

黄彬,许健民,史得道,等,2018.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,44(10):1342-1351.

黄渤海一次持续性海雾过程形变特征 及其成因分析*

黄彬¹ 许健民² 史得道³ 柳龙生¹

1 国家气象中心,北京 100081

2 国家卫星气象中心,北京 100081

3 天津市气象局,天津 300074

提 要: 2016年3月3—5日,渤海和黄海大部出现了一次大范围持续性的海上大雾天气过程。本文从卫星遥感监测上分析海雾在生成、发展和消亡三个阶段的形态演变特征。从海洋气象条件上分析了山东半岛东南近海没有海雾和海雾形态演变的原因。结果表明:(1)在海雾形成初期,在山东半岛东南海域有弱气旋性弯曲,大气层结不稳定,地面形势受低压影响,虽受偏南风控制,但湿度小,无水汽辐合,因此在山东半岛东南近海没有雾。(2)海雾的形成与低层的偏南暖湿气流有关,而这个偏南暖湿气流来源于西北太平洋,雾区对应着水汽辐合区,海气温差为0~1℃的区域与雾区吻合,在海雾发展成熟期,雾顶长波辐射导致雾体降温,出现气温低于海温的现象。(3)925~1000 hPa垂直风切变有利于海雾在逆温层内维持和垂直高度上的发展,形成有一定厚度的海雾。

关键词: 海雾,形态变化,气海温差,逆温层,垂直风切变

中图分类号: P412,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.011

Deformation Feature of a Continuous Sea Fog Process over the Yellow Sea and Bohai Sea and Its Genesis Analysis

HUANG Bin¹ XU Jianmin² SHI Dedao³ LIU Longsheng¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074

Abstract: During 3—5 March 2016, a large range of sea fog continuously occurred over most areas of the Yellow Sea and Bohai Sea. In this article, satellite remote sensing monitoring data are used to analyze the morphological variation of the sea fog event during the three stages of generation, development and extinction, and also the lack of sea fog over southeast coast of Shandong Peninsula and the causes for the evolution of the sea fog this time are discussed. The results show that (1) in the early stage of the sea fog formation, there was no sea fog under the southerly wind on the southeast coast of Shandong Peninsula as a result of weak cyclone, instability of atmospheric stratification, and low humidity. Affected by low pressure, no water vapor converged. (2) During the mature period of the sea fog, the air temperature was lower than that on the sea surface. This condition was caused by the long-wave radiation from the top of the fog within the 0—1℃ temperature difference between the air and sea surface. The southerly heating

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206001)、环渤海区域科技协同创新基金(QYXM2016)、国家自然科学基金面上项目(41775048)、国家重点研发计划(2017YFC1501604)和中国气象局气象预报业务关键技术发展专项[YBGJXM(2018)1B]共同资助

2017年3月23日收稿; 2018年5月31日收修定稿

第一作者:黄彬,主要从事海洋气象预报和研究. Email:hbzjbj199928@163.com

low air from the Northwest Pacific Ocean was beneficial to the formation of sea fog. The water vapor convergence was monitored obviously in this area. (3) The effect of vertical wind shear especially from 925 hPa to 1000 hPa was positive to the maintenance of inversion layer and the development of vertical height of the sea fog, eventually forming the typical sea fog with the certain thickness.

Key words: sea fog, morphological variation, temperature difference between air and sea surface, inversion layer, vertical wind shear

引 言

海雾是指在海洋的影响下,在海上、岛屿或沿海地区形成的雾(王彬华,1983;周福等,2015)。海雾和陆地雾一样,也是通过一定的途径使空气达到饱和或过饱和而生成的。海雾的下垫面是海洋,因此它是海洋大气边界层中的水汽凝结现象。王彬华(1983)首先对中国沿海海雾进行了研究。从整个中国近海范围来看,由南海、东海、黄海自南向北雾区范围有明显的逐渐增大的纬度变化。呈逗号相态分布,黄海海雾范围最广,影响整个黄海海域。吴晓京等(2015)从卫星遥感资料分析了黄渤海海雾季节变化的特征,得出黄海海雾的多发期和罕见期分别在4—6、8—11月。黄健(2008)指出水汽输送是海雾形成的物质基础,周发琇等(2004)和王鑫等(2006)分析黄海海雾形成的水汽是从低纬大气输送过来,张苏平等(2008)及张苏平和任兆鹏(2010)通过对海雾低空气象水文条件分析,认为黄海春季的海雾发生在冬季风环流背景下,大气环流提供了暖湿空气的输送条件,具有显著的季风特征,而海面条件相对并不重要。夏季海雾是西风带系统与副热带系统的相互作用,夏季风的强弱影响夏季海雾多寡,海温场对夏季海雾的形成是重要的。在海雾天气分析研究方面,周发琇和刘龙太(1986)、黄彬等(2009)、Fu et al(2012)指出黄海海雾多属于平流冷却雾。杨悦和高山红(2015)把黄海平流海雾划分为4种天气类型。任兆鹏和张苏平(2011)指出了逆温层在海雾形成过程中的重要作用,春季逆温层是非常明显的季节性逆温,属于强稳定层结;夏季温度层结近于等温或者弱逆温,静力稳定度较春季下降,因此有利于湍流的发展,海雾向上发展,夏季海雾的厚度一般大于春季。张苏平等(2014)还分析了黄海海雾过程与东海层云之间存在密切的联系,水汽从东海层云区向北输送,在黄海冷海面作用下逆温层内的下沉导致黄海海雾形成。黄彬等(2014)利用黄渤海一次

大雾过程分析海雾边界层和海气要素特征,分析得出黄渤海气海温差在 $0\sim 2^{\circ}\text{C}$ 是海雾形成的适宜条件;大气边界层垂直温度的变化是上层温度随时间增大高于底层,使逆温层加强并不断抬升或重建,抑制空气垂直对流发展;边界层湍流混合将中上层湿区水汽和雾滴带到近海面层,达到饱和凝结而形成大雾。王帅等(2012)利用5种观测资料和RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)模式对2009年5月2—5日发生在黄海海域的一次海雾过程进行了观测分析和数值模拟研究。分析得出黄海北部雾区形态演化与 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 海气温差的变化吻合,海气温差对海雾形成和演变起了重要作用。

2016年3月2日夜间至5日早晨,渤海、黄海大部及周边内陆地区出现了一次大范围持续性的海雾天气过程,沿岸数十个台站均观测到大雾,大雾持续时间长达54 h,成山头观测站能见度为0 km长达48 h。据估算,海雾鼎盛时期雾区面积超过 $10\times 10^4\text{ km}^2$,大雾给上述地区的海上运输和航空等交通造成较大影响。针对此次大雾过程中央气象台首次对外发布了海雾影响范围落区预报,有很好的指导意义,但是海雾落区预报范围较实况有一定的偏差,尤其在山东半岛东南近海的海雾预报误差较大。本文利用卫星监测、海上平台和高空观测数据、FNL再分析资料、NEARGOOS(Northeast Asia Region-Global Ocean Observation system)的海表温度数据等多种资料,对这次持续性海雾形态演变特征进行了分析,并探讨了海雾落区的可预报性,以期对黄渤海大雾的预报提供参考依据。

1 资 料

本文依据卫星监测海雾形状范围的演变过程,白天采用Himawari-8可见光云图(可见光分辨率0.5 km、红外分辨率1.6 km),夜间采用风云卫星红外双通道量温差技术反演海雾,时间间隔为1 h;美国国家环境预报中心NCEP提供的FNL(Final

Operational Global Analysis)再分析资料(水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$),时间间隔为 6 h;青岛气象站、大连气象站、荣成气象站数字式探空仪数据资料,海上平台资料, MICAPS 站点观测资料; NEARGOOS 的海表温度数据(水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$)。

2 海雾观测特征分析

2.1 海雾卫星遥感形态变化特征

卫星监测具有良好的空间和时间数据分辨率,可以监测海雾形状、范围的演变过程,而地面观测可分析海雾的水平能见度数值,因此卫星影像监测和地面观测在判识海雾以及形态变化、影响范围时互为补充。白天从 Himawari-8 卫星可见光云图上辨识;夜间基于 FY-2G 卫星的 IR1、IR4 红外通道数据,采用红外双通道亮温差法对雾区检测识别。从卫星监测上看出此次海雾过程的影响范围和形状演变可以被分为三个阶段:

(1) 生成阶段(3月3日02—12时,图1a~1c): 2016年3月3日07时从卫星监测上已经可以清晰看到灰白色云团(图1a),该云团纹理较为均匀,层状云结构,边界比较清晰,形状稳定,地面观测证实该云团为海雾。海雾首先在黄海东部靠近朝鲜半岛海岸生成,形态是叶片型,山东半岛东南近海没有雾。海雾厚薄不均匀,雾区有空心干区,露出下方的海面,说明海雾在形成初期结构较为松散。10—12时(图1b和1c),海雾的边界越来越清晰,结构变得密实,已经基本上看不到空心干区,色调变得白亮,形态由叶片型演变成飞鸟型,海雾受日变化影响小。

(2) 发展演变阶段(3月3日13时至4日13时,图1d~1f): 对比3日14时(图1d)与12时(图1c)可以看出,白天海雾南部向北收缩到黄海北部,到夜间(3日23时,图1e),黄海北部海雾逐渐向西向北伸展到渤海海域,渤海开始有海雾,此时在黄海东部朝鲜半岛南部附近海域又新生成一片海雾,与黄海北部海雾接壤,夜间反演海雾的厚度为400~500 m,4日09时(图1f),从可见光图上可见,海雾向西向北延伸,形成黄渤海大范围海雾,几乎布满整个渤海和黄海海域,此时海雾发展到成熟期。中间收缩,两端伸展,结构密实,色调柔和,边界非常清晰。形状演变成类似“8”葫芦型。

(3) 消散期(3月4日14时至5日08时,图1g~1i): 从4日14时可见光监测图上可看出(图1g),渤海海雾消散,黄海海雾的厚度变薄,部分依稀可以辨出下方的海面,而且海雾范围收缩变窄,到了夜间(4日22时,图1h),海雾范围进一步缩小,还可以看出从西北侧有一条锋面靠近,至5日06时(图1i),锋面到达黄渤海,海雾消散。

2.2 海雾站点监测分析

成山头位于山东半岛最东端,向东伸入黄海,因此该站是黄海海域海雾的典型代表站,本次大雾过程成山头站(54776)从3月2日23时开始出现轻雾,风向为西南风,能见度为3.7 km。到3日05时风向转为南风,出现能见度降低至0 km的大雾,之后能见度0 km几乎持续到5日08时,只有4日11—17时(6 h)雾和降水混合的能见度为0.1 km,大雾期间成山头能见度为0 km长达48 h,5日08时之后因冷空气影响,风向为西北风,出现能见度大于1 km的轻雾,3月6日雾消散(图2a)。渤海西部由A平台代表渤海,4日08时监测有雾,偏东风,能见度为0.2 km,4日夜间风向转为东北风,海雾逐渐消散(图2b)。从沿海代表站监测可以看出,黄海的海雾始于3日,至5日结束,渤海的雾始于4日,至5日结束,海雾期间平均风速为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而且卫星监测显示海雾的日变化小,因此此次大雾过程不是辐射雾。

综合分析卫星监测和海上代表站,整个海雾过程经历了初期、发展成熟到消散三个变化阶段,可以看出海雾成熟期的影响范围和形态结构都较初期有明显不同。初期在黄海东部海域生成,形态是叶片型,结构松散;至成熟期海雾向西向北延伸到几乎布满黄海和渤海大部海域,结构密实,边界清晰,形态演变成“8”葫芦型,形态演变受日变化影响小,雾体边界和海岸线吻合较好。

3 海雾形态变化原因分析

在海雾形成初期,从卫星监测可以看出在渤海和山东半岛东南近海没有海雾,至成熟发展期几乎铺满整个黄渤海海域。因而探讨并分析山东半岛东南沿海没有海雾的原因以及海雾形态演变的大气海洋物理特征量。

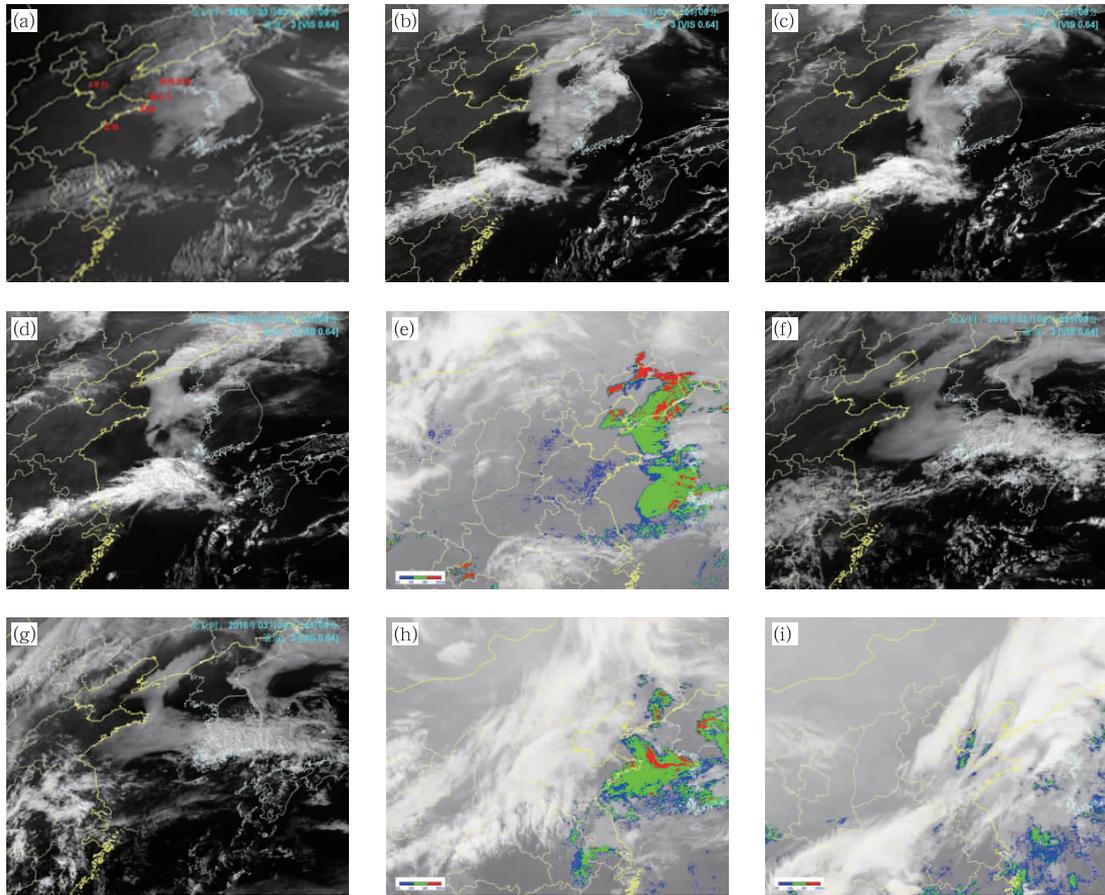


图 1 2016 年 3 月 3—5 日海雾卫星监测云图

(a)3 日 07 时,(b)10 时,(c)12 时,(d)14 时,以及(f)4 日 09 时,(g)14 时可见光监测图;
 (e)3 日 23 时,(h)4 日 22 时,(i)5 日 06 时海雾夜间监测
 (色标代表海雾厚度,单位: m)

Fig. 1 Satellite visible imageries from 3 to 5 March 2016

(a, b, c, d, f, g) visible light monitoring, (e, g, i) sea fog night monitoring
 (a) 07:00 BT 3, (b) 10:00 BT 3, (c) 12:00 BT 3, (d) 14:00 BT 3, (e) 23:00 BT 3,
 (f) 09:00 BT 4, (g) 14:00 BT 4, (h) 22:00 BT 4, (i) 06:00 BT 5
 (Shaded areas represent the sea fog thickness, unit: m)

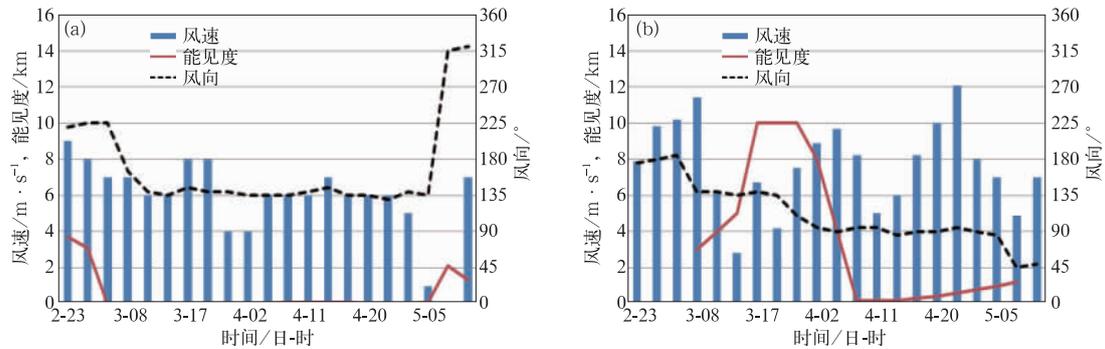


图 2 2016 年 3 月 2 日 23 时至 5 日 08 时成山头站(a)和 A 平台(b)的能见度和风速风向合成图

Fig. 2 Wind speed and visibility at Chengshantou (a), A Platform (b) from 23:00 BT 2 to 08:00 BT 5 March 2016

3.1 环流背景分析

静稳天气是海雾形成的天气背景。2016年3月3日08时黄海东部500 hPa高度场的弱脊区,大气层结稳定,利于黄海东部海雾的形成,但在渤海和山东半岛东南沿海有弱短波槽,致使渤海及山东半岛东南沿海大气层结处于弱不稳定状态(图3a),地面形势场3日08时渤海和山东半岛东南沿海受内陆蒙古低压外围气流控制,近地层大气不稳定,不利于渤海和山东半岛近海海雾形成;而黄海东部受入海变性高压影响(图3c),海上高压的西侧南风带来洋面湿气流为朝鲜半岛附近海域海雾形成提供了水汽条件。4日弱高压脊东移,500 hPa高度场整个黄海和渤海均处于平直西风气流中(图3b),天气形势稳定,4日地面形势调整为渤海和黄海受西太平洋高压后部偏南气流控制,偏南暖湿气流为渤海和黄海海雾形成提供了水汽条件,利于渤海和黄海大范围海雾生成(图3d)。

3.2 水汽来源分析

在大气层结稳定的条件下,当低层的暖湿气流流经冷海面时,暖湿气流中充足的水汽会凝结冷却成细微的水滴悬浮于空中,使海面水平能见度下降,从而形成海雾。从低层1000 hPa水汽通量及散度可以看出,在3日08时(图4a)渤海和山东半岛东南部近海因受陆地低压外围气流影响,虽为西南向的水汽,无水汽辐合;从2 m的相对湿度可以看出山东半岛东南近海相对湿度小于70%(图4c),而黄海东部海域水汽直接来源于西太平洋的偏南气流,偏南气流经东海北上到达黄海东部,东海有水汽辐合区,该辐合区由偏南气流继续推送到达黄海东部和黄海北部,再形成一个水汽辐合区,水汽辐合区对应雾区,致使该海域湿度增加,同时气温高于海温,因此大洋暖湿气流流经该海域形成平流冷海雾。从海洋洋流流向分析朝鲜半岛沿海附近有冷洋流(图略),因此暖湿气流易先在朝鲜半岛形成海雾,4日

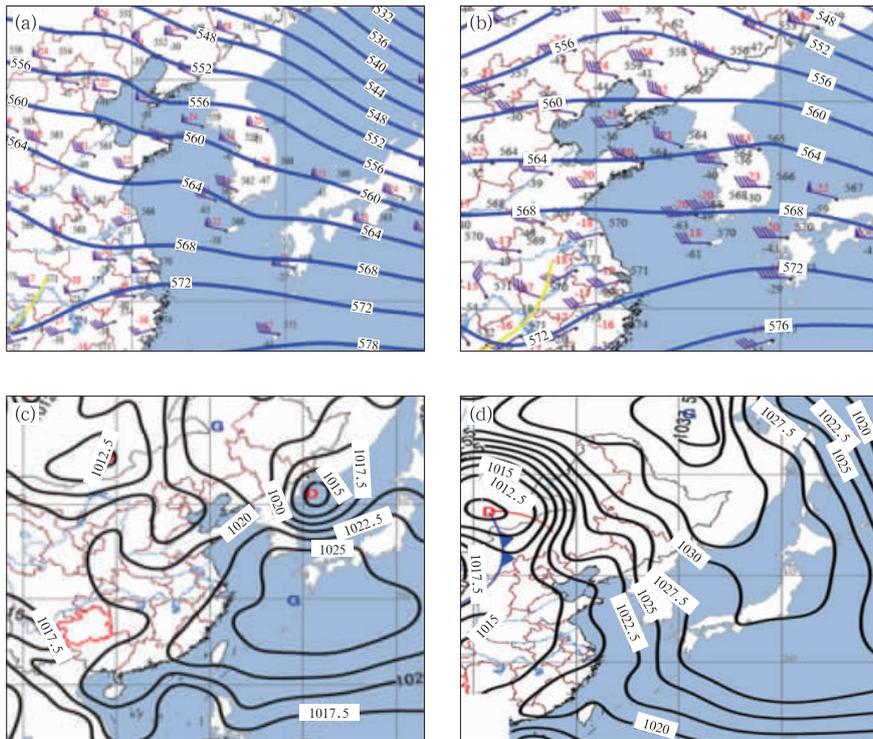


图3 2016年3月3日(a, c)和4日(b, d)08时的500 hPa高度场(a, b; 单位:dagpm)和海平面气压场(c, d;单位:hPa)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height (a, b; unit: dagpm) and sea level pressure (c, d; unit: hPa) from 3 to 4 March 2016
(a, c) 08:00 BT 3, (b, d) 08:00 BT 4

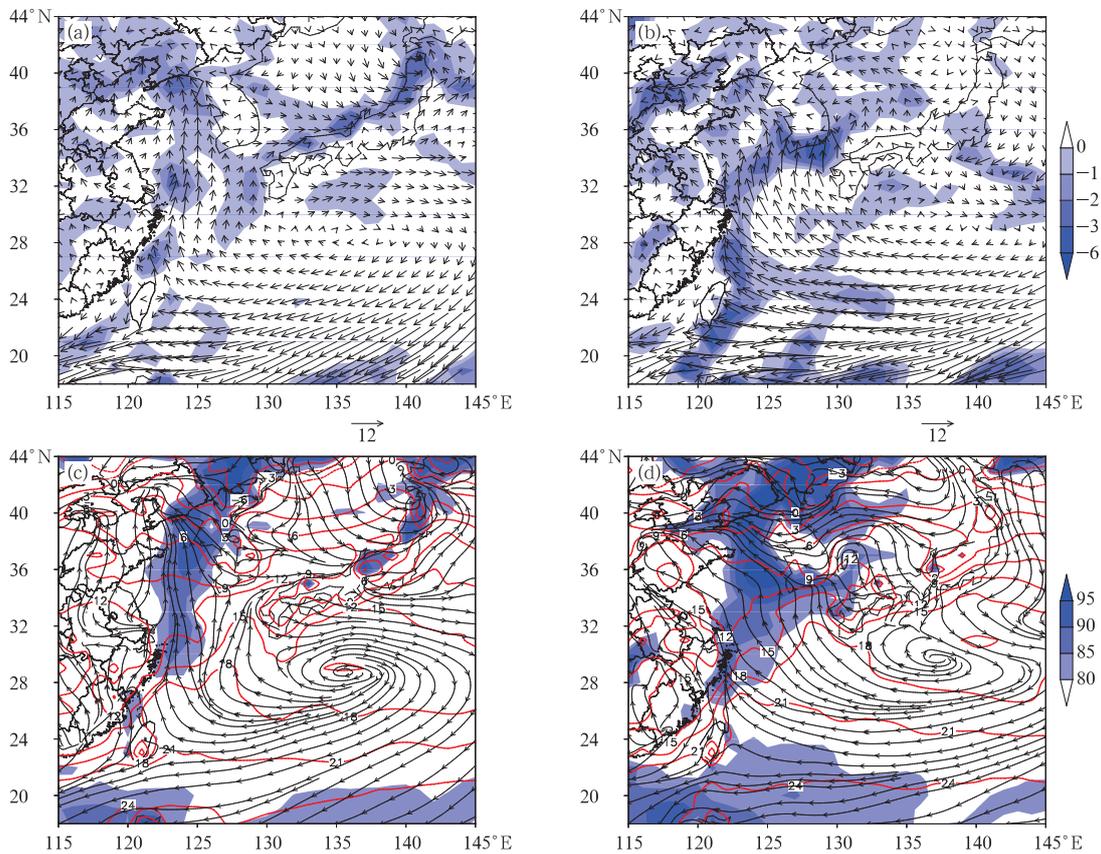


图 4 2016 年 3 月 3 日(a, c)和 4 日(b, d)08 时的 1000 hPa 水汽通量散度(a, b;箭头表示 1000 hPa 水汽通量,单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;填色为 1000 hPa 水汽通量散度,单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),2 m 相对湿度、气温和流场合成图(c, d;红色等值线为 2 m 气温,单位: $^{\circ}\text{C}$;黑色等值线表示 10 m 流场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;填色为相对湿度,单位:%)
 Fig. 4 (a, b) The 1000 hPa water vapor flux (arrow, unit: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence (shaded area, unit: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (c, d) 2 m relative humidity (shaded area, unit: %), temperature (red contour line, unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind field (black contour line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) from 3 to 4 March 2016
 (a, c) 08:00 BT 3, (b, d) 08:00 BT 4

08 时整个渤海、黄海风向转为东南风,西北太平洋的暖湿气流推送到渤海、黄海。同时渤海还有从日本海移来的偏东暖湿气流,渤海、黄海有大范围的水汽辐合区,此时山东半岛东南沿海也有水汽辐合,有利于渤海和黄海大范围海雾的生成(图 4b);从 2 m 相对湿度分析场上也可以看出(图 4d),大于 90% 的湿度区域和卫星监测的海雾形状非常吻合。

以上分析表明,海雾的形成与低层的偏南暖湿气流有关,而这个偏南暖湿气流来自西北太平洋,西北太平洋暖湿气流为本次海雾过程提供了水汽输送。初期渤海和山东半岛沿海受陆地低压外围的西南气流影响,湿度较小,在渤海和山东半岛东南沿海没有海雾,当风向转为东南风时,西北太平洋上的暖

湿气流流进渤海和黄海大部海域,同时日本海的偏东气流也向西流至渤海,至此,渤海、黄海的暖湿气流范围大、湿度大,导致海雾进入发展期和成熟期,海雾的区域与相对湿度大于 90% 的区域相吻合。

3.3 逆温层建立

海上大气逆温层是海雾形成、维持和发展的重要条件,需分析黄渤海探空变化,了解海雾形态演变期间的大气中低层的特性。青岛代表山东半岛东南海域,荣成代表黄海海域。从图 5 可以看出,3 日青岛探空图上显示存在逆温(图 5a~5c),但只在 1000 hPa 有非常浅薄的逆温,并没有形成逆温厚度,浅薄的逆温层不易形成海雾,至 4 日逆温层抬升

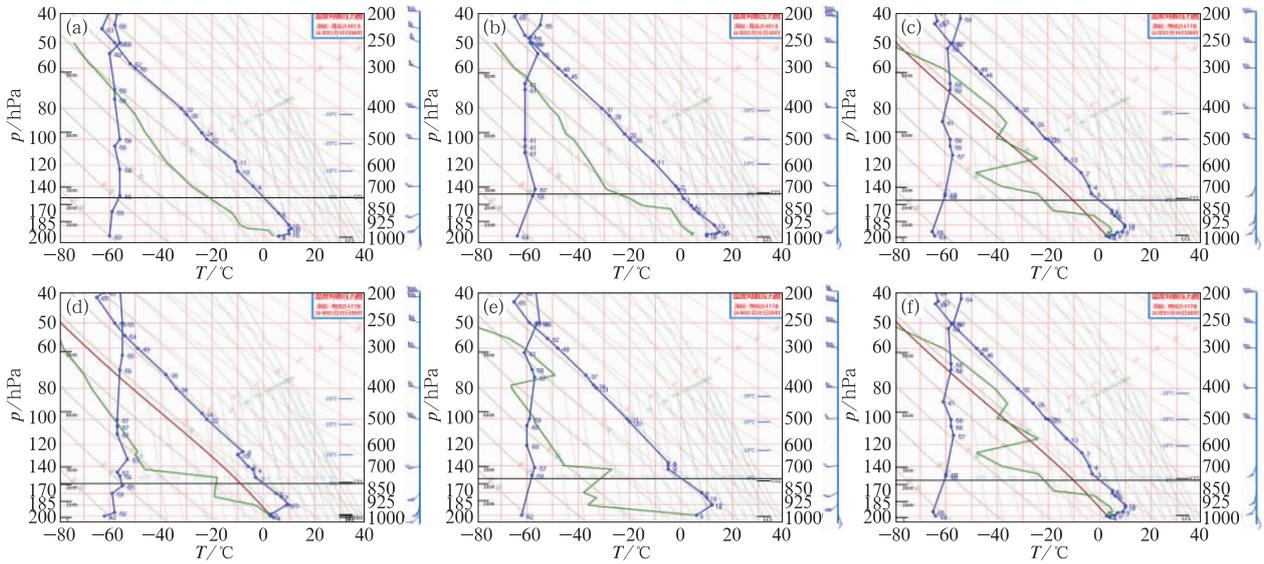


图 5 2016 年 3 月 3 日 08 时(a, d)、20 时(b, e)和 4 日 08 时(c, f)探空图
(a, b, c)青岛, (d, e, f)荣成

Fig. 5 Skew-Tlogp diagram of (a, b, c) Qingdao and (d, e, f) Rongcheng
at 08:00 BT 3 (a, d), 20:00 BT 3 (b, e) and 08:00 BT 4 (c, f) March 2016

到 925 hPa, 形成一定高度的逆温层, 逆温层的温度差值增大, 差值达到 6°C 。此时海雾监测向西延伸影响到山东半岛东南海域, 青岛出现海雾。从荣成探空站可以看出(5d~5f), 海雾形成前逆温层已经建立, 并且逆温层高度达到 925 hPa, 逆温层内的温度差值达到 6°C 。逆温层顶高度在 925 hPa 以下, 说明海雾的厚度在 500 m 以下, 与卫星监测分析一致。探空分析从底层到中层风向为顺时针, 表明边界层顶有暖平流, 它犹如无形的干暖盖, 抑制其下近海面的对流发展, 阻挡水汽向上扩散, 阻止海雾抬升为低云, 并形成一定厚度的海雾。

4 海雾维持发展边界层条件分析

4.1 海气温差分析

3 月(春季), 天气转暖, 气温升高, 海洋仍是冷海面, 渤海、黄海中北部的海表温度低于海面上空气温, 因此海洋对海面上空的大气有冷却效应, 有利于海雾的形成, 从宋亚娟(2009)的研究成果可知, 黄海海面上大气与海表温度的差值在 $-1\sim-2^{\circ}\text{C}$ 是成雾的海气温差适宜条件, 温度差值太大, 水汽不易达到饱和凝结形成海雾。因渤海、黄海沿岸海温受陆地影

响, 近岸海温梯度变化大, 山东半岛沿岸海表温度为高于黄海中部海域的水温, 而黄海东部朝鲜半岛沿岸有冷洋流, 冷洋流加速暖湿气流的降温冷却效应易于形成海雾, 故同样的条件下, 黄海东部靠近朝鲜半岛容易先出现海雾, 这与吴晓京等(2015)的卫星监测海雾分析结果一致。从图 6a 可看出, 在海雾初期成山头附近海域是海气温差的低值区, 黄海北部海域气温低于海温, 达到 -2.5°C , 说明大洋上暖湿空气没有到达黄海北部海域, 而渤海受陆地低压前部西南气团影响, 海气温差大于 2°C , 海气温差较大不易凝结形成海雾。3 日 14 时随着大洋暖湿气流北上(图 6b), 渤海、黄海海气温差值趋于接近, 海面上的大气湿度接近饱和, 海气温差在 0.5°C 的区域和卫星监测海雾的形态相吻合。4 日 08 时(图 6c), 海雾进入成熟期, 海气温差在 $0\sim0.5^{\circ}\text{C}$ 范围仍与海雾区域一致。但是黄海北部部分出现海气温差小于 0°C , 杨悦和高山红(2016)研究认为雾顶长波辐射增强, 降温增大, 云水含量增多, 进而导致温度较低的云水含量高值区在湍流混合的作用向下贯穿整个雾体抵达海面, 导致雾体降温, 出现了海雾发展成熟期气温低于海温的现象。5 日 08 时(图 6d), 渤海海面的海气温差大于 2°C , 海面上的空气饱和度降低, 海雾消散。

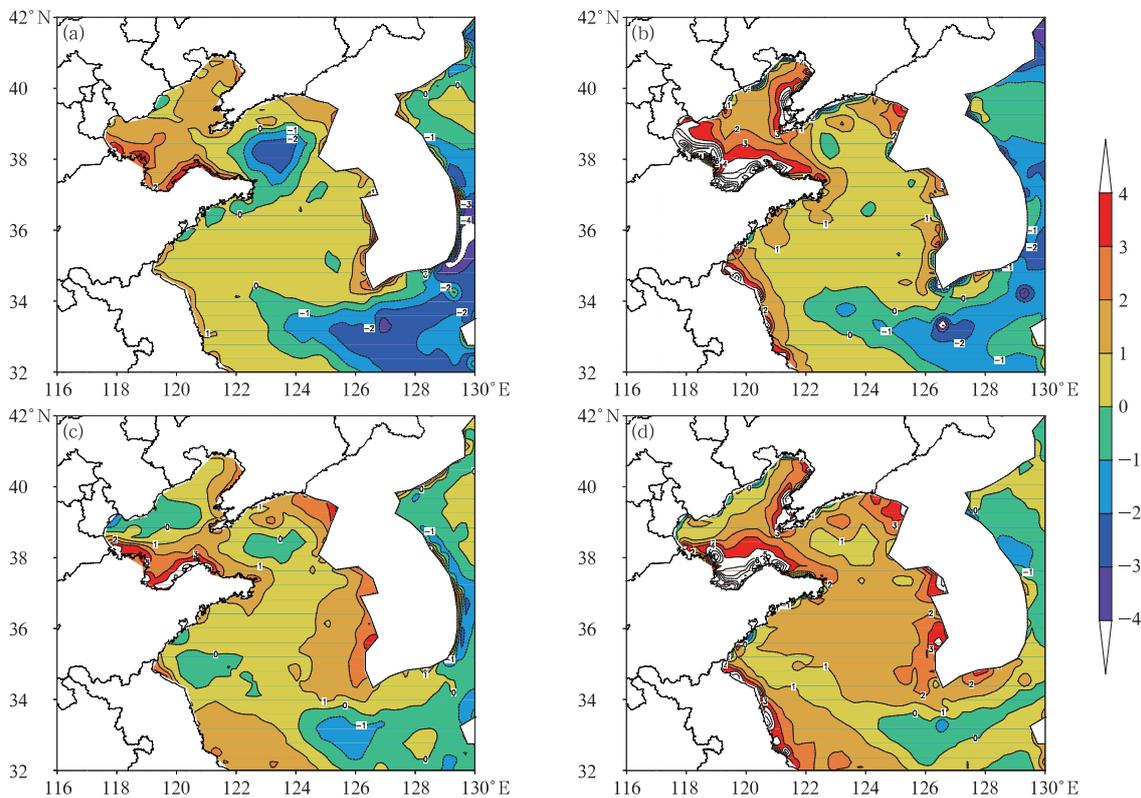


图 6 2016 年 3 月 3 日 08 时(a)和 14 时(b),4 日 08 时(c)和 5 日 08 时(d)海气温差(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 The air sea temperature difference from 3 to 5 March 2016 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

(a) 08:00 BT 3, (b) 14:00 BT 3, (c) 08:00 BT 4, (d) 08:00 BT 5

4.2 垂直风切变

低层垂直风切变对海雾的发展和维持有重要作用。根据前文探空分析逆温层内的风速变化, 925 hPa 上的风速小于 1000 hPa 的, 致使低层的暖湿空气不易向上输送, 有利于低层雾的生成, 垂直风切变不仅利于海雾的维持而且促进向上发展形成一定厚度的海雾, 3 日 08 时黄海东部海域有垂直风切变, 垂直切变数值在 $-3 \sim 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明在逆温层有垂直运动, 垂直切变值为 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围和海雾落区吻合(图 7a 和 7b); 4 日, 垂直切变范围扩展到整个黄渤海区域, 垂直风切变小于 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域和海雾的区域吻合得很好(图 7c), 4 日海雾区域的垂直风切变值比 3 日增大, 表明海雾区中的垂直运动增强, 海雾在垂直高度上有所发展, 形成一定厚度的海雾; 5 日 08 时, 垂直风切变大于 0, 垂直切变数值在 $0 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 有垂直运动向上发展, 海雾消散, 所以逆温层内的垂直风切变与海雾的垂直运动有关, 海雾的垂直运动加强促使海雾在垂直方向上发展, 形成了厚度密实的雾。

5 海雾形变的可预报性探讨

海雾形变预报存在难点: 海雾一旦生成, 其发展区域不仅与大气尺度环流和海洋背景条件有关, 形态转变往往还与次天气尺度、局地中小尺度热力动力条件, 甚至是微物理条件有关, 难以把握; 目前海雾的数值预报模式预报能力弱; 海雾的预报涉及次天气尺度和局地中小尺度海洋和气象条件, 相关研究较少; 尤其在海雾微物理变化机制方面的研究, 目前仍值得深入研究和探讨。虽然海雾预报存在着较大的不确定性, 但通过以上分析可知, 可以从以下几个着眼点来对海雾形态变化开展预报预警:

(1) 海雾预报从探空分析, 中高层有暖平流, 暖平流像一个干暖盖抑制低层的暖湿气流向上发展抬升成为低云, 海雾在探空上于海雾形成之前先形成逆温层, 且是有一定厚度的逆温层, 但逆温层的高度一般不超过 925 hPa。

(2) 海雾预报首先关注大气环流的静稳条件, 这是海雾形成的必要条件, 但是也要分析局地的中

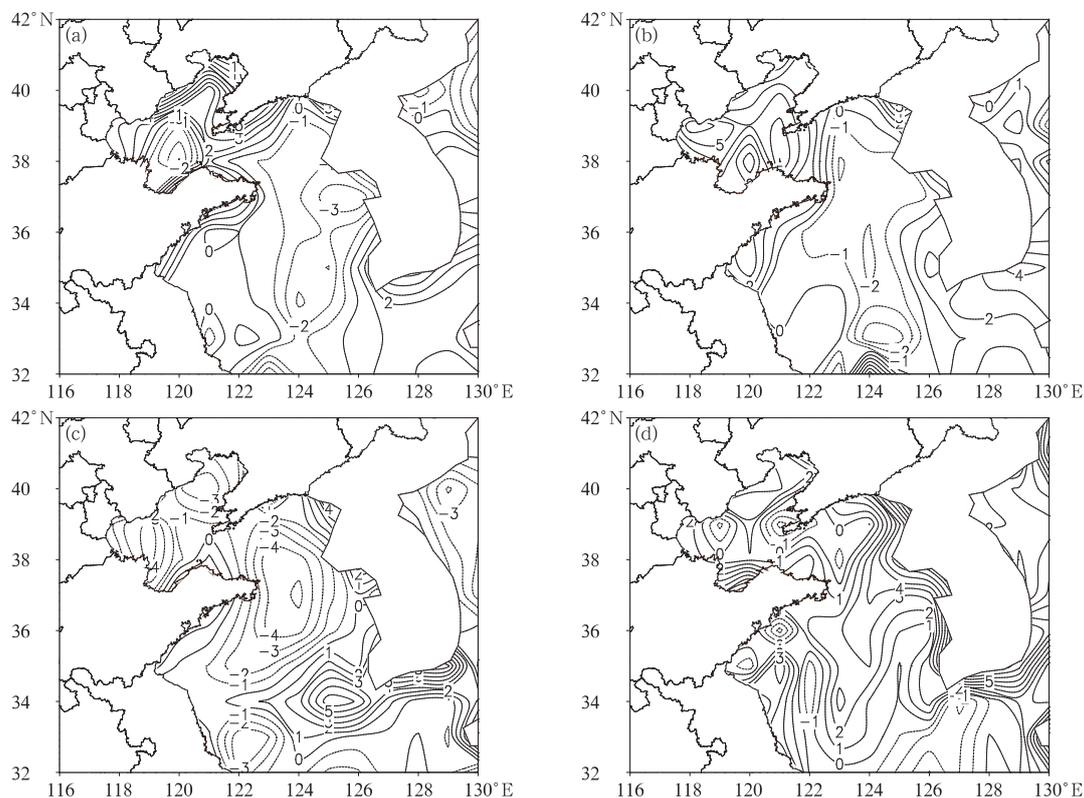


图7 2016年3月3日08时(a)和14时(b),4日08时(c)和5日08时(d)的925和1000 hPa风切变(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Vertical wind shear between 925 hPa and 1000 hPa from 3 to 5 March 2016 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 08:00 BT 3, (b) 14:00 BT 3, (c) 08:00 BT 4, (d) 08:00 BT 5

小尺度天气变化,局地小尺度天气影响海雾的形态分布。在本次过程中,山东半岛东南沿海前期受弱不稳定气流,因此该海域不易形成海雾。

(3) 大洋上的暖湿气流是海雾形成的物质基础,偏南暖湿气流推送的区域不仅影响海雾的形成而且影响海雾的形态,海气温差是海雾形成的充分条件,合适的海气温差促使海面上的暖湿气流凝结沉降形成海雾。本次过程分析海气温差在 $0 \sim 2^\circ\text{C}$ 有利于海雾的发展维持,海气温差在 $0 \sim 1^\circ\text{C}$ 的区域和海雾的形态非常吻合,海面上的大气饱和度更高,大洋的冷洋流分布是影响海雾形成的先决条件。

(4) 垂直风切变有利于维持发展并形成具有一定厚度的海雾。如果垂直风切变过强,不利于海雾发展,向上抬升成云,不能形成一定厚度的海雾,逆温层内的垂直风切变在 $-3 \sim 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 有利于海雾形成, $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的垂直切变风区和海雾的落区吻合得很好。

6 结 论

2016年3月3—5日黄渤海大雾过程从卫星监测可见经历了生成、发展成熟和消亡三个阶段,海雾在三个阶段形态发生了变化,分析引发海雾形态变化的海洋气象条件,主要得到如下几点结论:

(1) 整个海雾过程大气较稳定,黄渤海上空为平直西风气流,在海雾形成初期,在山东半岛东南海域有气旋性弯曲,大气层结不稳定,地面形势受低压影响,虽为偏南风,但湿度小,因此在山东半岛东南近海没有雾。

(2) 水汽是海雾形成的物质基础,此次过程海雾的水汽来源于西北太平洋,当西北太平洋的暖湿气流流经朝鲜半岛的冷洋流首先在黄海东部凝结形成海雾。当黄渤海为高压区控制,西北太平洋副热带高压西侧的偏南或东南风为黄渤海带来了充足的

水汽,暖湿气流向北输送到渤海海域,而且日本海的偏东气流也为渤海海雾提供了湿空气,形成水汽辐合区,海雾范围扩展,影响到黄渤海大范围海域,海雾的形态与湿度 90% 的区域非常吻合。

(3) 此次海雾受日变化小,海温低于海平面的气温,大洋上暖湿气流流经冷海面降温凝结成雾,因此是平流冷却雾,海气温差在 0~1℃ 的区域和雾区吻合,而且在海雾发展成熟期出现了气温低于海温的现象,其是由于雾顶长波辐射冷却导致雾体降温。

(4) 垂直风切变有利于海雾在逆温层内的维持和发展。低层的暖湿空气不易向上输送,聚集在低层,有利于雾的生成,同时垂直风切变有利于海雾在垂直高度上发展,并形成有一定厚度的海雾,海雾的垂直风切变随着海雾的发展而加强,形成海雾的垂直结构的发展。

参考文献

- 黄彬,高山红,宋煜,等,2009. 黄海平流海雾的观测分析[J]. 海洋科学进展,27(1):16-23.
- 黄彬,王晴,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[J]. 气象,40(11):1324-1337.
- 黄健,2008. 海雾的天气气候特征与边界层观测研究[D]. 青岛:中国海洋大学海洋环境学院.
- 任兆鹏,张苏平,2011. 黄海夏季海雾的边界层结构特征及其与春季海雾的对比[J]. 中国海洋大学学报,41(5):23-30,109.
- 宋亚娟,2009. 北太平洋海雾发生频率的气候学特征[D]. 青岛:中国海洋大学.
- 王彬华,1983. 海雾[M]. 北京:海洋出版社:352.
- 王帅,傅聘,陈德林,等,2012. 2009 年春季一次黄海海雾的观测分析及数值模拟[J]. 大气科学学报,35(3):282-294.
- 王鑫,黄菲,周发琇,2006. 黄海沿海夏季海雾形成的气候特征[J]. 海洋学报,28(1):26-34.
- 吴晓京,李三妹,廖蜜,等,2015. 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,37(1):63-72.
- 杨悦,高山红,2015. 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,45(6):19-30.
- 杨悦,高山红,2016. 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,74(6):974-988.
- 张苏平,刘飞,孔扬,2014. 一次春季黄海海雾和东海层云关系的研究[J]. 海洋与湖沼,45(2):341-352.
- 张苏平,任兆鹏,2010. 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,68(4):439-449.
- 张苏平,杨育强,王新功,等,2008. 低层大气季节变化及与黄海雾季的关系[J]. 中国海洋大学学报,38(5):689-698.
- 周发琇,刘龙太,1986. 长江口及济州岛临近海域综合调查报告(第七节,海雾)[J]. 山东海洋学院学报,16(1):114-127,131.
- 周发琇,王鑫,鲍献文,2004. 黄海春季海雾形成的气候特征[J]. 海洋学报,26(3):28-37.
- 周福,钱燕珍,金靓,等,2015. 宁波海雾特征和预报着眼点[J]. 气象,41(4):438-446.
- Fu Gang, Zhang Suping, Gao Shanong, et al, 2012. Understanding of Sea Fog over the China Seas[M]. Beijing: China Meteorological Press:216.