

西南地区主要城市PM_{2.5}浓度时空分布特征及其气象影响因素分析

尹婧, 李娜, 李昕悦, 陆明媚, 薛琪

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年6月24日; 录用日期: 2024年7月25日; 发布日期: 2024年8月16日

摘要

基于2015~2017年西南地区成都市、贵阳市、重庆市、昆明市、拉萨市PM_{2.5}浓度的逐日观测数据以及同期的气象要素(气温、气压、风速、相对湿度)观测数据, 分析PM_{2.5}浓度、气象要素的时空分布特征以及其之间的关系。结果表明: 西南地区PM_{2.5}年平均浓度在63.84 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ~73.93 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间内先增加后降低; 季节平均浓度具有鲜明的季节变化特征, 冬季高, 夏季低; 月平均浓度大致呈现减小-增加-减小-增加的位相变化。PM_{2.5}年平均浓度空间分布形式较稳定, 成都市始终呈现PM_{2.5}高浓度聚集(年平均浓度分别为101.27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、100.64 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、84.90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。五个城市PM_{2.5}浓度和气温呈显著负相关; 成都市PM_{2.5}浓度与气压呈强正相关, 重庆市、昆明市呈负相关; 昆明市、成都市PM_{2.5}浓度与风速呈负相关; 拉萨市、贵阳市PM_{2.5}浓度与相对湿度呈负相关。研究表明, 小风, 适宜的气温和湿度, 低压, 适当的降水会使PM_{2.5}的浓度增加。

关键词

西南地区, PM_{2.5}浓度, 气象要素, 相关分析

Characteristics of Spatiotemporal Distribution of PM_{2.5} Concentration in Major Cities in Southwest China and Analysis of Its Meteorological Influencing Factors

Jing Yin, Na Li, Xinyue Li, Mingmei Lu, Qi Xue

School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 24th, 2024; accepted: Jul. 25th, 2024; published: Aug. 16th, 2024

文章引用: 尹婧, 李娜, 李昕悦, 陆明媚, 薛琪. 西南地区主要城市PM_{2.5}浓度时空分布特征及其气象影响因素分析[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(4): 947-956. DOI: 10.12677/aep.2024.144125

Abstract

Based on the daily observation data of PM_{2.5} concentrations in Chengdu, Guiyang, Chongqing, Kunming, and Lhasa in Southwest China from 2015 to 2017, as well as the observation data of meteorological elements (temperature, air pressure, wind speed, and relative humidity) during the same period, the analysis of PM_{2.5} concentrations and the spatiotemporal distribution characteristics of meteorological elements and their relationship. The results show that the annual average PM_{2.5} concentration in Southwest China increases and then decreases in the range of 63.84~73.93 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; the seasonal average concentration has distinct seasonal variation characteristics, high in winter and low in summer; the monthly average concentration generally shows a phase change of decreasing-increasing-decreasing-increasing. The spatial distribution of the annual average PM_{2.5} concentration is relatively stable, and Chengdu always shows high PM_{2.5} concentration aggregation (the annual average concentrations are 101.27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 100.64 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and 84.90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively). PM_{2.5} concentrations and air temperature in five cities were significantly negatively correlated; PM_{2.5} concentrations in Chengdu were strongly positively correlated with air pressure, Chongqing and Kunming were negatively correlated; PM_{2.5} concentrations in Kunming and Chengdu were negatively correlated with wind speed; Lhasa and Guiyang PM_{2.5} concentrations were negatively correlated with relative humidity. Studies have shown that light winds, suitable temperature and humidity, low pressure, and appropriate precipitation will increase the concentration of PM_{2.5}.

Keywords

Southwest China, PM_{2.5} Concentration, Meteorological Elements, Correlation Analysis

Copyright © 2024 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

近年来,国内工业化、城市化的进程不断加快,大气污染也不断加剧。空气污染物浓度的增加已经严重威胁到人类的生命健康[1]。2022年,二十大报告中提出“深入推进污染防治,坚持精准治污、科学治污、依法治污,持续深入打好蓝天、碧水、净土保卫战,加强污染物协同控制,基本消除重污染天气”的新目标。PM_{2.5}是指空气动力学直径小于等于2.5 μm 的大气颗粒物[2]。由于其特殊的物理性质,易于在近地层积聚形成霾,远距离输送造成大范围污染;同时增加了人体呼吸系统、心血管系统的发病率,对人体健康产生负效应[3][4]。近几十年来,PM_{2.5}浓度变化的趋势一直是公众关注的热点之一。许多研究表明,PM_{2.5}浓度受到多种因素的影响,包括气象因素、人为排放以及其它污染物的影响,浓度受到不同气象要素的影响程度不同[5]。花瑞阳等[6]采用广义相加模型研究发现,长沙市城区臭氧浓度受到气象要素(温度、太阳辐射、相对湿度)和污染物(NO₂、CO)的影响。栾兆鹏等[7]通过计算降水清除率,对PM_{2.5}浓度的来源进行了解析,指出降水对PM_{2.5}的清除率受到降水强度、降水时长和初始浓度等因素的影响,同时风向会对霾污染产生作用。毛卓成等[8]研究2013~2017年PM_{2.5}-O₃复合污染及其与气象条件的关系发现,温度为27.9°C~34°C,湿度为43%~58%,风速为2.1~3.3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,混合层高度为1122~1599 m,有辐射时最有利于复合污染天气的出现。姚青等[9]采用天津地区PM_{2.5}质量浓度长期连续观测资料,结合后向轨迹方法研究发现气象因素对PM_{2.5}质量浓度的影响具有季节性,且静稳天气更利于PM_{2.5}颗粒物的积聚。尹承美等[10]研究指出济南市近地面PM_{2.5}与温度、相对湿度、K指数和A指数呈显著正相关,

与风速、边界层高度成负相关。

以往研究往往仅针对某一城市进行 $PM_{2.5}$ 浓度和气象要素的相关性分析,而针对西南地区的研究较少。根据《第七次全国人口普查公报》,成都市、重庆市、贵阳市、昆明市、拉萨市作为西南地区的主要城市,经济较为发达、人口较为集中。西南地区地形复杂,包括青藏高原山地单元、云贵高原的高山山地丘陵单元和四川盆地周围的山地单元[11],研究其 $PM_{2.5}$ 浓度和气象要素之间的关系更具有重要的意义。本文基于以上五个省会城市 2015~2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度数据和同期气温、气压、风速、相对湿度的气象观测数据,分析 $PM_{2.5}$ 浓度的时空分布特征,讨论 $PM_{2.5}$ 浓度和气象要素的相关性,为西南地区大气污染防治和防灾减灾提供科学参考。

2. 资料和方法

2.1. 研究区域

西南地区位于 $97^{\circ}21'E\sim 110^{\circ}11'E$, $21^{\circ}08'N\sim 33^{\circ}41'N$ 之间,北部接壤黄土高原,南有云贵高原,西部与青藏高原接壤,东有巫山、大巴山[12]。西南地区山地、高原地貌众多,地势西高东低、北高南低,地势起伏大,最大高度差达 7500 m。西南地区大部分地区年平均气温在 $14^{\circ}C\sim 24^{\circ}C$ 之间,降水量的空间分布呈现自东南向西北递减的趋势[13]。本文选取西南地区温江站、贵阳站、沙坪坝站、昆明站、拉萨站五个气象观测站点展开研究,海拔高度依次为 547.7 m、1223.8 m、259.1 m、1888.1 m、3648.9 m (图 1)。

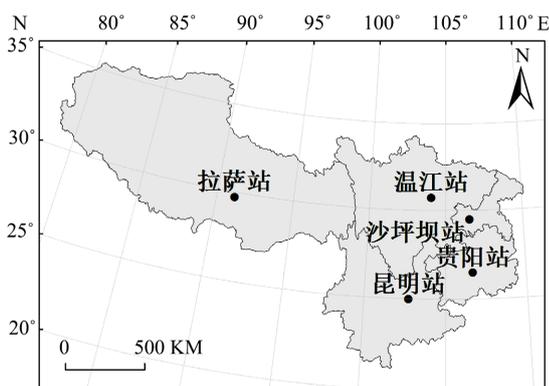


Figure 1. Distribution of meteorological stations in Southwest China
图 1. 西南地区气象站点分布图

2.2. 资料的选取

本文使用 2015 年 1 月 1 日~2017 年 12 月 31 日温江站、贵阳站、沙坪坝站、昆明站、拉萨站五个站点的 $PM_{2.5}$ 浓度和气象要素(气温、气压、风速、相对湿度)的站点观测数据。 $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于国家人口健康科学数据中心(<https://www.ncmi.cn/>),气象要素数据(气温、气压、风速、相对湿度)来源于 Weather for 241 countries of the world (<https://rp5.ru/>)。

2.3. 方法

皮尔逊相关系数 r 用来描述两个变量之间线性相关性强弱的程度[14]。有两组变量分别为 $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, $Y = y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$, 变量 X 和变量 Y 的皮尔逊相关系数公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)(y_i - \mu_Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_Y)^2}} \quad (1)$$

其中, r 代表皮尔逊相关系数, X , Y 代表变量, μ_X 为变量 X 的平均值, μ_Y 为变量 Y 的平均值, r 的绝对值越大, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和气象要素之间的相关性越高[15]。

本文对皮尔逊相关系数相关性强弱进行划分, 规定 $0.0 < |r| < 0.4$ 为弱相关, $0.4 \leq |r| < 0.6$ 为中等相关, $0.6 \leq |r| < 0.8$ 为强相关, $0.8 \leq |r| < 1.0$ 为极强相关。

3. 结果分析

3.1. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空变化特征

3.1.1. $\text{PM}_{2.5}$ 时间演变特征

图 2 给出了 2015~2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐年变化。2015~2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度分别高《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中 $\text{PM}_{2.5}$ 年均限值($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)约 101.63%、111.23%、82.41%, 严重超标[16]。三年间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别为 $70.57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $73.93 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $63.84 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度在 2016 年略有升高, 随后显著下降, 2017 年相较于 2016 年下降约 13.65%, 这表明 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况恶化之后, 政府积极采取的大气污染治理措施产生了显著的成效。

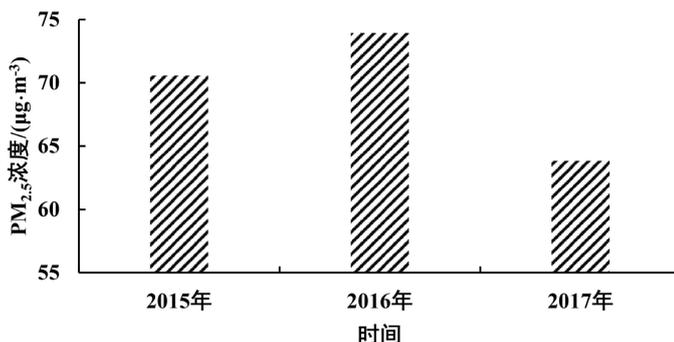


Figure 2. Annual variation of average $\text{PM}_{2.5}$ concentration in five cities in Southwest China from 2015 to 2017

图 2. 2015~2017 年西南地区五个城市平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年变化

本文以 3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季、12 月~次年 2 月为冬季为标准对季节进行划分, 如图 3 给出了 2015~2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 季节平均浓度变化。可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有鲜明的季节变化特征, 冬季高($94.33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 夏季低($49.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 冬季高夏季约 91.88%, 从高到低依次为冬季、春季、秋季、夏季。夏季为低谷值可能与降水的清除作用有关, 冬季为高峰值可能与冬季稳定的大气层结不利于污染物的扩散有关[17]。

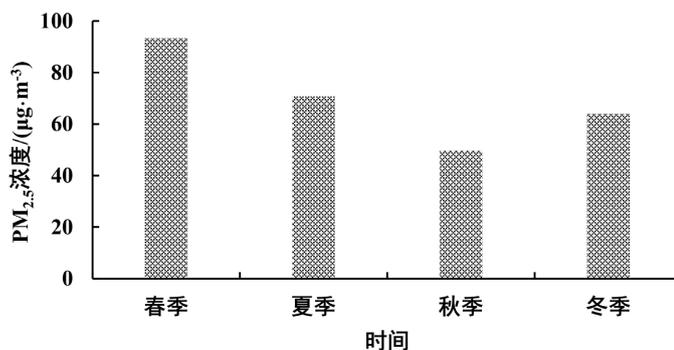


Figure 3. Seasonal variation of average $\text{PM}_{2.5}$ concentration in five cities in Southwest China from 2015 to 2017

图 3. 2015~2017 年西南地区五个城市平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度季节变化

图4给出了2015~2017年西南地区PM_{2.5}逐月浓度变化,具有较明显的月变化特征。2015年1月至9月,PM_{2.5}月平均浓度由113.96 μg·m⁻³波动下降至49.01 μg·m⁻³,在此期间,6月略有小幅度上升,随后从9月小幅度波动上升到12月达85.81 μg·m⁻³;2016年1月~4月PM_{2.5}浓度趋于稳定,在79.88 ± 3.11 μg·m⁻³范围内浮动,5月~7月下降约15.21 μg·m⁻³,随后显著上升至12月达121.72 μg·m⁻³;2017年1月~8月大幅度下降,由98.95 μg·m⁻³下降至34.44 μg·m⁻³,随后大幅度上升至12月达101.63 μg·m⁻³。整体来看,PM_{2.5}月平均浓度在2015~2017年间大致呈现减小-增加-减小-增加的位相变化。

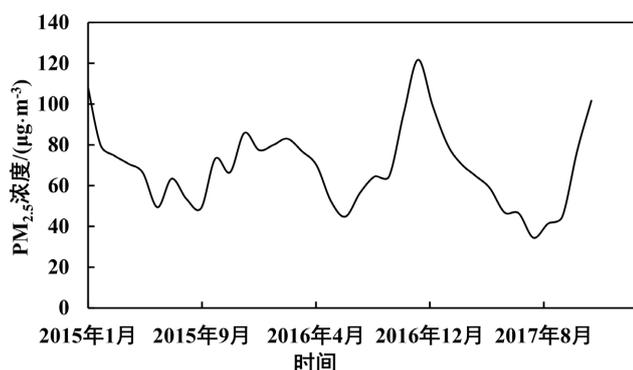


Figure 4. Monthly variation of average PM_{2.5} concentration in five cities in Southwest China from 2015 to 2017
图4. 2015~2017年西南地区五个城市平均PM_{2.5}浓度月变化

3.1.2. PM_{2.5}空间分布特征

以西南地区五个省市的省会城市代表各自省市,绘制出2015~2017年西南地区PM_{2.5}浓度年平均值的空间分布如图5所示。从PM_{2.5}年平均浓度分布的空间位置分析,西南地区中部、东北部PM_{2.5}年平均浓度相较其他地区较高,其中2015~2017年四川省年平均浓度均大于80 μg·m⁻³,污染最严重;西南地区南部、东南部PM_{2.5}年平均浓度明显低于其他地区,其中2015~2017年云南省PM_{2.5}年平均浓度分别是52.92 μg·m⁻³、52.70 μg·m⁻³、55.16 μg·m⁻³;西藏自治区位于西南地区的最西部,PM_{2.5}年平均浓度上下波动,其中2015年和2017年PM_{2.5}年平均浓度较低,2016年PM_{2.5}年平均浓度仅次于四川省(图5(b)),达78.21 μg·m⁻³。从西南地区PM_{2.5}年平均浓度分布的时间变化分析,2016年西南地区PM_{2.5}年平均浓度最高,污染最严重,2015年次之,2017年最低。2015~2017年,西南地区PM_{2.5}年平均浓度始分布形式较为稳定,四川省始终呈现PM_{2.5}高浓度聚集,PM_{2.5}年平均浓度分别为101.27 μg·m⁻³、100.64 μg·m⁻³、84.90 μg·m⁻³,均是西南地区的最高值,这与以往的研究结果相同[18]。

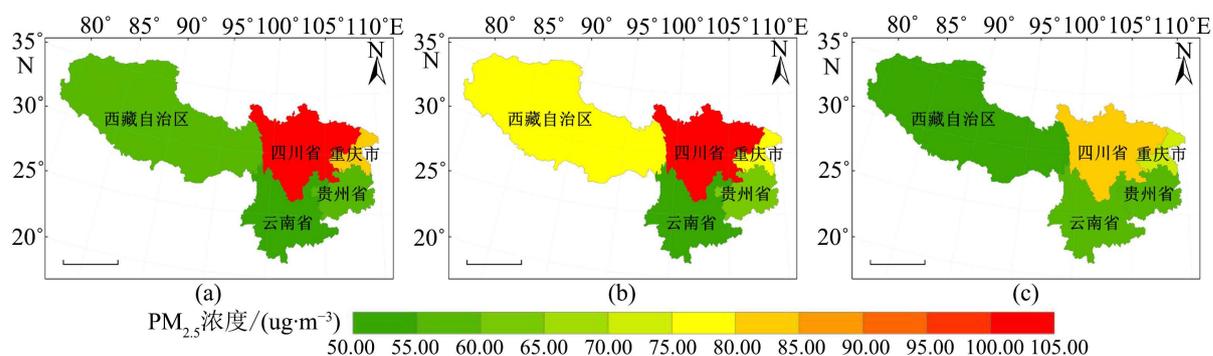


Figure 5. Spatial distribution of PM_{2.5} annual average concentration in five cities in Southwest China in 2015 (a), 2016 (b), and 2017 (c)

图5. 2015年(a)、2016年(b)、2017年(c)西南地区五个城市PM_{2.5}年均浓度空间分布

3.2. 气象要素时空变化特征

3.2.1. 气象要素时间演变特征

2015~2017年西南地区五个省会城市气温、气压、风速、相对湿度月均值变化曲线如图6所示。图6(a)为2015~2017年西南地区月平均气温变化曲线,月平均气温呈现单峰变化和明显的季节性变化,月平均最高气温出现在夏季,其中7月最高,2015~2017年分别为23.85℃、24.65℃、24.88℃,月平均气温最低出现在冬季,其中2015、2016年1月最低,分别为7.26℃、5.97℃,2017年12月最低,为7.64℃。与同期的PM_{2.5}月平均浓度相比较,大致呈现气温越高PM_{2.5}浓度越低的变化特征,因此气温越高越有利于PM_{2.5}颗粒物的扩散。图6(b)为2015~2017年西南地区月平均气压变化曲线,月平均气压在636.88~642.96 hPa之间小幅度波动。2015年1月至2015年5月由641.48 hPa下降至636.88 hPa,随后至2015年12月波动上升至642.15 hPa,2016~2017年变化趋势同2015年基本一致。PM_{2.5}月平均浓度与月平均气压大致呈现同增同减的趋势。风是影响大气层结中污染物稀释扩散的重要气象因素[19]。图6(c)给出了2015~2017年西南地区月平均风速变化曲线,月平均风速大致在 $2.9 \pm 0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间小幅波动,从2015年1月至3月上升至最大值($3.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),随后显著下降至10月达最低值($2.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),10月至次年4月波动上升至最大值($3.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),之后的变化趋势同前一年大致相同。结合PM_{2.5}月平均浓度可以发现,风速与PM_{2.5}浓度有较好的对应关系,风速越大PM_{2.5}浓度越低。图6(d)给出了西南地区月平均相对湿度变化曲线,相对湿度在50.21%~73.51%之间波动,与同期的PM_{2.5}浓度相比较,发现相对湿度与PM_{2.5}浓度呈现相反的位相变化。相对湿度高于平均值62.63%时,PM_{2.5}浓度大多低于平均值 $69.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这有悖于王佳佳等[20]的研究结果,相对湿度低于60%时,空气干燥不利于颗粒物的沉降,PM_{2.5}浓度较低。这可能是由于相对湿度处于60%~80%且无降水时,有利于颗粒物的二次生成,使得PM_{2.5}偏高[21]。

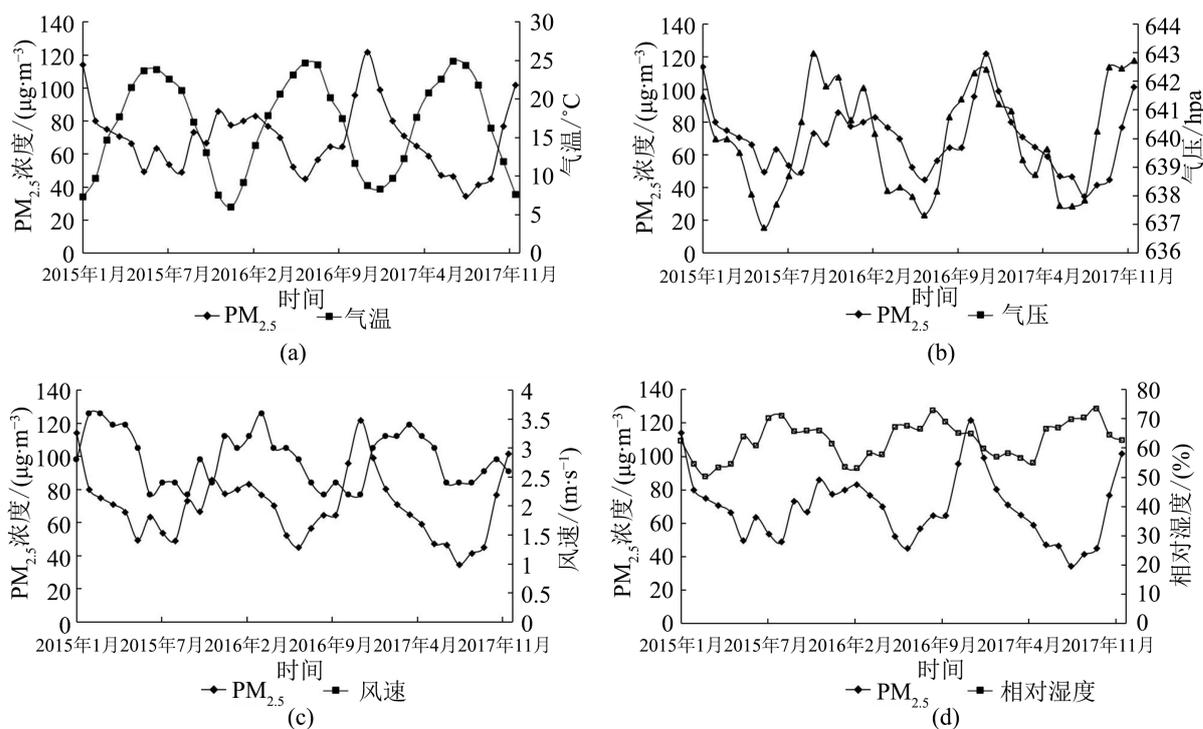


Figure 6. Monthly changes in average PM_{2.5} concentration and temperature (a), air pressure (b), wind speed (c), and relative humidity (d) in five cities in Southwest China from 2015 to 2017

图 6. 2015~2017年西南地区五个城市平均PM_{2.5}浓度和气温(a)、气压(b)、风速(c)以及相对湿度(d)月变化

3.2.2. 气象要素空间变化特征

图 7(a)给出了 2015~2017 年西南地区五个城市气温平均值, 平均气温由高到低依次为重庆市、成都市、贵阳市、昆明市、拉萨市, 这与海拔高度的变化相同, 重庆市、成都市气温高拉萨市约 49.06%~50.74%, 海拔低拉萨市约 84.99%~92.91%, 拉萨市地处青藏高原, 空气稀薄, 白天对地面长波辐射的吸收较少, 夜晚大气层结的保温效果较差, 温度较低[22]。图 7(b)给出了 2015~2017 年西南地区五个城市气压平均值, 平均气压重庆市 > 成都市 > 贵阳市 > 昆明市 > 拉萨市, 其多年平均气压值分别为 718.16 hPa、659.36 hPa、736.86 hPa、597.32 hPa、488.28 hPa, 结合各城市的海拔高度来看, 气压值的变化符合海拔愈高大气压力愈小的规律。2015~2017 年西南地区五个城市风速平均值如图 7(c)所示, 平均风速空间分布存在显著差异, 大致遵循自东向西递减的规律, 昆明市平均风速达 $4.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 显著大于其余城市。昆明市地处低纬度高海拔的云贵高原, 受地形狭管效应的影响, 气流加速流过峡谷, 同时冬夏季节西风带南北两支急流在高原上空穿过, 地面易于出现阵型偏西大风[23]。图 7(d)给出了 2015~2017 年西南地区五个城市相对湿度平均值, 西部和中东部平均相对湿度存在明显差异, 分别在 26% 以下和 64% 以上, 变化趋势和气温、气压相同。拉萨市相对湿度均显著低于西南地区其他城市, 这是由于拉萨市地处青藏高原, 属于高原山地气候, 降水量偏少, 水汽含量偏低。

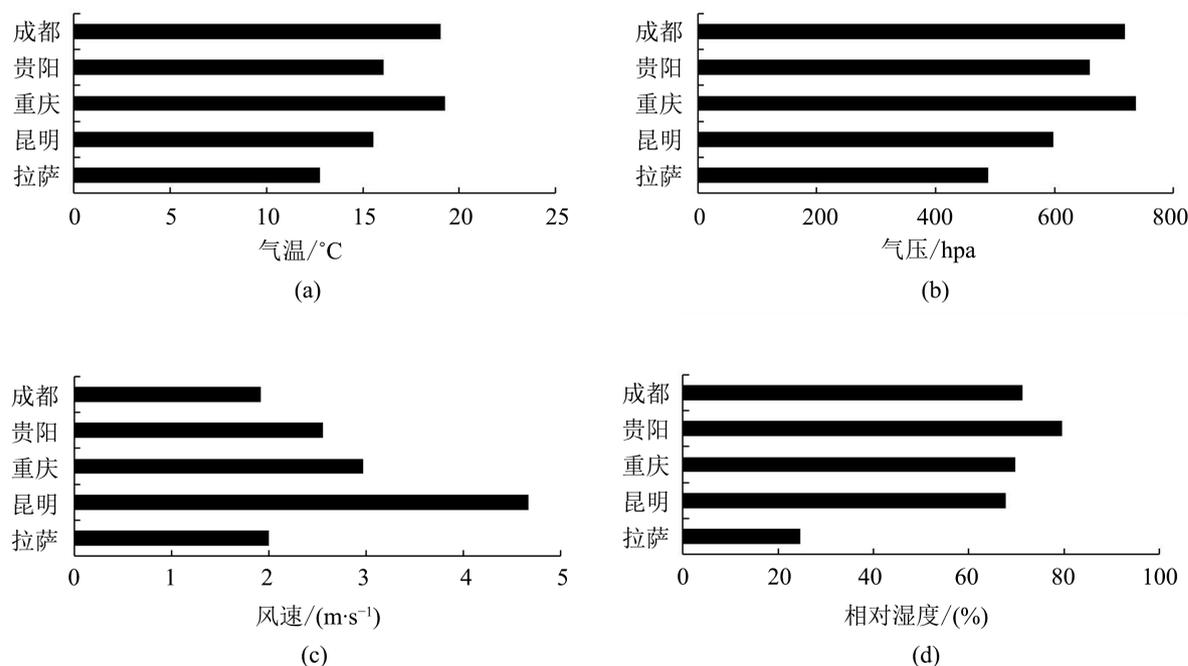


Figure 7. Average temperature, air pressure, wind speed, and relative humidity of five cities in Southwest China from 2015 to 2017

图 7. 2015~2017 年西南地区五个城市平均气温、气压、风速以及相对湿度平均值

3.3. 气象要素对西南地区 PM_{2.5} 浓度的影响分析

表 1 给出了西南地区五个城市 PM_{2.5} 浓度和气象要素的皮尔逊相关系数。西南地区 PM_{2.5} 浓度和气温均成显著负相关, 相关系数绝对值成都市 > 重庆市 > 贵阳市 > 昆明市 > 拉萨市。成都市、贵阳市、重庆市呈强负相关, 相关系数分别为 -0.781、-0.696、-0.698, 昆明市、拉萨市呈中等负相关, 相关系数为 -0.558、-0.511。气温升高, 空气中颗粒物的运动剧烈, 大气对流运动加剧, 有利于 PM_{2.5} 颗粒的稀释和扩散[24]。

成都市 $PM_{2.5}$ 浓度与气压呈强正相关, 重庆市呈强负相关, 昆明市呈中等负相关, 相关系数分别为 0.696、0.623、0.412, 其余城市相关性不显著。当地面受到高压控制时, 高压中心气流辐合下沉, 阻碍 $PM_{2.5}$ 颗粒物的向上扩散; 当地面受到低压控制时, 气流向低压中心补充, 辐合, 必然产生上升的气流, 有利于 $PM_{2.5}$ 颗粒物的向上扩散, 使得 $PM_{2.5}$ 浓度降低[25]。

昆明市 $PM_{2.5}$ 浓度与风速呈中等负相关, 成都市呈弱负相关, 相关系数分别为-0.427、-0.351, 其余城市相关性不显著, 结合图 7(c)可知, 昆明市风速显著大于其余城市, 风速增大有利于 $PM_{2.5}$ 颗粒物的扩散, 风速较小时, 由于西南地区山地环绕, 空气不易流通, $PM_{2.5}$ 颗粒物易于积聚于此, 加剧 $PM_{2.5}$ 污染; 风速超过某一阈值时, $PM_{2.5}$ 颗粒物得以被稀释扩散[26]。同时, 风速增大污染物输送速率加快, 稀释速度越快, 大气的自我调节能力更高[25]。

拉萨市 $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度呈中等负相关, 贵阳市呈弱负相关, 相关系数分别为-0.571、-0.338, 其余城市均未通过 0.05 水平的显著性检验, 相关性不显著。 $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度呈负相关是由于 $PM_{2.5}$ 是吸湿性气溶胶粒子, 降水对其有稀释、沉降作用, 因此相对湿度增加, 空气中的水汽含量增大, $PM_{2.5}$ 颗粒被液滴吸附沉降到地面, 使得空气中的 $PM_{2.5}$ 浓度降低[27]。

总的来说, 小风, 低温, 较高的湿度, 高压, 适当的降水通常会使得 $PM_{2.5}$ 的浓度增加。再结合多数学者对污染物浓度影响因素的研究可知, $PM_{2.5}$ 浓度不仅受单一气象要素的影响, 其变化是多种气象要素共同影响的结果[13]-[18] [28] [29] (表 1)。

Table 1. Pearson correlation coefficient between $PM_{2.5}$ concentration and meteorological elements

表 1. $PM_{2.5}$ 浓度与气象要素的皮尔逊相关系数

城市/气象要素	气温	气压	风速	相对湿度
成都市	-0.781**	0.696**	-0.351*	-0.065
贵阳市	-0.696**	0.297	-0.037	-0.338*
重庆市	-0.698**	-0.623**	0.085	0.211
昆明市	-0.558**	-0.412**	-0.427**	-0.567
拉萨市	-0.511**	-0.028	-0.306	-0.571**

注 1: **, *分别代表 1%、5% 的显著性水平。

4. 结论

1) 相较于以往对单一城市污染物浓度与气象要素相关性分析的研究, 本文选取西南地区省会城市, 更为全面地分析了 2015~2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度、气象要素的时空分布特征以及其相关性。

2) 2015~2017 年 $PM_{2.5}$ 年平均浓度在 $63.84 \sim 73.93 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间内先增加后降低; 季节平均浓度呈冬季高夏季低的特征; 月平均浓度呈现减小 - 增加 - 减小 - 增加的位相变化; 西南地区年平均浓度空间分布由高到低依次为东部、西部、东南部, 分布形式较为稳定, 西藏自治区浓度略有波动, 2016 年增加至 $78.21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3) 2015~2017 年西南地区平均气温、气压、相对湿度空间变化规律大致相同, 均为重庆市 > 成都市 > 贵阳市 > 昆明市 > 拉萨市, 平均风速大致遵循自东向西递减的规律。

4) 西南地区不同城市 $PM_{2.5}$ 浓度和不同气象要素的相关性存在差异: 五个城市 $PM_{2.5}$ 浓度与气温均呈显著负相关; 成都市 $PM_{2.5}$ 浓度与气压呈强正相关, 重庆市、昆明市呈负相关; 昆明市、成都市 $PM_{2.5}$ 浓度与风速呈负相关; 拉萨市、贵阳市 $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度呈负相关。

基金项目

本文由四川省自然科学基金青年基金项目(2024NSFSC0777)、成都信息工程大学人才引进项目(376528)、四川省气象局高原气象研究所开放课题(IPM202201)以及一流本科专业 - 大气科学(2021YLZY09)资助。

参考文献

- [1] 黄琳, 刘迪, 蔡东杰, 等. 广州市多污染物联合暴露的健康效应评估研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(11): 5418-5426.
- [2] 段艺珠, 黄志军, 舒志浩, 等. PM_{2.5}污染与心血管系统损害[J]. 中华心血管病杂志, 2016, 44(2): 179-182.
- [3] 曾贤刚, 阮芳芳. 中国 PM_{2.5}污染健康效应的国民经济影响分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 3228-3238
- [4] 王一楷, 张明锋, 陈志彪, 等. 厦门市冬季 PM_{2.5}污染情境识别及其与气象条件的关系[J]. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1758-1765.
- [5] 张辉, 巫楚, 张敬伟, 等. 河源市空气质量首要污染物特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(1): 40-47.
- [6] 花瑞阳, 李蔚, 叶成志, 等. 2016~2019年长沙市 O₃浓度变化特征及其影响因子分析[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(2): 44-52.
- [7] 栾兆鹏, 卢慧超, 李恬, 等. 降水和风对泰安地区 PM_{2.5}浓度的影响及区域传输研究[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(3): 33-39.
- [8] 毛卓成, 许建明, 杨丹丹, 等. 上海地区 PM_{2.5}-O₃复合污染特征及气象成因分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2730-2738.
- [9] 姚青, 蔡子颖, 刘敬乐, 等. 气象条件对 2009~2018 年天津地区 PM_{2.5}质量浓度的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 65-75.
- [10] 尹承美, 何建军, 于丽娟, 等. 多尺度气象条件对济南 PM_{2.5}污染的影响[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 1120-1128.
- [11] 熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1374-1391.
- [12] 国政, 聂华, 臧润国, 等. 西南地区天然林保护工程生态效益评价[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 65-72.
- [13] 郭利, 张艳昆, 刘树华, 等. 北京地区 PM₁₀质量浓度与边界层气象要素相关性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(4): 607-612.
- [14] 彭亮, 郑淑文, 何英, 等. 基于 MODIS 的积雪时空变化与 CMADS 气象因子相关性研究——以塔什库尔干河流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 53-62.
- [15] 郭亮, 郭子雪, 贾洪涛, 等. 基于皮尔逊相关系数与 SVM 的居民窃电识别[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2023, 43(4): 357-363.
- [16] 李瑞. 成都市 PM_{2.5}、PM₁₀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] 马德栗, 鞠英芹, 史瑞琴, 等. 天门市大气污染物特征及其与气象要素关系[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(S2): 1-6.
- [18] 杨文涛, 譙鹏, 刘贤赵, 等. 2011~2017 年中国 PM_{2.5}多尺度时空分异特征分析[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 236-5244.
- [19] 杨军, 李楠, 邓元博, 等. 2016~2017 年长白山池北区 PM_{2.5}、PM₁₀特征及其与气象因子的关系分析[J]. 南方农业, 2020, 14(26): 185-186, 196.
- [20] 王佳佳, 夏晓圣, 程先富, 等. 合肥市 PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1413-14, 21.
- [21] 叶如辉, 肖天贵, 谢志轩, 等. 新都区冬季空气污染扩散与气象要素相关性研究[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(2): 104-112, 136.
- [22] 卫大恒. 青藏高原典型气候条件对我区初中化学实验的影响及改进方法[J]. 西藏教育, 2014(6): 17-18.
- [23] 杨明. 狭管效应的分析与应用[J]. 地理教学, 2014(18): 43-44.

- [24] 郑胡飞, 曾勇, 张光红. 遵义市PM₁₀和PM_{2.5}污染水平时间分布及其与气象条件的关系研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 149-152.
- [25] 张朝能, 王梦华, 胡振丹, 等. 昆明市 PM_{2.5} 浓度时空变化特征及其与气象条件的关系[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2016, 38(1): 90-98.
- [26] 陈雅琼, 宋田, 宋冬洋, 等. 成都市冬季 PM_{2.5} 污染特征及溯源分析[J]. 河南科技, 2020, 39(7): 151-153.
- [27] 刘周华, 王鹏. 2016 年含山县 PM_{2.5} 的污染特征及与气象要素的相关性分析[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(24): 136-138, 157.
- [28] 任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 重庆主城区大气 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1387-1394.
- [29] 张彩艳, 吴建会, 张普, 等. 成都市冬季大气颗粒物组成特征及来源变化趋势[J]. 环境科学研究, 2014, 27(7): 782-789.