

2006年春季我国东部海域气溶胶 光学厚度与沙尘天气*

申彦波^{1,2}, 王 标², 石广玉²

(1. 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081;

2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG), 北京 100029)

摘 要 结合船基的太阳光度计观测资料和空基卫星遥感的 MODIS 气溶胶光学厚度资料, 研究了我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气的关系。通过对不同天气条件下 500nm 气溶胶光学厚度的分析, 得出晴天(背景天气)、有云和浮尘以及只有浮尘时的平均值分别约为 0.2、0.6 和 1.3 以上; 将 MODIS 的气溶胶光学厚度与船基观测资料进行对比之后发现, 两者随时间的变化趋势非常一致, 但前者在数值上明显偏高; 利用订正后的 MODIS 资料, 分析了 2006 年春季我国东部海域气溶胶光学厚度的时空分布特征, 并与我国北方发生的沙尘天气进行了对比, 发现两者之间关系密切。

关 键 词 : 东部海域; 气溶胶光学厚度; 沙尘天气; MODIS 资料

中图分类号 : P402; P445^{+.4} **文献标识码** : A

1 引 言

亚洲内陆频繁发生的沙尘天气每年向大气中注入大量沙尘气溶胶粒子, 它们不但可以随着西风带输送、沉降在中国中部和东部, 而且可以沉降到渤海、黄海、东海等中国近海以及日本海和太平洋的广大海域。这些沙尘微粒不仅影响当地的空气质量, 而且具有更深层次的环境和气候效应^[1~3], 近年来受到广泛的关注, 并开展了一些研究工作^[4~8]。

中国 SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study) 计划将亚洲内陆的沙尘气溶胶与海洋生态系统联系起来作为一个互相影响的有机整体进行研究^[9]。本文正是作为该研究工作的一部分, 利用该项目的有关观测资料, 分析我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气的关系, 为进一步定量研究沙尘

入海通量及其对海洋初级生产力的影响提供科学的依据。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD) 是表征大气混浊度和气溶胶含量的一个重要物理量, 也是确定气溶胶气候效应的一个关键因子和大气模型的一个重要参量, 气溶胶含量越高, 则 AOD 的值越大。在有沙尘天气发生时, AOD 可以用于反映大气中沙尘气溶胶含量的高低, 并进而判断沙尘天气的强弱。

由于在海洋区域很难直接获得业务化的观测资料, 因此通常都只能用卫星监测图像简单定性地确定一个区域的沙尘天气发生与否。要想定量研究长期、大面积的沙尘气溶胶入海通量, 必须间接利用其它有关观测资料。当前, NASA 所公开提供的 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 的气溶胶光学厚度(以下

* 收稿日期 2007-09-30; 修回日期 2008-01-18.

* 基金项目: 国家自然科学基金重大项目“上层海洋—低层大气生物地球化学与物理过程耦合研究”(编号: 40490260) 第一课题“亚洲沙尘对中国近海初级生产力的影响及其气候效应”(编号: 40490261); 科技部国际科技合作项目“亚洲沙尘的气候与环境效应研究”(编号: 2006DFA21950); 中国科学院国际合作重点项目“亚洲沙尘气溶胶的辐射特性及其气候与环境效应的研究”(编号: GJHZ0620) 共同资助。

作者简介: 申彦波(1978-)男, 河南南阳人, 副研究员, 主要从事沙尘的数值模拟研究. E-mail: shenyb@cm a.gov.cn

简记为 MODIS /AOD) 产品为这种研究提供了可能。

本文首先利用船基观测资料分析了不同天气条件下的气溶胶光学厚度,进而对 MODIS /AOD 资料进行对比和订正,最后利用订正后资料分析 2006 年春季我国东部海域气溶胶光学厚度的变化与我国北方沙尘天气发生的强弱多寡之间的关系,为下一步利用气溶胶光学厚度计算沙尘入海通量奠定基础。

2 资料介绍

2.1 船基光学厚度观测资料

为了深入了解黄海春季重要大气物质(沙尘、含氮物质)的沉降通量及其对海洋初级生产过程和生态系统的影响,揭示 CO_2 和其他辐射活性气体(如 DMS , N_2O , CH_4 等)在上层海洋与低层大气中的浓度分布、通量及其变化,研究上层海洋—低层大气物质交换及关键物理和生物地球化学过程的控制作用,中国 SOLAS 项目组分别于 2005 年春季(3月19~27日和4月29日至5月11日)和 2006 年春季(4月17~30日)对黄海和东海北部进行了 3 次综合调查研究,于 2005 年 5 月 15~20 日对南海进行了 1 次综合调查研究,调查船为中国海洋大学的东方红 2 号科考船。观测项目涉及物理海洋、海洋气象、海洋化学和海洋生物等多学科的内容^[10]。

2005 年我国大范围的沙尘天气发生较少,当年在黄海进行走航观测的两个航次都没有遇到,而 2006 年春季发生在我国北方的沙尘天气则频频影响到我国近海区域,在 4 月份进行的走航观测过程中也多次受其影响。因此本文主要以 2006 年春季在黄海和东海的观测过程为例,研究黄海海域大气气溶胶光学厚度与沙尘天气的关系,图 1 是此次出海观测的航行顺序及停靠站位。

此次出海用于大气气溶胶光学厚度观测的仪器是 LED (Light Emitting Diode) 手持太阳光度计,该类光度计的核心部分是光电二极管探测器,当太阳光照射到这个探测器时,它将产生微弱电流,电流通过放大器被转化成电压信号,检测这个电压信号,获得观测值,然后根据 Langley 算法将观测值转化为 AOD。光度计由四个通道组成,中心波段分别为 405 nm、500 nm、650 nm 和 800 nm,每个通道的视场角约为 2.5° ,带宽均为 10 nm。在将出海期间的观测值转化为 AOD 时,首先与中科院大气物理研究所的基准光度计进行了对比校标,该基准光度计每年定期采用 Langley 定标法结合量值传递定标法进行标定,不同光度计间的相对标准偏差小于 3%^[11]。

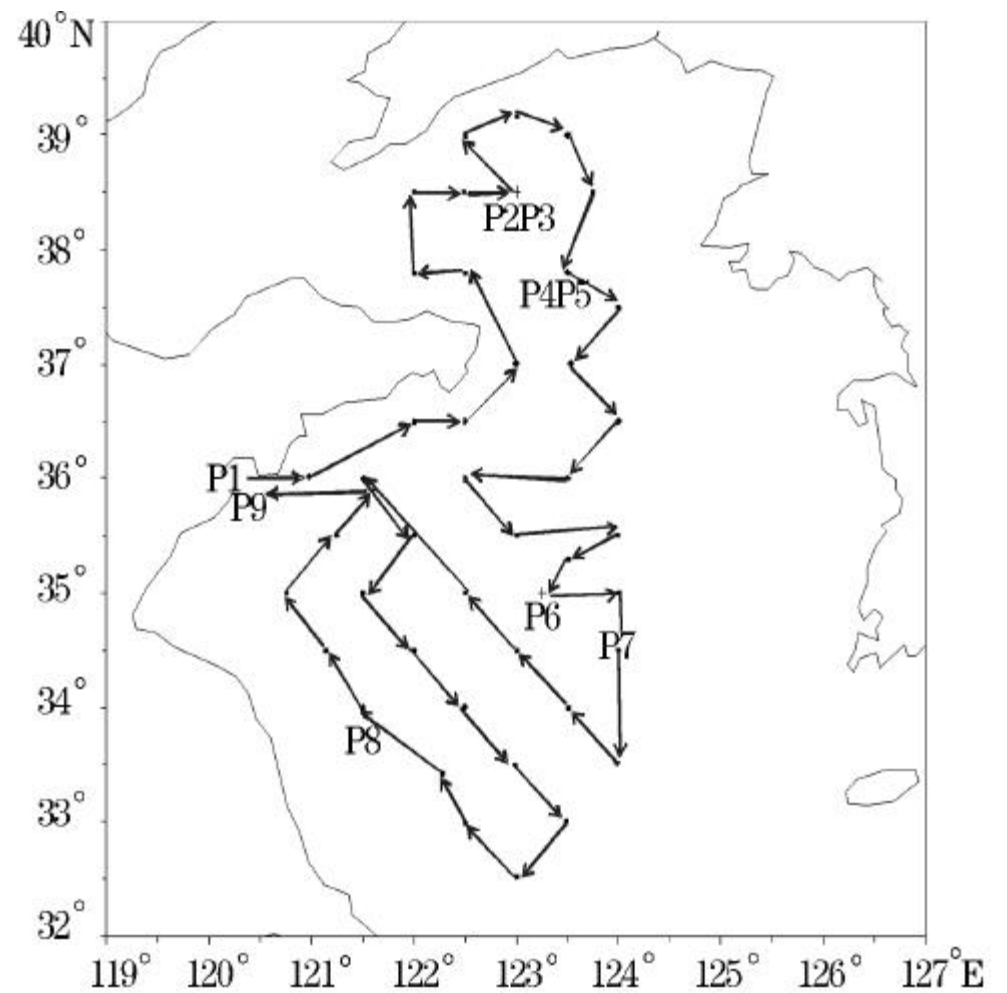


图 1 2006 年 4 月中国 SOLAS 项目组出海观测的航行顺序及停靠站位示意图

Fig.1 The sailing order and stop stations during the observational process of China SOLAS Project over

Yellow and East China Seas in April, 2006

- 表示船停的大面站,单站工作时间为 1 小时;
- 表示船停的连续站,单站工作时间为 25 小时;
- P1-P9 标示的是表 1 中 9 个 AOD 比较点的位置
- denotes the grid stations with 1hr observation;
- denotes Anchor stations with 25hr observation;
- P1-P9 denote the positions of the 9 points in Table 1

出海期间 AOD 的观测时间从每天上午 7 点左右开始,下午 6 点左右日落时结束,通常两次观测的时间间隔约为 30 分钟,每天开始后和结束前的一个小时内间隔为 10 分钟,当遇沙尘天气时,增加到每 5 分钟观测 1 次,每次观测都在 1 分钟内完成。观测时,同时记录当时天空中的云量,当云量(高云除外)占八成以上及阴天(阳光不能透射)情况下,不进行观测。

2.2 MODIS /AOD 资料

探测大气气溶胶光学厚度可以采用太阳光度计等仪器进行自下而上的地(船)基观测,也可以采用卫星遥感进行自上而下的空基观测。地基探测方法可以准确提供当地局部的气溶胶信息,但在广阔无人的海洋区域则难以长期连续地进行;而空基的卫星遥感则具有长期连续、空间范围广、分辨率高等诸多优点,为全球和区域尺度特别是海上气溶胶分布、变化、光学特性以及辐射效应的观测研究提供了较为可靠的技术手段。目前已有 NOAA /AVHRR, TOMS, GMS /VISSR, SeaWiFS, POLDER 以及 MODIS

等卫星传感器应用于海上气溶胶的反演和应用研究。

中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectrometer, MODIS)是 NASA 先后分别搭载在太阳同步极地轨道系列卫星 Terra(1999 年 12 月 18 日发射)和 Aqua(2002 年 5 月 4 日发射)上的一个传感器,该传感器每天覆盖全球一次,具有从可见光、近红外到红外的 36 个通道,扫描宽度 2 330 km,覆盖了可见光到中红外(440 ~2 135 nm)的 7 个通道,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。与以往类似星载辐射计相比,MODIS 在仪器定标、空间分辨率、光谱分辨率等方面都有很大改进,从而可以提供质量更高、空间覆盖更广的气溶胶卫星遥感产品。这些产品是开展气溶胶特性和辐射强迫、大尺度污染输送、区域空气质量预报等研究的重要资料来源。

根据暗背景条件下地表反射率在可见光与近红外波段相关很好的特征,NASA 利用 MODIS 可见光通道 1 与通道 3 和近红外通道 7 的资料业务反演了气溶胶产品,其空间分辨率为 10 km。本文利用该产品中 AQUA 卫星 550 nm 的气溶胶光学厚度(以下简称 τ_{550})结合上述船基观测资料对其进行有限的订正,并根据订正后的结果具体分析 2006 年春季(3 ~5 月)我国东部近海区域大气气溶胶光学厚度的时空分布特征及其与我国北方沙尘天气的关系。

3 我国东部近海区域不同天气条件下的气溶胶光学厚度

在 2006 年 4 月 17 ~30 日的出海过程中,观测区域的天气变化比较频繁,出现了晴天、多云、阴天、沙尘以及降水等多种天气现象。文献[12]结合有关 2006 年 4 月我国北方沙尘天气的统计结果^[13]、卫星监测图像以及出海过程中的天气现象记录,确定在此次出海过程中,20 ~21 日是其中天气最为晴好的两天,可以作为背景天气,用于与沙尘天气的对比,17 ~18 日和 27 日的观测区域既有云的影响又有浮尘的影响,23 ~24 日则只受到了浮尘天气的影响。下面利用太阳光度计的观测结果具体分析几种典型的天气条件下我国东部近海区域气溶胶光学厚度随时间的变化特征。由于 4 个波段的光学厚度随时间的变化曲线基本一致,因此这里仅以 500 nm(文中以 τ_{500} 表示,图中则以 AOD_{500 nm} 表示)为

例进行分析。

图 2 分别给出了全部观测过程,有云和浮尘、晴天以及只有浮尘的天气条件下 τ_{500} 随时间的变化曲线。结合记录的云量及当时的天气状况,从图中可以看出:

在整个观测过程中,由于天气变化比较频繁,海面上空经常有云存在,同时还可能有工业污染物、沙尘等陆源气溶胶的输入以及海盐气溶胶和水汽等多种消光因素的存在,使得光学厚度的波动范围和变化频率都非常高, τ_{500} 的最大值为 1.767,最小值为 0.081,平均值达到了 0.659。

4 月 17 日白天大部分时间全天空都有一层淡淡的薄云,但阳光还是能够透射出来,同时这一天还受到了浮尘的影响,因此大部分时间光学厚度的值都很高, τ_{500} 的平均值达到了 1.389,是 4 月 20 日晴天无云状况下的 6 倍以上,反映了云和浮尘对于太阳辐射较强的削弱作用。

4 月 20 日全部白天时间都是晴天无云也没有浮尘的影响,是此次出海观测过程中天气状况最好的一天之一,因此光学厚度的值一直很低,变化幅度也较小, τ_{500} 的最大值为 0.277,最小值为 0.081(也是全部观测过程的最小值),平均值仅为 0.209,这与其他研究者 2003 年春季在黄海的观测结果^[14]非常一致,基本反映了此次出海过程中黄海上空大气气溶胶光学厚度的背景值。

4 月 24 日的天气状况记录为无云,下午天空有些灰暗,明显是受到了浮尘的影响,同时由于天空没有云的存在,因此光学厚度的变化基本可以反映浮尘对于太阳辐射的削弱作用。从图中可以看出这一天 τ_{500} 的值一直在 0.5 附近波动,变化幅度很小,最大值为 0.66,最小值为 0.46,平均值为 0.565,是 20 日晴天无云状况下的 2.7 倍,充分反映了浮尘对太阳辐射的削弱作用。但另一方面,根据有关研究^[15],我国北方地区发生沙尘暴时,其 550 nm 的光学厚度往往可以达到 1.0 以上,与此相比,这里 0.565 的平均值就小了很多(在相同时间相同地点, τ_{500} 和 τ_{550} 的差异通常很小),而这也恰恰说明沙尘从源区经过远距离的输送和沉降到达海洋上空之后其浓度已经变得很低,因而对太阳辐射的削弱作用也变得较小,这与已有的研究成果^[16]以及人们的普遍认识都是一致的。

4 月 27 日的天气状况与 17 日比较相似,既有云的影响又有可能受到浮尘的影响,9 ~12 时之间云量甚至达到八成以上无法进行光学厚度的观测,

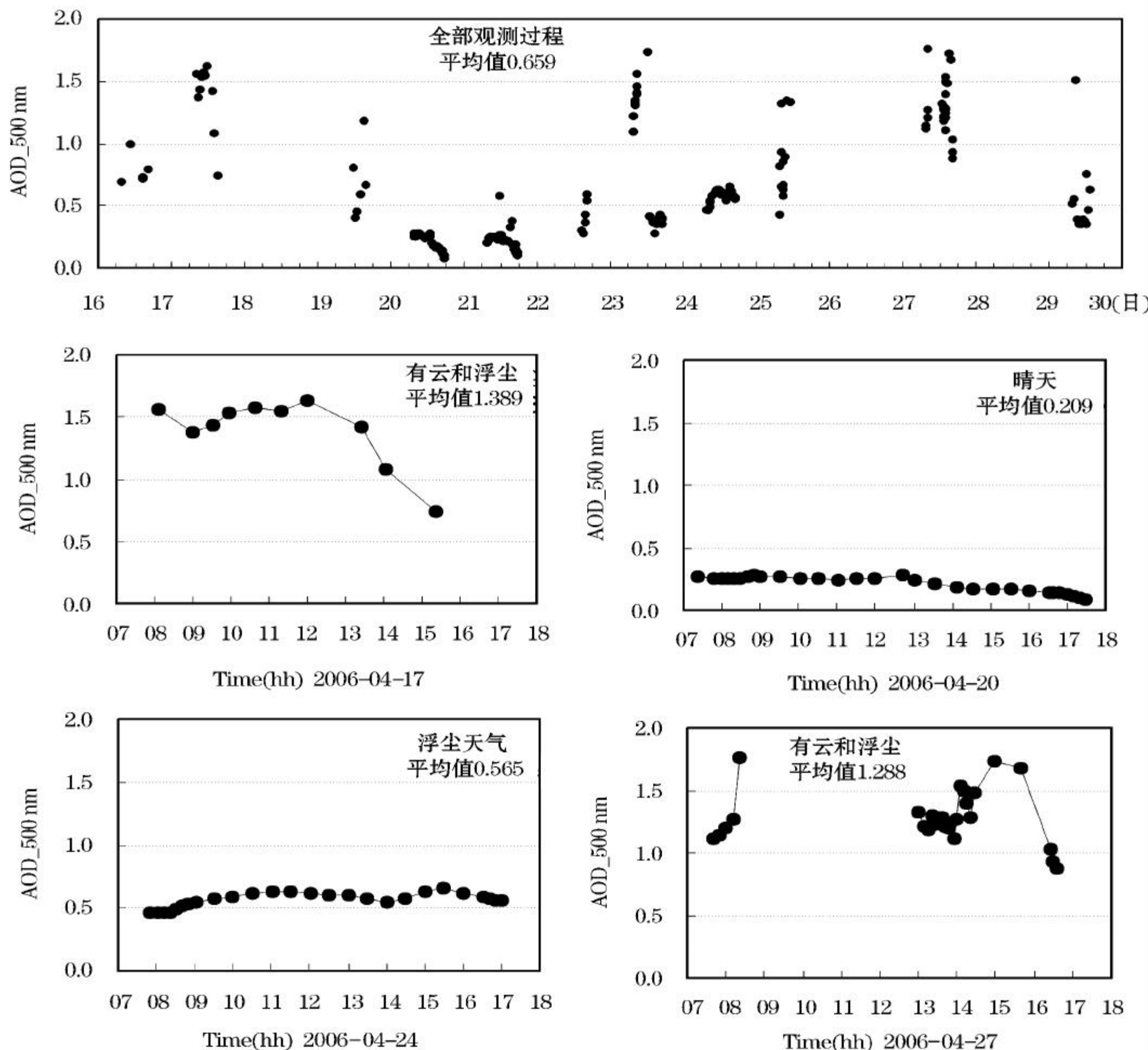


图 2 2006 年 4 月出海观测过程中我国东部海域不同天气条件下 500nm 的光学厚度(BST)
 Fig.2 Optical depth of 500nm in different weather conditions over Yellow and East China Seas during the observational process in April, 2006 (Beijing Standard Time)

而 12 时之后,则明显感觉到空气非常混浊,能见度很低,因此对光学厚度也进行了加密观测,每 5 分钟记录一次。从图中可以看出,这一天 AOD_{500} 的值基本都在 1.0 以上,最大达到了 1.767,平均值为 1.288,与 17 日非常接近,也反映出云和气溶胶对太阳辐射较强的削弱作用。

综上所述,在晴天、有云和浮尘以及只有浮尘这 3 种典型的天气条件下,我国东部海域光学厚度的平均值分别约为 0.2、0.6 和 1.3 以上。相比之下,在海洋上空浮尘对于太阳辐射的削弱作用要明显低于云,但也不可忽略。沙尘气溶胶由于空间分布相对均匀,因此对于光学厚度的影响比较持续一致,不

会使其产生大的波动,而云则由于时空变化比较剧烈,从而也使得光学厚度的波动非常大。

4 MODIS /AOD 资料与船基观测资料的对比与订正

卫星遥感的 MODIS /AOD 资料虽然具有空间范围广、分辨率高,时间连续性好等优点,但由于其自身的算法一直在不断的改进中,同时由于云和地表反照率等各种因素的影响,也使其仍然存在着精度方面的不足,因此在使用该资料时,应首先尽可能地利用地面观测资料进行订正,国内外已有很多研究者进行了这方面的工作^[17~22]。下面利用上述船基

观测资料对相应区域、相应时间段内的 MODIS / AOD 资料进行对比和订正。

由于船基观测的 4 个波段的 AOD 与 MODIS / AOD 的波段并不一致,因此需根据经典的 $\tau_{ngstr m}$ 公式^[23]利用观测资料进行计算,以得到与 MODIS / AOD 相同波长(550 nm)的 AOD:

$$\tau_{550} = \tau_{500} \left(\frac{550}{500} \right)^{-0.75} = \tau_{650} \left(\frac{550}{650} \right)^{-0.75}$$

式中 τ_{500} 是波长为 500 nm 的气溶胶光学厚度, τ_{650} 是大气混浊度, $\tau_{ngstr m}$ 是 $\tau_{ngstr m}$ 指数。计算时首先根据两个波段(500 nm 和 650 nm)的光学厚度确定 τ_{500} 和 τ_{650} 这两个参数,然后带入该式即可得到 550 nm 的光学厚度,观测数值和计算结果如表 1 所示。

由于 AQUA 卫星每天只扫描地球一次,使得每个格点每天都只有一个观测值,而且与船基的观测值很难在时间和空间上达到完全精确的重合,因此,在对两者进行比较时需要进行近似处理。时间上,以卫星每天扫描中国东部近海(主要是黄海)的时间为准(每天过境的时间都在北京时间 12:00 左右),船基观测对应的时间取与之相差在 1 个小时之内的数据的平均值;空间上,以船基观测的经纬度

为基准,MODIS / AOD 对应的位置取与之相差在 0.1 度(约 10 km)范围内的有效数据,然后,对入选的多个数值求平均之后再进行比较,结果如表 1 所示,一共有 9 个 MODIS / AOD 的平均值可与观测计算值进行比较,其中 4 月 21 日有 2 个数值,是由于观测船的运动正好在相应的时间段跨过了卫星的 2 个扫描区域。

图 3 是观测计算的 AOD 和 MODIS / AOD 的相关,从图中可以看出,两种 AOD 资料具有很好的线性相关关系,相关系数达到了 0.94,说明它们随时间的变化非常一致,MODIS / AOD 资料可以比较准确地反映出我国东部近海大气气溶胶光学厚度的相对变化;数值上,从表 1 可以看出,MODIS / AOD 的值几乎总是高于船基太阳光度计的观测计算值,平均而言,前者是后者的 1.343 倍,反映在图 3 中,则是有 8 个点都在图中的对角线之上。在下文利用 MODIS / AOD 资料分析我国东部海域 2006 年春季气溶胶光学厚度的时空分布特征时,根据这里的平均比值 1.343 进行订正。

为了进一步分析 MODIS / AOD 与观测计算的

表 1 2006 年 4 月出海观测的 AOD 与 MODIS / AOD 的比较

Table 1 Comparison of the observational AOD and MODIS / AOD over Yellow and East China Seas in April, 2006

日期 时间 在图 1 中的位置标示符	17 12 35 P1	19 12 20 P2	20 13 05 P3	21 12 10 P4	21 13 45 P5	23 13 35 P6	24 12 40 P7	27 13 10 P8	29 12 55 P9	平均值
观测(500nm)	1.678	0.587	0.348	0.417	0.365	0.484	0.700	1.402	0.600	0.731
观测(650nm)	1.524	0.405	0.227	0.269	0.221	0.381	0.597	1.197	0.463	0.587
观测计算(550nm)	1.620	0.513	0.298	0.356	0.304	0.443	0.660	1.323	0.546	0.674
MODIS(550nm)	2.308	0.545	0.347	0.405	0.522	0.483	1.103	1.318	0.993	0.892
比值(MODIS / 观测计算)	1.424	1.062	1.166	1.139	1.717	1.090	1.670	0.996	1.818	1.343

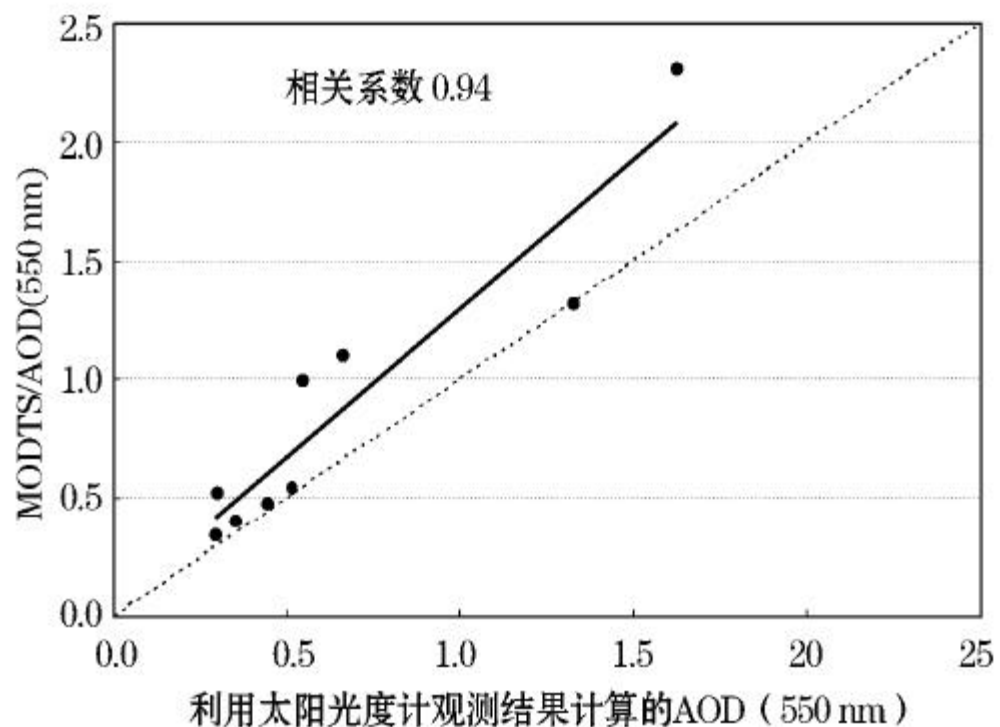


图 3 2006 年 4 月出海观测的 AOD 与 MODIS / AOD 的比较

Fig.3 Comparison of the observational AOD and MODIS / AOD over Yellow and East China Seas in April, 2006

AOD 存在差异的原因,根据经纬度将表 1 中 9 个点的位置在图 1 中标出。结合图 1 和表 1,可以将 9 个点大致分为 3 个区域进行分析:

(1) P1 和 P9,分别是起航和返航时的观测点,位于青岛近岸海域,两种 AOD 的比值都明显高于平均值,很可能是由于在近岸区域海水的污染比较严重,使得海面反射率难以准确估计,进而引起 MODIS / AOD 产生较大的误差。

(2) P2 ~P5,这 4 个观测点均位于北黄海区域,距离海水污染较重的渤海区域较远,其中 3 个点两种 AOD 的比值都明显低于平均值。

(3) P6 ~P8,这 3 个观测点均位于南黄海与东海的交界海域,离岸较远,其中 2 个点两种 AOD 的比值都明显低于平均值。这说明 MODIS / AOD 在我

国东部海洋区域产生误差的大小有着比较明显的地域性特征,即在近岸海域误差较大,而在离岸较远的海域则误差相对较小。

但另外还需要指出的是,在这9个观测点中有4个点的比值高于平均值,且分别分布在上述3个区域内,这说明使MODIS/AOD产生较大误差的原因是比较复杂的、多方面的,不仅仅只与距离海岸的远近有关,而且还可能与当时的天气条件等多种因素有关。

5 我国东部海域气溶胶光学厚度的时空分布特征及与沙尘天气的关系

根据有关统计,2006年春季3个月我国北方一

共发生了18次影响范围和强度不同的沙尘天气,卫星监测图像显示其中一部分经过远距离输送后到达了我国东部海域上空。这里利用订正后的MODIS/AOD(τ_{550})资料对2006年3~5月我国东部近海区域大气气溶胶光学厚度的时空分布特征进行具体的研究,并进一步分析其与发生在我国北方的沙尘天气之间的关系。研究的区域具体为 $31^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 和 $119^{\circ}\sim 127^{\circ}\text{E}$,包括了黄海和东海北部区域以及我国东部沿海的部分陆地。

图4是该区域2006年3~5月的日平均值随时间的变化曲线,其中没有数值的地方是因为该日在研究区域内MODIS/AOD的有效值(0~3)太少,不足以反映区域的平均值。从图中可以看出:

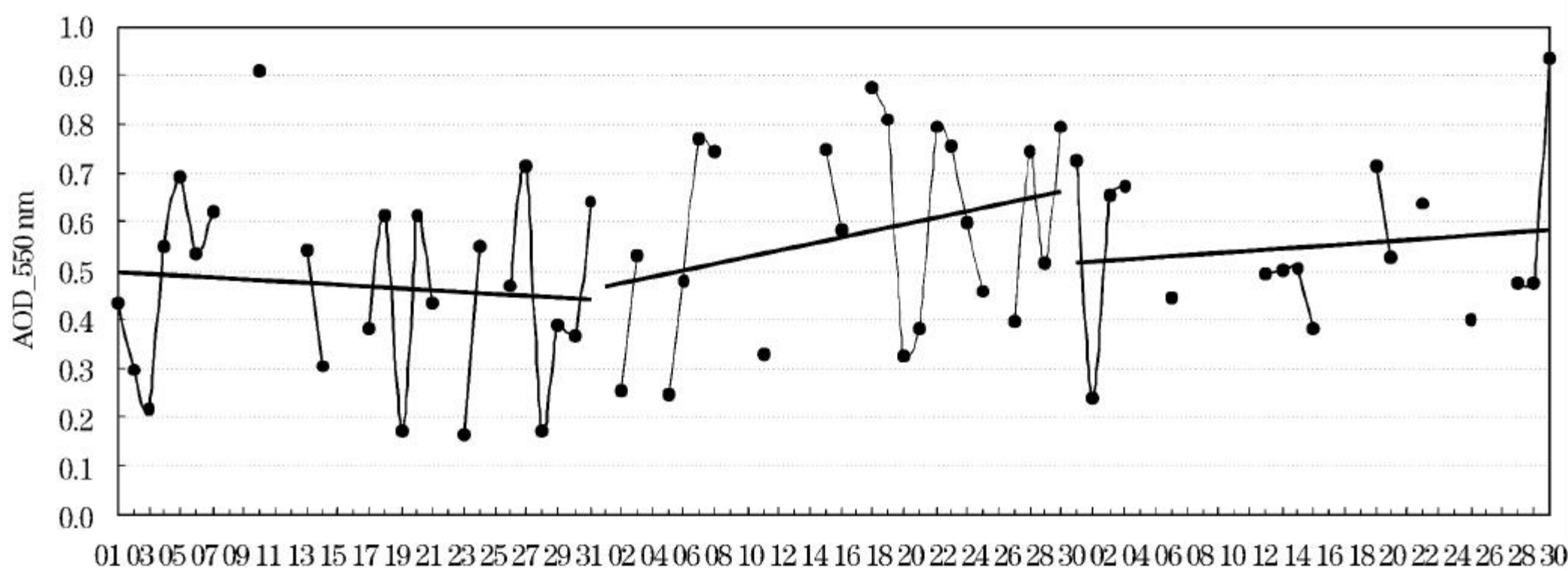


图4 2006年春季我国东部近海区域 τ_{550} 日平均值随时间的变化

Fig.4 Variation of τ_{550} over Eastern China Seas in Spring of 2006

(1) 总体而言, τ_{550} 在这3个月内随时间的分布并无明显规律性,波动频率很高,振幅较大,这与图2整个出海观测过程中 τ_{500} 的变化情况相同,同样可能是由于海上天气变化频繁,上空经常有云存在,降水也不时有发生,同时还可能有工业污染物、沙尘等陆源气溶胶的输入以及海盐气溶胶和水汽等多种时空变化较大的消光因素的存在所造成的;

(2) τ_{550} 在这3个月总的平均值为0.53,根据文献[14]的研究结果,在我国北方地区当 $\tau_{500} > 0.5$ 时,大气将明显混浊,由于通常情况下 τ_{550} 的值应略小于 τ_{500} ,因此这足以说明2006年春季我国东部近海区域的平均大气状况是相当混浊的,这很有可能是受到了期间发生在我国北方的沙尘天气的影响;

(3) 就月平均值而言,4月最大,3月最小,5月与4月比较接近,表2进一步给出了每个月不同分段数值的百分比,同时结合图2中关于AOD与天气状况的关系,可以看出,这3个月 τ_{550} 的值都主要

集中在0.2~0.6~1.0之间,说明期间我国东部海域的大气主要处于比较混浊的状态;这3个月0.0~0.2之间的较低值所占百分比都在8%以下,其中3月最多,5月最少,基本反映了每个月我国东部海域晴天无云也无浮尘天气所占的比例;4月和5月0.6~1.0~1.5之间的较高值所占百分比均比3月明显偏高,说明这两个月既有云又可能受浮尘影响的天气状况要多于3月份,这也是它们 τ_{550} 的平均值比3月份偏高的主要原因。

为了进一步分析这3个月AOD随时间变化的原因,根据有关文献的统计结果^[12,23,24],表3给出了2006年春季每个月发生在我国北方的沙尘天气的次数和强度,从中可以看出,其间发生在我国北方地区的沙尘天气以4月份次数最多,强度最强,其次是5月,而3月份发生的次数最少,只有5次,其中还有3次是强度不大的扬沙天气,这种时间分布特征与上述我国东部近海区域 τ_{550} 平均值随时间的变

化非常一致。二者之间这种良好的相关关系比较充分地说明了 2006 年春季我国东部海域的 AOD 与我国北方的沙尘天气密切相关,其随时间的变化很可能是由于期间每个月发生在我国北方的沙尘天气的强弱多寡和影响范围的不同所导致的。当然,这只是根据一部分数据资料进行的定性分析,要想得出二者之间定量性的结论,尚需对更多季节、更长时间序列进行更具体的统计分析。

表 2 2006 年春季我国东部近海区域 550 分段数值占总数值的百分比(%)

Table 2 Percent of subsection 550 numbers account for total 550 number over Eastern China Seas in Spring of 2006

月份	0.0 ~0.2	0.2 ~0.6	0.6 ~1.0	1.0 ~1.5	1.5 ~2.0	2.0 ~3.0
3 月	7.77	68.81	20.04	2.65	0.40	0.34
4 月	5.37	57.90	29.86	5.34	1.23	0.30
5 月	2.75	61.24	32.14	3.59	0.25	0.03

表 3 2006 年春季我国出现的沙尘天气次数

Table 3 Frequents of dusty weather occurred over China in Spring of 2006

月份	强沙尘暴	沙尘暴	扬沙	沙尘天气
3 月 ^[24]	2	0	3	5
4 月 ^[13]	3	2	2	7
5 月 ^[25]	0	4	2	6

图 5 给出了我国东部近海区域 2006 年 3 ~5 月 550 平均值的空间分布特征,从图中可以看出,在研究区域内 550 平均值的总体特征是自西北向东南逐渐减小,陆地明显比海洋大,这与我国北方的沙尘和沿海城市的工业气溶胶在西风带的作用下向东向南的输送路径是基本一致的,说明了二者之间密切的相关关系。就几个海区而言,渤海 550 的平均值大部分都在 0.6 以上,非常接近于陆地上的特征,在黄河入海口附近甚至比较集中地出现了 1.0 以上的高值,北黄海的值总体上大于南黄海,但是在南黄海以西,江苏省以东,32 ~34°N 之间的海面上空却出现了一个明显的高值区,其中 1.0 以上的值也是整个研究区域内出现最多的,其原因可能是由于该区域所相邻的陆地是我国经济比较发达的区域,经济的发展会引起较多的工业气溶胶的排放,在偏西风的作用下向东输送到海面上空,再加上这个季节沙尘可能的影响,从而使得该区域的气溶胶浓度较高,光学厚度较大。当然,这只是一种经验的猜测,更确

切的原因尚需进一步的分析判断。

6 结论与讨论

本文将船基观测资料与 MODIS /AOD 资料相结合,分析了 2006 年春季我国东部海域气溶胶光学度与我国北方沙尘天气的关系,主要得到以下结论:

(1) 我国东部海域的气溶胶光学厚度在晴天(背景天气)、有云和浮尘以及只有浮尘这三种典型的天气条件下的平均值分别约为 0.2、0.6 和 1.3 以上。

(2) MODIS /AOD 资料在随时间的变化趋势上与船基观测结果非常一致,但在数值上明显偏高,平均而言,前者大约是后者的 1.3 倍。

(3) MODIS /AOD 在我国东部海域的误差在近岸海域较大,而在离岸较远的海域较小,具有比较明显的地域特征;但造成误差较大的原因是比较复杂的,还可能与当时的天气条件有关。

(4) 2006 年春季我国东部海域 550 nm 的气溶胶光学厚度大部分时间都在 0.2 以上,平均值为 0.5,大气比较混浊;空间分布特征是自西北向东南逐渐减小,陆地明显比海洋大;其总体的时空变化与我国北方沙尘天气发生的强弱多寡密切相关。

由于各种客观条件的限制(海上观测的困难、遇上沙尘天气的机会少等),本文所能采用的船基有效观测资料非常有限,因此上述第 1 条结论主要是反映特定时间和特定区域内的情形,还不足以成为长期的、大范围内的一般性结论;关于 MODIS /AOD 在我国东部海域的误差,文中与观测资料的比较非常有限,只能反映一些基本的特征,而无法给出比较精确的数据上的订正,同时对于造成这种误差的可能原因也只能进行定性的分析,而无法给出量化的判断;而对于第 4 条结论,尚需在下一步的工作中,对我国东部海域春季的 MODIS /AOD 资料进行多年的统计分析,同时对比其它季节的情况,给出其与我国北方沙尘天气之间量化的经验关系。

致谢:本研究所采用的船基观测资料是在中国海洋大学东方红 2 号科考船上获得,中国科学院大气物理研究所的辛金元博士对太阳光度计进行了标定,并将其观测值转化为气溶胶光学厚度值,所用 MODIS /AOD 资料是从 NASA 的官方网站上下载,在此一并致谢!

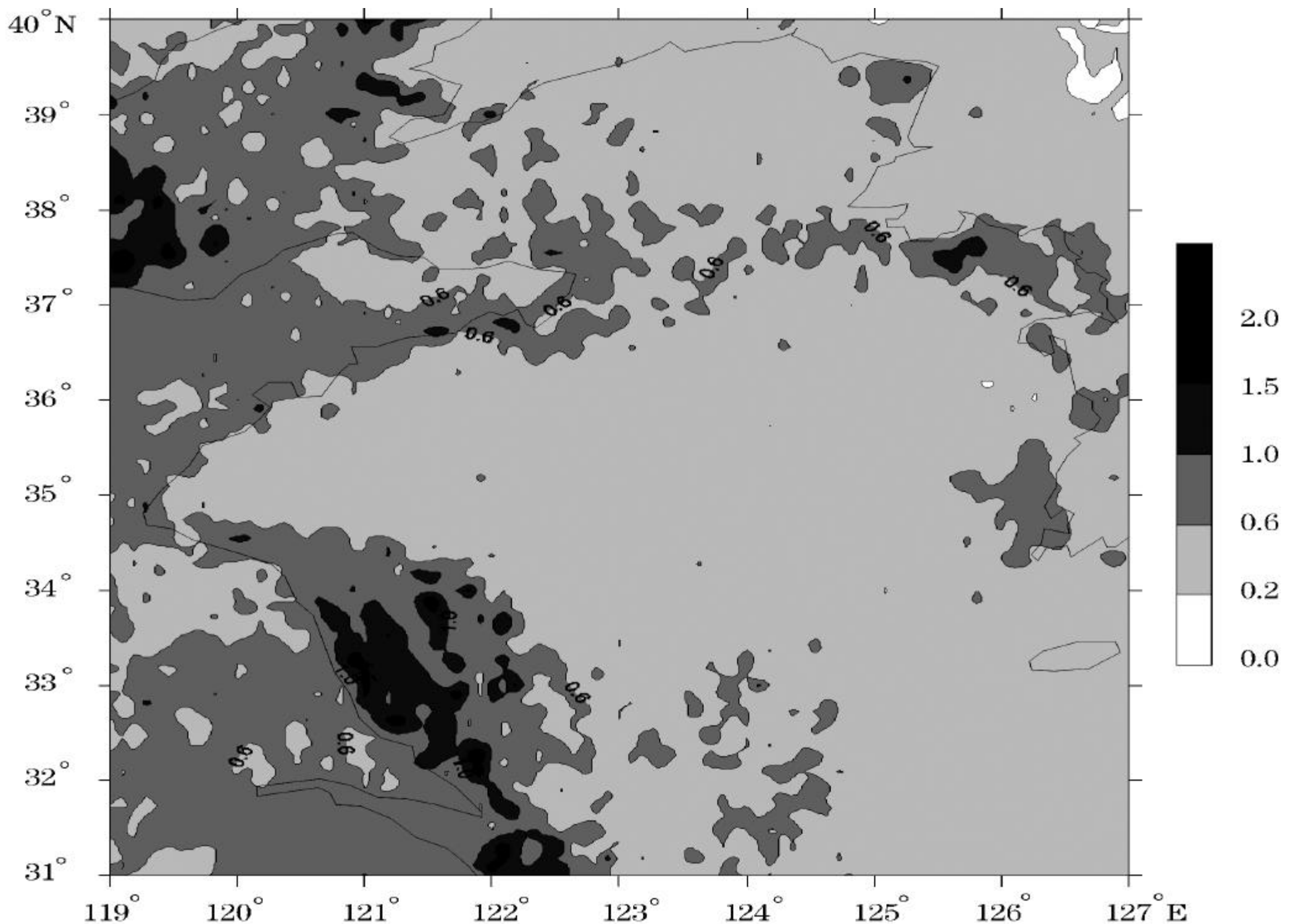


图5 我国东部近海区域 2006 年 3 ~5 月平均光学厚度(550 nm)的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of mean τ_{550} over Eastern China Seas during March to May in 2006

参考文献(References) :

- [1] Qian Yun, Fu Congbin, Wang Shuyu. Mineral dust and climate change[J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(4): 391-394. [钱云, 符淙斌, 王淑瑜. 沙尘气溶胶与气候变化[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 391-394.]
- [2] Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate[J]. *Science* 2005, 308: 5-9.
- [3] Shi Guangyu, Zhao Sixiong. Several scientific issues of studies on the dust storms[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* 2003, 27(4): 591-606. [石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. *大气科学*, 2003, 27(4): 591-606.]
- [4] Prospero J M, Uematsu M, Savoie D L, et al. Mineral aerosol transport to the Pacific Ocean[C]. Riley J P, et al, eds. *Chemical Oceanography*, Academic Press, 1989, 10: 188-218.
- [5] Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, et al. Trace elements in aerosol particles from Bermuda and Barbados: Concentrations, sources and relationships to aerosol sulfate[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry* 1992, 14(1/4): 439-457.
- [6] Huebert B J, Bates T, Russell P B, et al. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, No. D23, 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- [7] Mikami M, Shi G Y, Uno I, et al. Aeolian Dust experiment on Climate: An overview of Japan-China joint project ADEC[J]. *Global and Planetary Change* 2006, 52: 142-172.
- [8] Zhang Xiaoye. Aerosol over China and their climate effect[J]. *Advances in Earth Science* 2007, 22(1): 12-16. [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.]
- [9] 冯士? , 石广玉, 高会旺, 等. 上层海洋与低层大气研究的前沿科学问题[C]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [10] 石金辉, 高会旺, 石广玉. “上层海洋—低层大气生物地球化学与物理过程耦合研究”及其进展[C]. 冯士?, 石广玉, 高会旺, 等编著. 上层海洋与低层大气研究的前沿科学问题. 北京: 气象出版社, 2006: 194-205.
- [11] Xin Jinyuan, Wang Yuesi, Li Zhanqing, et al. Introduction and calibration of the Chinese sun hazemeter network[J]. *Environmental Science* 2006, 27(9): 1697-1702. [辛金元, 王跃思, 李占清, 等. 中国地区太阳分光辐射观测网的建立与仪器标定[J]. *环境科学*, 2006, 27(9): 1697-1702.]
- [12] 申彦波. 亚洲内陆沙尘气溶胶入海通量的数值模拟研究[R]. 北京: 中国科学院大气物理研究所博士后出站报告, 2007.
- [13] 蔡蓁宁. 北方风沙肆虐 南方雨水丰沛——2006年4月[J]. *气象*, 2006, 32(7): 121-125.

- [14] Zhao Wei, Tang Junwu, Gao Fei et al. Measurement and study of aerosol optical properties over the Huanghai Sea and the East China Sea in the spring [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 46-53. [赵巍, 唐军武, 高飞, 等. 黄海、东海上空春季气溶胶光学特性观测分析 [J]. *海洋学报*, 2005, 27(2): 46-53.]
- [15] Shen Yanbo, Shen Zhibao, Wang Wanfu. Atmospheric aerosol optical thickness and dusty weather in northern China in spring of 2001 [J]. *Plateau Meteorology* 2003, 22(2): 185-190. [申彦波, 沈志宝, 汪万福. 2001 年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气 [J]. *高原气象*, 2003, 22(2): 185-190.]
- [16] 申彦波, 石广玉. 亚洲内陆沙尘气溶胶入海通量的数值模拟研究 [C] // 冯士? , 石广玉, 高会旺, 等编著. 上层海洋与低层大气研究的前沿科学问题. 北京: 气象出版社, 2006: 93-99.
- [17] Mao Jietai, Li Chengcai, Zhang Junhua et al. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* 2002, 13: 127-135. [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与地面光度计遥感对比 [J]. *应用气象学报*, 2002, 13: 127-135.]
- [18] 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.
- [19] Chen Benqing, Yang Yaming. Validation of MODIS aerosol optical thickness in the Taiwan Strait and its circumjacent sea area [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(6): 171-176. [陈本清, 杨燕明. 台湾海峡及周边海区 MODIS 气溶胶光学厚度有效性验证 [J]. *海洋学报*, 2005, 27(6): 171-176.]
- [20] 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.
- [21] Remer L A, Kaufman Y J, Tanre D et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* 2005, 62: 947-973.
- [22] Kaufman Y J, Remer L A, Tanre D et al. A critical examination of the residual cloud contamination and diurnal sampling effects on MODIS estimates of aerosol over ocean [J]. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing* 2005, 43: 886-897.
- [23] ?ngstr m. The parameters of atmospheric turbidity [J]. *Tellus*, 1964, 16: 64-75.
- [24] 宋艳玲. 北方出现 5 次沙尘天气过程华北、西北旱情持续或发展——2006 年 3 月. *气象*, 2006, 32(6): 126-127.
- [25] 陈涛. 江南华南暴雨频繁 北方连遇沙尘天气——2006 年 5 月. *气象*, 2006, 32(8): 121-125.

Aerosol Optical Depth and Dusty Weather over Eastern China Seas in Spring of 2006

SHEN Yanbo^{1,2}, WANG Biao², Shi Guangyu²

(1. Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: Combining the ship-based observational data by sunphotometer with space-based MODIS/AOD data by satellite, the relationship between AOD and dusty weather over Eastern China Seas is studied in this paper. By investigation of 500nm AOD in different weather conditions, it is discovered that the mean AOD during clear day (background condition), cloudy and dusty condition, and only dusty weather are about 0.2, 0.6 and more than 1.3 respectively. By comparing the MODIS/AOD and ship-based observational data, it can be concluded that the variation of them with time are very consistent with each other, while the former is obviously larger than the latter magnitude. Using the revised MODIS/AOD data, the temporal and spatial distribution characteristics of AOD over Eastern China Seas are analyzed. By comparing these characteristics with dusty weather occurred in north China, it is found that the relationship of them is very close.

Key words: Eastern china seas; Aerosol optical depth; Dusty weather; MODIS data.