

成都市能见度演变特征分析及模拟研究

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

¹复杂地形区成都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28日; 录用日期: 2025年7月22日; 发布日期: 2025年7月29日

摘要

本文利用2020~2024年成都市温江气象站点的地面逐时气象数据, 采用统计分析方法研究能见度时间演变规律及气象影响因子, 检验能见度FSL模型在成都地区的适用性, 并结合WRF模式进行能见度拟合研究。结果表明: 成都市能见度呈显著年际改善趋势, 年均值从2020年的9.32 km升至2024年的10.71 km, 受其地理环境和气象条件影响, 成都市夏季能见度最高, 冬季最低, 能见度日变化呈“单峰单谷”型, 07时能见度最低, 为5.93 km, 17时峰值达15.90 km, 相对湿度与能见度在日变化上呈强负相关, 风速与能见度呈强正相关; 能见度FSL模型在成都地区存在明显高估问题, 改进后的FSL模型偏差显著减少, 均方根误差(RMSE)降低了27.8 km; WRF模式中RUC陆面方案模拟精度最优, 结合FSL模型, 可完善WRF模式能见度输出的功能。

关键词

成都市, 能见度, 气象要素, FSL, WRF

Analysis and Simulation Study of Visibility Evolution Characteristics in Chengdu

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

¹Climate Change and Resource Utilization in Complex Terrain Regions Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Sichuan

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

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

⁴School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: May 28th, 2025; accepted: Jul. 22nd, 2025; published: Jul. 29th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 朱秋婷, 王超, 肖天贵, 唐梓轩, 林宏磊. 成都市能见度演变特征分析及模拟研究[J]. 自然科学, 2025, 13(4): 854-862. DOI: 10.12677/ojns.2025.134090

Abstract

This paper utilizes hourly meteorological data from the Wenjiang meteorological station in Chengdu from 2020 to 2024, employing statistical analysis methods to study the temporal evolution of visibility and its influencing meteorological factors, examining the applicability of the visibility forecasting model FSL in the Chengdu area, and conducting visibility fitting research in conjunction with the WRF model. The results indicate that the visibility in Chengdu shows a significant interannual improvement trend, with the annual average increasing from 9.32 km in 2020 to 10.71 km in 2024. Affected by its geographical environment and meteorological conditions, Chengdu has the highest visibility in summer and the lowest in winter. The daily variation of visibility presents a “single peak and single valley” pattern, with the lowest visibility at 5.93 km at 07:00 and a peak value reaching 15.90 km at 17:00. There is a strong negative correlation between relative humidity and visibility in daily variation, while wind speed shows a strong positive correlation with visibility. The visibility FSL model exhibits a significant overestimation issue in the Chengdu area. The deviation of the improved FSL model has been significantly reduced, with the root mean square error (RMSE) decreasing by 27.8 km. Among the WRF models, the RUC land surface scheme has the best simulation accuracy; when combined with the FSL model, it can supplement the model's functionality for outputs without visibility.

Keywords

Chengdu, Visibility, Meteorological Elements, FSL, WRF

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

大气能见度作为大气透明度的直观表征, 不仅能反映大气的环境质量, 与居民健康也密切相关[1]。影响大气能见度的包括气象要素及空气污染物, 而相对湿度和颗粒物浓度是影响能见度的主要因子[2]。成都是我国西南地区的重要城市, 其经济发展与城市化进程可能会导致空气污染加剧、能见度下降问题。成都位于四川盆地腹地, 地形封闭, 静稳天气多发, 以及城市化带来的工业排放、机动车尾气、扬尘等污染源叠加, 导致雾霾天气频发, 尤其冬季, 低能见度现象频发[3]。

近年来, 众多学者对不同地方的能见度演变特征及影响因子展开了深入的研究[4]-[11]。关于南京市大气能见度的研究, 叶香等人对南京国家气候基准站 1980~2008 年能见度、相对湿度和天气现象等气象要素进行分析[12], 廖国连等人对 2000 至 2006 年的南宁市能见度资料进行统计分析[13], 针对成都市能见度演变特征, 白爱娟等人以 2009 年成都地区一次低能见度天气过程为例, 分析大气能见度与各气象要素的变化关系, 讨论影响成都市大气能见度变化的主要因素[14], 韦荣等人研究了成都市能见度时空演变规律以及不同等级能见度下气象要素和污染物浓度的关系[15]。本文拟通过统计分析最新观测资料, 归纳成都市能见度演变特征, 建立适合成都市能见度的模型方案。

2. 资料和方法

本文所用的地面气象数据来源于成都市温江气象局, 获取温江站(56187)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(包括能见度、风速、相对湿度等), 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。利用统计分析方法、相关分析法研究能见度的年、季节及日变化特征;

采用 FSL 模型来计算成都地区能见度, 并对其进行本地化改进; 此外还进行 WRF (Weather Research and Forecasting)模型模拟研究, 结合改进后的 FSL 模型, 建立适合成都市能见度拟合的最优参数化方案。

3. 能见度演变特征

3.1. 大气能见度总体特征

根据成都市温江气象局的能见度观测资料, 通过剔除误差值及异常值后, 采用算术平均法计算区域日均能见度值, 利用等级分析法, 将成都市大气能见度分为 5 个等级。如表 1 所示, 统计分析表明, 大气能见度集中分布在第二(1.9~9 km)、第三等级(9~19 km), 5 年中大气能见度“很差”比例占 2.5%, “较差”比例占 47.4%, 天气状况“一般”占 40.8%, “较好”比例占 9.3%, 能见度 ≥ 40 km 的天数为 0。2020~2024 年成都市能见度平均值为 10.16 km, 总体上处于较差到一般水平。

Table 1. Proportion of atmospheric visibility by grade from 2020 to 2024
表 1. 2020~2024 年大气能见度各等级比例

等级	范围/km	定义	天数	比例(%)
1	$0 < V \leq 1.9$	很差	46	2.5
2	$1.9 < V \leq 9$	较差	845	47.4
3	$9 < V \leq 19$	一般	727	40.8
4	$19 < V \leq 39$	较好	163	9.3
5	$V \geq 40$	很好	0	0

注: V 为大气能见度值。

3.2. 能见度年际变化特征

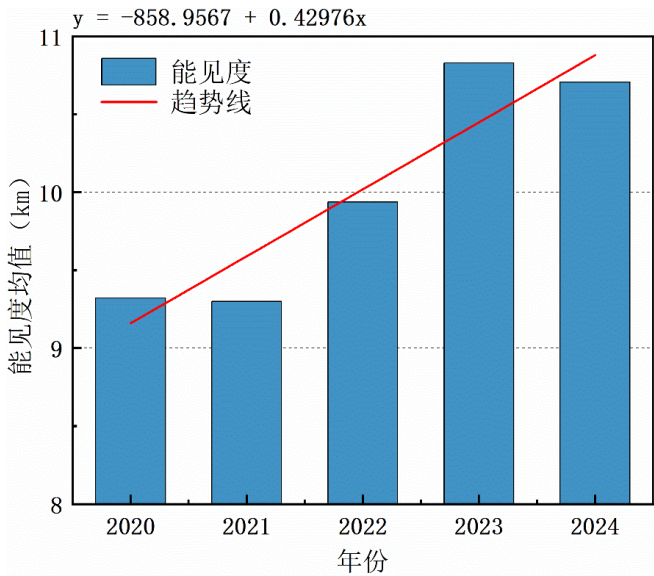


Figure 1. Interannual trends in atmospheric visibility from 2020 to 2024
图 1. 2020~2024 年大气能见度年际变化趋势

通过对成都市国家级自动气象站所监测的 2020~2024 年逐时能见度观测数据统计计算得到成都市能见度年平均值, 如图 1 所示柱状图通过时间序列分析清晰展现了研究期内能见度的演变规律。观测数据

显示,成都市能见度整体呈上升趋势,相关系数 $r=0.929$,显示强正相关,相关性显著($p=0.023$),通过95%的显著性检验,能见度均值从2020年的9.322km稳步提升至2024年的10.705km,各年度能见度均值始终维持在9~11 km区间。这种持续改善趋势与成都市近年来实施的大气污染防治措施密切相关。研究期间正值成都市大气污染治理全面推进阶段,通过重点行业超低排放改造、移动源污染综合治理、扬尘精准管控等系统工程,PM_{2.5}、NO_x等影响能见度的关键污染物浓度显著下降。

3.3. 能见度季节变化特征

成都市2020~2024年能见度季节变化曲线如图2所示,图2(a)为能见度的正弦函数拟合图,拟合相关系数 R^2 为0.941,均方根误差为0.723 km,拟合效果较好,说明能见度的季节变化呈现一定的正弦周期波动规律,图2(b)为5年的能见度季节变化图。2020~2024年成都市春季(3月至5月)能见度均值为11.289 km,夏季(6月至8月)能见度均值达13.73 km,秋季(9月至11月)能见度均值为9.541 km,冬季(12月至次年2月)能见度均值降至5.601 km。不难发现,成都市基本上夏季能见度最高,秋季、春季次之,冬季能见度最差,其中2023年夏季能见度最高,2020年冬季能见度最低。

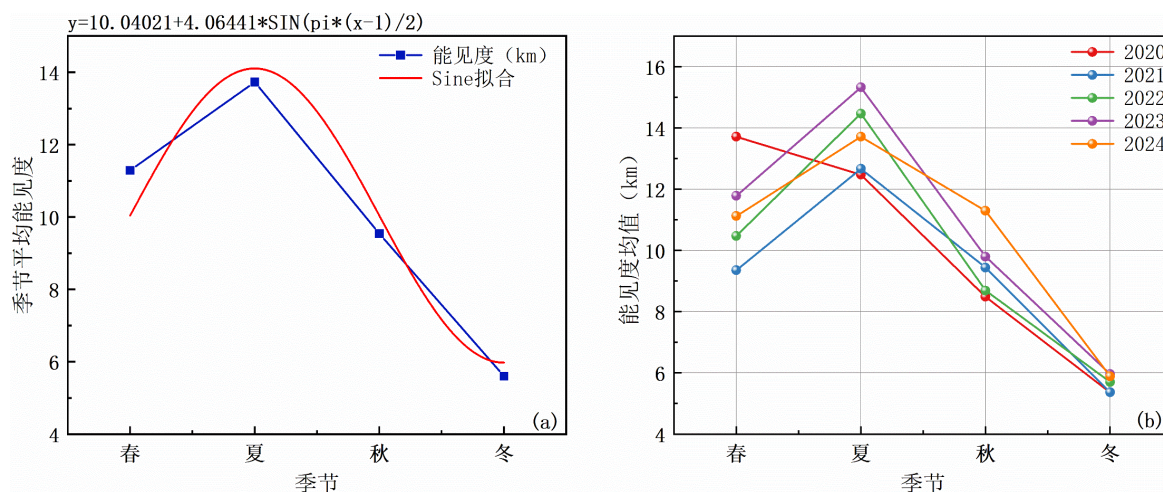


Figure 2. Seasonal changes in visibility 2020~2024

图2. 2020~2024年能见度季节变化

夏季能见度最佳,主要得益于西南季风带来的充沛降水。夏季降水量占全年40%以上,雨水对空气中的颗粒物具有显著冲刷作用,以及高温天气增强了大气垂直对流,污染物更易扩散至高空,加之夏季风速相对较高,进一步促进了污染物的水平扩散。冬季能见度最差则与逆温层、静稳天气和高湿度密切相关。冬季冷空气活动弱时,盆地内近地面易形成稳定的逆温层,如同一层“盖子”将污染物压制在低空。此时风速常低于1 m/s,水平扩散几乎停滞,污染物持续累积。加之冬季湿度高,夜间辐射冷却作用加剧,易形成辐射雾与霾的混合体,进一步降低能见度。春秋季作为过渡季节,能见度介于冬夏之间。这两个季节降水减少,夜间地面辐射冷却强烈,易形成辐射逆温层,导致大气垂直对流受阻,污染物在近地面难以扩散,加重雾霾,能见度较低。

3.4. 能见度日变化特征

图3为成都市的能见度日变化图,成都市大气能见度呈现出显著的日变化规律。对能见度日变化数据进行高斯拟合,拟合相关系数 R^2 为0.964,模型解释了能见度96.4%的变化,表明高斯函数能捕捉到日内单峰波动规律,均方根误差为0.664 km。如图3(a)所示,在凌晨时段(00:00~07:00),能见度持续下降,

于左右 07 时达到全日最低值,这几个小时的平均值为 5.926 km,为一天当中能见度最差的时段。随着日照增强和边界层结构改变,日间时段(08:00~17:00)能见度进入显著回升阶段,呈快速上升趋势,于 17 时左右达到峰值,这几个小时的小时平均值为 15.904 km。日落后能见度开始新一轮降低过程,在傍晚至夜间(17:00~23:00)时段再次呈下降趋势。2023 年的数据时间分辨率为 3 小时,波动比较明显,但总体变化与其他几年的一致。

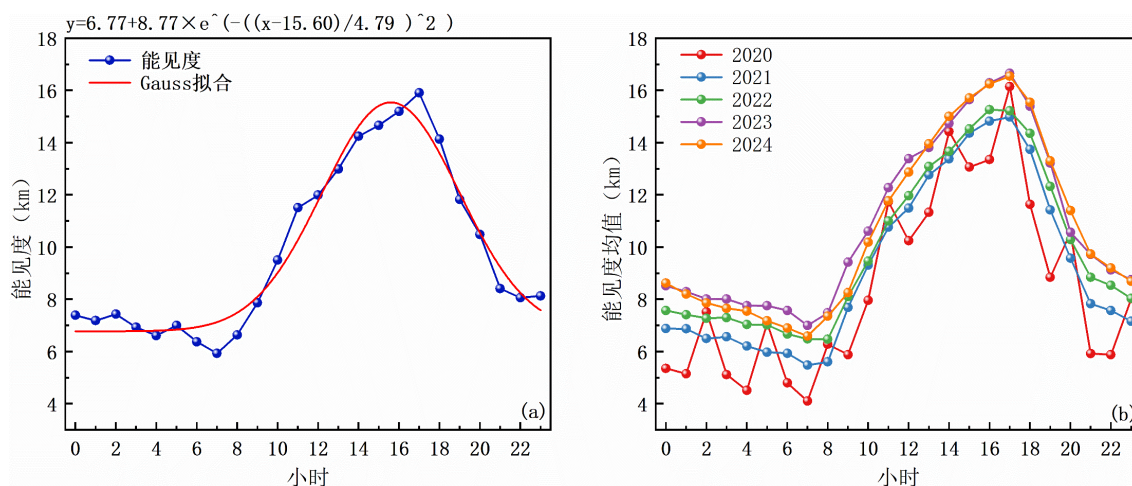


Figure 3. Hourly visibility trend from 2020 to 2024

图 3. 2020~2024 年能见度小时变化趋势

凌晨时段,地表辐射降温导致近地面空气温度低于上层,形成逆温层,抑制了污染物的垂直扩散。此时低温促使空气中的水汽凝结,吸湿性颗粒物膨胀,加上夜间工业排放固定污染源的持续作用,污染物与水汽在静稳天气下不断累积,最终使能见度降至最低。日出后日照增强,地表受热升温,近地面空气对流活跃,逆温层逐渐消散,污染物垂直扩散能力显著提升。而且白天气温升高形成的气压差会使得风速增大,水平扩散条件改善,尽管太阳辐射可能引发光化学反应生成二次污染物,但污染物整体扩散效率的提升仍推动能见度快速回升至日间峰值。日落后,地表冷却导致逆温层重建,大气趋于稳定,污染物扩散能力再度减弱。加上晚高峰交通排放、夜间工业活动等污染源增加,以及夜间湿度上升促进气溶胶吸湿增长,能见度会再次降低。

4. 能见度影响因子研究

一个地区的大气能见度核心特征由其所在区域的气象环境所主导。本文采用成都市 2020~2024 年大气能见度及同期气象要素观测资料进行相关分析。如图 4(a),从日变化来看,能见度与相对湿度的相关系数高达-0.99,说明两者有很强的负相关性,在 24 小时内呈现明显的负波动变化。凌晨至清晨时段,湿度缓慢升高,最高值在 90%以上,能见度则缓慢下降,最低值在 6 km 以下;随着日照增强和温度上升,午后至傍晚湿度逐渐下降至较低水平,能见度则显著提升至 14 公里以上。这与昼夜温差驱动的湿度变化密切相关:夜间地面辐射冷却使水汽凝结,形成雾或露水,导致能见度降低;而白天升温加速水汽蒸发,减少悬浮颗粒物的吸湿作用,从而提升能见度。总体而言,相对湿度通过调控空气中液态水含量和气溶胶光学特性,成为影响成都市能见度的核心环境因子。

能见度与风速的日变化相关系数为 0.95,说明两者具有很强的正相关性,如图 4(b)所示。在白天时段,随着风速逐渐增强至 1.6~1.8 m/s,能见度显著提升至 14 km 左右,这可能与太阳辐射增强导致的热力湍流有关,地表加热后空气垂直运动活跃,配合水平风速增大,双重作用下加速了污染物的扩散。而夜间至清

晨时段, 风速降至 1.0~1.3 m/s, 此时若逆温层形成, 大气层结稳定, 污染物在近地面堆积, 能见度随之降至 6~8 km 的最低水平。除此之外, 人类活动的昼夜差异也可能间接强化这一规律。白天交通、工业排放增加, 但较强的扩散能力削弱了污染积累, 而夜间排放量虽可能减少, 但扩散条件恶化仍导致能见度下降。

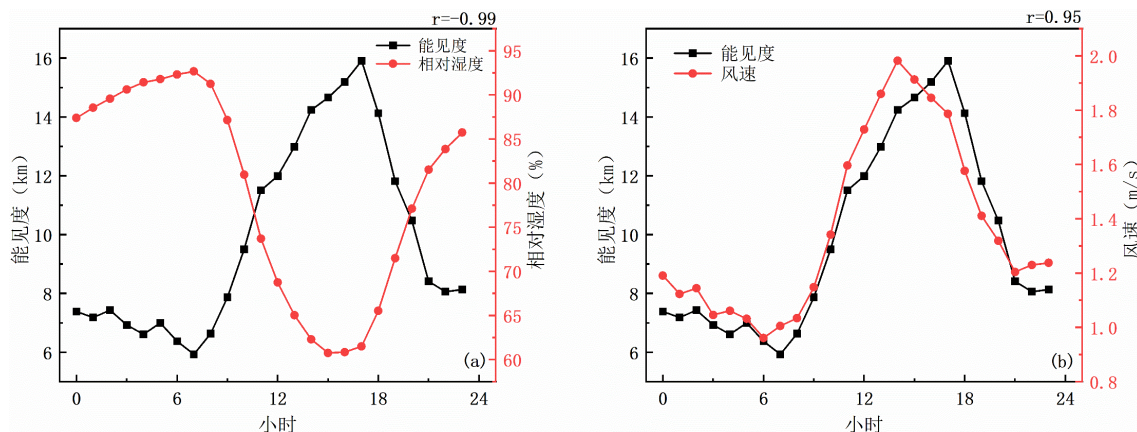


Figure 4. Diurnal variations in visibility, relative humidity and wind speed

图 4. 能见度与相对湿度及风速的日变化

5. FSL 模型研究

FSL (Forecast Systems Laboratory)方案是由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic & Atmospheric Administration, NOAA)的预报系统实验室开发的, 该方案基于大量观测试验, 利用能见度和温度露点差与相对湿度的关系进行拟合[16], 公式如下:

$$vis(mile) = 6000 \times \frac{t - t_d}{RH^{1.75}} \quad (1)$$

其中, t (单位: $^{\circ}\text{C}$)、 t_d (单位: $^{\circ}\text{C}$)与 RH (单位: $\%$)分别表示温度、露点温度与相对湿度, 且 1 mile = 1.609344 km。用该算法计算时, 当相对湿度为 100%时, 能见度为 0 km。

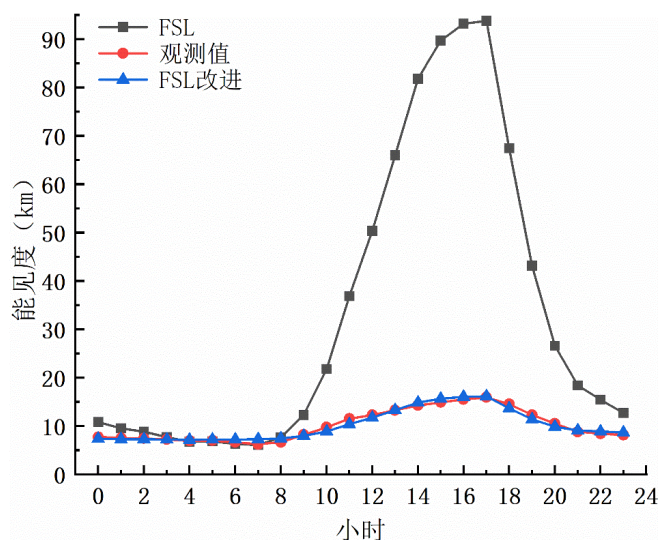


Figure 5. The effect of the improved FSL scheme

图 5. FSL 模型检验及其改进

本文根据相对湿度、气温、露点的观测值,采用 FSL 算法计算能见度如图 5 所示,在日变化特征方面,模拟结果虽能反映观测值的波动趋势(相关系数达 0.97),但在 10~20 时段模拟偏差显著加剧,最高偏差值达 77.83 km,这与相对湿度幂指数 1.75 的敏感性可能不足有关,相对湿度作为分母,在低湿度条件下,会使得计算值偏高。以及算法未包含 $\text{PM}_{2.5}$ 等气溶胶浓度参数,白天时段因人类活动增强(交通排放、工地扬尘)、光化学反应活跃(二次气溶胶生成),实际气溶胶消光效应显著增强。模型在凌晨 0~8 时表现出较好的拟合度,说明夜间稳定边界层条件下的能见度模拟具有更高的可靠性。

5.1. FSL 模型改进

针对 FSL 能见度计算方案存在的高偏差问题,本研究提出基于 24 小时连续观测数据(0~23 时)与 FSL 原始值的交互回归模型,采用多元线性回归方法构建修正模型,通过建立“FSL 改进值 = f(FSL 原始值, 小时)”的函数关系,探索计算方案的优化路径,采用普通最小二乘法(OLS)建立多元线性回归模型:修正值 = $6.305 + 0.0488 \times t + 0.0957 \times \text{FSL}$ 。

根据表 2 得知,改进后决定系数 $R^2 = 0.965$,即模型解释了 96.5%的能见度观测值方差,均方根误差(RMSE) = 0.629 km,表明模型预测值与实际观测值的平均偏差约为 ± 0.63 km,模型整体高度显著($p < 0.0001$)。

通过对比原始 FSL 计算结果、观测值及改进值,验证了回归方法在能见度日变化修正中的有效性(见图 5)。结果显示:修正后方案均方根误差降低 27.8 km,相关系数提升至 0.97,显著改善了午后高估现象,证明了回归校正方案的适用性。现有 FSL 模型在 10~20 时呈现显著高估,其误差特征有两个方面的表现,第一,正偏差较大,10~20 时平均高估量达 23.6 km。第二,非线性失真,计算值午后能见度下降速率与观测值差异显著。方案改进后这些误差能大部分消除,首先是偏差抑制,17 时高估值从 93.726 km 降至 16.104 km(观测值 15.904 km),绝对误差减少 77.622 km。其次是趋势修正,计算值午后能见度下降速率与观测值基本一致。

Table 2. Improved formula regression statistics

表 2. 改进公式回归统计指标

指标	改进前	改进后
决定系数(R^2)	0.2753	0.965
均方根误差(RMSE)	28.44 km	0.629 km

5.2. FSL 模型应用

WRF 模式系统具有可移植、易维护、可扩充等诸多特性,是目前最为先进的中尺度数值天气模式,但模式输出并无能见度。本文利用改进后的 FSL 模型,针对 WRF 几种常见的陆面过程参数化方案(表 3)开展模拟研究,得出成都市能见度的最优模拟方案。选取成都平原地区 2023~2024 年冬季(12 月 1 日~次年 2 月 29 日),采用 NCEP 提供的 6 小时时间分辨率、 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球再分析资料作为初始场和边界条件,构建了双重嵌套网格系统(外层 15 km/内层 5 km),其对应时间步长分别设定为 15 秒和 5 秒,模拟结果每 3 小时输出保存。通过多方案对比分析,深入探讨不同参数化方案对能见度模拟的影响效应,选出最优参数化方案。

由参数化方案得出的相对湿度、气温、露点温度,运用 FSL 模型计算得出能见度,如图 6 所示。对图进行分析得, RUC 方案最接近实际观测值(见表 4)。RUC 方案数值与观测值吻合度最优,在多数时段(如 0~23 小时)的能见度数值与观测值高度重合,总体偏差值小于 4 km,尤其在日间高能能见度时段(如 8~17 时), RUC 的柱状高度与观测值折线几乎完全重叠,而 Noah 与 TDS 在此时段明显偏高,尤其是 Noah 方

案，偏差值最高可达 100 km，存在显著高估问题，且 RUC 方案的均方根为 1.903 km，远小于 TDS、Noah 方案的均方根误差。其次 RUC 方案波动趋势与观测值高度同步，RUC 的波动特征与观测值折线完全一致，快速上升段(如 9~15 时)，RUC 方案能见度从 4 km 迅速升至 10 km，与观测值的陡升趋势完全匹配。平缓下降段(如 16~23 时)，RUC 的下降斜率与观测值基本吻合。最后 RUC 方案能捕抓到观测值的细微变化，9 时观测值有较小的降低，RUC 方案的能见度也有降低，而 Noah 方案未捕抓到这一细微变化。RUC 方案的数值吻合度、波动趋势同步性及关键气象时段的可靠性均优于 Noah 和 TDS 方案，推荐作为复杂天气条件下能见度模拟的首选方案。

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

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

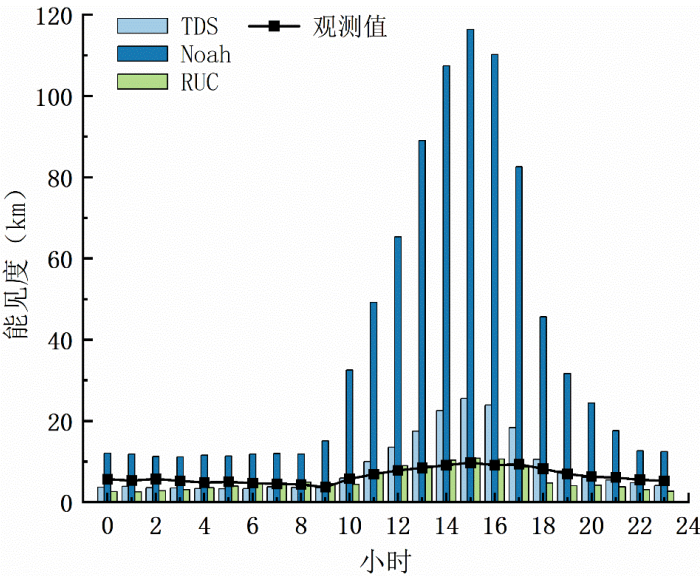


Figure 6. Daily variation in visibility for the three parameterized schemes
图 6. 三种参数化方案的能见度日变化

Table 4. Improved formula regression statistics Parameterization Scheme Indicators
表 4. 参数化方案指标

指标	TDS	Noah	RUC
Pearson 相关系数(r)	0.936	0.928	0.822
均方根误差(RMSE)	6.075	46.557	1.903

6. 结论

本文利用统计分析法、相关分析法、FSL 模型、WRF 模型对成都市能见度演变进行分析及模拟研究，得出以下结论：

(1) 2020~2024 年成都市大气能见度总体呈逐年改善趋势, 五年平均能见度为 10.16 km, 能见度集中在第二、第三等级, 能见度季节变化特征为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 夏季均值达 13.71~15.33 km, 冬季仅 5.47~6.50 km, 能见度日变化呈“单峰单谷”型, 07 时最低, 17 时最高。

(2) 相对湿度与能见度在日尺度呈极强负相关, 高湿度通过气溶胶吸湿增长加剧光散射来影响能见度, 冬季湿度 > 80% 时段能见度骤降至 5 km 以下。地面风速与能见度的正相关显著, 高风速对应高能见度, 风速有利于污染物的传输扩散, 盆地地形放大静风期的污染累积效应。当 AQI > 150 时能见度断崖式下降至 1~5 km, 高污染天能见度平均值较优良天降低 10.281 km。

FSL 模型存在日间显著高估问题, 改进的 FSL 模型偏差显著减少, 均方根误差降低了 27.8 km。在 WRF 数值模拟方面, RUC 陆面过程方案的模拟精度最优, 结合 FSL 模型, 能见度预测均方根误差 < 2 km, 可作为 WRF 模式能见度输出功能的补充。

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] 马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 623-628.
- [2] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 34-41.
- [3] 张迎春, 王文勇. 成都市冬季相对湿度和颗粒物浓度对大气能见度的影响[J]. 环保科技, 2018, 24(5): 17-22.
- [4] 张霞, 汪太明, 孟晓艳, 等. 我国 6 个典型城市大气能见度及其影响因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 239-247.
- [5] 赵旭辉, 张付海, 王含月, 等. 合肥市颗粒物和气象条件对大气能见度的影响研究[J]. 中国环境监测, 2024, 40(1): 97-106.
- [6] 易雪婷, 叶子铭, 罗音浩, 等. 1999-2019 年南昌市大气能见度变化特征分析[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(9): 233-235.
- [7] 马文博, 崔日权, 刘兰芝, 等. 延吉市大气能见度变化特征及其气象影响因子研究[J]. 气象灾害防御, 2023, 30(3): 11-15.
- [8] 董芳淑, 廉丽姝, 孙博雯, 等. 华东地区能见度时空变化特征及影响因子分析[J]. 气象科技, 2023, 51(4): 510-519.
- [9] 吴紫静, 姚扬, 陆海莹, 等. 池州市大气能见度与气象条件的关系[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(2): 61-63.
- [10] 张春辉, 徐鹏. 贵阳市相对湿度及 PM_{2.5} 浓度对大气能见度的影响分析[J]. 环保科技, 2022, 28(1): 23-26+36.
- [11] 张杨, 张福浩, 陈才, 等. 京津冀大气能见度特征分析及影响因素研究[J]. 测绘科学, 2021, 46(7): 196-204.
- [12] 叶香, 姜爱军, 张军, 等. 南京市大气能见度的变化趋势及特征[J]. 气象科学, 2011, 31(3): 325-331.
- [13] 廖国莲, 程鹏. 南宁市大气能见度变化特征及影响因子分析[J]. 气象研究与应用, 2007(4): 26-28.
- [14] 白爱娟, 钟文婷, 华兰, 等. 成都市大气能见度变化特征及影响因子研究[J]. 中国环境监测, 2014, 30(2): 21-25.
- [15] 韦荣, 张小玲, 华明, 等. 2012~2020 年成都市不同等级能见度的时空分布特征[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(4): 136-145.
- [16] Doran, J.A., Roohr, P.J., Beberwyk, D.J., et al. (1999) The MM5 at the Air Force Weather Agency-New Products to Support Military Operations. *The 8th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology*, Dallas, 10-15 January 1999, 84-97.