

光学学报

基于船载平台太阳光度计的渤海湾气溶胶光学特性

朱海^{1,2,3}, 李建玉^{1,3*}, 黄宏华^{1,3}, 徐刚^{1,3}, 戴聪明^{1,3}, 魏合理^{1,3}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽合肥 230031;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 230037

摘要 研制出一种可以在船载平台下完成气溶胶测量的太阳光度计。仪器采用两段式图像跟踪方法, 首先利用鱼眼成像系统对太阳进行粗跟踪, 之后通过精跟踪成像系统来提高跟踪精度, 并阐述了二维转台、图像跟踪系统、测量光路的工作流程。利用船载平台太阳光度计在渤海湾进行长期观测, 渤海湾日平均气溶胶光学厚度多集中在 0.1~0.3 范围内, 大气较为洁净, 且夏季大气以细粒子为主, 而深秋大粒子占据主导地位。将所得结果与日本 POM-01 MK III 船用太阳光度计的测量结果进行对比, 发现气溶胶光学厚度日变化趋势基本相近, 决定系数可达到 0.968, 其平均相对测量误差为 4.83%, Ångström 指数平均相对测量误差为 2.55%。所得结果验证了船载太阳光度计的可靠性与稳定性, 并且可以进一步利用可见光到近红外的辐射信息反演其他大气参数的光学特性。

关键词 大气光学; 气溶胶; 太阳光度计; 船载平台; 渤海湾

中图分类号 P412.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221169

1 引言

气溶胶粒子通过对辐射的散射与吸收作用影响着地球大气的辐射收支平衡, 其光学特性在卫星反演结果验证、激光传输、大气修正^[1]以及气候变化研究^[2]等领域都有着重要的应用。

各个国家与科研单位先后研制出不同型号的太阳光度计用于建立气溶胶观测网络, 进而不断深入对气溶胶光学特性的研究。其中内陆地区面积广阔, 各观测网络站点数庞大、数据丰富。Giles 等^[3]利用 AERONET 以极高的时间分辨率在广阔的内陆区域范围内获得高精度的气溶胶光学厚度(AOT)。Zhang 等^[4]利用冀中南平原(SCHP)62 个站点的大气能见度和水汽, 采用间接方法获取气溶胶光学厚度。Liu 等^[5]利用地基天空辐射计测量研究了银川地区气溶胶的光学厚度、波长指数、谱分布、折射率等参数的季节变化特征。Xin 等^[6]研究了中国北方及中部地区 8 个站点在一次强沙尘暴过程中气溶胶光学性质的变化, 得到气溶胶光学厚度“谷-峰-谷”和 Ångström 参数“峰-谷-峰”的变化规律。对于海上气溶胶光学特性的研究, 各观测网络也在沿海地区布置了观测站点。Tu 等^[7]通过对 AERONET 东海附近区域 4 个站点的气溶胶数

据进行分析, 了解气溶胶对气候和大气中污染物迁移的影响。Yu 等^[8]利用 AERONET 详细分析了中国、朝鲜以及日本三个国家沙尘气溶胶的基本特性。王跃思等^[9]基于中国地区太阳分光观测网络 CSHNET, 通过分析多个典型区域站点的秋冬两季数据, 得出不同区域内气溶胶的光学特性。但是, 这些观测网络所使用的测量仪器只能在陆地上使用, 而陆地面积仅占地球表面的 30%, 地球气溶胶光学特性的研究中迫切需要一款可以测量海上气溶胶参数的设备, 进而可以在海上建立移动观测站点, 弥补观测网络中海上数据的缺失。

目前可以获取海上气溶胶参数的探测手段主要包括气溶胶卫星遥感、近海岸与岛屿观测以及船舶观测等。Payra 等^[10]利用 Terra 和 Aqua 卫星上 MODIS 数据, 研究了印度 4 个城市 550 nm 气溶胶光学厚度, 但是气溶胶空间分布的复杂性与地面复杂的反射特性造成数据精度不高。在海岛上安置地基太阳光度计^[11]可以遥感局部海域气溶胶光学厚度, 但地理位置受限且安置的仪器数量较少。利用激光雷达^[12]在近海岸区域测量水汽与气溶胶, 测量过程中受激光雷达本身的能量限制, 测量的高度受限。因此, 研制船载太阳光度计用于高精度测量海上气溶胶光学特性变得尤为重要。

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-07-01; 录用日期: 2022-08-22; 网络首发日期: 2022-09-02

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFA0706004)、安徽省重点实验室基金(E03DEG29)

通信作者: *154023016@qq.com

本文采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的船载太阳光度计(SSP)在渤海湾开展了为期半年的海测实验,得到了该地区 550 nm 气溶胶光学厚度与 Ångström 指数的日变化特征与季节性变化特性的部分规律。

2 仪器介绍

2.1 整体设计

船载平台太阳光度计(SSP)的结构图如图 1 所示,其主体结构由水平转动箱体、鱼眼成像系统^[13]、二维旋转平台和单臂探头 4 个部件组成。SSP 的二维转台可以控制水平转动箱体与单臂探头分别在水平轴与俯仰轴两个维度上进行转动,将其固定在正交维度上,

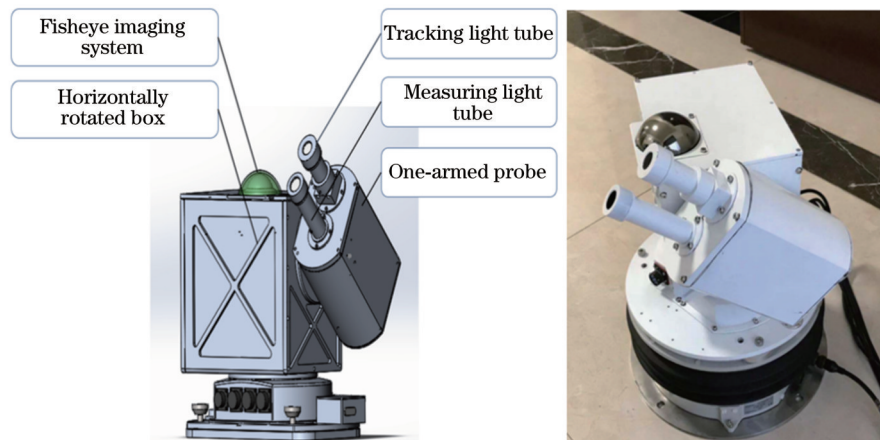


图 1 船载平台太阳光度计的结构图

Fig. 1 Structure of shipboard sun-photometer

2.2 图像跟踪系统

传统固定平台太阳光度计多采用四象限法对太阳进行跟踪,在规定时间内采集 4 个电压值,通过比较这 4 个电压值的大小,得出跟踪光筒的偏差方位,再由单片机下发命令给驱动器,控制电机转动,完成太阳的自动跟踪。但是船载平台太阳光度计要求在移动条件下实现跟踪。随着船舶航行、转向、太阳方位角变换频繁,角度变化较大。四象限探测器的跟踪视场小,时间响应慢,无法实现快速精确跟踪。为保证船载平台太阳光度计能在航行过程中高精度地测量气溶胶光学厚度,采用图像识别定位法来研制其图像跟踪系统。本文跟踪系统的粗跟踪模块将时钟定位法和鱼眼图像识别定位技术相结合。使用鱼眼镜头扩大了跟踪视场,弥补了时钟法在移动测量时无法正确找到方位角的缺陷。而系统的精跟踪模块采用 CCD 图像识别定位法对太阳方位进行准确定位,对镜筒指向进行微调,进而提高跟踪精度。由双 CCD 成像系统组成的图像跟踪系统运转流程图如图 2 所示,设备进行跟踪前首先利用光电开关使得二维转台在水平和俯仰方向上寻找初始方位,随后工控机下达指令进入粗跟踪模式。鱼眼成像系统获取全天空图像后,经过图像校正与质心计

从而可以快速完成对目标高精度、高稳定的跟踪。鱼眼成像系统安装在水平转动箱体顶部,可以实时采集太阳图像并进行计算,且不会因为二维旋转平台的转动而影响鱼眼图像的采集。单臂探头固定在水平转动箱体侧面的俯仰轴上,单臂探头前端安装两个平行光筒,分别为成像光筒和测量光筒。成像光筒内装有精跟踪成像系统,用于提高设备对太阳的跟踪精度。测量光筒内装有分光信号测量系统用于太阳光谱数据采集。下位机控制板、电机驱动器以及温控单元等被安装在水平转动箱体的内部。在部件与部件连接处加入密封垫以防尘防水,进而满足海上潮湿环境下的工作需求。通过航空插头将长距离线缆与工控机连接增加了便携性和稳定性。

算^[14]后获得太阳的方位角信息,再通过时钟法算出此刻太阳的高度角信息。上位机驱动二维转台转动,使得太阳进入精跟踪成像系统的视场,关闭粗跟踪模式,开启精跟踪模式。通过对太阳质心的提取计算实现高精度跟踪,在精跟踪模式下实现闭环稳定跟踪。

虽然本系统是双成像系统,但是其跟踪精度主要取决于其精跟踪成像系统的精度。已知太阳的视场角近似为 0.53° ,精跟踪 CCD 的分辨率为 $2456 \text{ pixel} \times 2058 \text{ pixel}$,靶面的物理尺寸为 $8.5 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$,可以计算出 CCD 靶面上太阳光斑区域的直径为 215 pixel,设置图像跟踪的精度为 5 pixel,计算出系统实际的跟踪精度为

$$\mu = \frac{\pm 5}{215} \times 32' \approx \pm 0.744'. \quad (1)$$

考虑到太阳在 CCD 图像传感器靶面上直径像素的误差以及 4 级海况下的晃动误差等,本系统的跟踪误差优于 $\pm 1'$ 。

2.3 光路设计

船载平台太阳光度计是以太阳为辐射源的光学精密仪器,其测量光路直接关系到仪器能否得到可靠准确的实测数据。将成像光筒与测量光筒平行设计,当

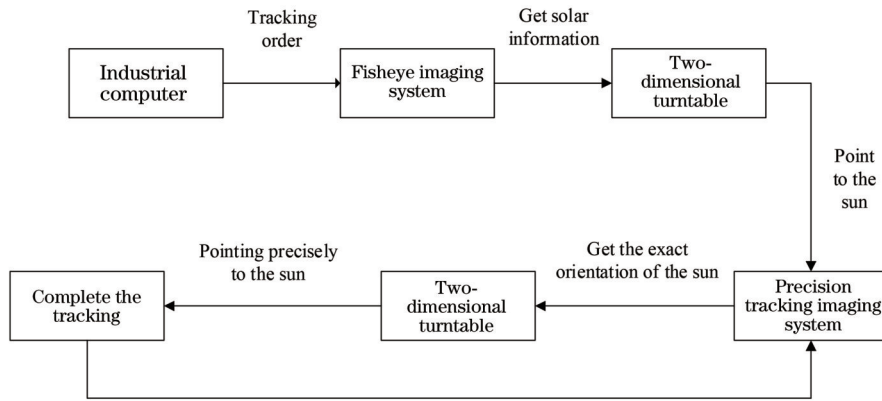


图 2 图像跟踪运转流程图

Fig. 2 Operation diagram of image tracking

成像光筒跟准太阳时,太阳光正好照射到测量光筒内探测器靶面中央。

图 3 所示的测量光路^[15]由视场光阑组、透镜、不同波段的滤光片和 PDA(photo-diode array)探测器组成。太阳辐射通过防尘窗口后,依次通过视场光阑组,这些光阑组的主要功能是控制视场大小,进而限制光通量。接着太阳辐射由透镜会聚后依次经过 9 个干涉滤光片(400、440、532、550、780、870、940、1050、1064 nm)过

滤到 PDA 探测器靶面并转换成电压信号,单片机的数据采集模块收集电压信号并将数据发送给上位机。当中午太阳光变强时,PDA 探测器往往会出现饱和现象,通过在前端加上合适的衰减片来解决这一问题。除此之外,通过在数据采集模块增加增益控制,可以控制 PDA 探测器测得的电压信号始终处在合适的范围区间,进而避免饱和。

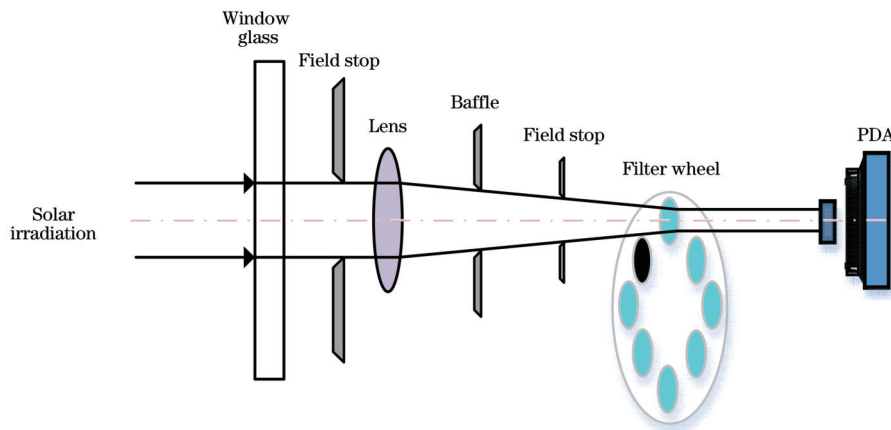


图 3 测量光路

Fig. 3 Measurement light path

2.4 性能指标

车载太阳光度计 SSP 所能达到的性能指标如表 1 所示。

3 仪器标定

2021 年 5 月 9 日当日晴空万里、大气干净稳定且气溶胶含量较少,满足车载平台太阳光度计的定标状态,标定时间选在 6:50—12:10。分别对仪器能够获取的可见光到近红外 9 个波段(400、440、532、550、780、870、940、1050、1064 nm)进行标定。根据比尔-朗伯定律,仪器 t 时刻在入瞳处光电探测器接收到的波长为 λ 的太阳直接辐射电信号 $V(\lambda, t)$ 可以写为

表 1 SSP 性能指标

Table 1 SSP performance indicators

Parameter	Value
Tracking accuracy / (')	±1
Field angle of measuring system / (°)	3
Wavelength range / nm	400-1100
Filter bandwidth / nm	10
Field angle of precision tracking imaging system / (°)	6
Field angle of fisheye imaging system / (°)	280
Working temperature / °C	-35-55
Temperature control precision / °C	±0.5
Sea level	≤4

$$V(\lambda, t) = V_0(\lambda) \times \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \exp[-m\tau(\lambda, t)], \quad (2)$$

式中: $V_0(\lambda)$ 为大气层顶太阳辐照度; d_0/d 为日地修正因子; m 为大气质量因子; $\tau(\lambda, t)$ 为大气光学厚度。

对于无大气分子吸收波段采用 Langley 法, 在 Langley 图中外推到大气层外的太阳辐照度(大气质量因子 $m=0$) 的电压响应值即是在不同波长下的定标常数。对于水汽吸收波段采用改进的 Langley 法^[16], 通过对 940 nm 波段相邻的两个非吸收波段的气溶胶光

学厚度进行线性插值, 即可求出 940 nm 波段气溶胶光学厚度。大气总光学厚度扣除 940 nm 波段气溶胶光学厚度即为水汽的光学厚度, 同样进行最小二乘拟合外推得出水汽波段定标常数 V_0 。

如图 4(a) 所示, 对于无大气分子吸收的 8 个波段, 利用 Langley 法求出 8 个波段的标定曲线, 其中横坐标为大气质量因子 m ; 如图 4(b) 所示, 对于水汽吸收波段, 利用改进的 Langley 法求出标定系数, 其中横坐标中修正常数 b 依赖于波长、滤光片带宽。

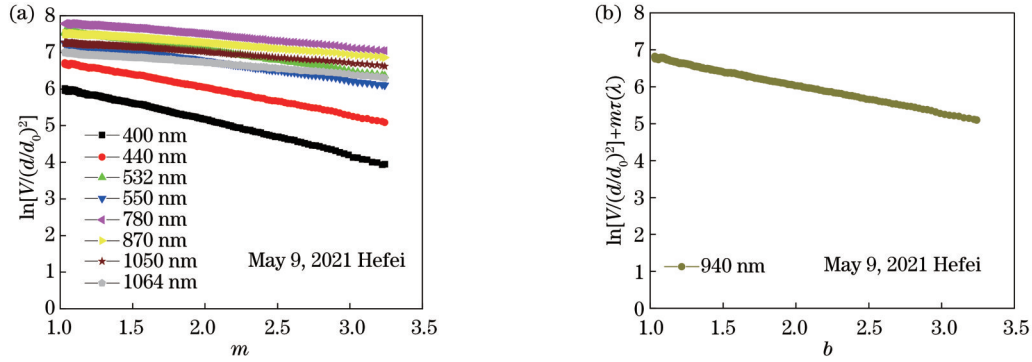


图 4 各波段标定曲线。(a) 无吸收波段; (b) 水汽吸收波段

Fig. 4 Calibration curve of each band. (a) Non-absorbing bands; (b) water vapor absorption band

获取到仪器的定标常数 V_0 , 即可由式(2)得到大气总的光学厚度为

$$\tau(\lambda, t) = \frac{1}{m} \ln \frac{V_0(\lambda)}{V(\lambda, t) / (d_0/d)^2}. \quad (3)$$

大气总光学厚度由以下三个部分构成: 1) 瑞利散射光学厚度 $\tau_R(\lambda)$; 2) 气溶胶光学厚度 $\tau_{AOT}(\lambda)$; 3) 气体吸收光学厚度 $\tau_G(\lambda)$ 。为了得到气溶胶的光学厚度 $\tau_{AOT}(\lambda)$, 根据式(3), 利用大气总光学厚度扣除瑞利散射与气体分子吸收光学厚度, 得到

$$\tau_{AOT}(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_R(\lambda) - \tau_G(\lambda). \quad (4)$$

通常在 400~1100 nm 光谱范围内, 气体吸收光学厚度主要为 O_3 光学厚度 $\tau_{O_3}(\lambda)$, 可以通过吸收系数与臭氧含量的乘积来计算 O_3 光学厚度:

$$\tau_G(\lambda) = \tau_{O_3}(\lambda) = k_{O_3}(\lambda) \frac{D}{1000}, \quad (5)$$

式中: D 为臭氧的含量; $k_{O_3}(\lambda)$ 为各波段臭氧吸收系数。

将散射系数 $k_R(h)$ 在垂直方向上对高度进行积分, 即可得到瑞利散射光学厚度:

$$\tau_R(\lambda) = \int_0^\infty k_R(h) dh = 0.008569\lambda^{-4} (1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \frac{p}{1013.25} e^{-1.25017A}, \quad (6)$$

式中: p 为仪器所处的气压; A 为海拔高度。

可见光到近红外的气溶胶光学厚度满足 Ångström 公式:

$$\tau_{AOT}(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (7)$$

式中: α 为 Ångström 指数; β 为大气浑浊度系数。Ångström 指数反映了该地区的粒子尺度谱分布的特性, 通过 Ångström 指数值的大小可以大致了解该地区的气溶胶粒子大小的分布情况。

通常来说, 在 550 nm 波段附近的大气气溶胶散射效应最强, 太阳辐射的传播也集中在该波段附近, 本文所得出的气溶胶光学厚度均为 550 nm 波段处的气溶胶光学厚度, 而其他任意波段的气溶胶光学厚度的计算均可由式(7)求出, 本文不进行详细分析。

4 结果与讨论

4.1 数据分析

图 5 给出了 2021 年 6 月到 11 月渤海湾有效测量的 550 nm 气溶胶光学厚度日变化特征, 图例 0620 代表 2021-06-20 这一天, 其他图例含义类似。总的来看, 550 nm AOT 日变化趋势十分复杂, 秋冬季节 550 nm AOT 日变化较为平缓且趋势相似, 夏季 550 nm AOT 日变化趋势比深秋复杂且波动范围较广, 这可能是由渤海湾夏季气候多变造成的。

影响气溶胶光学厚度日变化的因素主要有风场变化、局部湍流、人类活动等, 这使得气溶胶光学厚度日变化过程变得十分复杂。分析渤海湾实验期间的观测结果, 可将渤海海域 550 nm 气溶胶光学厚度日变化大体分为以下 5 种类型:

1) 550 nm AOT 日变化特征呈缓慢上升趋势, 渤海湾这样的天气较少, 实验期间仅出现 3 d, 分别是

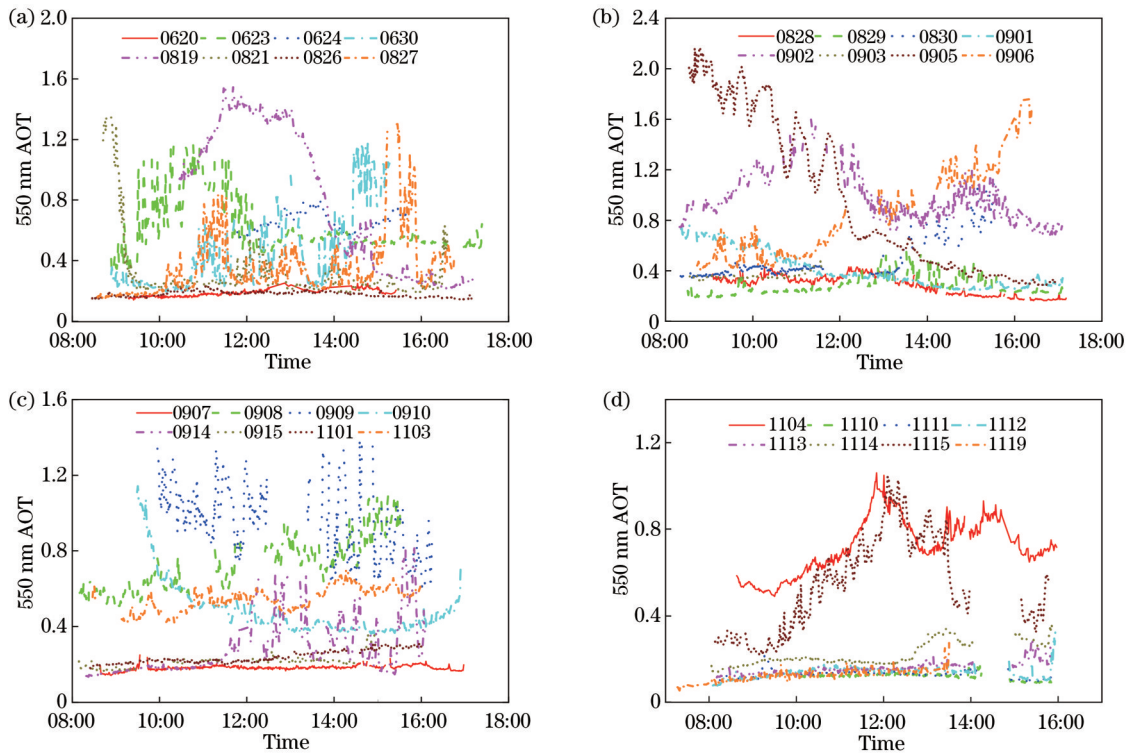


图 5 不同日期渤海湾 550 nm AOT 日变化曲线

Fig. 5 Diurnal variation curves of 550 nm AOT in Bohai bay for different date

2021-09-06、2021-09-08、2021-11-03。通常 550 nm AOT 整体呈线性增长,在中午以后上升趋势加快,造成这种变化趋势的原因一般有两个方面:一方面,随着太阳天顶角的增大,其辐射增强,地面粒子随着辐射的增强输送到大气中;另一方面,随着辐射的增强,海面液态水蒸发使得大气中水汽增加,气溶胶粒子吸收了大气中的水汽。

2) 550 nm AOT 日变化呈下降趋势,渤海湾这样的天气也不多,仅 3 d,分别是 2021-08-21、2021-09-02、2021-09-10。渤海湾夏秋换季时会有大雾产生,在太阳出来时才缓缓散去。该日变化类型往往出现在雾天。

3) 550 nm AOT 上午缓慢递增,下午缓慢递减,渤海湾这样的天气较多,上午太阳升起,地面温度不断升高,大气层结慢慢变得不稳定,地表气溶胶随着地表温度的升高向上输送而达到峰值,之后随着地表温度的降低而缓慢减少。

4) 550 nm AOT 日变化波动剧烈,白天出现多个波峰或波谷,共有 3 d,分别是 2021-08-27、2021-09-09、2021-09-14,多发生在夏秋换季之时。

5) 550 nm AOT 日变化缓慢。渤海湾这样的天气最多,各季均有出现。通常这种天气天空晴朗无云且颜色较蓝,大气中气溶胶含量较少,有很高的能见度。

综合分析以上几种 550 nm 气溶胶光学厚度日变化类型,可以得出:渤海海域的 550 nm 气溶胶光学厚度日变化波动十分剧烈,且相邻日期内 AOT 变化无

规律可循,这主要是由渤海海域常年刮大风、起大雾的气候特征决定的。

为了分析海测期间 550 nm AOT 与 Ångström 指数的变化趋势,分别给出了渤海湾有效测量的 550 nm 气溶胶光学厚度与 Ångström 指数逐日变化特征图,如图 6 所示。550 nm 气溶胶光学厚度的日平均变化范围为 0.12~1.07,可以发现,虽然近年来人类活动造成的污染越来越多,但整体并未使渤海湾造成大的污染,其 AOT 日平均值较低。而夏秋换季之时常出现雾天,能见度较低,造成该海域 AOT 波动较大,除此之外,强烈的海风也是造成其 AOT 日平均值变化剧烈的主要原因。

Ångström 指数也是反映气溶胶颗粒大小的重要参数,通常空气中大粒子较多时该值较小,而小粒子较多时该值较大。Ångström 指数与空气中气溶胶粒子半径成反比。将海测期间大气气溶胶划分为两个不同的类型,8、9 月份日平均 α 值基本都大于 1,而深秋的 11 月份日平均 α 值全都小于 1。这说明:在渤海湾大气在 2021 年 8、9 月份小粒子含量较多;而在 11 月份,大气中的大粒子占据主导地位。渤海湾靠近东北地区,秋冬季烧煤供暖使得空气中大粒子个数增加,且夏季多雨,雨水冲刷加速气溶胶的沉降,使得 8、9 月份的 Ångström 指数明显大于 11 月份。

为了更为详细地了解海测期间得到的有效数据中 550 nm 气溶胶光学厚度与 Ångström 指数在量值上的分布情况,图 7 给出了日平均 AOT 和 Ångström 指数

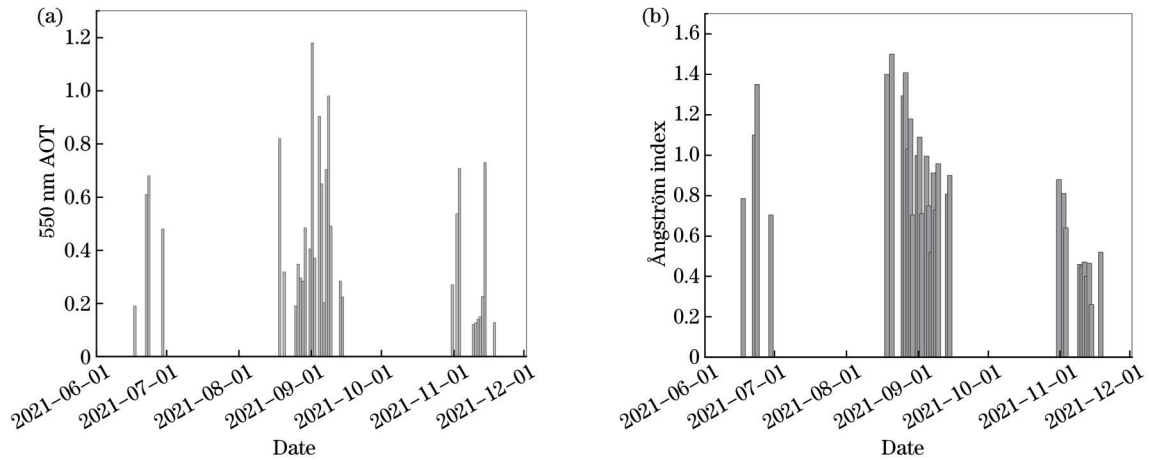


图 6 渤海湾 550 nm 气溶胶光学厚度与 Ångström 指数逐日变化图。(a) 550 nm 气溶胶光学厚度;(b) Ångström 指数
Fig. 6 Daily variation of 550 nm aerosol optical thickness and Ångström index in Bohai bay. (a) 550 nm aerosol optical thickness;
(b) Ångström index

的频率分布图。渤海湾日平均 AOT 多集中在 0.1~0.3 范围内,而 Ångström 指数多集中在 0.4~1.2 范围内。Ångström 指数的频率分布基本呈高斯分布。整

体来看,图 7(a)反映出渤海湾的大气环境较为干净,而图 7(b)则反映出渤海湾气溶胶粒子大小在不同的季节也完全不同。

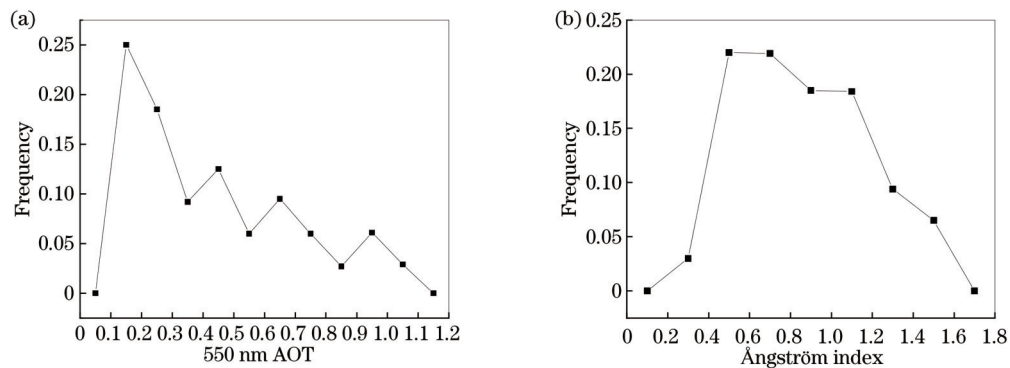


图 7 渤海湾 550 nm 气溶胶光学厚度与 Ångström 指数的频率分布。(a) 550 nm 气溶胶光学厚度的频率分布;(b) Ångström 指数的频率分布
Fig. 7 Frequency distributions of 550 nm AOT and Ångström index in Bohai bay. (a) Frequency distribution of 550 nm aerosol optical thickness; (b) frequency distribution of Ångström index

4.2 数据对比

为了检验船载平台太阳光度计测量海上气溶胶的有效性,将船载平台太阳光度计 SSP 测得的 550 nm 气溶胶光学厚度和 Ångström 指数与 POM-01 MK III 船用太阳光度计的测量结果进行对比,并对仪器的误差进行定量分析,以验证仪器测量气溶胶的稳定性与可靠性。

2021 年 9 月 5 日船载平台太阳光度计与 POM-01 MK III 船用太阳光度计气溶胶对比图如图 8 所示。由图 8(a)、(b)可见 SSP 与 POM-01 测量得到的 550 nm 气溶胶光学厚度日变化趋势基本相近,其决定系数可达到 0.968,其平均相对测量误差为 4.83%。而图 8(c)、(d)分别为由 SSP 和 POM-01 两台仪器根据 Ångström 公式得到的 Ångström 指数与大气浑浊度系数。SSP 得出 400、440、532、550、780、870、1050、

1064 nm 的平均 α 值为 1.004, POM-01 得出 400、500、670、870、1020 nm 的平均 α 值为 0.979, α 的相对测量误差为 2.55%。

总体来看,两台仪器测量得到 550 nm 气溶胶光学厚度与 Ångström 指数的一致性良好,但仍然存在偏差,其主要原因可能有以下 3 点:1) 标定误差,进行对比实验时,渤海湾处于夏秋交替阶段,常出现大雾天气,仪器没有遇到良好的天气时进行统一标定,使得两台仪器的标定值会产生一定程度上的漂移;2) 固有误差,两台仪器采用完全不同的探测器与滤光片,不同光学器件的差异引入不同的固有误差;3) 计算误差, POM-01 型船用太阳光度计没有 550 nm 波段的滤光片,在数据反演时,利用 Ångström 公式计算 550 nm 气溶胶光学厚度时引入了计算误差。

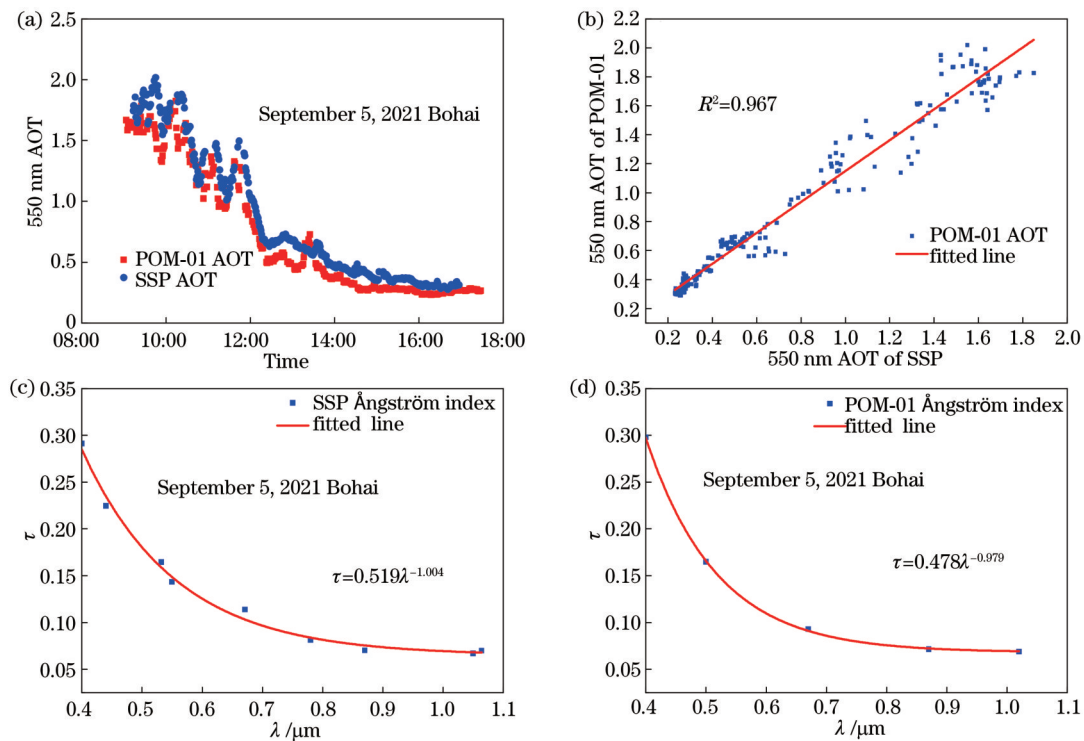


图 8 2021 年 9 月 5 日 SSP 与 POM-01 气溶胶对比图。(a) 550 nm 气溶胶光学厚度对比图；(b) 线性拟合图；(c) SSP Ångström 指数；(d) POM-01 Ångström 指数

Fig. 8 Comparison of SSP and POM-01 aerosols on September 5, 2021. (a) Comparison of aerosol optical thickness at 550 nm; (b) linear fitting diagram; (c) SSP Ångström index; (d) POM-01 Ångström index

5 结 论

利用船载平台太阳光度计在渤海湾进行了长期观测,结论如下:

1) 渤海湾气溶胶呈现双峰谱结构,2021 年 8、9、11 月有明显差异,8、9 月大气中以小粒子居多,而深秋的 11 月大粒子占据主导地位。两时段的平均 Ångström 指数分布分别约为 1.1 与 0.5。

2) 虽然近年来人类活动造成的污染越来越多,但渤海湾日平均 AOT 与 Ångström 指数频率分布基本呈高斯分布,且日平均 AOT 多集中在 0.1~0.3 范围内,说明该海域并未造成大的污染。

3) 船载平台太阳光度计 SSP 与 POM-01 测量得到的 550 nm 气溶胶光学厚度日变化趋势基本相近,其决定系数可达到 0.968,其平均相对测量误差为 4.83%,Ångström 指数平均相对测量误差为 2.55%。

参 考 文 献

- [1] 郭立红, 郭汉洲, 杨词银, 等. 利用大气修正因子提高目标红外辐射特性测量精度[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1871-1877.
Guo L H, Guo H Z, Yang C Y, et al. Improvement of radiation measurement precision for target by using atmosphere-corrected coefficients[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1871-1877.
- [2] 李正强, 谢一淞, 张莹, 等. 大气气溶胶成分遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2019, 23(3): 359-373.
- [3] Li Z Q, Xie Y S, Zhang Y, et al. Advance in the remote sensing of atmospheric aerosol composition[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(3): 359-373.
- [4] Giles D M, Sinyuk A, Sorokin M G, et al. Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database-automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(1): 169-209.
- [5] Zhang L Y, Li F X, Wei Q, et al. Long-term (1975—2016) variations of aerosol optical depth in South Central Hebei Plain, China, and its correlations with East Asian monsoon and economic activities[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(2): 1-15.
- [6] Liu J J, Zheng Y F, Li Z Q, et al. Ground-based remote sensing of aerosol optical properties in one city in Northwest China[J]. Atmospheric Research, 2008, 89(1/2): 194-205.
- [7] Xin J Y, Du W P, Wang Y S, et al. Aerosol optical properties affected by a strong dust storm over central and Northern China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(3): 562-574.
- [8] Tu Q G, Hao Z Z, Yan Y W, et al. Aerosol optical properties around the East China Seas based on AERONET measurements [J]. Atmosphere, 2021, 12(5): 642.
- [9] Yu X N, Cheng T T, Chen J M, et al. A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(30): 5787-5797.
- [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 Ångström 参数联网观测(2004-08—2004-12)[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1703-1711.
Wang Y S, Xin J Y, Li Z Q, et al. AOD and Ångström parameters of aerosols observed by the Chinese Sun hazemeter network from August to December 2004[J]. Environmental Science, 2006, 27(9): 1703-1711.
- [11] Payra S, Gupta P, Bhatla R, et al. Temporal and spatial

- variability in aerosol optical depth (550 nm) over four major cities of India using data from MODIS onboard the Terra and Aqua satellites[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(13): 1256.
- [11] Uchiyama A, Matsunaga T, Yamazaki A. The instrument constant of sky radiometers (POM-02), part 1: calibration constant[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(9): 5363-5388.
- [12] 谭敏, 王邦新, 庄鹏, 等. 基于拉曼激光雷达的大气温度和水汽反演分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(5): 1397-1401.
Tan M, Wang B X, Zhuang P, et al. Study on atmospheric temperature and water-vapor mixing ratio based on Raman lidar[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(5): 1397-1401.
- [13] 徐晓冰. 光伏跟踪系统智能控制方法的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
Xu X B. Research on intelligent control method of PV tracking system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [14] 杨鹏, 谢立, 刘济林. 基于Zernike矩的高精度太阳图像质心提取算法[J]. *宇航学报*, 2011, 32(9): 1963-1970.
Yang P, Xie L, Liu J L. Zernike moment based high-accuracy Sun image centroid algorithm[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(9): 1963-1970.
- [15] 李建玉, 刘庆, 徐文清, 等. 用于多波段激光大气透过率测量的太阳辐射计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 261-270.
Li J Y, Liu Q, Xu W Q, et al. Solar radiometer for measurement of multi-waveband laser atmospheric transmittance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 261-270.
- [16] 杨丽丽, 戴聪明, 徐青山, 等. 近红外大气吸收波段太阳辐射计定标[J]. *遥感学报*, 2012, 16(5): 928-938.
Qie L L, Dai C M, Xu Q S, et al. Calibration of near-infrared absorption band for a Sun-photometer[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(5): 928-938.

Optical Properties of Aerosols in Bohai Bay Based on Shipboard Platform Sun-Photometer

Zhu Hai^{1,2,3}, Li Jianyu^{1,3*}, Huang Honghua^{1,3}, Xu Gang^{1,3}, Dai Congming^{1,3}, Wei Heli^{1,3}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230031, Anhui, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

Abstract

Objective Aerosols play an important role in the balance of the earth's atmospheric radiation budget due to their complex composition and increasing particle concentration. Sun-photometer is an effective measurement device for remote sensing atmospheric parameters by measuring solar spectral radiation and is widely employed in ground-based remote sensing of aerosols. However, the sea covers a large area. In the research on the optical characteristics of aerosols on earth and climate change, there is an urgent need for a device that can measure the optical characteristics of aerosols with high accuracy under the shipboard platform to compensate for the lack of atmospheric data at sea.

Methods The traditional sun-photometer is difficult to track the sun on a moving shipboard platform, which cannot meet the needs of sea aerosol observation. The research group develops a novel shipboard sun-photometer with a new tracking method. The sun can be tracked on a shipboard platform with an accuracy of better than 1'. This new sun-photometer could obtain radiation information in nine spectral bands of 400, 440, 532, 550, 780, 870, 940, 1050, and 1064 nm at once. The aerosol information of the sea area can be obtained by direct solar radiation remote sensing on the mobile platform.

The instrument adopts a two-segment image tracking method instead of the traditional four-quadrant tracking method. Firstly, the fish-eye imaging system is employed to obtain the whole sky image, and the coarse tracking of the sun is completed. Then, the precision tracking imaging system is leveraged to improve the resolution of the solar image to improve the tracking accuracy. The development process of the shipboard sun-photometer is introduced in detail, including the instrument's two-dimensional turntable, image tracking system, and measurement optical path. The function and working flow of each main structure of the instrument are described in detail with the two-dimensional turntable of the shipboard sun-photometer as the starting point. After that, the theoretical tracking accuracy of the image tracking system is calculated in detail by image processing technology and can reach 0.744' to meet the tracking accuracy requirements of offshore measurement. Finally, a spectrometric measurement system is introduced based on the integrated design of spectrometric measurement systems. The structure and operation flow of the spectrometric measurement system are analyzed specifically, and the influence of stray light and detector saturation on the measurement results is thoroughly considered with corresponding improvement approaches.

Results and Discussions Shipboard sun-photometer has been successfully developed to meet the performance indexes, and long-term observation has been carried out in Bohai bay. The experimental results show that the daily average aerosol optical thickness in Bohai bay is mostly concentrated in the range of 0.1–0.3. Although human-made pollution is increasing in recent years, the frequency distribution of the daily average Ångström index in Bohai bay is basically Gaussian, which indicates that the sea area has not caused large pollution with the relatively clean atmosphere (Fig. 7). The aerosol in Bohai bay shows a bimodal spectrum structure, and there are significant differences between August, September, and November. In August and September, the atmosphere is dominated by small particles, while in late autumn, November, is dominated by large particles. The average Ångström index of the two periods is about 1.1 and 0.5 (Fig. 6).

Conclusions The Langley calibration method and the improved Langley method are adopted to calibrate the bands without atmospheric molecular absorption and water vapor absorption, respectively. The 550 nm aerosol optical thickness and Ångström index measured by the shipboard platform sun-photometer are compared with the measurement results of the POM-01 MK III marine sun-photometer. The diurnal variation trend of the 550 nm aerosol optical thickness is basically similar, the determination coefficient is 0.968, and the average relative measurement error is 4.83%. The Ångström index has an average relative measurement error of 2.55%. The reliability and stability of the shipboard sun-photometer are verified, and the optical properties of other atmospheric parameters can be further retrieved via the radiation information of visible and near-infrared bands. This instrument enriches the technical means for measuring the parameters of aerosol optical characteristics at sea and lays a solid experimental technical foundation for the research on space remote sensing, climate change, and atmospheric environment.

Key words atmospheric optics; aerosol; sun-photometer; shipboard platform; Bohai Bay