王安庭,苏航,郭爽,等.WRF模式不同边界层参数化方案对沈阳地区近地面气象要素模拟差异评估[J].陕西气象,2024(3):25-30.

文章编号:1006-4354(2024)03-0025-06

WRF模式不同边界层参数化方案对沈阳地区近地面气象要素模拟差异评估

王安庭[1],苏　航[2],郭　爽[3],刘东明[1],孙梦婕[1]

(1.辽宁省生态气象和卫星遥感中心,沈阳　110166;2.辽宁省气象台,沈阳　110166;
3.南京信息工程大学环境科学与工程学院,南京　210044)

摘　要:采用WRF(weather research forecast)模式中三种不同边界层参数化方案(YSU、MYJ、MYNN2)对2022年8月沈阳地区近地面逐时气象要素进行模拟研究,对比分析不同边界层参数化方案在模拟沈阳地区近地面气象要素时所表现出的差异。结果表明:三种边界层参数化方案均能较好地模拟沈阳地区近地面气象要素逐时变化趋势。在模拟近地面风速方面三种边界层参数化方案模拟结果整体偏大;MYJ方案平均偏差最小,相关系数最高,模拟效果最好。三种参数化方案在对近地面温度模拟整体偏低,平均偏差均为负值;YSU方案相关系数最高,可达0.94。在模拟近地面相对湿度方面三种参数化方案模拟结果整体偏低;从相关系数来看YSU方案和MYNN2方案差异性不大。

关键词:WRF;参数化方案;边界层;气象要素

中图分类号:P456.7　　**文献标识码:**A

风速、气温、相对湿度等是常见的气象要素,也是影响农业生产的重要气象因子。设施农业生产对于气象要素依赖程度较高[1-2]。当风速过大时会造成作物倒伏,农田毁坏;当温度过低时亦会对农作物造成影响。因此对近地面气象要素进行模拟研究是有必要的[3-4]。

大气边界层是大气和地表进行能量交换的重要渠道之一,部分灾害性天气现象的形成与边界层息息相关[5]。大气边界层中的动力过程也是陆气相互作用的关键环节,它影响着地球表面和自由大气之间热量和水汽的交换,进而对天气过程及气候变化产生极大影响[6]。同时近地层温度、风速以及相对湿度等也是地-气相互作用中重要的大气下边界信息,体现了地面过程与大气过程之间相互作用的结果[7]。在数值模式中不同边界层参数化方案所表现出的结果具有明显差异。因此在模拟沈阳地区近地面气象要素时,采用不同边界层方案进行模拟是有必要的。于丽娟等[8]利用2006年NCEP FNL再分析资料和气象站点观测资料,评估了中国区域近地面风速WRF的动力降尺度效果。结果表明,WRF模式显著高估近地面风速,在风速较大(小)的区域,WRF模式低(高)估了近地面风速。骆颜等[9]采用WRF(weather research forecast)中尺度天气数值模式,以新疆克塔铁路为研究对象,模拟该线路所在区域2018—2019年冬季的天气状况。结果表

收稿日期:2023-04-04

作者简介:王安庭(1995—),男,汉族,辽宁沈阳人,硕士,助工,主要从事数值模拟研究。

通信作者:苏航(1984—),男,汉族,辽宁沈阳人,博士,高工,主要从事大气物理与大气环境研究。

基金项目:辽宁省气象局年度基金项目(202311);国家重点研发计划资助项目(2018YFC1506500);国家自然科学基金项目(41505120);辽宁省民生科技计划项目(2021JH2/10200024)

明，通过 WRF 模拟，可以得到不同路段的风速概率密度分布。张展硕等[10]采用 WRF 模式中不同边界场与近地面层组合方案对西南地区进行了动力降尺度模拟，结果表明：WRF 模式整体低风速值偏大、高风速值偏小，更高的分辨率对于西南地区地面风速模拟并无较大优化，但高分辨率下风速模拟值也有所增大。李心雨等[11]通过中尺度气象研究与预报模式 WRF 和两种台风经验模型重构了 2018 年影响我国珠江口地区的超强台风“山竹”过程中的气压和风矢量场，结果表明，WRF 模式对气压、风速、风向及风暴增水模拟效果最佳，如果进一步优化该模式的各种参数化方案，可能还能提高其精度。Tuchtenhagen P 等[12]采用 WRF 模式对巴西南部地区进行天气评估研究，结果表明，WRF 模型可以作为评估巴西南部地区风力的工具。

沈阳位于辽宁中部，地势较为平坦，平均海拔约为 30～50 m，山地丘陵集中在东北、东南部，属辽东丘陵的延伸部分。沈阳农作物播种面积较广，近地面气象要素对玉米、大豆、春小麦等粮食作物生产的影响极其重要。利用数值模式模拟近地面气象要素具有重要的意义，但是目前基于 WRF 模式对沈阳地区近地面气象要素模拟评估较少。因此，基于 WRF 模式中不同边界层参数化方案对沈阳地区近地面气象要素进行模拟研究，对比分析不同边界层参数化方案对沈阳地区近地面气象要素的影响，为今后的沈阳地区农业生产提供参考。

1 模式方案设计及观测数据

WRF 模式是由 NCAR/NCEP 共同开发的一种中小尺度数值预报模式，为非静力中尺度模式。WRF 模式被广泛应用于数值天气预报，耦合模式应用、教学，理想隔离实验模拟，参数化过程对比优化实验以及资料同化等多个方面的研究。WRF 包含了先进的数据同化算法，可提高模型模拟精度，采用 Arakawa C 网格，是集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体的模式系统，能够较好地改善中小尺度天气的预报和模拟，并支持多层嵌套。WRF 是一种较为灵活完美的模拟系统，具有高效且可并行运算等优势。

1.1 模拟区域及模拟时间

采用 WRF4.1 模式对沈阳地区进行模拟。模式中心为 123.4°E，41.8°N，水平方向采用单向三重嵌套。第一层网格水平格点数为 117×106，水平格距 25 km；第二层水平格点数为 187×176，水平格距为 5 km；第三层网格水平格点数为 276×271，水平格距为 1 km。模式垂直方向分为 50 层，模式顶 50 hPa；采用兰勃脱投影。模拟区域及网格如图 1 所示。

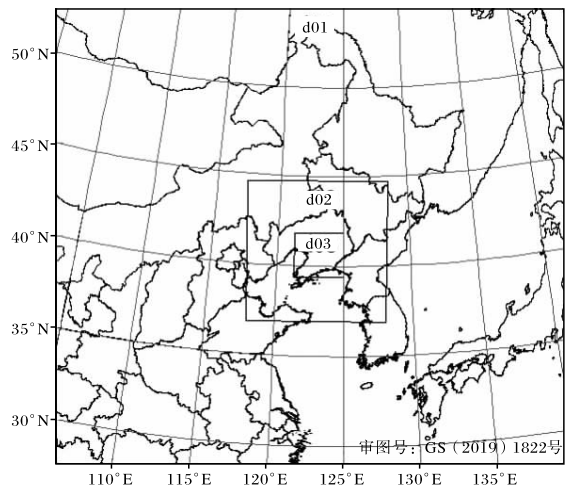

图 1 WRF 模式模拟区域

自 2022 年 8 月 26 日起，500 hPa 高空槽东移至黑龙江北部，配合低层切变线，使辽宁大部分地区出现雷雨天气。随后受冷高压前部影响，陆地气压梯度加大，系统性大风与对流叠加，导致地面风力较大。因此本次实验选取时间段为 2022 年 8 月 21 日至 9 月 1 日。观测数据采用沈阳地区 7 个国家基本气象站的逐时气象观测资料，数据时间范围为 2022 年 8 月 21 日至 9 月 1 日，数据来源于辽宁省气象局。

1.2 ERA5 再分析资料

本文所使用的 ERA5 再分析资料数据来源于欧洲中期天气预报中心网站（https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home），时间分辨率为 1 h，水平分辨率为 0.25°×0.25°，垂直方向分为 37 层。ERA5 再分析资料包含常规气象要素，其中包括 2 m 温度、海平面气压、2 m 相对湿度、10 m 风速等地面要素，以及位势高度、风场、温度和相对湿度等高空要素。

1.3　参数化方案及实验设计

模式采用的物理参数化方案分别为 Morrison two-moment 微物理过程参数化方案[13]、RRTMG 长波物理参数化方案、RRTMG 短波物理参数化方案[14],Kain-Fritsch[15]积云对流参数化方案以及热通量扩散方案。模式模拟中除边界层参数化方案外,其余参数化方案保持一致。边界层参数化方案采用多种方案,分别为 YSU 方案[16],MYJ 方案以及 MYNN2 方案[17]。

1.4　误差分析方法

在模式中通常把 2 m 温度、10 m 风速以及 2 m相对湿度等作为代表性气象要素指标量。将 WRF 模式模拟出的数据采用区域平均法与国家基本气象站观测数据进行对比,并利用平均偏差、均方根误差、相关系数三种评估方法分析不同边界层参数化方案在模拟时所表现出的规律。

本文采用第三重嵌套区域内所有观测站点气象要素的区域平均值与模式模拟相对应格点的气象要素区域平均值进行对比分析[18]。为验证模式模拟结果的准确性,本文采用平均偏差(M_B),均方根误差(R_{MSE})和相关系数(r)评估模式模拟结果[19]。各统计量定义如下。

$$M_B = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(A_{mi} - A_{oi}), \tag{1}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(A_{mi} - A_{oi})^2}, \tag{2}$$

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_{mi} - A_{oi})^2}{\sum_{i=1}^{n}(|A_{mi} - \overline{A}| + |A_{oi} - \overline{A}|)^2}。 \tag{3}$$

其中 A_m 代表模拟值,A_o 代表实测值,$\overline{A}$代表实测平均值,n 为样本数量。

2　模拟结果分析

2.1　地表风速模拟

图 2 为 2022 年 8 月 21 日至 9 月 1 日不同方案模拟风速与观测结果逐小时对比图。三种不同的边界层参数化方案在模拟沈阳地区近地面风速时,变化趋势总体呈一致性,但仍存在差异。如图 3 所示,WRF 模式较为合理地模拟出风速变化,白天实际风速较夜间偏大,午间风速不超过 5 m/s;夜间风速较小,通常不超过 1 m/s。从整体来看,三种不同的边界层参数化方案均显著高估了地面风速,可能原因是模式忽略了城市建筑对风场的减弱作用[20-22]。

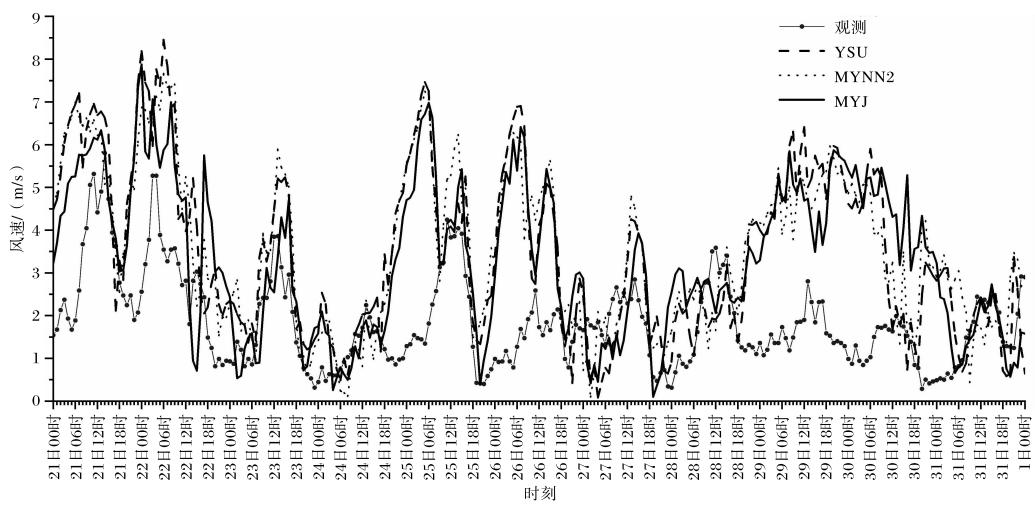

图 2　2022-08-21—2022-09-01 WRF 模式各方案模拟风速与观测结果

图 3 为各方案逐时平均风速的平均偏差。由图 3 可知 YSU 方案模拟地表风速整体偏大,最大偏差高达 6 m/s。从统计量(表 1)来看,整个时间段 MYJ 方案的平均偏差和均方根误差最小,分别为 1.46 m/s 和 2.23 m/s,相关系数最大,说明此次模拟过程中 MYJ 方案相比于其他两种方案模拟效果要好。另外两种方案中,MYNN2 平均偏差最大,均方根误差最小;YSU 方案和 MYNN2

方案相关系数差异不大。另外有研究[23]在使用FNL再分析资料模拟南京地区10 m风速时，相关系数在0.35左右；本文在采用ERA5再分析资料后，在模拟10 m风速方面相关系数提升到0.5左右。尽管不同再分析资料在不同区域适用性不同，ERA5再分析资料仍可能是提升模拟10 m风速精度的因素之一。

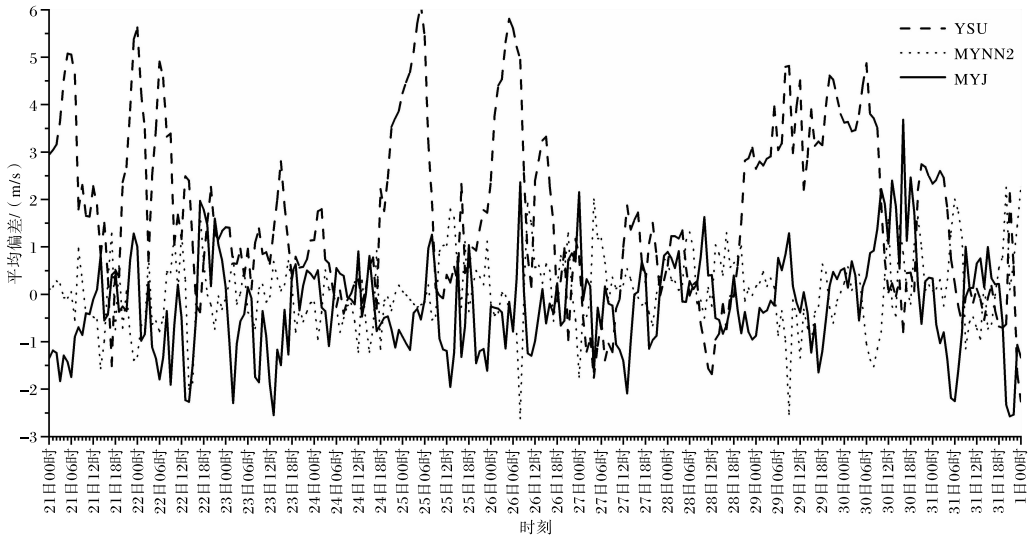

图3 2022-08-21—2022-09-01WRF模式各方案模拟风速平均偏差

表1 WRF模式不同参数化方案下风速模拟的不同统计量对比

统计量	YSU	MYNN2	MYJ
平均偏差/(m/s)	1.64	1.71	1.46
均方根误差/(m/s)	2.44	2.37	2.23
相关系数	0.48	0.49	0.53

2.2 气温模拟研究

由图4可知，三种不同的边界层参数化方案在模拟沈阳地区近地面2 m气温时均能较好地表征该地区的日变化特征：即夜间气温较低，最低气温出现在日出前；白天气温较高，正午前后气温达到最大值。三种边界层方案在白天和夜间对于气温模拟均存在不同程度上的低估，白天模拟结果最大差值在3 ℃左右，夜间MYNN2方案和MYJ方案低估较多，其中2022年8月27日凌晨模拟值较观测值最大差值达到5 ℃左右。

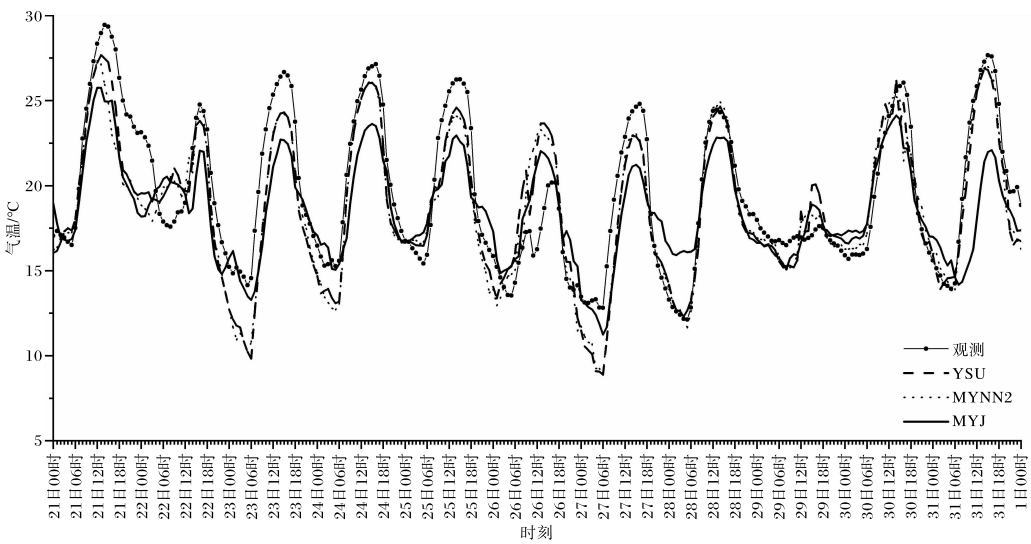

图4 2022-08-21—2022-09-01WRF模式各方案模拟气温与观测结果

由表 2 可知,各方案的平均偏差均为负数,其中 YSU 方案偏差最小,为－0.79 ℃。均方根误差中最小的仍为 YSU 方案,为 1.48 ℃;MYJ 方案最大,为 2.71 ℃。从相关系数来看,YSU 方案较观测值更为接近,相关系数为 0.97;MYNN2 方案次之,为 0.93;MYJ 方案最小,为 0.96。

表 2　WRF 模式不同参数化方案下气温模拟的不同统计量对比

统计量	YSU	MYNN2	MYJ
平均偏差/℃	－0.79	－0.92	－1.04
均方根误差/℃	2.05	2.14	2.71
相关系数	0.94	0.93	0.86

2.3　相对湿度模拟研究

由图 5 可知,三种不同的边界层参数化方案在模拟沈阳地区近地面相对湿度时均表现出相同的变化趋势:即夜间相对湿度较高,相对湿度高值区出现在日出前后;白天相对湿度较低,正午前后相对湿度达到最低值。三种参数化方案在白天和夜间对于相对湿度的模拟均存在不同程度上的低估,00 时到 12 时模拟值较观测值差异性不大,夜间 MYNN2 方案和 MYJ 方案低估较多,其中 2022 年 8 月 28 日凌晨 YSU 方案和 MYNN2 方案模拟值较测量值差异最大,约为 40%左右。

由表 3 可知,各方案的平均偏差均为负数,表明三种方案在模拟时均低估了此次天气过程的相对湿度。其中 MYJ 方案偏差最小,为 3.49。均方根误差中最小的仍为 MYJ,为 16.61;YSU 方案最大,为 17.92。从相关系数来看 MYNN2 方案较观测值更为接近,其相关系数为 0.80;YSU 方案次之,为 0.79;MYJ 方案相关系数最小,为 0.73。

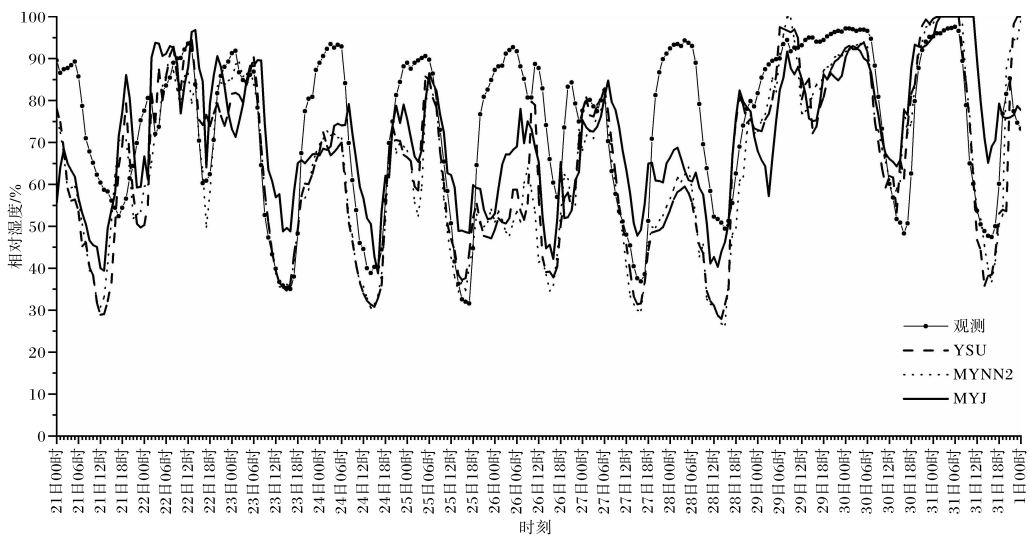

图 5　2022-08-21—2022-09-01WRF 模式各方案模拟相对湿度与观测结果

表 3　WRF 模式不同参数化方案下相对湿度模拟的不同统计量对比

统计量	YSU	MYNN2	MYJ
平均误差/%	－9.82	－10.39	－3.49
均方根误差/%	17.92	17.38	16.61
相关系数	0.79	0.80	0.73

3　结论

采用 WRF 模式中三种不同的边界层参数化方案(YSU、MYJ、MYNN2)对沈阳地区近地面气象要素进行模拟研究,对比分析不同边界层参数化方案模拟沈阳地区近地面气象要素的差异,研究结果如下。

(1)三种边界层参数化方案均较好地模拟出沈阳地区近地面气象要素变化趋势。

(2)在模拟地面风速方面,三种边界层参数化方案模拟结果整体偏大,MYJ 方案相比于 YSU 方案和 MYNN2 方案有更好的模拟效果;三种方案在模拟气温方面整体偏低,YSU 方案相比于其他两种方案具有优势;在相对湿度方面,三种方案

所表现的差异性不大。

(3)研究不同边界层参数化方案在模拟沈阳地区近地面气象要素时所表现的差异,得到了一些初步结论,为继续深入开展系统性的研究奠定基础。但仅基于一次个例进行了模式试验,具有一定的局限性,模式模拟结果不仅与边界层参数化方案有关,同时也与物理过程等密切相关[24]。在后续研究中,将进一步开展批量试验,提炼具有广泛性的结论。此外在边界层参数化方案的季节适用性以及提高模拟地表风速精度等方面也需要更进一步的研究。

参考文献:

[1] 宋倩,毛健,马振兴,等.WRF 模式气象要素模拟精度的验证及订正:以南疆区域为例[J]. 天津师范大学学报(自然科学版),2020,40(1):53-59.

[2] 陈笑娟,陈小雷,李婷,等. 河北省设施农业的抗风能力及大风灾害风险预警[J]. 贵州农业科学,2019,47(7):138-142.

[3] 朱晓华,马士剑,张燕. 南疆喀什地区风灾时空特征及对农业生产的影响[J]. 新疆农垦科技,2021,44(3):63-64.

[4] 姜晓艳,张菁,高杰,等. 沈阳地区农作物生长季热量资源变化特征[J]. 气象与环境学报,2011,27(2):19-24.

[5] 苗世光,蒋维楣. 森林冠层和森林边界层大涡模拟[J]. 地球物理学报,2004,47(4):597-603.

[6] GUO J P, MIAO Y C, ZHANG Y, et al. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data[J]. Atmos Chem Phys, 2016, 16(20): 13309-13319.

[7] 刘娜,张风丽,李志坤,等. 基于 SAR 与 NL 数据的建成区提取及其在 WRF 风场模拟优化中应用[J]. 遥感技术与应用,2022,37(2):488-498.

[8] 于丽娟,尹承美,林应超,等. 中国区域近地面风速动力降尺度研究[J]. 干旱气象,2017,35(1):23-28.

[9] 骆颜,马文勇,孙元春. 高寒地区交通线路风速及风向预测研究[J]. 工程力学,2022,39(增刊 1):195-201.

[10] 张展硕,段炼. WRF 模式不同边界层参数对西南地区风资源模拟[J]. 价值工程,2022,41(14):158-160.

[11] 李心雨,杨昀,李自如,等. WRF 大气模式与台风经验模型在超强台风“山竹”过程重构中的比较分析[J]. 海洋工程,2022,40(4):53-64.

[12] TUCHTENHAGEN P, CARVALHO G G D, MARTINS G, et al. WRF model assessment for wind intensity and power density simulation in the southern coast of Brazil[J]. Energy, 2020, 190: 116341-116341.

[13] HONG S Y, PAN H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model[J]. Mon Wea Rev, 1996, 124(10): 2322-2339.

[14] IACONO M J, DELAMERE J S, MLAWER E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113: D13103.

[15] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 170-181.

[16] 张碧辉,刘树华,马雁军. MYJ 和 YSU 方案对 WRF 边界层气象要素模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2239-2248.

[17] CONIGLIO M C, CORREIA J, MARSH P T, et al. Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations [J]. Weather and Forecasting, 2013, 28(3): 842-862.

[18] 顾沈旦,于丽娟,尹承美,等. WRF 模式对济南地区夏季近地面气象场模拟效果评估[J]. 气象与环境学报,2016,32(1):1-8.

[19] 王继康,张碧辉. 边界层方案对华北一次污染过程模拟的影响[J]. 中国环境科学,2019,39(1):61-71.

[20] HU X M, NIELSEN-GAMMON J W, ZHANG F Q. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF Model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(9): 1831-1844.

[21] 于丽娟,尹承美,何建军,等. 植被覆盖度算法对中国区域 WRF 模拟的影响[J]. 高原气象,2015,34(3):714-721.

[22] 马晨晨,余晔,何建军,等. 次网格地形参数化对 WRF 模式在复杂地形区风场模拟的影响[J]. 干旱气象,2016,34(1):96-105.

[23] 王安庭,李煜斌,赵纯,等. 边界层方案对南京地区 $PM_{2.5}$ 浓度模拟的影响[J]. 中国环境科学,2021,41(7):2977-2992.

[24] 马永永,娄盼星,惠英,等. 基于 WRF 不同边界层方案的陕西气象要素预报检验[J]. 陕西气象,2023(1):8-14.