

黄渤海海雾诊断及卫星云图特征

高松影¹, 史月琴², 赵婷婷³, 王玉琦¹, 孟鑫¹

(1. 丹东市气象台, 辽宁 丹东 118000; 2. 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081; 3. 容城县气象局, 河北 雄安新区 071700)

摘要: 利用 MICAPS 气象常规观测资料、NOAA PSL 分析数据、ECMWF ERA5 再分析数据, 基于 2009—2023 年卫星云图观测结果, 选取 38 个典型的黄渤海海雾个例, 对黄渤海海雾天气的气候特征、形成及持续条件、边界层、卫星云图特征等进行诊断分析。结果表明: 黄渤海海雾绝大多数在黄海生成, 登陆后主要分布在辽东半岛东部及丹东地区。黄渤海海雾季节性分布特征主要与海表面温度的月变化相关。海雾形成的两个主要条件为黄渤海处于有利天气形势下且有偏南暖湿气流向北输送, 以及海雾形成前 6~24 h 的气海温差在 0~2.5 °C 阈值范围内。海雾的形成是降温增湿的过程。海雾的持续与逆温层厚度、温差和梯度相关, 雾区上空有暖干层存在。受海陆分布、地形及输送水汽气流方向和分布等因素影响, 海雾的分布区域与其在卫星云图上呈现的形态不同。此外, 还对渤海海雾较少的原因进行了初步分析。

关键词: 黄渤海; 海雾; 卫星云图

中图分类号: P732.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)03-0021-13

0 引言

海雾是在海洋影响下, 产生在海洋上空低层大气中的一种水汽凝结现象, 它会给海上航运、渔业生产及沿海地区的交通运输带来严重危害。20 世纪 80 年代, 王彬华^[1]撰写了专著《海雾》, 对海雾研究产生了深远影响。我国海域辽阔, 不同海区都有海雾发生^[2-5], 其中黄渤海区域是世界上重要的海雾多发区之一^[6]。王彬华^[7]还分析了中国近海海雾的分布形式、生消过程、地区效应和雾体形状等。黄彬等^[8]指出, 黄海由于海雾生成范围广, 因此是受海雾影响最严重的海区。张红岩等^[9]对黄海春季海雾多发和少发年份的环流形势、水汽来源、输送等形成条件进行了研究。吴晓京等^[10]基于 20 年的卫星遥感资料, 分析了黄渤海海雾的分布特征, 并指出在春夏雾季, 黄海存在黄海中部和西朝鲜湾两处海雾多发区。孙连强等^[11]使用常规气象观测及卫星云图资料, 揭示了丹东附近海域海雾形成的大气和海洋

背景条件。汤鹏宇等^[12]对大连海雾的特征及形成机理进行了分析, 指出该地区的海雾多为平流雾。曹祥村等^[13]分析了发生在黄渤海及周边地区的一次持续性海雾天气的形成、维持、消散特征及其物理机制, 海雾发生时黄渤海位于入海高压后部, 海面气温略高于海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST), 975 hPa 以下有下沉逆温存在。黄彬等^[14]对黄渤海一次持续性大雾过程的大气边界层结构特征和生消机理进行了研究, 发现大雾期间大气边界层—对流层下部均有逆温层和等温层。杨悦等^[15]通过对黄海海雾的天气特征与逆温层成因进行分析得出, 天气系统控制下的冷暖平流与海面湍流冷却作用决定了海上大气逆温层的形成。史得道等^[16]研究了一次渤海海雾形成过程中的海气相互作用, 发现海雾在生成前和发展过程中伴随着明显的东—东南风, 可以将黄海水汽向渤海输送。王冠岚等^[17]发现青岛海域某次海雾过程呈现出黄海海域平流冷却雾的典型特征配置。柳龙生等^[18]对一次入海气

收稿日期: 2024-03-06。

基金项目: 辽宁省丹东市科技指导性计划项目(DD202428)。

作者简介: 高松影(1966-), 女, 正高级工程师, 学士, 主要从事短期天气预报工作。E-mail: ddgsy@163.com

旋在黄渤海造成的海雾过程进行了分析,表明气温差在 $0.5\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。还有学者从海雾的微物理结构、数值模拟^[19-21]等方面对其形成机理作了进一步研究。

以上研究不断推动了黄渤海海雾的研究发展进程,但受资料限制,研究不够全面和系统。例如,早期对于海雾的认定多是采用观测站记录,不能宏观反映海雾的特征,即使后来部分研究基于卫星云图进行分析,但多是针对海雾个例。要获取对黄渤海海雾气候特征、形成条件等较深入的认识,需要对更多海雾个例进行综合分析。本文基于2009—2023年卫星云图资料观测,选取38个海雾典型个例,以期研究成果为减轻海雾造成的灾害提供技术支撑,并为海雾精细化预报需求提供依据,以提高预报业务水平。

1 资料、研究方法

1.1 资料

本文使用的主要资料有中国气象局气象信息综合分析处理系统(Meteorology Information Comprehensive Analysis Process System, MICAPS)气象观测常规资料、风云系列气象卫星(FY-2C、FY-

2E、FY-2G)和日本葵花卫星(Himawari, HMW)的可见光云图。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)物理科学实验室(Physical Sciences Laboratory, PSL)1991—2020年逐月平均海表面温度COBE SST分析资料,水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$;欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析数据ERA5,水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,气象要素包括平均海平面气压、2 m温度(T)、SST、位势高度、气温、水平风场(u 分量和 v 分量)、相对湿度和比湿,垂直方向由1 000~300 hPa共16层。文中地图基于GS(2021)1328号的地图制作,底图无修改;卫星云图中的地图来自MICAPS系统第四版客户端平台基础地图。文中时间均为北京时。表1为38个黄渤海海雾个例的出现时间和影响范围,其中渤海个例只有3个,后面将分析其原因。

1.2 研究方法

研究范围主要包括黄海、渤海及黄海北部沿海地区。目前气象卫星遥测是海雾监测的有效手段,它可提供范围广、信息量大、重复频率高和客观真实性强的海雾信息^[8]。本文利用卫星云图并结合

表1 黄渤海海雾个例的出现日期和影响范围

Tab.1 Occurrence date and impacting area of sea fog events over the Yellow Sea and Bohai Sea

出现日期	影响范围	出现日期	影响范围	出现日期	影响范围
2009年3月16—18日	黄海	2018年6月5—6日	黄海	2020年6月7—8日	黄海
2009年5月3—6日	黄海	2018年7月16—19日	黄海	2020年6月19—20日	黄海
2012年4月9—10日	黄海	2018年7月20—22日	黄海	2021年2月6日	黄海
2012年4月23—24日	黄海	2019年3月1—5日	黄海	2021年2月9—13日	黄海
2014年3月24—25日	黄海	2019年3月18—19日	黄海	2021年2月19—20日	黄海
2016年3月18日	黄海	2019年3月25—26日	黄海	2021年3月14—15日	黄海
2018年3月12—13日	黄海	2019年4月23日	黄海	2021年3月24—26日	黄海
2018年3月24—27日	黄海	2019年5月15—17日	黄海	2022年3月9—10日	黄渤海
2018年3月31日—4月2日	黄海	2019年6月20日	黄海	2022年4月8日	黄海
2018年4月20—21日	黄海	2019年7月4日	黄海	2023年3月4—7日	黄渤海
2018年5月9—10日	黄海	2019年7月22日	黄海	2023年3月28日	黄渤海
2018年5月13—14日	黄海	2020年4月30日—5月2日	黄海	2023年5月15—17日	黄海
2018年5月24日	黄海	2020年6月3日	黄海		

MICAPS地面观测资料选取海雾个例。为使个例具有代表性,判读时选择可见光云图,基本在少云或无云情况下进行。判别依据为海雾纹理光滑、均匀、无暗影,色调为灰白到白色,边界清楚,且形状与地形走向和海岸线一致^[22],而且一旦形成,在较长的时间里保持大致相同的形状^[8]。

广义的海雾是指在海洋影响下海上或者海岸区生成的雾,可分为平流雾、混合雾、辐射雾等,狭义的海雾是指在一定的大气环流形势下,由于海洋的直接影响在海面上生成的平流冷却雾^[1]。从天气学角度对38个海雾个例的形成、持续条件等进行诊断分析,并利用卫星云图资料统计分析黄渤海海雾的气候特征。

为诊断分析海雾的水汽来源,计算了大气低层1 000 hPa的水汽通量 Q_{1000} 。公式为:

$$Q_{1000} = Vq/g$$

式中: V 为二维风矢量; q 为比湿; g 为重力加速度。 Q_{1000} 的单位为 $g/(cm \cdot hPa \cdot s)$ 。

2 海雾特征

基于2009—2023年的卫星云图资料观测,并结合地面观测资料,统计分析了黄渤海海雾的特征。需要说明的是,统计过程中可能有因其他原因漏判的海雾样本。

黄渤海年海雾日数在30天左右,海雾分布范围以黄海为主,渤海较少。持续时间1~2天的占68.6%,3~4天的占26.1%,5天的占5.3%。受海岸线与长白山脉向西南延伸的支脉或余脉的地形阻

挡作用,辽东半岛东部和辽宁省东南部的丹东地区是受海雾登陆影响最频繁、最显著的地区。海雾日变化特征通常不明显,尤其是浓重的海雾过程。图1为2018年4月1日黄海出现的一次强海雾过程。从可见光云图上看,海雾覆盖了黄海大部、辽东半岛东部及丹东地区,从08时直到中午之前,除了因太阳光线变化导致雾区色调发生变化外,雾区范围基本保持稳定;午后,登陆的海雾雾区范围有所缩减,但海面上的雾区范围和强度没有变化。

海雾主要出现在2—7月,其中3—5月的发生率占总数的73.7%,进入8月后海雾日数骤减,季节性特征显著。这一特征与汤鹏宇等^[12]统计的黄海沿岸测站(大连站)的海雾特征是一致的,即海雾多发于春夏两季,其中5—7月为多发期,而秋冬季很少发生。研究发现,这种季节性特征与SST的季节性变化有关。由于海雾是冷却平流雾,海面上的气温(T)需要高于SST,即 $T - SST > 0^\circ C$;其次SST不能太高,否则空气中的水汽达不到饱和条件。王彬华^[11]、姚学祥^[22]提出将 $25^\circ C$ 作为平流冷却雾生成的SST最高界线和临界值。图2是1—12月黄渤海气候平均SST图,其中8月黄渤海SST高于 $25^\circ C$,不具备海雾生成的条件。

1—7月和9—12月的SST虽然低于 $25^\circ C$,但国家海洋环境预报中心《中国近海海洋气候监测月报》^[23]中黄渤海典型海洋站的月平均海温、气温数据显示,只有2—7月的 $T - SST > 0^\circ C$,具备海雾形成的条件。由此可见,黄渤海出现时段的季节性特征,是在SST呈现季节性变化的气候事实背景下产生的。

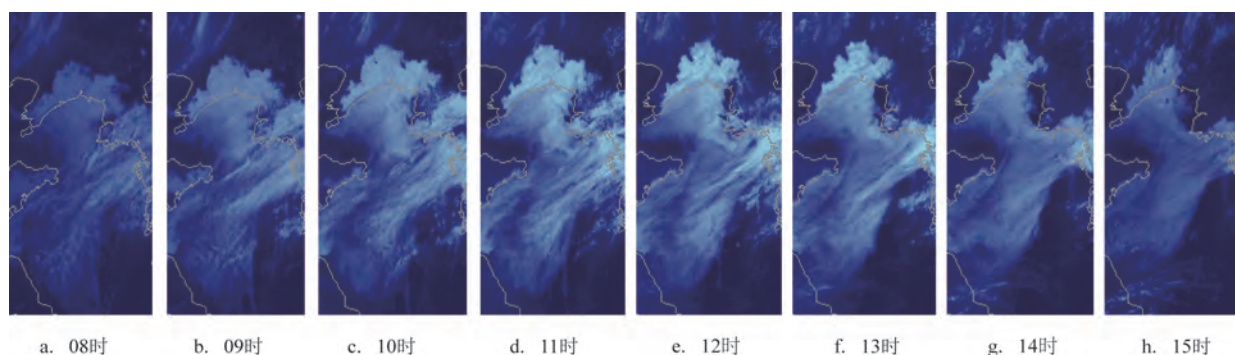


图1 2018年4月1日08—15时FY-2G可见光云图

Fig.1 FY-2G Satellite visible imagery from 08:00 BT to 15:00 BT on April 1, 2018

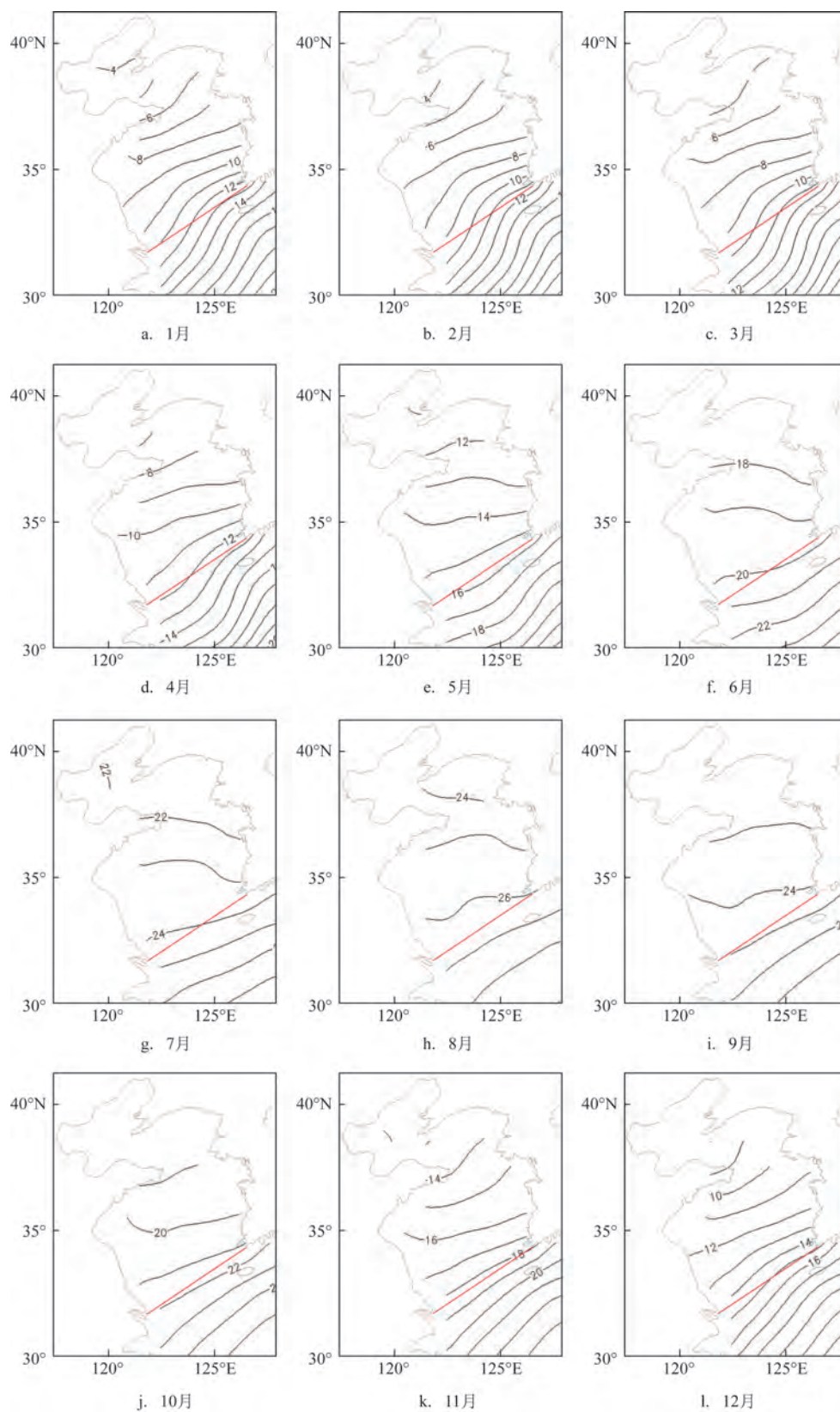


图2 1—12月平均海表面温度(1991—2020年)(单位:℃)

Fig.2 Monthly mean sea surface temperature from January to December (1991—2020) (unit: °C)

3 海雾形成条件

王彬华^[1]指出,海雾主要为平流冷却雾,其形成机制复杂,但从水文和气象范围考虑,都是增湿和降温过程。因此,对于黄渤海海雾形成条件的研究也主要从这两个方面开展。

3.1 水汽条件

水汽是海雾生成的物质基础,是在环流背景下最终发生凝结的根据^[24]。由图2可以看出,黄渤海—东海的月平均海温呈现南高北低的分布,当黄渤海处于偏南气流建立的有利天气形势时,来自低纬度的水汽会由南向北输送,进而达到增湿目的。有利于黄渤海偏南气流建立的天气形势为在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 有高压存在,高压主体位于 30°N 附近或以北,高压西脊点到达 120°E 以西,北界到达 40°N ,黄渤海处于高压西部或西北部。高压类型主要有两种,一是大陆入海高压,即在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间或 40°N 以北有大陆高压进入黄海、东海北部、日本海和西北太平洋;二是海上有高压存在。当环流形势稳定或两种类型的高压西侧或西北侧有低压系统配合,形成“东高西低”的形势场配置时,更有利于偏南气流的建立、加强和维持。通过对38个海雾个例1 000 hPa水汽通量分布的分析表明,黄渤海海雾的水汽主要来源于东海北部和黄海。图3为2018年3月25—27日黄海海雾过程的海平面气压场、1 000 hPa水汽通量和相对湿度分布情况。

这次海雾过程发生在大陆高压东移后与东海以东洋面的海上高压合并、且高压西侧有低压系统配合的形势下。黄海先后处于高压西部、低压前部,自南向北有偏南气流形成并维持。偏南气流在进入黄海北部后发生逆转,由西南气流转为东南气流,延伸至 40°N 并深入陆地。顺着气流方向,海雾先向东弥漫,进入黄海北部后呈条状径直向北到达海岸线并登陆,之后向西扩散,由于受长白山余脉阻挡,最终在辽东半岛东部及丹东地区登陆。雾区范围与1 000 hPa相对湿度大于90%的区域相对应。此外,海雾多出现在3—5月,这也与环流演变有关,此时冬季风向夏季风过渡,暖湿气流开始活跃,而冬天冬季风盛行时,暖湿空气北上到达黄海的机会较少。

3.2 温度条件

当来自低纬的暖湿气流形成并流经黄渤海海面时,只有当气温高于SST,即 $T-\text{SST}>0^{\circ}\text{C}$ 时,暖湿气流才能在与海面相互作用时因失去热量而降温,进而凝结并形成海雾。此外,气温还不能超过平流冷却雾生成所对应的SST最高界线和临界值 25°C 。通过对38个海雾个例逐一分析,与黄渤海海雾雾区吻合的 $T-\text{SST}$ 的阈值范围是 $0\sim 2.5^{\circ}\text{C}$,这一条件在海雾生成前6~24 h或更早就具备。研究发现,当海雾生成后,由于气海之间发生热量交换,该条件通常不再满足。2021年3月25日,黄海出现范围大、强度强的海雾过程,从3月24—25日气海温差范围演变图可以看到(见图4a—b),在海雾生成前24~12 h,黄海整个洋面的气海温差在 $0\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ 之间,满足海雾生成的温度条件,但到了25日08时,海雾达到最强(见图4d),黄海洋面的气海温差已经小于 0°C (见图4c),说明暖湿气流经洋面热量交换冷却后,气温已低于SST。

但对于持续时间长的海雾,满足海雾生成的气海温差维持的时间也长。例如2018年3月25—27日的海雾过程(见图3a),从海雾出现前的12 h一直到27日白天,黄海的气海温差一直满足海雾生成条件(见图4e—h)。此外,渤海海雾个例少与气海温差也有关系,在38个海雾个例中,渤海海域具备海雾生成的气海温差条件的只占36.8%。有研究指出,渤海是极浅海,海面较暖,平流蒸发雾多于平流冷却雾^[25-26]。

选取受海雾频繁登陆影响的丹东站($40^{\circ}02'\text{N}$, $124^{\circ}20'\text{E}$,站号54497)的观测记录,进一步了解海雾的属性。在38个海雾个例中,丹东站出现雾8次,浓雾8次,强浓雾4次。图5是在2018年3月24—27日的海雾过程中,丹东站观测的相对湿度、气温、能见度的变化曲线。从图中可以看到,3月24日午后气温由 10.2°C 陡然下降至 2.2°C ,相对湿度由60%急速上升至92%,能见度由7 954 m下降到2 351 m;24日夜间气温在 1°C 附近,相对湿度为97%~98%,海雾已经生成并登陆丹东,能见度在2 000 m以下;25日08时—27日午前,除了25日和26日中午由于太阳辐射作用导致气温有所上升、相对湿度短暂下降、能见度好转外,海雾一直持续,特别是25日傍晚—夜间的能见度不足500 m。丹东站温度、相对湿度、能见

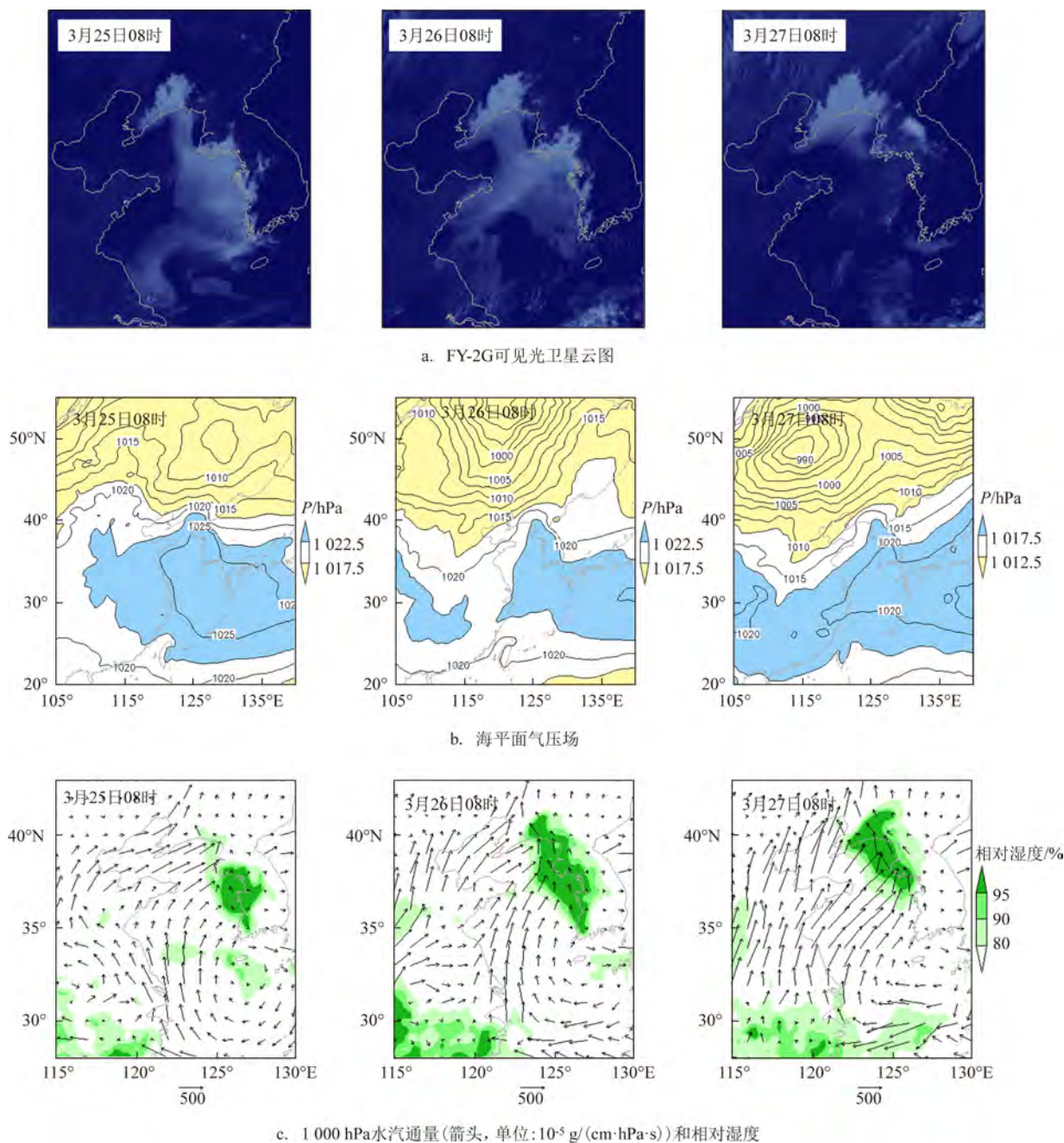


图3 2018年3月25—27日黄海海雾过程

Fig.3 Sea fog over the Yellow Sea from 25 to 27 March 2018

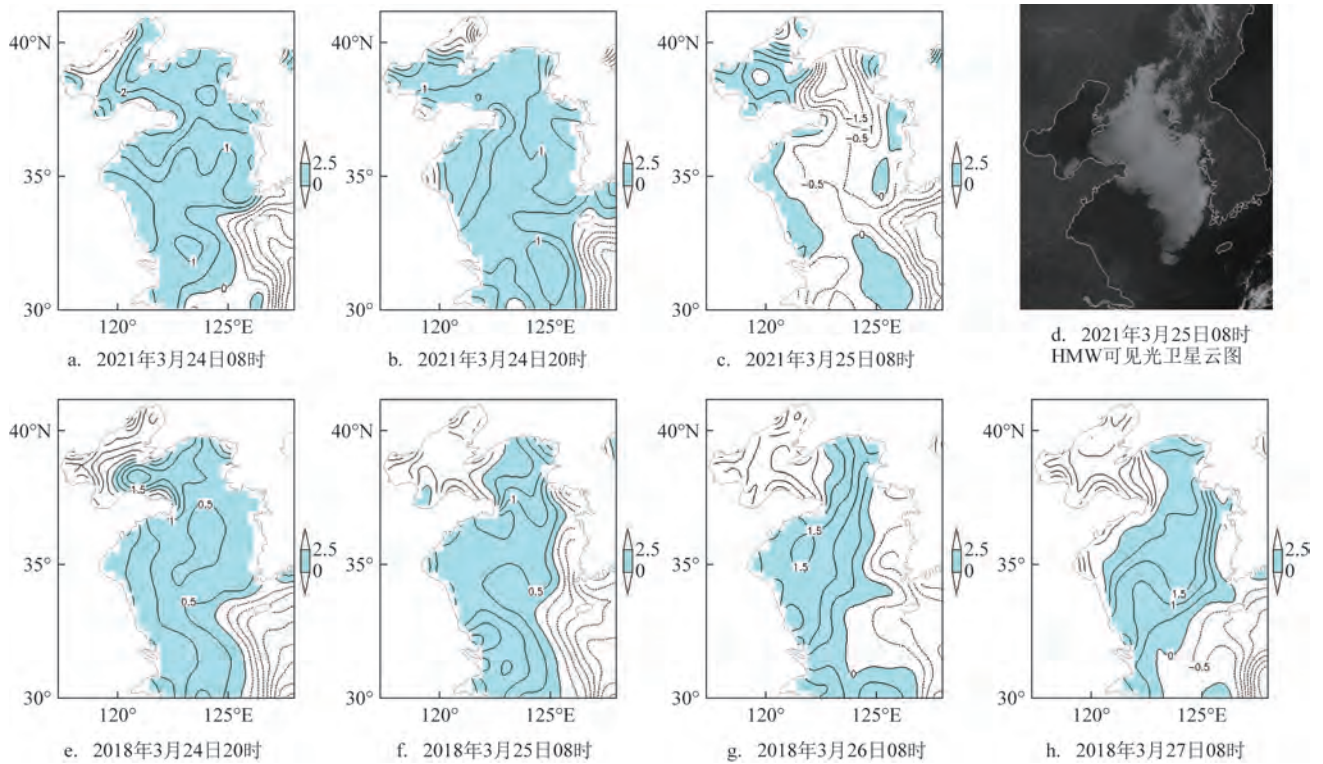
度的变化反映了平流冷却雾降温增湿的物理过程。

4 边界层特征

4.1 逆温层

海雾形成的前提条件是非绝热冷却,该过程一方面会使近地面的相对湿度增大,另一方面会在近

地面形成逆温层。由于缺乏海上测站,丹东站作为海雾频繁登陆地点,利用其温度与露点探空曲线来分析海雾边界层特征,具备一定的代表性。在38个海雾个例中,93.1%的个例的大气低层有明显的逆温出现,6.9%为等温情况。图6为2020年4月30日—5月2日,在黄海及北部沿海地区受海雾影响期间(见图6a),丹东站点的探空演变情况(见图6b)。4



注:除图d外均为气海温差(等值线,单位:°C)

图4 2021年3月25日和2018年3月25—27日黄海海雾过程

Fig.4 Sea fog over the Yellow Sea on 25 March 2021 and from 25 to 27 March 2018

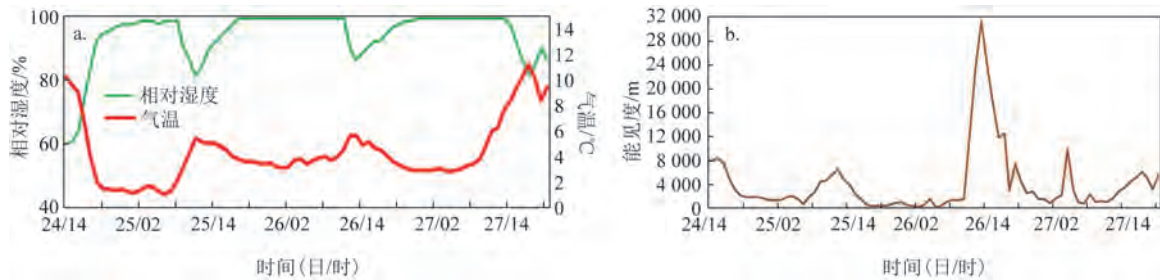


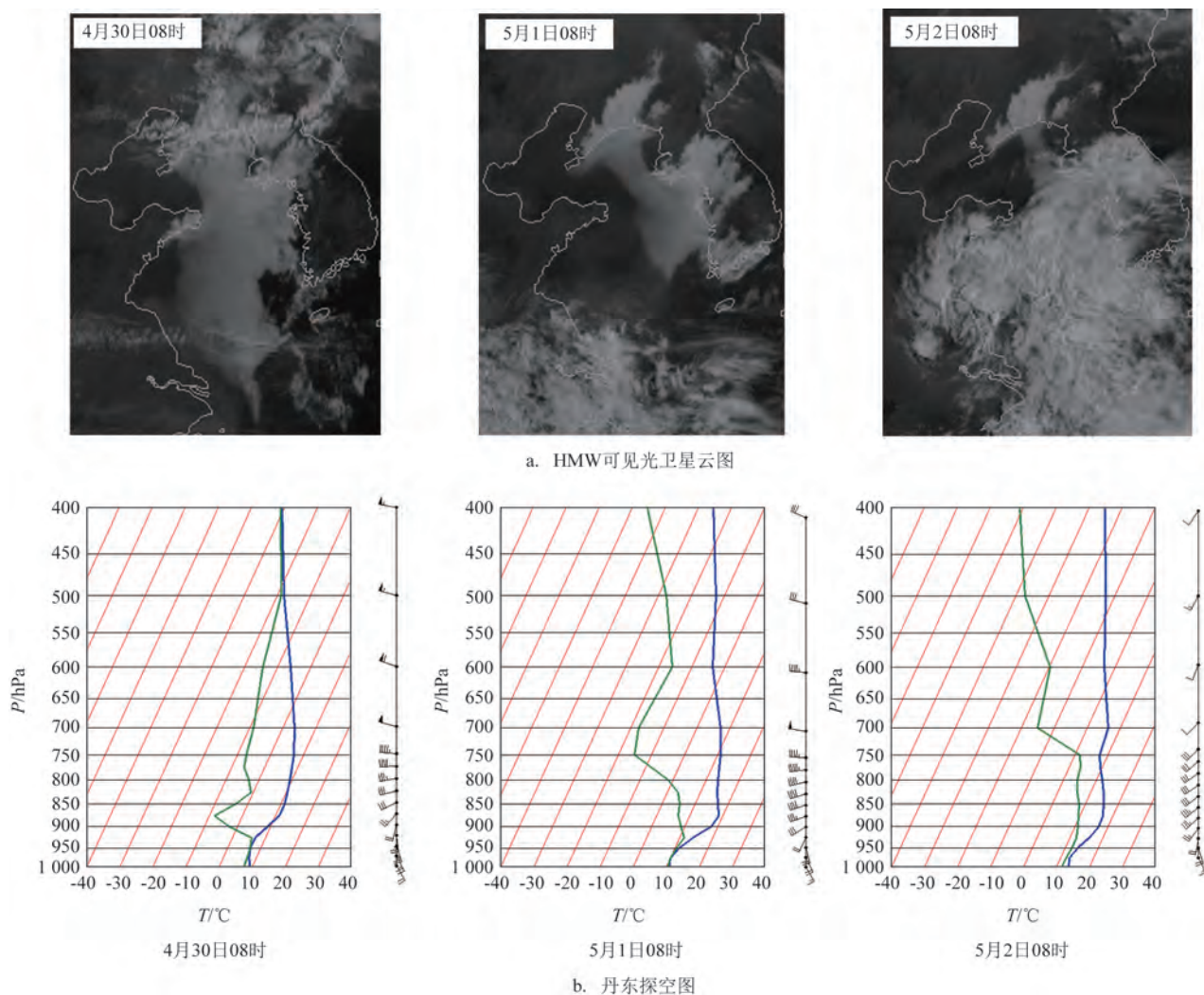
图5 2018年3月24—27日丹东站(54497)相对湿度和气温(a)以及能见度(b)变化曲线

Fig.5 Relative humidity, air temperature (a) and visibility (b) at Dandong Station (54497) from 24 to 27 March 2018

月30日08时逆温层在950~875 hPa之间,逆温层下大气接近饱和;5月1日08时,逆温层厚度增加,强度加大,高度接近850 hPa,逆温温差达到8℃左右,逆温层下大气达到饱和;5月2日00时逆温强度明显减弱,近地面接近等温,逆温层下大气饱和度下降。整个过程说明逆温层伴随着海雾的持续。

对38个海雾个例的统计分析表明,海雾持续时间与逆温温差相关。具体地,海雾持续1~2天时,

逆温平均温差为4.3℃,逆温梯度达0.5℃/100m;持续3天时,逆温平均温差为5.0℃,逆温梯度为0.6℃/100m;持续4天及以上时,逆温平均温差达7.8℃,逆温梯度接近1℃/100m。逆温温差最大值为11℃(出现在2009年5月4日20时),逆温梯度最大值为4.8℃/100m(出现在2021年3月25日20时)。伴随海雾的加强和减弱,逆温温差也有相同的变化趋势。海雾持续时间还与逆温层厚度相



注:蓝线为温度层结线,绿线为露点温度层结线,单位:℃;长风羽代表4 m/s风速,短风羽代表2 m/s风速

图6 2020年4月30日—5月2日海雾过程

Fig.6 Sea fog over the Yellow Sea from 30 April to 2 May 2020

关,当海雾持续1~2天时,逆温层多从925 hPa(高度1 000 m附近)发展到850 hPa(1 500 m附近);海雾持续3天及以上时,逆温层则从近地面1 000 hPa发展到925 hPa甚至850 hPa附近。雾区一般在逆温层以下,丹东站雾顶(饱和层)高度一般在925 hPa(1 000 m附近),最厚达到850 hPa(1 500 m附近)。另外,在海雾影响期间,近地面一般为偏南风,风向随着高度呈顺时针旋转,暖平流显著;近地面1 000 hPa的风速为2~6 m/s。

4.2 暖干层

在38个海雾个例中,90.6%的雾区上空有暖干

层存在。图7为2018年3月25—27日、2020年4月30日—5月2日两次海雾海雾过程(见图3a和图6a的卫星云图)中,丹东站温湿场和风场垂直剖面时序变化图。从图中可以看到,两次强海雾过程共同的特征是雾区上空有暖干层存在。2018年海雾过程的暖干层高度在900~800 hPa之间,中心温度为12℃;2020年海雾过程的暖干层高度为950~750 hPa,中心温度为20℃。在两次海雾过程中,雾区近地面均为偏南风,风向随高度呈顺时针旋转,暖平流显著。

经统计,持续1~3天的海雾过程的暖干层高度多在700~500 hPa,持续4~5天的海雾过程的暖干

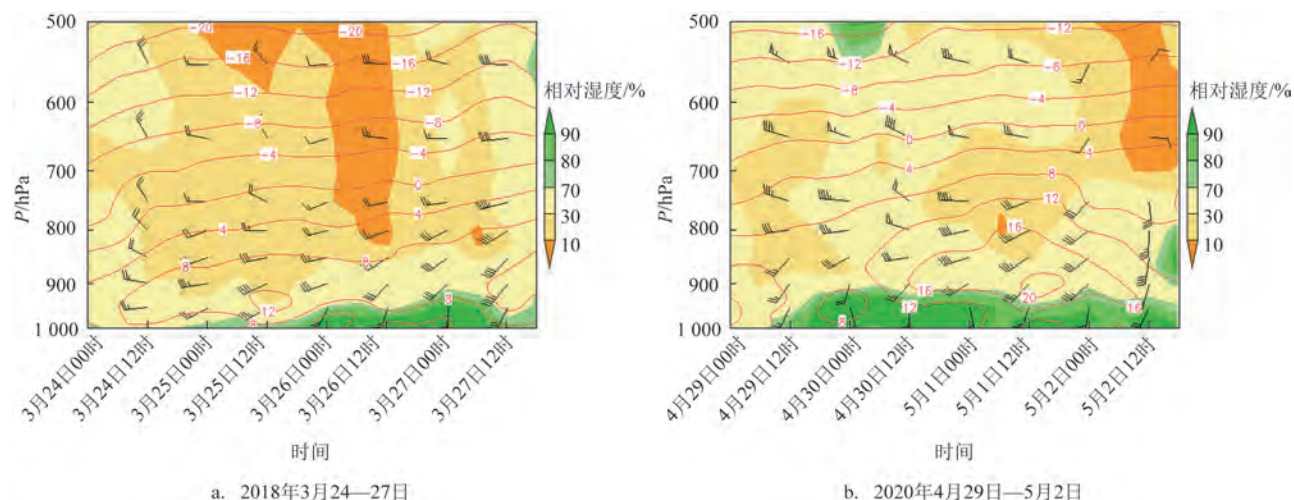


图7 丹东相对湿度、温度(红色实线,单位:℃)、风场(风羽,单位:m/s)垂直剖面时序图

Fig.7 Relative humidity, air temperature (red solid lines, unit: °C), and wind (barb, unit: m/s) at Dandong station

层高度甚至达到200 hPa。暖干层的存在不仅有利于大气低层逆温层的维持,还阻止了低层水汽向高层扩散,使得大气低层持续保持高湿稳定状态。

5 海雾卫星云图特征及成因分析

黄渤海海雾除了在纹理、色调、边界具有一定的特征外^[27-28],形态上也很独特^[29-31]。通过对38个海雾个例卫星云图形态的研究发现,黄渤海海雾的形态特征与大气低层环流场形势、气流方向、水汽输送量及气海温差相关。

5.1 形态特征

按照海雾的区域分布将黄渤海海雾分为黄海海雾、黄渤海海雾及其他。

①黄海海雾(共22个个例,占总数的57.9%)。海雾主要分布在黄海,其中形态完整的黄海海雾(共14个个例,以图8a—c为例)由登陆部分和海上部分组成。登陆部分由于受长白山脉向西南延伸余脉和辽东半岛阻挡,呈东北—西南向分布,雾区北边界呈齿状,与周围山谷、河谷的轮廓一致,南边界则沿黄海北部海岸线分布,雾区形态呈“扇状”;海上部分在黄海北部多呈“条状”、“带状”形态,在黄海中部呈弥散片状,边界沿海岸线分布。形态不完整的黄海海雾有时主要分布在陆地(共6个个例,以图8d为例),有时主要分布在海上或未发生登陆

(共2个个例,以图8e为例),形态呈“团状”或“带状”。

②黄渤海海雾(共3个个例,占总数的7.9%)。海雾不仅分布在黄海海面,还向西漫延进入渤海海峡或渤海(以图8f—g为例)。

③其他(共13个个例,占总数的34.2%)。海雾除登陆辽东半岛外,还向东漫延并在朝鲜半岛登陆(以图8h为例)。

5.2 成因分析

通过对38个海雾个例的水汽输送分布进行分析,发现海雾在卫星云图上的分布范围和形态,除与前面提到的海陆分布、地形、气海温差分布等因素相关外,还与输送水汽的气流方向有关,海雾的分布形态与范围和水汽通量大值区的分布基本一致。图9是与图8卫星云图监测到的海雾过程相对应的1000 hPa的水汽通量分布情况。

从水汽通量分布看,黄海海雾输送水汽的偏南或西南气流在北上过程中,在进入黄海北部后有沿朝鲜半岛西海岸线发生逆转后到达40°N的情况(见图9a—e),海雾基本顺沿气流的方向分布(见图8a—e),或分布在黄海和朝鲜半岛以西海域,或登陆后分布在辽东半岛东部和丹东地区。当输送水汽的气流为东—东南风时(见图9f—g),海雾进入渤海海峡和渤海(见图8f—g);当输送水汽气流以偏西风为主时(见图9h),海雾则向东漫延至朝鲜西海岸甚

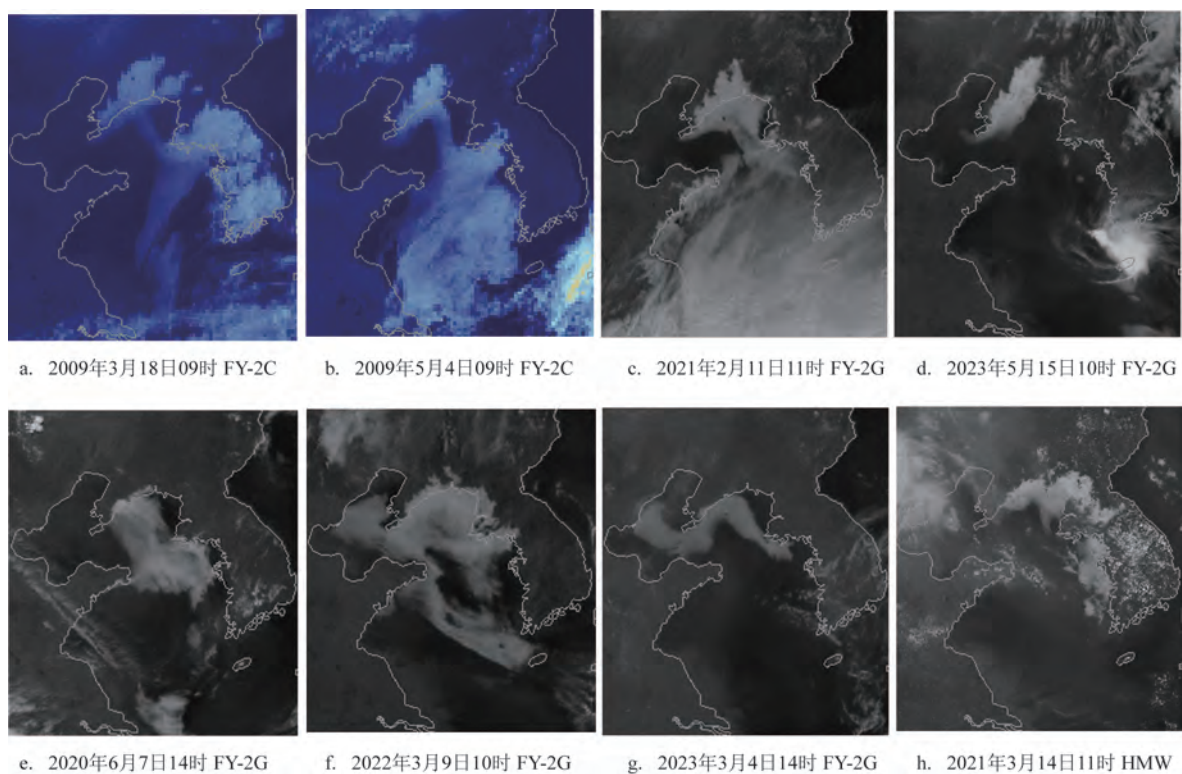
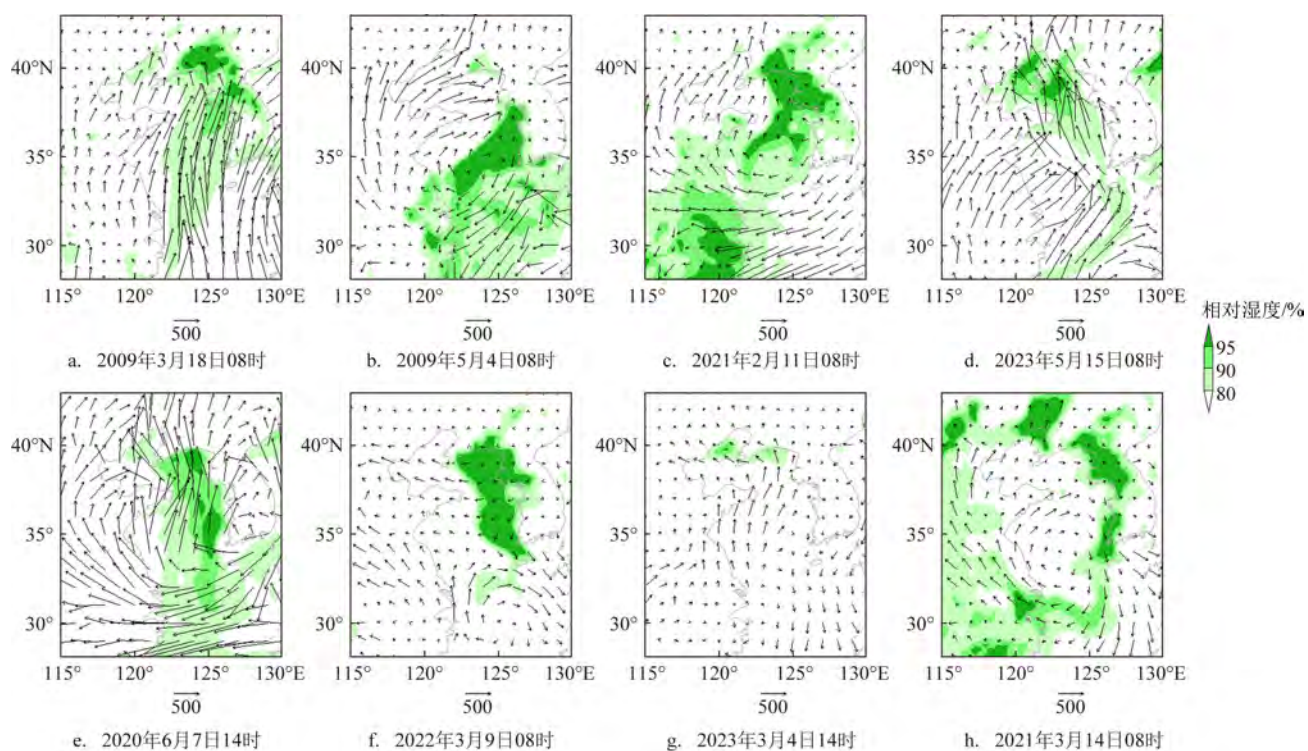


图8 海雾可见光卫星云图

Fig.8 Sea fog imagery monitored by satellite

图9 1 000 hPa水汽通量(箭头,单位: $10^{-5}\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)和相对湿度Fig.9 1 000 hPa water vapor flux (arrow, unit: $10^{-5}\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$) and relative humidity

至在朝鲜半岛登陆(见图8h)。史得道等^[32]在对一次黄渤海海雾过程进行分析后指出,海雾的水汽条件源于黄海输送,在偏东风作用下输送入渤海。经统计,在38个海雾个例中,西南风占63.2%,南风占28.9%,东南风仅占7.9%,由此可见,渤海海雾较少的原因一方面是由于山东半岛、辽东半岛对西南风、南风的阻挡^[2],另一方面是偏东或东南气流较少,两个因素均使得黄海形成的海雾难以进入渤海海峡和渤海区域。

6 结论与讨论

本文通过选取38个典型的黄渤海海雾个例,对黄渤海海雾的气候特征、形成条件、边界层和卫星云图特征等进行了分析。结论如下:

①黄渤海海雾绝大多数在黄海生成,渤海生成的较少。受长白山脉向西南延伸的支脉或余脉阻挡,海雾在黄海北部沿海登陆后主要分布在辽东半岛东部及丹东地区,日变化较小。受海面温度月变化与大气环流形势演变的影响,海雾主要出现在2—7月。

②黄渤海海雾发生在有利的水汽和温度条件下,即当黄渤海处于大陆入海高压或海上高压西部,且高压西侧或西北侧有低压系统配合时,来自低纬度的暖湿水汽由南向北输送并到达40°N附近或以北;水汽主要来源于东海北部和黄海。在海雾生成前的24~12 h,黄渤海海域的气海温差阈值范围在0~2.5℃之间。大多数情况下渤海不具备形成平流冷却雾的温度条件。

③海雾的持续时间不仅与稳定的环流形势、有利的天气系统配置和适宜的气海温差维持时间有关,也与逆温层、暖干层的厚度和高度相关,厚度愈大,高度越高,海雾的持续时间愈长;伴随海雾的加强和减弱,逆温温差有相似的变化过程。

④海雾在卫星云图具有一定的形态特征,除受地形、海陆分布影响外,还与水汽输送方向及满足海雾形成的气海温差分布有关。

本文主要从气象角度对黄渤海海雾的形成条件进行了分析,今后应利用海洋环境数据、直接观测的海雾属性和动态数据对海雾进行更深入的研究,并加强对海雾微物理过程的认识。此外,渤海

海雾较少,不仅与渤海湾的水文特征有关,还与地形和输送水汽的气流方向有关。对于渤海海雾的特征和成因,还需要做进一步分析。

参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
WANG B H. Sea fog[M]. Beijing: China Ocean Press, 1983.
- [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.
- [3] 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 一次南海海雾微物理结构个例分析[J]. 大气科学, 2013, 37(3): 552-562.
ZHANG S T, NIU S J, ZHAO L J. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(3): 552-562.
- [4] 周群, 黄焕卿, 邓小花, 等. 珠江口海雾天气气候特征及成因分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(1): 1-10.
ZHOU Q, HUANG H Q, DENG X H, et al. The characteristics and causes analysis of sea fog over the Pearl River Estuary[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(1): 1-10.
- [5] 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.
- [6] 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 等. 中国海雾研究简要回顾[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 20-28.
FU G, LI P Y, ZHANG S P, et al. A brief overview of the sea fog study in China[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(2): 20-28.
- [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] 黄彬, 毛冬艳, 康志明, 等. 黄渤海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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 孙连强, 曹士民, 柳淑萍, 等. 丹东附近海域海雾的特征及其海洋、大气背景条件分析[J]. 海洋预报, 2006, 23(3): 22-29.
- SUN L Q, CAO S M, LIU S P, et al. Characteristic of sea fog in Dandong sea area and analysis of it's atmospheric and oceanic background conditions[J]. Marine Forecasts, 2006, 23(3): 22-29.
- [12] 汤鹏宇, 何宏让, 阳向荣. 大连海雾特征及形成机理初步分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 62-69.
- TANG P Y, HE H R, YANG X R. Characteristics and generating mechanism of sea fog in Dalian of Liaoning province[J]. Arid Meteorology, 2013, 31(1): 62-69.
- [13] 曹祥村, 邵利民, 李晓东. 黄渤海一次持续性大雾过程特征和成因分析[J]. 气象科技, 2012, 40(1): 92-99.
- CAO X C, SHAO L M, LI X D. Analysis of characteristics and causes for a sustained heavy fog over Yellow Sea and Bohai Sea [J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(1): 92-99.
- [14] 黄彬, 王靖, 陆雪, 等. 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[J]. 气象, 2014, 40(11): 1324-1337.
- HUANG B, WANG Q, LU X, et al. Mechanism of a sea fog event over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(11): 1324-1337.
- [15] 杨悦, 高山红. 黄渤海海雾天气特征与逆温层成因分析[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(6): 19-30.
- YANG Y, GAO S H. Analysis on the synoptic characteristics and inversion layer formation of the Yellow Sea fogs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(6): 19-30.
- [16] 史得道, 吴振玲, 罗凯, 等. 2015-04-28渤海海雾形成过程中的海气相互作用分析[J]. 热带气象学报, 2018, 34(3): 324-331.
- SHI D D, WU Z L, LUO K, et al. Analysis of air-sea interaction on the formation of april 28, 2015 sea fog over Bohai Sea[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(3): 324-331.
- [17] 王冠岚, 孙莎莎, 孙柏堂, 等. 2018年6月青岛海域一次海雾过程分析[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(1): 29-35.
- WANG G L, SUN S S, SUN B T, et al. Analysis of a sea fog event along the coast of Qingdao in June 2018[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2021, 44(1): 29-35.
- [18] 柳龙生, 黄彬. 一次入海气旋在黄渤海造成的海雾过程分析[J]. 高原气象, 2022, 41(6): 1460-1470.
- LIU L S, HUANG B. Analysis of a sea fog event caused by an extratropical cyclone over the Yellow Sea and the Bohai Sea[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(6): 1460-1470.
- [19] 胡瑞金, 董克慧, 周发琇. 海雾生成过程中平流、湍流和辐射效应的数值试验[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(2): 156-165.
- HU R J, DONG K H, ZHOU F X. Numerical experiments with the advection, turbulence and radiation effects in the sea fog formation process[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(2): 156-165.
- [20] 程相坤, 程航, 徐杰, 等. 一次黄海海雾成因分析及数值模拟试验[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 15-23.
- CHENG X K, CHENG H, XU J, et al. Forming reason of a sea fog event and its numerical simulation over the Yellow Sea[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(6): 15-23.
- [21] 王锐, 刘彬贤. 一次弱冷空气对渤海海雾影响的数值模拟研究[J]. 海洋预报, 2021, 38(6): 82-92.
- WANG R, LIU B X. Numerical simulation study of the influence of cold air on sea fog in the Bohai[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(6): 82-92.
- [22] 姚学祥. 天气预报技术与方法[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- YAO X X. Weather forecasting techniques and methods[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.
- [23] 中国近海海洋气候监测月报[J]. 国家海洋环境预报中心, 2022, 109(1): 25.
- China Offshore Ocean Climate Monitoring Bulletin[J]. National Marine Environmental Forecasting Center, 2022, 109(1): 25.
- [24] 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]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(3): 28-37.
- [25] 曲平, 解以扬, 刘丽丽, 等. 1988—2010年渤海湾海雾特征分析[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 285-293.
- QU P, XIE Y Y, LIU L L, et al. Character analysis of sea fog in Bohai Bay from 1988 to 2010[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(1): 285-293.
- [26] 郑怡, 李冉, 史得道, 等. 渤海中西部近海与沿岸海雾的特征分析[J]. 海洋预报, 2016, 33(6): 74-80.
- ZHENG Y, LI R, SHI D D, et al. Characteristics of offshore and coastal sea fog in the mid-west Bohai Sea[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(6): 74-80.
- [27] 郑新江. 黄海海雾的卫星云图特征分析[J]. 气象, 1988, 14(6): 7-9.
- ZHENG X J. On satellite imagery features of sea fogs over the Yellow Sea[J]. Meteorological Monthly, 1988, 14(6): 7-9.
- [28] 肖艳芳, 张杰, 崔廷伟, 等. 海雾卫星遥感监测研究进展[J]. 海洋科学, 2017, 41(12): 146-154.
- XIAO Y F, ZHANG J, CUI T W, et al. Review of sea fog detection from satellite remote sensing data[J]. Marine Sciences, 2017, 41(12): 146-154.
- [29] 傅刚, 王菁茜, 张美根, 等. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究——以2004年4月11日为例[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 720-726.
- FU G, WANG J Q, ZHANG M G, et al. An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow Sea on 11 April, 2004[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(5): 720-726.

- [30] 黄彬, 许健民, 史得道, 等. 黄渤海一次持续性海雾过程形变特征及其成因分析[J]. 气象, 2018, 44(10): 1342-1351.
HUANG B, XU J M, SHI D D, et al. Deformation feature of a continuous sea fog process over the Yellow Sea and Bohai Sea and its genesis analysis[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(10): 1342-1351.
- [31] 曹宗元, 刘飞, 郭文明, 等. 黄、东海春季海雾“楔”形雾区分布特征及其成因分析[J]. 气象与环境科学, 2022, 45(4): 45-52.
CAO Z Y, LIU F, GUO W M, et al. Analysis on formation and characteristics of sea fog events with wedge shape over the Yellow and East China Sea in spring[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2022, 45(4): 45-52.
- [32] 史得道, 黄彬, 吴振玲. 2016年春季一次黄渤海明显海雾过程的大气海洋特征分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(5): 85-92.
SHI D D, HUANG B, WU Z L. Analysis of atmosphere and sea characteristics under an obvious sea fog process over the Bohai and Yellow Sea in spring 2016[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(5): 85-92.

Diagnosis and analysis of sea fog over the Yellow Sea and Bohai Sea and its satellite cloud image features

GAO Songying¹, SHI Yueqin², ZHAO Tingting³, WANG Yuqi¹, MENG Xin¹

(1. Dandong Meteorological Observatory, Dandong 118000, China; 2. Weather Modification Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Rongcheng Meteorological Bureau, Xiong'an 071700, China)

Abstract: Utilizing the MICAPS conventional data, NOAA PSL analysis data, ECMWF ERA5 reanalysis data and satellite cloud images, the weather, formation and persistence conditions, as well as boundary layer and satellite cloud image characteristics, of sea fog over the Yellow Sea and Bohai Sea are analyzed based on 38 typical sea fog events over the study area from 2009 to 2023. The results show that the vast majority of sea fog over the Yellow Sea and Bohai Sea form over the Yellow Sea, and distribute over the eastern Liaodong Peninsula and the Dandong region after landfall. Its seasonal distribution characteristics closely relate to monthly evolution of sea surface temperature. The main conditions for sea fog formation include: firstly a favorable weather situation with northward transport of warm and humid airflow from south, secondly air-sea temperature difference within threshold range of 0~2.5 °C during a period of 6~24 hours before the formation of sea fog. The formation of sea fog relates to the decrease of air temperature and the increase of air humidity, and the persistence of sea fog relates to the thickness, temperature difference and gradient of inversion layer with a warm and dry layer above the foggy area. Affected by land-sea distribution, terrain, and water vapor transport pattern, on site sea fog distribution are different from those on satellite cloud images. This work also studies the reasons why sea fog events over the Bohai Sea are less than those over the Yellow Sea.

Key words: the Yellow Sea and Bohai Sea; sea fog; satellite cloud image