

肖钟湧, 江洪, 陈健, 等. 2011. 杭州市大气气溶胶光学特性研究[J]. 环境科学学报, 31(8):1758-1767

Xiao Z Y, Jiang H, Chen J, et al. 2011. Monitoring the aerosol optical properties over Hangzhou using remote sensing data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(8):1758-1767

杭州市大气气溶胶光学特性研究

肖钟湧¹, 江洪^{1,2,*}, 陈健², 王彬², 江子山¹

1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093

2. 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室/浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 杭州 311300

收稿日期: 2010-11-09

修回日期: 2011-01-04

录用日期: 2011-01-17

摘要: 利用太阳分光光度计(CE-318)对杭州市地面的气溶胶光学特性进行观测, 并对卫星反演的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)气溶胶产品进行验证. 结果表明, MODIS 气溶胶产品在杭州地区的精度较高, 3 个站点全部数据回归曲线的斜率和截距分别为 1.02 和 -0.14 (RSME = 0.22, $R^2 = 0.71$). 在此基础上, 利用 MODIS 数据分析了杭州市气溶胶光学特性的时空特征. 结果发现, 在长时间变化尺度上, 气溶胶光学厚度(AOT)逐渐增加, 而且波动较大; Ångström 指数(α 值)比较平稳, 没有明显的变化趋势, 但是周期性较为明显. AOT 和 α 值的季节变化特征明显, AOT 的最大值和最小值分别出现在春季和冬季, 分别为 0.56 ± 0.19 和 0.39 ± 0.15 ; α 值的最大值和最小值分别出现在夏季和春季, 分别为 1.56 ± 0.23 和 1.07 ± 0.20 . 在空间上, 以城市/工业型气溶胶为主的杭州市区的 AOT(0.76)较大, α 值(1.01)较小; 而植被覆盖较多、人为影响较小且以自然型气溶胶为主的地区的 AOT(0.41)较小, α 值(1.43)较大. 整个杭州市春季的 AOT 普遍高于其它季节, α 值相反.

关键词: 杭州市; 气溶胶光学厚度; Ångström 指数; 中分辨率成像光谱仪(MODIS); 太阳分光光度计

文章编号: 0253-2468(2011)08-1758-10

中图分类号: X513

文献标识码: A

Monitoring the aerosol optical properties over Hangzhou using remote sensing data

XIAO Zhongyong¹, JIANG Hong^{1,2,*}, CHEN Jian², WANG Bin², JIANG Zishan¹

1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093

2. State Key Laboratory of Subtropical Forest Science & Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300

Received 9 November 2010;

received in revised form 4 January 2011;

accepted 17 January 2011

Abstract: We performed long term monitoring of aerosol optical properties using a sun photometer (CE-318) in Hangzhou, and these ground-based remote sensing data were used to validate the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aerosol products. The results indicated that the MODIS aerosol product has high accuracy in monitoring the spatial-temporal dynamics of the aerosol over Hangzhou. The slope and intercept of the linear regression of all data from three data monitoring sites and the MODIS aerosol products are 1.02 and -0.14 (RSME = 0.22, $R^2 = 0.71$), respectively. MODIS aerosol products were used to analyze the characteristics of aerosol properties over Hangzhou after they were evaluated. For the temporal evolution, the aerosol optical thickness (AOT) increased with strong fluctuation, while the Ångström exponent (α) value was more stable than AOT, and showed no obvious trend, but a periodic variation. Both AOT and the α value presented remarkable seasonal variation on the temporal scale. The largest AOT appears in spring (0.56 ± 0.19) and the smallest AOT appears in winter (0.39 ± 0.15), however the largest and smallest α appear in summer and spring at

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2010CB950702, 2010CB428503); 重大国际合作项目(No. 200073819); 国家高技术研究发展计划(863)项目(No. 2009AA122001, 2009AA122005); 科技部重大基础性项目(No. 2007FY110300-8); 浙江省重大科技专项(No. 2008C13G2100010)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB950702, 2010CB428503), the State Key International Cooperation Project (No. 200073819), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2009AA122001, 2009AA122005), the State Data Synthesis and Analysis Funds of China (No. 2007FY110300-08) and the Key Project of Zhejiang Province (No. 2008C13G2100010)

作者简介: 肖钟湧(1979—), 男, 博士研究生, E-mail: xiaozhongyong@gmail.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: jianghong_china@hotmail.com

Biography: XIAO Zhongyong (1979—), male, Ph. D. candidate, E-mail: xiaozhongyong@gmail.com; * **Corresponding author**, E-mail: jianghong_china@hotmail.com

1.56 ± 0.23 and 1.07 ± 0.20, respectively. For the spatial distribution, the aerosol properties have higher AOT (0.76) and lower α (1.01) value in urban areas with industrial/urban characteristics, while the lower AOT (0.41) and higher α value (1.43) areas are observed over dense vegetation or areas with less anthropogenic activity. For the entire region, the AOTs in spring are generally higher than other seasons, while the α value shows the inverse.

Keywords: Hangzhou city; aerosol optical thickness; Ångström exponent; MODIS; Sun photometer

1 引言 (Introduction)

大气气溶胶不仅危害人体健康,致使环境状况恶化,而且还会影响地球气候系统.研究表明,人体肺部功能的下降、呼吸系统疾病的增多和正在逐年增加的死亡率与大气中气溶胶粒子浓度的上升存在紧密的联系 (Suess *et al.*, 1999). 随着城市化和工业化进程的加快,土地利用方式和土地覆盖类型被快速改变,直接导致了大量的气溶胶进入大气中 (IPCC, 2001; Ramanathan *et al.*, 2001; Kaufman *et al.*, 2002). 人类活动向大气排放的气溶胶粒子,包括大量的硫酸盐、硝酸盐、氯化物及少量的有机酸等化学物质,它们与酸雨的形成有密切的关系,在城市环境中容易产生二次光化学反应. 大气气溶胶通过吸收和散射影响太阳辐射,进而影响地-气系统的辐射收支平衡,在地球辐射收支平衡中扮演着最重要的角色 (Charlson *et al.*, 1991; 1992; Jacobson *et al.*, 2001). 另一方面,气溶胶也可以充当生成云、雾的凝结核,影响云的反射率,进而对地-气系统辐射平衡产生间接影响 (Haywood *et al.*, 2000),但这种间接辐射强迫大小还有很大的不确定性. 因此,大气气溶胶成为气候系统研究中一个最重要的不确定性来源 (IPCC, 2001; 2007). 同时,了解气溶胶的分布及特性对气溶胶的环境气候效应研究至关重要.

目前,气溶胶观测手段逐渐从原位观测发展到遥感观测,美国 NASA 采用太阳分光光度计 (CE-318) 在全球建立了一个气溶胶自动地面观测网 (AERONET) (Holben *et al.*, 1998; 2001), 为气溶胶研究提供了大量数据,并为卫星遥感验证提供了数据来源. 随着传感器的发展,卫星遥感与地基遥感相比具有全球覆盖的优势,如 MODIS 为全球气溶胶研究提供了有效的手段,且其产品具有较高的时间空间分辨率 (Salomonson *et al.*, 1989; King *et al.*, 1999; Kaufman *et al.*, 2002). MODIS 主要运用暗像元法进行气溶胶反演 (Kaufman *et al.*, 1997b; Tanré *et al.*, 1997). Levy 等 (2007a) 和 Remer 等 (2005) 在 Kaufman 的暗像元算法基础上开发了 NASA 的

V5.2 气溶胶反演算法,并利用 MODIS 传感器进行了气溶胶光学特性的业务反演,为全球提供分辨率 10 km 的气溶胶产品,这对研究区域尺度和全球尺度气溶胶污染物具有重要的应用价值. 尽管卫星遥感有很多优点,但由于气溶胶自身的复杂特性及存在的不确定性,因此,需要地面观测数据对其进行验证. 目前已有大量研究利用地面的观测数据对 MODIS L2 气溶胶产品进行验证 (Chu *et al.*, 2002; Levy *et al.*, 2005; Ichoku *et al.*, 2002; Remer *et al.*, 2005). 在我国的长江三角洲地区,由于缺乏长时间的地面观测数据,相应的验证研究相对较少. 杭州市正在经历着经济快速发展的阶段,随着经济的发展,人为活动愈发强烈,工业污染物排放明显增加,产生了大量各种人为气溶胶. 为了研究该地区的气溶胶特性,在杭州市安装了 3 台 CE-318 仪器进行长期观测. 基于此,本文利用 MODIS 气溶胶产品并结合地基观测的 CE-318 数据,分析杭州市气溶胶光学厚度及 Ångström 指数的时空变化,从而揭示杭州市气溶胶污染的特征,并为长江三角洲地区气溶胶研究提供参考.

2 数据与方法 (Data and methodology)

杭州市 (30°16'N, 120°12'E) 是长江三角洲重要的中心城市,也是中国东南部的交通枢纽,2009 年末常住人口达 810 万. 该区域夏季和冬季分别受到海洋性季风和大陆性季风的影响,因此,区域属于亚热带湿润季风气候,夏季高温多雨,雨热同期,冬季寒冷干燥. 6、7 月出现梅雨天气,或受台风影响.

本文的地面数据是利用法国 CEMIL 公司制造的可自动跟踪扫描的太阳分光光度计 (CE-318) 观测获得. 该仪器具有 10 个滤光片,中心波长分别为 340、380、440、500、670、870、936、1020、1064 nm,其中,936 nm 是水汽的强吸收波段. 该仪器可以自动跟踪太阳进行太阳直接辐射测量、太阳天顶角天空扫描、太阳主平面扫描和极化通道天空扫描. CE-318 测得的太阳直接辐射数据可用来反演计算大气透过率、消光光学厚度、气溶胶光学厚度、大气水汽柱总量和臭氧总量,天空扫描数据可以反演大气气

溶胶粒子尺度谱分布及气溶胶相函数. 目前, 利用多波段光度计获得遥感气溶胶光学厚度是气溶胶遥感中最准确的方法, 通常被用来校验卫星遥感的结果. 课题组在杭州市安装了3台太阳分光光度计(CE-318), 具体信息如图1和表1所示.

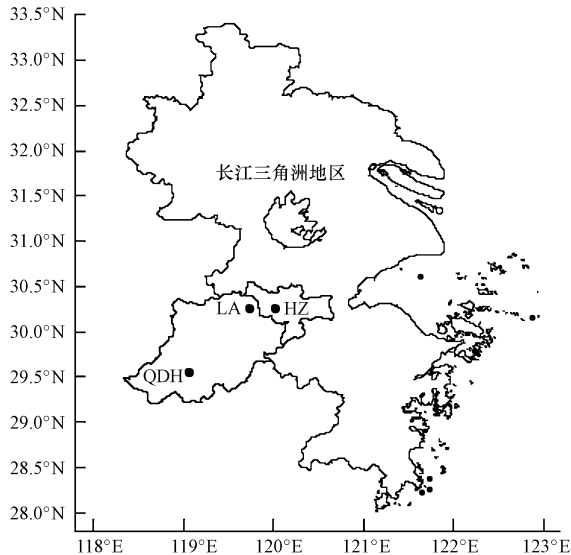


图1 研究区和观测站点图

Fig. 1 Research region and the monitoring stations

表1 观测站点的信息

Table 1 Information of monitoring stations

站点	具体位置	高程 /m	观测时间
杭州(HZ)	120.01°E 30.263°N	24	2008-04—2009-06
临安(LA)	119.73°E 30.257°N	89	2007-10—2009-06
千岛湖(QDH)	119.05°E 29.55°N	125	2008-03—2009-06

MODIS/Terra L2 气溶胶产品是从 NASA 的 LADSWEB 数据中心获得. MODIS 是 EOS 卫星 Terra 上搭载的一个重要传感器. Terra 卫星(上午星)发射于 1999 年 12 月 18 日, 大约于当地时间上午 10:30 上行飞过赤道, 可提供在可见光、近红外和红外共 36 个通道的全球观测, 为反演有关陆地、云、气溶胶、水汽、臭氧、海色、浮游植物、生物地球化学等产品提供了丰富的信息. 可见光通道 1(660 nm)和通道 2(860 nm)具有 250 m 星下点的分辨率, 可见光和近红外通道 3~7 具有 500 m 的分辨率, 其它通道的分辨率为 1000 km. MODIS 扫描宽度为 2330 km, 覆盖全球只要 1 d. NASA 利用 MODIS 数据进行气溶胶特性反演, 发布了 10 km 分辨率的气溶胶光学厚度(AOT)和其他光学特性的全球分布产品. 这

些资料已被广泛应用于分析全球大气气溶胶的研究中. 本文运用的 MODIS 气溶胶产品时间从 2000 年 2 月到 2008 年 12 月, 存储格式为 HDF 数据格式, 空间分辨率为 10 km × 10 km(经度 × 纬度). 首先, 利用 MATLAB 读取 HDF 数据, 然后处理成 ArcGIS 可以读写的 Shapefile 文件格式. 为了方便数据处理和分析, 在时间变化上, 通过计算区域平均值来分析气溶胶的变化特征. 空间上, 对多年的数据求平均值, 分析该地区的空间分布特征.

太阳分光光度计的 AOT 计算原理是根据 Beer-Bouguer-Lambert 定律, 在给定地点和 1 年中给定时间测量的给定波长(λ)的太阳辐照度, 具体可表示为:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \exp[-\tau_{\text{tot}}(\lambda)m(\theta_0)] \quad (1)$$

式中, $I_0(\lambda)$ 为日地平均距离处大气上界太阳直接辐射辐照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); $\tau_{\text{tot}}(\lambda)$ 是大气总光学厚度; θ_0 为太阳天顶角($^\circ$), 根据当地地方时的时角、地理经纬度、太阳赤纬可以计算出太阳高度角, 进而求出太阳天顶角; $\left(\frac{d_0}{d} \right)^2$ 为日-地距离修正因子, 详细的计算过程可参考肖钟湧等(2008)发表的文献.

AOT 随波长的变化表征了气溶胶粒子模式、粒子的物理和化学特性. Ångström(1929)认为, 气溶胶光学厚度可表示为大气浑浊度参数 β 和波长指数 α 的函数, 因为可以忽略水汽导致的吸收, 且臭氧吸收的作用也较小. 通常利用可见光谱的波长来表示, Ångström 公式具体如下:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

对方程(2)求对数, 则有:

$$\ln \tau_a(\lambda) = \ln \beta - \alpha \ln \lambda \quad (3)$$

利用多个波段测量得到的气溶胶光学厚度, 根据上式对气溶胶光学厚度的值进行拟合, 得到浑浊度系数 β 和波长指数 α . 通常波长指数反映了气溶胶粒子谱分布特征(Eck *et al.*, 1999), 较大的 α 值表征了细粒子模式, 如生物燃烧气溶胶. 相反, 较小的 α 值表征着粗粒子模式, 如沙尘气溶胶和海盐气溶胶(Lyamani *et al.*, 2006).

3 结果(Results)

3.1 气溶胶光学厚度(AOT)验证

利用气溶胶产品进行分析前, 需要对数据的可靠性进行验证, 特别是在 MODIS 数据在中国区域的验证工作较少的情况下(Wang *et al.*, 2007). MODIS

气溶胶反演算法受天气影响较大,因此,在杭州地区反演的 AOT 数据较少,选取同时能获取 CE-318 和 MODIS 数据的天数进行验证分析. 由于 CE-318 观测波段中没有能与 MODIS 对应的 550 nm 波长,因此,利用方程(2)进行插值,求得 550 nm 波长处的 AOT. 太阳分光光度计(CE-318)的 AOT 是卫星过境前后 0.5 h(10:00 ~ 11:00)的平均值,卫星遥感反演的 AOT 取与地面观测点对应窗口(3 像元 × 3 像元)的平均值进行回归分析(Ichoku *et al.*, 2002).

本文首先对杭州市区、临安、千岛湖 3 个站点的 CE-318 和 MODIS 的 AOT 单独进行回归分析,回归方程的斜率和截距如图 2 和表 2 所示. 从分析结果来看,杭州市区的回归分析结果最好;此外,对 3 个

站点的全部数据进行综合回归分析,得到方程的斜率和截距分别为 1.02 和 -0.14 ($R^2 = 0.71$, RMSE = 0.22),从整个区域来考虑,验证结果更合理. 这与其他学者的研究结果相近(Liang *et al.*, 2006; Mi *et al.*, 2007; He *et al.*, 2010). Levy 等(2007a)认为,在 550 nm 处,MODIS/AERONET 的回归方程近似于: $\tau_{\text{MODIS}} = 0.9\tau_{\text{AERONET}} + 0.1$. 在杭州地区,MODIS 反演结果普遍低估了 AOT,与其他学者在其它区域的研究结果有些不同,其他学者的研究认为气溶胶较小时,MODIS 反演结果高估了 AOT,反之亦然(Ichoku *et al.*, 2004; Chu *et al.*, 2002; Remer *et al.*, 2005; Levy *et al.*, 2005). 分析结果表明,MODIS 气溶胶产品在该地区的运用是可行的.

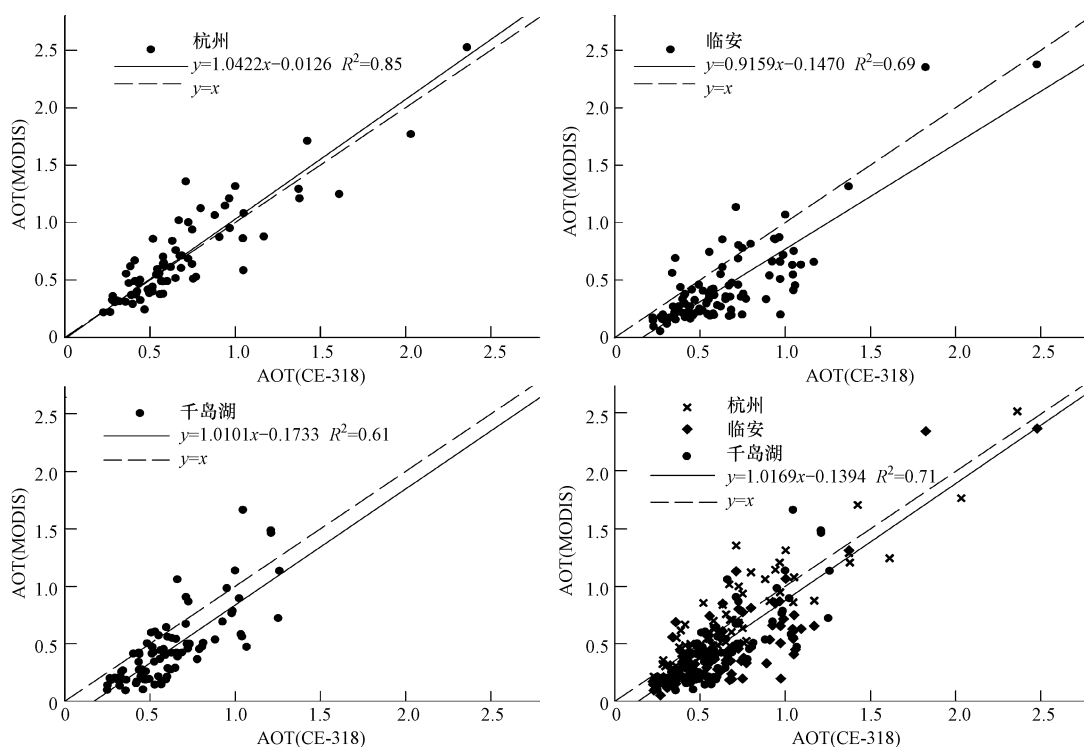


图 2 MODIS/CE-318 AOT 的线性回归分析

Fig. 2 Linear regression analysis of MODIS/CE-318 AOT

表 2 线性回归分析的结果

Table 2 The results of linear regression analysis

站点	斜率	截距	R^2	RSME	时间/d
杭州(HZ)	1.04	-0.01	0.85	0.20	74
临安(LA)	0.92	-0.15	0.69	0.21	102
千岛湖(QDH)	1.01	-0.17	0.61	0.20	88
3个站点(AS)	1.02	-0.14	0.71	0.22	264

3.2 气溶胶光学特性的变化

由于各种原因,特别是云的影响,杭州市 MODIS 产品反演的气溶胶特性数据较少.为了解杭州地区气溶胶的变化,首先对该地的气溶胶特性数据进行月平均合成,图 3a 为 2000—2008 年该区域 AOT(550 nm)的平均值和标准差的变化.标准差是指区域每个像元 AOT 的标准差,它能说明 AOT 空间分布的差异.从长时间尺度来看,该区域 AOT 呈逐渐增大的趋势,主要是由城市化和工业化进程中排放进入大气中的人为气溶胶迅速增加引起的,在杭州市区更加明显.但是,AOT 平均值波动较大,特别在 2001 年 7 月份出现了 1 个小峰值,大约为

0.91.在 2002—2007 年期间 AOT 增长比较平缓,至 2008 年,AOT 出现峰值,大约为 0.97.

图 3b 为 2000—2008 年该区域 α (460 ~ 670 nm)平均值和标准差的变化. α 值与 AOT 相比变化更为平稳,且呈现明显的 1 年周期变化,最大值出现在暖湿的夏季,较大的 α 值表明了在这个时期气溶胶粒子主要是细粒子模式,这可能是由复杂的人为气溶胶(工业/城市型)和生物燃烧气溶胶引起.同时, α 值的标准差较小,说明其在区域上的空间差异较小.在秋末冬初, α 值在区域上的空间差异较为明显.

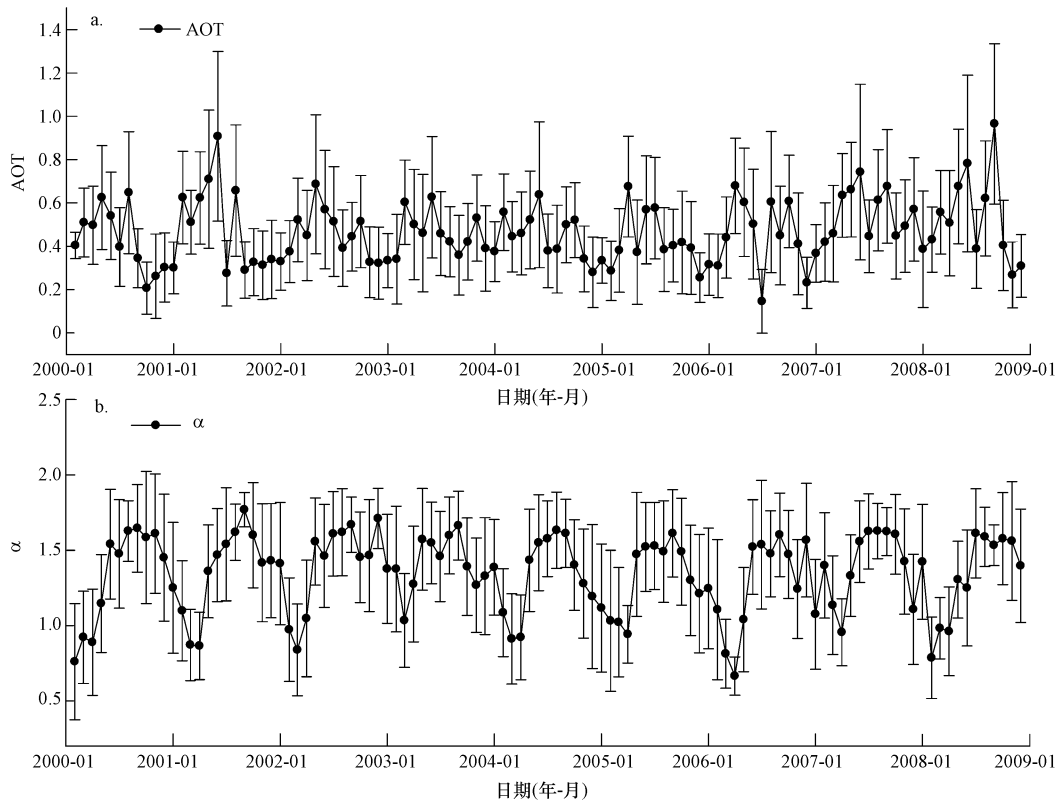


图 3 2000—2008 年区域 AOT 和 α 平均值和标准差的变化

Fig. 3 Variation of regional monthly mean and standard deviation of AOT and α during 2000—2008

图 4 为 2000—2008 年相同月份的 AOT 和 α 平均值和标准差的变化,误差棒代表了相同月份区域平均 AOT 和 α 的标准差.由图 4 可知,AOT 平均值的月变化呈抛物线,最大值出现在 6 月,但在 7 月,AOT 却突然下降,原因可能是该地区降水增多,大量的降水可以清除大气中的气溶胶粒子,从而使 AOT 比较小.最小值常出现在 1 或 12 月,1 月的 AOT 标准差较小,说明 1 月的 AOT 变化较小. α 最

大值出现在 9 月,最小值出现在 3 或 4 月,这可能是由于受北方带来的沙尘气溶胶的影响,在增大 AOT 的同时减小了 α 值.随着北方沙尘天气的减弱及沙尘气溶胶的沉降,到 5 月时, α 值快速上升,而 AOT 在继续增大,这主要是由人为气溶胶引起的,如工业排放和交通工具的排放等.同时,大气中的相对湿度增大,细粒子模式的人为气溶胶的吸湿效应增强,使 AOT 和 α 保持在较高水平.

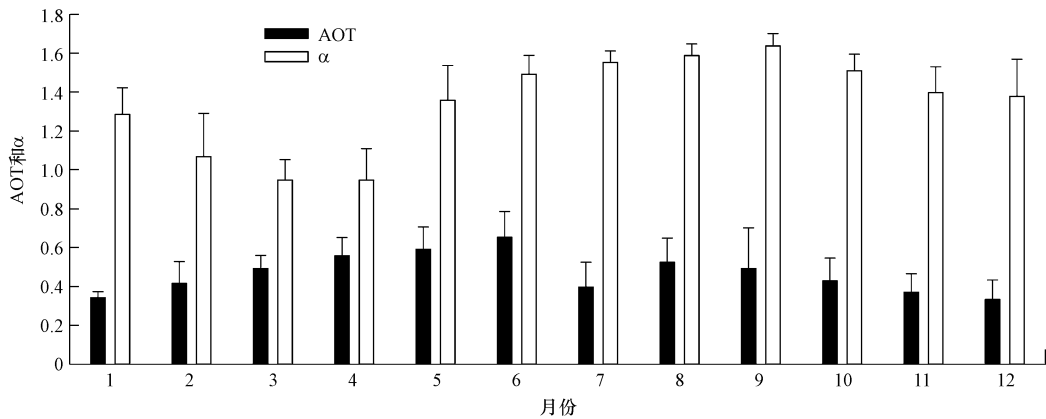


图4 气溶胶光学厚度(AOT)和 Ångström 指数(α)的月变化
Fig. 4 Monthly variation of AOT and α

从图4和表3可以看出,AOT和α值的季节变化明显,表明气溶胶特性随着季节的变化而变化.文中四季划分为春季(3月、4月、5月)、夏季(6月、7月、8月)、秋季(9月、10月、11月)、冬季(12月、1月、2月).4个季节的AOT值排序依次是:春季(0.56±0.19)>夏季(0.48±0.18)>秋季(0.42±0.16)>冬季(0.39±0.15);α值排序依次是:夏季(1.56±0.23)>秋季(1.50±0.27)>冬季(1.26±0.31)>春季(1.07±0.20).在夏季,AOT较大,却出现最大的α值,一方面是由于夏季的降水清除了一部分气溶胶粒子,减小了AOT,另一方面,在植被覆盖较多、人为影响较小地区受到生物气溶胶的影响,增大了α值(Lyamani *et al.*, 2006).从图4可以

看出,AOT和α值没有显著的相关关系,主要是由于该区域的气溶胶种类较为复杂,包括夏季从海洋带来的海盐气溶胶、城市/工业型气溶胶、夏季桔梗燃烧带来的气溶胶.空间上的分布差异,在计算时进行区域平均后,掩盖的这一部分信息.

表3 季节 AOT 和 α 的区域平均值和标准差

季节	AOT		α	
	平均值	标准差	平均值	标准差
春季	0.56	0.19	1.07	0.20
夏季	0.48	0.18	1.56	0.23
秋季	0.42	0.16	1.50	0.27
冬季	0.39	0.15	1.26	0.31

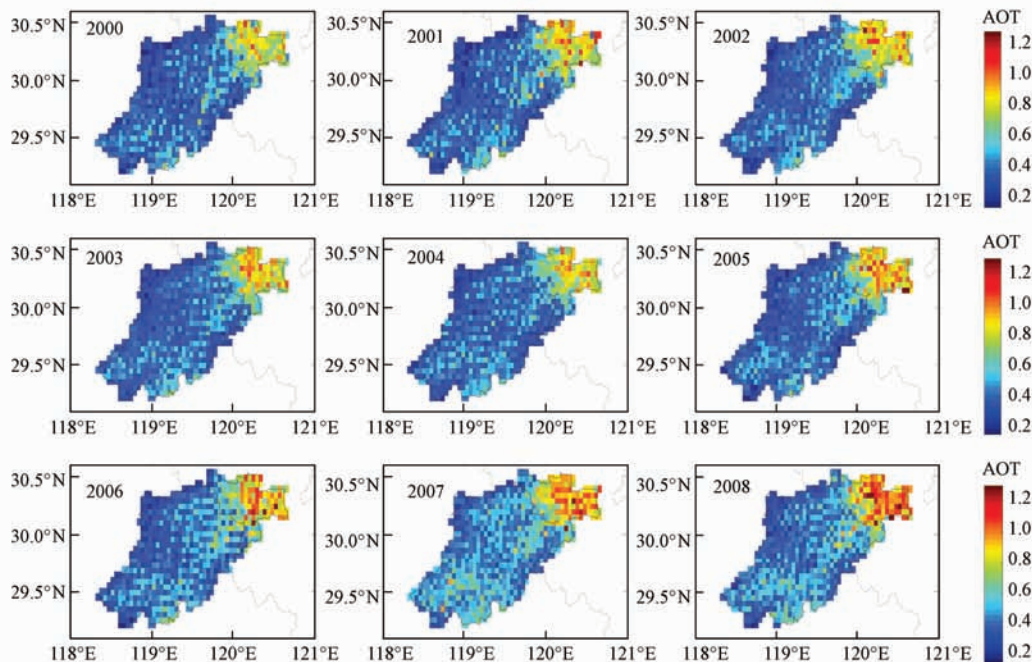


图5 2000—2008 年年平均 AOT 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of yearly mean AOT during 2000—2008

3.3 气溶胶的空间特征

3.3.1 年平均 AOT 和 α 的空间特征 图 5 为杭州市 2000—2008 年年平均 AOT 空间分布的变化. 从图 5 中首先注意到 AOT 空间差异显著, AOT 值在 0.15 ~ 1.30 之间变化, 较大的 AOT 分布在杭州市区, 在其它区域 AOT 较小. 在临安酸雨的高发区, 没有像期望一样出现较大的 AOT 分布. 在南部地区, 由于这些地区人为活动较小, 且有大片森林覆盖, 空气较为清洁, 因此, AOT 较小(肖钟湧等, 2008).

2000—2008 年, 整个地区的 AOT 逐渐增大, 特

别是杭州市区. 从表 4 可以看出, 较低 AOT 的面积不断减小, 较高 AOT 的面积不断增大. AOT < 0.4、0.4 ≤ AOT ≤ 0.8、AOT ≥ 0.8 的面积比例在 2000 年分别大约为 51.66%、42.38% 和 5.96%, 到 2008 年, 面积的比例变为 31.58%、55.54% 和 12.88%. 这主要是由城市化引起的, 土地的开发改变了土地用途, 减少了植被的覆盖, 使大量气溶胶粒子进入大气, 特别是硫酸盐气溶胶(Tian *et al.*, 2005). AOT ≥ 0.8 的面积比例增加了 1 倍.

表 4 2000—2008 年平均 AOT 和 Ångström 指数(α)分布面积的变化

Table 4 Variation of area ratio of AOT and α distribution during 2000—2008

年份	面积比例变化			面积比例变化		
	AOT < 0.4	0.4 ≤ AOT ≤ 0.8	AOT ≥ 0.8	α < 0.8	0.8 ≤ α ≤ 1.2	α ≥ 1.2
2000	51.66%	42.38%	5.96%	9.56%	15.10%	75.35%
2001	48.62%	43.63%	7.76%	9.70%	15.10%	75.21%
2002	45.84%	46.12%	8.03%	5.54%	12.74%	81.72%
2003	46.95%	45.29%	7.76%	2.22%	14.82%	82.96%
2004	46.54%	47.23%	6.23%	4.43%	17.87%	77.70%
2005	46.12%	44.04%	9.83%	5.12%	18.56%	76.32%
2006	37.95%	52.77%	9.28%	7.20%	26.18%	66.62%
2007	17.87%	69.81%	12.33%	3.46%	15.37%	81.16%
2008	31.58%	55.54%	12.88%	3.88%	18.14%	77.98%

波长指数 α 值反映了气溶胶粒子谱分布特征, 当小粒子比例增大时, α 值也相应增大, 而大粒子比

例增大, α 值也随着减小. 图 6 为 2000—2008 年年平均 α 值空间分布的变化, 在长时间变化尺度上,

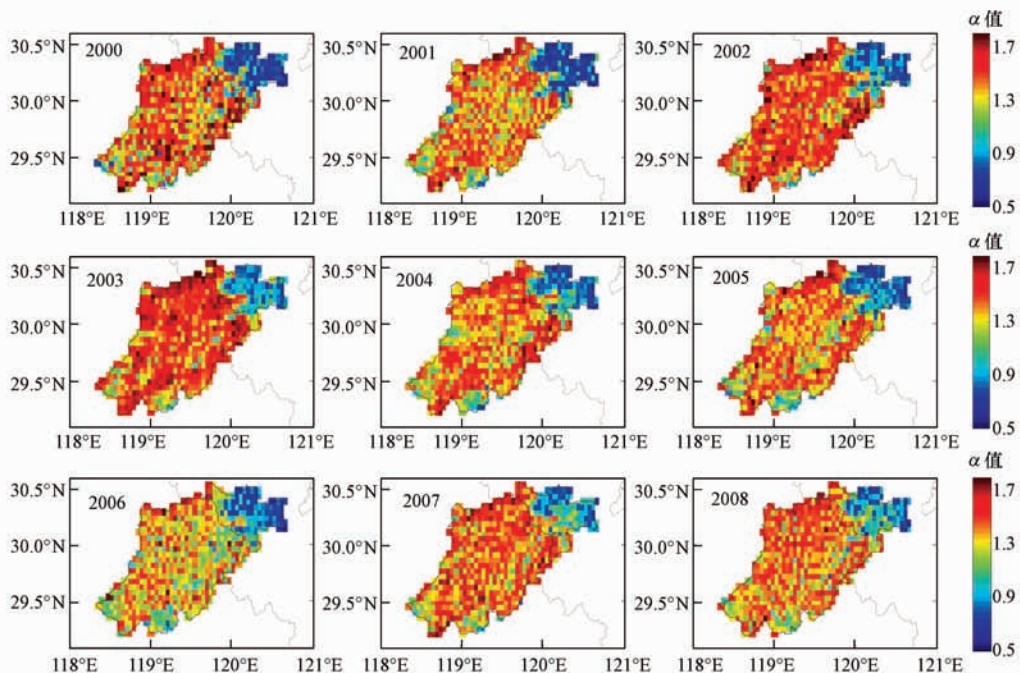


图 6 2000—2008 年年平均 α 的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of yearly mean α during 2000—2008

结合表 4 的面积统计可知, α 值不像 AOT, 没有明显的变化趋势. 从图中可以看出, α 值的空间分布差异明显, 在 0.5 ~ 1.8 之间变化. 在北部的杭州市区 α 值较低, 在南部的植被覆盖较高的地区 α 值较高, 这是由于这两个区域不同的气溶胶粒子的特性产生的, 如气溶胶组分、气溶胶粒子谱分布等. α 值空间分布的结果突出了植被较少的城市区和植被较多的郊区的差异, 即是人为型气溶胶和自然型气溶胶空间分布特征的差异.

3.3.2 季节 AOT 和 α 的空间特征 图 7 描述了杭州市 4 个季节平均 AOT 和 α 值的空间分布, 在杭州市区, 人为活动比较强烈, 工业排放和汽车尾气的排放量大, AOT 出现高值区, 而 α 值较低, 多年平均

AOT 和 α 值分别大约为 0.76 和 1.01; 其它地区人为活动影响较小, 且植被覆盖好, 植被可以减少地面气溶胶进入大气, 并可以吸附大气中的气溶胶粒子, 另外生物燃烧气溶胶粒子的影响较大, 增大了 α 值. 因此, AOT 较低, 而 α 值较高, 多年平均 AOT 和 α 分别大约为 0.41 和 1.43. AOT 呈现明显的季节变化, 春季的 AOT 最大, 为 0.56 ± 0.19 , 在空间分布上, 整个区域的 AOT 普遍大于其它季度; 在夏季, AOT 为 0.48 ± 0.18 , AOT 减少的原因可能是该地区降水增多, 大量的降水可以清除大气中的气溶胶粒子; 冬季的 AOT 最小, 为 0.39 ± 0.15 , 且空间差异最小, 整个区域的 AOT 较低.

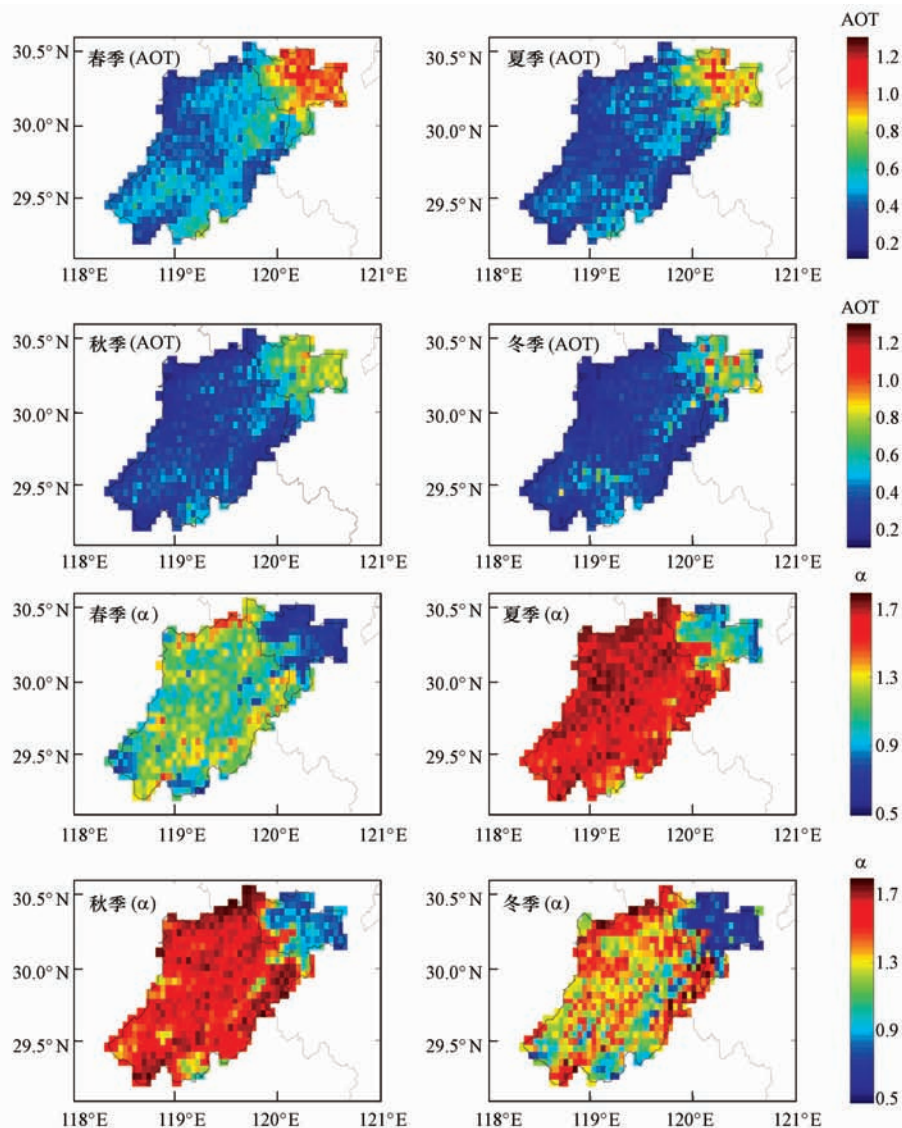


图 7 季节平均 AOT 和 α 的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of seasonal mean AOT and α

α 值的季节变化比 AOT 更加明显,最小值出现在春季,区域平均值为 1.07 ± 0.20 , α 值的空间差异也最小,与 AOT 相反,春季整个区域 α 值普遍低于其它季节. 在夏季,区域平均 α 值最大,为 1.56 ± 0.23 ,整个区域的 α 值高于其它季节,这是由于一方面在城区,工业、交通等排放的细粒子模式气溶胶增大了 α 值,且夏季湿热的天气有利于城市气溶胶的积聚效应 (Kosmopoulos *et al.*, 2008; Adamopoulos *et al.*, 2007), 容易进行二次光化学反应;另一方面,在植被密集的地方夏季生物燃烧气溶胶影响增大,使 α 值进行一步增大. 在秋季, α 值为 1.50 ± 0.27 , 与夏季相比,平均值较低,但标准差较大,说明秋季 α 值的空间差异比夏季的大. 在冬季, α 值为 1.26 ± 0.31 , 说明 α 值在冬季的空间差异最明显,也就是说城区和郊区的气溶胶粒子模式差别最大. 从图中还可以看出,杭州市区和郊县的内部空间分布较为一致,突出了人为型气溶胶和自然型气溶胶空间分布特征的差异.

4 结论 (Conclusions)

1) 利用太阳分光光度计 (CE-318) 进行了杭州市地面气溶胶光学特性的观测和 MODIS L2 气溶胶产品分析,并利用 CE-318 观测结果对卫星反演的 MODIS L2 气溶胶产品进行验证. 结果表明,MODIS 气溶胶产品在杭州地区的运用达到了精度要求,3 个站点 MODIS/CE-318 的线性回归方程的斜率和截距分别为 1.02 和 -0.14 ($RSME = 0.22$, $R^2 = 0.71$).

2) 在长时间变化尺度上,杭州市 AOT 逐渐增加,且波动较大,最大值常出现在 6 月,大约为 0.65 ± 0.13 ,最小值常出现在 1 或 12 月,大约为 0.33 ± 0.06 . α 值变化平稳,没有明显的变化趋势,但周期性较为明显,最大的 α 值出现在 9 月,大约为 1.64 ± 0.06 ,最小的 α 值出现在 3 或 4 月,大约为 0.95 ± 0.13 . AOT 和 α 值的季节变化明显,AOT 的最大值和最小值分别出现在春季和冬季,分别为 0.56 ± 0.19 和 0.39 ± 0.15 . 春季高的 AOT 是由于北方带来的沙尘气溶胶影响. α 值的最大值和最小值分别出现在夏季和春季,分别为 1.56 ± 0.23 和 1.07 ± 0.20 . 夏季高的 α 值,一方面可能是由市区的工业、交通等排放的细粒子模式气溶胶及在湿热的天气条件下气溶胶的积聚效应产生的;另一方面是在植被密集的地区受生物气溶胶影响的结果.

3) 在空间上,以城市/工业型气溶胶为主的杭州市区平均 AOT (0.76) 较大, α 值 (1.01) 较小,在植被覆盖较多、人为影响较小且以自然气溶胶为主的地区平均 AOT (0.41) 较小, α 值 (1.43) 较大,突出了人为型气溶胶和自然型气溶胶空间分布特征的差异. 整个杭州市区域春季的 AOT 普遍高于其它季节, α 值却相反.

致谢 (Acknowledgements): 本研究 MODIS 数据来自美国戈达地球科学数据和信息中心 (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center), 作者在此表示感谢.

责任作者简介: 江洪 (1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事全球变化、生态系统生态学、定量环境遥感应用研究. E-mail: jianghong_china@hotmail.com.

参考文献 (References):

- Adamopoulos A D, Kambezidis H D, Kaskaoutis D G, *et al.* 2007. A study on aerosols size in the atmosphere of Athens, Greece, retrieved from solar spectral measurements [J]. *Atmospheric Research*, 86: 194-206
- Ångström A. 1929. On the atmospheric transmission of sun radiation on dust in air [J]. *Geogr Annual*, 2: 156-165
- Charlson R J, Langner J, Rodhe H, *et al.* 1991. Perturbation of the Northern Hemisphere Radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols [J]. *Tellus*, 43(4): 152-163
- Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, *et al.* 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 255: 423-430
- Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, *et al.* 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land [J]. *Geophys Res Lett*, 29 (12): 391-394
- Eck T F, Holben B N, Reid J S, *et al.* 1999. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols [J]. *J Geophys Res*, 104: 31333-31350
- Haywood J M, Boucher O. 2000. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review [J]. *Rev Geophys*, 38: 513-543
- He Q S, Li C C, Tang X, *et al.* 2010. Validation of MODIS derived aerosol optical depth over the Yangtze River Delta in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 114: 1649-1661
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* 1998. AERONET — A federated instrument network and data archives for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 1-16
- Holben B N, Tanré D, Smirnov A, *et al.* 2001. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical 30 depth from AERONET [J]. *J Geophys Res*, 106: 12067-12097
- Ichoku C, Chu D A, Mattoo S, *et al.* 2002. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products [J].

- Geophys Res Lett, 29(12): doi:10.1029/2001GL013
- Ichoku C, Kaufman Y J, Remer L A, *et al.* 2004. Global aerosol remote sensing from MODIS [J]. *Advances in Space Research*, 34: 820-827
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. New York: Cambridge University Press
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. New York: Cambridge University Press
- Jacobson M Z. 2001. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols [J]. *J Geophys Res*, 106 (D2): 1551-1568
- Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. 2002. A satellite view of aerosols in the climate system [J]. *Nature*, 419: 215-223
- Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, *et al.* 1997. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *J Geophys Res*, 102: 17051-17067
- King M D, Kaufman Y J, Tanré D, *et al.* 1999. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present, and future [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80 (11): 2229-2259
- Kosmopoulos P G, Kaskaoutis D G, Nastos P T, *et al.* 2008. Seasonal variation of columnar aerosol optical properties over Athens, Greece, based on MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 112: 2354-2366
- Levy R C, Remer L A, Martins J V, *et al.* 2005. Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over ocean and land during CLAMS [J]. *J Atmos Sci*, 62(4): 974-992
- Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al.* 2007. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112 (D13211): doi: 10.1029/2006JD007811
- Liang S, Zhong B, Fang H. 2006. Improved estimation of aerosol optical depth from MODIS imagery over land surfaces [J]. *Remote Sensing of Environment*, 104: 416-425
- Lyamani H, Olmo F J, Alcántara A, *et al.* 2006. Atmospheric aerosols during the 2003 heat wave in southeastern Spain I: Spectral optical thickness [J]. *Atmospheric Environment*, 40: 6453-6464
- Mi W, Li Z, Xia X, *et al.* 2007. Evaluation of the moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products at two aerosol robotic network stations in China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112(D22S08): doi: 10.1029/2007JD8474
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, *et al.* 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294: 2119-2124
- Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, *et al.* 2005. The MODIS aerosol algorithm, products and validation [J]. *J Atmos Sci*, 62(4): 947-973
- Salomonson V V, Barnes W L, Maymon P W, *et al.* 1989. MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27 (2): 145-153
- Suess D T, Prather K A. 1999. Mass spectrometry of aerosol [J]. *Chemical Reviews*, 99: 3007-3035
- Tanré D, Kaufman Y J, Herman M, *et al.* 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances [J]. *J Geophys Res*, 102:16971-16988
- 田华, 马建中, 李维亮, 等. 2005. 中国中东部地区硫酸盐气溶胶直接辐射强迫及气候效应的数值模拟 [J]. *应用气象学报*, 16(3): 322-333
- Tian H, Ma J Z, Li W L, *et al.* 2005. Simulation of forcing of sulfate aerosol on direct radiation and its climate effect 5 over middle and eastern China [J]. *J Appl Meteorol Sci*, 16(3): 322-333 (in Chinese)
- Wang L, Xin J, Wang Y, *et al.* 2007. Evaluation of the MODIS aerosol optical depth retrieval over different ecosystems in China during EAST-AIRE [J]. *Atmospheric Environment*, 41(33): 7138-7149
- 肖钟湧, 江洪, 余树全, 等. 2008. 杭州地区大气气溶胶光学特性高光谱研究 [J]. *环境科学学报*, 28(9): 1894-1903
- Xiao Z Y, Jiang H, Yu S Q, *et al.* 2008. Monitoring the atmosphere aerosol optical characteristics using hyperspectral remote sensing in Hangzhou region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(9): 1894-1903 (in Chinese)