

基于混合效应模型的京津冀地区 PM_{2.5} 数值模拟*

鲍艳磊^{1,2} 田冰^{1,2#} 胡引翠^{1,2} 张文静^{1,2} 王晨旭^{1,2} 王天宇^{1,2}

(1.河北师范大学资源与环境科学学院,河北 石家庄 050024;

2.河北省环境演变与生态建设实验室,河北 石家庄 050024)

摘要 采用2017年京津冀地区中分辨率成像光谱仪提供的3 km气溶胶光学厚度(AOD)和气象数据,分别在有无气象因子作为自变量的情况下对PM_{2.5}与AOD的关系进行解释。比较基于空间、时间及时空的78种混合效应模型的模拟效果,并利用十折交叉模型进行验证。经相关系数、拟合程度和模型误差对比,最终确定将气温、相对湿度、风速和气压4种气象因子作为影响因子的基于时空的混合效应模型效果最佳。利用该模型估算2017年京津冀地区的PM_{2.5}监测值,结果表明,PM_{2.5}监测值与模拟值的 R^2 为0.90(经十折交叉模型校正后为0.81),均方根误差、平均绝对误差分别为13.44、10.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,模型的拟合精度较高。同时研究表明,整体来说,京津冀地区呈现南高北低、平原地区东南高西北低、非平原地区高纬度区域相对低的空间格局。

关键词 气溶胶光学厚度 PM_{2.5} 混合效应模型 京津冀地区 气象因子

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.03.003

Numerical simulation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei region based on mixed effect model BAO Yanlei^{1,2}, TIAN Bing^{1,2}, HU Yincui^{1,2}, ZHANG Wenjing^{1,2}, WANG Chenxu^{1,2}, WANG Tianyu^{1,2}. (1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050024; 2. Key Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang Hebei 050024)

Abstract: 3 km aerosol optical thickness (AOD) data provided by the medium resolution imaging spectrometer and meteorological data of Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017 were used to explain the relationship between PM_{2.5} and AOD, in the case of with or without meteorological elements as independent variables. 78 different mixed-effect models were built from 3 aspect of only considering space, only considering time and simultaneously considering time and space, then ten-fold cross model was used for model verification. Based on the correlation coefficient, fitting degree and model error, it was finally determined that the time-space based mixed effect model which included the four kinds of meteorological elements such as temperature, relative humidity, wind speed and pressure presented the best simulation results. Then, the obtained mixed effect model was used to estimate the PM_{2.5} concentration of the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017. The results showed that the R^2 of the PM_{2.5} simulation value and the observation value was 0.90, and it was 0.81 after verification. The root mean square error and the average absolute error were 13.44 and 10.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The model had a high precision of fitting. The research showed that the concentration of PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region was higher in the south and lower in the north; in plains area, the PM_{2.5} was higher in the southeast and lower in the northwest, and relatively lower in the high-latitude area of the non-plain areas.

Keywords: AOD; PM_{2.5}; mixed effect model; Beijing-Tianjin-Hebei region; meteorological elements

自20世纪90年代以来,雾霾逐渐成为中国严重的环境问题之一^[1]。PM_{2.5}是雾霾的主要污染物,许多流行病学研究表明,PM_{2.5}对人体健康产生不良影响,造成呼吸、心血管、免疫和生殖系统出现功能障碍,严重甚至会导致死亡^[2-4]。近年来,其引起了国家和社会的广泛关注。目前,PM_{2.5}自动监测依赖于地面监测格网,由于目前中国监测格网数量还有所欠缺,对于研究区域的PM_{2.5}浓度获取存在困难,

而利用遥感卫星获得的气溶胶光学厚度(AOD)数据反映近地面污染情况具有连续性好、传输速度快等难以比拟的优势。以AOD为介质的消光系数在垂直方向上的积分,是表征大气浑浊程度的关键物理量,也是确定气溶胶气候效应的重要因素。通常,高的AOD预示着气溶胶纵向积累的增长,直接导致大气能见度的降低。国内外许多学者开展了利用AOD估算PM_{2.5}的研究。研究表明,AOD和PM_{2.5}

第一作者:鲍艳磊,女,1993年生,硕士研究生,研究方向为大气环境。#通讯作者。

*国家自然科学基金资助项目(No.41471091);河北省自然科学基金资助项目(No.D2013205077)。

之间存在明显的正相关关系。近年来,不同学者基于多元线性模型^[5]、土地利用回归模型^[6-9]、协同时空地理加权回归模型^[10]等估算 PM_{2.5},基本得到了很好的结果。由此可知,利用 AOD 来估算地面 PM_{2.5}是可行的,对于了解 PM_{2.5}的时空分布及弥补没有监测站点地区的数据缺失是具有参考价值的。

2018年,北京市、天津市、河北全省 PM_{2.5}年平均均值分别约为 51、52、56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,京津冀地区平均值超过了《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)一级标准(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。针对该地区大气质量严重污染问题,《大气污染防治行动计划》提出建立京津冀等三大区域大气污染联防联控机制,开启京津冀区域协作治理的新进程。

郝静等^[11]使用空间分辨率为 10 km 的 AOD 数据,利用混合效应模型对京津冀内陆平原 PM_{2.5}浓度进行时空变化定量模拟,得到 $R^2 = 0.78$ 。景悦等^[12]利用基于每日的混合效应模型探究 AOD 与 PM_{2.5}的相关关系, $R^2 = 0.92$ 。由此说明,高精度的遥感数据和混合效应模型为预测 PM_{2.5}浓度提供了更好的数据源和数据模型。但 PM_{2.5}与 AOD 的关系会受到气象因素和其他因素的影响而存在不稳定性。国内外众多学者利用 AOD 来估算 PM_{2.5}浓度时加入气象要素,结果发现,这些因素会在一定程度提高两者相关性^[13-15]。薛文博等^[16]研究表明,PM_{2.5}与订正过的 AOD 的 R^2 为 0.77;同时引入相对湿度、风速,近地面 PM_{2.5}与反演值的 R^2 升至 0.79。目前,在混合效应模型中引入气象因子作为自变量对京津冀地区 PM_{2.5}与 AOD 相关关系的研究较少,本研究尝试以 AOD 数据和气象要素为预测因子,得到最优的混合效应模型,以期达到更好预测京津冀地区 PM_{2.5}浓度的效果。

1 研究区概况

京津冀是中国的“首都经济圈”,包括北京市、天津市及河北省 11 个地级市。京津冀地区包括多种类型的地貌,包括西部的坝上高原、燕山、太行山脉和中部、东南部的平原地区。京津冀地区属于温带季风性气候,具有明显的季节变化特征。燃煤、机动车、工业废气排放多种污染物共生局面加之西、北面环山的地形不利于雾霾的扩散情况导致近年来京津冀地区大气污染超标频度较高。为更好监测 PM_{2.5}对大气环境影响,目前京津冀地区有 PM_{2.5}监测站点 80 个、气象站点 26 个,具体位置如图 1 所示。

2 数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 中分辨率成像光谱仪(MODIS)AOD 数据

MODIS 数据通过将 MODIS 搭载在 Terra 卫星上获得,光谱范围 0.4~14.4 μm 。本研究采用美国国家航空航天局(NASA)网站(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov>)发布的以日为时间分辨率、3 km 为空间分辨率的 MOD04 L2 C6 产品数据,时间为 2017 年 1 月 1 日至 12 月 31 日。

首先在 ENVI5.1 软件中对下载的原始数据进行几何校正、拼接和裁剪等预处理,之后在 ArcGIS 10.2 软件中获取 PM_{2.5}监测站点周围 3×3 个栅格像元的 AOD 平均值与对应 PM_{2.5}监测站点相匹配。

2.1.2 地面 PM_{2.5}数据

京津冀地区的 80 个 PM_{2.5}监测站点的数据来自中国环境监测中心官方网站(<http://106.37.208.233:20035/>)。Terra 卫星在中国的过境时间是 10:30,因此本研究采用卫星过境时段(即 10:00—11:00)地面监测站点的 PM_{2.5}平均值。在以 3 km 为单元划分的京津冀地区监测格网中可能会存在一个或多个 PM_{2.5}监测站点,此时 PM_{2.5}取监测格网中所有监测站点的平均值。

2.1.3 气象和边界数据

京津冀地区 26 个气象站点的气象数据可从中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)获得,包括相对湿度、风速、气温和气压;因气象站点与 PM_{2.5}监测站点经纬度不同,因此需要将气象站点的数据进行插值得到与 PM_{2.5}监测站点相匹配的气象数据。

省、地、市行政边界数据来源于国家基础地理信息网站(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 混合效应模型

混合效应模型是指既包含固定效应又包括随机效应的模型。固定效应类似于标准回归系数,直接估计得到。随机效应从它们的方差和协方差估计值中总结而来。随机效应用于解释 AOD 数据、气象因子与 PM_{2.5}之间的日变化关系,以随机截距或随机系数的形式呈现。

景悦等^[12]指出,基于日变化的混合效应模型能在时间上解释 PM_{2.5}和 AOD 的关系变化,基于站点的混合效应模型也能在一定程度上解释空间上 PM_{2.5}和 AOD 的关系变化,而且两种模型均优于

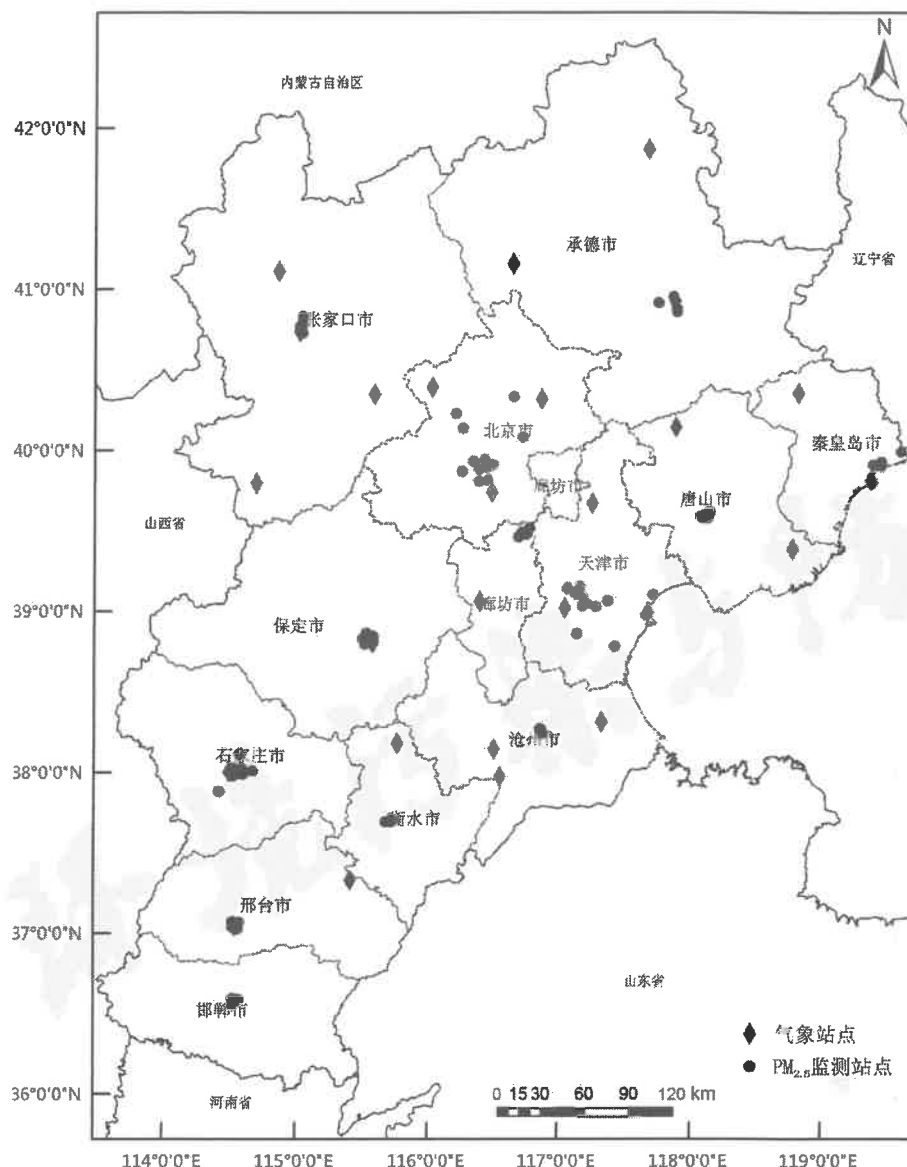


图1 京津冀PM_{2.5}监测站点和气象站点分布

Fig.1 Distribution of Beijing-Tianjin-Hebei PM_{2.5} monitoring site and meteorological site

简单的线性回归。式(1)表示在自变量只有 AOD 的情况下建立的 3 种模型:(1)站点变化影响下的混合效应模型(基于空间的模型);(2)时间变化影响下的混合效应模型(基于时间的模型);(3)PM_{2.5} 和 AOD 关系在时间和站点共同影响下的混合效应模型(基于时空的模型)。3 种模型使用相同的数据,基于不同的变量字段来实现。式(2)表示增添了气象因子作为影响因子的 3 种混合效应模型,反映 PM_{2.5} 和 AOD 关系在不同情况下的变化。

$$M_{ij} = (\alpha + u_j) + (\beta_1 + v_j) \times A_{ij} + S_i + \epsilon_{ij} \quad (1)$$

$$M_{ij} = (\alpha + u_j) + (\beta_1 + v_j) \times A_{ij} + (\beta_2 + \kappa_j) \times T_{ij} + (\beta_3 + l_j) \times W_{ij} + (\beta_4 + m_j) \times R_{ij} + \beta_5 \times P_{ij} + S_i + \epsilon_{ij} \quad (2)$$

式中: M_{ij} 为第 i 个监测格网第 j 天的 PM_{2.5};

$\mu\text{g}/\text{m}^3$; α 为固定截距; u_j 为第 j 天随机截距; β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 为与 AOD、气温、风速、相对湿度、气压有关的固定斜率; v_j 、 κ_j 、 l_j 、 m_j 为第 j 天与 AOD、气温、风速、相对湿度、气压有关的随机效应斜率; A_{ij} 为第 i 个监测格网第 j 天的 AOD; S_i 为第 i 个监测格网的随机效应; ϵ_{ij} 为第 i 个监测格网第 j 天的随机误差项; T_{ij} 为第 i 个监测格网第 j 天的气温, $^{\circ}\text{C}$; W_{ij} 为第 i 个监测格网第 j 天的风速, m/s ; R_{ij} 为第 i 个监测格网第 j 天的相对湿度, %; P_{ij} 为第 i 个监测格网第 j 天的气压, Pa 。

2.2.2 模型验证方法

采用十折交叉验证法验证混合效应模型的准确度。具体实现过程:将数据集随机分成 10 等份,轮流将 9 份参与建模,剩余一份作为测试集,重复 10

次直至所有数据都被预测出来,然后将 10 次验证结果的均值作为对预测模型精度的估计。

模型拟合效果的判断以 PM_{2.5} 监测值与模拟值的 R^2 、十折交叉验证后相关系数(CVR^2)、均方根误差(RMSE, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)及平均绝对误差(MAE, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)表示。

3 结果与讨论

3.1 模型拟合

采用基于不同类型的混合效应模型,并尝试在固定效应和随机效应中增添、改变气象因子的类型和数量,来进行模型的拟合和验证,共尝试进行了 78 种类型的含有不同自变量的混合效应模型。

在固定效应和随机效应中加入不同气象因子后, R^2 、 CVR^2 、RMSE、MAE 的取值见表 1。 R^2 和 CVR^2 取值越大,两者的相关性越强;RMSE 和

MAE 取值越小,模型的误差越小。综合分析,基于空间的模型的 R^2 、 CVR^2 比另外两种模型小,基于时间的模型的 R^2 、 CVR^2 基本都比基于时空的模型小;基于空间的模型的 RMSE、MAE 明显大于另外两种模型,后两种模型数值有交叉,但总体基于时空的模型的 RMSE、MAE 小于基于时间的模型。

在 78 种模型中,分别选择基于空间、时间和时空的最优模型进行分析。基于空间的模型,在固定效应和随机效应中同时含有 AOD、风速和相对湿度的模型得到的结果最优;基于时间的模型,在固定效应和随机效应中同时含有 AOD、风速、相对湿度、气温和气压的模型的结果最优;基于时空模型,在固定效应和随机效应中同时含有 AOD、风速、相对湿度和气温,且仅在固定效应中含有气压的模型的结果最优。将这 3 种最优模型经十折交叉模型校正,结果见图 2。模型 $R^2=0.90$,校正后基于时空最优模

表 1 R^2 、 CVR^2 、RMSE、MAE 的取值
Table 1 Values of R^2 、 CVR^2 、RMSE and MAE

项目	基于空间的模型	基于时间的模型	基于时空的模型
R^2	0.47~0.51	0.82~0.89	0.86~0.90
CVR^2	0.22~0.26	0.67~0.79	0.75~0.81
RMSE/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	26.30~27.40	14.45~17.73	13.44~15.39
MAE/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	19.74~20.41	10.69~13.26	10.12~11.88

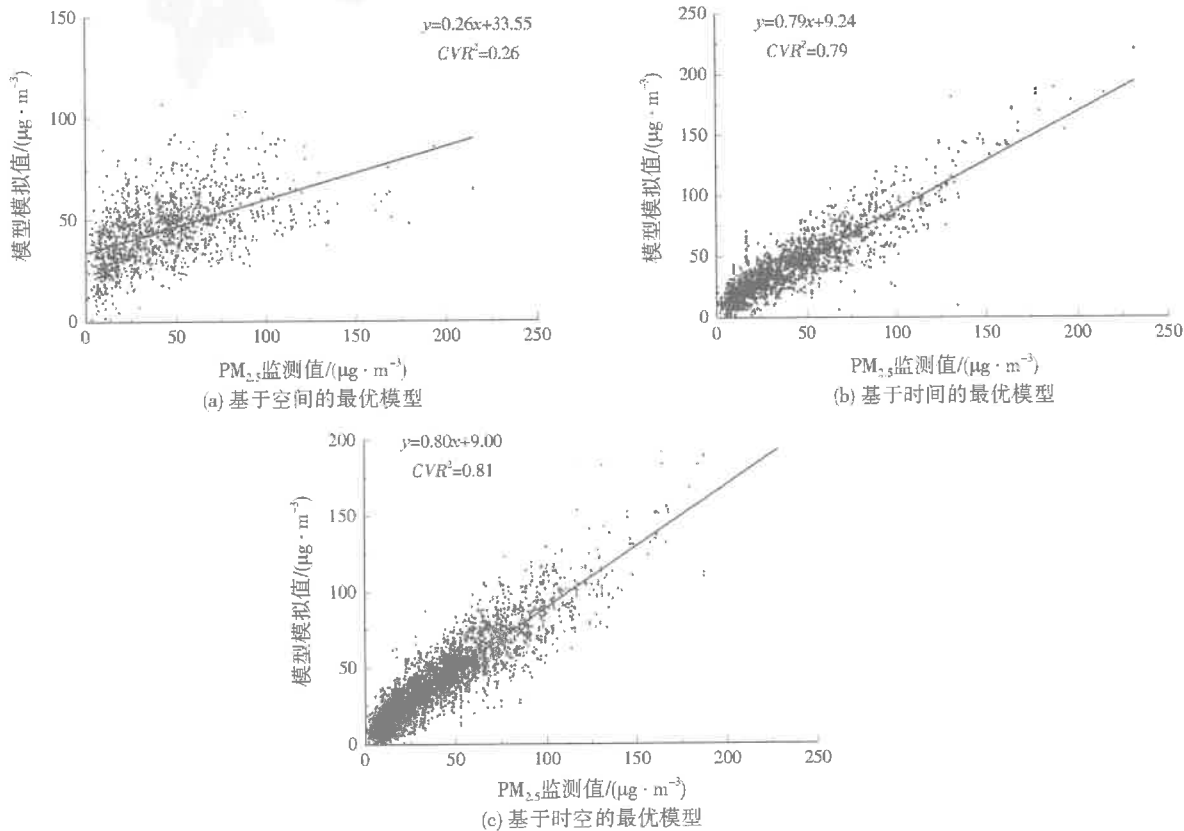


图 2 模型模拟值与监测值间校正后得到的相关关系

Fig.2 Correlation diagram between predicted and actual values of the model

型拟合程度最好, $CVR^2=0.81$, $RMSE$ 、 MAE 分别为 13.44、10.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。表 1 中, 基于时空的模型的 CVR^2 比 R^2 小, 说明模型存在部分过度拟合, 但总体来说模型的显著性明显, 说明气象因子可提高模型的拟合精度和 $\text{PM}_{2.5}$ 的预测精度。

基于时空的模型中引入气温、相对湿度、风速和气压 4 种气象因子, 此模型得到的固定效应(包括固定截距和固定斜率)的解见表 2。其中, 混合效应模型的固定效应类似于标准回归系数, 表示全年内自变量对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的固定影响, AOD 固定斜率估计值为 21.861 6, 说明 $\text{PM}_{2.5}$ 与 AOD 呈现正相关; 相对湿度固定斜率估计值 0.371 0, 说明相对湿度越大越有利于大气颗粒物质的形成, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越大; 气温固定斜率估计值为 0.064 2, 说明 $\text{PM}_{2.5}$ 与气温呈现正相关, 气温通过控制边界层高度影响大气颗粒物质的扩散; 气压固定斜率估计值为 0.000 1, 说明气压增大, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也提高, 但影响程度较小。风速固定斜率估计值为 -0.453 2, 表明 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速呈反比, 风有利于大气颗粒物的扩散, 风速越大越有利于空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 的输送与扩散。风速与相对湿度的系数较高, 是相对主要的气象影响因子。

由表 3 可知, 各城市的 CVR^2 为 0.71~0.88, $RMSE$ 为 9.79~14.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, MAE 为 8.19~11.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。根据 CVR^2 , 北京市、邢台市、秦皇岛市、张家口市、廊坊市和保定市的拟合效果较好, 石

家庄市、承德市的拟合效果较差, 但总体能在一定程度上表达 $\text{PM}_{2.5}$ 与 AOD 的关系, 表现为较高的拟合效果、较低的误差。

3.2 京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模型适应性与时空分布分析

2017 年, 京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 监测值为 1~232 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均为 45.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值为 0~229 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均为 44.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。分别将各监测站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测、模拟年均值插值到整个研究区, 结果见图 3。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间差异性和数值吻合度均较高, 说明模型的模拟效果较好, 因此可利用该模型对缺乏监测数据地区以及大范围研究区进行 $\text{PM}_{2.5}$ 的模拟与预测。

为方便分析, 本研究将京津冀分为 4 个地区, 分别为北京市、天津市、河北平原区(廊坊市、保定市、石家庄市、衡水市、邢台市和邯郸市)和河北非平原区(唐山市、秦皇岛市、沧州市、张家口市和承德市)。2017 年, 北京市、天津市、河北非平原区、河北平原区的 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟年均值分别为 42.51、51.38、38.32、46.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 整体上北部低于南部、东部沿海低于西部地区。

本研究还将一年分为冷暖两季(冷季为 10 月至次年 3 月, 暖季为 4—9 月), 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及模型适应性进行分析, 结果见图 4。京津冀全区冷、暖季 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟平均值分别为 44.99、44.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。全区

表 2 固定效应的解
Table 2 Solutions to fixed effects

固定效应	估计值	标准误差	自由度	t	P
固定截距	20.644 9	9.616 0	67.000 0	2.150 0	0.035 4
AOD 固定斜率	21.861 6	3.372 5	124.000 0	6.480 0	0.000 1
风速固定斜率	-0.453 2	0.173 6	125.000 0	-2.610 0	0.010 2
相对湿度固定斜率	0.371 0	0.096 5	118.000 0	3.840 0	0.000 2
气温固定斜率	0.064 2	0.030 8	121.000 0	2.080 0	0.039 2
气压固定斜率	0.000 1	0.000 5	3 061.000 0	-0.280 0	0.780 6

表 3 基于城市统计的混合效应模型拟合结果及校正结果
Table 3 Fitting results of mixed effect model based on city statistics and calibration results

城市	R^2	CVR^2	$RMSE/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$MAE/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$
北京市	0.91	0.88	13.51	10.15
天津市	0.81	0.74	14.92	11.80
石家庄市	0.81	0.71	13.33	10.32
保定市	0.89	0.80	12.52	9.31
唐山市	0.84	0.75	11.70	9.38
秦皇岛市	0.84	0.81	9.79	8.19
承德市	0.78	0.72	12.42	8.89
沧州市	0.80	0.74	13.95	9.33
衡水市	0.83	0.73	14.58	10.87
廊坊市	0.89	0.81	14.25	11.03
邢台市	0.87	0.82	12.72	8.73
张家口市	0.83	0.81	12.16	9.31

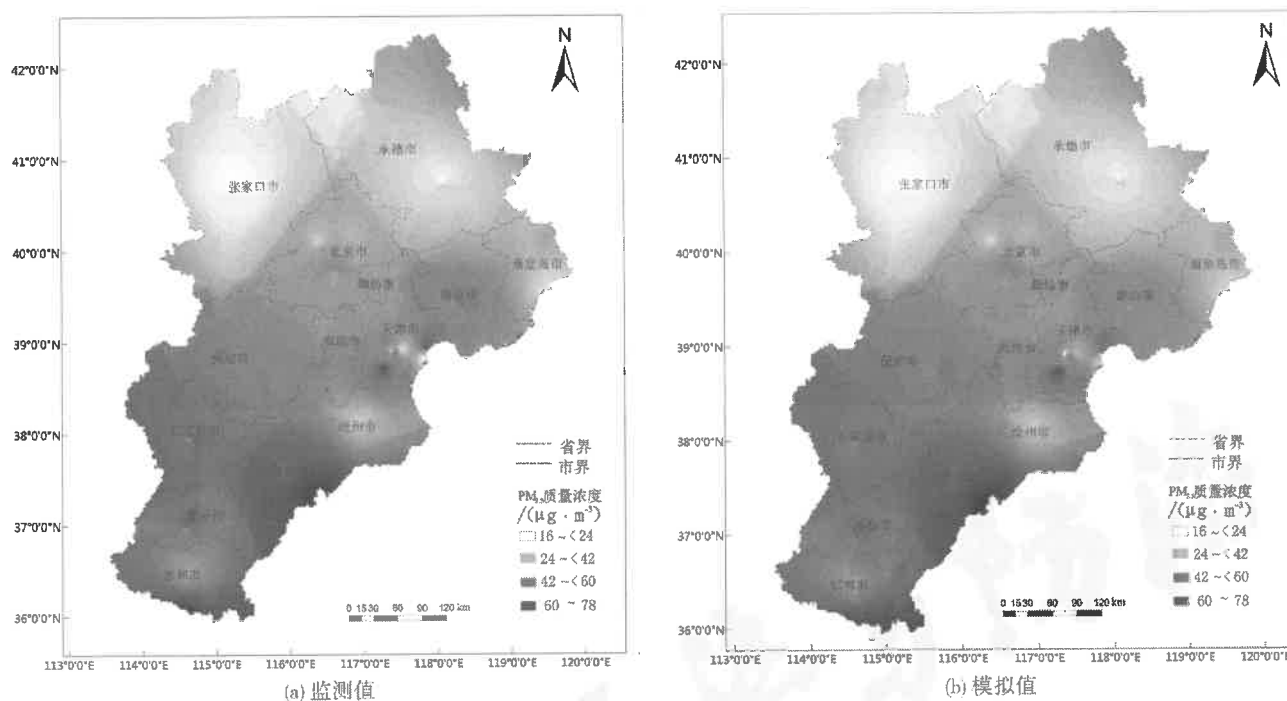

 图3 2017年PM_{2.5}监测与模拟年均值分布对比

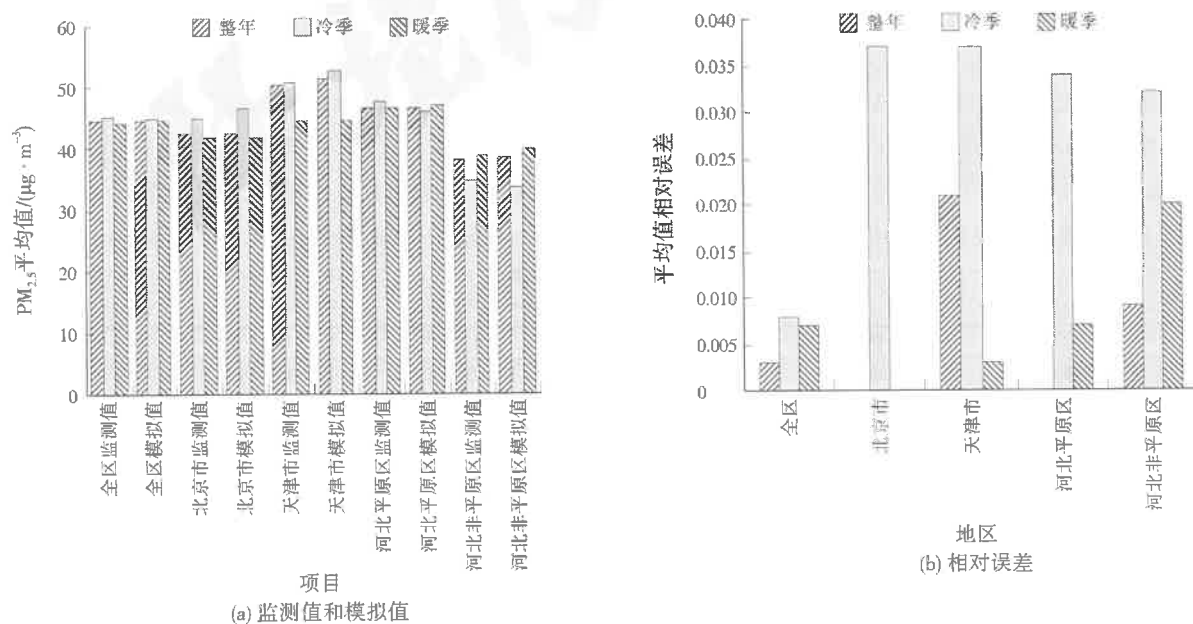
 Fig.3 Comparison of the PM_{2.5} distribution of monitoring values and simulation values in 2017

 图4 基于不同地区的PM_{2.5}监测值与模拟值对比

 Fig.4 Comparison of PM_{2.5} monitoring values and simulated values in different regions

暖、冷季PM_{2.5}模拟值与监测值分别相差0.31、0.36 μg/m³,其中北京市分别相差0.17、1.76 μg/m³,天津市分别相差0.17、2.00 μg/m³,河北平原区分别相差0.35、1.59 μg/m³,河北非平原区分别相差0.83、1.10 μg/m³。全区平均值相对误差值不超过0.008,分区平均值相对误差值为0~0.037。总体来说,暖季相较于冷季估计均值更精确,模型对PM_{2.5}浓度估计精度较高。

研究区4个地区PM_{2.5}模拟年均值均大于35 μg/m³,但是不同地区也存在差别。河北非平原区中的张家口市、承德市PM_{2.5}年均值较低,分析原因可能是因为当地工厂相对较少,空气流通状况好;秦皇岛市为沿海城市,常年有海风的作用,因此PM_{2.5}年均值相对较低,空气质量较好。河北平原区工厂多、人口密集,产生PM_{2.5}的源头多;冷季受西北风影响,随风飘荡的污染物在遇到太行山时无法翻越,

造成累积,然后便有可能形成气团污染到其他周边城市,造成二次及三次污染,导致内部平原地区 $PM_{2.5}$ 年均值明显偏高。北京市人口密集,但工厂外迁,冬季盛行西北风,湿度较小,较有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散,所以 $PM_{2.5}$ 年均值相对不是很高。整体来说,京津冀地区呈现南高北低、平原地区东南高西北低、非平原地区高纬度区域相对低的空间格局,京津冀地区空气质量亟待解决。

4 结 语

(1) MODIS 3 km AOD 的数据全球开放、获取方便,因此本研究使用此数据来预测地面的 $PM_{2.5}$ 浓度。目前,3 km 的 AOD 产品可通过 MODIS 的暗像元算法(DT)和深蓝算法(DB)得到,但通过 DB 得到的产品没有发布,应用 DT 在冷季云、雾及重污染天气反演得到的 AOD 产品质量较差,导致部分冬季天气恶劣地区参与建模的数据较少。在以后的研究中可尝试将 3、10 km 数据进行融合或采用 SARA 算法反演出 500 m 分辨率的 AOD 产品填补 AOD 的缺失,以提高研究的精度。另外,以后的研究中还可加入县级监测站点,增加站点数量与均匀程度进一步提高模型的精度。

(2) 局地气象是影响 $PM_{2.5}$ 浓度的重要因子,每天每个地方的气象因子存在差异,因此可通过最优插值得到监测站点的各种气象因子的数值。在构建模型时加入不同的气象因子,所得的 CVR^2 存在不同。其中,风速和相对湿度的影响系数较大。

(3) 基于时空的模型拟合结果比基于空间、时间的模型优。

(4) 整体来说,京津冀地区呈现南高北低、平原地区东南高西北低、非平原地区高纬度区域相对低的空间格局,京津冀地区空气质量亟待解决。

参考文献:

- [1] 范引琪,李春强.1980—2003 年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究[J].高原气象,2008,27(6):1392-1400.
- [2] 郭杰,肖纯凌. $PM_{2.5}$ 对人群健康影响的流行病学研究进展[J].环境卫生学杂志,2017,7(2):164-169.
- [3] 陈熙勤,张皓旻,顾万清,等.我国 $PM_{2.5}$ 主要成分及对人体健康危害研究进展[J].中华保健医学杂志,2019,21(1):83-85.
- [4] 徐灿,唐俊红,吴圣姬,等.大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 监测技术研究进展及展望[J].地球与环境,2015,43(5):577-582.
- [5] 焦利民,张博恩,许刚,等.气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 浓度相关关系的时空变异[J].干旱区资源与环境,2016,30(12):34-39.
- [6] 许悦蕾,刘延安,施润和,等.气象要素对气溶胶光学厚度估算 $PM_{2.5}$ 的影响[J].环境科学学报,2018,38(10):3868-3876.
- [7] 许刚,焦利民,肖丰涛,等.土地利用回归模型模拟京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布[J].干旱区资源与环境,2016,30(10):116-120.
- [8] 吴健生,廖星,彭建,等.重庆市 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异模拟及影响因素[J].环境科学,2015,36(3):759-767.
- [9] 吴健生,王茜,李嘉诚,等. $PM_{2.5}$ 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例[J].环境科学,2017,38(6):2191-2201.
- [10] 赵阳阳,刘纪平,杨毅,等.一种协同时空地理加权回归 $PM_{2.5}$ 浓度估算方法[J].测绘科学,2016,41(12):172-178.
- [11] 郝静,孙成,郭兴宇,等.京津冀内陆平原地区 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化定量模拟[J].环境科学,2018,39(4):1455-1465.
- [12] 景悦,孙艳玲,徐昊,等.基于混合效应模型的京津冀地区 $PM_{2.5}$ 日浓度估算[J].中国环境科学,2018,38(8).
- [13] KLOOG I, KOUTRAKIS P, COULL B A, et al. Assessing temporally and spatially resolved $PM_{2.5}$ exposures for epidemiological studies using satellite aerosol optical depth measurements[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(35): 6267-6275.
- [14] GUPTA P, CHRISTOPHER S A, WANG J, et al. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(30):5880-5892.
- [15] 孙成.基于混合效应模型的河北省 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化模拟[D].石家庄:河北师范大学,2018.
- [16] 薛文博,武卫玲,许艳玲,等.基于 WRF 模型与气溶胶光学厚度的 $PM_{2.5}$ 近地面浓度卫星反演[J].环境科学研究,2016,29(12):1751-1758.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2019-04-07)

(上接第 267 页)

- [2] 翟丹丹,宫永伟,张雪,等.简单式绿色屋顶雨水径流滞留效果的影响因素[J].中国给水排水,2015,31(11):106-110.
- [3] BERNDTSSON J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4): 351-360.
- [4] TEEMUSK A, MANDER U. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: the effects of short-term events[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(3): 271-277.
- [5] 欧阳威,王玮,郝芳华,等.北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J].中国环境科学,2010,30(9):1249-1256.
- [6] BERNDTSSON J C, BENGTSSON L, JINNO K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(3): 369-380.
- [7] 张科峰,李贺,傅大放,等.三种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析[J].环境科学学报,2011,31(4):724-730.
- [8] VIJAYARAGHAVAN K, JOSHI U M, BALASUBRAMANIAN R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs [J]. Water Research, 2012, 46(4): 1337-1345.
- [9] SPEAK A F, ROTHWELL J J, LINDLEY S J, et al. Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof[J]. Environmental Pollution, 2014, 184(1): 33-43.
- [10] GREGOIRE B G, CLAUSEN J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(6): 963-969.

编辑:丁 怀 (收稿日期:2019-02-15)

