

三参数云微物理方案对浙江沿海一次海雾过程 的数值试验研究*

周炳君¹ 孙继明² 钱燕珍¹ 邓玮² 王健捷³ 徐迪锋¹

1 宁波市气象局, 宁波 315012

2 中国科学院大气物理研究所 100029

3 宁波市鄞州区气象局, 宁波 315012

提 要: 为分析 IAP-LACS 三参数云微物理方案对浙江海雾模拟的影响, 选取了 WRF 模式中两种双参数云微物理方案 (Morrison 和 Thompson) 作为对比, 针对 2021 年 4 月浙江沿海的一次高浓度、大范围、高影响的海雾过程开展数值模拟和对比分析, 并采用 Setolinga-Warner (SW99) 算法和美国大气海洋局预报系统实验室 (NOAA/FSL) 算法进行能见度诊断。结果表明, 三种方案均能够模拟出本次海雾过程的发生, 但是在海雾强度和范围等方面存在差异, IAP-LACS 方案对海雾的分布范围与强度的模拟效果最优, TS 评分最高, FSL 算法在海雾范围上优于 SW99 算法, 但在强度方面不如 SW99 算法。IAP-LACS 更好地模拟出舟山群岛和台州—温州沿海的低层云水含量大值区域, 并对 4 月 1 日 22:00 至 2 日 00:00 (北京时间) 三山大闸沿海云水含量的量级与增长过程模拟更优, IAP-LACS 方案对低层云水含量模拟的改进是提高本次海雾预报效果的关键。IAP-LACS 方案相对于其他两种方案具有能够输出云滴数浓度的优势, 基于数浓度和液态水含量的能见度诊断方案, 在海雾范围和强度上与实况更为接近。

关键词: 海雾; IAP-LACS 三参数云微物理方案; 能见度诊断算法; 数值试验

中图分类号: P456.7, P457.7 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.041601

Numerical Simulation of a Sea Fog Event off the Coast of Zhejiang Using Three-Moment Cloud Microphysics Scheme

ZHOU Bingjun¹ SUN Jiming² QIAN Yanzhen¹ DENG Wei²
WANG Jianjie³ XU Difeng¹

1 Ningbo Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Ningbo 315012

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

3 Yinzhou District Meteorological Bureau of Ningbo, Zhejiang Ningbo 315012

Abstract: To analyze the impact of the three-moment cloud microphysics scheme IAP-LACS on the simulation of sea fog off the coast of Zhejiang, this study selected two two-moment cloud microphysics schemes from the WRF model (Morrison and Thompson) as comparisons. A high-concentration, wide-range, and high-impact sea fog event off the coast of Zhejiang in April 2021 was simulated and analyzed using these schemes. Setolinga-Warner (SW99) algorithm and NOAA/FSL algorithm were used to diagnose and analyze visibility. The results are as fol-

*宁波市公益性科技计划项目 (2022S181)、宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目 (2023Z139)、宁波市气象局重点项目 (NBQX2024002A)、浙江省“尖兵“领雁”研发攻关计划项目 (2024C03256)、宁波市气象台院士工作站共同资助

2025 年 5 月 16 日收稿; 2026 年 4 月 16 日收修定稿

第一作者: 周炳君, 从事天气预报、数值模拟与资料同化研究. E-mail: 448308183@qq.com

通信作者: 钱燕珍, 从事灾害性天气预报技术研究. E-mail: qian-y-z@163.com

lows. Three schemes were able to simulate the occurrence of this sea fog event, but differences remained in terms of fog intensity and spatial extent. The IAP-LACS scheme performed best in simulating both the spatial distribution and intensity of the fog, achieving the highest TS score. The FSL algorithm outperformed the SW99 algorithm in diagnosing the spatial extent of the fog but was less accurate in representing its intensity. The IAP-LACS scheme more accurately simulated the dense-fog areas of low-level cloud liquid water content over the Zhoushan Islands and the Taizhou—Wenzhou coastal region. It also better captured the magnitude and increasing trend of cloud liquid water content along the Sanshan Sluice coastal area from 22:00 on April 1 to 00:00 on April 2. The improvement in simulating low-level cloud liquid water content by the IAP-LACS scheme was a key factor in enhancing the forecast accuracy of this sea fog event. Compared to the other two schemes, the IAP-LACS scheme has the advantage of providing fog droplet number concentration output. The visibility diagnostic scheme based on both number concentration and cloud liquid water content yielded results that were closer to observations in terms of both fog extent and intensity.

Key words: sea fog, IAP-LACS three-moment cloud microphysics scheme, visibility diagnosis algorithm, numerical experiment

引 言

海雾是发生于海上大气边界层,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,当能见度小于 500 m 时称为浓雾(李子华, 2001)。海雾产生的近海面低能见度会对交通运输、渔业生产等造成不利影响,是天气预报的重点和难点(傅刚等, 2016; 陆桥等, 2024)。浙江海域面积达 26 万 km²,在近海发生的海难事故中,由海雾引发的船舶触礁、碰撞等海难事故占较大比重(田小毅和张志薇, 2019),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。海雾生消的物理过程十分复杂,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(黄翊和彭新东, 2017; 王锐和刘彬贤, 2021)。早期的海雾预报以预报员的主观判断为主,预报准确率建立在预报员对海雾生消机制及预报区域的气候、天气形势的充分认识和准确分析上(任兆鹏和张苏平, 2011; 周福等, 2015)。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(WRF)模式进行数值模拟研究广泛开展,目前高时空分辨率的数值模拟已成为研究海雾演变机制和预报的一种主要手段(高山红等, 2010a; 2010b; 王慧等, 2022)。陆雪等(2014)利用 2005—2011 年 11 次春季黄海海雾个例开展 WRF 模式参数化方案敏感性研究,发现边界层与云微物理方案的最佳组合为 Yonsei University (YSU) 与 Lin 方案,最差为 Mellor-Yamada-Janjic TKE 边界层与 WSM5 云微物理方案; Steeneveld et al (2015)在对英国的一次强浓雾过程的研究中,发现云微物理方案 WDM6 要优于 WSM5 和 WSM6。黄翊和彭新东(2017)采用基于我国不同下垫面上的边界层观测资料改进的 MYNN 参数化方案对三次大雾过程进行模拟检验,探讨边界层参数化方案对雾和边界层结构模拟的影响,表明改进的 MYNN 方案能够更好地模拟出两次雾过程的发生、移动和雾区空间分布。目前雾的预报仍是数值模式的难点,其 TS 评分通常明显低于同期的降水评分,主要原因是模式对次网格的微物理过程缺乏合理的描述(Zhou et al, 2012; 张伟等, 2023),

因此合适的云微物理方案对提高雾预报意义重大。中国科学院大气物理研究所（IAP）云降水物理与强风暴重点实验室（LACS）新开发的 IAP-LACS 三参数云微物理方案引入了云滴半径的总和为第三个预报量，克服了双参方案中云滴谱的拓宽问题，有效提高了气溶胶与云滴谱相互作用模拟的准确性（邓玮等，2019）。

影响雾中大气能见度的两个主要因素是雾滴谱分布和含水量（Ma et al, 2012; 岳岩裕等, 2013）。雾滴谱分布特征、含水量等微物理量是基于数值模式结果进行能见度诊断的重要参数（张伟等, 2024）。Gultepe et al (2006) 研究表明能见度参数化诊断方案中必须考虑雾滴数浓度，否则会增加能见度模拟的不确定性，但是目前的数值预报业务中，一般的业务模式并没有云滴数浓度的输出。IAP-LACS 三参数云微物理方案能输出雾滴数浓度，为能见度诊断提供了更多选择。

本文选取 2021 年 4 月 1 日的一次浙江沿海大范围海雾个例，利用 IAP-LACS 三参数云微物理参数化方案对此次海雾过程进行数值模拟和敏感性试验，讨论该方案对海雾的模拟影响，并对比分析不同能见度诊断方案在本次海雾过程中的表现，尝试在能见度诊断方案中引入数浓度这一重要变量，以期为海雾数值模式预报的改进提供参考和依据。

1 IAP-LACS 三参数云微物理参数化方案

IAP-LACS 三参数云微物理参数化方案（邓玮等，2019）建立了新的气溶胶活化和云滴凝结方案，在数浓度和质量混合比的基础上引入了云滴半径的总和为第三个参数。在新方案中气溶胶谱分布使用对数正态分布函数表示，谱分布中活化的气溶胶数浓度（CCN）由环境过饱和度和使用寇拉曲线计算的气溶胶临界过饱和度诊断而得，临界饱和度小于环境过饱和度的气溶胶会活化生成云滴。研究表明气溶胶的粒径在计算临界过饱和度中起决定性作用（Frank et al, 2006），所以新活化方案中设定气溶胶是从大尺度端开始活化。为了考虑云内或云底的二次活化问题，新方案中气溶胶活化后不清空，将活化的 CCN 视为进入云滴，当云滴蒸发后干气溶胶再次生成，在云内或云底可再次活化。目前广泛使用的总体双参数云滴谱方案因为表征云滴谱的预报量不足，在凝结过程中云滴谱呈不正常的拓宽现象。IAP-LACS 方案通过增加的云滴半径预报量克服了云滴谱的拓宽问题，提高了云滴谱模拟的准确性。

2 模式设置与数据

2.1 模式设置

本研究采用美国大气研究中心（NCAR）研发的区域非静力 WRF 模式 V4.2 版本及其资料同化系统。模式区域设置如图 1 所示，采用双重嵌套网格设计，模式中心位于（30° N、120° E），D01 和 D02 分辨率分别为 3 km 和 1 km，网格点数为 446×446 和 461×461，垂直方向为 55 层，模式层顶气压为 50 hPa。模式主要物理过程参数化方案包括：YSU 边界层方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案，模式 D01 和 D02 均关闭积云对流参数

化方案。初始场和边界条件采用美国国家环境预报中心(NCEP)全球预报模式 Global Forecast System (GFS) 提供的分析场和预报场。

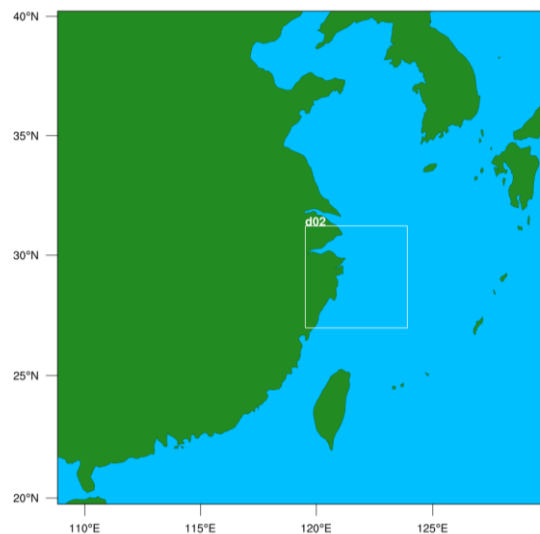


图 1 模式区域设置

Fig.1 Design of simulation domain

2.2 数据介绍

(1) 美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的全球预报模式 GFS 的分析场和预报场资料, 作为 WRF 模式的背景场和边界条件, 该资料的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为 6 h。

(2) 浙江省气象局提供的逐小时自动观测站观测资料, 包括 2 m 温度、2 m 湿度、2 m 露点温度、10 m 风速及能见度等要素用于检验。

(3) 毫米波雷达回波资料, 毫米波雷达可以有效探测海雾的水平分布和垂直结构, 可用于监测海雾的生消演变 (胡树贞等, 2022)。此海雾过程所用毫米波雷达位于宁波市北仑区沿海三山门附近 (图 2b), 海拔高度为 8 m。该雷达以平扫显示 (sPPI) 和高扫显示 (RHI) 两种模式对大气进行探测。高扫显示模式俯仰角为 $0 \sim 90^{\circ}$, 平扫显示模式扫描方位角为 $58.4^{\circ} \sim 188.5^{\circ}$ (图 2b), 俯仰角为 3° , 扫描采用长脉冲和短脉冲 ($12 \mu\text{s}$ 和 $0.2 \mu\text{s}$) 电磁波的互补机制, 长脉冲电磁波的探测盲区为 1.8 km, 该探测盲区可以通过短脉冲探测一定程度上进行补偿 (Tu et al, 2023)。

2.3 试验方案

为了分析 IAP-LACS 三参数云微物理参数化方案对海雾模拟的影响, 设计了 3 组敏感性试验, 具体方案列于表 1。选取 WRF 模式中的双参数云微物理参数化方案中的 Morrison 和 Thompson 作为对比试验, 两种方案均采用质量混合比和数浓度做为预报量, 但其预报的数浓度变量均未包含云滴数浓度 (Morrison 方案预报冰、雪、雨和霰数浓度, Thompson 方案预报冰和雨数浓度)。

表 1 试验设计方案

Table 1 Scheme of experimental design

方案	IAP-LACS	Morrison05	Thompson08
初始场和边值条件	GFS 分析场和预报场	GFS 分析场和预报场	GFS 分析场和预报场
网格分辨率	3 km/1 km	3 km/1 km	3 km/1 km
近地层参数化方案	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov
陆面过程	热扩散方案	热扩散方案	热扩散方案
边界层方案	YSU	YSU	YSU
微物理方案	IAP-LACS 三参数	Morrison 双参数	Thompson 双参数

2.4 分析方法

为直观比较 IAP-LACS 三参数云微物理参数化方案对能见度预报的影响,需要通过诊断方案对模式变量进行诊断从而输出能见度 V , 并且参考雾的预报等级(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2012), 对雾过程进行分类: 大雾 ($500 \text{ m} \leq V < 1 \text{ km}$)、浓雾 ($200 \text{ m} \leq V < 500 \text{ m}$)、强浓雾 ($100 \text{ m} \leq V < 200 \text{ m}$) 和特强浓雾 ($V \leq 100 \text{ m}$)。本研究采用 SW99 算法 (Stoelinga and Warner, 1999) 和美国大气海洋局预报系统实验室 FSL 算法 (Doran et al, 1999)。

SW99 算法主要基于液态水含量, 包括云水 (cw)、云冰 (ci)、雨水 (rw)、雪水 (sn), 综合考虑了多种水凝性物质对消光系数的影响, 具体公式为:

$$V = \frac{-\ln(0.02)}{144.7cw^{0.88} + 1.1rw^{0.75} + 163.9ci^{1.00} + 10.4sn^{0.78}} \quad (1)$$

FSL 算法具体公式如下:

$$V = 1.609 \times 6000 \times (T - T_d) / RH^{1.75} \quad (2)$$

式中, RH 为相对湿度, $T - T_d$ 代表温度露点差。

3 个例介绍及环流分析

2021 年 4 月 1—2 日, 浙江沿海出现了一次强度大、影响范围广的强海雾过程。图 2a 为本次过程最小能见度实况, 全省沿海海面和沿海地区大部分地区出现能见度小于 200 m 的浓雾, 局部地区出现能见度小于 100 m 的强浓雾。图 2b 为 2 日 00:00 (北京时, 下同) 位于宁波市北仑区沿海三山门的毫米波雷达观测回波强度, 在实际降水天气过程中, 选取 -5 dBz 作为区分降水和云雾天气现象的阈值 (刘光普等, 2019), 可以看到 2 日 00:00 毫米波雷达观测到沿海回波强度为 -15 ~ -5 dBz, 为海雾回波。此外, 本次大雾过程伴随着弱降水和厚重的云层, 较厚的云层导致卫星观测难以区分低层雾区。

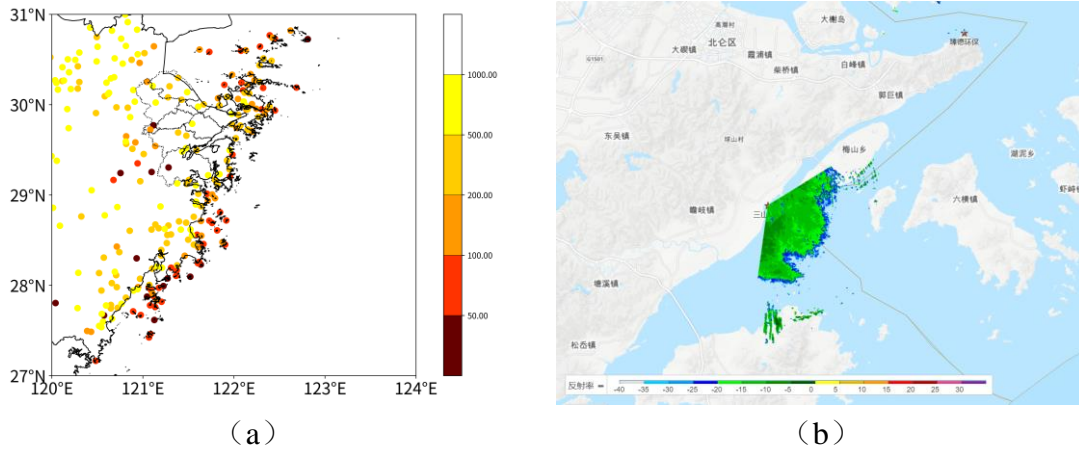
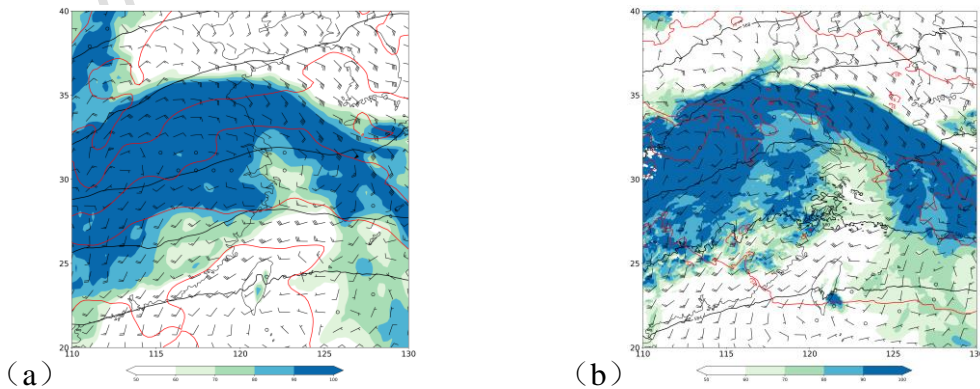


图2 2021年4月(a)1日8时至2日8:00浙江沿海自动观测站的最小能见度和(b)2日00:00毫米波雷达观测回波强度

Fig.2 (a) Observation minimum visibility from 08:00 BT 1 to 08:00 BT 2 and (b) millimeter-wave radar echo intensity at 00:00 BT 2 during the sea fog event off the coast of Zhejiang in April 2021

图3为4月1日20:00 ERA5再分析资料和IAP-LACS试验模拟的高空场与地面环流形势对比(其余两组试验模拟的环流形势与IAP-LACS试验非常接近,图略),两者环流形势比较接近,但IAP-LACS试验在浙江地区预报的850 hPa相对湿度略微偏小,近海面偏大。500 hPa以偏西—西南气流控制为主(图3a和3b),850 hPa浙江北侧存在弱分风切变,南侧受西南气流和弱的反气旋环流控制,沿海风速达到 12 m s^{-1} 。从地面分析场图(3c和3d)可见,浙江处于弱的低压倒槽中,气压梯度小,无明显锋面影响,湿度条件较好,近地面风速小,浙江沿海大部分自动站观测显示风速在 3 m s^{-1} 以下。

由于浙江中北部沿海缺少探空观测,本文采用基于ERA5再分析资料和IAP-LACS模拟结果进行对比分析,结果显示两者在近地面层呈现较为一致的温湿结构(图4),近地层存在逆温层,层结稳定,湿度接近饱和,有利于海雾的形成与维持,但IAP-LACS模式预报场对高空的湿度模拟低于ERA5再分析资料。



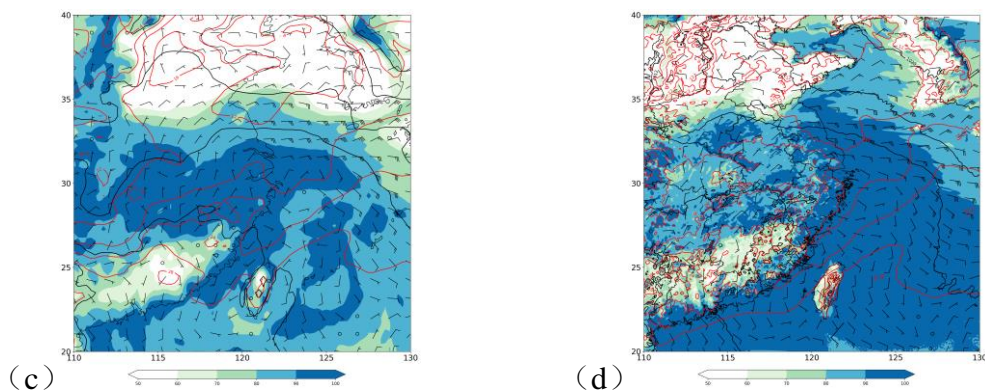
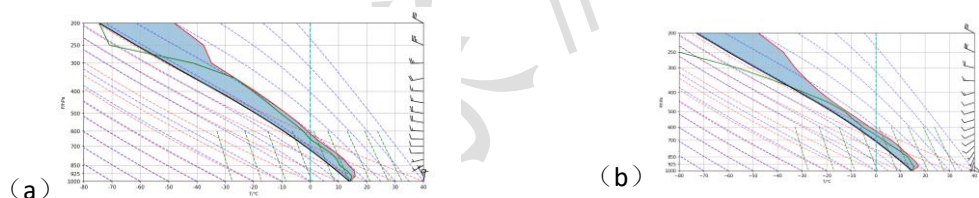


图3 2021年4月1日20:00基于(a, c) ERA5再分析资料和(b, d) IAP-LACS模拟的(a, b)高空500 hPa位势高度(黑色等值线, 单位: dagpm), 850 hPa气温(红色等值线, 单位: °C)、相对湿度(填色, 单位: %)、风速(风羽)与(c, d)地面气压(黑色等值线, 单位: hPa), 2 m气温(红色等值线, °C), 2 m相对湿度(填色, 单位: %)和风场(风羽)

Fig.3 Comparison of synoptic-scale circulation from (a, c) ERA5 reanalysis and (b, d) IAP-LACS forecast valid at 20:00 BT 1 April 2021

(a, b) upper-level fields: geopotential height at 500 hPa (black contour, unit: dagpm), temperature (red contour, unit: °C), relative humidity (colored, unit: %), and wind (barb) at 850 hPa; (c, d) surface-level fields: sea level pressure (black contour, unit: hPa), temperature at 2 m (red contour, unit: °C), relative humidity at 2 m (colored, unit: %), and wind field (barb)



注: 红色实线为温度, 绿色实线为露点温度, 黑色实线为状态曲线(代表气团绝热上升时的温度变化), 黄色虚线代表干绝热线, 蓝色虚线为湿绝热线, 绿色虚线为等饱和比湿线。

图4 2021年4月1日20:00基于(a) ERA5再分析资料和(b) IAP-LACS预报场在舟山的探空分析

Fig.4 Sounding analysis based on (a) ERA5 reanalysis and (b) IAP-LACS forecast over Zhoushan at 20:00 BT 1 April 2021

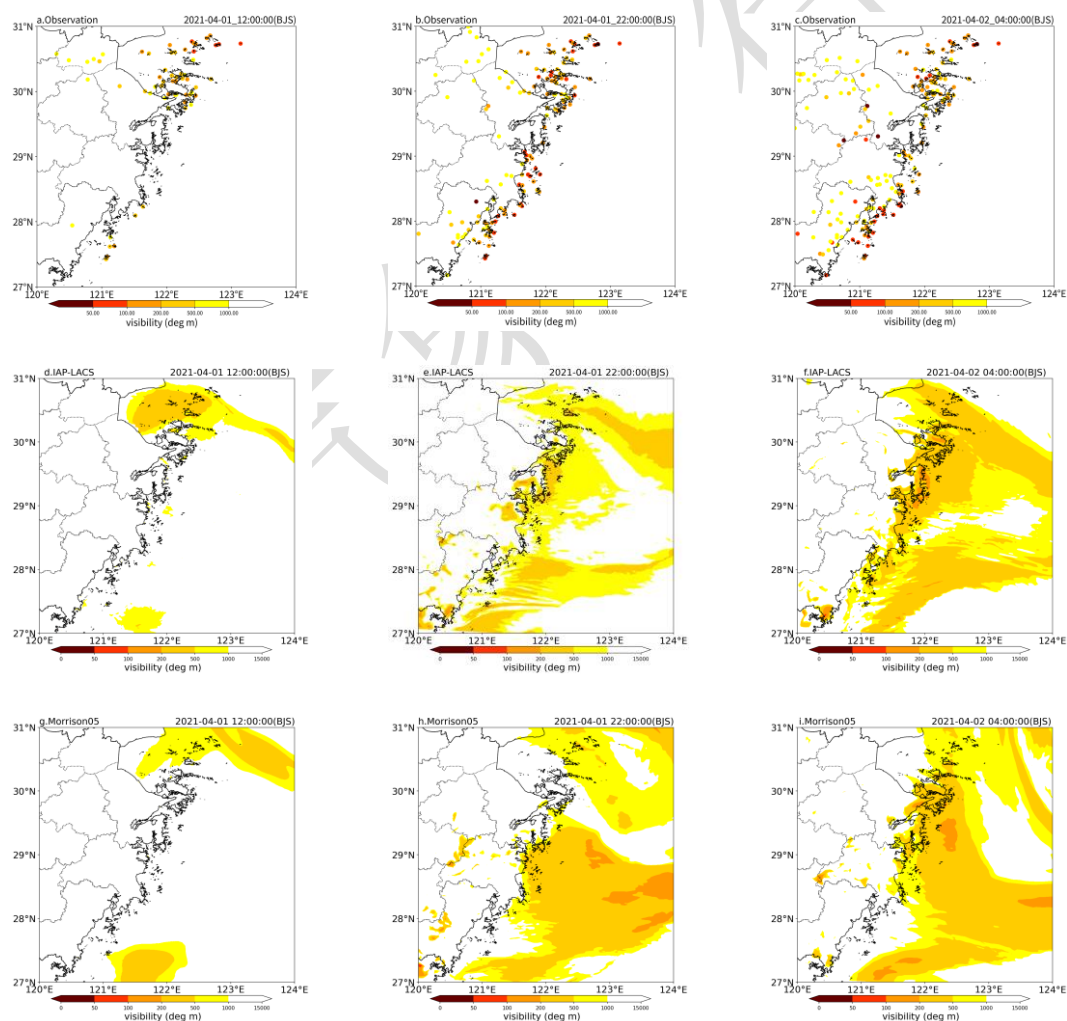
4 海雾模拟结果及敏感性试验对比分析

本研究针对2021年4月1—2日的大雾过程进行了数值模拟, 基于2021年4月1日08:00起报的模拟结果, 重点分析了IAP-LACS三参数云微物理参数化方案对近海海雾范围、生消和强度的模拟能力, 并探讨不同能见度算法对海雾预报的影响。

4.1 海雾模拟结果

图 5 为 IAP-LACS、Morrison05 和 Thompson08 试验采用 SW99 算法的能见度模拟，三组对比试验均为模式第一层的结果。从能见度观测看，2021 年 4 月 1 日 12:00（图 5a）浙江北部舟山群岛及台州、温州沿海局地出现低能见度。至 22:00（图 5b）海雾进一步发展，浙江沿海大部分地区能见度降至 200 m 以下，局地低于 100 m。2 日 04:00（图 5c）海雾继续维持。

三组试验均模拟出海雾发展，但在范围和强度上有差异。1 日 12:00（图 5d, 5g, 5j），三组试验对台州—温州的海雾范围均较实况偏东南；IAP-LACS 模拟的舟山群岛附近低能见度范围和位置与实况最为接近，Morrison05 和 Thompson08 偏东北。1 日 22:00 和 2 日 4:00，IAP-LACS 对台州—温州沿海的模拟更准确，Morrison05 和 Thompson08 出现漏报。总体上，IAP-LACS 模拟范围与观测较一致，Morrison05 和 Thompson08 有明显偏差。三组试验模拟的海雾强度均较实况偏弱，其中 IAP-LACS 的强度相对最强。模式对海雾预报强度偏弱可能与模式对云水含量低估有关（SW99 算法主要基于云水含量），本文将在 4.2 节对模式模拟云水含量进行进一步的分析。



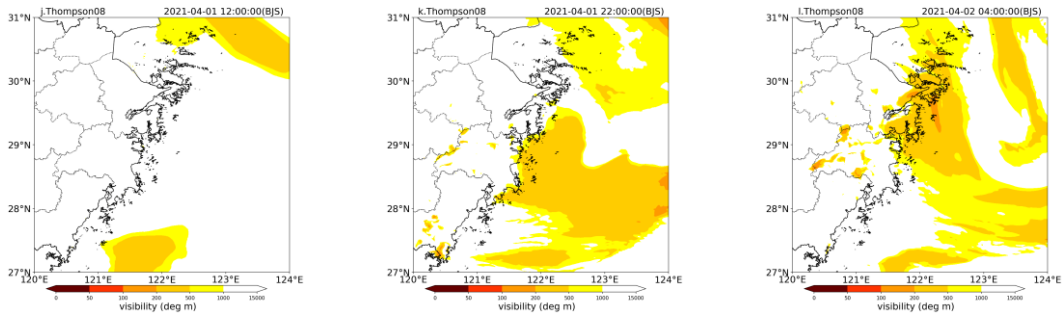
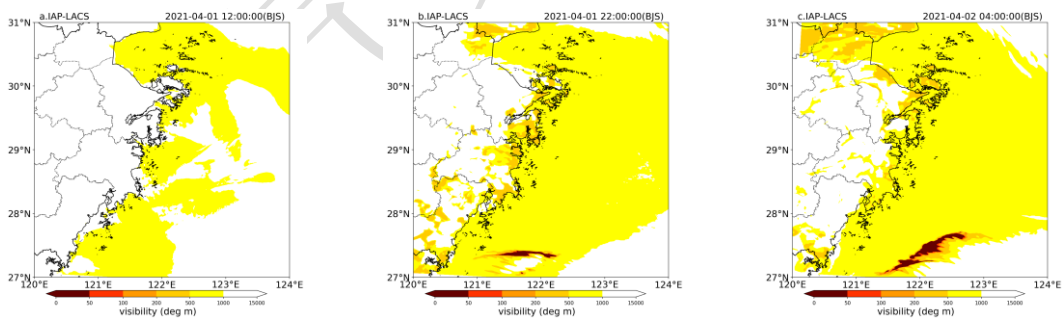


图5 基于SW99诊断的浙江东部沿海及海面2021年4月1日12:00、1日22:00和2日04:00 (a-c) 自动站能见度观测, (d-f) IAP-LACS, (g-i) Morrison05, (j-l) Thompson08 能见度模拟

Fig.5 Visibility forecasts diagnosed by the SW99 scheme from (a-c) observed, (d-f) IAP-LACS, (g-i) Morrison05, and (j-l) Thompson08 off the coastal of eastern Zhejiang at 12: 00 BT, 22:00 BT 1 and 04 BT 2 April 2021

图6为三组试验采用FSL算法的能见度诊断,三组试验均为模式第一层的结果。从强度上看,三组试验对海雾强度均明显偏弱,尤其对能见度低于200m的强浓雾区域。这可能与雾中相对湿度接近饱和时,能见度与相对湿度等气象要素之间的相关性下降有关(芮雪等,2023;张浩等,2021)。从模拟范围看,三组试验在1日12:00均模拟出舟山群岛附近和台州—温州沿海的海雾,IAP-LACS对温州—台州沿海的海雾范围模拟和沿海能见度观测最为接近。22:00和2日04:00三组试验均模拟出海雾增强,但IAP-LACS对温州—台州沿海海雾模拟最优,其余两组对温州—台州海陆交接处的海雾出现漏报。

FSL算法诊断的雾范围比SW99算法更大,能见度的值相对更高,最低能见度基本在0.5~1.0km,整体上来看,FSL算法对本次海雾过程诊断结果在范围上优于SW99算法,而在强度较差。



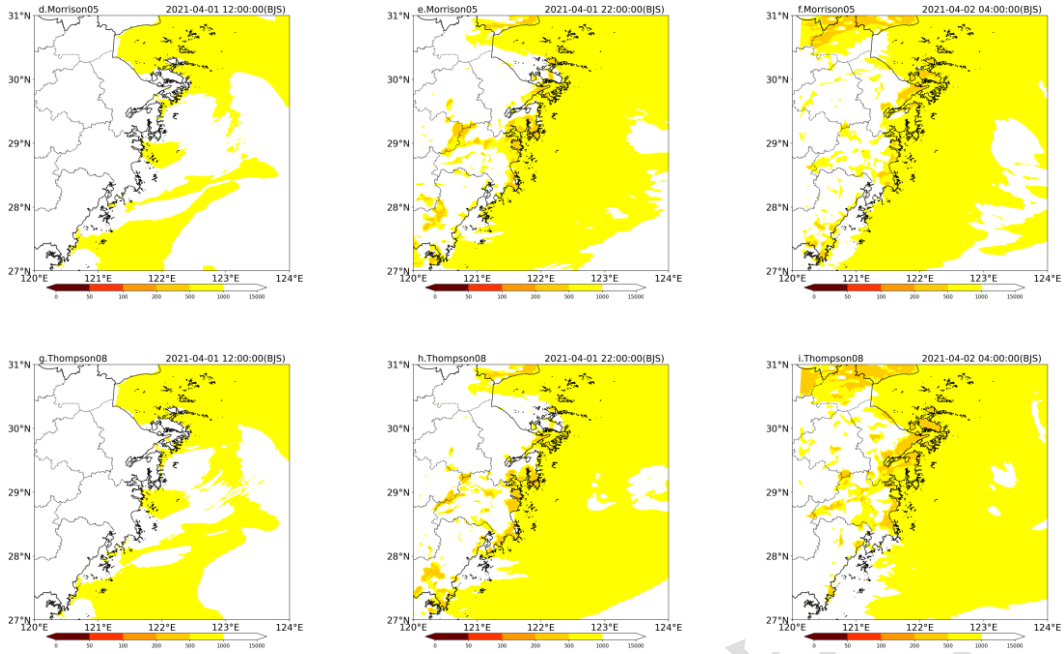
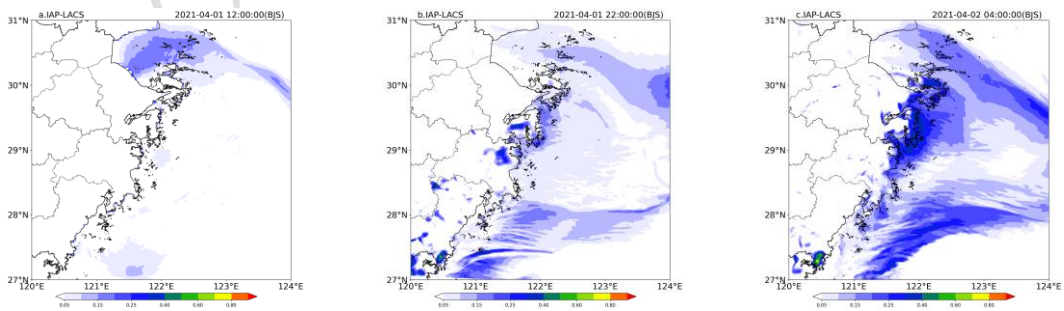


图 6 基于 FSL 诊断的浙江东部沿海及海面 2021 年 4 月 1 日 12:00、1 日 22:00 和 2 日 04:00 (a~c) IAP-LACS, (d~f) Morrison05, (g~i) Thompson08 模拟的能见度

Fig.6 Visibility forecasts diagnosed by the FSL scheme from (a~c) IAP-LACS, (d~f) Morrison05, (g~i) Thompson08 models off the coastal of eastern Zhejiang at 12: 00 BT, 22:00 BT 1 and 04: 00 BT 2 April 2021

4.2 海雾预报因子模拟结果

图 7 为三组试验模式第一层云水含量分布。可以看到, IAP-LACS 模拟出舟山群岛和台州—温州沿海的低层云水含量大值区域, 且其范围与沿海能见度观测的低值区吻合较好。Morrison05 和 Thompson08 对 1 日 12: 00 和 22:00 舟山群岛的低层云水含量大值区范围偏差较大, 且未能在台州—温州沿海地区模拟出低层云水含量大值区。



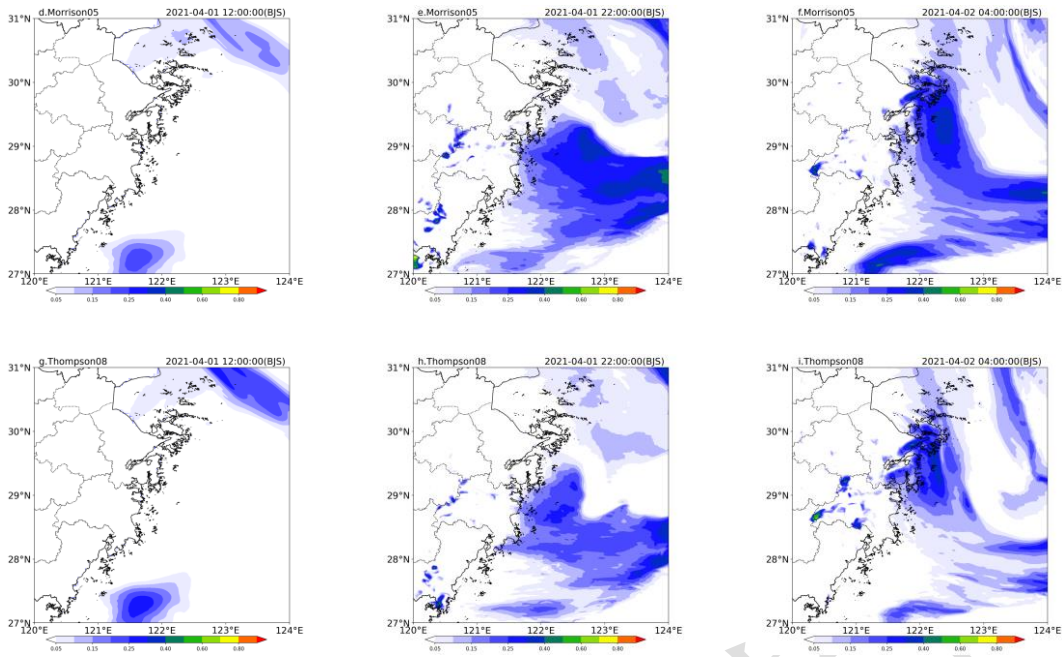


图7 浙江东部沿海及海面 2021 年 4 月 1 日 12:00、1 日 22:00 和 2 日 04:00(a~c)IAP-LACS, (d~f) Morrison05, (g~i) Thompson08 模拟的云水含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig.7 Cloud water content forecasts from (a~c) IAP-LACS, (d~f) Morrison05, (g~i) Thompson08 models off the coastal of eastern Zhejiang at 12:00 BT, 22:00 BT 1 and 04:00 BT 2 April 2021

图 8 为 2021 年 4 月 1 日 22:07、23:08 和 23:58 三山大闸毫米波雷达观测反射率和反演的云水含量。22:07 毫米波雷达观测几乎未捕捉到海雾回波, 云水含量均低于 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 三组试验模拟结果 (图 9a、9d、9g) 显示 1 日 22:00 三山大闸沿海 (图 9a 红色圆圈附近) 云水含量均较低, 其中 IAP-LACS 云水含量略高于毫米波雷达反演结果。

23:08 毫米波雷达 (图 8b、8e) 显示, 沿海区域出现海雾回波, 其强度在 $-30 \sim -20 \text{ dBz}$, 云水含量大值区达 $0.2 \sim 0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。1 日 23:00 三组试验模拟的云水含量均有所增大 (图 9b、9e、9h), IAP-LACS 在三山大闸沿海模拟的云水含量明显上升, 达到 $0.15 \sim 0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与毫米波雷达反演结果接近, 而其余两组试验为 $0.05 \sim 0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增强幅度较小。

23:58 海雾强度和范围进一步加大 (图 8c、8f), 海雾回波强度增强到 $-15 \sim -5 \text{ dBz}$, 云水含量约为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最高可达 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。2 日 00:00, IAP-LACS (图 8c) 在三山大闸沿海模拟的云水含量增强到 $0.25 \sim 0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而其余两组试验仍维持在 $0.05 \sim 0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 9f、9i)。

综上所述, 三山大闸沿海在 1 日 22:00 至 2 日 00:00 海雾快速加强, IAP-LACS 能更好地模拟出三山大闸沿海区域海雾在该时段内加强发展过程, 且云水含量也和毫米波雷达反演结果更加接近。IAP-LACS 对本次海雾过程的低层云水含量的改进是提高本次海雾模拟效果的重要原因。

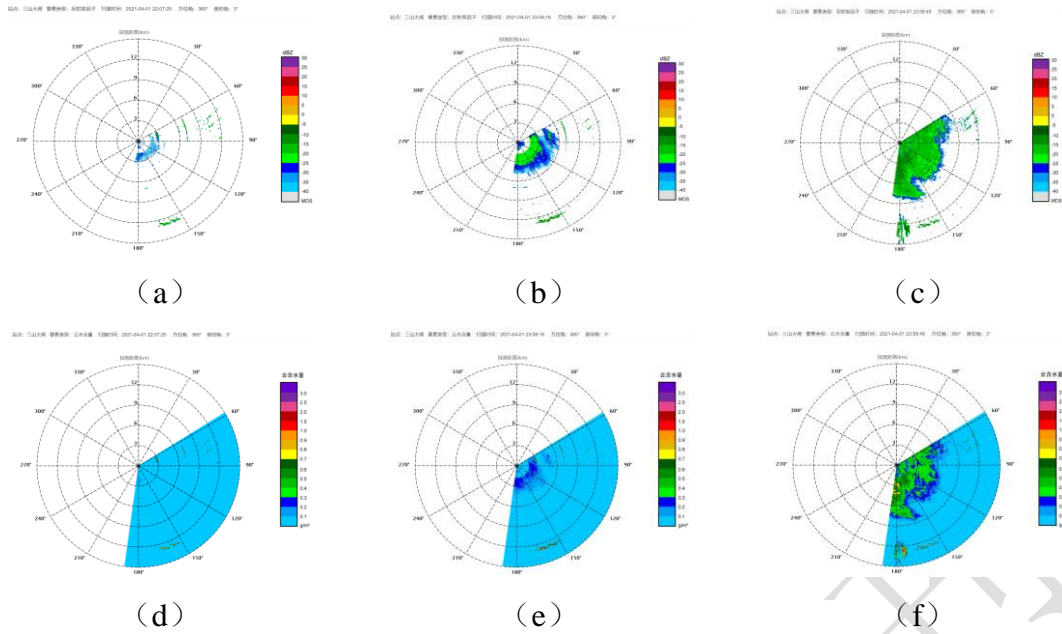


图 8 三山大闸沿海 2021 年 4 月 1 日 (a, d) 22:07、(b, e) 23:08 和 (c, f) 23:58 (a~c) 毫米波雷达观测反射率和 (d~f) 反演的云水含量

Fig.8 (a~c) Radar reflectivity observed by millimeter-wave cloud radar and (d~f) retrieved cloud water content over the coastal Sanshan Sluice at (a, d) 22:07 BT, (b, e) 23:08 BT, and (c, f) 23:58 BT 1 April 2021

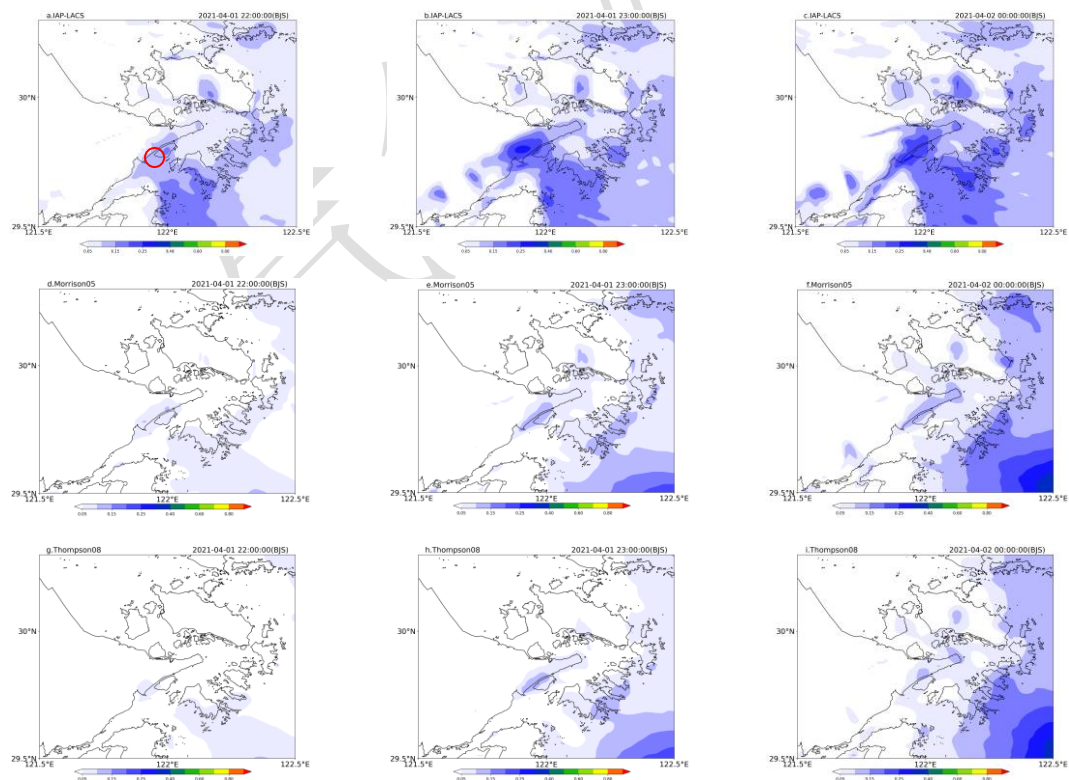


图 9 2021 年 4 月 1 日 22:00、1 日 23:00 和 2 日 00:00 (a~c) IAP-LACS, (d~f) Morrison05, (g~i) Thompson08 模拟的北仑舟山港附近云水含量

Fig.9 Cloud water content forecasts near the Beilun-Zhoushan Port from (a-c) IAP-LACS, (d-f) Morrison05, (g-i) Thompson08 models at 22:00 BT, 23:00 BT 1 April, and 00:00 BT 2 Apr 2021

由于三组试验对台州—温州沿海的海雾出现了不同程度的漏报或偏弱,本研究进一步选取该区域海陆交界附近的玉环站(28.08°N, 121.27°E),对其相对湿度、10 m 风速、2 m 温度和露点温度时序变化进行分析(图 10)。相对湿度的时序变化(图 10a)可见,三组试验虽模拟出相对湿度的日变化趋势,但与观测存在明显差异。观测显示 1 日 11:00 后相对湿度逐渐上升,而三组试验均在 16:00 后才快速上升;20:00 后模拟与观测的相对湿度均趋于稳定且差异较小;至 2 日 07:00,模式模拟的相对湿度迅速下降,而观测值仍维持较高水平。10 m 风速(图 10b)可见,观测和模式模拟的风速大部分时间均较低,且两者之间的差异较小,12:00—13:00 以及 2 日 06:00 观测风速增大明显,但三组试验均未模拟出该变化特征。

2 m 温度时序变化(图 10c)显示,三组试验均能模拟出温度的日变化趋势,但是对 12:00—16:00 温度模拟明显偏高,20:00 后则偏低 1~2°C,其中 20:00 后 IAP-LACS 温度模拟和观测最接近。2 m 露点温度变化(图 10d)可见,16:00 前三组试验和观测较为接近(除 10:00 偏低明显),20:00 后则偏低 1~2°C,同样 20:00 后 IAP-LACS 和观测最为接近。12:00—16:00 三组试验对 2 m 温度模拟偏高,但露点温度和实况接近,这种温湿配置可能是对应时次台州—温州沿海海雾漏报的影响原因之一。

整体上看,20:00 后玉环站 IAP-LACS 温度和露点温度模拟效果最优,其余时次不同试验之间差异相对较小,这可能是 IAP-LACS 试验的 FSL 诊断结果在温州—台州沿海优于其余两组试验的主要原因。

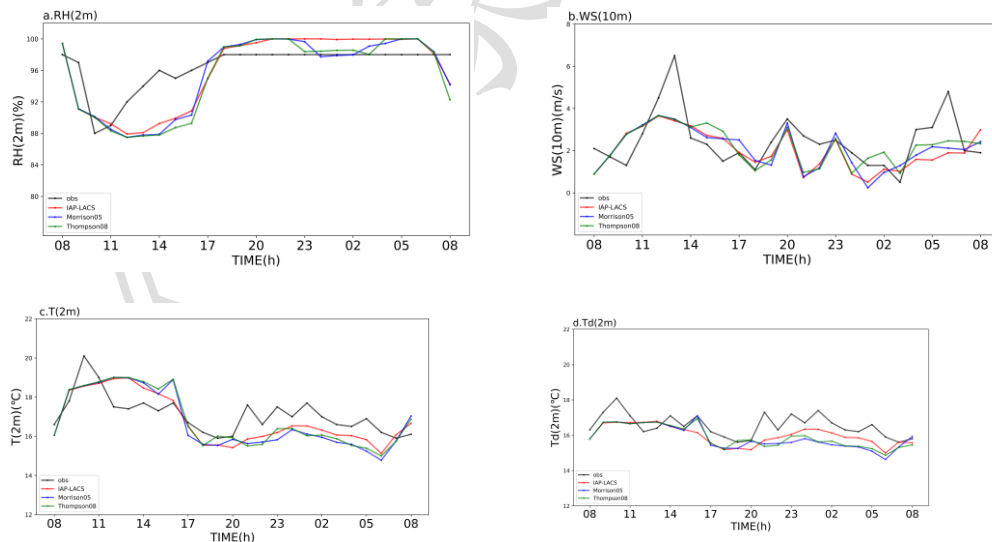


图 10 2021 年 4 月 1 日 08:00 至 2 日 08:00 玉环站各模式 (a) 2 m 相对湿度, (b) 10 m 风速, (c) 2 m 温度, (d) 2 m 露点温度对比

Fig.10 Comparison of (a) 2 m relative humidity, (b) 10 m wind speed, (c) 2 m temperature, (d) 2 m dew point temperature at Yuhuan Station from 08:00 BT 1 to 08:00 BT 2 April 2021

Gultepe et al (2006) 研究表明在同样云水含量下, 液滴数浓度范围可以从每立方厘米几滴到几百滴不等, 这表明能见度诊断方案应同时考虑液滴数浓度和液态水含量, 且不同等级能见度应用相应的拟合参数效果更优, 其采用在加拿大东部气溶胶云实验期间收集的现场观测资料, 建立了能见度 (V)、数浓度 (N_d) 和液态水含量 (LWC) 的参数化诊断算法:

$$V = \frac{1.002}{(LWC \times N_d)^{0.78}} \quad (3)$$

目前一般的气象模式并不输出云滴数浓度, 这极大限制了在能见度方案中引入云滴数浓度, 因此本文基于式 (3) 对 IAP-LACS 试验进行分析。图 11a~11c 为 IAP-LACS 模拟的近地层云滴数浓度空间分布。表明云滴数浓度的高值区与观测的低能见度区域在空间上基本吻合。图 11d~11f 为 IAP-LACS 试验基于式 (3) 诊断的能见度。从强度上看, 该算法诊断海雾强度比 SW99 算法和 FSL 算法更强, 与实况更加接近, 但在局部地区 (如 1 日 12:00 杭州湾、2 日 04:00 舟山—象山沿海) 仍存在系统性高估。从范围上看, 该算法结果与 FSL 算法的范围比较接近, 模拟出 4 月 1 日 12:00 温州—台州沿海的海雾, 且在 1 日 22:00 和 2 日 4:00 时次模拟出浙江沿海大面积海雾。整体上本次过程该算法诊断的海雾强度和范围优于 SW99 和 FSL 算法, 但仍然存在强度偏强的问题, 可能原因是该算法主要基于加拿大东部陆地上出现的边界层低云过程中的观测数据, 雾滴谱分布与东海海雾过程仍存在一定差异, 后续需要基于浙江沿海和海上观测资料, 建立适用于东海的海雾预报的能见度诊断算法。

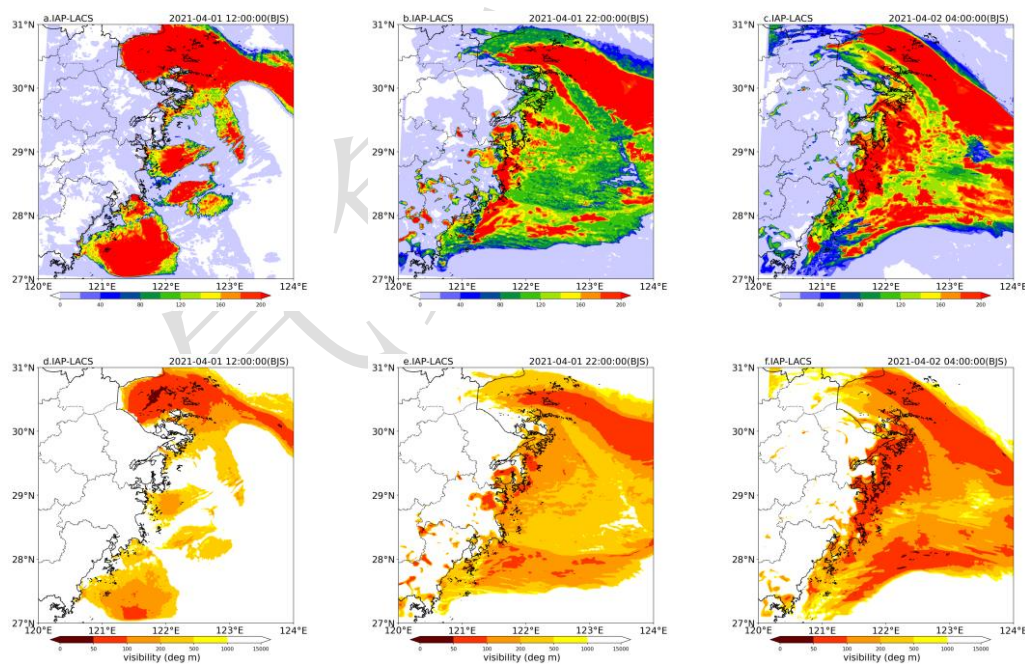


图 11 浙江东部沿海及海面 2021 年 4 月 1 日 12:00 (a、d) I、1 日 22:00 (b、e) I 和 2 日 04:00 (c、f) IAP-LACS 试验模式第一层云滴数浓度 (单位: 个 \cdot cm^{-3}) 和 (d~f) IAP-LACS 试验基于 Gultepe 方法的能见度诊断结果

Fig.11 Output from the IAP-LACS experiment: (a~c) cloud droplet number concentration in the first model layer (cm^{-3}) and (d~f) visibility diagnosed using the Gultepe method

over the coastal waters of eastern Zhejiang at 12:00 BT, 22:00 BT 1 April, and 04:00 BT 2

April 2021

图 12 为 4 月 1 日 12:00 至 2 日 08:00 各组试验不同能见度诊断方案 TS 评分。可以看到对于 FSL 和 SW99 能见度诊断方案, IAP-LACS 试验的 TS 评分均优于其余两组试验。对 1000 m 以下能见度 FSL 诊断方案优于 SW99 方案, 而能见度低于 500 m 时 FSL 诊断方案表现不如 SW99 方案。IAP-LACS 试验中采用式 (3) 的能见度 TS 评分表现最优, 1000 m 以下与 FSL 方案 TS 评分相当, 500 m 以下则明显高于其余方案。

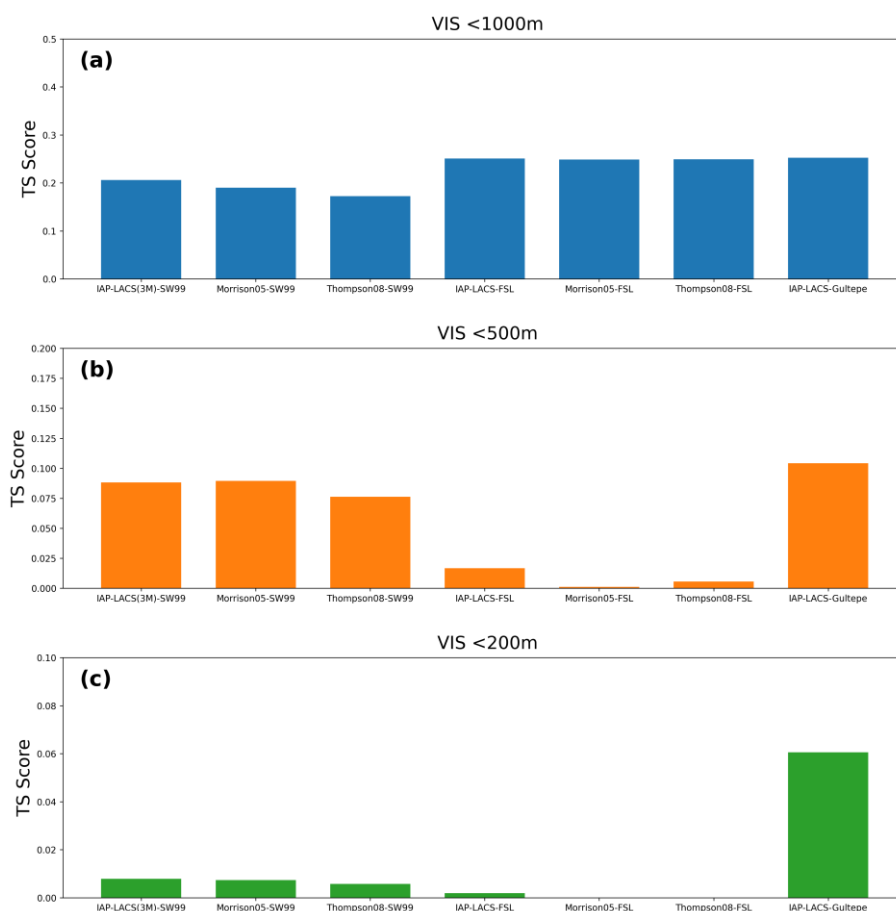


图 12 浙江东部沿海及海面 2021 年 4 月 1 日 12:00 至 2 日 08:00 各组试验不同能见度范围诊断方案 TS 评分

Fig.12 Threat score for different visibility thresholds among various diagnostic schemes across all experiment groups over the coastal waters of eastern Zhejiang from 12:00 BT 1 April to 08:00 BT 2 April 2021

5 结论与讨论

针对 2021 年 4 月 1—2 日浙江沿海一次高影响海雾过程, 采用 IAP-LACS 三参数云微物理方案、Morrison 和 Thompson 双参数云微物理方案开展了数值模拟试验, 采用 SW99 算法和 FSL 算法诊断能见度, 针对云水含量、云滴数浓度、2 m 温度和露点温度、相对湿度等海雾预报敏感因子进行分析, 得到以下主要结论。

(1) 三组试验均模拟出了本次海雾过程的发生, 但 IAP-LACS 方案对海雾的分布范围与强度的模拟效果最优, TS 评分最高, 尤其是对舟山群岛附近和台州—温州沿海的海雾的模拟。整体上, FSL 算法诊断结果在范围上优于 SW99 算法, 而在强度上不及 SW99 算法。

(2) 从云水含量模拟结果看, IAP-LACS 更好地模拟出舟山群岛和台州—温州沿海的低层云水含量大值区域, 且其范围和沿海能见度观测低值区较为一致。IAP-LACS 较好地模拟出 1 日 22:00 至 2 日 00:00 三山大闸沿海的云水含量以及增长过程。IAP-LACS 云微物理参数化方案对本次海雾过程的低层云水含量模拟的改进, 是提高本次海雾模拟效果的重要原因。

(3) 三组试验对玉环站 1 日 12:00—16:00 2 m 温度模拟偏高, 但露点温度与实况接近。IAP-LACS 对 1 日 20:00 后温度和露点温度模拟效果最优, 其余时次不同试验之间差异相对较小, 这可能是 IAP-LACS 试验的 FSL 诊断结果在温州—台州沿海优于其余两组试验的主要原因。

(4) 本次过程 IAP-LACS 输出的云滴数浓度大值区的分布和低能见度分布匹配较好, 基于数浓度和云液态水含量的能见度诊断方案模拟的海雾范围和 FSL 方案接近, 强度更强, 和实况更为接近, 且 TS 评分最优。目前业务模式一般不输出云滴数浓度, 这极大限制了在能见度诊断方案中引入云滴数浓度, 而 IAP-LACS 云微物理方案具备输出云滴数浓度的能力, 为改进海雾能见度预报提供了重要的微物理基础。

上述敏感性试验的结论仅是对本次海雾过程的模拟分析结果, 未来需做更多个例海雾试验, 来获得更为普遍性的结论, 为改进模式提供更好的参考。IAP-LACS 三参数云微物理方案能够预报数浓度、质量混合比和云滴半径总和, 后续需要基于雾滴谱观测对雾滴半径、数浓度等微物理量开展更深入的分析, 并针对浙江沿海海雾发展的合适的能见度诊断方案。IAP-LACS 三参数云微物理方案的计算量明显高于其他云微物理方案, 今后仍然需要优化计算方案提高计算速度, 提高业务应用能力。

参考文献:

- 邓玮, 孙继明, 雷恒池, 2019. 三参数云微物理方案中气溶胶谱函数对云滴谱影响的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究, 24(6): 693-710. Deng W, Sun J M, Lei H C, 2019. Numerical simulation research on the effects of the size distribution of aerosols on the droplet spectrum with a newly developed triple-moment bulk scheme[J]. Climatic Environ Res, 24(6): 693-710 (in Chinese).
- 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 等, 2016. 中国海雾研究简要回顾[J]. 气象科技进展, 6(2): 20-28. Fu G, Li P Y, Zhang S P, et al, 2016. A brief overview of the sea fog study in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(2): 20-28 (in Chinese).
- 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等, 2010a. 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, 2010a. Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the Yellow Sea by using cycling 3DVAR Part I: WRF numerical experiments[J]. Period Ocean Univ China, 40(10): 1-9 (in Chinese).

-
- 高山红, 张守宝, 齐伊玲, 等, 2010b. 利用循环 3DVAR 改进黄海海雾数值模拟初始场 II: RAMS 数值试验[J]. 中国海洋大学学报, 40(11): 1-10. Gao S H, Zhang S B, Qi Y L, et al, 2010b. Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the Yellow Sea by using cycling 3DVAR Part II: RAMS numerical experiments[J]. Period Ocean Univ China, 40(10): 1-10 (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).
- 黄翊, 彭新东, 2017. 边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响[J]. 大气科学, 41(3): 533-543. Huang Y, Peng X D, 2017. The impact of an improved planetary boundary layer parameterization scheme on the simulation of fog[J]. Chin J Atmos Sci, 41(3): 533-543 (in Chinese).
- 李子华, 2001. 中国近 40 年来雾的研究[J]. 气象学报, 59(5): 616-624. Li Z H, 2001. Studies of fog in China over the past 40 years[J]. Acta Meteor Sin, 59(5): 616-624 (in Chinese).
- 刘光普, 黄思源, 梁莺, 等, 2019. 毫米波雷达在港口海雾观测和能见度反演中的应用[J]. 干旱气象, 37(6): 993-1004. Liu G P, Huang S Y, Liang Y, et al, 2019. Application of millimeter wave radar in harbor marine fog observation and visibility inversion[J]. J Arid Meteor, 37(6): 993-1004 (in Chinese).
- 陆桥, 高丽, 翁之梅, 等, 2024. 不同边界层方案对一次浙江海雾数值模拟的敏感性研究[J]. 海洋预报, 41(4): 43-56. Lu Q, Gao L, Weng Z M, et al, 2024. Sensitivity of an advection fog process numerical simulation to different boundary layer parameterization schemes over Zhejiang coastal area[J]. Marine Forecasts, 41(4): 43-56 (in Chinese).
- 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等, 2014. 春季黄海海雾 WRF 参数化方案敏感性研究[J]. 应用气象学报, 25(3): 312-320. Lu X, Gao S H, Rao L J, et al, 2014. Sensitivity study of WRF parameterization schemes for the Spring sea fog in the Yellow Sea[J]. J Appl Meteor Sci, 25(3): 312-320 (in Chinese).
- 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. Ren Z P, Zhang S P, 2011. Structure characteristics of the Yellow Sea summer fog in the boundary layer and the comparison with Spring Fog[J]. Period Ocean Univ China, 41(5): 23-30 (in Chinese).
- 芮雪, 陆春松, 银燕, 等, 2023. 基于雾微物理观测改进能见度诊断方案[J]. 大气科学, 47(5): 1375-1387. Rui X, Lu C S, Yin Y, et al, 2023. Improved visibility diagnostic scheme based on fog microphysical observation[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5): 1375-1387 (in Chinese).
- 田小毅, 张志薇, 2019. 长江沿海地区雾的特征及影响因子分析[J]. 灾害学, 34(1): 51-55. Tian X Y, Zhang Z W, 2019. Characteristics and influence factors of fog in the coastal area of Yangtze River[J]. J Catastrophol, 34(1): 51-55 (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).
- 王锐, 刘彬贤, 2021. 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, 38(6): 82-92. Wang R, Liu B X, 2021. Numerical simulation study of the influence of cold air on sea fog in the Bohai[J]. Marine Forecasts, 38(6): 82-92 (in Chinese).
- 岳岩裕, 牛生杰, 赵丽娟, 等, 2013. 湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏微观特征分析[J]. 大气科学, 37(3): 609-622. Yue Y Y, Niu S J, Zhao L J, et al, 2013. Study on the synoptic system and macro-micro characteristics of sea fog along the Zhanjiang Coastal Area[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 609-622 (in Chinese).
- 张浩, 石春娥, 杨军, 等, 2021. 寿县不同强度雾的微物理特征及其与能见度的关系[J]. 大气科学, 45(6): 1217-1231. Zhang H, Shi C E, Yang J, et al, 2021. Microphysical characteristics of fog with different intensi-

-
- ties and their relationship with visibility in Shouxian County[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(6): 1217-1231 (in Chinese).
- 张伟, 崔梦雪, 王婧, 等, 2024. 闽南沿海雾滴谱统计特征及其与能见度的关系[J]. *大气科学*, 48(5): 1978-1990. Zhang W, Cui M X, Wang J, et al, 2024. Statistical characteristics of droplet spectrum and their relations with visibility on Southern coast of Fujian Province[J]. *Chin J Atmos Sci*, 48(5): 1978-1990 (in Chinese).
- 张伟, 李菲, 吕巧谊, 等, 2023. 闽南沿海一次海雾过程的多源资料综合分析[J]. *气象*, 49(6): 682-696. Zhang W, Li F, Lyu Q Y, et al, 2023. Comprehensive analysis of a sea fog event in Southern coast of Fujian based on multi-source data[J]. *Meteor Mon*, 49(6): 682-696 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2012. 雾的预报等级: GB/T 27964-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China, 2012. Grade of fog forecast: GB/T 27964-2011[S]. Beijing: China Standard Press (in Chinese).
- 周福, 钱燕珍, 金靛, 等, 2015. 宁波海雾特征和预报着眼点[J]. *气象*, 41(4): 438-446. Zhou F, Qian Y Z, Jin L, et al, 2015. Characteristics and forecasting focus of sea fog in Ningbo[J]. *Meteor Mon*, 41(4): 438-446 (in Chinese).
- Doran J A, Roohr P J, Beberwyk D J, et al, 1999. The MM5 at the air force weather agency-new products to support military operations[C]//The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Boston: AMS.
- Frank G P, Dusek U, Andreae M O, 2006. Technical note: a method for measuring size-resolved CCN in the atmosphere[J]. *Atmos Chem Phys Discuss*, 6(3): 4879-4895.
- Gultepe I, Müller M D, Boybeyi Z, 2006. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 45(11): 1469-1480.
- Ma C J, Kasahara M, Tohno S, 2012. Application of polymeric water absorbent film to the study of drop size-resolved fog samples[J]. *Atmos Environ*, 37(26): 3749-3756.
- Steenefeld G J, Ronda R J, Holtslag A A M, 2015. The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 154(2): 265-289.
- Stoelinga M T, Warner T T, 1999. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event[J]. *J Appl Meteor*, 38(4): 385-404.
- Tu X P, Yao R S, Hu L J, et al, 2023. Observation and simulation study on the macro-microphysical characteristics of a coastal fog offshore Zhejiang Province of China[J]. *Atmos Res*, 282: 106537.
- Zhou B B, Du J, Gultepe I, et al, 2012. Forecast of low visibility and fog from NCEP: current status and efforts[J]. *Pure Appl Geophys*, 169(5-6): 895-909.