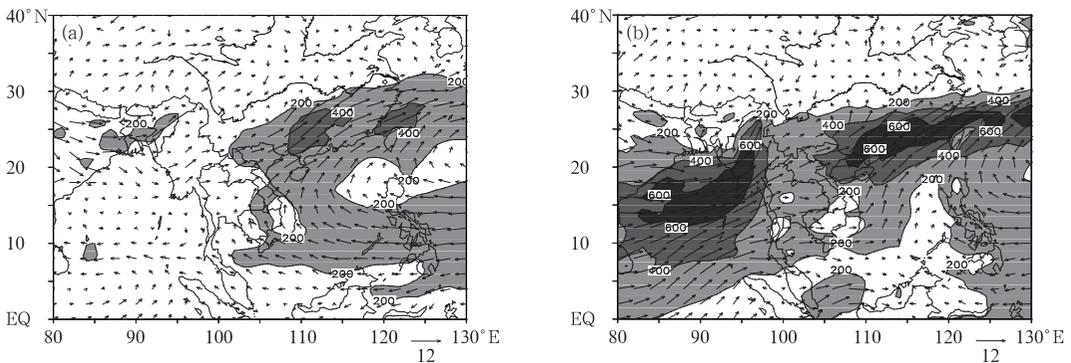


图7 个例统计江淮气旋(a)和梅雨锋(b)影响前24 h 850 hPa 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及整层水汽通量(阴影,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa and water vapor flux (shadow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) during different weather systems affecting Jianghuai cyclone (a) and Meiyu front (b)

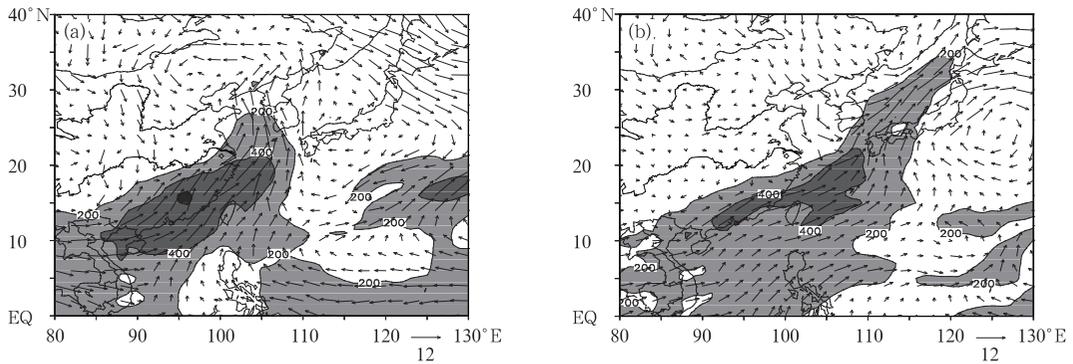


图8 个例统计冷空气过境前24 h(a)和冷空气过境前6 h(b)850 hPa 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及整层水汽通量场(阴影, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa and water vapor flux (shadow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (a) before and (b) during the cold air transit

在系统到达前1~2 d及锋线过境前夕。

由图8可见,冷空气影响期间锋区显著,锋后为一致的偏北风,锋前西南气流强盛,将来自南方的水汽向北输送。比较图8a和8b,系统过境前24 h宁波沿海上空受强暖湿气流影响,水汽通量超过 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,而锋前暖湿空气的堆积有利于近地面形成大范围的高湿区,湿区的增厚有利于海雾的形成和发展;系统过境期间前6 h以内,随着锋区的东移入海,也伴随着水汽通量高值带的东移及锋后冷空气的南下,不过由于此时冷高压主体尚未到达,宁波上空正好位于锋线附近冷暖气流转换期间,低空偏北气流并不强,近地面仅为 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的静风,气层稳定,有利于海雾的维持。

冷空气过境前1~2 d暖湿气流强盛,使沿海地区恰好位于高湿区,或在冷暖气流转换之前大气层结稳定,前一段有利于海雾形成,后一段有利于海雾维持。

3.2 海雾预报着眼点

由上可知,低空风场通过影响水汽输送,从而造成低层湿区的异常,进而为海雾的发生提供有利的背景条件。进一步研究在此环流背景下,海雾出现时的下垫面特征。

统计表明,各次海雾过程中,近地面附近均有一定强度的暖平流,导致 29°N 、 122°E 上空气温以及露点温度与海表气温之间存在差值(图9):冷锋前部及江淮气旋影响期间西南气流较强,气-海温差明显,其大值中心位于杭州湾一带,而宁波沿海可达 $1 \sim 1.5^\circ\text{C}$,同时露点温度与海表温度差值也在 0°C 上下,表明海面上空存在饱和湿空气,有利于空气块

在冷海面上降温冷凝,形成海雾;冷锋及梅雨锋过境前,气-海温差在 $0 \sim 0.5^\circ\text{C}$ 左右,露点-海表温差在 -0.5°C 左右,空气接近饱和。因此,局地上空暖平流维持,使空气块达到饱和或接近饱和,在相对偏冷的海面上降温并凝结成水汽,形成海雾。

基于上述分析与讨论,海雾预报首先应着眼于天气系统:锋面雾一般形成于系统过境前1~2 d,局地上空受锋前西南暖湿气流影响,或锋线恰好海岸线附近,局地上空风速较小,在前期西南气流的作用下已有充足的水汽汇聚并导致湿层增厚,近地面湿度超过95%的情况下;平流雾形成时局地上空位于西南涡前部,孟加拉湾或菲律宾沿岸源源不断水汽的输送,使得宁波沿海或其南部地区形成一定厚度或一定范围的湿度层,同时一定强度西南气流不断补充影响为海雾的发生发展并长时间维持提供有利条件。其次,在这些天气系统影响下,下垫面的气-海温差在 $0 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 左右,有利于水汽冷凝,同时露点-海表温差在 $-0.5 \sim 0^\circ\text{C}$ 上下,空气块饱和或接近饱和,有利于海雾的形成。

4 强浓雾及浓雾过程分析及雾强度预报着眼点

4.1 浓雾及强浓雾发生的一般规律及天气形势

持续时间达1 d以上的海雾过程对海上交通有更严重的影响,统计表明,2010年50%的海雾过程超过3 d,其中该年6月明显偏多,最长一次的雾日甚至达一周之久。因此下面对持续时长超过3 d并出现强浓雾及浓雾的过程作重点探讨。

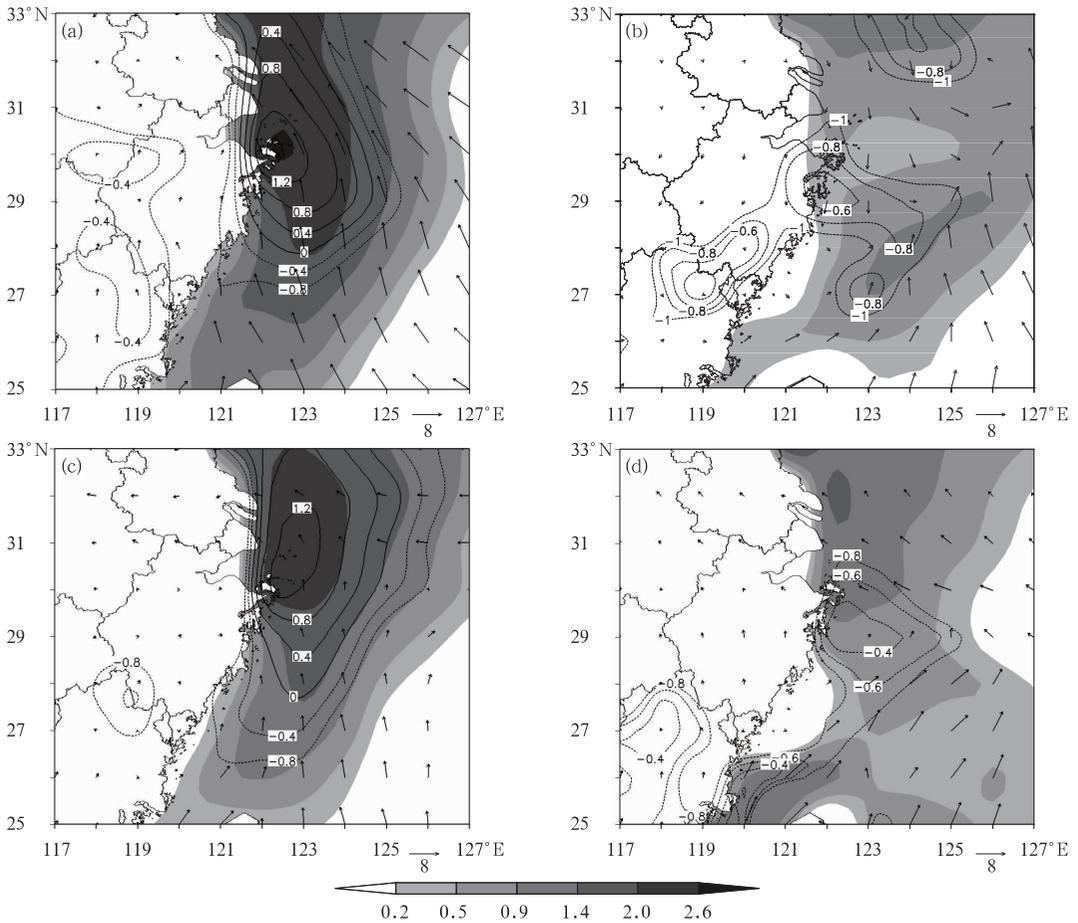


图9 个例统计气-海温差(阴影,单位: $^{\circ}\text{C}$)、露点-海面温差(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)及10 m风场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(a)冷空气过境前24 h, (b)冷空气过境前6 h, (c)江淮气旋影响前24 h, (d)梅雨锋影响期间

Fig. 9 Temperature difference between air and sea (shadow, unit: $^{\circ}\text{C}$), sea and dew point (contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) and 10 m wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(a) 24 h before cold air transit, (b) 6 h before during cold air transit, (c) 24 h before the impact of Jianghuai cyclone, (d) during the impact of Meiyu front

4.1.1 浓雾和强浓雾发生规律

统计表明,浓雾在4—6月均可能产生,4月主要受海上高压后部气流影响,时长最短,5月受华南低涡北部偏东气流影响,另外4—5月也有可能受大陆高压前部东到东北气流作用,这期间浓雾的持续时间稍长一些。6月梅雨期间受西南气流影响,将孟加拉湾或菲律宾沿岸的水汽输送北上,形成浓雾,出现的时长最长。

从各次过程分析可以发现,浓雾的发生与前期高湿区的维持及层结逆温的配合有关。浓雾消散期间,若在4—5月,则有大陆高压前部冷空气南下,冷空气占据主导地位,使局地产生偏北大风或冷暖气流交汇导致对流运动。6月梅雨锋影响期间,西南急流增强北上,西南暖湿气流带来强暖平流使辐合上升运动增强导致湍流发展。以上两种情况均导致层结不稳定性增强,使海雾消散。

强浓雾只出现在低涡系统活动前,即江淮气旋影响前或梅雨锋摆动期间,它的形成一般需要更充沛的水汽条件以及更稳定的大气层结条件。一般来说强浓雾期间,孟加拉湾与菲律宾沿岸两股暖湿气流共同北进,使局地上空维持一定强度的水汽通量;同时局地上空层结稳定,甚至有干暖盖出现,有利于低层水汽的聚集。另外强浓雾的消散一般也与西南急流或风切变增强,导致局地上空湍流发展有关。

4.1.2 浓雾和强浓雾发生的天气形势

分析表明,强浓雾或浓雾的发生发展整体与梅雨锋及江淮气旋影响期间类似,但雾的强度可能与垂直运动影响湿区厚度有关,因而除了对低空风场及水汽通量分析之外,有必要对垂直环流进行探讨研究。比较水汽及风场差异可见(图10a和10b):出现强浓雾期间长江以南地区西南急流明显偏强,直达宁波沿海及其以北地区,并在浙北一带形成切

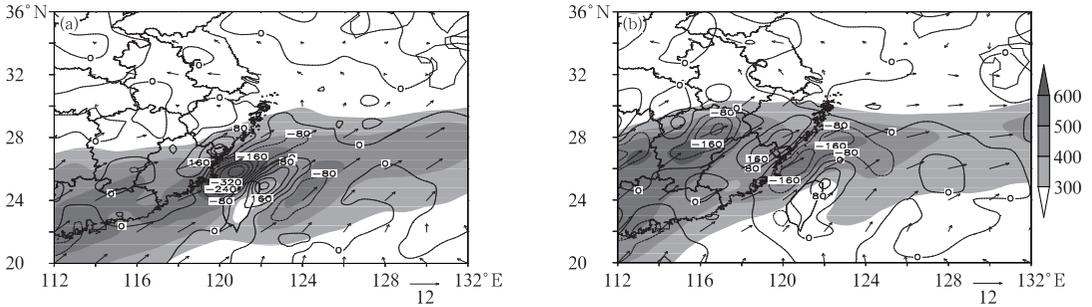


图 10 个例统计 850 hPa 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、水汽通量(阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及湿 Q 矢量场(等值线, 单位: $10^{-15} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-3}$)
(a) 浓雾, (b) 强浓雾

Fig. 10 Wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa, water vapor flux (shadow, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and wet Q vector (contour, unit: $10^{-15} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-3}$)
(a) dense fog, (b) severe dense fog

变, 急流的增强伴随着湿区范围的扩大, 强浓雾期间宁波沿海上空整层水汽达 $200 \sim 400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 为海雾的发展提供了充足的水汽条件。

进一步比较垂直环流的差异: 浓雾及强浓雾期间, 宁波沿海均位于湿 Q 矢量 0°C 线附近, 其南侧沿海一带为湿 Q 矢量负值区, 即上升运动, 内陆为正值, 即下沉运动, 因而在宁波南部, 沿海与内陆间形成一个完整的垂直环流圈, 比较图 10a 和 10b 可以发现, 强浓雾期间湿 Q 矢量的正、负区范围较前者明显扩大, 表明近地面有上升气流较强, 有利水汽的抬升及整层湿空气增厚, 为强浓雾的发展提供良好的温湿条件; 而浓雾期间的垂直环流范围较小, 位置也相对偏南, 导致整层气团增湿不显著, 所形成的海雾也相对浅薄。因此, 水汽、低空环流及近地面垂直

运动的差异影响了局地上空湿空气厚度, 进而导致雾强度不同。

4.2 海雾强度预报着眼点

低空环流引起的温度平流, 进而导致下垫面温湿场及海表风场的变化(图 11); 强浓雾过程中, 海表上空形成明显的湿区, 95% 的湿中心正好位于石浦上空同时, 湿中心附近正好对应东南—西南的风向切变, 850 hPa 上切变以南风速 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在这范围内风速越大浓度越强, 其中强浓雾一般在 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上携带水汽向北输送, 这股暖平流的中心位于浙南海域, 并不断向宁波沿海输送; 同时海表的冷平流由江苏沿海向南传播, 因此, 低空暖湿平流与海表的冷平流交汇于 $29^\circ\text{N}, 122^\circ\text{E}$ 附近, 暖湿空气在

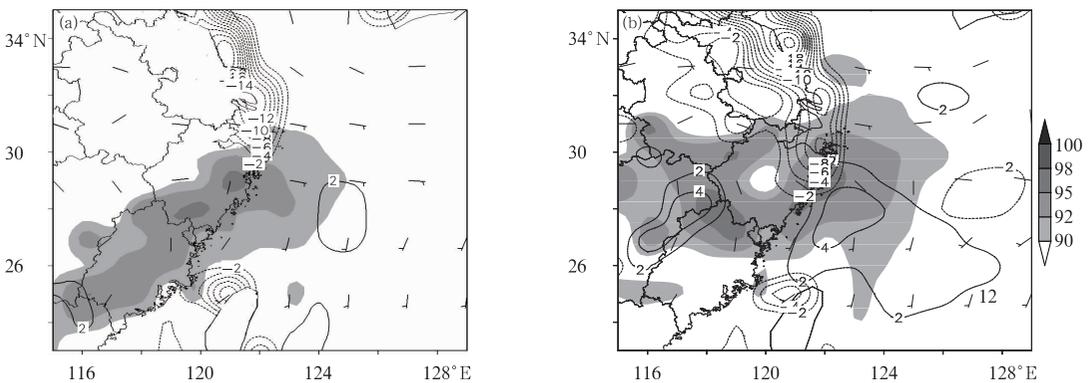


图 11 个例统计 850 hPa 温度平流(实线, 单位: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)、海面温度平流(虚线, 单位: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)、2 m 湿度(阴影, 单位: %)及 10 m 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 浓雾, (b) 强浓雾

Fig. 11 Temperature advection (solid line, unit: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$), sea temperature advection (dotted line, unit: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$), at 2 m humidity (shadow, unit: %) and 10 m wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) dense fog, (b) severe dense fog

偏冷的下垫面上空冷凝,形成深厚的海雾。而浓雾过程湿区范围明显偏小,西南气流较弱,不足以使冷暖平流交汇,导致气团与海表温差偏小,所形成的海雾厚度相对偏弱。

综上所述,由于海雾的形成机制为暖湿气流向北输送并抬升,导致湿空气不断增厚,并在偏冷的海表冷凝,因而其强度预报一般需着眼于气流强度、抬升运动的强弱以及海表温度的下降。通过强浓雾与浓雾过程各物理量分析比较,可以得到:一定强度的雾需要在稳定的大气条件下形成,而雾的厚薄与西南气流的强度有关,西南气流将丰富的水汽输送至宁波沿海,使局地增暖增湿,促进垂直运动发展,而造成沿海的底层到对流层中层均处于深厚的暖湿气流控制之下,有利于海雾的增强和维持。在近地面,暖平流源源不断向北输送,同时,来自北方的冷海流不断注入宁波沿海,暖平流与偏冷的下垫面交汇,最终导致水汽冷凝成雾,而海雾的强度则与暖平流及海表冷平流的强度有关。

5 结 论

通过对宁波海雾出现的时空特征的分析,对不同强度海雾出现时大气特征、天气形势的分析,可以得到:

(1) 海雾多发生于 4—6 月,主要出现在半夜至上午(23 时至次日 11 时),其中半夜前后(23 时至次日 02 时)最多,海雾消散一般在 11 时之后。风力在 2~3 级的西南或东北风最有利于海雾的发生。本站相对湿度在 90%~95%,气压在 990~1002 hPa 时,海雾发生概率随着湿度的增加及气压的减小而增加,但对于能见度 ≤ 50 m 的强浓雾来说,相对湿度及本站气压分别为 92%~95%及 990~999 hPa,且强浓雾的发生概率随湿度及气压的增加而增加。

(2) 海雾的发生发展预报:锋面雾一般形成于锋面过境前 1~2 d,局地上空受锋前西南暖湿气流影响,或锋线恰好在宁波沿海附近,局地上空风速较小,且前期有充足水汽汇聚并导致湿层增厚;平流雾形成时局地上空位于西南涡前部,孟加拉湾或菲律宾沿岸有水汽补充,使宁波沿海或其南部地区形成一定厚度或一定范围的湿度层,同时一定强度的西南气流不断补充影响,为海雾的发生发展并长时间维持提供有利条件,同时,在平流雾可能出现的天气背景条件下,下垫面的气-海温差维持在 0~1.5℃左右,有利于水汽冷凝,同时露点-海表温差在一 0.5

~0℃上下,空气块饱和或接近饱和,有利于海雾的形成。

(3) 海雾强度预报:首先需要在稳定的大气条件下形成,而雾的厚薄与西南气流的强度有关,西南气流将丰富的水汽输送至宁波沿海,使局地增暖增湿,促进垂直运动发展,从而使低层到对流层中层,沿海上空均处于深厚的暖湿气流控制之下,有利于海雾强度的维持。850 hPa 南大风风速在 4~8 m·s⁻¹ 范围内风速越大浓度越强,其中强浓雾风速一般在 6 m·s⁻¹。在近地面,暖平流源源不断向北输送,同时,来自北方的冷海流不断注入宁波沿海,最终暖平流与偏冷的下垫面叠加,导致水汽冷凝成雾,而雾的强度与暖平流及海表冷平流的强度有关。

参考文献

- 曹祥村,邵利民,李晓东. 2012. 黄渤海一次持续性大雾过程特征和成因分析. 气象科技, 40(1): 92-99.
- 侯伟芬,王家宏. 2004. 浙江沿海海雾发生规律和成因浅析. 东海海洋, 22(2): 9-12.
- 黄彬,毛冬艳,康志明,等. 2011. 黄渤海雾天气气候特征及其成因分析. 热带气象学报, 27(6): 920-929.
- 黄彬,王靖,陆雪,等. 2014. 黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征及生消机理分析. 气象, 40(11): 1324-1337.
- 孔宁谦. 1997. 广西海雾特征分析. 广西气象, 18(2): 41-45.
- 李沛,王式功,尚可政,等. 2012. 基于神经网络逐级分类建模的北京地区能见度预报. 兰州大学学报(自然科学版), 48(3): 52-57.
- 刘梅,严文莲,张备,等. 2014. 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制分析. 气象, 40(7): 835-843.
- 陆雪,高山红,饶莉娟,等. 2014. 春季黄渤海雾 WRF 参数化方案敏感性研究. 应用气象学报, 25(3): 312-320.
- 吕洪伟,丁海亮. 2008. 长江口和东海海域的恶劣天气及安全航行对策. 航海技术, 3(2): 22-24.
- 吕晶,牛生杰,张羽,等. 2014. 湛江东海岛一次春季海雾的宏微观结构及边界层演变特征. 气象学报, 72(2): 350-365.
- 曲平,解以扬,刘丽丽,等. 2014. 1988—2010 年渤海湾海雾特征分析. 高原气象, 33(1): 285-293.
- 苏鸿明. 1998. 台湾海峡海雾的气候分析. 台湾海峡, 17(1): 25-28.
- 汤鹏宇,何宏让,阳向荣. 2013. 大连海雾特征及形成机理初步分析. 干旱气象, 31(1): 62-69.
- 王彬华. 1983. 海雾. 北京: 海洋出版社, 352.
- 王婷,潘蔚娟,湛志刚,等. 2010. 珠江口持续性雾生消的环流特征和成因分析. 气象, 36(6): 13-20.
- 王益柏,梅娜,范磊,等. 2014. WRF 模式对 2013 年 1 月华北一次大雾的数值对比试验. 气象, 40(12): 1522-1529.
- 徐峰,王晶,张羽,等. 2012. 粤西沿海海雾天气气候特征及微物理结构研究. 气象, 38(8): 985-996.
- 徐燕峰,陈淑琴,戴群英,等. 2002. 舟山海域春季海雾发生规律和成因分析. 海洋预报, 19(3): 59-64.
- 杨棋,欧建军,李永平. 2013. 洋山海域海雾客观预报方法研究. 热带海洋学报, 32(5): 59-64.
- 张舒婷,牛生杰,赵丽娟. 2013. 一次南海海雾微物理结构个例分析. 大气科学, 37(3): 552-562.
- 张苏平,鲍献文. 2008. 近十年中国海雾研究进展. 中国海洋大学学报, 38(3): 359-366.