

## 近年来长江流域气溶胶光学厚度时空变化特征分析

白淑英<sup>1, 2</sup>, 史建桥<sup>1, 3</sup>, 卜军<sup>3</sup>, 洪志明<sup>3</sup>

1. 南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042;

3. 中国人民解放军 94783 部队 61 分队, 浙江 长兴 313111

**摘要:** 利用2000年3月至2011年2月MODIS Level 3遥感反演大气气溶胶光学厚度 (AOD) 产品数据, 结合中国地形的3大阶梯分布, 分析近年来长江流域气溶胶光学厚度的时空变化特征。结果表明, 近12年来, 长江流域的年平均AOD值在0.38~0.44之间变化, 其中“第一阶梯”年平均AOD呈极显著下降趋势 ( $P < 0.01$ ), “第二阶梯”和“第三阶梯”则呈上升趋势, 但趋势不显著 ( $P > 0.05$ ); 4季平均AOD除春季呈下降趋势, 其他3季均为上升趋势, 其中冬季上升速率最快, 线性倾向率为 $0.004 \text{ a}^{-1}$  ( $P < 0.05$ ), 春季AOD与其他季节的差距在逐步减小; 长江流域3大阶梯AOD具有鲜明的季节变化特征, 基本上是春夏季较大, 秋冬季较小, 具体表现为春季最大, 从夏季到冬季逐渐减小, 冬季到来年春季跳跃性增高, 但由于地理位置、地形、气候、人类活动等因素的影响, 不同区域又有所差异; AOD年平均值和四季平均值均表现为“第三阶梯”>“第二阶梯”>“第一阶梯”。长江流域年平均AOD变化空间差异显著, 其中显著减少区域占整个流域面积的17.54%, 主要分布在“第一阶梯”; 显著增加的区域仅占流域总面积的5.23%, 主要分布在“第二阶梯”和“第三阶梯”。另外, 由于海拔、地形及山脉阻挡等诸多因素影响, 导致在地形阶梯间高程突变线左右两边的狭窄区域, AOD分布存在低处明显大于高处的现象。这些结果有助于长江流域的区域气候变化和环境研究。

**关键词:** MODIS; 气溶胶光学厚度; GIS; 长江流域; 时空变化

**中图分类号:** X16

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2012) 09-1567-07

**引用格式:** 白淑英, 史建桥, 卜军, 洪志明. 近年来长江流域气溶胶光学厚度时空变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1567-1573.

BAI Shuying, SHI Jianqiao, BO Jun, HONG Zhiming. Spatio-temporal variations of aerosol optical depth in the Yangtze River Basin during 2000-2011 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1567-1573.

大气气溶胶通常是指悬浮在大气中的固态或液态微粒。对流层气溶胶通过直接辐射强迫和间接辐射强迫强烈影响着地-气系统的辐射平衡。另外, 气溶胶粒子在云雾降水、大气光学、大气电学、大气化学和大气环境等过程中起着重要作用<sup>[1]</sup>。随着人类活动的日益频繁, 全球大气气溶胶的含量显著增加, 其通过散射、反射和吸收作用影响着全球能量平衡<sup>[2]</sup>。

由于气溶胶粒子的成分、粒径谱、形状等影响辐射收支的物理参数的时空变化较大, 同时对源汇的定量了解亦不足, 因此气溶胶一直被认为是气候变化中最不确定的重要因子。在 2007 年发布的 IPCC (政府间气候变化专门委员会) 第四次评估报告中, 对于大气气溶胶做了更完整更深入的总结, 并明确指出: 气候变化与空气质量问题是通过大气气溶胶紧密耦合在一起的<sup>[3]</sup>。

为了更深入地了解中国地区气溶胶的分布和变化特征及其区域气候效应, 近年来国内外科学家

和学者的做了大量的研究。Luo 等<sup>[4]</sup>曾利用全国 46 个甲种太阳辐射站 1961—1990 年近 30 年的资料, 计算了中国地区大气气溶胶光学厚度的分布和变化, 发现四川盆地、贵州北部、长江中下游地区、山东半岛、青藏高原和南疆盆地西部气溶胶光学厚度存在大值区, 并且年变化保持一个上升的趋势。毛节泰等<sup>[5]</sup>利用 GMS 资料来反演中国 4 季气溶胶光学厚度的分布, 发现长江中下游及沿海地区具有较大值。李成才等<sup>[6]</sup>利用 MODIS 气溶胶产品统计了中国东部地区气溶胶光学特征和季节变化特点, 认为人类活动是中国东部气溶胶的主要来源。秦世广等<sup>[7]</sup>利用地面水平能见度估算并分析了中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征, 得出中国东南部地区多年平均光学厚度基本上都大于 0.4, 其中还存在几个明显的高值区, 如四川盆地、华北和河南以及长江中下游区域, 可以达到 0.6 以上, 最大气溶胶光学厚度出现在四川盆地, 超过 0.8。罗宇翔等<sup>[8]</sup>应用 2001—2010 年 MODIS 大气气溶胶光学厚度资

**基金项目:** 公益性 (气象) 行业科研专项 (GYHY201106044); 江苏高校优势学科建设工程 (PAPD)

**作者简介:** 白淑英 (1973 年生), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为遥感与 GIS 在资源环境中的应用。E-mail: baishu-ying@163.com

**收稿日期:** 2012-07-13

料,分析了中国 550 nm AOD 年和季节的平均分布,还选取了 10 个代表性区域,分析 AOD 变化特征,建立起了近 10 年来中国气溶胶光学厚度的气候学特征。Li 等<sup>[9]</sup>用 2003—2006 年 4 年数据进行中国大陆 AOD 时空变化研究。柳晶<sup>[10]</sup>利用 MISR 数据分析了气溶胶光学厚度在整个中国地区的空间分布特征。

长江流域在行政区划上横跨中国东部、中部和西部 3 大经济区共计 19 个省(市、自治区),在地形上横跨中国西高东低的 3 大地形阶梯,流域耕地面积超过  $2460 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,占全国耕地总面积的 1/4,是主要的农业生产基地。近年来,随着长江流域经济迅速发展和人类活动加剧,人为活动引起气溶胶等污染物排放的显著增加<sup>[11]</sup>。基于 NASA 的 MODIS 气溶胶光学厚度反演资料,对分析研究区域尺度的气溶胶输送和分布有很大帮助<sup>[12-14]</sup>。目前,还未见应用最新 12 年的 MODIS C5.1 版遥感数据分析长江流域气溶胶光学厚度的时空特征变化。因此,本文拟以 MODIS L3 资料为基础,结合中国地形 3 大阶梯分布,借助 GIS 空间分析功能,分析近 12 年长江流域 AOD 时空动态变化,为区域气候变化及长江流域生态可持续发展提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源与处理

本文旨在探讨长江流域气溶胶的长时间变化和空间分布规律,而气溶胶特性受具体天气过程影响极大,不适合直接用气溶胶日平均数据进行统计和分析。因此,本文采用 NASA 发布的 MODIS Level 3, 版本为 C5.1、波段为 550 nm 的气溶胶数据集,分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,时间从 2000 年 3 月到 2011 年 2 月,来自 EOS-Terra 的月数据集。研究区域的气溶胶遥感数据通过 HDFview 2.6、matlab 和 GIS 进行处理和分析得到。

### 1.2 变化趋势分析

为了反映研究区气溶胶的总体变化特征,采用平均值法计算和统计研究区内所有像元 AOD 的年和季节平均值(3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季),得到长江流域 AOD 多年年均和季度时间序列。采用一元线性回归(线性趋势)分析其变化趋势,建立 AOD ( $y$ ) 与时间序列( $x$ , 年份)的一元线性回归方程  $y=a+bx$ ,方程斜率  $b$  即为倾向率。 $b>0$  和  $b<0$  分别表示 AOD 随时间增加和减少<sup>[15]</sup>。

### 1.3 GIS 空间分析

为进一步研究长江流域气溶胶变化的区域差异性和空间异质性,在 Arcgis 9.3 环境中,采用线性法,对 AOD 与年份进行回归分析,来表征 AOD

的空间变化趋势;采用 AOD 与年份的相关系数来确定变化是否显著。按照各像元的年 AOD 值变化趋势显著性水平,将其变化趋势分为:增加、减少但不显著( $P>0.05$ ),增加、减少显著( $0.01<P\leq 0.05$ ),增加、减少极显著( $P\leq 0.01$ )。线性趋势斜率用最小二乘法来计算,公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n iX_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中,  $n$  为研究时段年份,  $X_i$  为待分析变量 AOD。

## 2 结果与分析

### 2.1 长江流域 AOD 时变特征

#### 2.1.1 AOD 年际变化

近 12 年来,长江流域全区的年平均 AOD 值在 0.38~0.44 之间变化(见图 1(a)),2007 年最高(0.44),2000 年最低(0.38),分析表明:2000—2011 年长江流域气溶胶光学厚度呈缓慢增加趋势,线性倾向率为  $0.001 \cdot \text{a}^{-1}$ ,但趋势不明显( $P>0.05$ )。其中,2000—2007 年间的增加显著( $P<0.05$ ),2008 年以后开始明显下降。

由图 1(b)可知,长江流域“第二阶梯”、“第三阶梯”年平均 AOD 值均呈上升趋势,但趋势不显著( $P>0.05$ ),线性倾向率分别为  $0.001 \cdot \text{a}^{-1}$  和  $0.003 \cdot \text{a}^{-1}$ ,”第一阶梯”则呈极显著下降趋势( $P<0.01$ )。从图 1 还

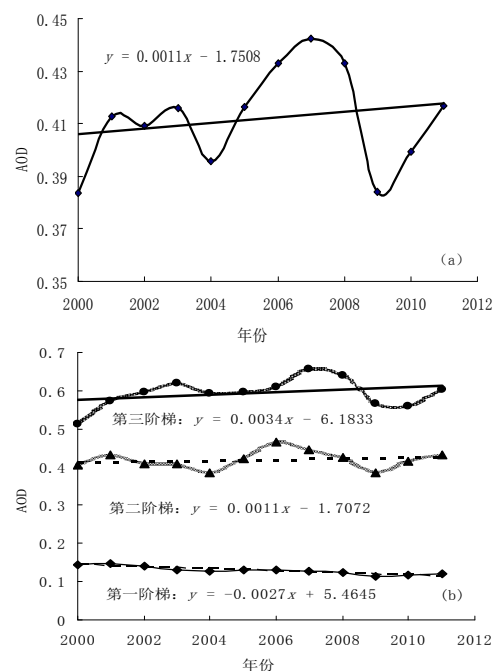


图 1 长江流域 (a) 和 3 大阶梯 (b) AOD 的年际变化  
Fig.1 Interannual variation of AOD in the Yangtze River basin (a) and three steps (b) during 2000—2011

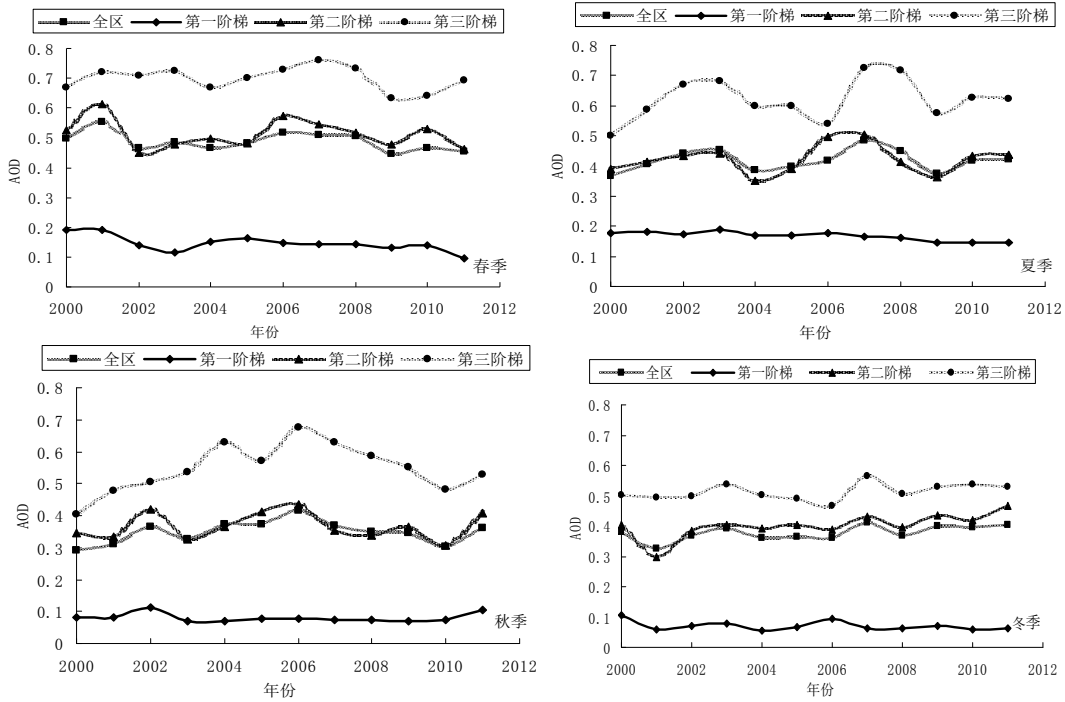


图2 2000—2011年长江流域 AOD 的季节变化趋势

Fig. 2 Variation trend of seasonal AOD in the Yangtze River basin during 2000—2011

知，长江流域全区AOD多年平均为0.41(“第一阶梯”为0.13，“第二阶梯”为0.42，“第三阶梯”为0.59)，与全球陆上平均AOD为0.19相比<sup>[16]</sup>，表明长江流域中东部地区气溶胶浓度非常高。

2.1.2 AOD 季节和月变化

从4季变化来看，长江流域四季平均AOD(图2)除春季呈下降趋势，其他3季均为上升趋势，其中冬季上升速率最快，线性倾向率为 $0.004 \cdot a^{-1}$  ( $P < 0.05$ )；“第一阶梯”4季均呈下降趋势，春季下降速率最快，线性倾向率为 $-0.005 \cdot a^{-1}$  ( $P < 0.05$ )；“第二阶梯”和“第三阶梯”除春季呈下降趋势，其他3季均表现为上升趋势，上升速率最快分别为冬季( $0.008 \cdot a^{-1}$ ,  $P < 0.05$ )、秋季( $0.007 \cdot a^{-1}$ ,  $P > 0.05$ )。

对比表1中不同季节和区域的数据，表明近12

年来长江流域气溶胶光学厚度季节变化的基本特点是：春夏季较大，秋冬季较小；春季最大，从夏季到冬季逐渐减小；冬季到来年春季跳跃性增高，但不同区域又有所不同，其中“第二阶梯”春季最大，原因可能是四川盆地受到我国北方地区远距离沙尘输送的影响，加上这一阶段降水并不多，导致AOD堆积升高，到了夏季，四川盆地的AOD相比春季显著下降，主要是由于四川盆地夏季雨量充沛，降水量约占全年的60%~90%，雨水的冲刷使得气溶胶的生命期大大缩短<sup>[3]</sup>。

从近12年的均值情况来看，长江流域春季AOD与其他季节的差距在逐步减小，且AOD年平均值和四季平均值均表现为“第三阶梯”>“第二阶梯”>“第一阶梯”。

从图3可知，2000年3月—2011年2月长江流域

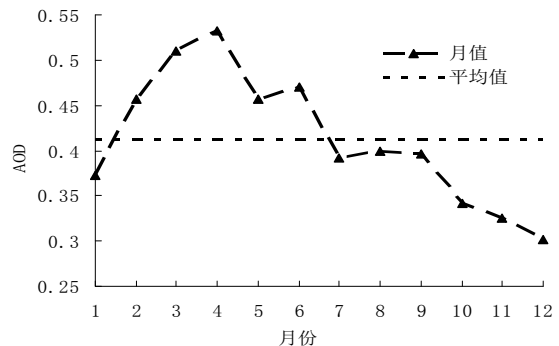


图3 2000—2011年长江流域 AOD 月变化特征

Fig.3 Monthly AOD time series in the Yangtze River basin from 2000 to 2011

表1 气溶胶光学厚度平均值、倾向率和显著水平

Table 1 Mean/ Tendency rate/Significance level of AOD

地区	变量	春季	夏季	秋季	冬季
研究区	平均值	0.4871	0.4181	0.3489	0.3785
	倾向率	-0.0038	0.0017	0.0025	0.0041
	显著水平	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P < 0.05$
第一阶梯	平均值	0.1454	0.1666	0.0806	0.0706
	倾向率	-0.0050	-0.0034	-0.0003	-0.0018
	显著水平	$P < 0.05$	$P < 0.01$	$P > 0.05$	$P > 0.05$
第二阶梯	平均值	0.5128	0.4217	0.3677	0.4016
	倾向率	-0.0029	0.0023	0.0003	0.0077
	显著水平	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P < 0.05$
第三阶梯	平均值	0.6985	0.6199	0.5477	0.5126
	倾向率	-0.0022	0.0054	0.0072	0.0033
	显著水平	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$

的月AOD在0.301~0.533之间变化,月际间的变幅较大,呈双峰型变化走势,具有季节性变化周期。其中3大阶梯略有差异,“第一阶梯”、“第二阶梯”和“第三阶梯”最大值分别出现在7月(0.180)、4月(0.553)和6月(0.785)。低值(AOD约0.31左右)出现在11—12月,高值(AOD>0.45)多出现在每年的2—6月,即秋末冬初低,春夏季高。

## 2.2 长江流域 AOD 空间变化特征

### 2.2.1 AOD 空间分布

图4为长江流域多年平均AOD空间分布,图中空白部分是地面覆盖达不到AOD遥感反演算法暗背景要求而出现的缺测。气溶胶光学厚度的分布受地形影响非常显著,因此长江流域年平均AOD空间分布表现出明显的地域差异,大体上是东高西低的“反阶梯”式的格局分布。其中低值中心位于“第一阶梯”青海东南班玛西北部,平均值为0.04,一个AOD低值带在“第一阶梯”与“第二阶梯”的高程突变线以西(四川盆地西部),呈南北走向。高值中心有3个,一个在四川盆地,中心值高达0.9,盆地,东侧的三峡险峰、北部的巴山秦岭和南面的云贵高原以盆地为中心,AOD呈递减分布。一个位于湖北天门和荆州之间的城市密集区,AOD约为0.86,由于黄山等山脉丘陵的存在,使得武汉及鄱阳湖地区与长三角高值区(中心在苏州吴县,AOD值高达0.8以上)分割开来,均出现在“第三阶梯”。

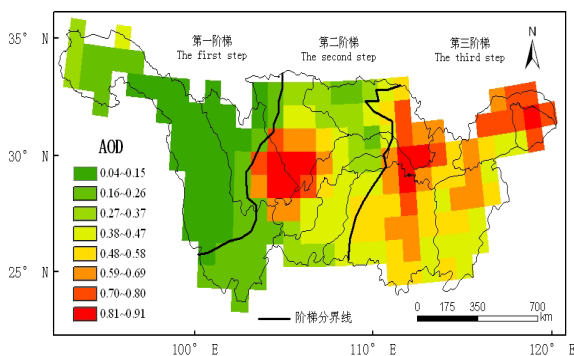


图4 2000—2011年长江流域年平均AOD空间分布

Fig.4 Spatial distribution of mean annual AOD in the Yangtze River basin from 2000 to 2011

整体而言,长江流域AOD分布为“第三阶梯”>“第二阶梯”>“第一阶梯”,且“第一阶梯”到“第二阶梯”,“第二阶梯”到“第三阶梯”的高程突变线左右的狭窄区域,AOD变化明显,存在低处明显大于高处的现象,原因可能是:(1)海拔因素,阶梯分界线左右海拔高程明显下降,大气厚度明显增加,气溶胶光学厚度也增加。(2)地形、山脉等影响,四川盆地内地面风速较小、湿度较大、白天混合层的发展经常受逆温的限制,水平扩散条件很差。(3)人

类活动<sup>[6,17-18,20]</sup>,武汉、长沙、长三角等地区人口稠密经济发达,人类活动产生的气溶胶排放大致和人口密度成正比,有效半径较大的吸收型气溶胶比周边地区要高很多。(4)其他因素,如植被覆盖<sup>[18-19]</sup>、大气环流<sup>[20-21]</sup>、沙尘<sup>[22]</sup>等。

### 2.2.2 变化趋势的空间分布

逐像元回归分析结果显示(图5),长江流域近12年来年AOD的变化存在明显的区域差异性和空间异质性,主要表现为“第一阶梯”呈显著减少趋势,“第二阶梯”和“第三阶梯”除三个高值中心呈显著增加趋势外,其余变化趋势不显著。其中研究区年AOD有增加趋势的像元占总像元数的51.5%,有减少趋势的占48.5%。研究区年AOD显著减少的像元占整个流域像元总数的17.54%,平均线性倾向率为 $-0.0038 \cdot a^{-1}$ ,主要分布在“第一阶梯”,具体为青海西部、四川西部、四川与青海交界处。年AOD显著增加的像元仅占流域像元总数的5.23%,平均线性倾向率为 $0.0112 \cdot a^{-1}$ ,主要分布在“第二阶梯”和“第三阶梯”,具体为四川东北部(绵阳、阆中)、湖北中部(宜昌、荆州、天门和武汉等)、长三角(苏州)。

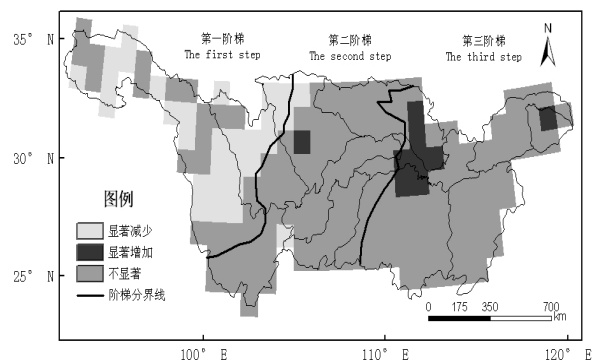


图5 2000—2011年长江流域AOD变化趋势显著性空间分布  
Fig.5 Significance level for AOD change trend in the Yangtze River basin during 2000—2011

### 2.2.3 AOD 季节分布特征

图6显示了2000—2011年长江流域春夏秋冬四季的平均AOD分布。

春季,长江流域开始春播耕种,秸秆燃烧和森林火险事件等生物质燃烧产生的气溶胶使南方地区的AOD增加明显<sup>[23-24]</sup>。“第一阶梯”大部分为低值区( $<0.2$ ),但在青海西部有一片明显的高值区,这与春季沙尘天气有很大关系。“第二阶梯”四川盆地和重庆地区,AOD达到一年中的最大值( $>1.0$ ),0.8以上高值区几乎占据整个盆地,盆地东、南、北三侧的大部分地区也分布着0.4以上的较高值。“第三阶梯”普遍被0.6以上的高值区所覆盖,其中湖北中部城市密集区,春季AOD达到最大值,中心最高

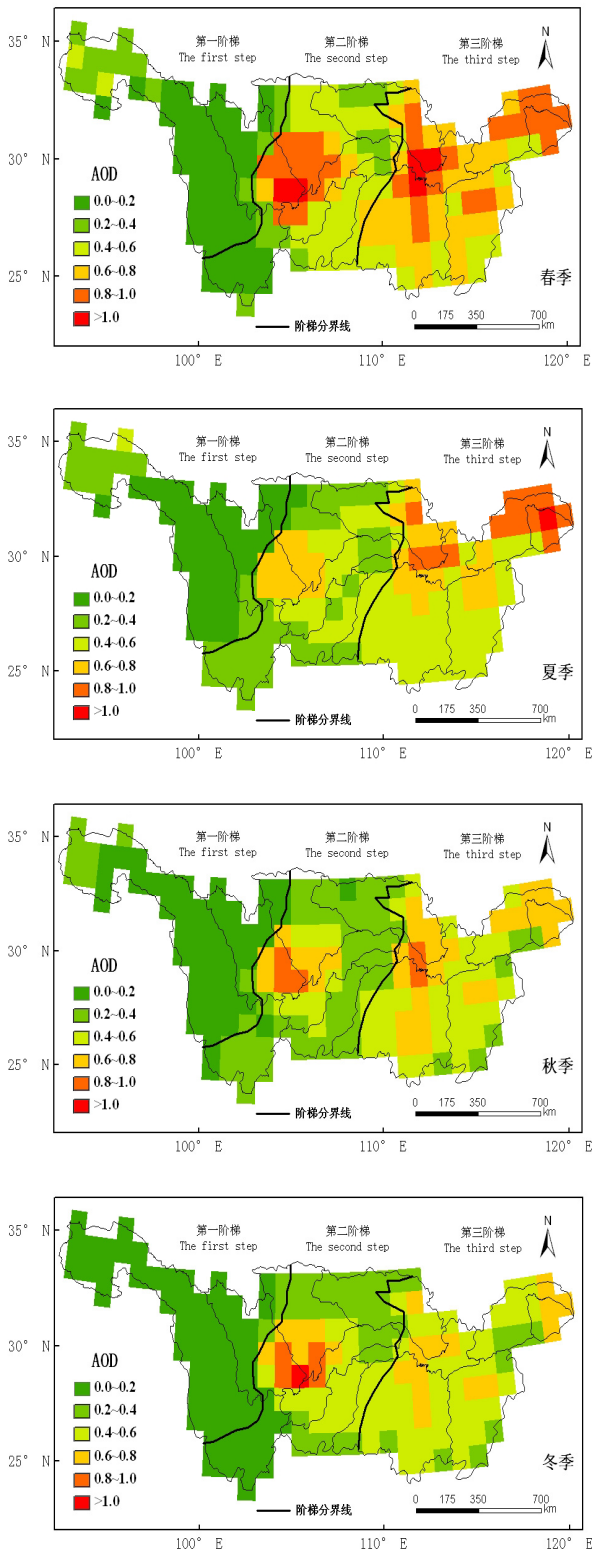


图6 2000—2011年长江流域AOD 4季分布  
Fig.6 Seasonal distribution of AOD in the Yangtze River basin during 2000—2011

值达到1.0以上。

夏季，由于季风影响，长江流域进入主汛期，降水量增多，加之雨水的冲刷作用（湿沉降）使全区平均AOD比春季高值区域明显收缩，强度减弱。

“第一阶梯”减少不明显。“第二阶梯”以四川盆地减少最为明显（0.2~0.3），需要注意的是，云南西北部、云南和四川交界处较春季AOD却增加0.1左右，可能与当地地形、气候和人类活动有关。“第三阶梯”大范围地区AOD减少，湖北中部高值区减少明显（0.2~0.3）；长三角地区则比春季略有增加，出现高值中心，AOD值达1.0以上（苏州），这与夏季人类活动增加以及气温和空气湿度增高有利于雾霾形成有关<sup>[25-26]</sup>。

秋季，长江流域全区大范围平均AOD大幅下降，高值区域明显减弱，且由于变得过于分散而基本消失。“第二阶梯”比夏季有所增加，出现红色AOD高值区（中心值达0.8以上）。“第三阶梯”则减少较明显，特别是长三角高值区减少了0.2~0.3。

冬季，在北方冬季风的作用下，有利于气溶胶的扩散和输送。“第一阶梯”低值区扩大并有所增强，普遍低于0.2。“第二阶梯”四川盆地和重庆地区高值区范围扩大、强度增强，出现AOD“热点”（中心值高达1.0以上），这可能是四川盆地内冬季地面风速较小、湿度较大、白天混合层的发展经常受逆温的限制等原因造成的。“第三阶梯”红色高值区彻底消失，基本维持在0.6左右，AOD基本达到一年中的最低值。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文在MODIS的C5.1版AOD遥感数据的基础上，结合中国地形3大阶梯分布，借助GIS空间分析功能，分析了长江流域气溶胶光学厚度的时空特征变化，主要结论如下：

（1）近12年来，长江流域全区的年平均AOD值在0.38~0.44之间变化，其中“第一阶梯”年平均AOD呈极显著下降趋势（ $P < 0.01$ ），“第二阶梯”和“第三阶梯”则呈上升趋势，但趋势不显著（ $P > 0.05$ ）。

（2）长江流域四季平均AOD除春季呈下降趋势，其他3季均为上升趋势，其中冬季上升速率最快，线性倾向率为 $0.004 \text{ a}^{-1}$ （ $P < 0.05$ ）。长江流域春季AOD与其他季节的差距在逐步减小，且AOD年平均值和4季平均值均表现为“第三阶梯”>“第二阶梯”>“第一阶梯”。

（3）长江流域AOD空间分布表现为为“第三阶梯”>“第二阶梯”>“第一阶梯”，且“第一阶梯”到“第二阶梯”，“第二阶梯”到“第三阶梯”的高程突变线左右的狭窄区域，AOD变化明显，存在低处明显大于高处的现象。

（4）长江流域AOD变化空间差异显著，其中显著减少区域占整个流域面积的17.54%，平均线性倾向率为 $-0.0038 \text{ a}^{-1}$ ，主要分布在“第一阶梯”；显著增

加的区域仅占总面积的5.23%，平均线性倾向率为 $0.0112\text{a}^{-1}$ ，主要分布在“第二阶梯”和“第三阶梯”。

(5) 长江流域3大阶梯AOD具有鲜明的季节变化特征，基本上是春夏季较大，秋冬季较小；春季最大，从夏季到冬季逐渐减小；冬季到来年春季跳跃性增高，但由于地理位置、地形、气候、人类活动等因素的影响，不同区域又有所差异。

### 3.2 讨论

由于气溶胶的分布在时间和空间上都变化很大，因此利用高分辨率的卫星遥感方式对气溶胶的分布、光学特性进行全球范围内的连续观测非常必要<sup>[27]</sup>。Zhang等<sup>[28]</sup>利用太阳光度计地面观测和卫星遥感等对中国地区气溶胶的分布和特性进行研究，发现黄河、长江中下游及沿海地区、四川盆地附近，全年都是气溶胶光学厚度的极大值中心，全国大部分地区在春季气溶胶光学厚度最大，这与本文的结论大致相同。关佳欣等<sup>[3]</sup>利用2000年3月—2009年2月MODIS遥感气溶胶光学厚度(AOD)产品，分析发现长江三角洲地区地区春季AOD达到全年最大值，均值高达0.83，中心最高值更是高达1.10以上，这与本文的分析结果略有差异。不同的研究时间尺度、数据资料及不同的地理空间范围等都将导致气溶胶光学厚度气候特征变化的差异。

本文在月尺度下结合中国地形的3大阶梯分布研究了长江流域气溶胶光学厚度(AOD)的时空动态变化，这在目前的研究中并不多见。但实际上气溶胶光学厚度还受地表覆盖、地形、环流、人类活动等多重因素影响，且不同时间尺度、不同研究范围等对AOD的影响也不相同。因此，未来要全方位考虑地表覆盖、气候因素及人类活动等影响，进一步深入研究气溶胶光学厚度时空变化分布与驱动因素之间的关系，并结合不同的时间尺度进行对比分析。

**致谢：** 本文使用了NASA的MODIS数据，在此特表示感谢。

### 参考文献：

[1] 盛裴轩, 毛节泰. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 27-29.

[2] 马井会, 郑有飞, 张华. 黑碳气溶胶光学厚度的全球分布及分析[J]. 气象科学, 2007, 27(5): 549-556.

[3] 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.

[4] LUO Y F, LÜ Daren, ZHOU X J, et al. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in the last 30 years [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D13): 14501-14513.

[5] 毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 622-635.

[6] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用MODIS研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2094-2100.

[7] 秦世广, 石广玉, 陈林, 等. 利用地面水平能见度估算并分析中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征[J]. 大气科学, 2010, 34(2): 449-456.

[8] 罗宇翔, 陈娟, 郑小波, 等. 近10年中国大陆MODIS遥感气溶胶光学厚度特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 876-883.

[9] Li Bengang, Yuan Huishi, Feng Nan, et al. Spatial and temporal variations of aerosol optical depth in China during the period from 2003 to 2006[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(7): 1801-1817.

[10] 柳晶. 中国地区气溶胶光学特性及辐射强迫的卫星遥感观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学大气科学学院, 2008.

[11] LEIL Y, ZHANG Q, HeI K B, et al. Primary aerosol emission trends for China, 1990—2005[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10: 17153-17212.

[12] REMER L A, KLEIDMAN R G, LEVY R C, et al. Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors[J]. Geophysical Research, 2008, 113:18.

[13] MEIJ D 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 and Physics Discuss, 2010, 10: 30731-30776.

[14] Yong Xie, Yan Zhang, Xiaoxiong Xiong, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth product over China using CARSNET measurements[J]. Atmospheric Environment, 2011,45(33): 5970-5978.

[15] 郑小波, 周成霞, 罗宇翔, 等. 中国各省区近10年遥感气溶胶光学厚度和变化[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 595-599.

[16] Remer L A, Kleidman R G, Levy R C, et al. Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113, D14S07, doi: 10.1029/2007JD009661.

[17] 葛美玲, 封志明. 中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析[J]. 地理学报, 2009, 64(2): 20-210.

[18] 郑小波, 罗宇翔, 赵天良, 等. 中国气溶胶分布的地理学和气候学特征[J]. 地理科学, 2012, 32(3): 265-272.

[19] 宋媛媛, 张艳燕, 王勤耕, 等. 基于遥感资料的中国东部地区植被VOCs排放强度研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2216-2227.

[20] 邓学良, 邓伟涛, 何冬燕. 近年来华东地区大气气溶胶的时空特征[J]. 大气科学学报, 2010, 33(3): 347-354.

[21] 姚锦烽. 东亚季风区人为气溶胶直接气候效应的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学大气科学学院, 2010.

[22] 田永丽, 张万诚, 陈新梅, 等. 中国西南地区气溶胶光学厚度的时空特征[J]. 气象科学, 2010, 30(6): 785-790.

[23] 厉青, 张丽娟, 吴传庆, 等. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析[J]. 生态与农村环境报, 2009, 25(1): 32-37.

[24] 王玲, 田庆久, 包颖. 基于HJ卫星IRS遥感数据的农作物秸秆火点提取模式研究[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 661-667.

[25] 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 533-542.

[26] 付晓辉, 肖刚, 姜玉印, 等. 近53年宜昌市霾的演变特征及气象因子诊断[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 164-168.

[27] KAUFMAN Y J, TANRE D, GORDON H R, et al. Passive remote sensing tropospheric aerosols and atmospheric correction for the aerosol effect[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D14): 16815-16830.

[28] ZHANG Jiahua, MAO Jietai, WANG Meihua. Analysis of the aerosol extinctions in different areas of China[J]. Advanced in Atmospheric Sciences, 2002, 19(1): 136-152.

## Spatio-temporal variations of aerosol optical depth in the Yangtze River Basin during 2000—2011

BAI Shuying<sup>1,2</sup>, SHI Jianqiao<sup>1,3</sup>, BO Jun<sup>3</sup>, HONG Zhiming<sup>3</sup>

1. College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Environmental Protection Department of Nanjing Institute of Environmental Science, Nanjing 210042, China;

3. Unit 61, No.94783 of PLA, Changxing, Zhejiang 313111, China

**Abstract:** Based on the monthly data of MODIS Level 3 and the terrain of three ladder distribution in China, the spatio-temporal variabilities of Aerosol Optical Depth (AOD) in the Yangtze River basin has been analyzed from March 2000 to February 2011. The results showed that the areal annual mean AOD varied between 0.38 and 0.44 for the whole Yangtze River basin during 2000-2011, while the annual AOD varied greatly for the different terrain of three ladder distribution in the Yangtze River basin. Significant decreasing trends can be found in the first step, and increasing but not significant trends occurred in the second step and third step. Moreover, increasing trends can be found in summer, autumn and winter and the greatest increasing trend appeared in winter with a tendency rate was  $0.004 \cdot a^{-1}$ , while the seasonal mean AOD in spring had a descending trend. The gap of the mean AOD between spring and the other seasons also reduced gradually. Aerosol Optical Depth in the three steps of Yangtze River basin had distinctly seasonal changing characteristics which showed higher value occurred in spring and summer and lower value appeared in autumn and winter. The seasonal characteristics showed that the mean AOD of spring was the largest, then the AOD decreased gradually from summer to winter, while it took a leap rise from winter to next spring. However, different characteristics can be found in different regions due to the different geographical location, terrain, climate and human activities, etc. Both of the annual and seasonal mean AOD showed the same features that the biggest AOD value occurred in the third step and the least appeared in the first step. There were significant spatial differences of Yangtze River basin AOD. The significant increasing area was accounted for 17.54%, which mainly occurred in the first step, while the significant decreasing area was accounted for 5.23% and mainly appeared in the second and third step. Moreover, because of the effect, such as altitude, terrain and mountain barrier, etc, the area from the first step to the second step and the second step to the third step, the distribution of AOD was significantly greater than that of lower place. These results might be greatly helpful to learn the possible relationship between the regional climate change and the air pollution variation over the Yangtze River basin.

**Key words:** MODIS; aerosol optical depth; GIS; Yangtze River Basin; spatio-temporal variation