

成都市地面相对湿度变化特征及模拟研究

林宏磊^{1,2,3,4}, 王超^{1,2,3,4*}, 肖天贵^{1,2,3,4}, 唐梓轩^{1,2,3,4}, 朱秋婷^{1,2,3,4}

¹复杂地形区域气候变化与资源利用四川省重点实验室, 四川 成都

²成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站, 四川 成都

³气象灾害预测预警四川省工程研究中心, 四川 成都

⁴成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年5月29日; 录用日期: 2025年7月4日; 发布日期: 2025年7月11日

摘要

地面空气湿度广泛影响地球生态系统和人类生活, 在诸多领域具有重要意义, 本文利用成都市2020~2024年期间地面相对湿度观测数据, 运用统计和数值模拟相结合的方法研究其演变特征, 结果表明: 2020~2024年成都市平均地面空气相对湿度为79.32%, 近五年呈明显下降趋势, 五年降幅为2.6%; 相对湿度季节变化和日变化显著, 季节变化呈“秋高春低”, 日变化呈现“先降后升”趋势, 二阶多项式和正弦函数可较好拟合其变化特征; WRF模式模拟试验中, 陆面过程选取Noah参数化方案时, 模拟的相对湿度与观测值吻合度最高, 该方案可应用于成都地区缺少地面观测数据的区域, 为气象研究、环境治理和农业生产等方面提供数据基础。

关键词

成都市, 地面相对湿度, 演变特征, WRF模式

Variation Characteristics and Numerical Simulation of Surface Relative Humidity in Chengdu

Honglei Lin^{1,2,3,4}, Chao Wang^{1,2,3,4*}, Tiangui Xiao^{1,2,3,4}, Zixuan Tang^{1,2,3,4}, Qiuting Zhu^{1,2,3,4}

¹Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

³Sichuan Provincial Engineering Research Center for Meteorological Disaster Prediction and Early Warning, Chengdu Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 林宏磊, 王超, 肖天贵, 唐梓轩, 朱秋婷. 成都市地面相对湿度变化特征及模拟研究[J]. 自然科学, 2025, 13(4): 775-781. DOI: 10.12677/ojns.2025.134081

Abstract

Surface air humidity widely influences global ecosystems and human life, holding significant importance in numerous fields. This study utilizes surface relative humidity observation data in Chengdu from 2020 to 2024, employing a combination of statistical and numerical simulation methods to investigate its evolution characteristics. The results show that the average surface air relative humidity in Chengdu from 2020 to 2024 was 79.32%, exhibiting a remarkable downward trend in the past five years with a five-year decline of 2.6%. The relative humidity demonstrates significant seasonal and diurnal variations: the seasonal variation shows a pattern of “high in autumn and low in spring,” while the diurnal variation follows a “first decrease then increase” trend. Second-order polynomials and sine functions can effectively fit these variation characteristics. In WRF model simulation experiments, when the Noah parameterization scheme is selected for land surface processes, the simulated relative humidity shows the highest consistency with observed values. This scheme can be applied to areas lacking ground observation data in Chengdu, providing a data foundation for meteorological research, environmental governance, agricultural production, and other aspects.

Keywords

Chengdu, Surface Relative Humidity, Variation Characteristics, WRF Model

Copyright © 2025 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

世界气象组织(WMO)指出,近50年全球平均气温升高速率是过去2000年中最快的,极端天气事件频率和强度显著增加[1],在此背景下,区域气候要素的演变特征研究尤为重要。中国作为受气候变化影响显著的国家之一,我国的区域性重大干旱事件也明显增多,特别是地处西南的亚热带气候湿润区[2],西南地区因其复杂地形和独特气候系统成为研究热点。四川省成都市地处四川盆地西部,受季风气候和地形抬升作用影响,四川盆地多雾同四川盆地的地理环境所形成的近地层空气湿度大密切相关[3],其空气湿度变化具有显著的区域特征。此外,成都市作为中国西南重要的农业基地,空气湿度对作物蒸腾作用和病虫害发生具有直接影响,湿度等气象因子与根肿病发病率关系最密切[4]。因此,探究成都市地面空气湿度的演变规律,对气候适应、环境治理和农业生产均具有重要价值。

空气湿度作为关键气象参数,其时空变化特征一直是气象学研究的重点[5]。张宇等(2015)发现,城市地表湿度显著区对城市热岛效应起到了有效的调控作用[6];而潘小乐(2007)指出,不同相对湿度条件下气溶胶颗粒物的亲水增长对散射特性存在一定影响[7]。但是,对于近年来成都地区地面空气湿度研究相对较少,在全球变暖的背景下的成都城市空气湿度演变是否有新的变化特征,还有待进一步研究。本文拟通过统计分析近5年最新观测资料,总结归纳成都市地面湿度演变特征,并开展WRF(Weather Research and Forecasting)模式模拟试验,建立适合成都市最优参数化方案,本研究可为后续区域气候研究、环境治理等方面提供了理论依据。

2. 资料与方法

本文所用的地面气象数据来源于成都市气象局,获取 56187 温江站国家基本气象站点 2020 年 1 月至 2024 年 12 月地面逐时的观测资料,站点经度为 $103^{\circ}87'$, 纬度为 $30^{\circ}75'$, 海拔高度范围为 548 m, 所有资料均进行严格的质量监控,将异常值处理后再对数据进行统计分析;选用 WRF 模式,利用 NCEP 的 FNL 资料作为模式的驱动资料开展模拟试验,应用均方根误差(RMSE)和相关系数(R^2)评估模拟精度,分析三种常用的陆面过程方案在成都地区的适用性,选取最适合成都地面空气湿度模拟的参数化方案。

3. 地面相对湿度特征

3.1. 年际变化特征

从图 1 的年际变化来看,2020~2024 年成都市平均地面空气相对湿度为 79.32%,近五年呈持续下降趋势,并通过置信度为 90%的显著性检验,五年间整体降幅为 2.6%。采用线性拟合函数($y = kx + b$)(x 为年份, y 为相对湿度, $k = -0.628$, $b = 1349.518$)对年变化趋势进行量化。通过拟合,红色线性曲线清晰呈现相对湿度的递减方向,其中负斜率 k 量化了递减速率,其中 R^2 为 0.855,拟合效果较为理想。

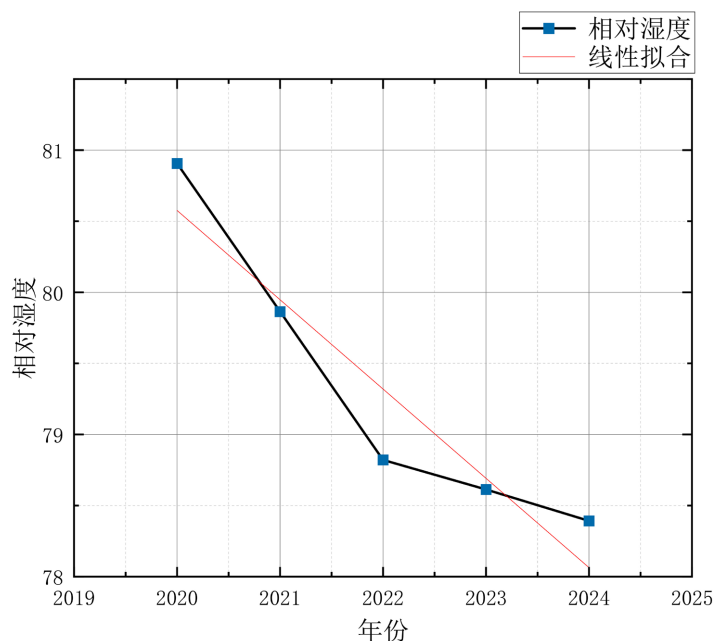


Figure 1. Annual variation of relative humidity from 2020 to 2024

图 1. 2020~2024 相对湿度年变化情况

3.2. 季节变化特征

图 2(a)为相对湿度季节变化及多项式(表 1)拟合结果,其中 R^2 为 0.869,拟合效果较为理想,可较好地反应成都地区相对湿度的季节变化特征,所用二阶多项式拟合函数为:

$$y = \text{Intercept} + \sum_{i=1}^2 B_i * x^i \quad (i=1,2) \quad (1)$$

成都地区秋季相对湿度最高为 83.44%,春季较低为 75.16%,冬季夏季次之,相对湿度呈现“秋高春低”的季节特征。这与成都气候特征相关,秋季在华西秋雨的影响下,大气中水汽质量较大,并且秋季气温开始下降,空气的饱和和水气压下降,相对湿度是空气实际水气压除以饱和水气压,所以计算出最大的相

对湿度出现在秋季；而在春季，虽然空气中水汽质量较冬季大，但春季开始增温，空气饱和和水气压上升，所以计算出的相对湿度最小。图 2(b)中 2020~2024 年成都市相对湿度季节变化曲线，各年份呈现统一的季节波动规律，但数值存在差异，2021 年秋季相对湿度最高，为 84.30%，2020 年春季最低，为 71.23%。

Table 1. Fitting parameters for seasonal variations of relative humidity

表 1. 相对湿度季节变化各项拟合参数

Intercep		65.11732
B (多项式系数)	B ₁	-35.82358044
	B ₂	1.027204952

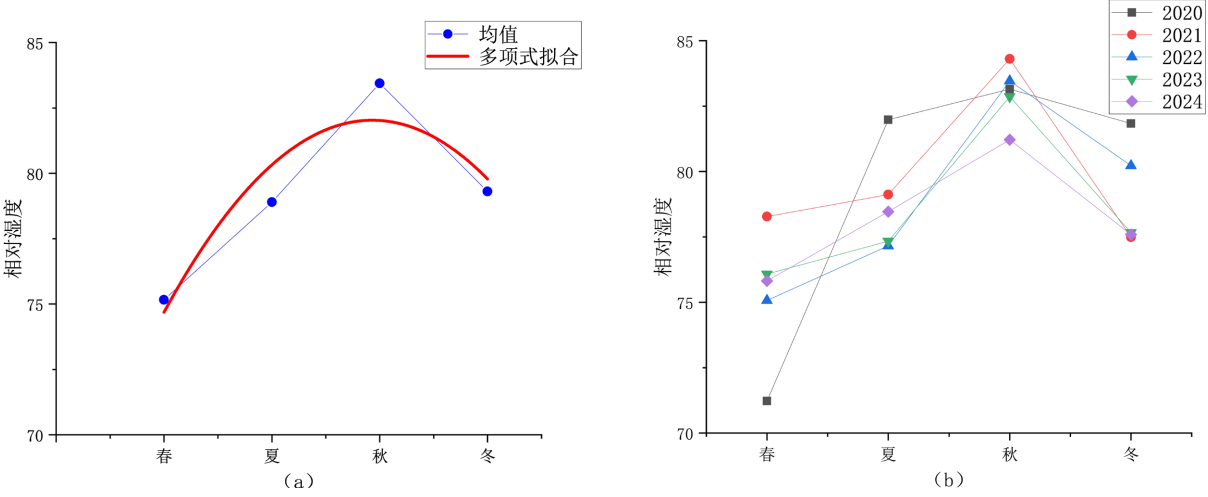


Figure 2. Seasonal variation of relative humidity from 2020 to 2024

图 2. 2020~2024 相对湿度季节变化情况

3.3. 日变化特征

图 3(a)表示了相对湿度日变化特征，相对湿度在 7 时达到峰值，为 92.78%，17 时达到谷值，为 61.47%，呈现明显的单峰形态。这一特征本质上主要是由温度的日变化导致的，显著的温度日变化导致饱和和水气压变化，从而导致相对湿度出现明显日变化特征，与此同时，也与水汽蒸发凝结等物理过程有关。针对该周期性规律，采用正弦函数进行拟合(其参数见表 2)，拟合方程为：

$$y = y_0 + A * \sin(\pi * (x - x_c) / w) \quad (2)$$

Table 2. Fitting parameters for diurnal variations of relative humidity

表 2. 相对湿度日变化各项拟合参数

y_0	78.97837
x_c	-0.83717
w	10.8472
A	16.29799

从拟合效果看， R^2 的值为 0.949，较好复现了相对湿度日变化的峰值、谷值位置，还准确捕捉了波动趋势，拟合效果良好，可很好地反映出成都地区相对湿度日变化特征。图 3(b)为每年的相对湿度日变化曲线，变化趋势一致，但具体数值有一定差异，反映出相对湿度演变具有一定的年际差异。

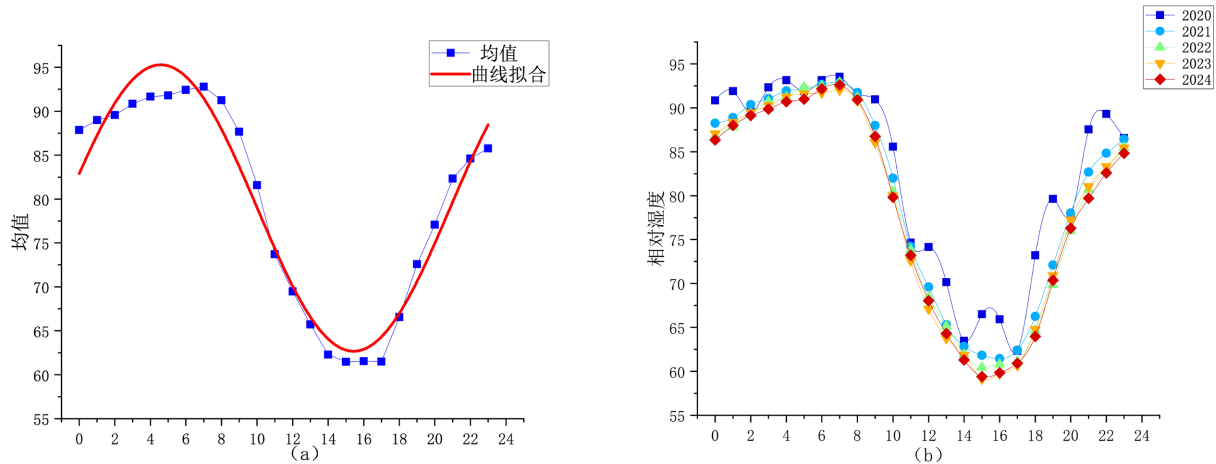


Figure 3. Daily variation of relative humidity from 2020 to 2024
图 3. 2020~2024 相对湿度日变化情况

4. 相对湿度模拟研究

由于观测站点空间分辨率有限，可以借助数值模式，把相对湿度数据合理地从点到面的扩展，为更多无观测的区域提供基础数据。本文采用 WRF 模式开展数值模拟试验，该模式由美国国家大气研究中心 (NCAR)、国家环境预报中心(NCEP)等机构联合开发，是一款面向大气科学研究与业务预报的中尺度数值模式，其设计聚焦于高分辨率、可扩展的气象模拟，为精细化气象要素分析提供重要平台。模式中有众多参数化方案可供选择，其中陆面过程方案对地面气象要素模拟影响最大。

大气与下垫面的相互作用是通过大气与下垫面之间的动量、热量和水汽交换实现的，该过程称为陆面过程，下垫面对大气环流的影响除了陆面过程外，还受大气低层的动量输送、热量输送、水汽输送、摩擦效应等边界层特征的影响。本文通过不同陆面过程参数化方案对成都市地面相对湿度的开展模拟，以气象观测站一个点扩展成城市区域的一个面，为揭示区域湿度时空演变规律提供了多视角数据。本研究针对 2023 年 11 月 30 日至 2024 年 3 月 1 日期间，通过以下三种常用陆面参数化方案(TDS、Noah、RUC)对成都市地面空气相对湿度进行模拟，其他方案详见表 3，模拟试验与实际观测数据进行对比分析，综合评估三套参数化方案的模拟效能，最终筛选出最优方案如下。

Table 3. WRF mode parameterization scheme
表 3. WRF 模式参数化方案

陆面过程	微物理	边界层	长波辐射	短波辐射
TDS	WSM3	MYJ	RRTM	Dudhia
Noah	WSM3	MYJ	RRTM	Dudhia
RUC	WSM3	MYJ	RRTM	Dudhia

从图 4 相对湿度模式资料与观测值对比折线图来看，三种模式在不同时段对相对湿度的模拟表现各有特点。在 0 时刻附近，TDS 方案和 RUC 方案的模拟值与观测值较为接近，相对湿度均处于较高水平，约在 90%~95%之间，而 Noah 方案的模拟值略低于观测值，约为 85%。随着时间推进，在 0~10 时刻期间，各模式模拟值与观测值均呈现下降趋势。其中，Noah 方案下降幅度最为显著，相对湿度从约 85%降至 50%左右，与观测值的变化趋势基本一致，但数值上存在一定偏差。TDS 方案和 RUC 方案下降趋势相对缓和，TDS 方案相对湿度降至 75%~80%之间，RUC 方案降至 85%左右，二者与观测值相比，在数

值上也存在一定差异。在 10~20 时刻期间, 各模式模拟值与观测值均呈现上升趋势。RUC 方案上升趋势较为明显, 相对湿度从约 85%上升至 95%左右, 与观测值的上升趋势和数值较为接近。TDS 方案相对湿度从 75%~80%上升至 90%~95%之间, Noah 方案从 50%左右上升至 85%左右, Noah 方案虽然在上升趋势与观测值相符, 但在数值上仍与观测值存在一定差距。

三种模式在一定程度上能够反映出相对湿度的日变化趋势, 但在具体数值上与观测值均存在不同程度的偏差。为综合评估各模式表现, 引入 Pearson 相关系数(r)和均方根误差($RMSE$)作为评判指标, 计算所用方程如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{4}$$

经计算, 各模式相关参数所得结果如表 4, Noah 方案相关系数相对较高为 0.977, 表明该方案在整体变化趋势和数值上与观测值的吻合度相对较高, 其均方根误差较小为 4.416 表明其方案的模拟值与观测值误差相对较小; TDS 参数化方案次之; RUC 无论是相关系数和均方根误差, 表现均较差。由此可见, 在开展成都地区地面相对湿度模拟时, 陆面过程方案可选用 Noah 得到的模拟效果较好, 地面相对湿度数据更加合理可信。

Table 4. Relative humidity model data and observed value parameters
表 4. 相对湿度模式资料与观测值参数

	TDS	Noah	RUC
Pearson 相关系数(r)	0.956	0.977	0.881
均方根误差($RMSE$)	12.383	4.416	16.435

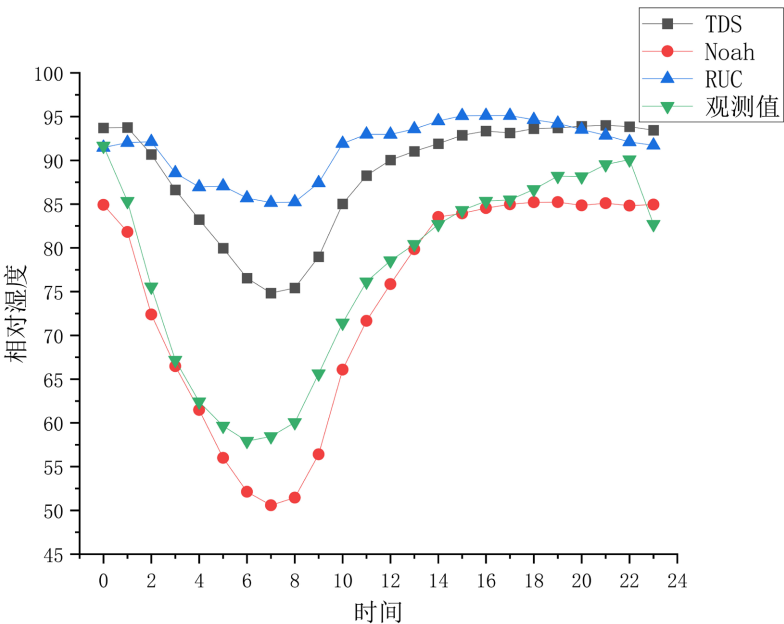


Figure 4. A line graph comparing the relative humidity model data with the observed values
图 4. 相对湿度模式资料与观测值对比折线图

5. 结论

本文利用成都市 2020~2024 年地面相对湿度数据,分析了相对湿度的年际、季节以及日变化特征,直观展现湿度的分布规律,从而清晰地呈现空气湿度在不同时间尺度下的整体特征;同时结合 WRF 数值模式,开展模拟试验,取得以下主要结论:在湿度演变特征上,2020~2024 年成都市平均地面空气相对湿度为 79.32%,近 5 年呈持续下降趋势,五年降幅 2.6%;相对湿度季节变化中,秋季最高为 83.44%,春季最低为 75.16,冬季和夏季次之,二阶多项式拟合可较好反映出季节变化特征;相对湿度日变化显著,7 时达到最大 92.78%,18 时最低 61.49%,正弦函数拟合可较好反映出日变化特征,各年份变化趋势相似,有一定数值差异;通过 WRF 模式模拟试验发现, Noah 参数化方案在整体变化趋势和数值上与观测值的吻合度相对较高,可利用此方案开展成都地区的数值模拟,为其他没有观测站点的区域提供合理可信的地面相对湿度基础数据。

基金项目

资助课题:云南省重点研发计划项目(202203AC100006);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010408)。

参考文献

- [1] Chapman, P.M. (2012) Global Climate Change and Risk Assessment: Invasive Species. *Integrated Environmental Assessment and Management*, **8**, 199-200. <https://doi.org/10.1002/ieam.1253>
- [2] 宁梓好, 徐宪立, 杨东, 等. 中国西南地区饱和水汽压差的年际变化及其影响因素[J]. 农业现代化研究, 2022, 43(1): 172-179.
- [3] 顾清源, 徐会明, 陈朝平, 等. 四川盆地大雾成因剖析[J]. 气象科技, 2006, 34(2): 162-165.
- [4] 胡琮, 郑东颖, 檀根甲, 等. 影响油菜根肿病发生流行的因子分析[J]. 植物保护, 2014, 40(3): 157-160.
- [5] 邓元红, 王世杰, 等. 西南地区土壤湿度与气候之间的关系及其记忆性[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 86-88.
- [6] 张宇, 陈龙乾, 王雨辰, 等. 基于 TM 影像的城市地表湿度对城市热岛效应的调控机理研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 629-640.
- [7] 潘小乐. 相对湿度对气溶胶散射特性影响的观测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007.