

文章编号:2095—0411(2015)04-0074-05

江苏省 MODIS 气溶胶光学厚度和 PM_{2.5} 质量浓度关系研究

杨 春,石小毛,刘飞翔
(常州大学 商学院,江苏 常州 213164)

摘要:采用 Terra-MODIS L1B 数据和 NASA 的 V5.2 气溶胶业务反演算法,通过 6S 辐射传输模型自制查找表,反演出江苏省的气溶胶光学厚度。利用地基太阳光度计观测资料计算的气溶胶光厚度数据对反演结果进行了验证。利用反演结果对南京、扬州和徐州等 3 个城市的气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 质量浓度数据的关系进行了回归分析,证实了 MODIS 气溶胶光学厚度可以作为预测 PM_{2.5} 区域分布与传输的有效补充手段。研究结果有助于相关部门了解大气污染情况及其变化趋势,在区域大气污染监测中具有应用价值。

关键词:气溶胶光学厚度;PM_{2.5};MODIS 数据;V5.2 算法

中图分类号: TP 391;P 409

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.2095—0411.2015.04.014

A Research on the Relationship Between Aerosol Optical Thickness and PM_{2.5} Concentration over Jiangsu Province

YANG Chun,SHI Xiaomao,LIU Feixiang
(School of Business,Changzhou University,Changzhou 213164,China)

Abstract: This paper obtains the aerosol optical thickness over Jiangsu province, by using Terra-MODIS L1B data and V5.2 aerosol retrieval algorithm of NASA, and by creating a lookup table from the 6S radiative transfer mode. The result is validated through the aerosol optical thickness data observed by sun photometer on the ground. The paper carries out a regression analysis between the aerosol optical thickness and the PM_{2.5} mass concentration with the data of Nanjing city, Yangzhou city and Xuzhou city. The result proves that the MODIS aerosol optical thickness can be used as an effective supplementary means to predict regional PM_{2.5} distribution and transmission, which is useful for departments concerned to understand the state and the changing tendency of air pollution, and it has application value in regional atmospheric pollution monitoring.

Key words: aerosol optical thickness;PM_{2.5};MODIS data;V5.2 algorithm

近年来,我国以雾霾为表象的空气污染日益严重,已构成对人民身体健康甚至社会经济发展的巨大威胁,受到全社会高度关注。空气质量的基本特

征量 PM_{2.5} 的起因、构成、观测、分析、预测和防控等方面,均是当前尤为急迫的研究课题,而 PM_{2.5} 的观测是所有这些研究的基础之一。观测 PM_{2.5},有微

收稿日期:2014-09-05。

基金项目:江苏省高校哲学社会科学研究项目(08SJB7900005)。

作者简介:杨春(1961—),男,四川宜宾人,博士,教授,主要从事管理信息系统设计和诊断研究。

观与宏观之分。微观的观测指在特定的时空点上的观测,目前已不是难题。宏观的观测则是针对一片较大区域,如一个城市、一个省甚至全国,观测其 $PM_{2.5}$ 的浓度、分布、迁移等特征和规律。 $PM_{2.5}$ 的宏观观测目前是一个有待广泛和深入研究的问题。以江苏省 3 个城市为例,以回归分析方法研究气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 的关系,证实气溶胶光学厚度可以作为预测 $PM_{2.5}$ 区域分布与传输的有效补充手段。

大气气溶胶是指大气分子及悬浮在大气中的固体和液体微粒组成的多相体系,其粒径的尺度大小在 $0.001\mu m \sim 10\mu m$ 。气溶胶不仅能够通过辐射强迫对地气辐射平衡产生显著影响,同时也是影响空气质量的重要污染物。气溶胶光学厚度是一个能够表示气溶胶总含量的参数,它可以体现大气的混浊程度。有关研究^[1]认为气溶胶光学厚度能够反映大气中颗粒物的分布情况,从而能表征大气污染的程度及污染源的分布情况。主要方法是利用 EOS/Terra 卫星上搭载的 MODIS (中分辨率成像光谱仪)数据反演 $550\mu m$ 波长上气溶胶光学厚度,用来补充地面观测难以反映城市大气污染物总体分布和变化趋势的不足。

最近十几年,许多学者通过卫星遥感数据对气溶胶光学厚度进行了研究。Kaufman^[2]建立了陆地上空气溶胶光学厚度遥感的暗像元算法,该算法使用 $2.12\mu m$ 通道的表观反射率取代 $2.12\mu m$ 的地表反射率来计算可见光红通道和蓝通道的地表反射率。Levy 等^[3]等在 Kaufman 暗像元算法基础上开发了 V5.2 气溶胶光学厚度反演算法,目前 NASA 采用该算法进行气溶胶光学厚度的业务反演,为全球提供分辨率为 $10km \times 10km$ 气溶胶产品,该产品对于研究全球尺度的气溶胶污染物传输有重要应用价值。然而,对于研究城市区域尺度的气溶胶来说, $10km \times 10km$ 分辨率的气溶胶产品在精度上并不能满足需求,而应该采用更高分辨率的卫星遥感数据来进行反演研究。陈辉等^[4]通过气象模式资料对 AQUA 卫星的 MODIS 气溶胶产品进行相应订正,建立了适用于冬季的气溶胶与 $PM_{2.5}$ 相关模型 ($R^2 = 0.51$),并运用建立的模型计算了京津冀地区的 $PM_{2.5}$ 月平均浓度。杨文雪等^[5]利用 MODIS 影像资料反演了北京市的气溶胶光学厚度,并将反演结果与地基监测点所获得的 $PM_{2.5}$ 数据进行了相关性分析,得出它们

总体相关性为 0.57,季节相关性为 0.609(夏季)和 0.536(冬季)的结论。Raffuse S M 等^[6]认为使用分辨率为 $10km$ 的 MODIS 气溶胶光学厚度产品可以预测 $PM_{2.5}$ 的质量浓度,以此演示了使用高分辨率 ($2.5km$) 的气溶胶光学厚度产品能够根据 $PM_{2.5}$ 的质量浓度情况来评估加州北部火灾事件发生的概率。王静^[7]等对北京市 MODIS 气溶胶光学厚度产品和 $PM_{2.5}$ 质量浓度之间的关系进行了探讨,验证了 MODIS 气溶胶光学厚度产品在监测区域和局地大气污染方面具有重要的应用价值及环境意义,但他们采用的 MODIS Level2 数据产品是分辨率为 $10km$ 的像元表面的空间统计平均值,且研究中仅选取了 10×10 的像元数,这就使得比较结果存在一定的不确定性。作为对这项研究的一个改进,本文采用分辨率为 $1km$ 的 MODIS L1B 数据。

1 数据资料

1.1 MODIS 遥感图像

从 NASA 的 LADSWEB 数据中心可以获取用于气溶胶光学厚度反演的 MODIS L1B 数据。文中选取了 2013 年 10 月的 7 天作为实验日,实验区域范围为 ($30^{\circ}45' \sim 35^{\circ}20'N$; $116^{\circ}18' \sim 121^{\circ}57'E$)。为尽量减少云检验误差可能对反演结果造成的影响,选择以晴空为主的研究区域的影像。

1.2 太阳分光光度计数据

利用 NASA 建立 AERONET (AERosol Robotic Network)发布的数据计算 $550nm$ 时的气溶胶光学厚度可以对卫星反演结果进行检验。该地面数据是利用法国 CEMIL 公司制造的自动跟踪扫描的太阳分光光度计 (CE-318) 进行观测而得的。本次研究的观测仪器 CE-318 架设在无锡市郊的太湖,地理坐标为 $31.421^{\circ}N$ 、 $120.215^{\circ}E$,海拔高度为 $0.02km$ 。

1.3 $PM_{2.5}$ 质量浓度

选取 2013 年 10 月南京市、扬州市、徐州市 3 个城市的 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度数据。各城市的每个监测点均地处市区内,周围多是居住区;同时亦靠近交通干道,受生活污染和交通污染影响,具有典型的城市大气污染特征。

2 气溶胶光学厚度反演算法

2.1 V5.2 气溶胶反演算法

暗像元法^[2]是目前陆地上空气溶胶遥感应用较为普遍的算法。但由于该方法在使用时要求研究区内必须存在稠密的植被,所以在城市尺度或包含城市尺度的区域范围内使用该方法反演结果精度不高^[8]。另外,由于下半年的空气质量较高,遥感影像中暗像元较少,因此暗像元法在秋季和冬季气溶胶光学厚度反演中也存在不确定性^[9]。本文主要研究秋季时的江苏省气溶胶光学厚度,因此选用目前陆地上空气溶胶反演应用最为广泛的 V5.2 算法进行气溶胶光学厚度的反演。

V5.2 算法对暗像元法进行了 2 方面的改进:①将 2.12 μm 通道的表观反射率与可见光红通道和蓝通道的地表反射率之间的关系由常量值转变成函数关系;②考虑了植被指数和散射角对地表反射率的影响。利用卫星观测的可见光和近红外通道的反射率比值对表面反射率进行参数化,使其成为植被指数和散射角的函数,具体公式如下:

$$\begin{aligned}\rho_{0.66} &= f(\rho_{2.12}^*) = \rho_{2.12}^* \times s_{0.66/2.12} + y_{0.66/2.12} \\ \rho_{0.47} &= h(\rho_{0.66}) = \rho_{0.66} \times s_{0.47/0.66} + y_{0.47/0.66}\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)中 $s_{0.66/2.12} = s_{0.66/2.12}^{NSW} + 0.002\Theta - 0.27$

$$y_{0.66/2.12} = 0.00025\Theta + 0.033$$

$$s_{0.47/0.66} = 0.49$$

$$y_{0.47/0.66} = 0.005$$

当 $N_{sw} < 0.25$, $S_{0.66/2.12}^{NSW} = 0.48$; 当 $N_{sw} > 0.75$, $S_{0.66/2.12}^{NSW} = 0.58$; 当 $0.25 \leq N_{sw} \leq 0.75$, $S_{0.66/2.12}^{NSW} = 0.48 + 0.2(N_{sw} - 0.25)$

式中: ρ 表示相应通道的地表反射率, Θ 为散射角, N_{sw} 表示植被指数可通过式(2)求得:

$$N_{sw} = (\rho_{1.24}^* - \rho_{2.12}^*) / (\rho_{1.24}^* - \rho_{2.12}^*) \quad (2)$$

2.2 6S 辐射传输模型

本文通过 6S 辐射传输模型来建立查找表。针对 MODIS 红光波段建立适用于 V5.2 算法的卫星表观反射率查找表;查找表通过假定气溶胶的模型为大陆型气溶胶来进行气溶胶的光学厚度反演;由于试验所选时间为 2013 年 10 月底,区域为(30°45'~35°20'N;116°18'~121°57'E),所以使用 6S 模式中的中纬度冬季大气廓线,来说明大气层的吸收和空气分子的散射行为。气溶胶光学厚度取 0.0~

2.0,以 0.12 为步长;地表反射率取 0.01~0.1,以 0.01 为步长;卫星、太阳的天顶角分别取 0~75°,以 5°为步长;卫星和太阳之间的方位角差取 0°~180°,以 10°为步长。利用辐射传输模型,通过以上各个系数的配置,即可生成反演使用的查找表。其他值则在它们之间进行线性内插求得。

3 反演结果验证及分析

通过使用 ENVI 遥感影像处理软件反演了 2013 年 10 月的 7 幅 MODIS 影像。为了对反演结果进行验证,使用太湖站地面光度计的数据进行对比。由于地面光度计的数据缺少 550 μm 处的气溶胶光学厚度数值,所以需要采用埃斯屈朗方程利用 440 μm 、500 μm 、675 μm 、870 μm 处的气溶胶光学厚度进行插值来生成,具体原理及计算过程可参见相关文献^[8]。

图 1 为 MODIS 反演数据与太阳光度计数据的回归分析,它们的回归方程可表示为: $y = 0.85x + 0.13$,其相关系数为 0.87,RMS 是 0.07。这与肖钟涌等^[10]利用 MODIS 遥感数据反演广州市的气溶胶光学厚度的结果相近,其得到的回归方程为 $y = 0.90x + 0.14$,相关系数为 0.91;且李成才等^[11]研究也认为在内陆植被密集的地表,RMS 应该 < 0.1。图 1 中的 $y = 1.2x + 0.05$ 和 $y = 0.8x + 0.05$ 这两条虚线为 NASA 发布的气溶胶光学厚度误差允许范围,从图中可以看到观测样本点全部落入误差允许范围之内。之所以会出现一定的误差,是因为太湖站位于无锡市郊区,其周围分布大量农舍和耕地,且靠近太湖湖水。贺千山^[12]的研究认为大陆地区 MODIS 气溶胶光学厚度反演的最大误差来源于陆地下垫面不均匀或遥感影像中存在水体。

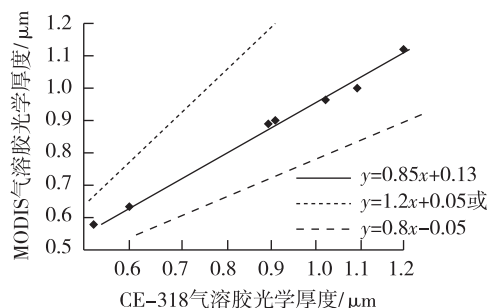


图 1 地面光度计数据与反演结果的回归分析

Fig. 1 Regression analysis of ground photometer data and inversion results

图 2 和图 3 为反演的江苏省气溶胶空间分布图中典型的 2 幅。从图中可以看出气溶胶光学厚度空

间分布差异十分显著,在 0.2~1.4 之间变化,呈现出了南高北低的趋势,这与邓学良与施成艳^[13-14]等的研究十分接近。因此,本文认为由于受到工业污染的影响,江苏省整体的平均气溶胶光学厚度在 0.8 左右波动。

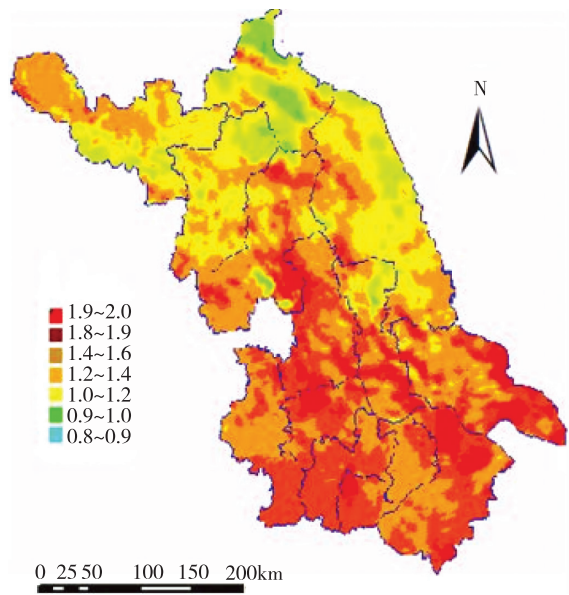


图 2 2013 年 10 月 1 日 MODIS 反演结果
Fig.2 The results of October 1, 2013 MODIS inversion

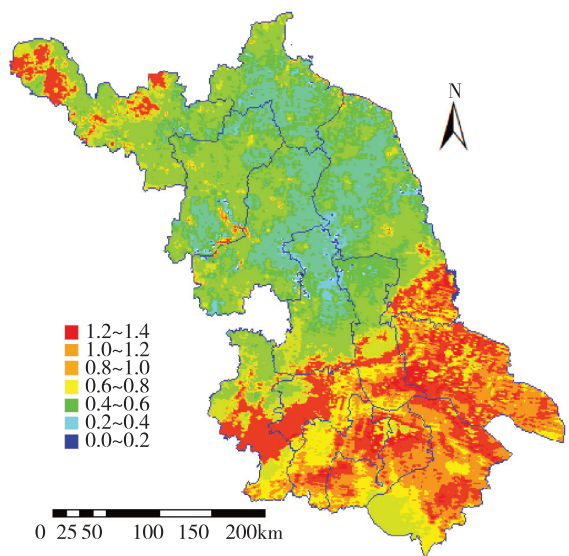


图 3 2013 年 10 月 20 日 MODIS 反演结果
Fig.3 The results of October 20, 2013 MODIS inversion

4 气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 的相关性分析

气溶胶光学厚度和 PM_{2.5} 分别是描述大气中颗粒物污染状况的 2 种方式。王静等^[4]在研究北京市

的气溶胶光学厚度认为其与 PM_{2.5} 平均质量浓度之间存在一定的相关性。因此,采用南京、扬州和徐州 3 个市日平均气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 平均质量浓度进行相关性分析。南京、扬州和徐州 3 个市日平均气溶胶光学厚度是通过 ENVI 软件将各城市市区范围选定为 ROI,再计算得到的。

表 1 为南京、扬州和徐州 3 座城市 MODIS 反演的平均气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 日平均质量浓度的回归方程及其检验结果。由表 1 可以看出,3 个回归方程中平均气溶胶光学厚度都在 95% 的置信水平下,对 PM_{2.5} 影响显著。另外,也可通过图 4~图 6 观察 3

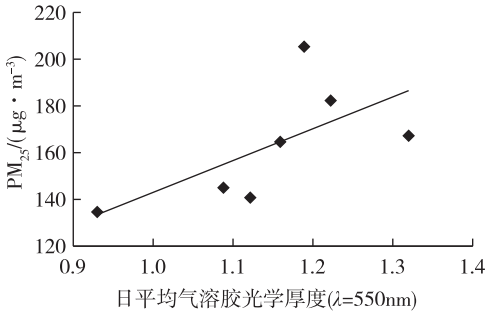


图 4 南京气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 回归方程
Fig.4 The aerosol optical thickness and the PM_{2.5} regression equation of Nanjing

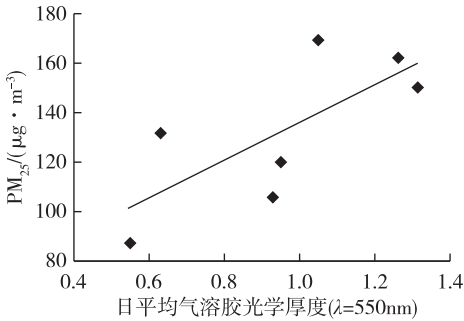


图 5 扬州气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 回归方程
Fig.5 The aerosol optical thickness and the PM_{2.5} regression equation of Yangzhou

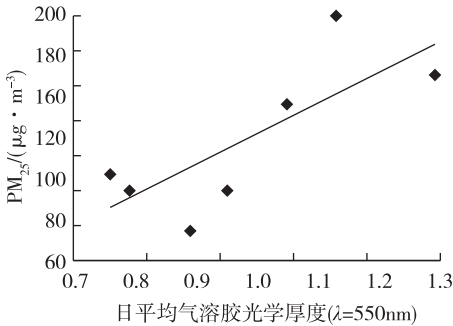


图 6 徐州气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 回归方程
Fig.6 The aerosol optical thickness and the PM_{2.5} regression equation of Xuzhou

座城市的平均气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 日平均质量浓度的回归方程。比较 3 个方程可以发现扬州和徐州的回归方程的相关系数十分接近且远高于南京市的回归方程的相关系数。通过计算及目视判读反演的气溶胶光学厚度空间分布图,可以看出南京市区内气溶胶光学厚度空间分布变化极大,位于高值区的鼓楼区和建邺区要比邻近的玄武区平均高 0.4 左右,而徐州和扬州两地市区内气溶胶光学厚度变化很小。因此,同一地区气溶胶光学厚度空间分布差异较大时会降低其与 $PM_{2.5}$ 的相关性。在这种情况下,最好是对研究区域进行再分解,当研究区域足够小时,其气溶胶光学厚度空间变化差异会降低。对南京、扬州和徐州平均气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 日平均质量浓度分析得到的 3 个回归分析方程的相关系数均高于上文提到的王静等研究的北京 MODIS 气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 的相关系数(0.62)。

表 1 各城市气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 回归方程及检验结果

Table 1 The aerosol optical thickness and the $PM_{2.5}$ regression equation and test results of each city

城市	回归方程	相关系数	t 值	F 值	F 统计量的 P 值
南京	$y=133.83x+9.72$	0.66	3.04	9.27	0.03
扬州	$y=98.56x+36.13$	0.76	2.64	6.97	0.04
徐州	$y=172.77x-40.31$	0.75	2.59	6.76	0.04

5 结 论

使用 MODIS L1B 影像,利用 V5.2 算法并通过自制的查找表反演出 7 幅江苏的气溶胶光学厚度空间分布图。为了对 MODIS 反演结果进行验证,采用太湖站的地面光度计数据与其进行了相关分析,结果表明反演精度极高。对南京、扬州和徐州的平均气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 的相关分析表明:

1)扬州和徐州的气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 的相关性较高,均高于 0.75,而南京的气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 的相关性只有 0.66。这与南京市的气溶胶光学厚度空间变化较大有关,通过对研究区进行再分解可以提高两者的相关程度。

2)本文使用分辨率为 $1km \times 1km$ 的气溶胶光学厚度产品得到的气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 的相关性结果,比使用分辨率为 $10km \times 10km$ 的产品得到的相关性结果要高。因此,通过对 MODIS 的气溶胶光学厚度的反演可以监测区域大气颗粒物的污

染程度及其分布,这就为相关部门了解大气污染情况及其变化趋势提供了一种有效的补充手段。

参考文献:

- [1]ZHANG Y, LI Z Q.Estimation of $PM_{2.5}$ from fine-mode aerosol optical depth [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17 (4): 1389-1396.
- [2]KAUFMAN Y J, KING M D, TANNER D, et al. Remote sensing of troposphere aerosols from space: past, present and future [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80 (11):2229-2259.
- [3] KAUFMAN Y J, WALD A E, REMER L A, et al. The MODIS 2.1- μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1997, 35(5):1286-1298.
- [4]陈辉,厉青,王中挺,等.利用 MODIS 资料监测京津冀地区近地面 $PM_{2.5}$ 方法研究[J].气象与环境学报, 2014, 30(5):27-37.
- [5]杨文雪,张晶,秦宁,等.北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 浓度的时空差异及其相关性研究[J].科学技术与工程, 2014, 14 (31):159-161.
- [6]RAFFUSE S M, MCCARTHY M C, CRAIG K J, et al. High-resolution MODIS aerosol retrieval during wildfire events in California for use in exposure assessment [J]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(19):11242-11255.
- [7]王静,杨复沫,王鼎益.北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的特征及其相关性[J].中国科学院研究生院学报, 2010, 27(1):10-16.
- [8]任佳,王振会,高扬.利用两种算法反演江浙皖地区气溶胶光学厚度[C]//第五届苏皖两省大气探测、环境遥感与电子技术学术研讨会专辑. 南京:[出版者不详], 2009:109-115.
- [9]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.
- [10]肖钟涌,江洪,陈健.利用 MODIS 遥感数据反演广州市气溶胶光学厚度[J].中国环境科学, 2010, 30(5):577-554.
- [11]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.
- [12]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 年年会大气物理学会会场论文集. 北京:[出版者不详], 2008:330-347.
- [13]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.
- [14]施成艳,江洪.长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度的遥感监测 [D].南京:南京大学, 2011.

(责任编辑:李艳)