

边界层参数化方案对文昌近地层气温模拟的影响

朱雨欣^{1,2}

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²新疆气象信息中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年11月24日; 录用日期: 2022年12月29日; 发布日期: 2023年1月4日

摘要

为了选取适用于我国海南文昌地区气温预报的最优边界层参数化方案, 本文利用中尺度天气预报模式(WRF), 采用美国国家环境预测中心分析资料(FNL)作为模式背景场, 基于2015年1~12月的12个案例开展了近地层气温的边界层参数化敏感性实验。通过与文昌地面测风塔观测结果的对比, 分析了10种边界层参数化方案在海南文昌的适用性。结果表明: 1) WRF模式对海南文昌地区气温模拟存在较小的偏差, 春夏季的模拟效果优于秋冬季。2) 一年中12月的模拟气温与实况偏差最大, 模拟效果最差。3) 各高度24小时预报模拟效果最好的方案是BouLac方案。4) 通过对五种高度三种时效模拟结果进行分析, 总体来说UW方案与实况偏差最小, 模拟效果最好。TEMF方案偏差最大, 模拟效果最差。

关键词

边界层参数化方案, WRF模式, 海南, 文昌, 敏感性试验, 气温

Effect of Boundary Layer Parametric Scheme on the Simulation of Near-Surface Air Temperature in Wenchang

Yuxin Zhu^{1,2}

¹School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi Xinjiang

Received: Nov. 24th, 2022; accepted: Dec. 29th, 2022; published: Jan. 4th, 2023

Abstract

In order to select the optimal boundary layer parametric scheme for temperature forecast, this paper uses mesoscale weather forecast model (WRF), using the national environmental forecast-

文章引用: 朱雨欣. 边界层参数化方案对文昌近地层气温模拟的影响[J]. 自然科学, 2023, 11(1): 15-29.

DOI: 10.12677/ojns.2023.111003

ing center final analysis data (FNL) as a background field. Based on 12 cases from January to December 2015, the boundary layer parameterization sensitivity experiment of the near-ground temperature is carried out. The applicability of 10 kinds of boundary layer parameterization schemes in Wenchang, Hainan is analyzed by comparing them with the observation results of Wenchang wind tower. The results show that: 1) WRF mode has a small deviation on the temperature simulation in Wenchang, Hainan, and the simulation effect in spring and summer is better than that in autumn and winter. 2) In December, the simulated temperature and the actual deviation are the largest, and the simulation effect is the worst. 3) The scheme with the best 24-hour forecast and simulation effect of each height is the BouLac scheme. 4) Through analyzing the simulation results of three kinds of five heights, overall, the UW scheme is the least biased and the simulation effect is the best. The TEMF scheme has the largest deviation and the worst simulation effect.

Keywords

Boundary Layer Parametric Scheme, WRF Mode, Hainan, Wenchang, Sensitivity Test, Air Temperature

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

大气边界层是对流层中受下垫面影响较大的那部分大气，约为一到两公里厚度，它对自由大气和下垫面动力和热力相互作用产生了一定影响。在边界层内，水汽和物质的输送对大气的化学变化、污染物的扩散、云和降水的形成起着十分重要的作用。鉴于大气边界层在天气和气候系统中具有举足轻重的地位，在数值模式中对边界层内物理过程的合理描述是很有必要的，然而由于数值模式本身的水平和垂直分辨率限制以及边界层内湍流运动的复杂性，使得边界层内的一些物理过程难以准确描述，因此必须将这些物理过程参数化，而边界层参数化方案的优劣直接关系到近地层气温预报的准确性[1]。

以往的研究发现边界层参数化方案在白天和夜间各个气象要素之间存在着显著差别，而非局地方案比局地方案稍好。对苏州东山地区冬季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近地层气象要素模拟的效果进行了分析，研究表明日间四种边界层方案对 2 m 温度的模拟差异不大，两种近地层方案的模拟结果存在一定的差异，在对流混合强度低时 Eta 方案的模拟优于 MM5 方案；在夜间，四种不同的边界层方案和近地层方案都对其产生了一定的影响，而在整个观测的过程中，四种不同的方案的模拟结果统计量差异较小；BL 边界层方案和 MM5 近地层方案的耦合对近地层气象要素 2 m 气温的模拟效果最好[2]。许多国外学者利用 MM5 和 WRF 模式开展了一些边界层参数化方案的敏感性试验。通过对 2005 年 7 月~9 月 TEXAS 的模拟和观测资料对比，发现在模拟边界层结构时，YSU 方案和 ACM2 方案的偏差整体上比 MYJ 偏差小[3]。利用 MM5 方案中 5 种边界层参数化方案，对夏季晴天条件下的美国中部地区进行了模拟，结果表明，非局地方案 BLK 对气象要素的模拟更为准确[4]。

目前，国内外学者对于边界层参数化方案对气温的模拟已经开展了较为系统的研究，并对各种不同的参数化方案的模拟效果进行了对比，但对于文昌地区气温模拟的研究较少。海南文昌地区位于海南省东北部，东经 108°21'~111°03'，北纬 19°20'~20°10'，东、南、北三面临海。具有热带和亚热带气候特点，属于热带季风岛屿型气候，它的光、水、湿、热条件优越，一年四季没有霜冻，年平均气温为 23.9℃。文昌是中国文昌航天发射场所在地，有中国第四座航天之城的美称，所以，文昌地区气温的准确预报对

于航天发射安全有重要影响。

WRF (The Weather Research and Forecasting Model)模式,即天气预报模式,具有先进的数据同化技术以及强大的嵌套能力和先进的物理过程,尤其是在处理对流和中尺度降水能力方面有优势。其适用范围很广,可以应用于中小尺度到全球尺度的数值预报和模拟。不仅可以用于业务数值天气预报,还可以用于大气数值模拟研究,同时包括数据同化、物理过程参数化的研究、区域气候模拟、空气质量模拟、海气耦合以及理想实验模拟等。因此本文采用最新的 WRFV4.2.1, WRF 使用三重嵌套模式区域来模拟文昌地区近地层的气温,旨在探究哪种边界层参数化方案对文昌近地层气温模拟的效果最好,以及各种参数化方案的适用性,进而提高预报的准确率。对于研究边界层参数化方案对文昌近地层气温模拟有重要影响。一方面能对文昌地区气温模拟的参数化方案的选取提供参考,同时也对提升边界层参数化方案的模拟能力有一定价值。

2. 模式和方法

2.1. 模式设置

本次试验采用 10 种不同的边界层参数化方案对海南文昌边界层进行了数值模拟,为更精确地反映出模拟区域的三维结构特征,模式区域的设计如图 1 所示,共使用了三重嵌套,边界层参数化敏感性试验基本设置如表 1 所示,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。在垂直方向上从 1000 hPa 至 10 hPa 共分为 60 层,在近地面大气中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。模式积分步长为模式水平分辨率的 6 倍,最外层模式的粗网格的积分步长为 300 s,最内层细网格的积分步长为 18 s。

2.2. 方案介绍

WRF 模式的参数化方案包括:微物理过程参数化方案、与对流活动有关的积云过程参数化方案、与地面长波辐射和太阳短波辐射有关的辐射方案以及与边界层有关的近地层方案,行星边界层方案和陆面过程方案等。本文主要对 10 种参数化方案(YSU, MYJ, QNSE, MYNN2.5, MYNN3, BouLac, UW, TEMF, Shin-Hong, GBM)的模拟结果进行对比分析。

微物理过程采用 WSM6 方案,长波辐射和短波辐射方案使用 RRTMG 方案,陆面过程使用 Noah 陆面模式,积云对流参数化使用 New Tiedtke 方案,模式嵌套最内层关闭积云对流参数化。只将 fnl 资料作为参数化方案的背景场来驱动模式进行预报,没有对本地观测数据进行同化。为了考虑季节间的差异,本次试验在 2015 年的每个月都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 setting of boundary layer parametric 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

Continued

长波辐射	RRTMG	RRTMG	RRTMG
积云参数化	NewTiedtke	NewTiedtke	NewTiedtke
陆面过程	Noah	Noah	Noah
边界层参数化	YSU、MYJ、QNSE、MYNN2.5、MYNN3、 BouLac、UW、TEMF、Shin-Hong、GBM		

2.3. 资料和方法介绍

在预报方法研究阶段本次模式采用 FNL 全球分析资料(Final Operational Global Analysis)来作为 WRF 模式模拟的背景场资料。

本研究主要对海南文昌地区 2015 年不同参数化方案模拟的气温进行分析,所用的观测数据为海南文昌地区测风塔观测资料。由于所选的资料是在 1951 年之后,我国的地面气象观测站已经比较的密集,所以测得的资料可靠性和科学性都比较强。本文选取的地面观测资料较为完整,缺测值较少。所研究区域的经度范围为:东经 108°21'~111°03', 纬度范围为:北纬 19°20'~20°10'。

本文首先对 WRF 模式进行设置,再根据背景场资料以及观测数据对文昌近地层气温进行模拟,再利用 10 种参数化方案模拟的不同高度不同时效的气温与观测数据进行对比,首先分为五个高度分别是 10 m、20 m、50 m、70 m 和 90 m,再分为三种时效,分别为 24 h、48 h 和 72 h。每种方案分为 12 个月,每个月 10 m 高度 24 小时、10 m 48 小时,10 m 72 小时的模拟数据与观测进行对比,其他月份和方案以此类推。

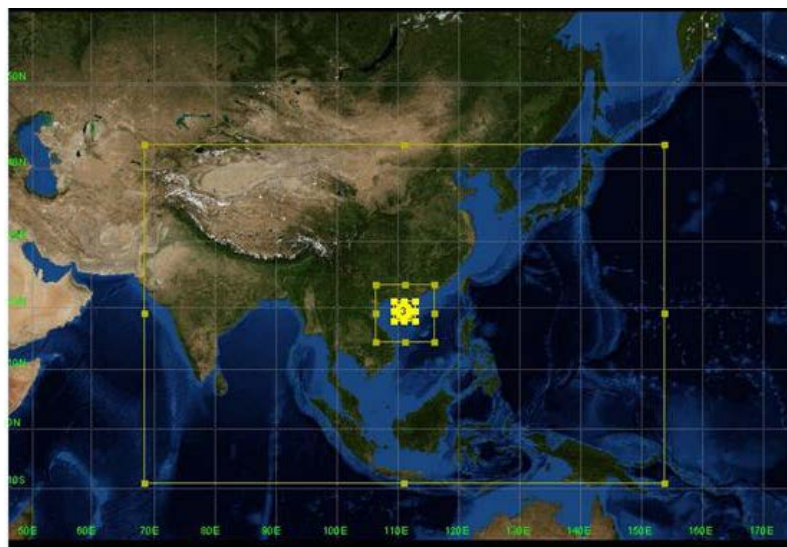


Figure 1. Simulation area diagram

图 1. 模拟区域图

3. 研究结果

3.1. 参数化方案模拟结果和观测结果的对比分析

3.1.1. 十米高度对比分析

图 2 中横坐标为月份,纵坐标为气温,单位为 1 摄氏度。不同的颜色分别代表不同方案的结果。从图中可以看出在 2015 年 1 月,TEMF 方案和 MYNN3 方案和观测的实际情况偏差较大,模拟的效果较为

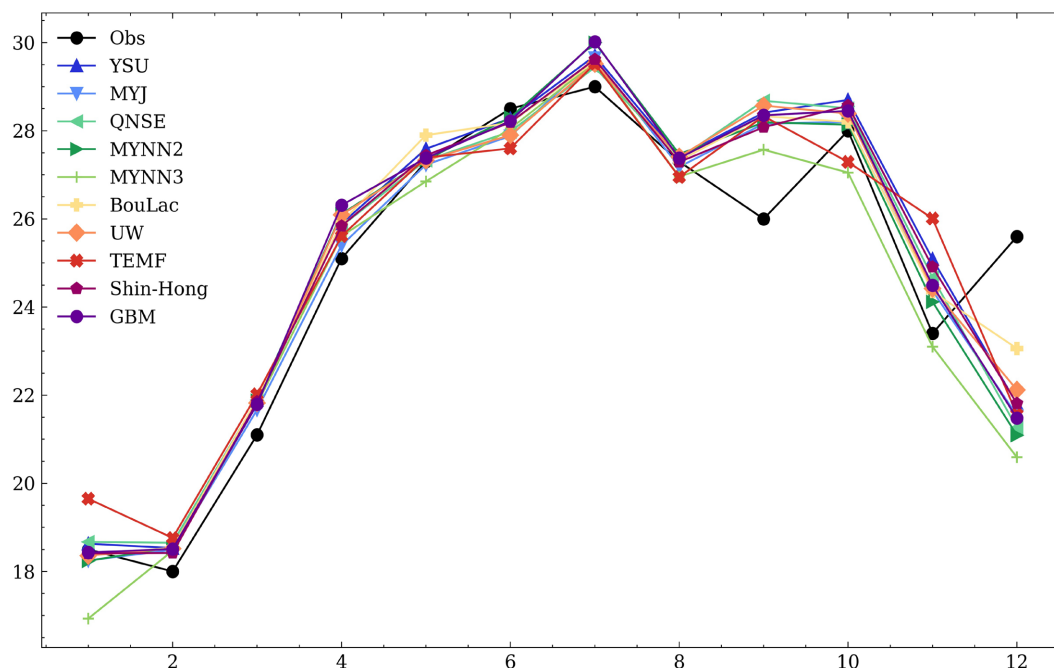


Figure 2. Comparison of the 24-hour forecast and observation data at the height of 10 meters
图 2. 10 米高度 24 小时预报与观测数据对比

不好。2015 年 2 月，TEMF 方案模拟的偏差最大，Shin-Hong 方案模拟的偏差与其他九种方案相比较小。2015 年 3 月，可以看出十种方案模拟的结果较为接近，都和观测的实际气温有明显的偏差，其中 MYJ 方案的偏差略小于其余九种方案。2015 年 4 月，GBM 方案的偏差最大，MYJ 方案的误差最小。在 2015 年 5 月，BouLac 方案和 MYNN3 方案误差略大。2015 年 6 月，TEMF 方案的模拟结果误差最大。在 2015 年 7 月，GBM 方案和 MYNN2 方案的误差高于其余八种方案，模拟效果较差。在 2015 年 8 月，TEMF 方案和 MYNN3 方案的模拟结果误差明显。从 2015 年 10 月可以看出，TEMF 方案和 MYNN3 方案模拟的结果低于实际气温。在 2015 年 11 月，只有 MYNN3 方案模拟的结果低于实际气温，TEMF 方案的误差最大。9 月、12 月模拟效果较差。

由图 3，在 2015 年 1 月，可以看出 QNSE 方案的模拟效果最好。在 2 月除 TEMF 和 MYNN3 方案误差明显较大之外，其他八种方案模拟结果接近。3 月的实际气温和十种方案模拟的气温误差明显，十种方案的模拟结果相近且都超过实际气温。4 月 BouLac 方案误差最大。5 月的 GBM 方案模拟结果与实际气温最接近，QNSE 方案的误差最大。在 6 月 TEMF 方案的误差最大。七月十种方案的模拟结果都超过实际气温，其中 BouLac 方案误差最大。八月的观测气温高于十种边界层参数化方案且误差明显。九月和十月的情况相似，TEMF 方案的误差最大，其余方案误差较小。11 月只有 TEMF 方案的模拟气温高于实际气温，MYNN3 方案的误差最大。8 月、12 月模拟效果较差。

由图 4，从一月的模拟效果来看，TEMF 方案的误差最大，MYNN2 方案的结果与实际情况最接近。3 月和 4 月的情况相似，模拟气温都高于实际气温且模拟的结果较为集中。从图中来看五月除了 MYNN2 方案的误差较大外其他方案模拟效果较好。在六月 TEMF 方案误差明显较大。七月和八月的情况相似，十种方案模拟的结果都高于实际情况。9 月只有 TEMF 方案模拟的气温高于实际气温，其中 MYNN3 方案的误差最大。11 月 TEMF 方案模拟效果最好，其余方案模拟结果都低于实际气温。2 月、10 月、12 月模拟效果较差。

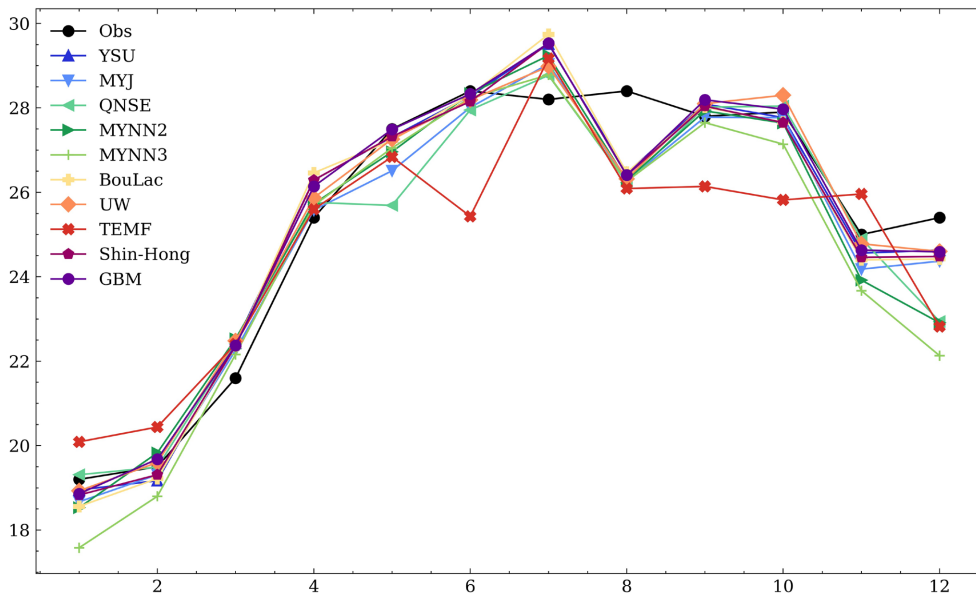


Figure 3. Comparison of the 48-hour forecast and observation data at the height of 10 meters
图 3. 10 米高度 48 小时预报与观测数据对比

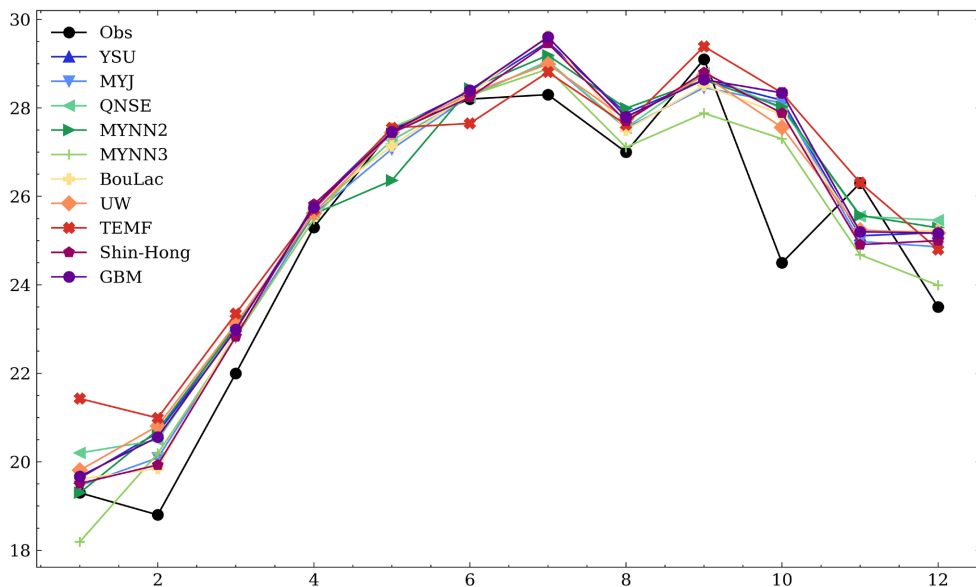


Figure 4. Comparison of the 72-hour forecast and observation data at the height of 10 meters
图 4. 10 米高度 72 小时预报与观测数据对比

3.1.2. 二十米高度对比分析

由图 5 可以看出在一月除 TEMF 和 MYNN3 方案误差较大之外其余方案模拟效果较好。4 月的 GBM 方案模拟的误差最大。9 月、12 月模拟效果较差。

由图 6，从一月来看，QNSE 方案的模拟效果最好，MYNN3 方案的误差最大。在 2 月 TEMF 方案和 MYNN3 方案误差最大。3 月的十种参数化方案模拟结果比较集中且均高于实际气温。四月的十种参数化方案也都高于实际气温。五月除了 QNSE 方案误差较大以外其余方案模拟效果较好，六月情况类似。7 月的十种参数化方案模拟结果均高于实际气温，其中 BouLac 方案的误差最大。8 月、12 月模拟效果较差。

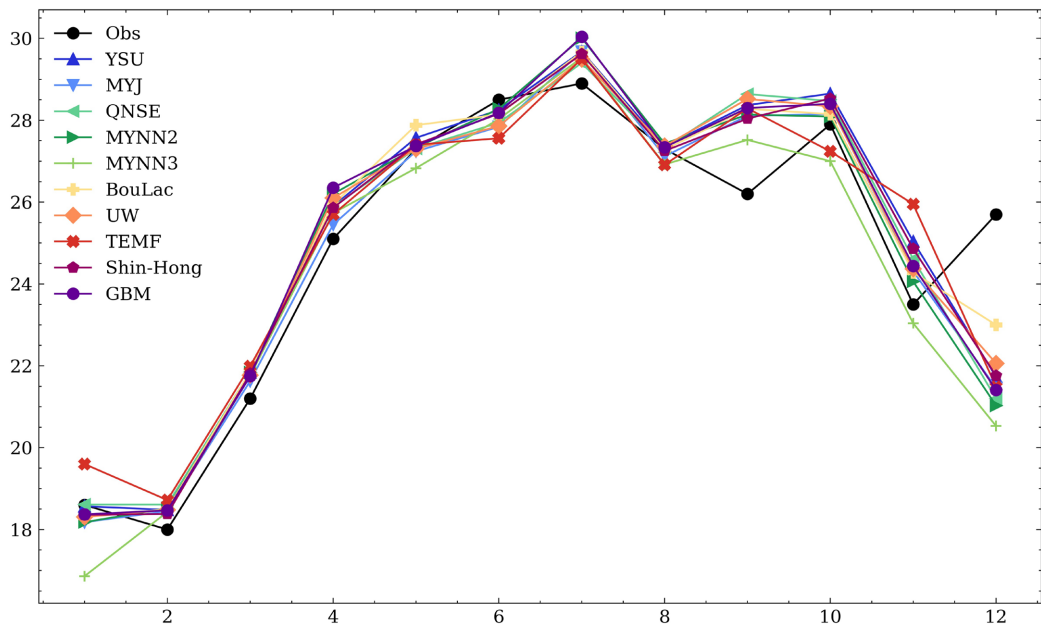


Figure 5. Comparison of the 24-hour forecast and observation data at the height of 20 meters

图 5. 20 米高度 24 小时预报与观测数据对比

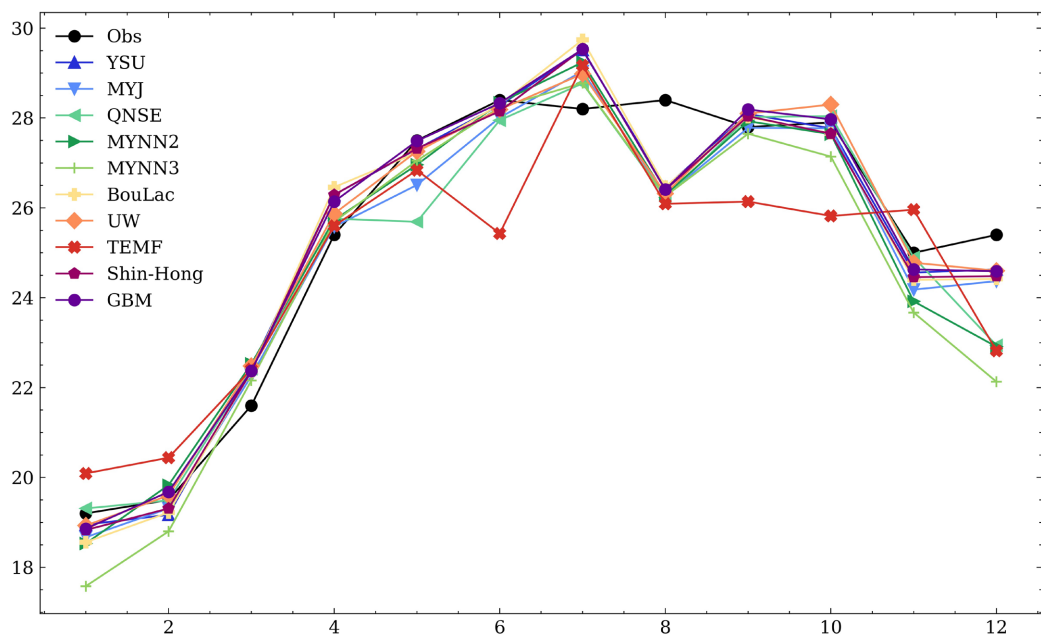


Figure 6. Comparison of the 48-hour forecast and observation data at the height of 20 meters

图 6. 20 米高度 48 小时预报与观测数据对比

由图 7，从一月来看 QNSE 方案模拟效果最好。2 月和 3 月相似十种参数化方案模拟结果都高于实际气温。4 月十种方案模拟的结果与实际观测气温接近。10 月、12 月模拟效果较差。

3.1.3. 五十米高度对比分析

从图 8 中可以看出在 1 月只有 TEMF 和 MYNN3 方案的误差最大。2 月、3 月和 4 月的情况相似，十种方案模拟的结果较为接近且都高于实际观测气温。4 月、7 月、9 月、12 月模拟效果较差。

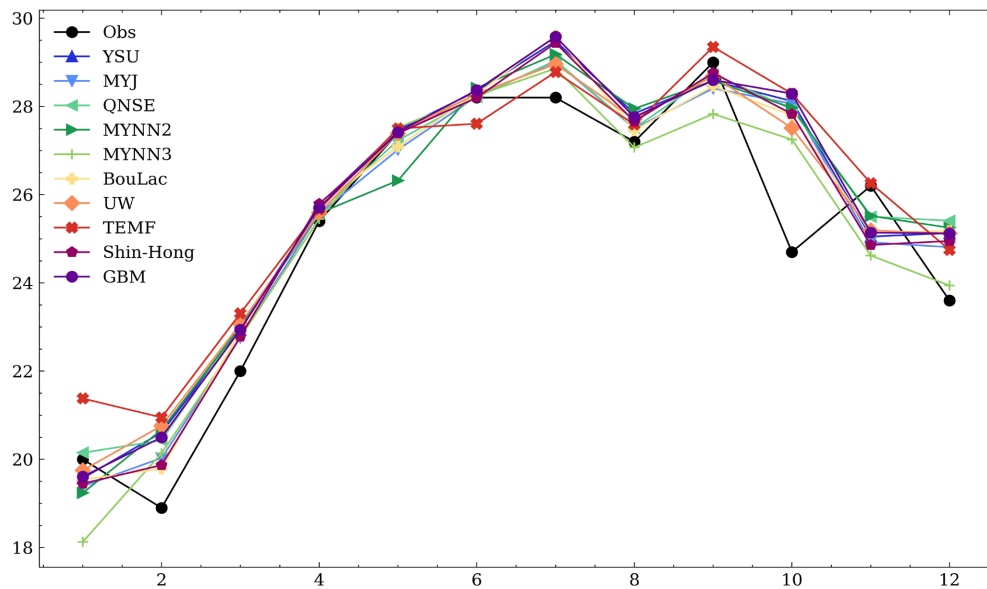


Figure 7. Comparison of the 72-hour forecast and observation data at the height of 20 meters
图 7. 20 米高度 72 小时预报与观测数据对比

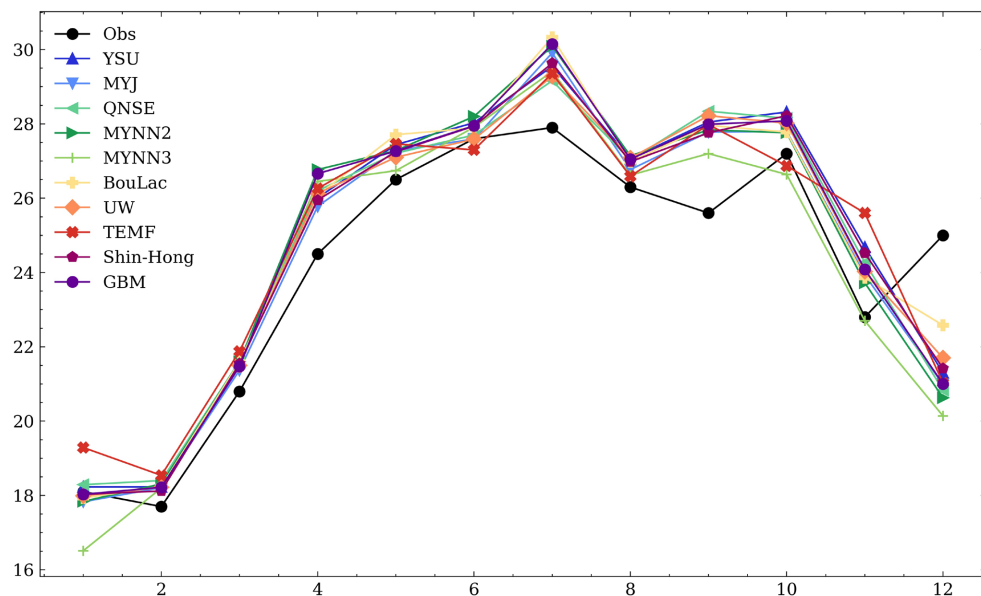


Figure 8. Comparison of the 24-hour forecast and observation data at the height of 50 meters
图 8. 50 米高度 24 小时预报与观测数据对比

由图 9，一月 QNSE 方案模拟效果最好。2 月 MYNN3 方案和 TEMF 方案误差较大。3 月和 4 月情况接近，十种方案模拟的结果都高于实际观测气温。5 月 TEMF 方案的模拟效果最好，QNSE 方案的模拟效果最差。6 月除了 TEMF 方案误差最大之外，其余九种方案误差相近。8 月 BouLac 方案模拟效果最好，TEMF 方案模拟效果最差。9 月 MYNN3 方案的模拟效果最好，TEMF 方案的模拟效果最差。10 月 TEMF 方案误差较大。11 月和 10 月的情况相似。7 月、12 月模拟效果较差。

由图 10 在一月，QNSE 方案的模拟效果最好。2 月、3 月和 4 月情况相似，十种方案模拟的结果都高于实际观测气温。5 月 MYJ 方案的模拟效果最好。6 月 TEMF 方案的模拟效果最好。8 月和 9 月只有

MYNN3 方案模拟的结果低于观测气温, 其他九种方案模拟结果近似且都高于实际气温。11 月只有 TEMF 方案模拟的结果高于观测气温。1 月、7 月、10 月、12 月模拟效果较差。

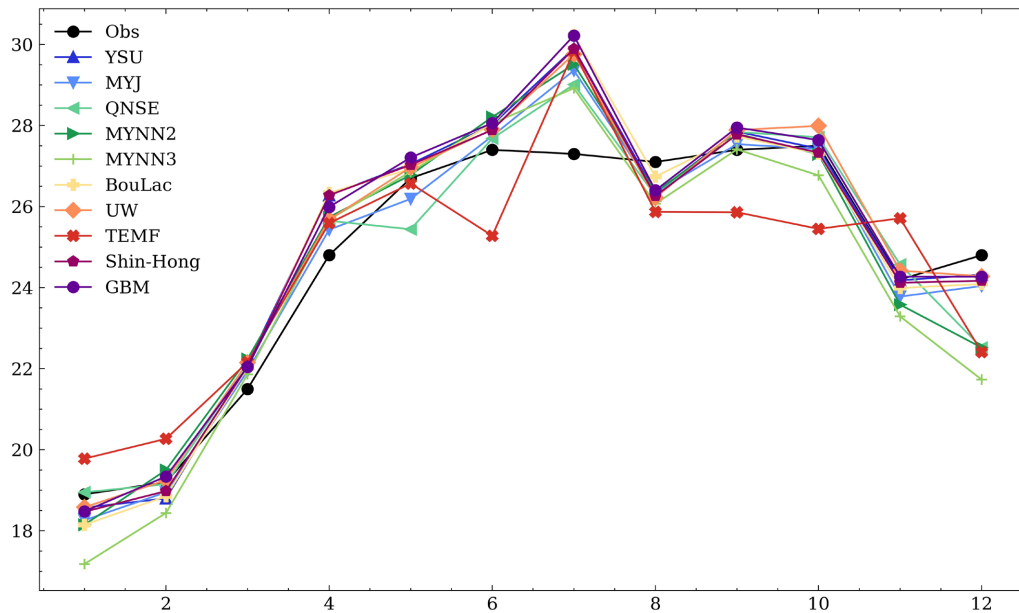


Figure 9. Comparison of the 48-hour forecast and observation data at the height of 50 meters
图 9. 50 米高度 48 小时预报与观测数据对比

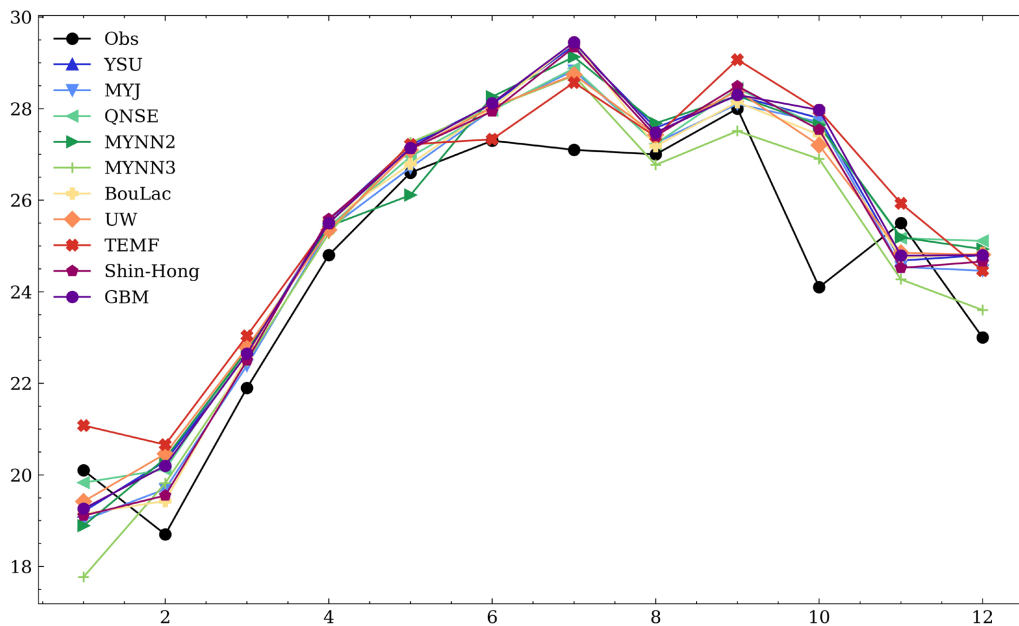


Figure 10. Comparison of the 72-hour forecast and observation data at the height of 50 meters
图 10. 50 米高度 72 小时预报与观测数据对比

3.1.4. 七十米高度对比分析

由图 11, 1 月只有 TEMF 和 MYNN3 方案的误差最大。2 月至 5 月期间十种方案模拟的结果较为接近且都高于实际观测气温。从图中来看, 4 月、7 月、9 月、12 月模拟效果较差。

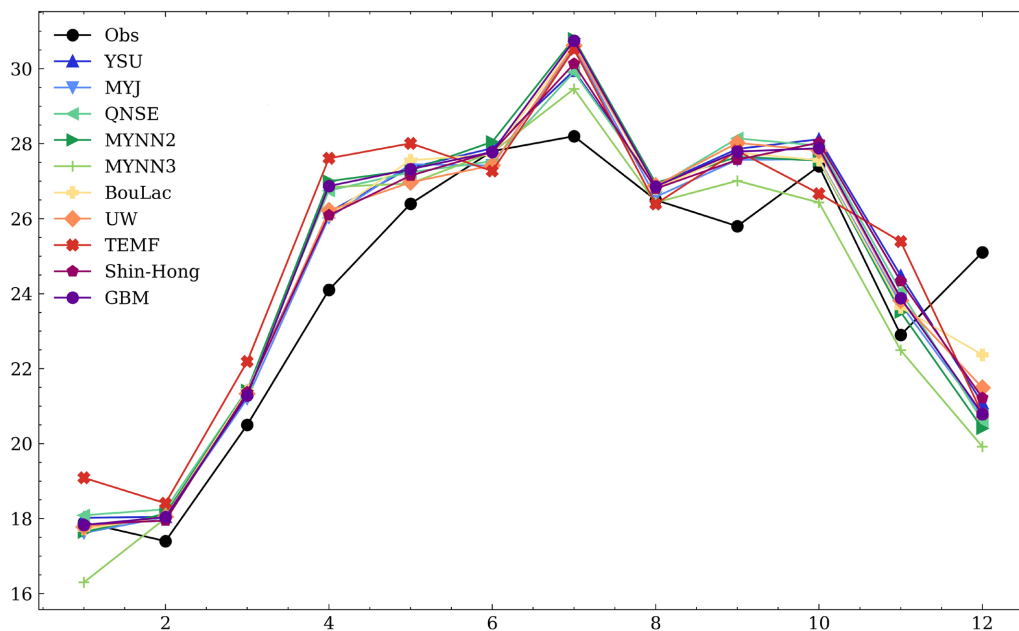


Figure 11. Comparison of the 24-hour forecast and observation data at the height of 70 meters

图 11. 70 米高度 24 小时预报与观测数据对比

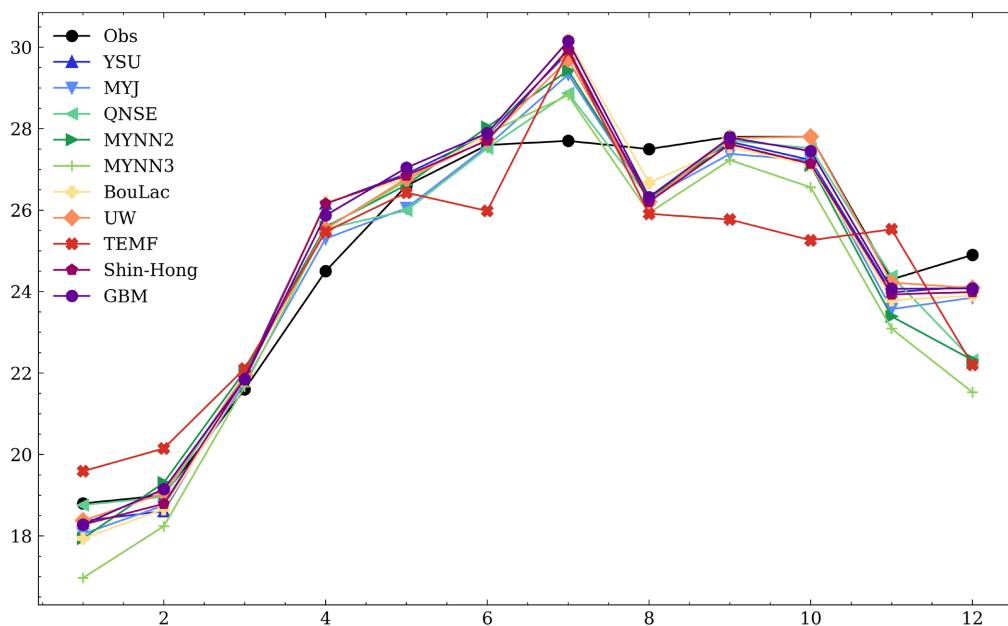


Figure 12. Comparison of the 48-hour forecast and observation data at the height of 70 meters

图 12. 70 米高度 48 小时预报与观测数据对比

由图 12 可以看出一月 QNSE 方案模拟效果最好，MYNN3 方案模拟的结果误差最大。3 月模拟效果最好，十种方案结果都相近。9 月和 10 月类似方案模拟结果近似。11 月除 TEMF 方案模拟的结果明显高于实际气温外，其余方案模拟结果近似。12 月十种方案模拟的结果都低于实际观测气温，其中 MYNN3 方案的误差最大。

从图 13 中看出 2015 年 1 月 QNSE 方案模拟效果最好。2 月 TEMF 方案的误差最大，BouLac 方案模

拟效果最好。8月 MYNN3 方案的误差最大但不超过 1°C 。9月 Shin-Hong 方案模拟的效果最好，误差最小。11月 TEMF 方案误差最小，模拟的效果最好。7月、10月、12月模拟效果较差。

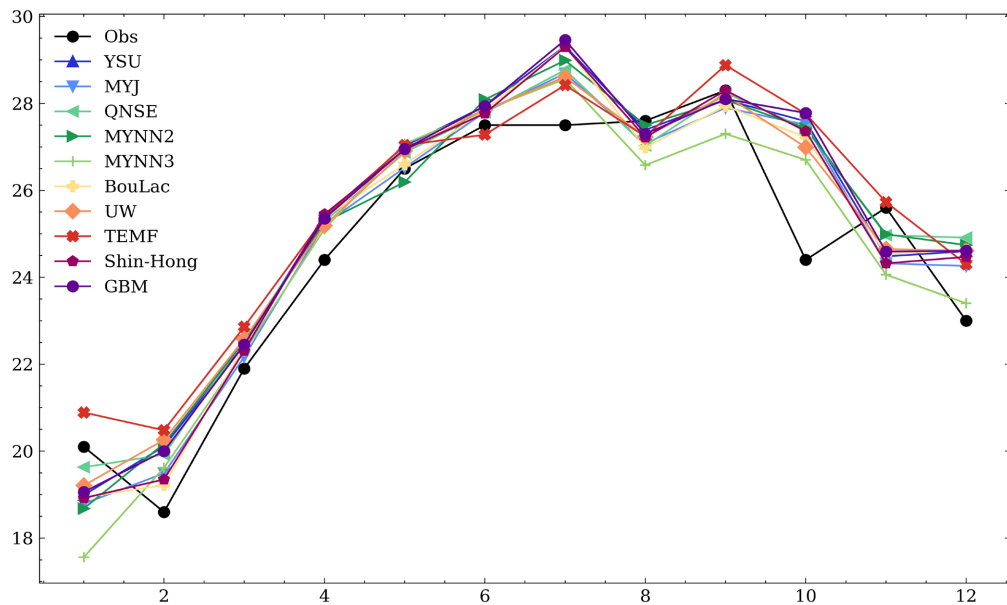


Figure 13. Comparison of the 72-hour forecast and observation data at the height of 70 meters
图 13. 70 米高度 72 小时预报与观测数据对比

3.1.5. 九十米高度对比分析

由图 14 一月只有 TEMF 和 MYNN3 方案的误差最大。2 月至 5 月 TEMF 方案的模拟结果明显高于其他方案以及观测值。11 月只有 MYNN3 方案模拟的气温低于实际气温。4 月、7 月、9 月、12 月模拟效果较差。

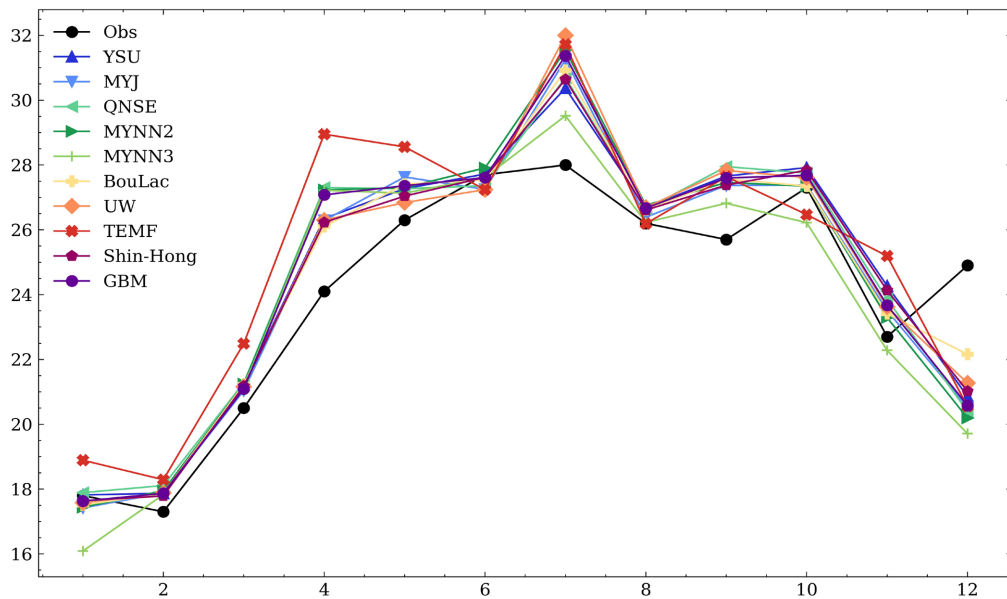


Figure 14. Comparison of the 24-hour forecast and observation data at the height of 90 meters
图 14. 90 米高度 24 小时预报与观测数据对比

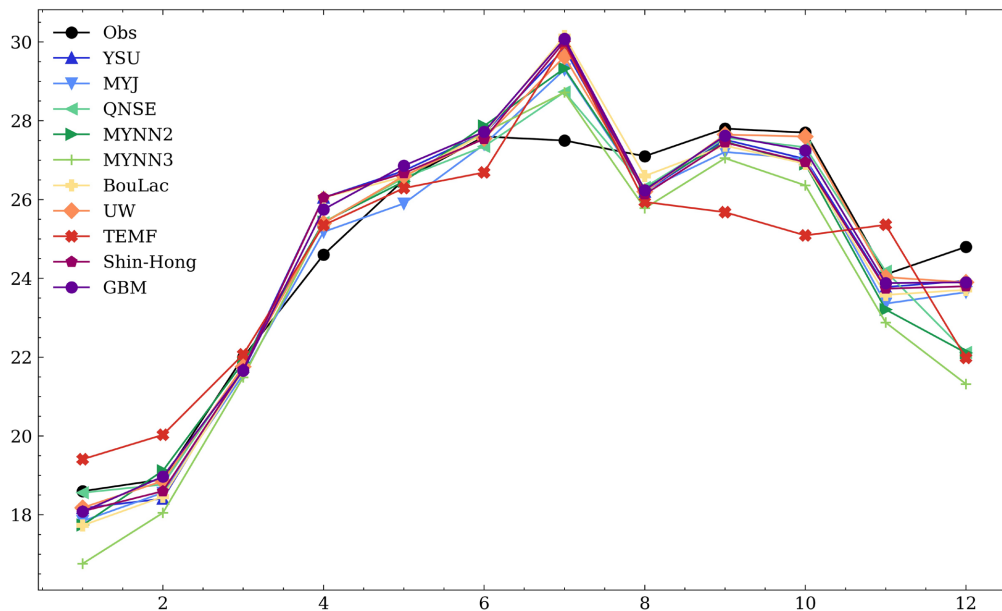


Figure 15. Comparison of the 48-hour forecast and observation data at the height of 90 meters
图 15. 90 米高度 48 小时预报与观测数据对比

由图 15，2 月 TEMF 方案误差最大，其他方案模拟的结果相近。3 月和 5 月的十种方案模拟的效果都较好，与实际气温很接近。6 月 TEMF 方案误差最大，其他方案模拟的结果相近。9 月和 10 月相似，TEMF 方案的误差最大，且观测气温都高于模拟气温。1 月、7 月、10 月、12 月模拟效果较差。

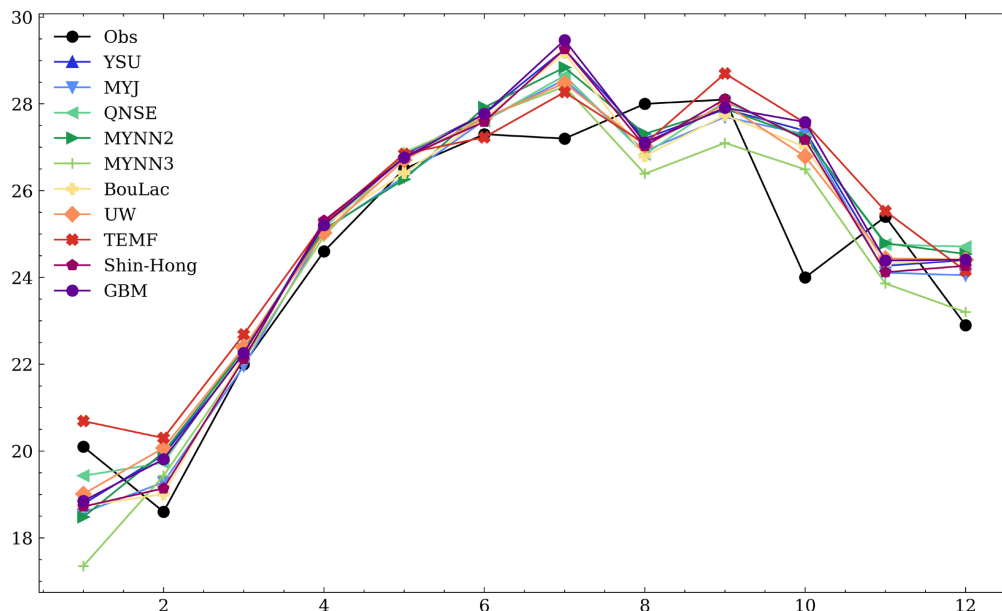


Figure 16. Comparison of the 72-hour forecast and observation data at the height of 90 meters
图 16. 90 米高度 72 小时预报与观测数据对比

由图 16，2 月十种边界层参数化方案的结果都高于观测值，TEMF 方案误差最大，BouLac 方案误差最小，模拟的效果最好。3 月和 5 月模拟的效果都好。4 月十种方案模拟的结果略高于实际气温且较为集

中, 误差较小。6月 TEMF 方案误差最小, 模拟的效果最好。9月 MYNN3 方案的误差最大。1月、7月、10月、12月模拟效果较差。

3.2. 误差分析

Table 2. RMSE statistic for 10 m height
表 2. 10 米高度 RMSE 统计值

边界层 参数化方案	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	MYNN3	BouLac	UW	TEMF	Shin-Hong	GBM
24 小时 RMSE (°C)	1.4656	1.4046	1.5807	1.5477	1.6537	1.1272	1.3644	1.6634	1.3872	1.5062
48 小时 RMSE (°C)	0.8209	0.8617	1.1349	1.111	1.3453	0.9035	0.7667	1.6474	0.8497	0.8151
72 小时 RMSE (°C)	1.4417	1.3075	1.37	1.4253	1.1698	1.3016	1.2952	1.5488	1.2851	1.4647

由表 2 可以看出在 10 米高度 24 小时预报中 BouLac 方案的均方根误差值最小, 模拟效果最好, TEMF 方案的均方根误差值最大, 模拟效果最差。48 小时预报中 UW 方案模拟效果最好, TEMF 方案模拟效果最差。72 小时预报中 MYNN3 方案的模拟效果最好, TEMF 方案的均方根误差值最大, 模拟效果最差。

Table 3. RMSE statistic for 20 m height
表 3. 20 米高度 RMSE 统计值

边界层 参数化方案	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	MYNN3	BouLac	UW	TEMF	Shin-Hong	GBM
24 小时 RMSE (°C)	1.4558	1.4175	1.5744	1.5622	1.6931	1.1116	1.3535	1.6441	1.3831	1.5137
48 小时 RMSE (°C)	0.805	0.845	1.1143	1.1178	1.387	0.8956	0.7272	1.6664	0.8403	0.7922
72 小时 RMSE (°C)	1.3458	1.2215	1.2469	1.3402	1.1755	1.2135	1.1857	1.3868	1.1981	1.3669

由表 3 可以看出在 20 米高度 24 小时预报中 BouLac 方案的均方根误差值最小, 模拟效果最好, MYNN3 方案的均方根误差值最大, 模拟效果最差。48 小时预报中 UW 方案模拟效果最好, TEMF 方案的模拟效果最差。72 小时预报中 MYNN3 方案模拟效果最好, TEMF 方案模拟效果最差。

Table 4. RMSE statistic for 50 m height
表 4. 50 米高度 RMSE 统计值

边界层 参数化方案	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	MYNN3	BouLac	UW	TEMF	Shin-Hong	GBM
24 小时 RMSE (°C)	1.6343	1.5715	1.6997	1.779	1.7344	1.4218	1.4788	1.8025	1.54	1.7286
48 小时 RMSE (°C)	0.9635	0.7651	0.9985	1.0788	1.2702	1.049	0.878	1.5804	0.9608	1.0093
72 小时 RMSE (°C)	1.5448	1.365	1.4178	1.5129	1.3173	1.4044	1.3464	1.5176	1.424	1.5689

由表 4 在 50 米高度 24 小时预报中 BouLac 方案的均方根误差值最小, 模拟效果最好, TEMF 方案模拟效果最差。48 小时预报中 MYJ 方案模拟效果最好。72 小时预报中 MYNN3 方案的均方根误差值最小, 模拟效果最好, GBM 方案的均方根误差值最大, 模拟效果最差。

Table 5. RMSE statistic for 70 m height

表 5. 70 米高度 RMSE 统计值

边界层 参数化方案	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	MYNN3	BouLac	UW	TEMF	Shin-Hong	GBM
24 小时 RMSE (°C)	1.6615	1.6916	1.8204	1.9037	1.8798	1.4273	1.6092	2.1453	1.5819	1.8235
48 小时 RMSE (°C)	0.9404	0.8093	0.9644	1.1118	1.4003	1.024	0.8041	1.6468	0.9748	0.9466
72 小时 RMSE (°C)	1.3752	1.2278	1.2417	1.3209	1.2774	1.2464	1.1729	1.3124	1.2727	1.4039

由表 5 可以看出十种方案在 70 米高度 24 小时预报中 BouLac 方案的均方根误差值最小, 模拟效果最好, MYNN2 方案的均方根误差值最大, 模拟效果最差。48 小时预报中 UW 方案的模拟效果最好。72 小时预报中 UW 方案的均方根误差值最小, 模拟效果最好。48 小时总体 RMSE 值和 24 小时、72 小时相比较小, 48 小时的模拟效果比 24 小时和 72 小时好。

Table 6. RMSE statistic for 90 m height

表 6. 90 米高度 RMSE 统计值

边界层 参数化方案	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	MYNN3	BouLac	UW	TEMF	Shin-Hong	GBM
24 小时 RMSE (°C)	1.7249	1.8433	1.9791	2.0498	1.9555	1.4836	1.8498	2.5558	1.6626	1.9504
48 小时 RMSE (°C)	0.9243	0.831	0.9276	1.0948	1.4214	1.0296	0.7682	1.6219	0.9848	0.9286
72 小时 RMSE (°C)	1.4196	1.2979	1.2856	1.3547	1.3655	1.312	1.205	1.3187	1.3421	1.4678

由表 6 可以看出在 90 米高度 24 小时预报中 BouLac 方案的模拟效果最好。48 小时预报中 UW 方案的均方根误差值最小, 模拟效果最好。72 小时预报中 UW 方案的模拟效果最好。

Table 7. Five height and three forecast time limit RMSE total value

表 7. 五种高度三种预报时效 RMSE 总值

边界层 参数化方案	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	MYNN3	BouLac	UW	TEMF	Shin-Hong	GBM
RMSE (°C)	19.5233	18.4603	20.356	21.3106	22.0462	17.9511	17.8051	25.0583	18.6872	20.2864

从表 7 中可以看出十种方案的 RMSE 总值中 UW 的值最小, 模拟效果最好。BouLac 方案 RMSE 总值和 UW 方案接近, 模拟效果相近。TEMF 方案的 RMSE 总值最大, 模拟效果最差。因此, 建议海南文昌地区可以采用 UW 方案进行气温预报。

4. 结论

本文基于 WRF 模式，利用 10 种边界层参数化方案对海南文昌的近地层气温开展了模拟实验。通过与地面测风塔观测数据进行对比，从预报时效和垂直高度两个方面对模拟结果进行了分析，主要结论如下：

模式对气温的模拟能力存在季节差异，整体来讲，各方案在春夏季的模拟效果优于秋冬季，其中 12 月的模拟结果与实况偏差最大，模拟效果最差。

各方案对气温模拟效果的差异相对较小。具体来看，十米高度 24 小时、48 小时、72 小时预报时效模拟能力较强的方案分别是 BouLac、GBM 和 MYNN3；二十米高度 24 小时、48 小时、72 小时预报时效模拟能力较强的方案分别是 BouLac、UW 和 MYNN3；五十米高度 24 小时、48 小时、72 小时预报时效模拟能力较强的方案分别是 BouLac、MYJ 和 MYNN3；七十米高度 24 小时、48 小时、72 小时预报时效模拟能力较强的方案分别是 BouLac、UW 和 UW；九十米高度 24 小时、48 小时、72 小时预报时效模拟能力较强的方案分别是 BouLac、UW 和 UW。

(3) 总体来说，UW 方案与实况的偏差最小，模拟效果最好，而 TEMF 方案偏差最大，模拟效果最差。建议海南文昌地区在对气温进行预报时可以使用 UW 方案。

参考文献

- [1] 孙文奇, 李昌义. 数值模式中的大气边界层参数化方案综述[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(3): 11-19.
- [2] 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.
- [3] Hu, X.M., Nielsen-Gammon, J.W. and Zhang, F.Q. (2010) Evaluation of Three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **49**, 1831-1844.
<https://doi.org/10.1175/2010JAMC2432.1>
- [4] Zhang, D.L. and Zheng, W.Z. (2004) Diurnal Cycles of Surface Winds and Temperatures as Simulated by Five Boundary Layer Parameterizations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **43**, 157-169.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0157:DCOSWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0157:DCOSWA>2.0.CO;2)