

# 2016年春季一次黄渤海明显海雾过程的大气海洋特征分析

史得道<sup>1</sup>, 黄彬<sup>2</sup>, 吴振玲<sup>3</sup>

(1.天津海洋中心气象台,天津 300074; 2.国家气象中心,北京 100081;3.天津市气象台,天津 300074)

**摘 要:** 利用FY卫星资料、自动气象站逐小时观测资料、ERA 0.5°×0.5°再分析资料对2016年3月3—5日黄渤海明显海雾过程形成机制进行了分析,结果发现:逆温层、低层上升中层下沉的配置提供了有利的层结条件;水汽条件源于黄海输送,南到东南风将暖湿空气向北输送,然后在偏东风作用下输送入渤海;降温条件源于海气界面湍流热交换,大气向海洋输送的湍流热通量使得湿空气降温凝结,达到饱和形成海雾。

**关键词:** 海雾;水汽输送;逆温;海气温差;湍流热通量

**中图分类号:** P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)05-0085-08

## 1 引言

海雾是中国近海需要高度关注的灾害性天气之一,海雾发生时海面水平能见度小于1 000 m,对海上船舶通航、石油平台作业、渔业捕捞及近岸船舶出入港等都造成很大影响。黄渤海是海雾多发海域<sup>[1-2]</sup>,近些年来的研究多集中在统计分析<sup>[3-9]</sup>、数值模拟<sup>[10-20]</sup>、海雾预报方法<sup>[21-24]</sup>等。国内气象部门海雾预报准确率比较低,主要原因之一是海雾形成的内在机理了解不够充分。海雾的形成过程特别复杂,既与下垫面海洋特征有关,比如海温、海-气温差、沿岸流等<sup>[6-7,12,25-27]</sup>,又与边界层内气象条件有关,比如有利的动力热力条件配置<sup>[28]</sup>、有利的大气层结特征和水汽条件等<sup>[26]</sup>,致使海雾预报成为海洋气象预报重点难点之一。本文通过分析黄渤海春季一次持续时间较长的海雾过程的大气特征、下垫面海洋特征和海气交换特征,揭示海雾形成的一些必要条件、影响因素及海气交换特点,对提高黄渤海海雾形成机理的认识和预报能力有一定的促进作用。

## 2 资料

本文所用资料包括2016年3月2—5日FY2E卫星多通道数据、3月2日20时(北京时,下同)—5日20时渤海A平台、大连、成山头自动气象站逐小时观测数据、ERA-Interim 0.5°×0.5°再分析数据。其中卫星数据来自国家卫星气象中心;气象站观测数据来自天津市气象信息中心,包括地面气温、相对湿度、能见度和10 m风向风速;ERA再分析数据来自网络下载,包含的物理量有海表面温度、2 m气温、2 m相对湿度、10 m风向风速、高空各层次相对湿度、风向风速、气温和垂直速度。

## 3 海雾实况

### 3.1 卫星监测

2016年3月2日夜间—3月5日,黄渤海出现一次明显海雾天气过程。地面天气图显示海雾首先在黄海部分海域出现,然后向西向南扩展。2日夜间—3日夜间是海雾发展阶段,4日白天到夜间是海

雾维持并加强阶段,5日早上开始受冷空气影响海雾逐渐消散。海上站点观测资料非常缺少,卫星资料就成为连续监测海雾形态演变的有力工具<sup>[29-31]</sup>,白天可利用可见光云图<sup>[11,26]</sup>,夜间利用双通道差值法<sup>[17,26,32]</sup>,本文采用Gao等<sup>[32]</sup>提出的标准,夜间黄渤海海雾对应的卫星IR4、IR1红外通道亮温差为 $-5.5\sim -2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。可以发现3月3日凌晨海雾首先出现在黄海北部和中部海域,3日白天海雾在黄海范围扩大,呈长条状位于黄海海面上空,夜间海雾向渤海扩展,首先在辽东半岛附近海域成雾,然后由辽东湾向西向南扩展到渤海中部和渤海湾。4日白天到夜间海雾在黄渤海海域维持,因4日中午以后有云层在渤海上空覆盖并向东移动,致使云层下面的海雾难以被监测到。5日08时后在冷空气作用下海雾从西向东逐渐消散。

### 3.2 自动气象站资料分析

海雾形成前后黄渤海位于低压前部高压后部,盛行南到东南风,对海雾形成较为有利。成山头(54776)、大连(54662)、渤海A平台(54646)3个气

象站(图2)观测资料显示(见图3),成山头在3月3日04时出现能见度为100 m的浓雾,之后一直维持,最小能见度为0,直到3月5日下午才升高至3 km以上。大连站在3日20时能见度减小至2 km,3日夜间能见度继续降低,4日08时能见度为400 m。之后海雾维持,最小能见度200 m,直到5日11时能见度升高至8 km。大连站气温在3日14时之后迅

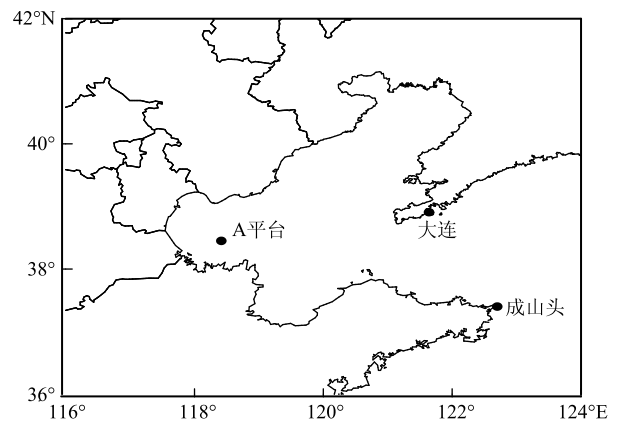


图2 渤海A平台、大连、成山头气象站所在位置示意图

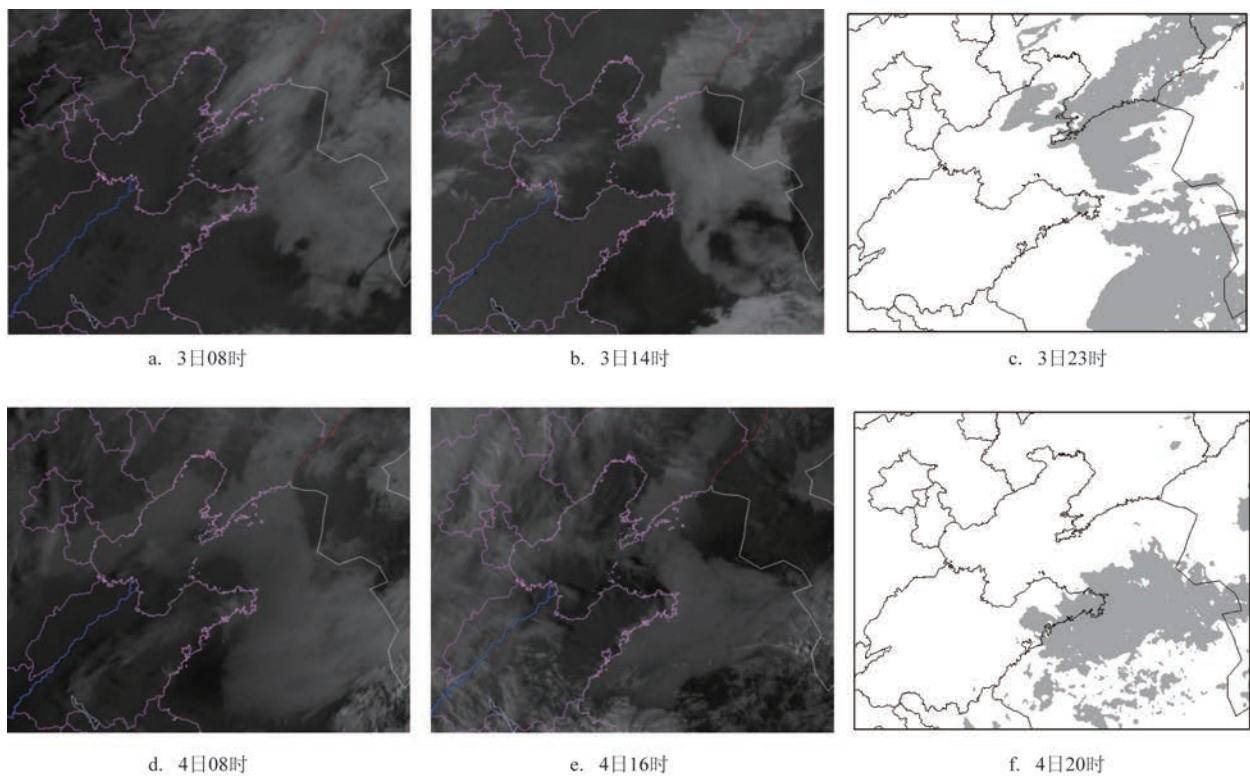


图1 2016年3月3日和4日各时段海雾演变示意图

速下降,相对湿度也明显增大,逐渐形成海雾。从3日夜间到5日早上,相对湿度基本都在95%以上,是海雾维持阶段。渤海西部A平台3日前半夜气温迅速下降,由3日20时16℃下降到4日02时1.8℃,湿度也由42%增大到97%,虽没有能见度观测,但此时雾已经形成。之后气温又下降到1℃以内,湿度增大到100%,4日08时能见度已经减小至200 m。表明在3日夜间由于气温下降湿度增大,大气饱和和形成海雾。一直到5日08时相对湿度都在100%,气温缓慢上升但变化幅度较小,是海雾维持阶段。5日08时之后湿度减小到57%,能见度开始好转。风场变化来看,A平台3月2—3日一直为偏南风,3日20时之后转为偏东风,风速在4~8 m/s之间;大

连站3月2—4日则为东到东南风,风速在2~4 m/s之间;成山头2—4日为偏南风,风速在4~8 m/s之间。说明海雾形成时风速既不能太大,也不能是静风,在2~4级最为合适。

## 4 大气特征分析

### 4.1 温湿特征

近海面相对湿度和风场显示(图略)2016年3月3日08时黄海海域存在90%以上大湿区,与可见光云图显示雾区范围较为接近。3日20时大湿区范围扩大,到4日08时黄海海域湿度增大到95%以上,并且90%以上大湿区从辽东半岛附近海域向西南

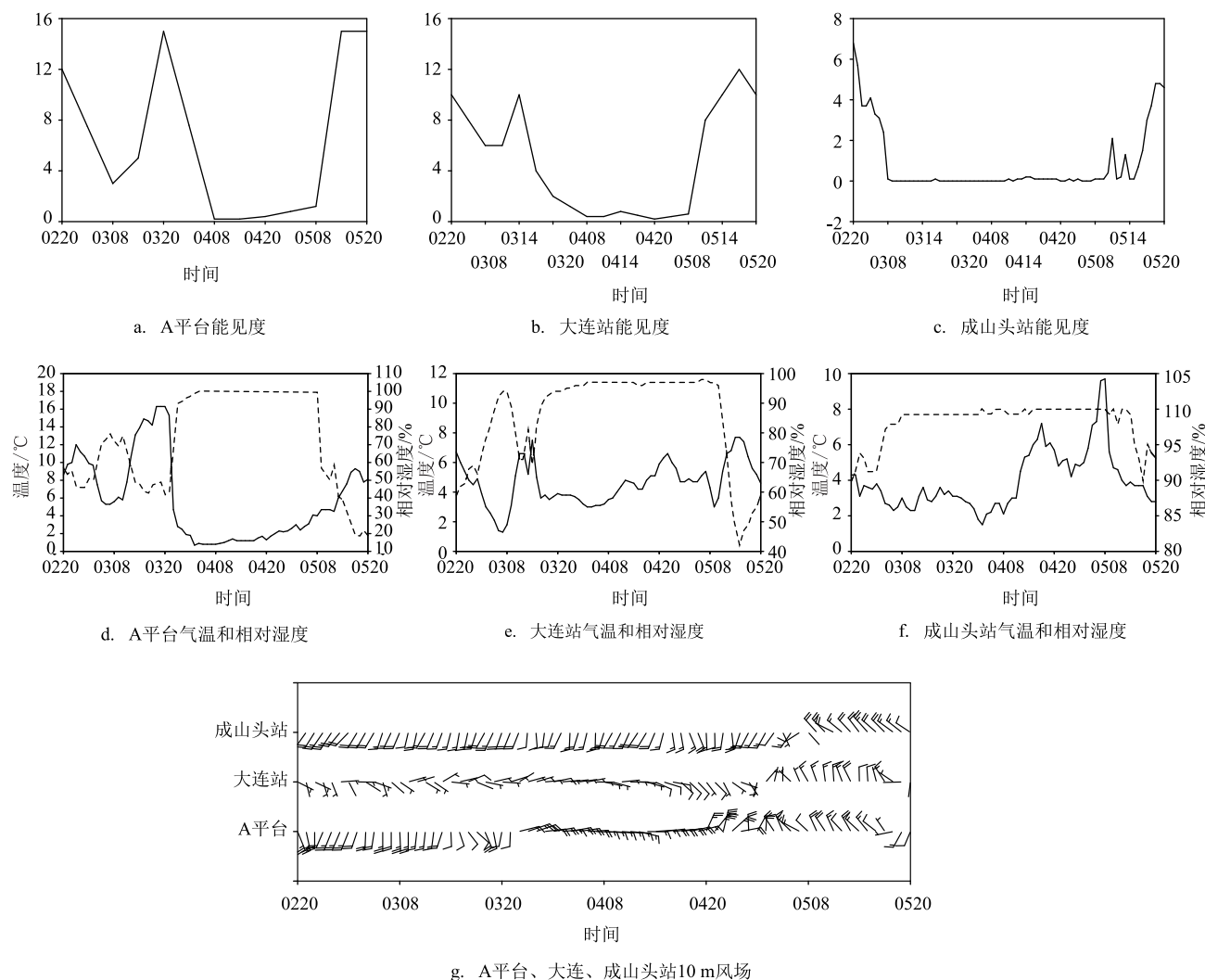


图3 2016年3月2日20时—5日20时渤海A平台、大连、成山头能见度(单位:km)、气温和相对湿度、10 m风场随时间演变示意图(0220表示2日20时)



扩展到渤海湾,这也与海雾先在辽东半岛附近海域生成然后向渤海湾扩展的变化形势较为一致。3月3—4日黄海一直为南到东南风,渤海则由偏南风转为东到东北风,有利于黄海上空水汽越过渤海海峡和辽东半岛输送到渤海上空。975 hPa 温度平流和水汽通量分布(见图4)显示黄渤海存在明显暖平流输送,且在黄海南部存在由南向北的水汽输送大值区,使得3日白天到夜间渤海上空水汽输送明显加强,有利于渤海水汽的积聚和雾的形成。4日20时黄海东南风继续加强,带来更加充沛的水汽,有利于海雾的维持和发展。另外3月3—4日黄渤海上空925 hPa 以下存在明显逆温现象(见图5),且逆温层逐渐增厚,最高抬升至925 hPa,有利于海面上空暖湿空气的积聚,相对湿度的变化也印证了这一点,80%以上高湿区由黄海向西、向上扩展,湿层增厚,在925 hPa 附近形成明显干暖盖,干暖盖下面形

成海雾。同时发现黄海的湿层比渤海要深厚,表示黄海的雾更浓,雾顶高度也更高。

#### 4.2 动力条件

从925 hPa 和1 000 hPa 风速差来看(见图6),3月3—4日,黄海雾区内925 hPa 风速一直小于1 000 hPa,3月3日渤海只有中部海域925 hPa 风速小于1 000 hPa,到4日08时除山东半岛北部海域外渤海其他海域925 hPa 风速都小于1 000 hPa,并且风向从低到高是由东南风顺转为西南风,这种垂直方向上的风切变引起的上升运动有利于低层水汽向上抬升。黄海雾区3月4日风切变要大于3日,可使得更多的水汽向上抬升,从而引起更加深厚的湿层。大连站(见图7)时空剖面图显示在3月2日20时起对流层低层即为上升运动,但湿度条件差,不易成雾。3日后半夜开始近地面层湿度明显增加,同时

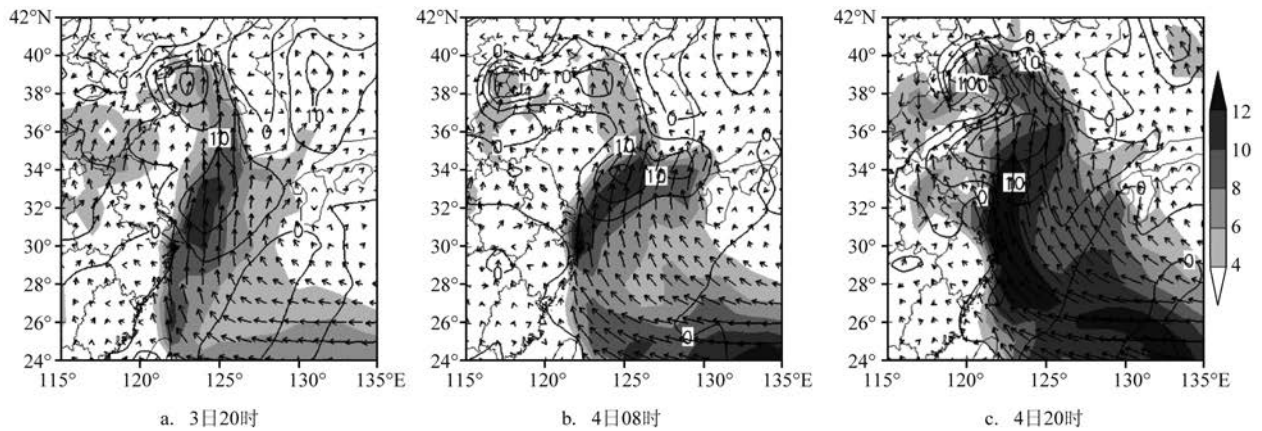


图4 2016年3个时间的975 hPa水汽通量(阴影,单位: $\text{g}/(\text{m}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ )和温度平流(等值线,单位: $1\times 10^{-5}\text{ K/s}$ )

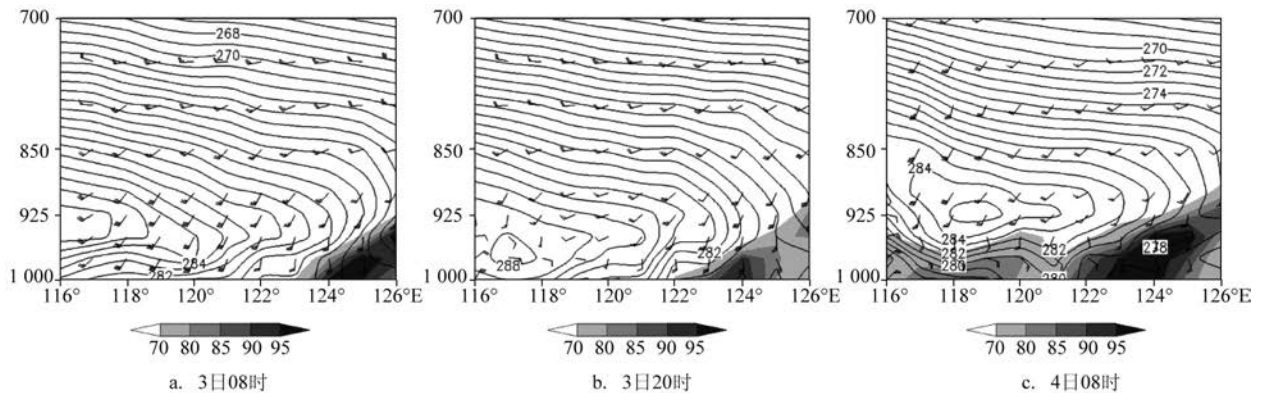


图5 2016年3个时间相对湿度(阴影,单位:%)、温度(等值线,单位:K)、风场沿39°N剖面图

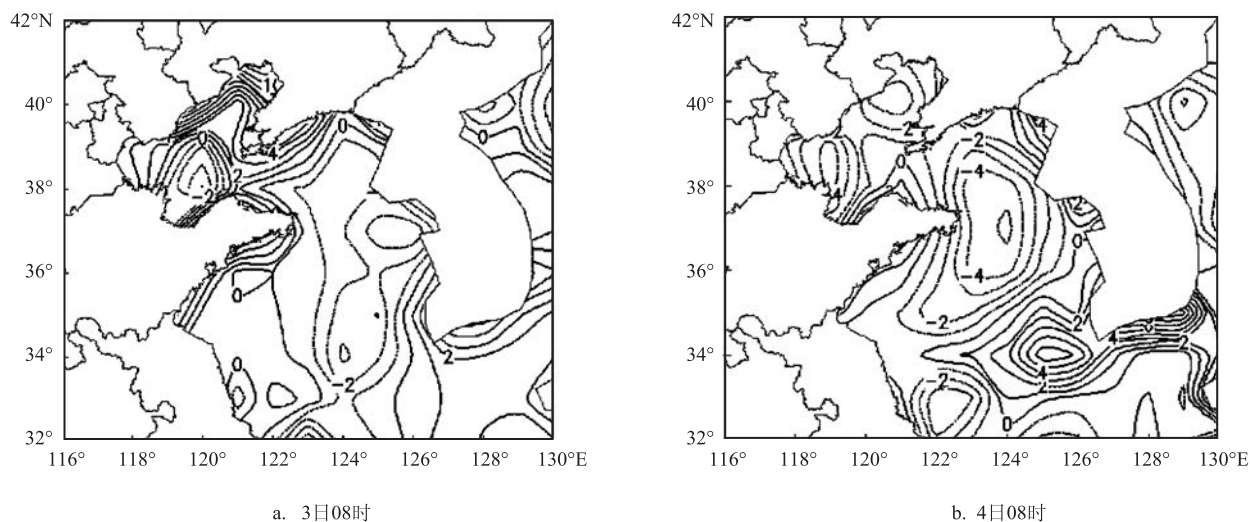


图6 2016年两个时间的925 hPa和1 000 hPa风速差(单位:m/s)

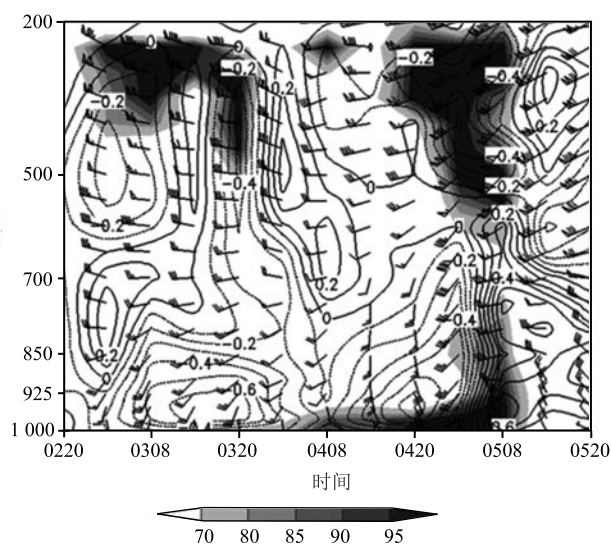


图7 2016年3月2日20时—5日20时大连站垂直速度(等值线,单位:Pa/s)、相对湿度(阴影,单位:%)和风场剖面图(0220表示2日20时)

850 hPa以下为上升运动,而对流层中层为下沉运动,下沉增温易于在近海面层和对流层中下层之间形成干暖盖<sup>[21]</sup>,这种低层上升中层下沉的配置有利于低层稳定层结的建立和维持。4日20时之后随着低层风速增大和上升运动加强,90%以上的湿层也增厚,意味着雾向上伸展高度更高。5日08时之后冷空气开始影响,850 hPa以下风场转为西北风,600 hPa以下都为下沉运动,湿度迅速减小,雾

逐渐消散。

## 5 海洋特征分析

### 5.1 海温特征

海雾形成阶段黄渤海海温变化幅度很小,基本在1℃以内,海气温差主要由气温变化所决定。从黄渤海海气温差来看(见图8),2016年3月3—4日,黄渤海雾区内气温高于海温,海气温差基本在4℃以内。3日08时雾主要出现在黄海,在渤海和海峡也有海气温差小于4℃的区域但并没有形成海雾,可见合适的海气温差是雾形成的必要条件而不是充分条件,另外还要考虑到湿度条件、稳定度条件等。3日夜间海气温差小于4℃的区域扩展到渤海海峡和渤海,配合有利的湿度条件,形成海雾。

### 5.2 海气交换特征

王彬华<sup>[1]</sup>提出,当海面饱和水汽压大于实际大气水汽压时,可以引起海水蒸发。2016年3月3日08时黄海、渤海海峡、渤海大部分海域海面饱和水汽压与实际大气水汽压之差大于0,可以引起海面蒸发,但3日14时之后一直到4日夜间,海雾发展、维持过程中,黄渤海海面饱和水汽压和实际大气水汽压之差都小于0,海面蒸发被抑制,不利于对海雾形成提供水汽,此次海雾形成所需水汽基本来自黄海平流输送。



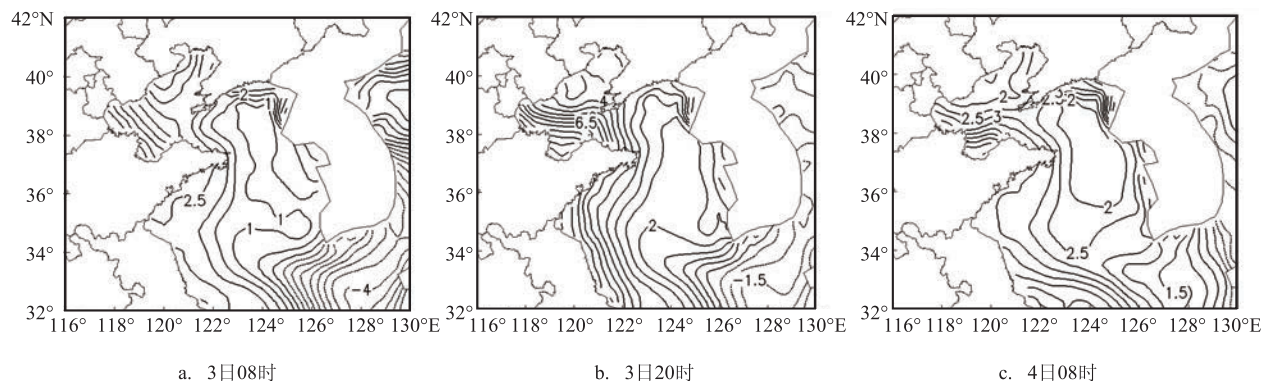


图8 2016年3个时间的海气温差(单位:℃)

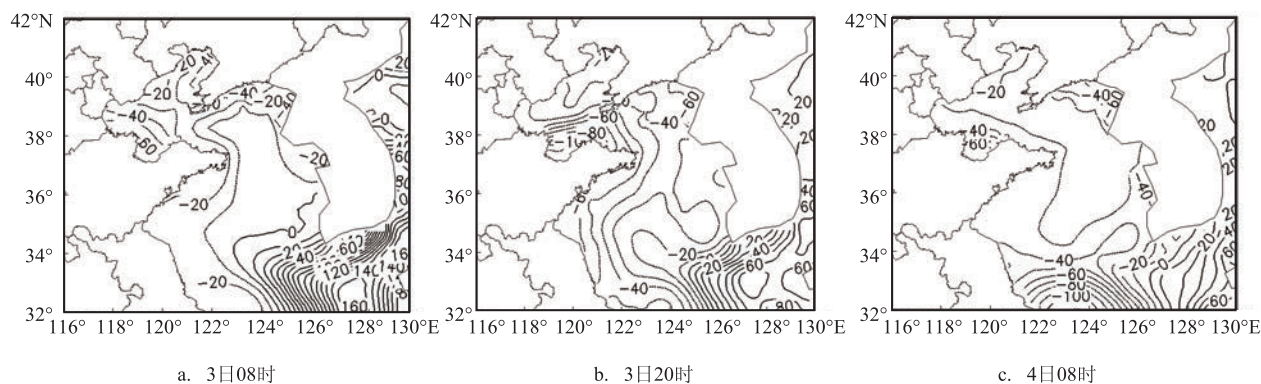


图9 2016年3个时间海气界面净湍流热通量(单位:W/m²,热通量方向向上为正,向下为负)

为探讨海雾过程中的降温效应以及海洋与大气之间的湍流热交换,利用块体法<sup>[33-35]</sup>计算了黄、渤海海气界面处的湍流热通量,湍流热通量包含感热通量和潜热通量两部分,感热通量主要由于海气温差引起的海洋大气之间热输送,潜热通量主要是由于海水蒸发引起的热输送。感热通量和潜热通量的计算公式分别为:

感热通量:

$$Q_s = \rho c_p c_h (T_s - T_a) u_{10} \quad (1)$$

潜热通量:

$$Q_l = \rho L c_e (q_s - q_a) u_{10} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为空气密度,  $c_p$  为空气定压比热,  $c_h$  为热量交换系数,  $c_e$  为水汽交换系数,  $L$  为水汽的蒸发潜热,  $T_s$  为海表面温度,  $T_a$  为2 m处气温,  $q_s$  为海气界面处空气比湿,  $q_a$  为2 m处空气比湿,  $u_{10}$  为

10 m处水平风速。

由于海水蒸发被抑制,此次海雾过程中潜热通量由大气输送向海洋。同时在海雾形成、发展、维持过程中,气温高于海温,感热通量也是由大气输送向海洋,这样使得低层大气与海洋之间净湍流热交换为大气向海洋输送热量(见图9),促使平流到海面的暖湿空气冷却凝结形成海雾,是平流冷却雾的形成机制。其中增湿条件来源于黄海上空水汽输送,降温机制来源于海气界面湍流热交换。在有利的水汽条件和降温冷却条件及层结条件下,海雾首先在黄海形成,然后扩展到渤海并维持。之后冷空气来临,海雾逐渐消散。

## 6 小结

本文通过对2016年3月3—5日黄渤海一次平

流冷却雾过程成因进行分析,探讨了海雾形成发展过程中的大气特征、海温特征及海气交换特征,得出以下结论:

(1)黄渤海雾区与相对湿度大于90%、海气温差在4℃以内区域分布较一致;

(2)海雾形成的水汽来源于黄海输送。在黄海南部存在水汽输送大值中心,在南到东南风作用下暖湿空气向北输送,然后在偏东风作用下越过渤海海峡和辽东半岛输送入渤海;

(3)海气界面净湍流热交换为大气输送向海洋,使得湿空气温度降低达到饱和形成海雾;

(4)对流层低层上升中层下沉的配置有利于低层稳定层结的建立和维持,逆温层抬升对形成海雾非常有利。

#### 参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [2] 傅刚, 宋亚娟. 北太平洋海雾发生频率的气候特征[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(10): 35-41.
- [3] 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.
- [4] Huang J, Zhou F X. The cooling and moistening effect on the formation of sea fog in the Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 25(2): 49-62.
- [5] 梁军, 张胜军, 隋洪起, 等. 大连地区大雾特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(1): 28-35.
- [6] 黄彬, 高山红, 宋煜, 等. 黄海平流海雾的观测分析[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 16-23.
- [7] 黄彬, 毛冬艳, 康志明, 等. 黄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.
- [8] 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.
- [9] 杨悦, 高山红. 黄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.
- [10] Gao S H, Lin H, Shen B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(1): 65-81.
- [11] 曹祥村, 邵利民, 易海祁, 等. 一次冬季平流辐射雾过程的观测分析及数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(4): 39-50.
- [12] 张苏平, 任兆鹏. 下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响——观测与数值试验[J]. 气象学报, 2010, 68(4): 439-449.
- [13] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环3DVAR改进黄海海雾数值模拟初始场I: WRF数值试验[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(10): 1-9.
- [14] 李冉, 高山红, 王永明. 直接同化卫星辐射数据的黄海海雾数值试验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(3): 10-20.
- [15] 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.
- [16] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄海海雾WRF参数化方案敏感性研究[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 312-320.
- [17] Wang Y M, Gao S H, Fu G, et al. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea[J]. Weather and Forecasting, 2014, 29(2): 205-225.
- [18] Guo J T, Li P Y, Fu G, et al. The structure and formation mechanism of a sea fog event over the Yellow Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(1): 27-37.
- [19] 杨悦, 高山红. 黄海海雾WRF数值模拟中垂直分辨率的敏感性研究[J]. 气象学报, 2016, 74(6): 974-988.
- [20] 王永明, 高山红. 黄海海雾数值模拟中多普勒雷达径向风数据同化试验[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(8): 1-12.
- [21] 孙连强, 柳淑萍, 高松影, 等. 丹东附近海域海雾产生的条件及天气学预报方法[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(1): 25-28.
- [22] 左迎芝, 梁军. 大连及其近海海雾预报系统[J]. 气象水文海洋仪器, 2010, (3): 9-14.
- [23] 高山红, 王永明, 傅刚. 一次黄海海雾的集合预报试验[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(12): 1-11.
- [24] 高荣珍, 李欣, 任兆鹏, 等. 青岛沿海海雾决策树预报模型研究[J]. 海洋预报, 2016, 33(4): 80-87.
- [25] 孟宪贵, 张苏平. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(6): 16-23.
- [26] 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.
- [27] Li M, Zhang S P. Impact of sea surface temperature front on stratus-sea fog over the Yellow and East China Seas—a case study with implications for climatology[J]. Journal of Ocean University of China, 2013, 12(2): 301-311.
- [28] 闫智超, 李冉, 易笑园, 等. 黄海晚冬一次持续性海雾天气的动力热力特征[J]. 海洋预报, 2013, 30(4): 57-64.
- [29] Li J, Han Z G, Chen H B, et al. Fog detection over China's adjacent sea area by using the MTSAT geostationary satellite data[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(2): 128-133.
- [30] 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.
- [31] 田永杰, 邓玉娇, 陈武喝, 等. 基于FY-2E数据白天海雾检测算法的改进[J]. 干旱气象, 2016, 34(4): 738-742.
- [32] Gao S H, Wu W, Zhu L L, et al. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huang-hai Sea using MTSAT-1R IR data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(2): 23-35.
- [33] Fairall C W, Bradley E F, Rogers D P, et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled-ocean atmosphere response experiment[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(C2): 3747-3764.
- [34] 邵庆秋, 周明煜, 李兴生. 洋面动量、感热和潜热通量计算的研究[J]. 大气科学, 1991, 15(3): 9-17.

[35] 褚健婷, 陈锦年, 许兰英. 海-气界面热通量算法的研究及在中

国近海的应用[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(6): 481-487.

## Analysis of atmosphere and sea characteristics under an obvious sea fog process over the Bohai and Yellow Sea in spring 2016

SHI De-dao<sup>1</sup>, HUANG Bin<sup>2</sup>, WU Zhen-ling<sup>3</sup>

(1. Tianjin Marine Meteorological Center, Tianjin 300074 China; 2. National Meteorological Center, Beijing 100081 China; 3. Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074 China)

**Abstract:** FY satellite data, automatic stations data and NCEP reanalysis data were used to analysis the formation mechanism of the Sea Fog from 3th to 5th March, 2016 over the Bohai and Yellow Sea. The results show that inversion layer, low level rise and middle level sinking provided favorable stratification conditions. Water vapour conditions were derived from Yellow Sea transport. The warm and moist air was transported northward by the south and southeast wind, then was delivered to Bohai Sea by the east wind. Air-sea interface turbulent heat exchange caused cooling. The turbulent heat transported from atmosphere to sea led to moist air cooling down, water vapor condensed and saturated, then Sea Fog formed.

**Key words:** sea fog; water vapor transport; inversion layer; sea-air temperature difference; turbulent heat flux