

# 典型盆地城市风廓线演变特征及模拟研究

唐梓轩<sup>1,2,3,4</sup>, 王超<sup>1,2,3,4\*</sup>, 肖天贵<sup>1,2,3,4</sup>, 林宏磊<sup>1,2,3,4</sup>, 朱秋婷<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>气象灾害预测预警四川省工程研究中心, 四川 成都

<sup>4</sup>成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月4日; 录用日期: 2025年7月10日; 发布日期: 2025年7月18日

## 摘要

研究成都地区风廓线的演变特征具有重要的科学意义和实际应用价值。本文利用成都市温江气象站2020~2024年观测数据通过风速廓线、风向玫瑰图, 总结归纳风廓线的演变规律, 采用WRF数值模拟评估了常用的三种边界层参数化方案(YSU、MYJ、ACM2)对成都地区风场的模拟性能。结果表明: (1) 成都地区08时与20时风场垂直结构特征相似, 多项式拟合可较好地表征风廓线变化特征; 平均风速随高度呈现先增后减趋势, 低层冬季平均风速最小夏季最大, 中高层相反, 春季、秋季特征相似; 其中850 hPa主导风向为东北风, 到700 hPa偏南风增加, 500 hPa以西风为主导, 季节主导风向在700 hPa及以上层次存在差异, 而且夏季的风向转换较多。(2) 三种方案均能有效模拟出成都地区风场特征, 通过模拟结果和观测对比显示, 采用YSU边界层方案为最优参数化方案。

## 关键词

风廓线, 成都市, WRF模式, 风场特征

# Vertical Variation Characteristics and Simulation Study of Wind Profiles in Typical Basin Cities

Zixuan Tang<sup>1,2,3,4</sup>, Chao Wang<sup>1,2,3,4\*</sup>, Tiangui Xiao<sup>1,2,3,4</sup>, Honglei Lin<sup>1,2,3,4</sup>, Qiuting Zhu<sup>1,2,3,4</sup>

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

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

<sup>3</sup>Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province,

\*通讯作者。

文章引用: 唐梓轩, 王超, 肖天贵, 林宏磊, 朱秋婷. 典型盆地城市风廓线演变特征及模拟研究[J]. 自然科学, 2025, 13(4): 826-836. DOI: 10.12677/ojns.2025.134087

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

<sup>4</sup>School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 4<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 10<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 18<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Studying the evolution characteristics of wind profiles in the Chengdu area has significant scientific significance and practical application value. In this paper, based on the observation data of Wenjiang Meteorological Station in Chengdu from 2020 to 2024, through wind speed profiles and wind direction rose diagrams, the evolution laws of wind profiles are summarized and concluded. The simulation performance of three boundary layer parameterization schemes (YSU, MYJ, ACM2) for the wind field in Chengdu area is evaluated by WRF numerical simulation. The results show that: (1) The vertical structure characteristics of the wind field in Chengdu area at 08:00 and 20:00 are similar. The average wind speed shows a trend of increasing first and then decreasing with height. The average wind speed is the smallest in winter and the largest in summer in the lower layer, the opposite in the middle and upper layers, and similar in spring and autumn. Among them, the dominant wind direction is the northeast wind at 850 hPa, the southerly wind increases at 700 hPa, and the westerly wind is dominant at 500 hPa. There are differences in the seasonally dominant wind direction at 700 hPa and above levels, and the wind direction changes more frequently in summer. (2) All three schemes can effectively simulate the wind field characteristics in the Chengdu area. The simulation results and observational comparisons show that the YSU boundary layer scheme is the optimal parameterization scheme.

## Keywords

Wind Profile, Chengdu, WRF Model, Wind Field Characteristics

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

风是研究大气结构和气候变化的一个重要参量,包括风速和风向两项观测。风对大气的热量、水分和其他属性的输送、交换及对某一地区的天气、气候的形成都起着重要的作用[1]。而且风对人类的生产和生活有着重要影响,近地层热量交换、空气中的二氧化碳、氧气等输送过程随着风速的增大而加快或加强[2]。风廓线指的是风速和风向随高度的变化,成都市作为典型盆地城市,位于四川盆地西部,西邻青藏高原东缘,地形复杂,静风频率高,因此研究成都地区风廓线的演变规律对优化城市规划、揭示污染物输送路径、保障航空安全、应对气候变化等具有重要的支撑作用[3]-[7]。

目前大多数研究着眼于近地层风场的研究[7]-[10],而对高空风场研究较少。孙羨[7]等利用自贡机场2018~2019年自动气象站地面风资料,对风场变化特征进行分析发现机场主要受偏北风、偏西南风影响,偏北风频率较高,较大风速出现在春夏季,静风及风向不定频率较高。王吕[8]等利用1950年1月至2023年12月的地面10米风速再分析资料分析川藏铁路沿线地面风场的变化特征发现川藏铁路地区平均风速较大的区域主要集中在铁路的中部和西部,且平均风速总体呈现上升趋势,其中夏季增速最快。张可嘉[9]等对邢台冬季近地层风速、风频、污染系数等进行分析发现1~100 m高度平均风速呈现明显日变化特

征, 日间平均风速明显大于夜间平均风速且各高度盛行风向均以北风及相近风向为主。陈阳[10]等利用 2014 年 8 月至 2019 年 7 月文昌高分辨率风廓线雷达数据, 统计分析其高空风垂直结构和季节变化特征发现冬季平均风最大值在 13~14 km 高度。夏季在 18 km 上下; 垂直方向风向反向, 以 2500 m 为界, 由低到高, 冬季由偏东风转向偏西风, 夏季由西南风转偏东风。相关研究指出气象因子与污染物的传输扩散密切相关。熊洁[11]等通过分析武汉市 2013 年 10 月 30 日到 11 月 3 日 AQI 指数的演变特征发现逆温层和低风速是制约污染物扩散的两大因素。WRF (Weather Research Forecast)模式系统是美国气象界联合开发的新一代中尺度预报模式和同化系统, 其输出的气象场, 可用于天气预报和气候变化分析, 选取适用于研究区域的参数化方案组合可提高 WRF 模式模拟性能[12]-[15], 可为后续的物理过程机理研究提供有利数据。

本文利用了温江气象站 2020~2024 年的风向风速资料, 统计分析成都地区风廓线总体、季节变化特征, 然后应用 WRF 数值模式, 评估模式对该区域风廓线的模拟效果, 并筛选最优参数化方案, 可提高对典型盆地城市风特性的认识, 为改善该区域大气环境现状、城市建设以及工业布局等提供参考。

## 2. 资料和方法

成都市地处四川盆地西部边缘, 地势由西北向东南倾斜, 属亚热带季风气候区, 由于地表海拔高度差异显著, 直接造成水、热等气候要素在空间分布上的不同[16]。本文气象相关数据为温江气象站(56187) 2020 年 1 月 1 日~2024 年 12 月 31 日(08 时和 20 时)探测到的规定标准等压面的风向风速资料。按照气象学四季划分方法: 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12 月至次年 2 月为冬季[17]。通过温江气象站的资料统计分析 08、20 时的总体、季节变化, 计算不同气压下的平均风速绘制不同气压层下的平均风速廓线并绘制三个等压面层(850 hPa、700 hPa、500 hPa)风向出现频率随高度变化的风玫瑰图, 总结出成都的风速风向变化特征。开展 WRF 数值模拟, 评估不同边界层参数化方案对成都地区风廓线的模拟效果, 并筛选最优参数化方案。

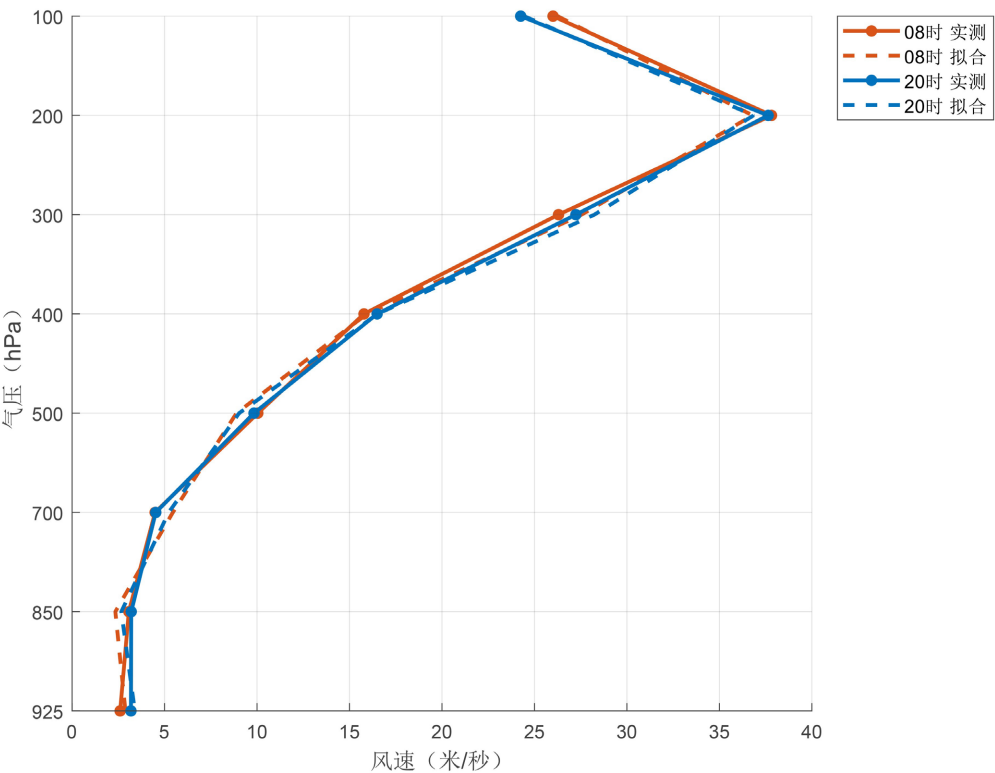
### 2.1. 风廓线总体变化特征

对成都 2020~2025 年 08 时和 20 时的资料进行统计, 得到 5 年平均风速的垂直变化廓线。橙色实线和蓝色实线分别为 08 时和 20 时的实际观测数据, 橙色虚线和蓝色虚线分别为 08 时和 20 时的多项式拟合的数据如图 1 所示。多项式拟合相关系数可达 0.9 以上(表 1), 并且均方根误差较小, 表明多项式拟合可较好的标准成都地区风廓线特征。

从图 1 中可以看出, 在 200 hPa 以下的高度, 随高度增加, 平均风速几乎随高度线性增加, 且 20 时的平均风速普遍大于 08 时的平均风速。925 hPa 的 08 时和 20 时的风速平均值均较小, 分别为 2.60 m/s 和 3.18 m/s, 往上到 850 hPa 平均风速缓慢增加; 从 850 hPa 到 200 Pa 两个时次的平均风速开始迅速增大, 相邻两个层次的平均风速增幅在 500 hPa 达到最大, 08 时和 20 时的平均风速增幅分别为 123.61%和 117.22%, 且 20 时的平均风速普遍大于 08 时的平均风速; 从 200 hPa 到 100 hPa 平均风速逐渐减小, 但 08 时的平均风速大于 20 时。

对这 5 年 08 时和 20 时的风向的数据选取常用等压面 850 hPa、700 hPa、500 hPa 绘制出不同气压层的风向频率玫瑰图, 分析其所在高度风向的变化规律。如图 2 所示, 从图上可知 08 时 850 hPa 成都地区主导风向为 NE、频率为 19.18%, 其次为 SW 和 SSW; 20 时 850 hPa 风向玫瑰图上主导风向为 NE, 其对应出现的频率为 26.61%, 850 hPa 成都地区主要以东北风为主。700 hPa 图上可知, 08 时跟 20 时总体的风向玫瑰图相似, 在两个时间段内各个风向均有出现。08 时的主导风向为 SW, 其对应所出现的频率为 19.67%, 其次为 SSW 和 NE; 20 时的主导风向为 SW、SSW 和 NE, 频率分别为 15.57%、12.92%和 12.53%, 其次为 S, 整体以西南风和东北风为主。500 hPa 图上可以明显看到 08 时和 20 时的主导风向均

为西风。08 时主导风向为 W，频率为 27.31%，其次为 WNW；20 时盛行风向为 W、频率为 25.59%，其次为 WSW 和 SW。由此可见 500 hPa 上，受西风控制，风向维持在 SW 和 WNW 之间。



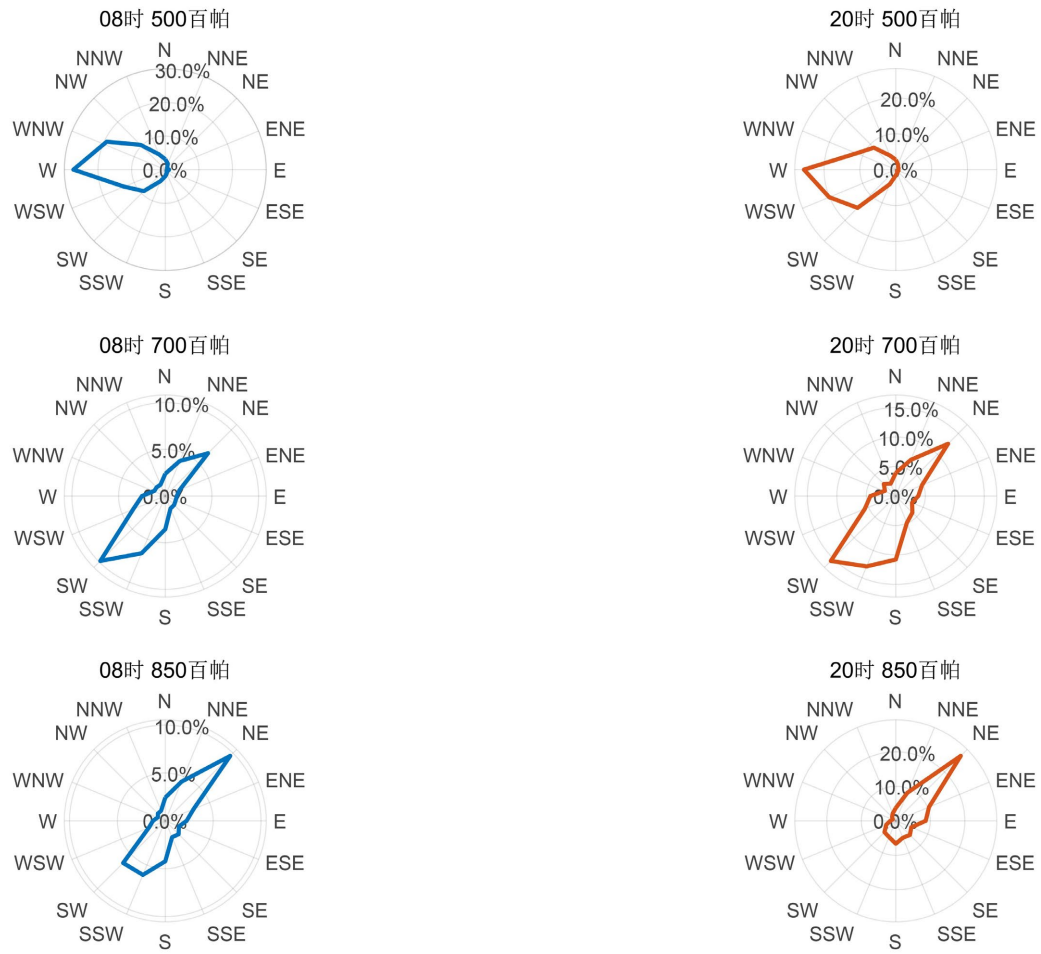
**Figure 1.** The overall profiles of the fitted and measured average wind speeds at different times from 2020 to 2024  
**图 1.** 2020~2024 年不同时刻的拟合和实测的平均风速总体廓线

**Table 1.** Fitting parameters of the average wind speed at different times  
**表 1.** 不同时刻平均风速各项拟合参数

|                |       | 08 时       | 20 时       |
|----------------|-------|------------|------------|
| $R^2$ (决定系数)   |       | 0.995      | 0.997      |
| $RMSE$ (均方根误差) |       | 0.832      | 0.626      |
| P (多项式系数)      | $P_0$ | -35.824    | -41.024    |
|                | $P_1$ | 1.027      | 1.070      |
|                | $P_2$ | -0.005     | -0.005     |
|                | $P_3$ | 9.937E-06  | 9.942E-06  |
|                | $P_4$ | -9.038E-09 | -8.924E-09 |
|                | $P_5$ | 3.092E-12  | 3.022E-12  |

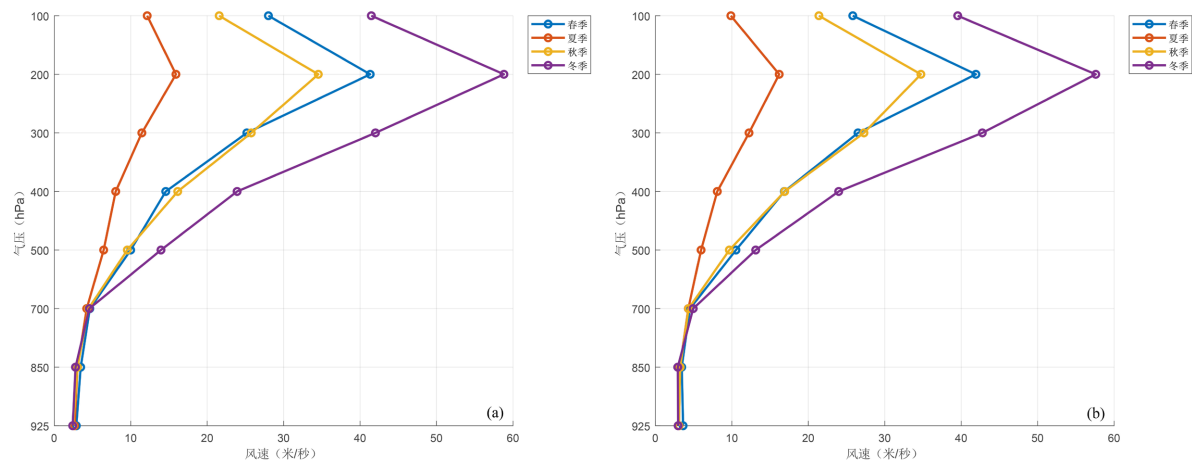
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{1}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \tag{2}$$



**Figure 2.** Overall wind direction rose charts under different pressure layers at different times from 2020 to 2024  
**图 2.** 2020~2024 年不同时段不同气压层下的总体风向玫瑰图

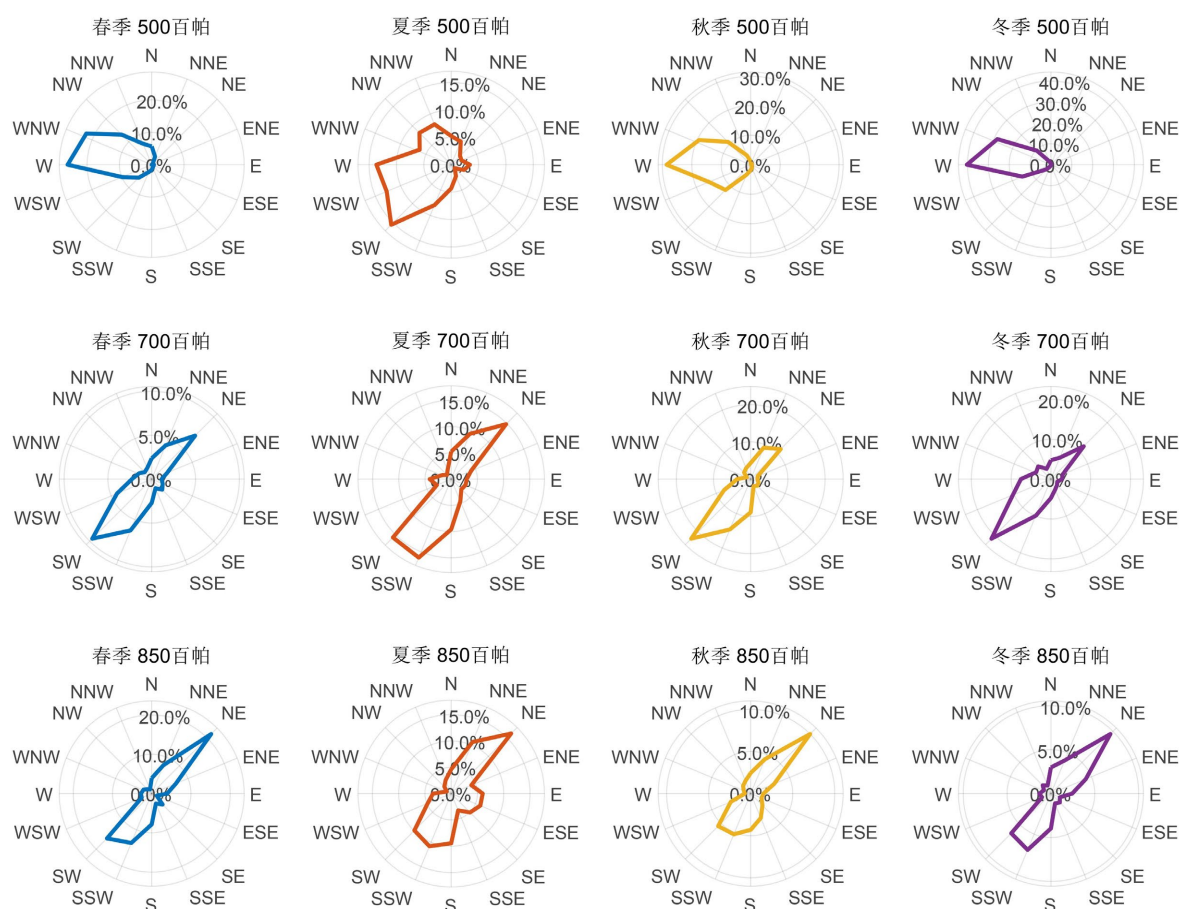
**2.2. 风廓线季节变化特征**



**Figure 3.** Seasonal average wind speed profile at 08:00 (a) and 20:00 (b) from 2020 to 2024  
**图 3.** 2020~2024 年 08 时季节平均风速廓线图(a)和 20 时季节平均风速廓线图(b)

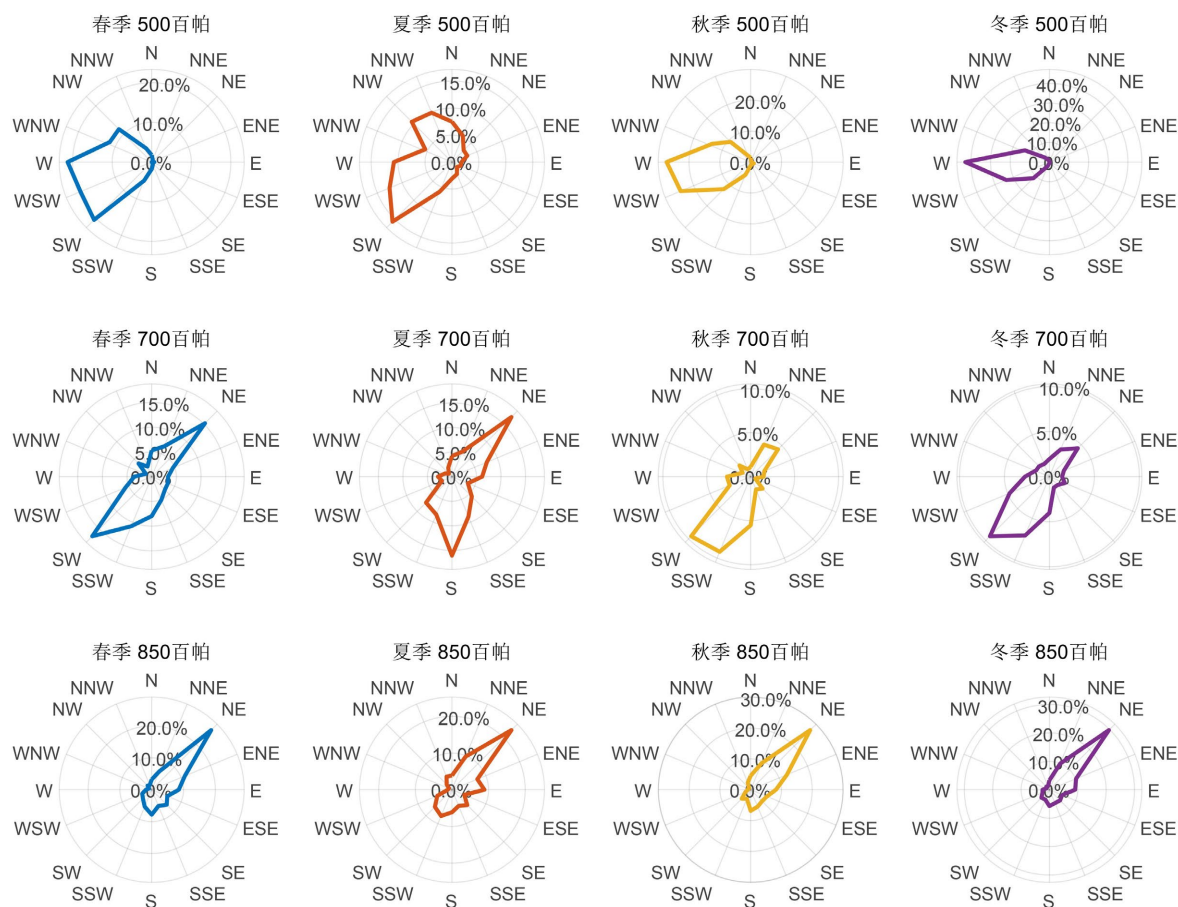
对成都 2020~2024 年 08 时和 20 时的资料进行统计, 得到 5 年的平均风速季节的垂直变化廓线。如图 3 所示, 从图中可以看出 08 时跟 20 时不同季节风速廓线区别不大, 总体上平均风速有明显的季节特征, 在 700 hPa 气压层以上表现为冬季平均风速最大, 夏季平均风速最小, 而在低层表现为冬季平均风速最小, 春季平均风速最大。700 hPa 以下风速随高度增长率较慢, 700 hPa 到 200 hPa 平均风速随高度急剧增加, 200 hPa 到 100 hPa 平均风速急剧减小。总体上冬季风速随气压层变化最快, 夏季随气压层变化最慢, 春季与秋季特征相似且平均风速交替变化, 风速随高度变化均快于夏季。

利用这 5 年的风向, 将不同时段各季节内的等压面 850 hPa、700 hPa、500 hPa 在各风向上出现的频率进行统计, 所得的各季节风向玫瑰图如图 4 和图 5 所示。



**Figure 4.** Rose charts of wind direction in different seasons under different pressure layers at 08.00 from 2020 to 2024  
**图 4.** 2020~2024 年 08 时不同气压层下各季节风向玫瑰图

从图 4 中可以看出, 08 时 850 hPa 上主导风向均为 NE, 春、夏、秋、冬季的频率分别为 21.43%、16.13%、20%和 19.16%, 春季和冬季次多风向均一致分别为 SW 和 SSW, 且频率明显大于夏季和秋季。到 700 hPa 偏南风增加, 春、秋、冬季的主导风向均为 SW, 频率分别为 19.19%、22.60%和 21.12%, 但夏季的主导风向为 SSW 和 SW, 频率分别为 16.17%和 15.72%, 此外夏季的 NE 的频率也较其他季节大很多。500 hPa 上春、秋、冬季受西风控制, 春季秋季和冬季风向维持在 WSW-WNW 之间, 而夏季西南风较多, 即春季、秋季和冬季的主导风向为 W, 频率为 26.02%、28.54%和 40.30%; 夏季主导风向为 SW, 频率为 15.49%, 夏季次多风向为 W 和 WSW, 频率为 13.67%和 12.76%。



**Figure 5.** Rose charts of wind direction in different seasons under different pressure layers at 20:00 from 2020 to 2024  
**图 5.** 2020~2024 年 20 时不同气压层下各季节风向玫瑰图

从图 5 中可以看出 20 时 850 hPa 与 08 时相比, 风向转换较少, 春、夏、秋、冬季主导风向均为 NE, 频率为 26.44%、22.95%、27.33% 和 29.65%, 风向较集中, 其它风向的频率均较少。20 时 700 hPa 春季以 SW 和 NE 为主, 频率分别为 17.04% 和 15.27%, 合计 32.31%; 夏季 20 时 700 hPa 风向转换较多, 夏季主导风向为 NE 和 S, 频率分别为 17.14% 和 16.04%; 秋季主导风向为 SW 和 SSW, 频率分别为 19.14% 和 18.47%, 而冬季的 SSW 频率比秋季较少, 以 SW 为主, 频率为 19.70%。500 hPa 除冬季以外各季节的风向转换较大, 冬季主导风向为 W, 频率为 42.86%, 而春、夏、秋季风向均维持在 SW-W 之间, 其中秋季的主导风向为 SW, 频率为 15.06%; 秋季主导风向为 W 和 WSW, 频率分别为 27.25% 和 24.55%; 春季较秋季主导多一个风向为 SW。

### 3. 风廓线模拟研究

#### 3.1. 数值模式介绍

由于气象局常规的小球探空观测每日仅两次(08、20 时), 相比变化迅速的大气风廓线, 观测数据难以捕捉到其演变规律, 文章利用 WRF 模式, 开展模拟研究, 选取最优参数化方案, 研究 2023 年冬季的风廓线的演变特征。该模式是由许多美国研究部门及大学的科学家共同参与进行开发研究的新一代中尺度气象预报模式系统, 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[18]。WRF 模式系统具有可移植、易维护、可扩充、高效率、

方便等诸多特性，是目前最为先进的中尺度数值天气模式，目前已经在世界大多数国家的天气预报业务和相关的业务部门及科研单位广泛应用[19]。

3.2. 风廓线最优参数化方案研究

本研究利用中尺度气象模式 WRF4.1 模拟了 2023 年 12 月至 2024 年 1 月成都地区冬季风场，以温江站点为网格中心(103.88° E, 30.75° N)，选用 NCEP-FNL 每 6 h 一次，分辨率为 1° × 1°的再分析资料作为 WRF 模式的初始场和侧边界。模式选用双重嵌套的方式，水平分辨率分别为 15 km、5 km，垂直方向 39 层，与水平网格距相对应的模式积分步长分别为 15 s 和 5 s，每 1 个小时输出一次。WRF 模式主要包括大气辐射参数、微物理过程参数、积云参数、边界层参数、陆面过程参数等，不同参数方案的设置对各类型区域或各种天气过程等的模拟效果具有显著的差异[14]。其中边界层参数化方案对模拟风场的影响显著，因此本文设计了三组试验(表 2)，分析常用的边界层参数化方案(YSU、MYJ、ACM2)在成都地区的模拟效果，利用相关系数、平均偏差和均方根误差，对比观测和模拟数据，筛选出最优的边界层参数化方案。

Table 2. WRF mode parameter scheme  
表 2. WRF 模式参数方案

| 边界层  | 微物理  | 陆面过程 | 长波辐射 | 短波辐射   |
|------|------|------|------|--------|
| YSU  | WSM3 | Noah | RRTM | Dudhia |
| MYJ  | WSM3 | Noah | RRTM | Dudhia |
| ACM2 | WSM3 | Noah | RRTM | Dudhia |

图 6 是观测和不同方案下平均风速廓线，从图中可以看出三种方案下的平均风速廓线高度重合且与观测数据趋势变化一致，三种方案下风速的模拟效果均较好，为了进一步对比三种方案模拟的效果以及选择最优参数化方案，本研究对 WRF 三维气象场进行检验，具体所用统计量公式如下：

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

$$MB = \frac{1}{n} \sum (y_i - x_i) \tag{4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)^2} \tag{5}$$

公式中， $R$  为相关系数(反映模拟序列和观测序列之间的线性相关程度)， $MB$  为平均偏差(反映模拟序列和观测序列之间的偏差情况)， $RMSE$  为均方根误差(反映模拟序列和观测序列之间偏差的平均)， $x_i$  和  $y_i$  分别为第  $i$  个气象要素观测值和模拟值， $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  则分别为全部观测值和模拟值的平均值， $n$  为时间样本总数，上述统计量中， $MB$  和  $RMSE$  越接近 0， $R$  越接近于 1，则说明模拟效果越好[20]。结果如表 3 所示。表 3 显示在 850 hPa 到 100 hPa 中所有方案的模拟风速与观测值高度相关( $R > 0.999$ )，但均存在轻微的负偏差(模拟值略低于观测值)， $RMSE$  值相近，表明三种方案的模拟精度相似其中，YSU 方案的  $RMSE$  略低于其他两种方案。

Table 3. Statistical values of  $R$ ,  $MB$  and  $RMSE$  under different schemes ranging from 850 hPa to 100 hPa  
表 3. 850 hPa~100 hPa 不同方案下  $R$ 、 $MB$ 、 $RMSE$  统计值

| 方案  | $R$     | $MB$    | $RMSE$ |
|-----|---------|---------|--------|
| YSU | 0.99982 | -1.1536 | 1.2996 |

续表

|      |         |         |        |
|------|---------|---------|--------|
| MYJ  | 0.99979 | -1.1527 | 1.3049 |
| ACM2 | 0.99980 | -1.1910 | 1.3217 |

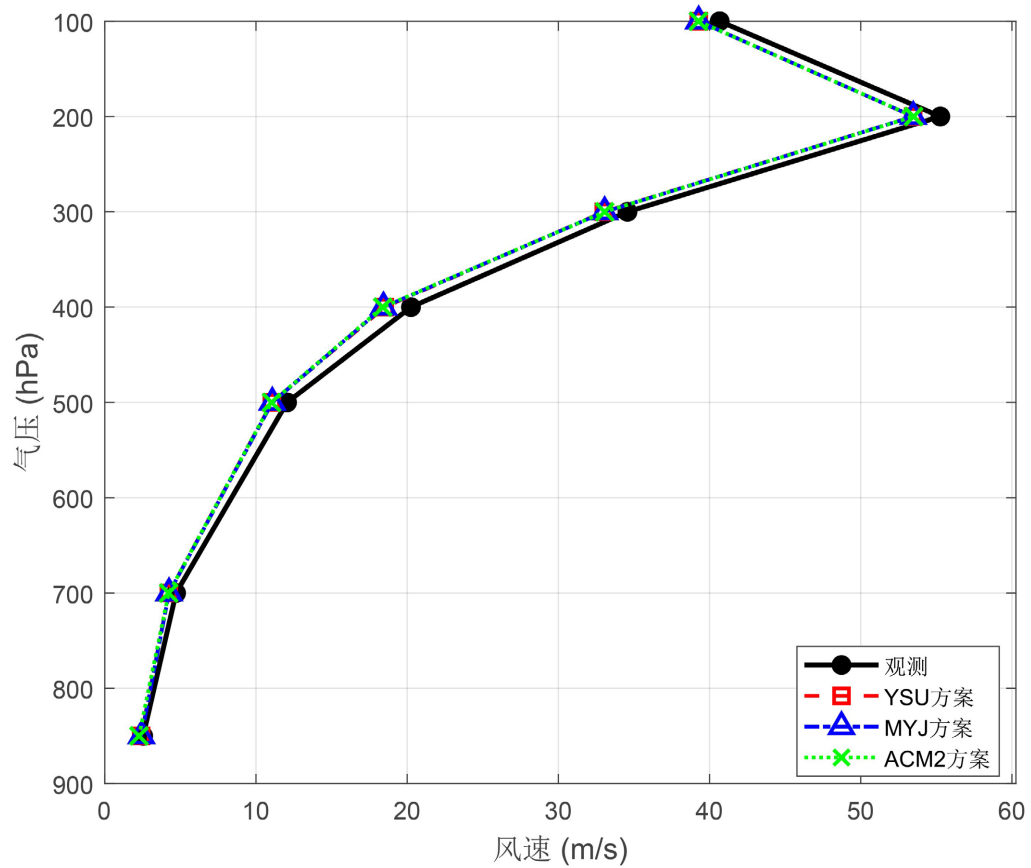


Figure 6. Average wind speed profiles of different schemes and observational data from 850 hPa to 100 hPa  
图 6. 850 hPa~100 hPa 不同方案和观测数据的平均风速廓线图

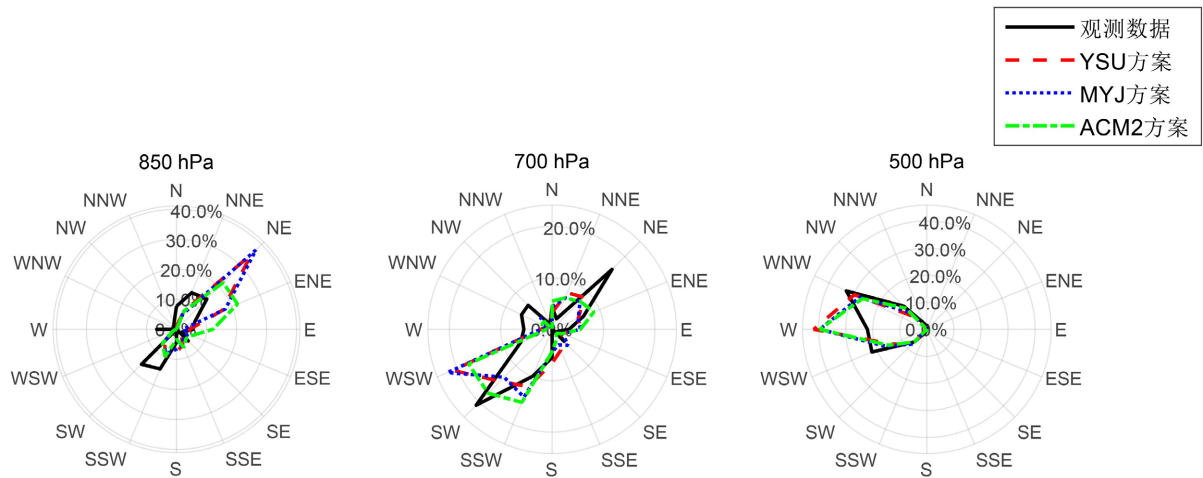


Figure 7. Wind direction rose charts of different schemes and observed data  
图 7. 不同方案与观测数据的风向玫瑰图

利用 WRF 模式各组参数化方案组合模拟 2023 年冬季成都地区 08 时的风向, 通过风向统计结果画出 500 hPa、700 hPa 和 850 hPa 观测跟不同方案的风向玫瑰对比图 7, 由图 7 可知, YSU 方案模拟结果略优于 MYJ 方案, MYJ 方案优于 ACM2 方案, 三组方案总的来说, 各组方案风向模拟结果差异不大, 模拟值与观测值主导风向最大有一个方位的偏差, 模拟结果主导风向与观测主导风向较为一致, 均能较好的模拟出成都地区的主导风向。

结合误差统计值和以上三组参数化方案对 08 时成都地区风场的模拟结果和观测对比显示, 对于成都地区风场而言, 采用 YSU 边界层方案的第一组参数化方案为最优参数化方案。

#### 4. 结论与展望

本文利用统计分析法、WRF 数值模拟, 说明数据, 对成都市风廓线垂直变化特征进行分析及模拟研究, 得出以下结论:

(1) 成都地区 08 时与 20 时风场垂直结构特征相似, 多项式拟合可较好地表征该地区的风廓线变化特征; 风速季节差异显著, 从 925 hPa 至 100 hPa 层平均风速呈现先增后减趋势, 低层冬季平均风速最小夏季最大, 中高层相反, 春季、秋季特征相似; 其中 850 hPa 主导风向为东北风, 到 700 hPa 偏南风增加, 500 hPa 以西风为主导, 季节主导风向在 700 hPa 及以上层次存在差异, 而且夏季的风向转换较多, 但春、夏季偏南风增加较少, 到 500 hPa 偏西风占比提升但 08 时夏季的西南风较多, 20 时除夏季外春季和秋季西南风频率较高, 冬季 500 hPa 西风主导特征显著。

(2) 三种方案均能有效模拟出成都地区风场特征, 通过模拟结果和观测对比显示, 对于成都地区风场而言, YSU 边界层方案为最优参数化方案, 可利用此方案开展成都地区的数值模拟, 为成都地区风廓线研究和应用提供合理可信的基础数据。

#### 基金项目

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] 李颖莎, 晏惠芬, 莫芳, 等. 西昌 2014 年大气边界层风场特征分析[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2015, 29(4): 55-58+62.
- [2] 王静, 李靖, 李荣波, 等. 近 10 年南海海表风场季节特征统计[J]. 科技资讯, 2014(3): 197-200.
- [3] 曹杨, 赵晓莉, 苏德斌, 成翔. 成都西部山地和平原过渡区边界层水平风场区域差异分析[J]. 气象科技, 2024, 52(5): 743-752.
- [4] 祁贵明, 王发科, 贺海成, 等. 格尔木地面、低空风场特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 118-120.
- [5] 肖南, 董治宝, 南维鸽, 等. 1957-2014 年库布齐沙漠地面风场特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 628-636.
- [6] 周书华, 倪长健, 刘培川. 成都市温江边界层风场特征的研究[J]. 四川环境, 2014, 33(3): 30-35.
- [7] 孙羨, 穆玉娇. 自贡机场地面风场特征分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2023, 34(1): 31-34.
- [8] 王吕, 齐玉磊. 川藏铁路沿线地面风场变化特征分析[J]. 自然科学, 2024, 12(5): 955-964.
- [9] 张可嘉, 郝巨飞, 贾秋兰, 张杰, 黄毅. 2019 年冬季邢台近地层风场特征分析与污染系数研究[J]. 世界生态学, 2022, 11(3): 297-306.
- [10] 陈阳, 黄红艳, 唐安志, 赵兴娜, 郝鹏. 基于风廓线雷达数据的文昌地区高空风特征[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(S02): 36-40.
- [11] 熊洁, 陈楠, 操文祥, 等. 武汉市一次重霾天气 AQI 演变及气象因子特征分析[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 183-187+316.
- [12] Shu, H., Song, W., Xiao, K., Guo, H. and Song, Z. (2023) Analysis of Vertical Characteristics of Shallow Wind in

Northeast of Horqin Grassland. *E3S Web of Conferences*, **369**, Article 02009.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336902009>

- [13] 张华, 孙科, 田玲, 等. 应用 WRF 模型模拟分析风力发电场风速[J]. 天津大学学报, 2012, 45(12): 1116-1120.
- [14] 姚琳, 沈竞, 温新龙, 等. WRF 模式参数化方案对江西山地风电场的风模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1509-1516.
- [15] Hamzeh, N.H., Abadi, A.R.S., Alam, K., Shukurov, K.A. and Opp, C. (2024) Long-Term Wind and Air Temperature Patterns in the Southeastern Region of Iran through Model Simulation and Ground Observations. *Atmosphere*, **15**, Article 993. <https://doi.org/10.3390/atmos15080993>
- [16] 李瑞. 成都市 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>变化特征及其与气象因素的关系[J]. 大气与环境光学学报, 2023, 18(1): 47-58
- [17] 赵国永, 韩艳, 闫军辉, 等. 信阳市城区四季变化特征研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2015, 28(4): 529-532.
- [18] 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.
- [19] 徐永清, 刘春生, 张弛, 等. 基于 WRF 模式的短期风速预报研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8): 3539-3541+3615.
- [20] 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 等. WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 104-117.