杨 旭,樊文雁,蔡子颖,等.能见度观测同化对天津地区雾霾低能见度数值预报影响研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):5959-5968.
Yang X, Fan W Y, Cai Z Y, et al. Impact on numerical forecast of low visibility during haze/fog episodes in Tianjin based on visibility data assimilation [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):5959-5968.

能见度观测同化对天津地区雾霾低能见度数值预报影响研究

杨 旭[1,2],樊文雁[1,2],蔡子颖[1,2*],朱玉强[1,2],唐颖潇[1,2],董琪如[3] (1.天津市环境气象中心,天津 300074；2.中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室,天津 300074；3.天津市气象科学研究所,天津 300074)

摘要：以天津地区两次典型雾霾低能见度过程为例,通过发展适用于雾霾能见度观测的资料同化方法,实现 $PM_{2.5}$浓度、相对湿度及雾水含量等影响要素的模拟优化,提升模式能见度数值预报效果.研究表明,典型霾过程能见度变化主要受 $PM_{2.5}$ 浓度影响,最低值 1km 左右,随相对湿度日变化幅度为2~3km,雾霾混合过程相对湿度高,夜间雾显著影响导致局地能见度低于 50m,能见度日变幅大、过程极值低是其典型特征;通过能见度观测资料同化应用,雾霾低能见度模拟效果有显著提升,两次过程的能见度均方根误差分别由 7km 和 4km 减小至 2km 左右,间隔 6h 同化可以及时修正模拟偏差,部分时段提升效果更优;通过同化实现 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度模拟优化,霾能见度模拟偏差下降幅度最大达到 6~8km;通过增加雾水含量修正,结合相对湿度同化改进,能够进一步改善雾霾混合过程夜间雾水含量考虑不足的问题,能见度模拟偏差由 1~2km 减小至 300~500m,低能见度影响程度、影响范围均有明显提升;一个月模拟试验显示,低于 10km 的能见度模拟均方根误差由 4.4km 减小至 3.2km.

关键词：雾霾；能见度；资料同化；三维变分；数值预报
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-5959-10

Impact on numerical forecast of low visibility during haze/fog episodes in Tianjin based on visibility data assimilation.

YANG Xu[1,2], FAN Wen-yan[1,2], CAI Zi-ying[1,2*], ZHU Yu-qiang[1,2], TANG Ying-xiao[1,2], DONG Qi-ru[3] (1.Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China；2.CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074, China；3.Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：5959~5968

Abstract：The present study took the two typical haze/fog low visibility episodes in Tianjin as a point of departure for the following investigation, developed data assimilation methods applicable to visibility observations, in order to improve the numerical forecast effect of visibility through the simulation optimization of $PM_{2.5}$ concentration, relative humidity and fog water content. Theresults showed that the visibility change of typical haze episode was primarily influenced by $PM_{2.5}$ concentration, the minimum value of visibilitywas approximately 1km, with the daily change about 2~3km in the result of relative humidity change. The relative humidity of the haze-fog mixing episode was high, and visibility was lower than 50min localities due to the significant influence of fog during nighttime. The typical characteristic of the haze-fog episode were largedaily change and extreme value being low in visibility. The simulation of haze-fog low visibilitywas significantly enhanced with assimilation of visibility observation, root mean square error of the two episodes reduced from 7km and 4km to approximately 2km. Furthermore, the simulation deviation was corrected in time with 6-hour interval assimilation, with an enhancement effect observed to be more pronounced during specific time periods. Through the assimilation to achieve the optimization of the $PM_{2.5}$ concentration and the relative humidity simulation, the deviation of the haze visibility simulation was reduced by a maximum of 6~8km.By adding fog water content correction, combined with relative humidity assimilation improvement, the underestimate of fog water content was reduced during nocturnal periods, the visibility simulation deviation was reduced from 1~2km to 300~500m and the degree and range of the low visibility was significantly improved. One-month simulation showed that the root mean square error of visibility below 10 km was reduced from 4.4 km to 3.2 km.

Key words：haze/fog；visibility；data assimilation；3-DVAR；numerical forecast

能见度是天气预报的关键因素,低能见度影响公众生活出行,威胁交通运输安全,易造成社会经济损失和居民人身财产危害,受到公众和政府部门广泛关注.能见度预报方法主要有天气学方法、统计预报方法和数值预报方法等,其中数值模式通过对大气中物理、化学过程的客观描述,能够准确反映雾滴、气溶胶粒子、雨滴等成分对大气消光的综合影响,提供高时空分辨率的能见度客观预报产品,是开

收稿日期：2025-03-15
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42130513);天津市气象局科研项目(202424ybxm17)
* 责任作者, 正高级工程师, 120078030@163.com

展能见度预报的重要支撑手段.雾、霾是影响能见度的常见天气现象,雾能见度与雾滴液态含水量和雾滴尺度密切相关,常用天气模式结合 K84 消光方案[1-2]进行描述,从简单的一维雾模式[3-5]发展到可以考虑复杂地形等因素影响的二维[6]、三维雾模式[7-8].近年来利用 WRF 等中尺度天气模式[9-12]开展雾的模拟研究也取得了良好效果,模拟结果能够较好地反映出雾的生成条件.霾天气能见度与气溶胶、相对湿度密切相关,通过天气模式和大气化学模式耦合,结合气溶胶消光方案可实现霾天气能见度数值预报[13-15].初始条件是影响模式效果的重要因素,初始场不准确会对模式结果造成不利影响,对其改进的直接有效方法是进行观测资料同化.能见度与温度、湿度等气象场密切相关,因此通过气象资料同化对气象要素预报改进,更好地反映出雾等低能见度天气形成的环境条件,可以进一步提高其预报效果[16-17].近年来气溶胶资料同化技术得到了很大发展,通过地面[18-21]、飞机[22]以及激光雷达[23]、卫星[24-25]等气溶胶观测资料同化可以显著改善模式气溶胶初始场及后续预报,天津地区相关研究[26]初步发现基于气溶胶资料同化实现 $PM_{2.5}$ 浓度预报优化,能见度预报也有所改进,相对误差由 18.4%下降为 15.5%.

上述研究中利用资料同化技术结合大气化学模式,综合考虑气溶胶和气象因素模拟优化对模式能见度预报提升的影响关注还整体较少,且在研究中使用能见度观测资料进行同化的相关工作也较少.已有研究表明进行能见度观测资料同化可以改善模式对气溶胶等影响因素的预报[27-28],是提升能见度数值预报的可行思路.本文基于天津环境模式,对天津地区两次典型雾霾低能见度过程开展同化数值模拟影响研究,利用气溶胶三维变分同化和 WRFDA 同化技术发展适用于雾霾能见度观测的资料同化方法,通过对模式 $PM_{2.5}$ 浓度、相对湿度及雾水含量等要素的模拟优化,进一步提升模式能见度数值预报效果,以期为天津地区雾霾低能见度预报提供技术支撑.

1 资料与方法

1.1 天津环境模式设置

天津环境模式以 WRF-Chem 为核心构建,该模式是美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)等研究机构及一些大学共同参与研发的新一代中尺度模式系统,考虑了大气污染的化学过程、平流输送、湍流扩散、干湿沉降过程,在全球空气质量预报和模拟中有广泛的运用.本文采用 WRF-Chem 3.8 版本,在天津地区以外人为排放源清单使用清华大学 MEIC2020[29],分辨率 0.25°×0.25°,天津地区使用源谱调查排放源清单数据,其分辨率为 1km,通过源同化技术对排放源进行优化,以降低排放清单相比实际排放源变化的滞后.化学过程采用 CBMZ 方案,气溶胶过程采用 MOSAIC 4bins 方案,长波辐射方案和短波辐射方案均采用 RRTMG,边界层方案使用 YSU 方案,微物理方案采用 WSM5 方案,积云对流方案采用 New Grell 方案.采用单层网格设置,水平分辨率为 15km,水平网格数为 121 个×121 个,中心经纬度为 116.2°E、38.6°N,垂直方向分为 41 层.

1.2 观测资料和资料同化方法

本文使用的气象观测资料来源于天津地区 13 个国家气象站,包括逐小时的能见度、2m 相对湿度和温度,环境观测资料来源于气象部门和生态环境部门共享逐小时空气质量监测数据.使用的气溶胶消光方程参考蔡子颖等研究[15],雾水消光方程采用 K84 方案,具体见式(1)~(2):

$$\sigma_1 = a \cdot PM_{2.5}{}^{b}(1-RH)^{-c\cdot RH} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = 144.7 \times LWC^{0.88} \times 1000 \quad (2)$$

式中:σ_1 为气溶胶消光系数,σ_2 为雾水消光系数,RH 为相对湿度,a、b、c 取值分别为 7.63、0.9 和 0.479;LWC 为雾水含量.

本文进行雾霾能见度观测资料同化的基本思路是基于气溶胶消光和雾水消光方程,区分雾、霾不同影响,由能见度观测计算得到对应的 $PM_{2.5}$ 质量浓度或雾水含量,在此基础上,通过气溶胶三维变分同化和 WRFDA 同化系统进行 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度同化以及进行雾水含量修正等处理,实现对模式初始场中影响能见度的气溶胶和气象要素的优化调整.具体方法如下:①通过转换关系 $vis = 3912/\sigma$,vis 为能见度(km),σ 为大气消光系数,根据能见度观测计算大气消光系数;②判断是否有雾水:当观测站点相对湿度大于 80%,且能见度低于 1km 时,根据式(1)利用观测站点相对湿度和周边生

态环境部门 $PM_{2.5}$ 浓度计算气溶胶消光系数,判断当气溶胶消光占大气消光的比例低于 80%时,考虑有雾水影响;③判断无雾水时,根据式(1)以大气消光系数计算得出观测站点 $PM_{2.5}$ 浓度;有雾水时,以周边生态环境部门观测数据作为观测站点 $PM_{2.5}$ 浓度,结合相对湿度观测计算气溶胶消光,通过实际大气消光扣除气溶胶消光得出雾水消光,再利用式(2)根据雾水消光系数计算得出观测站点雾水含量;④对基于上述方法由能见度观测得出的观测站点 $PM_{2.5}$ 浓度进行气溶胶三维变分同化,技术方法详见相关研究[30],利用 WRFDA 同化系统对观测站点相对湿度、温度观测进行同化;有雾水时,还需根据计算的观测站点雾水含量对同化时刻模式底层雾水含量进行修正.

2　结果与讨论

2.1　过程概况及模拟试验方案

第一次过程为 2023 年 12 月 4~5 日(图 1),受辐合风场以及强逆温等不利气象条件影响,从 4 日开始天津地区 $PM_{2.5}$ 浓度持续增长,出现一次以气溶胶消光影响为主的霾低能见度过程.4 日白天天津地区能见度在 5~6km,之后逐渐下降,5 日夜间 20:00 全市平均值最低为 1.7km,其中东部沿海部分站点能见度短时低于 1km.过程期间天津地区 $PM_{2.5}$ 浓度持续缓慢增长,4 日 08:00 为 115μg/m^3 左右,5 日 08:00 达到 150μg/m^3,过程峰值浓度达到 198μg/m^3.相对湿度存在明显的日变化,白天最小值在 40%左右,夜间增加至 80%~90%,部分地区超过 90%.

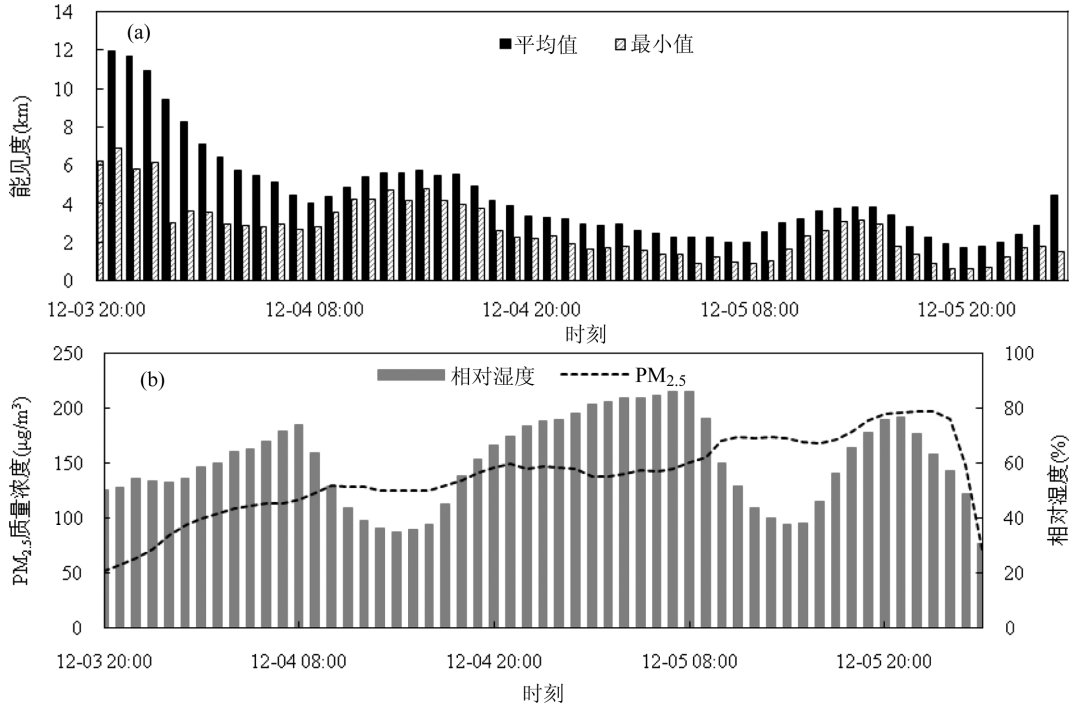


图 1　2023 年 12 月 4~5 日天津地区能见度、$PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度变化

Fig.1　Visibility, $PM_{2.5}$ mass concentration and relative humidity in Tianjin from December 4 to 5, 2023

第二次过程为 2024 年 10 月 24~26 日(图 2),高空暖脊、地面弱高压控制下,天津地区气温回升,地面风场偏弱且部分时段伴有风场辐合,气象条件利于 $PM_{2.5}$ 积累浓度增加,同时夜间近地面增湿明显,形成一次雾霾混合影响的持续性低能见度过程.过程期间天津地区能见度整体逐日降低,24 日能见度日均值为 3km,最大值 5.3km,26 日均值下降到 1.4km,最大值 3.3km.能见度昼夜差异较大,白天全市平均能见度 3~5km,夜间能见度显著下降,全市平均值下降至 1km 以下,部分地区低于 100m,其中 25 日夜间 7 个国家站出现能见度低于 100m 的情况,个别站点持续时间长达 10 个小时.$PM_{2.5}$ 质量浓度呈波动增长,24 日至 25 日白天在 100μg/m^3 左右,25 日夜间开始迅速上升并维持在 120~150μg/m^3.相对湿度存在明显的日变化,整体上随着过程发展相对湿度逐渐增大,26 日全天平均相对湿度均达到 70%以上.

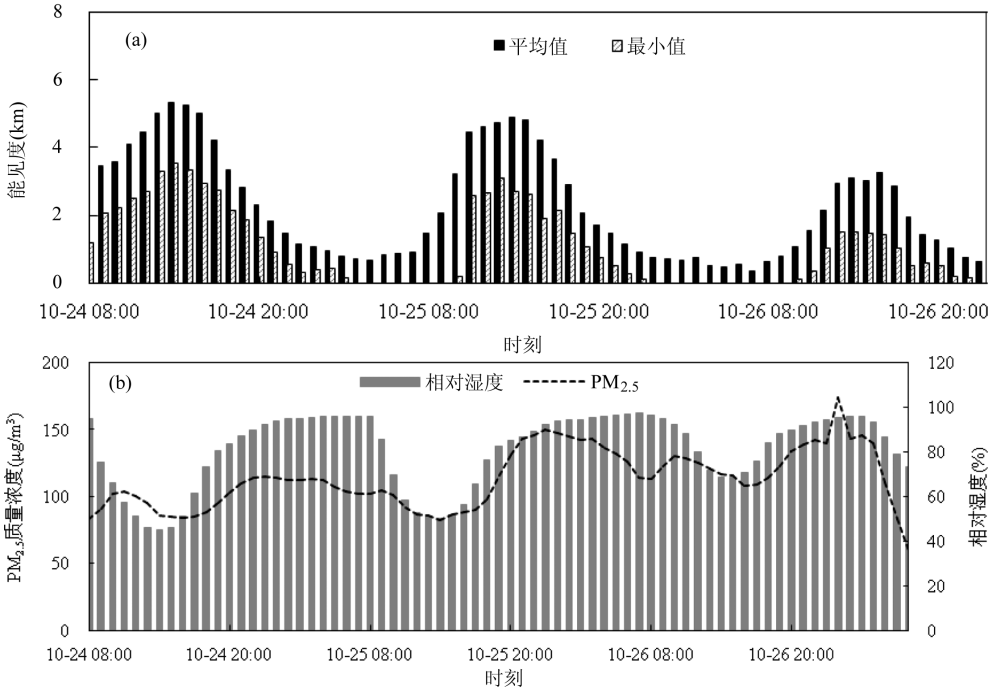


图 2 2024 年 10 月 24~26 日天津地区能见度、$PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度变化

Fig.2 Visibility, $PM_{2.5}$ mass concentration and relative humidity in Tianjin from October 24 to 26, 2024

对比两次低能见度过程,第一次过程以气溶胶消光影响为主,$PM_{2.5}$ 浓度整体较高,5 日全市平均浓度达到 150μg/m^3 以上持续 18h,相对湿度大部分地区均在 90%以下,明显低于第二次过程.期间能见度主要随着 $PM_{2.5}$ 浓度变化整体平缓下降,受相对湿度影响出现小幅度日变化,过程最低能见度 1~2km.第二次过程雾霾混合影响、相对湿度整体偏高,能见度日变化幅度大、夜间出现局地低于 50m 的极端情况是此次过程的主要特征.一方面高湿条件很大程度上提高了气溶胶粒子的消光作用,对能见度下降起到正贡献,例如 26 日白天 $PM_{2.5}$ 浓度约 120μg/m^3,明显低于第一次过程,但相对湿度超过 70%,能见度仅在 3km 左右;另一方面,夜间天津部分地区相对湿度达到饱和状态出现雾天气影响,其主要影响时段为后半夜 00:00 至 08:00,雾水的强消光作用导致局地能见度急剧下降低于 50m,是影响此次低能见度过程的重要因素.

表 1 同化模拟试验方案

Table 1 Assimilation simulation schemes

方案名称	描述
控制试验(CTRL)	不进行同化
同化试验(DA_6h)	间隔 6h 进行同化
同化试验(DA_12h)	间隔 12h 进行同化

针对上述两次低能见度过程,设计 1 组控制试验和 2 组同化试验,分析能见度观测同化对天津地区能见度及其影响因素的改进效果,并探究同化时间间隔对模拟效果的影响,具体方案如表 1 所示.

2.2 霾天气过程同化效果分析

第一次过程模拟起始时间为 2023 年 12 月 4 日 08:00,结束时间为 6 日 08:00,模拟时效 48h.从模式模拟结果来看(图 3a),CTRL 试验能见度模拟值均在 5km 以上,部分时段超过 10km,相比于观测值明显偏高,其中在 4 日 20:00 前后模拟与观测值之间的误差最大达到 8~10km.此外,在过程结束时段 5 日 22:00 模拟能见度开始快速回升,比观测提前了 3h 左右.从影响要素分析(图 3b 和图 3c),此次过程中 CTRL 试验模式能够一定程度上反映 $PM_{2.5}$ 质量浓度、相对湿度的变化特征,但是模拟值与观测值之间均存在较大误差.对于 $PM_{2.5}$ 质量浓度,CTRL 试验模拟值基本在 100μg/m^3 以下,比观测值整体偏低 77μg/m^3 左右,模拟偏差随时间的变化幅度不大;5 日 20:00 之后 CTRL 试验 $PM_{2.5}$ 质量浓度模拟值已经开始逐渐下降,与观测值变化趋势存在明显差异,是导致过程后期模拟能见度回升时间偏早的主要原因.对于相对湿度,CTRL 试验模式能够较好地反映出相对湿度的日变化特征,但是模拟值比观测值明显偏低,白天平

均偏低 10%~20%,夜间相对湿度峰值的模拟误差更加明显,平均偏低 30%~40%.

进行同化后,两组同化试验能见度模拟值与观测值之间的偏差比 CTRL 试验均明显减小.其中 4 日 08:00 至 14:00,两组同化试验模拟偏差略有减小,幅度约 1~2km;4 日 14:00 至 20:00,DA_6h 试验模拟值偏差明显降低,与观测值之间的偏差减小至 1km 以内,DA_12h 试验模拟值与观测值还存在一定差距,但整体均优于 CTRL 试验;4 日 20:00 以后两组同化试验模拟值与观测值比较一致,偏差基本在 1km 以内,同时对于 6 日 02:00 前后能见度快速回升的时间也有着较好的反映.从 $PM_{2.5}$ 质量浓度模拟结果来看,4 日 08:00 至 14:00 两组同化试验结果与 CTRL 试验无明显差异;4 日 14:00 至 20:00,DA_6h 试验模拟值与观测值之间偏差明显减小至 20~30μg/m^3, DA_12h 试验模拟偏差仍然无明显变化;4 日 20:00 以后,两组同化试验模拟结果变化趋势比较一致,与观测值的偏差大多在 20~40μg·m^{-3} 左右,比 CTRL 试验明显减小;同时 $PM_{2.5}$ 质量浓度高值维持时间延长至 6 日 00:00 前后,与观测结果也比较一致.从相对湿度结果来看,两组同化试验模拟值与观测值之间的偏差显著减小,大部分时段偏差均在 10%以内;两组同化试验之间的模拟结果整体上差异不大,在部分时段如 4 日 14:00 至 5 日 08:00,DA_6h 试验优于 DA_12h 试验,与观测值更为接近,同时该时段内 DA_6h 试验能见度模拟结果也略优于 DA_12h 试验.

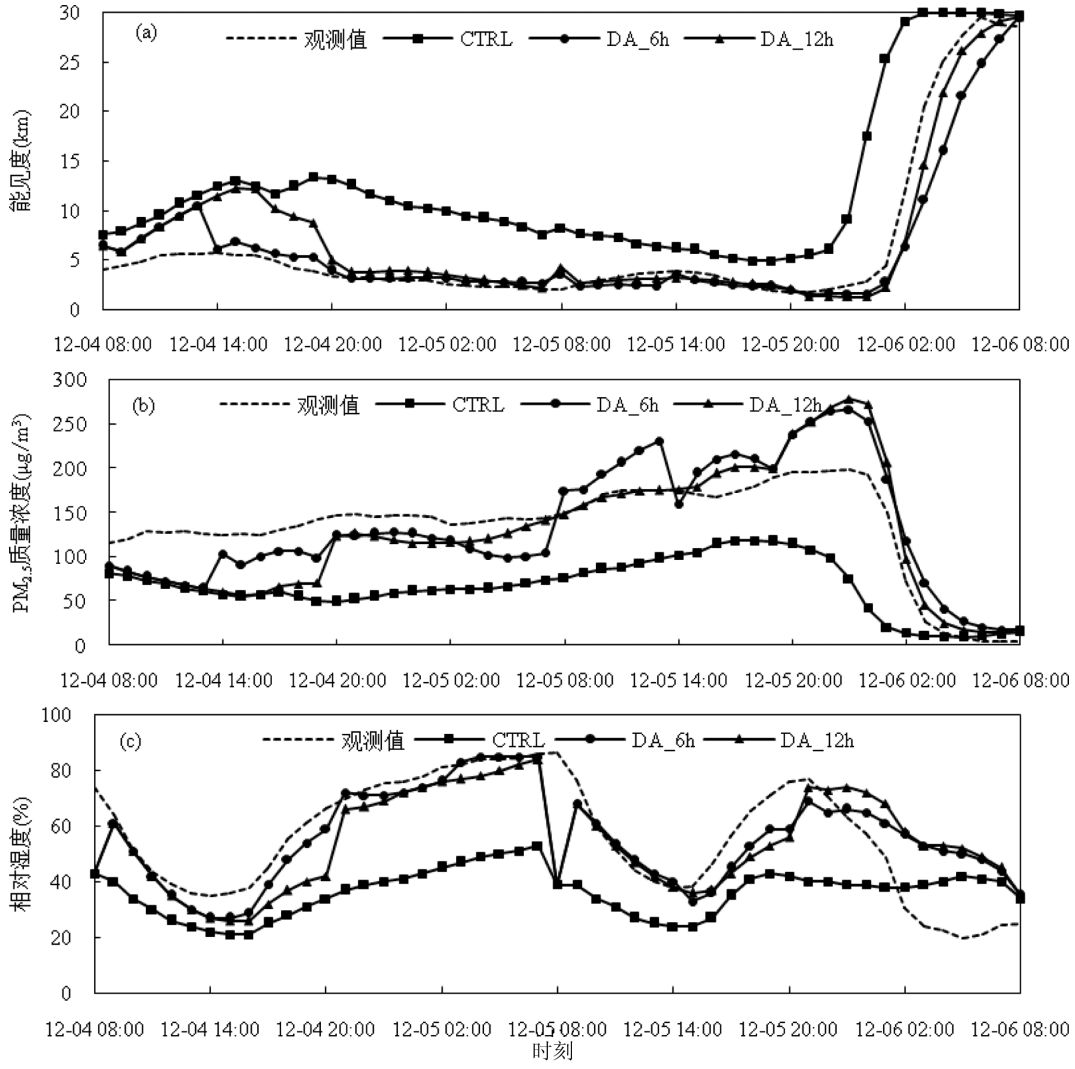


图 3　2023 年 12 月 4~5 日天津地区能见度、$PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度的模拟对比

Fig.3　Comparison of simulations for visibility, $PM_{2.5}$ mass concentration and relative humidity in Tianjin from December 4 to 5, 2023

由此显示,对于此次霾低能见度过程,进行同化后能够有效提升模式能见度模拟效果(表 2),平均偏

差由 6km 降低至 1~2km 左右,均方根误差由 7km 降低至 2km 左右,其效果提升是 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度模拟优化的综合作用结果.过程初期 $PM_{2.5}$ 浓度改善不明显,相对湿度模拟改进使得能见度模拟偏差比 CTRL 试验略减小 1~2km,后续随着 $PM_{2.5}$ 浓度模拟效果的显著提升,能见度模拟偏差下降幅度最大达到 6~8km.间隔 6h 和 12h 同化效果整体上差异不大,可能是对于此类稳定发展的霾天气过程,同化影响持续时间相对较长,在部分时段如 4 日 14:00 至 20:00,间隔 6h 同化可以及时修正模拟偏差,进一步提升效果.

表 2 两次过程模拟试验的能见度模拟误差分析(km)

Table 2 Simulation error of visibility during two episodes(km)

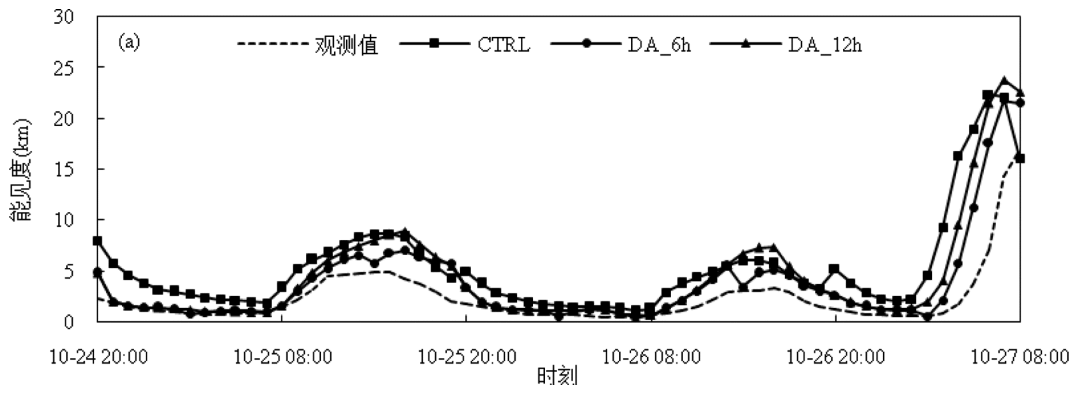
试验方案	2023 年 12 月 4~5 日		2024 年 10 月 24~25 日	
	平均偏差 (km)	均方根误差 (km)	平均偏差 (km)	均方根误差 (km)
控制试验(CTRL)	6.08	7.00	3.02	4.31
同化试验(DA_6h)	0.47	1.41	1.28	2.17
同化试验(DA_12h)	1.77	2.61	1.90	3.24

2.3 雾霾混合过程同化效果分析

第二次过程模拟起始时间为 2024 年 10 月 24 日 20:00,结束时间为 27 日 08:00,模拟时效 60h.由图 4a 可见,CTRL 试验能见度模拟值与观测值的变化趋势比较一致,模式较好地反映出了此次过程期间天津地区能见度白天升高,夜间显著降低的日变化特征,但是模拟值比观测值有所偏高,白天平均偏高 3km 左右,夜间偏高 1~2km;此外,CTRL 试验 27 日 01:00 能见度开始迅速上升,比观测提前了 3h 左右.从影响因素来看(图 4(b)和图 4(c)),CTRL 试验 $PM_{2.5}$ 质量浓度模拟值比观测值有所偏低,幅度在 10~50μg/m^3 左右,27 日 01:00 以后 $PM_{2.5}$ 质量浓度模拟值迅速下降,与模拟能见度迅速上升时间基本一致.对于相对湿度,过程期间各时段 CTRL 试验模拟值比观测值均有所偏低,其中夜间偏低幅度在 5%以内,白天整体偏低 10%~20%左右,此外 26 日夜间相对湿度模拟偏差也达到 20%左右.

进行同化后,DA_6h 和 DA_12h 两组同化试验能见度模拟值与观测值偏差比 CTRL 试验均有所减小,其中夜间表现得更为明显,24 日、25 日夜间模拟偏差均减小至 300~500m,26 日夜间模拟偏差减小至 500~1000m;白天时段能见度模拟值偏差减小幅度低于夜间,08:00~13:00 两组同化试验模拟值比观测值偏高 1~2km,比 CTRL 试验模拟偏差有所减小,但在 14:00~16:00 前后的能见度峰值与 CTRL 试验相似,与观测值之间均存在一定差距.对于过程后期能见度迅速回升时间,两组同化试验相比于 CTRL 试验均延后 1~2h,与观测值变化更为接近.对比两组同化试验之间模拟结果整体上差异不大,DA_6h 试验在白天能见度峰值时段以及过程后期能见度回升时段的表现略优于 DA_12h 试验.

从 $PM_{2.5}$ 质量浓度模拟结果来看,24 日 20:00 至 25 日 20:00 两组同化试验模拟值与观测值之间的差异偏低幅度在 10μg/m^3 左右,比 CTRL 试验均有所减小;之后模拟值随时间变化出现较大波动,在各个同化时刻模拟值趋近于观测,例如 25 日 20:00 模拟值偏差由前一时次的 43μg/m^3 减小至 4μg/m^3,但是随着时间延长模拟值逐渐趋近于 CTRL 试验,与观测值的差异再次迅速增大.从相对湿度变化分析,两组同化试验模拟偏差比 CTRL 试验均有所减小,夜间模拟值与观测值基本一致,偏差在 3%以内,白天模拟结果整体上略优于 CTRL 试验,但与观测值之间还存在一定差异,例如 26 日 08:00 至 14:00 相对湿度模拟值下降速度比观测偏快,可能是模式对于夜间雾影响导致上午近地面高湿条件维持时间偏长的现象表现有所不足.



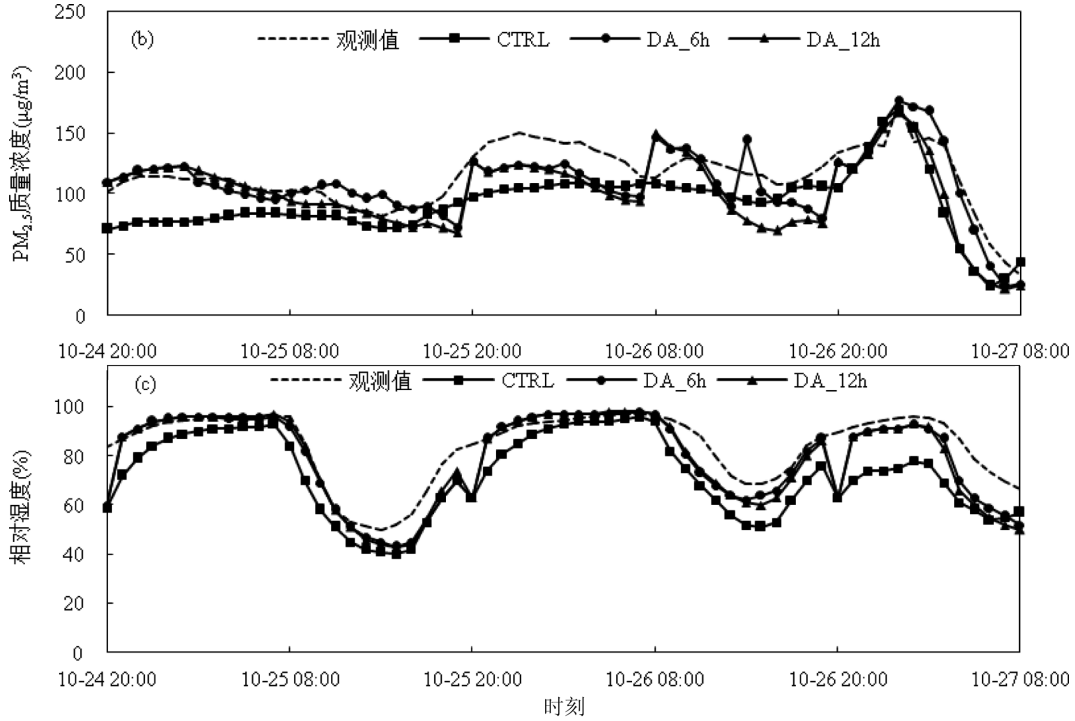


图 4　2024 年 10 月 24~26 日天津地区能见度、$PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度的模拟对比

Fig.4　Comparison of simulations for visibility, $PM_{2.5}$ mass concentration and relative humidity in Tianjin from October 24 to 26, 2024

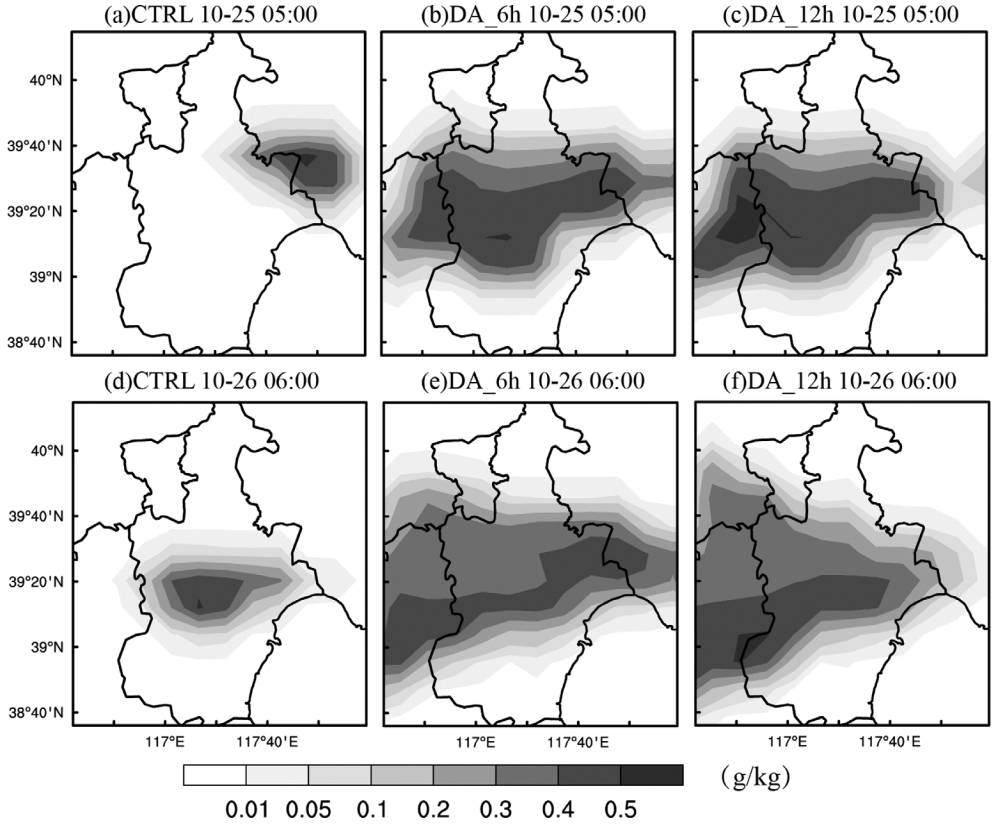


图 5　2024 年 10 月 25 日 05:00 和 26 日 06:00 控制试验和同化试验雾水含量

Fig.5　Fog warter content of CTRL and DA experiments at 05:00 on October 25 and 06:00 on October 26, 2024

此次过程期间,夜间天津地区出现雾天气,是导致夜间低能见度的重要原因.从雾水含量对比来看

(图 5),CTRL 试验 25 日 04:00 至 08:00 仅在天津东北部出现雾水含量大值区,其余大部分地区无明显雾水影响,全市大部分地区能见度在 1~3km 左右(图 6),与观测之间存在明显差异;26 日 04:00 至 08:00 天津中部出现雾水含量大值区,其影响范围内出现能见度低于 100m 的区域,与观测显示的能见度范围明显偏小. 两组同化试验天津地区夜间雾水含量模拟值比 CTRL 试验明显增加,24 日夜间全市均值约 0.2~0.3g/kg,25 日夜间全市均值最大达到 0.3g/kg 以上,同时雾水含量大值区范围扩大到天津中部、东北部,上述地区能见度均低于 500m,局地低于 100m,更好地反映出了夜间天津地区雾对能见度的显著影响.

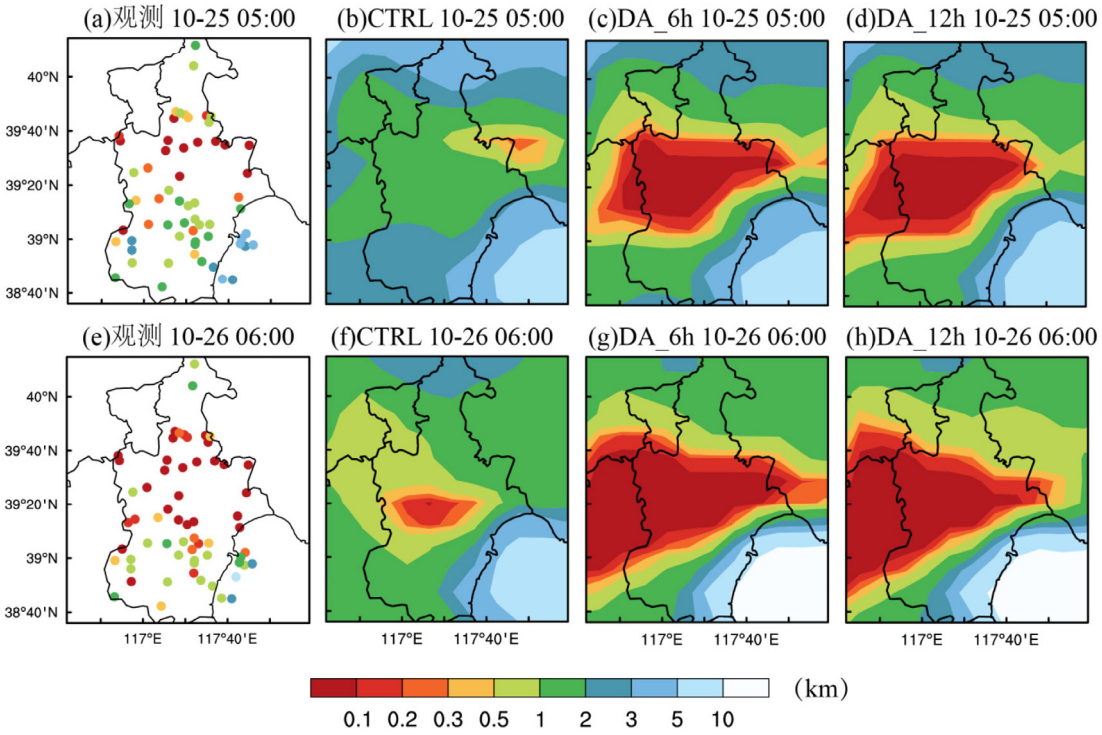


图 6 2024 年 10 月 25 日 05:00 和 26 日 06:00 控制试验和同化试验能见度

Fig.6 Visibility of CTRL and DA experiments at 05:00 on October 25 and 06:00 on October 26, 2024

由此显示,对于此次雾霾混合低能见度过程,进行同化后模式能见度模拟偏差明显减小(表 2),平均偏差由 3km 降低至 1~2km,均方根误差由 4km 降低至 2~3km,一方面通过同化实现 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度模拟优化提升了气溶胶消光影响,另一方面通过增加雾水含量修正,结合夜间湿度条件优化,有效改善了模式夜间雾水含量考虑不足的问题,更好地反映了夜间雾对能见度的显著影响,低能见度影响程度、影响范围比 CTRL 试验均有明显提升.白天时段以及过程结束时段能见度模拟效果改进幅度有限,相比于 CTRL 试验有所提升,但是与观测结果之间还存在差异,可能是由于模式本身对风场等气象条件模拟存在误差,同时对于此类雾霾混合影响的低能见度过程,其变化特征和影响因素也更加复杂,模式表现能力有所不足,例如 26 日白天雾消散时间、相对湿度下降速度比观测明显偏快以及 27 日凌晨过程结束时段冷空气偏快、偏强,可能需要结合风场等资料同化以及模式物理化学机制改进等进一步优化提升.

2.4 长时段模拟试验分析

综合上述两次典型过程,同化后模式能见度模拟效果均有显著提升.为进一步检验本文研究方法对天津地区雾霾低能见度数值预报的改进效果,对 2023 年 12 月进行了一个月的滚动模拟试验.以每天 20:00 为起报时刻进行 24h 模拟,控制试验不进行同化,同化试验分别在 20:00、02:00 和 08:00 进行 3 次同化.

由图 7 可见,同化前天津逐小时能见度模拟值的整体变化趋势与观测值基本一致,模式对月内几次低能见度过程出现的时段均有所反映,但数值上还存在一定差异.其中部分过程的能见度模拟误差

相对较大,如 12 月 4~5 日、7~8 日,模拟值整体偏高,对低能见度的影响程度表现有所不足,同时也有部分过程模拟效果相对较好,如 12 月 13~14 日、29~30 日.进行同化后,对低能见度过程模拟效果有不同程度的提升,模拟值与观测值之间更加接近.图 8 对比了能见度低于 10km 的情况(共有 377 个时次),结果显示同化后模拟值与观测值之间的平均绝对误差由 2.99km 减小至 1.65km,均方根误差由 4.40km 减小至 3.19km,上述结果进一步验证了同化对模式低能见度预报改进的有效性.

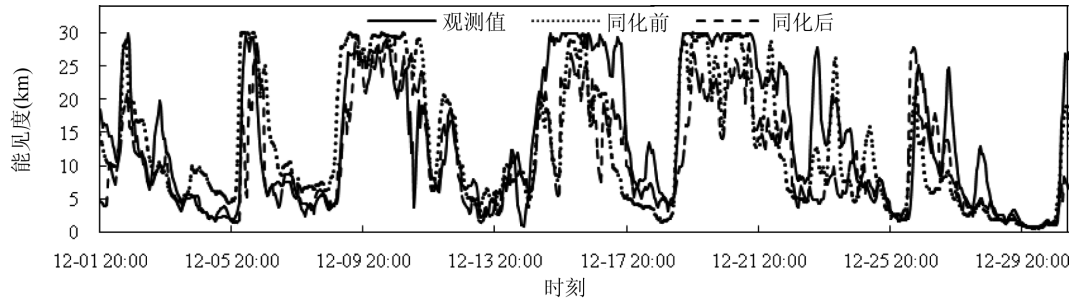


图 7　2023 年 12 月天津逐小时能见度观测值与模拟值的变化曲线

Fig.7　Hourly visibility for observation and simulation in Tianjin during December, 2023

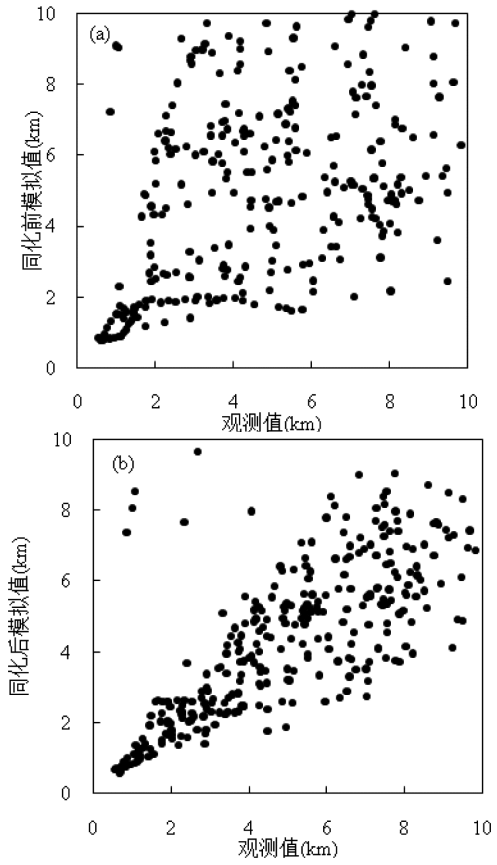


图 8　2023 年 12 月天津小时能见度≤10km 时的同化前(a)、同化后(b)模拟对比

Fig.8　Simulation of hourly visibility (≤10km) before and after assimilationin Tianjin during December, 2023

3　结论

3.1　典型霾过程 $PM_{2.5}$ 浓度高,能见度变化主要受 $PM_{2.5}$ 浓度影响,最低值 1km 左右,随相对湿度日变化幅度 2~3km.雾霾混合过程相对湿度高,夜间雾显著影响导致局地能见度急剧下降低于 50m,能见度日变幅大、过程极值低是其典型特征.通过能见度观测资料同化,两次雾霾低能见度过程模拟均方根误差由 7km 和 4km 减小至 2km 左右,在部分时段间隔 6h 同化表现更优.结合一个月模拟试验,同化后能见度低于 10km 的均方根误差由 4.4km 减小至 3.2km.

3.2　霾低能见度过程通过同化实现 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度等影响因素模拟优化,能够有效提升模式能见度模拟效果.过程初期 $PM_{2.5}$ 浓度改善不明显,相对湿度模拟改进可使得能见度模拟偏差比 CTRL 试验减小 1~2km.随着 $PM_{2.5}$ 浓度模拟效果的显著提升,能见度模拟偏差下降幅度最大达到 6~8km.

3.3　雾霾混合过程通过增加雾水含量修正,结合夜间相对湿度条件模拟优化,能够进一步改善模式夜间雾水含量考虑不足的问题,更好地反映了夜间雾对能见度的显著影响,模拟偏差由 1~2km 减小至 300~500m,低能见度影响程度、影响范围比 CTRL 试验均有明显提升.

参考文献:

[1] Kunke1, Bruce A. Parameterization of droplet terminalvelocity andextinction coefficient in fog models [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984,23(1):34-41.

[2] 周　鑫,丁菊丽,田　伟,等. 能见度参数化方案概述 [J]. 气象研究与应用, 2009,30(3):22-25.
Zhou X, Ding J L, Tian W, et al. Introduction of visibility

parameterization scheme [J]. Journal of Meteorological Research And Application, 2009,30(3):22−25.

[3] Bott A, Trautmann T. PAFOG—a new efficient forecast model of radiation fog and low−level stratiform clouds [J]. Atmospheric Research, 2002,64(1):191−203.

[4] 尹 球,许绍祖.辐射雾生消的数值研究(Ⅰ)—数值模式 [J]. 气象学报, 1993,51(3):351−360.
Yin Q, Xu S Z. A numerical study of the formation and dissipation of radiation fog(Ⅰ)—the numerical model of radiation fog [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1993,51(3):351−360.

[5] 尹 球,许绍祖.辐射雾生消的数值研究(Ⅱ)—生消机制 [J]. 气象学报, 1994,52(1):60−67.
Yin Q, Xu S Z. A numerical study of the formation and dissipation of radiation fog(Ⅱ)—the physical mechanism of radiation fog [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1994,52(1):60−67.

[6] 张利民,李子华.重庆雾的二维非定常数值模拟 [J]. 大气科学, 1993,17(6):750−755.
Zhang L M, Li Z H. A two−dimensional time−integral numerical model of Chongqing fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1993,17(6):750−755.

[7] Shi C, Sun X, Yang J, et al. 3D model study on fog over complex terrain − Part I: Numerical study [J]. Journal of Meteorological Research, 1996,10(4):493−506.

[8] 石春娥,曹必铭,李子华,等.复杂地形上三维局地环流的模拟研究 [J]. 南京气象学院学报, 1996,19(3):58−66.
Shi C E, Cao B M, Li Z H, et al. Numerical simulation of 3D local circulation over a complicated terrain [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1996,19(3):58−66.

[9] Jaberi P, Sabetghadam S, Ghader S. Visibility prediction during fog and precipitation using the WRF model over Tehran [J]. Journal of Spatial Analysis Environmental Hazarts, 2020,7(3):107−124.

[10] Lin C, Zhang Z, Pu Z, et al. Numerical simulations of an advection fog event over Shanghai Pudong International Airport with the WRF model [J]. Journal of Meteorological Research, 2017,31(5):874−889.

[11] Ezber Y, Sen O L. WRF sensitivity simulations of a dense advection fog event in Istanbul [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2022,148(1/2):617−641.

[12] Pithani P, Ghude S D, Chennu V N, et al. WRF model prediction of a dense fog event occurred during Winter Fog Experiment (WIFEX) [J]. Pure and Applied Geophysics, 2019,176(4):1827−1846.

[13] Zong P, Zhu Y, Wang H, et al. WRF−Chemsimulation of winter visibility in Jiangsu, China, and the application of a neural network algorithm [J]. Atmosphere, 2020,11(5):520−537.

[14] 赵秀娟,李梓铭,徐 敬.霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 [J]. 环境科学, 2019,40(4):1688−1696.
Zhao X J, Li Z M, Xu J. Modification and performance tests of visibility parameterizations for haze days [J]. Environmental Science, 2019,40(4):1688−1696.

[15] 蔡子颖,姚 青,韩素芹,等.天津地区霾天气特征研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(1):50−60.
Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, et al. Research on characteristics of haze weather in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2019,39(1): 50−60.

[16] 梁爱民,张庆红,刘开宇,等.华北地区一次大雾过程的三维变分同化试验 [J]. 气象学报, 2007,65(5):792−804.
Liang A M, Zhang Q H, Liu K Y, et al. 3D variation data assimilation experiments on a dense fog event over North China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007,65(5):792−804.

[17] Zhang C, Zhang L, Wang B, et al. Analysis and modeling of a long−lasting fog event over Beijing in February 2007 [J]. Journal of Meteorological Research, 2010,24(4):426−440.

[18] Li Z, Zang Z, Li Q, et al. A three−dimensional variational data assimilation system for multiple aerosol species with WRF/Chem and an application to $PM_{2.5}$ prediction [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013,13(8):4265–4278.

[19] Jiang Z Q, Liu Z Q, Wang T J, et al. Probing into the impact of 3DVAR assimilation of surface PM_{10} observations over China using process analysis [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(12):6738–6749.

[20] Feng S Z, Jiang F, Jiang Z Q, et al. Impact of 3DVAR assimilation of surface $PM_{2.5}$ observations on $PM_{2.5}$ forecasts over China during wintertime [J]. Atmospheric Environment, 2018,187:34–49.

[21] 靳璐滨,臧增亮,潘晓滨,等.$PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 资料同化及在南京青奥会期间的应用试验 [J]. 中国环境科学, 2016,36(2):331−341.
Jin L B, Zang Z L, Pan X B, et al. Data assimilation and application experiments of $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ during Nanjing Youth Olympic Games [J]. China Environmental Science, 2016,36(2):331−341.

[22] Zang Z L, Li Z J, Pan X B, et al. Aerosol data assimilation and forecasting experiments using aircraft and surface observations during CalNex [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2016,68(1):29812.

[23] Cheng X H, Liu, Y L, Xu X D, et al. Lidar data assimilation method based on CRTM and WRF−Chem models and its application in $PM_{2.5}$ forecasts in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2019,682: 541–552.

[24] Liu Z Q, Lin Q H, Hui C, et al. Three−dimensional variational assimilation of MODIS aerosol optical depth: Implementation and application to a dust storm over East Asia [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116(D23):D20206.

[25] 冯 沁,鲍艳松,闵锦忠,等.卫星气溶胶光学厚度资料同化对灰霾预报改进个例研究 [J]. 气象学报, 2018,76(1):104−116.
Feng Q, Bao Y S, Min J Z, et al. A study on effects of satellite based AOD assimilation on numerical forecast of haze [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018,76(1):104−116.

[26] 蔡子颖,杨 旭,吕 妍,等.基于环境模式 $PM_{2.5}$ 的渤海及其西岸能见度预报技术优化研究 [J]. 环境科学学报, 2022,42(6):260−273.
Cai Z Y, Yang X, Lv Y, et al. The research on improving visibility forecast in Bohai Sea and West Coast of Bohai Sea based on environmentalmodel $PM_{2.5}$ [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(6):260−273.

[27] Clark P A, Harcourt S A, Macpherson B, et.al. Prediction of visibility and aerosol within the operational Met Office Unified Model. I: Model formulation and variational assimilation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008,134(636):1801–1816.

[28] Kim M, Lee K, Lee Y H. Visibility data assimilation and prediction using an observation network in South Korea [J]. Pure and Applied Geophysics, 2020,177(2):1125−1141.

[29] Li M, Liu H, Geng G, et al. Anthropogenic emission inventories in China: Areview [J]. National Science Review, 2017,4:834−866.

[30] 杨 旭,唐颖潇,蔡子颖,等.基于气溶胶三维变分同化天津 $PM_{2.5}$ 数值预报研究 [J]. 中国环境科学, 2021,41(12):5476−5484.
Yang X, Tang Y X, Cai Z Y, et al. Impact of aerosol data assimilation with 3−DVAR method on $PM_{2.5}$ forecast over Tianjin [J]. China Environmental Science, 2021,41(12):5476−5484.

作者简介：杨 旭(1994−),男,河南省三门峡人,工程师,硕士,主要研究方向为大气物理与大气环境.发表论文 5 篇.yangx_tjqx@163.com.