

杨颖川, 葛宝珠, 郝赛宇, 等. 2020. 基于能见度及 AOD 数据的北京市 PM_{2.5} 浓度的反演 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 521–530. YANG Yingchuan, GE Baozhu, HAO Saiyu, et al. 2020. Inversion of PM_{2.5} Concentration in Beijing Based on Visibility and AOD Data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (5): 521–530. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19114

基于能见度及 AOD 数据的北京市 PM_{2.5} 浓度的反演

杨颖川^{1,2} 葛宝珠^{1,3} 郝赛宇⁴ 徐丹卉^{1,2} 刘颖⁵
甘璐⁶ 王自发^{1,2,3}

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3 中国科学院城市环境研究所城市环境科学卓越中心, 厦门 361021

4 国防科技大学计算机学院, 长沙 410073

5 国家气候中心, 北京 100081

6 北京市气象局, 北京 100089

摘要 选择北京市为研究地区, 对 2014~2017 年 AERONET (Aerosol Robotic Network) 提供的 CE-318 太阳光度计 440 nm 波段反演的气溶胶光学厚度 (AOD) 进行风速订正, 对订正后 AOD 日均数据与同期地面监测站 PM_{2.5} 日均浓度数据做季节相关性分析并建立回归模型。又引入能见度因子并利用广义差分法构建 2015~2017 年北京市 AOD 与 PM_{2.5} 浓度、能见度的三元回归模型, 最后将 2014 年数据分为污染日和非污染日分别进行模型检验。结果表明: AOD 与 PM_{2.5} 浓度存在显著的线性正相关性, 且存在季节性差异, 夏季相关性最强、秋季次之、春季和冬季最低。引入能见度因子并消除自相关后, 四季的模型相对误差均显著减小, 模型拟合优度显著提高。检验结果为四季整体的平均相对误差在 21%~31% 范围内, 与前人的结果相比拟合曲线的准确性得到了明显地提高。且模型对低 PM_{2.5} 浓度日的模拟效果较好, 对于高 PM_{2.5} 浓度日的模拟效果较差。本研究对构建北京地区 PM_{2.5} 浓度长期的历史数据具有重要的科学意义。

关键词 北京市 气溶胶光学厚度 PM_{2.5} 能见度 相关性

文章编号 1006-9585(2020)05-0521-10

中图分类号 X513

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19114

Inversion of PM_{2.5} Concentration in Beijing Based on Visibility and AOD Data

YANG Yingchuan^{1,2}, GE Baozhu^{1,3}, HAO Saiyu⁴, XU Danhui^{1,2}, LIU Ying⁵,
GAN Lu⁶, and WANG Zifa^{1,2,3}

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2019-08-09; 网络预出版日期 2019-12-21

作者简介 杨颖川, 女, 1998 年出生, 硕士研究生, 研究方向为大气物理与大气环境。E-mail: 1256840428@qq.com

通讯作者 葛宝珠, E-mail: gebz@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC0830802, 中科院先导 A 专项 XDA19040204, 国家自然科学基金项目 41877313、91744206, 大气重污染成因与治理攻关项目 DQGG0106

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC0830802), Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA19040204), National Natural Science Foundation of China (Grants 41877313 and 91744206), Causes of Heavy Pollution in the Atmosphere and Governance Issues (Grant DQGG0106)

3 Center for Excellence in Regional Atmospheric Environment, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021

4 College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073

5 National Climate Center, Beijing 100081

6 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

Abstract In this study, Beijing is selected as the research area to perform wind speed correction of the aerosol optical depth (AOD) data of the 440 nm band inversion of the CE-318 solar photometer provided by AERONET (Aerosol Robotic Network) in 2014–2017. Then, the seasonal correlation analysis and modeling of the corrected daily average AOD data and the same period ground monitoring station daily average PM_{2.5} concentration data are conducted. Then, the visibility factor is introduced and the generalized difference method is used to construct the ternary regression model of AOD, PM_{2.5}, and visibility in Beijing from 2015 to 2017. Finally, the data of 2014 are divided into pollution and nonpollution days for the model tests. Results show a significant linear positive correlation between AOD and PM_{2.5}. Moreover, the seasonal differences exhibit the strongest correlation in summer, followed by that in autumn, and the weakest correlation in spring and winter. After introducing the visibility factor and eliminating the autocorrelation, the relative error of the model in the four seasons is reduced, the goodness of fit of the model significantly improved, and the relative error ranges from 21% to 31%. Compared with the previous results, the accuracy of curve fitting has been significantly improved. Moreover, the simulation effect of the model is good for low PM_{2.5} concentration days but poor for high PM_{2.5} concentration days. This study is of scientific significance for the construction of the long-term historical data of PM_{2.5} in Beijing.

Keywords Beijing, Aerosol optical depth, PM_{2.5}, Visibility, Correlation

1 引言

细颗粒物是指悬浮在大气中的直径小于或等于 2.5 μm 的微小粒子, 其在对流层中可通过直接辐射与间接辐射强迫对气候系统产生强烈的影响 (Shank et al., 2012; Dredge et al., 2013)。随着中国工业化和城市化的飞速发展, 中国很多城市 and 地区由 PM_{2.5} 造成的环境问题日益突出; 不仅严重威胁公众的身体健康 (Pope III, 2000; Pope III and Dockery, 2006), 还可以通过散射和吸收可见光, 使大气能见度下降 (刘爱霞等, 2013), 且各城市广泛出现不同程度的“雾霾”天气 (吴兑等, 2007) 对交通出行会造成不良影响。PM_{2.5} 的质量浓度是表征城市空气质量的重要指标之一, 准确获得其区域浓度分布是控制细颗粒物的质量浓度, 改善空气质量的必要前提。

气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 是气溶胶消光系数从地面到大气层顶的积分, 表征无云大气铅直气柱中气溶胶散射造成的消光程度。目前, 利用 AOD 反演地面 PM_{2.5} 浓度的建模方法已有大量研究。有直接建立二者相关关系模型的 (Cordero et al., 2012; Sorek-Hamer et al., 2013; Strawa et al., 2013; Yao et al., 2015), 也有学者在

AOD—PM_{2.5} 相关关系模型中加入气象要素如风速、温度、边界层高度、相对湿度、大气气压等 (郭建平等, 2013; Guo et al., 2014; Nguyen et al., 2014; Song et al., 2014, 2015; Zheng et al., 2015; Xiao et al., 2015), 或加入土地利用信息、人口密度、交通密度等要素 (Kloog et al., 2012; Hu et al., 2013; Just et al., 2015) 来改善拟合效果。但是, 目前尚未出现引入能见度因子来建立反演 PM_{2.5} 浓度模型的研究。能见度主要取决于水平方向的大气消光系数, 是在地表水平方向上的气溶胶光学特性的量化表示。气溶胶光学厚度指的是消光系数在垂直方向上的总积分, 与气溶胶消光系数的垂直分布和气溶胶总浓度有关。又由于太阳辐射、降水的湿清除、相对湿度分布不均、风引起的水平扩散、沙尘输送等诸多因素 (李放和吕达仁, 1996; 黄印博等, 2007; 晏利斌和刘晓东, 2009; 李星敏等, 2014; 任团伟等, 2015; 赵胡笏等, 2015), 使气溶胶消光作用的空间变化十分复杂。而气溶胶颗粒物主要集中在大气低层, 气溶胶的消光作用也主要集中在低层, 所以对于反演空间上颗粒物的分布, 引入近地面水平方向的大气混浊度指标地面能见度是十分必要的。

由于地面观测站点获取的 AOD 能够提供时间连续的观察, 但受到观测成本限制不能得到良好的

空间覆盖信息, 使用卫星遥感监测能够弥补这一不足 (Kumar et al., 2007; Gupta and Christopher, 2008)。搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 传感器提供了全球范围的气溶胶产品, 但其在复杂下垫面区域会存在较大的误差, 其季节均值或月均值的误差会出现叠加放大 (Xin et al., 2011), 故利用卫星遥感资料直接反演地面颗粒物浓度必然会引入较大误差。同时卫星遥感数据获得的是整层大气所有粒子的综合气溶胶光学厚度, 包括粗粒子和细粒子。而 PM_{2.5} 是指近地表直径小于 2.5 μm 的细粒子, 因此由于粒子尺度问题也会造成误差。

因此, 本文利用地基气溶胶光学特性遥感数据和近地层颗粒物浓度数据研究建立北京市 2014~2017 年 PM_{2.5} 与 AOD、能见度的相关函数, 有利于进一步准确地认识北京气溶胶的变化特征, 且对利用卫星遥感反演近地层颗粒物浓度提供重要的应用参考。

2 数据与方法

2.1 AOD 数据

本研究选择气溶胶数据来自 AERONET (Aerosol Robotic Network) 观测网站, 是由 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 和 LOA-PHOTONS (CNRS) 联合建立的全球气溶胶监测网络。仪器安置在北京市朝阳区中国科学院大气物理研究所的楼顶, 其为法国 Cimel 公司生产的 CE-318 太阳光度计, 工作波长为 340、380、440、500、675、870、940、1020 nm, 能够对太阳直射和天空漫射光进行测量。采用目前的 Version2 反演算法可以反演无云情况下全部气溶胶粒子的多波段光学厚度, 以及单次散射反照率、不对称因子等多种光学性质参量。AERONET 的测量必须在白天、晴空条件下进行, 而且还需要根据一定的标准对数据进行分类筛选, 相应地产生 3 个等级的数据产品, 即 L1、L1.5 和 L2.0, 其中 L2.0 的气溶胶反演产品, 是经过过去云处理及人工检查保证质量的数据 (戴一枫等, 2018)。考虑到 PM_{2.5} 颗粒物的粒径大小与光学特性, 由于 AOD 主要反映粒子的散射和吸收特性, 波长越长, 对小粒子散射的敏感性降低, 而对大粒子散射的敏感性增加, 所以较长波段的 AOD 受到大粒子 (如直径大于 2.5 μm 的大粒子)

的影响较大 (王家成等, 2015)。因此使用 440 nm 波段反演 PM_{2.5} 可有效避免大粒径颗粒的影响。综上本研究采用 440 nm 波段得到的 Level2.0 的气溶胶反演产品, 即日平均气溶胶光学厚度反演北京市 PM_{2.5} 日均浓度。

2.2 地面站点监测数据

地面站点的 PM_{2.5} 质量浓度数据采用距离 AERONET 仪器测量点 (39.98°N, 116.37°E) 最近的国家环境空气质量监测网的奥体公园监测站 (40.00°N, 116.39°E), 二者直线距离约为 2.76 km。风速、能见度数据来源于北京市气象局奥森站 (39.95°N, 116.30°E)。地面环境监测数据和地面气象站点数据均为 2014 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日的小时平均数据, 为与 AERONET 数据相匹配, 将地面环境监测数据和地面气象站点数据求日均值, 即 06:00 (北京时间, 下同) 至 18:00 的地面 PM_{2.5} 日平均浓度、日平均风速、日平均能见度数据。

2.3 模型与方法

本研究主要利用风速订正方法对 AOD 进行订正, 对订正后的 AOD 数据与同期 PM_{2.5} 浓度数据季节相关性分析并建立回归模型。后引入能见度因子构建 AOD 与 PM_{2.5} 浓度、能见度的季节多元回归模型, 并利用广义差分法消除模型自相关。最后对 2014 年数据分季节检验, 并对污染日和非污染日分开讨论。

2.3.1 风速订正

风速对大气污染物的传输和扩散起着主导作用。吴奕霄等 (2014) 通过结合基本气象要素和后向轨迹模式分析不同天气条件下的吸湿因子变化, 发现在高温静风低压条件下, 颗粒物传输与扩散受到较强的限制, 导致粒子有更长的时间老化凝聚, 并且通过在空气中的二次反应产生吸湿性化学物质, 增加颗粒物的吸湿性, 从而间接影响了气溶胶的光学厚度。本文根据环境监测站实测风速 v , 设定风速系数 $f(v)$, a 和 a' 分别表示光学厚度及风速订正后的光学厚度:

$$f(v) = \frac{1}{1 - v/10}, \quad (1)$$

$$a' = \frac{a}{f(v)}. \quad (2)$$

2.3.2 广义差分变换

若多元回归模型的误差项存在自相关, 会导致

模型参数估计量无效, 变量显著性检验失去意义且模型预测结果失效。故需要利用广义差分法来处理模型一阶自相关, 设原多元回归模型为

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1t} + \beta_2 x_{2t} + \dots + \beta_k x_{kt} + u_t, \quad (3)$$

其中, $t=2, 3, \dots, T$, β_0 为常数项, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为回归系数, $x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{kt}$ 为自变量, y_t 为因变量。 u_t 具有一阶自回归形式, ρ 为自相关参数:

$$u_t = \rho u_{t-1} + v_t, \quad (4)$$

广义差分法取自相关参数 ρ 的估计值 $\hat{\rho}=1-D/2$, 其中, D 为德宾—沃森检验统计量。并对自变量、因变量做如下变换:

$$x'_{nt} = x_{nt} - \rho x_{nt-1}, \quad (5)$$

$$y'_t = y_t - \rho y_{t-1}, \quad (6)$$

其中, $t=2, 3, \dots, T$, $n=1, 2, \dots, k$ 。对变换变量 x'_{nt} 、 y'_t 采用普通最小二乘法求得回归模型, 其中, $\beta'_0 = \beta_0(1-\rho)$ 。得到满足基本假定的广义差分模型:

$$y'_t = \beta'_0 + \beta_1 x'_{1t} + \beta_2 x'_{2t} + \dots + \beta_k x'_{kt} + v_t, \quad (7)$$

其中, $t=1, 2, \dots, T$ 。并用德宾—沃森 (DW) 检验法对所得模型进行检验: 首先计算出 DW 统计量, 再根据样本数量对照 DW 统计量临界值表从而判断模型的一阶自相关性。

2.3.3 模型的检验

构建模型时, 为了既能达到所构建模型的准确性又要保证评估结果的保真性, 常见的做法是将大约 $2/3 \sim 4/5$ 的样本用于构建模型, 剩余样本用于测试 (王珏和石纯一, 2003)。因此, 本研究采用的数据时间段为 2014~2017 年, 通过对 2015~2017 年的 AOD 及能见度与 PM2.5 日均浓度数据进行多元线性回归得到回归方程, 并利用将该方程应用在 2014 年的数据中, 进行独立检验, 从而获得对回归方程适应性。利用地面监测站点测得的 PM2.5 与模型反演所得的 PM2.5 的差异可以确定模型的平均相对误差以反映模型平均误差水平。

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{d=1}^N |M_d - M_{ad}| / M_d \times 100\% / N, \quad (8)$$

其中, $\bar{\varepsilon}$ 表示平均相对误差, M_d 表示 d 天的地面监测站点位置 PM2.5 浓度观测日均值, M_{ad} 表示利用多元回归模型拟合得到的 d 天的 PM2.5 的日均值, N 表示总天数。

3 结果与讨论

3.1 北京市大气 PM2.5 浓度与 AOD 的相关性分析

对经过风速订正后的北京市地基数据 AOD 与地面观测颗粒物浓度 PM2.5 进行相关性分析。在 2014 年 1 月至 2017 年 12 月期间, 共获取 852 对有效数据。其中用 3~5 月、6~8 月、9~11 月、12~2 月分别代表春、夏、秋、冬四季。表 1 中的皮尔逊相关系数表明, 北京市 AOD 值与 PM2.5 浓度间存在较强的正相关性, 通过了 0.001 的极其显著性检验。但此种相关性具有季节性差异, 夏季相关性最强、秋季次之、春季和冬季最低。

图 1 给出了 2014~2017 年北京市风速订正后的 AOD 与 PM2.5 日均值在各季节的散点图、线性回归方程以及其决定系数 R^2 。由图可见, 相关性模型拟合优度 R^2 春夏秋冬分别为 0.61、0.72、0.63、0.44, 气溶胶 AOD 与颗粒物 PM2.5 质量浓度呈现出较强的线性正相关。目前已有部分学者对北京地区 AOD 与近地面 PM2.5 浓度进行相关性分析。林海峰等 (2013) 利用手持太阳光度计测量了北京市城区的 AOD, 与地面的 PM2.5 质量浓度的 R^2 为 0.42。陈辉等 (2014) 利用 MODIS 卫星遥感得到京津冀地区的 AOD 与地面 PM2.5 质量浓度的 R^2 最高达到 0.51, 比本文模型 R^2 的最高值低 0.21。王伟齐等 (2016) 利用 MODIS 卫星遥感测得的北京市 AOD 及地面 PM2.5 浓度相关性分析所得的 R^2 在北京市不同地区的变化范围为 0.47~0.58, 而本研究得到的模型拟合度四季变化范围为 0.44~0.72。本研究获得的相关系数与前人研究结果相似, 也进一步证实了由 AERONET 地基测量计算得到的 AOD 估算近地面 PM2.5 浓度的可行性。但在冬季相关性仍较差, 普遍低于基于 MODIS 的 AOD

表 1 2014~2017 年北京市 AOD 与 PM2.5 浓度的皮尔逊相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient between aerosol optical depth (AOD) and PM2.5 concentration in different seasons of 2004~2017 in Beijing City

AOD与PM2.5浓度的皮尔逊相关系数	
春季	0.76
夏季	0.85
秋季	0.79
冬季	0.66

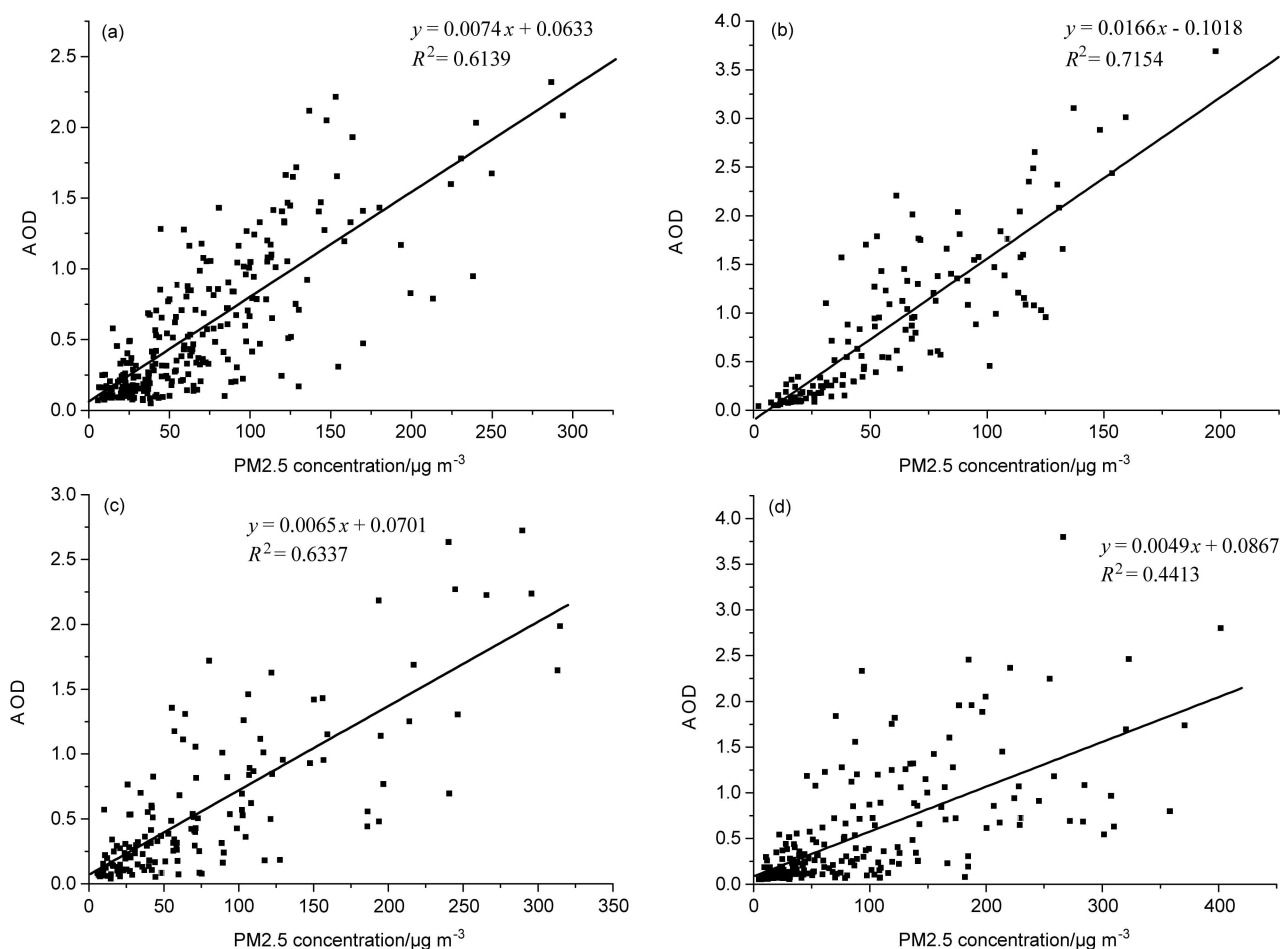


图1 2014~2017年北京市风速订正后的AOD与PM_{2.5}浓度日均值在不同季节的相关性：(a)春季；(b)夏季；(c)秋季；(d)冬季

Fig. 1 Correlation between wind-speed-corrected daily mean aerosol optical depth (AOD) and PM_{2.5} concentration in different seasons of 2004–2017 in Beijing City: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

的反演结果。为解决这一问题，本研究引入能见度因子，从水平维度上增加光学反馈效应，从而达到更好的拟合效果。

3.2 建立能见度、AOD反演PM_{2.5}浓度的关系模型

使用研究区2014~2017年的日平均数据构建各个季节AOD、能见度、PM_{2.5}浓度的三元线性回归模型，并计算其回归分析统计量得到表2。模型中 b 表示能见度，单位是km； c 表示气溶胶光学厚度；DW表示德宾—沃森统计量值。由表可知，引入能见度因子后，根据DW（德宾—沃森）检验值和各季节样本数量，对照DW统计量临界值表发现各季模型均具有一阶自相关，这会造成所得到的模型参数估计不准确且得到的其他统计量结果无意义。因此，为了得到准确而有效地反演模型，我们使用广义差分法处理原方程，计算去除一阶自相

关性后的模型及其统计量。

根据表2可知，经过广义差分变换后的模型均不再存在自相关。与广义差分变换前的模型相比，各季节的相对误差均显著降低，达到21%~31%。与仅用AOD回归模型相比，引入能见度因子可显著提高对PM_{2.5}反演模型的拟合优度，决定系数(R^2)春季由0.61提升至0.73，夏季由0.72提升至0.87，秋季由0.63提升至0.78，冬季由0.44提升至0.65。值得注意的是，相关系数仍然存在季节性差异：夏季>秋季>春季>冬季。这种结果一方面是由于气候条件因素所导致。根据吴序鹏等(2018)在江苏淮安地区大气污染变化特征及其与气象条件的关系中研究发现，冬春季恶劣的天气状况会导致气溶胶垂直廓线的变化非常剧烈，致使AOD与PM_{2.5}之间的关系复杂多变。蒋婕等(2018)在珠三角PM_{2.5}遥感估算区域复合模型

表 2 2014~2017 年北京市日平均数据构建多元线性回归分析统计量

Table 2 Statistics and regression equations of multivariate linear regression analysis in different seasons of 2014–2017 in Beijing City

		回归方程	R^2	相对误差	DW	是否存在自相关
原始*	春季	$54.4-3.0b+53.1c$	0.74	27.1%	1.437	是
	夏季	$31.3-1.3b+35.5c$	0.87	28.8%	0.953	是
	秋季	$30.4-0.7b+88.1c$	0.78	37.1%	1.510	是
	冬季	$105.5-6.1b+57.04c$	0.66	29.7%	1.402	是
修正**	春季	$37.9-0.7b+66.8c$	0.61	21.1%	1.934	否
	夏季	$36.8-0.5b+33.1c$	0.69	21.7%	1.846	否
	秋季	$52.4-1.6b+80.2c$	0.68	31.0%	1.880	否
	冬季	$92.1-4.4b+56.5c$	0.59	27.3%	1.893	否

* 代表初始得到的反演模型；**代表广义差分法处理后的反演模型；回归方程中 b 、 c 分别表示能见度、AOD； R^2 表示决定系数；DW表示德宾—沃森统计量值。

的研究结果可知，春季的沙尘天气导致气溶胶数据时间代表性差，AOD 数据稳定性差，增加了预测值的离散程度。而冬季污染灰霾现象频发使模型预测值分散、浮动大，故要素之间相关性差。[蒲立力等（2017）](#)用卫星遥感数据估算上海市近地面空气 PM2.5 浓度的研究结果发现，上海市 PM2.5 反演准确度与上海市大气污染有较大关系，是由季节排放及气候条件决定的。而对于北京，在春季我国西北及内蒙中部地区沙暴活动较为频繁，沙尘粒可以通过西风的输送到达其下游的北京，再加之北京春季降水偏少，导致春季沙尘天气多发。而冬季太阳辐射的加热作用较弱，北京地区在没有冷空气活动时，边界层内经常保持静稳状态，逆温比较多，而且供暖释放的气溶胶粒子尺度较小不易沉降且向上扩散，同时又是机动车人口大都市，气溶胶粒子在地面聚集滞留，灰霾现象多，因此带来的结果是春冬两季 AOD 与 PM2.5 的关系相关性差，引入能见度因子可显著提升气溶胶光学因子与气溶胶质量浓度的相性。与春冬两季相比，夏秋两季气溶胶数据相对稳定性增加、气溶胶垂直廓线变化相对均匀，AOD 与 PM2.5 之间的关系稳定（[韩永等, 2007](#); [林海峰等, 2013](#); [宋挺等, 2016](#); [郭婉臻等, 2017](#)）。因此，会导致 PM2.5 与 AOD 的相关性以及 PM2.5 反演模型统计量存在季节差异。

第二个原因是由于数据样本不平衡，部分 PM2.5 的数据值明显高于其余数据值，不同季节的数据离散程度不同，在污染较为严重的天气下，PM2.5 的数据值具有明显的跳跃性。致使利用总体数据所建立的模型对部分极端值预测不准确，相对

误差较大。根据环境空气质量标准，PM2.5 日均浓度大于或等于 $150\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，空气质量指数级别为严重污染及以上。北京夏季湿润多雨，边界层高度高，空气质量普遍较好，严重污染天数较少。而冬季边界层常处于逆温状态，供暖排放气溶胶粒子难以扩散，致使严重污染天数明显增多，空气质量较差。这会导致 PM2.5 反演模型模拟效果在各季节存在明显差异。因此我们将有效数据根据 PM2.5 浓度区分为污染日和非污染日来验证模型。

3.3 AOD 反演模型的验证

利用北京市 2014 年风速订正后的 AOD 数据、每日 06:00 至 18:00 的 PM2.5 日平均浓度及日平均能见度进行模型检验。采用全部数据即不区分污染日与非污染日的四季全部有效数据，分别计算所建立的四季模型的平均相对误差，得到结果见[表 3](#)。又根据 PM2.5 浓度是否大于 $150\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 区分为污染日和非污染日，计算建立的四季模型在污染日和非污染日的平均相对误差，结果见[表 4](#)。根据[表 3](#)，总体的平均相对误差均在 21% 至 31% 范围内，春季为 24.0%，夏季为 21.7%，秋季为 31.0%，冬季为 27.3%。[高宇潇等（2018）](#)利用 MODIS 气溶胶产品 AOD 数据和地面监测站 PM2.5、气压、温度、风向、风速和相对湿度数据建立乌鲁木齐春、夏、秋反演 PM2.5 的多元回归模型。并利用城中监测站、农科院数据进行模型检验，结果为城中监测站的春季平均相对误差为 46%，夏季为 80%，秋季为 42%。而农科院的春季平均相对误差为 51%，夏季为 61%，秋季为 33%。相比之下，本文建立的春、夏、秋季模型的相对误差显著降低，尤其是

表 3 2014~2017 年北京市全部数据模型验证结果

Table 3 Results of all the data model validation in different seasons of 2004–2017 in Beijing City

	相对误差	准确率
春季	24.0%	76.0%
夏季	21.7%	79.3%
秋季	31.0%	69.0%
冬季	27.3%	72.7%

表 4 2014~2017 年北京市分类数据模型验证结果

Table 4 Results of classified data model validation in different seasons of 2004–2017 in Beijing City

		相对误差	准确率
非污染日	春季	23.5%	76.5%
	夏季	19.9%	80.1%
	秋季	26.3%	73.7%
	冬季	26.4%	73.6%
污染日	春季	26.1%	73.9%
	夏季	25.6%	74.4%
	秋季	36.1%	63.9%
	冬季	28.1%	71.9%

夏季，准确度提高高达 58.3%、39.3%。蒲立力等（2017）利用 MODIS 气溶胶产品 AOD 数据和地面监测站 PM_{2.5}、气压、温度、风速数据，建立上海市四季估算 PM_{2.5} 的多元线性回归模型并检验，得到春季的平均相对误差为 28.74%，夏季为 29.42%，秋季为 26.83%，冬季为 22.21%。而本文所建立春季、夏季的模型更优，模型准确率更高，秋季、冬季模型准确率略低于该模型。本研究建立的 PM_{2.5} 反演模型因综合考虑了气溶胶对垂直和水平两方面的光学特征，与前人的结果相比拟合曲线的准确性得到了显著地提高。图 2a–2d 为 2014 年 PM_{2.5} 每日 06:00 至 18:00 的日平均浓度模型计算值与实测值对比图。模型计算值与实测值曲线变化趋势基本一致，拟合度较好。从整体上看，各季节 PM_{2.5} 日均浓度反演模型，对 PM_{2.5} 浓度均有不同程度的低估状况。当 PM_{2.5} 浓度较低时，反演模型低估程度小，准确程度高；当 PM_{2.5} 浓度较高时，反演模型低估程度大，准确程度低。从四季的准确率来看，夏季反演模型对 PM_{2.5} 模拟效果最好，其次是春、冬两季的反演模型，最后是秋季的反演模型。

根据表 4，各季节模型反演的平均相对误差在

非污染日明显低于同季节的污染日。从而验证了 PM_{2.5} 的反演模型在 PM_{2.5} 低浓度日的模拟效果好，对于 PM_{2.5} 高浓度日的模拟效果较差。同时，在非污染日时，模型反演的准确率存在显著性季节差异：夏季>春季>秋季>冬季。在污染日时，模型反演的准确率亦存在显著性季节差异：夏季>春季>冬季>秋季。据北京市环保局发布资料显示，2014 年全年重污染天数共为 45 天，春季为 9 天、夏季为 5 天，秋季为 16 天，冬季为 15 天。其中秋季重污染天数占比高达三分之一，故造成污染日秋季模型反演相对误差最高的原因可能是 2014 年秋季的突发性污染所致，因此反演结果的季节性差异也进一步验证了 PM_{2.5} 的反演准确率与 PM_{2.5} 浓度有关，PM_{2.5} 污染越严重，模型反演效果越差。

表 3 与表 4 对比可得，将数据区分为污染日和非污染日所建立的模型，其对非污染日的模拟效果明显优于利用全部有效数据所建模型的模拟效果，准确率更高，但对污染日的模拟效果反而更差。这充分表明了样本数据的不平衡对模型模拟效果准确率的影响。对于污染日的数据，与正常非污染日数据相比，离散程度大，数据极端值较多，跳跃性更强，所以拟合得到的模型相对误差更大。而相对变化均匀的数据所建立的模型更能代表数据的一般性变化规律，致使离散程度越小的模型准确率越高。

综上，北京市 PM_{2.5} 日均浓度反演模型模拟效果较好，误差小。且模型对低 PM_{2.5} 浓度日的模拟效果好，对于高 PM_{2.5} 浓度日的模拟效果较差。模型具有很好的应用潜力，对构建北京地区 PM_{2.5} 长期的历史数据具有重要的科学意义。

4 结论

利用 2014~2017 年北京市 AERONET 的地基数据 AOD 经过风速订正后，与同期 PM_{2.5} 浓度数据进行相关性分析，构建了利用能见度、AOD 反演 PM_{2.5} 的三元线性季节回归模型，并利用广义差分法处理该模型并分为污染日和非污染日进行模型检验，结论如下：

（1）AOD 与 PM_{2.5} 浓度在四季均存在极强的正相关性，且 AOD 与 PM_{2.5} 的线性回归模型的相关系数较高。说明二者存在明显的线性相关性，但存在着显著季节性差异：夏季>秋季>春季>冬季。

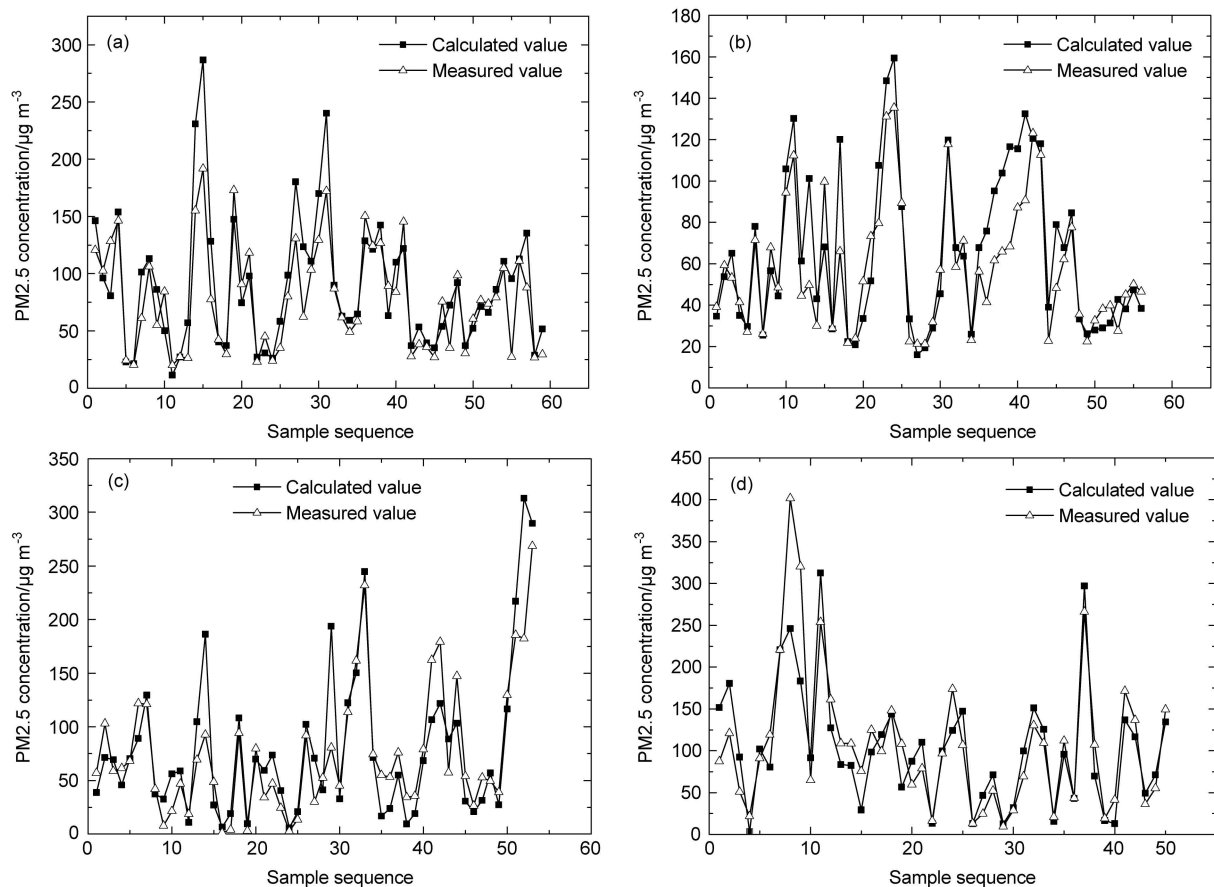


图2 2014年北京市PM_{2.5}日平均浓度模型计算值与实测值对比: (a)春季; (b)夏季; (c)秋季; (d)冬季

Fig. 2 Comparisons between calculated and measured PM_{2.5} concentrations in Beijing City in 2014: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

(2) 构建的能见度、AOD、PM_{2.5}的三元线性季节回归模型具有显著自相关, 利用广义差分法处理该模型, 与处理前相比, 自相关完全消除, 且各季节的相对误差显著降低, 准确率有所提高。与AOD直接反演PM_{2.5}的模型相比, 模型拟合优度明显提高, 且仍存在显著季节性差异: 夏季>秋季>春季>冬季。

(3) 利用2014年的数据分为非污染日及污染日进行模型检验的结果为: 各季预测准确率较高, 拟合度较好, 春夏两季预测效果高于秋冬两季。模拟结果非污染日明显优于污染日, 且PM_{2.5}污染越严重, 反演模型模拟效果越差。综上北京市PM_{2.5}日均浓度反演模型具有较好的应用潜力。

参考文献 (References)

陈辉, 厉青, 王中挺, 等. 2014. 利用MODIS资料监测京津冀地区近地面PM_{2.5}方法研究[J]. 气象与环境学报, 30(5): 27-37. Chen Hui, Li Qing, Wang Zhongting, et al. 2014. Study on monitoring surface PM_{2.5} concentration in Jing-Jin-Ji regions using MODIS

data [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30(5): 27-37.

Cordero L, Wu Y H, Gross B M, et al. 2012. Use of passive and active ground and satellite remote sensing to monitor fine particulate pollutants on regional scales [C]//Proceedings of SPIE 8366, Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies IX. Baltimore, Maryland: SPIE. doi: 10.1117/12.918765

戴一枫, 张广何, 韦旭. 2018. 中国地区AERONET站点数据的使用概述[J]. 科技创新导报, 15(6): 153-156. Dai Yifeng, Zhang Guanghe, Wei Xu. 2018. Overview of the use of AERONET site data in China [J]. Science and Technology Innovation Guide (in Chinese), 15(6): 153-156. doi:10.16660/j.cnki.1674-098X.2018.06.153

Dredge J, Fairchild I J, Harrison R M, et al. 2013. Cave aerosols: Distribution and contribution to speleothem geochemistry [J]. Quaternary Science Reviews, 63: 23-41. doi:10.1016/j.quascirev.2012.11.016

高宇潇, 刘志辉, 王敬哲. 2018. 乌鲁木齐市PM_{2.5}浓度与MODIS气溶胶光学厚度相关性分析[J]. 干旱区地理, 41(2): 298-305. Gao Yuxiao, Liu Zhihui, Wang Jingzhe. 2018. Correlation analysis of PM_{2.5} concentration and MODIS aerosol optical depth in Urumqi City [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 41(2): 298-305.

郭建平, 吴业荣, 张小曳, 等. 2013. BP网络框架下MODIS气溶胶光

- 学厚度产品估算中国东部 PM_{2.5} [J]. 环境科学, 34(3): 817–825.
- Guo Jianping, Wu Yerong, Zhang Xiaoye, et al. 2013. Estimation of PM_{2.5} over eastern China from MODIS aerosol optical depth using the back propagation neural network [J]. Environmental Science (in Chinese), 34(3): 817–825.
- 郭婉臻, 夏楠, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 2017. 基于 AOD 数据的新疆大型露天煤炭开采区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 反演 [J]. 农业工程学报, 33(19): 216–222.
- Guo Wanzhen, Xia Nan, Tashpolat Tiyp, et al. 2017. Inversion of PM_{2.5} and PM₁₀ content based on AOD data in large opencast coal mining area of Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (in Chinese), 33(19): 216–222. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.028
- Guo Y J, Feng N, Christopher S A, et al. 2014. Satellite remote sensing of fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality over Beijing using MODIS [J]. Int. J. Remote Sens., 35(17): 6522–6544. doi:10.1080/01431161.2014.958245
- Gupta P, Christopher S A. 2008. Seven year particulate matter air quality assessment from surface and satellite measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8(12): 3311–3324. doi:10.5194/acp-8-3311-2008
- 韩永, 饶瑞中, 王英俭. 2007. 利用大气能见度获取多波长气溶胶光学特性 [J]. 红外与激光工程, 36(2): 265–269.
- Han Yong, Rao Ruizhong, Wang Yingjian. 2007. Multi-wavelength aerosol optical characteristics obtained by atmospheric visibility [J]. Infrared and Laser Engineering (in Chinese), 36(2): 265–269. doi:10.3969/j.issn.1007-2276.2007.02.031
- Hu X F, Waller L A, Al-Hamdan M Z, et al. 2013. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the southeastern U.S. using geographically weighted regression [J]. Environ. Res., 121: 1–10. doi:10.1016/j.envres.2012.11.003
- 黄印博, 黄红莲, 韩永, 等. 2007. 合肥、东南沿海地区气溶胶光学特性测量及模式分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2(6): 423–433.
- Huang Yinbo, Huang Honglian, Han Yong, et al. 2007. Measurement and model analysis of the aerosol optical properties in the regions of Hefei and southeast coast [J]. Journal of atmospheric and Environmental Optics (in Chinese), 2(6): 423–433. doi:10.3969/j.issn.1673-6141.2007.06.003
- 蒋婕, 洪松, 郭阳洁. 2018. 珠三角 PM_{2.5} 遥感估算区域复合模型研究 [J]. 生态经济, 34(6): 155–162.
- Jiang Jie, Hong Song, Guo Yangjie. 2018. Satellite remote sensing to build the PM_{2.5} estimating model in the pearl river delta region [J]. Ecological Economy (in Chinese), 34(6): 155–162.
- Just A C, Wright R O, Schwartz J, et al. 2015. Using high-resolution satellite aerosol optical depth to estimate daily PM_{2.5} geographical distribution in Mexico City [J]. Environ. Sci. Technol., 49(14): 8576–8584. doi:10.1021/acs.est.5b00859
- Kloog I, Nordio F, Coull B A, et al. 2012. Incorporating local land use regression and satellite aerosol optical depth in a hybrid model of spatiotemporal PM_{2.5} exposures in the Mid-Atlantic states [J]. Environ. Sci. Technol., 46(21): 11913–11921. doi:10.1021/es302673e
- Kumar N, Chu A, Foster A. 2007. An empirical relationship between PM_{2.5} and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan [J]. Atmos. Environ., 41(21): 4492–4503. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.01.046
- 李放, 吕达仁. 1996. 北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征 [J]. 大气科学, 20(4): 385–394.
- Li Fang, Lü Daren. 1996. The mid-long term features of atmospheric aerosol optical depths over Beijing area [J]. Atmospheric Science (in Chinese), 20(4): 385–394. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.04.01
- 李星敏, 董自鹏, 陈闯, 等. 2014. 陕西关中气溶胶对大气能见度的影响研究 [J]. 高原气象, 33(5): 1289–1296.
- Li Xingmin, Dong Zipeng, Chen Chuang, et al. 2014. Study of influence of aerosol on atmospheric visibility in Guanzhong region of Shaanxi province [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(5): 1289–1296.
- 林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 2013. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究 [J]. 环境科学, 34(3): 826–834.
- Lin Haifeng, Xin Jinyuan, Zhang Wenyu, et al. 2013. Comparison of atmospheric particulate matter and aerosol optical depth in Beijing City [J]. Environmental Science (in Chinese), 34(3): 826–834.
- 刘爱霞, 韩素芹, 姚青, 等. 2013. 2011 年秋冬季天津 PM_{2.5} 组分特征及其对能见度的影响 [J]. 气象与环境学报, 29(2): 42–47.
- Liu Aixia, Han Suqin, Yao Qing, et al. 2013. Characteristics of chemical composition of PM_{2.5} and its effect on visibility in autumn and winter of 2011 in Tianjin [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 29(2): 42–47. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.02.007
- Nguyen T N T, Ta V C, Le T H, et al. 2014. Particulate matter concentration estimation from satellite aerosol and meteorological parameters: Data-driven approaches [M]//Huynh V N, Denoeux T, Tran D H, et al. Knowledge and Systems Engineering. Cham: Springer, 351–362. doi:10.1007/978-3-319-02741-8_30
- Pope III C A. 2000. Review: Epidemiological basis for particulate air pollution health standards [J]. Aerosol Science and Technology, 32(1): 4–14. doi:10.1080/027868200303885
- Pope III C A, Dockery D W. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 56(6): 709–742. doi:10.1080/10473289.2006.10464485
- 蒲立力, 朱涵, 袁东, 等. 2017. 利用卫星遥感数据估算上海市近地面空气 PM_{2.5} 浓度的探索 [J]. 环境与职业医学, 34(2): 99–105.
- Pu Lili, Zhu Han, Yuan Dong, et al. 2017. Application of satellite remote sensing to ground-level PM_{2.5} concentration estimation in Shanghai [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine (in Chinese), 34(2): 99–105. doi:10.13213/j.cnki.jeom.2017.16271
- 任团伟, 郭照冰, 刘唯佳. 2015. 2009–2011 年北京地区大气气溶胶光学特性季节变化规律研究 [J]. 环境化学, 34(12): 2239–2247.
- Ren Tuanwei, Guo Zhaobing, Liu Weijia. 2015. Seasonal variation of atmospheric aerosol optical properties in Beijing during 2009–2011 [J]. Environmental Chemistry (in Chinese), 34(12): 2239–2247.
- Shank L M, Howell S, Clarke A D, et al. 2012. Organic matter and non-refractory aerosol over the remote Southeast Pacific: Oceanic and combustion sources [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12(1): 557–576. doi:10.5194/acp-12-557-2012
- 宋挺, 刘军志, 胡婷婷, 等. 2016. MODIS 气溶胶光学厚度产品和激光

- 雷达数据在大气颗粒物监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 31(2): 397–404. Song Ting, Liu Junzhi, Hu Tingting, et al. 2016. Application of atmospheric particles monitoring based on MODIS Aerosol optical thickness products and laser radar [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 31(2): 397–404.
- Song W Z, Jia H F, Huang J F, et al. 2014. A satellite-based geographically weighted regression model for regional PM_{2.5} estimation over the Pearl River Delta region in China [J]. Remote Sensing of Environment, 154: 1–7. doi:10.1016/j.rse.2014.08.008
- Song Y Z, Yang H L, Peng J H, et al. 2015. Estimating PM_{2.5} concentrations in Xi'an City using a generalized additive model with multi-source monitoring data [J]. PLoS One, 10(11): e0142149. doi:10.1371/journal.pone.0142149
- Sorek-Hamer M, Strawa A W, Chatfield R B, et al. 2013. Improved retrieval of PM_{2.5} from satellite data products using non-linear methods [J]. Environmental Pollution, 182: 417–423. doi:10.1016/j.envpol.2013.08.002
- Strawa A W, Chatfield R B, Legg M, et al. 2013. Improving retrievals of regional fine particulate matter concentrations from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Ozone Monitoring Instrument (OMI) multisatellite observations [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 63(12): 1434–1446. doi:10.1080/10962247.2013.822838
- 王家成, 朱成杰, 朱勇, 等. 2015. 北京地区多气溶胶遥感参量与 PM_{2.5} 相关性研究 [J]. 中国环境科学, 35(7): 1947–1956. Wang Jiacheng, Zhu Chengjie, Zhu Yong, et al. 2015. Correlation between remote sensing aerosol parameters and PM_{2.5} in Beijing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 35(7): 1947–1956. doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2015.07.005
- 王珏, 石统一. 2003. 机器学习研究 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 21(2): 1–15. Wang Jue, Shi Chunyi. 2003. Investigations on machine learning [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition) (in Chinese), 21(2): 1–15. doi:10.3969/j.issn.1001-6600.2003.02.001
- 王伟齐, 臧增亮, 宋彬, 等. 2016. 北京地区不同时段平均 PM_{2.5} 浓度与 MODIS 气溶胶光学厚度相关性分析 [J]. 环境科学学报, 36(8): 2794–2802. Wang Weiqi, Zang Zengliang, Song Bin, et al. 2016. Correlation between averaged PM_{2.5} concentrations and MODIS aerosol optical depth during different periods in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 36(8): 2794–2802. doi:10.13671/j.hjkxxb.2015.0743
- 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 2007. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降 [J]. 热带气象学报, 23(1): 1–6. Wu Dui, Deng Xuejiao, Bi Xueyan, et al. 2007. Study on the visibility reduction caused by atmospheric Haze in Guangzhou area [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23(1): 1–6. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.01.001
- 吴序鹏, 刘端阳, 谢真珍, 等. 2018. 江苏淮安地区大气污染变化特征及其与气象条件的关系 [J]. 气象与环境科学, 41(1): 31–38. Wu Xupeng, Liu Duanyang, Xie Zhenzhen, et al. 2018. Change characteristics and relationship with meteorological conditions of atmospheric pollution in Huai'an [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 41(1): 31–38. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2018.01.004
- 吴奕霄, 银燕, 顾雪松, 等. 2014. 南京北郊大气气溶胶的吸湿性观测研究 [J]. 中国环境科学, 34(8): 1938–1949. Wu Yixiao, Yin Yan, Gu Xuesong, et al. 2014. An observational study of the hygroscopic properties of aerosols in north suburb of Nanjing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 34(8): 1938–1949.
- Xiao Q Y, Ma Z W, Li S S, et al. 2015. The impact of winter heating on air pollution in China [J]. PLoS One, 10(1): e0117311. doi:10.1371/journal.pone.0117311
- Xin J Y, Wang L L, Wang Y S, et al. 2011. Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in Northeast China from 2004 to 2010 [J]. Atmos. Environ., 45(35): 6317–6325. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.08.052
- 晏利斌, 刘晓东. 2009. 京津冀地区气溶胶季节变化及与云量的关系 [J]. 环境科学研究, 22(8): 924–931. Yan Libin, Liu Xiaodong. 2009. Seasonal variation of atmospheric aerosol and its relation to cloud fraction over Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 22(8): 924–931.
- Yao H, Ni X C, Wang X, et al. 2015. The relevant research on AOD and concentration of PM_{2.5} pollutant [C]//Proceedings of SPIE 9521, Selected Papers from Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics 2014, Part I. China: SPIE. doi:10.1117/12.2087590
- 赵胡笳, 马雁军, 王扬锋, 等. 2015. 沈阳大气气溶胶光学特性及其影响因素 [J]. 气象与环境学报, 31(3): 43–49. Zhao Hujia, Ma Yanjun, Wang Yangfeng, et al. 2015. Aerosol optical characteristics and its influencing factor over Shenyang [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 31(3): 43–49.
- Zheng S, Pozzer A, Cao C X, et al. 2015. Long-term (2001–2012) concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) and the impact on human health in Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(10): 5715–5725. doi:10.5194/acp-15-5715-2015