

# 厦门海域大气气溶胶光学厚度地基观测分析及卫星遥感检验

刘希<sup>1</sup>, 胡秀清<sup>2</sup>

1. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要:** 利用设立于厦门岛西南部沿海的气溶胶地基观测站点 2008 年 1 月 7 日至 2009 年 4 月 30 日的观测资料, 对厦门海域气溶胶光学厚度的每日逐时变化、逐日变化、逐月变化进行了分析研究, 并利用观测结果对 MODIS L2 级气溶胶光学厚度(AOT)产品进行检验。结果表明, 厦门海域气溶胶光学厚度每日逐时变化和逐月变化有一定的季节规律, 而逐日变化随气象条件的不同有很大差异。一年中气溶胶光学厚度月平均值呈现春秋双峰分布趋势, 4 月份最大, 超过 0.9, 空气较为混浊; 6 月份呈现谷值, AOT 小于 0.3, 空气相对清洁。夏季气溶胶主控粒子的粒径较大, 而其余各月份的波长指数在平均值 1.21 附近波动, 混浊系数年平均值为 0.25。利用该地基观测资料对 MODIS L2 级 AOD 产品进行检验, MODIS 反演的厦门海域气溶胶光学厚度逐月变化趋势和地基观测结果完全一致, 表明 MODIS 卫星遥感气溶胶光学厚度能比较好地反映厦门海域的气溶胶季节变化特征。

**关键词:** 气溶胶光学厚度; 日变化; 月变化

**中图分类号:** P732.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-5470(2011)04-0038-06

## Ground-based measurements of the aerosol optical thickness at Xiamen Sea and satellite remote sensing test

LIU Xi<sup>1</sup>, HU Xiu-qing<sup>2</sup>

1. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China; 2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

**Abstract:** Through the ground-based measurements of Aerosol Optical Thickness (AOT) at the Xiamen Sea from January 7, 2008 to April 30, 2009, we have obtained hourly variability, daily variability, and monthly variability of AOT. The results show that the hourly variability and monthly variability of AOT change regularly, while the daily variability of AOT changes a lot according to the weather condition. The values of AOT peak in spring and autumn. The average AOT in April is greater than 0.9 when the air is turbid, while the average AOT in June is less than 0.3 when the air is relative clean. The Angstrom parameter  $\alpha$  reaches its lowest value in June and fluctuates around 1.21 in other months. The annual-mean value of Angstrom parameter  $\beta$  is 0.25. The comparison of MODIS Level 2 AOD with these ground-based measurements shows that the monthly variability of AOT retrieved from MODIS is basically consistent with the one from the ground-based observation at the Xiamen Sea.

**Key words:** aerosol optical thickness; daily variability; monthly variability

大气气溶胶是悬浮在大气中, 粒径为 0.001—10 $\mu\text{m}$  的各种液态或固态的微小粒子, 包括烟、尘埃、沙粒和火山灰等, 是陆地-大气-海洋系统的重要组分。海洋上空的气溶胶粒子通过散射或吸收作用影响着海表的辐射收支平衡, 进而可能对海洋生物及生态环境产生一定的影响。此外, 气溶胶作为云滴的凝结核改变云的光学特性和生命期, 间接地影响地气系统的能量收支和水循环, 进而对全

球或区域气候造成影响。

为了解大气气溶胶光学特性及其时空变化特征, 科学家利用卫星遥感反演等手段对不同区域的气溶胶进行了大量的研究<sup>[1-11]</sup>。陈本清等<sup>[1]</sup>利用 2002—2004 年的 MODIS 气溶胶卫星遥感资料分析台湾海峡及周边海区气溶胶光学厚度的时空分布特征; 董海鹰等<sup>[2]</sup>反演了 2002 年 10—11 月中国近海气溶胶光学厚度。

收稿日期: 2009-11-30; 修订日期: 2010-07-05。孙淑杰编辑

基金项目: 国家海洋局基本科研业务费专项 (海三科 2008009); 国家高技术研究发展计划项目(2007AA12Z145)

作者简介: 刘希(1978—), 女, 福建省厦门市人, 硕士, 工程师, 从事环境影响评价工作。E-mail: xixijuanyun@163.com

近海海域是大气污染物从源地向大洋扩散的过渡带, 气溶胶类型由陆地源成分和海洋源成分混合组成, 构成较为复杂; 同时由于近海海域水体本底信号较强, 造成卫星的气溶胶反演算法在该区域产生较大的反演误差, 因此近海海域的气溶胶地基观测对于卫星反演气溶胶光学厚度的标定和验证极其重要。然而, 目前中国已建立的气溶胶地基观测站基本上为观测陆地气溶胶服务, 如多波段气溶胶观测网络 CAeroNet, 已有的 20 个观测站主要分布在中国的北方。中国生态研究网络大气科学分中心依托其 19 个生态观测站和 4 个城市观测点建成的中国典型区域太阳分光辐射观测网, 观测点也均位于陆地, 离岸较远。以美国宇航局 NASA 为首建立的全球气溶胶光学特性监测网络 AERONET, 在厦门海域周边的站点主要分布在台湾岛及广州、香港等地, 站点距离海洋都有一定距离, 且设置于楼群之间, 未必能真实反映近海大气气溶胶的情况。目前, 我国近海海域气溶胶的地基观测主要是搭载在黄海、东海的轮船航次上, 或在岛屿上设立临时观测点。刘毅等<sup>[3]</sup>利用中国近海 10 个航次的气溶胶观测资料, 研究了中国近海大气气溶胶的时间和地理分布特征。李正强等<sup>[4]</sup>利用太阳光度计对黄海海域的气溶胶光学厚度进行测量与研究。赵崴等<sup>[5]</sup>对黄海、东海上空春季气溶胶光学特性进行了观测分析。谭浩波等<sup>[6]</sup>对南海北部上空的气溶胶分布情况进行了分析研究, 但对东南部的台湾海峡海域气溶胶地基观测及研究尚未见报道。

为了解厦门海域的气溶胶光学特性及其随时间的变化规律, 本课题组于 2008 年 1 月 7 日起在厦门岛西南部近岸处设立气溶胶地基观测点。该观测数据的获取填补了台湾海峡西岸气溶胶地基观测数据的空白, 有助于更全面地了解我国近海海域气溶胶的时空分布。

## 1 仪器观测及数据处理

此次设立的气溶胶地基观测站位于厦门岛南部国家海洋局第三海洋研究所科研大楼楼顶, 经纬度为 118°4'59"E、24°25'59"N, 观测点海拔高度 38m, 离海岸距离仅约 20m。采用的观测仪器为美国 Solar Light 公司制造的手持太阳光度计 Microtops II, 仪器设置通道的滤光片中心波长为 380、500、870、936 和 1020nm。该仪器于 2007 年 9 月 28 日进行了出厂标定, 并于 2009 年 6 月在北京灵山与 Aeronet 基准传递过来的标准 CE318 太阳光度计进行了高山

比对标定。2009 年定标结果与出厂定标系数  $V_0$  比较, 仪器大气外界的  $V_0$  大约衰减了 10% 左右, 因此数据处理时采用了 2009 年 6 月的定标数据。

根据波格-朗伯-比尔定律, 基于 Microtops 各个通道的信号强度、气压、观测时间、地理位置计算气溶胶光学厚度 AOT(aerosol optical thickness), 计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$\text{AOT}_{\lambda} = \frac{\ln V_{0\lambda} - \ln(V_{\lambda} \times d)}{M} - \tau_{R\lambda} \times \frac{P}{P_0}$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $V_{0\lambda}$  为该波长的定标系数,  $V_{\lambda}$  为信号强度,  $d$  为日地距离校正因子,  $M$  为大气光学质量,  $\tau_{R\lambda}$  为标准气压下的大气分子瑞利散射光学厚度,  $P$  为实际地面气压,  $P_0$  为标准气压 1013.25mbar。

本研究采取的观测时间为夏季每日 8:00 至 17:30, 其余季节每日 8:30 至 17:00, 上述时间段内每逢正点、半点进行一组观测, 每组观测间隔为 0.5h, 每组观测采用 5 次连续重复测量, 并记录下当时的天气状况和云状。晴天开展观测, 阴天和雨天停止观测, 当有薄云、霾等天气现象时, 若目视观察没有直接遮蔽太阳则正常观测。每天观测试验前利用 GPS 进行一次仪器时间校准, 时间误差确保小于 2s。

由于观测不是在完全晴空无云天气下进行, 因此在分析气溶胶光学厚度特征时, 还必须进行有云时的数据剔除。当有薄云时, 气溶胶光学厚度随时在变化, 故每组观测获取的 5 次测值波动较大, 且在有云的天气里, 同一天不同组观测的波动值也较大, 因此可通过计算每一组观测的 5 次测值均方差及同一天的不同组观测均方差, 剔除有云时的观测数据。当每日的无云观测组大于 8 时, 认为该日的数据有效。经统计, 截止 2009 年 4 月 30 日, 各月份的有效观测天数见表 1。

表 1 2008—2009 年各月份太阳光度计观测有效天数  
Tab. 1 Number of observation days of sun photometer from 2008 to 2009

年份	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2008 年	2	4	15	9	11	4	17	11	9	6	11	12
2009 年	13	7	6	10	空白	空白	空白	空白	空白	空白	空白	空白

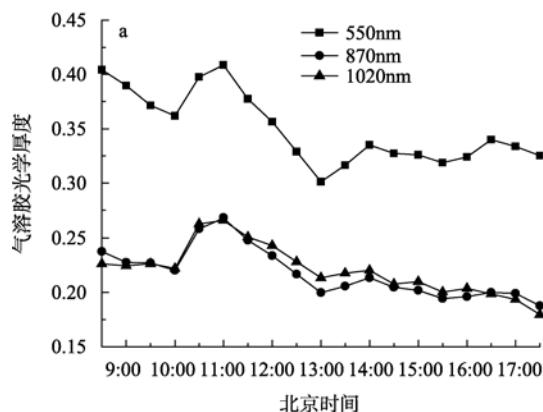
## 2 厦门海域大气气溶胶地基观测分析

### 2.1 不同波段气溶胶光学厚度变化研究

通过对观测数据的处理分析可知, 不同波段气溶胶光学厚度的变化趋势大体一致。因波长越短, 气溶胶的消光能力越强, 且在不同波段气溶胶光学

厚度的变化与其理化性质有一定的关联, 因此, 不同波段气溶胶光学厚度虽变化趋势大体一致, 但变化幅度略有差别。

图 1 显示了两天的气溶胶光学厚度观测结果。2008 年 5 月 12 日, 870nm 和 1020nm 的光学厚度在 14 时(北京时间)后逐渐减小, 而 500nm 的光学厚度



则呈略微波动变化。2008 年 9 月 8 日, 不同波段的气溶胶光学厚度在同一天随时间的变化趋势基本一致, 但 500nm 波段气溶胶光学厚度出现峰值的时间与 870nm 和 1020nm 稍有不同。500nm 的光学厚度最大值出现在 15 时, 而 870nm 和 1020nm 的光学厚度最大值出现在 13 时。

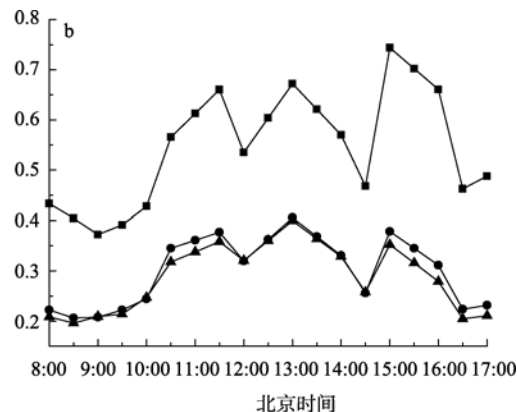


图 1 不同波段气溶胶光学厚度逐时变化图

a. 2008 年 5 月 12 日; b. 2008 年 9 月 8 日

Fig. 1 Hourly variability of aerosol optical thickness at 500, 870, and 1020 nm

## 2.2 气溶胶光学厚度的逐时变化

将 16 个月的气溶胶观测数据按月份进行每日逐时变化分析, 分析可得厦门海域气溶胶光学厚度的日变化规律。选取天气状况较为稳定, 全天无云的日子作为典型日, 不同月份典型日气溶胶光学厚度的逐时变化见图 2。10 月份至次年 1 月份, 气溶胶光学厚度一天中随时间变化基本呈逐渐上升趋势, 15 时前基本稳定, 而 15 时后升幅明显增大。除 4 月份外, 3 至 8 月份气溶胶光学厚度日变化较小, 上下午气溶胶光学厚度基本不变。其他个别月份如 4 月和 9 月, 气溶胶光学厚度随时间变化较大, 这可能与当日的天气过程尤其是风力输送变化有关。

## 2.3 与天气过程有关的气溶胶光学厚度的逐日变化

2008 年 7 月份有 3 次降雨过程, 分别为 7 日至 10 日、18 日至 20 日、28 日至 31 日。图 3 为 7 月份气溶胶光学厚度逐日变化图。7 日至 10 日的降雨过程本应对气溶胶粒子有所清除, 但因 11 日厦门地区地面为低压, 空气湿度较大, 水汽与气溶胶粒子相互作用后导致大气的消光能力有所增加, 加上有轻雾, 使得 11 日的气溶胶光学厚度非但没有下降, 反而跃升至 0.66。这与赵威等<sup>[5]</sup>所提出的当海区上空霾层较厚时测量得到的气溶胶光学厚度明显增

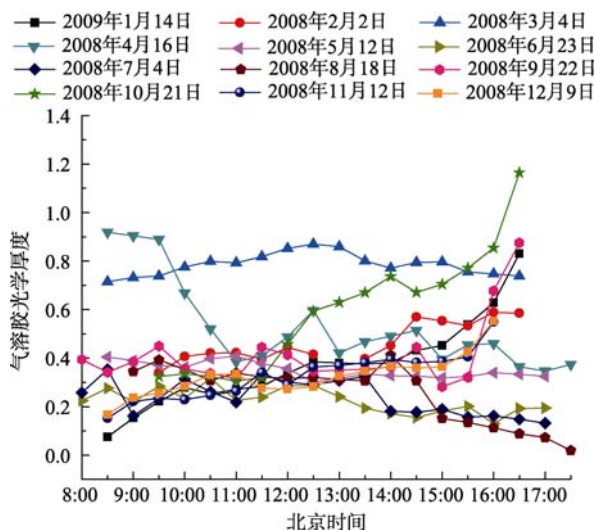


图 2 不同月份典型日 500nm 处气溶胶光学厚度逐时变化图

Fig. 2 Hourly variation of aerosol optical thickness of typical days in different months

大、最大接近 0.8 基本一致。11 日后气溶胶光学厚度有所下降, 15 日厦门地区位于副高底部, 由图 4 的 850hPa 天气形势图可知, 厦门海域受偏南气流控制, 有海盐粒子注入, 同时水汽量增加, 气溶胶光学厚度又有所上升。17 日厦门位于台风北侧, 受低层空气辐合影响, 空气密度加大, 使垂直气溶胶光学厚度继续上升。降雨过程结束后, 随着天气转晴,

气溶胶光学厚度回落。25 日后随着下一轮降雨天气系统的形成, 空气中水汽量增加, 气溶胶光学厚度明显跃升。

由此可见, 厦门海域气溶胶光学厚度受到一定的气象条件的影响, 特别是风速风向和大气中的水汽量。

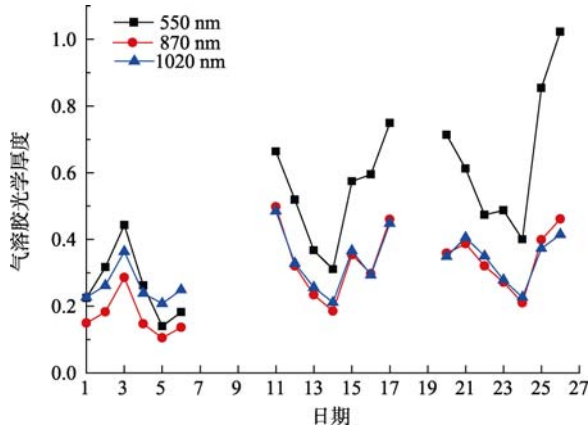


图 3 2008 年 7 月气溶胶光学厚度逐日变化图

Fig. 3 Daily variation of aerosol optical thickness in July 2008

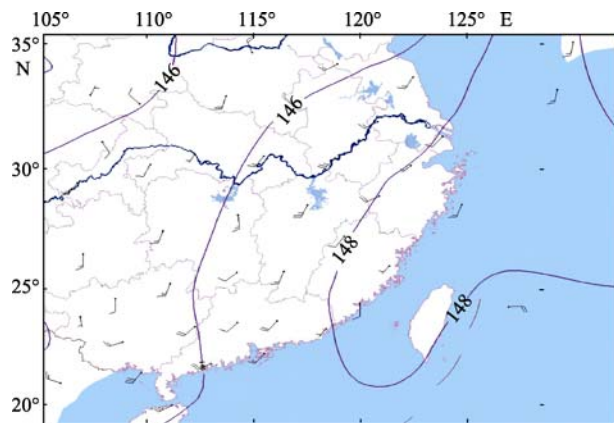


图 4 2008 年 7 月 15 日 08 时 850hPa 天气形势图

Fig. 4 Weather pattern at 850 hPa at 0000 UTC on July 15, 2008

#### 2.4 气溶胶光学厚度的逐月变化

我们把有效观测天的气溶胶光学厚度进行按月平均, 结果见图 5。结果显示厦门海域气溶胶光学厚度一年中月平均值呈现春秋双峰变化趋势, 4 月份最大, 超过 0.9, 空气较为混浊; 6 月份呈现谷值, AOT 小于 0.3, 空气相对清洁。这与陈本清等<sup>[1]</sup>提出的 2002—2004 年台湾海峡及周边海区气溶胶光学厚度的逐月变化呈现出双峰(春季月份和秋季月份)和一谷(夏季月份)的特征相一致。500nm 气溶胶光学厚度的变化随气溶胶理化特征的变化很敏感, 而在 870nm 和 1020nm, 其变化趋势虽和 500nm 基本

一致, 但较为平缓。

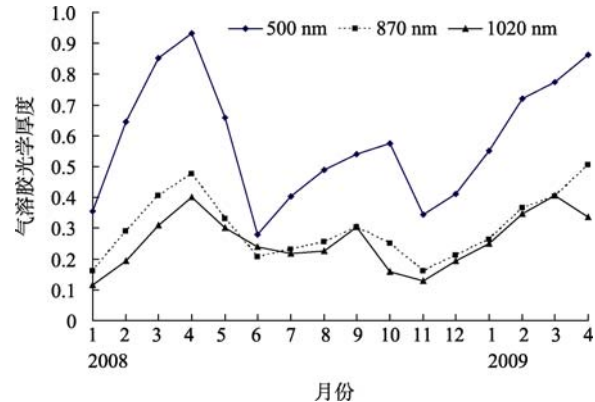


图 5 2008 年 1 月至 2009 年 4 月气溶胶光学厚度逐月变化图

Fig. 5 Monthly variability of aerosol optical thickness from January 2008 to April 2009

气溶胶光学厚度的波长变化反映气溶胶粒子信息, Angstrom 指出气溶胶光学厚度可表示为:  $\tau(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}$ , 式中  $\beta$  为 Angstrom 混浊系数, 它和气溶胶粒子总数、折射指数和谱分布等有关;  $\alpha$  为波长指数, 其数值与气溶胶平均半径有关, 通常  $0 < \alpha < 2$ , 较小的  $\alpha$  代表较大粒径的气溶胶粒子为主控粒子, 与此相反, 较大的  $\alpha$  代表较小粒径的气溶胶粒子为主控粒子<sup>[13]</sup>。参数  $\alpha$  和  $\beta$  可通过太阳光度计测量的两个不同波长处的光学厚度推算得到。

本文利用 500nm 和 870nm 的气溶胶光学厚度计算 Angstrom 指数。图 6 为 Angstrom 波长指数  $\alpha$  和混浊系数  $\beta$  逐月变化图。波长指数  $\alpha$  在 2008 年 6 月份出现最低值 0.70, 16 个月的平均值为 1.21, 与谭浩强等<sup>[6]</sup>提出的 Angstrom 波长指数在大陆沿海岸域平均约为 1.3 相一致。总体而言, 夏季的波长指数较小, 说明夏季气溶胶主控粒子的粒径较大。混浊

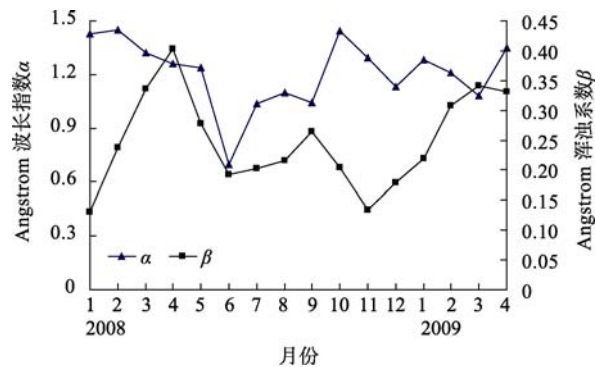


图 6 2008 年 1 月至 2009 年 4 月气溶胶 Angstrom 波长指数  $\alpha$  和混浊系数  $\beta$  逐月变化图

Fig. 6 Monthly variability of Angstrom parameter  $\alpha$  and  $\beta$  from January 2008 to April 2009



系数  $\beta$  逐月变化趋势和气溶胶光学厚度基本一致, 全部 16 个月的平均值为 0.25, 在 2008 年 11 月出现最低值 0.13。总体而言, 厦门海域的空气较为混浊。

### 3 卫星遥感产品检验

为获取大范围气溶胶光学厚度空间变化, 卫星遥感是目前最有效的手段。MODIS L2 级气溶胶光学厚度产品(MOD04)的反演算法为多通道反射率法, 空间分辨率  $10\text{km} \times 10\text{km}$ 。我们采用下午过境 AQUA 星的 MODIS 卫星遥感反演产品与地基观测进行对比。地基数据采用 12:30 至 14:30 期间的气溶胶光学厚度平均值, MODIS 卫星反演产品取自厦门周边 30km 范围内数据的平均, 地基观测的 AOT 值根据 Angstrom 公式推算至 550nm 波长处, 卫星遥感与地基观测比较散点图见图 7。全部数据点相关系数 0.9249, 两者的均方根偏差(RMSE)为 0.16。在气溶胶光学厚度较小值范围( $<0.2$ )地基观测值比卫星反演值明显偏高, 但两者相关性较好。

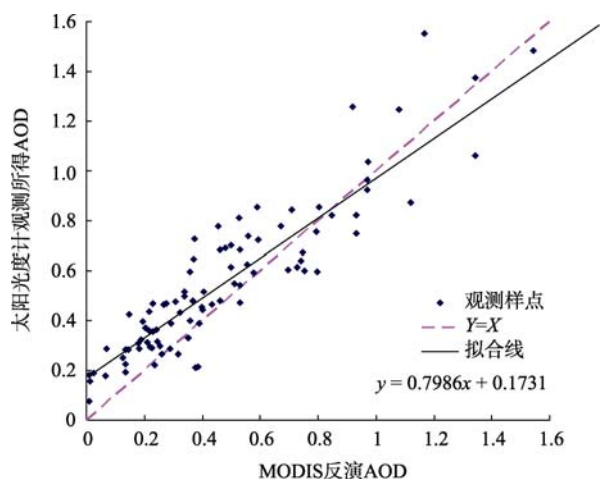


图 7 550nm 处地基观测与 MODIS 气溶胶光学厚度对比散点图

Fig. 7 Comparison of AOT between ground-based observations and MODIS Level 2 products

为了进一步检验卫星遥感气溶胶光学厚度在厦门海域季节变化趋势是否合理, 滤除随机误差, 将卫星遥感和地基观测的数据进行月平均比较。图 8 为中国东南部及沿海地区 2008 年 4 月气溶胶光学厚度月平均值, 图中显示了台湾海峡两岸气溶胶分布, 厦门区域是该地区非常明显大值区。取卫星遥感气溶胶产品的  $3 \times 3$  格点与地基观测的月平均数据进行比较, 见图 9。

图 9 中显示 MODIS 反演的厦门地区的气溶胶光学厚度逐月变化趋势和地基观测结果完全一致,

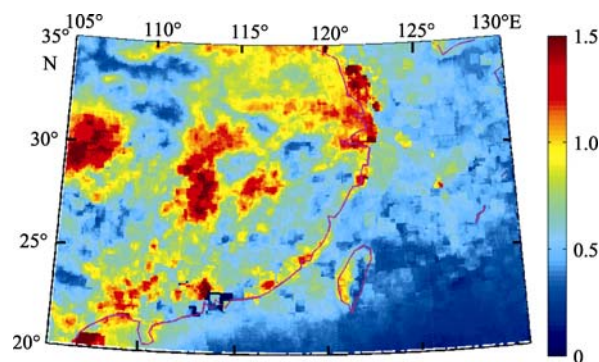


图 8 2008 年 4 月 MODIS 反演气溶胶光学厚度月平均图

Fig. 8 Monthly averaged aerosol optical thickness obtained by MODIS Level 2 products in April 2008

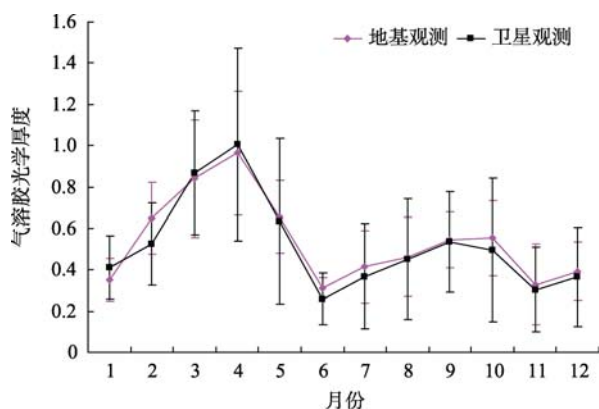


图 9 2008 年 550nm 处 MODIS 反演气溶胶光学厚度与地基观测月平均值的比较

Fig. 9 Comparison of monthly averaged aerosol optical thickness from MODIS Level 2 products and ground-based observations in 2008

MODIS 卫星遥感气溶胶光学厚度比较好地反映了厦门海域的季节变化特征。MODIS 反演的光学厚度总体上比地基观测值稍小, 产生偏差的原因主要如下。

1) 两者的观测时段不完全相同。AQUA 星每日过境时间为下午 1:30, 而地基观测时间为每半小时观测一次。

2) 太阳光度计的观测更代表局地性, 而卫星观测代表的是  $10\text{km} \times 10\text{km}$  的平均, 这种差异可能是由于气溶胶在小尺度上空间和时间的局地变化引起的。

3) 太阳光度计观测过程中, 太阳直射路径中是否有云是凭观测人员的肉眼来判断, 微量卷云的影响将造成气溶胶光学厚度的较大误差, 而 MODIS 所得的 level 2 产品是建立在 250m 和 500m 分辨率多通道的晴空、云量识别算法的基础上。

4) MODIS 反演算法本身存在一定的误差, 特别是气溶胶模型假定和推算误差导致气溶胶光学厚度

反演的绝对精度。

#### 4 结论

本文利用设立于厦门岛西南部沿海的气溶胶地基观测站点 2008 年 1 月 7 日至 2009 年 4 月 30 日的观测资料进行分析。结果表明, 厦门海域气溶胶光学厚度不同通道变化趋势基本一致。气溶胶光学厚度每日逐时变化有一定的季节规律, 而逐日变化随气象条件的不同有很大差异。一年中月平均值呈现春秋季双峰分布趋势, 春季的 4 月和秋季 10 月气溶胶光学厚度月平均值呈现峰值, 6 月和 11 月呈现谷

值。从 Angstrom 波长指数  $\alpha$  可知, 夏季气溶胶主控粒子的粒径较大, 而其余各月份的波长指数在平均值 1.21 附近波动。混浊系数  $\beta$  基本维持在 0.2 以上, 平均值为 0.25, 说明厦门海域的空气总体而言较为混浊。利用该地基观测资料对 MODIS L2 级 AOD 产品进行检验, 二者的相关性很好, 但在气溶胶低值区间( $<0.2$ )卫星遥感比地基观测值偏小, MODIS 反演的厦门海域气溶胶光学厚度逐月变化趋势和地基观测结果完全一致, 表明 MODIS 卫星遥感气溶胶光学厚度能比较好地反映厦门海域的气溶胶季节变化特征。

#### 参考文献

- [1] 陈本清, 杨燕明. 台湾海峡及周边海区气溶胶时空分布特征的遥感分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(12): 2597-2604.
- [2] 董海鹰, 刘毅, 管兆勇. MODIS 遥感中国近海气溶胶光学厚度的检验分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 336-337.
- [3] 刘毅, 周明煜. 中国近海大气气溶胶的时间和地理分布特征[J]. 海洋学报, 1999, 21(1): 32-40.
- [4] 李正强, 赵凤生, 赵威等. 黄海水域气溶胶光学厚度测量研究[J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 635-640.
- [5] 赵威, 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.
- [6] 谭浩波, 吴兑, 毕雪岩. 黄海北部气溶胶光学厚度观测研究[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(5): 21-25.
- [7] 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 201-208.
- [8] 刘玉杰, 牛生杰, 郑有飞. 用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 615-622.
- [9] 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.
- [10] 王跃思, 辛金元, 李占清, 等. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观测(2004-08—2004-12)[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1703-1711.
- [11] 吴兑. 华南气溶胶研究的回顾与展望[J]. 热带气象学报, 2003, 19 (增刊): 145-150.
- [12] User's Guide Version 5.5 for MICROTOS [M]. Solar Light Company, Inc., 2003: 12-14.
- [13] 尹宏. 大气辐射学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 142-145.