

成都市城市化与PM_{2.5}浓度时空演变关系

何芳菲^{1*}, 何萍^{2#}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²楚雄师范学院资源环境与化学学院, 云南 楚雄

收稿日期: 2026年4月23日; 录用日期: 2026年5月14日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

本文对成都市2013~2022年近10年的PM_{2.5}数据进行分析, 应用Microsoft Excel软件分析PM_{2.5}浓度的时间变化特征, 应用ArcGIS软件分析PM_{2.5}浓度的空间变化特征, 应用SPSS软件通过主成分分析和耦合协调度分析了城市化与PM_{2.5}浓度的关系。研究结果表明PM_{2.5}的月变化特征每年表现出相似的变化模式, 呈现出先降低后上升的趋势, 1~8月呈下降趋势, 9~12月呈上升趋势。季节变化特征冬季PM_{2.5}浓度最高, 夏季PM_{2.5}浓度最低, 春季和秋季PM_{2.5}浓度相似, 基本上是冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季。年变化特征整体上呈现下降趋势, 从2013年的86.17 μg/m³逐步下降到2022年的31.21 μg/m³。空间变化特征表明PM_{2.5}浓度在中心区域数值偏高, 向四周扩散时则逐渐降低, 从西北部向东南部PM_{2.5}浓度逐渐递增。

关键词

成都市, 城市化, PM_{2.5}浓度, 时空演变

Relationship between Urbanization and the Spatial-Temporal Evolution of PM_{2.5} Concentration in Chengdu

Fangfei He^{1*}, Ping He^{2#}

¹Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²College of Resources, Environment and Chemistry, Chuxiong Normal University, Chuxiong Yunnan

Received: April 23, 2026; accepted: May 14, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

This paper analyzes the PM_{2.5} data of Chengdu in the nearly 10 years from 2013 to 2022. The

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 何芳菲, 何萍. 成都市城市化与PM_{2.5}浓度时空演变关系[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(6): 1056-1069.

DOI: 10.12677/aep.2026.166107

temporal variation characteristics of PM_{2.5} concentration are analyzed by using Microsoft Excel software, and the spatial variation characteristics of PM_{2.5} concentration are analyzed by using ArcGIS software. The relationship between urbanization and PM_{2.5} concentration are analyzed by principal component analysis and coupling coordination relationship using SPSS software. The results indicate that the monthly variation of PM_{2.5} shows a similar pattern every year, with a downward trend from January to August and an upward trend from September to December, displaying a pattern of first decreasing and then increasing. PM_{2.5} concentrations are highest in winter and lowest in summer, while levels in spring and autumn are relatively comparable, resulting in a general seasonal pattern of winter > spring > autumn > summer. The annual variation characteristics showed a overall downward trend, progressively descending from 86.17 μg/m³ in 2013 to 31.21 μg/m³ in 2022. The spatial variation characteristics indicate that the concentration of PM_{2.5} is relatively high in the central area and gradually decreases when diffusing to the periphery, while the concentration increases gradually from the northwest to the southeast.

Keywords

Chengdu, Urbanization, PM_{2.5} Concentration, Space-Time Evolution

Copyright © 2026 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

成都是西部地区的核心城市,近年来随着经济快速发展与城市化进程加快,城市空间规模大幅扩展,建成区域、人口密度和产业结构均出现明显变化。与此同时,细颗粒物 PM_{2.5} 作为危害人体健康的主要大气污染物,在成都及其周边地区呈现高浓度水平,是困扰城市环境质量改善和达标管理的一项重要污染物[1]。PM_{2.5} (直径 ≤ 2.5 μm 的细颗粒物)是大气中化学组成最复杂,危害最大的污染物之一,因粒径小、比表面积大,易携带有毒物质,能够深入肺泡并进入血液循环,对人体健康产生多系统、多层面的危害[2][3]。城市化不同发展阶段对 PM_{2.5} 浓度的非线性影响有显著差异,二者存在环境库兹涅茨曲线(EKC)的关系,在“U”型曲线的左侧部分城市化影响 PM_{2.5} 浓度上升[4]。城市化通过改变土地利用、能源消费和交通排放等途径,直接影响 PM_{2.5} 的时空分布特征[5];同时气象条件和城市空间形态进一步调节了污染物的扩散与累积[6]。尽管成都市近年来通过产业结构调整 and 污染协同治理取得了一定成效,但城市化与 PM_{2.5} 的时空演变关系仍需深入解析。

本文收集并整理了 2013~2022 年成都市空气质量监测站点的 PM_{2.5} 浓度数据,研究成都市 PM_{2.5} 浓度的时空变化特征,应用 SPSS 软件通过主成分分析和耦合关系分析城市化与 PM_{2.5} 浓度的关系。通过研究成都市城市化与 PM_{2.5} 浓度的时空演变关系,可以促进城市发展,改善空气污染程度并提高居民的生活质量,为治理大气污染和城市规划提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

成都市位于四川盆地西部,地理坐标在东经 102°54'~104°53',北纬 30°05'~31°26'之间。西部为山地,东部为平原,这种地形容易形成静稳天气,阻碍污染物扩散,导致 PM_{2.5} 等污染物易累积。在气象方面,冬季逆温频率高,垂直对流弱,会加剧 PM_{2.5} 的滞留;夏季降水多,湿沉降作用会显著降低 PM_{2.5} 浓度。

在人为排放方面, $PM_{2.5}$ 人为源主要来自于工业生产排放、机动车尾气、燃煤与生物质燃烧以及扬尘等。气象条件是催化剂, 人为排放是主因, 因此需要研究分析成都市城市化与 $PM_{2.5}$ 浓度之间的关系, 研究区如图 1 所示。

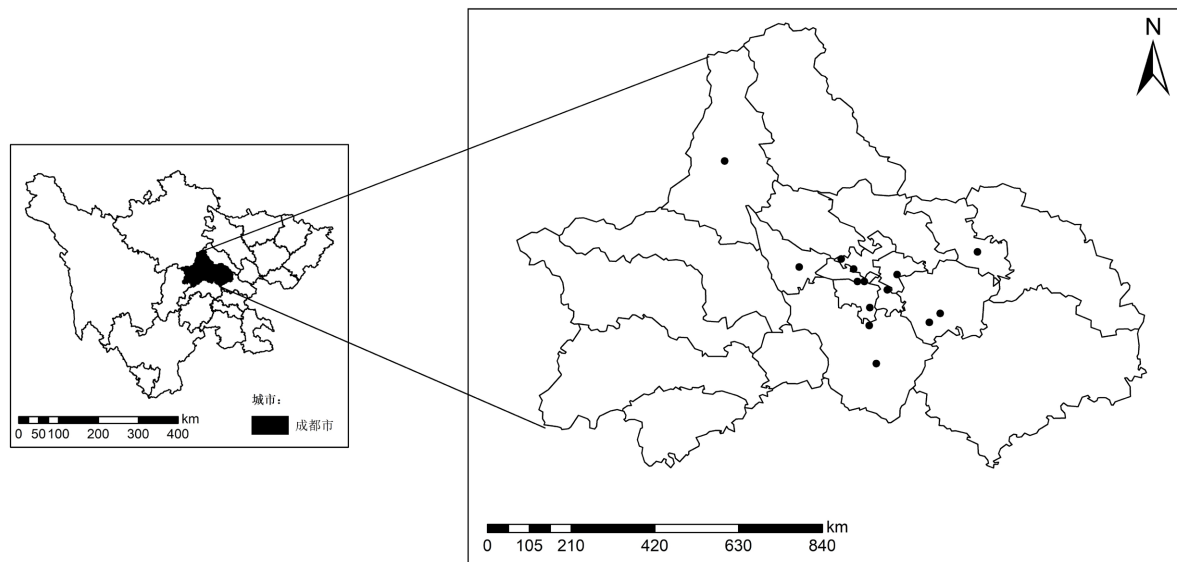


Figure 1. Distribution of $PM_{2.5}$ monitoring stations in the study area

图 1. 研究区 $PM_{2.5}$ 监测站分布图

2.2. 数据来源

本研究通过成都市环境监测站、国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>)以及全国城市空气质量实时发布平台(<https://aqicn.org/historical/cn/#city>)得到与 $PM_{2.5}$ 浓度相关的监测数据, 主要提供了成都市 $PM_{2.5}$ 数据从 2013~2022 年的 24 小时平均值、最大值、最小值、标准差等监测数据。通过 ArcGIS 软件中的插值法进行可视化处理, 分析成都市 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化特征, 直观展示了 2013~2022 年成都市 $PM_{2.5}$ 浓度在空间上的分布特征和变化趋势。

经济城市化、人口城市化及各控制变量数据主要源自 2013~2022 年《中国城市统计年鉴》¹《中国区域经济统计年鉴》²《中国人口和就业统计年鉴》³, 人均总产值(GDP)、人口数量和密度及各产业占比主要源自于 2013~2022 年权威发布的《中国城市统计年鉴》、详尽记录各地发展脉络的《中国区域经济统计年鉴》及聚焦人口与就业动态的《中国人口和就业统计年鉴》。针对数据的准确性, 对于个别缺失的数据点, 参考了市级的统计年鉴、社会经济发展统计公报。

2.3. 研究方法

2.3.1. 克里金插值法

克里金插值法(Kriging)是一种基于协方差函数对随机过程进行空间建模和预测的回归算法。例如固有平稳过程中, 克里金法能够给出最优线性无偏估计, 因此在地统计学中也被称为空间最优无偏估计器 [7]。许多研究证实了克里金插值法对于分析 $PM_{2.5}$ 浓度在时间和空间变化分析方面的重要性。

¹<http://www.tjcn.org/>

²<http://www.tjcn.org/e/tags/?tagname=%D6%D0%B9%FA%C7%F8%D3%F2%BE%AD%BC%C3%CD%B3%BC%C6%C4%EA%BC%F8>

³<http://www.tjcn.org/e/search/result/?searchid=3265>

$$\hat{z}_o = \sum_{i=0}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

$$\min_{\lambda_i} Var(\hat{z}_o - z_o) \quad (2)$$

$$E(\hat{z}_o - z_o) = 0 \quad (3)$$

2.3.2. 相关性分析

相关性分析是分析不同变量之间线性关系一种普遍的统计方法, 更具体地说, 通过相关性分析, 可以观察一个变量的变化如何影响另一变量。相关性分析通过相关系数深入分析研究不同变量的关系和相互作用的方向, 相关系数通常用 r 表示。Pearson 简单相关系数的计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: x_i 与 y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为两组样本值, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为两组样本的平均值, R_{xy} 为相关系数, 位于 $[-1, 1]$ 区间内。

2.3.3. 主成分分析

主成分分析(PCA)是一种常用的无监督机器学习方法, 属于多元统计分析技术, 用于减少数据集的维数和特征提取。主成分分析在确保信息丢失最少的情况下, 对可能包含重叠信息的多个相关指标进行降维处理, 在确保精度的前提下起到减少自变量的互相干扰程度的作用[8], 相关系数分类标准如表 1 所示。

Table 1. Classification standard of correlation coefficient

表 1. 相关系数分类标准

相关系数范围(r)	关联强度分类
$ r = 1$	完全相关
$0.8 \leq r < 1$	高度相关
$0.5 \leq r < 0.8$	中度相关
$0.3 \leq r < 0.5$	低度相关
$ r < 0.3$	不相关

2.3.4. 耦合协调度模型

Table 2. Coupling coordination degree classification

表 2. 耦合协调度等级划分

协调等级	耦合协调度	耦合协调程度
1	0.0~0.1	极度失调
2	0.1~0.2	严重失调
3	0.2~0.3	中度失调
4	0.3~0.4	轻度失调
5	0.4~0.5	濒临失调
6	0.5~0.6	勉强协调
7	0.6~0.7	初级协调
8	0.7~0.8	中级协调
9	0.8~0.9	良好协调
10	0.9~1.0	优质协调

耦合分析模型主要用于研究两个或多个系统之间的相互作用与协调发展水平, 广泛应用于经济地理、环境科学等领域。其核心是通过量化指标评估系统间的耦合度(反映相互作用强度)和协调度(反映良性耦合程度), 最终确定协调发展等级, 耦合协调度等级划分如表 2 所示。

3. 结果与分析

3.1. 成都市 PM_{2.5} 浓度时间变化特征

3.1.1. 月变化特征

通过处理数据建立成都市 2013~2022 年 PM_{2.5} 月平均质量浓度表和 PM_{2.5} 月变化曲线图。从图 2 和表 3 观察到, PM_{2.5} 浓度的月变化呈现出一定的规律性。

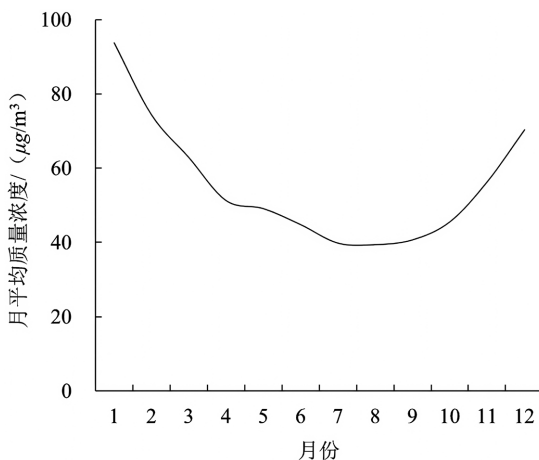


Figure 2. Monthly variation curve of PM_{2.5}, 2013~2022
图 2. 2013~2022 年 PM_{2.5} 月变化曲线图

Table 3. Table of monthly average mass concentration
表 3. 月平均质量浓度表

单位(µg/m³)

年份 \ 月份	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
1	157	107	112	78	128.29	76.87	69.87	68	73.71	66.65
2	112	103	88	74	76.07	72.43	51.32	64	60.29	42.89
3	95	98	75	69	46.06	60.03	42.19	47	48.84	48.03
4	83	89	63	61	32.10	47.45	38.37	39	28.20	32
5	72	86	54	60	42.38	41.06	33.03	36	37.16	30
6	68	79	48	63	41.13	28.90	26.83	34	31.53	28
7	63	73	43	67	26.23	25.58	21.41	33	21.42	25
8	61	71	41	68	19.81	35.04	27.07	32	17.65	22
9	65	76	46	69	28.13	24.52	29	31	18.83	20
10	74	83	53	70	34.37	39.65	30.65	30	23.52	18
11	86	93	65	73	62.17	52	48.73	34	30	20
12	98	98	72	80	91.84	61.04	77.42	39	64.39	22

从月尺度分析成都市 PM_{2.5} 浓度, 不同月份会出现不同程度的污染。其中 1 月的污染程度最严重, 是

十年来月污染浓度最高的月份, 月污染浓度的次峰值在 12 月; 7~8 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现稳定趋势且是全年污染浓度最小的两个月份。2013~2022 年 $\text{PM}_{2.5}$ 月变化曲线图呈现出先降低后上升的趋势, 1~8 月呈下降趋势, 9~12 月呈上升趋势。

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度主要受气象条件和人为排放的影响, 1 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度处于全年顶峰的原因与燃煤取暖、静稳天气多、扩散条件差有关。3~5 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度从峰值逐步回落, 但仍处于较高水平, 存在沙尘等污染叠加的风险。6~8 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受高温、强对流天气、扩散条件好和植被吸附等影响, 浓度较低。10~12 月易出现静稳天气, 风速小且逆温频繁, 污染物易持续累积, 导致浓度回升。

3.1.2. 季节变化特征

通过处理数据建立成都市 2013~2022 年 $\text{PM}_{2.5}$ 季平均质量浓度表和 $\text{PM}_{2.5}$ 季变化折线图。从图 3 和表 4 中观察到, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现出明显的季节变化规律。

冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高, 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最低, 春季和秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相似; 冬季浓度历史最高点出现在 2013 年($122.33\mu\text{g}/\text{m}^3$), 夏季浓度历史最低点出现在 2022 年($25\mu\text{g}/\text{m}^3$)。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化基本上是冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, 在 20 年和 22 年出现了夏季 > 秋季的情况, 可能与当年的政策以及防治大气污染的手段有关。

冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高的主要原因是, 冬季是成都市及周边地区供暖需求增加的时期, 燃煤、燃气等供暖方式的使用会导致污染物排放量上升。同时, 机动车尾气、工业排放以及工地扬尘等也是重要的污染源, 这些排放源在冬季可能因人为活动增加而排放更多污染物。夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最低的主要原因是, 夏季由于降雨增加和高温天气有利于大气污染物的扩散和沉降, 降雨可以清洗空气中的污染物, 高温易形成强对流天气促进污染物的扩散和分解。春季风速通常比冬季大, 有助于污染物扩散, 但由于扬尘和工业活动的影响, 导致春季的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度比夏季高, 比冬季低。

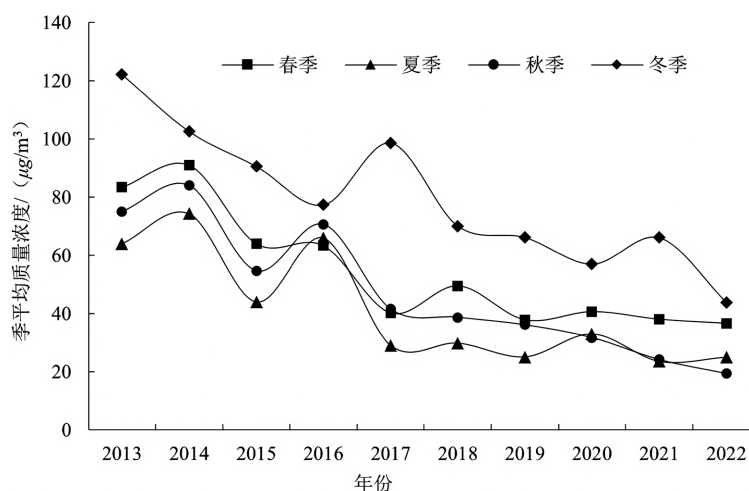


Figure 3. Line chart of seasonal variation of $\text{PM}_{2.5}$, 2013~2022

图 3. 2013~2022 年 $\text{PM}_{2.5}$ 季变化折线图

Table 4. Table of seasonal average mass concentration

表 4. 季平均质量浓度表

单位($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

年份 \ 季节	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
春季	83.33	91	64	63.33	40.18	49.51	37.86	40.67	38.07	36.68
夏季	64	74.33	44	66	29.06	29.84	25.10	33	23.53	25

续表

秋季	75	84	54.67	70.67	41.56	38.72	36.13	31.67	24.12	19.33
冬季	122.33	102.67	90.67	77.33	98.73	70.11	66.20	57	66.13	43.85

3.1.3. 年变化特征

通过处理数据得到成都市 2013~2022 年 PM_{2.5} 年平均质量浓度表和 PM_{2.5} 年变化折线图。从图 4 和表 5 中观察到, PM_{2.5} 浓度呈现出明显的年变化规律。

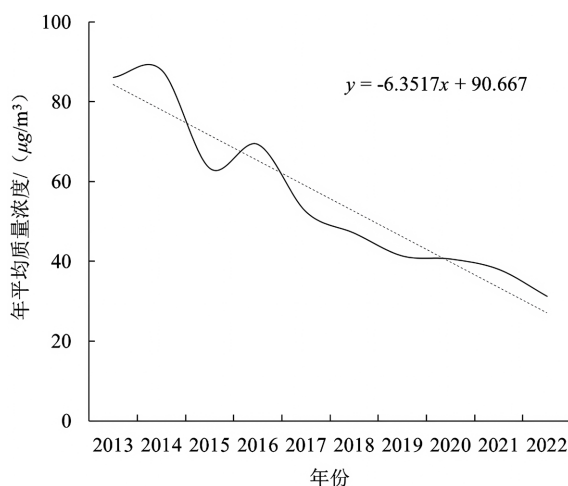


Figure 4. Line chart of annual changes of PM_{2.5}, 2013~2022

图 4. 2013~2022 年 PM_{2.5} 年变化折线图

Table 5. Annual average mass concentration table

表 5. 年平均质量浓度表

单位(μg/m³)

年份	年平均质量浓度
2013 年	86.17
2014 年	88
2015 年	63.33
2016 年	69.33
2017 年	52.38
2018 年	47.05
2019 年	41.32
2020 年	40.58
2021 年	37.96
2022 年	31.21

从年尺度分析成都市 PM_{2.5} 浓度, 整体上呈现下降趋势, 从 2013 年的 86.17 μg/m³ 逐步下降到 2022 年的 31.21 μg/m³, 说明成都市在这期间大气污染防治工作取得了明显成效, 空气质量得到持续改善。虽然整体呈下降趋势, 但过程中存在小幅波动。例如 2014 年浓度较 2013 年有所上升, 2016 年浓度较 2015 年也有一定回升, 可能原因是受逆温天气影响或建筑施工影响, 不过波动后仍保持长期下降的趋势。从拟合的直线方程 $y = -6.3517x + 90.667$ 可以看出, PM_{2.5} 浓度每年大约以 6.35 μg/m³ 的速率下降, 下降趋势较为稳定。

表明近十年政府在治理大气污染方面采取了多项有力措施, 例如推广清洁能源、限制汽车出行、增加绿地覆盖率、加强工业污染治理、减少扬尘等。这样的改善不仅意味着空气质量的提升, 更直接关联到市民的健康福祉, 减少了因空气污染导致的呼吸道疾病等健康问题。

3.2. 成都市 $PM_{2.5}$ 浓度空间变化特征

通过 ArcGIS 软件利用空间插值法将成都市 $PM_{2.5}$ 浓度均值划分为六个等级, 从图 5 的结果表明, $PM_{2.5}$ 浓度在地域上存在显著的差异性。过去十年的空间分布在中心区域数值偏高, 而向四周扩散时则逐渐降低。成都市在中部地区的 $PM_{2.5}$ 浓度最高, 东部地区的 $PM_{2.5}$ 浓度高于西部地区, 西部地区的 $PM_{2.5}$ 浓度最低。 $PM_{2.5}$ 浓度从西北部向东南部逐渐递增, 主要原因是成都市的特殊地理和气象条件影响着 $PM_{2.5}$ 浓度, 成都位置处于四川盆地西部边缘, 地势西高东低, 处于中心位置的高值区因湿度大、逆温出现频繁、中性及稳定性天气多, 这导致盆地内的污染物不易扩散, 容易造成污染物浓度快速增长[9]; 低值区海拔较高、降雨充足、植被覆盖率较高, 良好的气候条件使得该区域 $PM_{2.5}$ 浓度较低[10]。

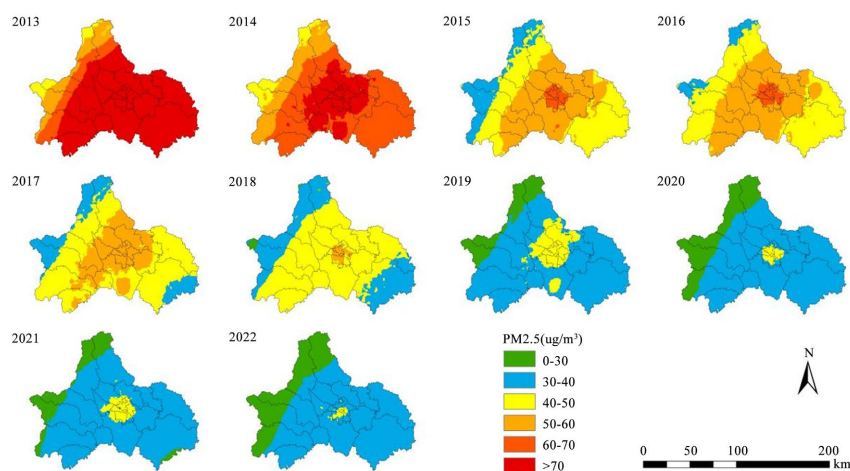


Figure 5. Spatial distribution map of $PM_{2.5}$ change, 2013~2022

图 5. 2013~2022 年 $PM_{2.5}$ 变化空间分布图

2013~2014 年成都市 $PM_{2.5}$ 浓度整体处于高值, 仅西部边缘有少量橙色, 空间差异极小。2015~2018 年高值区向中部收缩, 西部开始出现蓝色, 空间差异扩大; 2017 年“大气十条”第一阶段结束, $PM_{2.5}$ 浓度首次降至 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。2019 年“蓝天保卫战”深入推进, 绿色区域大量出现; 2021~2022 年绿色区域大幅扩张, 覆盖北部、西部大部分地区, 红色区域完全消失, 黄色区域收缩至中部小范围。

成都市 $PM_{2.5}$ 空间变化受到不同因素的影响, 包括城市发展、交通、人口和工业排放等。前期 $PM_{2.5}$ 污染严重的主要原因是城市中心区由于人口增长、工业扩张和排放、能源消耗上升以及汽车数量加剧等原因, 市区内的主要干道、中心商务区 and 工业区域的 $PM_{2.5}$ 浓度显著增加。相对于市区, 郊区和周边地区的 $PM_{2.5}$ 浓度较低, 但受季节性农业活动以及城市扩张引起的人口增长和承接工业转移, 局部地区也会出现高浓度污染。后期 $PM_{2.5}$ 污染减轻的主要原因是成都市在政策上实施了一系列大气污染防治行动, 这些措施包括协同降碳、控车减油、治污减排、清洁降尘、综合执法和科技治气等六大行动[11]。2017 年以来, 成都淘汰落后产能企业 1200 家, 工业 $PM_{2.5}$ 排放量减少约 40%。2022 年非化石能源消费比重达 42%, 推广天然气、新能源替代煤炭, 减少燃煤排放。2015~2022 年淘汰老旧车辆 8 万辆, 新能源汽车增至 20 万辆, 移动源 $PM_{2.5}$ 排放量减少约 30%。西部山区植树造林 100 万亩, 植被覆盖率从 2013 年的 55% 升至 2022 年的 65%, 增强自然净化能力。

3.3. 成都市城市化发展

成都是中国西南地区的重要城市, 近十年来在城市化进程中持续加速, 从城市规模的扩大到基础设施的完善, 从优化升级产业结构到全面提升公共服务, 为城市带来新的发展动力。

3.3.1. 城市人口增长与城市规模

从图 6 和图 7 所示, 成都的常住人口从 2013 年的 1564 万增长到 2022 年的 2127 万, 增长率达到 40% 以上, 成为我国第四个常住人口超过 2000 万的城市, 步入全国超大城市行列。城镇化率由 2013 年的 69.4% 提升至 2022 年的 79.9%, 高于全国多个百分点, 这种人口增长推动扩大了城市建成区面积。城市形态上, 成都在交通运输方面有着明显提升, 改善了道路运输系统和网络结构, 并不断增加国际和地区的定期直达货客运航线, 同时还在运行中加强了与国际城市之间的贸易交流合作, 成功开启国际铁路联运货物列车服务。在文化方面, 加强基础设施建设并推进众多重点项目, 大幅度提高了成都市的文化设施和娱乐项目的质量。

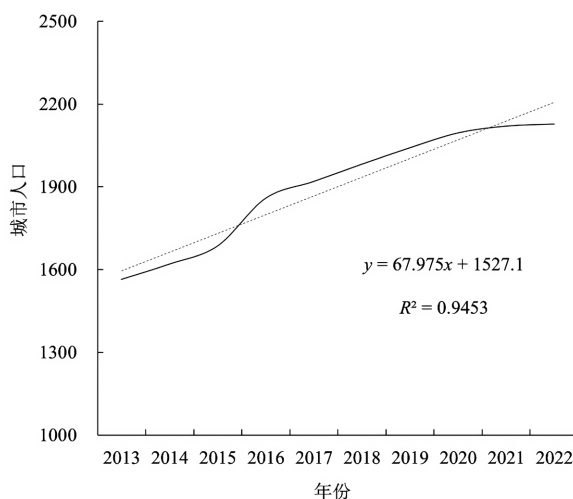


Figure 6. Line chart of permanent resident population of Chengdu, 2013~2022

图 6. 2013~2022 年常住人口年变化图

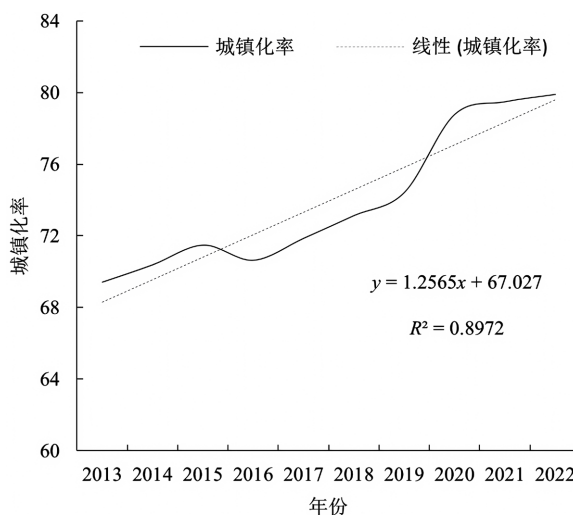


Figure 7. Line chart of urbanization rate in Chengdu, 2013~2022

图 7. 2013~2022 年成都市城镇化率年变化图

3.3.2. 经济发展与产业结构优化

从图 8~10 所示, 成都市经济稳定增长, 地区生产总值不断攀升, GDP 在十年间实现了跨越式增长, 由 2013 年的 9450.7 亿元连续跨过 11 个千亿台阶增长至 2022 年的 20817.5 亿元, 首次迈入“2 万亿元俱乐部”, 居全国城市第 7 位、副省级城市第 3 位。2022 年成都全年经济运行划出了一条迎难而上的奋进“曲线”, 比上年增长 2.8%。分产业看, 第一产业增加值 588.4 亿元, 增长 3.8%; 第二产业增加值 6404.1 亿元, 增长 5.5%; 第三产业增加值 13825.0 亿元, 增长 1.5%, 第二产业对经济增长贡献率达 59.6%, 成为稳定增长的关键。

成都市第二产业占比逐年下降, 从 2013 年的 45.91% 降至 2022 年的 30.8%; 第三产业占比提升, 从 2013 年的 53.3% 升到 2022 年的 66.4%。两者变化方向相反, 体现工业在经济中的比重逐步弱化, 成都向服务型经济、消费型城市转型的趋势。说明成都的产业结构逐步优化升级, 经济向更多元化的方向发展。反映出传统制造业外迁、高新技术产业占比提升但整体规模仍在调整, 经济增长动力从工业投资驱动逐步转向服务业消费、科创、金融、商贸等多元驱动, 城市功能更偏向于服务、流通和创新。城市在积极推进传统产业向高端化、智能化、绿色化的方向转型升级, 构建和完善一个以绿色低碳为核心的现代产业体系。

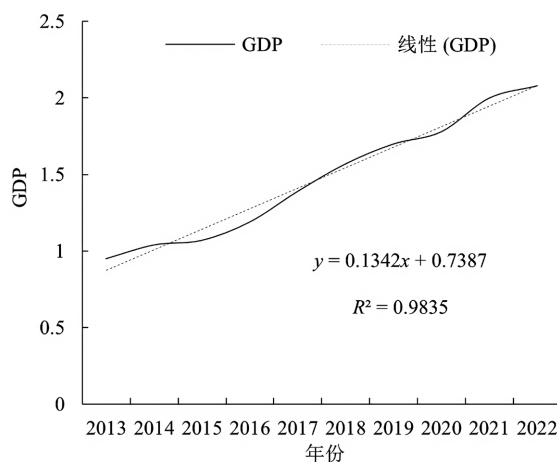


Figure 8. Chengdu GDP line chart from 2013 to 2022

图 8. 2013~2022 年成都市 GDP 年变化图

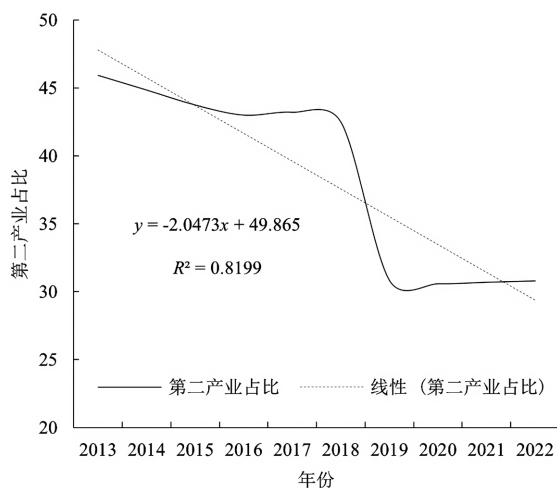


Figure 9. Break line chart of the proportion of secondary industry in Chengdu, 2013~2022

图 9. 2013~2022 年成都市第二产业占比年变化图

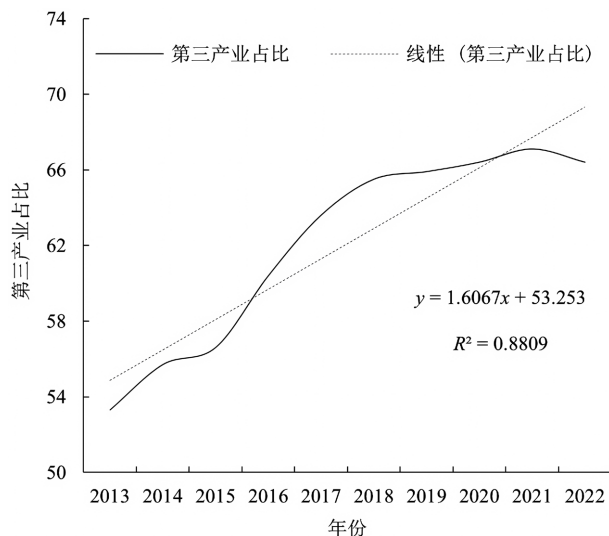


Figure 10. Break line chart of the proportion of tertiary industry in Chengdu, 2013~2022
图 10. 2013~2022 年成都市第三产业占比年变化图

3.4. 成都市城市化与 PM_{2.5} 浓度的关系分析

3.4.1. 主成分分析

在 SPSS 统计软件的支持下, 通过 PCA 方法分析 2013~2022 年成都市 GDP、第二产业占比、第三产业占比、城镇化率 4 个城市化因素, 研究城市化与 PM_{2.5} 浓度的关系。根据 KMO 的结果显示为 0.76 > 0.5, 显著性 P 值为 0.000*** (**、* 分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平), 水平上呈现显著性, 拒绝原假设, 各变量间具有相关性, 主成分分析有效。

主成分分析中, 特征值表示该主成分对应的方差值, 贡献率表示单个主成分的方差占总方差的百分比, 累计贡献率表示前 n 个主成分贡献率之和。针对分析主要选择特征值和贡献率较大的主成分, 因为包含的信息较多并可以更好地解释数据的变异性。从表 6 的结果表明, GDP 可以体现 PM_{2.5} 浓度的基本情况, 主要原因是 GDP 的特征值为 3.868 并远大于其他 3 个成分, 贡献率为 96.696%。

Table 6. Results of principal component analysis

表 6. 主成分分析结果

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
GDP	3.868	96.696	96.696
第二产业占比	0.103	2.569	99.265
第三产业占比	0.029	0.723	99.988
城镇化率		0.012	100

Table 7. Results of loading different factors

表 7. 不同因子的载荷结果

因子	主成分
GDP	0.988
第二产业占比	-0.986
第三产业占比	0.991
城镇化率	0.969

因子载荷的大小是用来衡量变量与因子之间的相关性, 负数意味着变量与因子的关联方向相反。主成分分析的结果如表 7 所示, GDP、第三产业占比、城镇化率在主成分中所占比例都较大, 与成都市 $PM_{2.5}$ 浓度有相对较强的正相关关系, 第二产业占比与 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著负相关。

研究表明[12], 城市化对 $PM_{2.5}$ 浓度存在正向非线性的影响, 并具有显著的门槛特征。当以 GDP 为门槛变量时, 在越过门槛值之前, 经济增长对 $PM_{2.5}$ 浓度产生正向影响。以第二产业占比为门槛变量时, 第二产业占比对 $PM_{2.5}$ 浓度产生正向影响, 但是越过门槛值之后呈现下降的趋势。

GDP 增长、第三产业占比提升与城镇化率提高, 导致 $PM_{2.5}$ 浓度污染越显著的主要原因是, 在特定的发展阶段, 这三者共同构成了一种以高能耗、高排放为显著特征的“规模扩张”模式, 形成了一个正反馈循环。带来的污染排放增量超过了结构调整和环境治理技术进步的减排效应, 这种现象并非线性永恒, 而是环境库兹涅茨曲线(EKC)拐点左侧上升阶段的典型表现。GDP 增长主要依赖工业生产与能源消耗, 这种增长模式意味经济增长越大, 伴随的化石能源消耗总量、工业加工量和货物周转量也越大, 会直接导致二氧化硫、氮氧化物、烟尘等 $PM_{2.5}$ 前体物排放量激增。第三产业占比提升会诱发高排放的生活消费, 城镇化率提高会带来人口的大规模集聚, 生活服务业的繁荣会直接刺激居民消费水平提升, 经济活跃会导致机动车量、商贸餐饮活动、建筑工程规模持续扩大, 各类人为污染源全面增加。餐饮、机动车排放大量 VOCs、氮氧化物, 易通过光化学反应生成二次 $PM_{2.5}$, 进一步加重污染; 建筑工程会导致施工扬尘、道路扬尘显著增加, $PM_{2.5}$ 污染排放量增加。

第二产业占比增长而 $PM_{2.5}$ 浓度显著下降的核心原因并不是如表面结果表明第二产业占比高直接导致 $PM_{2.5}$ 污染降低, 主要原因是成都市第二产业内部结构升级以及地域集聚效应的调节。第二产业与 $PM_{2.5}$ 污染的关系不是简单的线性关系, 而是遵循环境库兹涅茨曲线(EKC)的“倒 U 型”特征, 即在工业化初期和中期, $PM_{2.5}$ 浓度污染随第二产业扩张而加剧; 但越过某个发展拐点后, 随着内部结构向高技术和低污染行业转型、环保投入增加和产业结构升级, $PM_{2.5}$ 浓度污染开始下降。同时, 当产业以集聚形式发展时, 可能更易产生规模效应、共享环保设施、促进绿色技术扩散, 从而在一定程度上抵消第二产业扩张带来的污染效应。

3.4.2. 耦合协调度分析

在 SPSS 统计软件的支持下, 通过耦合协调度对 2013~2022 年成都市城市化数据与 $PM_{2.5}$ 数据进行分析, 研究城市化与 $PM_{2.5}$ 浓度的耦合关系。如表 8 所示, 城市化与 $PM_{2.5}$ 浓度的耦合协调度呈现“先快速提升、后逐步回落”的趋势, 从 2013 年的“严重失调”逐步提升至 2021 年的“良好协调”, 协调等级从 2 级升至 9 级, 体现出成都市在 $PM_{2.5}$ 防控、人口发展、经济增长、产业结构优化、城镇化推进等多系统间的相互作用不断增强, 且发展方向趋于一致, 协调水平显著提升。但 2022 年出现回落, 反映各要素间关联强度与发展同步性在不同阶段呈现差异化。

耦合度在 2013~2018 年从 0.13 升至 0.93, 说明城市化与 $PM_{2.5}$ 浓度间的关联度快速上升, 经济规模扩张带动人口集聚、第三产业占比上升推动城镇化、环境治理与经济联动的增强都与 $PM_{2.5}$ 浓度紧密相关。2019~2022 年虽有所回落, 但整体仍处于较高水平(0.56~0.89), 说明城市化与 $PM_{2.5}$ 的关联强度逐步减弱但多系统间的互动关系仍长期保持紧密。协调指数从 2013 年的 0.17 稳步提升至 2022 年的 0.83, 说明城市化与 $PM_{2.5}$ 浓度的发展节奏逐步趋同。早期 T 值低, 反映要素间“同步性较差”; 后期 T 值高, 体现要素间“发展协同性增强”。

综上所述, 2013~2022 年成都市城市化与 $PM_{2.5}$ 多系统的耦合协调关系整体呈显著优化态势, 前期体现早期政策对要素联动的引导作用, 后期反映产业转型中要素联动机制的波动。长期较好的趋势明确, 反映出成都市在统筹多领域发展、推动系统协同方面取得了积极成效。

Table 8. Coupling coordination degree calculation results
表 8. 耦合协调度计算结果

年份	耦合度	协调指数	耦合协调度	协调等级	耦合协调程度
2013 年	0.13	0.17	0.15	2	严重失调
2014 年	0.60	0.26	0.39	4	轻度失调
2015 年	0.89	0.26	0.48	5	濒临失调
2016 年	0.85	0.35	0.55	6	勉强协调
2017 年	0.92	0.38	0.59	6	勉强协调
2018 年	0.93	0.44	0.64	7	初级协调
2019 年	0.89	0.65	0.76	8	中级协调
2020 年	0.88	0.76	0.82	9	良好协调
2021 年	0.83	0.82	0.83	9	良好协调
2022 年	0.56	0.83	0.68	7	初级协调

4. 结论

(1) 从月尺度分析成都市 $PM_{2.5}$ 浓度, 不同月份会出现不同程度的污染, 其中 12~1 月的污染程度最严重, 7~9 月的污染程度最小。

(2) 从季节尺度分析成都市 $PM_{2.5}$ 浓度, 冬季 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高, 夏季 $PM_{2.5}$ 质量浓度最低, $PM_{2.5}$ 质量浓度变化基本特点是冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季。北京、上海、重庆等其他特大城市 $PM_{2.5}$ 质量浓度在四季上的特点都是冬高夏低, 呈“U”型曲线, 但北京季节振幅较大, 上海波动较小, 重庆在冬季反弹较大。

(3) 从年尺度分析成都市 $PM_{2.5}$ 浓度, $PM_{2.5}$ 质量浓度在年尺度变化上整体呈下降趋势。北京、上海、重庆等其他特大城市 $PM_{2.5}$ 质量浓度在年尺度上均呈现先上升后下降的变化趋势, 但不同城市的降幅差异较大, 重庆受盆地地形约束更强, 北京以区域传输和移动源为主, 上海变化稳定。

(4) 从空间变化分析成都市 $PM_{2.5}$ 浓度, 2013~2022 年 $PM_{2.5}$ 浓度在中心区域数值偏高, 而向四周扩散时则逐渐降低。中部地区是 $PM_{2.5}$ 浓度的高值区, 东部地区高于西部地区, 西部地区为低值区。北京 $PM_{2.5}$ 浓度的空间特点是南部高、北部低, 中心城区受交通源主导。上海 $PM_{2.5}$ 浓度的空间特点是区域分布呈“西北高、东南低”的格局, 市区与郊区差异不显著, 甚至郊区有时更高。重庆 $PM_{2.5}$ 浓度的空间特点是主城区高、山区低, 在封闭地形中污染物易在河谷堆积。

(5) 主成分分析的结果表明, GDP 已基本可以反映成都市 $PM_{2.5}$ 浓度的情况。GDP、第三产业占比、城镇化率与成都市 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著正相关, 第二产业占比与 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著负相关。

(6) 耦合协调度的结果表明, 城市化与 $PM_{2.5}$ 浓度的耦合协调度呈现“先快速提升、后逐步回落”的趋势, 从 2013 年的“严重失调”逐步提升至 2021 年的“良好协调”, 协调等级从 2 级升至 9 级, 但 2022 年出现回落。

5. 研究局限性

(1) 研究数据时间跨度较短: 2013~2022 年的研究只能反映近年的趋势, 短期数据易受政策波动或极端天气干扰, 影响结论稳定性。

(2) 没有排除气象因素的干扰: 成都盆地地形闭塞、静稳天气频发, 气象条件对 $PM_{2.5}$ 累积有显著影

响。

(3) 没有考虑区域污染输送: 成都作为区域中心的城市, 空气质量受周边城市群工业排放和跨境输送影响显著, 缺乏区域尺度的联防联控。

(4) 城市化指标体系有待完善: 城市化水平没有综合考虑经济密度、交通网络、土地利用强度等多维指标。

基金项目

国家自然科学基金项目(云南高原滇中城市群对区域降水的影响研究, 41465001); 云南省教育厅科学研究基金项目资助(2023J1080)。

参考文献

- [1] 刘启龙. 云南省蒙自市大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. 四川环境, 2020, 39(5): 82-88.
- [2] 徐靖雅, 么艳鑫, 王颖, 等. 2013-2018 年京津冀地区大气细颗粒物污染致居民健康危害的经济学评价[J]. 卫生研究, 2021, 50(6): 938-943+951.
- [3] 许丽忠, 蔡雯颖, 钟雪芬, 等. 中国城市 2016~2017 年 PM_{2.5} 时空分布特征[J]. 四川环境, 2021, 40(6): 74-80.
- [4] 郭向阳, 穆学青, 丁正山, 等. 长三角多维城市化对 PM_{2.5} 浓度的非线性影响及驱动机制[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1274-1293.
- [5] 牛曦辰. 中国 PM_{2.5} 空间分布特征及影响因素[J]. 科技与创新, 2023(10): 1-6.
- [6] 张莹, 张婕, 王式功, 等. 成都市 PM_{2.5} 浓度变化的影响因素交互作用研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4518-4528.
- [7] Le, N.D. and Zidek, J.V. (2006) *Statistical Analysis of Environmental Space-Time Processes*. Springer.
- [8] 孙艺宁, 许嘉巍. 基于主成分分析的长春市土地生态安全评价[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(34): 207-210.
- [9] 周子涵, 张小玲, 康平, 等. 基于异常天气分析法探究四川盆地冬季大气污染的气象成因[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 66-77.
- [10] 白雪琴, 马丽, 黄天志, 等. 2015-2020 年成都市 PM_{2.5} 的时空分布及影响因素[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2023, 46(6): 785-793.
- [11] 王小红, 宋燕梅. 基于引力模型的大气污染对成都入境旅游的影响研究[J]. 成都大学学报(社会科学版), 2022(3): 30-39.
- [12] 严雅雪, 李锴. 中国城市化对 PM_{2.5} 浓度影响的门槛效应研究[J]. 环境经济研究, 2016, 1(2): 93-106.