

2000—2014年四川省气溶胶时空格局 及其驱动因子定量研究

张静怡, 卢晓宁*, 洪佳, 孟成真

(成都信息工程大学, 成都 610225)

摘要: 论文研究四川省 2000—2014 年气溶胶光学厚度的时空演变趋势, 并综合自然和人为两方面因素, 从区域尺度上对四川省气溶胶光学厚度演变的驱动力进行定量研究, 更进一步从像元尺度上分析驱动力的空间分异。结果表明: 1) 四川省以中部盆地气溶胶光学厚度高值中心区且增长趋势最为明显, 川东平行岭谷值较小且有轻度减少趋势, 川西高原、川西南山地值最小, 但有轻度增长趋势; 2) 区域尺度上, 对气溶胶光学厚度驱动力主导因子进行定量研究, 建立了气溶胶光学厚度(AOD)与 GNP、降水量和归一化植被指数的多元回归模型, 即 $AOD = 0.849 + 0.567 \times GNP - 0.909 \times \text{降水量} - 0.077 \times \text{归一化植被指数}$, 该模型较好地体现了在更为宏观的区域层面上四川省气溶胶光学厚度演变驱动力的定量作用; 3) 像元尺度上, 驱动力的空间分异表现为中部盆地气溶胶光学厚度主要受人为和地表因素影响, 川东平行岭谷、川西高原和川西南山地气溶胶光学厚度受气象和地表因素影响较多。由于川渝地区秋冬季多云雾, 有效的气溶胶卫星观测数据偏少, 因此如何在秋冬季获取气溶胶光学厚度有效数据是未来应加强的工作; 在驱动力因子方面人为因子的选取划分可以进一步具体化; 由点到面的插值会影响驱动力因子数据的精度, 故如何通过高精度的插值方法来提高数据的精度亦是未来提高驱动力定量研究准确性的发展方向。

关键词: 四川省; 气溶胶光学厚度; MODIS; 遥感; 驱动力

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2016)09-1514-12

DOI: 10.11849/zrzyxb.20151088

大气气溶胶是指悬浮于大气中直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的微粒, 它是影响大气环境质量的重要污染源, 已经导致了区域性空气污染问题的出现^[1]。作为表征大气浑浊度的重要指标——气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD)^[2], 已成为国内外学者开展气溶胶研究的主要对象, 且集中在气溶胶光学厚度反演^[2-4]、时空分布特征^[5-7]及影响因素^[8-10]等方面。

开展对气溶胶时空分布研究有助于研究气溶胶对环境和气候的影响, 进而为提出合理的对策提供科学依据。然而对气溶胶光学厚度的时空分布研究, 多关注其多年及季节

收稿日期: 2015-10-09; 修订日期: 2016-01-28。

基金项目: 国家自然科学基金 (524006); 四川省科技计划应用基础研究 (2014JY0084); 四川省教育厅项目 (13ZA0092)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No. 524006; Sichuan Province Science and Technology Plan Applied Basic Research, No. 2014JY0084; The Project of Education Department of Sichuan, No. 13ZA0092.]

第一作者简介: 张静怡 (1991-), 女, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感、3S 集成与气象应用方面的研究。E-mail: 840460612@qq.com

***通信作者简介:** 卢晓宁 (1980-), 女, 山东人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感及水文小波分析方面的研究。E-mail: lxn@cuit.edu.cn

平均状况^[5-7], 普遍缺乏对其变化趋势空间异质性的探讨。同时, 对其驱动力的研究多局限于定性层面^[8-9], 定量程度尚显不足, 且所选取的驱动力因子较少^[8-10], 难以对影响气溶胶光学厚度变化的诸多因素加以详尽考察。

随着四川省经济高速发展, 加之四川省特殊的盆地地形, 使得空气污染情况日益严重, 因此有必要对四川省的空气污染问题进行时空演变上的深入研究并对导致该演变的因素进行分析, 为大气污染防治提供有力参考和科学依据。因此, 本研究以2000—2014年MODIS气溶胶产品为数据源, 对四川省AOD进行时空演变趋势分析, 并综合考虑自然和人为因素选取驱动力因子, 从区域尺度上对四川省气溶胶演变的驱动力进行定量, 并进一步从像元尺度上分析气溶胶演变的驱动力的空间分异。

1 数据来源

1.1 数据获取

1) 气溶胶光学厚度: 2000—2014年MODIS气溶胶光学厚度产品数据(MOD04), 空间分辨率为10 km, 时间分辨率为1 d, 来自NASA官网(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)。

2) 驱动力因子: 从自然及人为两方面, 分地表、气象和人为三个角度, 选取9个可能引起AOD空间异质与变化的驱动因子。包括归一化植被指数(NDVI) 1个地表因子和相对湿度、气温、降水量、风速、地表温度(LST) 5个气象因子, 归为自然因子; 人口密度、国民生产总值(GNP) 和第二产业生产总值3个人为因子。其中, 植被和地表温度因子为NASA提供的产品数据, 分别是归一化植被指数16 d合成产品(MOD13Q1) 和地表温度8 d合成产品(MOD11A2); 其他气象因子来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>); 人为因子来自四川省2000—2014年统计年鉴(<http://www.sc.stats.gov.cn/>)。

1.2 数据处理

1.2.1 植被指数和地表温度遥感数据的处理

对MODIS数据进行投影转换、拼接、辐射定标和掩膜提取等预处理, 最终得到研究区真实有效的16 d合成的植被指数和8 d合成的地表温度数据。

1.2.2 其他气象数据的处理

基于实测的站点数据, 采用插值方法得到各气象要素的空间连续分布数据。结合相关研究^[11-12], 本文选取径向基函数法对气温数据进行空间插值, 选取协同克里金法对降水量、相对湿度和风速数据进行空间插值。

1.2.3 人为因子数据的处理

对人为因子数据亦进行空间化处理, 采用样条法对研究区GNP和第二产业生产总值进行空间插值, 而人口密度数据则采用反距离权重插值法^[13]。

2 研究方法

2.1 AOD时空演变趋势

为了定量研究AOD的空间变化趋势, 采用一元线性回归分析的方法, 计算AOD随

时间变化的回归斜率，记为 $slope$ 。 $slope>0$ 表明此像元 AOD 呈增长变化趋势，反之则呈减少变化趋势。其计算公式如下：

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2}$$

(1)

式中：变量 i 为 2000—2014 的年序列号， X_i 为第 i 年 AOD 值。依据 $slope$ 大小进行分级：明显增加区（ $0.07<slope<0.33$ ）、轻度增加区（ $0<slope<0.07$ ）、基本不变区（ $-0.01<slope<0$ ）、轻度减少区（ $-0.06<slope<-0.01$ ）、明显减少区（ $-0.21<slope<-0.06$ ）5 个等级，可直观反映四川省近 15 a AOD 的年际空间变化趋势。

2.2 区域尺度上AOD演变的驱动力定量分析

目前，学者已经探讨了气溶胶形成与演变的驱动力，如彭威等研究了气溶胶与地表植被覆盖状况的相关性，并提出了人类活动对 AOD 的影响越来越大^[8]；林俊等^[9]、韩道文等^[10]研究了气候因素对气溶胶的影响。但是这些学者的研究都仅侧重单方面（或地表或气候），且仅研究了因子与气溶胶的相关性，缺乏其与气溶胶定量关系的研究。因此，哪些因子、多大程度上对气溶胶光学厚度产生影响，需要采用科学定量的方法进行研究。

2.2.1 驱动力因子评价指标体系构建

气溶胶颗粒来源广泛，如地表土壤微粒^[8]、人类活动排放至空气中的微粒，而其转移过程受到大气环流作用影响^[14]，沉降过程受温度、降水量和相对湿度影响^[9]。因此，AOD 的演变是自然和人为共同作用的结果。自然方面，气象和地表状况均有可能对气溶胶的形成与扩散产生或正或负的影响。人为方面，人口是最能代表人类活动对区域大气环境影响的因素；此外，GNP 能够在一定程度上反映一个地区的经济实力以及城市化发展的水平，而区域经济发展及城市化进程难免会对气溶胶产生影响；第二产业在发展过程中会产生大量的污染物排放，对气溶胶有直接或间接的影响。因此，选取植被指数（ X_1 ）、地表温度（ X_2 ）、气温（ X_3 ）、降水量（ X_4 ）、风速（ X_5 ）、相对湿度（ X_6 ）、人口密度（ X_7 ）、GNP（ X_8 ）、第二产业生产总值（ X_9 ）共计 9 个引起研究区 AOD 时空演变的驱动力因子，构建四川省 AOD 驱动力因子评价指标体系（表 1）。

2.2.2 驱动力主导因子的确定

因驱动力因子较多，为消除因子间的相关影响，故采用主成分分析法进行主成分提取，构建主导因子同 AOD 的多元回归模型，分析其与 AOD 的定量关系。具体过程如下：

1) 驱动力因子的标准化处理。根据各指标同 AOD 变化的关系，分为正向指标（指标值越大，则 AOD 越大）和负向指标（指标值越大，则 AOD 越小），其

表 1 四川省 AOD 驱动力因子评价指标体系

Table 1 Index system for assessing driving forces of AOD

指标体系	具体指标	单位	指标性质	
人为因子	人口密度	人/km²	正	
	GNP	亿元	正	
	第二产业生产总值	亿元	正	
自然因子		相对湿度	无	正
	气象因子	气温	℃	正
		降水量	mm	负
		风速	m/s	负
	地表因子	地表温度	℃	正
		植被指数	无	负

中正向指标包括人口密度、GNP、第二产业生产总值、相对湿度、气温、LST, 采用最小值归一化法对驱动力因子进行处理; 负向指标包括降水量、风速、NDVI, 采用最大值归一化处理。

2) 主成分分析。利用SPSS软件进行主成分分析, 由相关系数矩阵计算特征值以及主成分的方差与累积贡献率(表略)、主成分载荷(表2)。

表2 主成分载荷

Table 2 Principal component matrix

主成分	LST	NDVI	气温	相对湿度	降水量	风速	GNP	第二产业产值	人口密度
1	-0.307	-0.364	0.497	0.636	-0.343	-0.550	0.940	0.898	-0.771
2	0.486	-0.229	0.575	0.711	0.861	-0.439	-0.069	-0.271	-0.340
3	0.638	0.683	-0.525	0.147	0.213	0.414	0.263	0.065	-0.279

统计得到3个主成分, 其累计方差贡献率达到了81.9%, 所代表的信息量能够充分地解释并提供原始数据承载的信息。由表2选取载荷最大者作为每个主成分的主导因子, 即GNP、降水量和NDVI分别成为第一、第二和第三主成分的主导因子, 利用这3个因子代替原来的9个因子进行分析, 使问题的解决既科学又简单。

2.2.3 区域尺度驱动力定量模型的确定

本研究应用多元线性回归模型来拟合AOD(因变量 y)与其驱动力因子[自变量 x , 包括GNP(x_1)、降水量(x_2)、NDVI(x_3)]之间的关系。采用ArcGIS样本点分析, 选取研究区内100个均匀分布样点(相邻样本点之间距离为30 km), 样本点大小为10 km × 10 km。提取出每个样本点15 a的年平均AOD、GNP、降水量和NDVI值, 随机选取其中2/3的样本点数据, 用于构建多元线性回归模型。利用剩余1/3的样本点数据对模型进行验证。多元线性回归模型如下:

$$y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + k \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 代表GNP、降水量、NDVI三个驱动力因子的回归系数; k 为回归常数。

2.3 像元尺度上AOD演变的驱动力空间分异分析

在更为宏观的区域尺度上, 四川省AOD演变趋势的驱动力以主导因子为主, 然而, 在更小的像元尺度上, 那些在较小的空间尺度上具有空间异质性的因子也会对该尺度上AOD演变趋势产生较大作用。因此, 在像元尺度上, 不仅分析主导因子的驱动作用, 还要分析非主导因子的驱动作用。通过分析像元尺度上AOD演变驱动力的空间分异, 有助于确定不同驱动力因子的具体影响范围与程度。像元尺度上驱动力分析的实现是通过基于GIS平台进行逐像元的各驱动力因子与AOD进行相关分析, 公式如下:

$$R = \frac{\sum (AOD_i - \overline{AOD})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (AOD_i - \overline{AOD})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中: R 为相关系数; Y 为驱动力因子。通过相关系数 R 的大小来解释AOD同该驱动因子关系的紧密程度。进一步通过显著性检验得到逐像元的AOD同驱动力因子的显著性水平结果图。

3 结果与分析

3.1 AOD的空间分布及演变特征

3.1.1 多年平均AOD空间分布特征

四川省AOD空间分布呈现以中部盆地
为高值中心区的向外辐射状（图1），分别
向川西高原、川西南山地、川东平行岭谷
呈减少变化。以成都、德阳等城市为代表
的中部盆地AOD均值达到1.0以上，这是
因为成都、德阳等城市工业污染源多，人
口稠密^[15]，人类活动频繁，故空气污染严
重；再加之盆地相对闭塞的地理环境导致
区域产生的气溶胶颗粒不易向盆地外输
送，且大雾静风天气^[16]也一定程度上导致气溶胶颗粒聚集。川东岭谷地区AOD较中部减
小，但均值仍在0.55以上，是由于中部与东部之间没有高山阻隔，大气环流作用使得中
部盆地的气溶胶颗粒扩散到川东平行岭谷。而川西高原本身的工业污染源较少，人口稀
疏^[15]，加之高山山脉的屏障作用将盆地输送的污染物阻隔，因此川西高原一带甘孜、阿
坝等地AOD值更小，其均值下降到0.30以下。川南山地大部分地区AOD值较低，其均
值在0.35以下，但攀枝花一带AOD较高，其值在0.4以上，主要是因为攀枝花是重工
业城市，空气质量较差。

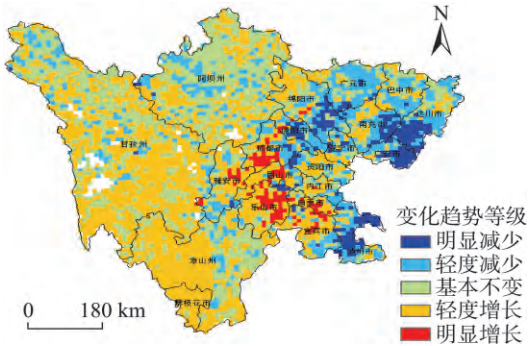


图2 四川省2000—2014年AOD演变趋势
Fig. 2 The trends of AOD in Sichuan
Province during 2000–2014

表3 2000—2014年四川省AOD各等级
变化趋势面积

演变趋势	面积/km ²	所占百分比/%	总计/%
明显减少区	26 637.05	5.50	23.57
轻度减少区	87 514.82	18.07	
基本不变区	155 657.23	32.14	32.14
轻度增加区	201 666.68	41.64	44.79
明显增加区	15 255.77	3.15	

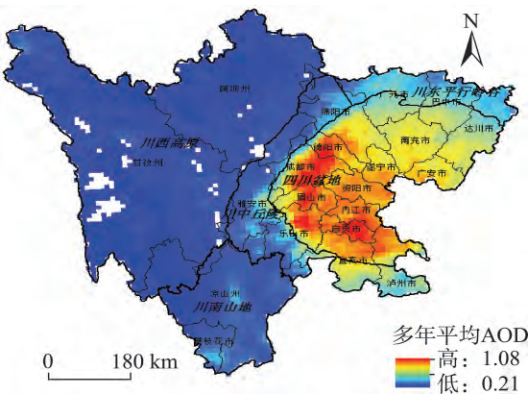


图1 四川省AOD空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of AOD in Sichuan Province

3.1.2 AOD演变趋势的空间异质性

四川省近15 a来AOD变化趋势存在显
显的空间差异（图2）。整体而言，四川省
绝大多数地区的AOD值在近15 a间呈增长
变化趋势，其面积占四川省的44.79%（表
3）。其中以盆地中部成都、眉山、乐山等
地区AOD值呈明显增长变化趋势。西部大
面积区域AOD值则呈轻度增长变化趋势，
面积比高达41.64%。这在一定程度上说明
气溶胶污染加剧的变化有向西部扩展的态
势。AOD值基本不变区分布较为零散，但
所占面积比较大，达到32.14%。川东北和
东南少数地区15 a间AOD值呈减少变化趋
势，面积仅占到23.57%。由此可见，在近
15 a间，四川省AOD变化以增加趋势的区
域最多，且以盆地中部地区增长最为显
著，导致整个区域的空气质量整体下降。

3.2 AOD年内(季节)演变特征

四川省AOD 15 a平均值达到0.54（表

4), 在春季达到平均的最大值0.74, 其原因是秸秆燃烧的影响, 加之春季整体降水较少(同一时段多年平均降水量为587 mm, 占全年的18%), 春季北风主导造成来自北方远距离沙尘粒子的输入^[17], 上述三方面综合影响导致该时期四川省AOD值最高。夏季AOD值相对于春季减小, 平均值为0.51, 变化范围在0.39~0.73之间, 其原因是夏季雨量充沛(同一时段多年平均降水量为1 662 mm), 降水的明显增多利于颗粒物的沉降, 因此AOD值低于春季。但夏季高温高湿的环境条件又会在一定程度上使气溶胶颗粒聚集^[10], 使得该季节AOD值仍较高; 秋季AOD值在0.33~0.61之间波动变化; 冬季AOD值主要在0.21~0.55之间小幅变化。川渝地区多云雾, 秋冬季更甚, 故有效的气溶胶卫星观测数据偏少, 可能产生统计偏差, 在一定程度上导致秋冬季AOD偏小。因此, 如何在秋冬季节获得AOD有效数据是未来应该加强的工作。

表4 2000—2014年四川省AOD平均值、标准差和增长率

Table 4 Mean value, standard deviation and growth rate of AOD in Sichuan Province during 2000–2014					
变量	年均	春季	夏季	秋季	冬季
平均值	0.54	0.74	0.51	0.44	0.41
标准差	0.07	0.06	0.09	0.08	0.07
增长率	0.79	0.85	0.98	0.34	0.12

4 四川省AOD的驱动力分析

4.1 区域尺度驱动力定量分析

以AOD (y) 为因变量, GNP (x_1)、降水量 (x_2)、NDVI (x_3) 为自变量, 建立多元回归模型 (表5)。对模型结果进行检验, 模型拟合度为90%, 说明可以用这个模型来预测。且 $\text{sig}=0.000<0.05$, 说明该回归方程成立, 因变量与自变量之间有很好的线性关系。经与验证数据进行验证发现, 平均绝对误差仅为0.02, 相对误差率为4.72% (本研究的标准误为0.024, 预期误差率为4.74%, 此值为 t 检验假设检验值), 接近预期误差率, 说明本研究所构建的区域尺度上以三大主导因子为自变量的四川省AOD演变的驱动力定量模型有效性较好。

表5 多元回归分析结果

Table 5 Results of multiple regression analysis			
回归公式	F	R^2	sig
$y=0.849+0.567x_1-0.909x_2-0.077x_3$	36.482	0.544	0.000
标准化系数 x_1 为0.192, x_2 为-0.598, x_3 为-0.031			

依据表5多元线性回归模型, GNP与AOD的回归系数为0.567, 回归系数为正说明随着城市化的不断发展, 人类经济活动越强烈, AOD会随之呈现增加趋势, 已成为区域AOD值呈增长变化的主导因素。降水与AOD的回归系数为-0.909, 且其与AOD呈负相关关系, 说明降水量的增多有利于气溶胶的湿清除, 从而导致AOD的减小, 这与一些学者的研究结果相一致^[10]。NDVI与AOD的回归系数为-0.077, 说明地表植被覆盖的增多和植被长势的变好, 有利于吸收悬浮于大气中的气溶胶颗粒, 同时能在一定程度上减少地表土壤颗粒物进入大气, 从而导致AOD的减少。因此, 对区域尺度而言, AOD的增长主要受人类活动加剧的影响, 而降水主导的气候因素和植被主导的地表因素对气溶胶的削弱作用较轻。

4.2 像元尺度驱动力空间分异分析

1) AOD同地表因子的相关性

四川省中东部及西北部小面积区域的AOD与NDVI呈显著的正相关，其他西部大范围区域呈显著负相关 [图 3(a)]。具体来说，以成都、德阳等城市为代表的中东部地区AOD与NDVI呈显著的正相关性，平均相关系数 R 为0.48。说明四川省中东部区域较低的植被覆盖（区域NDVI平均为0.44，相对于西部区域低0.12），对区域空气质量恶化的形势有加剧作用，未来在该区域进行针对气溶胶增长所引起的大气污染的治理应该从增加植被覆盖的角度入手；而西部的甘孜、阿坝和凉山地区AOD与NDVI呈显著负相关性，平均相关系数为-0.15，说明该区域目前良好的植被覆盖状况对大气污染具有很好的缓解作用。

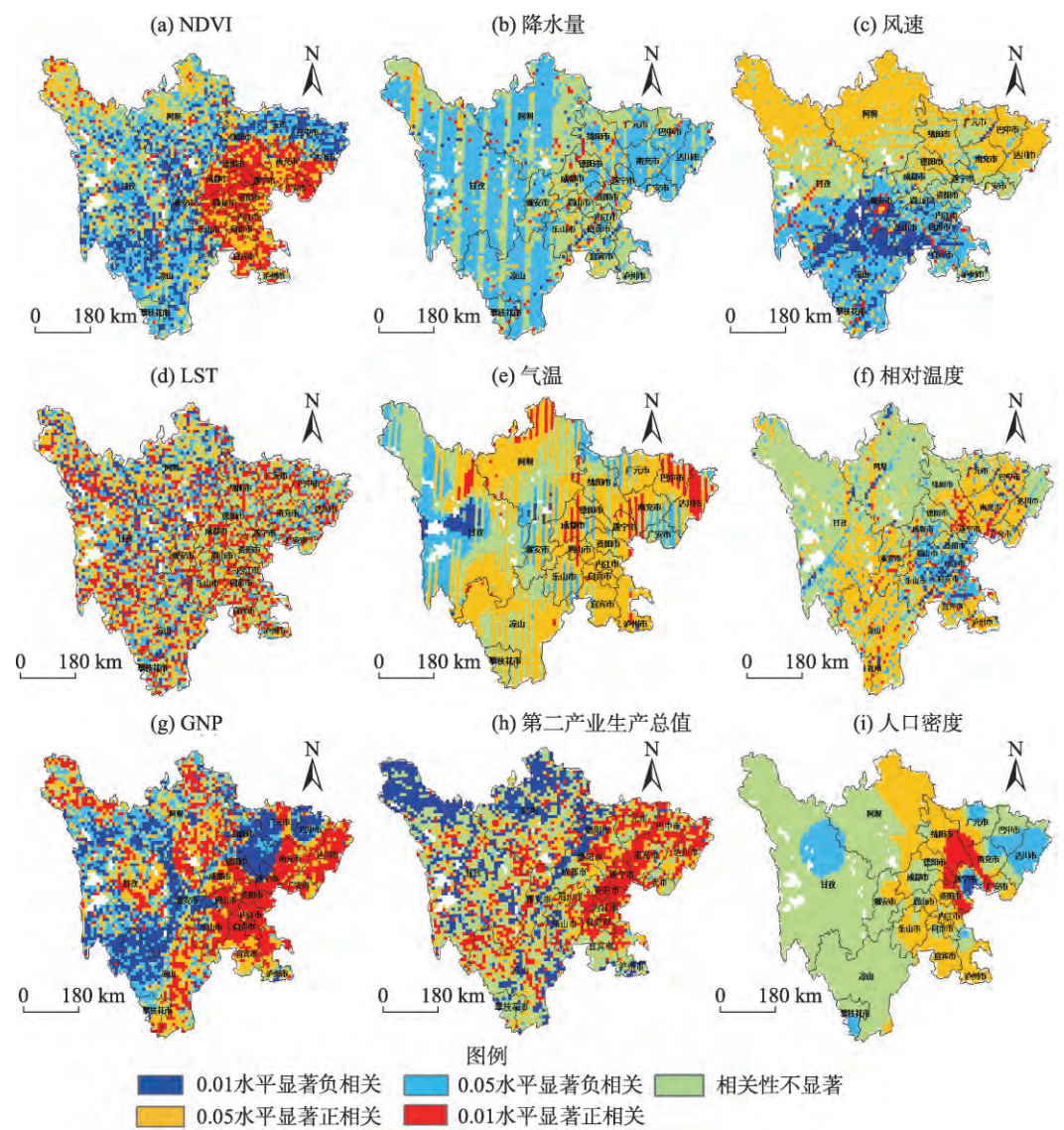


图3 四川省AOD同各因子显著性水平

Fig. 3 The significant level of AOD and each driving force in Sichuan Province

2) AOD同气象因子的相关性

降水量与AOD主要呈显著负相关性 [图 3(b)], 负相关系数 R 绝对值最大为0.68, 最小为0.09, 其像元所占比例为75%, 说明降水对气溶胶的削减作用在整个区域具有普遍性, 体现出降水在气溶胶缓解中的主导作用, 而这一结果与区域尺度上AOD演变的驱动因子的研究结果极为一致。尤其突出表现在川西高原和川东北部区域, 区域较高的植被覆盖度, 叠加上充沛的降水, 最终使得该区域AOD值相对于盆地区域较低。而川中盆地的成都、绵阳一带, 降水量与AOD相关性不显著, 说明降水对该区域气溶胶的削减作用微乎其微, 体现出降水在该区域气溶胶缓解作用中的非主导性。

由图 3(c)可以看出, AOD与风速的相关性呈现出显著的空间异质性, 表现为由北向南, 逐渐由北部区的显著正相关, 过渡到中部小部分区的相关性不显著, 再到南部发展到显著负相关。具体是, 北部阿坝、达州和巴中地区的AOD与风速呈0.05水平显著正相关, 该类像元占到研究区的40%, 相关系数 R 平均为0.23; 南部地区达到0.01水平显著负相关的像元数占到研究区像元总数的11%, 平均相关系数绝对值 R 绝对值高达0.74。风速因子与AOD的相关性呈上述空间分异的原因大致有两点: 其一, 四川所遭受的输入性浮尘大多来自西北冷空气输送的沙尘暴^[7], 浮尘污染区主要集中在川北及成都平原地区。因此随着风速的增大, 携沙量增大, 从而导致AOD增大, 故二者在该区域呈正相关; 其二, 四川的盆地地形不利于中部平原气溶胶的扩散, 而中部盆地一带多为山谷风, 风速的增大将非常有利于该区域气溶胶的扩散稀释, 因此在中部区域, 风速因子与AOD由北部区域的0.05水平显著正相关, 逐渐过渡到0.05水平的显著负相关; 其三, 南部的峡谷、平原一带主要盛行西南风, 而来自西南一带的风不仅含沙量少, 且空气湿度大, 风速的增大将更有利于气溶胶的扩散和湿沉降, 导致该区域AOD随之下降, 最终造成南部区域AOD与风速呈显著负相关。

LST与AOD主要呈显著正相关性 [图 3(d)], 显著正相关的像元占研究区总像元数的74%, 平均相关系数 R 为0.37; 只有极少部分区域呈负相关性。这足以说明随着LST的增加, AOD也随之增加。其原因是一个地区的LST主要受海拔高差、人口密度、工业发展程度和绿地覆盖率等因素的综合影响, LST值高可以在一定程度上反映出该地区海拔较低、人口密度大、工业发展程度高和绿地覆盖率低, 而这些因素都会导致AOD值增加。

气温与AOD的空间相关性 [图 3(e)]主要为, 中东部和北部地区气温与AOD呈正相关关系, 0.05水平显著正相关的像元占研究区总像元的49%; 川西高原气温与AOD呈负相关关系, 其原因是温度升高时, 大气垂直对流作用加剧, 有利于大气扩散^[9], 从而利于气溶胶粒子的扩散, 0.05水平显著负相关的像元占研究区的14%; 而相关性不显著的像元占29%。中东部和北部地区气温与AOD主要呈正相关关系是因为在高温的环境条件下中东部地区低层大气常有逆温层存在, 导致气象扩散条件变差, 利于空气中气溶胶粒子的聚集^[10]。

相对湿度与AOD主要为显著正相关 [图 3(f)], 其像元占比为39%。南部如凉山和攀枝花一带以及东部如遂宁、南充等地区相对湿度与AOD呈0.05水平显著正相关, 其像元所占比例为34%。正相关关系是因为随着湿度的增加, 吸湿性和溶解性气溶胶粒子的尺度、折射指数和众数半径将随之增大, 从而引起粒子消光特性的改变, 最终导致AOD的增加^[10]。

在研究的5个气象因子中, 降水量对四川省AOD的贡献最大, 其次依次为风速、相对湿度、气温和LST。

3) AOD同人为因子的相关性

GNP与AOD相关性的空间分布表现为中、东部发达地区主要呈正相关性,如成都、资阳、内江和自贡等城市,其平均相关系数 R 为0.57,成都、资阳等城市的正相关性达到了0.77。这说明,城市经济发展越好,城市化进程越快,AOD越大。而西部欠发达地区如阿坝、甘孜和凉山地区两者则主要呈显著负相关,其负相关系数绝对值达到了0.58,说明该类型区域GNP的增长并没有造成区域AOD值的增长,相反,区域良好的植被,充足的降水、适宜的气温、湿度和有利的风向条件促进了AOD值的下降变化,这也在一定程度上说明该区域的经济的发展不是以牺牲环境为代价,而这种发展模式应继续推广。

第二产业生产总值与AOD呈0.01水平正相关性的地区主要为东部发达城市,尤其是南充、资阳等城市的正相关性值较大, R 达到0.52,说明东部发达的第二产业对该区域AOD增长的正向贡献作用突出;而西部欠发达的第二产业表现为与AOD呈负相关,且该类像元占到研究区总像元的26%,这在一定程度上体现出该现象在西部地区的普遍性,该区域第二产业的欠发达使得川西部区AOD增长趋势较缓。

人口密度与AOD呈正相关的地区主要集中在中东部地区,其像元所占比例为37%,其中成都、德阳和绵阳一带相关性达到0.01水平显著正相关,平均相关系数 R 为0.43。这说明该区域人口对AOD有一定的影响,但影响程度小于GNP和第二产业对其影响。而川西高原和川西南山地的人口与AOD相关性不显著,该类像元所占比例为62%,这是因为该区域人口变化不显著,其对AOD的影响程度较低。

横向比较3个人为因子,其中GNP对四川省AOD贡献最大,其次依次是第二产业生产总值和人口密度。

5 结论与讨论

5.1 结论

1) 四川省AOD的空间分布呈现以盆地高值中心区向外辐射状,分别向川西高原、川西南山地、川东平行岭谷呈减少变化。由于成都、德阳等城市工业污染源多,人类活动频繁;加之盆地相对闭塞的地理环境因素及大雾静风天气均在一定程度上导致气溶胶粒子聚集。川东岭谷地区AOD较中部减小,这是由于中部与东部之间没有高山阻隔,大气环流作用使得中部的气溶胶粒子会扩散到川东平行岭谷。而川西高原本身工业污染源较少,自身空气质量较好,加之高山山脉的屏障作用将盆地输送的污染物阻隔,因此川西高原一带甘孜、阿坝等地AOD值更小。

2) 四川省AOD变化以增长趋势为主,且以人口密集的盆地中部区域增长趋势最为明显,这种气溶胶污染加剧的变化有向西部高原和山地区域扩展的态势,导致整个区域的空气质量整体下降,需要引起高度重视。

3) 四川省AOD在过去15 a间呈波动变化,并具有明显的季节变化特征。春季农户焚烧秸秆、来自北方的沙尘输送以及降水较少等因素使得AOD值在春季达到最大;夏季,AOD值在降水增多以及高温高湿环境的综合影响下较春季有所减小。

4) 对AOD与其驱动力主导因子进行了定量研究,建立了AOD与GNP、降水量和NDVI的多元回归模型,得到模型 $AOD=0.849+0.567 \times GNP-0.909 \times \text{降水量}-0.077 \times NDVI$ 。说明GNP是区域AOD值呈增长变化的主导因素,这也说明随着城市化的不断发

展, 人类活动对气溶胶时空格局的影响最大。降水是影响AOD变化的另一主要驱动力, 且其与AOD呈负相关关系。NDVI与AOD也呈负相关关系。

5) 在像元尺度上, 通过相关分析发现: 气象因子方面, 降水量对AOD的贡献最大, 其次依次为风速、相对湿度、气温、LST。人为因子方面, GNP对AOD最大, 其次依次是第二产业生产总值和人口密度。

6) 驱动力因子的空间分异是导致AOD空间分异的原因, 表现为中部盆地AOD主要受人为和地表因素影响, 川东平行岭谷、川西高原和川西南山地地区AOD受气象和地表因素影响较多。

5.2 讨论

文章在深入研究四川省AOD近15 a时空演变规律的基础上, 从自然和人为两方面考虑, 选取了9个驱动因子, 从区域尺度上对四川省AOD演变的驱动力进行定量研究, 更进一步从像元尺度上分析了驱动力的空间分异。本研究弥补了在AOD演变的驱动力定量和空间异质性研究方面的不足, 但还存在以下不足:

1) 由于四川省秋冬季云量多的客观因素, 使得卫星获取有效数据不足, 故本研究对四川省秋冬季节的AOD演变规律目前未予以分析。因此未来应就如何在秋冬季获取AOD有效数据进行深入研究。

2) 本文在考虑驱动因子人为因素方面, 因子的选取划分不够具体, 比如化石燃料排放、汽车尾气排放等都会在一定程度上影响气溶胶, 因此未来也应该考虑进去, 这样有利于提高未来空气环境保护措施的针对性。

3) 本文选取了四川省作为研究区域, 研究区域大, 必然涉及驱动因子的空间插值, 而选取的插值方法和插值结果的精度都必然影响结果, 最终影响研究结论, 尤其对四川这一地形地貌复杂、地域较大的区域。因此如何通过高精度的、科学的插值方法, 提高基础数据的准确性, 也是未来提高驱动力定量研究准确性的发展方向。

参考文献(References):

- [1] 范娇, 郭宝峰, 何宏昌. 基于MODIS数据的杭州地区气溶胶光学厚度反演[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 1-9. [FAN J, GUO B F, HE H C. Retrieval of aerosol optical thickness with MODIS data over Hangzhou. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 1-9.]
- [2] RICHTER R, SCHLAPFER D, MULLER A. An automatic atmospheric correction algorithm for visible/NIR imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(10): 2077-2085.
- [3] 孙林, 柳钦火, 刘强, 等. 高反射率地区气溶胶光学厚度遥感反演: 现状及展望[J]. 地理科学进展, 2006, 25(3): 70-78. [SUN L, LIU Q H, LIU Q, et al. Aerosol optical thickness retrieving over bright surface: Progress and prospect. Progress in Geography, 2006, 25(3): 70-78.]
- [4] 周永波, 白洁, 周著华, 等. FY-3A/MERSI海上沙尘天气气溶胶光学厚度反演[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 771-787. [ZHOU Y B, BAI J, ZHOU Z H, et al. Aerosol optical depth retrieval from FY-3A/MERSI for sand-dust weather over ocean. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(4): 771-787.]
- [5] DE MEIJ A, POZZER A, LELIEVELD J. Global and regional trends in aerosol optical depth based on remote sensing products and pollutant emission estimates between 2000 and 2009[J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2010, 10(12): 30731 - 30776.
- [6] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析[J]. 大气科学, 2002, 26(6): 721-730. [LUO Y F, LV D R, ZHOU X J, et al. Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(6): 721-730.]

- [7] 关佳欣, 李成才. 我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 185-191. [GUAN J X, LI C C. Spatial distributions and changes of aerosol optical depth over eastern and central China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(2): 185-191.]
- [8] 彭威, 江洪, 肖钟湧, 等. 长三角地区土地覆盖对气溶胶光学厚度的影响 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37(6): 177-182. [PENG W, JIANG H, XIAO Z Y, et al. Influence of land cover on the aerosol optical thickness over Yangtze River Delta. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(6): 177-182.]
- [9] 林俊, 刘卫, 李燕, 等. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析 [J]. 气象与环境学报, 2009, 25(1): 1-5. [LIN J, LIU W, LI Y, et al. Relationship between meteorological conditions and particle size distribution of atmospheric aerosols. *Journal of Meteorology and Environment*, 2009, 25(1): 1-5.]
- [10] 韩道文, 刘文清, 张玉钧, 等. 温度和相对湿度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(5): 619-624. [HAN D W, LIU W Q, ZHANG Y J, et al. Influence of temperature and relative humidity upon aerosol mass concentrations vertical distributions. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2007, 24(5): 619-624.]
- [11] 梁英杰, 杨武年, 李霜林. 基于 ArcGIS 的四川省气温空间插值分析 [J]. 测绘, 2012, 35(3): 105-107. [LIANG Y J, YANG W N, LI S L. Spatial interpolation analysis on temperature of Sichuan Province based on ArcGIS. *Surveying and Mapping*, 2012, 35(3): 105-107.]
- [12] 刘普幸, 卓玛兰草. 甘肃省 1960—2008 年潜在蒸散量时空变化及其影响因子 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1561-1571. [LIU P X, ZHUO M L C. Temporal and spatial change of the potential evaporation and its impact factors in Gansu Province. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1561-1571.]
- [13] 张露, 杨永国, 姚松均. 基于 ArcGIS 的 GDP 空间插值方法比较分析 [J]. 科技致富向导, 2010(6): 31-32. [ZHANG L, YANG Y G, YAO S J. Comparative analysis of spatial interpolation method of GDP based on ArcGIS. *Guide of Sci-tech Magazine*, 2010(6): 31-32.]
- [14] 杨华安, 但尚铭. 四川盆地冬季风速、降水量与大气污染浓度分析 [J]. 四川气象, 1995, 15(3): 28-30. [YANG H A, DAN S M. The analysis of wind speed, precipitation and atmospheric pollution during the winter on Sichuan Basin. *Journal of Sichuan Meteorology*, 1995, 15(3): 28-30.]
- [15] 四川省统计局. 四川统计年鉴 2014 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014: 1-35. [Sichuan Provincial Bureau of Statistics. *Sichuan Statistical Yearbook*. Beijing: China statistics press, 2014: 1-35.]
- [16] 周自江, 朱燕君, 姚志国, 等. 四川盆地区域性浓雾序列及其年际和年代际变化 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 567-573. [ZHOU Z J, ZHU Y J, YAO Z G, et al. Regional dense fog time sequence with its annual and decadal variation in the Sichuan Basin. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(5): 567-573.]
- [17] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 用 MODIS 遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 3-6. [LI C C, MAO J T, LIU Q H. Characteristics of aerosol optical depth distributions over Sichuan Basin derived from MODIS data. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(1): 3-6.]
- [18] 张顺谦, 马振峰. 1961—2009 年四川极端强降水变化趋势与周期性分析 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1918-1929. [ZHANG S Q, MA Z F. Change tendency and cyclicity analysis of extreme precipitation over Sichuan Province during 1961-2009. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1918-1929.]

Quantitative Study on Temporal and Spatial Patterns of Aerosol Optical Depth and Its Driving Forces in Sichuan Province during 2000–2014

ZHANG Jing-yi, LU Xiao-ning, HONG Jia, MENG Cheng-zhen
(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The paper studied the trend of temporal and spatial changes of aerosol optical depth from 2000 to 2014 in Sichuan Province, and quantitatively analyzed the driving forces of the evolution of the aerosol optical depth in Sichuan Province on regional scale by combining natural and artificial factors, and further analyzed the spatial differentiation of driving forces on pixel scale. From this research, we concluded that: 1) The aerosol optical depth at the central Sichuan Province is the biggest and its growth trend is the most obvious, and the value in the parallel ridge valley of eastern Sichuan is smaller and shows a mild decrease trend, while the values in western Sichuan Plateau and southwestern mountainous area are the smallest and have mild growing trends. 2) On the regional scale, we quantitatively studied the dominant driving forces of aerosol optical depth, and established the multivariate regression model of the aerosol optical depth with relation to GNP, precipitation and normalized vegetation index: $AOD = 0.849 + 0.567 \times GNP - 0.909 \times \text{precipitation} - 0.077 \times NDVI$. The model reflected the quantitative effects of driving forces on the regional level. 3) On the pixel scale, the aerosol optical depth of Sichuan Basin has been mainly affected by human and earth surface factors, and the aerosol optical depth in eastern parallel valley area, western Sichuan Plateau and southwestern mountainous area has been mainly affected by the earth surface and meteorology factors. Because of the cloudy weathers in fall and winter in Sichuan–Chongqing region, there is less effective aerosol satellite observation data, so acquiring the aerosol optical thickness data in fall and winter should be strengthened, the anthropogenic factors should be divided more specifically, and high-precision interpolation method should be used to improve the accuracy of the driving factors data. These are the directions which can improve the accuracy of quantitative research of the driving force.

Key words: Sichuan Province; AOD; MODIS; remote sensing; driving force