

利用遥感数据估算四川省PM_{2.5}的4种模型对比

吴磊, 杜宁*, 王莉, 张春亢, 敖道

贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳
Email: 463874845@qq.com, *ndu1@gzu.edu.cn

收稿日期: 2020年11月2日; 录用日期: 2020年11月19日; 发布日期: 2020年11月26日

摘要

基于2015年四川省PM_{2.5}地面监测数据、MODIS 3 km气溶胶光学厚度(AOD)数据和地面气象站点数据, 采用简单线性回归模型、多元线性回归模型、BP神经网络模型、线性混合模型预测近地面PM_{2.5}浓度, 并利用地面监测站点数据评估模型的拟合结果。同时利用GIS分析技术, 得到四川省2015年空间连续的PM_{2.5}年均、季均浓度分布。结果表明: (1) 利用线性混合模型反演的PM_{2.5}浓度精度最高、效果最好, 其可以解释四川省PM_{2.5}浓度75.77%的变异。(2) 线性混合模型预测的PM_{2.5}浓度与地面实测PM_{2.5}浓度在时空变化趋势上基本一致, 即东高西低, 其中成都平原经济区、川南经济区的PM_{2.5}浓度最大, 其次为川东北经济区, 最低的为攀西经济区和川西北经济区。PM_{2.5}浓度大小关系为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季。

关键词

MODIS 3 km AOD, 浓度估算, BP神经网络, 线性混合模型, 时空变化

Comparative Analysis of Four Models for Estimating PM_{2.5} in Sichuan Province Using Remote Sensing Data

Lei Wu, Ning Du*, Li Wang, Chunkang Zhang, Xiao Ao

College of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou
Email: 463874845@qq.com, *ndu1@gzu.edu.cn

*通讯作者。

文章引用: 吴磊, 杜宁, 王莉, 张春亢, 敖道. 利用遥感数据估算四川省PM_{2.5}的4种模型对比[J]. 应用数学进展, 2020, 9(11): 2063-2074. DOI: 10.12677/aam.2020.911239

Abstract

Based on the PM_{2.5} ground monitoring data of Sichuan Province, MODIS 3 km aerosol optical depth (AOD) data and surface meteorological station data in 2015, the near surface PM_{2.5} concentration was predicted by simple linear regression model, multiple linear regression model, BP neural network model and linear mixed model, and the fitting results of the model were evaluated by using the ground monitoring station data. At the same time, using GIS analysis technology, the spatial continuous annual and seasonal average concentration distribution of PM_{2.5} in Sichuan Province in 2015 was obtained. The results show that: (1) PM_{2.5} concentration retrieved by linear mixed model has the highest accuracy and the best effect, which can explain 75.77% variation of PM_{2.5} concentration in Sichuan Province. (2) The PM_{2.5} concentration predicted by the linear mixed model is basically consistent with the measured PM_{2.5} concentration on the ground, which is higher in the East and lower in the West. The PM_{2.5} concentration in Chengdu Plain Economic Zone and southern Sichuan Economic Zone is the largest, followed by Northeast Sichuan Economic Zone, and the lowest is Panxi Economic Zone and Northwest Sichuan Economic Zone. The relationship of PM_{2.5} concentration was as follows: winter > spring > autumn > summer.

Keywords

MODIS 3 km AOD, Concentration Estimation, BP Neural Network, Linear Mixed Model, Temporal and Spatial Change

Copyright © 2020 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

随着工业和城镇化的快速发展,区域大气污染日益严重,城市空气质量越来越受到人们的关注[1]。其中细颗粒物(PM_{2.5},空气动力学直径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$)已经被大量流行病学研究证明和心血管、呼吸疾病等息息相关[2]。目前利用地面PM_{2.5}监测站点对PM_{2.5}浓度进行监测是获得PM_{2.5}浓度信息的主要方法,然而地面监测站点数量有限且主要分布在经济较发达的地区,许多郊区特别是中西部地区的郊区没有站点分布,难以对大区域的PM_{2.5}浓度获得准确的观测信息,因此卫星遥感监测地面PM_{2.5}浓度具有十分重要的意义[3][4][5][6]。

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)作为大气气溶胶重要的参数,是表征大气浑浊度或大气气溶胶含量的重要物理量,卫星遥感是目前唯一可提供区域和全球尺度气溶胶特性的探测手段,为大范围遥感监测气溶胶提供了可能[7]。已经有研究表明:卫星遥感反演的AOD与地面监测站观测的PM_{2.5}浓度之间有较强的相关性[8][9][10][11]。在研究卫星遥感反演PM_{2.5}浓度时,大多数学者主要以气溶胶光学厚度(AOD)与气象数据为自变量,通过建立线性回归模型或非线性回归模型来预测PM_{2.5}浓度。王旭等[12]以京津冀为研究区域,利用MODIS气溶胶光学产品,构建了AOD与PM_{2.5}浓度之间的线性回归模型;付宏臣等[13]利用地理加权回归模型预测了新疆地区2016年PM_{2.5}和PM₁₀浓度;孙成等[14]利用MODISAOD产品和气象等数据通过线性混合模型预测的河北省2013~2014年PM_{2.5}浓度;夏晓圣等[15]利用随机森林模型分析了影响PM_{2.5}浓度的因素;孙梦竹等[16]利用BP神经网络模型预测了中国区域

PM_{2.5}污染时空分布;刘林钰等[17]利用 Himawari 气溶胶光学厚度(AOD)数据和气象数据运用深层神经网络(DNN)模型预测了华东地区 PM_{2.5} 质量浓度。

目前利用卫星遥感数据估算近地面 PM_{2.5} 质量浓度的研究主要集中在中东部地区和京津冀地区,对于西南地区相关的研究甚少,且研究主要的遥感数据源为MODIS 10 km AOD 产品。已有学者研究表明MODIS 3 km AOD 产品与 AERONET 地基观测的 AOD 相关性比 MODIS 10 km AOD 产品的相关性要高[18]。

本文运用 MODIS 3 km AOD 产品、气象数据和地面监测站点获取的 PM_{2.5} 浓度数据建立起适合四川省遥感监测 PM_{2.5} 浓度的简单线性回归模型、多元线性回归模型、线性混合模型、BP 神经网络模型用于估算四川省 2015 年 PM_{2.5} 浓度,并用 PM_{2.5} 地面监测站点数据拟合模型的预测精度,通过对比 4 种模型反演的 PM_{2.5} 浓度效果确定最适合遥感监测四川省 PM_{2.5} 浓度的最佳模型,从而为大气污染治理提供科学依据。

2. 研究区概况和数据来源

2.1. 研究区概况

四川省位于中国西南部,地处长江中上游,位于我国大陆地势三大阶梯中的第一级和第二级,全省地貌东西差异大,地形复杂多样,高差悬殊,西高东低的特点明显,介于东经 92°21'~108°12'和北纬 26°03'~34°19'之间。东连渝,南邻滇、黔,西接西藏,北界青、甘、陕三省。全省气候类型复杂,区域差异较为显著。东部盆地主要为亚热带湿润气候,西部为高原气候区。东部四川盆地是我国四大盆地之一,其北部为秦岭,东部为米仓山、大巴山,南部为大娄山,西北部为龙门山、邛崃山等山地环绕,阻断了相关气流扰动平原,不利用大气污染物的扩散,且该区域气候温暖湿润,加重了平原地区的污染程度,这导致了四川省是继京津冀、长三角、珠三角地区之后我国第四大灰霾地区[19]。

2.2. 基础数据

2.2.1. 遥感数据

本文使用的遥感数据来源于美国 NASA 网站(<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)公开的 MODIS Aqua Level 2 级气溶胶产品——MYD04_3K,其空间分辨率为 3 km,时间分辨率为 1 d,版本为 C006。下载四川省 2015 年 1 月 1 日~12 月 31 日时间段内的 MYD04_3K AOD 产品。通过利用 ENVI 的 MCTK 插件对下载的数据进行投影转换、边界剪切等预处理,提取出四川省波段为 0.55 μm 的 AOD 值用于本文研究。

2.2.2. 气象数据

气象数据来源中国气象网(<http://data.cma.cn>),获取四川省 2015 年 1 月 1 日~12 月 31 日时间段内各气象站点的风速、温度和相对湿度的日均值。

2.2.3. PM_{2.5} 数据

四川省 2015 年地面 PM_{2.5} 浓度数据来源于全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>)发布的 94 个监测站点的每小时空气质量数据。图 1 为四川省 94 个监测站点的位置分布图。

3. 模型构建与验证

3.1. 数据处理与匹配

由于各种数据来源不同,需将 AOD、气象数据、地面 PM_{2.5} 数据做如下处理以便后续建模。MODIS

Aqua 卫星的过境时间约为下午 13:30,选取 PM_{2.5} 地面监测站点每天下午 13:00~14:00 的平均 PM_{2.5} 浓度。在 Arcgis10.3 中以 MODIS AOD 数据的分辨率为准,创建四川省范围内 3 km × 3 km 的格网。根据地面 PM_{2.5} 监测站点的位置,分别提取各站点对应格网的非空白 AOD 值,如果有多个地面监测站点位于同一个格网内,则对每个站点的 PM_{2.5} 浓度取平均值再与 AOD 值进行匹配。由于获取的气象数据是站点数据为了能与所有地面 PM_{2.5} 监测站点进行空间匹配,需要对气象数据进行插值处理,以获取研究区域 3 km × 3 km 分辨率的面状数据,插值方法为普通克里金插值。

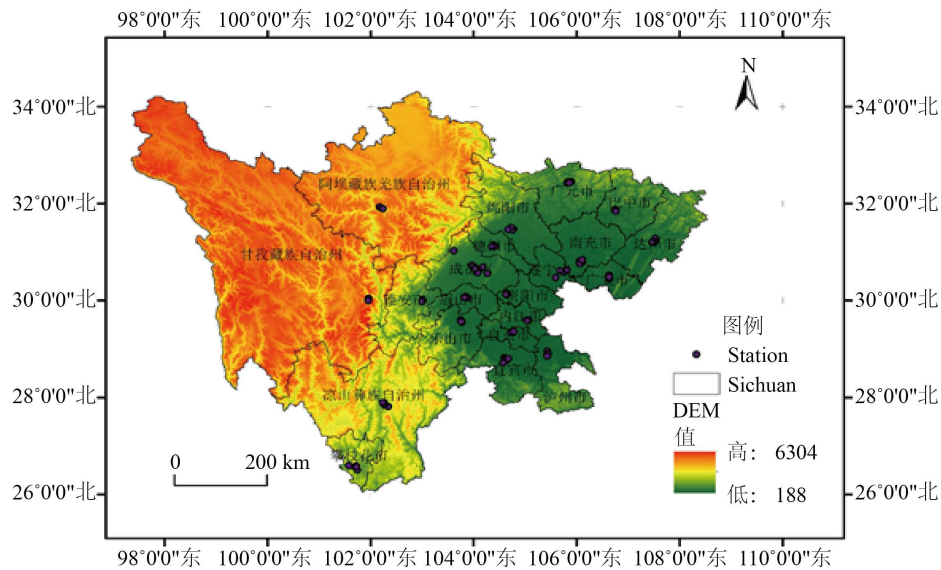


Figure 1. Distribution of PM_{2.5} ground monitoring stations in Sichuan Province
 图 1. 四川省地面 PM_{2.5} 监测站点分布图

3.2. 模型方法

为了建立起适用于四川省卫星遥感估计近地面 PM_{2.5} 浓度的统计回归模型,本文将从以下几个模型来预测近地面 PM_{2.5} 浓度。

由于 AOD 值与地面监测站点的 PM_{2.5} 浓度具有较好的相关性,因此使用 AOD 值和地面监测站点 PM_{2.5} 浓度值建立简单线性模型。该模型的数学表达式如公式(1)所示:

$$PM_{2.5} = \alpha + \beta AOD \tag{1}$$

式中, α 和 β 分别为简单线性回归模型的截距和斜率。

根据相关的研究表现: AOD 与 PM_{2.5} 的关系受风速、湿度、温度等气象因子的影响, 本文将建立多元线性回归模型来预测地面 PM_{2.5} 浓度, 其数学表达如公式(2)所示:

$$PM_{2.5} = \alpha AOD + bWIN + cRHU + dTEM + e \tag{2}$$

式中: PM_{2.5} 代表平均 PM_{2.5} 浓度值; WIN 为风速值; RHU 为相对湿度值; TEM 为温度值; e 为残差值; α 、b、c、d 为相应的系数, 其残差值和系数由最小二乘法(OLS)确定。

BP 神经网络是误差反向传播神经网络的简称, 它由一个输入层, 一个或多个隐含层和一个输出层构成, 每一次由一定数量的神经元构成。它是一个高度复杂的非线性动力学习系统, 适合处理多因素、多条件、不精确和模糊的问题[20]。

线性混合模型包含了固定效应和随机效应, 其中固定效应表示影响因子对 PM_{2.5} 的平均影响状态, 而

随机效应表示 $PM_{2.5}$ 与 AOD 及其他影响因子之间的日差异性，以随机截距和随机斜率的形式表示，本文建立的线性混合模型如公式(3)：

$$PM_{2.5ij} = (a + \mu_j) + (\beta_1 + b_j)AOD_{ij} + (\beta_2 + c_j)WIN_{ij} + (\beta_3 + d_j)RHU_{ij} + (\beta_4 + e_j)TEM_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

式中： $PM_{2.5ij}$ 为平均浓度值； a 和 μ_j 为固定效应和随机效应的截距； AOD_{ij} 表示第 i 个站点第 j 天的气溶胶光学厚度值，对应的 β_1 和 b_j 分别表示 AOD 的固定效应和随机效应的斜率； WIN_{ij} 表示第 i 个站点第 j 天的风速值，对应的 β_2 和 c_j 分别表示 WIN_{ij} 的固定效应和随机效应的斜率； RHU_{ij} 表示第 i 个站点第 j 天的相对湿度值，对应的 β_3 和 d_j 分别表示 RHU_{ij} 的固定效应和随机效应的斜率； TEM_{ij} 表示第 i 个站点第 j 天的气温值，对应的 β_4 和 e_j 分别表示 TEM 的固定效应和随机效应的斜率； ε_{ij} 第 i 个站点第 j 天的最大误差项，其中线性混合模型的相关参数通过 R-language 软件计算得到。

3.3. 模型精度验证

本文通过计算地面监测站点实测的 $PM_{2.5}$ 浓度值与模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度值之间的 R^2 (决定系数)、 $RMSE$ (均方根误差)对模型精度进行验证。决定系数(R^2)一般用于回归模型中评估预测值与真实值之间的符合程度，一般地， R^2 越接近 1，说明回归分析中自变量对因变量的解释越好。其计算公式如下(4)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4)$$

式中， n 为数据总量 i 为每个数据的编号； \hat{y}_i 为预测值， \bar{y}_i 为原始数据均值， w_i 为权重。

均方根误差($RMSE$)是预测值与真实值偏差的平方与观测参数比值的平方，用来衡量预测值与真实值之间的偏差。其值越小，预测值就越接近真实值，精度就越高，其计算公式如下(5)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs,i} - y_{model,i})^2}{n}} \quad (5)$$

式中， $y_{obs,i}$ 为第 i 个监测格网 $PM_{2.5}$ 的真实值，单位为： $\mu g/m^3$ ； $y_{model,i}$ 为第 i 个监测网格的模型预测值，单位为 $\mu g/m^3$ ； n 为参与建模的总个数。

4. 结果与分析

4.1. 统计数据分析

通过提取四川省 94 个地面监测站点对应的 AOD、风速、相对湿度、气温和 $PM_{2.5}$ 浓度，最终得到四川省 2015 年 145 天的有效数据。各相关参数的描述如表 1。由表 1 可知：2015 年四川省全年 94 个站点的 AOD 变化范围为 0.003~1.521，年均值为 0.500，标准差为 0.314； $PM_{2.5}$ 浓度范围为 1.500~232.5，年均值为 47.771，标准差为 35.238。

皮尔逊相关系数 r 描述的是两个变量间的相关性强弱， r 的绝对值越大，表明相关性越强。为了分析各变量之间的相关性，本文使用 SPSS 23 统计分析软件对各建模参数进行了 Pearson 相关性分析(见表 2)，由表 2 可知除了风和相对湿度的相关系数 r 为-0.545 以外，其他变量之间的 $|r| < 0.2$ ，即各变量之间相关性极弱或无相关性，这有效避免了模型多重共线问题。

Table 1. Descriptive statistics of parameters in modeling data
表 1. 建模数据各参数的描述性统计分析

项目	最大值	最小值	中值	平均值	标准差
PM _{2.5} /μg/m ³	232.500	1.500	39.500	47.771	35.238
AOD	1.521	0.003	0.440	0.500	0.314
温度/°C	324.481	-16.178	204.790	189.150	72.045
相对湿度/%	90.115	28.103	67.620	65.983	9.962
风速/m/s	2.827	0.741	1.568	1.5711	0.350

Table 2. The Pearson correlation analysis of model independent variables
表 2. 模型自变量的 Pearson 相关性分析

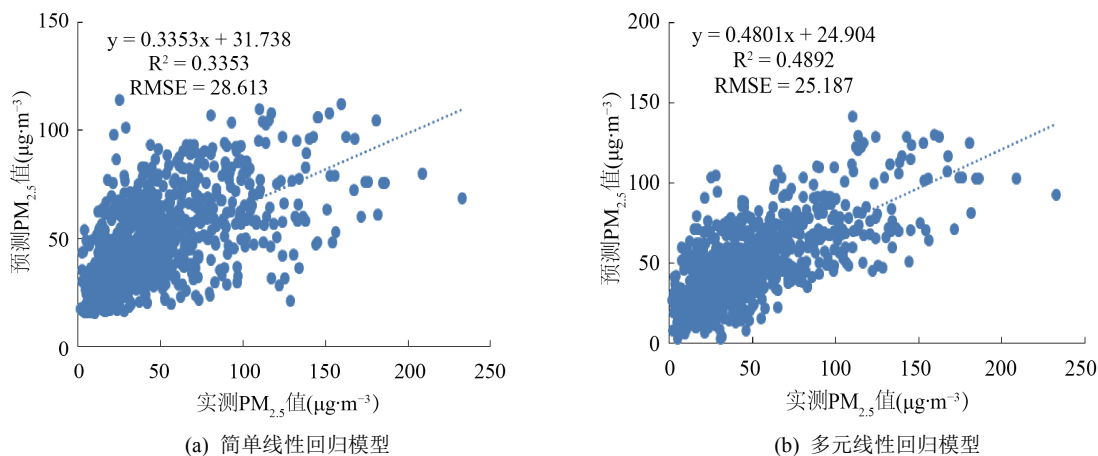
参数	AOD	相对湿度	温度	风速
AOD	1	0.152	0.075	-0.088
相对湿度		1	-0.102	-0.545
温度			1	0.113
风速				1

4.2. 模型回归分析

将 2015 年四川省处理和匹配好的数据分别用于 4 个模型并进行回归分析，结果如图 2 所示。

由图 2 可知：简单线性回归模型可以解释 PM_{2.5} 浓度 33.53% 的变异 ($R^2 = 0.3353$)，RMSE 为 28.613 μg/m³；多元线性回归模型可以解释 PM_{2.5} 浓度质量 48.92% 的变异 ($R^2 = 0.4892$)，RMSE 为 25.187 μg/m³；说明在加入气象数据以后可以提高 PM_{2.5} 的预测精度，BP 神经网络模型可以解释 PM_{2.5} 浓度 60.16% 的变异 ($R^2 = 0.6016$)，RMSE 为 24.109 μg/m³；线性混合模型可以解释 PM_{2.5} 浓度 75.77% 的变异 ($R^2 = 0.7577$)，RMSE 为 17.580 μg/m³。

从斜率与截距方面进行分析可知：4 种模型的斜率小于 1，截距大于 0，说明各个模型都存在一定程度的高估和低估情况。通过线性混合模型和另外的三种模型进行比较发现：线性混合模型的斜率相比其他三种模型分别提高了 114.5%、49.82%、24.92%，截距分别降低了 57.99%、46.46%、32.98%。



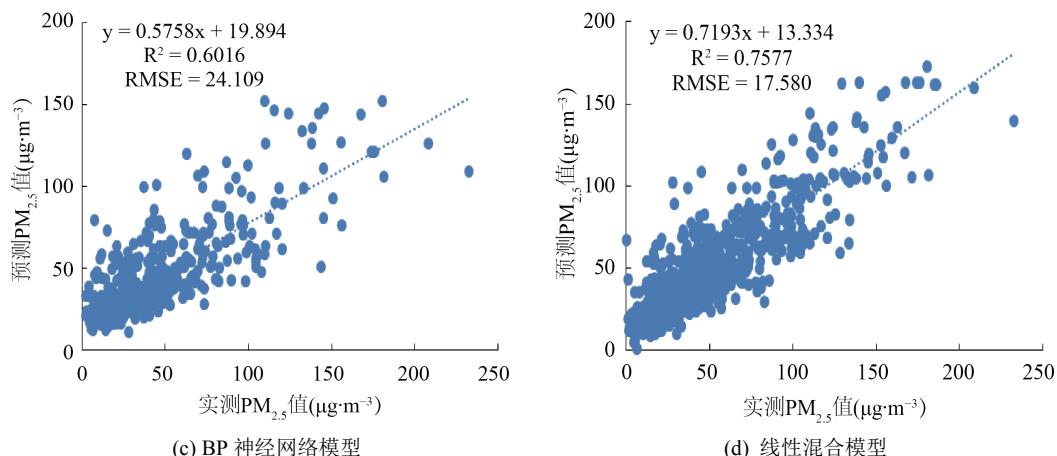


Figure 2. The comparison of model inversion results
图 2. 模型反演结果对比

为了分析 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化规律, 进一步将数据划分为春夏秋冬四个季节, 本文按 3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季、12~2 月为冬季进行划分。各个模型预测的 2015 年四季平均 $PM_{2.5}$ 浓度见表 3。由表 3 可知地面监测的 $PM_{2.5}$ 浓度四季的大小关系为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, 其大小关系和多元线性回归模型和线性混合模型预测的大小关系一致; 而简单线性回归模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度的大小关系为: 春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季; BP 神经网络模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度的大小关系为: 冬季 > 夏季 > 秋季 > 春季。

Table 3. Statistical results of $PM_{2.5}$ concentration predicted by the four models in each quarter
表 3.4 种模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度季均统计情况

模型	$PM_{2.5}$ 浓度($\mu g \cdot m^{-3}$)				
	春季	夏季	秋季	冬季	年均
简单线性回归模型	57.62	38.79	38.07	49.43	47.25
多元线性回归模型	51.55	28.73	42.71	69.28	47.83
BP 神经网络模型	47.22	50.75	48.13	52.39	49.42
线性混合模型	49.46	27.04	39.10	75.65	47.94
地面实测 $PM_{2.5}$	49.68	25.64	38.39	77.05	47.25

各模型预测的四季平均 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势见图 3, 由图 3 可知: 线性混合模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度季均值变化趋势和地面实测的 $PM_{2.5}$ 浓度基本一致; BP 神经网络和简单线性回归模型预测的夏季和冬季 $PM_{2.5}$ 浓度和地面监测站预测的 $PM_{2.5}$ 浓度相差较大。结合各个模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度的 R^2 和 $RMSE$ 可知: 线性混合模型估算四川省 $PM_{2.5}$ 质量浓度精最高、效果最好。

4.3. $PM_{2.5}$ 时空变化特征分析

由 4.2 章节可: 线性混合模型估算四川省 $PM_{2.5}$ 质量浓度精最高、效果最好, 本文将采用线性混合模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度进行时空变化分析。为了准确分析四川省 2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化, 本文将从成都平原经济区、川南经济区、川东北经济区、攀西经济区、川西北经济区的时空变化及影响因子进行分析, 具体划分见表 4 所示。

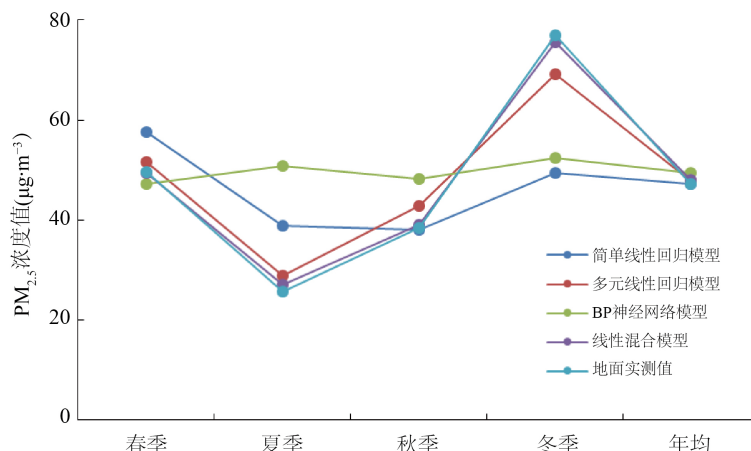


Figure 3. The seasonal average variation trend of PM_{2.5} concentration predicted by each model

图 3. 各模型预测的PM_{2.5}浓度季均值变化趋势

Table 4. Sichuan province economic zone division table

表 4. 四川省经济区划分表

经济区	包括的州、市
成都平原经济区	成都市、绵阳市、德阳市、雅安市、眉山市、乐山市、资阳市、遂宁市
川东北经济区	广元市、巴中市、南充市、达州市、广安市
川南经济区	内江市、自贡市、宜宾市、泸州市
攀西经济区	攀枝花市、凉山彝族自治州
川西北经济区	阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州

由图 4(a)和图 4(b)可知, 2015 年四川省全年平均 PM_{2.5} 浓度整体呈现东高西低的空间分布趋势, 其高值主要出现在成都平原经济区、川东北经济区和川南经济区, 其主要原因是此区域的工业发达、汽车尾气和人类生活排放的 PM_{2.5} 浓度高, 加之成都平原经济区和川东北经济区四面环山, 不利于 PM_{2.5} 的扩散。川南经济区地处西南涡旋的中心地带, 污染物累积, 不易扩散[21]。雅安属于成都平原经济区, 其有“华西雨屏”之称, 虽然与成都市、眉山和乐山相邻, 但年平均 PM_{2.5} 浓度却很低, 这主要与雅安年均降雨量有关[22], 较高的降雨量利于 PM_{2.5} 浓度的稀释。攀西经济区 PM_{2.5} 浓度次之, 虽然攀枝花以钢铁著称, 但年均 PM_{2.5} 浓度却低, 主要是因为该区域海拔高, 受南亚季风的影响, PM_{2.5} 浓度容易扩散。攀西经济区的凉山彝族自治州和川东北经济区的 PM_{2.5} 浓度最低, 其主要原因是该地区主要发展旅游、纺织食品等产业, 大型电厂及污染企业分布很少[23]。

2015 年四川省相对湿度、温度、风速的空间分布图分别见图 5~图 7, 结合相对湿度、温度、风速对 2015 年四川省四个季节的 PM_{2.5} 浓度进行时空分布分析。由图 4(c)可知春季 PM_{2.5} 浓度主要集中在成都平原经济区的成都、绵阳和德阳, 其主要原因是春季该地区的相对湿度较高、温度较低、风速小和降雨量小, 这不利于 PM_{2.5} 的扩散和稀释。

由图 4(d)可知成都平原经济区、川东北经济区、川南经济区夏季的 PM_{2.5} 浓度均值是四个季节中同区域最低的季节。通过对比图 5(c)和图 5(b)可知夏季成都平原经济区、川东北经济区和川南经济区的相对湿度比春季同区域的相对湿度高, 但 PM_{2.5} 浓度却没有春季高, 主要原因是因为夏季的温度、风速都要比春季高, 这有利于 PM_{2.5} 的扩散, 其次夏季 PM_{2.5} 高值区的降雨量占同年降雨量的 70%~75%, 这有利于 PM_{2.5} 的稀释。

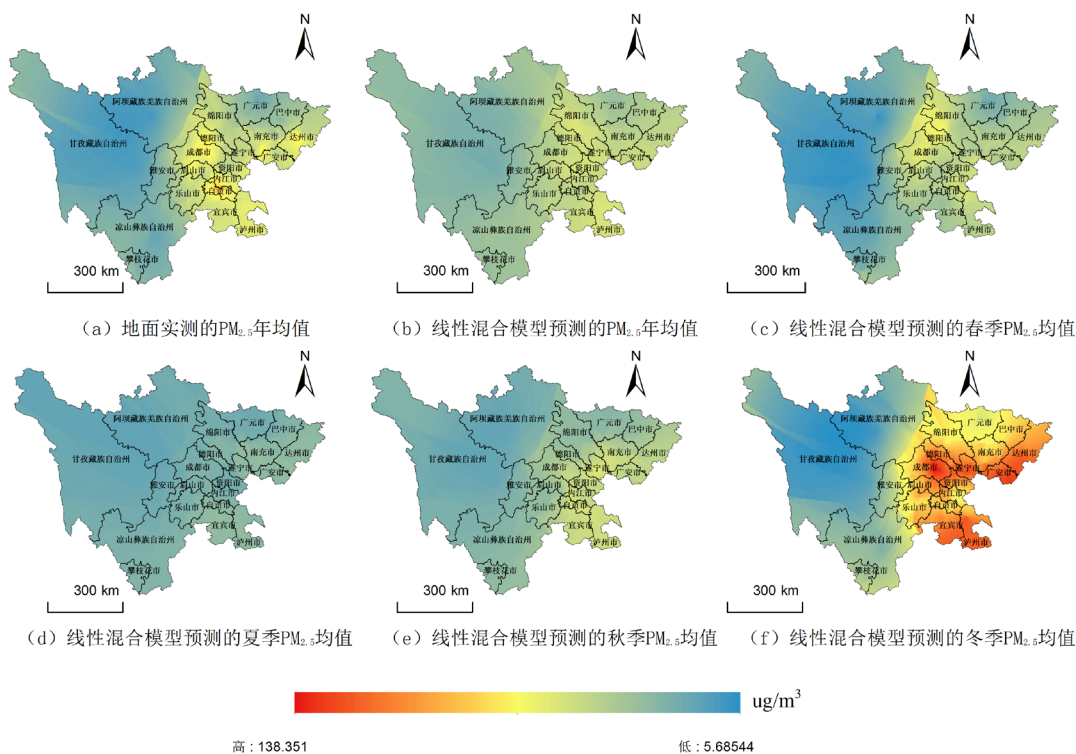


Figure 4. The distribution map of $PM_{2.5}$ quality concentration in Sichuan Province in 2015

图 4. 2015 年四川省 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布图

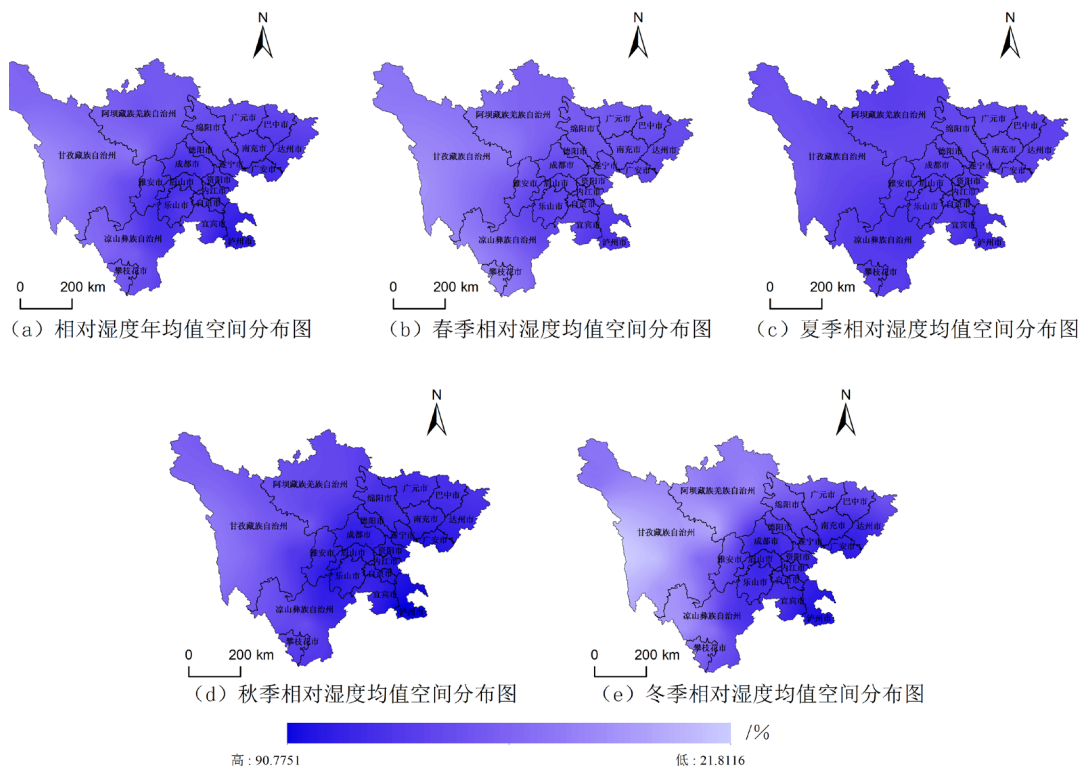


Figure 5. The spatial distribution map of relative humidity in 2015

图 5. 2015 年相对湿度空间分布图

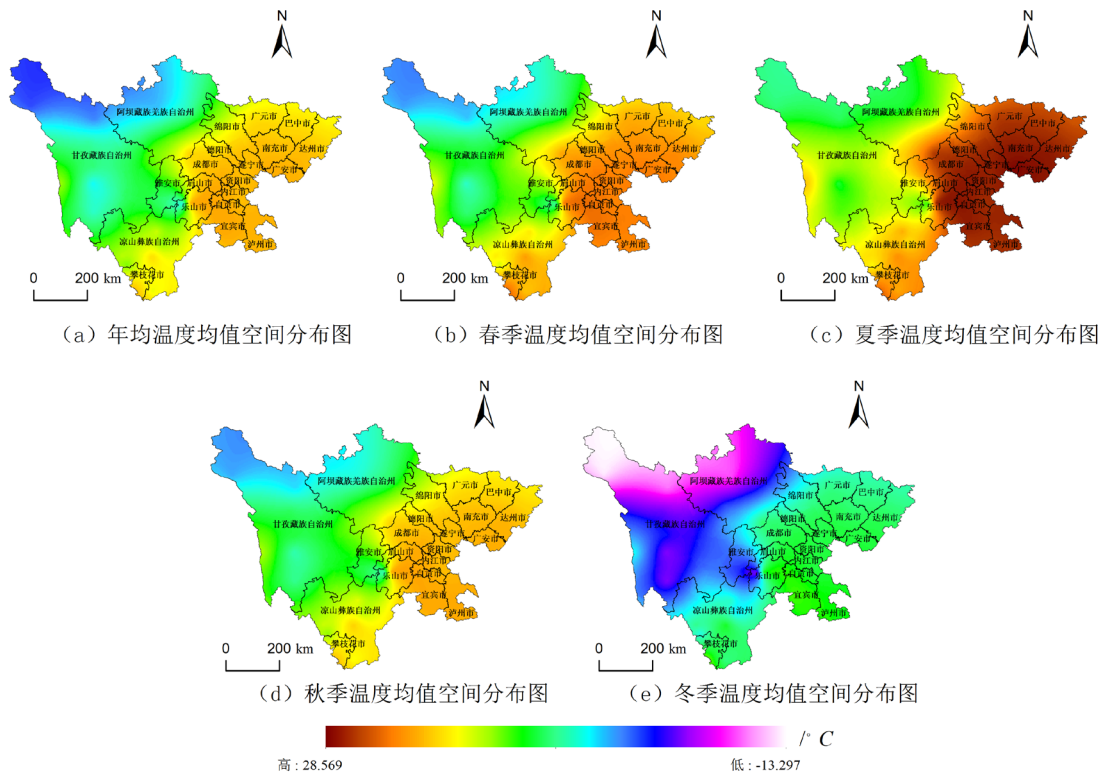


Figure 6. The temperature spatial distribution map in 2015

图 6. 2015 年温度空间分布图

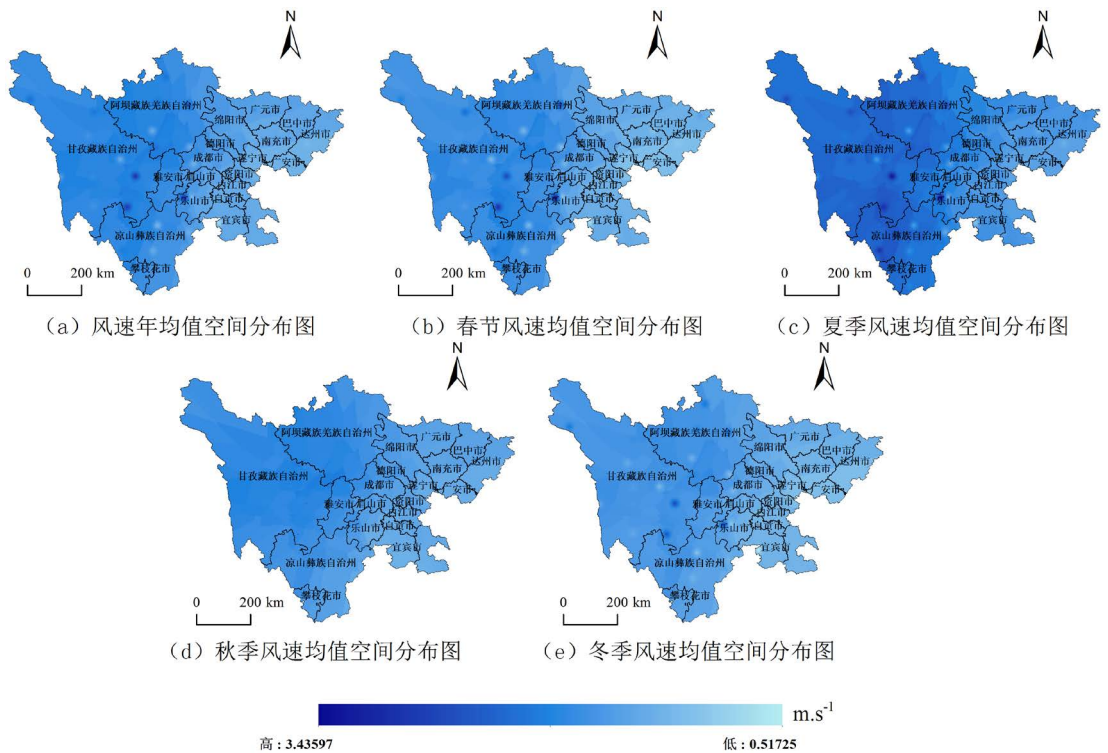


Figure 7. The spatial distribution map of wind speed in 2015

图 7. 2015 年风速空间分布图

由图 4(e)可知秋季 $PM_{2.5}$ 高值区主要集中在成都经济区的资阳和遂宁、川南经济区的内江、自贡、宜宾和泸州以及川东北经济区的南充, 由图 5(d)和图 7(d)可知此区域的相对湿度大、风速小, $PM_{2.5}$ 浓度扩散速率小, 导致了该区域的 $PM_{2.5}$ 浓度较大。

由图 4(f)可知冬季是四个季节中 $PM_{2.5}$ 浓度最高的季节, $PM_{2.5}$ 浓度高值主要分布在成都平原经济区、川东北经济区和川南经济区, 主要原因有: 冬季 $PM_{2.5}$ 高值区域的降雨量占年均降雨量的 3%~5%, 降雨量低不利于 $PM_{2.5}$ 的稀释; 相对湿度高(图 5(e))、温度低(图 6(e))、风速小(图 7(e)), 不利于 $PM_{2.5}$ 的扩散; 其次受北方供暖期的影响也增加了该区域 $PM_{2.5}$ 的浓度。

5. 结论

本文利用 MODIS 3 km AOD、气象数据和地面监测实测的 $PM_{2.5}$ 数据, 构建了 4 种模型来预测 $PM_{2.5}$ 浓度, 并利用最佳预测模型进行 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化分析, 其主要结论如下:

(1) 通过计算 4 种模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度与地面实测的 $PM_{2.5}$ 浓度的 R^2 与 $RMSE$, 最终确定了线性混合模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度精度最高、效果最好, 其全数据集 $R^2 = 0.7577$, $RMSE = 17.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(2) 利用地面预测的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值和线性混合模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值分别进行空间插值生成 2015 年四川省年均 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布图, 其空间分布格局基本一致, 即 $PM_{2.5}$ 浓度高值区主要分布在成都平原经济区、川东北经济区和川南经济区。通过对线性混合模型预测的 $PM_{2.5}$ 浓度值按季节进行空间分析发现: 2015 年四川省 $PM_{2.5}$ 浓度均值在冬季最高, 在夏季 $PM_{2.5}$ 浓度均值最低。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(41701464); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017] 1026)。

参考文献

- [1] 罗佳, 周小玲, 田育新, 等. 长沙市不同污染程度区域桂花和香樟叶表面 $PM_{2.5}$ 吸附量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 503-510.
- [2] Ma, Z.W., Hu, X.F., Sayer, A.M., et al. (2016) Satellite-Based Spatiotemporal Trends in $PM_{2.5}$ Concentrations: China, 2004-2013. *Environmental Health Perspectives*, **124**, 184-192. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409481>
- [3] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2005(S1): 177-186.
- [4] 陈辉, 厉青, 李莹, 等. 京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 时空变化特征遥感监测分析[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 33-43.
- [5] 徐建辉, 江洪. 长江三角洲 $PM_{2.5}$ 质量浓度遥感估算与时空分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3119-3127.
- [6] Lee, M., Kloog, I., Chudnovsky, A., et al. (2016) Spatiotemporal Prediction of Fine Particulate Matter Using High-Resolution Satellite Images in the Southeastern US 2003-2011. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, **26**, 377-384. <https://doi.org/10.1038/jes.2015.41>
- [7] 刘浩, 高小明, 谢志英, 等. 京津冀晋鲁区域气溶胶光学厚度的时空特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1506-1511.
- [8] Li, S., Joseph, E. and Min, Q. (2016) Remote Sensing of Ground-Level $PM_{2.5}$ Combining AOD and Backscattering Profile. *Remote Sensing of Environment*, **183**, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.025>
- [9] Slater, J.F., Dibb, J.E., Campbell, J.W., et al. (2004) Physical and Chemical Properties of Surface and Column Aerosols at a Rural New England Site during MODIS Overpass. *Remote Sensing of Environment*, **92**, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.05.011>
- [10] 陈辉, 厉青, 王中挺, 等. MERSI 和 MODIS 卫星监测京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度[J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 822-832.
- [11] 周云云, 张德英, 施润和. 多种气象要素及其变化对 AOD 与 $PM_{2.5}$ 关联模型的影响研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 204-211.
- [12] 王旭, 胡引翠, 田冰, 等. 京津冀地区 AOD 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的特征及相关性分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9):

5069-5074.

- [13] 付宏臣, 孙艳玲, 陈莉, 等. 基于 AOD 数据与 GWR 模型的 2016 年新疆地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 27-35.
- [14] 孙成, 王卫, 刘方田, 等. 基于线性混合效应模型的河北省 PM_{2.5} 浓度时空变化模型研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9): 1500-1509.
- [15] 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 等. 基于随机森林模型的中国 PM_{2.5} 浓度影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2057-2065.
- [16] 孙梦竹, 杨昆, 杨玉莲, 等. 基于 MODIS 的中国 PM_{2.5} 污染时空分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(11): 53-58.
- [17] 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 等. 基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1513-1519.
- [18] 张颖蕾, 崔希民. 京津冀地区 MODIS 3 km 气溶胶光学厚度产品与 10 km 产品的对比分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 429-437.
- [19] 杜诗薇. 基于 LUR 模型的四川省 PM_{2.5} 时空分布特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [20] 邵琦, 陈云浩, 李京. 基于卫星遥感和气象再分析资料的北京市 PM_{2.5} 浓度反演研究[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(3): 32-38.
- [21] 张巍, 蒋燕, 罗彬, 等. 四川省近年来空气质量变化趋势及污染特征分析[J]. 四川环境, 2018, 37(5): 131-135.
- [22] 刘孟琴, 汤家法, 刘小青, 等. 四川省近 15 年以来 PM_{2.5} 的时空分布特征及原因分析[J]. 四川环境, 2017, 36(3): 74-81.
- [23] 何敏, 王幸锐, 韩丽. 四川省大气固定污染源排放清单及特征[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 3127-3137.