

CMA-MESO 三维变分同化系统 2 m 相对湿度资料同化研究*

徐枝芳^{1,2,3} 吴洋⁴ 龚建东^{1,2,3} 蔡怡^{3,5}
XU Zhifang^{1,2,3} WU Yang⁴ GONG Jiandong^{1,2,3} CAI Yi^{3,5}

1. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京, 100081
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081
3. 国家气象中心, 北京, 100081
4. 天津市津南区气象局, 天津, 300350
5. 成都信息工程大学, 成都, 610225

1. *CMA Earth System Modeling and Prediction Centre (CEMC), Beijing 100081, China*

2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

3. *National Meteorological Centre, Beijing 100081, China*

4. *Tianjin Jinnan District Meteorological Bureau, Tianjin 300350, China*

5. *Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*

2021-02-24 收稿, 2021-08-17 改回。

徐枝芳, 吴洋, 龚建东, 蔡怡. 2021. CMA-MESO 三维变分同化系统 2 m 相对湿度资料同化研究. 气象学报, 79(6): 943-955

Xu Zhifang, Wu Yang, Gong Jiandong, Cai Yi. 2021. Assimilation of 2 m relative humidity observations in CMA-MESO 3DVar system. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(6):943-955

Abstract In order to improve the relative humidity analysis and forecast of the CMA-MESO (China Meteorological Administration Mesoscale model) 3DVar (3-Dimensional Variational) data assimilation system at 3 km resolution, a new observation operator for 2 m relative humidity observations and the tangent linear as well as its adjoint have been coded, tested, and then introduced into the CMA-MESO 3DVar operational assimilation system. The T639 (T639L60 Global Medium Range Forecast System, $0.28125^\circ \times 0.28125^\circ$) analysis of results for three months (1 June to 31 August, 2015) shows that the difference in relative humidity between 2 m and the lowest model level is a function of the Richardson number. Therefore, 2 m relative humidity can be directly compared to relative humidity at the lowest model level. The observation operator assumes that relative humidity is constant in unstable surface layer. The results show that more 2 m relative humidity observations can be used in the 3DVar assimilation system with this scheme, and the relative humidity analysis is more close to observations. The EST (Equitable Threat Score) value of summer (1–31 July, 2018) experiments is higher when 2 m relative humidity observations are assimilated using this scheme. The assimilation of surface relative humidity observations seems to be improved.

Key words 2 m relative humidity, CMA-MESO 3DVar, Assimilation, Richardson number

摘要 为了提高 CMA-MESO (China Meteorological Administration Mesoscale model) (原 GRAPES) 三维变分同化系统中 2 m 相对湿度资料的应用效果, 改善模式中相对湿度的分析和降水预报效果, 分析了 2015 年 6—8 月 T639 (T639L60 全球中期数值预报系统, $0.28125^\circ \times 0.28125^\circ$) 分析场低层相对湿度和 2 m 相对湿度之差与表征稳定度的理查森数 (Ri) 的关系, 发现二者有很好的相关, $Ri < 0$ 时, 模式低层相对湿度与 2 m 相对湿度的差异较小, 基本在同化观测误差范围内。依据该统计结果, 对 CMA-MESO 同化系

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507600、2018YFF0300100)和国家自然科学基金项目(41275105)。

作者简介: 徐枝芳, 主要从事数值模式与资料同化研究。E-mail: zhifang@cma.gov.cn

统中 2 m 相对湿度同化方案进行优化, $R_i < 0$ 时, 将观测站地形低于模式地形的 2 m 相对湿度观测由观测站高度改为模式最低层高度进行同化, 形成新的 2 m 相对湿度同化方案, 旨在解决 2 m 相对湿度资料同化时模式地形高度与观测站高度不同的影响。2018 年 7 月 CMA-MESO 三维变分同化系统(3DVar)个例和连续试验结果显示: 新的 2 m 相对湿度同化方案同化分析资料数量明显增加, 且 08 时多于 20 时(北京时), 新增观测点新息向量(背景减观测)与周围原有观测新息向量保持基本一致, 分析残差偏差和均方根误差减小, 降水预报效果明显改善。新 2 m 相对湿度同化方案通过提高观测站低于模式地形高度的观测资料合理应用, 从而改善了 3 km 模式系统同化分析和预报效果。

关键词 2 m 相对湿度, CMA-MESO 3DVar, 同化, 理查森数
中图法分类号 P456.7

1 引言

暴雨灾害在中国频发, 具有突发性、强度大等特点, 常造成人员伤亡和巨大的经济损失, 能否准确预报暴雨是社会关注的热点之一。暴雨系统多是在多种水平尺度系统相互作用条件下产生的, 如导致暴雨产生的各类天气尺度系统中, 大尺度系统为暴雨提供了有利的环境条件, 而中、小尺度系统是造成暴雨的直接系统(陆汉城等, 2004)。当前, 数值预报模式是成功预报暴雨系统的重要技术支撑。提高数值预报模式对暴雨等强对流系统的预报能力可从两方面着手, 一方面是提高模式分辨率, 开发适合高分辨率模式的物理过程参数化方案和动力框架, 增强模式预报精度; 另一方面是改善模式初始条件, 提高模式对中小尺度系统的刻画能力(Vendrasco, et al, 2015)。资料同化利用各种观测资料能为模式提供一个尽可能准确的初值, 是提高数值模式预报技巧的一种有效手段。因此, 随着数值模式的不断发展完善, 资料同化为数值模式提供一个更加精准的初值场十分重要(陈东升等, 2004)。

地面观测要素均为模式变量, 且相对探空等非非常规观测具有高时、空分辨率, 可满足数值预报的快速同化发展需求, 因此地面观测是快速循环同化系统的重要资料来源, 在数值模式中所起的作用也愈加显著。目前中国的 2800 多个国家级地面自动气象站均为全要素观测站, 其资料经过严格质量控制可进入数值模式。由于现有数值预报模式还不能准确地描述大气地表层的过程, 且对起伏地形在模式中的表述(模式采用平均地形)与实际地形并不匹配, 模式地形高度与观测站高度存在明显的差异, 该差异是地面资料同化技术难点之一。中国地形状况复杂, 在地面资料同化中不解决这个问题, 资料同化有可能带来负效果(徐枝芳等, 2007a,

2007b, 2009)。近年来, 一些研究者在寻找解决这两种地形高度差异在地面资料同化中产生负影响的方案, 如 Lazarus 等(2002)在 ADAS 系统(the ARPS(Advanced Regional Prediction System) Data Analysis System)客观分析复杂地形下地面观测和探空观测资料时, 考虑了高度差异, 并在进行分析时所取的客观分析权重系数中不仅包含了水平距离权重系数, 还增加了模式分析层高度与观测站地形高度差权重系数以及模式地形与实际观测地形高度差权重系数, 有效地降低了高度差异在资料客观分析过程可能带来的负影响; Devenyi(2003)和 Benjamin 等(2004)采取气象要素局地递减率的方法, 将地面观测要素值由实际地形高度订正到模式地形高度上, 解决地面资料同化中地形差异问题; 徐枝芳等(2007a, 2007b, 2009)在 Guo 等(2002)方法的基础上, 将地形高度的代表性误差加入到观测误差中, 解决郭永润方法中地形差异问题。张鑫宇等(2021)针对模式与观测地形高度差异问题, 对 WRF_DA 中的地面资料同化订正方案进行优化, 提高地面观测气温及风速订正值合理性, 从而改进预报。2 m 气温资料相对而言具有较好的连续性, 而 2 m 相对湿度资料变化不连续性增加了同化难度, 针对 2 m 相对湿度同化单独开展的研究工作非常少。

近年来, 中国数值预报自主创新发展取得了显著进展, 建立了以中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)(原 GRAPES 全球同化预报系统, GRAPES_GFS)和中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)(原 GRAPES 区域中尺度数值预报系统, GRAPES_MESO)为核心的数值预报业务体系(沈学顺等, 2020)。CMA-MESO 自 2006 年业务化以来, 不断升级改进(徐枝芳等, 2013; 黄丽萍等, 2017; 许晨璐等, 2017), 逐渐取代引进的数值模式系统(李泽椿等, 2014; 沈学顺等, 2020), 在日常天气预报中发挥着越来越重要的作用。到 2020 年,

中国区域范围 CMA-MESO 水平分辨率为 3 km, 垂直 51 层, 具备了同化雷达、卫星等多种非常规观测资料的能力, 而地面资料中仅地面气压(连治华等, 2010)、部分 2 m 相对湿度(观测站地形高于模式地形部分)参与变分同化, 地面降水则是用 nudging 方法进行同化(吴亚丽等, 2015)。通过对中国东部区域范围 CMA-MESO 三维变分同化系统 2 m 相对湿度同化试验分析发现, 超过一半 2 m 相对湿度资料因为观测站高度低于模式面而不能使用。由于湿度资料是不连续变化, 因此如何把观测站高度低于模式面的 2 m 相对湿度资料同化入模式是一大难点。

对边界层内的气象要素研究(盛裴轩等, 2003)发现, 在对流边界层的主体部分各种气象要素的梯度都很小, 混合层中温度、湿度和风随高度接近均匀分布。模式系统中相对湿度与高度和稳定度是否存在相关? 文中采用 T639 分析场(T639L60 全球中期数值预报系统, 0.28125°×0.28125°)对 2015 年夏季(6—8 月)华北、长江中下游和华南地区模式最低层和 2 m 相对湿度差与理查森数(判定大气稳定度)的关系进行统计分析发现, 模式最低层和 2 m 相对湿度的差与理查森数有很好的相关, 因此, 在该统计结果基础上建立 CMA-MESO 3DVar 系统 2 m 相对湿度资料同化方案, 并采用该系统进行 1 个月(2018 年 7 月)连续集成试验分析, 评估同化方案的效果。

2 理查森数与近地层相对湿度差关系分析

在白天小风少云的天气下, 太阳对下垫面的加热将导致感热通量向上的输送, 逐渐形成不稳定层结的边界层, 在不稳定层结中大气湍流较强。因此, 在对流边界层主体各气象要素的梯度很小, 在中等以上不稳定时大气湿度随高度变化较小(盛裴轩等, 2003)。文中利用理查森数作为判定大气稳定度的变量, 理查森数(Ri)为(程麟生, 1994)

$$Ri = \frac{g\Delta z}{\theta_m} \cdot \frac{\theta_m - \theta_{vo}}{U_m^2 + V_m^2}$$

式中, g 为重力加速度, Δz 为模式最低层到地面的高度差, θ_{vm} 为模式最低层的虚位温, θ_m 为模式最低层位温, θ_{vo} 为地面的虚位温, U_m 、 V_m 为模式最低层的风场分量。当 $Ri < 0$ 时, 为不稳定层结; 当 $Ri = 0$ 时, 为中性层结; 当 $Ri > 0$ 时, 为稳定层结。

文中采用 T639(T639L60 全球中期数值预报系统, 0.28125°×0.28125°)分析场中等压面分析最低层(1000 hPa)和 2 m 相对湿度数据。考虑到中国地面观测主要分布在中东部地区, 因此统计分析 2015 年夏季(6、7 和 8 月)华北地区(35°—45°N, 110°—120°E)、长江中下游(28°—35°N, 110°—120°E)和华南地区(22°—28°N, 110°—120°E)模式最低层相对湿度和 2 m 相对湿度差与理查森数的关系。表 1 为不同时间不同地区大气不稳定度情况的占比, 分为 2 m 相对湿度不低于 90% 和低于 90% 两种情况。4 个时次(02、08、14、20 时, 北京时)分析发现, 白天大气更不稳定, 08 和 14 时占比较大, 20 和 02 时占比较小。

从表 1 可见, 白天大气不稳定, 08 和 14 时 2 m 相对湿度低于 90% 占比超过 70%, 晚上大气相对稳定, 不稳定情况占比明显较低, 华北和长江中下游地区占比低于 10%。2 m 相对湿度低于 90% 时的大气不稳定占比比不低于 90% 时高。大气不稳定情况下模式最低层相对湿度和 2 m 相对湿度的关系如何? 下面以华南地区为例(其他地区结果大体一致)进行分析。

图 1a、c 为华南地区 08、14 时 2 m 相对湿度低于 90% 时模式最低层相对湿度和 2 m 相对湿度差与理查森数的散点, 此时大气不稳定占比为 73.03%(表 1)。08 和 14 时 2 m 相对湿度大于等于 90% 时(图 1b、d), 大气不稳定点数明显比低于 90% 时少(占比 38.7%, 表 1), 而 20 和 02 时大气稳定情况占比较大(图 1e、f)。当理查森数小于 0 时, 相对湿度

表 1 不同时间大气不稳定度所占比例
Table 1 Proportions of atmospheric instability at different times

时次(北京时)	2 m RH值	华北地区	长江中下游	华南地区
08、14时	<90%	75.03%	78.35%	73.03%
	≥90%	30.96%	32.67%	38.70%
20、02时	<90%	3.80%	1.88%	22.91%
	≥90%	2.25%	2.68%	9.67%

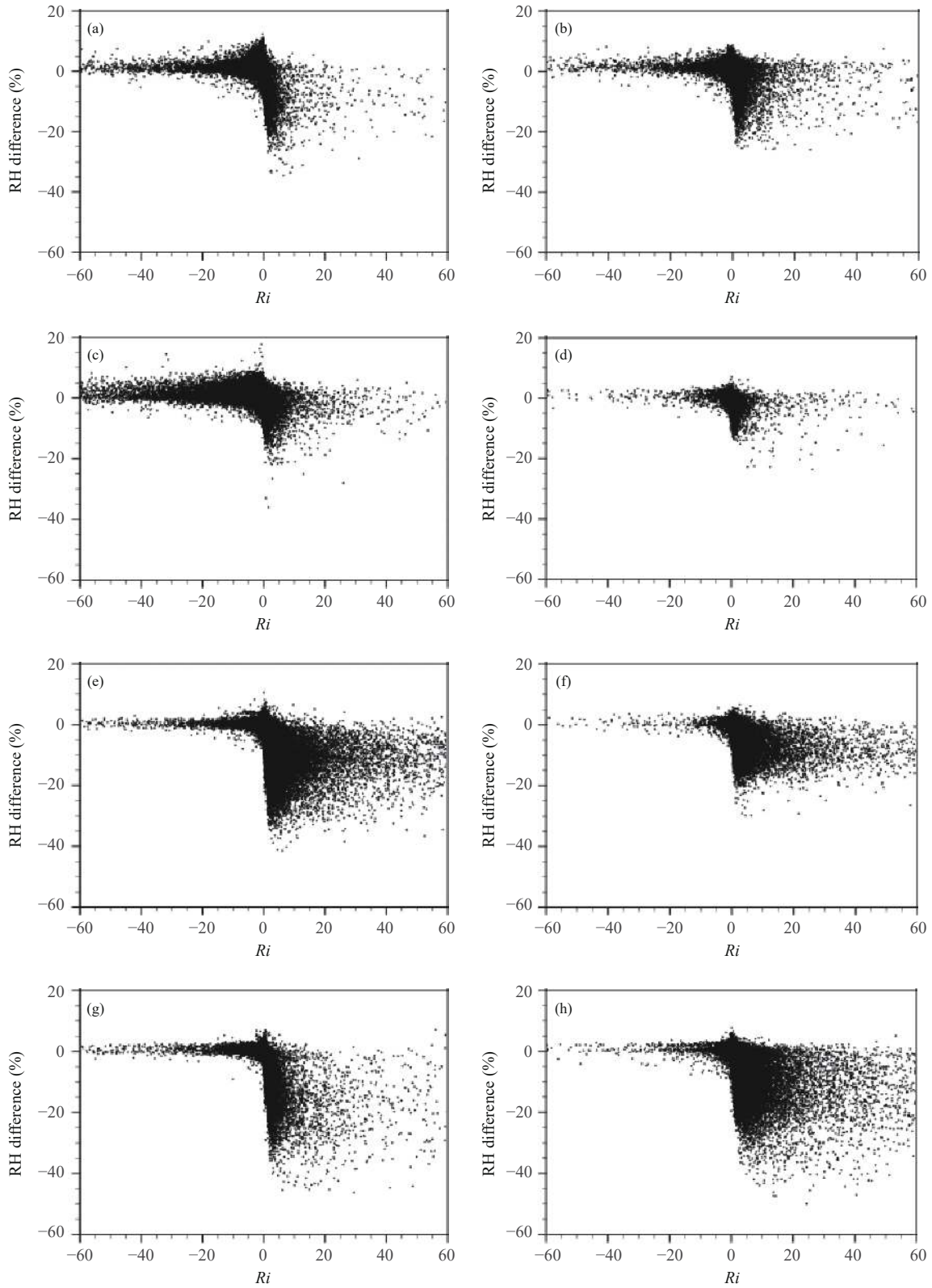


图 1 华南地区模式最低层相对湿度和 2 m 相对湿度差与理查森数散点

(a, b. 08 时, c, d. 14 时, e, f. 20 时, g, h. 02 时; a, c, e, g. RH < 90%, b, d, f, h. RH ≥ 90%)

Fig. 1 Differences between relative humidity at the lowest model level and at 2 m height as a function of the Richardson number (a, b. 08: 00 BT; c, d. 14: 00 BT; e, f. 20: 00 BT; g, h. 02: 00 BT; a, c, e, g. RH < 90%; b, d, f, h. RH ≥ 90%)

差集中在 $\pm 20\%$, 模式最低层相对湿度和 2 m 相对湿度比较接近, 这和对流边界层主体各气象要素的梯度变化很小, 在中等以上不稳定时大气湿度随高度变化较小(盛裴轩等, 2003)结论大体一致; 理查森数大于 0 时, 模式最低层相对湿度和 2 m 相对湿度差异则相对比较大。

下文依据理查森数小于 0 时模式最低层相对湿度与 2 m 相对湿度差为 $\pm 20\%$ (同化系统给的低层观测误差)这一关系, 尝试将观测站高度低于模式地形高度的 2 m 相对湿度观测资料由观测站高度直接插值到模式最低层高度, 以解决 2 m 相对湿度资料由于模式地形与观测站地形高度差异而导致不能使用问题。

3 CMA-MESO 三维变分同化系统 2 m 相对湿度同化方案设计

文中设计 2 组试验方案: (1) CTL 试验: 采用系统中原有 2 m 相对湿度同化方案。当观测站地形高度大于模式地形高度, 将地面观测资料作为高空资料进入同化系统; 观测站地形高度低于模式地形高度时将该观测站资料进行剔除, 不进入同化系统。(2) RH 试验: 当观测站地形高度大于模式地形高度, 将地面观测资料作为高空资料进入同化系统; 当观测站地形高度低于模式地形高度时, 依据前文公式计算得到背景低层理查森数, 将理查森数小于 0 的地面观测资料高度由观测站高度处理到模式最低层, 然后按照探空湿度同化方式进行同化, 理查森数大于 0 的地面观测资料则和 CTL 试验一样做不使用处理。CTL 试验和 RH 试验区别在于观测站地形高度低于模式地形高度且背景低层理查森数小于 0 的地面观测站资料同化。文中试验采用的是 CMA-MESO 4.4 版, 模式系统水平分辨率为 3 km, 垂直不等间距 51 层, 由于计算资源问题, 试验范围为中国中东部(17° — 50° N, 102° — 135° E)。采用的三维同化系统控制变量为 U 、 V 风场, 地面气压(p_s), 气温(T)和假相对湿度(RH^*)。同化分析资料为探空报(U , V , T , RH (相对湿度)), 地面报(p_s , RH), 船舶报(p_s , RH), 飞机报(U , V , T), 云导风, 地基掩星反演可降水量(GPS/PW), 雷达速度方位显示反演风廓线(VAD 风), 雷达径向风, 风廓线雷达风, 基于云分析系统(朱立娟等, 2017)的雷达

和卫星资料, 地面自动气象站降水 nudging 同化。试验为每 3 h 同化分析 24 h 预报, 00 和 12 时(世界时)包含一次冷启动分析预报和一次暖启动分析预报。采用美国国家环境预报中心(NCEP) $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ FNL 6 h 预报场做背景场资料, 同化分析预报时段为 2018 年 7 月 1—31 日, 地面观测资料为国家气象信息中心收集的国家级地面观测站逐 3 h 气象数据。

4 试验结果分析

4.1 个例试验结果分析

为了分析 2 m 相对湿度资料同化方案改进前后的差异, 选取 2018 年 7 月 14 日的降水进行个例分析。7 月 14 日 00 时—15 日 00 时, 华北南部、辽宁中东部、吉林中东部、四川盆地西部和北部、华南南部沿海以及海南岛等地的部分地区降大雨到暴雨、局地大暴雨。试验区域地面观测站共计 1630 个, CTL 试验 2 m 相对湿度资料的利用率为 43.2%, RH 试验资料利用率为 88.6%, 约为 CTL 试验的 2 倍。从图 2 可见, RH 试验增加的观测资料主要分布在中国地形相对复杂区域, 且增加的观测站资料同化后的新息向量(背景减观测)与周围 CTL 试验原有同化观测的新息向量接近, 新息向量的正负基本保持一致。

结合图 2、3 可知, 2 m 相对湿度同化对模式最低层的相对湿度分析影响很明显, 2 m 相对湿度大的区域, 相对湿度分析增量为正值, 2 m 相对湿度小的区域, 相对湿度分析增量为负值。低层相对湿度分析增量变化基本在 $\pm 10\%$ 内, 比 2 m 相对湿度新息向量的差值略小。RH 试验增加了很多资料, 但低层相对湿度分析增量变化不是很大, 这可能与图 2 中新增观测资料的新息向量与 CTL 试验周围新息向量的正负基本保持一致、差异不是很大有关。

从前 12 h 降水预报情况(图 4)来看, 2 组试验预报的 6 h 降水变化很小。对增加观测资料较多的区域分析发现, RH 试验预报的 6 h 降水与实况更加接近, 虚假降水强度明显减小(图 4a、d 紫色圈内), 这和相对湿度分析增量减小表现一致, 第 2 节分析表明, 理查森数小于 0 时, 2 m 相对湿度小于 90% 占比更大, 模式最低层相对湿度和 2 m 相对湿度比较接近, 因而新增资料主要是相对湿度小于 90% 这部分。相对而言, 模式低层相对湿度相对高些(图 2

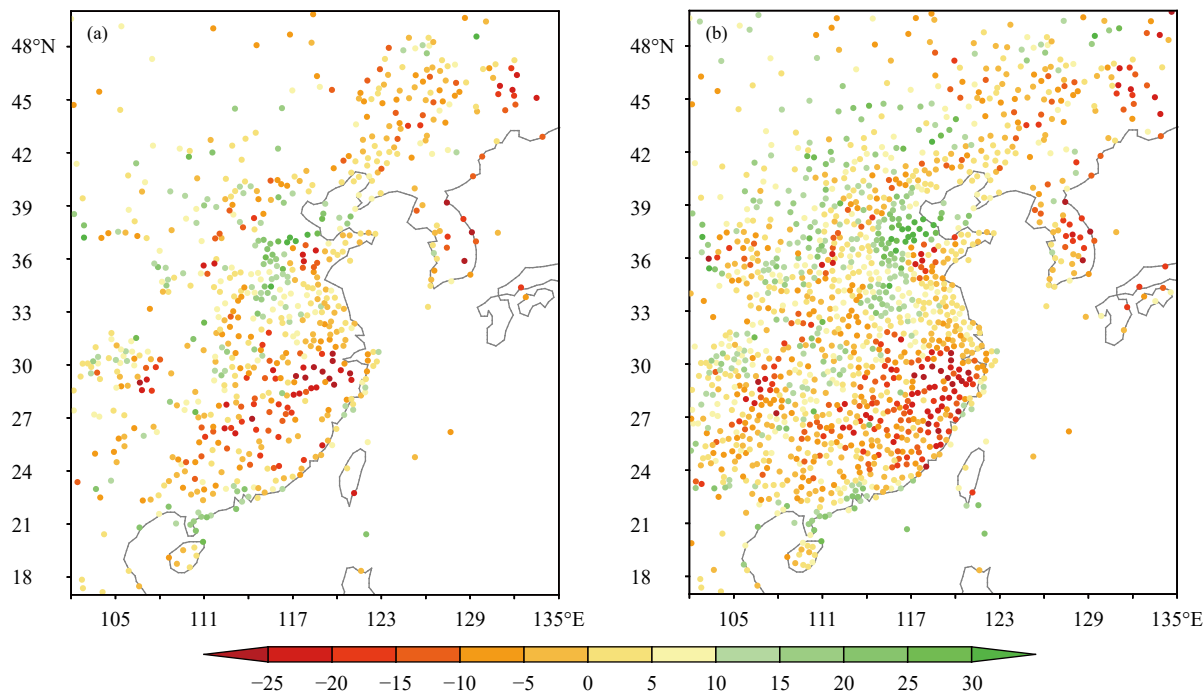


图2 2018年7月14日同化2 m 相对湿度的新息向量分布 (a. CTL 试验, b. RH 试验; 单位: %)

Fig. 2 Distributions of 2 m relative humidity innovation (background minus observation) for 14 July 2018 (a. CTL experiment, b. RH experiment; unit: %)

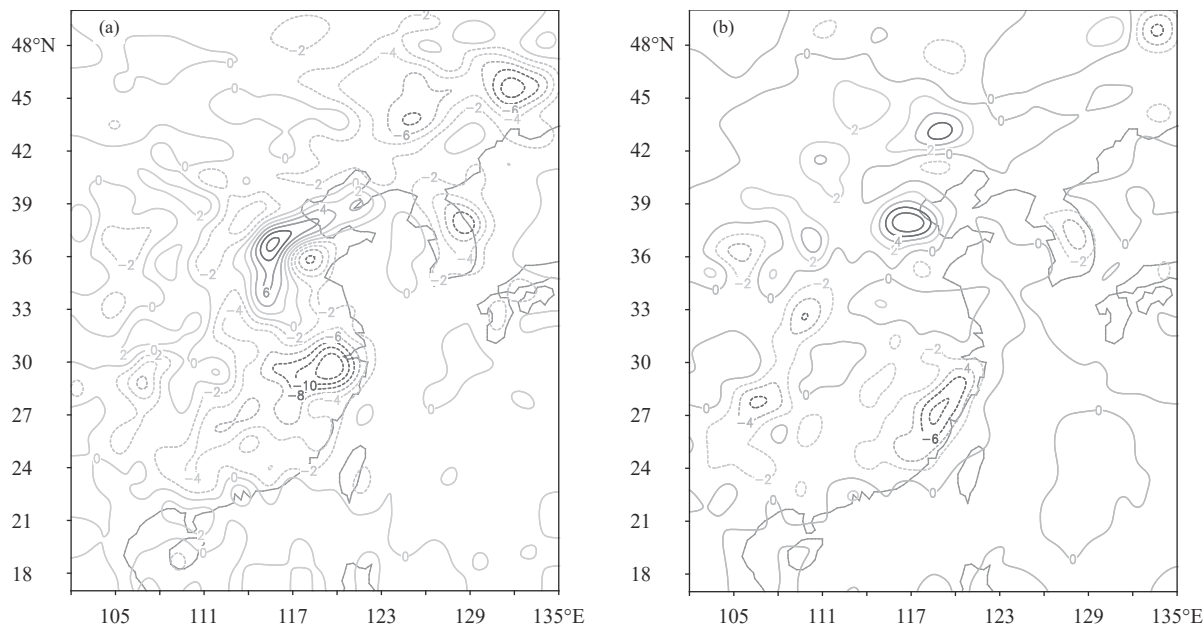


图3 模式最低层相对湿度分析增量 (a. CTL 试验, b. RH 试验与 CTL 试验差; 单位: %)

Fig. 3 Relative humidity analysis increments at the lowest model level

(a. CTL experiment, b. difference between RH experiment and CTL experiment; unit: %)

中新息向量大于0的观测站), 因此新增同化的2 m 相对湿度资料降低了图4a、d中紫色圈附近模式低层相对湿度分析, 使得虚假降水减少或消失。

降水常采用TS(Threat Score)、ETS(Equitable Threat Score)和Bias(Bias score)分析(韦青等, 2020)。ETS评分是由TS评分改进而来, ETS和

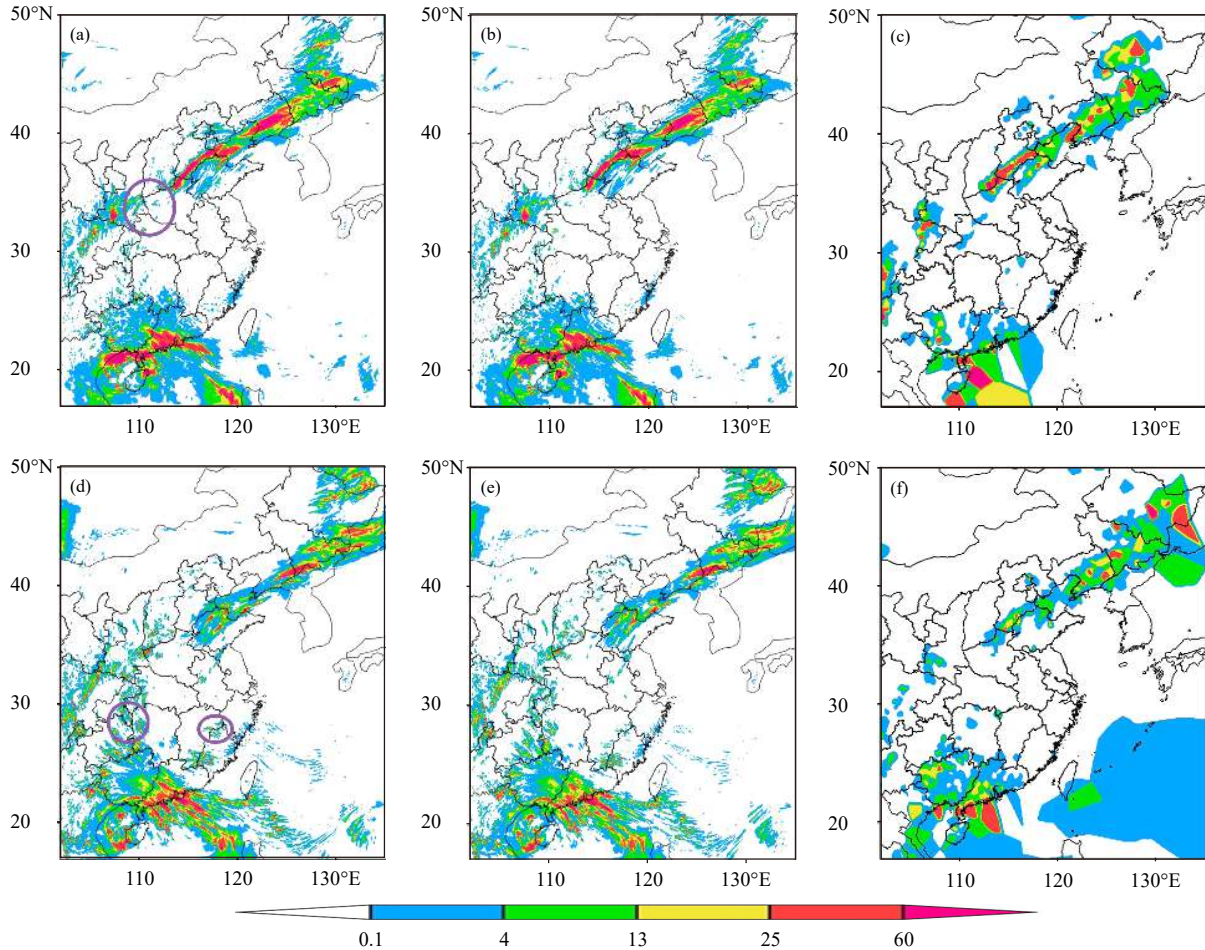


图4 2018年7月14日6 h 累计降水(单位: mm)分布(00—06时: a. CTL, b. RH, c. 实况; 06—12时: d. CTL, e. RH, f. 实况)

Fig. 4 6 h accumulated rainfall (unit: mm) from 00: 00 to 06: 00 UTC 14 July, 2018 (a. CTL, b. RH, c. observation) and from 06: 00 to 12: 00 UTC 14 July 2018 (d. CTL, e. RH, f. observation)

TS 值越大, Bias 值越接近 1, 表示对降水的预报越准确。根据 24 h 降水量划分为小雨[0.1 mm, 10 mm)、中雨[10 mm, 25 mm)、大雨[25 mm, 50 mm)、暴雨[50 mm, 100 mm)和大暴雨[100 mm, ∞)5 个量级, 6 h 降水量划分为小雨[0.1 mm, 4 mm)、中雨[4 mm, 13 mm)、大雨[13 mm, 25 mm)、暴雨[25 mm, 60 mm)和大暴雨[60 mm, ∞)5 个量级。

从 24 h 降水检验结果(图 5)来看, RH 试验降水预报明显改善, 除大雨外其他量级降水 TS 评分都比 CTL 试验高, 所有量级降水预报的 Bias 结果都优于 CTL 试验。

4.2 连续试验结果分析

在个例分析基础上, 开展连续试验进行效果评估。由于多次循环同化会导致 00 和 12 时暖启动同化分析的背景场不一致, 因此同化分析资料数量变

化和分析场差异结果取自冷启动分析试验。从 2018 年 7 月 1—31 日 00 和 12 时 2 m 相对湿度资料参与同化分析资料数量(图 6)可见, RH 试验在不同高度上(依据观测站气压进行分类统计, 大体代表不同地形高度)均有所增多, 且低层高于高层, 00 时高于 12 时, 这与第 2 节采用 T639 分析场分析理查森数小于 0 时, 08 时(北京时)资料占比高于 20 时(北京时)结果是一致的。

从 2 m 相对湿度新息向量以及分析残差(分析减观测)的垂直剖面偏差和均方根误差(RMSE)(图 7)可见, 2 m 相对湿度新息向量在高层偏差为负, 低层偏差为正, 分析残差表现大体与新息向量一致, 但偏差绝对值明显变小, 且均方根误差也减小。RH 试验新息向量和分析残差偏差及均方根误差明显改善, 正、负偏差的大值区绝对值减小, 同时

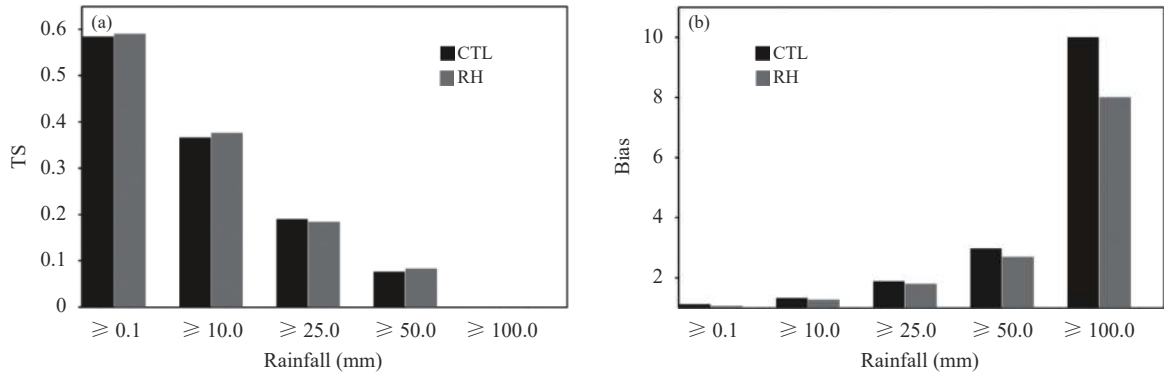


图5 2018年7月14日00时预报24h累计降水检验结果 (a. TS, b. Bias)

Fig. 5 TS and Bias values of 24 h accumulated rainfall simulated in the experimental region at 00:00 UTC 14 July 2018 (a. TS, b. Bias)

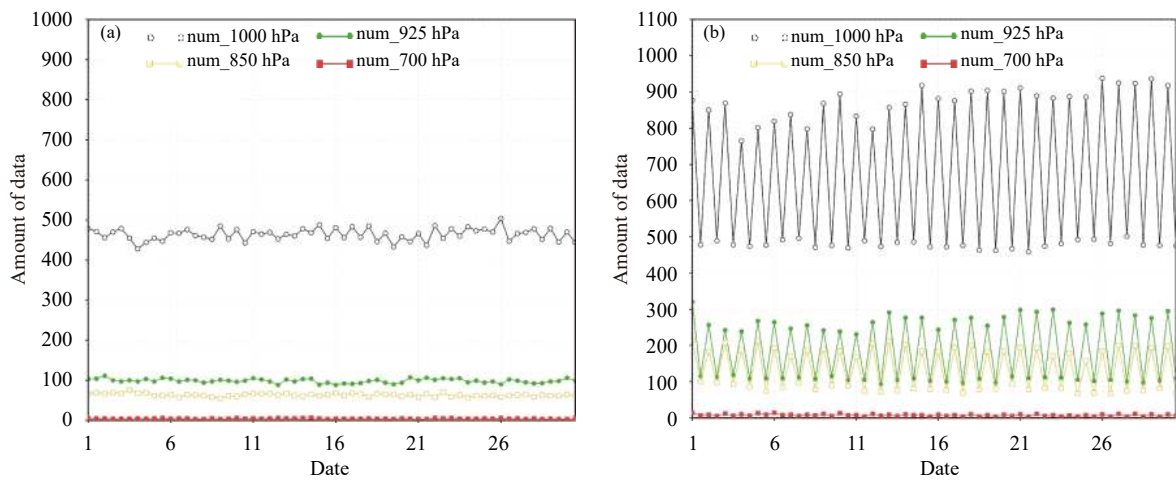


图6 2018年7月1—31日三维变分同化系统中不同高度同化分析2m相对湿度资料数量随时间变化

(a. CTL 试验, b. RH 试验)

Fig. 6 Time-dependent amount of 2 m relative humidity data used in 3Dvar system at different heights 1 to 31 July 2018 (a. CTL experiment, b. RH experiment)

均方根误差大值区减小。

由以上分析可知, RH 试验通过增加 2 m 相对湿度同化资料数量, 分析残差的偏差和均方根误差大值区的值明显减小, 有效改进了数值模式初始分析场。图 8 和 9 是冷启动和暖启动两种情况下中国中东部区域 24 h 降水检验结果。与 CTL 试验相比, RH 试验 00 时冷启动除大雨外, 其他量级降水 ETS 评分略有提高, 偏差减小并接近 1。00 时暖启动除小雨 ETS 评分略有下降外, 中雨、大雨、暴雨 ETS 评分均有所增大, 偏差在小雨和中雨相当, 大雨以上量级则减小。由此可见, 改进的 2 m 相对湿度资料同化方案能提高降水预报技巧。

从 00 时冷、暖启动 6 h 降水检验 ETS 评分

(图 10、11) 来看, 冷启动时 RH 试验对前 6 h 降水预报影响较大, 各量级降水 ETS 评分均有明显提升, 随着预报时效延长, 对降水的影响逐渐减弱, 小雨和中雨基本处于弱的正影响, 大雨(13 mm)以上量级的 ETS 则有些下降, 与前面分析的个例结果一致, 即 RH 试验增加的资料主要是相对湿度低于 90% 部分, 对大雨量级以上的降水正影响小。RH 试验每 3 h 同化都有新的 2 m 相对湿度资料增加, 不断改进模式的分析和预报效果(冷启动结果显示前 6 h 基本为正贡献), 因而 RH 试验暖启动试验逐 6 h 降水 ETS 评分检验基本表现为弱的正贡献(大部分量级降水 ETS 评分在各时段都有所提高)。6 h 降水检验偏差(图略)表现与 24 h 降水检验表现相

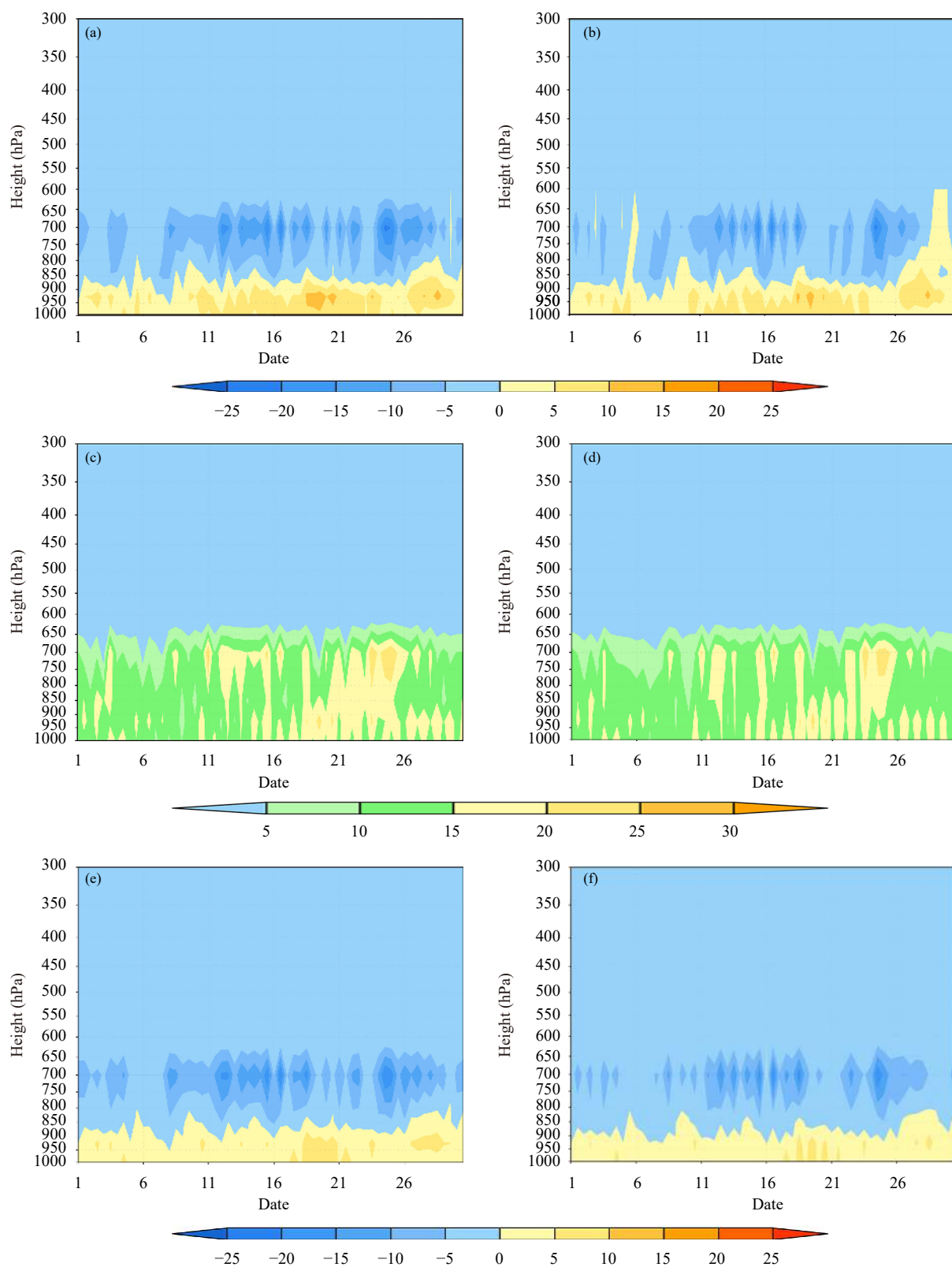
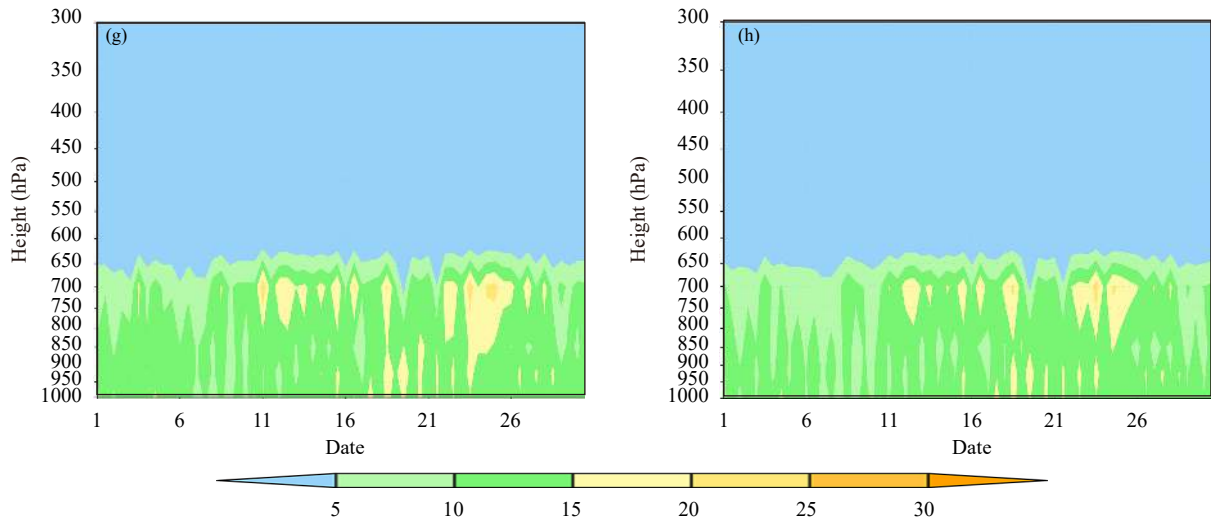


图 7 2 m 相对湿度新息向量(a—d) 和分析残差(e—h) 垂直剖面的偏差(a、b、e、f) 和均方根误差(c、d、g、h) (a、c、e、g. CTL; b、d、f、h. RH; 单位: %)

Fig. 7 Vertical cross sections of Bias (a, b, e, f) and RMSE (c, d, g, h) of 2 m relative humidity innovation(a—d) and residual analysis(e—h) (a, c, e, g. CTL; b, d, f, h. RH; unit: %)



续图 7

Fig. 7 Continued

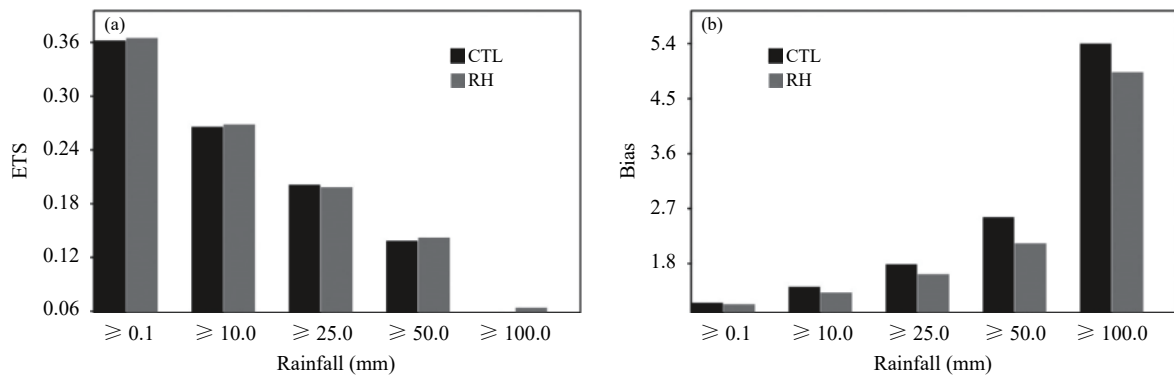


图 8 2018 年 7 月 1—31 日 00 时 (世界时) 冷启动 24 h 累计降水检验结果
(a. ETS, b. Bias)

Fig. 8 ETS (a) and Bias (b) values of 24 h accumulated rainfall simulated in the experimental region for the period from 00:00 UTC 1 to 00:00 UTC 31 July 2018 with cold start

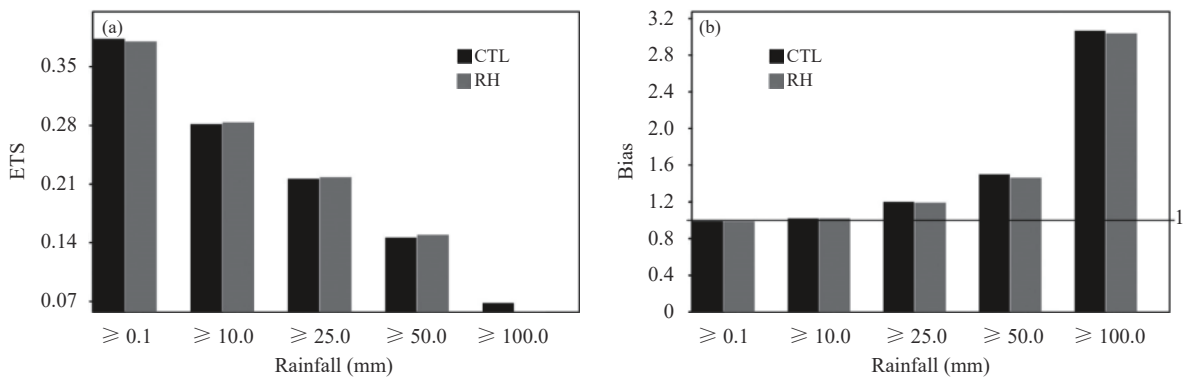


图 9 同图 8, 但为 2018 年 7 月 2—31 日 00 时 (世界时) 暖启动结果

Fig. 9 Same as Fig. 8 but for the period from 00:00 UTC 2 to 00:00 UTC 31 July 2018 with warm start

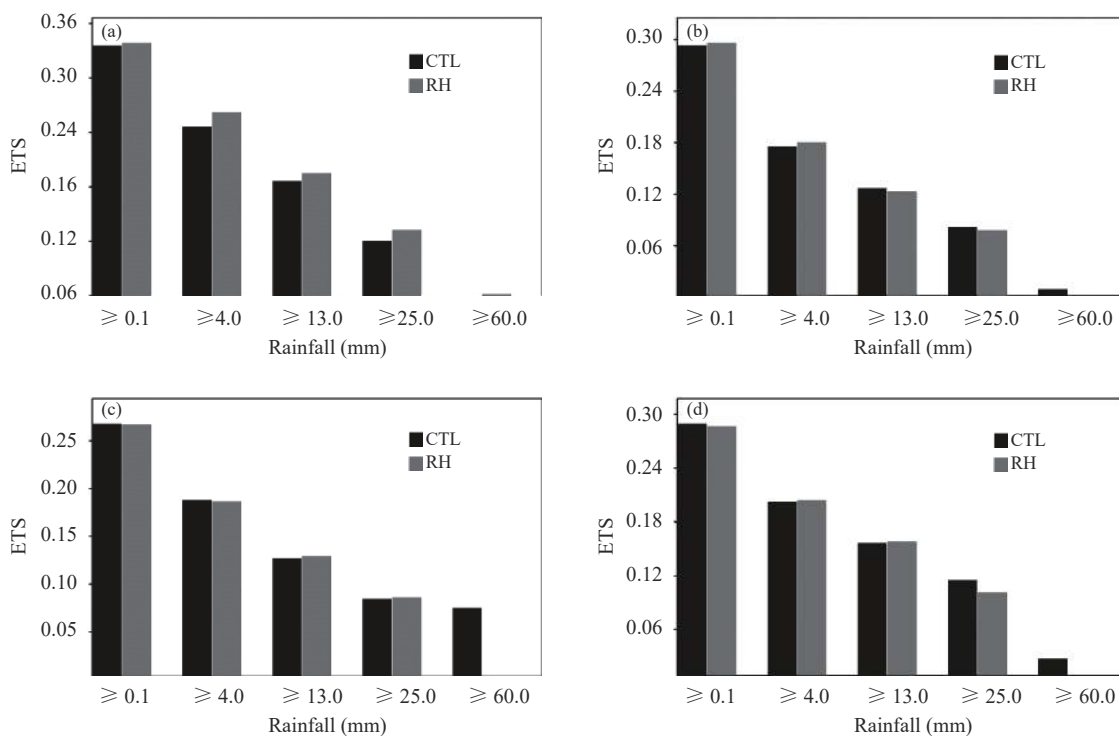


图 10 2018 年 7 月 1—31 日 00 时 (世界时) 冷启动逐 6 h 累计降水 ETS 评分检验结果
(a. 00—06 时, b. 06—12 时, c. 12—18 时, d. 18—00 时)

Fig. 10 ETS values of 6 h accumulated rainfall simulated in the experimental region for the period from 00:00 UTC 1 to 00:00 UTC 31 July 2018 with cold start
(a. 00:00—06:00, b. 06:00—12:00, c. 12:00—18:00, d. 18:00—00:00)

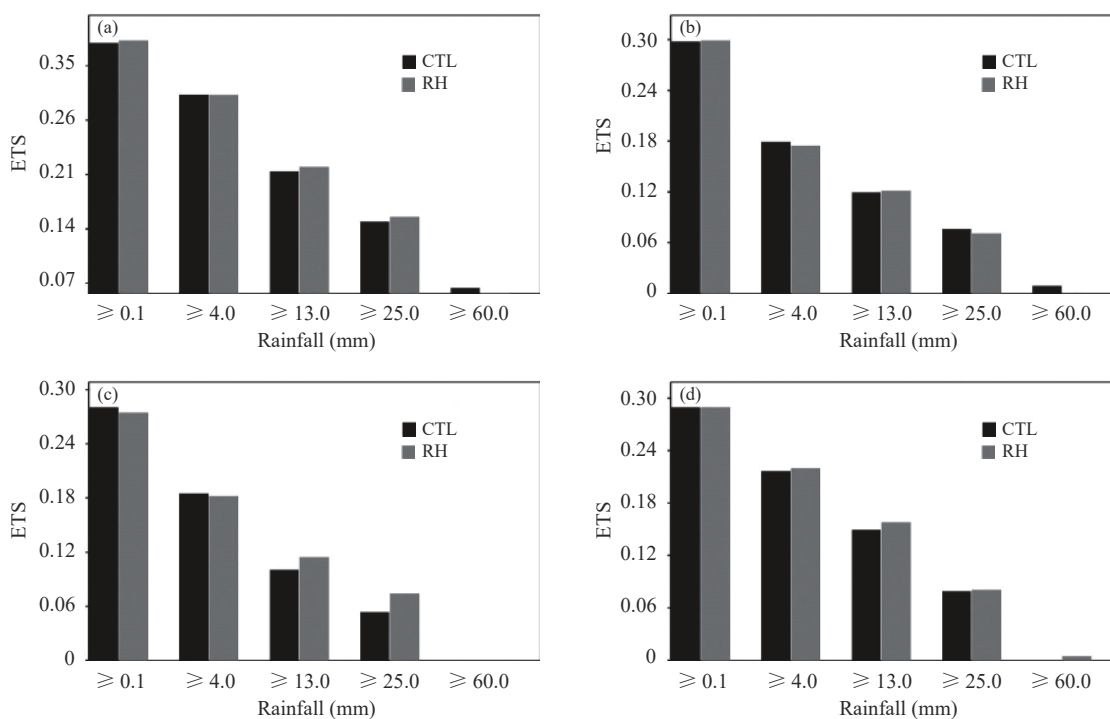


图 11 同图 10, 但为 2018 年 7 月 2—31 日 00 时 (世界时) 暖启动结果

Fig. 11 Same as Fig. 10 but for the period from 00:00 UTC 2 to 00:00 UTC 31 July 2018 with warm start

似,冷启动时2组试验偏差差异明显,RH试验偏差更接近1,而暖启动时2组试验无明显差异。

5 结论与讨论

中国地面观测资料的站点分布密集、观测频率高、资料实时性强,能很好地反映边界层内大气的动力和热力变化,是高分辨率模式同化分析的重要资料之一,但由于模式地形与观测站地形高度差异的影响,地面观测资料在数值模式中的应用还不够充分。文中分析了2015年6—8月T639(0.28125°×0.28125°)分析场中低层相对湿度和2 m相对湿度差与理查森数的关系,依据分析结果在CMA-MESO三维变分同化系统中建立解决模式与观测站地形高度差异影响的2 m相对湿度同化方案,并进行1个月(2018年7月)连续数值试验评估新2 m相对湿度同化方案效果。得到以下主要结论:

(1)当理查森数小于0时,相对湿度随高度变化较小,模式低层相对湿度与2 m相对湿度的差在模式低层相对湿度同化观测误差(±20%)范围内。08和14时(北京时)理查森数小于0的占比高于20和02时(北京时)。2 m相对湿度小于90%时的大气不稳定占比比大于等于90%时高。

(2)个例和批量试验同化分析结果表明,新2 m相对湿度同化方案应用后同化分析2 m相对湿度资料数量明显增多,低层多于高层,08时高于20时(北京时),新息向量和残差偏差绝对值和均方根误差均减小。

(3)个例和批量试验降水结果分析显示,新2 m相对湿度同化方案方法对降水预报技巧有改善,ETS(TS)评分提高,Bias值减小,冷启动预报对前6 h预报降水改善更为明显,暖启动预报由于不断增加观测资料,新的2 m相对湿度同化对24 h时段内每6 h降水预报都有改善,影响时效明显长于冷启动预报。

致谢:感谢国家气象中心王瑞春博士、陈炯博士在同化方案实现过程中给予的帮助。

参考文献

陈东升,沈桐立,马革兰等.2004.气象资料同化的研究进展.南京气象学院学报,27(4):550-564. Chen D S, Shen T L, Ma G L, et al. 2004. Advances in the meteorological data assimilation. J Nanjing Inst Meteor, 27(4): 550-564 (in Chinese)

程麟生.1994.中尺度大气数值模式和模拟.北京:气象出版社,230-308.
Cheng L S. 1994. Mesoscale Atmospheric Numerical Model and Simulation. Beijing: Meteorological Press, 230-308 (in Chinese)

黄丽萍,陈德辉,邓莲堂等.2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验.应用气象学报,28(1):25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al. 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification. J Appl Meteor Sci, 28(1): 25-37 (in Chinese)

李泽椿,毕宝贵,金荣花等.2014.近10年中国现代天气预报的发展与应用.气象学报,72(6):1069-1078. Li Z C, Bi B G, Jin R H, et al. 2014. The development and application of the modern weather forecast in China for the recent 10 years. Acta Meteor Sinica, 72(6): 1069-1078 (in Chinese)

连洁华,薛纪善.2010.一种新的地面气压插值方案在计算低于模式地形的观测相当量中的研究.热带气象学报,26(4):489-493. Lian Z H, Xue J S. 2010. A new surface pressure interpolation scheme for calculation of observations-equivalent quantities lower than model terrain. J Trop Meteor, 26(4): 489-493 (in Chinese)

陆汉城,杨国祥.2004.中尺度天气原理和预报.2版.北京:气象出版社,278-287. Lu H C, Yang G X. 2004. Principles and Forecasts of Mesoscale Meteorology. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 278-287 (in Chinese)

沈学顺,王建捷,李泽椿等.2020.中国数值天气预报的自主创新发展.气象学报,78(3):451-476. Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al. 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction. Acta Meteor Sinica, 78(3): 451-476 (in Chinese)

盛裴轩,毛节秦,李建国等.2003.大气物理学.北京:北京大学出版社,220-285. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. 2003. Atmospheric Physics. Beijing: Peking University Press, 220-285 (in Chinese)

韦青,代刊,林建等.2020.2016—2018年全国智能网格降水及温度预报检验评估.气象,46(10):1272-1285. Wei Q, Dai K, Lin J, et al. 2020. Evaluation on the 2016—2018 fine gridded precipitation and temperature forecasting. Meteor Mon, 46(10): 1272-1285 (in Chinese)

吴亚丽,陈德辉.2015.潜热加热纳近方法在地面降水资料同化中的应用.应用气象学报,26(1):32-44. Wu Y L, Chen D H. 2015. Application of latent heat nudging method to assimilating surface precipitation observations. J Appl Meteor Sci, 26(1): 32-44 (in Chinese)

许晨璐,王建捷,黄丽萍.2017.千米尺度分辨率下GRAPES-Meso4.0模式定量降水预报性能评估.气象学报,75(6):851-876. Xu C L, Wang J J, Huang L P. 2017. Evaluation on QPF of GRAPES-Meso4.0 model at convection-permitting resolution. Acta Meteor Sinica, 75(6): 851-876 (in Chinese)

徐枝芳,龚建东,王建捷等.2007a.复杂地形下地面观测资料同化I:模式地形与观测站地形高度差异对地面资料同化的影响研究.大气科学,31(2):222-232. Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al. 2007a. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain Part I: Influence of the elevation difference between model surface and observation site. Chinese J Atmos Sci, 31(2): 222-232 (in Chinese)

- 徐枝芳, 龚建东, 王建捷等. 2007b. 复杂地形下地面观测资料同化 II: 模式地形与观测站地形高度差异代表性误差. *大气科学*, 31(3): 449-458.
- Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al. 2007b. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain Part II: Representative error of the elevation difference between model surface and observation site. *Chinese J Atmos Sci*, 31(3): 449-458 (in Chinese)
- 徐枝芳, 龚建东, 李泽椿. 2009. 复杂地形下地面观测资料同化 III: 两种解决模式地形与观测站地形高度差异方法的对比分析. *大气科学*, 33(6): 1137-1147. Xu Z F, Gong J D, Li Z C. 2009. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain Part III: Comparison analysis of two methods on solving the problem of elevation difference between model surface and observation Sites. *Chinese J Atmos Sci*, 33(6): 1137-1147 (in Chinese)
- 徐枝芳, 郝民, 朱立娟等. 2013. GRAPES_RAFS 系统研发. *气象*, 39(4): 466-477. Xu Z F, Hao M, Zhu L J, et al. 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS. *Meteor Mon*, 39(4): 466-477 (in Chinese)
- 张鑫宇, 陈敏, 孙娟珍等. 2021. WRF-DA 中地面观测资料同化方案的改进与应用. *气象学报*, 79(1): 104-118. Zhang X Y, Chen M, Sun J Z, et al. 2021. Improvement and application of the ground observation data assimilation scheme in WRF-DA. *Acta Meteor Sinica*, 79(1): 104-118 (in Chinese)
- 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍等. 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用. *应用气象学报*, 28(1): 38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al. 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 38-51 (in Chinese)
- Benjamin S G, Devenyi D, Weygandt S S, et al. 2004. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. *Mon. Wea Rev*, 132: 495-518
- Devenyi D, Benjamin S G. 2003. A variational assimilation technique in a hybrid isentropic-sigma coordinate. *Meteor. Atmos Phys*, 82: 245-257
- Guo Y R, Shin D H, Lee J H, et al. 2002. Application of the MMS 3DVAR system for a heavy rain case over the Korean Peninsula//Proceedings of the 12th PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop. Boulder: UCAR
- Lazarus S M, Ciliberti C M, Horel J D, et al. 2002. Near-real-time applications of a mesoscale analysis system to complex terrain. *Wea Forecast*, 17(5): 971-1000
- Vendrasco E P, Sun J Z, Herdies D L, et al. 2015. Constraining a 3DVAR radar data assimilation system with large-scale analysis to improve short-range precipitation forecasts. *J Appl Meteor Climatol*, 55(3): 673-690