

刘志杰,王炜,廖志宏,等,2024. FY-4A 温度廓线和融合海温数据协同同化的海雾模拟效果分析[J]. 气象,50(5):547-560. Liu Z J, Wang W, Liao Z H, et al, 2024. Coordinate influence of FY-4A temperature profiles and fusion SST data on the sea fog simulation[J]. Meteor Mon, 50(5):547-560(in Chinese).

FY-4A 温度廓线和融合海温数据协同同化的 海雾模拟效果分析*

刘志杰¹ 王 炜^{2,3} 廖志宏⁴ 李英华^{2,3}

1 天津市西青区气象局,天津 300380

2 天津市海洋气象重点实验室,天津 300074

3 天津市气象科学研究所,天津 300074

4 国家气象信息中心,北京 100081

提 要: 利用 CODAS 实况融合海温和 FY-4A 温度廓线资料协同同化的方法,尝试改进 WRF 模式在黄渤海区域的海雾数值模拟效果。分析结果显示,高时空分辨率的 CODAS 海温显著改善了 WRF 模式对黄渤海区域海雾模拟性能,模拟雾区范围及强度相比 FNL 海温模拟结果更接近实况。通过分析雾区各类要素相对海温变化的敏感度,明确了 2 m 气温及比湿,以及海气界面感热、潜热和水汽通量与海温呈现不同程度的正相关,而液态水含量则与海温呈显著负相关。同时,协同同化 FY-4A 廓线资料可优化 WRF 模式边界层内湿度及风速垂直分布,改善雾区水汽输送及液态水含量。FY-4A 廓线资料和 CODAS 海温的协同同化能更好地模拟出雾区气象要素的中尺度分布特征,表明高精度和高分辨率的海洋实况资料有利于改善黄渤海区域海雾数值模拟效果。

关键词: 海雾,数值模拟,海温,垂直探测

中图分类号: P456, P47

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.072101

Coordinate Influence of FY-4A Temperature Profiles and Fusion SST Data on the Sea Fog Simulation

LIU Zhijie¹ WANG Wei^{2,3} LIAO Zhihong⁴ LI Yinghua^{2,3}

1 Xiqing District Meteorological Office of Tianjin, Tianjin 300380

2 Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074

3 Tianjin Institute of Meteorological Sciences, Tianjin 300074

4 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

Abstract: The paper discusses the coordinate influence of CODAS-SST and the assimilated FY-4A temperature profiles on sea fog simulation with WRF model around the Yellow-Bohai Sea. The analyses show that the high-resolution CODAS-SST can significantly improve the results of sea fog simulation with WRF model around the Yellow-Bohai Sea, which makes the range and intensity of simulated fog more reasonable. By analyzing the sensitivity of various elements in the foggy area to change in SST, we have clarified that the 2 m temperature and specific humidity, as well as the sensible heat, latent heat, and water vapor fluxes at

* 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201801)、中国气象局核心业务专项(YBGJXM(2020)1A-10)和国家自然科学基金青年基金项目(42105009)共同资助

2022 年 12 月 12 日收稿; 2024 年 3 月 18 日收修定稿

第一作者:刘志杰,主要从事海雾数值模拟与预报研究. E-mail:zhijieliu@yeah.net

通讯作者:王炜,主要从事数值模式研究和融合资料应用. E-mail:wwei356@163.com

the sea-air interface, exhibit varying degrees of positive correlation with SST, while the liquid water content shows a significant negative correlation with SST. The assimilation of FY-4A vertical sounding data can further optimize the vertical distribution of specific humidity and wind speed in the boundary layer of WRF model, improving the vapor transport and liquid water content. Therefore, the coordinate assimilation of FY-4A vertical sounding data and CODAS-SST can better simulate the mesoscale characteristics of fog area, which indicates the high-precision and high-resolution ocean observation data are beneficial for improving the numerical simulation capability of sea fog.

Key words: sea fog, numerical simulation, sea surface temperature (SST), vertical sounding

引 言

海雾是一种发生在海上及其沿岸地区的低层水汽凝结现象,其伴随的低能见度特征对海上交通、港口调度、渔业生产等造成极其不利的影 响(Bergot and Koracin, 2021)。黄渤海区域西邻欧亚大陆,东邻太平洋,其特殊的地理位置和气候特征使得这一区域的海雾天气高发(Zhang et al, 2009),严重影响了沿岸港口航运(曹越男等, 2020)。因此,海雾精准预报的社会需求较大。

在以往海雾研究中,常使用浮标、船舶、海岛以及近岸观测资料分析海雾发生发展的天气气候规律(Fernando et al, 2021; 胡树贞等, 2022)。卫星观测的出现,一定程度上弥补了海上观测资料稀少的不足(张伟等, 2021)。随着高精度卫星遥感图像和各类先进融合算法发展,海雾的空间结构和时间演化特征研究取得了显著成果(Yang et al, 2021)。数值模式问世后,海雾的数值模拟和预报成为研究新热点(Fisher and Caplan, 1963; Li et al, 1997), MM5、WRF 等中尺度模式被用于黄渤海海雾个例的诊断分析(Gao et al, 2007),极大助力了海雾中小尺度特征研究。在海雾数值模拟取得长足进步的同时,更多影响海雾数值模拟性能的敏感要素被发现,如初始场资料和物理参数化方案等。鉴于海雾是发生在边界层内近海面的天气现象,边界层内要素模拟性能必将显著影响海雾模拟效果。已有研究表明海雾模拟对边界层参数化方案选取较为敏感(Lin et al, 2017)。模式边界层内的垂直分层设置(杨悦和高山红, 2016; 王慧等, 2022)以及雾顶辐射选项(Yang and Gao, 2020)等均显著影响海雾模拟性能。

在影响海雾数值模拟的众多要素中,海面温度因能持续影响海气界面湍流通量,而在海雾数值模拟中体现出重要作用(张苏平和任兆鹏, 2010)。目

前,常用的海温资料包括美国国家环境预报中心全球再分析数据的海面温度(Zhang et al, 2009; 张苏平和任兆鹏, 2010; Lin et al, 2017)、美国国家海洋和大气管理局逐日最优插值海表面温度(Lee et al, 2021)、东北亚区域全球海洋观测系统海温数据(Yang and Gao, 2020)、中国气象局全球海面温度融合分析系统(CMA Ocean Data Analysis System-SST, CODAS-SST)海温数据(Qu et al, 2021)。由于海温资料的时空分辨率不同,其在黄渤海区域的代表性和准确性存在一定差距。尤其是 CODAS 海温资料业务化以后,其在区域数值模式改进方面的研究还较少,同时其对海雾模拟效果的影响也需要进一步关注。

近年来, FY-4A 携带的干涉式大气垂直探测仪(geostationary interferometric infrared sounder, GIIRS)资料,为获取高分辨率海洋上空大气观测数据带来了便利(Xian et al, 2021)。这些最新的海洋实况资料是否可以改善黄渤海区域雾的数值模拟性能需要进行定量评估。为此,本文基于 WRF 模式开展 CODAS 实况融合海温和 FY-4A 垂直探测资料协同同化试验,研究了其对海雾数值模拟效果的改进程度。

1 资料与方法

1.1 主要资料来源

1.1.1 CODAS 海温资料

CODAS 海温资料来自于国家气象信息中心的 海面温度融合分析系统(师春香等, 2019)。该系统融合了全球浮标和船只、ECMWF 模式 SST 产品以及多颗极轨卫星反演海温资料,采用多重网格变分融合方法实现了多源海温资料的实时融合(徐宾等, 2018)。CODAS 海温有 1 d 和 6 h 的 2 种时间分辨

率产品,对应空间分辨率分别为 0.25° 和 0.1° 。本文重点考虑高时空分辨率的 CODAS 6 h 海温数据对海雾模拟性能的影响。

1.1.2 FY-4A 垂直廓线资料

FY-4A 发射于 2016 年底,其携带的干涉式大气垂直红外探测器(GIIRS)拥有 1650 个光谱探测通道,涵盖了 $4.44\sim 6.06\ \mu\text{m}$ 的中波波段以及 $8.85\sim 14.29\ \mu\text{m}$ 的长波波段。国家卫星气象中心基于自身静止轨道算法试验平台,采用多类反演和订正算法相融合,制作发布了空间水平分辨率 16 km,垂直达到 101 层的大气温度廓线产品(Min et al, 2017)。该产品已业务化并经过相关研究验证(杜明斌等, 2023),晴空下反演偏差在 $-1\ \text{K}$ 左右,均方根误差在 $2\ \text{K}$ 上下;云区误差有所增大,但多体现在中上层,600 hPa 及以下反演均方根误差仍控制在 $3\ \text{K}$ 以下。尽管红外通道大气垂直廓线的反演精度已经有了显著提升,但多限于无云区,对于雾和低云区域的研究还有待加强(Menzel et al, 2018)。因此,本研究将质量较优的云区卫星反演数据同化到模式初始场中,探求云区反演资料在雾模拟中的可用性。

1.2 数值模拟方案

由于黄渤海在 4 个季节中对雾形成的作用不同,因此需要考虑不同季节的 CODAS 实况融合海温和 FY-4A 温度廓线资料对海雾模拟的影响。数值模拟试验选取了 2019 年 7 月和 10 月与 2020 年 2 月和 4 月的 4 次雾过程,分别代表夏、秋、冬、春 4 个不同季节的海雾(表 1)。WRF 模式(V4.1.2)选用单

层方案,水平分辨率为 5 km,垂直方向 51 层,区域中心为 $(40^\circ\text{N}, 115^\circ\text{E})$,网格点数 $439\ \text{个}\times 368\ \text{个}$ 。参照 Yang and Gao(2020),海雾模拟中微物理过程选用 Lin 方案,边界层取 YSU 方案,陆面过程取 Noah 方案,积云参数化选用 KF 方案,长波和短波辐射均选用 RRTMG 方案。

模式大气初始场和边界场条件采用 NCEP/NCAR 每日 4 次的全球再分析资料(FNL)。模式下边界的海温约束资料分别选用了 FNL 初始时刻定常海温和逐 6 h 更新的 CODAS-SST 产品,并且在 6 h CODAS-SST 约束下同化了 FY-4A 温度廓线数据,文中分别称其为 FNL、CODAS、FY-4A 方案(表 1)。其中 CODAS 方案以 CODAS-SST 为模式的下边界驱动场, FY-4A 方案则更进一步,采用 GSI-3DVAR V3.5 系统同化 FY-4A 温度廓线资料。考虑到云区反演的廓线产品质量不稳定,同化前根据产品自带的质量控制码(0, 1, 2, 3, ...)对质量较差部分进行剔除,并在云覆盖区采用最优(质量控制码为 0)部分,预处理后作为新型探空资料参加同化。

因 CODAS 海温融合产品中未使用 FY-4A 卫星数据,其与 FY-4A 反演的温度廓线资料间相互独立,所以设计了 2 种比较方式。第一种方式是以 CODAS 方案结果减去 FNL 方案结果,体现海温资料差异对雾模拟结果的影响;第二种方式是以 FY-4A 方案结果减去 CODAS 方案结果,体现 CODAS-SST 约束条件下的 FY-4A 温度廓线资料对雾模拟结果的影响。为便于对比,全文均采用北京时。

表 1 数值模拟方案

Table 1 Numerical simulation scheme

季节	海雾个例模拟时段/BT	代表时刻/BT	FNL 方案	CODAS 方案	FY-4A 方案
夏	2019 年 7 月 25 日 14 时至 28 日 08 时	7 月 26 日 07 时			
秋	2019 年 10 月 21 日 08 时至 23 日 08 时	10 月 22 日 09 时			
冬	2020 年 2 月 18 日 08 时至 20 日 20 时	2 月 20 日 10 时	FNL-SST	CODAS-SST	CODAS-SST+
春	2020 年 4 月 16 日 08 时至 18 日 08 时	4 月 17 日 11 时			FY-4A 温度廓线

1.3 其他资料与检验方法

海雾模拟效果检验采用定性评估(卢绪兰和彭新东, 2021)与定量分析相结合的方式。海雾实况资料选取了海雾个例模拟时段(表 1)国家卫星气象中心的卫星反演海雾图(吴晓京等, 2017),以及黄渤海区域地面国家站逐时能见度资料。选取 54730、54660、54579 及 54861 共 4 个近岸地面国家级气象观

测站(图 1)分别作为渤海内、渤海海峡、黄海北部和西部代表站,用站点逐时观测能见度体现海雾变化。以上午雾区较强时刻作为代表时刻(表 1),对 4 个海雾模拟效果进行定性评估。定量分析以均方根误差为统计指标,选取 54558、54748、54762 及 54772 共 4 个海上浮标站(图 1)在海雾模拟时段逐时海温、2 m 气温及相对湿度数据,用于评估不同资料对海雾模拟的改进效果。将相对湿度数据在分析中统

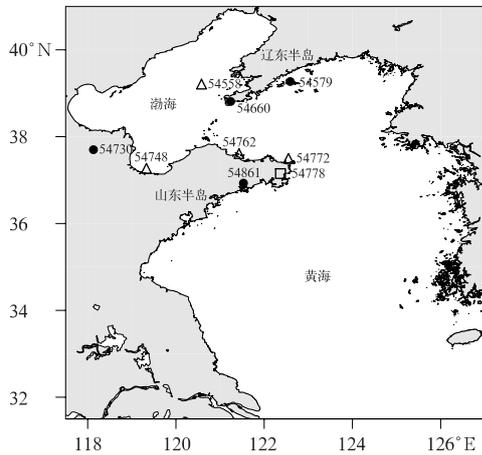


图 1 研究海域及地面站(圆点)、浮标站(三角)、探空站(矩形)位置

Fig. 1 Research sea area and locations of ground stations (circle), buoy stations (triangle) and sounding station (rectangle)

一换算为比湿。同时,采用山东荣成 54778 探空站(图 1)在 2019 年 7 月 25 日 20 时至 28 日 08 时的逐 12 h 探空资料,对比分析边界层内要素模拟结果。

2 模拟结果与实况资料的对比分析

2.1 海雾演变过程实况分析

图 2 给出了 4 个海雾代表时刻卫星反演海雾分布和地面观测站能见度情况,图 3 是每个海雾过程的近岸站点能见度变化趋势。依据观测资料分析获得 4 个海雾过程的实况特征:(1)2019 年 7 月夏季大雾个例自 25 日夜间在渤海海峡及其以东海域形成(图 2a,2b),27 日范围收缩,28 日白天逐步消散(图 3a);(2)2019 年 10 月秋季大雾个例自 21 日夜间在山东半岛、辽东半岛及其近海形成(图 2c,2d),其中辽东半岛东南海域雾区较弱,23 日雾区减弱消散(图 3b);(3)2020 年 2 月冬季大雾个例自 2 月 19 日渤海湾沿岸开始出现,20 日上午雾区覆盖渤海西部、黄海北部及山东半岛东西两侧(图 2e,2f),随后陆上雾区消散,海上雾区也随之减弱(图 3c);(4)2020 年 4 月春季大雾个例自 16 日夜间开始形成并向东移动,17 日白天向黄海东南部收缩(图 2g,2h),18 日显著减弱(图 3d)。

在地面天气图上(图略),夏、秋、冬季 3 次海雾个例均是在弱气压场环境下形成发展的,并在低压东移过境后减弱消散,均维持较长时间。春季个例

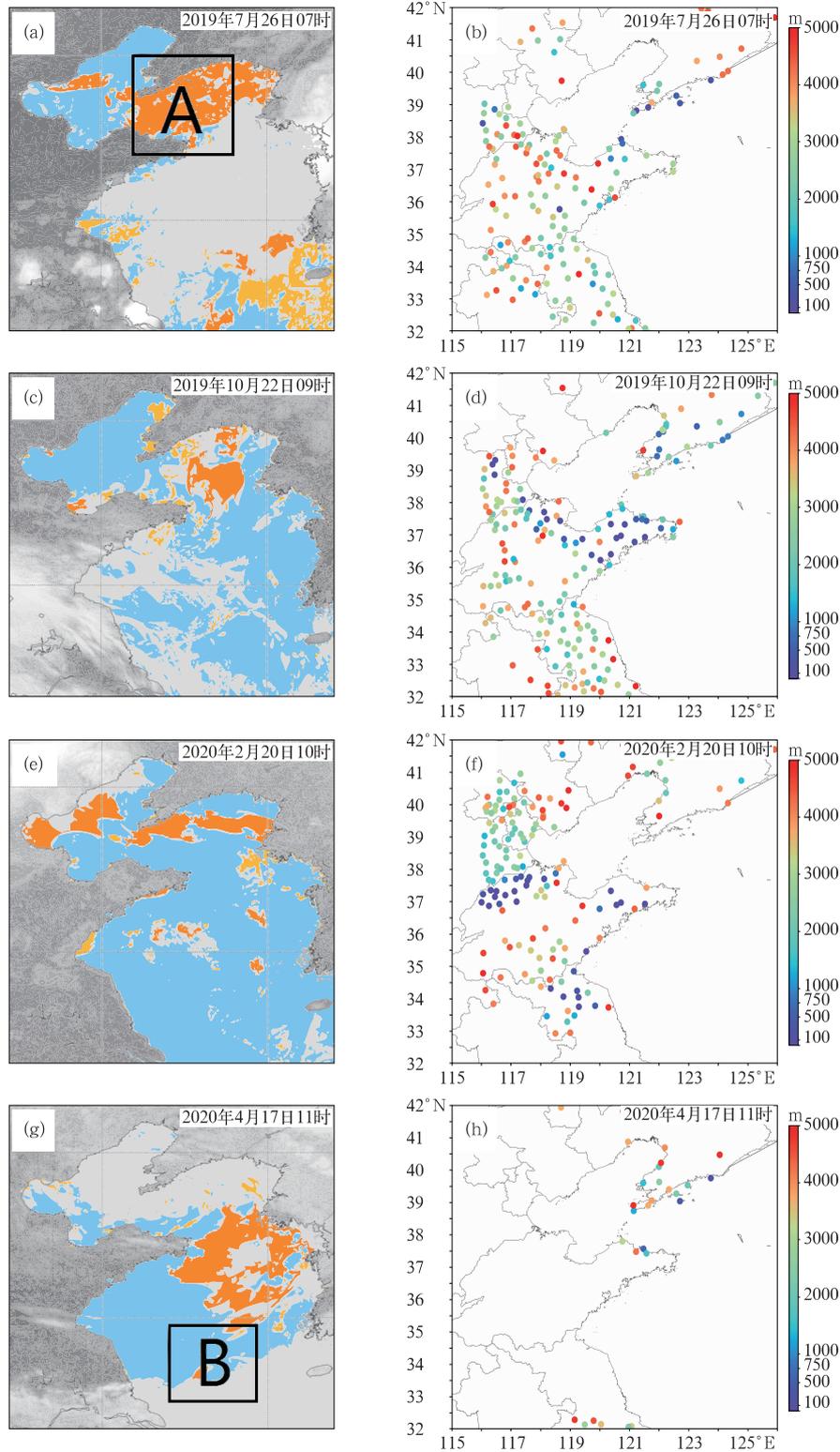
则是在低压东移入海后的槽前偏南暖湿气流下形成,随着低压槽东移减弱。春、夏季海雾个例主体均位于海上,属于平流冷却雾;秋、冬季海雾个例多是陆海相连的辐射雾,其本质上是陆地雾向海上的延伸。

2.2 海雾个例的对比分析

在海雾模拟结果分析中,雾区确定原则是模式最底层液态水含量超过 $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,雾顶高度低于 400 m 的区域(Wang et al,2014)。图 2a 卫星反演雾区中的区域 A($37^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$, $121^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$)存在大范围海雾,而图 2g 的区域 B($32.5^{\circ} \sim 34.5^{\circ} \text{N}$, $122.5^{\circ} \sim 124.5^{\circ} \text{E}$)则以晴空海表为主,雾区范围较小。区域 A 和 B 的海雾分布存在显著差异,用其可以更好地讨论 FNL、CODAS、FY-4A 3 种模拟方案的差异(图 4)。

4 次雾过程的对比分析表明:(1)在夏季过程中,CODAS 方案相对 FNL 方案能模拟出渤海海峡及其以东雾区(区域 A),FY-4A 方案则进一步突出该雾区,整体抑制了 CODAS 方案在渤海内的虚假雾区(图 4a~4c);(2)在秋季过程中,CODAS 方案抑制了 FNL 方案中辽东半岛东南侧近岸过强雾区,同化 FY-4A 卫星资料后则消除了山东半岛北岸虚假雾区(图 4d~4f);(3)在冬季过程中,CODAS 方案相对 FNL 方案模拟的渤海中东部及黄海东北部雾区偏小、偏弱,FY-4A 方案消除了山东半岛北岸虚假雾区,增大南岸雾区,使得模拟结果同实况雾区更接近(图 4g~4i);(4)在春季过程中,相对于 FNL 方案,CODAS 方案在黄海南部雾区强度和高度上均偏弱(区域 B),FY-4A 方案进一步减弱黄海南部的虚假雾区,与卫星反演雾区分布更为贴近(图 4j~4l)。

统计分析 4 个浮标站的实况资料发现(表 2),除 54748 站 CODAS 融合海温均方根误差略大于 FNL 资料外,其余 3 个站点 CODAS 海温资料的均方根误差均显著低于 FNL 海温。4 个浮标站全部观测样本的综合统计结果表明,CODAS 海温的检验均方根误差平均为 2.02°C ,相较 FNL 海温误差降低 17%;CODAS 方案 2 m 气温和比湿均方根误差分别为 1.61°C 和 $1.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相比 FNL 方案模拟误差分别降低了 9% 和 17%。这表明更精确的 CODAS 海温显著改善了 2 m 温、湿度的模拟效果。然而,同化 FY-4A 温度廓线对模式的 2 m 温、湿度影响不明显。



注:图 a,c,e,g 中,深黄色:雾区,浅黄色:疑似雾区,灰色:云区,蓝色:晴空海表;资料来自国家卫星气象中心,网址:ftp.nsmc.org.cn;区域 A/B:代表性研究雾区。

图 2 (a,b)夏季、(c,d)秋季、(e,f)冬季、(g,h)春季海雾个例代表时刻(a,c,e,g)卫星反演雾区及(b,d,f,h)站点能见度
 Fig. 2 (a, c, e, g) Fog area retrieved by satellite and (b, d, f, h) visibility at stations at the representative moments in (a, b) summer, (c, d) autumn, (e, f) winter and (g, h) spring of the sea fog cases

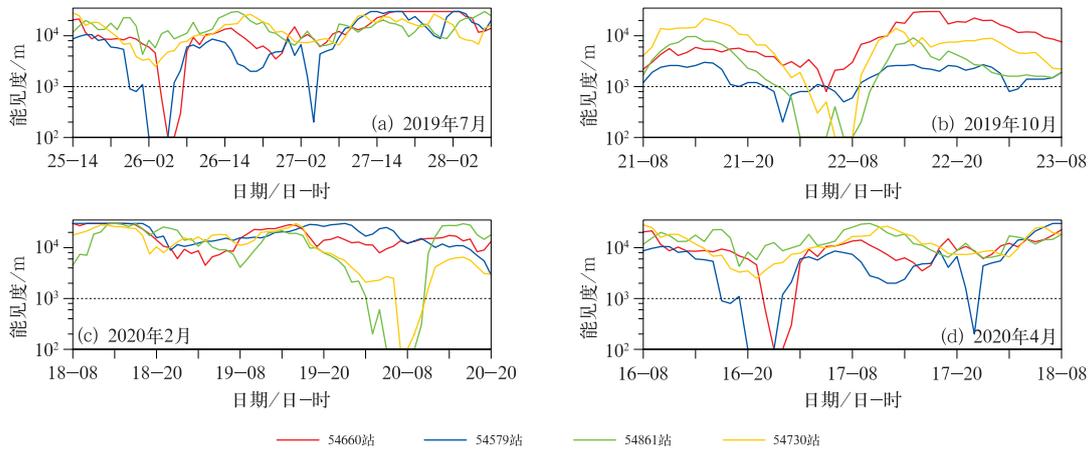


图 3 代表陆地站在(a)夏季、(b)秋季、(c)冬季、(d)春季 4 次海雾个例模拟时段观测能见度

Fig. 3 Observed visibility at representative land stations during the simulation periods of four sea fog cases in (a) summer, (b) autumn, (c) winter, and (d) spring

表 2 黄渤海区域代表浮标站 3 种方案模拟要素均方根误差
Table 2 Root mean square errors of simulation elements of three schemes at representative buoy stations around Yellow-Bohai Sea Region

站号	海温/ $^{\circ}\text{C}$		2 m 气温/ $^{\circ}\text{C}$			2 m 比湿/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$		
	FNL	CODAS/FY-4A	FNL	CODAS	FY-4A	FNL	CODAS	FY-4A
54748	2.83	2.89	2.35	2.42	2.49	1.04	0.98	0.99
54762	2.32	2.09	1.53	1.46	1.32	0.97	0.83	0.86
54772	2.27	1.39	1.74	1.26	1.27	1.83	1.36	1.36
54558	2.37	1.41	1.01	0.88	0.99	1.05	1.44	1.47
合计	2.42	2.02	1.78	1.61	1.60	1.38	1.14	1.15

上述分析表明, CODAS 方案相对 FNL 方案显著改善了海雾大尺度空间分布模拟效果, FY-4A 方案则在 CODAS 方案基础上进一步优化了模拟雾区中小尺度空间分布特征。因 CODAS 方案中高分辨率海温及其模拟的 2 m 温、湿度更为精确, 模拟雾区范围和强度比 FNL 海温的模拟结果更加合理 (Qu et al., 2021), 而且其对春、夏季大范围平流冷却雾的模拟效果改进明显, 体现出海温在平流冷却型海雾模拟中的重要性。同化 FY-4A 卫星温度廓线数据可进一步提升 WRF 模式对雾区中小尺度特征的模拟能力。

3 实况融合海温资料对 WRF 模式的海雾模拟影响

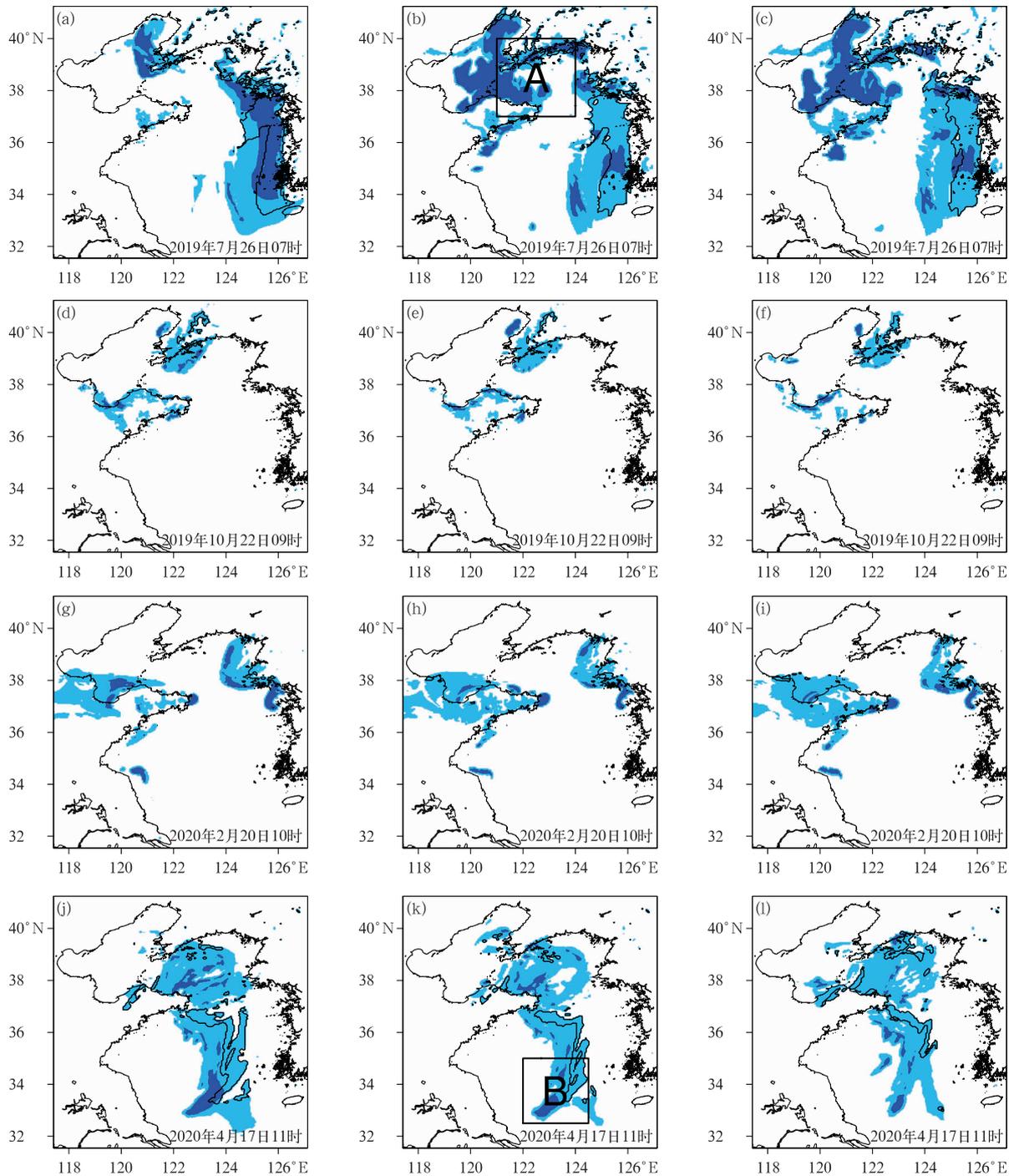
3.1 海温对海雾模拟效果影响的定性分析

讨论海温对模式底层气象要素的影响, 有助于了解海温资料在 WRF 模式模拟海雾中的作用。

CODAS 海温对气象要素的模拟影响采用了 FNL 和 CODAS 2 种方案模拟结果的对比分析方法。鉴于海洋有热容量大和海温变化缓慢的特性, 海温一般在海雾发生前后的空间分布特征相对稳定, 因而对海雾有一个稳定的持续影响。海温资料间比较结果亦表明, 海雾代表时刻 CODAS 与 FNL 的海温差异显著, 平均温差达到 0.88°C , 部分海域相差超过 2°C (图 5a, 5e, 5i, 5m), 有助于开展进一步对比分析。

图 5 的 4 次海雾个例的海温变化与水汽通量及比湿变化关系表明, 黄渤海区域海气界面水汽通量与较大尺度海温变化表现出一定的正相关性, 但其相关程度受季节及自身量值影响显著。2 m 比湿在春、夏季个例中与海温异常有一定正相关性, 但是秋、冬季变化不明显, 推论可能是春、夏季近饱和和空气中气态与液态水相互转化形成了这种差异。

液态水含量在大雾过程中降低能见度的作用很大, 分析液态水含量的变化可以更好地理解海温对海雾模拟的影响。结合 FNL 和 CODAS 方案中海温



注:浅蓝色:雾区,深蓝色:液态水含量超过 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的浓雾区域,等值线:雾顶高度 200 m;区域 A/B:代表性研究雾区。

图 4 (a~c)夏季、(d~f)秋季、(g~i)冬季、(j~l)春季海雾个例代表时刻(a,d,g,j)FNL 方案, (b,e,h,k)CODAS 方案以及(c,f,i,l)FY-4A 方案模拟雾区

Fig. 4 Simulated fog areas at the representative moments in (a-c) summer, (d-f) autumn, (g-i) winter and (j-l) spring of the sea fog cases by (a, d, g, j) FNL, (b, e, h, k) CODAS and (c, f, i, l) FY-4A schemes

及液态水含量(雾区)差异分析可知,雾区液态水含量与海温变化在空间上呈现出显著负相关性,偏暖

(偏冷)海温对应液态水含量降低(增加),使得低能见度雾区范围减小(扩大)、雾强度削弱(增强)。液

态水含量对海温差异较为敏感,且在春、夏季大范围

平流冷却雾中更明显。

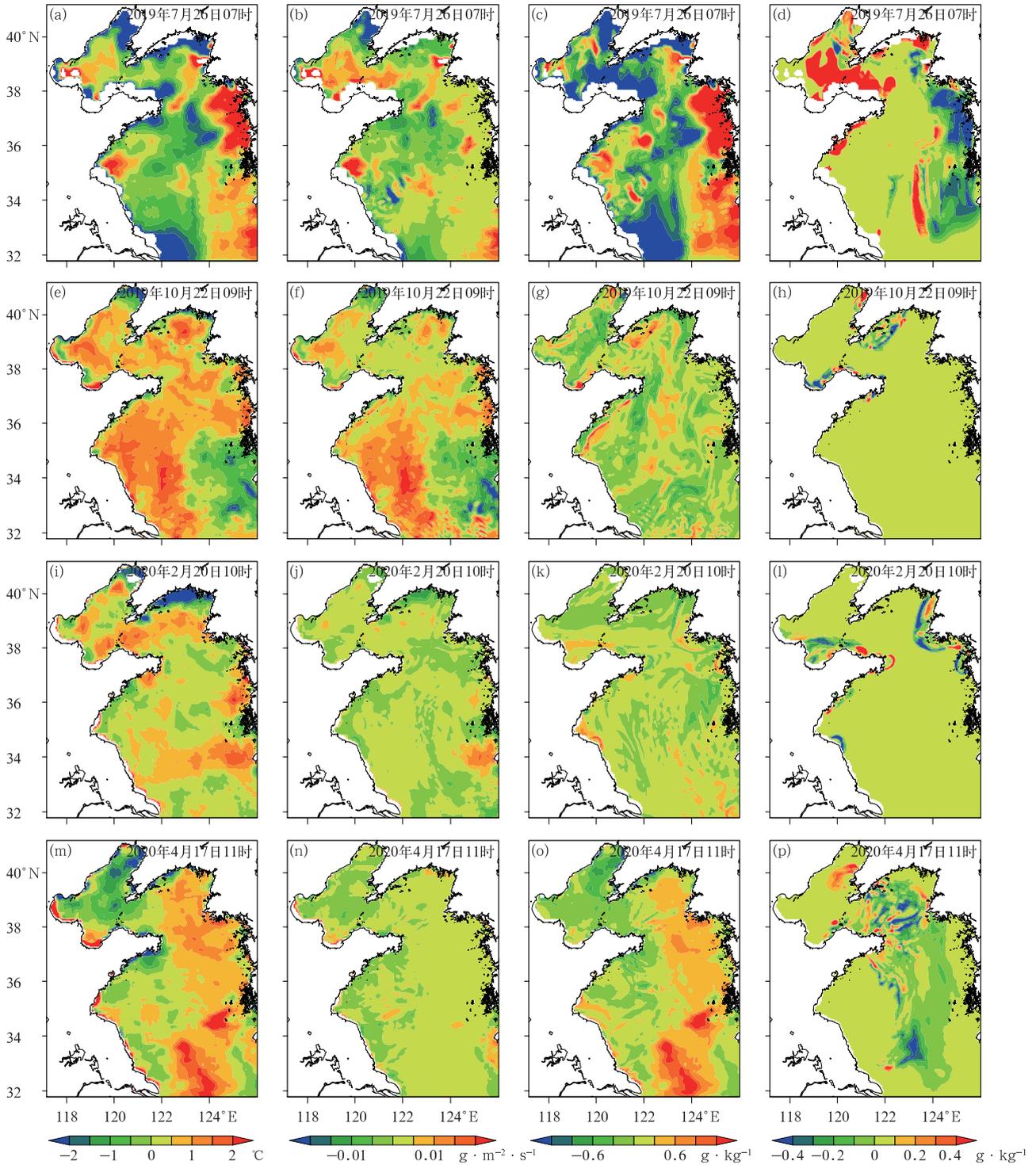


图 5 (a~d)夏季、(e~h)秋季、(i~l)冬季、(m~p)春季海雾个例代表时刻 CODAS 方案与 FNL 方案(a,e,i,m)海温差值, (b,f,j,n)水汽通量差值,(c,g,k,o)2 m 比湿差值及(d,h,l,p)液态水含量差值

Fig. 5 Differences of (a, e, i, m) sea surface temperature, (b, f, j, n) water vapor flux, (c, g, k, o) 2 m specific humidity and (d, h, l, p) liquid water content between CODAS and FNL schemes at the representative moments in (a~d) summer, (e~h) autumn, (i~l) winter and (m~p) spring of the sea fog cases

3.2 海温对海雾模拟效果影响的定量分析

为了量化海雾模拟中各要素对海温变化的响应程度,选取 FNL 及 CODAS 方案在 4 个海雾代表时刻模拟输出的 2 m 气温和比湿、10 m 风速,以及海气界面感热、潜热和水汽通量等要素,分析其对海温数据的敏感度。令 FNL 及 CODAS 方案在共同模拟海雾区域单位格点 i 上要素值分别为 $X_{\text{fnl},i}$ 及 $X_{\text{codas},i}$,可根据式(1)得到 2 种方案海上模拟雾区要素差值与海温差值之比的区域平均 $Y_{\text{codas-fnl}}$,称 $Y_{\text{codas-fnl}}$ 为要素敏感度,并以此表征海温差异对海雾模拟中各气象要素的局地影响。

$$Y_{\text{codas-fnl}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{X_{\text{codas},i} - X_{\text{fnl},i}}{\text{SST}_{\text{codas},i} - \text{SST}_{\text{fnl},i}} \quad (1)$$

式中: $\text{SST}_{\text{fnl},i}$ 和 $\text{SST}_{\text{codas},i}$ 分别为 FNL 及 CODAS 方案在海雾代表时刻第 i 格点上的海温, n 为海雾区域所有格点数。

分析式(1)计算结果(表 3)可知,海温变化对海气界面热通量、水汽通量、2 m 温、湿度以及液态水含量均有一定影响,但风速整体变化小。液态水含量与海温呈现显著负相关性,其敏感度均值可达 $-0.090 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$;其余要素与海温均呈一定正相关性。其中,2 m 气温相对海温变化比值达到 $0.69 \text{ C} \cdot \text{C}^{-1}$,表明近海面气温对海温变化极为敏感,但敏感度的幅度小于 1。因 FNL 及 CODAS 方案间海表风速差异不明显,海气界面中潜热输送主要受水汽通量影响,而感热输送则基本受制于海气温

差。因此,潜热和水汽通量在空间变化上有较强的一致性,且均与海温关系密切,而感热通量则因受海气温差影响,敏感度值偏弱,仅为 $2.47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ 。

各要素对海温变化的响应程度与自身量值有关,因而呈现出显著季节差异。潜热和水汽通量在夏、秋季对海温变化最敏感,感热通量则是在夏季对海温变化敏感。尽管秋、冬季个例中大部分海域 2 m 比湿无明显变化规律,但雾区比湿与海温之间仍存在一定的正相关性(表 3),表明海温可影响雾区的 2 m 比湿。这种影响的机制可能是春、夏季个例的雾区分布较广,大部分区域水汽近饱和,比湿受气温及对应饱和水汽压影响更明显,而秋、冬季个例中大部分海域水汽欠饱和,比湿对气温变化不敏感,在风速及对应水平方向水汽输送无显著变化时,比湿变化不明显(Huang and Jou, 2006)。此外,海温对春、夏季平流冷却雾的模拟影响最为明显,液态水含量的敏感度值超过 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ 。

在黄渤海区域,不论是偏南暖湿气流与本地冷海面相互作用形成的平流冷却雾(Zhang et al, 2015),还是在辐射冷却作用下形成的辐射雾(王彬华, 1983),都需要相对偏冷的下垫面,以利于底层大气中的水汽凝结形成雾区(Lewis et al, 2004)。偏暖海温在使底层大气显著增温的同时,也增大了其饱和水汽压。这种变化会抑制水汽的凝结,其作用效果超过了海表蒸发增强带来的比湿增加效应,因而使得液态水含量减少,雾区强度和范围减弱。

表 3 四季海雾个例代表时刻雾区各要素相对海温变化比例
Table 3 Change proportion of each element relative to sea surface temperature in fog areas at representative moments of fog cases

海雾个例	2 m 气温差值/ 海温差值/ ($\text{C} \cdot \text{C}^{-1}$)	2 m 比湿差值/ 海温差值/($\text{g} \cdot$ $\text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	感热通量差值/ 海温差值/($\text{W} \cdot$ $\text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$)	潜热通量差值/ 海温差值/($\text{W} \cdot$ $\text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$)	水汽通量差值/ 海温差值/($\text{g} \cdot$ $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	液态水含量差值/ 海温差值/($\text{g} \cdot$ $\text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	10 m 风速差值/ 海温差值/($\text{m} \cdot$ $\text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)
夏季	0.60	0.86	3.48	7.62	0.0030	-0.123	0.080
秋季	0.70	0.36	2.73	8.06	0.0032	-0.076	0.033
冬季	0.66	0.15	2.29	3.34	0.0013	-0.055	0.058
春季	0.78	0.44	1.39	1.71	0.0007	-0.104	0.238
平均	0.69	0.45	2.47	5.18	0.0021	-0.090	0.102

4 CODAS 海温与 FY-4A 温度廓线资料协同同化的影响

CODAS 实况融合海温和 FY-4A 温度廓线资

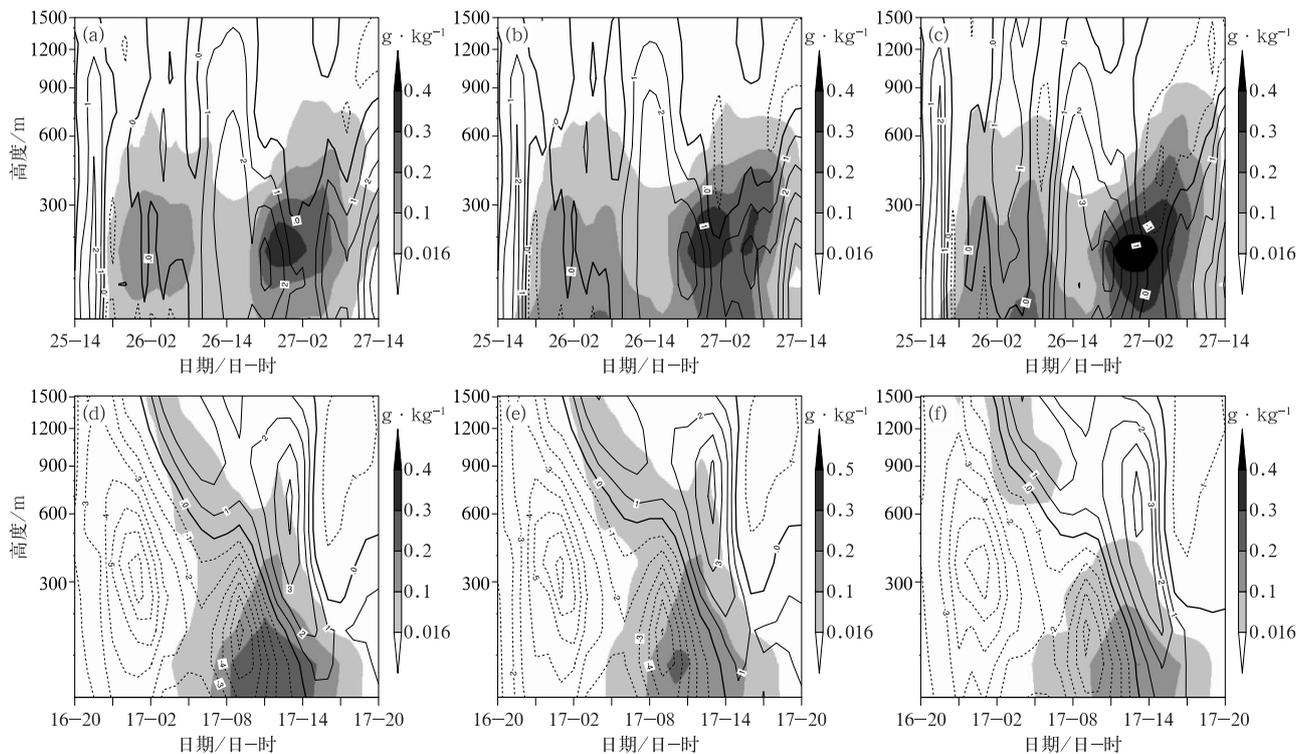
料都是中国气象局业务化的新型观测资料,均有效增强了黄渤海区域的海洋大气信息的获取能力。然而,二者对海上天气预报的影响需要进行评估。因此,增加 CODAS 海温与 FY-4A 资料协同同化研究,可以反映 2 种资料在数值预报模式中的综合作用。

4.1 海温与卫星资料协同同化对边界层内要素模拟影响

为了探究 CODAS 海温与 FY-4A 资料协同同化对 WRF 模式中雾模拟的影响,分析了表 1 中 3 种方案在图 4 中的区域 A(对应 2019 年 7 月夏季个例)和区域 B(对应 2020 年 4 月春季个例)中边界层要素的模拟差异(图 6,图 7)。通过对比 FNL 及 CODAS 方案中边界层内要素分布及其变化可知,2 个代表区域内 2 种方案的液态水含量差异均表现出由近海面向高层递减,且 100 m 以下的温、湿度差异明显。6 h CODAS 海温具有显著日变化特征,其在区域 A 中 2019 年 7 月 26 日 02—07 时以及 27 日 03—14 时的海温显著偏低(图略),对应底层温、湿度明显下降,液态水含量增多,与实况雾区更为吻

合,体现出高时间精度海温资料在海雾模拟中的作用。此外,FNL 与 CODAS 方案在整个边界层内水汽水平输入(水汽通量散度)差异较小,可能与底层风场对海温异常响应较弱有关。

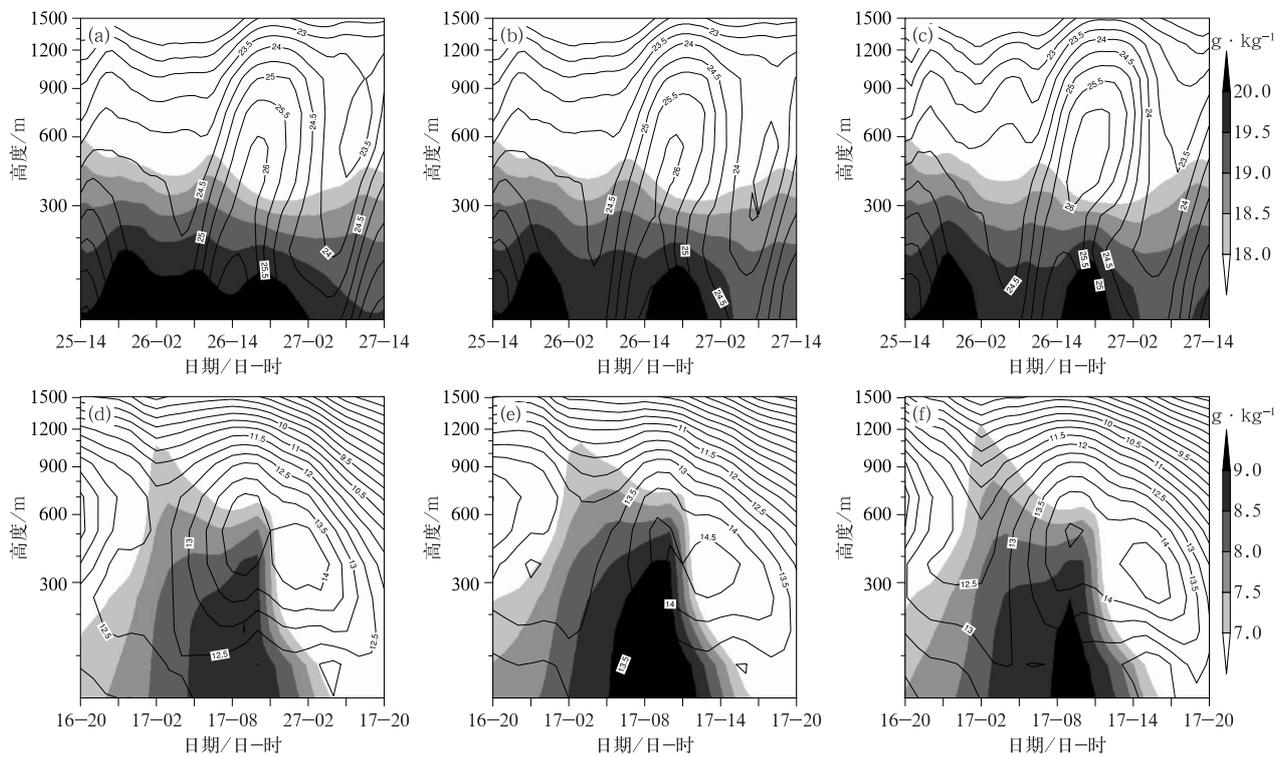
FY-4A 方案相比单纯的 CODAS 方案,模式在整个边界层内的液态水含量均有所改变(图 6)。在 FY-4A 方案中,2019 年 7 月 26 日 06—10 时以及 27 日 02—08 时,区域 A 中水汽输入偏强并向高层扩展,使得雾区液态水含量增多,其高度也有提升;2020 年 4 月 17 日 14 时前,区域 B 的水汽输入减少,但是 14 时后水汽输出增多,对应的液态水含量减少而且高度有所下降。由于水汽输送在平流冷却雾发展中具有重要作用(Huang and Jou,2006),2 种方案中液态水含量和水汽通量散度间有较好对应关系,表明同化卫星廓线资料可改变水汽输送强度



注:区域 A/B 位置见图 2。

图 6 (a~c)2019 年 7 月 25 日 14 时至 27 日 14 时(夏季海雾个例)区域 A 和(d~f)2020 年 4 月 16 日 20 时至 17 日 20 时(春季海雾个例)区域 B 中(a,d)FNL 方案, (b,e)CODAS 方案以及(c,f)FY-4A 方案模拟的液态水含量(阴影)和水汽通量散度(等值线,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

Fig. 6 Simulation results of liquid water content (shaded) and vapor flux divergence (contour, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) of (a, d) FNL, (b, e) CODAS and (c, f) FY-4A schemes in (a~c) Area A of summer sea fog case from 14:00 BT 25 to 14:00 BT 27 July 2019 and (d~f) Area B of spring sea fog case from 20:00 BT 16 to 20:00 BT 17 April 2020



注:区域 A/B 位置见图 2。

图 7 (a~c)2019 年 7 月 25 日 14 时至 27 日 14 时(夏季海雾个例)区域 A 和(d~f)2020 年 4 月 16 日 20 时至 17 日 20 时(春季海雾个例)区域 B 中(a,d)FNL 方案,(b,e)CODAS 方案及(c,f)FY-4A 方案模拟的比湿(阴影)和气温(等值线,单位:℃)

Fig. 7 Simulation results of specific humidity (shaded) and air temperature (contour, unit: °C) of (a, d) FNL, (b, e) CODAS and (c, f) FY-4A schemes in (a-c) Area A of summer sea fog case from 14:00 BT 25 to 14:00 BT 27 July 2019 and (d-f) Area B of spring sea fog case from 20:00 BT 16 to 20:00 BT 17 April 2020

并影响雾区模拟结果。此外,卫星资料也一定程度上改变了温、湿度层结分布,图 7b 和 7c 中的 26 日 20 时以及图 7e 和 7f 中 17 日 11 时前后,模式结果的逆温层强度都调整了,验证了 FY-4A 协同同化对海雾模拟有一定影响。

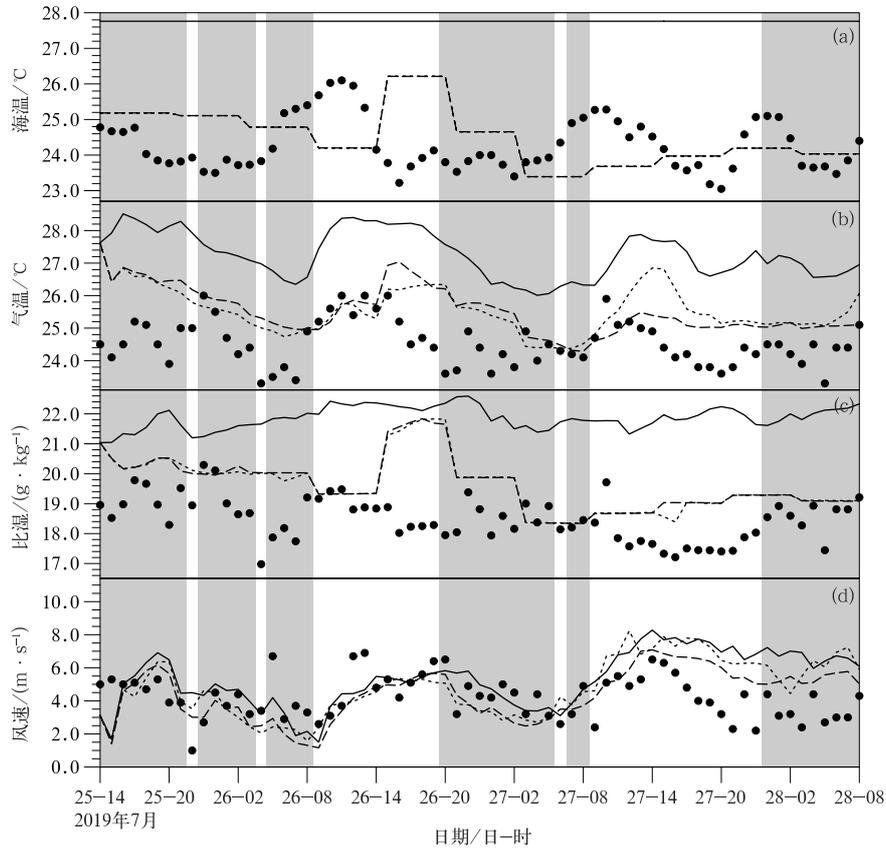
4.2 海温与卫星资料协同同化对雾区影响的时间序列分析

用区域 A 中 54772 鸡鸣岛浮标站在 2019 年夏季个例期间的观测资料,分析 3 种方案的气象要素模拟结果随时间的演变。由于浮标站缺乏能见度观测资料,根据站点温、湿度信息估算能见度(田云菲等,2019),并在图中标示出有雾时段(图 8)。结果显示 6 h CODAS 海温同其对应气温及比湿关系,能较好地反映出实况海温及气温、比湿日内变化特征,但存在 3 h 左右滞后性。CODAS 方案中海温及模

拟气温、比湿误差相对 FNL 方案分别下降了 66%、53%、24%,有明显的改善效果。FY-4A 方案相对 CODAS 方案的 2 m 比湿和风速差异较小,但在有雾时段 2 m 气温同实况更接近。高时间分辨率的 CODAS 海温和 FY-4A 温度廓线有效改善了雾区模式底层温、湿度模拟效果。

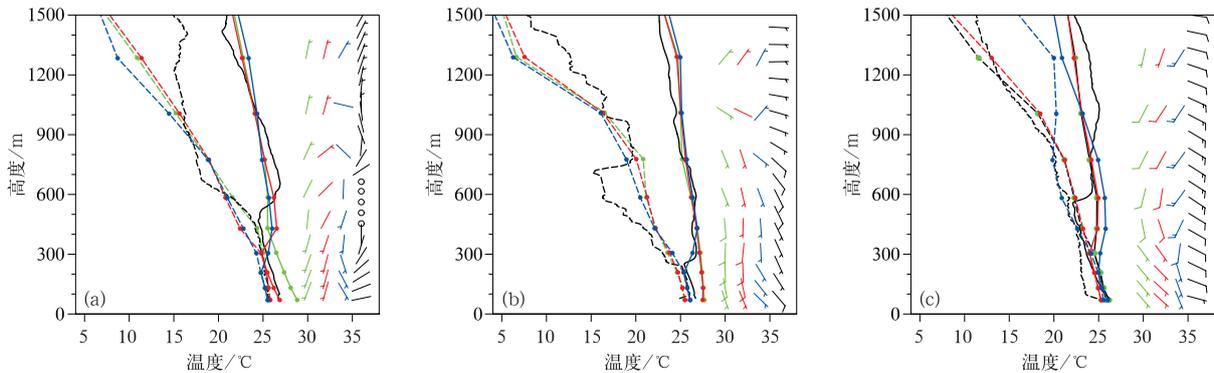
4.3 海温与卫星资料协同同化对雾区影响的垂直结构分析

选取区域 A 中 54778 山东荣成站探空资料,分析 3 种方案的雾区边界层气象要素的模拟效果。图 9 表明 2019 年 7 月 26 日 08 时荣成站呈现上下湿结构,500 m 高度存在逆温结构,风力微弱。受邻近海域海温偏低影响,CODAS 方案模拟底层气温偏低,其上部逆温增强,结果与实况分布更为一致。FY-4A 方案则略微改善了雾区中上部 400 m



注:阴影:有雾时段,圆点:实况,实线:FNL方案,虚线:CODAS方案,点线:FY-4A方案。

图 8 夏季海雾个例模拟时段鸡鸣岛浮标站实况以及模拟的(a)海温,(b)气温,(c)比湿和(d)风速
 Fig. 8 Observations and simulation results of (a) sea surface temperature, (b) air temperature, (c) specific humidity, and (d) wind speed at Jiming Island Buoy Station during the simulation period of summer sea fog



注:黑色:观测值,绿色:FNL方案,红色:CODAS方案,蓝色:FY-4A方案;对应时刻地面最小能见度分别为3000、1000和6000 m。

图 9 2019年7月(a)26日08时,(b)26日20时和(c)27日08时(夏季海雾个例)荣成站观测和模拟的低层大气温度(实线)、露点温度(虚线)及风(风羽)分布

Fig. 9 Distribution of air temperature (solid line), dew point temperature (dashed line) and wind (barb) in the lower atmosphere of summer sea fog case at Rongcheng Station at (a) 08:00 BT 26, (b) 20:00 BT 26 and (c) 08:00 BT 27 July 2019

高度温度露点差。

26日20时该站地面最小能见度达到1000 m左右,200 m以下湿层明显,以上则呈现显著逆温结

构,200~400 m的风速较小。CODAS方案对最底层温、湿度略有改进,FY-4A方案则较好地模拟出底层近饱和湿区和逆温结构以及弱风速。弱风速使

得南侧水汽输入减弱,对应了区域 A 同时刻 500 m 以下逆温增强、水汽输出增加(图 6b, 6c 及图 7b, 7c)。

27 日 08 时该站呈现上干中湿下干结构, 500 m 以上有较高的逆温层, 400 m 以上风速有所增大。3 种方案对温、湿度廓线模拟均存在一定偏差, 但 FY-4A 方案较好地模拟出 400 m 以上风力增大的现象, 加强了区域 A 南侧水汽输入, 对应了图 6 区域 A 该时刻 400 m 以上水汽输送增强, 水汽通量散度减小的现象(图 6b, 6c)。

统计分析整个海雾过程中 3 种方案对荣成探空站温、湿、风 3 个要素模拟效果可知, 高精度 CODAS 海温有效降低了底层大气温、湿度模拟误差, 而 FY-4A 廓线资料改进了边界层比湿和风速的模拟效果, 对应模拟误差分别为 $1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对 CODAS 方案分别下降了 8% 和 32%, 对模拟效果改进明显。

综上所述, 模式底层海雾分布对海温具有较高的敏感性, 其中雾区底层液态水含量与海温之间的敏感度均值将近 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, 体现出海温在海雾模拟中的重要性。海雾上层的液态水含量和雾顶高度等要素受海温差异影响较小, 这与平流冷却雾发展主要受长波辐射冷却机制主导以及湍流交换作用偏弱有关(胡瑞金等, 2006)。海雾天气与海温间存在复杂的相互作用机制, 除高精度海温资料的影响外, 模式的物理参数化方案也是影响海雾数值模拟准确性的重要因素。

5 结论与讨论

本文分析了 CODAS-SST 和 FY-4A 温度廓线资料的协同同化对黄渤海大雾模拟性能的改进效果, 明确了实况资料对海雾模拟过程相关要素的影响并得到如下结论:

(1) 6 h CODAS 实况融合海温资料的日变化信息, 有效改善 WRF 模式底层大气的温、湿度分布, 使得雾区强度和范围与实况更为接近, 提升了底层雾区模拟效果。

(2) 雾区各类要素相对海温变化的敏感度分析表明, 海温差异改变了雾区海气界面热通量、水汽通量及 2 m 温、湿度等气象要素的分布, 上述要素与海温变化间呈现不同程度的正相关性。海温与气象要素相关性具有明显季节变化, 夏季平流冷却雾中气象要素对海温变化最为敏感。

(3) 海温变化显著影响雾区模式底层大气中气

态与液态水的模拟值, 其中液态水含量与海温间存在较强负相关性, 敏感度值可达 $-0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ 。偏暖海温在增强底层大气温、湿度的同时, 会增大空气饱和水汽压, 抑制水汽向液态水转化。液态水含量是影响低能见度的重要因素, 因此液态水含量减小会使得雾区强度偏弱和范围偏小。

(4) 同化 FY-4A 温度廓线产品能够优化雾区中尺度空间分布特征。FY-4A 廓线资料改进了雾区边界层内湿度及风速的垂直分布, 优化了雾区液态水含量模拟效果。

当前, 有云条件下卫星探空资料的反演仍是研究难点(Menzel et al, 2018), 相关的反演算法需要持续优化。此外, 卫星红外通道定标误差本身也在一定程度上影响 FY-4A 温度廓线资料准确性, 进而影响海雾的数值模拟效果。尽管云区的红外大气要素反演存在一些缺陷, 但是在薄的低云条件下, 部分 FY-4A 的反演廓线完整并可以反映出雾区的一些逆温特征(Wang et al, 2022)。而且, 文中的数值模拟研究亦表明预先做好廓线的质量控制筛选, 卫星反演温度廓线资料可在一定程度上改进海雾模拟性能。随着融合算法的持续改进和 FY-4B 的业务化, 新实况资料特别是云区廓线资料对海雾数值模拟的改善效果还需要进一步研究。此外, 本研究工作仅选取了 4 个海雾个例作为代表, 海雾过程的研究个例数量相对偏少, 需要更多个例的研究结果增强结论的普适性。

致谢:感谢国家卫星气象中心吴晓京研究员提供的静止卫星反演海雾产品。

参考文献

- 曹越男, 刘涛, 杨正龙, 等, 2020. 海雾客观预报方法在精细化网格预报中的应用[J]. 气象, 46(10): 1320-1329. Cao Y N, Liu T, Yang Z L, et al, 2020. Application of sea fog objective prediction method in fine gridded weather forecasting[J]. Meteor Mon, 46(10): 1320-1329(in Chinese).
- 杜明斌, 崔林丽, 陆风, 等, 2023. FY-4A/GIIRS 大气温度廓线产品质量评估[J]. 红外与毫米波学报, 42(3): 399-409. Du M B, Cui L L, Lu F, et al, 2023. Quality evaluation of FY-4A/GIIRS atmospheric temperature profile[J]. J Infrared Millim W, 42(3): 399-409(in Chinese).
- 胡瑞金, 董克慧, 周发琇, 2006. 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, 24(2): 156-165. Hu R J, Dong K H, Zhou F X, 2006. Numerical experiments with the advection, turbulence and radiation effects in the sea fog formation process[J]. Adv Mar Sci, 24(2): 156-165(in Chinese).
- 胡树贞, 王志成, 张雪芬, 等, 2022. 毫米波雷达海雾回波特征分析及能见度反演[J]. 气象, 48(10): 1270-1280. Hu S Z, Wang Z C, Zhang X F, et al, 2022. Analysis of sea fog echo characteristics

- and visibility inversion of millimeter-wave radar [J]. Meteor Mon, 48(10):1270-1280(in Chinese).
- 卢绪兰,彭新东,2021. 尺度自适应大气边界层参数化改进及其对一次海雾的数值模拟研究[J]. 气象学报, 79(1):119-131. Lu X L, Peng X D, 2021. Scale-aware parameterization of atmospheric planetary boundary layer and its application to sea fog simulation[J]. Acta Meteor Sin, 79(1):119-131(in Chinese).
- 师春香,潘畅,谷军霞,等,2019. 多源气象数据融合合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 77(4):774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al, 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):774-783(in Chinese).
- 田云菲,杨悦,高山红,2019. 一个黄渤海海雾大气水平能见度算法[J]. 海洋气象学报, 39(2):24-33. Tian Y F, Yang Y, Gao S H, 2019. An algorithm of atmospheric horizontal visibility associated with sea fog over the Yellow and Bohai Seas[J]. J Mar Meteor, 39(2):24-33(in Chinese).
- 王彬华,1983. 海雾[M]. 北京:海洋出版社. Wang B H, 1983. Sea Fog[M]. Beijing:China Ocean Press(in Chinese).
- 王慧,林建,马占山,等,2022. 2018年2月琼州海峡持续性海雾过程的数值模拟分析[J]. 大气科学, 46(5):1267-1280. Wang H, Lin J, Ma Z S, et al, 2022. Numerical simulation and analysis of the persistent sea fog in the Qiongzhou Strait in February 2018[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5):1267-1280(in Chinese).
- 吴晓京,李云,黄彬,等,2017. 利用动态阈值方法改进的风云二号卫星海雾检测技术[J]. 海洋气象学报, 37(2):31-41. Wu X J, Li Y, Huang B, et al, 2017. Application of dynamic threshold method to sea fog detection with FY-2 satellite[J]. J Mar Meteor, 37(2):31-41(in Chinese).
- 徐宾,宇婧婧,张雷,等,2018. 全球海表温度融合研究进展[J]. 气象科技进展, 8(1):164-170. Xu B, Yu J J, Zhang L, et al, 2018. Research progress of global sea surface temperature fusion[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1):164-170(in Chinese).
- 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. Yang Y, Gao S H, 2016. Sensitivity study of vertical resolution in WRF numerical simulation for sea fog over the Yellow Sea[J]. Acta Meteor Sin, 74(6):974-988(in Chinese).
- 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. Zhang S P, Ren Z P, 2010. The influence of the thermal effect of underlying surface on the spring sea fog over the Yellow Sea: observations and numerical simulations[J]. Acta Meteor Sin, 68(4):439-449(in Chinese).
- 张伟,陈德花,胡雅君,等,2021. 闽南沿海一次春季海雾过程微物理特征分析[J]. 气象, 47(2):157-169. Zhang W, Chen D H, Hu Y J, et al, 2021. Microphysical structure analysis of a spring sea fog event in southern coastal area of Fujian[J]. Meteor Mon, 47(2):157-169(in Chinese).
- Bergot T, Koracin D, 2021. Observation, simulation and predictability of fog: review and perspectives[J]. Atmosphere, 12(2):235.
- Fernando H J S, Gultepe I, Dorman C, et al, 2021. C-FOG: life of coastal fog[J]. Bull Amer Meteor Soc, 102(2):E244-E272.
- Fisher E L, Caplan P, 1963. An experiment in numerical prediction of fog and stratus[J]. J Atmos Sci, 20(5):425-437.
- Gao S H, Lin H, Shen B, et al, 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling[J]. Adv Atmos Sci, 24(1):65-81.
- Huang J, Zhou F X, 2006. The cooling and moistening effect on the formation of sea fog in the Huanghai Sea[J]. Acta Oceano Sin, 25(2):49-62.
- Lee E, Kim J H, Heo K Y, et al, 2021. Advection fog over the Eastern Yellow Sea: WRF simulation and its verification by satellite and in situ observations[J]. Remote Sens, 13(8):1480.
- Lewis J M, Koraćin D, Redmond K T, 2004. Sea fog research in the United Kingdom and United States: a historical essay including outlook[J]. Bull Amer Meteor Soc, 85(3):395-408.
- Li Z H, Shi C E, Lu T S, 1997. 3D model study on fog over complex terrain-part II: numerical experiment[J]. Acta Meteor Sin, 11(1):88-94.
- Lin C Y, Zhang Z F, Pu Z X, et al, 2017. Numerical simulations of an advection fog event over Shanghai Pudong International Airport with the WRF model[J]. J Meteor Res, 31(5):874-889.
- Menzel W P, Schmit T J, Zhang P, et al, 2018. Satellite-based atmospheric infrared sounder development and applications[J]. Bull Amer Meteor Soc, 99(3):583-603.
- Min M, Wu C Q, Li C, et al, 2017. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series[J]. J Meteor Res, 31(4):708-719.
- Qu P, Wang W, Liu Z J, et al, 2021. Assessment of a fusion sea surface temperature product for numerical weather predictions in China: a case study[J]. Atmosphere, 12(5):604.
- Wang W, Qu P, Liu Z J, 2022. Mesoscale characteristics analysis of a fog case with complete weather information derived from FengYun-4A data[J]. Meteor Environ Res, 13(2):10-27.
- Wang Y M, Gao S H, Fu G, et al, 2014. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea[J]. Wea Forecasting, 29(2):205-225.
- Xian D, Zhang P, Gao L, et al, 2021. Fengyun meteorological satellite products for earth system science applications[J]. Adv Atmos Sci, 38(8):1267-1284.
- Yang J H, Yoo J M, Choi Y S, 2021. Advanced dual-satellite method for detection of low stratus and fog near Japan at dawn from FY-4A and Himawari-8[J]. Remote Sens, 13(5):1042.
- Yang Y, Gao S H, 2020. The impact of turbulent diffusion driven by fog-top cooling on sea fog development[J]. J Geophys Res: Atmos, 125(4):e2019JD031562.
- Zhang S P, Chen Y, Long J C, et al, 2015. Interannual variability of sea fog frequency in the Northwestern Pacific in July[J]. Atmos Res, 151:189-199.
- Zhang S P, Xie S P, Liu Q Y, et al, 2009. Seasonal variations of Yellow Sea fog: observations and mechanisms[J]. J Climate, 22(24):6758-6772.