

边界层参数化方案对文昌近地层湿度模拟的影响

郝辛凯, 齐玉磊

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年11月28日; 录用日期: 2023年3月7日; 发布日期: 2023年3月14日

摘要

本文基于WRF中尺度预报模式, 采用10种边界层参数化方案(YSU、MYJ、QNSE、MYNN2、MYNN3、GBM、BouLac、UW、TEMF、Shin-Hong), 对2015年12个个例的近地层湿度开展了数值模拟。通过浅层风塔观测数据进行对比, 研究了不同边界层参数化方案对文昌近地层湿度模拟差异。结果表明: 随着近地层高度的增加, 三月到七月的观测相对湿度增加, 模拟相对湿度变化不大; 其余月份观测和模拟的相对湿度均会降低; 模拟和观测的均方根误差随高度增加而增加, 相关系数随高度增加则会减小。通过对均方根误差和相关系数的分析, MYJ方案模拟数据接近观测数据, 并且可以模拟出每个月份的日变化趋势, 是模拟结果最好的方案。TEMF方案的均方根误差最大且相关系数表现最差, 是模拟效果最差的方案。

关键词

WRF模式, 边界层参数化方案, 相对湿度, 相关系数, 数值模拟

Influence of Boundary Layer Parameterization Scheme on Near-Surface Humidity Simulation in Wenchang

Xinkai Hao, Yulei Qi

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 28th, 2022; accepted: Mar. 7th, 2023; published: Mar. 14th, 2023

Abstract

Based on the WRF mesoscale prediction model, 10 boundary layer parameterization schemes

(YSU, MYJ, QNSE, MYNN2, MYNN3, GBM, BouLac, UW, TEMF and Shin-Hong) are used to simulate the near surface humidity of 12 cases in 2015. By comparing the observation data of shallow wind tower, the simulation differences of near stratum humidity in Wenchang under different boundary layer parameterization schemes are studied. The results show that with the increase of near ground height, the observed relative humidity increases from March to July, and the simulated relative humidity changes little. The relative humidity observed and simulated in other months will decrease; the root mean square error of simulation and observation increases with the increase of height, and the correlation coefficient decreases with the increase of height. Through the analysis of root mean square error and correlation coefficient, the simulation data of MYJ scheme is close to the observation data, and the daily variation trend of each month can be simulated. It is the best scheme with simulation results. TEMF scheme has the largest root mean square error and the worst correlation coefficient, which is the scheme with the worst simulation effect.

Keywords

WRF Model, Boundary Layer Parameterization Scheme, Relative Humidity, Correlation Coefficient, Numerical Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气边界层通常指大气底部直接受地球表面影响的一层,其高度约为 1~1.5 km,是地球各个圈层相互作用的关键区域,大气边界层的大气运动有明显的湍流性质,所以热量动量和水汽的垂直输送会导致气象要素产生明显的日变化[1]。根据国外业务及研究表明影响中尺度预报的各个因子中湿物理过程是尤为重要的,可见湿度对边界层的影响是很重要的[2]。目前对于复杂下垫面,特殊地区和各种气象条件下的大气边界层特征研究已经是国际边界层气象学研究的重点,而针对大气边界层进行的研究主要采用实验观测和数值模拟的方法[3]。国外对边界层方案的研究多以气候要素模拟结果的差异性为主,国内关于边界层方案的研究主要针对天气状况方面[4]。

文昌市三面临海,海岸线长 210 千米,沿海多天然良港和沙滩。文昌市地处热带边缘,属热带季风气候,沿海地区风较大,夏秋季节影响海南岛的台风,有 75%是从文昌登陆,故有“台风走廊”之称。海南地区的地理位置十分适合火箭的发射,所以文昌航天发射场建立在了文昌。文昌航天发射场是中国首个开放性滨海航天发射基地,也是世界上为数不多的低纬度发射场之一。在近地层的各类气象要素对于天气和生活产生影响。

本文对文昌地区不同近地层高度的相对湿度采用不同的边界层方案进行模拟,选择 10 种不同的边界层方案(YSU、MYJ、QNSE、MYNN2、MYNN3、GBM、BouLac、UW、TEMF、Shin-Hong),通过评估从中优选出效果最佳的参数化方案[5]。

2. 资料与方法

2.1. 资料概况

本研究主要对文昌地区 2015 年近地层相对湿度的变化特征进行分析,所用的数据为文昌地区的 1 号浅层风自建塔的观测资料。观测资料包括日期,测量层次,平均风速风向,温度,相对湿度,十分钟平

均风速风向等多个参数。所研究区域的经度范围为: $109^{\circ}38' \sim 112^{\circ}56'$, 纬度范围为: $18^{\circ}21' \sim 21^{\circ}09'$ 。所选台站观测距地高度层次为: 10 m, 20 m, 50 m, 70 m, 90 m。

2.2. 研究方法

本次使用的数值模式是最新的 WRFV4.2.1 版本, 该模式满足从全球尺度到区域尺度预报的各种需求, 是目前国际主流的高分辨率中尺度模式之一[6]。如图 1 所示, 本次模式区域的设计共使用了三重嵌套, 由外层至内层的模式水平分辨率分别为 $27 \text{ km} \times 27 \text{ km}$, $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$, $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$, 网格点数分别为 300×200 , 103×103 和 115×109 , 其中最内层区域中心点位于海南文昌发射场区[7]。为了避免区域边界对区域内部模拟的不利影响, 模拟的核心区域均与边界处保持了较大的距离。为了能够包含更多的背景场信息, 模式的最外层区域包括了较大范围的海洋和陆地区域, 以便捕捉到更全面的背景场信息, 从而达到更好的预测效果。垂直方向上从 1000 hpa 至 10 hpa 共分 60 层, 在近地面大气的设置高分辨率的垂直分层, 在 100 m 以下高度设置了约 10 个模式面层, 以便更好的模拟边界层内的相对湿度变化过程。模式静态数据包括地形高度、土地利用类型等数据使用的是来自 MODIS 的资料。模式积分步长设为模式水平分辨率的 6 倍, 最外层模式的积分步长为 300 s, 最内层为 18 s, 模式每小时输出一次预测结果。

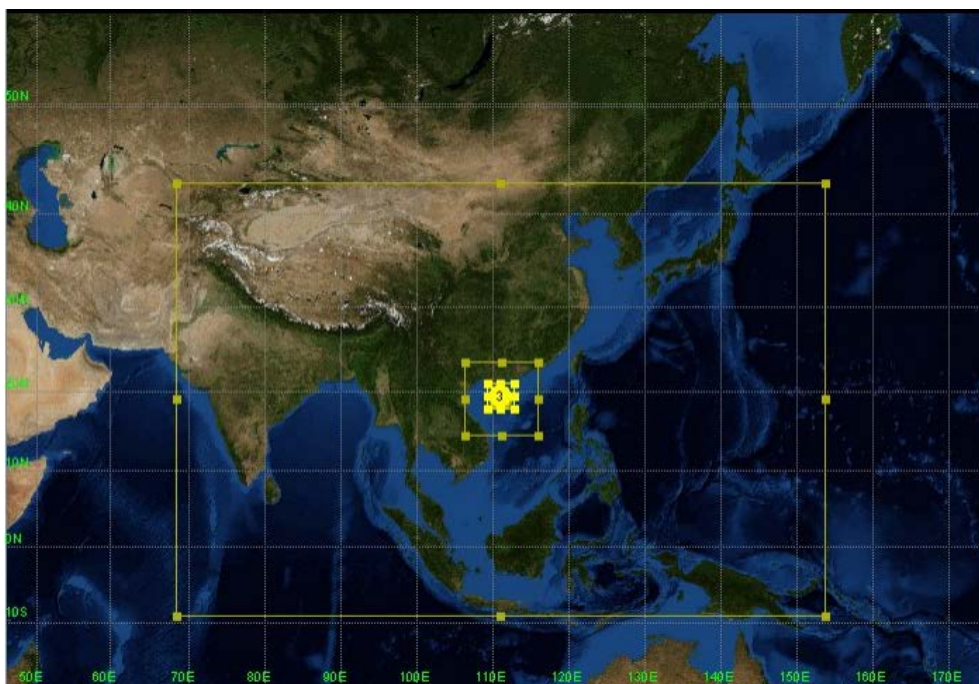


Figure 1. Triple nested simulation area of WRF mode

图 1. WRF 模式的三重嵌套模拟区域

本文主要对以下 10 种参数化方案(YSU、MYJ、QNSE、MYNN2、MYNN3、BouLac、UW、TEMF、Shin-Hong、GBM)的模拟结果进行对比分析。

为了选取最佳的适合本地区的风速数值模拟的边界层参数化方案, 共设计了 10 组敏感性试验。其他物理过程设置如表 1 所示。微物理过程使用 WSM6 方案(6), 长波辐射和短波辐射方案使用 RRTMG 方案(4), 陆面过程使用 Noah 陆面模式(2), 积云对流参数化使用 New Tiedtke 方案(16), 模式嵌套最内层关闭积云对流参数化[8] [9]。为考虑季节间的差异, 本次试验在 2015 年每个月均选取了一个个例进行模拟, 因此每组试验共 12 个例子。

Table 1. Basic setup of boundary layer parameterized sensitivity test
表 1. 边界层参数化敏感性试验基本设置

| 模拟域 | D01 | D02 | D03 |
|--------|---|-------------|-----------|
| 模拟时段 | 2015 年每月前 3 天 | | |
| 水平分辨率 | 27 km | 9 km | 3 km |
| 格点维数 | 300 × 200 | 103 × 103 | 115 × 109 |
| 垂直层数 | 61 | 61 | 61 |
| 微物理过程 | WSM6 | WSM6 | WSM6 |
| 短波辐射 | RRTMG | RRTMG | RRTMG |
| 长波辐射 | RRTMG | RRTMG | RRTMG |
| 积云参数化 | New Tiedtke | New Tiedtke | |
| 陆面过程 | Noah | Noah | Noah |
| 边界层参数化 | YSU、MYJ、QNSE、MYNN2、MYNN3、BouLac、UW、TEMF、Shin-Hong、GBM | | |

将 10 种边界层方案模拟结果与海南文昌 1 号浅层风塔的观测结果进行对比分析, 并通过均方根误差 ($RMSE$) 和相关系数 (R) 两种评价指标对不同层次的近地层模拟结果进行精度评估, 相关的评估指标公式为:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}, \quad (2)$$

公式中 F 和 O 分别表示模拟值和观测值, \bar{F} 、 \bar{O} 分别表示模拟平均值和观测平均值; N 表示样本的数量, 其中均方根误差表示观测值与模拟值表示观测与模拟之间误差的大小, 均方根误差越小则表示模拟结果和观测值越接近, 模拟效果越好[10]。相关系数表示观测数据和模拟结果之间的相关程度, 相关系数越接近 1 表示相关性越大, 模拟结果越准确[11]。

3. 研究结果

3.1. 相对湿度观测模拟对比分析

从图 2~6 几幅图中, 通过对不同高度的观测和模拟相对湿度的对比分析, 可以看到随着高度的升高, 观测的相对湿度在三月到七月有所升高, 八月到十二月略微降低; 模拟的相对湿度在九到十二月降低, 其余月份变化不明显。其中各个方案对 1~2 月, 11~12 月模拟效果较差, 其余月份效果较好, 尤其是 4 月到 9 月, 各个层次都可以清楚看到日变化的趋势。总体来看, 相对湿度模拟效果随着高度的升高逐渐变差。

10米高度相对湿度

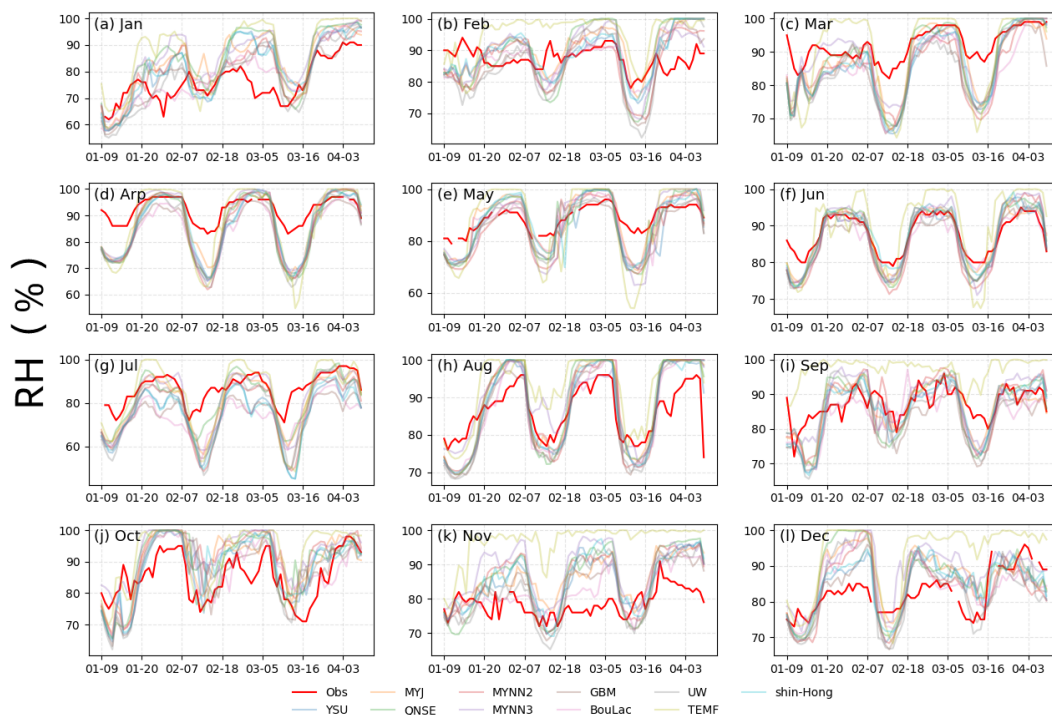


Figure 2. Observation and simulation diagram of relative humidity at 10 m height
图 2. 10 米高度相对湿度观测和模拟图

20米高度相对湿度

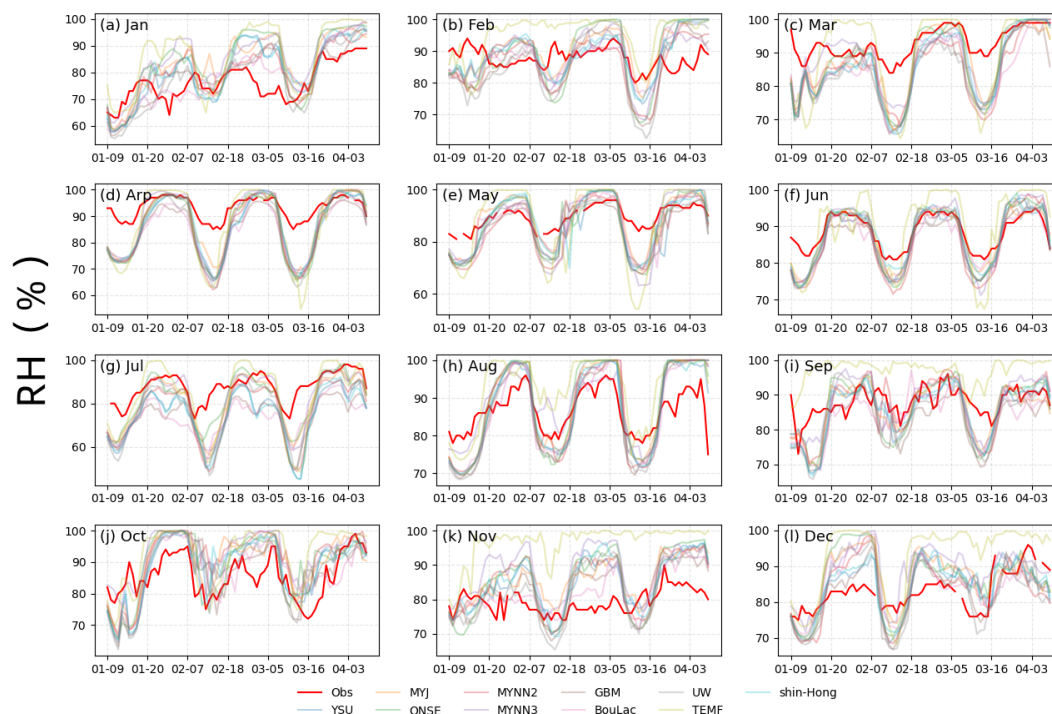


Figure 3. 20 m height relative humidity observation and simulation diagram
图 3. 20 米高度相对湿度观测和模拟图

50米高度相对湿度

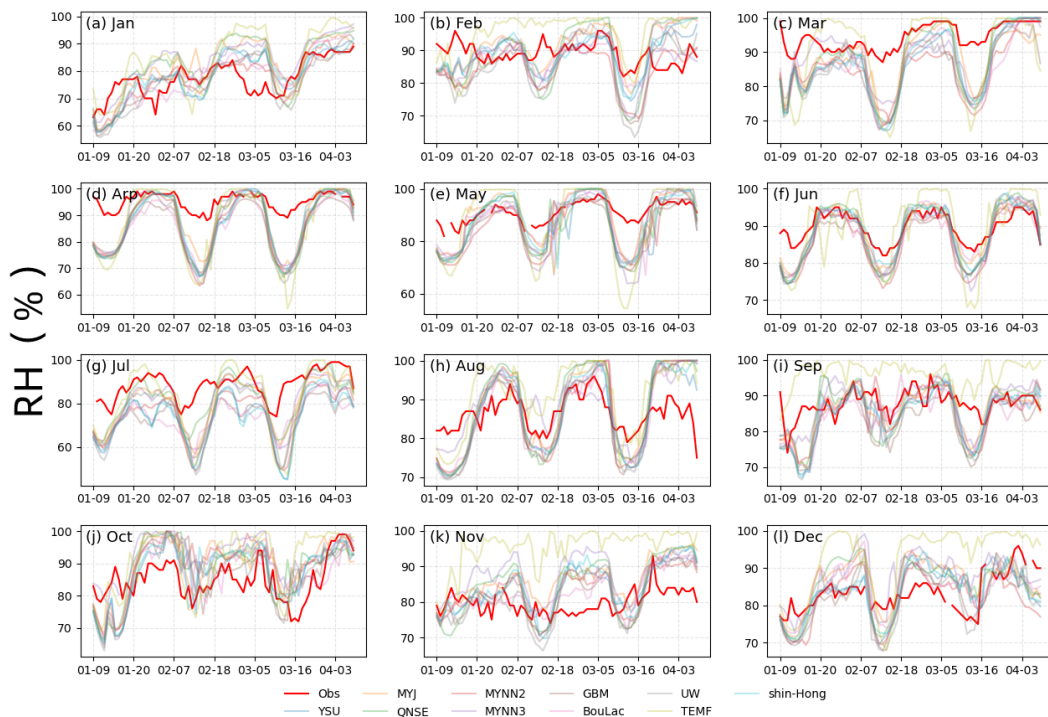


Figure 4. Observation and simulation diagram of relative humidity at 50 m height
 图 4. 50 米高度相对湿度观测和模拟图

70米高度相对湿度

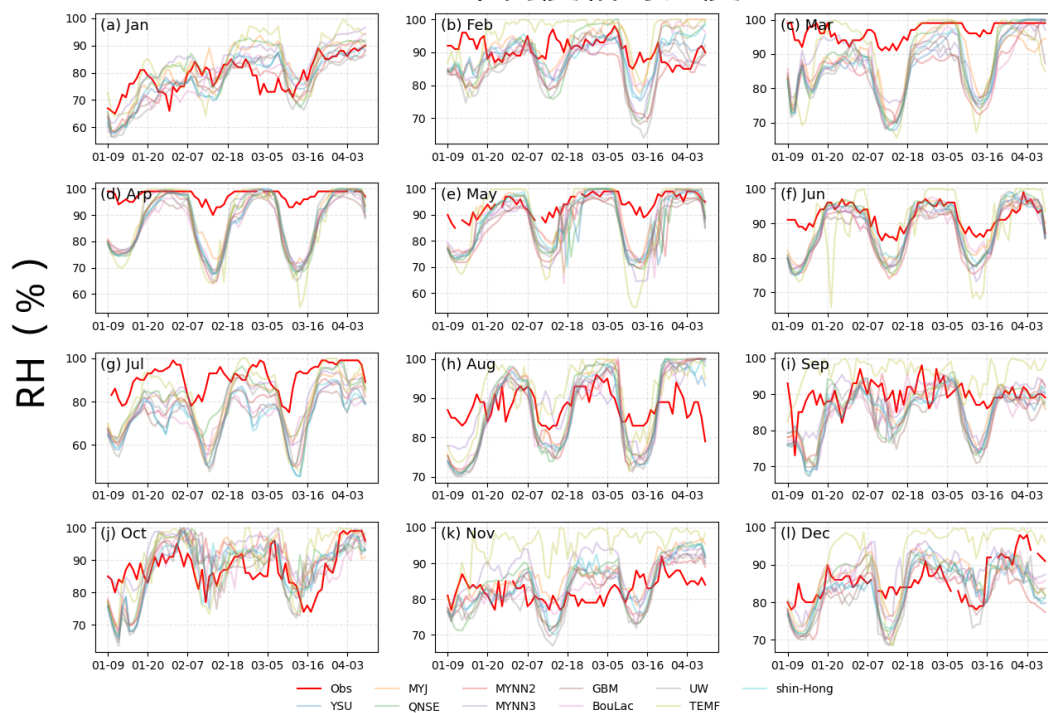


Figure 5. Observation and simulation diagram of relative humidity at 70 m height
 图 5. 70 米高度相对湿度观测和模拟图

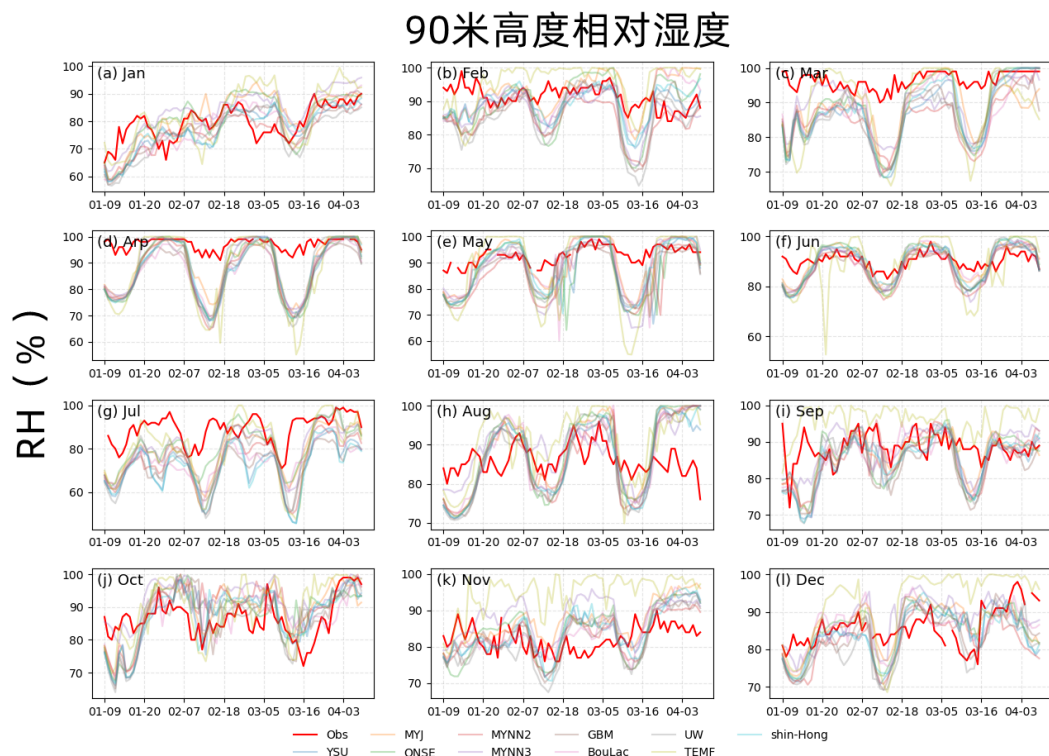


Figure 6. 90 m height relative humidity observation and simulation diagram
图 6. 90 米高度相对湿度观测和模拟图

3.2. 均方根误差分析

这次均方根误差评估分析是对不同层次模拟出的相对湿度按照每个月做一个均方根误差值, 每种方案在各个层次均有 12 个值。

从图 7 可以看到, 各方案 10 米高度的相对湿度均方根误差在一月到六月逐渐降低, 在六月达到最低误差 2.5, 但在七月的会猛然升高, 到达误差峰值 15。然后迅速降低, 在八月、九月维持一个较低的均方根误差, 然后在九月后缓慢升高。在这些方案中, BouLac 方案在一月, 二月和十一月模拟的效果最好, MYNN3 方案在三月, 八月的模拟效果更好一些, MYJ 方案在四月、五月、六月、九月的模拟效果显著, GBM 方案在十二月误差最小, QNSE 方案在七月的误差最小, 效果最好, 通过总体的均方根误差分析, 可以看出 MYJ 方案的总体模拟效果最佳。然后是 MYNN3 方案的模拟效果次之, QNSE 方案的模拟效果较前两种方案虽然差了一些, 但是在七月份的模拟效果是最好的。另外 TEMF 方案在除了七月份外的其余月份, 均方根误差均是最大的, 所以 TEMF 方案的模拟效果最差。

从图 8 可以看到, 各方案 20 米高度的相对湿度均方根误差在一月到六月逐渐降低, 在六月达到最低误差 3.5, 但在七月的会猛然升高, 到达误差峰值 16。然后迅速降低, 在八月、九月维持一个较低的均方根误差, 然后在九月后缓慢升高。整体的模拟情况和 10 米高度相对湿度均方根误差情况差不多, 在一月、二月、十月和十一月 BouLac 方案模拟的效果好, MYNN3 方案在三月、八月的模拟显著, MYJ 方案在四月、五月、六月、九月的模拟效果比其他方案优秀, GBM 方案在十二月误差最小, QNSE 方案在七月的效果最好, 整体仍然是 MYJ 方案的总体模拟效果最佳, MYNN3 方案的模拟效果次之, 然后是 QNSE 方案。而 TEMF 方案在二月、三月、七月、八月外的其余月份, 均方根误差均是最大的, TEMF 方案在 20 米层次的模拟效果仍是最差的。

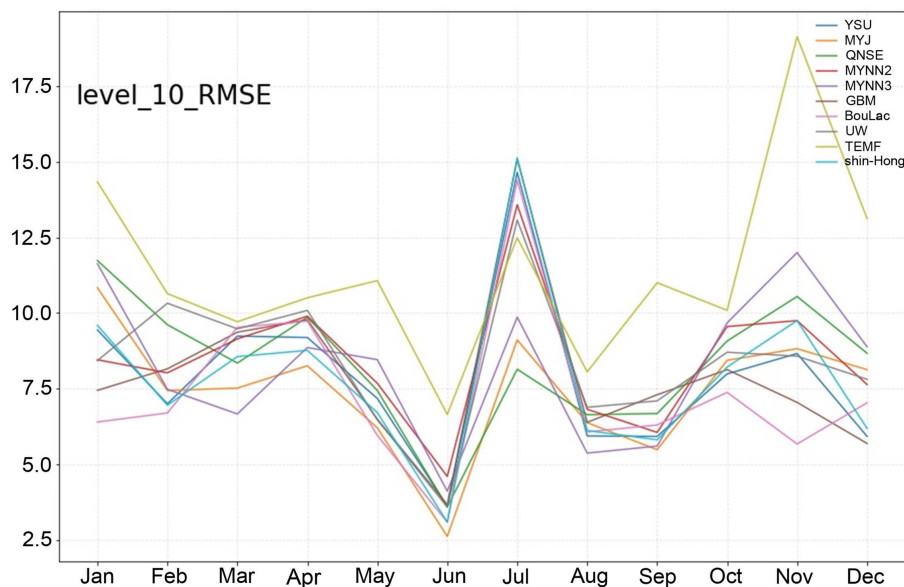


Figure 7. Root mean square error of relative humidity at 10 m height

图 7. 10 米高度相对湿度均方根误差

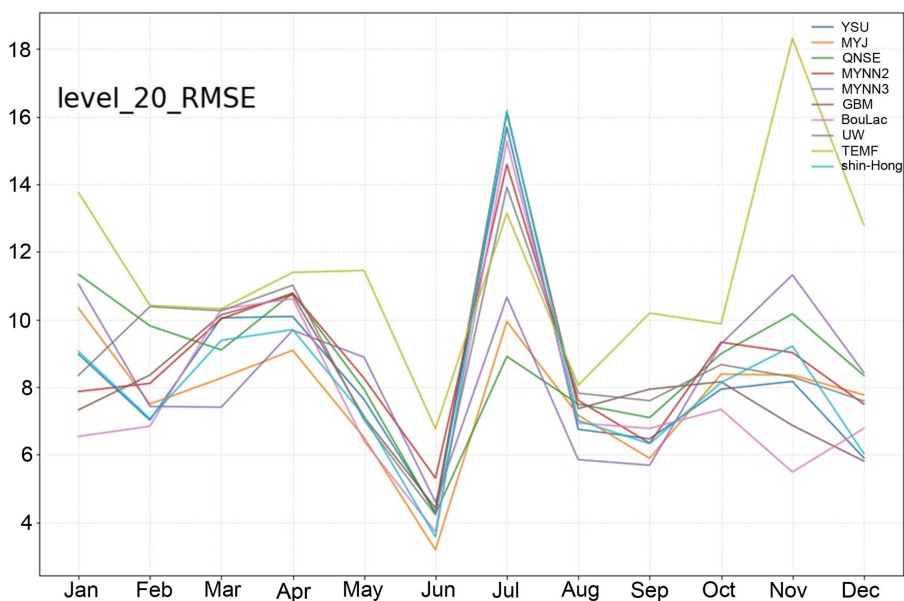


Figure 8. Root mean square error of relative humidity at 20 m height

图 8. 20 米高度相对湿度均方根误差

从图 9 可以看到, 各方案 50 米高度的相对湿度均方根误差在一月到二月缓慢降低, 二月开始逐渐升高, 到四月开始下降, 下降的速度更快, 在六月达到最低误差 3.5, 然后在七月的会猛然升高, 到达误差峰值 18.5。然后迅速降低, 在八月、九月维持一个较低的均方根误差, 然后在九月后缓慢升高。在这些方案中, MYNN2 方案在一月份的误差最低, YSU 方案在二月份的模拟效果更好, MYNN3 方案在三月、八月和九月的模拟效果更好一些, MYJ 方案在四月、五月、六的模拟效果显著, QNSE 方案在七月的误差最小, 效果最好, BouLac 方案在十一月模拟的效果最好。TEMF 方案在三月、七月、八月外的其余月份, 均方根误差均是最大的, TEMF 方案模拟效果最差的。通过总体的均方根误差分析, 可以看出 MYJ

方案的总体模拟效果最佳。然后是 MYNN3 方案的模拟效果次之, QNSE 方案的模拟效果较前两种方案虽然差了一些, 但是在七月份的模拟效果是最好的, TEMF 方案模拟效果最差。

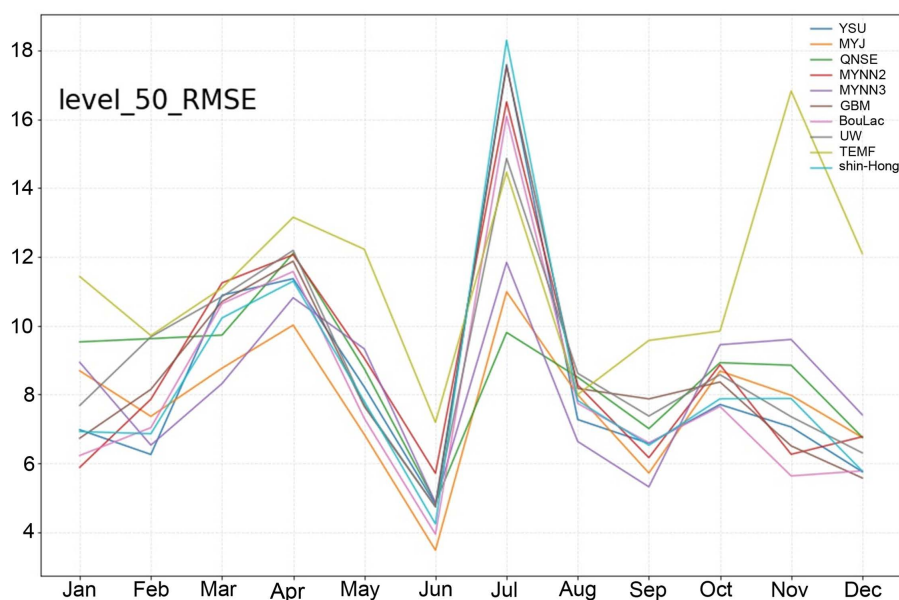


Figure 9. Root mean square error of relative humidity at 50 m height

图 9. 50 米高度相对湿度均方根误差

从图 10 可以看到, 各方案 70 米高度的相对湿度均方根误差在一月到二月缓缓降低, 二月开始逐渐升高, 到四月开始下降, 下降的速度更快, 在六月达到最低误差 4.5, 但在七月的会猛然升高, 到达误差峰值 20 以上, 然后在七月到八月之间迅速降低, 八月之后缓慢降低。在这些方案中, MYNN2 方案在一月份的误差最低, YSU 方案在二月份的模拟效果更好, MYNN3 方案在三月、八月和九月的模拟效果更好一些, MYJ 方案在四月、五月、六的模拟效果显著, QNSE 方案在七月的误差最小, 效果最好, BouLac 方案在十一月模拟的效果最好。TEMF 方案在三月、七月、八月外的其余月份, 均方根误差均是最大的, TEMF 方案模拟效果最差的。通过总体的均方根误差分析, 可以看出 MYJ 方案的总体模拟效果最佳。然后是 MYNN3 方案的模拟效果次之, QNSE 方案的模拟效果较前两种方案虽然差了一些, 但是在七月份的模拟效果是最好的, TEMF 方案模拟效果最差。

从图 11 可以看到, 各方案 90 米高度的相对湿度均方根误差在一月开始逐渐升高, 到四月达到一个小高峰, 然后开始迅速下降, 在六月达到最低误差 4.8, 但在七月的会猛然升高, 到达误差峰值 20 以上, 之后均方根误差开始降低, 在七月到八月之间迅速降低, 八月之后降低速度变得很缓慢。在这些方案中, MYNN2 方案在一月份的误差最低, YSU 方案在二月份的模拟效果更好, MYNN3 方案在三月、八月和九月的模拟误差最低, MYJ 方案在四月、五月、六的模拟效果显著, QNSE 方案在七月的误差最小, BouLac 方案在十月和十二月模拟的效果最好。TEMF 方案在四月、五月、六月和九月开始的均方根误差均是最大的, 可以看出 TEMF 方案模拟效果最差的。通过总体的均方根误差分析, 可以看出 MYJ 方案的总体模拟效果最佳。然后是 MYNN3 方案的模拟效果次之, QNSE 方案在七月份的模拟效果是最好的, 其余月份表现不错, TEMF 方案模拟效果最差。

通过上述分析, 可以发现随着高度的上升, 均方根误差开始逐渐增大。其中 TEMF 的误差虽然自始至终均是最大的, 但是随着高度上升, TEMF 方案的均方根误差有明显的减小。MYJ 方案在四月到六月的均方根误差均是最低, 在其余月份也表现优秀, 是所有方案中综合模拟效果最好的。

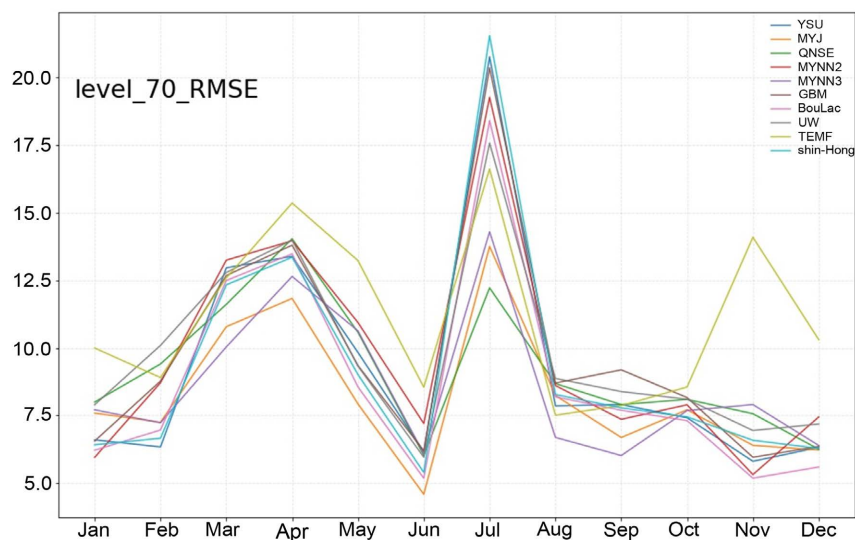


Figure 10. Root mean square error of relative humidity at 70 m height

图 10. 70 米高度相对湿度均方根误差

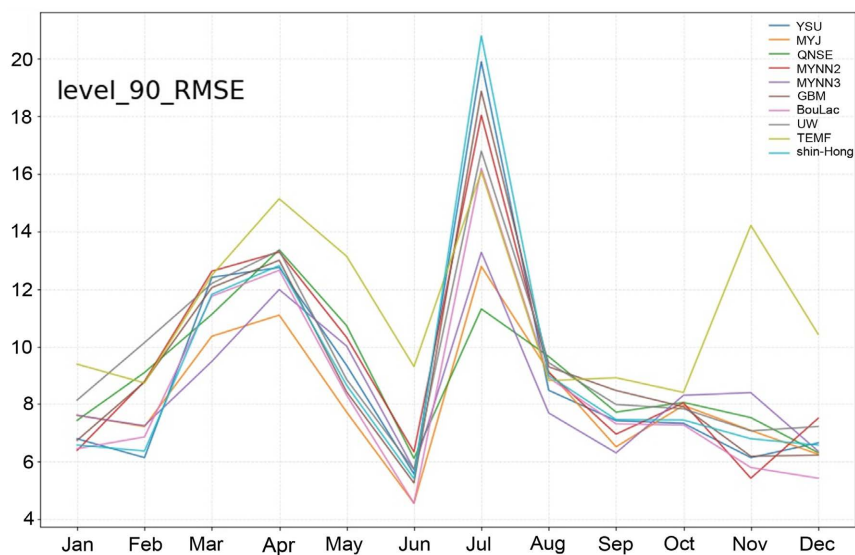


Figure 11. Root mean square error of relative humidity at 90 m height

图 11. 90 米高度相对湿度均方根误差

3.3. 相关系数分析

关于相关系数的评估分析是对不同层次模拟出的相对湿度按照每个月算出一个相关系数, 所以每种方案在各个层次分别有 12 个值。

从图 12 中可以清楚的看到, 10 米高度各个方案的相关系数在一月份均大于 0.6, 在二月份减小到最低点, 均处于 0.4 以下, 且最低值低于 0.1。然后在三月份开始升高, 各个方案的相关系数均在 0.7 以上, 并且在四月份的时候达到峰值 0.95, 之后直到 9 月份相关系数除了 TEMF 方案都维持在 0.6 以上, 可以较好的模拟出日变化的趋势, 在 10 月份开始各个方案的相关系数均减少, 图中可以清晰看到 10 月份和 11 月份的相关性明显降低, 12 月份的相关系数较 11 月升高了一点, 相关系数除了二月份未通过显著性检验, 其余月份 P 值均小于 0.05, 均通过显著性检验。其中 TEMF 方案的相关系数明显是最低的, BouLac

方案在一月和十一月的相关系数最高, GBM 方案在二月和十二月相关系数高于别的方案, 其他月份各个方案的相关系数差距并不明显。

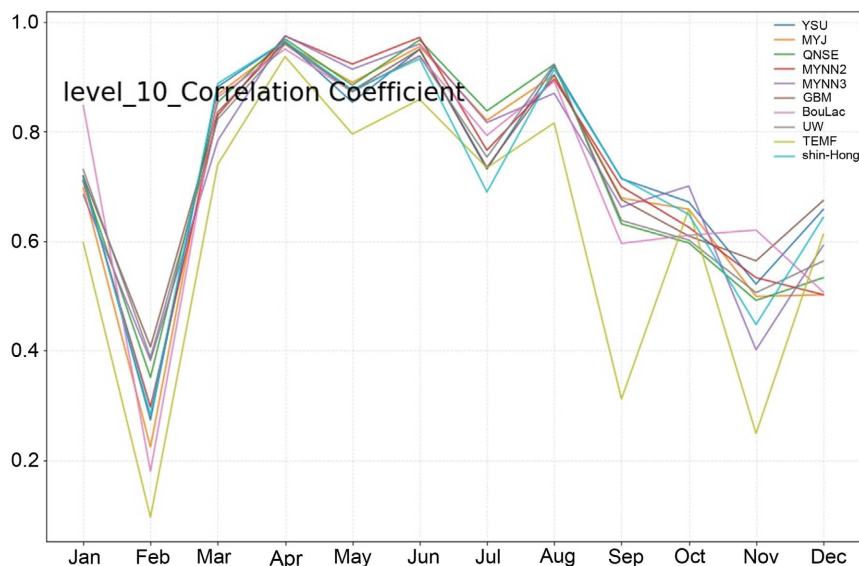


Figure 12. Correlation coefficient of each scheme at 10 m height
图 12. 10 米高度各方案相关系数

从图 13 中可以清楚的看到, 20 米高度各个方案的相关系数在一月份均大于 0.6, 在二月份减小到相关系数最低点, 其中最低值不足 0.1。然后在三月份开始升高, 各个方案的相关系数均在 0.6 以上, 并且在四月份的时候达到峰值 0.95, 之后直到八月份相关系数除了 TEMF 方案都维持在 0.7 以上, 从九月份开始各个方案的相关系数均减少, 相关系数除了二月份未通过显著性检验, 其余月份 P 值均小于 0.05, 均通过显著性检验。其中 TEMF 方案的相关系数明显是最低的, BouLac 方案在一月和十一月的相关系数最高, GBM 方案在二月和十二月相关系数高于别的方案, 其他月份各个方案的相关系数差距并不大。

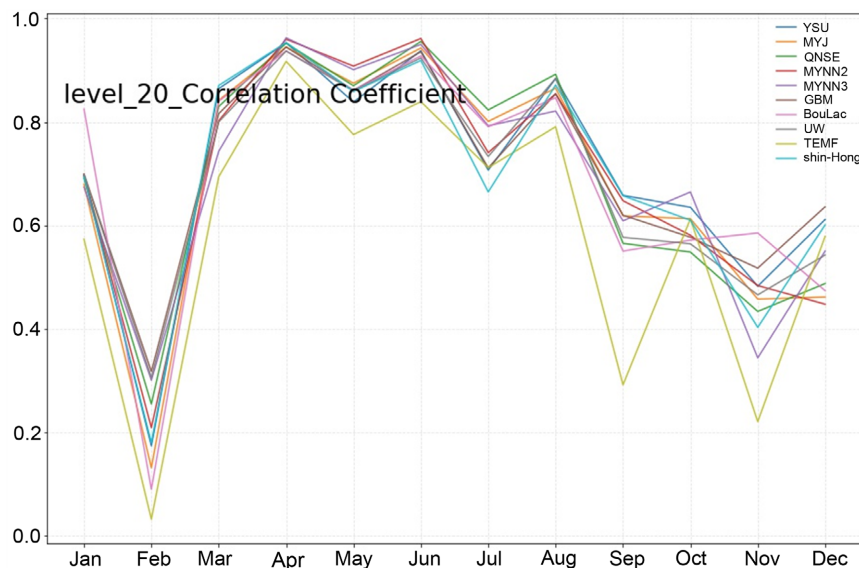


Figure 13. Correlation coefficient of each scheme at 20 m height
图 13. 20 米高度各方案相关系数

从图 14 中可以清楚的看到, 50 米高度各个方案的相关系数在一月份均大于 0.5, 在二月份减小到相关系数最低点, 其中最低值为负值。然后在三月份开始升高, 在四月份的时候达到峰值 0.9, 之后直到八月份相关系数基本维持在 0.6 以上, 从九月份开始各个方案的相关系数均减少, 相关系数除了二月份未通过显著性检验, 其余月份 P 值均小于 0.05, 均通过显著性检验。其中 TEMF 方案的相关系数在四月之前与其他方案相关系数相似, 在四月之后渐渐处于最低。BouLac 方案在一月和十一月的相关系数最高, MYNN3 方案在二月的的相关系数是最大的, GBM 方案在十二月相关系数高于别的方案, 其他月份各个方案的相关系数差距并不大。

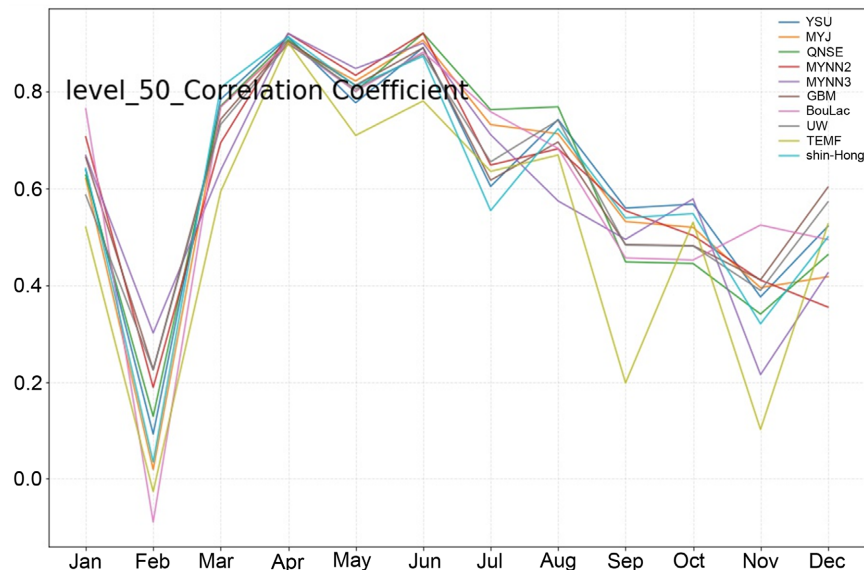


Figure 14. Correlation coefficient of each scheme at 50 m height
图 14. 50 米高度各方案相关系数

从图 15 中可以看到, 70 米高度各个方案的相关系数在一月份均在 0.5 以上, 在二月份减小到相关系数最低点, 其中最低值接近-0.2。然后在三月份开始升高, 在四月份的时候达到峰值 0.9, 到六月份相关系数维持在 0.6 以上, 从七月份到九月之间各个方案的相关系数均减少, 且减少幅度较大, 九月之后减小幅度显著变小, 相关系数除了二月份未通过显著性检验, 其余月份 P 值均小于 0.05, 均通过显著性检验。其中 TEMF 方案的相关系数在八月之前与其他方案相关系数相似, 在四月之后渐渐处于最低。QNSE 方案在七月、八月相关系数较高, GBM 方案在十二月相关系数高于别的方案, 其他月份各个方案的相关系数差距并不大。

从图 16 中可以看到, 90 米高度各个方案的相关系数在一月份均在 0.5 以上, 在二月份减小到相关系数最低点, 其中最低值小于-0.2, 三月份开始升高, 在四月份的时候达到峰值 0.8, 到六月份相关系数基本维持在 0.6 以上, 从七月份到九月之间各个方案的相关系数均减少, 且减少幅度较大, 九月到十二月之间相关系数反复升高下降, 呈现出一个波动的曲线, 相关系数除了二月份未通过显著性检验, 其余月份 P 值均小于 0.05, 均通过显著性检验。其中 TEMF 方案的相关系数在十一月的相关系数最小, 在其他月份的相关系数也不是很理想。MYNN2、MYNN3 方案在二月相关系数较高, GBM 方案在十二月相关系数高于别的方案, 其他月份各个方案的相关系数差距并不大。

通过对各个层次不同方案相关系数分析, 可以发现随着高度的上升相关系数逐渐开始变小。二月份的相关系数随着高度上升, 出现了负相关的情况, 而其中相关系数高的月份是在三月开始到七月份, 七

月之后相关系数开始明显变小, 所有的层次相关系数除二月份均通过了显著性检验。在这些方案当中, TEMF 方案的相关系数随高度升高逐渐接近其他的方案, 但是在本次相关系数分析中处于最差的方案。MYNN2 方案和 MYNN3 方案在二月的相关系数始终呈现出微弱的正相关。在其他月份大部分的方案都可以很好的模拟出相对湿度的趋势。

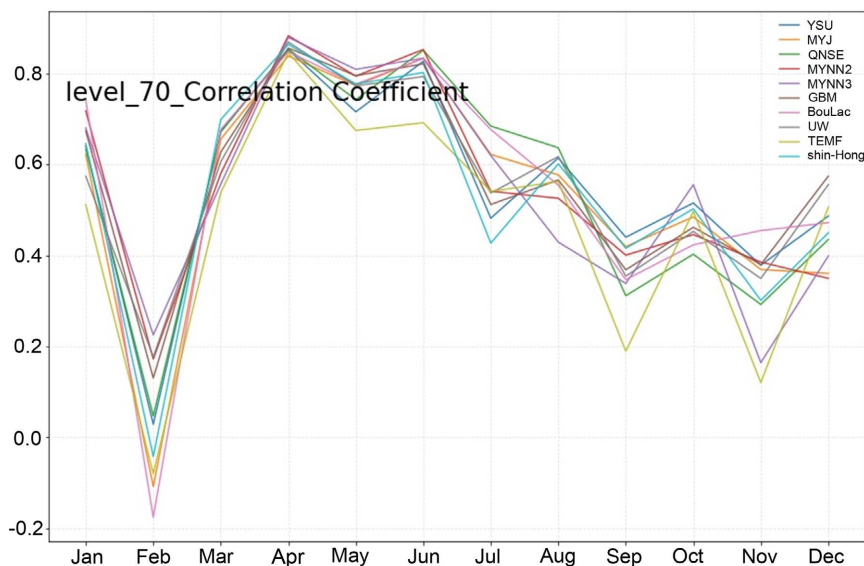


Figure 15. Correlation coefficient of each scheme at 70 m height

图 15. 70 米高度各方案相关系数

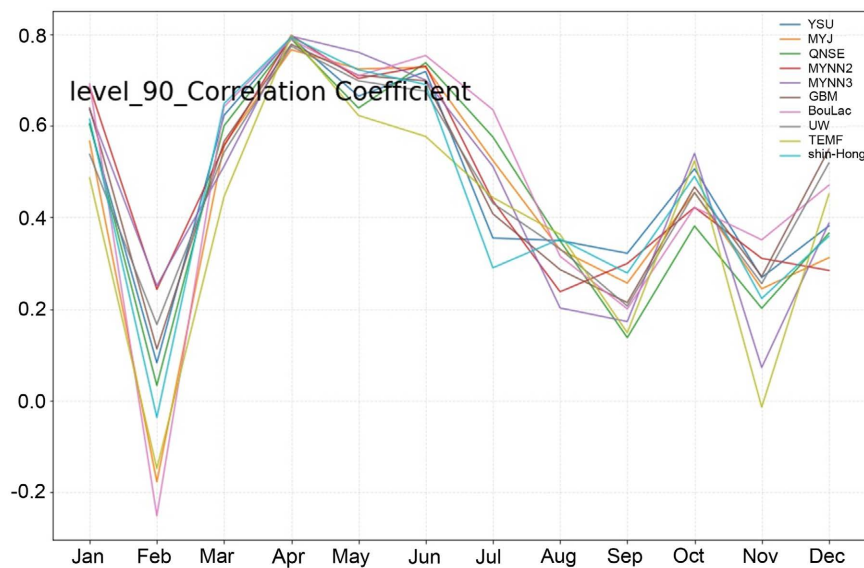


Figure 16. Correlation coefficient of each scheme at 90 m height

图 16. 90 米高度各方案相关系数

4. 结论

本文基于 WRF 模式, 利用 10 种近地层参数化方案对海南文昌的近地层湿度开展了模拟实验。通过与地面测风塔数据的对比, 对各方案在文昌地区的相对湿度模拟效果进行评估, 主要结论如下:

1) 随着近地层高度的增加, 三月到七月的观测相对湿度增加, 模拟相对湿度变化不大; 其余月份观测和模拟的相对湿度均会降低; 模拟和观测的均方根误差随高度增加而增加, 相关系数随高度增加则会减小。

2) MYJ 方案模拟的相对湿度在三月到六月之间偏差最小, QNSE 方案模拟的相对湿度在七月份效果则是更好一些。TEMF 方案在各个层次中表现都是最差的, 但随着高度上升, 该方案的误差会相对减少。从整年的均方根误差来看 MYJ 方案的误差是最小的。

3) 在整个模拟过程中, 二月份模拟的相关系数是最小的, 随高度上升还会出现负值, 三月到六月的相关系数一直呈现出良好的相关性。TEMF 方案在各个层次中表现都是最差的, 但随着高度上升, 该方案的相关系数会有明显的升高。MYNN2 方案和 MYNN3 方案在二月的的相关系数始终呈现出微弱的正相关。除了个别月份, 大部分方案都可以呈现出良好的相关性, 可以较好地模拟相对湿度变化的趋势。

4) 通过对均方根误差和相关系数的分析, MYJ 方案模拟数据接近观测数据, 并且可以模拟出每个月份的日变化趋势, 是模拟结果最好的方案。TEMF 方案的均方根误差最大且相关系数表现最差, 是模拟效果最差的方案。

参考文献

- [1] 车军辉, 赵平, 史茜等. 大气边界层研究进展[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 735-751.
- [2] 陈晓燕, 孔祥伟, 杨春芽, 等. GRAPES_Meso 模式不同参数化方案在甘肃河东地区的模拟评估[J]. 陕西气象, 2021(1): 8-14.
- [3] 宁志远, 刘厚凤. 大气边界层的国内外研究现状[J]. 河北环境工程学院学报, 2017, 27(2): 22-25.
- [4] 张玉, 王小伦, 刘雁. 不同边界层方案在短期天气模拟中的精度评估[J]. 通化师范学院学报, 2021, 42(12): 15-21.
- [5] 吴秋月, 华维, 胡垚, 等. 不同边界层方案对一次西南涡暴雨过程模拟的对比试验[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1071-1081.
- [6] 靳双龙, 冯双磊, 王勃, 等. 西北电网风场数值预报的大气边界层参数化方案适用性[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 447-455.
- [7] 王媛, 张苏平, 衣立, 等. 一次层积云发展过程对黑潮延伸体海洋锋强迫的响应研究——数值模拟和试验[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2017, 47(7): 10-20.
- [8] 王成刚, 沈滢洁, 罗峰, 等. 晴天及阴天条件下 WRF 模式中几种边界层参数化方案的对比分析研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(3): 924-934.
- [9] 蔡子颖, 韩素芹, 汪靖, 等. 基于天气背景天津地区重污染天气特征分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 3906-3917.
- [10] 秦楚菲, 孙家仁, 张文君, 等. 基于数值模拟和统计拟合分析华北冬季一次大范围重污染过程的形成机理[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(2): 185-198.
- [11] 贾文星, 姜海梅, 袁伟红, 等. 中尺度天气预报模式边界层参数化方案以及近地层方案对苏州东山冬季近地层气象要素模拟的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(17): 32-43.