

Application of Different Boundary Layer Schemes in Numerical Simulation

—A Case Study of a Storm in the Flight Path of UAVs in North China

Shiya Deng, Ruomei Zhong*, Tianya Liu

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: *352708752@qq.com

Received: Sep. 9th, 2019; accepted: Sep. 22nd, 2019; published: Sep. 29th, 2019

Abstract

This paper is based on the WRF (Weather Research and Forecasting Model) mesoscale numerical model, by changing the boundary layer parameterization scheme in the climate model and the vertical layering of the η coordinate system. Simulating and analyzing a storm in the area where the low-altitude public route of UAVs in North China was located on July 19, 2010, quantitative analysis of the accuracy of each climate model data, in order to provide the key technical support for the low-altitude flight meteorological protection of UAVs in North China in the future. Research and analysis show that rainfall simulation results are greatly affected by the choice of boundary layer parameterization scheme, and YSU scheme is more accurate than MRF scheme. The wind field simulation effect is greatly influenced by the vertical resolution of eta coordinate system; the higher vertical resolution simulates the better results.

Keywords

Boundary Layer Schemes, WRF Model, Storm, Vertical Resolution

不同边界层方案在数值模拟中的应用

——以华北地区无人机航路中一次暴雨为例

邓世雅, 钟若媚*, 刘天雅

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: *352708752@qq.com

收稿日期: 2019年9月9日; 录用日期: 2019年9月22日; 发布日期: 2019年9月29日

*通讯作者。

摘要

本文基于WRF (Weather Research and Forecasting Model)中尺度数值模式,通过改变气候模式中的边界层参数化方案和 η 坐标系垂直分层的方式,模拟并分析2010年7月19日华北地区无人机低空公共航路所在区域的一次暴雨,定量分析各气候模式数据的精确度,从而为今后华北地区的无人机低空飞行气象保障提供关键技术支撑。研究分析表明:降雨模拟结果受边界层参数化方案的选择影响较大,YSU方案精确度高于MRF方案;风场模拟效果受 η 坐标系的垂直分辨率影响较大,垂直分辨率越高,模拟效果越好。

关键词

边界层方案, WRF模式, 暴雨, 垂直分辨率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

自信息时代以来,无人机的应用领域被不断发展扩大,除了军事用途外,还包括了电力巡检、农业植保、警用执法、环境监测、地质勘探、森林防火以及影视航拍等民用领域,且其适用领域还在迅速地延伸和拓展,无人机的发展前景越来越受重视。无人机按照不同的使用方向 and 设计要求,可分为军用无人机、民用无人机和消费级无人机三大类[1]。后两者相较于军用无人机,其技术要求、安全性能和服务能力都稍逊,更容易受到温度、气压、湿度、风速和风向等气象要素的影响。其一旦受到影响,可能会给使用者造成巨大的经济损失。因此建立一套完备的低空飞行安全气象保障体系是非常有必要的。

精细化高分辨率的数值天气预报是低空飞行安全气象保障体系的发展趋势,低空飞行气象预报系统将成为该体系的基础手段和核心技术。随着中尺度模式的发展,由NCAR和美国的某些研究部门及大学共同参与开发研究出了新一代中尺度预报模式和同化系统WRF (Weather Research and Forecasting Model)。WRF模式基于最新的计算技术,并且可以方便的选择各种参数化方案,也可以灵活地添加新的参数化方案,自2000年诞生以来,在科研与业务上得到了广泛的应用,并不断地更新发展,不仅具有良好的天气预报水平,而且具有模拟天气情况的能力,拥有非常广阔的应用前景[2],将WRF模式运用于无人机低空飞行航线安全气象保障的系统中,不失为一种有前景的开拓和尝试。

围绕边界层参数化方案对降水影响的问题,国内外研究人员对此开展了丰富大量的研究左志燕[3](2004)在《行星边界层参数化对我国夏季降水的影响及其成因分析》一文中指出不同的边界层参数化方案模拟出差较大的降水发生时间。蔡芩宁[4]等人(2007)《边界层参数化对“雅安天漏”降水数值模拟的影响》着重研究了MRF边界层参数化方案对雨量中心强度和雨区分布的影响。李刚[5]等(2010)在《WRF3.0模式中边界层参数化方案对暴雨预报的影响》指出不同的边界层参数化方案对不同量级降水的影响是不同的。沈勇新[6]等人(2017)在《不同边界层参数化方案对一次梅雨锋暴雨过程湍流交换特征模拟的影响》指出边界层方案的选取对于降水的落区和强度模拟会产生较显著的影响;在降水率及地面要素的模拟上,各方案在降水后期中的模拟差异明显大于降水发生阶段。

风场是大气环流形式的直观体现,对判断重要天气系统和未来天气预测具有重要的指示作用。风对无人机飞行安全的影响主要来自低空风切变,周芯玉[7][8]等通过分析指出,低空急流与低层风垂直切变的发展对于暴雨的发生具有重要的影响,因此对风场的模拟研究显得尤为重要。国内许多学者针对边界层参数化方案对于低空风场的影响进行研究并取得一定成果。李玉鹏[9](2017)在《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》一文中指出各个方案都可以预报低空风场的发展与变化趋势,其中,对10 m风速和70 m风速预报效果最好的分别是YSU参数化方案和ACM2参数化方案,但各方案对10 m风场的预报差异比70 m风场更为明显,并且模拟的风速偏大。穆清晨[10]等人(2017)研究了MYJ、YSU、ACM2三种边界层参数化方案模拟2010年贵州韭菜坪复杂地形条件下的近地层风以检验风速模拟性能。

本次研究拟用WRF中尺度数值模式系统,就华北地区无人机低空公共航路所在区域的一次暴雨进行模拟,定量分析各模式数据的精确度,得到最优参数组合,从而为今后华北地区的无人机低空飞行气象保障提供关键技术支持。

2. 研究区域与方法

华北地区属于暖温带半湿、湿润气候,四季分明,光热资源充足,降水集中夏季,雨热同季。春季多风沙和大风;七月中旬至八月下旬为华北地区雨季,降水强度大且局地性强。华北地区的无人机产业在国内占有重要一席,为华北地区无人机低空飞行提供气象安全保障,降低灾害性天气对其造成的损失是必然要求。本文选择的个例日期是2010年7月19日,该日有一次强降水,可对无人机飞行产生致命的威胁,并且降水过程的天气形势最为复杂,能够最大化的检验模式模拟的真实性和准确性。

本文的研究主要基于WRF-ARW 3.7.1,所选区域选用的物理参数化方案为:Lin等微物理方案、rrtm长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、Monin-Obukhov近地层面方案、Noah陆面过程方案、浅对流Kain-Fritsch积云对流参数化方案。本次模拟使用FNL再分析资料作为背景场和初始场,每6小时更换一次边界条件,中心经纬度为(38.3°N, 117.2°E),水平格距为5.5 km,积分步长30 s。利用不同的边界层参数化方案和垂直分辨率组合进行对比试验,主要研究边界层参数化方案和垂直分辨率对暴雨模拟的影响,定量分析各模式数据的精确度,得到最优参数组合。表1给出了本文的四个实验方案,方案一选用YSU边界层参数化方案,垂直层面为51层;方案二选用YSU边界层参数化方案,垂直层面为30层;方案三选用MRF边界层参数化方案,垂直层面为51层;方案四选用MRF边界层参数化方案,垂直层面为30层。当垂直层面的分层重点考虑1000米以下,当eta坐标垂直层面为51时,对500米以下垂直层进行再次加密。

Table 1. Setting parameters of background field test mode

表 1. 背景场场试验模式参数设置

	方案一	方案二	方案三	方案四
模式分辨率	5 km	5 km	5 km	5 km
格点数	146 × 146	146 × 146	146 × 146	146 × 146
边界层方案	YSU	YSU	MRF	MRF
垂直分层	51	30	51	30
近地层	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov
陆面过程	Noah	Noah	Noah	Noah
短波辐射	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia
长波辐射	rrtm	rrtm	rrtm	rrtm
积云对流	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch
微物理	Lin	Lin	Lin	Lin

2.1. 背景场环流形势

2010年7月19日08时, 西西伯利亚南下的冷空气与西太平洋副热带高压带来的暖湿气流在华北地区相交绥, 多地产生大暴雨。

500 hPa 高空环流形势: 2010年7月18日08时(北京时, 下同)至7月19日08时, 中高纬槽脊东移并发展, 西西伯利亚为低压, 贝加尔湖为高压脊, 黑龙江及其北方地区为低槽, 低槽控制我国东北地区。华北地区为气旋性环流。在高空天气图上, 南下的冷空气, 与副高左侧的西南暖湿气流在华北地区交绥, 为此次降水提供了充足的水汽条件(如图1(a)和图1(b)所示)。

700 hPa 环流形势: 2010年7月18日08时至7月19日08时, 我国中部至华北地区形成一低槽, 贝加尔湖高脊前东北气流引导冷空气南下, 西南气流自孟加拉湾一路北上形成强烈水汽通道与西太平洋高压的暖湿气流一道为华北地区带来源源不断的水汽(如图1(c)和图1(d)所示)。

850 hPa 低空环流形势: 中低层从陕西南东到川东地区切变线的存在及西南低空急流携带充沛水分分为此次强降水过程提供了有利的动力和水汽条件(如图1(e)和图1(f)所示)。

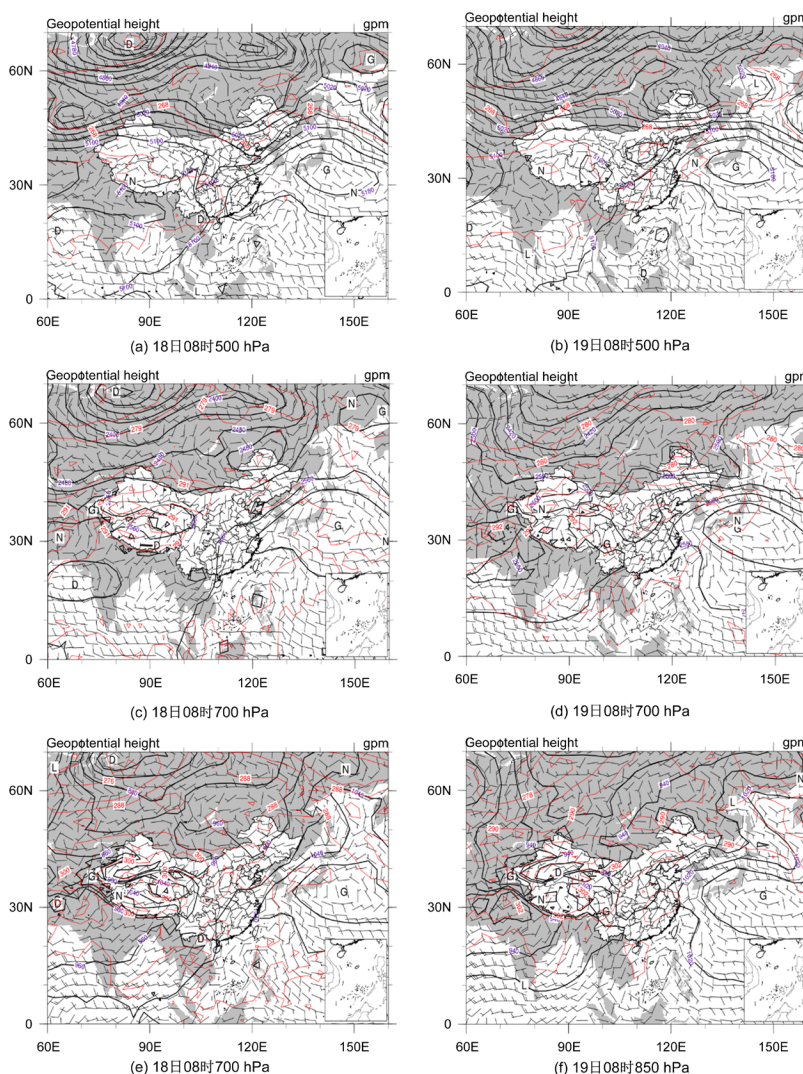


Figure 1. Background field circulation situation from 08/07/18, 2010 to 08/08/19, 2010
图 1. 2010年7月18日08时至2010年7月19日08时背景场环流形势

2.2. 边界层参数化方案的选择

在试验过程中往往会产生逆梯度输送的现象，即水汽从干燥的区域向湿润的区域输送，动量由速度小的区域向速度大的区域传输，以此类推。一般的模式中都采用梯度型运输，没有全面考虑大气湍流运动的特点，无法反映大气湍流运动的复杂性。MRF 方案中加入逆梯度传输项，更加合理的描述大气湍流运动。YSU 方案在 MRF 方案的基础上进行了改进，一定情况下描绘更加真实的边界层情况，新版的 YSU 方案还针对夜间稳定边界层做了设置增加了对陆地和海洋下垫面、白天与夜间的区分。

2.3. 垂直分层的设置

本次试验重点对垂直分层进行加密并检验其对模拟效果的影响。在垂直分层为 30 层的基础上，对高度 200 m 以下每隔 10 m 进行一次加密，400 m 以下每隔 25 m 进行一次加密，1000 m 以下每隔 50 m 进行一次加密。加密之后的垂直分层为 51 层。

3. 研究过程与结果分析

3.1. 降水模拟结果对比

图 2 为 2010 年 7 月 18 日 20:00~19 日 20:00 降水实况，华北地区 24 小时降水呈东北—西南向带状分布特征，强降水中心位于山东省惠民县至河北省黄骅市，降水中心强度超过 150 mm。

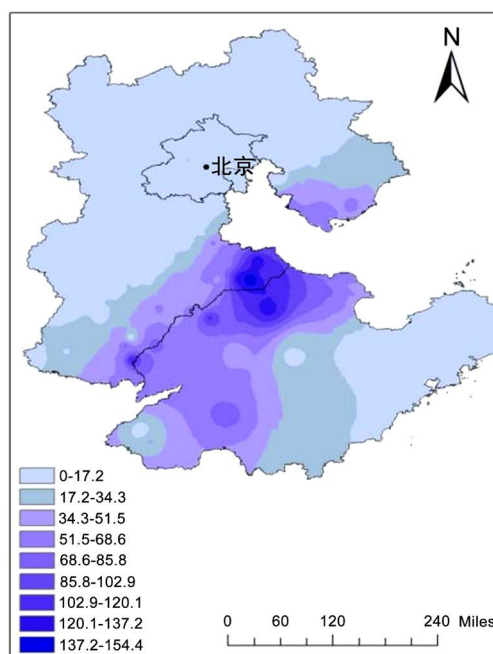


Figure 2. 24 hours of precipitation

图 2. 24 小时降水实况

大型降水对国防和社会主义经济建设关系密切，对无人机飞行也存在严重威胁，为提高模式对降水的模拟效果，提供更准确的降水预报，首先对 24 小时降水进行模拟和分析，图 3 是四种方案 24 小时降水模拟结果。从 24 小时降水模拟的范围来看，4 种方案都较好的模拟了 24 小时累计降水分布的东西宽度与南北走向，各方案模拟结果基本相同，与图 2 实况相比降水落区向西北方向偏移。对于降水强度和中心降水强度模拟结果显示，4 种模式均能体现降水范围内存在强中心，使用 YSU 边界层参数化方案能

更完整地模拟出强降水区域，但总体而言 4 种方案模拟的暴雨范围都比实际偏小；方案二模拟的降水强中心强度较实际值稍偏弱，4 种方案模拟的强度中心均偏东；在强降水中心南部的降水区域，YSU 方案模拟的降水值比 MRF 模拟的降水值更接近于实测值。方案一与方案二、方案三与方案四对比发现，采用 YSU 边界层参数化方案，增加垂直分辨率，模拟的降水强中心范围有所扩大，并且对于降水落区的分辨率提高；而采用 MRF 边界层参数化方案，垂直分层加密并没有特别明显的影响。

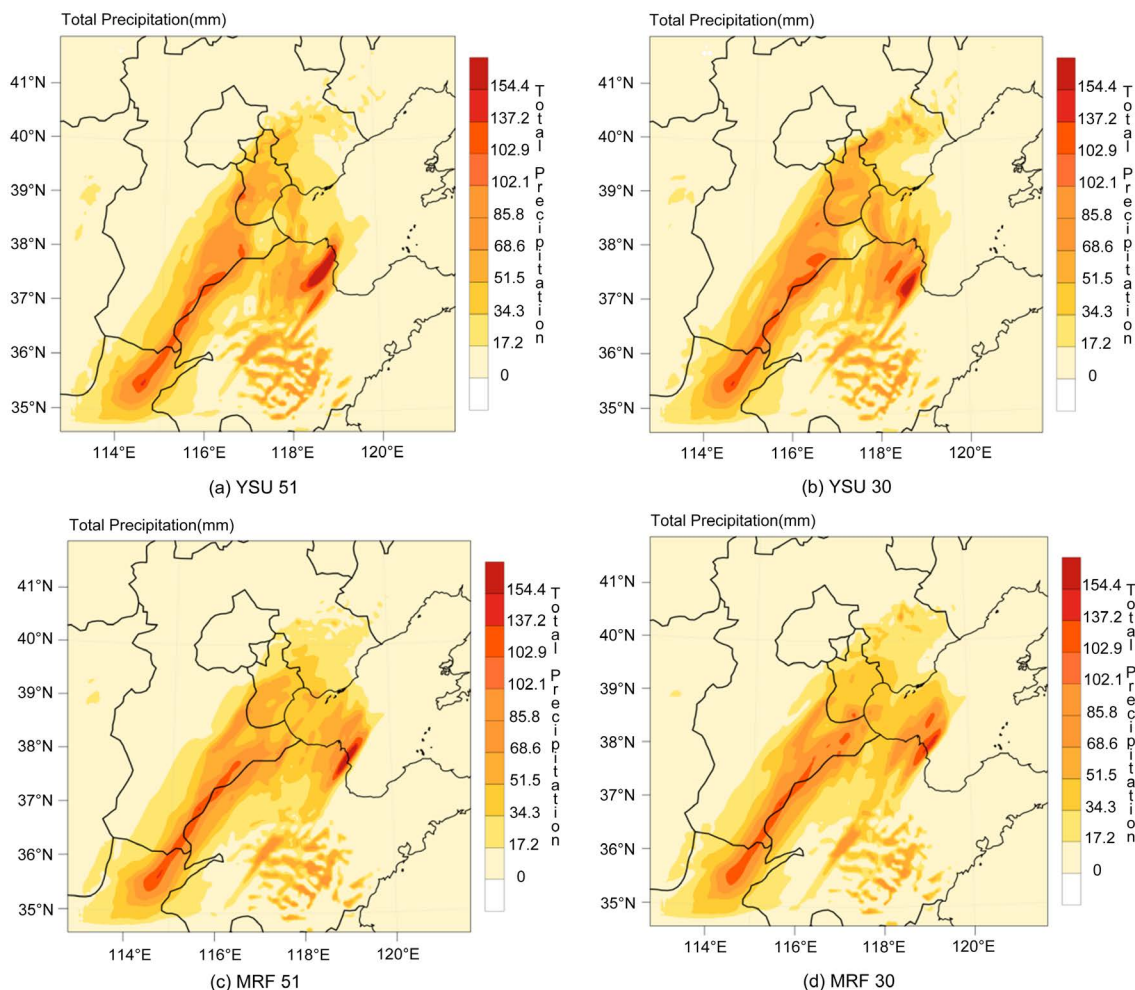


Figure 3. 24-hour precipitation simulation results of four schemes (unit: mm) (a) Scheme 1, (b) Scheme 2, (c) Scheme 3, (d) Scheme 4

图 3. 四种方案 24 小时降水模拟结果(单位: mm) (a) 方案一, (b) 方案二, (c) 方案三, (d) 方案四

总体来说，两种边界层方案都模拟出了降水分布和强降水中心，但使用 YSU 边界层参数化方案模拟降水与实况更为接近。另外，垂直分层加密对降雨模拟的影响在本次试验中对改进降水强中心范围预报有一定作用，但效果不显著。从模拟降水情况来看，YSU 边界层参数化方案的模拟效果明显优于 MRF 边界层参数化的模拟效果。造成这种结果的原因可能是：YSU 方案是非局地 K 理论方案，通过控制方程中加入逆梯度向表示非局地通量，不仅考虑了边界层内简单的局地湍流扩散，还考虑了对流大尺度涡流导致的非局地混合作用和边界层顶的夹卷过程[11] [12]。YSU 方案是对 MRF 方案的改进，相比 MRF 方案，YSU 方案在低层产生更加湿润的大气[13]，在一定程度上缓解了 MRF 方案边界层过干这一问题，使得边界层结构更接近中性，从而更精确的描述了大气边界层中的物理过程。

3.2. 温度场、10 m 风速模拟结果对比

温度和风速是大气能量的不同表现形式，提高对温度场和风速的模拟效果，是更好地对降水过程进行诊断分析和预报的重要基础。为找到温度和风速模拟的最优方案，下面对 4 种方案的模拟结果进行对比分析。

选取模拟试验区域中北京、天津、惠民、黄骅等 4 个站点，采用标准化平均偏差(NMB)、均方根误差(RMSE)与 IOA(一致性指数)评估地面温度和 10 m 风速模拟结果和实测值的吻合度。

$$NMB = \frac{\sum_1^N (C_m - C_0)}{\sum_1^N C_0}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (C_m - C_0)^2}{N}} \quad IOA = 1 - \frac{\sum_1^N (C_m - C_0)^2}{\sum_1^N [|C_m - \bar{C}_0| - |C_0 - \bar{C}_0|]^2}$$

其中， C_m 为模拟值， C_0 为实测值， \bar{C}_0 为实测值平均值， NMB 越小， $RMSE$ 越小， IOA 越接近于 1，模式性能越好。

3.2.1. 温度

图 4 给出了 4 个站点温度模拟值与实测值的日变化曲线，可以看出，四种方案都模拟出了温度的日变化趋势，一般来说，在白天温度较高时采用 YSU 方案的模拟结果更接近实况，而在清晨、傍晚和夜间温度较低时 MRF 方案的模拟效果更好。对比不同地区模拟值与实测值发现：北京地区中午温度模拟值比实况高，其他时间温度模拟值低于实况；天津地区中午温度模拟值偏高，下午偏低，到凌晨时又高于实况；惠民地区中午温度模拟值偏高，凌晨到早晨相反，该地区的温度模拟效果是四个地区中最差的；黄骅地区温度模拟效果最好，模拟值与实况最接近。

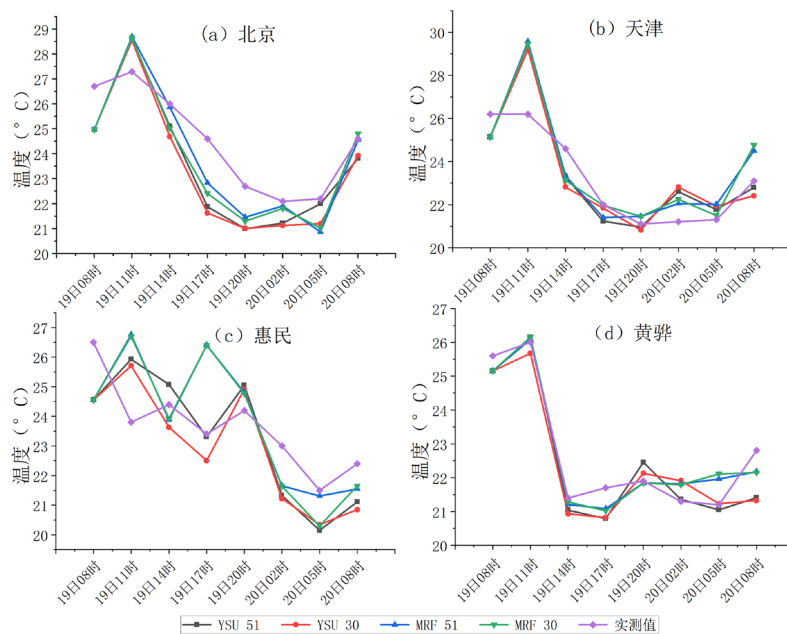


Figure 4. Simulated and measured temperature values of 4 stations (a) Beijing, (b) Tianjin, (c) Huimin, (d) Huanghua
图 4. 4 个站点温度模拟值与实测值 (a) 北京, (b) 天津, (c) 惠民, (d) 黄骅

由表 2 可以看出, 地面温度的模拟结果显示, 对同一地区四种方案的 NMB、RMSE、IOA 三个指数相差不大, 地面温度模拟效果相近。对于不同地区两种边界层参数化方案的模拟效果不同: 北京地区 MRF 方案模拟效果优于 YSU 方案, 两者 IOA 值相差 0.03 左右; 天津地区两种边界层参数化方案的模拟效果基本相同; 惠民地区使用 YSU 方案 IOA 值明显比 MRF 方案提高 0.1~0.2; 黄骅地区采用 MRF 方案的模拟结果略优于 YSU 方案, 两者 IOA 值仅相差 0.01。对于不同的边界层参数化方案, 垂直分层加密影响效果不同: 垂直分层由 30 层加密到 51 层, 采用 YSU 方案的模拟结果 IOA 值提高 0.02 左右; 而采用 MRF 方案, 垂直分层加密对模拟效果没有固定的影响方向, 北京和黄骅地区模拟效果有所提高, 而天津和惠民地区相反。

Table 2. Comparison of temperature simulation results
表 2. 温度模拟结果对比

		北京	天津	惠民	黄骅
方案一	NMB	-0.03	0.01	-0.01	-0.02
	RMSE	1.46	1.35	1.41	0.65
	IOA	0.89	0.90	0.81	0.97
方案二	NMB	-0.05	0.01	0.01	-0.02
	RMSE	1.59	1.45	1.42	0.71
	IOA	0.87	0.88	0.79	0.96
方案三	NMB	-0.03	0.02	0.01	-0.003
	RMSE	1.19	1.49	1.76	0.48
	IOA	0.92	0.88	0.67	0.98
方案四	NMB	-0.03	0.02	0.003	-0.003
	RMSE	1.32	1.50	1.79	0.52
	IOA	0.91	0.89	0.69	0.97

3.2.2. 10 m 风速

10 m 风速的模拟结果精确程度虽有一定的欠缺, 但也具有一定的参考价值。图 5 结果显示, 10 m 风速模拟值不能很好地反映其实际的日变化特征。其中北京和天津地区模拟值与实况呈现出相反的变化特征, 并且北京地区的风速日较差达 8 m/s 左右明显高于实际的风速日较差 1 m/s; 惠民和黄骅地区基本模拟出了风速的日变化特征, 但是模拟值与实况仍存在较大偏差。由表 3 可以看出, 方案三对 10 m 风速模拟的效果最好, 方案二模拟效果最差。垂直分层由 30 层加密到 51 层, 采用 YSU 方案 IAO 提高 0.01~0.06, 采用 MRF 方案时可提高 0.03~0.24。结合四种方案所选择的边界层参数化方案和垂直分层情况, 可以得出: 相同的垂直分辨率情况下, MRF 方案模拟效果优于 YSU 方案; 相同边界层参数化方案的情况下, 垂直分辨率越高, 风速模拟效果越好。

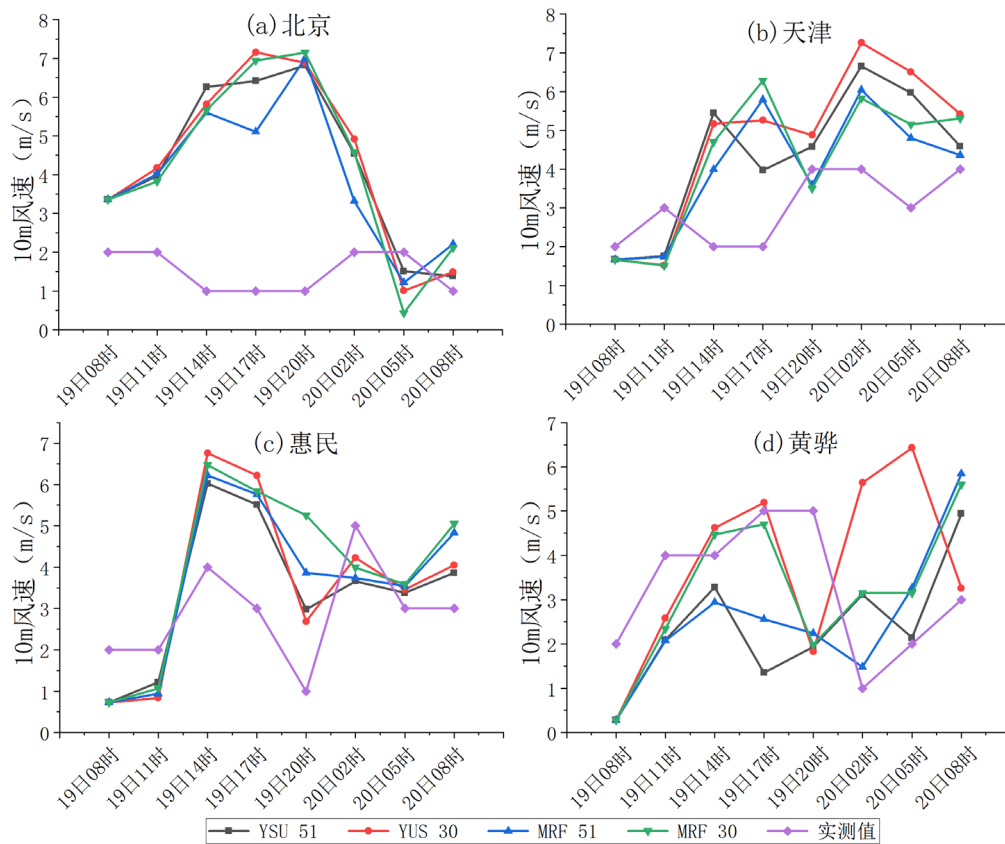


Figure 5. Simulation and measurement of wind speed at 4 stations (a) Beijing, (b) Tianjin, (c) Huimin, (d) Huanghua
图 5. 4 个站点风速模拟值与实测值 (a) 北京, (b) 天津, (c) 惠民, (d) 黄骅

Table 3. Comparison of 10 m wind speed simulation results
表 3. 10 m 风速模拟结果对比

		北京	天津	惠民	黄骅
方案一	NMB	1.85	0.44	0.18	-0.26
	RMSE	3.59	2.06	1.54	2.18
	IOA	0.12	0.48	0.65	0.39
方案二	NMB	1.91	0.57	0.26	0.14
	RMSE	3.74	2.46	1.79	2.6
	IOA	0.06	0.44	0.64	0.36
方案三	NMB	1.65	0.33	0.28	-0.01
	RMSE	3.23	1.86	1.89	1.72
	IOA	0.15	0.66	0.57	0.58
方案四	NMB	1.83	0.41	0.39	0.12
	RMSE	3.71	2.17	2.24	1.86
	IOA	0.12	0.42	0.51	0.52

从 10 m 风速模拟情况看, YSU 方案模拟值与实测值的差异较 MRF 方案更为显著。这是由于 YSU 方案在热力引发的自由对流的状况下, 会增强边界层中的湍流混合作用, 会使得模拟的 10 m 风速值与实测值差异更为显著。从垂直分辨率对模拟效果的影响情况看, 本次试验中垂直分辨率的大小与降水的模拟效果无太大关系, 但对 10 m 风速的模拟结果有影响。其原因可能是: 模式的垂直坐标选用 η 坐标, 气压仅是几何高度 Z 的函数, 并一直持续到模式层顶, 这些 η 坐标面都是水平的, 避免了 σ 坐标模式中陡峭地形条件下水平气压梯度力计算误差过大的问题[14] [15]。 η 坐标系可以很好地描述山脉的形状, 再配之以简单的边界条件, 又可以较好地描述山脉的阻挡作用。所以, 当增加垂直分辨率时, 可以更好的模拟风的运动。

3.2.3. 温度场、10 m 风速空间分布对比分析

温度场和风速场可以直观地反映大气温压场配置, 可用来判断大气斜压性、大气环流形势以及大气能量特征等方面, 进而对天气诊断分析有重要指示意义。提高温度场和风速场的模拟效果, 是做出更准确天气预报的一个前提。根据图 6 地面温度空间分布对比显示, 地面温度的模拟比较贴合实际, 大致反映出高温和低温区域分布特征, 由于分辨率较粗等问题, 如北京等地的局部高温没有得到很好的体现。图 7, 10 m 风速空间分布对比显示, 实况图上山东省惠民县至河北省黄骅市存在气旋式环流, 环流位置与图 2 强降水中心重合。模式模拟出了大致的环流形势, 但气旋式环流中心位于 37°N, 117°E 左右, 位置较实际略有偏移, 风向较实际略有误差。

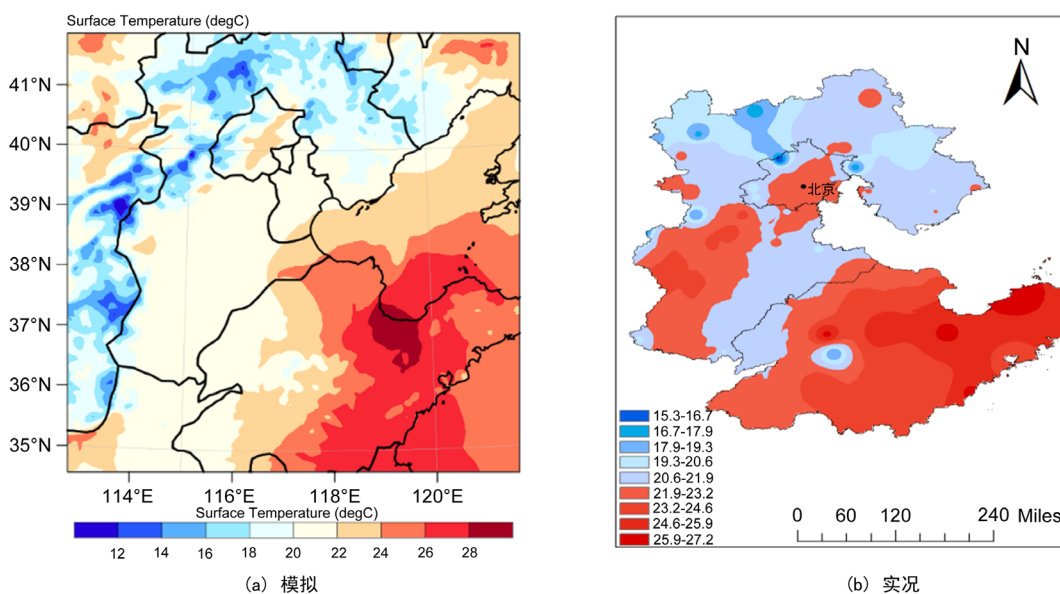


Figure 6. Comparison of spatial distribution of ground temperature (a) Simulation, (b) Real situation
图 6. 地面温度空间分布对比(a) 模拟, (b) 实况

4. 结论

每年七八月份, 华北地区进入雨季, 对无人机的飞行造成巨大影响; 且华北地区多大风, 大风引起的风切变、扬沙和沙尘暴等天气也会对无人机的低空飞行产生严重威胁。本次试验选取了 WRF3.7.1 中两种边界层参数化方案(YSU、MRF)和两种垂直分层(51 层、30 层)对华北地区 2010 年 7 月 19 日降雨进行模拟分析, 并与同期的 MICAPS 地面资料对比分析和讨论了对于此次强降水过程中 24 小时降雨总量、10 m 风速以及地面温度的模拟概况及差异, 结果表明:

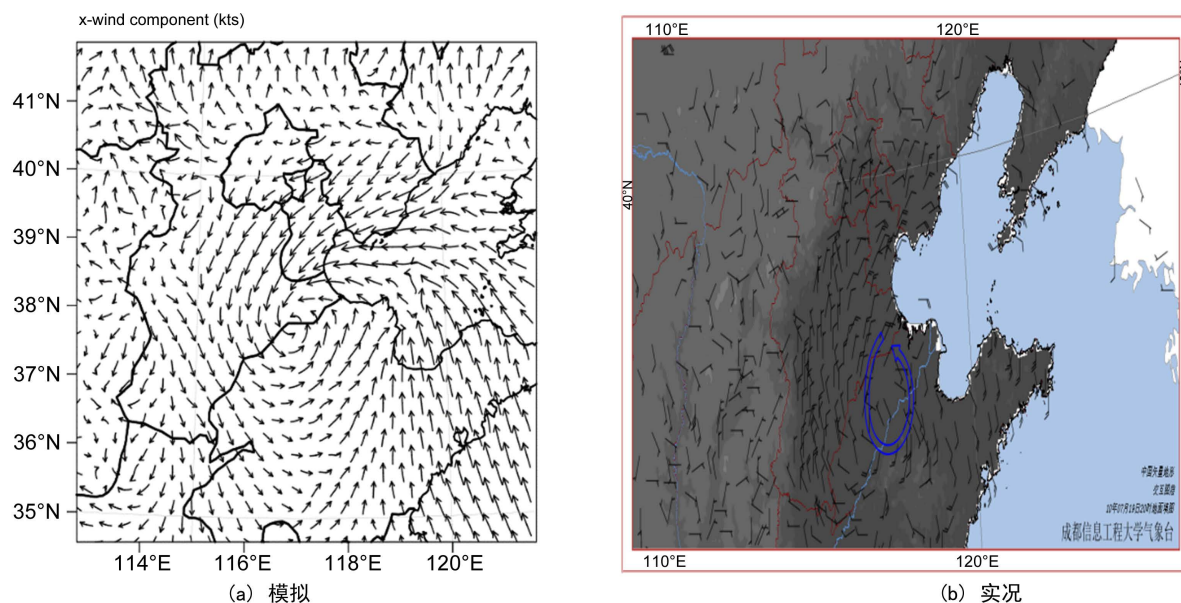


Figure 7. Comparison of 10 m wind speed spatial distribution (a) Simulation, (b) Real situation
图 7. 10 m 风速空间分布对比 (a) 模拟, (b) 实况

1) 4种方案都较好的模拟了24小时累计降水的东西宽度与南北走向,降水范围的模拟结果基本相同,但总体而言模拟的暴雨范围比实际偏小,强度中心偏东。降雨模拟结果受边界层参数化方案的选择影响较大,YSU方案精确度高于MRF方案。降雨模拟中加密垂直分层对改进降水强中心范围预报有一定作用,但效果不显著;

2) 4种方案的地面温度模拟效果相近,白天温度较高时宜采用YSU方案,而在清晨、傍晚和夜间温度较低时MRF方案的模拟效果更好,两种边界层参数化方案的模拟效果具有一定的区域性;加密垂直分层,采用YSU边界层参数化方案的模拟效果变好,IOA值提高0.02左右;而采用MRF边界层参数化方案方案,垂直分层加密没有固定影响方向。

3) 风场模拟效果受 η 坐标系的垂直分辨率影响较大,提高垂直分辨率越高,风速模拟效果提高,采用YSU边界层参数化方案的模拟效果的提高不如采用MRF边界层参数化方案时显著。相同的垂直分辨率情况下,MRF方案模拟效果优于YSU方案;相同边界层参数化方案的情况下,垂直分辨率越高,模拟效果越好;

4) 温度场和10 m风速场的模拟结果都较良好。

基金项目

国家重点研发计划(2017YFB0503005)和国家级大学生创新创业计划(201710621047)共同资助。

参考文献

- [1] Liu, C.G., Liu, Y., Wu, H., *et al.* (2015) A Safe Flight Approach of the UVA in the Electrical Line Inspection. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, **16**, 503-515. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2015-0021>
- [2] 章国材. 美国WRF模式的进展和应用前景[J]. 气象, 2004, 30(12): 27-31.
- [3] 左志燕. 行星边界层参数化对我国夏季降水的影响及其成因分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2004.
- [4] 蔡芴宁, 周庆亮, 钟青, 等. 边界层参数化对“雅安天漏”降水数值模拟的影响[J]. 气象, 2007, 33(5): 12-19.
- [5] 黄泓, 李刚, 谭言科, 等. WRF3.0模式中边界层参数化方案对暴雨预报的影响[C]//中国气象学会年会. 第26届

中国气象学会年会论文集. 2009: 1342-1356.

- [6] 沈新勇, 马铮, 郭春燕, 等. 不同边界层参数化方案对一次梅雨锋暴雨过程湍流交换特征模拟的影响[J]. 热带气象学报, 2017(6): 793-811.
- [7] 周芯玉, 廖菲, 孙广凤. 广州两次暴雨期间风廓线雷达观测的低空风场特征[J]. 高原气象, 2015, 34(2): 526-533.
- [8] 周芯玉, 涂静, 廖菲, 等. 2014年5月23日广州中北部大暴雨过程多尺度特征研究[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3): 235-242.
- [9] 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.
- [10] 穆清晨, 王咏薇, 邵凯, 等. 山地复杂条件下三种边界层参数化方案对近地层风模拟精度初步评估分析[J]. 资源科学, 2017, 39(7): 1349-1360.
- [11] 马媛媛, 杨毅, 胡小明, 等. WRF中三种边界层参数化方案对新疆“2·28”大风过程模拟的对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(3): 8-18.
- [12] 张碧辉, 刘树华, 等. 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.
- [13] 刘羽, 杨学胜, 孙健. 在GRAPES模式中引入夹卷过程的影响试验[J]. 热带气象学报, 2013, 29(2): 215-220.
- [14] 周祖刚, 张维桓, 姜勇强, 等. 高分辨率 η 模式暴雨个例的数值模拟[J]. 气象科学, 2001, 21(4): 452-461.
- [15] 宇如聪, 彭贵康. “雅安天漏”研究: II. 数值预报试验[J]. 大气科学, 1994, 18(5): 535-551.