

文章编号: 1004-4965 (2008) 02-0205-04

南海北部海域气溶胶光学厚度研究

刘大召^{1,2}, 田礼乔³, 杨锦坤¹, 陈楚群¹

(1. 中科院南海海洋研究所热带环境与动力重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 广东海洋大学信息学院, 广东 湛江 524088; 3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 气溶胶光学厚度是大气校正所需要的重要参数。利用 2006 年 9 月 7~30 日中科院南海海洋研究所公开航次的多波段太阳光度计资料, 得到了南海北部海域的气溶胶光学厚度。分析结果表明, 南海北部海域气溶胶光学厚度在一天内的变化非常明显, 最小值可达 0.1 (870 nm), 最大值为 0.9 (440 nm), 而日平均气溶胶光学厚度在 0.2~0.6 之间。结合同步观测气象数据, 发现从陆地方向吹来的风, 当风速达 4 m/s, 对气溶胶的光学厚度有非常明显的影响, 而从大洋方向吹来的风, 对气溶胶的光学厚度影响不明显。

关 键 词: 南海; 气溶胶光学厚度; 太阳光度计

中图分类号: P426.5.1

文献标识码: A

1 引 言

气溶胶粒子是悬浮在大气中的直径 $10^{-3} \sim 10^1 \mu\text{m}$ 固体或液体粒子, 其质量仅占整个大气质量的十亿分之一。但其对大气辐射传输有重要的影响。大气中的气溶胶粒子的自然来源主要是土壤、海洋、火山及生物圈等^[1]。由于气溶胶和大气分子的散射降低了仪器探测的空间分辨率^[2], 故对卫星遥感数据, 特别是海洋水色卫星遥感数据必须进行气溶胶和大气分子散射效应的修正, 研究大气气溶胶特性是海洋水色遥感数据大气校正的基础工作, 利用太阳辐射计测量气溶胶光学厚度是研究气溶胶的主要手段。

目前, 对气溶胶光学厚度已有不少的观测研究工作。赵巍等分析了黄海、东海海域的气溶胶的光学特性, 指出在无云的条件下, 黄海、东海海域的气溶胶光学厚度在 0.2~0.4 之间^[2]。麻金继等在已知厦门海域气溶胶粒子谱分布的基础上, 用 MIE 散射理论计算了厦门海域气溶胶粒子的散射截面、吸收截面及消光截面等^[3]。邱明燕等利用太阳光度计资料和同期的气象数据, 分析了不同气象条件对青岛地区气溶胶光学特性的影响^[4]。以上的研究工作大多是针对内陆和黄海、东海海域的, 对南海海域的气溶胶的研究成果还比较少。

2 观测仪器和资料

本次试验中采用的仪器是美国 Solar Light 公司的手

持太阳光度计 Microtops II, 最小视场角为 2.5 度, 5 个波段的中心波长分别位于 440、490、550、750、870 nm, 滤光片的半波宽度为 10 nm。由于受两次台风的影响, 本航次只获得 12 天晴天的数据, 每天测量多组数据, 对每组数据至少测量 20 次以上, 共获得了 72 组数据。本文采用的气象数据包括风速、风向、相对湿度和站位的坐标数据由本航次的水文小组提供。图 1 是中科院南海海洋研究所 2006 年南海北部开放航次的站位示意图。

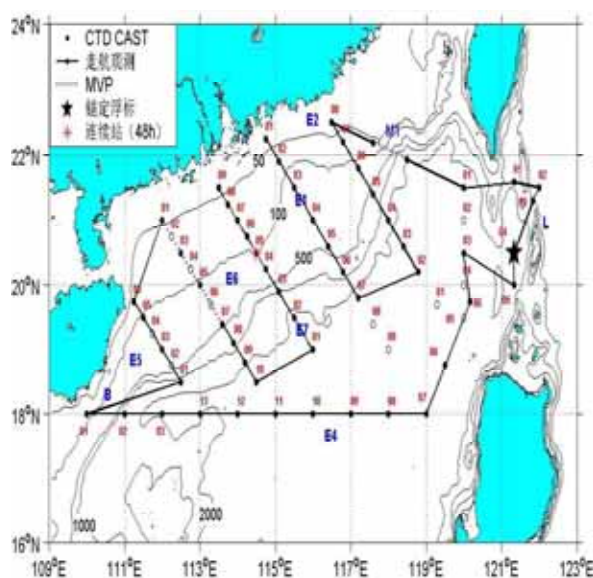


图1 2006 年南海北部开放航次站位示意图

收稿日期: 2006-10-26; 修订日期: 2007-05-09

基金项目: 国家自然科学基金 (40676094) “激光雷达辅助的海岸带 II 类水体水色遥感大气校正研究” 资助

作者简介: 刘大召, 男, 河南人, 中科院南海海洋研究所博士研究生, 主要研究方向为大气校正及水色要素反演。E-mail: llddz@163.com

3 计算方法

3.1 基本原理

考虑到水汽分子对红外辐射的强烈吸收, Microtops II 选取的用于测量气溶胶光学厚度的 5 个波段的中心波长分别位于 440、490、550、750、870 nm。在这些波段对太阳辐射造成衰减的主要因子是大气分子散射、臭氧吸收以及大气气溶胶的散射。

由 Beer 定律, 在地面上接收到的单色太阳直接辐照度仪器的响应值可以表示为^[5]

$$U(\lambda) = U_0(\lambda)(R_m/R)^2 \exp[-m\tau(\lambda)] = U_0(\lambda)\alpha \exp[-m(\tau_m(\lambda) + \tau_{o_3}(\lambda) + \tau_a(\lambda))] \quad (1)$$

式中 $U_0(\lambda)$ 为与大气外层的太阳辐照辐照度相对应的仪器响应电压, 即仪器的标定常数; R_m 为日地平均距离, R 为实际日地距离; m 为大气质量数, τ_m 为大气瑞利散射光学厚度; τ_{o_3} 为臭氧吸收光学厚度; τ_a 为大气气溶胶光学厚度。 τ_m 由公式 (3) 计算得到^[4]

$$\tau_m(\lambda) = \frac{p}{p_0} \times 0.00864\lambda^{-(3.916+0.074\lambda+0.05\lambda^{-1})} \quad (2)$$

式中 p 为地面气压, 由 Microtops II 内置的感应器同步测得, $p_0=1013.25$ hPa 为标准大气压。

臭氧对紫外区的不同波段的吸收能力不同, 波长越短吸收能力越强, 研究表明, 大气柱臭氧含量与紫外的不同波段的辐射比值成一定的比例关系, Microtops II 根据这一关系采用三波段法来测量大气中臭氧, 三个波段的中心波长位于 300、305.5、312.5 nm, 由第一波段大气光学厚度和第二波段的大气光学厚度的比值确定大气中臭氧的含量, 而由第二和第三波段的比值进行校正, 详细内容见文献[6]。不同波段的吸收系数在仪器定标的时候确定。臭氧的光学厚度可以由式 (3) 计算得到^[2]

$$\tau_{o_3} = c^k / 1000 \quad (3)$$

式中 c 是大气中臭氧含量, 可由光度计直接测量, k 为臭氧的吸收系数, 为仪器的定标常数。

已知仪器的标定常数 $U_0(\lambda)$, 由式 (1)、(2)、(3) 即可确定气溶胶的光学厚度。

3.2 Ångström 浑浊度与 Ångström 波长指数的计算

气溶胶光学厚度 $\tau_{a(\lambda)}$ 与波长 λ 之间存在 $\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$ 的关系。其中 α 为 Ångström 波长指数, 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, 当粒子尺度接近于大气分子时, α 接近于 4; β 为 Ångström 浑浊度, β 实际上是波长为 1 μm 处大气柱的气溶胶光学厚度。要计算不同波长的气溶胶光学厚度关键是确定系数 α 和 β , 利用已知通道的气溶胶光学厚度的值即可拟合出 α 和 β 的值, 根据公式即可确定不同波长的气溶胶光学厚度。

4 气溶胶光学厚度分析

4.1 气溶胶光学厚度的日变化

图 2 是三亚湾口实验站 2006 年 10 月 14 日气溶胶光学厚度随时间的变化曲线, 可以看出该站点单日内 10~15 时气溶胶的数值变化非常明显。以 870 nm 波段为例, 11 时左右气溶胶光学厚度的值最小为 0.132, 11 时后气溶胶的光学厚度逐渐增大, 13:00 时左右达到最大值为 0.247, 而后光学厚度的值又有所下降, 全天平均光学厚度的均值为 0.189。分析其它站位的数据, 发现几乎所有站位的气溶胶的光学厚度的值日变化都非常明显, 并且大多数站的数据与图 2 的变化趋势类似, 呈波动变化, 一些站位的曲线还出现了多个波峰波谷。870 nm 波段最小值可达 0.1, 最大值可达 0.6。这说明南海上空大气变化较快, 气溶胶光学厚度的值变化比较剧烈。

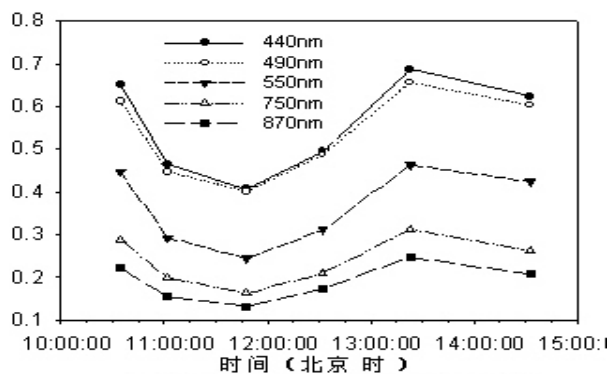


图 2 2006 年 10 月 14 日气溶胶光学厚度随时间的变化

4.2 日平均光学厚度

图 3 给出本航次 2006 年 9 月 9~27 日, 共 12 天日平均光学厚度随波长的变化关系。可以看出南海北部海域的气溶胶日平均光学厚度位于 0.2~0.6 之间, 只有 2006 年 9 月 9、14 日的光学厚度明显高于这个范围, 27 日数值则偏低。结合原始气象数据发现, 9 日云量较多, 相对温度高达 85%, 只在 10 时左右测得一组有效数据, 此后云遮住了太阳, 测量被迫中断, 该天的测量数据可能受到云的影响, 所以偏大。14 日进行第一组数据测量时, 风速为 1.2 m/s, 下午 2:30 时左右风速达 8 m/s, 此后云遮住了太阳, 测量中断, 可以认为该天的数据受到风的影响而偏大。将 27 日的实测数据与原始数据进行仔细的对比分析发现, 27 日只有 8:30~10:20 时的三组有效数据, 此后由于看不到太阳而测量中断, 三组数据分别在 e801、e802 站位停船时测量及从 e801 到 e802 站位行船时测量, 测量的站位位于南海中部。由于只有三组数据, 所以只能反映测量时段的气溶胶光学厚度的情况, 而不能代表当天的日平均光学厚度。总体而言, 日平均光学厚度较集中在 0.2~0.6 之间, 日平均光学厚度随波长的增加而减小。

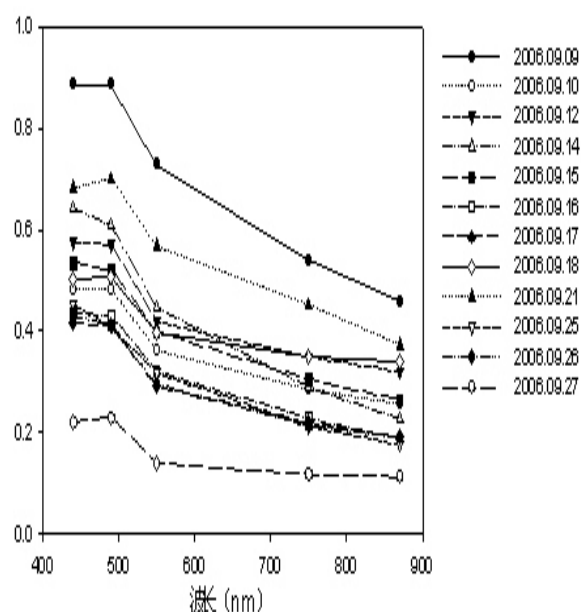


图3 2006年9月9~27日平均光学厚度随波长的变化

4.3 风速对气溶胶光学厚度的影响

本航次受到两次台风的影响。我们选取风速有明显变化的14日和17日进行分析。数据处理中用到的风速是测量光学厚度时测到的瞬时风速。图4是14日三亚湾口站位气溶胶光学厚度,图5是17日测得的e409、e410及e411的气溶胶光学厚。可看出图4中气溶胶的光学厚度与风速有较密切关系,在风速较低时($<3\text{ m/s}$),光学厚度变化不明显,随着风速的增大,气溶胶光学厚度呈上升趋势,风速越大,上升的趋势越明显,风速 $\geq 8\text{ m/s}$ 时,440 nm波段的光学厚度达0.8。相比较而言,图5中的光学厚度与风速的变化没有明显的关系,随着风速的增大,有些波段的气溶胶光学厚度甚至出现了降低的现象。结合当时的原始记录,发现14日的风向为北偏向东 $60\sim 80$ 度之间,观测的站位在三亚湾口,风正好从海南岛方向吹来,较多陆源的沙尘、污染物等物质被输送到观测站的上空,从而引起气溶胶浓度分布的变化,导致光学厚度增大。17日的观测站e409位于南海的中部地区,根据当时的气象条件,17日的风向为西偏南 $0\sim 45$ 度之间,即风从大洋上空吹来,尽管风速较大,但海洋上空空气相对较纯净,所以对气溶胶光学厚度的影响不是很明显。利用14日、17日的光学厚度,根据Ångström公式反演这两天的浑浊度分别为0.327、0.149。也说明14日风向观测点上空输送了较多的陆源的物质,改变了气溶胶的浓度分布,影响了气溶胶的光学厚度。对其它站点的数据分析也说明了这一点,而当风从大洋吹过来时,对观测点的气溶胶的光学厚度影响较小,各波段的曲线与图5类似,没有明显的规律,风从大陆吹过来,风速较大($>4\text{ m/s}$)时,对近岸站点的气溶胶光学厚度有较明显的影响。

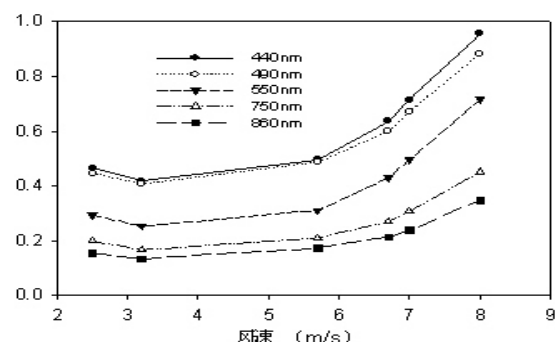


图4 14日三亚湾口站位气溶胶光学厚度

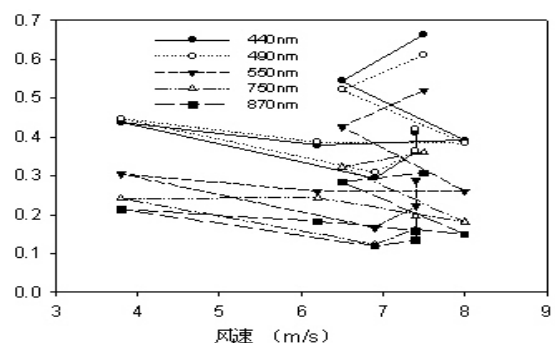


图5 17日测得e409、e410及e411的气溶胶光学厚

5 误差分析

根据误差的来源分为：定标误差、仪器固有误差、测量误差，下面分别论述。

光度计的定标关键是大气的稳定性,对天气条件要求严格,在比较洁净的大气条件下,定标结果较好。经过严格的定标程序,定标相对误差小于 2% ^[7]。

仪器固有误差包括诸如温度效应、电子线路的非线性、探测器灵敏度的变化和暗电流的影响所造成的误差。通过缩短每次测量的时间和每组数据的测量时间及数据处理时剔除系统增大的数据,可以减小温度效应所造成的误差,本次实验中单次测量的时间设置过5秒,一组测量30个数据,总时间不超过3分钟。通过标准光源对仪器不断地进行标定,可以解决探测器灵敏度变化造成的误差,本次测量所用的仪器有暗电流纠正功能,可以解决由暗电流影响所造成的误差。根据用户手册,由非线性因素造成的相对误差小于 0.005% 。

测量误差是人为的因素所造成的。其中最主要的测量误差来源于在测量时对准太阳所造成。光度计的基本原理是测量太阳与光度计之间的太阳辐射。测量时太阳指向偏差会造成测量数据偏大。在海面上进行测量时,由于船体的摇晃很难准确的指向太阳,单次测量的过程中,太阳光度计的指向很容易偏离太阳,在海面上风速较大时,这种情况尤其明显。解决的办法是选取每组测量数据中各波段数值最小的测量值,作为本次测量的真值,而不是取其平均值^[2]。进行这样的处理后,可以减少这方面的误差。计

算各波段测量的相对误差,发现 870 nm 波段的测量的相对误差最大,可达 11.2%,490 nm 波段的相对误差最小,为 5.9%。

在测量的过程中,发现从实验室到甲板上进行测量时,由于实验室是空调房温度较低,甲板上太阳直射温度较高,存在温差,较容易造成水汽在镜片上的凝结,造成测量的数据偏高,所以每次测量前,最好清洁镜片。每组数据测量结束要关闭电源,避免仪器连续工作造成内部温度变化,影响测量结果。

另外本次实验中,也较多地遇到轻雾(能见度 <10 km,相对湿度 $>60\%$)天气。根据原始记录,本次实验相对湿度的值均大于 60%,集中于 70%~90%之间,海面上空相对湿度较高,很容易形成轻雾天气。轻雾也会造成测量数据的偏高,结合气象数据分析发现有轻雾的影响时,气溶胶的光学厚度的变化的比晴朗条件下的变化更明显。由于

不同时间、不同地点气溶胶的光学厚度都有较大的变化,所以很难定量分析轻雾对测量数据的影响,最终的数据处理没有能够排除轻雾的影响,可能会造成测量数据偏大的误差。有关轻雾对南海北部海域气溶胶光学厚度的影响需要作进一步的研究。

6 结 论

利用多波段光度计观测到的太阳辐射数据和同步的气象数据,分析了南海北部海域的气溶胶的光学厚度,研究结果表明:南海北部海域气溶胶光学厚度的日变化较大,而日平均光学厚度则较集中于 0.2~0.6 之间;从陆地方向吹来的风对气溶胶的光学厚度有重要的影响;测量时,对不准太阳所造成的误差是误差的一个主要来源,取多次测量的最小值可以减少这种误差的影响;轻雾天气对气溶胶的光学厚度也有较大的影响。

参 考 文 献:

- [1] 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): 145-151.
- [2] 赵崴,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.
- [3] 麻金继,陈瑾. 用 MIE 散射理论计算大气气溶胶光学特性[J]. 原子与分子物理学报, 2005, 22(4): 701-707.
- [4] 邱明燕,盛立芳,房岩松,等. 气象条件对青岛地区气溶胶光学特性的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(6): 925-930.
- [5] BIGGAR S F, GELLMAN D I, SLATER P N. Improved evaluation of optical depth components from Langley plot data[J]. Remote Sense Envir, 1990, 32(6): 91-101.
- [6] MIMS F M. Microtops II user' guide 2.43[Z]. Philadelphia: Solar Light Company, 2001: 44-47.
- [7] 张军华,王美华,毛节泰. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正[J]. 大气科学, 2000, 24(6): 855-859.
- [8] 高飞. 气溶胶的光学厚度与反射率比的处理方法[J]. 海洋技术, 2003, 22(1): 25-28.
- [9] 吴润,罗燕,王卫国,等. 矿尘气溶胶短波辐射效应的初步研究[J]. 热带气象学报, 2004, 20(3): 328-336.
- [10] GORDON Howard R, WANG Menghua. Retrieval of Water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J]. Applied Optics, 1994, 33(1): 443-452.

STUDY OF AEROSOL OPTICAL THICKNESS OVER NORTHERN SOUTH CHINA SEA

LIU Da-zhao^{1,2}, TIAN Li-qiao³, YANG Jin-kun¹, CHEN Chu-qun¹

(1. Key Laboratory of Environment Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academic of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Guangdong Ocean University, ZhanJiang 524088, China; 3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract : The aerosol optical thickness is the primary parameter in the atmospheric correction algorithm. Based on the multi-wavelength sun-photometer data of an open navigation of South China Sea Institute of Oceanology, CAS, from September 7th to 30th 2006, the optical thickness of the northern South China Sea is obtained. The results indicate that the aerosol optical thickness of the northern South China Sea has extremely obvious diurnal change. The minimum value can be as low as 0.1(870 nm), the maximum value is 0.9(440 nm) and daily average optical thickness is about 0.2~0.6. Based on meteorological data simultaneously observed, it is discovered that the wind blowing from the land direction has extremely obvious influence on the aerosol optical thickness when it reaches 4m/s, but the wind blowing from the ocean direction does not have obvious influence on the optical thickness of aerosols.

Key words: South China Sea; aerosol optical thickness; sun-photometer