

doi: 10.6046/gtzyyg.2017.04.22

引用格式: 张明明,程东兵,齐建华,等. 基于卫星遥感的池州市气溶胶光学厚度时空分布[J]. 国土资源遥感,2017,29(4):147-155. (Zhang M M, Cheng D B, Qi J H, et al. Temporal and spatial distribution of aerosol optical depth in Chizhou based on satellite remote sensing[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(4):147-155.)

# 基于卫星遥感的池州市气溶胶光学厚度时空分布

张明明, 程东兵, 齐建华, 胡建春, 罗晶

(安徽省池州市气象局, 池州 247100)

**摘要:** 气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)是大气环境的重要评价指标,可用于反映空气污染程度。通过卫星遥感获取 AOD,可以弥补地面观测难以反映 AOD 空间分布和整体变化趋势的不足。以池州市为研究区,利用 2013 年 12 月—2014 年 12 月间获取的 EOS MODIS 数据,基于改进的暗像元法(V5.2 算法),反演研究区 2014 年全年 4 个季度的 AOD; 在其可靠性进行验证的基础上,分析研究区 AOD 时空变化特征。研究表明,AOD 反演结果与 MOD04\_3K 气溶胶数据在整体变化趋势上有较好的一致性,但同时也存在一定差异,尤其是在冬半年; 研究区 AOD 区域差异和季节变化明显,总体表现为北部沿江 AOD 明显高于南部,春夏季节高于秋冬季节,同时不同地区变化趋势和幅度存在不同; AOD 的时空变化强烈受到自然因素和人为因素 2 方面的影响。

**关键词:** MODIS; 气溶胶光学厚度(AOD); 改进的暗像元法; 池州市

**中图法分类号:** TP 751.1; X 513; P 407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2017)04-0147-09

## 0 引言

气溶胶是指悬浮在大气中的固体(如尘埃、烟粒等)和液体(如由水和冰组成的云雾滴、冰晶等)微粒与大气载体共同组成的多相体系<sup>[1]</sup>。虽然气溶胶占整个大气的比重并不大<sup>[2]</sup>,但作为地-气系统的重要组成部分,其对包括环境质量、气候变化和人类健康等在内的诸多方面都有重大而深远的影响<sup>[3-5]</sup>。已有研究表明<sup>[6]</sup>,高浓度气溶胶在静稳天气条件下不断积聚凝结增长是产生大范围持续性雾霾天气的主要因素。

气溶胶最基本的光学特性可以用气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)来衡量,其定义为气溶胶消光系数沿辐射传输路径在垂直方向上的积分,为无量纲量<sup>[7]</sup>。AOD 描述了气溶胶对光的衰减作用,是表征大气浑浊度的重要物理量,能够在一定程度上反映区域空气质量的好坏<sup>[8]</sup>。准确、及时获取 AOD 的时空分布信息,对全面认识和掌握大气中颗粒物污染程度及其变化特征有着重要意义。目前,AOD 主要通过地基观测和卫星遥感 2 种方式获取。常规的地基观测时效性强且数值准确,但受限

于站点分布的不均,无法很好地反映较大范围 AOD 的连续分布; 而卫星遥感则能很好地弥补这一不足,包括 MODIS 在内的各类光学遥感仪器已在此方面得到了广泛应用<sup>[9]</sup>,成为目前监测区域 AOD 分布的一种有效手段。国际上,Kaufman 等<sup>[10]</sup>在 20 世纪 90 年代提出了利用 MODIS 数据反演陆地上空 AOD 的方法,即暗像元法(dense dark vegetation, DDV)。Levy 等<sup>[11]</sup>在 DDV 法的基础上加以发展完善,进而提出了改进的 DDV 法(V5.2 算法),已作为一种经典算法在 AOD 遥感领域广泛应用,MODIS 标准气溶胶产品(MOD04)就是以此算法为基础生成的。在国内,毛节泰等<sup>[12]</sup>、李成才等<sup>[13]</sup>、刘桂青等<sup>[14]</sup>和段婧等<sup>[15]</sup>通过与地面实测数据进行对比验证,对 MODIS 标准气溶胶产品进行了时空变化分析; 赵秀娟等<sup>[16]</sup>利用 DDV 法反演并分析了兰州地区 AOD 空间分布情况; 唐家奎等<sup>[17]</sup>利用 Terra 和 Aqua 双星 MODIS 数据协同反演,最终获取陆地上空 AOD。作为主要是面向大区域尺度乃至世界范围的气溶胶监测与展示,MODIS 标准气溶胶产品最新的 Collection 6 数据集提供的 MOD04\_3K 与之前的 Collection 5 数据集提供的 MOD04\_L2 相比,星下点空间分辨率由 10 km 提高到了 3 km; 但对池州市

收稿日期: 2016-06-21; 修订日期: 2016-07-28

基金项目: 安徽省气象局硕博士工作启动经费项目“基于卫星遥感和地面监测数据的池州市气溶胶分布研究”(编号: C201527)资助。

第一作者: 张明明(1989-),男,硕士,助理工程师,主要从事天气预报和环境气象方面的研究。Email: zhangmingming\_5310@126.

万方数据

这样的中小城市来说,其空间分辨率仍较低,难以满足在该区域尺度上研究的需求。本文利用 EOS MODIS L1B 数据,以安徽省池州市为研究区,基于改进的 DDV 法 (V5.2 算法) 反演得到空间分辨率为 1 km 的池州市 AOD,通过与 MOD04\_3K 数据进行可靠性对比验证,分析池州市 2014 年全年 4 个季节的 AOD 时空分布变化特征。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

池州市地处安徽省西南部 (E116°38' ~ 118°05', N29°33' ~ 30°51'), 长江下游南岸 (图 1)。全市下辖 1 区 3 县,分别为贵池区、东至县、石台县和青阳县。池州市境内地形地貌多样,其东南部以九华山、牯牛降为主体构成南部山区骨架,是皖南山区的组成部分;中部为岗冲相间的丘陵区;西北部沿江地带为洲圩区,地势低平,河湖交错。

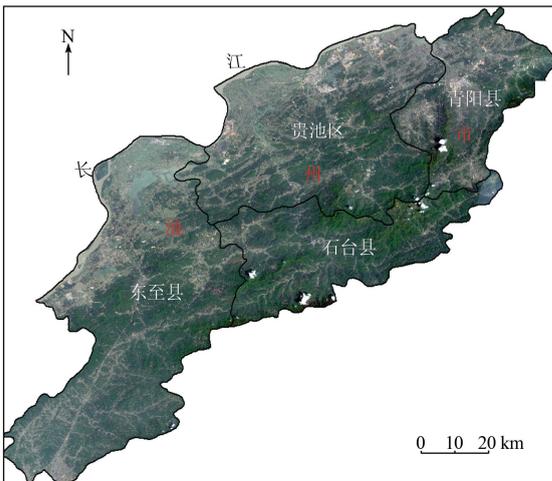


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

作为中国第一个国家生态经济示范区,池州境内森林覆盖率达 59.2%,生态环境优良。但近年来,随着社会经济的发展,尤其是工业生产、汽车尾气等人为因素的影响,使得气溶胶的排放显著增加,灰霾天气频发。据池州市气象部门统计,2014 年池州市出现雾霾的天数为 129 d,雾霾天数超过了全年的 1/3,发布相关预警 22 次,对池州市环境质量和居民健康造成了较大影响。因此,准确、及时地了解该地区大气污染分布状况及变化特征是十分迫切和必要的。

### 1.2 MODIS 数据

本文使用的 EOS MODIS 数据包括 MODIS L1B 数据、云检测数据 (MOD35)、气溶胶数据 (MOD04\_3K) 和植被指数数据 (MOD13A3),除 MOD04\_3K 空间分辨率为 3 km 外,其余均为 1 km,选取时段均为 2013 年 12 月—2014 年 12 月。其中 MODIS L1B 数据包括 MOD02 反射率数据和 MOD03 地理空间定位数据; MODIS 植被指数产品 (MOD13A3) 选用标准的归一化差值植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI),为逐月合成数据。上述数据均来自 NASA\_LAADS (level 1 and atmosphere archive and distribution system) 网站 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)。

### 1.3 AOD 反演方法

在大量实验的基础上, Kaufman 等<sup>[10]</sup>发现在晴空洁净 (气溶胶较少) 大气背景下,绿色植被覆盖区的红光 (0.66 μm)、蓝光 (0.49 μm) 波段反射率与中红外 (2.1 μm) 波段存在一定关系。由于中红外波段反射率主要由地表决定,受气溶胶的影响较小,因此对于非洁净大气,红光、蓝光波段地表反射率可以通过与中红外波段表观反射率之间建立的简单关系式估算得到,由此形成传统的 DDV 法,即

$$\begin{cases} \rho_{0.66}^s = \rho_{2.1}^m / 2 \\ \rho_{0.47}^s = \rho_{2.1}^m / 4 \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $\rho_{0.66}^s$  和  $\rho_{0.47}^s$  分别为波长在 0.66 μm 和 0.47 μm 处的地表反射率;  $\rho_{2.1}^m$  为波长在 2.1 μm 处的表观反射率。

Levy 等<sup>[11]</sup>在此基础上,考虑了散射角和 NDVI 对地表反射率的影响,进而提出了改进的 DDV 法 (V5.2 算法),即

$$\begin{cases} \rho_{0.66}^s = \rho_{2.12}^m \cdot slope_{0.66/2.12} + yint_{0.66/2.12} \\ \rho_{0.47}^s = \rho_{0.66}^m \cdot slope_{0.47/0.66} + yint_{0.47/0.66} \end{cases}, \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} slope_{0.66/2.12} = slope_{0.66/2.12}^{NDVI_{SWIR}} + 0.002\Theta - 0.0027 \\ yint_{0.66/2.12} = 0.00025\Theta + 0.033 \\ \Theta = \cos^{-1}(-\cos\theta_0\cos\theta + \sin\theta_0\sin\theta\cos\varphi) \\ slope_{0.47/0.66} = 0.49 \\ yint_{0.47/0.66} = 0.005 \end{cases}, \quad (3)$$

$$slope_{0.66/2.12}^{NDVI_{SWIR}} = \begin{cases} 0.48 & NDVI_{SWIR} < 0.25 \\ 0.58 & NDVI_{SWIR} < 0.75 \\ 0.48 + 0.2(NDVI_{SWIR} - 0.25) & 0.25 \leq NDVI_{SWIR} \leq 0.75 \end{cases}, \quad (4)$$

$$NDVI_{SWIR} = (\rho_{1.24}^m - \rho_{2.12}^m) / (\rho_{1.24}^m + \rho_{2.12}^m), (5)$$

式中:  $\Theta$  为散射角;  $\theta_0, \theta$  和  $\varphi$  分别为太阳天顶角、卫星天顶角和相对方位角;  $\rho_{1.24}^m$  和  $\rho_{2.12}^m$  分别为波长在 1.24  $\mu\text{m}$  和 2.12  $\mu\text{m}$  处的表观反射率。

## 2 数据处理

### 2.1 MODIS 数据预处理

利用 MRTSwath 工具软件,基于 MOD03 数据对 MOD02 数据进行几何纠正,将原始投影类型转换为经纬度投影,并将影像 DN 值转换为表观反射率值。同理,分别利用 MCTK 和 MRT 工具对 MOD04\_3K 和 MOD13A3 数据进行预处理,投影类型转换为经纬度投影,并通过镶嵌、裁剪处理将空间范围选择为池州市。

在利用改进的 DDV 法反演 AOD 时,云层会导致很大的反演误差,因此在反演前需对影像进行云检测。本文使用 MOD35 云检测数据进行逐像元判定,剔除云像元。

### 2.2 多维查找表构建

本文借助 6S 大气辐射传输模型,建立反演 AOD 所需的查找表(look up table, LUT)。根据研究区的地理位置及 MODIS 数据获取时间(2013 年 12 月—2014 年 12 月),气溶胶模式选择标准辐射大气(standard radiation atmosphere, SRA)中的大陆型,大气廓线分别选择中纬度夏季大气廓线(2014 年 4—9 月)和中纬度冬季大气廓线(2013 年 12 月—2014 年 3 月及 2014 年 10—12 月),海拔高度设为 0 km。用于构建 6 维 LUT 中的 5 维参数(6S 模型输入值)具体设置见表 1,其中相对方位角为太阳与卫星的方位角之差;还有 1 维参数为模拟得到的表观反射率(6S 模型输出值)。

表 1 LUT 参数设置

Tab. 1 Parameters in LUT

| 参数        | 范围        | 步长   |
|-----------|-----------|------|
| 气溶胶光学厚度   | 0.1 ~ 1.5 | 0.10 |
| 地表反射率     | 0 ~ 0.1   | 0.01 |
| 相对方位角/(°) | 0 ~ 180   | 10   |
| 太阳天顶角/(°) | 0 ~ 75    | 5    |
| 卫星天顶角/(°) | 0 ~ 75    | 5    |

### 2.3 地表反射率估算

选取中红外(2.12  $\mu\text{m}$ )波段表观反射率范围在 0.01 ~ 0.15 的像元为暗像元<sup>[18]</sup>,其地表反射率则根据改进的 DDV 法由式(2)~(5)估算得出。

### 2.4 反演插值与高度订正

将 MODIS 影像逐像元的实际参数值(包括表观

反射率、估算的地表反射率、太阳和卫星的天顶角及相对方位角)代入 LUT,进行多维查找比较,当其相一致时,则将 LUT 中该组合对应的 AOD 值赋给当前像元点;其他值则采用线性内插的方法,从而获取像元在 550 nm 处的 AOD 反演初值。

由于前期在查找表中假定的像元海拔高度为 0 km,而池州市境内地势起伏较大,海拔高度不一,故需要根据实际海拔高度对 AOD 反演初值进行高度订正<sup>[19]</sup>(见式(6)),最终得到池州市 AOD 空间分布图,即

$$\tau_z = 0.00877 \times 0.55^{-4.05} [1 - e^{-\frac{z}{8.5}}] + \tau_0, (6)$$

式中:  $\tau_z$  为经海拔高度订正后的 AOD;  $z$  为海拔高度, km;  $\tau_0$  为假定海拔高度为 0 km 状态下的 AOD 反演初值。

## 3 结果与分析

### 3.1 反演结果及验证

本文选取 2013 年 12 月—2014 年 12 月获取的池州市晴空区域较多的 MODIS L1B 数据影像共 75 景,逐月景数分别为 19, 10, 1, 5, 2, 5, 2, 4, 0, 1, 9, 4 和 13(其中 8 月份因有大面积云存在,故没有符合条件的影像),利用改进的 DDV 法最终获得池州市 1 km 空间分辨率的 AOD 分布图。

由于研究区内没有地基气溶胶观测数据,而 MOD04\_3K 数据被证实在地地区域与 AERONET 地面观测站点相关性较好<sup>[20]</sup>,其精度满足期望误差要求<sup>[21]</sup>。本文参考胡子梅<sup>[22]</sup>和张璐等<sup>[23]</sup>的研究方法,将 AOD 反演结果与同时间获取的 MOD04\_3K 产品数据进行比较(图 2)。

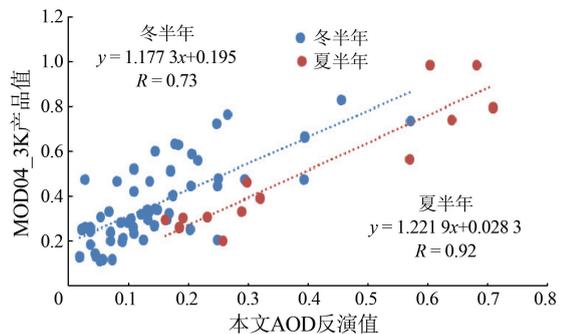


图 2 MODIS AOD 反演结果与 MOD04\_3K 数据对比

Fig. 2 Comparison between AOD retrieved from MODIS and MOD04\_3K

从图 2 可以看出,MODIS AOD 反演结果与同时时间的 MOD04\_3K 产品数据在整体变化趋势上有着较好的一致性,但也存在一定的差异——整体上,产品

值高于本文的反演值,总平均绝对误差和相对误差分别为 0.19 和 51.63%; 季节上,冬半年(1—3 月和 10—12 月)两者差别较大且相关性较低,而夏半年则两者差别较小且相关性显著提升。除因空间分辨率不一致导致的整体差异外,由于 MOD04\_3K 产品数据是采取对暗/亮目标使用不同方法(暗目标使用改进的 DDV 法,亮目标使用深蓝算法)获取 AOD 后融合的结果<sup>[24]</sup>,考虑冬半年地表植被覆盖减少,符合改进的 DDV 法的总体程度下降,这可能是反演结果与 MOD04\_3K 产品值在该季节存有较大偏差的原因。线性相关分析表明,本文的 AOD 反演值与产品值在 0.01 置信水平(双侧检验)下显著相关,其 Pearson 相关系数为 0.78。总体而言,本文的反演结果具有可信性,可以用来表征池州市 AOD 的时空分布并据此进行特征分析。

### 3.2 AOD 空间分布特征

利用改进的 DDV 法得到池州市 2014 年 1—12 月共 55 景 AOD 影像,首先计算 55 景 AOD 总和,然后除以对应的有效像元(非 0 值)总景数,得到池州市 2014 年 AOD 均值分布情况(图 3),其中 0 值为云、水体或亮地表覆盖区。

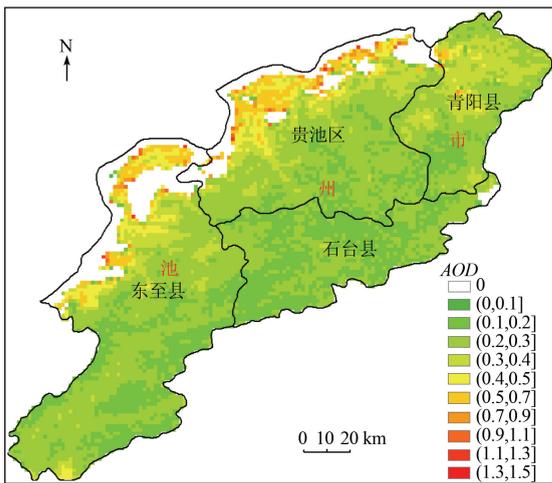


图 3 2014 年池州市 AOD 均值分布

Fig. 3 Spatial distribution of AOD average in Chizhou City in 2014

从图 3 可以看出,2014 年池州市 AOD 均值在空间分布上特征明显,具体表现为北部沿江一线较高(一般在 0.70 以上),中南部较低(基本都在 0.40 以下)。由于池州属于皖南山区,境内多山,唯有沿江平原地势平坦,适宜大面积聚集生产和生活,故沿江一线多为城镇中心,也成为 AOD 高值区,并随着城镇规模的扩大而增高。

以贵池区、东至县、石台县和青阳县共 1 区 3 县分地区进行统计,得到不同区域 AOD 统计值(表 2)和 AOD 频数分布(图 4)。

表 2 2014 年池州市各区县 AOD 统计比较

Tab. 2 Comparison of AOD statistics in different regions of Chizhou City in 2014

| 各区县 | 最小值  | 最大值  | 平均值  | 标准差  |
|-----|------|------|------|------|
| 贵池区 | 0.11 | 1.26 | 0.31 | 0.14 |
| 东至县 | 0.08 | 1.21 | 0.27 | 0.12 |
| 石台县 | 0.01 | 0.37 | 0.20 | 0.03 |
| 青阳县 | 0.05 | 0.78 | 0.28 | 0.08 |
| 池州市 | 0.01 | 1.26 | 0.27 | 0.12 |

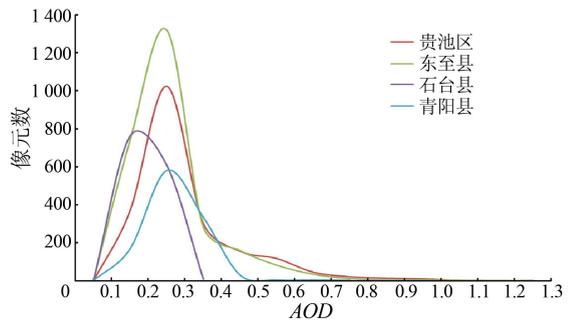


图 4 2014 年池州市各区县 AOD 频数分布比较

Fig. 4 Comparison of frequency distribution of AOD in different regions of Chizhou City in 2014

由表 2 和图 4 可以看出,4 个地区的 AOD 值分布差异明显: 贵池区 AOD 值最高,均值为 0.31,值域分布的最高频数位于 0.20~0.30; 青阳县和东至县次之,AOD 均值分别为 0.28 和 0.27,值域分布的最高频数也都位于 0.20~0.30; 而石台县 AOD 均值仅为 0.20,为 4 个地区中最低,值域分布的最高频数位于 0.10~0.20,且聚集性较好,范围集中,与其他 3 个地区差异明显。

此外,由图 3 可以看出,除北部沿江一线,在东至县西南部、青阳县中北部也存在 AOD 均值较高区域,这与各区域的城镇化发展状况及特殊的地理位置相关。东至县西南部 AOD 值较高区域为龙泉镇,作为承担加快城镇化进程和带动周围农村地区发展任务的全国重点镇以及安徽省 13 个重点边贸市场之一,龙泉镇被赋以副县级镇级别,承担了一系列的农村改革试点工作,2006 年被省政府列为新农村建设示范镇,镇内有工业园区、温泉度假村等,使得该地区 AOD 值较高,达到了 0.50 左右; 而青阳县中部为县城中心,是生产和生活聚集地,北部则为县城中心的延伸,加之与贵池区沿江一线高值区相邻,受其影响较大,因而出现较高的 AOD 值。与此相对应的是石台县,作为安徽省“两山一湖”旅游经济圈的重要组成部分,全县生态环境优良,即使是石台县中部的县城中心,其 AOD 值与周边相比也未明显偏高。

### 3.3 AOD 季节变化特征

按季节分别统计 2014 年池州市 4 季 AOD 反演

均值(图 5),分析研究区 AOD 季节变化。4 季的具  
体划分为:2013 年 12 月—2014 年 2 月为冬季(30

景),3 月—5 月为春季(12 景),6 月—8 月为夏季  
(6 景),9 月—11 月为秋季(14 景)。

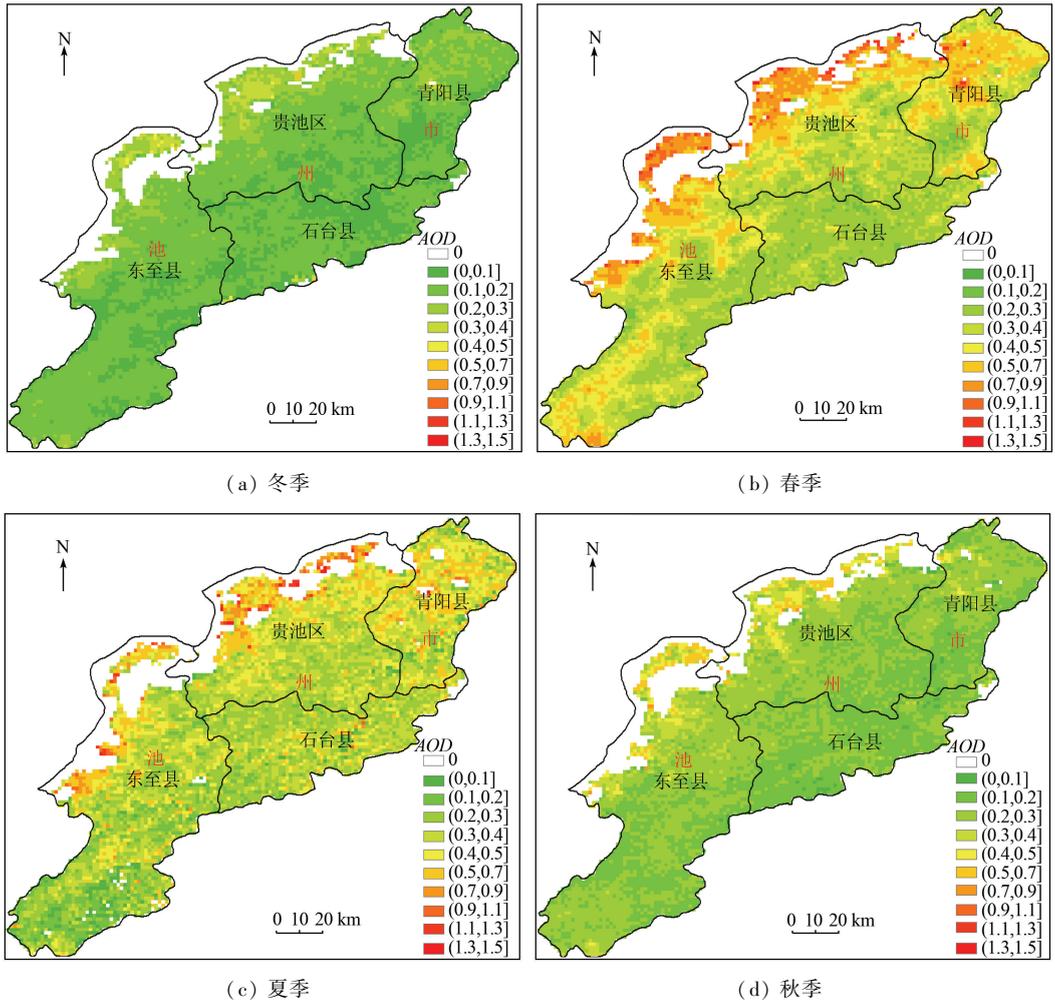


图 5 2014 年池州市 4 季 AOD 分布  
Fig. 5 Spatial distribution of AOD in four seasons of Chizhou City in 2014

从图 5 可以看出,2014 年池州市 AOD 值季节  
变化明显,冬、春、夏、秋 4 个季节均值分别为 0.15,  
0.41,0.36 和 0.23。总体上看,研究区 AOD 值春、  
夏季高,秋、冬季低。具体表现为:冬季,研究区内  
AOD 值普遍较低,AOD 均值在 4 季中最低,值域范  
围也最为集中( $\leq 0.6$ ),整个研究区无明显高值区  
域;春季,AOD 值呈爆发式增长,均值位列 4 季之  
首,高值区( $>0.9$ )集中于北部沿江一带,且呈现出  
NE—SW 向连片分布并向 SE 方向延伸的趋势,  
AOD 高低值分界较为清晰,南北差异对比明显;夏  
季,AOD 值小于春季但仍较高,在空间分布上与春  
季相比也有所不同,整个研究区 AOD 值分布较为均  
匀,北部沿江的高值有所下降,而南部的低值亦有  
所抬升,南北部之间的差异缩小,高低值之间界线不  
复存在;秋季,整个研究区内 AOD 值回落明显,虽然  
北部沿江一线仍为高值区,但范围已显著缩小且聚  
集度不高,在数值上与春、夏 2 季相比也有明显

降低。  
进一步对贵池区、东至县、石台县和青阳县地区  
进行统计,得到不同区域 4 季 AOD 均值变化情况  
(图 6)。

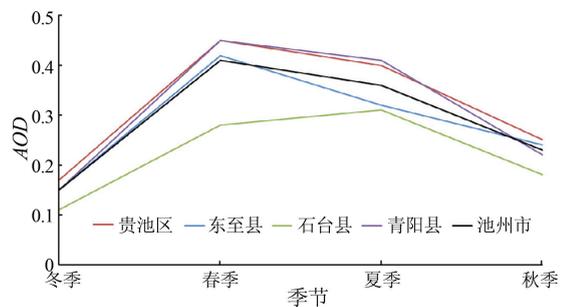


图 6 2014 年池州市各区县 4 季 AOD 均值比较  
Fig. 6 Comparison of mean values of AOD in four  
seasons of Chizhou City in 2014

由图 6 可以看出,在总体上,贵池区和青阳县  
AOD 值较高,东至县次之,石台县在 4 季中 AOD 值

均为最低,且与其他 3 个地区差异较为明显。季节变化上,除石台县外,贵池区、东至县和青阳县 3 个地区由冬季至秋季,均为先快速升高(冬季—春季)后缓慢下降(春季—夏季—秋季),在这期间 AOD 值变化范围在 0.30 左右,且均发生在相邻季节(冬季—春季),4 季变化幅度大且急速;而石台县为先缓慢上升(冬季—春季—夏季)再缓慢下降(夏季—秋季),在这期间 AOD 值变化范围为 0.20,相邻季节变化最大为 0.17(冬季—春季),4 季变化幅度小且平稳。

### 3.4 AOD 时空变化因素分析

#### 3.4.1 自然因素

NDVI 是反映植被覆盖的一个重要指数<sup>[25]</sup>,图 7 示出利用 MOD13A3 产品数据得到的池州市 2014 年 NDVI 均值分布。

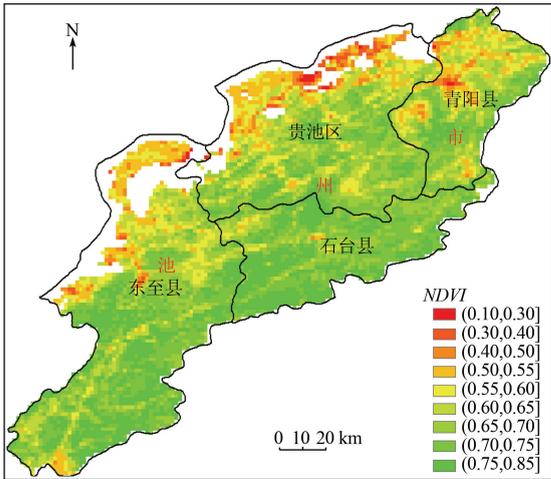


图 7 2014 年池州市 NDVI 空间分布

Fig.7 Spatial distribution of NDVI in Chizhou City in 2014

由图 7 可以看出,研究区内植被覆盖由北部沿江一线向东南方向逐步增加,均值由 0.64 升至 0.72,整体上南部高于北部(图 8)。

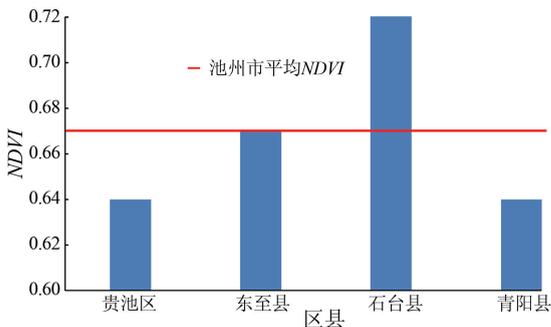


图 8 2014 年池州市各区县 NDVI 均值比较

Fig.8 Comparison of mean values of NDVI in different regions of Chizhou City in 2014

研究区 NDVI 与 AOD 的定量回归散点图如图 9 所示。 万方数据

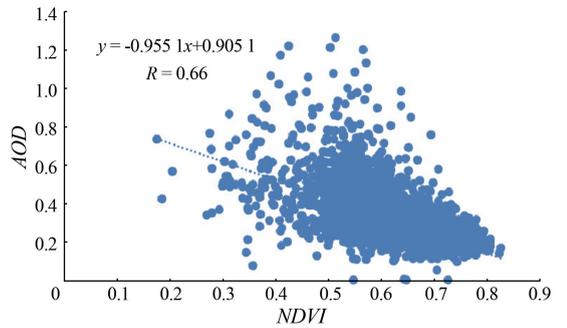


图 9 NDVI 与 AOD 的散点图

Fig.9 Scatter diagram of AOD and NDVI

从图 9 可以看出,在整体变化趋势上,AOD 随着 NDVI 的增大而减小,两者呈明显的负相关性,具体表现为:随着 NDVI 的增大( $<0.7$ ),AOD 相应的迅速减小,之后( $NDVI > 0.7$ )则趋于平缓。AOD 空间分布与植被茂密程度存在紧密联系的原因很可能是由于地表植被的覆盖能够有效吸附空气中的悬浮物,对大气中的粉尘、微小颗粒具有阻挡、吸附、滞留和过滤的作用,从而达到“净化”空气的效果,抑制了 AOD 高值的产生。另外值得注意的是,AOD 值分布在随着 NDVI 值逐步增大的过程中,其聚集性明显转好。这是由于相比于高植被覆盖区,低植被覆盖区对于空气中的气溶胶颗粒的吸附净化能力不足,主要表现在一方面无法有效阻滞如扬尘天气导致的地面颗粒物悬浮于空气中;另一方面对来自周边区域扩散的颗粒物也无法形成生态屏障、起到净化作用,这使得该区域对源自本地区产生、周边区域扩散或两者兼而有之的颗粒物均易受到直接影响,导致在这一区域 AOD 值波动范围大、聚集性差。

池州市处于亚洲大陆内陆,4 季不同的天气和气候特点对 AOD 时空分布变化也会产生较大的影响。春季气候干燥且风速较大,有利于本地扬尘天气的产生,同时易受到北方地区在此季节多发的沙尘天气的影响,加上季内有效降水并不多,导致 AOD 堆积升高。夏季气温和湿度都比较高,有利于“气粒”转化过程中气溶胶的生成以及水溶性气溶胶吸湿增长<sup>[26]</sup>,因而使得 AOD 维持在较高水平;与此同时,混合层发展较高,对流发展旺盛,使得大气交换比较充分,AOD 在空间分布上表现得较为均匀,但季内尤其是梅雨期降水频繁雨量充沛,雨水的冲刷通过湿沉降作用大大缩短了气溶胶寿命期<sup>[27]</sup>,不过仍远高于秋、冬季。秋、冬季一般天气晴好,气温及相对湿度较低,使得 AOD 相比于春、夏季进一步降低。

#### 3.4.2 人为因素

除自然因素外,AOD 的空间分布还强烈受到人

类活动的影响。作为人类活动最为主要的载体,每个城市因其自身特点(人口密度、土地资源、生活方式和城镇化水平等)的不同而在 AOD 值上存在着差异<sup>[28]</sup>。本研究通过查询 2015 年出版的池州市统计年鉴,统计了 2014 年池州市 1 区 3 县共 4 个区县的城市建设用地占比、人口密度以及工业和建筑业的生产总值,对比结果分别见图 10 和图 11。

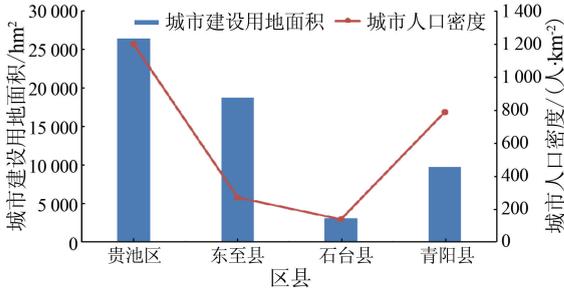


图 10 2014 年池州市各区县建设用地面积和城市人口密度

Fig. 10 Construction land area and urban population density in different regions of Chizhou City in 2014

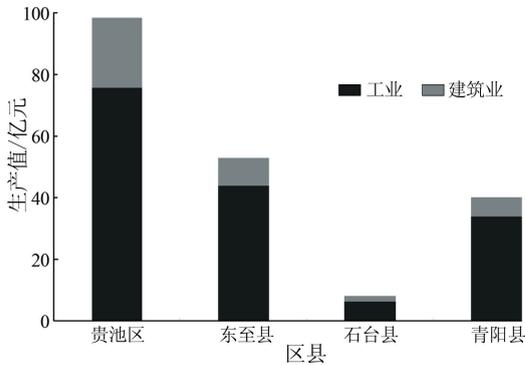


图 11 2014 年池州市各区县工业和建筑业生产总值

Fig. 11 Production values of industry and construction industry in different regions of Chizhou City in 2014

由图 10 和图 11 可以看出,就城镇化水平而言,在 4 个地区中,贵池区城镇化发展水平最高,其不论是城市建设用地面积还是城市人口密度都位居第一,分别为 26 435 hm<sup>2</sup> 和 1 199 人·km<sup>-2</sup>。东至县和青阳县次之,其中东至县城市建设用地面积为第二,达 18 733 hm<sup>2</sup>;而青阳县城市人口密度为第二,达 788 人·km<sup>-2</sup>。石台县最低,其城市建设用地面积和城市人口密度分别仅为 3 109 hm<sup>2</sup> 和 137 人·km<sup>-2</sup>。最高值与最低值之间相差近 9 倍,差异十分明显。就工业化水平来看,贵池区依然位居第一,其工业和建筑业产值分别为 756 874 万元和 228 057 万元;东至县和青阳县次之,分列第二和第三位;石台县最低,工业和建筑业产值仅分别为 63 371 万元和 17 610 万元,两者均仅连贵池区的一成都不到,存在很大差距。

纵观图 3 和图 5 可以看出,AOD 均值表现出与各区县发展状况相统一的现象。贵池区经济发展迅

速,其 2014 年 GDP 总量占全市的 43%,同时工业和建筑业发达,加之城市建设用地面积和城市人口密度均较大,促使该地区 AOD 值维持在一个较高的范围;石台县则主要以农林业为主,城镇化和工业化建设规模不大,使其本地 AOD 值较小;而东至县和青阳县则居于贵池区和石台县之间。此外,一些较为集中的人类生产活动也会对该时段 AOD 的分布产生影响,如池州市的夏收季节,农民大量焚烧秸秆(一般集中于 5 月),会导致空气中的气溶胶颗粒显著增加,从而加剧该季节 AOD 值的上升。

## 4 结论

本文利用改进的 DDV 法(V5.2 算法)反演了池州市 2013 年 12 月—2014 年 12 月间的气溶胶光学厚度(AOD),并对其可靠性进行了验证,对其时空分布及其变化因素进行了分析,得出结论如下:

1) 本文 AOD 反演结果与 MOD04\_3K 气溶胶数据在整体变化趋势上有较好的一致性,在 0.01 置信水平(双侧检验)下显著相关,Pearson 相关系数达 0.78;但同时也存在一定差异(尤其是在冬半年),总平均绝对误差和相对误差均值分别为 0.19 和 51.63%。除因两者空间分辨率不同导致的差别外,主要与反演算法的差异有关。

2) 2014 年池州市 AOD 时空分布特征明显,年均 AOD 值为 0.27,整体表现为北部沿江一线较高(一般在 0.70 左右),中南部较低(基本都在 0.40 以下);4 季 AOD 值整体表现为春、夏季高(0.4 左右),秋、冬季低(0.2 左右);1 区 3 县中,南部的石台县 AOD 年均值和季节均值均为最低,4 季变化幅度小且平稳。

3) AOD 的时空变化强烈受到自然因素(位置地形、天气气候和植被指数等)和人为因素(城镇规模、人口密度和工业化水平等)2 个方面的影响。相比于中南部,池州市北部沿江一线人口聚集度高,城镇化和工业化水平较高,加之植被覆盖度较低,造成其容易出现较高的 AOD 值;同时,一些较为集中的人类生产活动(如春季的秸秆焚烧)也会对 AOD 值带来不利影响。

## 参考文献(References):

- [1] 章澄昌,周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京:气象出版社,1995:2-3.  
Zhang C C, Zhou W X. Atmospheric Aerosol Tutorial[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995:2-3.
- [2] 王明星. 气溶胶与气候[J]. 气候与环境研究,2000,5(1):1-5.

- Wang M X. Aerosol in relation to climate change[J]. Climatic and Environmental Research, 2000, 5(1): 1-5.
- [3] Schwartz S E, Arnold F, Blanchet J P, et al. Group report: Connection between aerosol properties and forcing of climate[C]//Charlson R J, Heintzenberg J. Aerosol Forcing of Climate. 1995: 251-280.
- [4] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (D6): 6831-6864.
- [5] 任丽新, 游荣高, 吕位秀, 等. 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(1): 67-73.
- Ren L X, You R G, Lyu W X, et al. The physical and chemical characteristics of aerosols in the urban region and their influence on human health [J]. Climatic and Environmental Research, 1999, 4(1): 67-73.
- [6] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [7] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. Science, 1992, 255(5043): 423-430.
- [8] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染[J]. 大气科学, 2003, 27(5): 869-880.
- Li C C, Mao J T, Liu Q H, et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(5): 869-880.
- [9] 陈良富, 陶金花, 王子峰, 等. 空气质量卫星遥感监测技术进展[J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(2): 117-125.
- Chen L F, Tao J H, Wang Z F, et al. Review of satellite remote sensing of air quality [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(2): 117-125.
- [10] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. The MODIS 2.1- $\mu\text{m}$  channel - correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1286-1298.
- [11] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, et al. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D13): D13211.
- [12] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(S1): 127-135.
- Mao J T, Li C C, Zhang J H, et al. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(S1): 127-135.
- [13] 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): 2094-2010.
- Li C C, Mao J T, Liu Q H, et al. Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(22): 2488-2495.
- [14] 刘桂青, 李成才, 朱爱华, 等. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究 [J]. 环境保护, 2003(8): 50-54.
- Liu G Q, Li C C, Zhu A H, et al. Optical depth research of atmospheric aerosol in the Yangtze River Delta region [J]. Environmental Protection, 2003(8): 50-54.
- [15] 段婧, 毛节泰. 长江三角洲地区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.
- Duan J, Mao J T. Study on the distribution and variation trends of atmospheric aerosol optical depth over the Yangtze River Delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(4): 537-543.
- [16] 赵秀娟, 陈长和, 张武, 等. 利用 MODIS 资料反演兰州地区气溶胶光学厚度 [J]. 高原气象, 2005, 24(1): 97-103.
- Zhao X J, Chen C H, Zhang W, et al. Retrieval of aerosol optical depth over Lanzhou area using MODIS data [J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(1): 97-103.
- [17] 唐家奎, 薛勇, 虞统, 等. MODIS 陆地气溶胶遥感反演——利用 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 数据协同反演算法 [J]. 中国科学 D 辑 (地球科学), 2005, 35(5): 474-481.
- Tang J K, Xue Y, Yu T, et al. Aerosol retrieval over land by exploiting the synergy of TERRA and AQUA MODIS data [J]. Science in China Series D, 2006, 49(6): 641-649.
- [18] 李晓静, 刘玉洁, 邱红, 等. 利用 MODIS 资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究 [J]. 气象学报, 2003, 61(5): 580-591.
- Li X J, Liu Y J, Qiu H, et al. Retrieval method for optical thickness of aerosols over Beijing and its vicinity by using the MODIS data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(5): 580-591.
- [19] 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 等. 气溶胶遥感定量反演研究与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Chen L F, Li S S, Tao J H, et al. Research and Application on Quantitative Retrieval of Aerosol by Remote Sensing [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [20] Remer L A, Mattoo S, Levy R C, et al. MODIS 3 km aerosol product: Algorithm and global perspective [J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2013, 6(1): 69-112.
- [21] 孙晓雷, 甘伟, 林燕, 等. MODIS 3 km 气溶胶光学厚度产品检验及其环境空气质量指示 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1657-1666.
- Sun X L, Gan W, Lin Y, et al. Validation of MODIS 3 km aerosol optical depth product and its air quality indication [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1657-1666.
- [22] 胡子梅. 基于卫星遥感和地面监测数据的上海市气溶胶污染研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- Hu Z M. Aerosol Pollution Research in Shanghai Based on Satellite Remote Sensing and Ground Monitoring Data [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [23] 张璐, 施润和, 李龙. 基于 HJ-1 卫星数据反演长江三角洲地区气溶胶光学厚度 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 290-296.
- Zhang L, Shi R H, Li L. Retrieval of aerosol optical depth using HJ-1 data over the Yangtze River Delta [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(2): 290-296.
- [24] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The collection 6 MODIS

- aerosol products over land and ocean[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(11): 2989 – 3034.
- [25] 杨 啸. 基于时序 NDVI 的湖北省植被覆盖动态变化监测分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2): 226 – 231.  
Yang X. Dynamic change monitoring and analysis of vegetation cover in Hubei Province based on time series NDVI data[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(2): 226 – 231.
- [26] 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 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(2): 185 – 191.
- [27] 刘桂青, 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(S1): 58 – 63, 193.  
Liu G Q, Mao J T, Li C C. Optical depth study on atmospheric aerosol in Yangtze River Delta region[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003(S1): 58 – 63, 193.
- [28] 张明明, 刘振波, 葛云健. 江苏省大气气溶胶光学厚度时空分布研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(12): 1775 – 1782.  
Zhang M M, Liu Z B, Ge Y J. Spatio-temporal distribution of atmospheric aerosol optical depth in Jiangsu Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(12): 1775 – 1782.

## Temporal and spatial distribution of aerosol optical depth in Chizhou based on satellite remote sensing

ZHANG Mingming, CHENG Dongbing, QI Jianhua, HU Jianchun, LUO Jing  
(Chizhou Meteorological Bureau of Anhui, Chizhou 247100, China)

**Abstract:** Aerosol optical depth (AOD) is a key indicator of the atmospheric environment, which can be used to represent the degree of atmospheric pollution. Obtaining AOD by satellite remote sensing can make up for the lack of the spatial distribution of AOD and the trend of overall change by ground – based observation. With Chizhou City as the study area, the authors retrieved AOD of four seasons in 2014 using the improved dense dark vegetation method (V5.2 method) based on EOS – MODIS data and analyzed spatial and temporal distribution of AOD after verifying its reliability. The research results show that there is a good consistency in the overall change trend between the AOD retrieved from MODIS and that from MOD04\_3K, but they also have some differences, especially in the winter half year. There is a remarkable difference of AOD distribution both regionally and seasonally. Overall performance in the northern part of the AOD is significantly higher than in the south, and spring and summer seasons are higher than the autumn and winter seasons, while different regional trends are different. The temporal and spatial changes of AOD are strongly influenced by natural factors and human factors.

**Keywords:** MODIS; aerosol optical depth (AOD); improved dense dark vegetation method; Chizhou City  
(责任编辑: 李 瑜)