

利用 CE318 太阳光度计资料反演合肥气溶胶光学特性

牟福生¹, 李昂¹, 谢品华^{1,2}, 王杨¹, 徐晋¹, 陈浩¹, 张杰¹, 吴丰成¹

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽合肥 230031)

摘要: 利用 2012 年 9 月~2014 年 8 月年合肥市西北郊的 CE318 型太阳光度计观测资料, 分析了合肥地区气溶胶光学厚度(AOD)和 Angstrom 波长指数(α)的时间变化特征。结果表明, 合肥地区 AOD 全年较高, 2012 年 9 月~2013 年 8 月和 2013 年 9 月~2014 年 8 月两个时段的年平均值分别为 0.60 ± 0.15 和 0.73 ± 0.23 。春季受沙尘天气影响气溶胶波长指数最小, 秋季受西北高空气团影响 AOD 最低。研究了 AOD 和大气水汽含量之间的关系, 结果表明 AOD 和大气水汽含量呈正相关关系。利用 Hysplit 风场轨迹模型对各个季节的风场进行了研究, 合肥春季主要受西北气流(约 42%)影响, 夏季风场主要受偏南风场(约 50%)影响, 秋季受北风风场(约 39%)影响较大, 冬季受西北高空气团影响较大。CE318 和 MODIS 对比结果表明, 两者具有较好的一致性, 相关系数在 0.7 以上。

关键词: 气溶胶光学特性; MODIS; CE318

中图分类号: P402 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0211003

Retrieval of aerosol optical properties at Hefei by sun-photometer CE318 data

Mou Fusheng¹, Li Ang¹, Xie Pinhua^{1,2}, Wang Yang¹, Xu Jin¹, Chen Hao¹, Zhang Jie¹, Wu Fengcheng¹

- (1. Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: The temporal characteristics of Aerosol Optical Depth (AOD) and Angstrom exponent were analyzed using the sun photometer (CE318) data from September 2012 to August 2014 in north-west region of Hefei. It shows the aerosol optical depth in Hefei is higher in the whole year. The annual mean AOD is 0.60 ± 0.15 from September 2012 to August 2013 and 0.73 ± 0.23 from September 2013 to August 2014. The aerosol wavelength exponent in Spring is the least and the optical depth in the autumn is the least. The study of AOD and atmospheric water vapor content shows a positive correlation. The back trajectory analysis indicates that Hefei area is mainly influenced by northwest currents (about 42%) in spring, influenced by southward currents (about 50%) in summer, influenced by northward currents (about 39%) in autumn and influenced by northwest in the high altitude. The relationship between MODIS

收稿日期: 2015-06-11; 修订日期: 2015-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(41275038; 41405033); 国家高技术研究发展计划(2014AA06A511, 2014AA06A508);

安徽省自然科学基金(1308085QF124); 安徽省科技攻关计划(1301022083); 环保公益性项目(201109006)

作者简介: 牟福生(1987-), 男, 博士生, 主要从事地基 MAX-DOAS 等遥感方面的研究。Email: fsmou@aiofm.ac.cn

导师简介: 谢品华(1968-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事大气环境光谱探测方面的研究。Email: phxie@aiofm.ac.cn

retrieved and sun photometer CE318 shows a good agreement and the correlation coefficient is above 0.70.

Key words: aerosol optical properties; MODIS; CE318

0 引言

大气气溶胶是大气中悬浮的固体和液体颗粒组成的体系。虽然它在大气中含量很少,但是对大气物理化学反应有很重要的影响。气溶胶不仅能够通过吸收和散射太阳光直接改变地气系统的能量平衡,还能够通过影响云的生成间接影响到气候^[1]。同时,气溶胶能降低能见度,和臭氧等污染气体发生非均相反应,加重城市大气污染和灰霾问题。随着城市化进程加快,气溶胶对人类影响愈加严重,近年来气溶胶的气候和环境效应已经成为大气科学研究的热点^[2]。

由于缺乏气溶胶光学特性观测资料且气候强迫机制较为复杂,气溶胶的气候效应没有得到较好解决,因此在世界范围内开展长期气溶胶的观测就显得尤为重要。建立地基观测网是全面研究气溶胶光学特性最为精确和重要的手段,以 CE318 型太阳光度计为主要观测仪器的 AERONET 被认为是全球最成功的气溶胶地基观测网络,其反演的气溶胶光学参数被广泛用于大气污染监测、卫星数据验证和气候强迫等方面^[3]。

国内学者利用 AERONET 提供的资料进行了大量的研究:在华北地区,车慧正等^[4]利用北京 AERONET 资料研究了大气污染和气溶胶性质的相关性;在东北地区,王彭等^[5]对龙凤山地区的气溶胶光学性质进行了研究;在长江中下游地区,Pan L 等^[6]对长江三角洲地区的 AOD 和波长指数的研究表明,440 nm 波长处 AOD 月均值浦东大于 0.70,太湖和临安大于 0.80,Angstrom 波长指数全年都大于 1;王宏斌等^[7]利用太湖、香河和榆中 AERONET 资料对 MODIS 的气溶胶产品进行了对比验证;杨军等^[8]研究了南京雾霾过程中气溶胶粒子的物理特征;宋磊等^[9]对上海大气气溶胶光学特性进行了研究,并分析气溶胶光学厚度和能见度的关系。合肥位于长江三角洲和内陆地区的缓冲地带,张玉平等^[10]曾分析了 2002~2007 年间合肥地区气溶胶光学厚度的时间变化特征。近年来随着经济发展,人口和城市规模不断扩

大,人为因素对大气气溶胶影响增大,因此气溶胶光学特性也会有所改变。

文中对 2012 年 9 月~2014 年 8 月的太阳光度计数据进行了反演分析,研究了合肥地区的气溶胶光学厚度和波长指数随时间的变化及典型污染天气下的气溶胶光学特性,结合 Hysplit 风场轨迹模型对各个季节的风场进行了研究,并将太阳光度计测量 AOD 结果和 MODIS 数据进行了对比验证。

1 原理及装置

合肥站(117.16°E,31.91°N)采用 CE318 标准型太阳光度计,在紫外到近红外波段设有 8 个通道,各通道波中心波长分别为 340、380、440、500、670、870、936、1 020 nm,每个通道带宽均为 10 nm,936 nm 为强水汽吸收通道,其他通道均为大气窗口。CE318 既可以自动追踪太阳,进行太阳直接辐射测量,又可以进行太阳等高圈和太阳主平面扫描^[11]。太阳直接辐射数据可以用来反演气溶胶光学厚度和大气柱水汽总量等,天空扫描数据可用来反演大气气溶胶粒子谱和单次散射反照率等。仪器自 2012 年 8 月工作至今,可用数据主要集中在 2012 年 9 月~2014 年 8 月,文中将其分为两年进行分析,选择计算反演的主要参数为 AOD 和 α ,在气溶胶 Junge 谱分布情况下,AOD 和 α 满足以下关系:

$$\tau(\lambda)=\beta\lambda^{-\alpha}$$

式中: τ 、 β 、 α 分别为气溶胶光学厚度、大气浑浊度指数和波长指数; λ 为波长。其中波长指数 α 反映大气中气溶胶粒子的尺度; α 值越大,表示大气中小粒子占优势,反之亦然。计算中通过已知通道的气溶胶光学厚度拟合得到 α 和 β ,然后插值得到其他波长处的气溶胶光学厚度。

2 数据处理和分析

2.1 AOD 和 α 月、季变化

图 1 给出了 2012 年 9 月~2013 年 8 月和 2013 年 9 月~2014 年 8 月的 AOD 和 α 的月均值时序图。表 1

为两个时段内 AOD 和 α 的季节均值和标准差。从图 1 可知,两个时段 AOD 变化趋势基本一致,峰值分别出现在 1 月~2 月和 5 月~10 月,全年 AOD 较高(年均值分别为 0.60 ± 0.15 和 0.73 ± 0.23)。主要原因是 1~2 月受冬季逆温层影响大气扩散能力差,本地气溶胶在大气中不断积聚所致;此外,当地采暖和地面扬尘的也会对 1~2 月的 AOD 增加有一定作用^[2]。5 月~10 月空气中湿度和温度较大,有利于光化学反应生成二次气溶胶;大气湿度较大时,气溶胶吸湿增长也可以使 AOD 显著增加^[3];另外在这段时间合肥及周边地区进入夏收和秋收季节,燃烧秸秆向大气中排放了大量气溶胶,也会对大气中气溶胶产生一定影响^[4]。对比 α 值,发现 1 月~2 月和 5 月~10 月 AOD 出现峰值时 α 值也较高,根据媒体报导发现,在秸秆燃烧期间 α 达到全年最大值,说明夏、秋和冬季合肥地区气溶胶多为小颗粒的城市/工业气溶胶和生物质气溶胶,较少有沙尘等大颗粒气溶胶的外来输入。

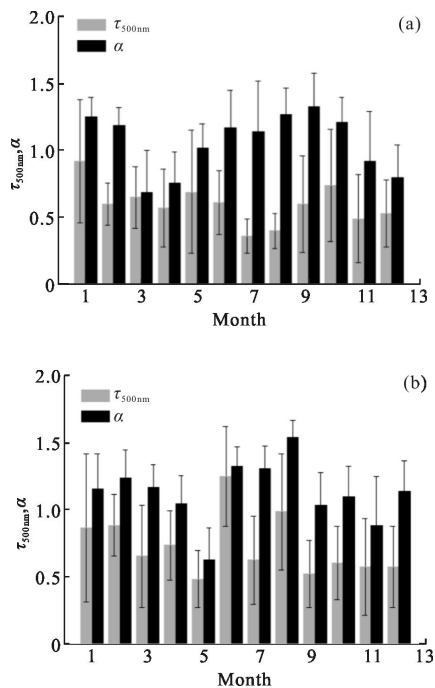


图 1 2012 年 9 月~2013 年 8 月 (a) 和 2013 年 9 月~2014 年 8 月 (b) 合肥地区 AOD 和 α 的月均值 (竖线表示标准偏差)

Fig.1 Monthly means of AOD and wavelength index α at Hefei site from September 2012 to August 2013 (a) and from September 2013 to August 2014 (b) (The vertical line indicates standard deviation)

表 1 两时段内 AOD 和 α 的季节平均值和标准偏差
Tab.1 Seasonal mean and standard deviation of AOD and α in two periods

Parameter	Spring	Summer	Autumn	Winter
AOD ¹	0.64 ± 0.06	0.46 ± 0.13	0.61 ± 0.13	0.68 ± 0.21
α^1	0.82 ± 0.17	1.19 ± 0.07	1.15 ± 0.21	1.08 ± 0.24
AOD ²	0.63 ± 0.13	0.96 ± 0.31	0.57 ± 0.04	0.78 ± 0.17
α^2	0.95 ± 0.28	1.39 ± 0.13	1.01 ± 0.11	1.18 ± 0.05

Note: 1 indicates the period from September 2012 to August 2013, 2 indicates the period from September 2013 to August 2014.

图 2(a) 给出了 2012 年 11 月合肥地区秸秆燃烧对气溶胶光学特性的影响。从图中可以看出,秸秆燃烧过程中 AOD 和 α 明显同步增加,燃烧后分别为之前的 3.3 倍和 2.7 倍,主要原因为焚烧秸秆过程中由于秸秆不完全燃烧产生了大量黑炭气溶胶,消光能力强且颗粒小,使得 AOD 和 α 都同时剧烈增加^[15],另外较稳定的大气环境也有利于污染物积累。图 2(b) 给出了降水和相对湿度对气溶胶的影响,两条细线代表了两次降雨过程。由图,第一次降水后 AOD 和

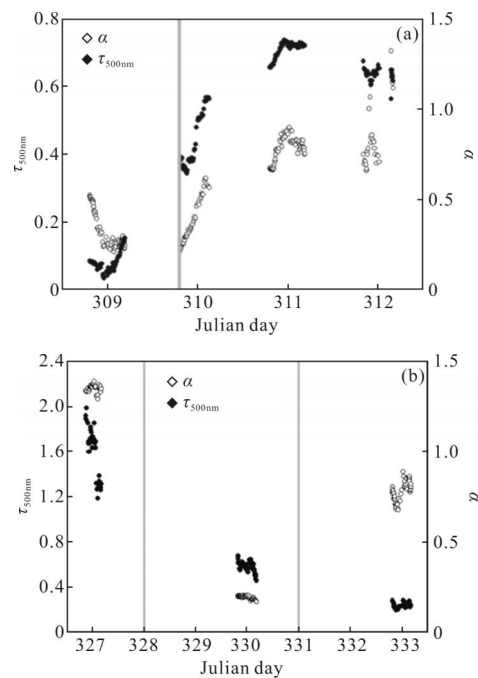


图 2 合肥地区秸秆燃烧(a)(粗直线)和降水(b)(细直线)对气溶胶光学特性的影响

Fig.2 Influence of straw burning (a) (thick line) and precipitation (b) (thin line) on aerosol optical property at Hefei site

α 同时降低, 这是因为短期降水对大气中细颗粒气溶胶有较好的清除作用, 但是对粗粒子影响较小, 与西安地区研究结果一致^[16], 另外发现连续降水下 AOD 进一步降低, 同时 α 升高, 表明连续降水不仅可以进一步清洁大气, 使 AOD 继续降低, 并且对粗颗粒气溶胶也有清除作用。因此秸秆燃烧会使 AOD 和 α 大量增加, 连续降水对大气中粗粒子和细粒子都有较好的清洁作用。

图 3 表明 AOD 随大气柱水汽含量增加而明显增大, 主要是因为充足水汽有利于气溶胶进行吸湿性增长, 同时也会为大气中发生非均相反应产生二次气溶胶创造条件。已有的研究表明^[17], 由于夏季水汽充足且温度较高, 十分有利于大气中气-粒转化的气相反应, 并易于通过大气对流形成气溶胶垂直输送, 使得测量的大气柱气溶胶含量增加, 因此夏季一般是气溶胶 AOD 最高的季节。由表 1 可知合肥两段时期内 2012 年 9 月~2013 年 8 月测得的夏季 AOD 偏低。通过气象数据^[18]发现, 2014 年 6 月~8 月各项气象指标同往年基本一致, 2013 年 6 月~8 月的平均气温为 30℃ 以上, 夏季降水量季节均值相比常年同期降低 50.1%, 分析认为高温干燥气候条件下, 大气混合层高度较高且通风系数大, 大气湍流交换和扩散能力加强, 有利于颗粒物扩散和输出; 此外干燥天气下气溶胶吸湿性成长受到抑制^[19], 致使第一段时间内测量的夏季气溶胶比其他季节偏低。

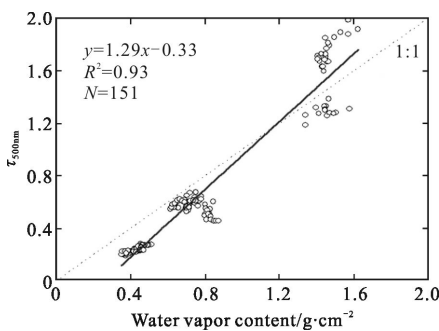


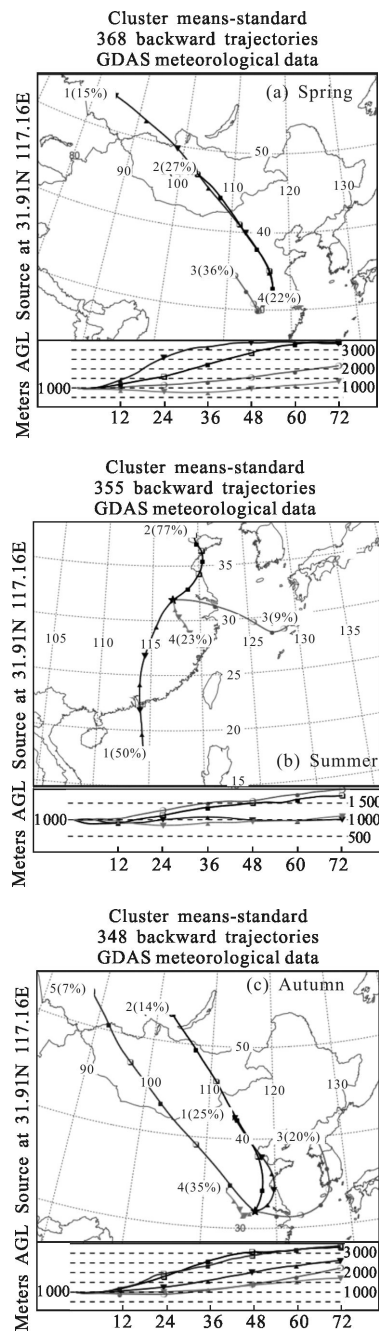
图 3 大气柱水汽含量对 AOD 的影响

Fig.3 Influence of water vapor content on AOD

2.2 基于 Hysplit 风场模型的后向轨迹分析

为了研究外来输送对本地污染积累的影响, 文中选取了 Hysplit^[20]模型对合肥地区进行风场后向轨迹分析, 研究不同时间段内风场变化情况。图 4(a)~(d)分别给出了 2013 年春、夏、秋、冬四个季节的风场

统计情况。由图可知春季(簇 1,2, 约 42%)盛行西北风场, 在该风场影响下西北地区大颗粒气溶胶会对合肥地区产生输送, 大气中波长指数较小粒子增多, 这也解释了春季 α 季节均值相比其他季节低的原因(参见表 1)。夏季风场来自东部沿海区域(簇 2,3,4, 约 50%)和中国南部地区(簇 1, 约 50%), 这些地区工业发达, 产生的污染物可能会在夏季风场产生输送, 这可能也是夏季 AOD 和 α 较高的原因之一。秋季来自北方的相对干燥冷气团(簇 1,2 约 39%)中高压天气系统出现较多, 空气相对比较洁净, 使得秋季 AOD 和



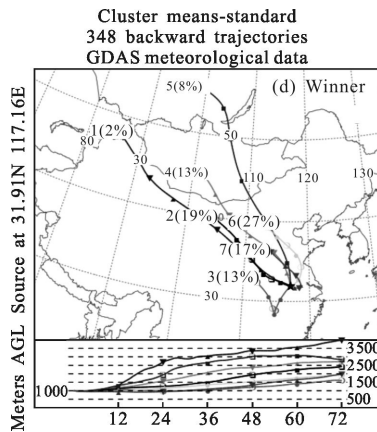


图 4 2013 年合肥地区风场后向轨迹分析

Fig.4 Back trajectory analysis at Hefei site in 2013

离散程度低于其他季节。因此合肥全年主要受西北风场、偏东风场和偏南风场影响。其中春季受西北风场(约 42%)影响引入沙尘等大颗粒气溶胶,但相比北京以及西北地区受其影响小,相比上海^[17]等地要大。夏季风场主要受偏南风场(约 50%)影响,降水较多。秋季受北风风场(约 39%)影响较大,空气较为洁净。冬季受西北高空气流影响,会对大气有清洁作用。

2.3 地基 AOD 和 MODIS AOD 对比检验

图 5 将 CE318 数据与 MODIS 测量 AOD 进行对比检验。总体来说,CE318 与 MODIS AOD 相关性较好,2012 年 8 月~2014 年 8 月 Terra/MODIS、Aqua/MODIS 和 CE318 AOD 拟合的相关系数分别为 0.71 和 0.70,两者之间的差异主要来源为测量方式不同和 MODIS 的反演误差^[21]。地基测量主要是对一个相对小的区域进行测量,卫星是对测量像元的投影区域进行平均。另外,高气溶胶以及薄云对近地面有遮蔽作用,会对卫星观测产生影响。MODIS AOD 反演的主要误差来源为气溶胶模式(主要为单次散射反照率)和地表反照率的假设,前者影响太阳光度计和 MODIS AOD 拟合的斜率,后者影响截距。从图 5(a)、(b)中可以看到,两年间内截距都大于 0.1,主要原因是 MODIS 反演过程中高估了地表反照率,致使 MODIS AOD 系统性低于地基测量值。两次对比拟合曲线斜率都小于 1,可能是因为 MODIS 在安徽地区的单次散射反照率假定值高于实际值,相对地基测量对近地面气溶胶更不敏感。

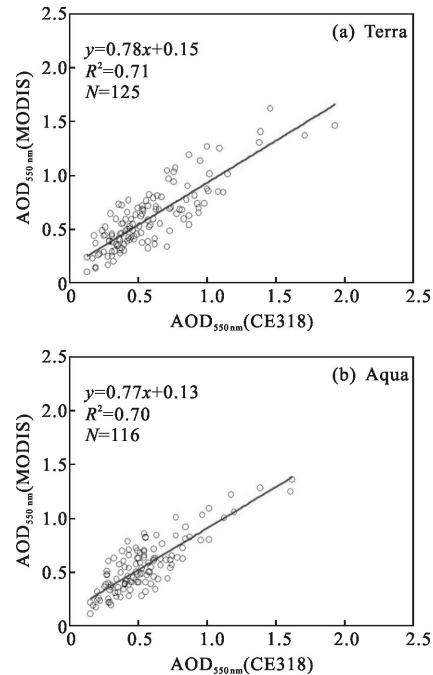


图 5 2012 年 9 月~2014 年 8 月太阳光度计 CE318 数据和 MODIS 数据进行对比(CE318 取卫星过境前后 2 小时内均值)

Fig.5 Comparison between MODIS retrieved AOD and ones measured by ground based sunphotometer at Hefei site from September 2012 to August 2014

3 结论

文中基于太阳光度计 CE318 于 2012 年 8 月~2014 年 8 月在合肥的观测数据,对大气气溶胶光学厚度 AOD 和波长指数 α 进行了统计分析,利用太阳光度计数据以及能见度数据对 AOD 与水汽之间的关系进行了初步分析,结合 Hysplit 风场轨迹模型对各个季节的风场进行了研究,并将地基数据和 MODIS 卫星数据进行了对比较验,得到如下结论:

(1) 合肥地区 AOD 全年偏高,2012 年 9 月~2013 年 8 月和 2013 年 9 月~2014 年 8 月两段时期内 AOD 的年平均值分别为 0.60 ± 0.15 和 0.73 ± 0.23 。其中由于冬季本地气溶胶积聚和夏、秋季秸秆燃烧等影响,AOD 峰值一般出现在 1~2 月和 5~10 月。

(2) AOD 与大气水汽含量成正相关关系,地表能见度一般与大气柱水汽含量成负相关关系。2012 年 9 月~2013 年 8 月夏季 AOD 偏低的主要原因是降水量较常年低 50% 以上,连续高温天气利于污染物扩散且气溶胶吸湿性增长受到抑制。

(3) 风场后向轨迹分析表明,合肥春季主要受西

北气流(约 42%)影响引入沙尘等大颗粒气溶胶,波长指数 α 季节均值最小且粒子尺度分布较丰富。夏季风场主要受偏南风场(约 50%)影响,降水较多且大颗粒气溶胶输入较少,波长指数 α 季节均值最大。秋季受北风风场(约 39%)影响较大,空气较为洁净。冬季受西北高空气流影响,对大气有清洁作用。

(4) MODIS AOD 在合肥地区有较好的适用性,MODIS AOD 和 CE318 AOD 的相关系数在 0.70 以上。与太阳光度计 CE318 相比,MODIS 对近地面气溶胶较不敏感,且在反演过程中高估了单次散射反照率和地表反照率,造成测量值相比 CE318 测量值系统性偏低,此外两种仪器的观测方式不同也会引入一定误差。

参考文献:

- [1] Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. 1995 Atmospheric Aerosol Tutorial [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995: 299-323. (in Chinese)
- [2] Liu Guiqing, Li Chengcai, Zhu Aihua, et al. Optical depth research of atmospheric aerosol in the Yangtze River Delta Region [J]. *Environment Protection*, 2003(8): 50-54. (in Chinese)
- [3] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET-A federated instrument network and data achieve for aerosol characterization[J]. *Rem Sens Environ*, 1998, 66(1): 1-16.
- [4] Che H Z, Shi G, Uchiyama A, et al. Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing, China [J]. *Atmos Chim Phys*, 2008, 8(3): 3199-3214.
- [5] Wang P, Che H Z, Zhang X Y, et al. Aerosol optical properties of regional background atmosphere in Northeast China [J]. *Atmospheric Environmental*, 2010, 44 (3): 4404-4412.
- [6] Pan L, Che H Z, Geng F H, et al. Aerosol optical properties based on ground measurements over the Chinese Yangtze Delta Region [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(3): 2587-2596.
- [7] Wang Hongbin, Zhang Lei, Liu Ruijin. Comparison and assessment of the MODIS C005 and C004 aerosol products over the China[J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(3): 772-783. (in Chinese)
- [8] Yang Jun, Niu Zhongqing, Shi Chun'e, et al. Microphysics of atmospheric aerosols during winter haze/fog events in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(7): 1425-1431. (in Chinese)
- [9] Song Lei, Lv Daren. Investigating of atmospheric optical characteristics over Shanghai region [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(2): 203-208. (in Chinese)
- [10] Zhang Yuping, Yang Shizhi, Wang Xianhua. The temporal characteristics of atmospheric aerosol optical depth over Hefei [J]. *Journal of university of science and technology of China*, 2010, 40(1): 15-20. (in Chinese)
- [11] Ren Yiyong, Li Xia, Lv Ming. Application prospect of measurement by sun photometer CE318 and retrieval methodology [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3): 349-352. (in Chinese)
- [12] Wang Zhenzhu. Study on aerosol optical properties and direct radiative effects over Hefei [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [13] Xia Xiang'ao, Li Zhanqing, Brent Holben, et al. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta Region of China[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(D22): 1323-1327.
- [14] Yang Yuanjian, Fu Yunfei, Wu Biwen. Impacts of agricultural fire on aerosol distribution over east China during summer harvest time [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(4): 241-252. (in Chinese)
- [15] Deng Congrui. Identification of biomass burning source in aerosols and the formation mechanism of haze[D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)
- [16] Dong Zipeng, Li Xingmin, Du Xingli. Study on aerosol optical property in Xi'an region [J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(3): 856-864. (in Chinese)
- [17] Li Zhangqing, Xia Xiangao, Maureen Cribb, et al. Aerosol optical properties and their radiative effects in northern China [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: D22S01.
- [18] 安徽水旱情信息网. 月降雨量简报[EB/OL].[2015-06-11]. <http://shangqing.wswj.net/UnitingBriefing/P030.aspx>.
- [19] Song Ning, Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang. Effects on fine particles by the continued high temperature weather in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(4): 33-36. (in Chinese)
- [20] Brimelow J C, Reuter G W. Transport of atmospheric moisture during three extremer ainfall events over the Mackenzie Riverbasin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(4): 423-440.
- [21] Li Chengcai, Mao Jietai, Lau Kai, et al. Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products [J]. *Chinese Sci Bull*, 2003, 48(22): 2488-2495.