

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.

Deng Xue-liang, Deng Wei-tao, He Dong-yan. Spatial-temporal features of atmospheric aerosol in East China in recent years[J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(3): 347-354.

近年来华东地区大气气溶胶的时空特征

邓学良¹,邓伟涛²,何冬燕³

(1.安徽省气象科学研究所 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,安徽 合肥 230031;

2.南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,江苏 南京 210044; 3.安徽省气候中心,安徽 合肥 230031)

摘要:利用 2000 年 2 月—2008 年 12 月的 AERONET(AEROSOL ROBOTIC NETWORK)地基观测数据对 MODIS/TERRA Collection 005 气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness; AOT)在华东区域的适用性进行了验证,并利用验证后的 MODIS 气溶胶产品对华东区域气溶胶光学厚度和尺度分布特征进行了分析。结果表明,(1)通过验证比较,MODIS 的 AOT 在华东区域与 AERONET 站陆基观测到的 AOT 具有非常好的一致性,满足美国 NASA 的设计要求。(2)华东区域的气溶胶光学厚度存在明显的时空分布特征。时间上,在春季和夏季达到最大,而在秋季和冬季最小,表现出明显的季节变化规律。空间上,气溶胶光学厚度受地形影响明显。其高值区主要分布在平原地区,而低值区主要在海拔较高的山区。(3)该区域的气溶胶尺度分布也存在显著的变化特征。在冬、春由于沙尘输送的影响,整个华东区域气溶胶粒子的尺度都比较大,主要以自然生成的沙尘粒子为主。而在夏、秋季由于夏季风和降水的影响,气溶胶粒子的尺度都较小,以工业排放的人为气溶胶粒子为主。

关键词:MODIS;气溶胶;华东区域;时空特征

中图分类号:P402 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-7097(2010)03-0347-08

Spatial-temporal Features of Atmospheric Aerosol in East China in Recent Years

DENG Xue-liang¹, DENG Wei-tao², HE Dong-yan³

(1. Anhui Institute of Meteorology, Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China;

2. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China;

3. Anhui Climate Centre, Hefei 230061, China)

Abstract: Based on MODIS_C005 aerosol product and AERONET data from February 2000 to December 2008, MODIS/TERRA Collection 005 aerosol optical thickness was validated and aerosol characteristics were analyzed in East China. The results show that: (1) MODIS/AOT is in accordance with AERONET/AOT and is up to the NASA design requirement through verification; (2) MODIS/AOT has notable spatial-temporal distribution features: AOT reaches its maximum value in spring and summer, and the minimum in winter and fall; AOT tends to be higher on plains and lower in mountain areas at high altitude; (3) aerosol size distribution also presents obvious feature: aerosol size is big and coarse mode aerosol dominates in spring and winter because of dust prevalence, but under the influence of summer monsoon and rainfall, there are more fine mode aerosol and anthropogenic aerosol dominates in

收稿日期:2010-03-12;改回日期:2010-03-25

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(090415216);武汉区域气象中心科技发展基金项目(QY-Z-200902);卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放研究基金资助项目(SOED0911)

作者简介:邓学良(1981—),男,安徽蚌埠人,博士,研究方向为海洋气溶胶, dengxueliang9989@yahoo.com.cn

summer and fall

Key words: MOD IS; aerosol; East China; Spatial-temporal features

0 引言

大气气溶胶通常是指悬浮在大气中直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的液态或固态的微小粒子^[1-2]。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^[3-4]。IPCC 第四次评估报告指出,在众多的气候变化影响因子中,气溶胶的辐射强迫作用具有非常大的不确定性^[5-6]。张小曳^[7]在 973 项目“中国大气气溶胶及其气候效应的研究”中提出对于我国气溶胶研究的必要性。

为了更好地了解我国气溶胶的分布和特性,近年来,国内外学者进行了大量的研究。Luo 等^[8]利用全国 46 个甲种太阳辐射站近 30 a 的资料计算了中国地区大气气溶胶的光学厚度的分布和变化,发现中国四川盆地、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。Zheng 等^[9]利用太阳辐射计对敦煌地区气溶胶特性进行了连续 2 a 的观测,发现该地区气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数等参数具有明显的季节变化特征。Yu 等^[10]利用 AERONET 的多年气溶胶观测数据,对北京气溶胶特性进行了分析,发现气溶胶光学厚度在春、夏季最大,而 Angstrom 指数在夏季最大,春季最小。Zhang 等^[11]利用太阳光度计地面观测对中国地区气溶胶的分布和特性进行了研究,发现中国黄河、长江中下游及沿海地区、四川盆地附近等地区是年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。谭浩波等^[12]利用多波段太阳光度计数据反演珠江三角洲地区的气溶胶光学厚度,得到了该区域 4 个站点的气溶胶分布特征。

以上地基观测研究精度高^[13],但是它只能得到单点的数据。因此,大量的卫星数据被利用到大面积的气溶胶研究中来。毛节泰和李成才^[14]利用 GMS 资料来反演中国四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^[15]利用 MOD IS 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。柳晶^[16]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。邓学良^[17]结合 MOD IS 和 CERES 两颗传感器数据讨论了我国海域气溶胶的辐射强迫分布情况。

我国华东地区经济发展迅速,人为活动使得气溶胶的排放显著增加,可能引起该区域的环境问题和气候变化^[18]。因此,对于华东地区气溶胶进行研究是十分必要。本文在对 MOD IS_C005 数据验证基础上,利用 MOD IS_C005 气溶胶产品对华东地区气溶胶分布进行了分析。

1 研究区域和数据

研究区域选为华东区域 ($113\sim 123\ \text{E}$, $23\sim 39\ \text{N}$),包括了华东 6 省 1 市。图 1 为研究区域以及全球气溶胶自动观测网 (AERONET) 验证站点。数据选取了 MOD IS 气溶胶数据和 AERONET 观测数据^[19]。季节划分采用的划分标准为: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。

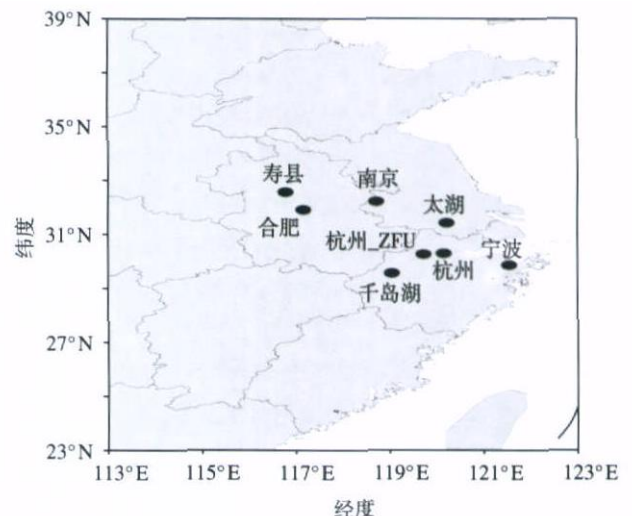


图 1 研究区域及 AERONET 站点分布

Fig 1 Study area and AERONET stations

首先,搜集了 2000 年 2 月—2008 年 12 月 MOD IS_C005 的 Terra/MOD04_L2 和 MOD08_M3 气溶胶产品,包括 550 nm 处气溶胶光学厚度 (AOT) 和小颗粒比例 (RMF)^[20]。MOD IS_C005 是美国国家航空航天局 (NASA) 对 1996 年开始使用的气溶胶反演算法 (ATBD-96) 进行重新改进后得到气溶胶产品,其精度有所提高^[21]。

其次,使用了研究区域内 2000 年 2 月—2008

年 12 月间所有可以获得的 AERONET 站点的 Level 2.0 数据,其中包括了 7 个波段的气溶胶光学厚度 (1 020 nm, 870 nm, 675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm, 340 nm),观测时间步长为 15 min,其精度可为 0.01 ~ 0.02^[22],常用来验证卫星气溶胶光学厚度遥感结果。

2 数据验证

由于 MODIS 和 AERONET 对气溶胶观测的中心波长和时空尺度不同,为了使两者具有可比性,需要对两者的气溶胶光学厚度做波段匹配和时空匹配

的前处理。采用前人的验证方法^[23],具体步骤为:

- (1)波段匹配。将 AERONET 的 7 个波段数据拟合得到 550 nm 处的 AOT 值。
- (2)时空匹配。在空间窗口上选择 30 km × 30 km;在时间窗口上选择了 1 h。

图 2 是 MODIS 与 AERONET 数据经过前处理后,得到 550 nm 处气溶胶光学厚度的线性拟合结果 (AOT550 为 550nm 处气溶胶光学厚度)。从图 2 可以看出,在 8 个 AERONET 站点中,MODIS_C005 的 AOT550 与 AERONET 的 AOT550 间的相关系数在 0.8 以上,而且斜率在 0.9 附近,说明在该区域

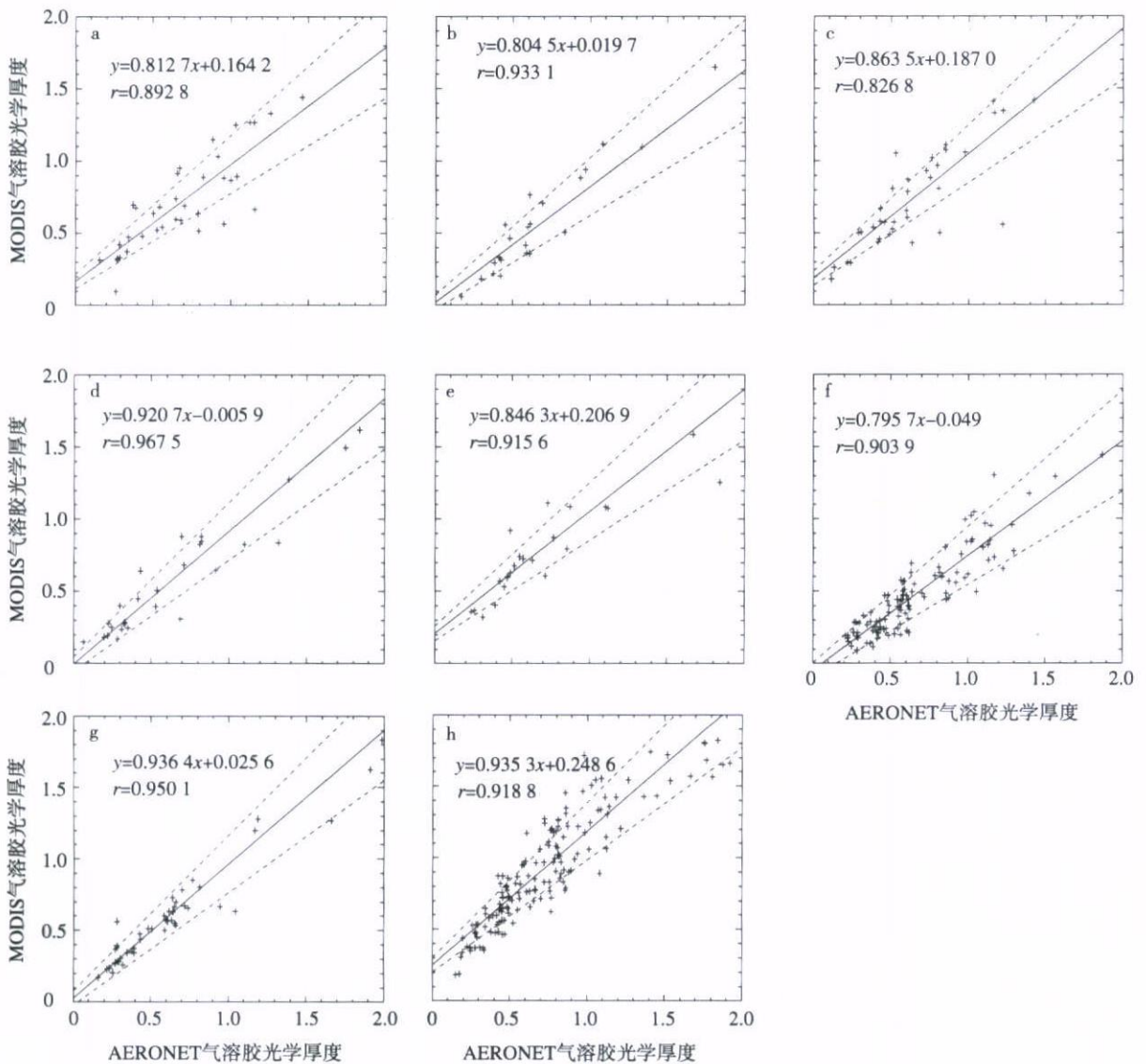


图 2 550 nm 处 MODIS 气溶胶光学厚度和 AERONET 气溶胶光学厚度线性拟合结果 a 杭州; b 杭州_ZFU; c 合肥; d 宁波; e 南京; f 千岛湖; g 寿县; h 太湖

Fig 2 Scatter plot between AOT550 derived from MODIS and AERONET at different AERONET stations (a-h are Hangzhou, Hangzhou_ZFU, Hefei, Ningbo, Nanjing, Qiandaohu, Shouxian and Taihu, respectively. AOT550 is aerosol optical thickness at 550 nm)

MODIS_C005 与 AERONET 的 AOT550 有着很好的相关性且数值非常逼近,与贺千山等^[24]研究结果一致。在 8 个站点中,除千岛湖外,其他 7 个站点的截距都大于 0,说明 MODIS 数据在华东区域具有系统偏差,略高于观测值,与夏祥鳌^[25]研究结果一致。NASA 对于陆地上 MODIS 气溶胶光学厚度规定的误差范围为 $\pm 0.05 \pm 0.15$,验证结果中超过 65% 的点在规定误差范围内,满足 NASA 要求的 65%,说明 MODIS_C005 的气溶胶光学厚度适合华东区域。

3 结果分析

3.1 气溶胶光学厚度分布

图 3 是利用 MODIS_C005 气溶胶产品得到的华东区域 2000—2008 年多年平均的 550 nm 气溶胶光学厚度的季节分布。从图 3 可以清楚地看出,华东区域气溶胶光学厚度存在非常明显的空间分布特征和季节变化特征。

从空间分布上看,气溶胶光学厚度的分布与地形有非常密切的关系(图 3 和图 4)。气溶胶的高值区和低值区与地形相当吻合,深受地形的影响。从图 3 来看,高值区主要集中在海拔较低的平原地区,如华北平原、长江三角洲和鄱阳湖平原等。低值区大都分布在海拔相对较高的山区,如山东中南部山脉群、大别山区、皖南山区以及福建全省等。从气溶胶的总体分布来看,华北平原被太行山山脉分割为西北部的气溶胶低值区和东南部的气溶胶高值区,且高值区向东南的平原地区不断的扩展。与此同时,在山东中南部由于泰山等山脉群阻挡,气溶胶的东扩受限,使得该区域常年存在低值区;长江三角洲地区由于经济的发展,大量的工业排放对于大气污染产生显著的影响,造成该区域气溶胶终年很高,其污染物借助气象场扩散到周边地区,形成高值区。而大别山区和皖南山区,由于地形的屏障作用,在这两个山区气溶胶始终处于低值区;鄱阳湖平原地势是中间低四周高,局地生成的气溶胶无法输送出去,使得该区域常年存在一个高值区。而与江西相邻的福建省,由于武夷山脉的抬高作用,全省气溶胶一直都很小。从分析可以看出,独特的地形分布造成了华东区域上述的从北到南的气溶胶分布特征。

从季节变化上来看,华东区域气溶胶的四季变化非常明显。春季,由于北方沙尘的影响,华北平原大部区域 AOT 大于 0.8,在一年中仅次于夏季。工业污染造成长江三角洲的 AOT 始终大于 0.8,其中

心区域大于 0.9,大值区覆盖了江苏南部、安徽南部以及上海。由于地形的作用,大别山区 AOT 都在 0.6 以下;皖南山区和福建全省连成一片,AOT 都小于 0.4;鄱阳湖平原的 AOT 中心值大于 0.8,出现一年中的最大值。夏季与春季比较,北部 AOT 有所增加,而南部 AOT 有所减小。长江三角洲气溶胶在夏季风的输送下,大值区范围扩大到江苏全省,并通过狭长的平原通道到达华北平原,使得华北平原 AOT 达到一年中的最大值,中心范围不断扩大。与此同时,山东中南部的小值区东缩,中心范围有所减小。而在南部区域,大别山区低值中心有所减小;皖南山区及福建全省地区的 AOT 低值区范围不断西扩,进入江西东部;鄱阳湖平原的高值中心强度也有所削弱。秋季和冬季,AOT 的分布形式和春、夏季相似,所有 AOT 中心的强度都有明显的减弱,冬季的 AOT 达到一年中的最小值。

3.2 气溶胶小颗粒比例分布

MODIS 气溶胶产品中的小颗粒比例(FMF)定义为 550 nm 处小于 $1.0 \mu\text{m}$ 的小颗粒气溶胶光学厚度与总气溶胶光学厚度的比例。FMF 越大,则小颗粒气溶胶的比例越大;FMF 越小,则小颗粒气溶胶的比例越小。由于人为形成的气溶胶如硫酸盐等,主要是小颗粒气溶胶;而自然气溶胶如沙尘和海盐,主要是大颗粒气溶胶。所以 FMF 还可以用来区分人为气溶胶和自然气溶胶^[20]。图 5 是 MODIS_C005 多年平均的小颗粒比例的季节变化,可以看出,FMF 在冬、春的季节分布非常相似,在长江以北的广大区域,FMF 都非常小,其值大部分在 0.2 以下。这说明该区域受北方沙尘气溶胶的影响非常明显,北方沙尘借助西风输送到我国东部,使得这些地区的气溶胶主要以自然产生的大颗粒的沙尘粒子为主。与此同时,长江以南区域 FMF 值明显高于北部区域,除了鄱阳湖平原外,FMF 都大于 0.3,明显受到自然气溶胶和人为气溶胶的共同作用。而在夏、秋季,FMF 值在整个区域明显增加,尤其是夏季,达到一年中的最大值,FMF 值大多在 0.6 以上,说明夏季气溶胶主要以人为产生的小颗粒气溶胶为主,这可能与夏季降水和夏季风的共同作用有关。夏季风的盛行使得北方沙尘无法到达华东区域,同时由于夏季为一年中降水最大的季节,借助雨水的冲刷作用,大颗粒的自然气溶胶被清除,大气只保留了小颗粒的人为气溶胶粒子。同时还要注意,在鄱阳湖平原和长江三角洲地区 FMF 常年存在低值中心,这可能与地形以及人类活动有关,说明在这些东部人

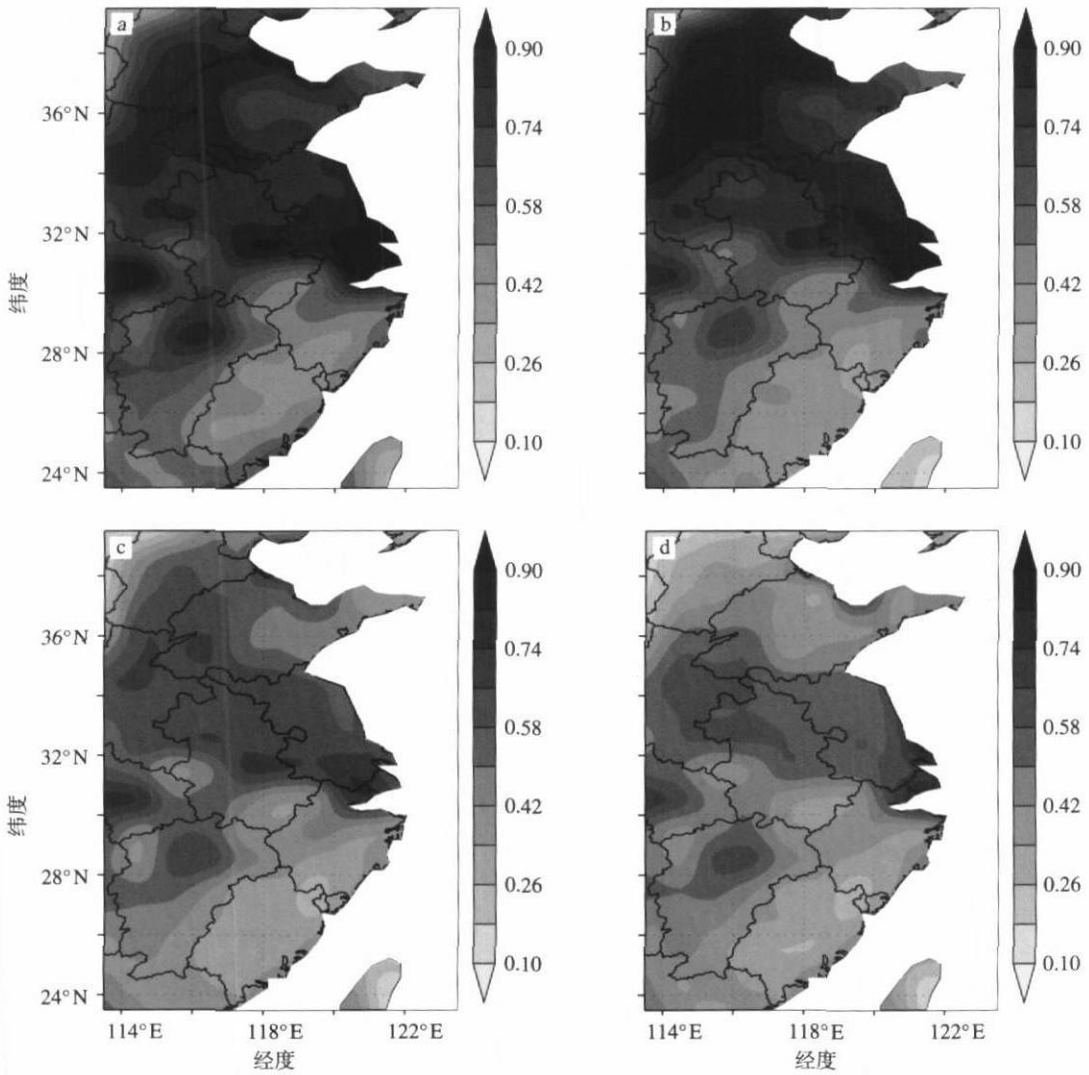


图 3 550 nm 处 MODIS 气溶胶光学厚度季节分布 a 春季; b 夏季; c 秋季; d 冬季

Fig 3 Seasonal distribution of MODIS aerosol optical thickness in East China in (a) spring, (b) summer, (c) fall, and (d) winter

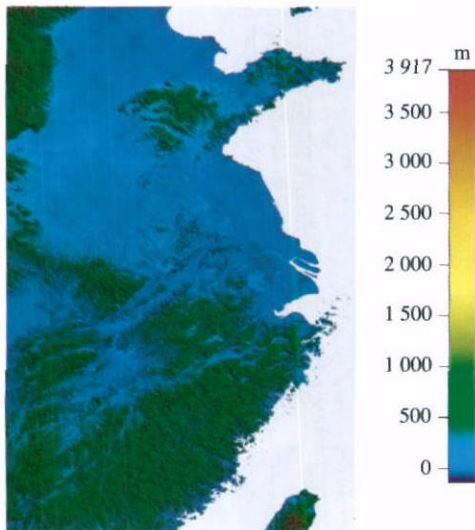


图 4 华东区域地形图

Fig 4 Topographic map of East China

口稠密经济发达的地区,燃烧产生的有效半径较大的吸收型气溶胶比周边地区要高很多^[15]。而福建省、大别山区和皖南山区的 PM_{10} 常年存在高值区,说明地形对于气溶胶的尺度分布具有一定的影响的,可能是气溶胶粒子在爬坡作用的影响下,造成了大颗粒粒子的沉降。

3.3 气溶胶光学厚度和小颗粒比例的时间序列

图 6 是 AOT 和 PM_{10} 在华东区域平均的时间序列,图 7 是 AOT 和 PM_{10} 在华东地区多年区域平均的月变化。从逐月的时间序列(图 6)看,AOT 与 PM_{10} 变化具有很明显的规律,呈现出 1 a 周期振荡,在 2 个峰值之间出现单调增或减的趋势,四季转换明显。AOT 在每年的春、夏季相对较高,其中 5、6 月可以达到最大,而在秋、冬季相对较小,最小值一般出现在 11、12 月。同时从年际变化来看,AOT 具有明显的逐年增长趋势,说明由于频繁的人类活动

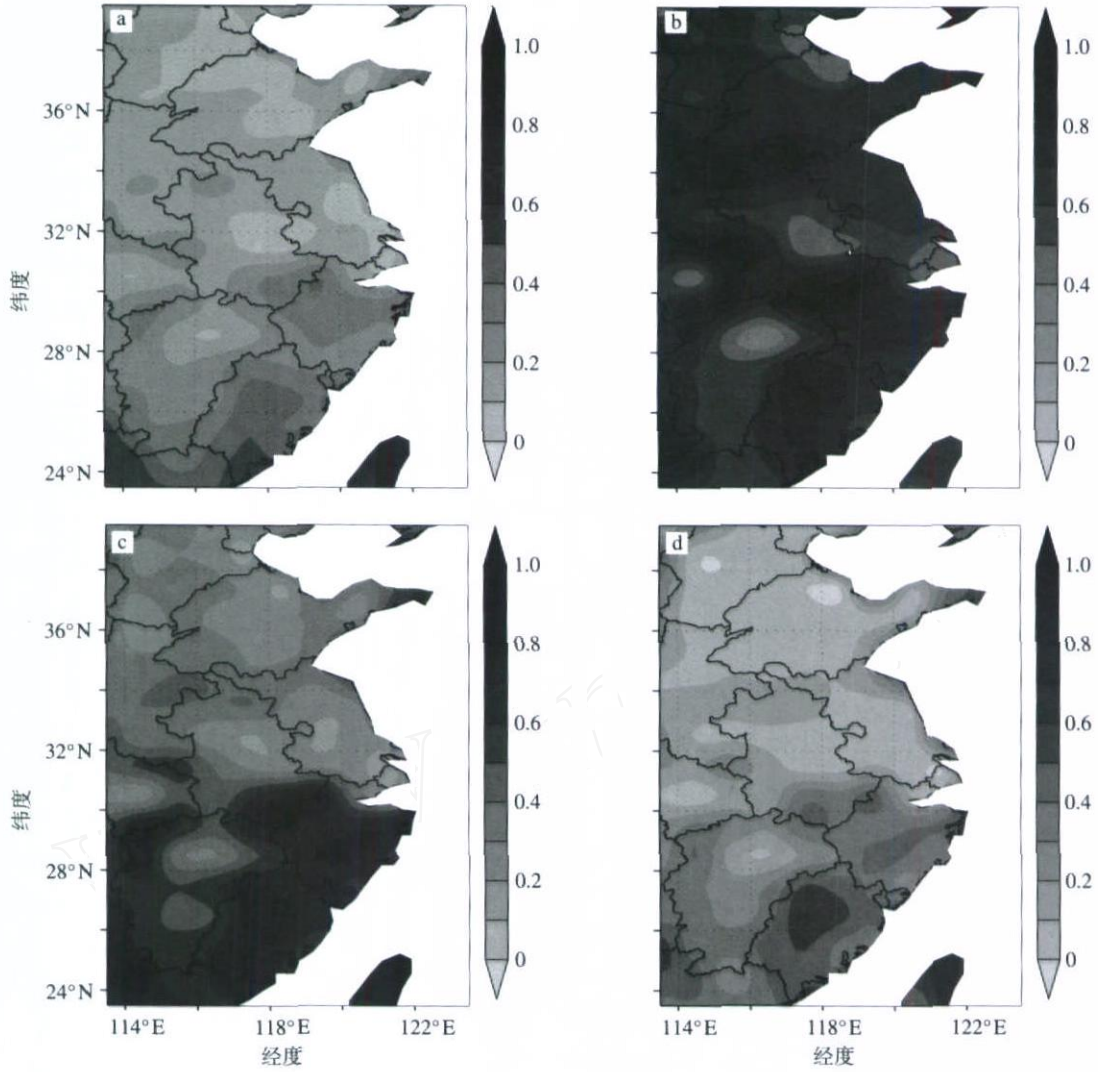


图 5 MODIS小颗粒比例 (FMF)的季节变化 a 春季; b 夏季; c 秋季; d 冬季

Fig 5 Seasonal distribution ofMODIS aerosol fine mode fraction in East China in (a) spring, (b) summer, (c) fall, and (d) winter

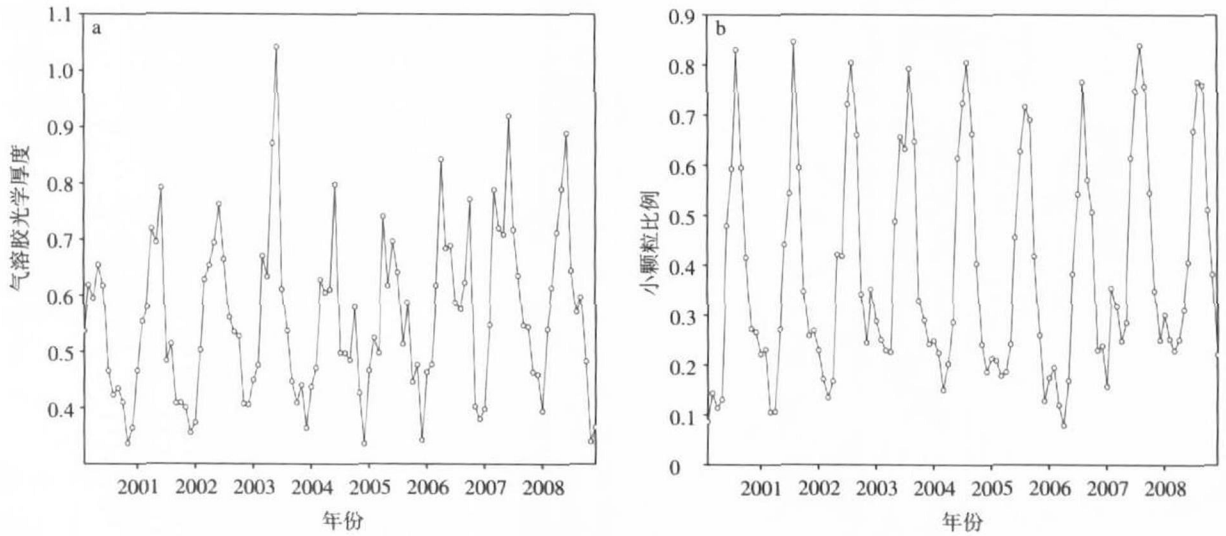


图 6 550 nm 处 MODIS 气溶胶光学厚度 (a)和小颗粒比例 (b)的时间序列

Fig 6 Time series of monthly area mean (a)AOT and (b)FMF in East China

及工业生产,造成了气溶胶排放的不断增加。FMF 与 AOT 的变化趋势略有不同,在每年夏季的 7、8、9 月达到最大,而在冬、春季达到最小。图 7 为多年区域平均的月变化,其变化规律与图 6 相似,AOT 的季节转化非常明显,也是在春、夏季相对较大,尤其是在 6 月达到最大;而在秋、冬季相对较小,在 12 月达到最小。同时,FMF 的变化也是四季分明,在夏、秋季相对较大,在 8 月达到最大;在冬、春季相对较小,在 4 月达到最小。可见,AOT 与 FMF 两者变化并不一致,说明在不同季节气溶胶的组成成分是不同的。通过以上分析,可以看出华东区域气溶胶光学厚度和气溶胶尺度分布存在显著的季节变化。

4 结论

通过利用验证后的 MODIS_C005 气溶胶产品,对华东区域气溶胶的分布及变化进行了初步研究,得到以下主要结论:

(1)通过与 AERONET 地基观测相比较,发现 MODIS_C005 气溶胶光学厚度在华东区域具有一定的适用性,满足 NASA 的设计要求。

(2)华东区域气溶胶光学厚度的分布具有显著的地域性特征,受地形影响显著。气溶胶光学厚度的高值区集中在海拔较低的平原地区。低值区大都分布在海拔相对较高的山区。同时其季节变化也十分显著,气溶胶光学厚度在每年的春、夏季相对较高,而在秋、冬季相对较小,季节转换明显。

(3)华东区域气溶胶具有明显的尺度分布特征。冬、春季的分布由于沙尘输送的影响,整个华东

区域气溶胶粒子的尺度都比较大。而在夏、秋季由于夏季风和降水的影响,气溶胶粒子的尺度都较小。同时,受到地形和人类活动的共同影响,在鄱阳湖平原和长江三角洲地区,气溶胶小颗粒比例全年都存在低值区,而在地势相对较高的山区,气溶胶小颗粒比例全年都是高值。

致谢:感谢 NASA GSFC 提供本文所需的 MODIS_C005 数据以及 AERONET 站点负责人和调查人员对于 AERONET 数据的收集、处理和维护!

参考文献:

- [1] 章澄昌,周文贤. 大气气溶胶教程 [M]. 北京:气象出版社, 1995
- [2] 杨琨,孙照渤,倪东鸿. 1999—2003 年我国气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 92-96.
- [3] Kuafin Y J, Tanre D, Gordon H R, et al Passive remote sensing tropospheric aerosols and atmospheric correction for the aerosol effect [J]. J Geophys Res, 1997, 102 (D 14): 16815-16830.
- [4] 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.
- [5] IPCC. The fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 153-171.
- [6] 陈丽,银燕. 沙尘气溶胶对大气冰相过程发展的敏感性试验 [J]. 气象科学, 2009, 29(2): 208-213.
- [7] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 12-16.
- [8] Luo Y F, L üDaren, 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]. J Geophys Res, 2001, 106 (D13): 14501-14513.

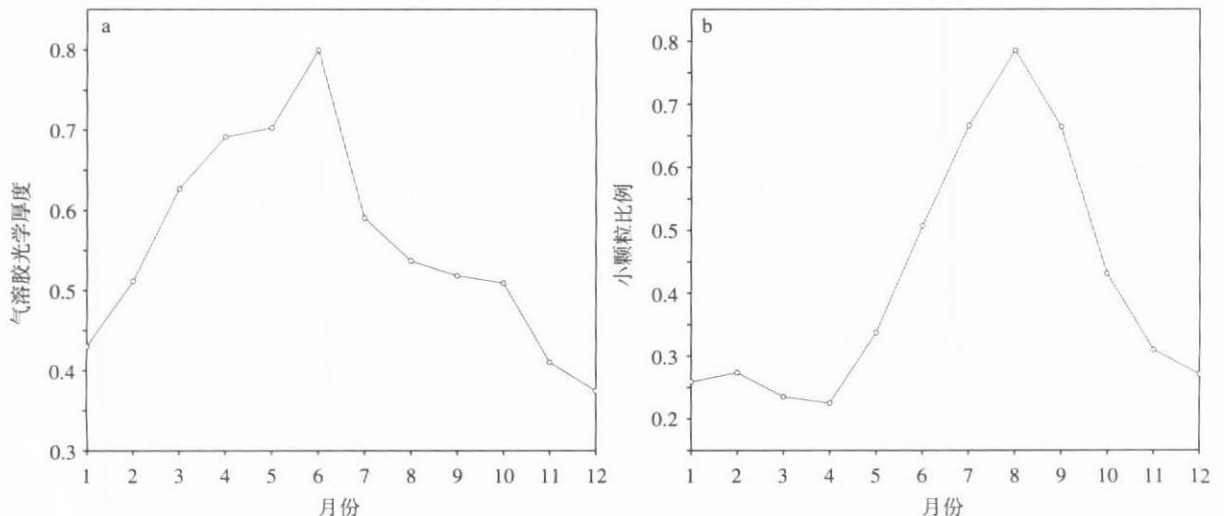


图 7 550 nm 处 MODIS 气溶胶光学厚度 (a) 和小颗粒比例 (b) 月序列

Fig 7 Monthly variation of area mean (a) AOT and (b) FMF in East China

- [9] Zheng Y F, Liu J J, Wu R J, et al. Seasonal statistical characteristics of aerosol optical properties at a site near a dust region in China [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, D16205, doi: 10.1029/2007JD009384.
- [10] Yu Xingna, Zhu Bin, Zhang Meigen. Seasonal variability of aerosol optical properties over Beijing [J]. *Atmos Environ*, 2009, 43: 4095-4101.
- [11] Zhang Junhua, Mao Jietai, Wang Meihua. Analysis of the aerosol extinctions in different areas of China [J]. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19 (1): 136-152.
- [12] 谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶光厚度的观测研究 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29 (6): 1146-1155.
- [13] 高润祥, 牛生杰, 张华, 等. 2006年春季西北地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31 (5): 655-661.
- [14] 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.
- [15] 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 [J]. *科学通报*, 2003, 48 (19): 2094-2100.
- [16] 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.
- [17] 邓学良. 卫星遥感中国海域气溶胶光学特性及其辐射强迫研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学大气科学学院, 2008.
- [18] 石广玉, 王标, 张华. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 2008, 32 (4): 826-840.
- [19] 延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划 [J]. *气象科学*, 2006, 26 (1): 110-117.
- [20] 邓学良, 潘德炉, 何冬燕, 等. 卫星遥感中国海域人为和沙尘气溶胶时空分布的研究 [J]. *海洋学报*, 2009, 31 (4): 58-68.
- [21] 周春艳, 柳钦火, 唐勇. MODIS 气溶胶 C004、C005 产品的对比分析及其在中国北方地区的适用性评价 [J]. *遥感学报*, 2009, 13 (5): 863-872.
- [22] Holben B N, Eck T F, Slutsker I. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 66: 1-16.
- [23] 邓学良, 何冬燕, 潘德炉, 等. 中国海域 MODIS 气溶胶光学厚度检验分析 [J]. *大气科学学报*, 2009, 32 (4): 558-564.
- [24] 贺千山, 杨引明, 耿福海, 等. 长江三角洲地区 MODIS 遥感气溶胶光学厚度的对比验证 [C]//中国气象学会 2008 年年会大气物理学分会论文集. 北京, 2008: 330-347.
- [25] 夏祥鳌. 全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高 [J]. *科学通报*, 2006, 51 (19): 2297-2303.

(责任编辑: 张福颖)