

基于WRF的机场中尺度预报模式对乌鲁木齐机场地面气象要素预报效果的评估分析

丁旭, 陈阳权, 张茜, 朱雯娜

民航新疆空管局空管中心气象中心, 新疆 乌鲁木齐
Email: 764619466@qq.com, dx.s@qq.com

收稿日期: 2021年2月14日; 录用日期: 2021年3月10日; 发布日期: 2021年3月17日

摘要

对乌鲁木齐国际机场中尺度预报模式WRF在2016~2019年预报的风速、温度、海平面气压、相对湿度等要素进行评估, 评估过程中采用最近点插值法将嵌套2区(d02区)和嵌套3区(d03区)分别插值到乌鲁木齐机场站点, 将插值结果与机场实况资料进行对比分析。结果表明: 1) 从全年误差度量情况来看, 模式对海平面气压预报效果最好, 温度和湿度次之, 对风速的预报能力相对薄弱, d03-00预报结果最优。2) 从月际变化来看, 模式预报对温度和修正海平面气压的变化趋势和数值大小预报能力较强, 春、夏、秋季对相对湿度的预报较实况偏高, 对春冬季的相对湿度预报效果优于夏秋季, 对风速的预报效果稍差。其中d03-00预报偏差最小, d02-12整体偏差最大。3) 从日变化来看, 各预报结果对海平面气压的模拟效果较好, 以d03为最优; 对风速预报结果的平均偏差和均方根误差较小, 但相关性较差, 以d03为优; 对温度、湿度的预报值误差随时间变化有明显的波动, 其中以d02-12、d03-12最优。

关键词

乌鲁木齐机场, WRF模式, 气象要素, 质量评估

Evaluation and Analysis of WRF Model for Forecasting Effect of Ground Meteorological Elements in Urumqi Airport

Xu Ding, Yangquan Chen, Qian Zhang, Wenna Zhu

Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Urumqi Xinjiang
Email: 764619466@qq.com, dx.s@qq.com

Received: Feb. 14th, 2021; accepted: Mar. 10th, 2021; published: Mar. 17th, 2021

Abstract

The Urumqi Airport mesoscale forecasting model WRF was used to evaluate the forecasted wind speed, temperature, sea level pressure, relative humidity and other factors for 2016~2019, and the nearest point interpolation method was used to interpolate d02 and d03 to the Urumqi airport station respectively. And the forecast results are compared with the site data. The results show: 1) The changes of the four meteorological elements have obviously seasonal characteristics. There is a positive correlation between temperature and wind speed, relative humidity and sea level pressure; there is a significantly negative correlation between temperature and relative humidity, temperature and sea level pressure. 2) From the perspective of the error measurement throughout the year, the model has the best effect on sea level pressure forecast, followed by temperature and humidity, and relatively weak forecasting ability of wind speed, the d03-00 is the best. 3) From the perspective of inter-monthly changes, the model forecast has a strong ability to predict the change trend and numerical magnitude of temperature and corrected sea level pressure, and the forecast effect of wind speed is slightly worse. The forecast deviation of d03-00 is the smallest. 4) From the perspective of daily changes, the prediction results of sea level pressure are better, and d03 is the best. The average deviation and root mean square error of the wind speed forecast results are small, but the correlation is poor, and d03 is the best. The errors in the predicted values of temperature and humidity have obvious fluctuations with time, d02-12 and d03-12 are the best.

Keywords

Urumqi Airport, WRF Model, Meteorological Elements, Quality Assessment

Copyright © 2021 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

乌鲁木齐飞行情报区是国内最大的飞行情报区，也是通往欧洲、中亚地区重要的空中大动脉[1]。作为中国国际航空枢纽的乌鲁木齐地窝堡国际机场(以下简称乌鲁木齐机场)，其地理位置特殊、地形环境复杂，是天气系统的必经之地[2] [3]。随着我国航空运输业的快速发展，复杂天气过程对航班的安全及正常的影响越来越严重，天气过程的准确预报至关重要，目前对各气象要素的预报主要来源于全球模式和中尺度模式预报结果，WRF (Weather Research Forecast)模式作为发展较完善的中尺度数值预报模式之一，有多种参数化方案可供选择，已被广泛应用于各类复杂天气过程的预报试验中。

近年来，国内外学者对天气预报的研究逐渐深入，除了对气候学特征统计分析、天气学预报方法的研究之外，还利用数值模式对各类天气的成因机制以及预报预警等方面开展了研究工作。王澄海等[4]用 WRF 模式对西北地区 1、4 月份风速变化进行模拟，检验了大气数值模式的模拟性能和误差大小。结果表明，WRF 模式对西北地区风场的模拟性能较好。汤浩等[5]对 WRF 模式在新疆区域预报性能的影响进行了研究，得出模式对秋季的风场、高度场、海平面气压场预报准确率较高，春季次之，夏冬季最差。马媛媛等[6]用 WRF 模式对新疆“2·8”大风过程模拟结果进行分析，结果表明，模式对温度和比湿的模拟效果好，对风速的模拟能力尚不足。我国民航气象工作者也针对新疆地区复杂多变的天气过程进行了数值模拟研究。黄海波等[7]利用 MM5 和 WRF 模式预报结果对新疆地区 2008 年 3 月 9 日至 10 日的一次强天气过程进行模式预报效果

的检验,结果表明,模式对部分地区风向预报效果好,对降水类型把握不足。王春红[8]利用 WRFV3 (ARW) 预报模式对 2009 年 10 月 25 日北疆沿天山一带秋冬转换季节的第一场辐射大雾天气进行数值模拟和诊断分析,得出较好地揭示出大雾生消的水汽、层结、动力条件等近地层气象要素的演变特征的结论。综上可知,利用数值模式进行天气预报已成为必不可少的预报方式之一,模式预报结果的检验工作十分重要,不但可以进行客观的偏差订正,还能为预报员利用模式预报结果进行要素预报提供主观订正和信心参考。

本文利用乌鲁木齐机场中尺度预报模式 WRF 模式 2016~2019 年的预报结果,通过最近点插值到机场站点上得到相应的风速、温度、相对湿度、海平面气压等要素,并将之与机场实况要素进行对比分析,讨论不同嵌套区域与不同起报时间对预报结果的影响,期望得到这些要素不同月份、不同季节的预报性能差异,对提高预报准确率、为用户提供精细化预报服务有重要意义。

2. 资料及方法

2.1. 资料来源

2.1.1. 实况资料

本文使用的实况资料来自于乌鲁木齐机场民用航空自动气象观测系统(Aviation Automated Weather Observing Systems, 简称 AWOS),选取 24 小时制整点 METAR 报,时间范围为 2016 年 2 月 20 日起至 2019 年 10 月 8 日。包含 4 种气象要素,分别是风速、温度、相对湿度以及海平面气压。

2.1.2. 预报资料

文中机场 WRF 模式采用三重双向嵌套,以 44°N, 87°E 为中心,水平分辨率分别为 27 km、9 km、3 km,格点数分别为 181 × 151, 271 × 271, 322 × 322,嵌套区域如图 1 所示,D01 区取欧亚范围,d02 区

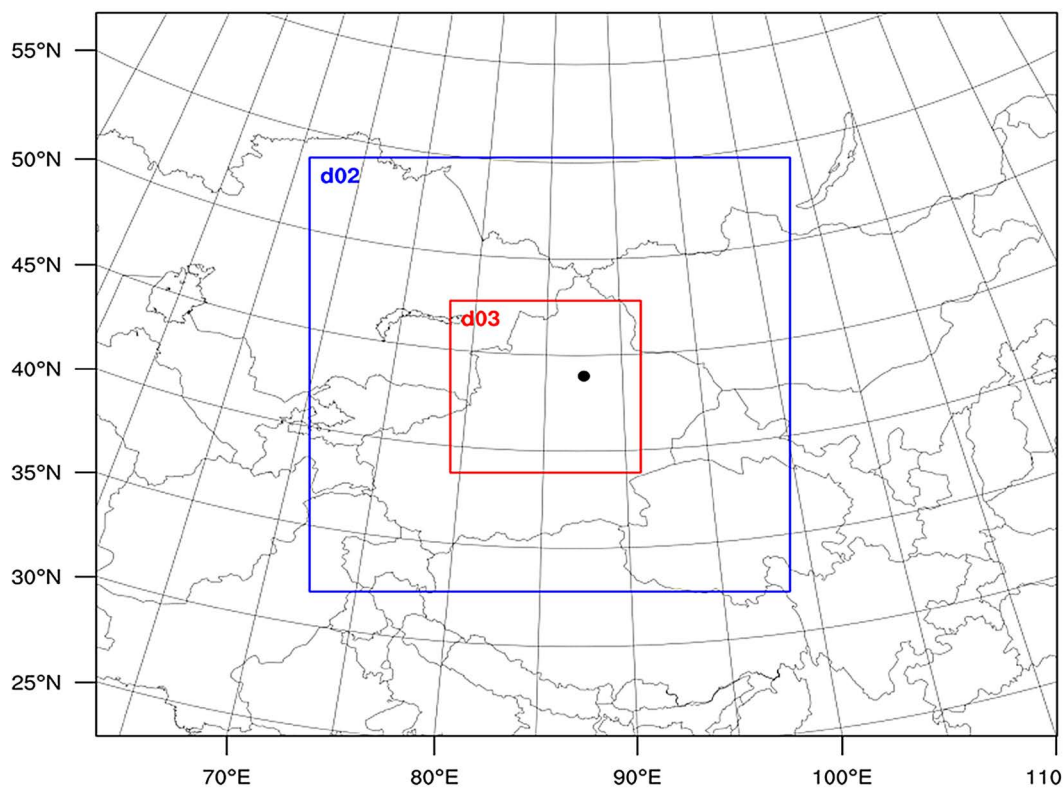


Figure 1. Schematic diagram of model nested area

图 1. 模式嵌套区域示意图

取新疆区域范围, d03 区取乌鲁木齐机场及机场终端区范围, 垂直方向有 40 层, 时间步长分别是 90 s。初始场为 GFS 全球模式预报场 00 时和 12 时(时间为世界协调时 UTC), D01 区逐 3 小时输出预报结果, d02 区和 d03 区逐小时输出预报结果, 预报时效为 60 小时。选取参与检验的嵌套区域为 d02 区及 d03 区, 时间段为 2016 年 2 月 20 日~2019 年 10 月 8 日, 气象要素为通过最近点插值到乌鲁木齐机场站点的风速、温度、相对湿度以及海平面气压等 4 种要素。

2.2. 研究方法

选择误差度量值来体现预报结果的准确性十分重要, 单个指标或统计量并不能捕获环境变量的所有属性[9], 所以文中综合 4 种常用误差度量, 分别是相关系数(correlation coefficient, R)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均偏差(mean bias, Bias)、标准差比(ratio of standard deviations, SDV)和 E [10], 来量化各气象要素的预报值在乌鲁木齐机场的适用性。

标准差比和 E 值一般体现在泰勒图中[11], 其中 SDV 为径向距离, SDV 值越接近于 1 表示预报值与观测值的变化幅度越接近; R 为极坐标图中的角度, 角度越小代表相关系数越大, 观测值是位于 x 轴上 R = 1 且 SDV = 1 的点; E 表示各产品到该点的距离, E 值越小代表预报值与观测值间的相关系数越大、变化幅度越接近。R、E、SDV 三个变量同时显示在单个泰勒图上可以清楚地展现不同预报产品的性能, 不但为描述各要素与观测值间的匹配程度提供了直观的表现形式, 还有助于解释预报结果在乌鲁木齐机场适用性的验证结果。

$$E^2 = SDV^2 + 1 - 2 \cdot SDV \cdot R$$

$$SDV = \frac{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SM_i - \overline{SM})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (STA_i - \overline{STA})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

3. 研究内容

为了检验 WRF 模式对乌鲁木齐机场地面气象要素的预报效果, 为预报员提供偏差订正的参考, 利用 2016 年 2 月 20 日~2019 年 10 月 8 日的机场实况资料与 WRF 模式的预报结果进行了对比分析。选取的预报结果包括不同嵌套区域(d02, d03)和不同起报时间(00, 12 UTC)的四种组合结果: d02-00、d02-12、d03-00、d03-12。

3.1. 乌鲁木齐机场各预报要素与实况的年变化对比分析

表 1 为乌鲁木齐机场 2016~2019 年各气象要素预报值与实况要素值误差度量统计。可以看出, WRF 模式能够较准确的描述海平面气压场的变化, 预报要素与实况要素间的相关系数均大于 0.985, SDV 值最接近于 1 (SDV 越接近于 1, 则预报值与实况间变化幅度越一致), RMSE 和 E 的误差值也最小; 其次为温度和相对湿度, 相关系数分别大于 0.976 和 0.740, SDV 差值在 0.13~0.25 之间, 误差值 E 分别小于 0.24 和 0.67; 预报结果对风速的把握能力相对差一些, 相关系数大于 0.385, SDV 差值小于 0.32, E 大于 1.21。

综合 4 种误差参量分析可知, d02-00 对海平面气压和湿度的预报效果好, 但是相关系数不是最优值; d02-12 对各气象要素预报效果表现稍差; d03-00 对风速及温度的预报效果最好, 偏差量较小, 变化幅度最接近于实况; d03-12 在风速、海平面气压和湿度的相关系数方面表现为最优结果, 预报温度的偏差值最小, 并且能够较准确描绘实况温度和相对湿度的变化幅度。

Table 1. Statistics of simulated values and actual error measurement of various meteorological elements at Urumqi Airport (full year)**表 1.** 乌鲁木齐机场各气象要素模拟值与实况误差度量统计(全年)

要素名称	起报时间及区域范围	R	RMSE	Bias	SDV	E
风速	d02-00	0.385*	2.06	0.31	1.28	1.28
	d02-12	0.387*	2.11	0.35	1.32	1.31
	d03-00	0.403*	1.94	0.24	1.20	1.21
	d03-12	0.410*	1.96	0.27	1.23	1.23
温度	d02-00	0.977*	3.85	-1.10	0.87	0.24
	d02-12	0.976*	3.85	-1.01	0.88	0.24
	d03-00	0.977*	3.74	-0.94	0.88	0.23
	d03-12	0.976*	3.74	-0.85	0.89	0.23
修正海平面气压	d02-00	0.985*	1.90	-1.42	1.06	0.19
	d02-12	0.986*	1.93	-1.81	1.06	0.18
	d03-00	0.986*	1.96	-0.85	1.07	0.19
	d03-12	0.987*	2.00	-0.96	1.08	0.19
相对湿度	d02-00	0.740*	18.09	6.96	0.75	0.67
	d02-12	0.756*	18.27	8.28	0.78	0.66
	d03-00	0.740*	18.21	7.29	0.76	0.67
	d03-12	0.757*	18.42	8.65	0.80	0.65

*代表通过 99%的置信度检验。

3.2. 乌鲁木齐各预报要素与实况的的月变化对比分析

上一部分研究分析了 4 种预报结果对全年风速、温度、海平面气压以及湿度的预报准确度,得知模式对不同气象要素整体变化特征的模拟效果。接下来本文将详细分析模式对不同月份各气象要素预报的时间特征。

通过对全年的要素预报结果与实况进行对比分析,为气象预报提供了模式对不同气象要素预报能力的整体评估。模式在各月份和季节中,其对天气的描述和对气象要素预报的能力不同,下面对不同月份的预报要素与实况进行对比分析,按月评估模式要素预报的性能,希望为实际预报工作和偏差订正提供更优的参考。

图 2 是乌鲁木齐机场 2016~2019 年实况和模式预报的风速、温度、修正海平面气压、相对湿度的月平均变化特征,研究中取要素的月平均值代表该月的要素值。由图可见,温度和海平面气压值呈现“单峰型”,7 月平均温度为峰值,平均海平面气压为谷值,呈现相反的变化趋势。4 种预报结果的温度和海平面气压在数值上相差不大,与实况相比,10 月至次年 2 月的温度预报较实况偏高,3 至 10 月温度预报较实况偏低。

海平面气压 1 至 5 月预报与实况较为一致,5 至 12 月略偏低。对于风速,4 种预报结果在 2~3 月、6~9 月以及 12 月在数值上差异不大,4、5、10、11 及 1 月 d02 区预报风速大于 d03 区。与实况相比,2、3、6、9 月预报与实况最为接近,7、8 月预报较实况略偏低,其余月份预报较实况均明显偏高。

对于相对湿度,模式预报相对湿度的月变化趋势与实际基本一致,4 种预报结果在数值上相差不大,

3~10月预报较实况明显偏高, 11月至次年2月预报较实况略偏低。

综上所述, 4种预报结果的月平均与实况的月平均趋势变化基本一致模式对温度和海平面气压的描述能力较强; 相对湿度在冬季预报效果较好, 其余季节均较实况偏大, 对于风速的预报, 模式对2~3、6~9以及12月的风速预测较好, 其余月份均较实况偏大。

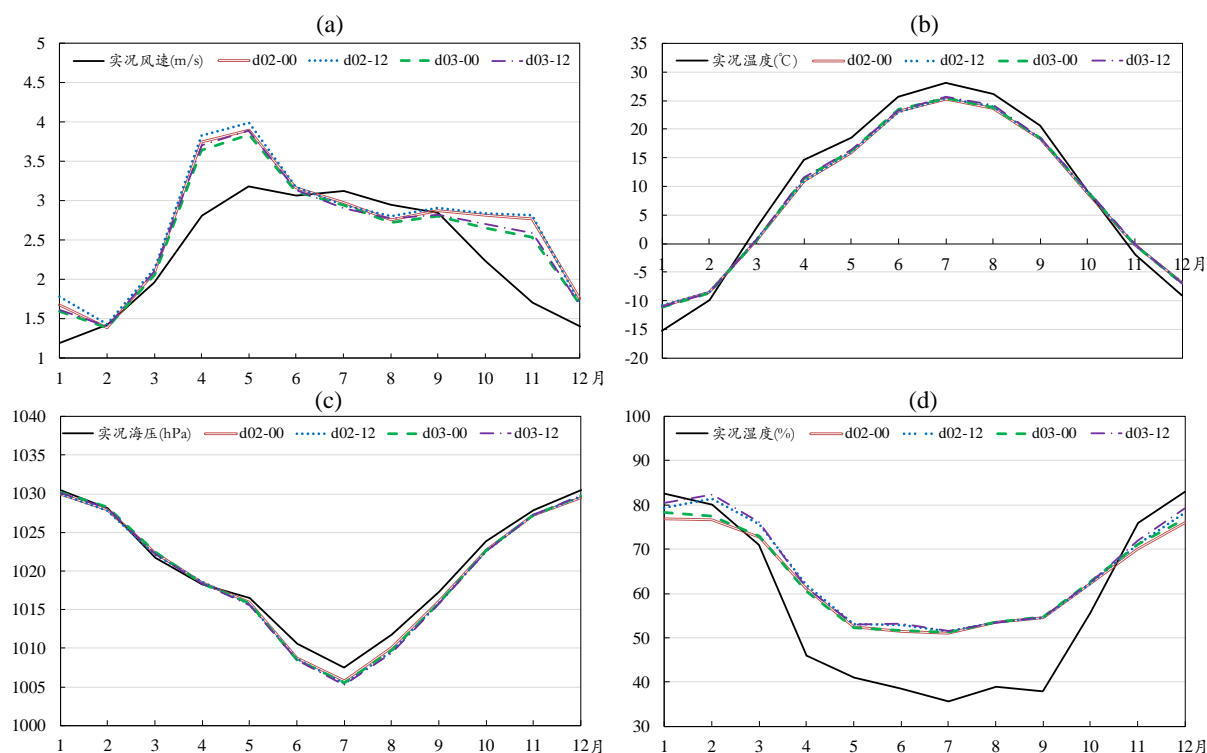


Figure 2. Urumqi Airport 2016~2019 model forecast and actual monthly average change characteristics of wind speed, temperature, corrected sea level pressure, and relative humidity

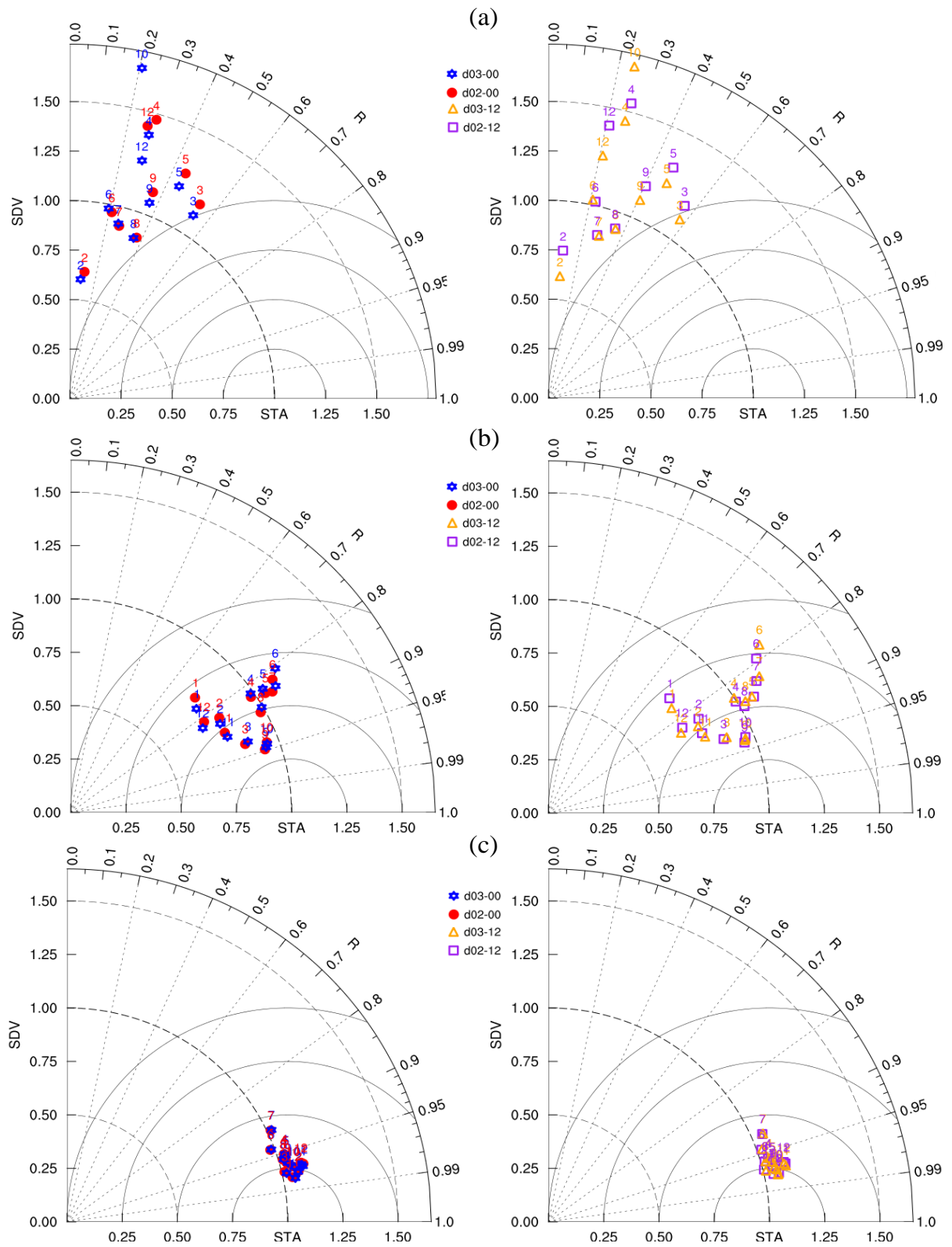
图 2. 乌鲁木齐机场 2016~2019 年模式预报和实况风速、温度、修正海平面气压、相对湿度的月平均变化特征

图 3 是乌鲁木齐机场 2016~2019 年模式预报与实况的风速、温度、修正海平面气压、相对湿度的泰勒图, 由图可见, 模式预报对海平面气压的预报效果最好, 不论从相关性 R , 还是变化幅度 SDV 方面来看, 均为最优; 其次是温度, 各月的相关系数在 0.7~0.95 之间, 变化幅度在 0.71~1.12 之间, 模式对风速和湿度的预报能力稍弱, 尤其对风速, 各月相关系数均小于 0.6, 变化幅度偏差也较大, 4 种组合的预报结果在对要素的预报能力上差距并不明显。

从不同月份上看, 模式对 3 月的风速变化预报能力较强(图 3(a)), 相关系数最高, 且变化幅度最接近于观测值, 其次是 9、8、5 月; 准确度最高的组合为 d03-00 和 d03-12; 对于温度(图 3(b)), 模式能够较准确预报 4、5、8、9、10 月的温度动态变化; 对于海平面气压(图 3(c)), 除 6、7 月预报稍差以外, 其余月份的预报均能较准确描述海平面气压的变化特征; 对于湿度(图 3(d)), 不同月份的预报结果有较大的差异, 6、8、9、11 月变化幅度最接近实况, 4、5、9、10 月预报结果与实况相关性最高, 综合其相关性和变化幅度可知, 模式对 4、5、10 月的预报效果较好, 其中准确度最高的组合为 d02-00, 其次是 d03-12。

图 4 是预报要素与实况的平均偏差。由图可见模式在不同月份对风速、温度、修正海平面气压、相对湿度的预报差异很大。如图 4(a)所示为预报风速与观测的风速的平均偏差, 2、7-9 月, d03 区风速预报与实况的偏差为负, 其余月份均为正, 4、5、11 月的风速预报偏高较大, 偏差值在 0.64~1.09 m/s 之间,

偏差最小的月份为2月和9月，平均偏差值仅为0.01~0.05 m/s。从四种组合整体分析，d03-00的预报偏差最小，预报的准确水平较为平稳，d02-12偏差最大。



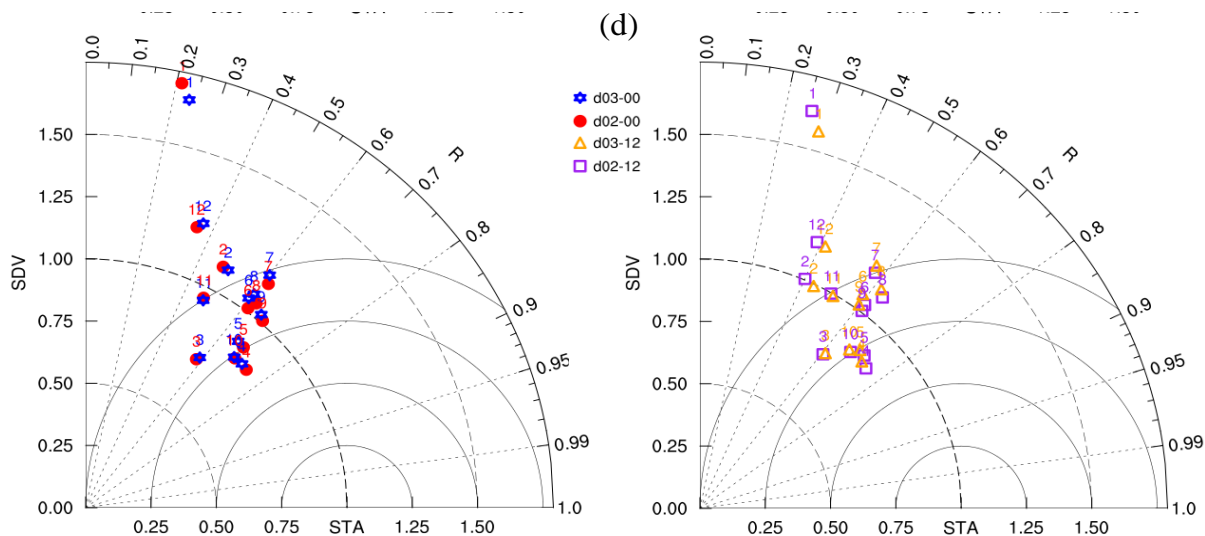


Figure 3. Urumqi Airport 2016~2019 model forecast and actual wind speed, temperature, corrected sea level pressure, and relative humidity Taylor diagram ((a) Wind speed (b) Temperature (c) Sea level pressure (d) Relative humidity)

图 3. 乌鲁木齐机场 2016~2019 年模式预报与实况的风速、温度、修正海平面气压、相对湿度的泰勒图((a)风速(b)温度(c)海平面气压(d)相对湿度)

对于温度预报(图 4(b)), 1、2、11、12 月以及 10 月的 d03 区预报较实况偏高, 其余月份均较实况偏低, 10 月的温度预报偏差最小, 平均偏差小于 0.19°C; 1 月和 4 月预报效果最差, 其余月份偏差值在 2.87°C 以下。综合 d02 和 d03 的预报结果发现, d03 区预报效果明显优于 d02 区, 且 d03-12 组合的预报效果最好。

对于修正海平面气压(图 4(c)), 修正海平面气压预报结果大部分月份较实况偏低, 2、4 月准确度最高, 预报效果最好, 其次为 3、10、12 月; 综合来看, d03 区的预报效果优于 d02 区。

对于相对湿度(图 4(d)), 4~9 月模式预报相对湿度明显较实况偏高, 偏差范围为 11.16%~16.72%, 1~3 月模式对相对湿度的预报效果较好; 四种组合对相对湿度的预报比较平稳, 相互之间偏差不大; 3~10 月 00 时起报的预报效果优于 12 时起报, 其余月份 12 时起报预报效果优于 00 时起报。

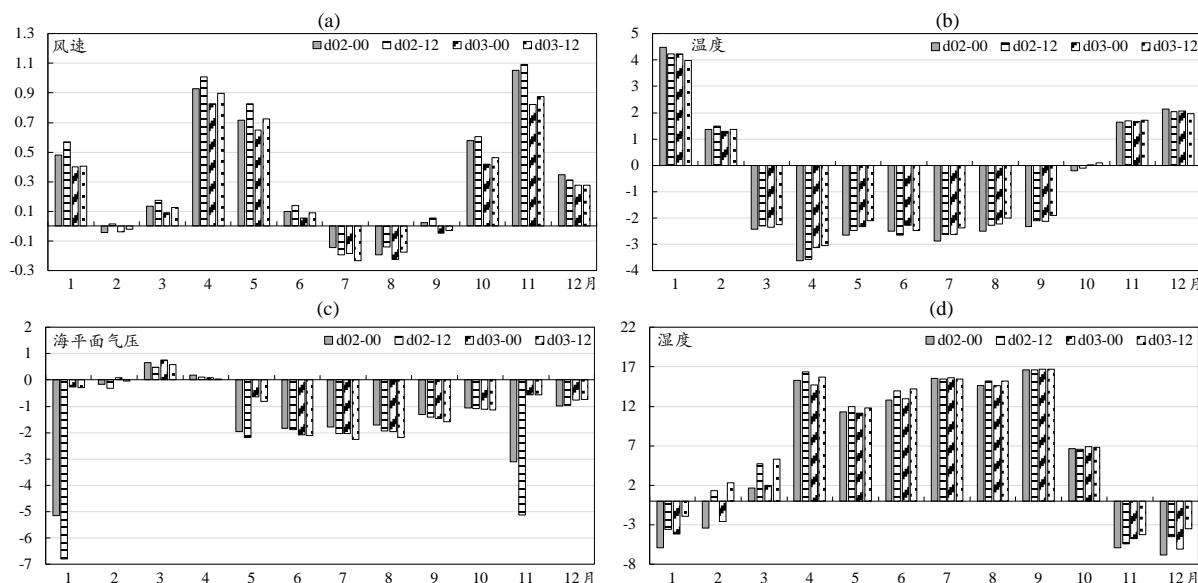


Figure 4. The average deviation of the model forecast elements from January to December

图 4. 模式预报要素预实况在 1~12 月的平均偏差

图5是模式预报要素与实况在1~12月的均方根误差,右图可见,模式对春秋风速,春冬季的温度以及夏季的修正海平面气压预报效果较差,对春冬季的湿度预报效果优于夏秋季。d03-00对风速的预报效果最好,其在1、2、4、5、10~12月的均方根误差最小,d02-12的预报效果最差;d03区对温度的预报优于d02区,均方根误差控制在1.93~5.03之间;d03-12对海平面气压预报效果优于其它组合,在1~4及11月均方根误差值最小;d02-00对相对湿度预报效果优于其它组合,其均方根误差在4、6~10月在四种组合中最小。

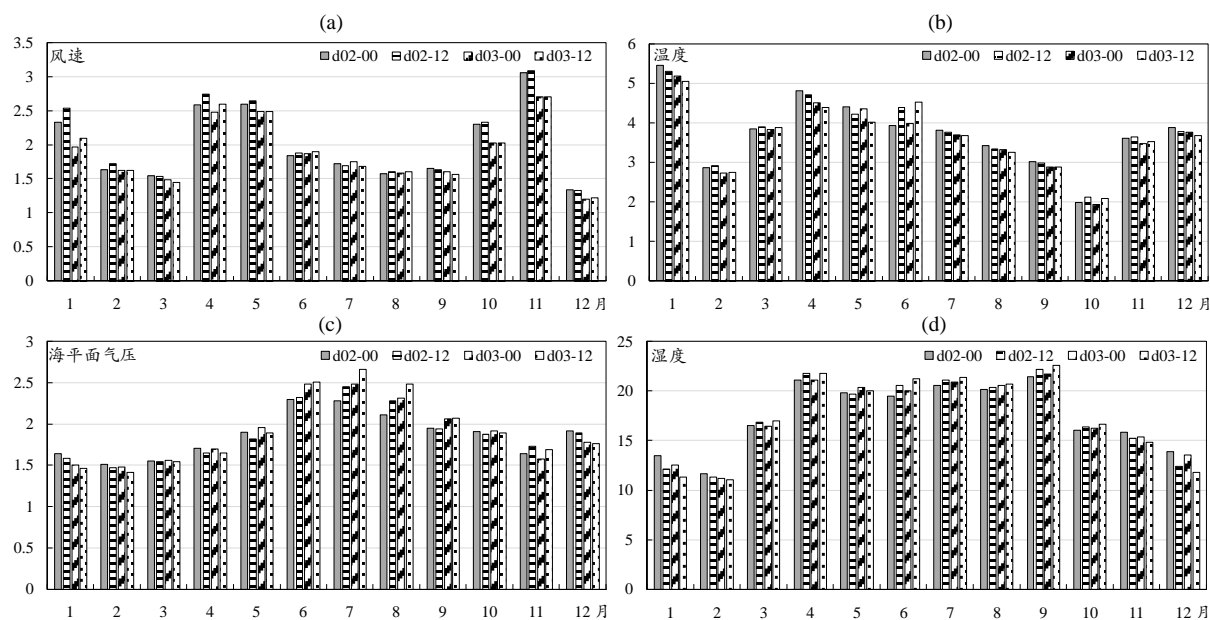


Figure 5. Comparison of the root mean square error between the forecast results of each element and the observations from January to December

图5. 各要素预报结果与实况值1~12月均方根误差对比图

3.3 乌鲁木齐机场各预报要素与实况的日变化对比分析

通过对全年及月际变化的要素预报结果的对比分析,可知模式在一年中的不同月份对各气象要素预报的能力存在差异,且具有明显的季节性变化特征,本节将进一步对预报要素与实况的日变化特征进行对比分析,以求获取不同模式预报结果对气象要素在一日内不同时间段的预报效果。

图6为各要素预报结果与实况值日变化相关系数对比图,其中风速为次坐标轴。从相关性来看,各预报值与海平面气压实测值有显著的正相关关系,相关系数均大于0.98。风速的预报效果较差,预报结果与实测值相关系数仅为0.2~0.55,其中d03-00、d03-12预报结果与实测值相关性最高。模式对湿度的预报结果有明显的日变化特征,02~11时相关系数均大于0.98,12时后相关性开始下降,至24时达到最低值。其中d02-12、d03-12相关性最高。对于温度,d03-00、d03-12预报效果最优,并且在24小时中相关系数变化平稳,维持在0.975以上。

图7为各要素预报结果与实况值日变化平均偏差对比图,其中湿度为次坐标轴。从平均偏差来看,风速的预报结果较实测值偏高,四种预报值差异不大,d03区预报结果整体偏差最小。温度与湿度平均偏差呈反相关变化,湿度在05~14时平均偏差增大,15时~04时减小;温度变化则相反,其中d02-12、d03-12对两种要素的预报结果偏差较小。海平面气压模式预报值较实测值偏低,偏差值大小随时间成波动变化,其中d02-00、d03-00偏差整体较小。

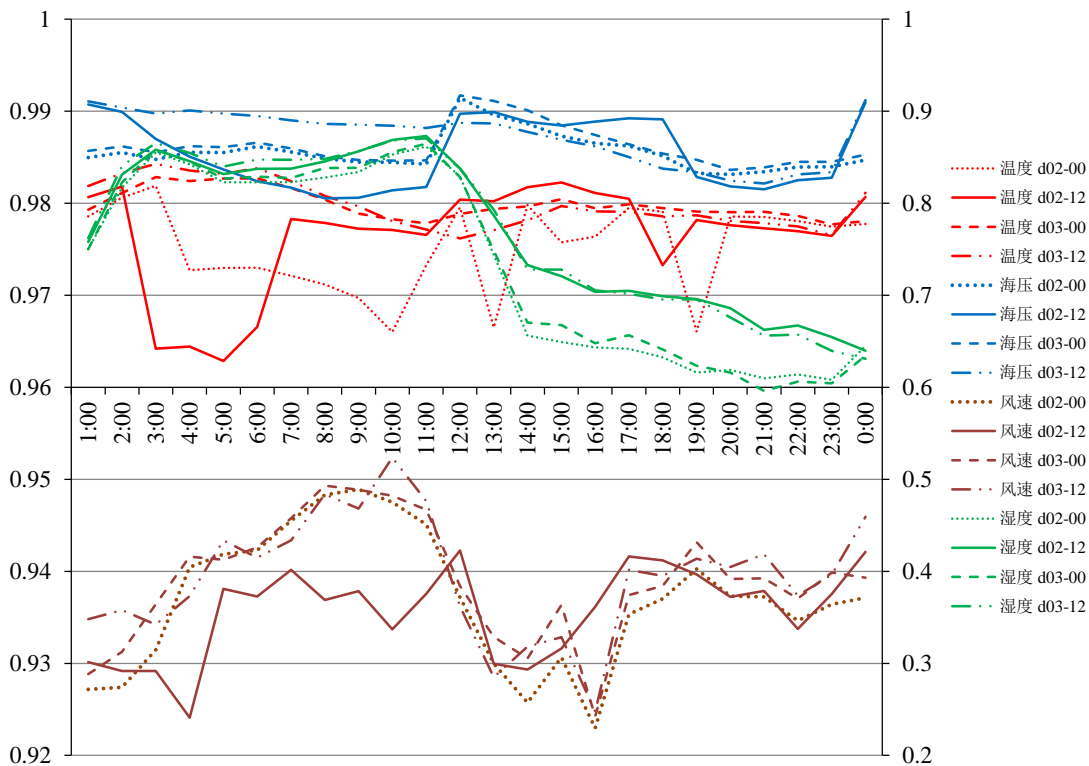


Figure 6. Comparison of the correlation coefficient between the forecast results of each element and the daily variation of the observations (wind speed is the secondary axis)

图 6. 各要素预报结果与实况值日变化相关系数对比图(风速为次坐标轴)

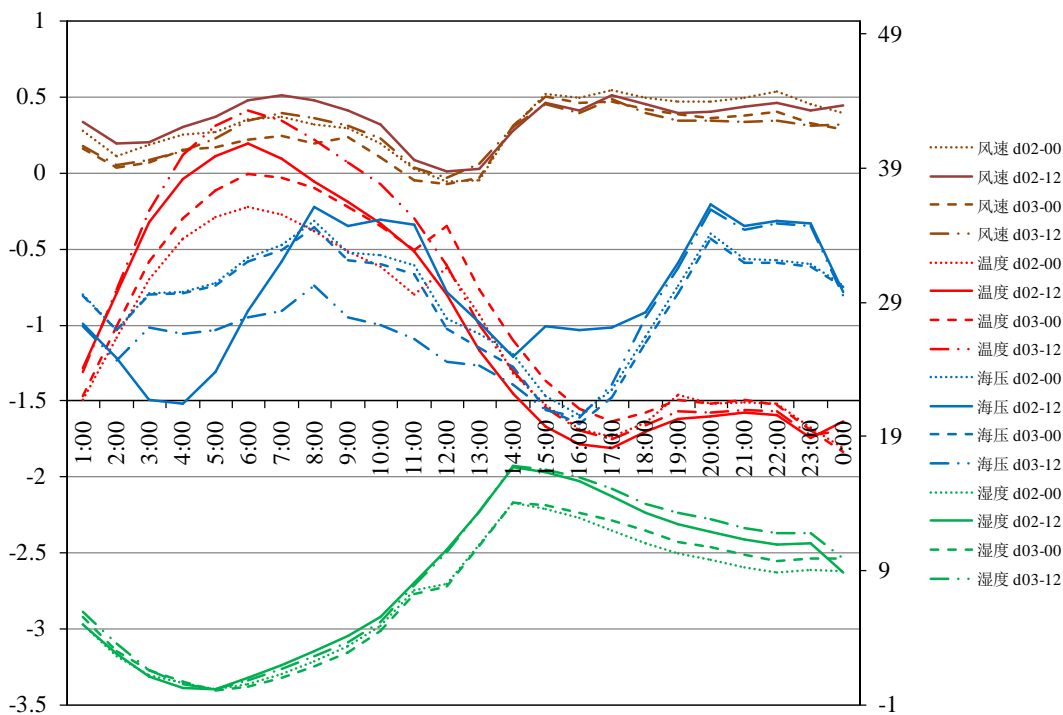


Figure 7. Comparison of the average deviation between the forecast results of each element and the observations of the daily variation (humidity is the secondary axis)

图 7. 各要素预报结果与实况值日变化平均偏差对比图(湿度为次坐标轴)

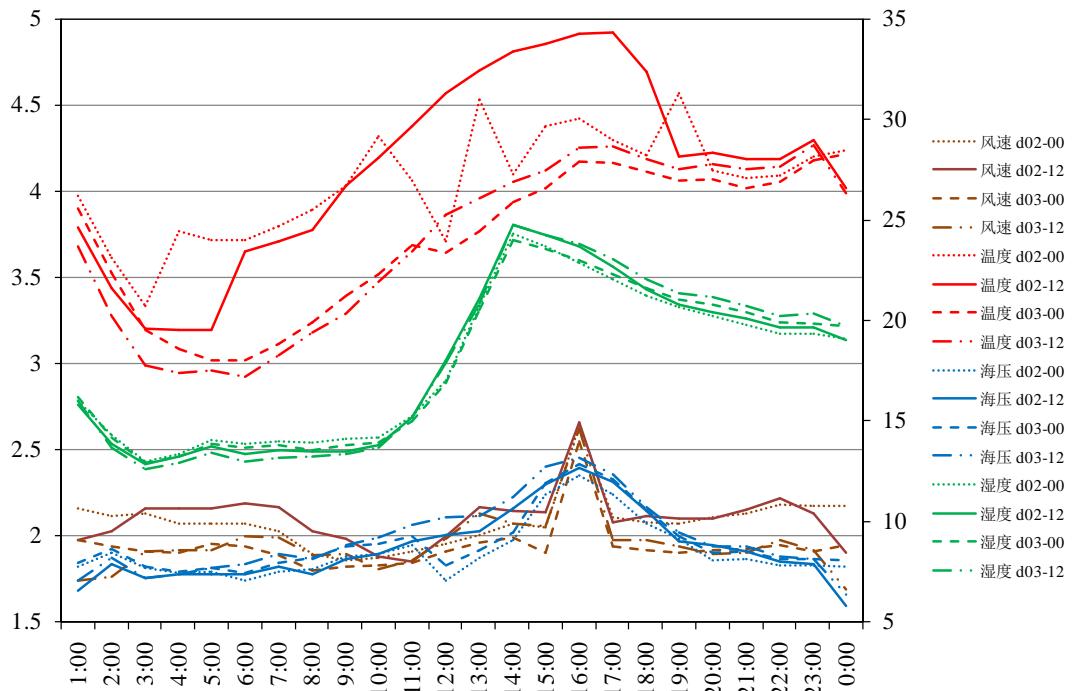


Figure 8. Comparison of the root mean square error between the forecast results of each element and the observations (humidity is the secondary axis)
图 8. 各要素预报结果与实况值日变化均方根误差对比图(湿度为次坐标轴)

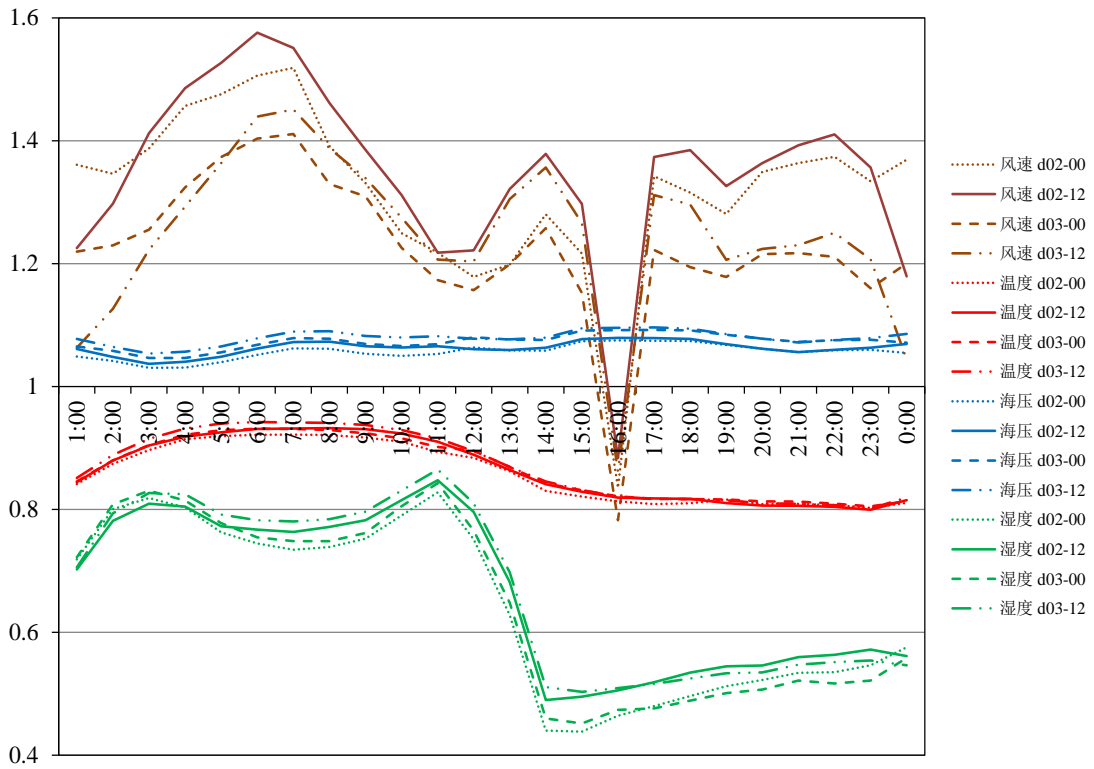


Figure 9. Comparison of the daily variation range between the forecast results of each element and the observations
图 9. 各要素预报结果与实况值日变化变化幅度对比图

图 8 为各要素预报结果与实况值日变化均方根对比图, 其中湿度为次坐标轴。由图可知, 各气象要素均方根误差自 03、04 时开始增大, 14~17 时误差值最大, 随后误差值逐渐减小。其中均方根误差值整体较小的预报结果为 d03-00、d03-12。

图 9 为各要素预报结果与实况值日变化的变化幅度对比图, 由图可知, 温度与海平面气压的预报值与实测值的变化幅度最接近, $SDV \approx 1$; 对于温度来说, d03-00、d03-12 最优, 对于海平面气压, d02 区结果最优。风速的预报值与实测值的变化幅度在 24 小时内呈上下波动, 在 03~09 时的变化幅度明显偏高, 16 时偏低; 其中 d03-00、d03-12 结果最优。湿度的预报值与实测值变化幅度在 02~12 时较一致, 在 13~01 时变化幅度差异较大, 预报值明显低于实测值。

4. 总结与讨论

文章利用 2016~2019 年 WRF 模式预报对乌鲁木齐机场风速、温度、修正海平面气压、相对湿度等要素预报结果与机场实况进行对比分析, 利用相关系数、均方根误差、平均偏差和标准差比等统计参数综合评估模式对乌鲁木齐机场要素预报效果, 结论如下:

1) 从年变化来看, 模式对海平面气压预报效果最好, 其次是温度、湿度, 对风速的预报能力相对薄弱; d03-00 对风速及温度的预报效果优于其它 3 种组合, 其次分别为 d03-12、d02-00 及 d02-12。

2) 从月变化来看, 模式预报对温度和修正海平面气压的变化趋势和数值大小预报能力较强, 对春、夏、秋季相对湿度的预报较实况偏高, 对春冬季的相对湿度预报效果优于夏秋季, 对风速的预报效果稍差。其中 d03-00 预报偏差最小, 预报的水平较为平稳, d02-12 整体偏差最大。

3) 从日变化来看, 各预报结果对海平面气压的模拟效果较好, 以 d03-00、d03-12 为最优; 对风速预报结果的平均偏差和均方根误差较小, 但相关性较差, 以 d03 为优; 对温度、湿度的预报值误差随时间变化有明显的波动, 其中以 d02-12、d03-12 最优。

参考文献

- [1] 朱雯娜, 黄海波, 杜安妮, 等. 乌鲁木齐地窝堡国际机场航空气候志(1986 年~2015 年)[Z].
- [2] 张家宝. 新疆短期天气预报指导手册(1986 年) [Z].
- [3] 中国民用航空局. 中国民航国内航空资料汇编 ZWWW(2018-4-15) [Z].
- [4] 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(2): 32-38.
- [5] 汤浩, 贾丽红. 背景场和物理过程对 WRF 模式在新疆区域预报性能的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(3): 27-33.
- [6] 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.
- [7] 黄海波, 谭艳梅, 朱雯娜. MM5 和 WRF 模式在制作精细化预报中的初步应用[J]. 空中交通管理, 2009(10): 24-25.
- [8] 王春红. 乌鲁木齐国际机场 2009 年秋冬初雾天气的数值模拟分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011(5): 19-23.
- [9] 梁晓, 郑小谷, 戴永久, 等. EnKF 中误差协方差优化方法及在资料同化中应用[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4): 397-405.
- [10] Albergel, C., Dorigo, W., Reichle, R.H., et al. (2013) Skill and Global Trend Analysis of Soil Moisture from Reanalysis and Microwave Remote Sensing. *Journal of Hydrometeorology*, **14**, 1259-1277. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0161.1>
- [11] Taylor, K.E. (2011) Summarizing Multiple Aspects of Model Performance in a Single Diagram. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>