

# 边界层参数化方案对文昌近地层风速模拟的影响

赵子荟, 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29日; 录用日期: 2023年4月28日; 发布日期: 2023年5月8日

## 摘要

为了研究边界层参数化方案对文昌近地层风速模拟的影响, 本文选用美国国家环境中心终分析资料FNL (Final Operational Global Analysis)作为模式的背景场资料, 应用WRFV4.2.1模式10种边界层参数化方案(YSU, MYJ, QNSE, MYNN2, MYNN3, BouLac, UW, TEMF, Shin-Hong和GBM), 对文昌近地层2015年每月前三天的风速进行数值模拟, 检验评估了它们对不同高度层风速的预报能力。结果表明: MYNN2方案和MYNN3方案在低层的风速模拟效果较好, UW方案、GBM方案和BouLac方案在高层风速模拟效果较好, TEMF方案风速模拟效果最差, 且总体来看10个方案在70 m和90 m高度层的风速模拟效果更好。

## 关键词

风速, WRF模式, 边界层参数化方案, 模拟试验

## Influence of Boundary Layer Parameterization Scheme on Wind Speed Simulation near Surface in Wenchang

Zihui Zhao, Yulei Qi

Faculty of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information and Technology, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 29<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 28<sup>th</sup>, 2023; published: May 8<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to study the influence of boundary layer parameterization scheme on the wind speed simulation of Wenchang near-surface layer, this paper selects the Final Operational Global Analysis

(FNL) data of the National Environmental Center of the United States as the background field data of the model, and uses 10 boundary layer parameterization schemes of WRFV4.2.1 model (YSU, MYJ, QNSE, MYNN2, MYNN3, BouLac, UW, TEMF, Shin-Hong and GBM) to numerically simulate the wind speed of Wenchang near-surface layer in the first three days of each month in 2015. Their ability to forecast wind speeds at different altitudes was tested and evaluated. The results show that the MYNN2 scheme and MYNN3 scheme have better wind speed simulation effect at the low level, the UW scheme, GBM scheme and BouLac scheme have better wind speed simulation effect at the high level, and the TEMF scheme has the worst wind speed simulation effect. In general, the wind speed simulation effect of the 10 schemes at 70 m and 90 m levels is better.

## Keywords

Wind Velocity, WRF Model, Boundary Layer Parameterization Scheme, Simulated Test

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

位于对流层下部的行星边界层作为地面与大气之间的交换带和过渡带,它不仅对低层的气象要素产生重要影响,在垂直输送下其对高层大气也产生影响[1]。位于大气边界层底部的近地层很薄,约为数十米厚,风速随高度呈对数分布。近地层参数化是数值模式一个重要部分,也是研究大气边界层问题的一个重要部分,整层大气的能量平衡和垂直结构几乎由近地层方案计算的水汽和热量的通量决定,它不仅为湍流在边界层方案中的传播提供了重要的下边界条件,而且对大气湍流边界层的发展以及云的发射和降水等物理过程也有重要的影响[2]。但是湍流运动属于次网格尺度的运动,模式很难分辨,因此需要进行参数化处理。边界层参数化方案作为数值模式的一个重要组成部分[3],为边界层方案中湍流通量的传输提供了重要的下边界条件。

目前国内许多专家学者都曾利用 WRF 模式中不同边界层参数化方案对各气象要素进行敏感性试验,屠妮妮[4]等利用 WRF 模式 YSU 方案和 MRF 方案两种边界层参数化方案, RUC 方案、SLAB 方案和 Noah 方案三种陆面过程方案,模拟了 2015 年的四川东部暴雨过程,结果表明模式对 24 h 降水分布有较强预报能力,但对单站小时降水落区及强度的预报能力不足。郑亦佳[5]等利用 WRF 模式的 YSU 方案,并在 YSU 方案加入了两个订正方法,模拟了北京地区的气象要素个例,结果表明订正前后地面温度模拟几乎无差别,地面风速模拟在订正之后效果更好,并得出 UW 地面订正方法适合在北京地区使用。王莹[6]等使用 MM5 方案和 Eta 方案对海南岛一次海风降水过程进行了模拟,结果表明不同的近地层方案对当地的海风和降水特征产生不同的效果。陈炯[7]等利用 WRF 模式中不同边界层参数化方案对 2003 年 7 月江淮暴雨的数值模拟进行比较,结果表明降水的模拟效果较好,雨带分布情况与实况比较一致。王成刚[8]等利用 WRF 模式中 5 种边界层参数化方案,对比分析了晴天及阴天条件下的典型农田下垫面模拟,结果表明晴天和阴天条件下均是 ACM2 方案更具优势。文昌市位于海南省北部,东北南三面临海,海域辽阔,有低矮的丘陵和台地平原,地势由西南内陆向东北沿海倾斜。文昌市属于热带北缘海岸带,具有热带和亚热带气候特点,雨量丰富,但时空分布不均,干、湿季明显,春旱突出,且常年气温较高,从 8 月到 11 月,文昌市经常受到强热带风暴和台风的影响。海风是沿海地区边界层中一种重要的中小尺度局地环流,它主要是由海陆热力性质差异引起的,海风锋面上的海风锋在向内陆推进的过程中经常引起

局地对流天气, 沿海地区的天气和污染物的传播扩散往往与局地海风的发生发展密切相关。虽然国内外关于边界层参数化方案对近地形风场影响的研究并不少见[9], 但关于文昌地区的风场模拟较少, 如果不对文昌地区进行边界层参数化方案的试验, 只靠以往的研究很难选出最优的方案, 因此有必要对文昌地区进行不同的边界层参数化方案数值试验, 从而利用该地区丰富的地面观测风塔观测资料对结果进行评估检验, 以为该地区的风资源预报服务提供参考[10], 有效预防由于海风造成的污染物的扩散及各类灾害, 又能验证 WRF 模拟的参数化方案是否适用于海南地区, 因此研究文昌近地层风速模拟很有必要。本文选择文昌地区作为研究区域, 模拟使用 WRFV4.2.1 版本来研究文昌近地层风速模拟对文昌的气候观测。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 模式介绍

WRF 模式能够合理描述中小尺度天气过程, 是数值模拟研究中常用的模拟工具。WRF 模式为大气运动过程中的各种物理现象建立了一个综合的参数化方案。模式包括微物理过程参数化方案、积云过程参数化方案(与对流活动相关)、辐射方案(与地面长波辐射、太阳短波辐射相关)和边界层相关方案: 近地层方案、行星边界层方案、陆面过程方案等[11]。WRF 模式能够比较令人满意地重建近地表气象要素的主要特征[12]。WRFV4.2.1 的数据同化方法先进、物理过程先进、嵌套能力强大, 尤其在处理对流和中尺度降水方面优势更强。WRF 模式适用范围很广, 既可以用于业务数值天气预报, 也可以用于大气数值模拟研究领域, 包括数据同化的研究、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。因此本次实验采用最新的 WRFV4.2.1 版本, 以美国国家环境中心终分析资料 FNL (Final Operational Global Analysis)作为模式的背景场资料, 用地面测风塔的观测数据作为文昌的实际风速数据, 对文昌地区 2015 年每月前三天的风速开展了模拟研究对比。

### 2.2. 方案设计

模式区域共使用了三重嵌套, 为了减小区域边界对模拟效果的影响, 模拟的中心区域均与边界有很大的距离, 也为了包含更多的背景场资料, 模式最外层区域包含了广大的海洋和陆地区域, 由此可以得到更加准确的预测效果。表 1 为边界层参数化敏感性实验基本设置, 由外层到内层的网格格距分别为 27 km, 9 km, 3 km, 网格点数分别为  $300 \times 200$ ,  $103 \times 103$  和  $115 \times 109$ , 垂直方向上等分为 61 层, 模式层顶 10 hpa。最外层的粗网格积分步长是 300 s, 最内层的细网格积分步长是 18 s。在近地面大气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风速变化过程。模拟时段为 2015 年每月 1 日 08 时至 4 日 08 时, 模式每小时输出一次模拟结果。

调优试验包括模式功能模块和模式物理参数以及微物理参数化方案、积云对流参数化方案、长波和短波辐射方案、近地面层和行星边界层方案。物理过程参数化方案是数值模式的重要组成部分[13], 在数值预报中起着重要作用。物理过程参数化方案的合理选择是数值模拟中的一个基本科学问题。

WRFV4.2.1 中共有 13 种边界层参数化方案可供选择使用, 其中 GFS 方案(3)仅能在与 NMM 动力核心中使用, MRF 方案(99)作为 YSU 的老版本目前基本已经弃用。所以本次采用 10 种参数化方案(YSU, MYJ, QNSE, MYNN2.5, MYNN3, BouLac, UW, TEMF, Shin-Hong, GBM), 10 个方案中, YSU 方案和 Shin-Hong 方案都是非局地闭合方案, 它们在计算各个格点上的脉动通量时考虑了该格点及周边格点的影响[14]。YSU 方案特点是将来自混合层顶夹卷过程的热量通量单独进行处理, 增加了热力自由引起的湍流混合, 降低了动力强迫引起的湍流混合[15]。MYJ 方案为湍流动能方案, 适合于研究精细的边界层结构[16]。QNSE 方案是一个湍流动能方案, 该方案能够保留更为复杂的物理过程[17]。MYNN2.5 方案和 MYNN3 方案都是局地湍流动能闭合方案, MYNN 方案与 MYJ 方案的区别在于 MYNN 方案的混合层厚度更深, MYNN 方案的涡动扩散率比 MYJ 方案大[18]。BouLac 方案也是湍流动能闭合方案, 能够较好

的预报陡峭地形的晴空湍流强度和位置, 同时能够提供湍流动能强度的持续预报[19]。UW 方案和 GBM 方案为局地湍流动能闭合方案, 假设每个格点上的脉动通量完全由该格点上物理量的平均量决定[20]。TEMF 方案特点是结合了湍流和潮湿对流成分[21]。Shin-Hong 方案在平均剖面、分辨率剖面和次网格垂直热输运剖面及其网格尺度依赖性和能谱方面比传统的非局部 K 剖面模型有所改进[22]。模式嵌套最内层关闭积云对流参数化方案。由于每个参数化方案都有其优缺点, 因此我们在了解不同参数化方案对文昌地区风速模拟效果不同的基础上, 总结出一个相对比较适合文昌近地层风速模拟的方案, 并了解不同的参数化方案在此地区对风速模拟效果的影响。

**Table 1.** Basic setup of boundary layer parameterization sensitivity experiment  
**表 1.** 边界层参数化敏感性实验基本设置

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	New Tiedtke
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. 分析方法步骤

本次试验主要研究分为三个部分, 第一个部分为 10 个方案在每月 2 日、3 日和 4 日上午 8 时的风速模拟和均方根误差分析; 第二个部分为 10 个方案在 1 月前三天的每天 24 小时风速模拟和风速均方根误差分析, 在 7 月前三天的 24 小时风速模拟和风速均方根误差分析; 第三部分为 10 个方案 12 个月的每月前三天的 24 小时风速模拟均方根误差平均值分析。详细内容见第 3 章。

## 3. 结果分析

### 3.1. 10 个方案在 12 个月的风速模拟实验结果分析

#### 3.1.1. 10 个方案在每月 2 日上午 8 时的风速模拟值

为考虑季节间的差异, 本次试验主要研究了 2015 年每个月 2 日、3 日和 4 日上午 8 时的风速模拟数据, 层高分别为 10 m、20 m、30 m、50 m、70 m 和 90 m。图 1 是 12 个月每月 2 日上午 8 时的风速模拟折线图, 10 m 高度的风速模拟效果在 10 月 2 日 8 时的 BouLac 方案模拟效果较好, 12 月 2 日 8 时的 MYNN3 方案的风速模拟值和风速观测值接近, 其他月份误差较大; 20 m 高度的风速模拟效果 3 月 2 日 8 时的 MYNN3 方案的风速模拟值和风速观测值接近, 10 月 2 日 8 时的 BouLac 方案模拟效果较好, 12 月 2 日 8 时的 MYNN3 方案的风速模拟值和风速观测值接近, 其余月份均误差较大; 30 m 高度的 3 月 2 日 8 时的 MYNN2 方案风速模拟较准确, 9 月 2 日 8 时除了 MYNN3 方案和 TEMF 方案, 其余方案模拟效果较好, 10 月 2 日 8 时的 BouLac 方案模拟较准确, 12 月 2 日 8 时各个方案的模拟效果较好; 50 m 高度层中 1 月 2 日 8 时的 MYNN2 方案和 MYNN3 方案的模拟效果较好, 2 月的 TEMF 方案和 GBM 方案模拟效果较好, 3 月的 MYNN2 方案模拟效果好, 9 月的 TEMF 方案、QNSE 方案和 Shin-Hong 方案模拟准确, 10

月的 BouLac 方案模拟准确, 12 月的各个方案模拟效果较好; 70 m 高度的 1 月 2 日 8 时的 MYNN2 方案和 MYNN3 方案的模拟效果较好, 2 月每个方案的模拟效果都不错, 3 月的 MYNN2 方案模拟效果好, 9 月的 TEMF 方案和 Shin-Hong 方案模拟准确, 10 月的 BouLac 方案模拟准确, 11 月的 TEMF 方案模拟效果较好, 12 月各个方案模拟效果都不错, 此层高模拟准确性更高; 90 m 高度的风速模拟效果和 70 m 接近。

图 2 为每月 2 日上午 8 时的 6 个层高下边界层参数化方案的均方根误差散点图, 各个方案的误差在 6 个层高都接近, 模拟效果几乎相同。

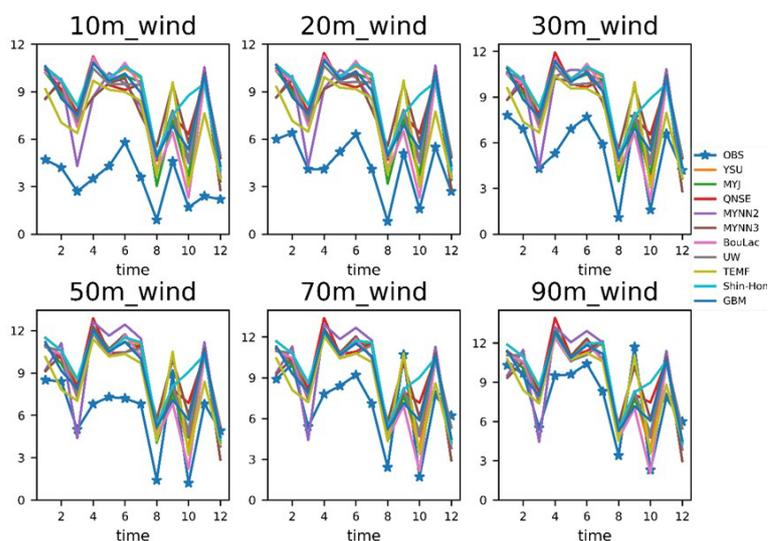


Figure 1. Comparison chart of wind speed simulation of 10 schemes at 8:00 a.m. on the 2nd day of each month for 12 months at 6 height levels

图 1. 6 个高度层在 12 个月每月 2 日早 8 点的 10 个方案风速模拟对比图

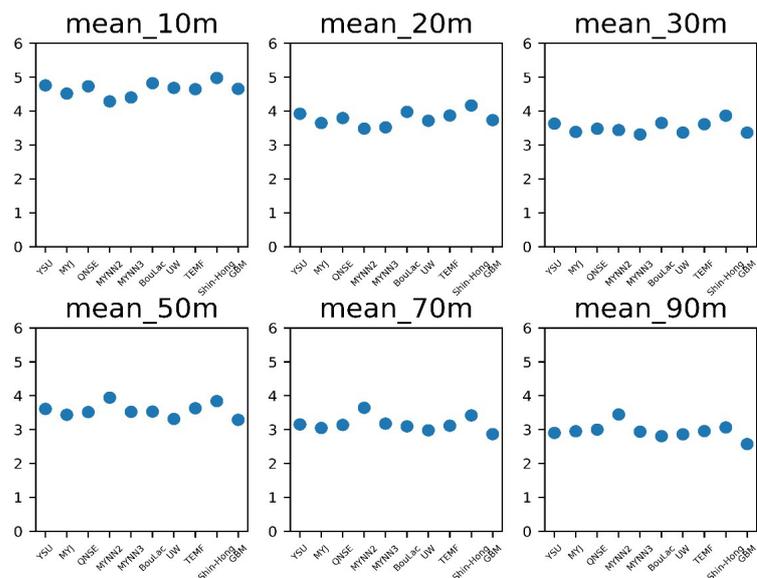


Figure 2. Comparison chart of root mean square error of wind speed simulation for 10 schemes at 9:00 a.m. on the 2nd day of each month for 12 months at 6 height levels

图 2. 6 个高度层在 12 个月每月 2 日早 9 点的 10 个方案风速模拟均方根误差对比图

### 3.1.2. 10个方案在每月3日上午8时的风速模拟值

图3是12个月每月3日上午8时的风速模拟折线图, 10 m 高度层中5月和8月3日8时各个方案的风速模拟值和风速观测值接近, 10月的BouLac方案模拟接近, 其余月份模拟效果较差; 20 m 高度层中3月3日8时的QNSE方案的风速模拟值和风速观测值接近, 5月、6月和8月的各个方案的风速模拟值和风速观测值都接近, 10月的BouLac方案模拟接近; 其他高度层的模拟效果很好。图4是12个月每月2日上午9时的各个方案的均方根误差散点图, 10 m 高度层的误差最大, 其次是20 m 高度层, 其余高度层误差接近, 各个方案的误差都接近。

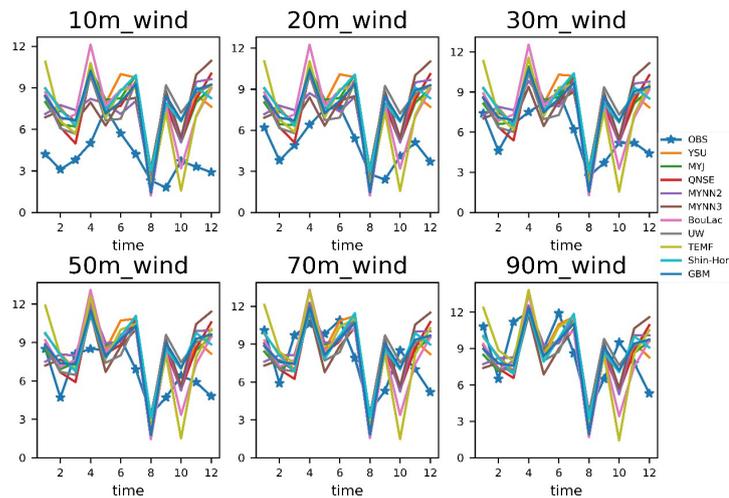


Figure 3. Comparison chart of wind speed simulation of 10 schemes at 8:00 a.m. on the 3rd of each month at 6 levels and 12 months

图3. 6个高度层 12个月每月3日早8点的10个方案风速模拟对比图

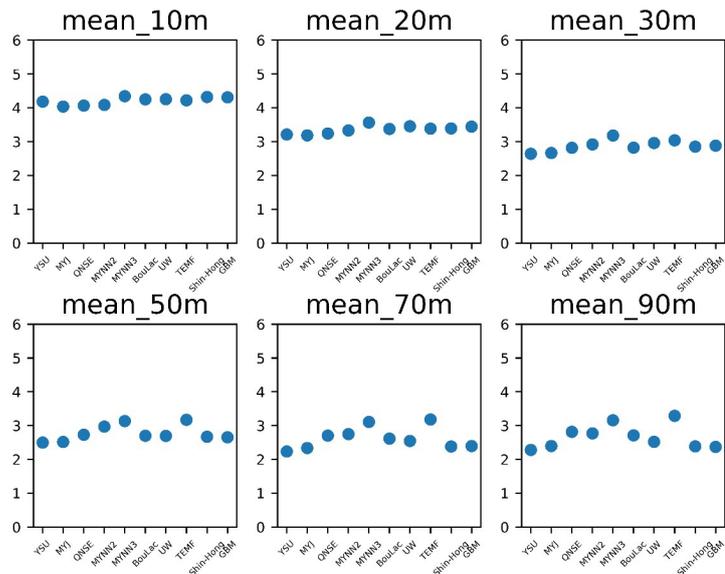


Figure 4. Comparison chart of root mean square error of wind speed simulation for 10 schemes at 8:00 a.m. on the 3rd day of each month for 12 months at 6 height levels

图4. 6个高度层在12个月每月3日早8点的10个方案风速模拟均方根误差对比图

### 3.1.3. 10 个方案在每月 4 日上午 8 时的风速模拟值

图 5 是 12 个月每月 4 日上午 8 时的风速模拟折线图, 由图可知, 除了 YSU 方案在 10 月 4 日 8 时的模拟效果很差外, 各个方案在各个高度层模拟效果都较好。图 6 是 12 个月每月 4 日上午 8 时的风速模拟均方根误差散点图, MYNN2 方案和 MYNN3 方案的误差最大, UW 方案误差最小。

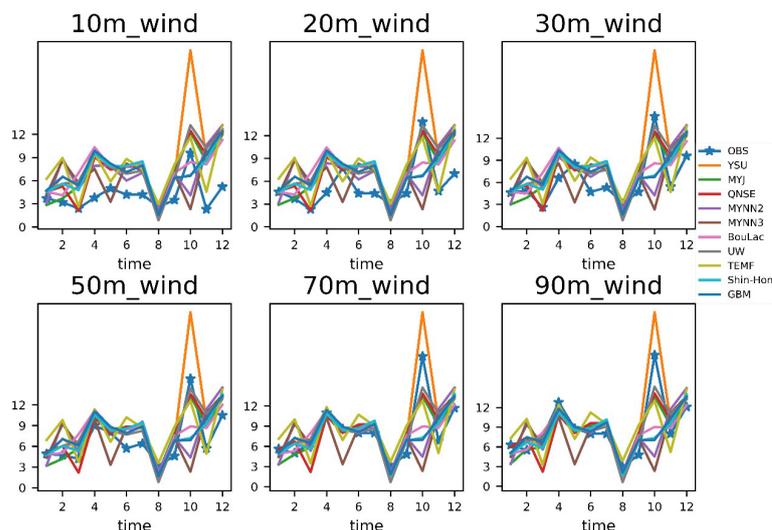


Figure 5. Comparison chart of wind speed simulation of 10 schemes at 8:00 a.m. on the 3rd of each month at 6 levels and 12 months

图 5. 6 个高度层 12 个月每月 3 日早 8 点的 10 个方案风速模拟对比图

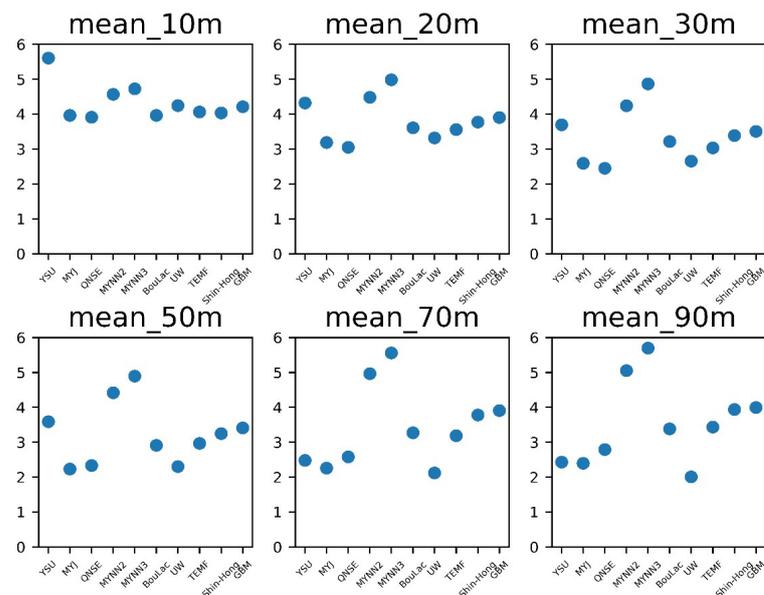


Figure 6. Comparison chart of wind speed simulation of 10 schemes at 8:00 a.m. on the 4th of each month at 6 levels and 12 months

图 6. 6 个高度层 12 个月每月 4 日早 8 点的 10 个方案风速模拟对比图

总体说来, 2 日 8 时和 3 日 8 时的风速模拟效果接近, 各个方案的模拟误差也接近, 4 日 8 时的 UW 方案误差最小, 模拟效果最好, MYNN2 方案和 MYNN3 方案误差最大, 模拟效果最差, 10 m 层高的模

拟效果与其他层高相比最差, 70 m 和 90 m 层高模拟效果较好。

### 3.2. 10 个方案 1 月、7 月的风速模拟结果

#### 3.2.1. 1 月风速模拟对比实验结果分析

取 1 月 1 日上午 9 时至 1 月 2 日上午 9 时 24 小时风速模拟对比, 由图 7 可知, 10 m 高度层中各个方案的风速模拟效果都较差; 20 m 高度层中只有在 1 月 1 日 21 时的 MYNN2 方案和 MYNN3 方案模拟效果接近, 其余方案均误差较大; 30 m 高度层中 MYNN2 方案和 MYNN3 方案和观测值接近的时刻较多, 在 1 月 2 日 1 时观测值和模拟值差距较大; 50 m 高度层在 1 月 1 日 11 时至 21 时模拟效果较好, 各个方案模拟风速相差不大, 在 1 月 2 日 1 时观测值和模拟值差距较大; 70 m 高度层中除了 1 月 1 日 9 时和 11 时, 1 月 2 日的 1 时之外, 其余模拟效果较好, 尤其 YSU 方案、MJY 方案、ACM2 方案和 ONSE 方案模拟值和观测值更接近; 90 m 高度层中 MYNN2 方案和 MYNN3 方案在 1 月 1 日 17 时和 1 月 2 日 1 时模拟值和观测值接近, 其余方案在 1 月 1 日 23 时和 1 月 2 日 5 时、7 时模拟值和观测值接近。

图 8 为 6 个层高下边界层参数化方案的均方根误差散点图, 由图可知 MYNN2 方案和 MYNN3 方案除了在 90 m 高度层外, 均方根误差值较小, 模拟效果较好; UW 方案的均方根误差最小, 其次是 QNSE 方案, MYNN2 方案和 MYNN3 方案均方根误差值几乎相同, 模拟效果接近, YSU 方案、MYJ 方案、BouLac 方案和 TEMF 方案的均方根误差值都相较于其他方案的均方根误差值大, 模拟效果不好。

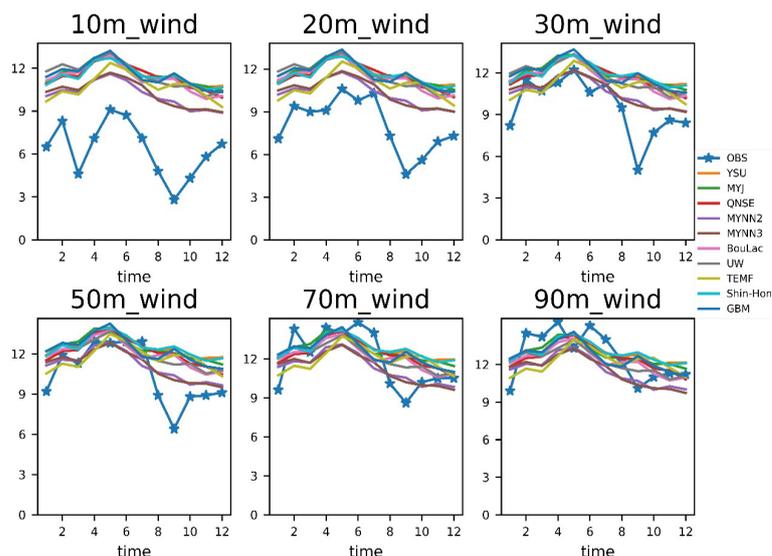
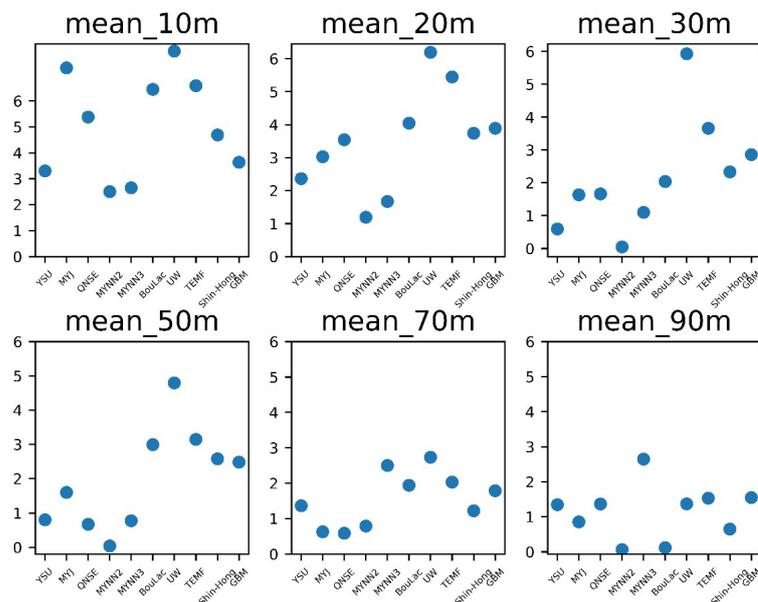


Figure 7. Comparison chart of wind speed simulation of 10 schemes at 6 height levels from 9 am on January 1st to 9 am on January 2nd

图 7. 6 个高度层 1 月 1 日上午 9 时至 1 月 2 日上午 9 时的 10 个方案风速模拟对比图

取 1 月 2 日上午 9 时至 1 月 3 日上午 9 时风速模拟对比。分析得出, 10 m 高度层 3 日 3 时的 MYNN2 方案和 MYNN3 方案模拟效果较好, 其余时间段的各个方案的风速模拟值和风速观测值相差很大; 20 m 高度层, 2 日 11 时、2 日 15 时和 3 日 3 时除了 MYNN2 方案和 MYNN3 方案, 其余方案的模拟效果较好, 3 日 5 时的 UW 方案模拟效果较好; 30 m 高度层各个时间的各个方案模拟效果都较差; 50 m 高度层的 3 日 1 时的 MYNN2 方案和 MYNN3 方案和风速模拟值和风速观测值接近, 3 日 3 时的 YSU 方案和 Shin-Hong 方案模拟效果较好; 70 m 高度层 2 日 9 时和 3 日 1 时各个方案模拟效果较好, 3 日 3 时的 YSU 方案、



**Figure 8.** Comparison chart of root mean square error of wind speed simulation for 10 schemes from 9:00 a.m. on January 1st to 9:00 a.m. on January 2nd at six levels

**图 8.** 6 个高度层 1 月 1 日上午 9 时至 1 月 2 日上午 9 时的 10 个方案风速模拟均方根误差对比图

QNSE 方案、Shin-Hong 方案和 GBM 方案模拟效果较好; 90 m 高度层每个时刻每个方案模拟效果都不错。分析 6 个层高下边界层参数化方案的均方根误差散点图, 总体来说 MYJ 方案的 BouLac 方案误差较大, Shin-Hong 方案误差最小, YSU 方案和 QNSE 方案误差较小; 10 m 高度层误差最大, 其次是 20 m 高度层, 其余高度层误差接近也偏小。

取 1 月 3 日上午 9 时至 1 月 4 日上午 9 时风速模拟对比。分析得出, 10 m 和 20 m 高度层模拟效果较差, 各个方案在各个时刻模拟效果差距很大; 30 m 和 50 m 高度层的 4 日 5 时的 MYNN2 方案和 MYNN3 方案的风速模拟值和风速观测值接近, 其余方案在各个时刻差距都很大; 70 m 和 90 m 高度层 3 日 9 时的 TEMF 方案模拟效果较好, 3 日 13 时、3 日 23 时和 4 日 3 时的 MYNN2 方案和 MYNN3 方案模拟效果好, 4 日 5 时和 4 日 7 时的 YSU 方案、MYJ 方案、QNSE 方案、BouLac 方案、UW 方案、TEMF 方案、Shin-Hong 方案和 GBM 方案模拟效果较好。分析 6 个层高下边界层参数化方案的均方根误差散点图, Shin-Hong 方案误差最小, MYJ 方案、BouLac 方案和 GBM 方案误差稳点且偏小, YSU 方案、QNSE 方案和 UW 方案误差偏大, 10 m 高度层误差最大。

总体来说, 1 月的 Shin-Hong 方案模拟效果较好, MYJ 方案、YSU 方案和 BouLac 方案模拟效果较差, 10 m 高度层模拟效果最差。

### 3.2.2.7 月风速模拟对比实验结果分析

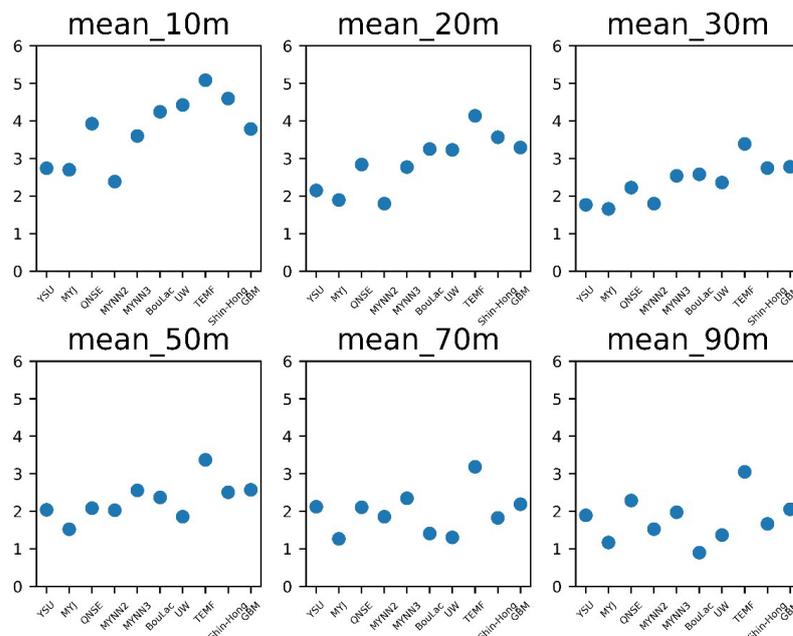
分析 7 月 1 时 9 时至 7 月 2 日 9 时 24 小风速模拟对比, 各个高度层的前 10 个小时的模拟效果较好, 后 14 个小时模拟效果很差。分析 7 月 1 时 9 时至 7 月 2 日 9 时 10 个方案的风速模拟均方根误差, TEMF 方案的误差最小, 其次是 MYNN3 方案, BouLac 方案和 MYJ 方案的误差较大, 90 m 高度层的误差最小, 10 m 高度层的误差最大。根据 7 月 2 时 9 时至 7 月 3 日 9 时风速模拟对比, 90 m 高度层模拟效果最好, 但只有 3 个时间点模拟值和观测值接近, 其余高度层模拟效果都很差。根据 10 个方案的风速模拟均方根误差得到, QNSE 方案和 YSU 方案误差最小, MYJ 方案、UW 方案和 BouLac 方案误差最大, 10 m 高度

层风速模拟误差最大,90 m 高度层风速模拟误差最小。分析 7 月 3 时 9 时至 7 月 4 日 9 时风速模拟对比,发现各个高度层的模拟折线图和观测折线图差距都很大。分析 7 月 3 时 9 时至 7 月 4 日 9 时 10 个方案的风速模拟均方根误差,YSU 方案和 QNSE 方案误差最小,其余方案误差都很大。

总体来说,YSU 方案、QNSE 方案、TEMF 方案和 MYNN3 方案误差较小,MYJ 方案、UW 方案和 BouLac 方案误差较大,10 m 高度层观测值误差偏大,90 m 高度层观测值误差偏小。

### 3.3. 10 个方案的风速模拟误差分析

图 9 是 10 个方案每月 1 日 9 时至 2 日 9 时的风速模拟均方根误差平均值散点图,10 m 高度层中 MYNN2 方案误差最小,其次是 MYNN3 方案,MYJ 方案误差也偏小,QNSE 方案和 TEMF 方案的误差接近,BouLac 方案和 Shin-Hong 方案误差接近,UW 方案和 GBM 方案和 YSU 方案误差最大;20 m 高度层中误差最小的是 MYNN2 方案,第二个是 MYNN3 方案,MYJ 方案和 QNSE 方案误差接近,YSU 方案、BouLac 方案、UW 方案、Shin-Hong 方案和 GBM 方案误差接近,误差最大的是 TEMF 方案;30 m 高度层中误差最小的是 MYNN2 方案,其次是 MYNN3 方案,MYJ 方案和 QNSE 方案误差接近,YSU 方案、BouLac 方案、UW 方案、Shin-Hong 方案和 GBM 方案误差接近,TEMF 方案误差最大;50 m 高度层中 QNSE 方案和 BouLac 方案误差最小,其次是 MYJ 方案、UW 方案和 GBM 方案,接着是 YSU 方案和 Shin-Hong 方案,MYNN2 方案和 MYNN3 方案误差接近,TEMF 方案误差最大;70 m 高度层中 BouLac 方案误差最小,YSU 方案、MYJ 方案、QNSE 方案、UW 方案和 Shin-Hong 方案误差也较小且接近,MYNN2 方案和 MYNN3 方案误差接近,TEMF 方案误差最大;90 m 高度层中 BouLac 方案误差最小,YSU 方案、MYJ 方案、Shin-Hong 方案和 GBM 方案误差接近也较小,QNSE 方案、MYNN2 方案、MYNN3 方案和 UW 方案的误差接近,TEMF 方案的误差最大。



**Figure 9.** Comparison chart of root mean square error of average wind speed simulation from 9 o'clock on the 1st to 9 o'clock on the 2nd of 6 height layers and 10 schemes every month

**图 9.** 6 个高度层 10 个方案每月的 1 日 9 时至 2 日 9 时平均风速模拟均方根误差对比图

图 10 是 10 个方案每月 2 日 9 时至 3 日 9 时的风速均方根误差平均值散点图, 10 m 高度层中 YSU 方案、QNSE 方案和 MYNN2 方案误差最小, BouLac 方案和 TEMF 方案误差最大; 20 m 高度层中 YSU 方案和 QNSE 方案误差最小, BouLac 方案和 TEMF 方案误差最大; 30 m 高度层中 YSU 方案、MYJ 方案、UW 方案和 Shin-Hong 方案误差最小, BouLac 方案和 TEMF 方案误差最大; 50 m 高度层中 UW 方案和 Shin-Hong 方案误差最小, BouLac 方案和 TEMF 方案误差最大; 70 m 和 90 m 高度层中 UW 方案、Shin-Hong 方案和 GBM 方案误差最小, QNSE 方案、MYNN2 方案和 TEMF 方案误差最大。

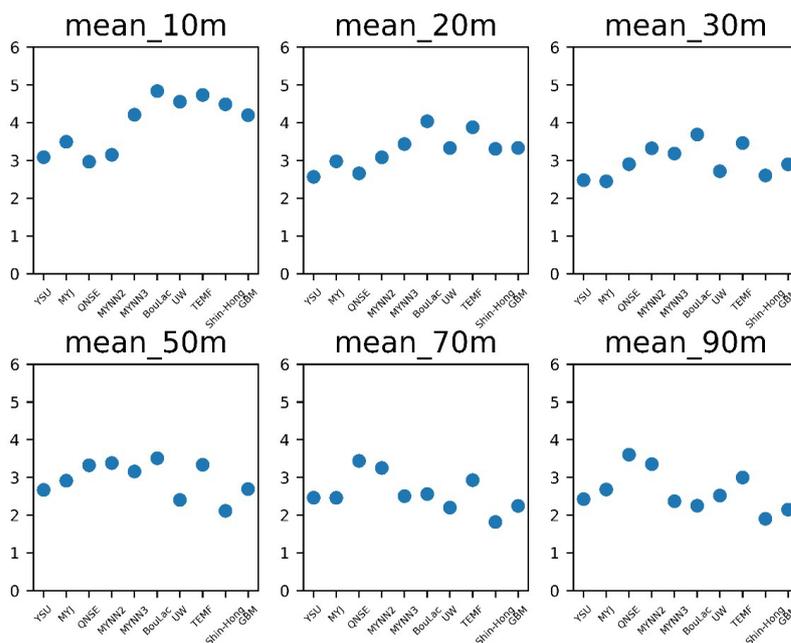


Figure 10. Comparison chart of root mean square error of average wind speed simulation from 9 o'clock on the 2nd to 9 o'clock on the 3rd of 6 height layers and 10 schemes every month

图 10. 6 个高度层 10 个方案每月的 2 日 9 时至 3 日 9 时平均风速模拟均方根误差对比图

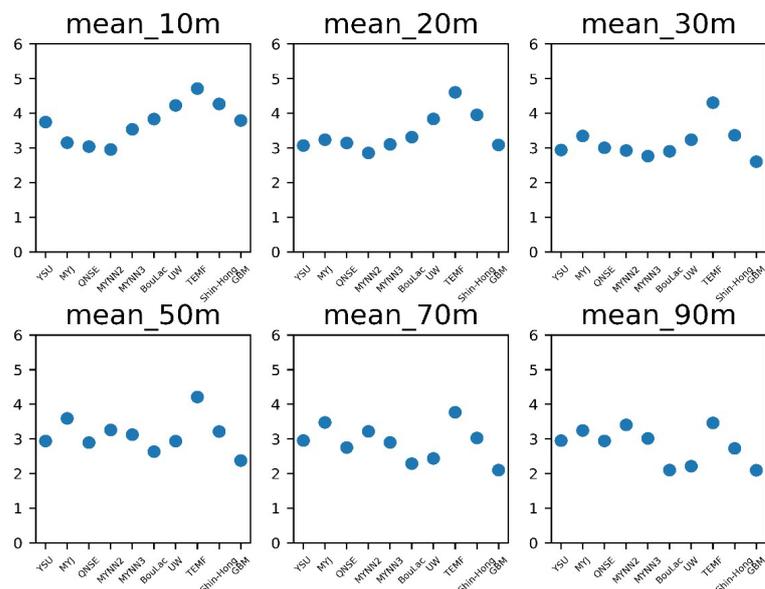
图 11 是 10 个方案每月 3 日 9 时至 4 日 9 时的平均风速模拟均方根误差对比, 10 m 和 20 m 高度层中 QNSE 方案和 MYNN2 方案误差最小, TEMF 方案误差最大, UW 方案和 Shin-Hong 方案误差偏大; 30 m 高度层中 YSU 方案和 GBM 方案误差最小, TEMF 方案误差最大; 50 m、70 m 和 90 m 高度层中 BouLac 方案、UW 方案和 GBM 方案误差最小, TEMF 方案误差最大。

总体来说, TEMF 方案误差最大, GBM 方案、BouLac 方案和 UW 方案误差最小, MYNN2 方案和 MYNN3 方案误差也偏小。10 m 和 20 m 高度层误差较大, 70 m 和 90 m 高度层误差偏小。

#### 4. 结论

本文基于 WRFV4.2.1 模式, 利用 10 种边界层参数化方案, 对海南文昌地区 2015 年 12 个个例的近地层风速开展了数值模拟, 并与地面测风塔的观测结果进行了对比, 主要结论如下:

每月前三天 8 时的预报时效的风速模拟效果相当, 各个方案的模拟误差无明显差别。UW 方案误差最小, 模拟效果最好, MYNN2 方案和 MYNN3 方案误差最大, 模拟效果最差。相对来讲 10m 高度的模拟效果最差, 70 m 和 90 m 高度模拟效果较好。



**Figure 11.** Comparison chart of root mean square error of average wind speed simulation from 9 o'clock on the 3rd to 9 o'clock on the 4th of 6 height layers and 10 schemes every month

**图 11.** 6 个高度层 10 个方案每月的 3 日 9 时至 4 日 9 时平均风速模拟均方根误差对比图

总体来说, 10 m、20 m 和 30 m 高度层模拟效果较差, MYNN2 方案和 MYNN3 方案在这三个高度层中模拟是模拟效果最好的, 且一直稳定, 在其他三个高度层的模拟效果也很稳定, TEFM 方案模拟效果最差, 50 m、70 m 和 90 m 高度层中 UW 方案、BouLac 方案和 GBM 方案模拟效果最好, TEFM 方案模拟效果最差。6 个高度层中 90 m 高度层的模拟效果最好, 10 m 高度层模拟效果最差。

## 致 谢

感谢齐玉磊老师耐心的指导, 本文在选题、撰写、修改以及最终定稿都得到了齐老师的耐心指导, 在初稿完成时, 齐老师不耐烦、斟字斟句的帮忙修改, 提出了许多宝贵的建议。

## 参考文献

- [1] 徐亚钦, 翟国庆, 李国平, 余贞寿, 严红梅. WRF 模式对高影响浙江型台风微物理和边界层参数化方案的优化试验[J]. 热带气象学报, 2017, 33(2): 201-211. <https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.2017.02.006>
- [2] 王莹. 海南岛地形对局地海风降水强度和分布影响的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [3] 仲鹏志, 冶磊, 李煜斌, 等. 不同边界层参数化方案对台风“利奇马”模拟的影响研究[J]. 热带气象学报, 2022, 38(2): 275-289.
- [4] 屠妮妮, 何光碧, 张利红. 不同边界层和陆面过程参数化方案对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(3): 1-8. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2184.2012.03.001>
- [5] 郑亦佳, 刘树华, 缪育聪, 等. YSU 边界层参数化方案中不同地形订正方法对地面风速及温度模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2016, 59(3): 803-815.
- [6] 王莹, 苗峻峰. 近地层参数化对海南岛海风降水模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 32-48. <https://doi.org/10.6038/cjg2018K0551>
- [7] 陈炯, 郑永光, 邓莲堂, 等. WRF 模式中不同边界层参数化方案对 2003 年 7 月江淮暴雨的数值模拟及其比较[C]//新世纪气象科技创新与大气科学发展. 北京: 气象出版社, 2003: 2268-2271.

- [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] Draxl, C., Hahmann, A.N., Peña, A. and Giebel, G. (2014) Evaluating Winds and Vertical Wind Shear from Weather Research and Forecasting Model Forecasts Using Seven Planetary Boundary Layer Schemes. *Wind Energy*, **17**, 39-55. <https://doi.org/10.1002/we.1555>
- [10] 李玉鹏, 王东海, 尹金方. 蒙西地区不同边界层参数化方案的近地层风场预报效果评估[J]. 中山大学学报自然科学版, 2018, 57(4): 16-29.
- [11] 李玉鹏. 模式背景场及边界层参数化方案对近地层风场预报的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
- [12] Tyagi, B., Magliulo, V., Finardi, S., *et al.* (2018) Performance Analysis of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes in WRF Modeling Set Up over Southern Italy. *Atmosphere*, **9**, 272. <https://doi.org/10.3390/atmos9070272>
- [13] 王子谦, 段安民, 吴国雄. 边界层参数化方案及海气耦合对 WRF 模拟东亚夏季风的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(3): 548-562.
- [14] 吴哲珺, 包云轩, 朱霆, 等. 长江流域一次大暴雨过程的低空急流形成和影响机制分析[J]. 热带气象学报, 2019, 35(3): 409-422.
- [15] 张龙. WRF 不同 PBL 方案对 SACOL 冬季近地面气象要素模拟验证[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [16] Janić, Z.I. (2001) Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso Model.
- [17] Sukoriansky, S., Galperin, B. and Perov, V. (2005) Application of a New Spectral Theory of Stably Stratified Turbulence to the Atmospheric Boundary Layer over Sea Ice. *Boundary-Layer Meteorology*, **117**, 231-257. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-6848-4>
- [18] Olson, J.B. and Brown, J.M. (2009) A Comparison of Two Mellor-Yamada-Based PBL Schemes in Simulating a Hybrid Barrier Jet. *23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction*, Omaha, Vol. 13. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:43782503>
- [19] Bougeault, P. and Lacarrere, P. (1989) Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta—Scale Model. *Monthly Weather Review*, **117**, 1872-1890. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1872:POOIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOIT>2.0.CO;2)
- [20] 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.
- [21] Mielikainen, J., Huang, B. and Huang, H.L.A. (2015) Optimizing Total Energy-Mass Flux (TEMF) Planetary Boundary Layer Scheme for Intel's Many Integrated Core (MIC) Architecture. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **8**, 4106-4119. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2438638>
- [22] Shin, H. and Hong, S.Y. (2015) Representation of the Subgrid-Scale Turbulent Transport in Convective Boundary Layers at Gray-Zone Resolutions. *Monthly Weather Review*, **143**, 250-271. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00116.1>