doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.01.013

安徽省遥感监测 AOD 时空变化与城市化影响

潘建平[1]，程卫华[1*]，付占宝[1]，李　鑫[1]，黄桂萍[1]，崔　伟[1]，蔡卓言[1]，李鹏霞[1]
（1. 重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400041）

摘　要：针对目前气溶胶反演大都只在较大区域上定性分析其时空变化的问题，结合城市化影响因子，定量分析了城市化背景下 AOD 的主要影响因素。首先采用暗像元法对 AOD 进行反演，然后通过测算 3—9 月的 AOD 均值分析 AOD 空间分布特征和时间变化规律，最后分析表征城市化的因子与 AOD 分布之间的关系。结果表明：①5 月、6 月、8 月、9 月的 AOD 值偏低，3 月、4 月、7 月的 AOD 值偏高；②AOD 由北向南呈高、高、低的趋势，AOD 在皖南的数值明显偏低；③MODIS_1 km 数据反演的 AOD 与地面实测数据结果基本一致，相关系数为 0.823；④研究区 AOD 与常住人口密度、不透水面覆盖率以及工业企业数量呈正相关关系，表明城市化对 AOD 时空分布影响较大。

关键词：AOD；MODIS 影像；时空变化分析；城市化
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）01-0064-05

Spatio-temporal Changes of AOD and Urbanization Impact in Anhui Province Monitored by Remote Sensing

PAN Jianping[1], CHENG Weihua[1], FU Zhanbao[1], LI Xin[1], HUANG Guiping[1], CUI Wei[1], CAI Zhuoyan[1], LI Pengxia[1]
(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400041, China)

Abstract: In view of the current problem that aerosol inversion only qualitative analyzing the spatio-temporal changes in a large area, we quantitative analyzed the main influencing factors of AOD under the background of urbanization combined with urbanization impact factors. Firstly, we used the dense vegetation method to invert AOD. Then, we analyzed the spatial distribution characteristics and temporal change of AOD by measuring the average value of AOD from March to September. Finally, we analyzed the relationship between the factors representing urbanization and AOD distribution. The results showed that ①AOD values in May, June, August and September were low, while AOD values in March, April and July were high. ②AOD showed a trend of high, high and low from north to south, and AOD value in southern Anhui was obviously lower. ③AOD inverted by MODIS_1 km data was basically consistent with the ground measured data, and the correlation coefficient was 0.823. ④There was a positive correlation between AOD and resident population density, impervious water coverage and the number of industrial enterprises in the study area, indicating that urbanization had a great impact on the spatio-temporal distribution of AOD.

Key words: AOD, MODIS image, spatio-temporal change analysis, urbanization

悬浮于大气中的尺度范围约在 0.001~10 μm 之间的固体和液体微小粒子被称作气溶胶[1]。虽然含量少，但作为污染载体和污染媒介，其在大气化学或大气环境污染中却具有重要作用[2-3]。气溶胶光学厚度（AOD）的定义为垂直方向上介质的消光系数积分，可描述气溶胶对光的消减作用，也是代表大气浑浊程度的关键物理量，是确定气溶胶气候效应的重要因素。目前，遥感技术是 AOD 反演的重要手段，主要分为两种：①地基遥感反演，通过建立地面基站来测量 AOD，该方法结果准确，成本极高，地面基站难以做到全面覆盖，因此地面基站数据一般用来订正和对比反演结果，如张晗[4]等利用地面基站观测 AOD 数据订正 MODIS 反演结果，提高了四川盆地地区 $PM_{2.5}$ 的反演精度，郑玉蓉[5]等利用 CE-318 太阳光度计观测数据验证了 MODIS 反演结果的精度，相关系数达到 0.973；②基于遥感影像的 AOD 反演，该方法精度稍低，但具有实时性、连续性强、覆盖范围广等优势，如刘超[6]对 NASA 发布的气溶胶产品进行融合，分析了整个中国地区的 AOD 时空分布情况；施益强[7]等分析了 AOD 反演结果与 $PM_{2.5}$ 数据的相关关系，证明 AOD 可用于预测大气中的颗粒物污染。

近年来，国内外学者研究 AOD 对环境气候的影响

收稿日期：2021-10-15。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41801394）；重庆市规划和自然资源科技资助项目（KJ-2020042）；重庆市自然科学基金面上资助项目（cstc2019jcyj-msxmX0548）。
（*为通信作者）

时，大多只分析了所在区域时间和空间上的变化规律，且很大程度上是在较大区域的定性分析，对于AOD的定量分析较少。城市化进程的加快，对AOD的分布造成了很大影响，因此本文利用2016—2018年21个月的MODISL1B_1 km数据定量反演了安徽省的AOD，并对其进行时空分析；再研究了AOD与常住人口密度、不透水面覆盖率、工业企业数量等城市化影响因子之间的关系，得到在城市化背景下AOD的主要影响因素。

1　研究区概况

安徽省地理位置优越，地处我国东部、长江下游、淮河中游，介于114°54′~119°37′E、29°41′~34°38′N之间，与江苏、河南、湖北、浙江、江西、山东等省接壤，包括17个地级市、101个区县，总面积为14.01万km^2。省内地形较复杂，皖北、皖中地区以平原丘陵为主，皖南地区以低山为主，属于台地地形，总体南高北低。以长江、淮河为界，将安徽省分为淮北平原、江淮丘陵、皖南山区三大自然区域[8]，天气湿度较好，大部分地区上空空气湿度较大，为气溶胶的产生提供了充足的水分条件，近地面常出现逆温现象且地面风速小，大气垂直运动受到阻碍，不利于污染物扩散，从而导致重雾—霾天气频发。

2　数据来源

MODISL1B_1 km数据是MODIS系列数据产品中的二级产品，产品ID为MOD02。本文下载研究区2016—2018年的3—9月云量覆盖较少的影像数据，并对其进行预处理，再进行AOD反演。地面实测AOD数据来自NASA官方发布的AERONET站点数据，采用该数据对反演结果进行精度验证。MODIS传感器上搭载的Terra星观测结果绘制的地形数据称为GDEM，空间分辨率可达30 m，经过处理可对研究区内空间分布和地形变化进行更直观的分析与讨论。分析数据选取能表现城市化进程的相关数据，包括常住人口密度、不透水面覆盖率、工业企业数量，人口数据和工业企业数量均来自安徽省统计局统计年鉴，由于数据限制，本文人口数量采用101个区县的数据，工业企业数量采用17个地级市的数据；不透水面数据来自LIU H[9]等提供的全球不透水面数据集GAIA，该数据给出了准确的不透水面信息。

3　技术流程设计

3.1　反演方法

目前，气溶胶反演工作中最常用的方法是暗像元法，也叫浓密植被法。暗像元是指在遥感影像上看起来很暗的区域，该处地物对可见光吸收能力强、反射能力弱。相关研究显示，气溶胶会影响暗像元地物的辐射亮度，AOD越大，辐射亮度增强越明显，二者之间呈正相关关系。利用这种关系反演AOD的方法称为暗像元法。如何判定暗像元是利用该方法反演AOD的核心，当前理论认为大多数地物在红光、蓝光波段反射率较低，再结合归一化植被指数（NDVI）或近红外通道的表观反射率即可识别出暗像元。Kaufman Y J[10]等通过大量试验研究，拟合得到3个不同区域波段与地表之间的关系，分别为蓝光波段（0.47 μm）、红光波段（0.66 μm）和中红外波段（2.1 μm）。其关系式为：

$$\rho_{红}=\frac{\rho^{*}_{2.1}}{2}，\quad \rho_{蓝}=\frac{\rho^{*}_{2.1}}{4}$$

式中，$\rho_{红}$和$\rho_{蓝}$分别为红光和蓝光通道的地表反射率。

3.2　技术路线设计

首先对原始数据进行预处理，并采用暗像元法反演AOD；再采用NASA提供的地面站点实测AOD数据与反演结果数据进行对比，验证反演结果的精度；然后分别统计每个月的AOD均值，并对其进行排序，用于后续相关性分析工作；最后根据对应地区AOD值的大小对表征城市化因子数据进行分级处理，分析不同等级因子对AOD的影响。技术路线如图1所示。

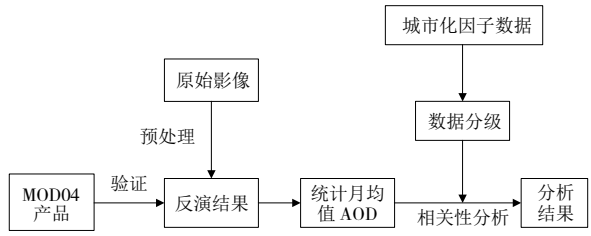


图1　技术路线

4　AOD反演实验及其时空分析

4.1　反演实验

由于NASA官方发布的气溶胶产品的空间分辨率较低（分别为3 km和10 km），且缺失值较多，对于研究区内城市化对AOD的影响有很大的局限性，因此挑选研究区内无云或少云的MODISL1B_1 km数据进行反演，提高了反演结果的空间分辨率和数值连续性，

也减少了缺失值对研究结果的影响，使结论更加具有说服力。

数据预处理工作主要包括对MODISL1B_1km数据进行去除蝴蝶结效应、几何校正、波段合成、裁剪等，反演结果如图2所示，AOD月均值统计结果如表1所示。

表1 月均值统计数据

月份	AOD月均值
3	0.67
4	0.72
5	0.64
6	0.35
7	0.65
8	0.65
9	0.56

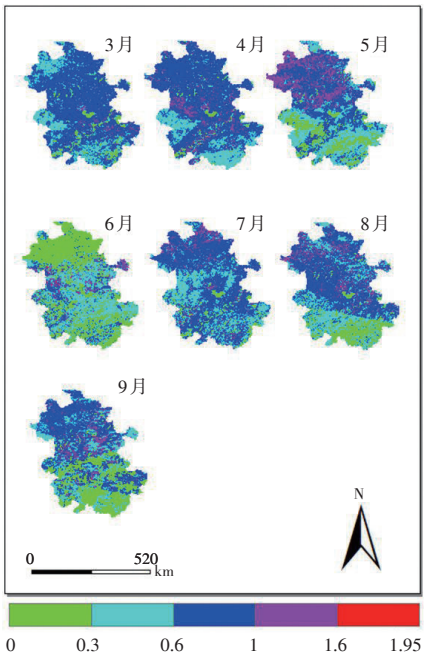


图2 反演结果

4.2 精度验证

NASA在各国不同区域建立了600个气溶胶自动监测站点，其监测得到的地面实测数据通常被用来验证遥感反演得到的气溶胶数据的精度。安徽省分布着3个监测站点（阜阳、寿县、合肥），由于在本文研究时段内站点数据缺失一个月，因此利用收集到的20组实测数据与反演数据进行相关性分析。此外，MODIS反演的结果为550 nm处的AOD，而站点数据则为340~1 640 nm不等，无550 nm处的AOD，考虑到准确性，本文采用国际上AOD波段与Angstrom指数之间的函数关系[11]，通过线性拟合得到550 nm处的AOD值，拟合公式为：

$$AOD_{550\,nm}=AOD_{500\,nm}\left(\frac{550}{500}\right)^{-\alpha}$$

式中，α为Angstrom指数。

通过遥感影像反演得到的气溶胶数据与地面实测气溶胶数据的相关性分析结果如图3所示，可以看出，二者呈现显著的相关性，相关系数达到0.823，由此可以得出结论，基于MODIS影像反演的AOD数据可用于对安徽省的研究。

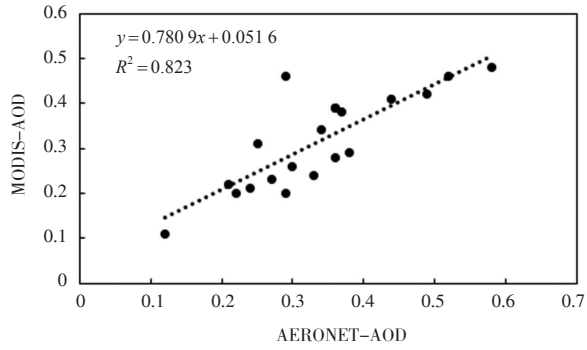


图3 实测数据与反演数据的相关性分析结果

4.3 AOD时空变化分析

4.3.1 AOD空间分布特征

总体来讲，安徽省AOD分布特征较为明显，低AOD区（0~0.3）多分布于皖南山区，由于该区域海拔较高、受人为污染影响较小，且其他区域产生的气溶胶颗粒不易向高处扩散，使得区域内AOD值偏低；而中高AOD区（0.6~1.6）多分布于皖北平原、皖中以及沿江地区，由于皖北平原地势较平坦，且经济发展主要依靠农业和煤矿业，主要气溶胶污染源为农业燃烧和粉尘，马鞍山一带经济发展以工业为主，产生大量NO_2、SO_2等污染气体，因此该区域AOD值普遍偏高，这也表明气溶胶分布受局部排放源的影响很大，分布特征与城市规划发展战略相符合；沿江地区AOD值较高，其原因在于该区域空气湿度大，大气的垂直或水平运动导致气溶胶沉降堆积或水平输送扩散，生成气溶胶的化学反应也会相应增强。

4.3.2 AOD时间分布特征分析

AOD各区间占比如表2所示，可以看出，安徽省AOD普遍处于中等水平（0.6~1），3—5月污染较严重的原因在于上海、江苏、浙江等地经济发达，工业生产产生的大量污染气体在风的作用下输入安徽省，导致污染加剧，其次安徽省距离东部沿海地区较近，在沿海到内陆的季风作用下，也会导致研究区内气溶胶浓度升高；6月降水较频繁，无论是气流对气溶胶的扩散作用还是降水对气溶胶的湿沉降作用，都会导致气溶胶浓度的降低；7—9月天气炎热，汽车尾气、空

调排放等污染物激增，且由于安徽省是农业大省，农作物丰收伴随而来的是农作物秸秆的焚烧，导致夏秋之交的AOD值偏高。

表2　AOD各区间所占百分比/%

AOD区间	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
0~0.3	3.02	1.85	8.09	24.73	3.07	7.34	14.29
0.3~0.6	12.9	11.56	17.05	19.99	16.79	15.70	13.74
0.6~1.0	37.5	36.84	19.62	6.83	31.38	25.68	22.20
1.0~1.6	1.6	4.65	10.21	3.32	3.73	6.17	4.7
1.6~1.95	0.00	0.00	0.00	0.13	0.02	0.03	0.01

5　AOD与城市化的关系

5.1　AOD城乡差异分析

本文利用GAIA城市边界数据对城市地区和农村地区进行划分，分别统计各地区的平均值（图4），可以看出，除3月外，其他月份均为城市AOD值大于农村AOD值，3月这一城乡差异现象也说明了人类异常活动和突发因素的存在，各月份城乡差值依次为–0.33、0.07、0.16、0.92、0.38、0.17、0.33。

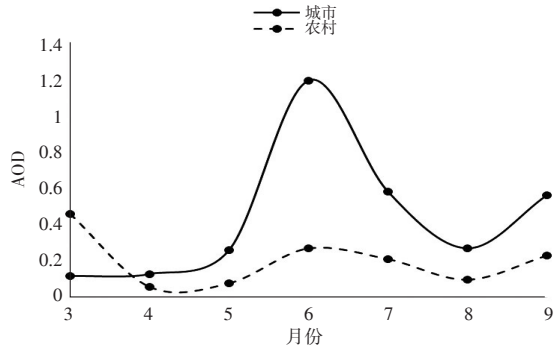


图4　城区与非城区AOD变化

5.2　AOD与城市化表征因子的关系

本文选取的表征城市化进程的因子包括各地级市的常住人口数量、不透水面面积以及工业企业数量，分别计算并统计各影响因子在对应区县的数据和AOD值，以此来量化比较AOD与各种因素的相关性，探究城市化对AOD的影响。常住人口数量对一个地区的城市化水平起到决定性作用，统计分析显示，安徽省2016—2018年的人口增长率分别为7.06%、8.17%、6.45%。不透水面覆盖率在城市化进程中也至关重要，安徽省17个地级市2010年与2018年的不透水面总面积分别为3 304 km^2和6 440 km^2，增长率为12.6%，各地级市不透水面面积存在明显差异。通过统计17个地级市工业企业数量发现，中部和南部各区县的工业企业数量多于北部区县，这主要是由于这些地区位条件优越，交通便利。

本文首先分别计算研究区101个区县的常住人口密度、不透水面覆盖率以及17个地级市工业企业分布数量；然后将常住人口密度和不透水面覆盖率分为5个等级，工业企业数量分为4个等级，为保证每个等级至少含有两个区县数据，采用平均分配的方式进行等级划分，进一步计算不同的因子等级对AOD产生的影响。

5.2.1　常住人口密度与AOD的关系

常住人口密度每个等级所含的区县个数为20、20、20、20、21，5个等级分别为0.01~0.03、0.03~0.04、0.04~0.05、0.05~0.09、0.09~0.53；利用单因素方差分析法对该组数据进行分析，利用Fisher最小显著性差异检验各分组间的差异，利用皮尔逊相关系数度量二者的相关程度。

结果显示，常住人口密度与AOD之间呈正相关关系，$R^2=0.729$，如图5所示，且不同人口等级之间存在显著差异性（$F=3.8$、$P<0.05$），如0.01~0.03等级的AOD值小于后4个等级的AOD值。

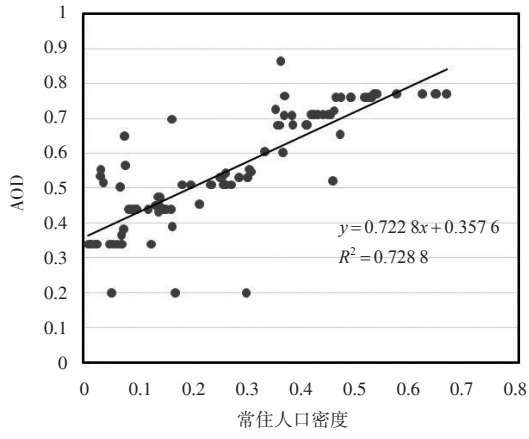


图5　AOD与常住人口密度的相关性分析

5.2.2　不透水面覆盖率与AOD的关系

不透水面覆盖率每个等级所含的区县个数为20、20、20、20、21，5个等级分别为0.004~0.039、0.044~0.096、0.103~0.157、0.157~0.227、0.236~0.631；分析方法与常住人口密度分析方法相同。结果显示，不透水面覆盖率与AOD之间也成正相关关系，$R^2=0.78$，如图6所示，且不同不透水面覆盖率等级之间存在显著差异性（$F=15.829$、$P<0.05$），如0.004~0.039、0.044~0.096两个等级的AOD值小于后3个等级的AOD值。

5.2.3　工业企业数量与AOD的关系

工业企业数量每个等级所包含的地级市个数为4、4、4、5，4个等级分别为16~43、43~67、69~

95、131~309；分析方法与常住人口密度和不透水面覆盖率分析方法相同。结果显示，工业企业数量与AOD之间也呈正相关关系，$R^2=0.722$，如图7所示，且不同等级之间差异明显（$F=6.492$、$P<0.05$），如16~43、43~67两个等级的AOD值明显小于后两个等级的AOD值。

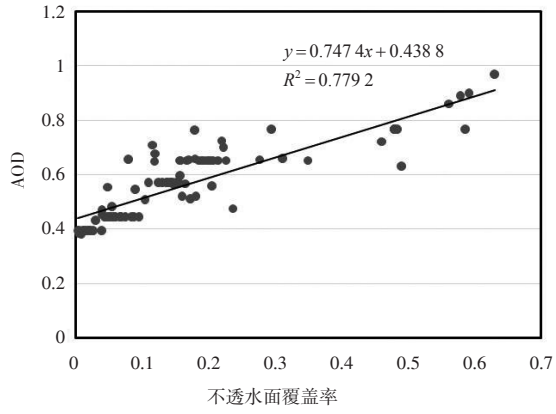


图6 AOD与不透水面覆盖率的相关性分析

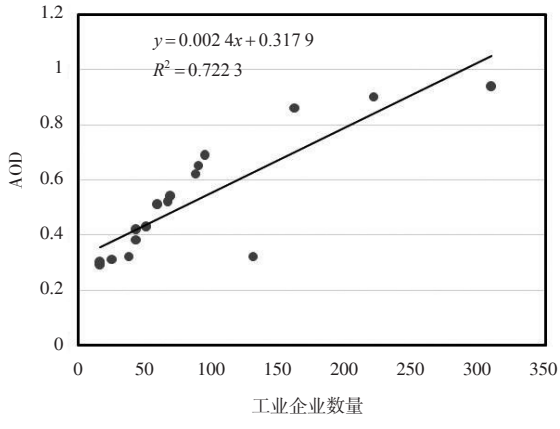


图7 AOD与工业企业数量的相关性分析

6 结 语

本文采用暗像元法对安徽省2016—2018年3—9月的MODIS影像进行反演，并进行时空分析，再引入城市化因子定量分析其对AOD分布的影响。

1）采用MODISL1B_1 km数据反演AOD，反演结果的精度$R^2=0.823$，结果较可靠，该数据可用于大气污染研究。

2）反演结果与城市规划发展战略和局部排放污染源相吻合，人类活动少的区域AOD偏低，工业企业分布较密集的区域AOD偏高，表明反演结果合理。

3）安徽省AOD具有较明显的月际变化特征，AOD月均值在0.3~0.7之间浮动，呈V型曲线上升。

4）研究区的常住人口密度、不透水面覆盖率和工业企业数量均与AOD呈正相关关系，且不同等级之间存在显著性差异，表明城市化进程加快确实对大气环境有一定的负面影响。

参考文献

[1] 王贺，曹念文，王鹏，等. 南京地区大气气溶胶综合观测与对比分析[J]. 遥感学报，2017，21(1)：125-135

[2] Haywood J，Boucher O. Estimates of the Direct and Indirect Radiative Forcing Due to Tropospheric Aerosols: A Review[J]. Reviews of Geophysics，2000，38(4)：513-543

[3] Scott C E，Arnold S R，Monks S A，et al. Substantial Large-scale Feedbacks Between Natural Aerosols and Climate[J]. Nature Geoscience，2018，11：44-48

[4] 张晗，王式功，辛金元，等. 基于地基观测订正的MODIS AOD反演四川盆地PM2. 5时空分布特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2019，55(5)：611-615

[5] 郑玉蓉，王旭红，张秀，等. 基于Landsat数据的关中盆地腹地AOD时空格局及城市化对其影响[J]. 环境科学，2021，42(6)：2 699-2 712

[6] 刘超. 中国地区MODIS气溶胶产品精度验证及融合产品改进[D]. 焦作：河南理工大学，2019

[7] 施益强，陈炯烽，王坚，等. 厦门市MODIS气溶胶光学厚度与$PM_{2.5}$的时空特征及其相关性[J]. 大气与环境光学学报，2020，15(5)：334-346

[8] 郑玉林，高本华. 中国人口(安徽分册)[M]. 北京：中国财政经济出版社，1987

[9] LIU H，GONG P，WANG J，et al. Annual Dynamics of Global Land Cover and Its Long-term Changes from 1982 to 2015[J]. Earth System Science Data，2020，12(2)：1 217-1 243

[10] Kaufman Y J，Wald A E，Remer L A，et al. The MODIS 2.1-μm Channel-correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，1997，35(5)：1 286-1 298

[11] Prasad A K，Singh R P. Comparison of MISR-MODIS Aerosol Optical Depth over the Indo-Gangetic Basin During the Winter and Summer Seasons(2000-2005) [J]. Remote Sensing of Environment，2007，107(1/2)：109-119

第一作者简介：潘建平（1976—），博士，教授，硕士生导师，主要研究方向为摄影测量与遥感。