

高精度曲面建模方法在气象要素场估测中的应用研究——以江西省为例

李 贺¹, 文小航¹, 赵 娜²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要:为更精确地模拟复杂地区气象要素场的结构及特征,得到高精度气象要素数据,以江西省为例,利用 WRF 区域模式模拟江西省 2019 年夏季近地表气温场、2 m 比湿场、10 m 风速场的结构及日变化特征,并利用 HASM-WRF 方法将 WRF 模式模拟结果与气象观测台站数据进行融合,以提高 WRF 模拟近地面气象要素数据的精度和准确性,并讨论 WRF 模式及 HASM-WRF 数据融合方法对近地面气象要素的估测表现。结果表明,WRF 模式能较准确地再现江西地区近地面气象场及时间变化特征,其中气温的模拟效果最好,比湿次之,风场的误差较大,WRF 模式对江西地区近地面的气温、比湿和风速的模拟准确率分别为 82.88%、64.58%、47.85%。WRF 模式模拟的比湿偏低,风速偏高,存在系统性偏差,经过 HASM-WRF 数据融合方法的订正,气温、比湿和风速的准确率分别提高到了 95.27%、95.54% 和 49.42%,说明 HASM-WRF 数据融合方法对 WRF 模式模拟结果有明显改善。

关键词:气象学;数值模拟;区域气候模式;高精度曲面建模;气象要素场

中图分类号:P456.7

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.05.013

0 引言

高精度且连续化的气象数据对气候与水文的研究有着重大的研究意义。现阶段,气象资源的空间化被广泛应用于生态系统模拟与农业区划中。对于地形复杂地区气象要素空间分布的估测与模拟是个广为关注的难点^[1]。许多学者采用反距离权重、克里金等插值法对地形复杂地区的气象要素空间分布进行模拟,但其结果精度不高^[2]。WRF 模式被广泛用于数值模拟与区域气候的研究中。前人利用 WRF 区域模式对各地的温度场、环流场、能量场的结构及其日变化特征进行了较为细致的模拟研究^[3];为得到更高精度的数据,将 WRF 模式模拟结果与不同类型以及来源的数据进行融合或者同化,如将中国气象局(CMA)的现场观测数据同化到 WRF 模式中,得出 CMA 的网格观测数据,这种研究利用遥感数据改善了地表参数,并通过数据同化系统进一步改善大气要素场^[4],但由于初值误差、模式误差及大气混沌性等,WRF 模式在数值预报方面精度有待提高^[5]。

现如今,高精度曲面建模(HASM)已被证实在气候研究方面可以提高数值模拟精度^[6-7],普遍应用于空间插值与数据融合,其原理阐述了生态环境曲面由外蕴量和内蕴量共同决定,在空间分辨率足够细的条

件下,高精度的生态环境曲面可以运用集成微观过程信息和宏观格局信息的恰当方法(例如高精度曲面建模方法)来构建^[8-12]。HASM-WRF 数据融合方法是以宏观信息为驱动场,以观测信息为订正条件,将同一要素不同来源的多种数据融合得到更高精度的数据集。在研究中^[13]以京津冀地区为案例,实证了对于 HASM 数据融合方法的合理性。周佳等^[8]以四川省为例,将 HASM 方法用于遥感数据融合气温实测数据以得到更高精度的近地表气温。刘宇等^[14]用 HASM-WRF 数据融合方法将 WRF 模式输出的气温同气象台站观测数据融合获得黑河流域 30 年的高精度温度场。

实验采用 WRF 模式与 HASM-WRF 数据融合方法,以江西省为例,将气象台站观测数据作为订正数据,改善 WRF 区域模式模拟数据的精度,估算江西省 2019 年 6-8 月近地表气温、2 m 比湿、10 m 风速的空间分布与时间序列,并对结果进行精度验证,评估 WRF 模式对地形复杂地区气象要素场的模拟性能,检验 HASM-WRF 数据融合方法的合理性。

1 资料和方法

1.1 研究区域介绍

江西省位于 113°34'E ~ 118°28'E, 24°29'N ~ 30°04'N, 其地形复杂,东、西、南三面环山,包含了河谷平原、丘陵、鄱阳湖平原,这使得江西的气象要素空间分布差异

明显。江西省是中国气象灾害较为严重的省份,夏季多发暴雨、高温等。研究夏季江西近地表气象场,对该省农林及气候研究有重要意义。

研究中所用江西省内及其周边地区气象观测站的气温资料均来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn>),包括 2019 年共计 93 个台站的日平均观测数据(图 1)。图 1 方框内为内重网格及 93 个气象台站,其中三角形标注的为实验中参与数据融合的 73 个台站,圆形标注作为验证样本的 20 个台站。

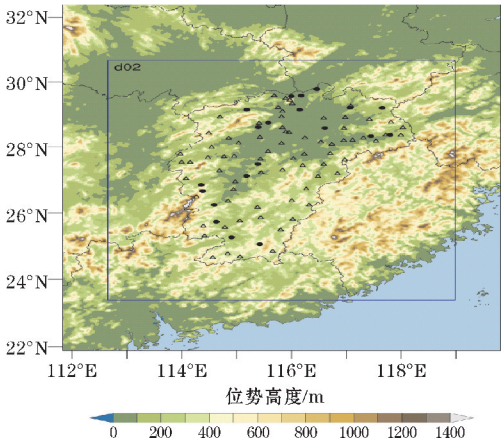


图 1 WRF 区域模式江西地区双重网格及海拔

1.2 WRF 模式的设置

WRF 模式(weather research and forecast model)是由美国国家大气研究中心(national center for atmospheric research,NCAR)和美国国家环境预测中心(national center for environmental prediction,NCEP)等科研机构共同开发的中尺度预报模式,在气象科研和业务中被广泛应用^[16-17]。本研究运行的 WRF 模式系统采用 WRFV4。WRF 模式采嵌套方法为双层网格(图 1),其内层覆盖了江西省地区,内外水平网格数分别取 144×99、199×238。水平分辨率分别取 9 km、3 km。中心经纬度为(27.2°N,115.4°E),初始场及边界条件数据来源于美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合制作的 FNL 逐日再分析资料(<https://rda.ucar.edu>),每 6 h 更新一次。采用 30 s 静态地形数据。WRF 模式对世界时 2019 年 6 月 1 日 00 时至 8 月 31 日 24 时进行模拟,每小时输出的模拟数据进行月平均和日平均计算,与处理后观测数据的时间分辨率一致。

对 WRF 模式参数化方案的研究已得出的结论有:YSU 对 2 m 气温模拟效果较好^[15-16];韩丽娜等^[17]分析不同模拟方案下北京市气象要素模拟精度得出选用 RRTM 长波辐射方案模拟精度较高的结论;RRTM 长波辐射方案与 Dudhia 短波辐射方案对风速预报精度较高^[18]。故在实验中,微物理过程采用 WSM 3 类简单冰方案;长波辐射方案采用 RRTM 方案;短波辐射方案采

用 Dudhia 方案;近地层过程采用 Monin-Obukhov scheme 方案;陆面过程方案为热扩散方案;边界层方案采用 YSU 方案;积云对流过程采用 Kain-Fritsch^[19]。

1.3 实验的设计

HASM 模型通过引入权重可简化为一个由采样信息约束控制的最优化问题,如式(1)所示^[11]。

$$\min \left\| \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ \lambda S \end{bmatrix} Z^{n+1} - \begin{bmatrix} d \\ q \\ p \\ \lambda k \end{bmatrix} \right\|_2 \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 分别为系数矩阵; d 、 q 、 p 为常数向量; Z 为待求解向量; n 为迭代次数; λ 为权重参数; S 为气温的系数矩阵; k 为估算的气象要素值。

最优化问题即式(1)等价于

$$\begin{aligned} Wz &= v \\ W &= A^T A + B^T B + C^T C + \lambda^2 S^T S \\ v &= A^T d + B^T q + C^T p + \lambda^2 S^T k \end{aligned}$$

式中: v 为向量矩阵; T 为对象的转置矩阵, W 为对称正定大型系数矩阵,通过迭代法计算该方程组,直到满足精度解时停止迭代,输出最终的结果。

使用 HASM 方法将站点观测资料和 WRF 模式输出结果融合,主要包括以下步骤:(1)利用 NCEP-FNL 再分析资料驱动 WRF 模式对江西地区 6、7、8 月的气象要素场进行估测,对估测结果进行月平均计算。(2)采用最近点赋值法得到 WRF 格点数据中距离检验观测站点最近的格点,并对两者做残差,得到月平均近地面气象要素残差点,即 HASM-WRF 的控制场:

$$OBS-WRF = error$$

式中,OBS 为气象台站观测点数据,WRF 为采用最近点赋值法得到的与距离检验站点最近的模式格点数据,error 为两者的近地表气象要素残差数据。(3)用克里金插值法将月平均气象要素残差点插值成月平均要素残差场,即为 HASM-WRF 的驱动场。(4)利用 HASM-WRF 方法将驱动场与控制场进行融合,得到融合后的月平均近地面气象要素残差场,并与 WRF 模式输出的月平均近地面气象要素场进行叠加。

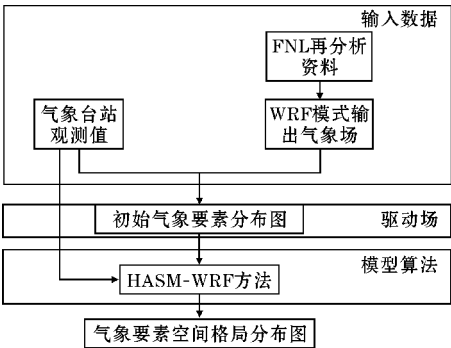


图 2 实验设计流程图

1.4 精度验证

为保证数据精度检验的科学性,将 93 个气象观测站点数据分为数据融合样本与验证样本,随机抽取 20 个站点作为验证样本,其余 73 个台站数据作实验需要的数据融合样本。精度验证的参数采用均方根误差 (RMSE)、平均相对误差 (MRE)、平均绝对误差 (MAE)、偏差 (Bais) 以及准确率 (HR)。具体表达式如下:

$$\begin{aligned} \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{ac} - T_a)^2} \\ \text{MRE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|T_{ac} - T_a|}{T_a} \\ \text{MAE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_{ac} - T_a| \\ \text{Bias} &= \frac{\sum_{i=1}^n (T_{ac} - T_a)}{n} \\ \text{HR} &= \frac{N_m (|T_{ac} - T_a| \leq S)}{n} \times 100\% \end{aligned}$$

其中: T_{ac} 为两种模式输出结果; T_a 为气象台站实测气象数据; n 为样本个数; N_m 为满足条件的样本数; S 为标准值;气温、比湿、风速的标准值^[20-22]分别为 2 K、2 g·kg⁻¹、1 m·s⁻¹。

2 WRF 模式与 HASM-WRF 方法估测结果的对比分析

2.1 两种方法对近地表温度的模拟

就夏季最高、最低和平均气温估测结果来看(表 1),HASM-WRF 方法具有较高精度,对于高温、低温及平均气温的估算,该方法的 RMSE 估算精度相对 WRF 模式误差降低了 0.7℃、0.27℃和 0.52℃,MAE 的估算精度分别提高了 0.66℃、0.27℃和 0.44℃,MRE 的估算精度分别提高了 2.04%、1.06%和 2.24%,准确率分别提高了 18.64%、10.87%和 7.36%。WRF 模式对于高温、低温及平均的模拟普遍存在冷偏差现象,与实测温度相比 WRF 模式模拟结果分别偏冷 0.47℃、0.64℃和 0.17℃,经过 HASM-WRF 方法订正,估测结果偏差降低至 -0.19℃、0.34℃和 -0.006℃。就夏季各月温度估测结果来看(表 2),无论是高温、低温还是平均气温,经 HASM-WRF 方法订正后的估测结果精度均比 WRF 模式模拟精度要高。此可见,HASM 数据融合方法的应用能够极大提升 WRF 模拟结果对气温模拟测精度。

表 1 两种方法的平均误差对比

参数	WRF			HASM-WRF		
	高温	低温	平均气温	高温	低温	平均气温
RMSE/℃	2.43	1.66	1.49	1.73	1.39	0.97
MAE/℃	1.85	1.31	1.19	1.19	1.04	0.75
MRE/%	5.72	5.34	4.31	3.68	4.28	2.07
Bais/℃	-0.47	-0.64	-0.17	-0.19	0.34	-0.006
HR/%	64.07	77.28	88.23	82.71	88.15	95.59

表 2 基于两种方法的各月最高、最低及平均温度误差对比

月份	参数	WRF			HASM-WRF		
		高温	低温	平均气温	高温	低温	平均气温
6 月	RMSE/℃	2.32	1.61	1.53	1.75	1.16	0.96
	MAE/℃	1.68	1.23	1.20	1.10	0.85	0.72
	MRE/%	5.84	5.40	4.68	3.79	3.82	2.76
	Bais/℃	-0.038	-0.45	0.27	-0.38	0.23	-0.01
7 月	RMSE/℃	2.34	1.64	1.39	1.79	1.24	0.96
	MAE/℃	1.76	1.32	1.10	1.22	0.91	0.74
	MRE/%	5.55	5.27	4.01	3.87	3.68	2.66
	Bais/℃	-0.26	-0.63	0.13	-0.26	0.27	0.02
8 月	RMSE/℃	2.62	1.73	1.56	1.68	1.57	0.99
	MAE/℃	2.06	1.38	1.27	1.20	1.22	0.79
	MRE/%	5.79	5.34	4.25	3.39	4.78	2.67
	Bais/℃	-1.89	-0.84	-0.19	-0.26	0.38	-0.02

为表示实验地区实际气温分布特征,将 93 个实验区内台站观测点的逐月平均气温进行克里金插值法得到台站实测平均气温曲面(图 3)。由图 3 可知,江西省 6 月高温区出现在南部,温度约 26℃~27℃,整体温度与纬度呈负相关关系,呈现一个北低南高的趋势;7 月高温区出现在中部,温度约 28℃~28.5℃,8 月高温区出现在南部温度约 28.5℃~30℃。6~8 月,逐月增温约 1℃~2℃。WRF 模式对 6 月气温场的模拟整体温度偏高,6 月份平均温度的高温区出现在江西省南部的吉安、赣州地区,温度约为 28℃~30℃(图 4a);7 月份高温区出现在江西省中部与南部(抚州、

赣州地区),约 28℃~30℃(图 4c);8 月份整体温度偏高,高温区出现在江西省中部及南部(南昌、宜春、抚州、吉安、赣州地区)温度大约 28℃~30℃(图 4e)。HASM-WRF 方法估测的 6 月气温场高温区出现在江西省中部,高温区约 26℃~28℃(图 4b),更加接近 6 月份实际温度场;7 月气温场大部分温度较高,高温区出现在江西省中部,约为 27℃~29℃(图 4d);8 月份高温区出现在江西省中部与南部(赣州地区),高温区温度约 29℃~30℃(图 4f)。两种方法对夏季温度场的再现较为准确。

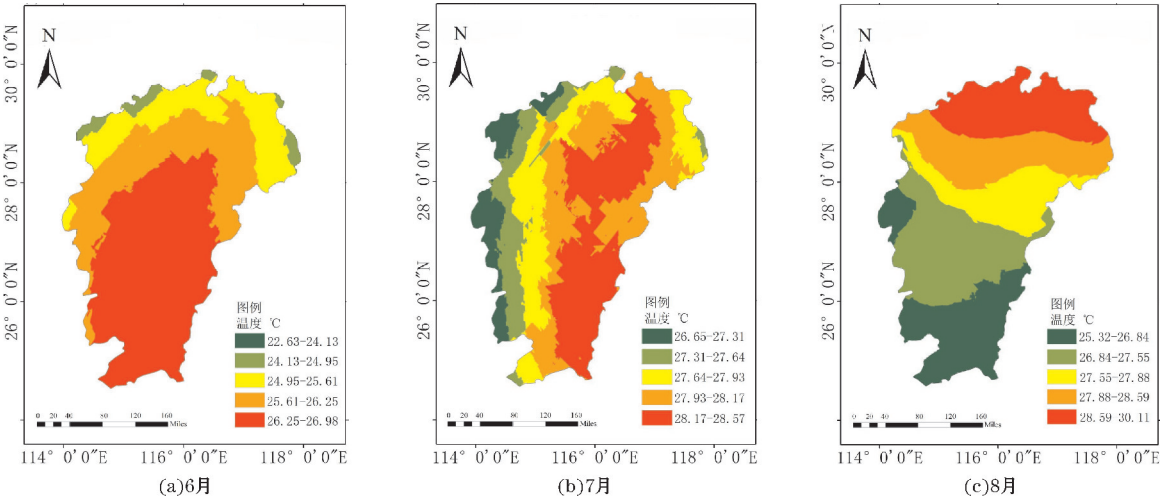


图 3 克里金插值法所得台站月平均气温图

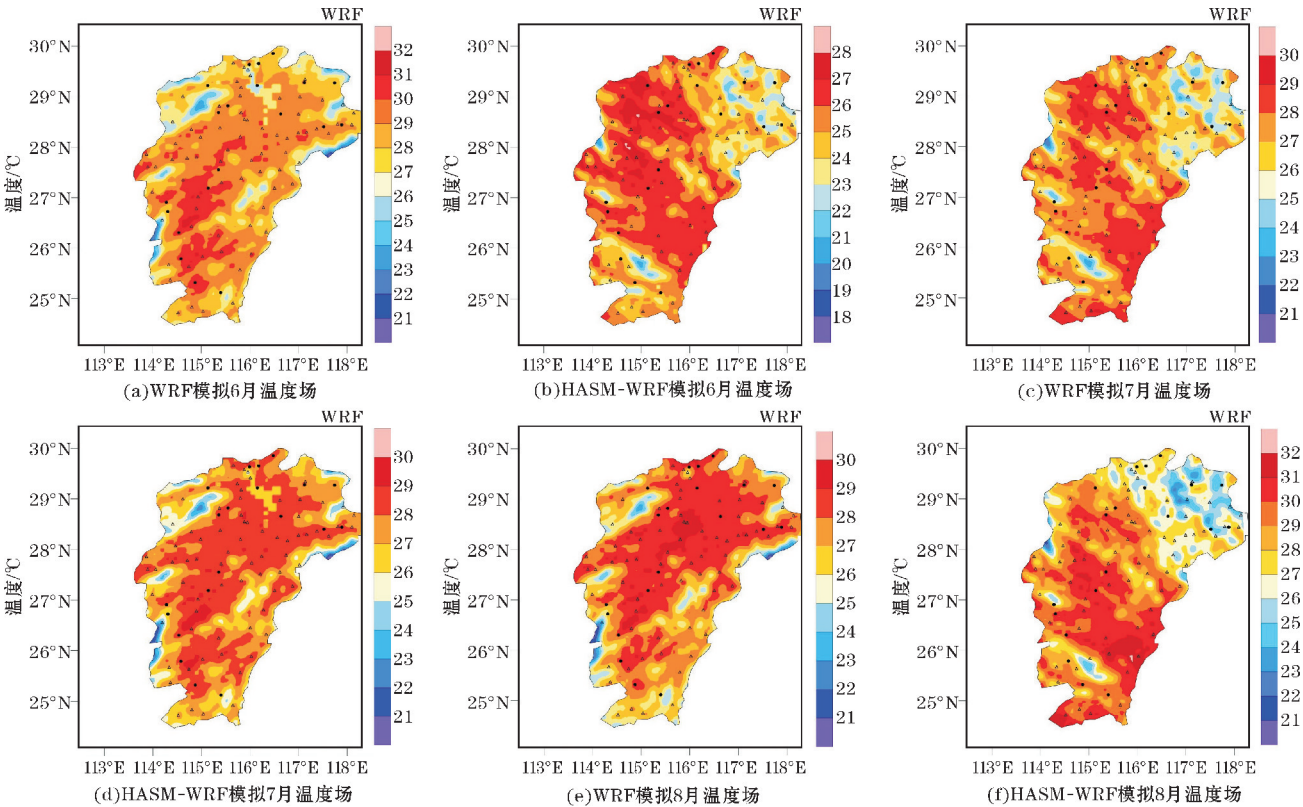


图 4 两种方法模拟 6~8 月近地表月平均气温对比图

(三角形标注的为实验中参与数据融合的 73 个台站,圆形标注为作为验证样本的 20 个台站)

为检验 WRF 模式及 HASM-WRF 方法对日最高气温和最低气温的估测能力,利用 HASM-WRF 数据融合方法将 6 月 1 日至 8 月 31 日的日平均地表气温逐日进行融合。实验中 WRF 模式对 14 时输出的模拟数据作为模式输出的日最高温度,对 02 时输出的模拟数据作为模式输出的最低温度,并将其与台站观测日最高温度与台站观测日最低温度进行对比。两种方法对近地表高温、低温及平均温度变化趋势的模拟与估测表明(图 5):夏季近地表高温为 $24^{\circ}\text{C} \sim 37^{\circ}\text{C}$, 8 月整月高温在 36°C 上下浮动。WRF 模式对 6 月 1 日至 7 月 15 日高温模拟较准确,能够再现最高温度的日变化特征,7 月 15 日至 8 月 31 日 WRF 模式的模拟结果偏冷(图 5a)。通过图 5(b)也能明显地看出 WRF 模式在 7 月 15 日至 8 月 31 日偏差较大,6 月 1 日至 7 月 15 日 WRF 模式模拟高温结果与台站观测值的偏差在 $-2^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$, 7 月 15 日之后其偏差在 $-6^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 。HASM-WRF 方法估测的高温逐日变化特征更贴近实际近地表最高温度场。HASM-WRF 方法估测值与台站观测

值的偏差控制在 $-2^{\circ}\text{C} \sim 0.2^{\circ}\text{C}$;夏季近地表低温范围在 $18^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ (图 5c), WRF 模式对低温模拟整体偏冷,其偏差在 $-2^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$, 经过 HASM-WRF 的调整,其估测结果的偏差约为 0.25°C 左右(图 5d)。夏季平均温度范围约 $22^{\circ}\text{C} \sim 32^{\circ}\text{C}$ 。WRF 模式对日平均温度的模拟偏差在 $-3^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ (图 5e), 经过 HASM-WRF 方法的调整其估测结果偏差在 -0.5°C 与 0.5°C 上下浮动(图 5f), 两种方法都能较好地表现平均温度场的日变化特征,但 WRF 模式对 8 月逐日平均温度的模拟偏冷。综合看, WRF 模式对 8 月整月高温、低温和平均温度的模拟均偏冷, HASM-WRF 方法较 WRF 模式能更好地再现研究区的高温、低温及平均温度的日变化特征。比较 WRF 与 HASM-WRF 两种方法的估测气温值与实测气温值的散点分布(图 6), 结果表明, WRF 模式模拟高温、低温和平均温度分布相对松散, 都存在高估和低估偏差大的现象, HASM-WRF 方法估算温度与实测温度更加接近, 大部分散点都聚集在直线两侧, 偏差相比 WRF 模式要小。

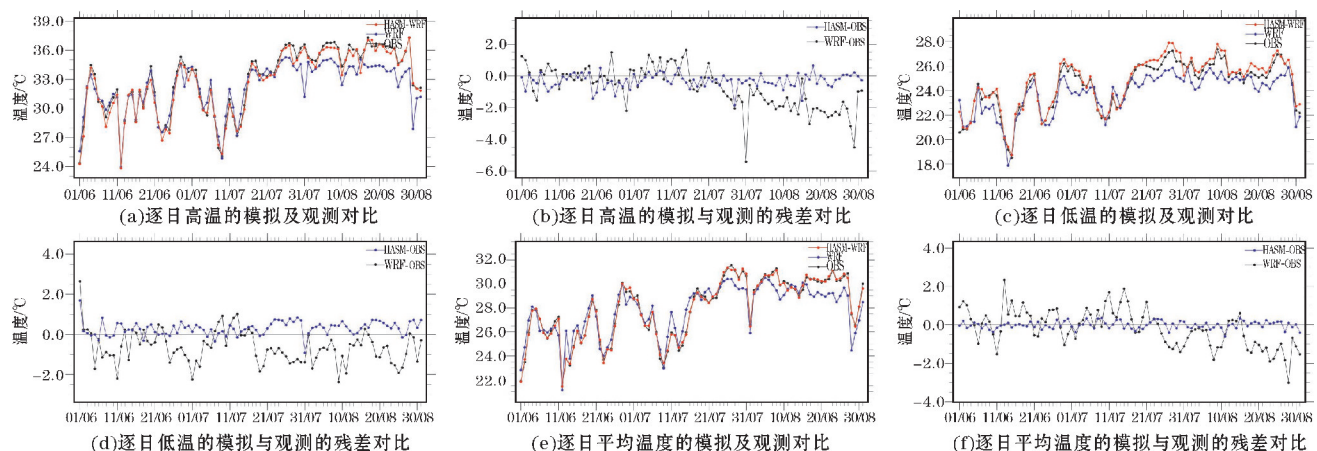


图 5 两种方法模拟 6~8 月日最高、最低及平均近地面气温的时间序列曲线及模拟结果与台站实测数据的残差曲线

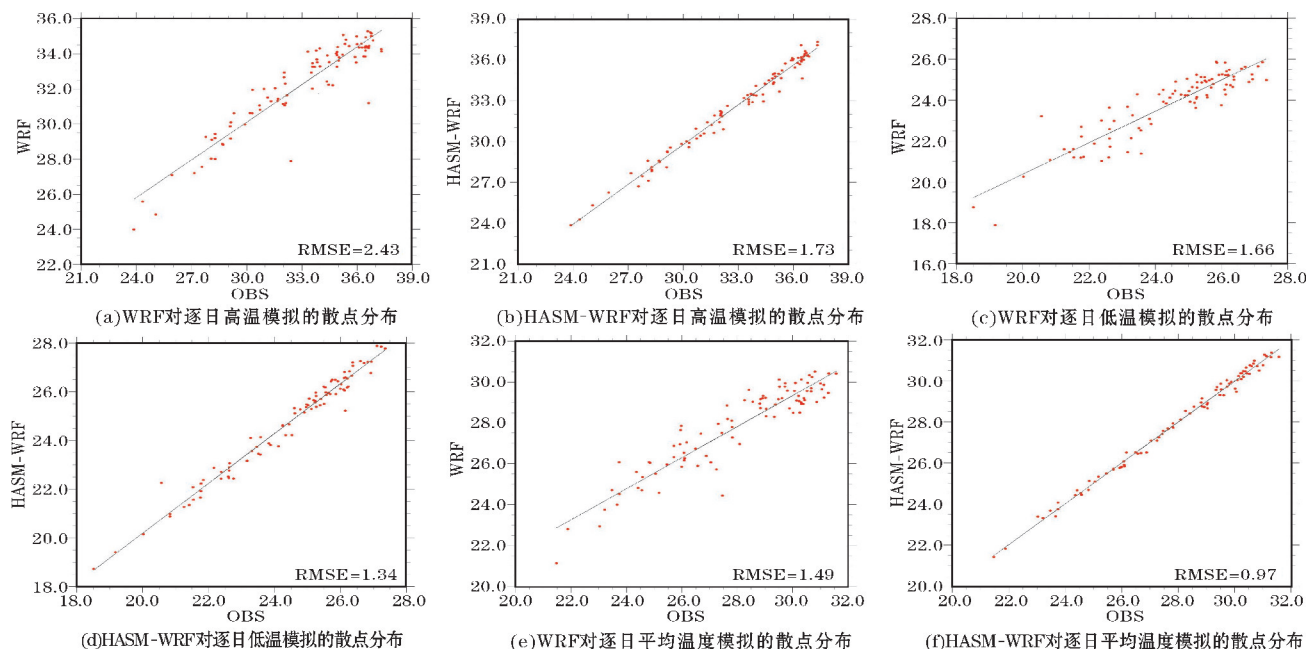


图 6 两种方法模拟 6~8 月日最高、最低及平均近地面气温与实测温度的散点分布

2.2 两种方法对 2 m 比湿的估测

比湿是水汽与湿空气的质量之比,因其受气压变化引起大气膨胀和收缩影响不大,常用于表征大气中的水汽含量,被广泛应用于暴雨的水汽条件研究和日常预报业务中。比湿不受温度影响,为避免温度估测带来的误差影响,实验采用比湿验证 WRF 模式 HASM 方法估测湿度的能力。

将 WRF 模式估测结果及 HASM-WRF 模式估测的江西地区 6、7、8 月的月平均 2 m 比湿结果进行精度验证(表 3),其结果表明 HASM-WRF 模式估测结果要比 WRF 模式模拟结果好。WRF 模式模拟各月的 RMSE 在 1.9 ~ 2.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, HASM-WRF 方法使估测结果的 RMSE 降低至 0.8 ~ 1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, WRF 模式模拟各月比湿的 MAE 在 1.68 ~ 1.80 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, MRE 在 8.01% ~ 9.47%,

HASM-WRF 方法使 MAE 的精度提高了约 1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 使 MRE 的精度提高了约 5% ~ 7%。WRF 模式模拟夏季逐月比湿结果比台站数据约低 1.3 ~ 1.6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 经过 HASM-WRF 模式订正,其数据融合后结果比台站约低 0.25 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中 WRF 模式对 7 月份估测效果更好, HASM-WRF 模式对 6 月份纠正效果更好。两种方法均能很好地再现 6~8 月实际比湿的逐日变化特征(图 7a),但 WRF 模式对 6~8 月逐日平均比湿的模拟相比台站实测平均比湿均偏低约 0 ~ 4.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 7b), HASM-WRF 方法的模拟值相比实测值偏低约 0.25 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。比较两种方法模拟值与实测值的散点分布, WRF 模式输出的部分数值相差较大(图 8a), HASM-WRF 方法更加稳定估测精度比 WRF 模式更高(图 8b)。

表 3 基于两种方法的各月平均比湿误差对比

Avg	WRF			HASM-WRF		
	6 月	7 月	8 月	6 月	7 月	8 月
RMSE/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2.03	1.96	2.15	0.86	0.83	0.99
MAE/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.60	1.63	1.80	0.63	0.61	0.75
MRE/%	9.18	8.01	9.47	3.61	3.04	4.01
Bais/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	-1.37	-1.51	-1.56	-0.24	-0.25	-0.25

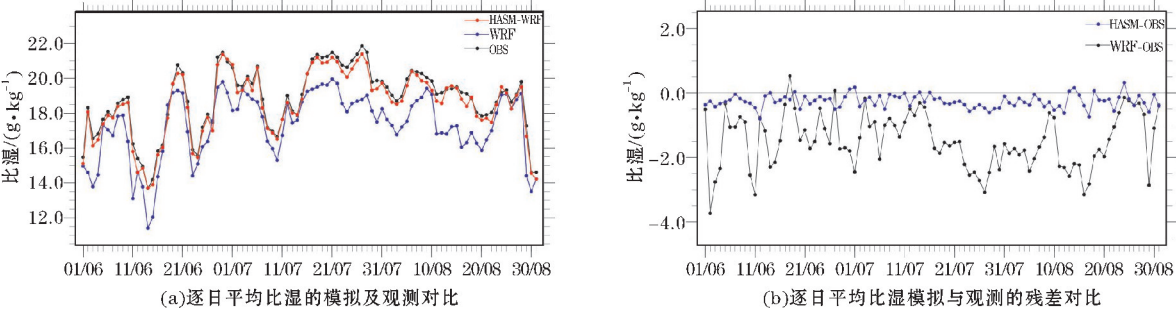


图 7 两种方法对 6~8 月逐日平均比湿的模拟与观测情况

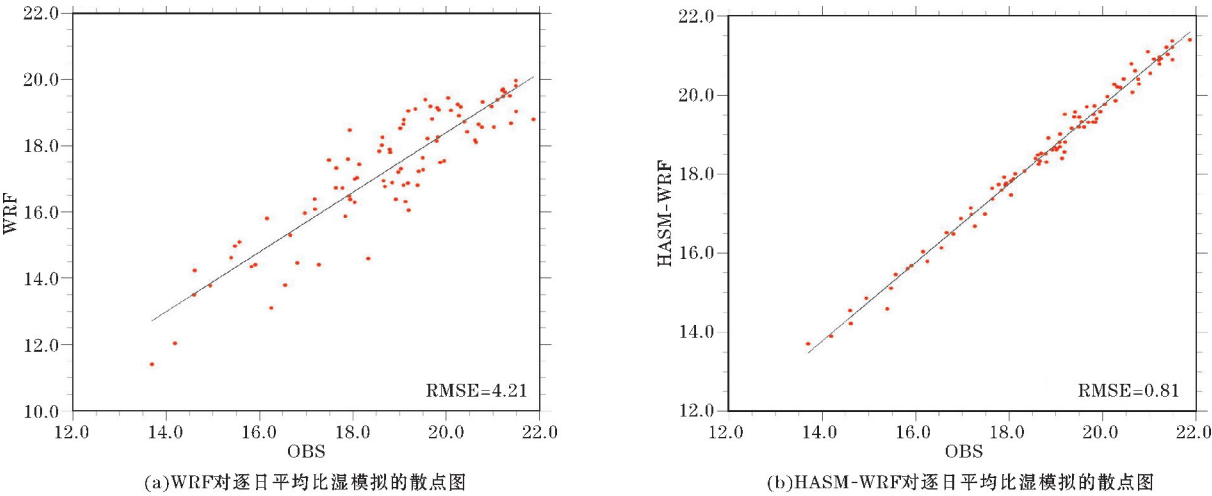


图 8 两种方法模拟 6~8 月逐日平均比湿与实测比湿的散点分布

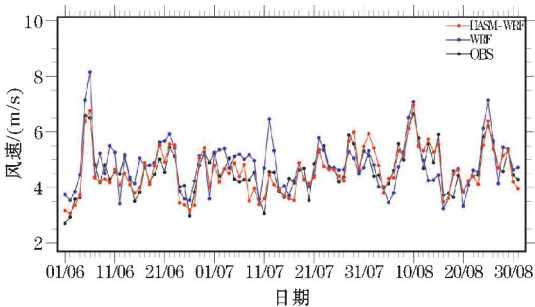
2.3 两种方法对 10 m 风速的估测

表 4 为两种方对各月平均 10 m 风速模拟值与台站实测风速误差对比,WRF 模式各月的模拟值 RMSE 约在 1.77 ~ 3.08 m/s,MAE 约在 1.32 ~ 1.35 m/s,MRE 约在 2.88% ~ 3.52%,偏差在 -0.06 ~ 0.35 m/s;经 HASM-WRF 方法订正后,RMSE 的精度提高了 0.07 ~ 0.6 m/s,MAE 精度提高了 0.02 ~ 0.16 m/s,MRE 的精度提高了 0.1% ~ 0.51%,偏差的精度无明显变化。两种方法对

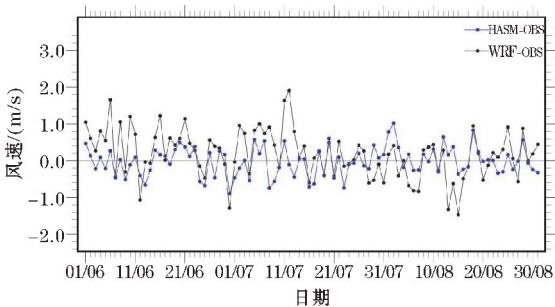
逐日平均风速的模拟变化较差(图 9a),WRF 模式模拟结果与台站实测数据的残差较大,在 -1 ~ 2 m/s 浮动,经过 HASM-WRF 方法的订正,残差在 -1 ~ 1 m/s 上下浮动(图 9b)。两种方法模拟值与观测值的散点分布也相对温度与比湿的模拟松散(图 10),WRF 模式的模拟表现不如 HASM-WRF 方法,其散点分布更加松散。整体来看 WRF 模式对风速的模拟效果不如温度与比湿,这在其他区域也有相同的结论,通常情况由于系统误差,WRF 模式对风速模拟值偏大^[22-23]。

表 4 基于两种方法的各月平均风速误差对比

Avg	WRF			HASM-WRF		
	6 月	7 月	8 月	6 月	7 月	8 月
RMSE/(m·s ⁻¹)	1.77	3.08	3.07	1.60	2.48	3.00
MAE/(m·s ⁻¹)	1.35	1.35	1.32	1.26	1.19	1.30
MRE/%	3.52	3.31	2.88	3.01	2.79	2.78
Bais/(m·s ⁻¹)	0.35	0.27	-0.06	-0.05	-0.09	0.07

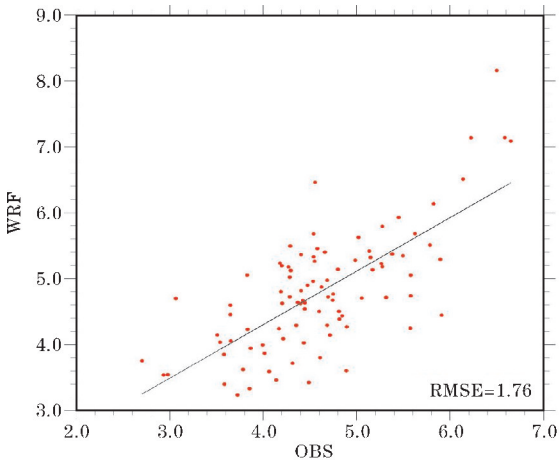


(a)逐日平均风速的模拟及观测对比

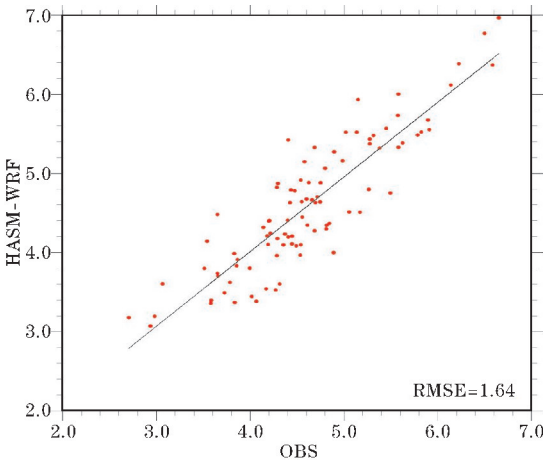


(b)逐日平均风速模拟与观测的残差对比

图 9 两种方法对 6-8 月逐日平均风速的模拟与观测情况



(a)WRF对逐日平均风速模拟的散点图



(b)HASM-WRF对逐日平均风速模拟的散点图

图 10 两种方法模拟 6-8 月日平均风速估算效果验证

3 结论

通过对比 WRF 模式估测结果、HASM-WRF 数据

融合方法估测结果与台站资料在江西省及其周边地区气象要素的空间分布与时间序列,并对两种方法的估测结果进行精度验证,综合评估了两种方法在复杂地形条件下的估测性能,得到主要结论:

(1) WRF 模式能较准确地估测江西地区近地表气温的空间分布特征, HASM-WRF 方法能够改善 WRF 模式估测气温场的结果: 江西省夏季高温区在省内南部 $24.5^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E} \sim 116^{\circ}\text{E}$ (赣州地区), 整体温度与纬度呈负相关关系, 呈现一个北低南高的趋势。WRF 模式对高温区温度的模拟偏低, HASM-WRF 方法对 8 月夏季温度场的模拟最为准确。

(2) WRF 模式能较准确地再现江西地区近地面气象场及其时间变化特征, WRF 模式对江西地区近地面的气温、比湿和风速的估测准确率分别为 82.88%、64.58%、47.85%。WRF 模式估测的比湿偏低, 风速偏高。HASM-WRF 数据融合方法对江西地区近地面气温、比湿和风速的估测准确率分别为 95.27%、95.54% 和 49.42%。相比较 WRF 模式输出结果, HASM-WRF 数据融合方法分别将近地面气温、比湿和风速的准确率提高了 12.34%、30.96% 和 1.57%。

(3) WRF 模式气温的估测效果最好, 比湿次之, 风速的误差相对较大。其中温度的 RMSE 在 $1.39^{\circ}\text{C} \sim 1.56^{\circ}\text{C}$, MAE 在 $1.10^{\circ}\text{C} \sim 1.27^{\circ}\text{C}$, MRE 在 4.01% ~ 4.68%; 比湿的 RMSE 在 $1.96 \sim 2.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, MAE 在 $1.60 \sim 1.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, MRE 在 8.01% ~ 9.47%; 风速的 RMSE 在 $1.77 \sim 3.08 \text{ m/s}$, MAE 在 $1.32 \sim 1.35 \text{ m/s}$, MRE 在 2.88% ~ 3.52%。经过 HASM-WRF 方法的订正, 各气象要素的各模拟精度都有所提升, 其中温度的 RMSE 精度提升了 $0.43^{\circ}\text{C} \sim 0.57^{\circ}\text{C}$, MAE 的精度提升了 $0.36^{\circ}\text{C} \sim 0.48^{\circ}\text{C}$, MRE 的精度提升了 0.72% ~ 1.92%; 比湿的 RMSE 降低至 $0.8 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, MAE 的精度提高了约 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, MRE 的精度提高了约 5% ~ 7%; 风速的 RMSE 的精度提高了 $0.07 \sim 0.6 \text{ m/s}$, MAE 精度提高了 $0.02 \sim 0.16 \text{ m/s}$, MRE 精度提高了 0.1% ~ 0.51%。HASM-WRF 数据融合方法对近地表气温和比湿的估测都很准确, 对 WRF 模式估测比湿的结果订正效果最好, 对风速的订正效果最差。

参考文献:

- [1] 于贵瑞, 何洪林, 刘新安, 等. 中国陆地生态信息空间化技术研究(I): 气象/气候信息的空间化技术途径[J]. 自然资源学报, 2004(4): 537-544.
- [2] 占龙飞, 张传江, 胡菊芳, 等. 基于 DEM 的复杂地形气温空间插值研究[J]. 气象与减灾研究, 2018, 41(1): 57-62.
- [3] 文小航, 吕世华, 孟宪红, 等. WRF 模式对金塔绿洲效应的数值模拟[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1163-1173.
- [4] WEN Xiaohang, YUAN Wenping, Zheng, et al. Establishment and analysis of a High-Resolution Assimilation Dataset of the water-energy cycle in China[J]. Physics and chemistry of the earth, 2015(9): 126-141.
- [5] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象, 2004, 30(12): 27-27.
- [6] 赵明伟, 岳天祥. 高精度曲面建模方法研究进展与分类[J]. 地理科学进展, 2016, 35(4): 401-408.
- [7] 赵娜, 岳天祥, 史文娇, 等. 基于 HASM 方法对气候模式气温降水的降尺度研究: 以黑河流域为例[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1227-1236.
- [8] 周佳, 赵亚鹏, 岳天祥, 等. 结合 HASM 和 GWR 方法的省级尺度近地表气温估算[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(10): 2098-2107.
- [9] 范泽孟, 岳天祥, 陈传法, 等. 中国气温与降水的时空变化趋势分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 526-533.
- [10] 李晗, 赵娜, 岳天祥, 等. 基于 HASM 方法的黑河流域潜在蒸发量的模拟[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1466-1474.
- [11] YUE Tianxiang. Surface Modeling: High Accuracy and High Speed Methods[J]. Crc Press, 2013, 27(8): 1689-1690.
- [12] YUE Tianxiang, ZHAO Na, RAMSEY R D, et al. Climate change trend in China, with improved accuracy[J]. Climatic Change, 2013, 120(1-2): 137-151.
- [13] YUE Tianxiang, ZHAO Na, LIU Yu, et al. A fundamental theorem for eco-environmental surface modelling and its applications[J]. Science China Earth Science, 2020, 63: 1-21.
- [14] Liu Yu, Yue Tianxiang, Jiao Yimeng, et al. Temperature changes in the Heihe River Basin based on High Accuracy Surface Modeling[J]. Meteorological Applications, 2019. DOI: 10. 1002/met. 1803.
- [15] 贵志成, 郑益群, 曾新民, 等. 不同边界层参数化方案对东亚夏季风气候模拟的对比研究[J]. 气象科学, 2014, 34(6): 638-646.
- [16] 张小培, 银燕. 复杂地形地区 WRF 模式四种边界层参数化方案的评估[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 68-76.
- [17] 韩丽娜, 唐晓, 陈科艺, 等. 北京地区一次空气重污染过程的气象条件模拟参数化敏感性试验[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(3): 253-267.

[18] 刘霄,赖旭,陈玲. 大气模式物理过程参数化对风电场风速预报的影响[J]. 水电能源科学, 2012,30(8):208-210+145.

[19] 胡向军,陶健红,郑飞,等. WRF 模式物理过程参数化方案简介[J]. 甘肃科技,2008,24(20):73-75.

[20] 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.

[21] Cox Robert, Bauer, Bruce L, Smith Thomas. A mesoscale model intercomparison[J]. The Bulletin of American Meteorological Society, 1988,79(2):265-283.

[22] 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.

[23] 王澄海,胡菊,靳双龙,等. 中尺度 WRF 模式在西北西部地区低层风场模拟中的应用和检验[J]. 干旱气象,2011,29(2):161-167.

Research on Application of High Accuracy Surface Modeling
Method in the Estimation of Meteorological Elements Field
——Taking Jiangxi Province as an Example

LI He¹, WEN Xiaohang¹, ZHAO Na²

(1. College of Atmospheric Science Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to more accurately simulate the structure and characteristics of the meteorological element field in complex areas, high-precision meteorological element data can be obtained. In the study, it takes Jiangxi Province as an example and uses the WRF regional model to estimate the structure of the near-surface temperature field, 2 m specific humidity field, and 10 m wind velocity field in Jiangxi Province in the summer of 2019. Also, it uses the characteristics of daily variation, and uses High Accuracy Surface Modeling method (HASM) to fuse the WRF model estimation results with the meteorological observation station data to improve the accuracy and accuracy of the WRF estimation of the near-surface meteorological element data, and discuss WRF The model and HASM-WRF data fusion method estimate the performance of near-surface meteorological elements. The results show that the WRF model can more accurately reproduce the near-surface meteorological field and time change characteristics in Jiangxi. The simulation effect of temperature is the best, followed by specific humidity, and the error of the wind field is larger. The simulation accuracy rates of specific humidity and wind speed are 82.88% ,64.58% ,and 47.85% , respectively. The WRF model simulates lower specific humidity and higher wind speed, and with systemic deviations. After the coupling correction of the HASM-WRF data fusion method, the accuracy rates of air temperature, specific humidity and wind speed have been increased to 95.27% , 95.54% and 49.42% respectively, indicating that the HASM-WRF data fusion method has significantly improved the simulation results of the WRF model.

Keywords: meteorology; numerical simulation; regional climate model; high accuracy surface modeling (HASM); meteorological element field