

CALIPSO 卫星资料的春夏季黄海海雾高度特征分析

孙艺¹, 杨悦², 甄晴³

(1. 烟台市人民政府人工影响天气办公室, 山东烟台 264003; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 海洋与大气学院, 山东青岛 266100; 3. 龙口市气象局, 山东烟台 265700)

摘要: 利用 2007—2018 年 CALIPSO 卫星数据对春夏季黄海海雾的高度特征进行了统计, 并借助 MTSAT 可见光卫星云图、“葵花 8 号”可见光卫星云图和 KMA 地面天气图对控制海雾产生的天气形势进行了分析, 进一步讨论了各天气型下黄海海雾的高度特征。研究结果表明: (1) 黄海海雾的平均雾顶高度是 211 m, 海雾高度最大值为 370 m, 大多数黄海海雾雾顶高度介于 100~400 m; (2) 7 月的海雾雾顶高度高于其他月份, 为 260 m; (3) 控制黄海海雾生成发展的主要天气型有入海变性高压型和大陆低压低槽东移型, 入海变性高压控制下的弱偏南风区域的雾顶高度相对较高, 大陆低压低槽控制下的槽前风速稍大区域的雾顶高度偏高。

关键词: CALIPSO; 黄海; 海雾; 雾顶高度

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)03-0054-08

1 引言

黄海是我国海雾发生频率最高的海区之一, 青岛年雾日数为 50 d 以上, 山东半岛东部的成山头年雾日数可达 80 d 以上^[1-2]。黄海海雾以暖湿空气经过冷海面形成的平流雾为主, 其主要特点是分布范围广、大气水平能见度低、持续时间较长。张苏平等^[1]在统计黄海海雾的气候特征时发现, 海雾一般在每年 4—7 月的春夏季达到最盛期, 8 月雾季结束, 标志是海上盛行风由偏南风转为偏东风。关于海雾的形成, 王彬华^[2]总结了我国沿海海雾发生的海洋和气象条件, 海洋条件主要包含海表面温度和冷暖洋流的作用, 而气象条件中, 近海面大气温度、湿度和稳定度是发挥作用的主要因素; 同时还归纳了几种我国沿海海域极有可能生成海雾的天气类型, 即北太平洋脊、我国大陆东移的低槽或低压系统、入海变性的低压。杨悦等^[3]在此基础上又将黄海海雾天气型中的入海变性高压型细分为南高北低、东高西低、独立高压 3 种配置, 并补充了入西太平洋高

压型。在上述天气系统的控制下, 当低纬的暖湿空气平移至黄海的冷海面, 稳定层结使低层的暖湿空气不易向上发展, 聚集在近海面而形成海雾^[4-5]。除了天气系统的支配, 成雾之后, 雾体内部的湍流与雾顶的长波辐射冷却对海雾的维持和演变必不可少。夏季海上大气边界层中温度层结近于等温或较弱逆温, 静力稳定度下降, 有利于湍流的发展, 加之水汽量较大, 雾顶高度较高^[6]。胡瑞金等^[7]认为平流作用在黄海海雾形成的初期有明显影响, 辐射在海雾发展的中后阶段影响更加显著。杨悦等^[8]通过加密垂直分辨率进行天气预报模式 (Weather Research and Forecasting, WRF) 试验时指出, 雾顶液态水含量的增多会使雾顶长波辐射冷却率增强, 雾顶降温幅度增大, 进一步促进雾顶液态水含量的积累, 这种正反馈机制有助于雾顶高度的抬升。

由于海雾多发于冷暖海流交汇的特定海域, 这决定了对它的研究也因海域而不同。在雷州半岛附近海域, 赵丽娟^[9]分析了海雾的宏微观特征, 发现在海雾的发展和成熟阶段湍流运动增强可以促进

收稿日期: 2019-08-27; 修回日期: 2019-12-02。

基金项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-061, CMAYBY2015-040); 环渤海区域项目(QYXM201707)。

作者简介: 孙艺(1992-), 女, 助理工程师, 本科, 主要从事天气预报研究。E-mail: sunyiyt021@126.com

水汽和雾滴的湍流输送,使海雾增厚。除了国内对于海雾的研究,国际上针对其他类型雾的高度特征研究也取得了一定的成果。Leipper等^[10]研究加州沿海的海雾时表明,近海面湍流促使海雾生成,成雾后雾顶长波辐射冷却也会导致湍流而促进海雾发展,雾顶高度增高。沿岸海雾发展至厚度超过100 m后,雾顶长波辐射冷却比近海面湍流混合冷却占优势,成为海雾向上发展和维持的推动力^[11]。在英格兰地区陆地辐射雾的观测研究中,Roach^[12]发现成雾后雾滴的辐射冷却会导致雾顶高度的升高,这对海雾的研究有借鉴意义。

海雾高度特征的变化会影响不同高度的大气水平能见度。随着山东半岛蓝色经济区的发展和“21世纪海上丝绸之路”的建设,海上经济、社会和军事活动的日益增多使得黄海海雾雾顶高度的信息对沿岸航空、海上航运和渔业作业等至关重要。但已有对黄海海雾的研究中,有关海雾垂直特征的分析较少,所以有必要深入探究黄海海雾的高度特征。考虑到CALIPSO(The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)卫星在边界层内的垂直分辨率高达30 m,因此利用CALIPSO卫星资料不仅可以一定程度弥补海上观测数据的匮乏,还能细致刻画雾顶高度的特征。

由于海上观测匮乏,预报员无法获取海雾发生时其内部的湍流和辐射状况,因而无法对雾顶高度进行估计。而可见光卫星云图和地面天气图是预报员能及时获取的可靠资料。为了给春夏季黄海海雾的预报提供参考,有必要据此建立不同天气型与黄海海雾雾顶高度变化之间的联系。影响黄海海雾生成的天气型的一个共同特点是支配黄海上空吹偏南方向的风^[13]。海表面风(主要是风向)和散度是影响黄海海雾形成的主要因素。南风分量越大越有利于水汽的输送,容易成雾^[14]。海雾形成时风速在2~4级最为合适^[15]。具体到特定海域,青岛沿海的海雾多发于江淮气旋前部、入海高压后部^[16-18]。杨悦等^[5]统计了黄海海雾天气型,天气系统主要为入海变性高压型,3月和5月较多;其次为大陆低压低槽东移型,发生在2—5月。王静菊等^[19]通过黄海海雾数据同化试验,提出高压下沉增温形成顶部较高的稳定层,从而生成较厚的雾区。

本文基于CALIPSO卫星资料,细致研究2007—2018年春夏季黄海海雾的高度特征,按照不同天气

型分析影响雾顶高度变化的因素,重点关注入海变性高压型和大陆低压低槽东移型,从而进一步加深对黄海海雾发展机制的认识。

2 数据与个例

2.1 观测资料

本文使用的数据资料来源有:

(1)美国国家航天航空局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的CALIPSO卫星一级Level 1B数据和Level 2 VFM(Vertical feature mask)产品。Level 1B数据包括CALIPSO卫星的扫过路径和垂直分层结构等数据,Level 2 VFM产品将云和气溶胶分别分为不同的种类。Level 1B 532 nm数据和Level 2 VFM产品在-0.5~8.2 km的高度范围内垂直分辨率为30 m,水平分辨率为333 m。本文利用VFM数据描绘云和气溶胶水平、垂直分布的特性来判别海雾,用532 nm总衰减后向散射系数和高度数据来获得黄海海雾的高度信息和卫星的轨迹。

(2)MTSAT(Multi-functional Transport Satellite)可见光卫星云图、“葵花8号”(HIMAWARI-8)可见光卫星云图和韩国气象局(Korea Meteorological Administration, KMA)地面天气图。可见光云图主要用于获取黄海海雾的发生时间和水平分布特征,从而挑选海雾个例。韩国地面天气图用于分析黄海海雾发生时的天气系统,进行天气形势的分析。

2.2 个例选取

在可见光云图上,海雾的特征表现为颜色暗淡、质地均匀,边缘与海岸线贴合度高、边界痕迹明显,且位置随时间变化不大。根据以上特征,我们从2007—2018年的历史可见光卫星云图中挑选出了有黄海海雾发生的白天样本,逐月的黄海海雾天数统计见表1。

获取黄海区域内CALIPSO的Level 1B和VFM产品,通过可见光云图找到海雾区域,接着把卫星轨迹图和可见光云图相结合,对于卫星没有扫描到黄海海雾雾区的数据文件进行剔除,只保留卫星轨迹恰好经过黄海海雾雾区的数据文件,结合VFM产品中识别为靠近地面时的云即为海雾,从而得到所要研究的白天海雾个例集,共79例(见表2)。

表1 2007—2018年逐月黄海海雾天数统计表(单位:d)

年份	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2007	0	2	0	4	7	5	2	0	0	0	0	0
2008	0	0	4	6	7	4	1	0	0	0	0	0
2009	0	3	1	11	4	6	0	1	0	0	0	0
2010	1	0	0	4	3	7	1	0	0	0	0	0
2011	0	2	2	3	1	0	2	0	0	0	0	0
2012	0	0	2	4	9	4	0	0	0	0	0	0
2013	0	0	5	2	7	3	2	0	0	0	0	0
2014	0	2	4	10	8	0	0	0	0	0	0	0
2015	0	6	9	4	9	6	3	0	0	0	0	0
2016	0	2	9	12	11	8	3	0	0	0	0	0
2017	0	1	5	11	10	4	2	0	0	0	0	0
2018	0	2	18	10	7	11	5	0	0	0	0	0

表2 黄海海雾对应的天气形势汇总

天气型	时间(YYYYMMDD)			天气形势
入海变性 高压型 (东高西低配置)	20080502	20160414	20170616	20080502等34次个例属于入海变性高压型的东高西低气压场配置。在东高西低的配置下,黄海处于高压和低压过渡区,低空气流为东南方向的气流。
	20110221	20160415	20180302	
	20110709	20160512	20180312	
	20120328	20160520	20180329	
	20130603	20160609	20180330	
	20140326	20160613	20180331	
	20140327	20160619	20180419	
	20140408	20160630	20180420	
	20140410	20170304	20180429	
	20140521	20170501	20180430	
	20150429	20170522		
	20150430	20170531		
入海变性 高压型 (南高北低配置)	20080407	20150330	20170421	20080407等15次个例为入海变性高压型的南高北低气压场配置。陆地上的高压系统在气流引导下东移入海,气压梯度值较大,此时黄海低空为偏西南向气流。
	20080525	20150524	20170517	
	20120414	20150525	20170613	
	20120515	20160528	20180428	
大陆低压低槽东移型	20150223	20160617	20180713	20120508等30次个例属于大陆低压低槽东移型。黄海处于低压中心东北部和槽前,冷暖空气交汇海雾发展。
	20120508	20160409	20180313	
	20130511	20160422	20180327	
	20150428	20160506	20180328	
	20150610	20160511	20180509	
	20160316	20170417	20180510	
	20160322	20170420	20180514	
	20160331	20170505	20180605	
20160402	20170521	20180607		
20160407	20180223	20180608		
20160408	20180304	20180725		

3 黄海海雾的高度特征

由表1给出的2007—2018年逐月黄海海雾发生天数(雾日数)可以发现,黄海海雾发生频率较高的时间主要集中在3—7月份,属于春季和夏季,其中5月份海雾出现频率最高,共83次,4月份次之,共81次,这两个月份海雾发生的频率占了全年的50.6%;而秋季和冬季的黄海海雾发生频率明显降低,这与前人的统计结果一致^[17]。另外,不同的年份黄海的雾日数也存在明显的差异,2018年黄海雾日数最多,为53 d,2011年的雾日数最少,仅有10 d。

为了获得黄海海雾的垂直结构,绘制已筛选的黄海海雾个例的532 nm总衰减后向散射系数垂直剖面图(图1给出部分个例),同时提取海雾高度数据,获得黄海海雾个例的雾顶高度。由于海雾发生在海上大气边界层内,可被认为是接到海面的云,因此在处理数据时去掉了高空数据,选取的是1 km以下的数据。CALIPSO卫星此高度范围内垂直分辨率高达30 m,故将云底高度小于70 m的层云作为海雾统计。参考已有海雾研究中认定的总衰减后向散射系数大于 $0.03/(\text{km} \cdot \text{sr})$ 为海雾区^[20]。由于1 km以上的海雾较少,因此在1 km以下直到海面的黄色至橙红色的总衰减后向散射系数高值区,衰减系数范围为 $0.03 \sim 0.1/(\text{km} \cdot \text{sr})$,说明此时有海雾,海雾雾区内气溶胶粒子密度很高。对图1进行分析,发现2008年4月7日(见图1a)海雾雾顶高度为250 m,2012年3月28日(见图1b)和2013年6月3日(见图1c)两次海雾雾顶高度约为220 m,2014年3月26日(见图1d)和2018年4月20日(见图1h)两次海雾雾顶高度约为280 m,2015年4月30日(见图1e)海雾雾顶高度为340 m,2016年4月9日(见图1f)和2017年4月17日(见图1g)两次海雾雾顶高度均为160 m,通过这些初步可以确定大多数海雾雾顶高度介于100~400 m。

提取黄海海雾的雾顶高度数据并制成雾顶高度散点图(见图2a),图中显示:黄海海雾雾顶高度月变化特征显著,7月散点的高度整体高于其他月份,在150~400 m之间,说明7月份海雾雾顶的高度较高,3月散点的高度整体略低于其他月份,在100~300 m之间,说明该月份的海雾雾顶高度较

低。通过图2和表2可以看出,所有个例中雾顶高度最高为370 m,计算得到这些海雾个例的平均雾顶高度是211 m。春季(3—5月)61个海雾个例的平均雾顶高度为210 m,最高高度为340 m,出现在2013年5月11日、2014年5月21日、2015年4月29日、2015年4月30日和2016年4月8日;夏季(6—8月)15个海雾个例的平均雾顶高度为214 m,最高高度为370 m,出现在2018年6月8日。对黄海海雾雾顶高度按月份进行平均,得到分布图(见图2b),图中显示:和散点图分布特征相似,海雾高度月变化明显,7月份的高度最高,3月份的高度最低。

4 黄海海雾天气型的个例分析

参考前人对海雾的分型研究^[5,13,16-19],接下来主要针对黄海海雾较常见的入海变性高压型和低压低槽东移型展开详细研究,其中入海变性高压型比例为62.03%,低压低槽东移型比例为37.97%。借助海雾发生时的地面天气图,将79次海雾个例按照天气型进行归类(见表2),逐个探讨影响黄海海雾雾顶高度的气象条件,从而进一步研究不同天气型下黄海海雾的高度特征。

4.1 入海变性高压型

由表2可知,有49次海雾个例受入海变性高压型控制,个例时间都集中在春季和夏季。在春季多为闭合的小型高压,夏季的高压系统经常由副热带高压西伸北抬造成。在对入海变性高压型个例分析中发现,东高西低气压场配置的黄海海雾平均高度(219 m)与南高北低配置的海雾平均高度(196 m)接近,两种气压场配置下海雾的高度分布特征也存在相似之处。以2008年5月2日(见图3)的黄海海雾个例为例,它是典型的东高西低气压场配置,在地面天气图上(见图3a)黄海在高压系统控制下盛行偏西南风。总衰减后向散射系数垂直剖面图(见图3b)上可以发现,海雾高度由南向北逐渐降低,在海上高压系统的西南部雾顶高度较高,雾顶高度介于200~340 m。根据CALIPSO卫星轨迹(直线AB)在地面天气图(见图3a)上的位置,轨迹处于高压后部,海上的高压系统产生下沉气流,下沉增温有助于在海上边界层内形成逆温层,从而利于海雾

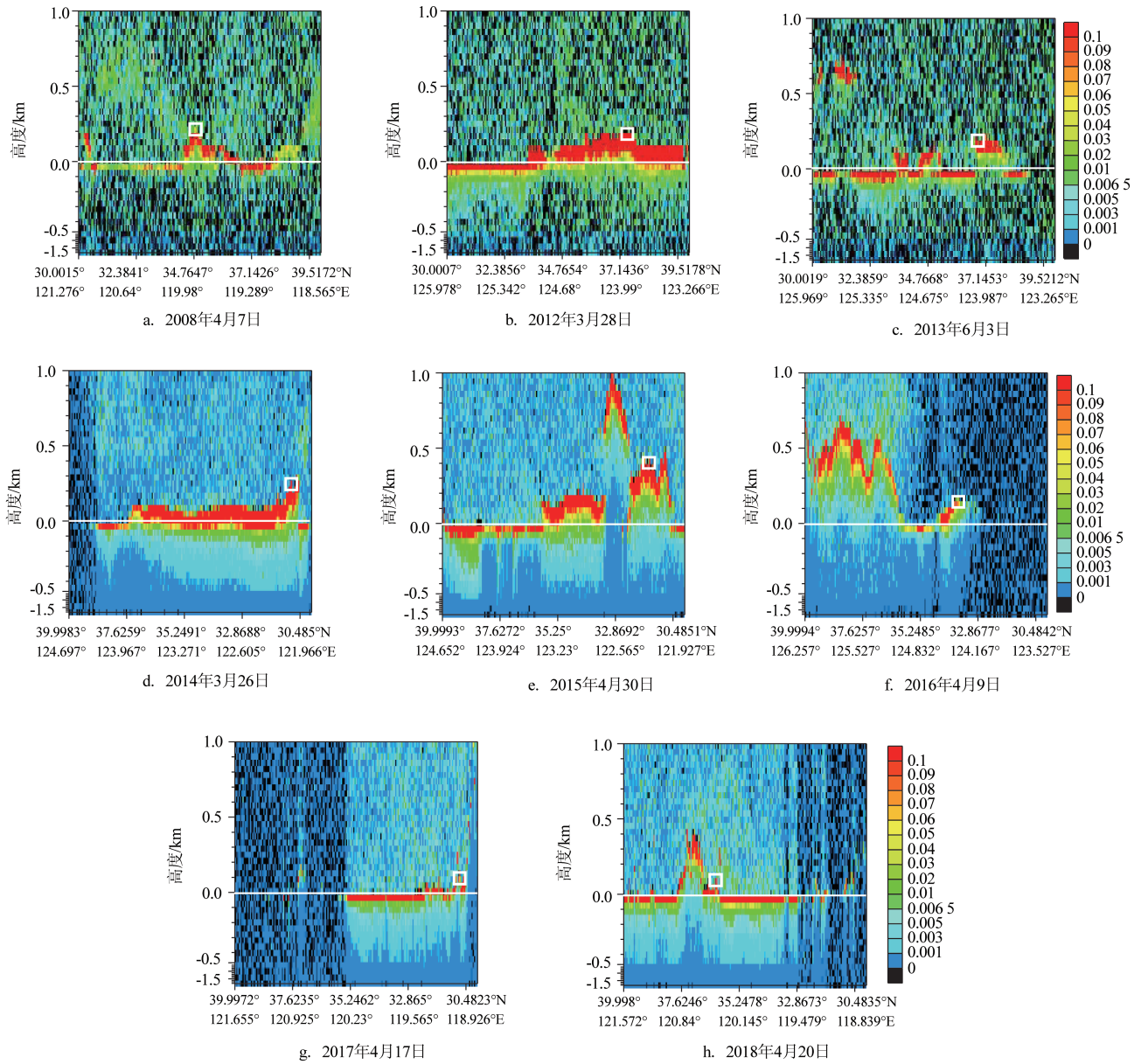


图1 黄海海雾532 nm总后向散射衰减系数垂直剖面图

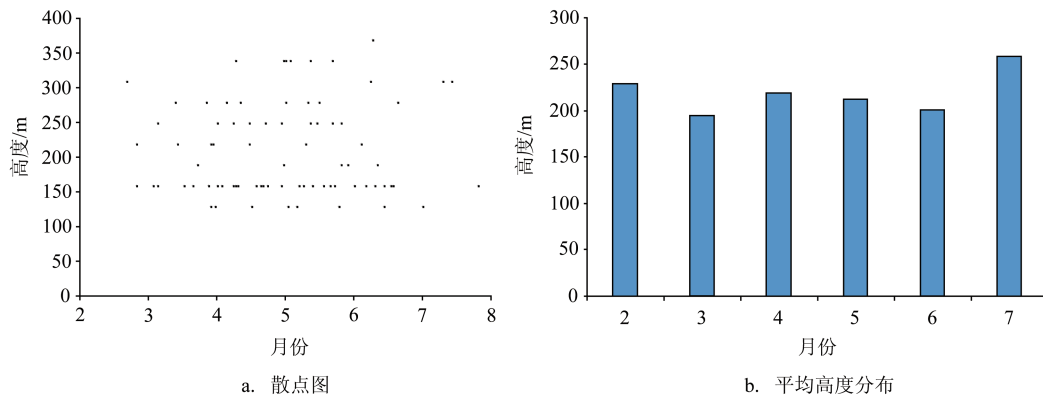


图2 2007—2018黄海海雾雾顶高度随月份变化

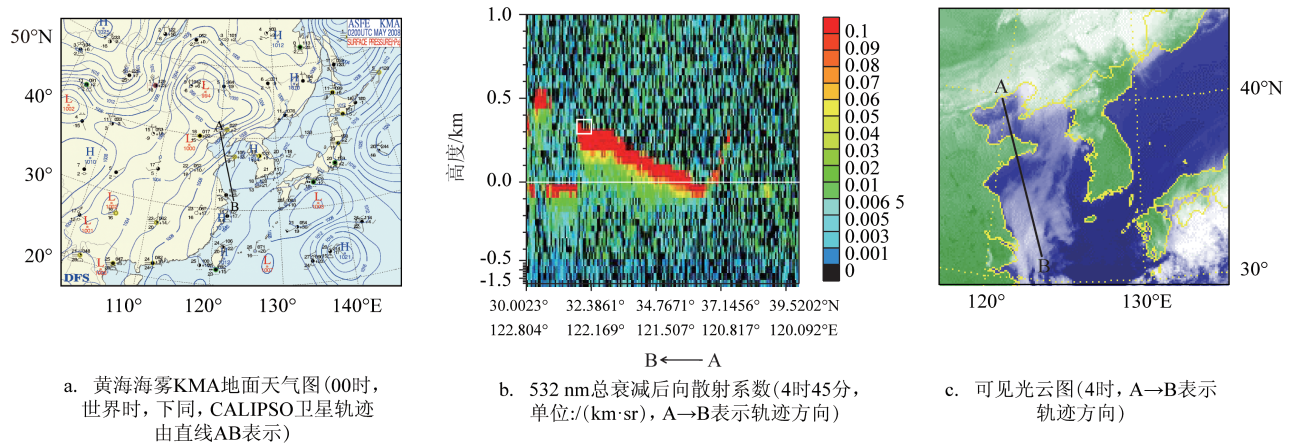


图3 2008年5月2日天气图、散射系数垂直剖面图和MTSAT可见光云图

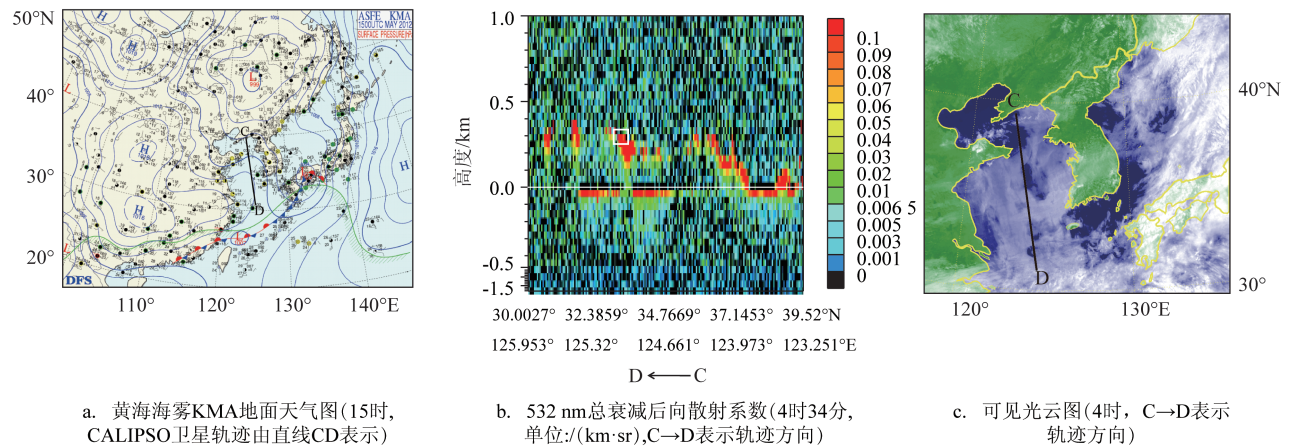


图4 2012年5月15日天气图、散射系数垂直剖面图和MTSAT可见光云图

的生成和维持,地面风向以西南风为主,其中35°N以南风速较小,所以,雾顶高度较高处受风速较低的偏南气流控制。2014年4月10日的海雾个例配置与之类似,在弱西南风的高压后部雾顶高度较高,雾顶高度介于220~280 m。雾顶高度偏低处多位于高压前部,以及高压与低压之间等压线较密集的区域。

2012年5月15日(见图4a)海雾个例属于南高北低的气压场配置,结合总衰减后向散射系数垂直剖面图(见图4b),发现33°N和37°~38°N附近,即高压系统的西南部和西北部海雾雾顶高度大于220 m,高于其他区域。根据卫星轨迹(直线CD)可以判断,沿CD为西北风,高压系统的反气旋环流能够把南部的暖湿气流输送到黄海,雾顶高度较高的区域等压线梯度较小,西北风较弱;靠近C点的区域

位于低压外围,雾顶高度较低。

4.2 低压低槽东移型

2012年5月8日(见图5a)和2016年3月31日(见图6a)的海雾个例是属于低压低槽东移型。2012年5月8日个例(见图5b)中36°~37°N海雾雾顶高度稍高,介于100~160 m,其他区域海雾不明显;对照地面天气图(见图5a)发现雾顶较高区域位于低压前部,等压线较密集,以偏南风为主。从地面天气图(见图6a)上分析发现,2016年3月31日在我国内蒙古东部地区有一个气旋,此时黄海海域是偏西南向的风,形成平流雾。根据总衰减后向散射系数垂直剖面图(见图6b),靠近31°N的区域雾顶高度高于36°~37°N区域,雾顶高度介于200~250 m,该区域位于低压槽前,南部有一个高压中

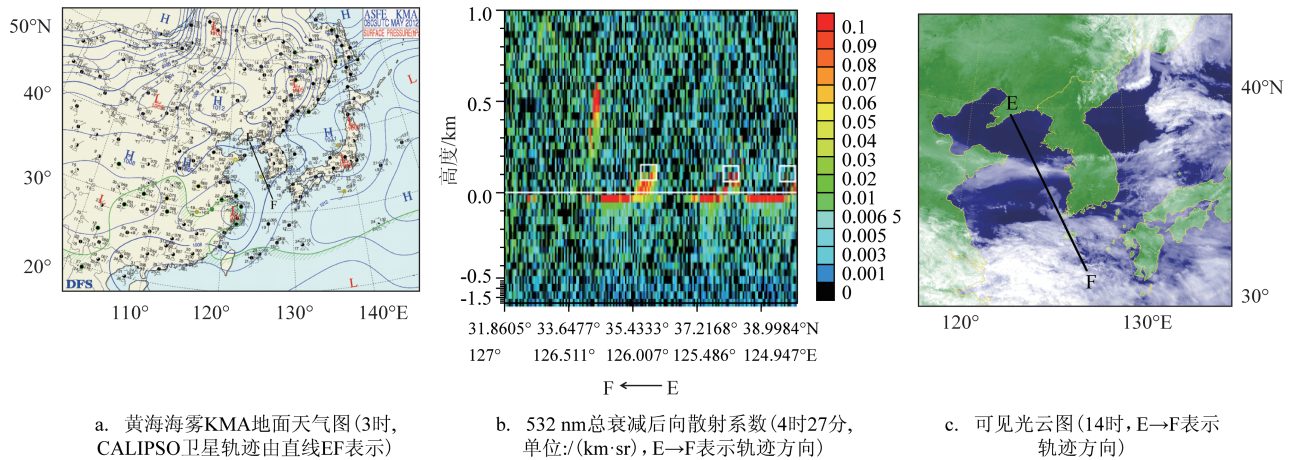


图5 2012年5月8日天气图、散射系数垂直剖面图和MTSAT可见光云图

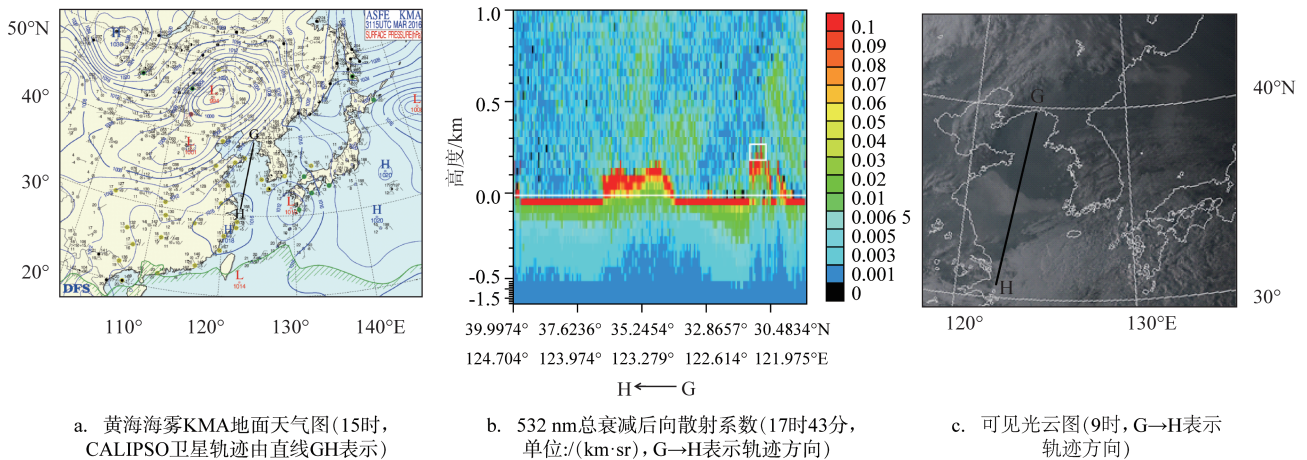


图6 2016年3月31日天气图、散射系数垂直剖面图和MTSAT可见光云图

心,气压梯度大于靠近H点的区域,西南风风速稍大,约为4 m/s。雾顶高度较低的区域西南风较弱,附近站点风速一般小于4 m/s。

5 结论与讨论

本文利用多种观测资料,包括CALIPSO卫星资料、MTSAT可见光云图和KMA地面天气分析图等,选取2007—2018年白天发生的海雾个例,对春夏季海雾的高度特征进行了统计,并研究了不同天气型下雾顶高度的变化趋势,得到结论如下:

- (1) 黄海海雾主要集中在春夏季,秋冬季发生频率明显降低。不同年份雾日数差异显著,2018年最多为53 d,2011年天数最短仅为10 d。
- (2) 黄海海雾雾顶高度在不同月份有明显差

异,7月黄海海雾的雾顶高度最高。2007—2018年黄海春夏季海雾的平均雾顶高度是211 m,海雾雾顶高度最高为370 m,大多数黄海海雾雾顶高度介于100~400 m。

(3) 控制黄海海雾生成发展的主要天气型是入海变性高压型和大陆低压低槽东移型。入海变性高压控制下的弱偏南风区域的海雾雾顶高度相对较高;大陆低压低槽东移型的槽前风速稍大区域的海雾雾顶高度偏高。

参考文献:

- [1] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(3): 359-366.
- [2] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983: 352.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 任兆鹏, 张苏平. 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, 2011, 41(5): 23-30, 109.
- [7] 胡瑞金, 周发琇. 海雾生成过程中平流、湍流、辐射效应研究I. 理论分析[J]. 海洋学报, 1998, 20(1): 25-32.
- [8] 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.
- [9] 赵丽娟. 雾宏微观结构与湍流、辐射、气溶胶相互作用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [10] Leipper D F. Fog forecasting objectively in the California coastal area using LIBS[J]. Weather and Forecasting, 1995, 10(4): 741-762.
- [11] Oliver D A, Lewellen W S, Williamson G G. The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1978, 35(2): 301-316.
- [12] Roach W T. On some quasi-periodic oscillations observed during a field investigation of radiation fog[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 102(432): 355-359.
- [13] 张苏平, 杨育强, 王新功, 等. 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, 2008, 38(5): 689-698.
- [14] 王绪翔, 邵利民, 曹祥村. 黄海西部 2005-2007 年海雾演变的气候特征研究[J]. 海洋预报, 2012, 29(3): 62-68.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王静菊, 高小雨, 高山红. 一次黄海海雾的数据同化试验与形成机制研究[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(1): 42-53.
- [20] Wu D, Lu B, Zhang T, et al. A method of detecting sea fogs using CALIOP data and its application to improve MODIS-based sea fog detection[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, 153: 88-94.

The characteristics of the top height of sea fog over the Yellow Sea in spring and summer based on CALIPSO satellite data

SUN Yi¹, YANG Yue², ZHEN Qing³

(1. Yantai Weather Modification Office, Yantai 264003 China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100 China; 3. Longkou Meteorological Bureau, Yantai 265700 China)

Abstract: The characteristics of the top height of sea fog over the Yellow Sea in spring and summer are statistically analyzed using the CALIPSO satellite data from 2007 to 2018. Furthermore, the synoptic systems that control the generation of sea fog over the Yellow Sea are analyzed and the characteristics of its top height under different synoptic conditions are discussed based on the MTSAT and Himawari-8 visible cloud images and KMA surface pressure charts. The results show that the top height of sea fog over the Yellow Sea is 211 m on average with a maximum of 370 m. Most of the top height is between 100 m and 400 m. The average top height in July is 260 m, which is higher than that in the rest of the year. The main synoptic systems that control the generation and development of sea fog over the Yellow Sea are the transition high to sea and eastward low or trough. The height of sea fog top is relatively high in the area controlled by the transition high to sea with weak southerly wind. The height of sea fog top is higher in the sea fog cases controlled by the eastward low or trough, where the wind speed is slightly larger in front of the trough.

Key words: CALIPSO; the Yellow Sea; sea fog; top height