

不同边界层方案对一次浙江海雾数值模拟的敏感性研究

陆桥, 高丽*, 翁之梅, 郭九华, 李渊, 方奎明

(台州市气象局, 浙江 台州 318001)

摘要: 通过欧州中期天气预报中心大气再分析资料ERA5资料驱动WRF模式,对2019年6月4—6日发生于浙江沿海的一次平流雾过程开展模拟实验,并利用浙江省气象自动站逐小时气象观测数据检验4种边界层参数化方案(YSU、QNSE、ACM2、MYJ)的模拟能力。结果表明:从对地面气象要素的检验来看,各边界层方案整体对气温和相对湿度的模拟效果较好,但对风速的模拟均较观测结果存在一定的高估,其中ACM2与YSU方案对相对湿度和风速的预报效果总体好于QNSE与MYJ方案,且ACM2方案在相对湿度的预报平稳度以及误差检验上要优于YSU方案。ACM2方案可以较好地再现此次过程海雾的生消演变及雾区分布;YSU方案预报的雾区范围偏大,存在一定空报;而QNSE与MYJ方案则对海-陆雾区分布的把控能力有限。边界层高度直接反映湍流运动的强度,继而影响海雾的生消与发展。局地闭合模型QNSE与MYJ相较于非局地闭合模型YSU和ACM2对沿海地区的湍流混合强度估计不足,造成了对沿海雾区的一定漏报。

关键词: 浙江沿海;平流雾;数值模拟;效果评估

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)04-0043-14

0 引言

海雾是发生于海上大气边界层内,由于水汽凝结而导致的近海面大气水平能见度小于1 km的海洋灾害性天气^[1],其产生的近海面低能见度会对交通运输、渔业生产以及军事活动等造成不利影响^[2-3]。浙江海域面积达26万平方公里,在近海区发生的海难中,由海雾引发的航船触礁、碰撞等海难事故占了很大比重^[4-5],每年因大雾封航或影响码头生产所造成的经济损失不亚于台风和暴雨灾害。因此,开展海雾演变机制和精准预报等相关研究对国民生活 and 经济发展具有重要意义^[6]。

海雾生消的物理过程十分复杂,它是边界层大气运动中微物理、热力以及动力过程相互反馈、相互作用的结果^[7-8]。近几十年来,国内外学者针对海雾开展了大量的观测研究^[9-12],揭露了海雾的宏微观

物理特性和理化机制。20世纪90年代后,随着数值预报模式的日益发展与成熟,利用中尺度天气研究与预报(Weather Research and Forecasting, WRF)模式进行的数值模拟研究得到广泛开展^[13-16]。大气边界层内的湍流运动使得陆地和海洋之间的大气不断进行质量、能量和水汽交换,是影响海雾生消演变的重要因素,而近海面湍流混合作用的特征描述则由WRF模式中的边界层方案体现,因此边界层方案的选择对海雾预报尤为重要。陆雪等^[15]表明YSU(Yonsei University scheme)边界层方案与Lin微物理方案的组合对黄海海雾有较好的模拟效果。王益柏等^[16]认为TEMF(Total Energy Mass Flux)边界层方案和RUC(Rapid Update Cycle)陆面方案适用于华北地区大雾过程模拟。PÉREZ等^[17]比较了不同边界层方案对于地中海沿岸地区气象要素的模拟效果,并探讨这些方案对当地空气质量预报的优劣

收稿日期: 2023-04-16。

基金项目: 浙江省气象科技计划项目(2021YB31);台州市气象科技计划项目(TZ2022QN01)。

作者简介: 陆桥(1994-),男,助理工程师,硕士,主要从事数值预报研究。E-mail:852120404@qq.com

*通信作者: 高丽(1985-),女,高级工程师,硕士,主要从事数值预报研究。E-mail:362579619@qq.com

性。黄政等^[18]比较了不同参数化方案对陆上大雾模拟效果的影响,确定了江苏省大雾的最佳模拟方案。

实际大气的湍流运动具有明显的时空差异,而不同边界层方案对于边界层大气的动量、热量和水汽过程的参数处理各有不同,因此边界层方案对海雾预报存在明显的区域适用性^[15, 19],需要结合地形、季节、天气形势等特点进行针对性的参数化配置。本文针对浙江沿海地区2019年6月的一次海雾天气过程,利用WRF模式耦合不同边界层方案对本次海雾过程进行模拟,并对各方案的模拟效果进行评估,分析预报差异的主要原因,以期对浙江沿海大雾的数值模式诊断和本地化预报提供必要的参考和借鉴。

1 海雾观测过程及环流背景

1.1 实况观测

浙江省自动气象站的能见度实况监测数据显

示(见图1),2019年6月4日夜间—5日凌晨、5日夜间—6日上午浙江沿海出现了较大范围的低能见度天气过程,其中台州近海和沿海一带测站的能见度普遍不足500 m,4日下午—傍晚,温州洞头、瑞安以及台州玉环一带部分沿海站点的实测能见度最先低于500 m,19时(北京时,下同)后低能见度范围开始向东北沿海扩散,台州温岭、椒江、三门沿海站点的能见度迅速下降到200 m以下,4日后半夜—5日早晨,温州中北部、台州和宁波中南部海域普遍出现大范围能见度不足200 m的强浓雾天气,此时段雾区覆盖范围最广、水平能见度最低。5日晨起大雾逐渐消散,沿海能见度恢复正常。5日傍晚—夜间温州洞头—台州三门湾沿海一带再次被强浓雾笼罩,低能见度过程持续到6日上午结束。

1.2 环流背景

从4日14时500 hPa形势场看出(见图2a),浙江地处弱高压脊前,受西北气流控制;在925 hPa形

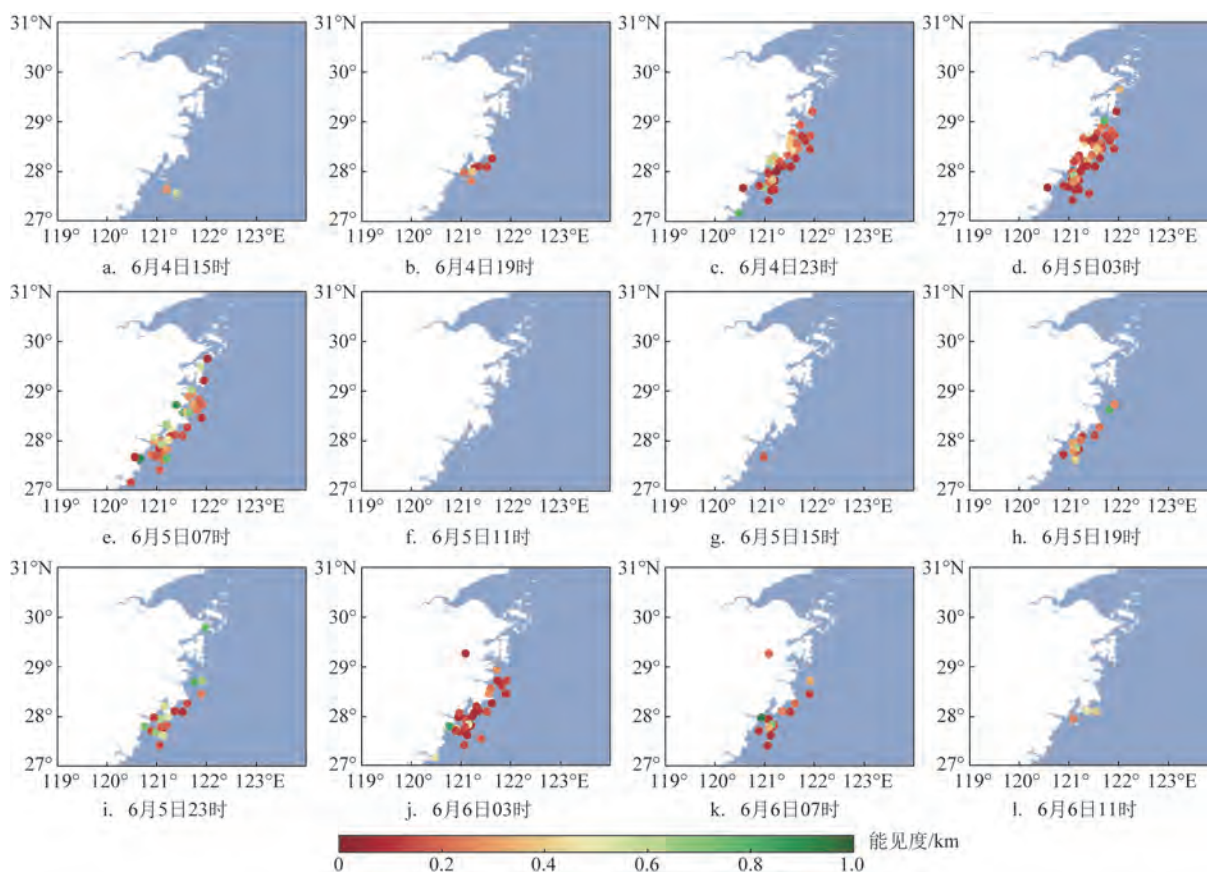


图1 2019年6月4—6日浙江沿海地区气象自动站能见度实况

Fig.1 Spatial distributions of visibility observed by automatic meteorological stations in Zhejiang coastal area during 4–6 June 2019

势场上(见图2d),浙江位于均压场内,风速小,湍流输送弱,近地层稳定。5日02时(见图2b、2e),高层脊区加深缓慢东移,近地层海上高压脊有所加深,沿海位势梯度增大,风力有所增强,浙江沿海位于暖脊西部,吹西南风,浙江沿海32°N附近风力约为4~8 m/s,暖湿气流既可以为近地面层输送水汽,同时又有利于其与较冷的海水发生热量交换,使其降温冷却达到饱和,有利于雾体的形成;此外,大小合适的风速还可以产生一定的垂直湍流运动,使低层水汽不断向高层输送,促进雾体不断向上发展。5日08时(图略),受辐射增温影响,近海面温度升高,逆温层遭到破坏,相对湿度不断减小,海雾消散。5日夜間(见图2c、2f),高层脊区东移过境,浙江高空转为平直西风气流,无明显上升运动,低层随着贵州、重庆一带的低涡发展东移,海上暖脊进一步发展,浙江沿海受暖脊后部偏南暖平流的影响,水汽输送条件转好,新一轮大雾天气再次产生。

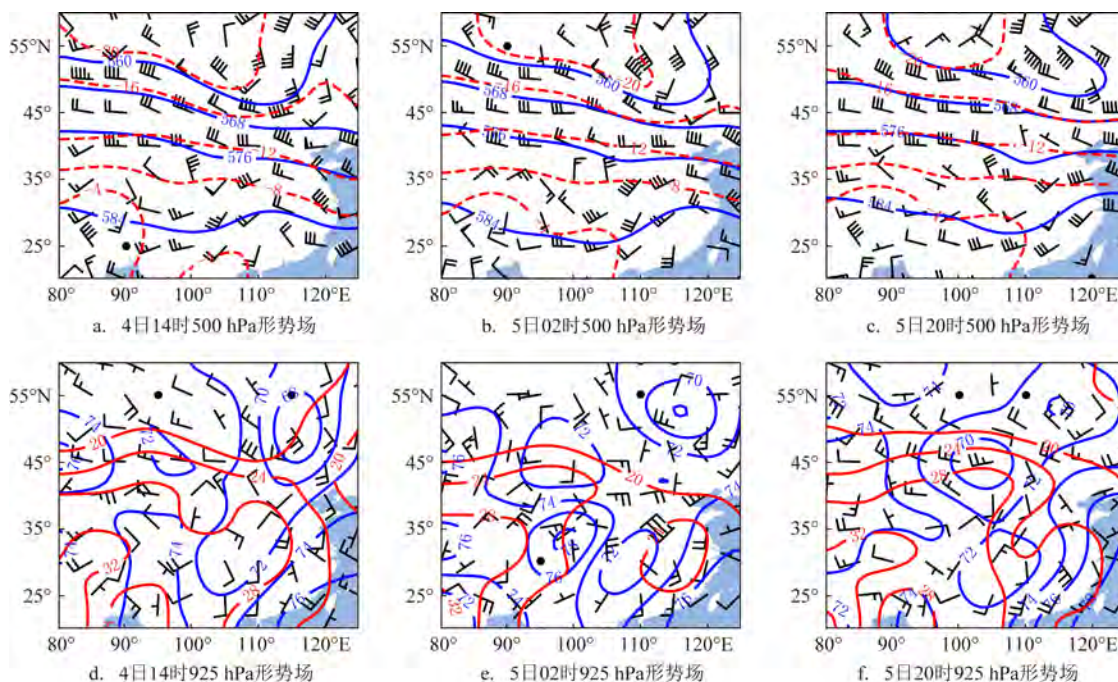
综合分析,本次过程高层主要受纬向环流影响,大气层结较稳定,存在一定的下沉运动;低层受西南暖湿气流影响,有较好的水汽输送条件,同时又与较冷的海面形成平流逆温,产生逆温层,逆温层以下在一定程度上有利于水汽在海面上的聚集;

风速大小合适的暖湿气流又可以通过一定的垂直湍流运动继续向上输送水汽,增加高层气体的饱和度和,促进雾体高度的增长,所以本次浙东南沿海大雾为一次典型的平流雾天气过程。

2 数值实验

2.1 模式设置

本次实验采用高分辨率的中尺度数值模式WRF4.3.1版本对本次平流雾天气过程进行模拟。实验采用双重、双向网格嵌套,模拟区域的中心位于28.65°N, 121.26°E。d01区域共有110×90个格点,格距9 km, d02区域共有91×91个格点,格距3 km,模拟区域地形见图3。实验的地形背景场采用KIOUSSIUKIS等^[20]提供的版本。WRF采用地形跟随质量坐标(即值为从0~1的 η 分层,其中 $\eta = \frac{P - P_{\text{top}}}{P_{\text{bot}} - P_{\text{top}}}$, P_{top} 与 P_{bot} 分别代表大气顶与地表的气压, P 代表某层大气气压)。已有研究表明,适当提高模式的垂直分辨率会有效改善大雾过程的模拟效果^[21],因此本次模拟将初始场垂直层数从默认的37层提升到56层^①,其主要差别集中在980 hPa以下,



注:蓝线为位势高度场(单位:gpm),红线为温度场(单位:℃)

图2 6月4日14时、5日02时、5日20时天气形势图

Fig.2 Synoptic weather patterns at 1400LST 4 June, 0200LST 5 June, and 2000LST 5 June

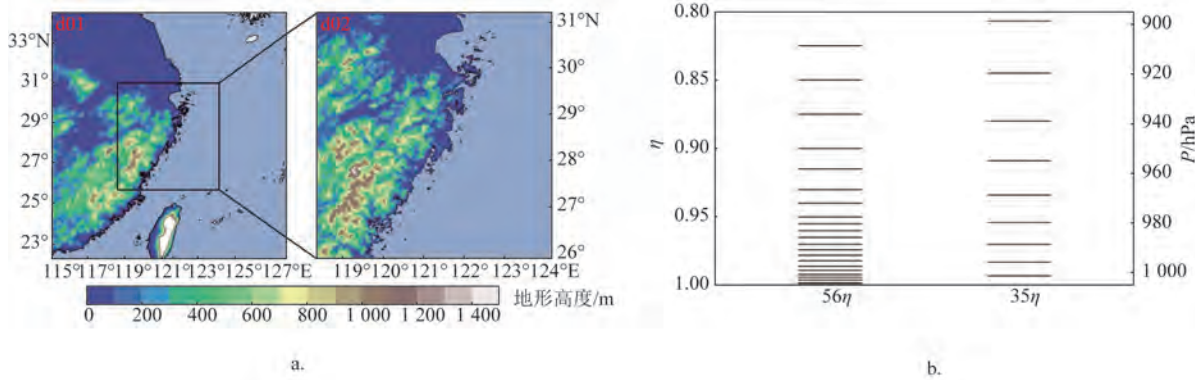


图3 模拟区域地形高度示意图(a)与垂直分辨率设计(b)

Fig.3 Terrain height in the model domain (a) and vertical resolution schemes (b)

其中 0.8η 层以下从默认的10层增加为24层。模式以欧州中期天气预报中心的大气再分析资料ERA5作为初始驱动场,每1 h输出一次结果。

为兼顾计算效率与准确描述复杂物理过程的需要,WRF提供了多种可通过不同物理参数化方案选项用于模拟分析不同类型和尺度的天气形势,包括长(短)波辐射方案、微物理方案、边界层方案、陆面过程、积云对流化方案等。在以往对黄渤海海雾的数值模拟研究中^[22-23],普遍认为海雾的模拟结果对边界层方案的选取最为敏感,其次是长波辐射方案,而微物理过程方案的影响最小。故本文控制其他参数化方案不变,选用YSU、QNSE(Quasi-Normal Scale Elimination PBL)、ACM2(Asymmetric Convective Model)、MYJ(Mellor-Yamada-Janjic scheme)4种边界层参数化方案开展本次浙江沿海平流雾过程的敏感性实验。微物理方案采用适用于实时数据高分辨率模拟的Purdue-Lin方案,长、短波辐射方案采用大雾模拟中常用的RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)方案,积云对流参数化方案与陆面方案分别选用应用较多的Kain-Fritsch浅对流方案和Noah陆面方案。所有数值实验均采用相同的背景场和物理方案(除边界层方案外)。各类参数化方案设置详见表1。

2.2 实验数据

本文采用的主要数据主要包括两种:一是浙江省气象自动站逐小时气象观测数据,主要包括2 m温度、2 m相对湿度、10 m风向、风速以及水平能见度等气象观测要素,对模拟结果进行对比检验;二

表1 WRF4.3参数化方案设置

Tab.1 Design of WRF4.3 parameterization scheme

方案名称	WRF标记	所选方案
微物理方案	mp_physics	Purdue-Lin
积云方案	cu_physics	Kain-Fritsch
短波辐射方案	ra_sw_physics	RRTMG
长波辐射方案	ra_lw_physics	RRTMG
陆面过程	sf_surface_physics	Noah
边界层方案	bl_pbl_physics	YSU&iz0tInd
&近地面方案	&sf_sfclay_physics	QNSE&QNSE
		ACM2&iz0tInd
		MYJ&Eta similar

是ERA5数据(空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为逐3 h),其具有时空分辨率高、时间序列长、数据记录完整、整体数据质量高等特点,可广泛用于表征真实大气的状态属性,因此本文选用ERA5资料为WRF数值模拟提供初始场和侧边界条件。

2.3 评估方法

本文采用平均误差(Mean Bias,记作BIAS)、平均均方根误差(Mean Root Mean Square Error,MRMSE)、平均相对误差(Mean Relative Difference,MRD)、相关系数(R)与标准差比率(σ)评估每种方案对各类气象要素的预报效果。具体算法为:

$$\text{BIAS} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij}^m - X_{ij}^n) \quad (1)$$

$$\text{MRMSE} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(X_{ij}^m - \bar{X}^m) - (X_{ij}^n - \bar{X}^n)]^2} \quad (2)$$

$$\text{MRD} = \frac{I}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left| \frac{X_{ij}^m - X_{ij}^n}{X_{ij}^n} \right| \quad (3)$$

$$R = \frac{\left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij}^m - \bar{X}^m)(X_{ij}^n - \bar{X}^n) \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij}^m - \bar{X}^m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij}^n - \bar{X}^n)^2} \right]} \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_m / \sigma_n \quad (5)$$

式中: X^m 是模式气象要素模拟值; X^n 是自动站气象要素观测值; M 是参与计算的站点总数; N 是过程时段内参与计算的时次总数; \bar{X}^m 是模式模拟要素的平均值; \bar{X}^n 是站点观测气象要素的平均值; i 为站点序号; j 为时次数序号; $\sigma_m = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij}^m - \bar{X}^m)^2 / MN}$ 为模式模拟要素的标准差; $\sigma_n = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij}^n - \bar{X}^n)^2 / MN}$ 为观测气象要素的标准差。

此外,本文采用TS(Threat Score)评分、BS(Bias Score)评分来评估雾区预报效果,具体算法为:

$$\text{TS} = \frac{\text{NA}}{\text{NA} + \text{NB} + \text{NC}} \quad (6)$$

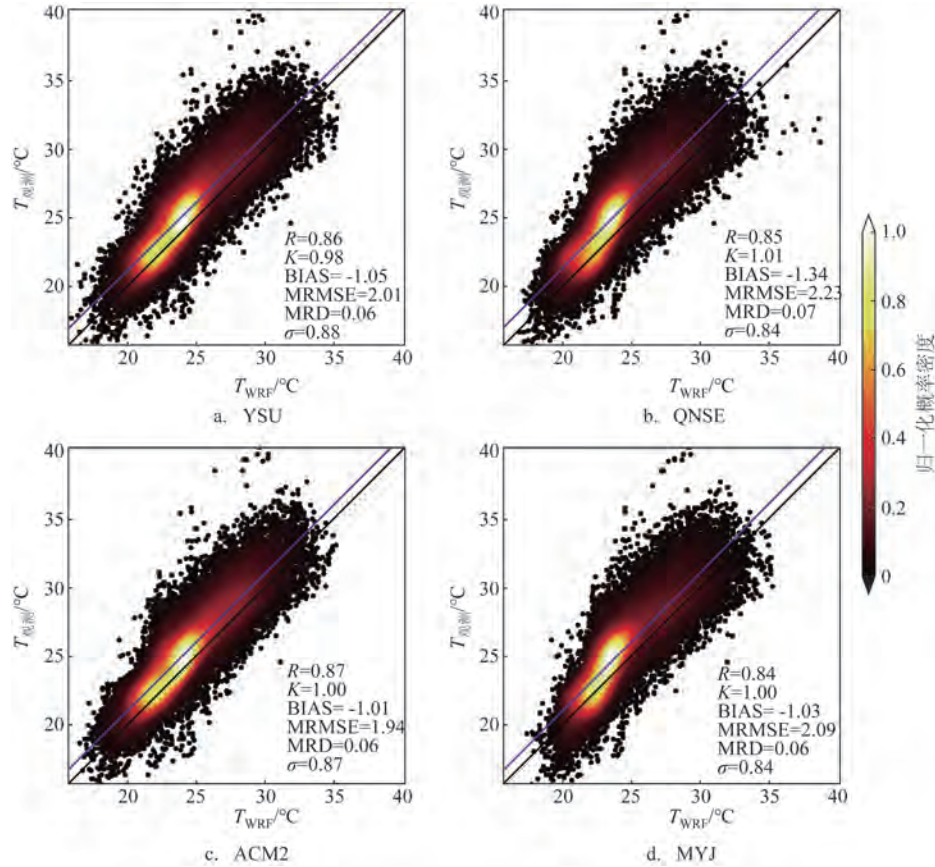
$$\text{BS} = \frac{\text{NA} + \text{NB}}{\text{NA} + \text{NC}} \quad (7)$$

式中:NA为大雾预报正确总次数;NB为空报总次数;NC为漏报总次数。

3 结果分析

3.1 地面气象要素

基于海雾发生时段(4日14时—6日14时)内浙江沿海城市(台州、宁波、温州)120个区域自动站逐小时气象要素的实时观测资料,对耦合不同边界层方案的地面气象要素(2 m高度气温、2 m高度相对湿度、10 m高度风速)的模拟效果进行评估。图4—



注:图中蓝线为模拟与观测结果的线性拟合直线,黑线表示理想线性拟合直线

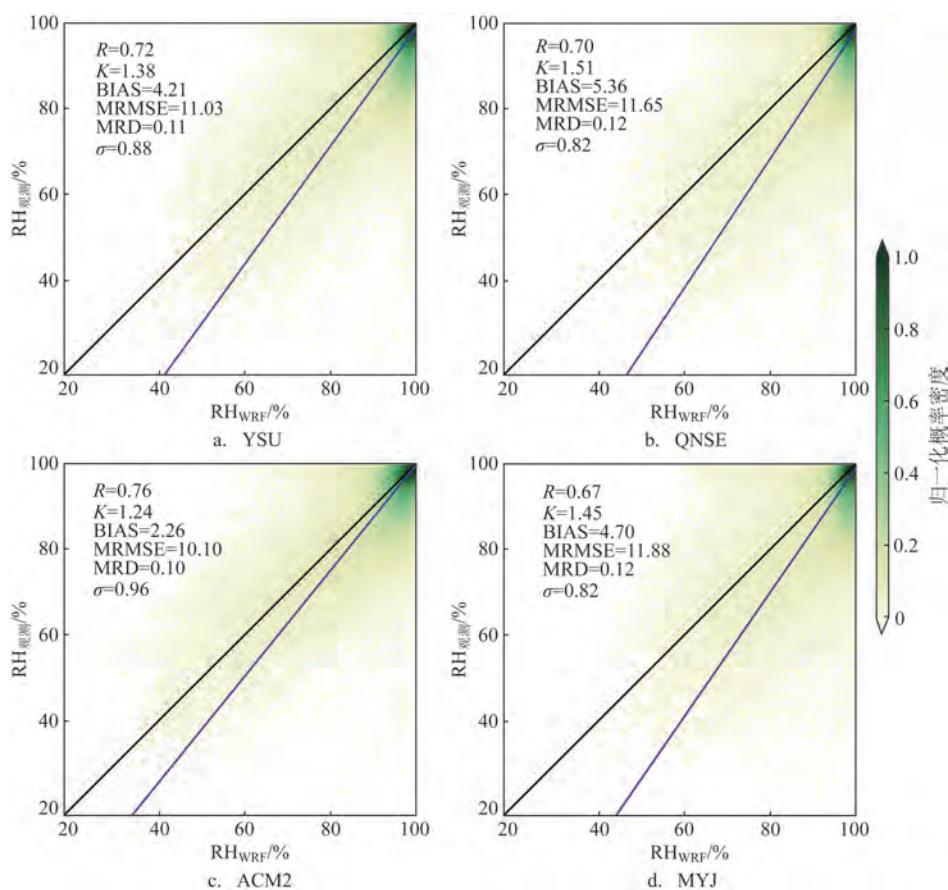
图4 不同边界层参数化方案下的模拟温度与观测温度的对比

Fig.4 Comparisons of simulated and observed air temperature in different boundary layer parameterization schemes

6分别为不同参数化方案下气温、相对湿度和风速的模拟结果与观测值的散点对比图,色标表示数据点的归一化概率密度(Normalized Probability Density)分布。平均误差、相关系数、平均均方根误差和平均相对误差各项数据显示,各参数化方案整体展现出模拟的气温略偏低、相对湿度及风速偏高的特征,总体上模型对温度的预报效果最好,相对湿度次之,对风力的预报效果稍差。从平均误差来看,各方案模拟的气温均较实测略偏低 $1.0\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而相对湿度和风速则分别较实况偏高约 $2\%\sim 5\%$ 与 $1.3\sim 1.7\text{ m/s}$ 。从平均相对误差与相关性(相关系数)的检验上看,所有参数化方案对于温度的模拟效果最好(相关系数均在 0.84 以上,且存在 7% 左右的高估);相对湿度的模拟效果较好(相关系数 $0.70\sim 0.75$ 之间,且存在 $10\%\sim 12\%$ 的高估),而对风速的模拟效果一般,相关系数仅在 $0.5\sim 0.6$ 之间,

且都普遍较实测存在明显的高估。已有研究也表明^[24-25],模式对风力的模拟效果往往依赖于地形因素和格点分辨率,对沿海风力的预报往往会偏大,而对内陆陡峭山脉地形下的风力预报则会偏小。

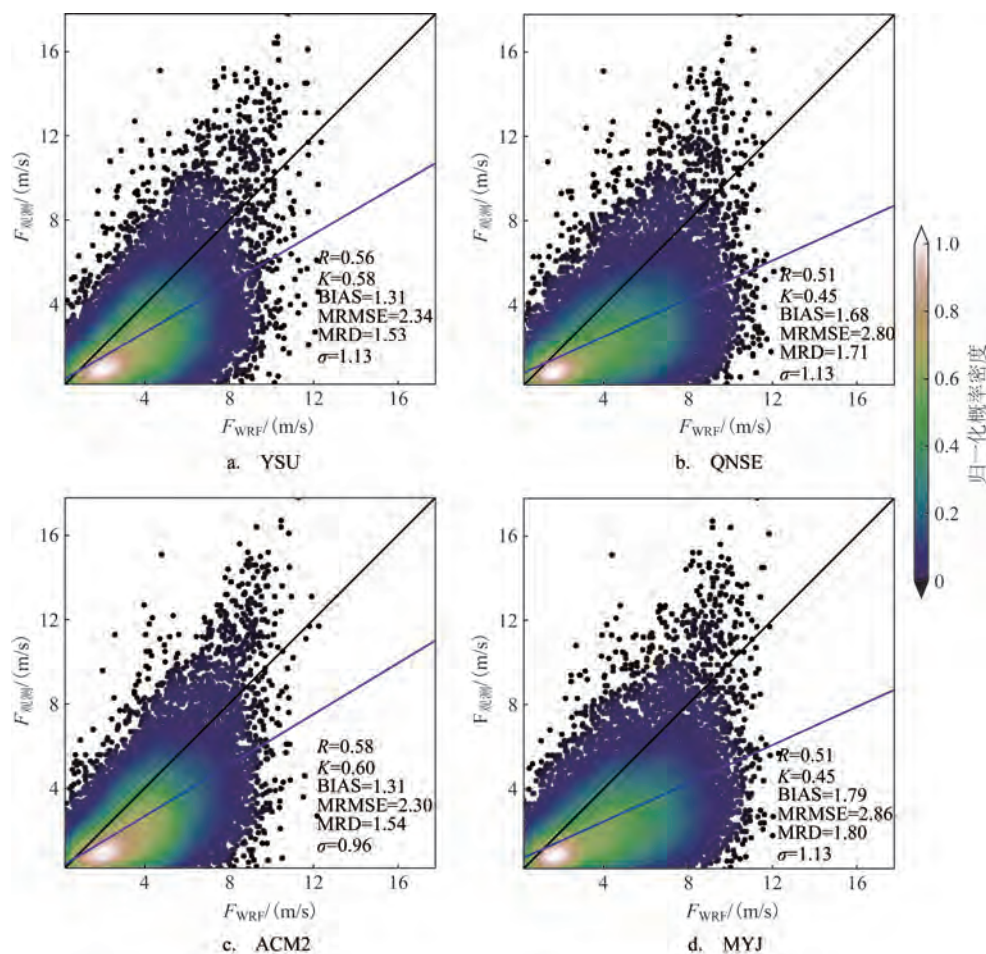
对比4类边界层方案对同一气象要素的模拟效果,其中气温受不同边界层方案的影响相对较小,而相对湿度和风速的模拟结果在一定程度上依赖于边界层方案的选择,从相关性上看,YSU和ACM2方案模拟的相对湿度和风速与观测值的相关性最好。误差检验方面,ACM2与YSU对于实况气象要素的平均相对误差基本一致,且都小于QNSE与MYJ方案,但在平均误差和均方根误差的检验上,ACM2对相对湿度的高估程度较YSU略低,误差相对较小。此外,标准差比率可以表征两组数据离散程度的差异,标准差比率越接近 1 ,说明预报要素与观测要素的离散程度越接近,预测效果越好。



注:图中蓝线为模拟与观测结果的线性拟合直线,黑线表示理想线性拟合直线

图5 不同边界层参数化方案下的模拟相对湿度与观测相对湿度的对比

Fig.5 Comparisons of simulated and observed relative humidity in different boundary layer parameterization schemes



注:图中蓝线为模拟与观测结果的线性拟合直线,黑线表示理想线性拟合直线

图6 不同边界层参数化方案下的模拟风速与观测风速的对比

Fig.6 Comparisons of simulated and observed wind velocity in different boundary layer parameterization schemes

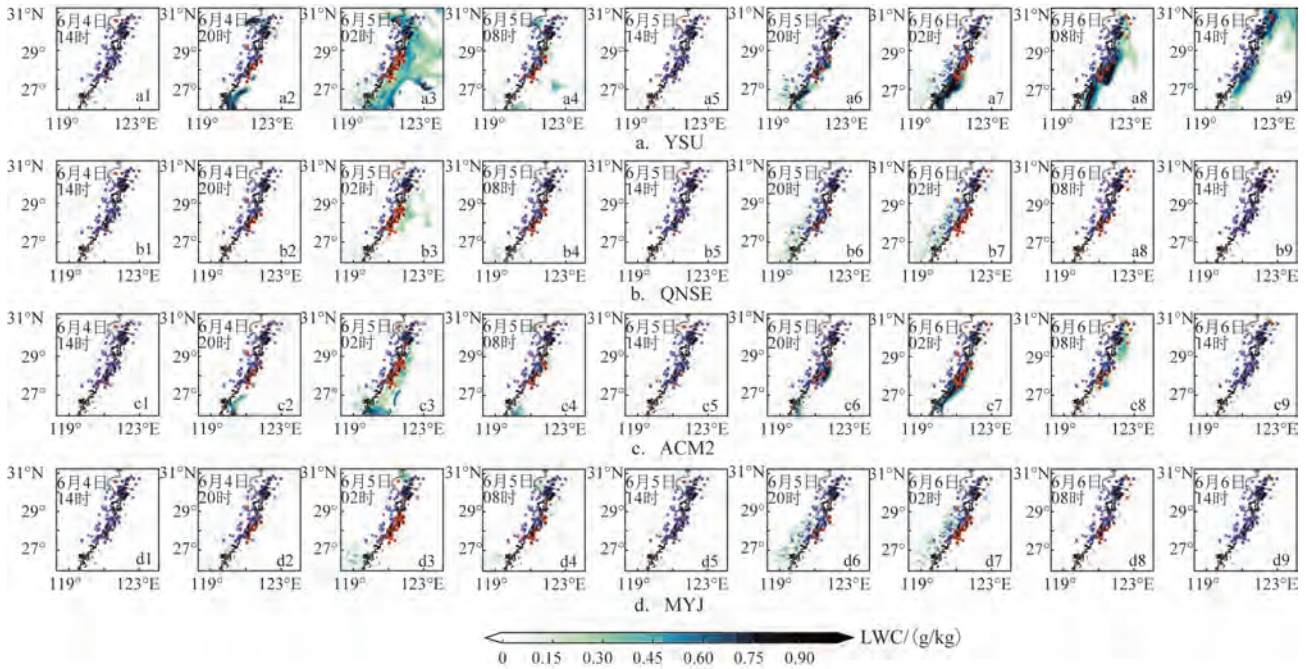
从气温和风速上看,YSU与ACM2方案展现的标准差比率与实况最为接近,说明两种方案对于温度和风速变化的预测能力较强,而QNSE与MYJ对风速模拟的标准差比率均大于1,离散程度偏大;但在相对湿度的预报平稳度和误差检验上,ACM2方案优于YSU。

3.2 雾区模拟效果

WRF模式并没有对能见度的直接模拟结果。目前海雾的数值模拟一般利用液态水含量(Liquid Water Content, LWC)并依据能见度经验公式来反演水平大气能见度。根据经验关系公式^[26],一般将 $LWC=0.05 \text{ g/kg}$ (对应水平能见度为1 000 m)作为成雾阈值^[27],因此本文将距海平面10 m高度处 $LWC \geq 0.05 \text{ g/kg}$ 所对应的区域作为雾区的判别指标。此

外,本文将模拟区域内的所有观测站点与模拟格点匹配到相同的网格点进行比较,运用水平雾区统计评分(TS、BS)验证雾区的预报效果。TS、BS评分分别用来反映预报的准确度和偏差程度,TS评分越接近1,表示模式对雾区的预报能力越好;BS评分大于1时,表示模拟的雾区范围较实况偏大,小于1时,则偏小,越接近1,代表模拟雾区的范围与实况的偏差越小。

图7为不同边界层方案在平流雾生成—消散整个时段下所模拟的雾区与地面观测能见度的比较。从图中可以看到,4种方案大体都能预报出实验时段浙江沿海大雾的整体分布,但不同方案对实验时段雾的生效时间、雾区范围预报有所差异。YSU方案模拟的液态水含量最高,雾区范围偏大,尤其是在5日夜间—6日早晨,对台州北部—宁波海域一带



注:阴影区域为模拟液态水含量 ≥ 0.05 g/kg的区域;●代表水平能见度小于1 km的测站;×代表水平能见度大于1 km的测站。

图7 耦合不同边界层方案下的模拟雾区与地面实测雾区的比较

Fig.7 Comparison between the simulated and observed fog zone in different boundary layer parameterization schemes

的雾区范围空报较明显(见图7a6—7a8),且对6日白天雾的消散预报滞后于实况(见图7a9);QNSE与MYJ方案的模拟结果较为接近(见图7b、7d),但模拟的海雾雾区范围较ACM2偏小,尤其是针对4日夜间的过程,MYJ方案在台州—宁波沿海一带存在较明显的漏报(见图7d3),此外,5日20时—6日08时,自动站监测的低能见度天气主要集中于温州—台州南部沿海一带,但两组方案将雾区范围定在了温州和台州境内。对比其余3种方案,ACM2方案针对5日凌晨、5日夜間—6日早晨这两次雾体最浓、雾区范围最大的时段,模拟的雾区可以覆盖沿海大部分低能见度站点,对沿海与内陆雾区的把握最为准确(其余3种方案都对温州内陆地区的雾区存在或多或少的空报),并且也是4种方案里唯一准确预报出了5日夜間台州三门湾—温州中部沿海一带的局部雾区(见图7c6)。

耦合4种边界层方案,YSU模拟的液态水含量最高、雾区最广,存在一定空报,预报的雾的消时间均较实况偏晚;QNSE与MYJ模拟的液态水含量较低、雾区范围较窄,但对雾体落区的整体把控不如YSU与ACM2方案;ACM2方案较好地模拟出两

次海雾自南向北发生、发展及消散的过程,模拟的海雾区域与自动站能见度实况最为吻合。但稍有不足的是,4种边界层方案都没有准确预报出4日下午—夜里海上平流雾的出现时间,从而产生了一定程度的迟报(见图7a2、7b2、7c2、7d2)。

根据式(6)、(7)分别计算出YSU、QNSE、ACM2与MYJ方案下本次实验时段内TS与BS的评分均值,其中TS评分分别为0.74、0.81、0.83、0.81,BS评分分别为1.25、1.05、1.09、0.99。综合两个评分指标来看,YSU方案的TS评分相对较低,BS评分最大,说明该方案对浙江沿海雾区的整体预报范围偏大,这与其在浙中北一带存在较多的空报有关,但其模拟雾区的海陆整体分布与实际情况较为接近。QNSE、MYJ两种方案的预报评分都非常接近,虽然二者的BS评分接近于1,但由于其对浙中北沿海大雾存在漏报,而对内陆地区存在一定空报,故两者抵消后导致BS评分较高。ACM2方案对沿海地区无明显的空报与漏报现象,可以较准确地模拟出整个大雾过程的生消演变,故其TS与BS整体评分良好。

图8为针对本次平流雾过程的不同时段,通过

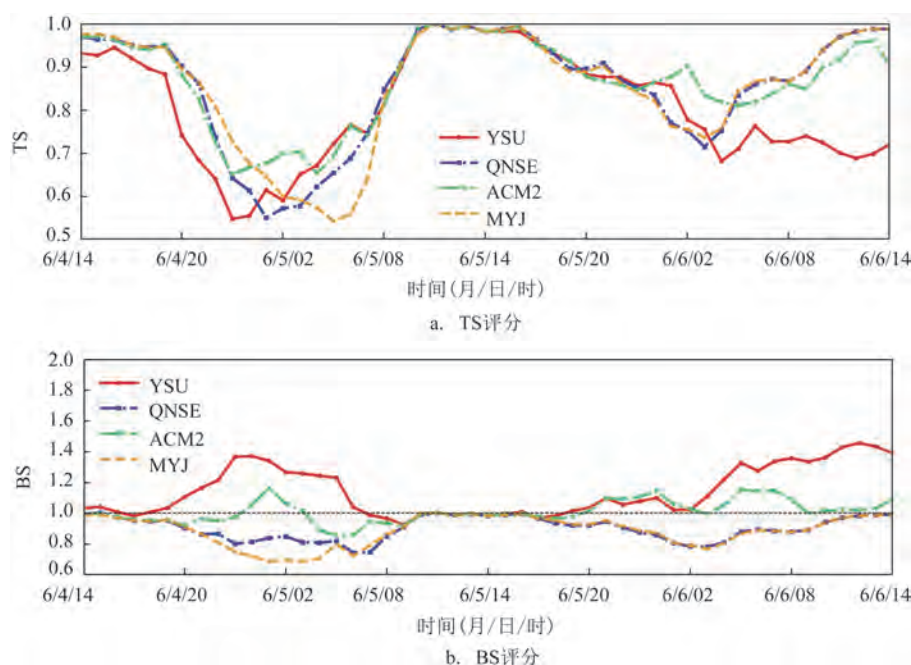


图8 海雾过程时段不同边界层方案下的TS与BS评分随时间的变化

Fig.8 Evolution of the TS and BS scores during the fog process in boundary layer parameterization schemes

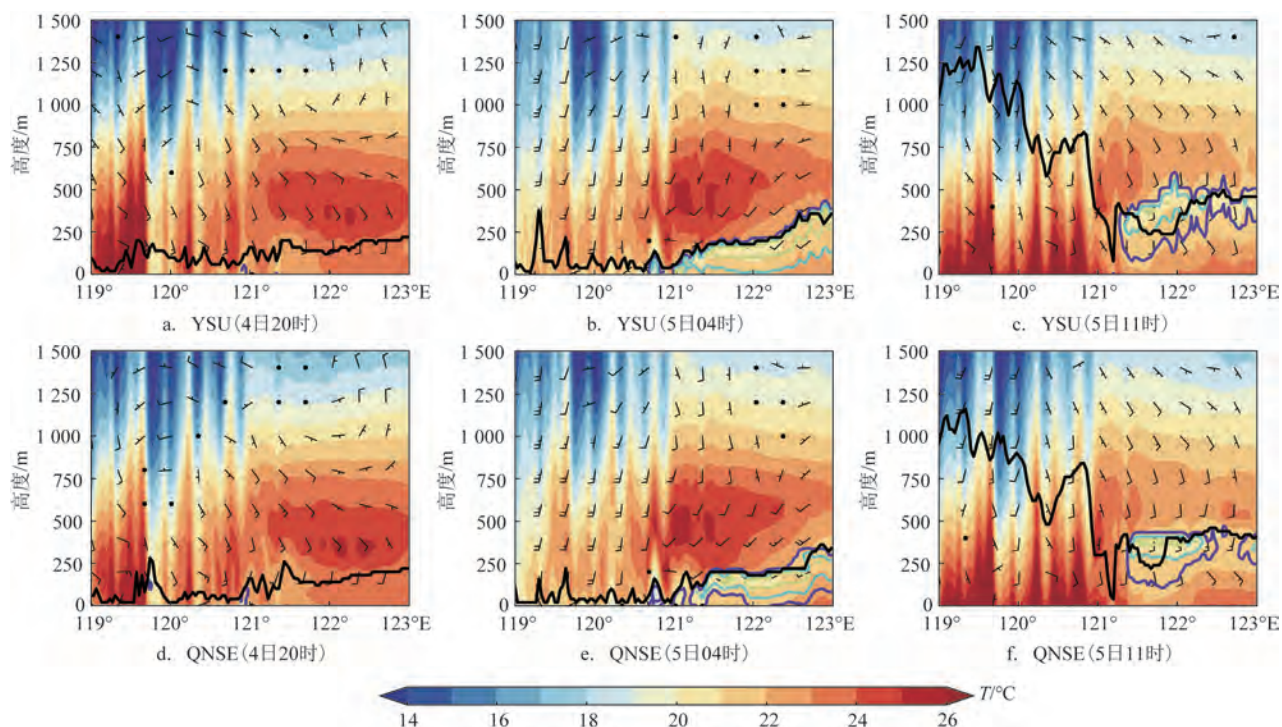
耦合不同边界层方案得到的TS与BS评分变化。从图中可以看出,4种方案下的TS评分随时间的整体变化趋势较为一致,评分差异的时段集中在大雾的生成以及消散阶段。对于4日夜间—5日白天的海雾发展过程,QNSE与MYJ的整体评分要优于YSU与ACM2,主要是由于后两种方案对5日后半夜台州北部—宁波近海一带存在较明显的空报,BS值达到了1.8左右;对于5日夜间—6日早晨的海雾过程,ACM2的整体评分优于其他3种方案,对应的TS评分达到0.9。正如上文所述,QNSE与MYJ对海-陆雾区分布的质量把控存在偏差;YSU仍旧对沿海雾区范围预报偏大,并且对6日早晨雾区消散时间的预报明显偏迟。从4种方案评分的变化上看,YSU与ACM2对4日夜间—5日白天海雾过程预报的TS评分变化趋势较为一致,而QNSE与MYJ在整个海雾过程中的TS评分变化趋势都比较接近,这可能与边界层方案使用相似或不同的算法来计算边界层的湍流属性有关。

3.3 雾区与边界层高度的关系

海雾的生消演变主要依赖于大气边界层内的湍流过程,不同边界层方案所刻画的湍流强度存在较大差异,也因此造成不同方案模拟结果的优劣。

边界层内湍流混合强度主要通过边界层高度来表征,边界层高度越高,表示边界层内湍流混合强度越强。在平流雾的生成中,合适的垂直湍流运动一方面可以使暖平流向下输送热量而冷却降温,也可以使底层水汽不断向上输送造成雾体变厚,雾顶高度升高(雾顶高度判据为LWC不小于0.5 g/kg所对应的最大高度)。但是,当湍流过强、边界层高度过高时,热量不再向下持续传导,近海层逆温层抬升遭到破坏,不利于水汽在近海面聚集;同时较强的垂直湍流运动也会将高层的干空气卷入到雾体内,使雾顶相对湿度减小,海雾结构遭到破坏^[15]。

不同边界层方案对边界层内的大气运动、能量交换的刻画方式都有所不同。这其中,YSU与ACM2方案采用非局地闭合模型,根据理查森数计算边界层高度;QNSE与MYJ方案采用局地闭合模型,根据湍流动能(Turbulent Kinetic Energy, TKE)计算边界层高度。4种方案计算边界层高度的算法和阈值各不相同。本文采用NIELSEN-GAMMON等^[28]提出的“1.5-theta-increase”方法计算各参数化方案的边界层高度并进行统一对比,即当某一高度的位温首次超过最低位温1.5 K时,定义此高度为边界层高度,该方法已广泛应用于边界层结构和天气变化的相关研究中。为了探究边界层高度与雾



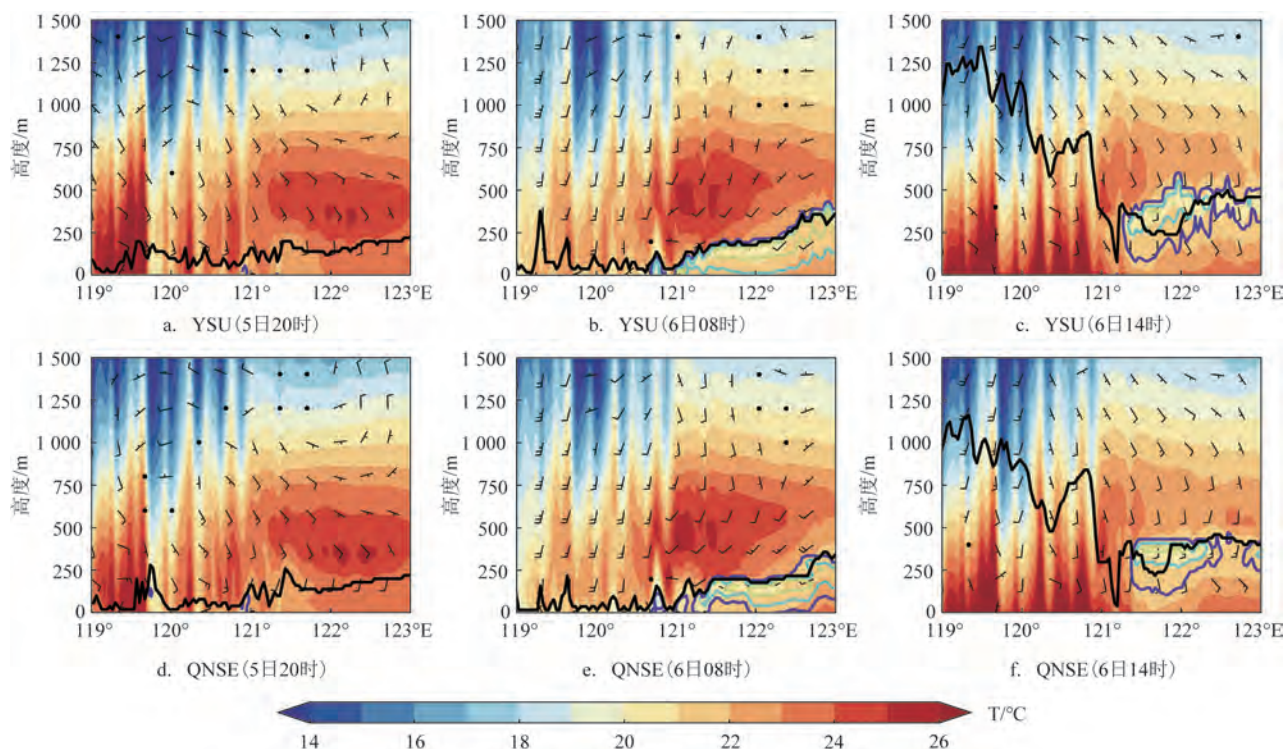
注:黑色粗线条为边界层高度,紫色、蓝色、黄色线条分别对应液态水含量0.05 g/kg、0.35 g/kg、0.65 g/kg等值线。

图9 6月4日20时、5日04时、5日11时YSU方案与QNSE方案沿28.2°N下液态水含量、边界层高度、温度以及风速的时间-高度剖面

Fig.9 Time cross-sections of liquid water content, boundary layer height, temperature, and wind velocity simulated using the YSU and QNSE schemes along 28.2°N at 2000LST 4 June, 0200LST 5 June, and 1100LST 5 June

区的联系,下文主要展示了以YSU为代表的非局地闭合方案和以QNSE为代表的局地湍流闭合方案的对比分析。图9、图10分别为4日20时—5日11时以及5日20时—6日14时YSU与QNSE方案沿28.2°N下的液态水含量、边界层高度、温度以及风速的垂直剖面。4日20时(见图9)为海雾形成阶段,两种方案在沿海地区(121°E以东)近海面都显示出较明显的逆温层,低层风速约为4 m/s,稳定的逆温层和合适的风速有利于水汽在近海面聚集,又可以使暖湿气流向下输送热量冷却成雾,为海雾的形成和发展创造了有利条件,此时边界层高度处于逆温层顶以下低于250 m的高度,湍流强度相对较弱。5日凌晨,近海面逆温层内温度梯度增大,平流冷却作用增强,沿海一带边界层高度随湍流发展有所升高,近海面雾区发展,逆温层顶、边界层高度和雾顶高度三者基本重合。5日白天,受辐射增温影响,低层逆温层逐渐遭到破坏,沿海边界层迅速升高到500 m以上,湍流混合增强,低层雾区消散。

5日夜间—6日白天,两种方案所刻画的液态水含量和边界层高度有较大差异(见图10)。5日20时,随着低涡的东移靠近,近地面西南风风力逐渐增大至10~12 m/s,中低层水汽输送通道打通,液态水含量大值区(低云)集中于边界层附近。6日白天,121°E以东沿海地区受低层暖平流和海面辐射冷却影响,在200 m处形成逆温层,边界层高度下降。在内陆地区,由于地表的快速升温,导致近地层稳定度被打破,边界层高度过高,垂直湍流输送过强,雾区无法维持。在沿海一带,YSU在6日白天持续报出了较明显的雾区,液态水含量大值区集中于雾顶附近,边界层高度、液态水含量以及雾顶高度三者的经向变化基本保持一致;而QNSE在沿海一带刻画的边界层高度较YSU偏低,从而导致预报出的海气输送作用较弱、沿海水汽供应不足、海雾无法维持,也因此造成了对沿海雾区的漏报(注:非闭合方案ACM2与闭合方案MYJ的对比同样遵循上述结论,在此不再赘述)。



注:黑色粗线条为边界层高度,紫色、蓝色、黄色线条分别对应液态水含量0.05 g/kg、0.35 g/kg、0.65 g/kg等值线。

图10 6月5日20时、6日08时、6日14时YSU方案与QNSE方案沿28.2°N下液态水含量、边界层高度、温度以及风速的时间—高度剖面

Fig.10 Time cross-sections of liquid water content, boundary layer height, temperature, and wind velocity simulated using the YSU and QNSE schemes along 28.2°N at 2000LST 5 June, 0800LST 6 June, and 1400LST 6 June

4 结论

本文利用ERA5资料驱动WRF模式对2019年6月4—5日浙江沿海地区的一次平流雾过程进行了数值模拟实验,通过耦合不同闭合方式的4种边界层参数化方案(YSU、QNSE、ACM2、MYJ)的实验结果,将其与实测气象要素进行对比分析,检验了不同边界层方案对此次平流雾的模拟效果。

研究结果表明,各边界层参数化方案对地面气象要素的模拟结果均呈现出气温略偏低、相对湿度和风速偏大的特征,其中对气温和相对湿度的模拟效果较好,但对风速的模拟普遍存在一定的高估。耦合不同边界层方案的模拟结果对气温的改善不明显(相关系数均在0.84以上,且都存在约7%的高估),但对相对湿度和风速的模拟产生了一定的敏感性,其中ACM2与YSU方案的预报效果总体好于QNSE与MYJ方案,且ACM2方案在相对湿度的预

报平稳度以及误差检验上优于YSU方案。

选取TS、BS评分作为检验雾区模拟效果的指标。从效果检验来看,4种实验方案都对本次过程展现出一定的预报能力。ACM2方案对海雾范围和落区的模拟效果最好,TS评分达到0.83,较准确地模拟出了本次大雾过程的生消时间及落区分布;YSU方案模拟的雾区范围偏大,对浙中北沿海一带存在一定空报;QNSE与MYJ的预报结果较为接近,但都对海—陆雾区落区的把控有所偏差。不同方案对海雾过程的模拟很大程度上取决于其所刻画的湍流运动强度,而垂直湍流运动则与边界层高度的变化有着紧密联系。对比分析不同方案的边界层高度与模拟雾区的关系可以看出,在海雾形成和维持阶段,局地闭合模型QNSE与MYJ相较于非局地闭合模型YSU和ACM2所计算出的边界层高度偏低,对沿海地区的湍流混合强度估计不足,从而导致对沿海雾区存在一定漏报。

本研究针对一次夏季浙江海雾个例进行模拟研究,今后将针对不同天气形势及季节的海雾预报的适用性进行进一步探讨,为浙江近海平流雾天气的预报提供更多的理论支持。

参考文献:

- [1] 李子华. 中国近40年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616-624.
LI Z H. Studies of fog in China over the past 40 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(5): 616-624.
- [2] 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.
- [3] 俞燎霓, 胡波, 黄新晴, 等. 浙江沿海大雾的时空分布特征及影响因子分析[J]. 气象科技, 2017, 45(2): 324-330.
YU L N, HU B, HUANG X Q, et al. Temporal and spatial distribution and influencing factor analysis of coastal fogs in Zhejiang[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(2): 324-330.
- [4] 田小毅, 张志薇. 长江沿海地区雾的特征及影响因子分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 51-55.
TIAN X Y, ZHANG Z W. Characteristics and influence factors of fog in the coastal area of Yangtze River[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 51-55.
- [5] 孙文文, 江洪, 陈晓峰, 等. 浙江北部气溶胶时空动态与区域雾霾事件分析[J]. 科技通报, 2016, 32(8): 230-236.
SUN W W, JIANG H, CHEN X F, et al. Analysis of regional haze event and the temporal and spatial dynamic of aerosol in northern Zhejiang[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(8): 230-236.
- [6] 俞涵婷, 廖晨昕, 王可欣, 等. 浙江中南部海雾预报决策树模型研究[J]. 海洋预报, 2020, 37(6): 96-101.
YU H T, LIAO C X, WANG K X, et al. A decision-tree forecasting model of sea fog for the central and southern coastal area of Zhejiang Province[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(6): 96-101.
- [7] 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.
- [8] 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.
GAO S H, QI Y L, ZHANG S B, et al. Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the yellow sea by using cycling 3DVAR Part I: WRF numerical experiments[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(10): 1-9.
- [9] 杨中秋, 许绍祖, 耿骝. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构[J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 431-438.
YANG Z Q, XU S Z, GENG B. Formation and microphysical structure of spring sea fog in Zhoushan area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 11(4): 431-438.
- [10] 陆春松, 牛生杰, 岳平, 等. 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析[J]. 大气科学学报, 2011, 34(1): 58-65.
LU C S, NIU S J, YUE P, et al. Observational research on boundary layer structure during high incidence period of winter fog in Nanjing[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(1): 58-65.
- [11] 杨军, 谢玉静, 石春娥, 等. 南京冬季辐射雾和平流辐射雾的化学特征差异[J]. 大气科学学报, 2009, 32(6): 776-782.
YANG J, XIE Y J, SHI C E, et al. Differences in ion compositions of winter fogwater between radiation and advection-radiation fog episodes in Nanjing[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(6): 776-782.
- [12] 周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等. 0713号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析[J]. 大气科学, 2011, 35(6): 1046-1056.
ZHOU L L, ZHAI G Q, WANG D H, et al. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 typhoon Wipha[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(6): 1046-1056.
- [13] 林杨, 沈桐立, 胡琳, 等. 陕西冬季一次大雾天气的数值模拟和生消机制分析[J]. 陕西气象, 2008(4): 24-28.
LIN Y, SHEN T L, HU L, et al. Numerical simulation and analysis on formation and dissipation mechanism of a heavy fog in winter in Shaanxi Province[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2008(4): 24-28.
- [14] 杨依莹. 地形对昆明机场一次典型大雾天气的影响研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
YANG Y Y. Research of topographical impact on a typical heavy fog weather condition at Kunming airport[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017.
- [15] 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.
LU X, GAO S H, RAO L J, et al. Sensitivity study of WRF parameterization schemes for the spring sea fog in the Yellow Sea [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(3): 312-320.
- [16] 王益柏, 梅娜, 范磊, 等. WRF模式对2013年1月华北一次大雾的数值对比试验[J]. 气象, 2014, 40(12): 1522-1529.
WANG Y B, MEI N, FAN L, et al. Comparative experiments of WRF simulation on a fog event of January 2013 in North China [J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(12): 1522-1529.
- [17] PÉREZ C, JIMÉNEZ P, JORBA O, et al. Influence of the PBL

- scheme on high-resolution photochemical simulations in an urban coastal area over the western Mediterranean[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(27): 5274-5297.
- [18] 黄政, 袁成松, 包云轩, 等. 基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验[J]. *气象*, 2016, 42(8): 944-953.
- HUANG Z, YUAN C S, BAO Y X, et al. Numerical simulations of heavy fog processes on expressways based on different parameterization schemes[J]. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(8): 944-953.
- [19] 李伟, 邵利民, 唐君, 等. 基于WRF的黄渤海海雾数值模拟参数化方案研究[J]. *海洋预报*, 2019, 36(2): 88-96.
- LI W, SHAO L M, TANG J, et al. Research on the parameterization scheme in simulating sea fog in the Yellow Sea and Bohai Sea based on WRF model[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(2): 88-96.
- [20] KIOUTSIUKIS I, DE MEIJ A, JAKOBS H, et al. High resolution WRF ensemble forecasting for irrigation: multi-variable evaluation[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 167: 156-174.
- [21] 杨悦, 高山红. 黄前海雾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.
- YANG Y, GAO S H. Sensitivity study of vertical resolution in WRF numerical simulation for sea fog over the Yellow Sea[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, 74(6): 974-988.
- [22] 李鹏远. 黄前海雾的观测和基于WRF模式的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- LI P Y. An observational and modeling study of sea fogs over the Yellow Sea based upon WRF model[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [23] 陈俊文, 蔡扬, 白毅平, 等. 南海冬季一次海面大风天气的WRF模式预报检验[J]. *海洋预报*, 2014, 31(4): 32-40.
- CHEN J W, CAI Y, BAI Y P, et al. Simulation of one gale case in winter in the South China Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(4): 32-40.
- [24] 刘郁珏, 苗世光, 刘磊, 等. 修正WRF次网格地形方案及其对风速模拟的影响[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(1): 70-81.
- LIU Y J, MIAO S G, LIU L, et al. Effects of a modified sub-grid-scale terrain parameterization scheme on the simulation of low-layer wind over complex terrain[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30(1): 70-81.
- [25] KUNKEL B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(1): 34-41.
- [26] 包云轩, 丁秋冀, 袁成松, 等. 沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟试验[J]. *大气科学*, 2013, 37(1): 124-136.
- BAO Y X, DING Q J, YUAN C S, et al. Numerical simulations of a highly complex fog event on Shanghai - Nanjing expressway [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(1): 124-136.
- [27] 崔驰潇, 包云轩, 袁成松, 等. 不同边界层参数化方案对江苏地区一次平流雾过程的模拟影响[J]. *大气科学*, 2018, 42(6): 1344-1362.
- CUI C X, BAO Y X, YUAN C S, et al. Influence of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of an advection fog process in Jiangsu[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(6): 1344-1362.
- [28] NIELSEN-GAMMON J W, POWELL C L, MAHONEY M J, et al. Multisensor estimation of mixing heights over a coastal city[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(1): 27-43.

Sensitivity of an advection fog process numerical simulation to different boundary layer parameterization schemes over Zhejiang coastal area

LU Qiao, GAO Li^{*}, WENG Zhimei, GUO Jiuhua, LI Yuan, FANG Kuiming

(Taizhou Meteorological Bureau, Taizhou 318000, China)

Abstract: An advection fog process during 4–6 June 2019 over Zhejiang coastal area is simulated using the WRF model driven by the ERA5 data, and the effects of different boundary layer parameterization schemes (YSU, QNSE, ACM2, MYJ) on the simulation results are studied in comparison with observed meteorological data. The results show that all boundary layer parameterization schemes perform well on simulating surface air temperature and relative humidity, but all of them overestimate surface wind speed. The ACM2 and YSU schemes overall perform better than the QNSE and MYJ schemes on the relative humidity and surface wind speed simulation. The ACM2 scheme exhibits a better capacity than the YSU scheme on the relative humidity prediction stability and

error test. The ACM2 scheme generates reasonable temporal evolution and spatial distribution of the fog. The YSU scheme overestimates the fog zone and generates occasional fail forecast. The QNSE and MYJ schemes produce insufficient accuracy in the spatial distribution of sea–land fog zone. Boundary layer height directly reflects the intensity of turbulent flows, and thus plays a critical role in the evolution of advection fogs. Compared with the YSU and ACM2 schemes, the QNSE and MYJ schemes underestimate the turbulent mixing intensity in coastal areas, resulting in occasional fail forecast of coastal fog zone.

Key words: Zhejiang coastal area; advection fog; numerical simulation; simulation evaluation