

湖北省气溶胶光学厚度时空分布特征研究

郭阳洁¹ 洪松¹ 庄艳华¹ 冯楠²

(1 武汉大学资源与环境科学学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 阿拉巴马汉茨维尔大学大气科学系,AL 35805,美国)

摘要:利用 MODIS 遥感数据反演湖北省 2003~2008 年气溶胶光学厚度(AOD)数据,研究了 AOD 平均值的空间分布与时间变化特征;利用自组织映射(SOM)模型与线性模型,分析了湖北省 AOD 与人口密度、人均工业产值、森林覆盖率之间的关系。结果表明,在空间分布上,AOD 高值区主要位于地势较低、人口密度较大、人均工业产值较高、森林覆盖率较低的湖北中南部;AOD 次高值、低值区位于地势较高、人口密度较小、人均工业产值较低、森林覆盖率较高的湖北西部、东北部和东南部,对高值区呈环绕之势。在时间变化上,AOD 年均值呈逐年增加的趋势;四季均值及细粒比分布存在明显差异;月平均值在冬春、春夏之交分别呈上升与下降趋势。在 AOD 时空分布的影响因素上,SOM 模型与线性模型分析结论一致,AOD 分布与人口密度、人均工业产值呈正相关,与森林覆盖率呈负相关。

关键词:气溶胶;空间分布;时间变化;自组织映射(SOM)

中图法分类号:P237.9

大气气溶胶的辐射强度对大气环境、全球气候有重要影响,目前已成为国际大气科学领域最热点、最前沿的研究方向之一^[1]。由于气溶胶的寿命短、来源广泛、性质多变,其分布呈空间差异和时间变化^[2],因此,详细了解气溶胶时空分布的需求极为迫切^[3]。利用卫星遥感技术研究气溶胶,可弥补一般地面观测难以反映气溶胶大尺度时间分布的不足^[2],也是国际研究趋势之一^[4]。已有研究表明,大气气溶胶的空间分布与地形地貌、气象条件、人口密度、社会经济活动等因素密切相关^[2,5]。已有学者对于中国大气气溶胶光学厚度(aerosol optical depth,AOD)进行了研究,但影响 AOD 分布的因素一般只停留于对比及描述性分析,缺乏直观定量的研究^[5,6]。现代神经网络技术及计算机软件的发展为直观反映变量之间的相关性提供了可能,如自组织映射(self-organizing maps,SOM)^[7]。本文利用 MODIS 遥感资料反演了湖北省 2003~2008 年间的气溶胶光学厚度数据,研究了其时空分布规律,利用 SOM 模型实现 AOD 空间分布与人口密度、人均工业总产值、森林覆盖率之间相关性的可视化,并在此基础上结合线性相关和线性回归拟合

方法对上述因素进行 AOD 影响的定量分析。

1 研究方法

1.1 MODIS 气溶胶数据获取与处理

本研究的气溶胶卫星遥感数据来自 NASA 发布的 Aqua 卫星 MODIS/Level 2 C005 气溶胶数据产品(0.47~2.13 μm)。从 NASA 官网下载 2003~2008 年的 Granule 气溶胶数据文件 MYD04_L2,空间分辨率为 10 km \times 10 km,选用大值合成法(maximum value composition,MVC)筛选同一天不同时段的数据。根据文献中的陆地气溶胶光学厚度具体反演算法^[8],自编程序进行运算。选取 0.55 μm 波长处的气溶胶光学厚度和细粒子百分比,按湖北省陆地边界(E108°~117°,N29°~34°)切割图片,生成 6 a 共 2 192 d 的数据图。对气溶胶日数据进行月平均,得到 2003~2008 年(72 个月)湖北省气溶胶 AOD 和细粒比 η 的月平均栅格图各 72 幅。

将月均栅格图按季节平均,得到各年份季平均图各 4 幅;按所有月份平均,得到历年 AOD 年

平均值分布图及多年平均值分布图,并结合细颗粒比计算得到细颗粒和粗颗粒分布图。根据月平均栅格图得到全省各月 AOD 和 η 的平均值,进行时间序列分析。

1.2 SOM 模型分析

1.2.1 数据预处理

为便于统计,以县域单位为基础,经适当调整合并,将湖北省共划分为 79 个研究单元。将 2007 年湖北省 AOD 平均分布的栅格数据按研究单元进行空间统计,得到各区域 AOD 年平均值。根据影响 AOD 空间分布的因素^[6,9],选取人口密度、人均工业产值和森林覆盖率 3 个指标作为分析变量。2007 年各研究单元内的人口密度、人均工业产值数据取自《湖北统计年鉴 2008》^[10],森林覆盖率数据取自《湖北省地图集》^[11]。

将以上变量作为模型的输入矢量,需进行正态验证,以增强模型算法的性能^[12]。若不符合正态分布,则进行正态转化。剔除离群值后,经 Kolmogorov-Smirnov 检验,湖北省 AOD、人口密度、森林覆盖率数据近似服从正态分布,人均工业产值进行对数转化后,也通过 Kolmogorov-Smirnov 检验呈正态分布(SPSS 15.0)。

1.2.2 SOM 模拟方法

SOM 模拟基于 Matlab 7.1 软件,利用 SOM 工具箱实现^[13-15]。训练过程中,学习率和邻域函数、邻域半径均采用默认值。

1.2.3 SOM 模拟结果

通过模拟得到 SOM 模型的可视化结果图,可用于分析各输入变量之间的关系。如果组分平面相同位置的颜色有相似格局,即一个变量的数值随着另一个变量数值的变化而变化,可反映变量存在相关性^[16]。

1.3 线性模型分析

运用线性回归方法定量分析各因素对 AOD 空间分布的影响。线性相关分析与回归拟合在 SPSS 15.0 软件中完成。计算研究单元内 AOD 值与人口密度、人均工业产值和森林覆盖率的 Pearson 相关系数,并与 SOM 模型的运算结果进行对比。

2 结果与讨论

2.1 AOD 空间分布特征

2.1.1 总体分布特征

湖北省 2003~2008 年 AOD 多年平均值的空间分布见插页Ⅲ彩图 1。彩图 1 中由蓝色到红

色依次代表 AOD 值由小到大变化,白色曲线为省内县级行政区界线。可以看到,湖北省 AOD 呈现明显的空间分布特征。AOD 高值区(>0.70)主要位于湖北中南部,次高值区($0.50\sim0.70$)位于东北和东南部,低值区(<0.50)位于西部。次高值与低值区向南对高值区呈半包围状态。高值中心主要分布于武汉、鄂州、荆州。高值区极值出现在武汉市中心城区与黄陂区交界处,高达 0.96。

对比湖北地貌分区图发现,地形地貌是影响湖北省 AOD 空间分布的关键因素。湖北地势呈三面高起、中间低平、向南敞开、北有缺口的不完整盆地,表现出 AOD 分布的“盆地效应”。

2.1.2 不同粒径气溶胶分布特征

粗、细颗粒气溶胶在湖北上空的分布情形明显不同(见插页Ⅲ彩图 2(a))。细颗粒气溶胶(粒径 $<0.6\mu\text{m}$)主要分布在湖北中部和东部。这些地区由于城市、人口分布密集,人类活动如工业生产、供暖与日常生活燃料消耗产生废气排放的强度较大,造成细颗粒气溶胶含量较高。相对而言,湖北西部地区的细颗粒气溶胶排放普遍较低。

粗颗粒气溶胶(见插页Ⅲ彩图 2(b))与湖北省 AOD 多年平均值的空间分布相似。在气溶胶浓度高的湖北中南部地区,粗颗粒 AOD($0.5\sim0.87$)也显著高于其他地区,其次是东北和东南部($0.2\sim0.5$),西部地区最低(<0.2)。湖北中南部粗颗粒气溶胶可能由城市排放废气中的有机化合物组成,还有一部分可能来自北方春季沙尘暴的远距离迁移。西部地区人口密度低,人类活动少,较高地势也对北方春季沙尘暴有阻隔作用,粗颗粒气溶胶来源较少,AOD 较低。

2.2 AOD 时间变化特征

2.2.1 年际变化分析

2003、2004 年,省域 AOD 平均值相近,约为 0.48。自 2005 年起,AOD 逐年升高,至 2008 年已达 0.55。总体上看,湖北省 AOD 年平均值呈上升趋势(见插页Ⅲ彩图 3)。2008 年与 2003 年相比,AOD 高值区(>0.70)的范围在襄樊地区有明显扩大,低值区(<0.50)范围缩小,特别是在最低 AOD(<0.15)出现的神农架林区有明显缩小。高值区及次高值区的 AOD 年平均值升高,特别是中南部的荆州和宜昌地区,AOD 值大幅度上升。低值区的 AOD 年平均值变化不显著。在 AOD 年平均值的高值中心方面,2003 年主要集中在武汉、鄂州附近,2008 年则出现多处高值中心(武汉、荆州、宜昌、襄樊)。2003 年,AOD 极端

高值出现在武汉,达到 1.0。2008 年,AOD 极端高值则出现在中南部多个区域,都超过 1.0。

2.2.2 四季变化分析

湖北省 2003~2008 年 AOD 在春(3~5 月)、夏(6~8 月)、秋(9~11 月)、冬(12~2 月)四季的多年平均值分布见插图 IV 彩图 4。

从总体上看,AOD 在不同季节的空间分布特征与其多年平均值的空间分布特征有相似之处,但季节变化特征也很明显。春季,AOD 高值区范围为全年最大,大部分地区 AOD 平均值显著高于夏、秋、冬三季。中部平原、岗地地区被 AOD 大于 0.7 的高值覆盖,说明春季气溶胶主要受地形因素控制,“盆地效应”非常突出。夏季,AOD 低值区范围略有扩大,高值区范围急剧缩小,高值中心集中在武汉及鄂州附近区域、潜江及仙桃一带、襄樊的部分地区。AOD 夏季均值与春季均值比较,在低值区变化不大,但在高值区变化较为明显。秋季,AOD 低值区范围与夏季相比略有扩大,高值区在中北部有缩小,襄樊高值中心消失。省域大部分地区秋季 AOD 平均值低于多年平均值。AOD 秋季均值与夏季均值比较,武汉及鄂州附近区域略有降低,另一高值中心潜江及仙桃一带变化不大,其他大部分地区都有降低。冬季,AOD 低值区范围与秋季相比在鄂东南有所扩大,武汉附近 AOD 高值区的范围缩小到全年最小。AOD 冬季均值与秋季均值比较,武汉附近下降至 0.62,比当地多年平均值约低 20%。荆州、仙桃一带仍是高值中心。

2.2.3 月际变化分析

在一年之内,AOD 月平均值波动基本表现为先上升后下降,除 2004 年外,AOD 月峰值均出现在 5~6 月(见图 1)。从 2004 年开始,AOD 月峰值逐年递增,由 0.64 上升至 2008 年的 0.92,从另外一方面反映出气溶胶浓度逐年上升的趋势,与年际变化的分析结论一致。

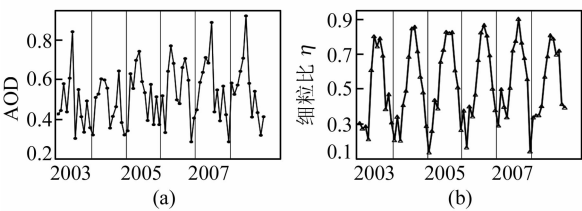


图 1 湖北省 2003~2008 年 AOD 月平均值、细粒比 η 的时间序列图
Fig. 1 Time Series of Monthly Average AOD and η for Hubei Province During 2003-2008

月平均值都有较大幅度的上升,尤其是 2005 年 1~2 月和 2006 年 2~3 月出现陡升,分别从 0.34 和 0.33 升至 0.63 和 0.64,升幅达 85%和 94%。春夏之交的月份(5~6 月或 6~7 月),AOD 月平均值都有较大幅度的下降,尤其是 2003 年和 2007 年 6~7 月出现大幅下降,分别从 0.84 和 0.89 降至 0.30 和 0.44,降幅达 64%和 51%。这一现象可能主要受气候因素的影响^[18]。另外,季风带来的降水过程在 6 月中旬至 7 月中旬形成该省的梅雨期,雨量最多,强度最大^[10],降水对气溶胶的冲刷作用能大大缩短气溶胶的生命周期^[18],有效降低 AOD。

湖北气溶胶的粒径变化呈明显的周期性规律。细粒比在冬半年(9 月至次年 2 月)逐月下降,在夏半年(3~8 月)逐月上升。12 月至次年 2 月,气溶胶以粗颗粒为主,可能是冬季燃煤活动所致^[2]。从 3 月开始,细颗粒气溶胶所占比例逐月增加,一般在 5 月接近或超过 50%,6~10 月,细颗粒气溶胶始终占主导地位,除 2003 年 10 月以外,其比例都维持在 60%以上。

2.3 AOD 影响因素的模型分析

2.3.1 SOM 分析结果

利用 SOM 模型计算得到的可视化结果见插图 IV 彩图 5。可以看出,AOD 年均值的高值(>0.582)与人口密度的高值(>376)、 \log (人均工业产值)的高值(>0.229)大致相对应,AOD 的低值,特别是右下角的最低值(深蓝色区域)与人口密度的最低值所处位置完全相同,与 \log (人均工业产值)的最低值也比较接近,说明 AOD 与后两者之间呈正相关。

AOD 年均值的低值(<0.582)与森林覆盖率的高值(>36.6)相对应,AOD 的高值(>0.582)与森林覆盖率的低值(<36.6)相对应,两者存在明显负相关。

比较各组分平面图的颜色分布格局,发现森林覆盖率与 AOD 的相似程度最高,明显高于人口密度和 \log (人均工业产值)。由此可以推断,AOD 与森林覆盖率之间的相关性高于其与后两者之间的相关性。

2.3.2 线性模型分析结果

经 Pearson 相关性分析,湖北省 AOD 年均值与人口密度、 \log (人均工业产值)之间呈显著正相关($P<0.0001$),与森林覆盖率之间呈显著负相关($P<0.0001$)。

湖北省 AOD 年均值与人口密度、 \log (人均工业产值)、森林覆盖率之间的线性模型拟合结果见

冬春之交的月份(1~2 月或 2~3 月),AOD

插页Ⅳ彩图 6。它们之间线性拟合的回归方程为：

$$\text{AOD} = \begin{cases} 0.000\ 9 \times \text{人口密度} + 0.305 \\ \quad (R^2 = 0.611, P < 0.000\ 1) \\ 0.201 \times \log(\text{人均工业产值}) + 0.656 \\ \quad (R^2 = 0.219, P < 0.000\ 1) \\ -0.009 \times \text{森林覆盖率} + 0.932 \\ \quad (R^2 = 0.682, P < 0.000\ 1) \end{cases}$$

可见, R^2 与三因素呈高度线性相关。随着人口密度、人均工业产值的增大和森林覆盖率的减小, AOD 年均值逐渐上升。三因素与 AOD 的相关性由大到小排序为: 森林覆盖率>人口密度>人均工业产值。

2.3.3 SOM 与线性模型的比较

Vesanto^[16]指出,在某些情况下,SOM 模型可视化结果反映出来的变量之间的相关性可能不正确,故需要利用其他方法加以验证。笔者认为,SOM 模型能真实反映湖北省 AOD 空间分布与其影响因素之间的关系。

本文的 SOM 模型与线性模型的相关性结论一致:湖北 AOD 年均值分布与人口密度、人均工业产值呈显著正相关,与森林覆盖率呈显著负相关。两模型结论可以相互验证。

2.3.4 AOD 影响因素综合分析

从森林覆盖率对 AOD 空间分布的影响看,森林覆盖率越高,AOD 年均值越小;反之,则 AOD 年均值越大。如森林覆盖率较高的神农架林区(70.1%)、鹤峰县(65%)、五峰县(73.8%), AOD 年均值都较低,分别为 0.21、0.28、0.36;而森林覆盖率较低的仙桃市(11.6%)、应城市(16%)对应的 AOD 年均值都较高,分别达到 0.90、0.87。

从人口密度对 AOD 空间分布的影响看,湖北省 AOD 年均值总体分布格局是东部高、西部低,与人口密度分布东部稠密、西部稀疏的特征类似;AOD 高值和低值中心也与人口密度的对应中心区域基本吻合。这与已有文献的结论一致。如人口密度较高的武汉市城区(3 495.34 人/km²)、黄冈市黄州区(1 045.33 人/km²),对应的 AOD 年均值分别为 0.90、0.84,明显高于省内的许多其他地区;人口密度较低的神农架林区(24.59 人/km²)、恩施鹤峰县(76.07 人/km²),对应的 AOD 年均值仅为 0.21、0.28。

从人均工业产值对 AOD 空间分布的影响看,不如前两个因素的影响显著,但也存在正相关关系,工业较发达地区由于工业生产过程中废气排放量大,造成 AOD 较高。如人均工业产值较高

的武汉市城区(6.55 亿元/万人)对应的 AOD 年均值高达 0.90;人均工业产值较低的神农架林区(0.52 亿元/万人)对应的 AOD 年均值仅为 0.21。

参 考 文 献

[1] Crutzen P J. Atmospheric Aerosols: To the Fore-front of Research in Atmospheric Chemistry[J]. Global Change News Letter, 1998, 33: 9

[2] Kaufman Y J, Tanr D, Boucher O. A Satellite View of Aerosols in the Climate System[J]. Na-ture, 2002, 419: 215-223

[3] Kaufman Y J, Tanr D, Gordon H R, et al. Passive Remote Sensing of Tropospheric Aerosol and At-mospheric Correction for the Aerosol Effect[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D14): 16 815-16 830

[4] Baker M B, Peter T. Small-scale Cloud Processes and Climate[J]. Nature, 2008, 451: 299-300

[5] Li B G, Yuan H S, Feng N, et al. Spatial and Temporal Variations of Aerosol Optical Depth in China During the Period from 2003 to 2006[J]. In-ternational Journal of Remote Sensing, 2010, 31 (7): 1 801-1 817

[6] Li Chengcai, Mao Jietai, Alexis L K H, et al. Characteristics of Distribution and Seasonal Varia-tion of Aerosol Optical Depth in Eastern China with MODIS Products [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(22): 2 488-2 495

[7] 杨占华, 杨燕. SOM 神经网络算法的研究与进展 [J]. 计算机工程, 2006, 32 (16): 201-202, 228

[8] Remer L A, Kaufman Y J, Tanr D, et al. The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Valida-tion [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, 62(4): 947-973

[9] 段婧, 毛节泰. 长江三角洲大气气溶胶光学厚度分布和变化趋势研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27 (4): 537-543

[10] 湖北省统计局, 国家统计局湖北调查总队. 湖北统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008

[11] 湖北省地图集编纂委员会. 湖北省地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1998

[12] Obu-Cannk, Fujimura K, Tokutaka H, et al. Data Mining of Power Transformer Database Using Self-organizing Map[C]. International Conference on In-fo-tech & Info-net, Beijing, China, 2001

[13] 蔡永香, 郭庆胜. 基于 Kohonen 网络的点群综合研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(7): 626-629

[14] 哈斯巴干, 马建文, 李启青, 等. 多波段遥感数据的自组织神经网络降维分类研究[J]. 武汉大学学

报·信息科学版, 2004, 29(25): 461-465,450

[15] Zhang Liang, Scholz M, Mustafa A, et al. Assessment of the Nutrient Removal Performance in Integrated Constructed Wetlands with the Self-organizing Map[J]. Water Research, 2008, 43 (12): 3 519-3 527

[16] Vesanto J. Data Exploration Process Based on the Self-organizing Map[D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2002

[17] O'Neill N T, Royer A, Cot P, et al. Relations Between Optically Derived Aerosol Parameters, Humidity, and Air-quality Data in an Urban Atmosphere[J]. Journal of Applied Meteorology, 1993, 32: 1 484-1 498

[18] 李桂青, 毛节泰, 李成才. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究[J]. 上海环境科学, 2003(增刊): 58-63

第一作者简介:郭阳洁,博士生,研究方向为环境地学。
E-mail:guoyj-021@163.com

Temporal Variation and Spatial Distribution of Atmospheric Aerosols over Hubei Province

GUO Yangjie¹ HONG Song¹ ZHUANG Yanhua¹ FENG Nan²

(1 School of Resource and Environmental Science, Wuhan University,129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Department of Atmospheric Sciences, University of Alabama in Huntsville, AL 35805, USA)

Abstract: Using MODIS-derived aerosol data, temporal variation and spatial distribution of aerosol optical depth (AOD) during 2003-2008 over Hubei province was investigated based on GIS. SOM (self-organizing maps) and linear models were used to analyze the relationships between AOD and population density, per capita gross industrial output value, forest coverage. The results were as follows: high AOD values were observed in central south areas with lower elevation, larger population density, higher per capita gross industrial output value, lower forest coverage, while low values, in western, northeast and southeast, were contrary. Distribution of seasonal average AOD and η (fine-mode fraction) vary from each other. Monthly average AOD rises substantially in winter-spring season and drops sharply in spring-winter season. Two models were both showing that AOD distribution is positively related with population density, per capita gross industrial output value, and negatively with forest coverage.

Key words: aerosols; spatial distribution; temporal variation; self-organizing maps

About the first author: GUO Yangjie, Ph.D candidate, majors in environmental geoscience.
E-mail: guoyj-021@163.com

(上接第 1380 页)

paratively speaking, the land market on the former stage (from 1994 to 2002) operated very stably, except that it has been depression in 1999, in others years the land market has in the normal state. On the latter stage (2003-2006) the land market fluctuated very obviously, it has been heat in 2003, 2005, and cool in 2004, and has been normal until 2006. All of these mentioned above are the driving results of a series of macroeconomic control policies, including many land management policies and economic development measures, etc.

Key words: prosperity index; land market; macroeconomic control

About the first author: KONG Weidong, Ph.D candidate, majors in land economic and policies.
E-mail: wdkong519@163.com