

光学学报

基于 AERONET 的东沙海域气溶胶光学模型

陈舜平^{1,2,3}, 戴聪明^{1,3*}, 刘娜娜^{1,3}, 连文涛^{1,3,4}, 张聪^{1,2,3}, 吴凡^{1,3,4}, 张宇轩^{1,3,4}, 魏合理^{1,3,4}

¹中国科学院合肥物质科学研究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中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

⁴中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

摘要 使用气溶胶自动观测网(AERONET)东沙站的长期观测资料,初步建立逐月的南海东沙海域气溶胶光学特性模型。长期观测数据表明,东沙海域气溶胶光学厚度(AOD)基本低于0.5,春秋两季达到峰值,夏季最低。气溶胶粒子的有效半径在春秋两季较小,其余月份在0.5 μm左右。使用三模态对数正态函数拟合区域气溶胶粒径谱,得到细模态半径为0.1 μm,中间模态半径为0.28 μm,粗模态半径为2.2 μm。基于多波段AOD观测数据,评估该模型计算所得AOD光谱和透过率误差,可见和近红外波段透过率的均方根误差(RMSE)为1%~2%,AOD的RMSE为0.01~0.03。结果表明,所建气溶胶模型可以准确描述东沙海域的气溶胶光学特性,满足工程计算的精度要求。

关键词 大气光学; 气溶胶模式; 海洋气溶胶; 气溶胶光学特性; AERONET

中图分类号 P427.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230587

1 引言

气溶胶粒子是悬浮在大气中的微粒,对可见、红外波段的大气辐射传输具有显著影响^[1],是环境污染监测、大气-海洋参数遥感、光电工程应用^[2]等领域的重要研究对象。海洋气溶胶产生于海浪破碎溅射和气粒转换过程^[3],主要由海盐粒子、硫酸盐粒子构成,是最重要的气溶胶自然源。海洋气溶胶对大气辐射传输的影响评估,依赖于准确的数值模型。因此,在光电工程应用中,亟需建立基于我国海域观测数据的海洋气溶胶光学特性模型^[4]。

目前常用的海洋气溶胶模式有 navy aerosol model (NAM)^[5-6]、mediterranean extinction code (MEDEX)^[7]等。NAM是Gathman^[6]于1983年基于地中海、大西洋、太平洋沿岸的粒子谱观测数据建立的。1993年,Gathman等^[8]总结多年实验积累的海洋气溶胶垂直分布数据,提出了包含垂直廓线模型的海军海洋垂直气溶胶模式(navy oceanic vertical aerosol model)。van Eijk等^[5]将适用于开阔海域的NAM拓展到沿海^[9],Piazzola等^[7]则将NAM的参数化方案修正为符合地中海区域气溶胶特征的模态参数依赖于离岸距离的形式(即MEDEX)。

上述海洋气溶胶模式均基于国外海域的观测数据而建立,在光电工程应用领域亟需构建基于国内区域观测数据的相应模式,已有不少学者在该领域开展了研究工作,如:Chu等^[10]依据南海走航观测数据,搭建了海洋气溶胶通量函数和两模态谱分布模型;Pan等^[11]根据青岛、茂名的观测数据,修正了沿海气溶胶谱分布参数;许华团队^[12]则基于气溶胶自动观测网(AERONET)的数据对南海区域的气溶胶来源及参数特征进行分析。走航观测和外场实验的周期一般较短,从数周到数月不等,尽管在时间选择上尽量考虑了实验地点的气候特征,但仍然缺乏基于国内典型海域长期观测数据的气溶胶光学特性模型。

AERONET作为站点遍布全球的长期地基气溶胶遥感监测网络,可以提供多种气溶胶微物理参数的观测(反演)数据,包括气溶胶光学厚度(AOD)、Angstrom指数(AE)、谱分布等。基于该数据集,可以对局地气溶胶类型进行区分^[13],探究其时空分布规律^[14],研究污染物长期变化行为^[15],建立局地PM_{2.5}污染物的预报模型^[16]等。此类研究侧重于对局地气溶胶微物理参数的分析,较少考虑光学特性建模。AERONET基于太阳光度计的太阳直射和小角度散射观测,测量精度较高、结果可靠,能够反映局地气溶

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-04-17; 录用日期: 2023-04-24; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(62105240, 62075159)、国家重点研发计划(2019YFA0706004)、中国科学院合肥研究院院长基金(YZJ2022QN06)

通信作者: *cmdai@aiofm.ac.cn

胶光学性质的长期变化规律。因此,探索 AERONET 数据资料在气溶胶光学模型搭建中的使用,对光电设备的原位测量、实时应用有重要意义。

本文基于 AERONET 长期观测的我国东沙地区气溶胶光学特性资料,初步建立了中国南海东沙岛区域气溶胶光学模型,主要参数包括东沙地区逐月平均的气溶胶谱分布模型和 AOD。结合 Mie 散射理论,计算了该地区光学波段的 AOD 光谱,并使用一年期观测数据验证了该模型在计算 AOD 时的准确性。

2 数据及处理方法

2.1 AERONET 数据

AERONET 是由 NASA 主导的地基气溶胶遥感网络,收集数据资料时长超过 25 年,是气溶胶研究领域的重要公开数据源,主页网址为 <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>。AERONET 使用的 CE-318 太阳光度计(CIMEL 公司)可进行太阳直射辐射测量和天空扫描测量^[17],其中用于直射测量的通道共 8 个(中心波长分别为 340、380、440、500、670、870、940、1020 nm),用于天空扫描测量的通道共 4 个(440、670、870、1020 nm)。CE-318 的天空扫描模式测量太阳平纬度和主平面的散射辐射,用于反演谱分布、相函数等气溶胶微物理参数。AERONET 的二级产品(Level 2.0 数据)经过除云和质量保证,一般作为机载、星载遥感校正^[18]等研究中的地面基准。相关研究^[18]表明,该产品所提供的气溶胶参数,如柱平均粒径谱等反演结果,与其他原位测量所得结果一致,数据质量较为可靠。

AERONET 东沙站(Dongsha_Island)位于中国南海北部,经纬度为(20.699°N,116.729°E),海拔高度约 6 m,局地气溶胶受陆源气溶胶的影响相对较小,观测数据适用于海洋气溶胶光学特性研究。本文所用 Level 2.0 数据的时间范围为 2003 年 12 月 15 日至 2021 年 11 月 22 日,其中用于局地气溶胶光学模型搭建的数据时间范围为 2003 年 12 月 15 日至 2020 年 10 月 14 日(阶段 1)。为检验所建气溶胶光学模型的准确性,使用 2020 年 10 月 15 日至 2021 年 11 月 22 日(阶段 2)的多波段 AOD 光谱数据对所建模式进行检验,验证模型在该地区的计算精度。

2.2 数据处理方法

在气溶胶光学特性模式中^[8],主要关注消光系数 β_{ext} 、吸收系数 β_{abs} 等光学参数的相对光谱分布。在实时计算 β_{ext} 时,用地面气象能见度(VIS)等易于观测的宏观参数进行归一化,得到待计算波长处的 β_{ext} 。在世界气象组织(WMO)的规范中,VIS 以人眼最敏感的 550 nm 为基准波长,VIS 和 β_{ext} 之间的估算方式为

$$\beta_{550} = \frac{3.912}{\gamma_{\text{VIS}}}, \quad (1)$$

式中: β_{550} 为 550 nm 波长的单色消光系数; γ_{VIS} 为能见

度。本研究以 550 nm AOD 为宏观约束参数,替代观测数据较少的 VIS。550 nm AOD 需要通过 AERONET 观测的多波段(340~1020 nm)AOD 光谱拟合得到,如式(2)所示。式(2)可同时计算 AE(α)。

$$\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}. \quad (2)$$

气溶胶 AE 与荣格(Junge)谱分布之间存在密切关系,AE 反映了使用幂函数拟合气溶胶数浓度谱的结果,AE 越大,小粒子占比越高,反之大粒子占比较高。海洋气溶胶数浓度谱常用对数正态分布函数进行拟合^[6,11],即

$$n(\lg r) = \frac{dN}{d \lg r} = \sum_{i=1}^3 \frac{N_i}{\sqrt{2\pi} \cdot \lg \sigma_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg r - \lg r_{mi}}{\lg \sigma_i} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式中: $n(\lg r)$ 为谱分布的对数表示; N_i 为模态 i 的幅度; σ_i 为标准偏差; r_{mi} 为模态 i 的几何平均半径。AERONET 反演的谱分布半径范围为 0.05~15 μm ,共 22 个半径点。本文使用三模态对数正态分布函数拟合东沙站的谱分布数据。

在海洋气溶胶谱分布建模时进行归一化处理^[6,8-9],将粒子数浓度归一化到单位体积内仅有一个气溶胶粒子,能够消除不同测量时间点的数浓度差异,便于分析谱分布形态的变化。数浓度归一化并不影响 β_{ext} 相对光谱分布的计算。依据 Mie 散射理论, β_{ext} 可由粒径谱分布和粒子复折射率计算得到,即

$$\beta_{\lambda} = \int \pi r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) n(\lg r) d \lg r, \quad (4)$$

式中: β_{λ} 为气溶胶在波长 λ 处的消光系数; r 为气溶胶粒子半径; $Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m)$ 为消光效率因子; m 为粒子复折射率。本研究所使用的气溶胶粒子复折射率为 HITRAN 2020 数据库中的海盐粒子复折射率^[19]。

由于东沙站测量数据的时间分布极不均匀,为了避免因有效测量次数在不特定时间段内较高而提高该时间段在平均计算时的权重,进而影响平均结果,本研究所用月均值均为逐级平均所得,即首先计算日均值,然后由日均值计算各月均值,最后计算各月份的平均结果,用于研究气溶胶参数的月际分布。

3 结果与分析

3.1 气溶胶月际变化

AERONET 基于太阳直射辐射的 AOD 测量时间间隔约为 15 min^[20],经除云和质量控制后,数据分布较为稀疏。根据式(2)计算阶段 1 的 550 nm AOD,并逐级平均为月均值后,时间序列如图 1(a)所示,AOD 月均值均不大于 1,极少高于 0.5。阶段 1 的数据共包含 27693 组 AOD 光谱。从 AOD 的月均值频率分布来看[图 1(c)蓝色部分],AOD 频率分布的峰值在 0.1~0.2 区间,呈单峰状,向高值区有一定程度拖尾,但在高于

0.5 的区间急剧下降,说明该地区气溶胶较为清洁,受陆地气溶胶排放源的污染较小,符合海洋气溶胶的特征。图 2 为 AOD 月份均值分布,可见 AOD 在 3、4 月达到全年峰值,最低值出现在 7 月,随后在秋冬季呈现缓慢上升趋势。在图 1(a) 所示时间序列中较为连续的部分均可观察到此趋势,如 2019—2020 年、2014—

2015 年,以及 2009 年冬至 2010 年春等。AOD 年均值为 0.27,全年波动幅度仅约 0.2。 $\alpha_{440-675}$ 的月均值序列如图 1(b) 所示,频率分布见图 1(c) 的橙色部分。 $\alpha_{440-675}$ 的频率分布也呈单峰状,较 AOD 的频率分布更为对称,峰值位于 1.2~1.3 区间,在 0.6 前后区间有拖尾,整体对称性较好。

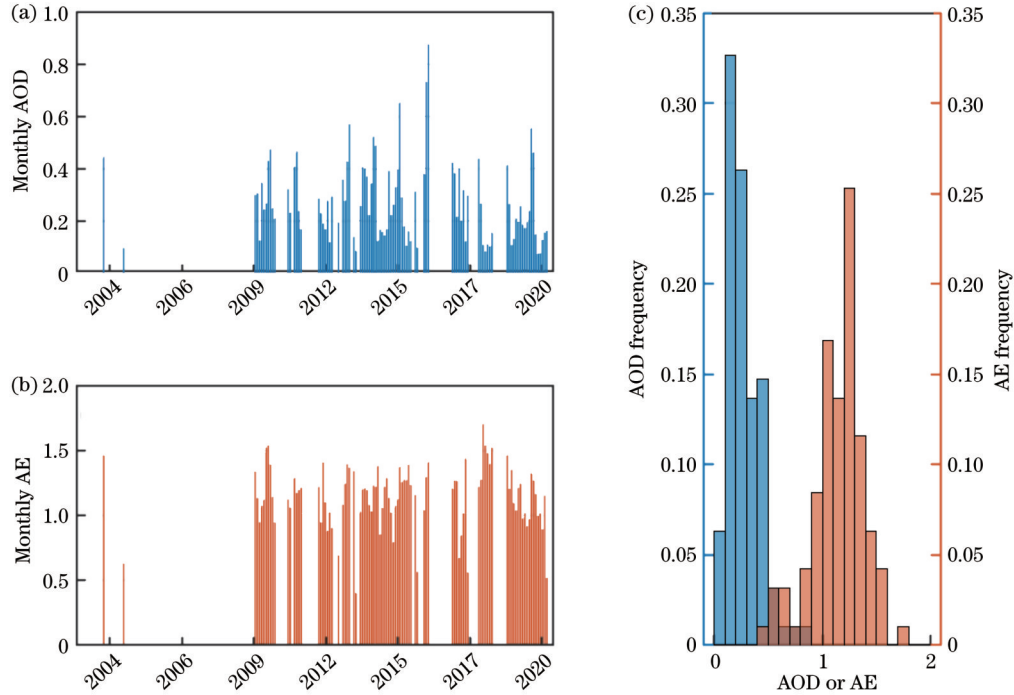


图 1 东沙站 550 nm AOD、AE 月均值时间序列及频率分布。(a) AOD 月均值;(b) AE 月均值;(c) AOD 和 AE 的月均值频率分布
Fig. 1 Sequences of 550 nm AOD and AE monthly mean, and their frequencies in Dongsha_Island. (a) AOD monthly mean; (b) AE monthly mean; (c) frequencies of AOD and AE

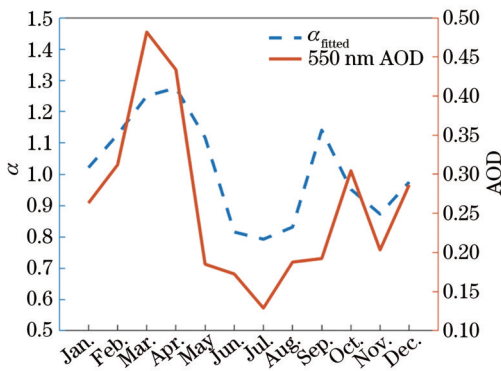


图 2 东沙站 AOD、AE 月份均值序列
Fig. 2 Sequences of monthly averaged AOD and AE in Dongsha_Island

东沙站多波段 AOD 的月份均值光谱如图 3 所示。除 3、4 月外, AOD 光谱曲线 τ 对 λ 的斜率整体上较为平缓,波长从 340 nm 增加到 1060 nm,最小的 AOD 下降幅度为 0.1(7 月),最大的下降幅度为 0.3(2 月)。3、4 月为东沙站 550 nm AOD 的峰值月份, AOD 光谱曲线往长波方向的下降较明显,从 340 nm 到 550 nm 下降了 0.3 左右,到近红外 1060 nm 则共下降了约 0.6,光

谱曲线呈凹状,短波波段的下降率高于长波波段。由多波段 AOD 拟合所得 AE (α_{fitted}) 的时间序列如图 3 所示,呈现春季、初秋两个峰值,说明在这两个时间段局地气溶胶的小粒子占比更高。

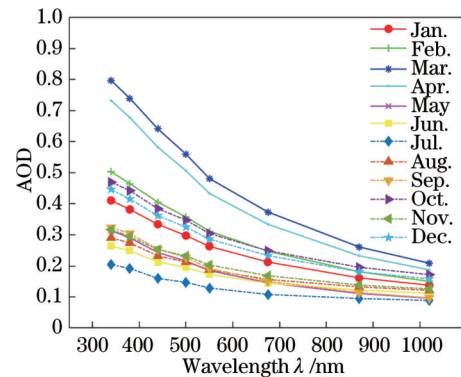


图 3 东沙站 AOD 月份均值光谱
Fig. 3 Monthly mean AOD spectra of Dongsha_Island

3.2 局地气溶胶光学模型

气溶胶消光系数 β_{ext} 可通过 Mie 散射理论由粒径谱分布和复折射率计算得到[式(4)]。将东沙站的谱

分布归一化到单位柱截面的数浓度为 $N=1$, 再逐级计算月份均值, 得到 12 个月的平均谱分布。这种方式消除了谱分布反演结果间的数浓度差异, 突出局地气溶胶粒子尺寸在不同半径上的相对分布。阶段 1 共包含 806 组谱分布, 不同月份的样本数分布并不均匀 (表 1 的第 2 列), 春夏季样本数较多, 可达 130 余组, 而冬季较少, 11 月份仅有 18 组谱分布数据。将谱分布按月份平均后, 使用三模态对数正态分布函数对谱分布进行拟合 (图 4), 得到拟合参数表 (表 1)。图 4 为 7 月的平均谱分布的拟合示意图, 可见使用三模态对数正态分布函数可以很好地拟合 AERONET 的谱分布反演结果。拟合结果表明, 细模态 (模态 1) 的模态半径平均值约为 $0.1 \mu\text{m}$, 中间模态 (模态 2) 为 $0.28 \mu\text{m}$, 粗粒子模态 (模态 3) 为 $2.2 \mu\text{m}$ 。局地气溶胶谱分布形态全年变化不大, 有效半径 r_{eff} 约为 $0.5 \mu\text{m}$ (图 5)。从 r_{eff} 的月际分布来看, 春季和秋季的 r_{eff} 明显较低, 说明在春季和秋季东沙地区气溶胶细粒子占比升高, 可能有沙尘等陆源气溶胶输入。如图 5 所示, 有效半径 r_{eff} 与光谱拟合所得 α_{fitted} 呈负相关趋势, r_{eff} 小的月份, α_{fitted} 相对较大。

东沙站谱分布的拟合结果提供了和 NOVAM 类似的气溶胶谱分布模型^[8], 但模态半径存在一些差异。NOVAM 的细模态半径为 $0.03 \mu\text{m}$, 中间模态半径为 $0.24 \mu\text{m}$, 粗模态半径为 $2.0 \mu\text{m}$ 。从东沙站谱分布的拟合结果来看, 粗模态和中间模态的模态半径与 NOVAM 基本一致, 细模态半径则差距较大, 这是因为 AERONET 数据表征的是从大气顶到海面的整层大气气溶胶特性, 包含较大垂直高度范围内的粒子尺度信息, 而 NOVAM 只描述近海表面的气溶胶特征, 所以二者有一定的差异。

NOVAM^[5] 和 MEDEX^[7] 的建模数据均来自近海表面的观测实验, 测量高度约为船体高度 ($10\sim 20 \text{ m}$)。

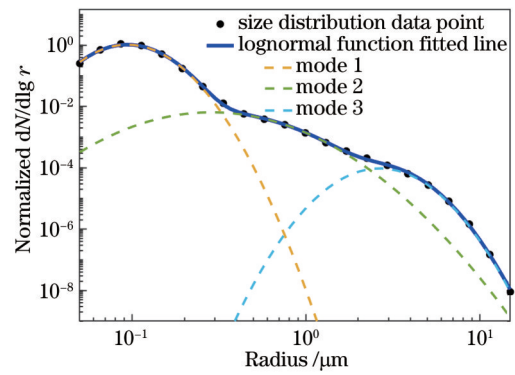


图 4 东沙站归一化谱分布拟合结果

Fig. 4 Fitting results of normalized aerosol size distribution in Dongsha Island

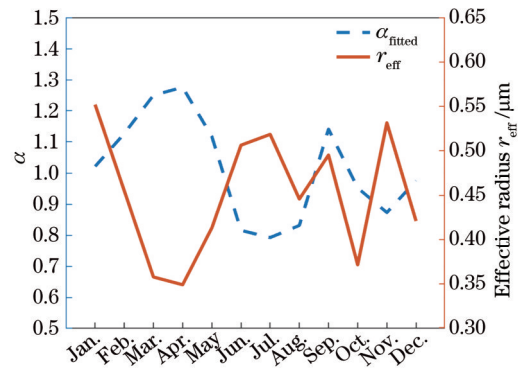


图 5 东沙站拟合 AE、有效半径月际分布

Fig. 5 Monthly sequences of fitted AE and effective radius

NOVAM 模型认为, 模态半径为 $0.03 \mu\text{m}$ 的细模态描述的是背景沙尘气溶胶, $0.24 \mu\text{m}$ 的中间模态表征滞空时间较久的老化海盐气溶胶, $2.0 \mu\text{m}$ 的粗模态则表征新生的海洋飞沫气溶胶。AERONET 反演的谱分布是整层大气的平均分布, 但仍能较好地描述老化海盐粒子和海洋飞沫气溶胶的粒径特征, 进一步证明

表 1 东沙站谱分布三模态拟合参数

Table 1 Fitting coefficients of particle size distribution in Dongsha Island

| Month | Sample number | N_1 | σ_1 | r_{m1} | N_2 | σ_2 | r_{m2} | N_3 | σ_3 | r_{m3} |
|-------|---------------|-------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|----------|
| Jan. | 46 | 1.08 | 1.61 | 9.71×10^{-2} | 1.25×10^{-2} | 2.11 | 2.70×10^{-1} | 1.65×10^{-4} | 1.52 | 2.43 |
| Feb. | 70 | 1.04 | 1.59 | 9.82×10^{-2} | 5.50×10^{-3} | 1.94 | 3.86×10^{-1} | 1.65×10^{-4} | 1.56 | 2.20 |
| Mar. | 134 | 1.02 | 1.53 | 1.03×10^{-1} | 5.90×10^{-3} | 2.10 | 2.99×10^{-1} | 7.80×10^{-5} | 1.55 | 2.16 |
| Apr. | 133 | 1.00 | 1.56 | 1.05×10^{-1} | 6.50×10^{-3} | 2.11 | 3.00×10^{-1} | 6.79×10^{-5} | 1.59 | 2.04 |
| May | 114 | 1.04 | 1.54 | 1.03×10^{-1} | 1.15×10^{-2} | 2.13 | 2.48×10^{-1} | 1.13×10^{-4} | 1.56 | 2.20 |
| Jun. | 74 | 1.01 | 1.55 | 1.00×10^{-1} | 1.40×10^{-2} | 2.11 | 2.70×10^{-1} | 1.44×10^{-4} | 1.55 | 2.23 |
| Jul. | 27 | 1.02 | 1.48 | 9.39×10^{-2} | 1.16×10^{-2} | 2.04 | 2.87×10^{-1} | 9.67×10^{-5} | 1.49 | 2.67 |
| Aug. | 30 | 1.00 | 1.46 | 9.71×10^{-2} | 1.15×10^{-2} | 2.09 | 2.74×10^{-1} | 6.08×10^{-5} | 1.50 | 2.71 |
| Sep. | 64 | 1.06 | 1.61 | 9.82×10^{-2} | 1.24×10^{-2} | 2.14 | 2.56×10^{-1} | 2.01×10^{-4} | 1.64 | 1.91 |
| Oct. | 65 | 1.03 | 1.59 | 1.07×10^{-1} | 8.30×10^{-3} | 2.02 | 2.58×10^{-1} | 1.57×10^{-4} | 1.62 | 1.88 |
| Nov. | 18 | 1.06 | 1.50 | 8.96×10^{-2} | 1.61×10^{-2} | 2.14 | 2.28×10^{-1} | 1.46×10^{-4} | 1.53 | 2.31 |
| Dec. | 31 | 1.05 | 1.58 | 1.01×10^{-1} | 7.40×10^{-3} | 2.10 | 2.86×10^{-1} | 1.44×10^{-4} | 1.57 | 2.08 |

了 AERONET 数据在气溶胶光学特性建模上具有较高的应用价值。

3.3 模型精度评估

选取 AERONET 东沙站 2020 年 10 月 15 日至 2021 年 11 月 22 日 (阶段 2) 的多波段 AOD 观测数据, 对前文建立的气溶胶光学模式进行精度评估, 阶段 2 共包含 7649 组 AOD 光谱。模型精度验证的方式为, 对比由前述月份谱分布模型计算所得的多波段 AOD 光谱和太阳光度计的太阳直射测量结果之间的误差, 统计其均方根误差 (RMSE)。本研究所建模型以 550 nm AOD 为宏观约束参数, 即先由前述模型计算各波段 AOD 之间的光谱相对分布, 将相对分布归一化到 550 nm 波长处, 再乘以太阳光度计的 550 nm AOD 测量结果, 即可得到其他波段的模型 AOD 计算值。在误差统计时, 以不确定度合成的方式叠加 CE-318 太阳光度计的 AOD 观测误差 (0.01), 得到模型在计算各波段 AOD、透过率时的精度, 结果如表 2、表 3 所示。

从阶段 2 的平均结果 (表 2、表 3) 来看, 模型计算 AOD 光谱和透过率在紫外波段的误差较近红外波段大。模型计算的 AOD 光谱在 340 nm 处误差最大, RMSE 为 0.051, 380 nm 处次之, RMSE 为 0.038。模

型计算透过率的 RMSE 在紫外 340 nm、380 nm 处分别为 4.64%、3.59%。在 1020 nm 处, 模型计算 AOD 的 RMSE 为 0.022, 模型计算透过率的 RMSE 为 2.63%, 约为紫外波段的 1/2。模型计算 AOD 的误差在可见波段与太阳辐射计的 AOD 测量误差相当, 为 0.01~0.02。

表 2、表 3 列出了不同月份的模型误差评估结果, 可以看到, 不同月份的模型误差光谱分布一致, 均在紫外波段高估了气溶胶的消光能力, 而在红外波段则有所低估。总体来看, 可见波段的计算结果较好, AOD 误差基本为 0.01~0.02, 相应的透过率误差为 1%~2%。红外和紫外波段的模型计算误差稍大, 且红外波段的误差小于紫外波段, 在 1020 nm 处各月份模型 AOD 计算误差为 0.02~0.03, 在 870 nm 处为 0.01~0.02, 紫外波段的 AOD 计算误差基本为 0.02~0.04。从误差的月份分布来看, 3 月和 7 月各波段的 RMSE 均较其他月份大, 其中 7 月模型 AOD 的 RMSE 可达 0.123, 透过率的 RMSE 为 9.30%。图 6 所示为从 RMSE 最大的 7 月随机抽取的一次对比验证数据, AOD 光谱的测量时间为 2021-07-14T10:09:15。可以看到, 模型计算所得的光谱分布趋势与实测结果一致。

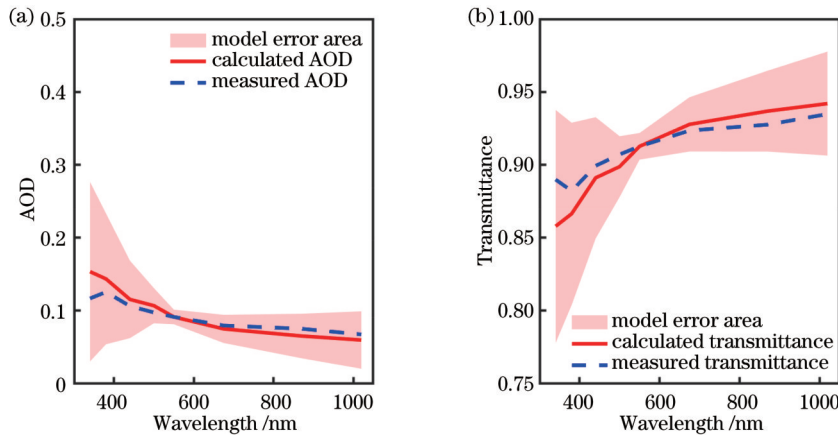


图 6 模型计算结果与 2021-07-14T10:09:15 的东沙站测量结果对比。(a) AOD 光谱对比; (b) 透过率光谱对比

Fig. 6 Comparison of calculated results of aerosol optical model and measured results at 2021-07-14T10:09:15 in Dongsha Island.

(a) AOD spectrum comparison; (b) transmittance spectrum comparison

上述误差评估结果表明, 所建模型可以正确地计算局地气溶胶的光谱消光特性, 其精度满足工程计算需要。可以使用该模型估计气溶胶在无实际观测数据波段上的光学特性, 如对于常用的红外 3~5 μm 、8~12 μm 波段, 在阶段 2 时间范围内, 平均透过率分别为 0.9664 ± 0.0090 和 0.9848 ± 0.0039 。

3.4 气溶胶光学特性计算

所建模型应用于工程计算时, 可通过由原位测量、遥感反演等手段获得的观测波长处的气溶胶光学特性参数来估算其他所需波长处的光学参数。例如, 可通过能见度仪、太阳辐射计或激光雷达等设备测量 550 nm 处 (或附近波长) 的消光系数, 再使用上述模型

估算近红外等波段的消光系数。本节使用 HITRAN 2020 数据库^[19]中的海盐粒子复折射率, 结合前文所建局地气溶胶光学模型, 计算东沙地区局地气溶胶消光系数 β_{ext} 的光谱分布, 光谱范围为 0.2~40 μm , 如图 7 所示。 β_{ext} 光谱以 550 nm 处的计算结果为基准进行归一化, 方便工程存储和分析各月份的光谱相对分布。如图 7 所示, 不同月份的 β_{ext} 光谱相对分布情况差异较大。7 月、11 月的 β_{ext} 曲线长波部分较高, 即红外消光系数较其他月份大, 在图 7 中表现为对应月份的 β_{ext} 曲线位于曲线簇上方, 且 β_{ext} 取值约为消光系数较低的 4 月、8 月的两倍。其他月份的 β_{ext} 曲线若在可见光波段高, 在红外波段就低; 反之, 在可见光波段低, 在红外波

表 2 模型 AOD 光谱误差统计 ($N_{\text{tot}}=7649$)
Table 2 Error statistics for model AOD spectra ($N_{\text{tot}}=7649$)

| Month | RMSE of AOD spectra | | | | | | | Sample number |
|----------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------------|
| | 340 nm | 380 nm | 440 nm | 500 nm | 675 nm | 870 nm | 1020 nm | |
| Jan. | 0.029 | 0.023 | 0.016 | 0.011 | 0.013 | 0.018 | 0.021 | 267 |
| Feb. | 0.035 | 0.024 | 0.017 | 0.013 | 0.013 | 0.023 | 0.027 | 700 |
| Mar. | 0.074 | 0.049 | 0.028 | 0.015 | 0.017 | 0.026 | 0.029 | 853 |
| Apr. | 0.058 | 0.044 | 0.027 | 0.016 | 0.016 | 0.030 | 0.034 | 916 |
| May | 0.029 | 0.025 | 0.017 | 0.011 | 0.013 | 0.017 | 0.020 | 1920 |
| Jun. | 0.041 | 0.031 | 0.021 | 0.015 | 0.014 | 0.024 | 0.030 | 635 |
| Jul. | 0.123 | 0.089 | 0.053 | 0.024 | 0.019 | 0.030 | 0.039 | 381 |
| Aug. | 0.030 | 0.030 | 0.024 | 0.013 | 0.013 | 0.017 | 0.022 | 381 |
| Sep. | 0.035 | 0.029 | 0.017 | 0.015 | 0.012 | 0.018 | 0.019 | 634 |
| Oct. | 0.047 | 0.041 | 0.025 | 0.025 | 0.013 | 0.025 | 0.026 | 601 |
| Nov. | 0.021 | 0.018 | 0.015 | 0.011 | 0.011 | 0.013 | 0.015 | 338 |
| Dec. | 0.034 | 0.020 | 0.012 | 0.011 | 0.011 | 0.013 | 0.013 | 23 |
| Averaged value in period 2 | 0.051 | 0.038 | 0.024 | 0.015 | 0.010 | 0.014 | 0.022 | |

表 3 光谱透过率误差统计 ($N_{\text{tot}}=7649$)
Table 3 Error statistics for spectrum transmittance ($N_{\text{tot}}=7649$)

| Month | RMSE of relative errors / % | | | | | | | Sample number |
|----------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------------|
| | 340 nm | 380 nm | 440 nm | 500 nm | 675 nm | 870 nm | 1020 nm | |
| Jan. | 2.87 | 2.26 | 1.59 | 1.13 | 1.29 | 1.82 | 2.10 | 267 |
| Feb. | 3.40 | 2.39 | 1.67 | 1.26 | 1.26 | 2.34 | 2.70 | 700 |
| Mar. | 6.93 | 4.65 | 2.70 | 1.46 | 1.72 | 2.60 | 2.91 | 853 |
| Apr. | 5.57 | 4.32 | 2.63 | 1.63 | 1.60 | 3.05 | 3.44 | 916 |
| May | 2.92 | 2.54 | 1.72 | 1.15 | 1.29 | 1.67 | 2.04 | 1920 |
| Jun. | 3.99 | 3.06 | 2.10 | 1.52 | 1.44 | 2.45 | 3.09 | 635 |
| Jul. | 9.30 | 7.21 | 4.67 | 2.32 | 2.01 | 2.96 | 3.79 | 381 |
| Aug. | 3.03 | 3.06 | 2.42 | 1.26 | 1.31 | 1.71 | 2.17 | 381 |
| Sep. | 3.49 | 2.84 | 1.70 | 1.53 | 1.19 | 1.78 | 1.92 | 634 |
| Oct. | 4.62 | 4.02 | 2.48 | 2.47 | 1.27 | 2.56 | 2.64 | 601 |
| Nov. | 2.11 | 1.84 | 1.47 | 1.13 | 1.13 | 1.27 | 1.47 | 338 |
| Dec. | 3.34 | 2.02 | 1.20 | 1.12 | 1.05 | 1.29 | 1.31 | 23 |
| Averaged value is period 2 | 4.64 | 3.59 | 2.30 | 1.53 | 1.42 | 2.26 | 2.63 | |

段就相对较高。吸收系数 β_{abs} 曲线如图 8 所示,其月份间的相对分布规律与 β_{ext} 曲线一致。气溶胶粒子的吸收系数在红外波段显著高于可见波段。

光学工程应用主要关注大气窗区的气溶胶消光系数 β_{ext} 和吸收系数 β_{abs} ,因此基于所建气溶胶模型,计算常用的红外中波 3~5 μm 和长波 8~12 μm 波段的 β_{ext} 相对光谱分布(图 9)、从海平面到大气顶的波段平均透过率的月份分布(图 10)。两个波段的透过率变化趋势一致,均表现为春、秋两季出现峰值,而夏季和秋冬之交透过率较低。

4 结 论

基于 AERONET 东沙站的长期气溶胶观测数据,

建立了可用于大气辐射传输特性计算的局地气溶胶光学模型,分析了不同月份间气溶胶光学特性的时间分布,对所建立的模型进行了初步验证。阶段 2 验证数据集的误差分析结果表明,在 AERONET 的测量波段,所提模型的计算误差在红外和可见波段较好。模型 AOD 在可见波段的 RMSE 为 0.01~0.02,红外波段为 0.01~0.03,相应的可见透过率 RMSE 为 1%~2%,红外透过率 RMSE 为 2%~3%。对于 3~5 μm 波段,模型计算透过率的误差为 ± 0.0090 ,8~12 μm 波段的透过率计算误差为 ± 0.0039 。此外,对该模型的工程应用方式进行了说明,计算了常用红外波段(3~5 μm 、8~12 μm)各月份的透过率变化情况,结果呈现春秋两季双峰的结构。

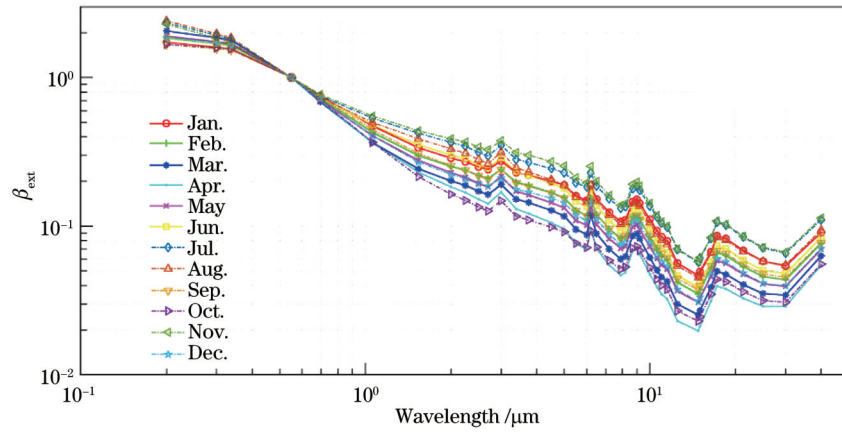


图 7 月份消光系数 β_{ext} 分布

Fig. 7 Distribution of monthly extinction coefficient β_{ext}

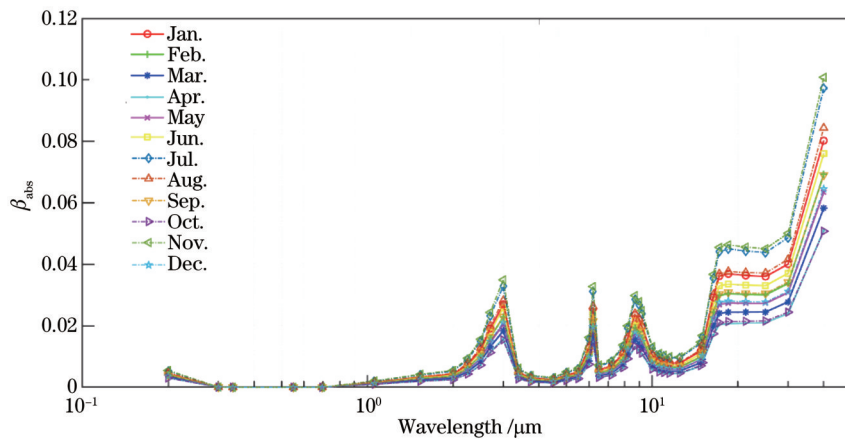


图 8 月份吸收系数 β_{abs} 分布

Fig. 8 Distribution of monthly absorption coefficient β_{abs}

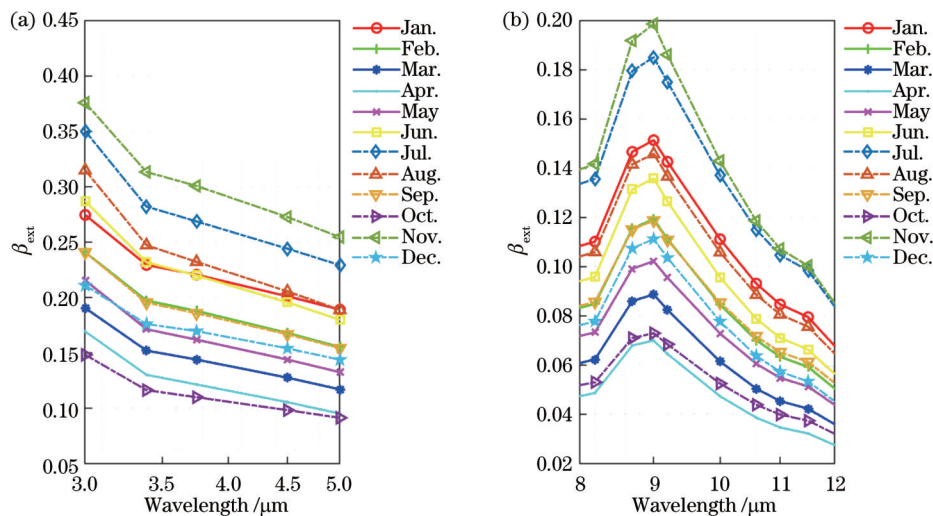


图 9 3~5 μm 、8~12 μm 波段消光系数的月份变化。(a) 3~5 μm ; (b) 8~12 μm

Fig. 9 Monthly tendency of extinction coefficient of 3-5 μm and 8-12 μm wavebands. (a) 3-5 μm ; (b) 8-12 μm

所建局地气溶胶模型给出了各月份的 550 nm AOD、AE 和气溶胶谱分布拟合参数。三模态对数正态分布函数的拟合结果表明,细模态半径约为

0.1 μm ,中间模态的平均模态半径为 0.28 μm ,粗模态半径则约为 2.2 μm ,与 NOVAM 等模型仅在细模态上有一些差别,说明采用地基遥感数据进行气溶胶光学

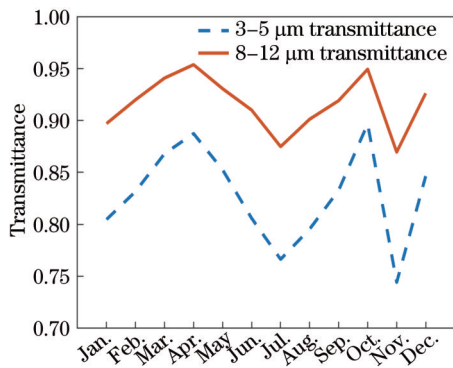


图 10 3~5 μm, 8~12 μm 波段平均透过率的月份变化
Fig. 10 Monthly tendency of averaged transmittance of 3-5 μm and 8-12 μm wavebands

模型搭建切实可行。东沙地区 AOD 整体取值较低, 春季的 AOD 峰值也仅约 0.5, 在时间分布上呈现春季和秋季两个高峰, AE 的月份分布规律与 AOD 一致。

本研究结果表明, 基于 AERONET 长期观测数据, 可以通过较为简便的方式建立精度满足工程计算需要的局地气溶胶光学模型。该方式使用太阳光度计观测(反演)结果, 拓展了建模数据来源, 使之不再局限于近海表面观测。可以使用该模型来估计非实验观测波长处的气溶胶光学特性, 其计算结果的精度依赖于准确的气溶胶谱分布、折射率等参数。使用 AERONET 监测数据, 可以从更长时间尺度上分析局地气溶胶的演变, 不断修正这些参数。但是, 本文所建立的模型为柱平均气溶胶模型, 未考虑气溶胶垂直分布, 在计算具体某个海拔高度的气溶胶光学特性时, 可能会引入误差, 后续将基于激光雷达等垂直廓线观测数据建立分层模式, 提高模型对气溶胶微物理状态描述的准确度。

参 考 文 献

- [1] Li J W, Han Z W, Yao X H, et al. The distributions and direct radiative effects of marine aerosols over East Asia in springtime [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 1913-1925.
- [2] 聂敏, 张帆, 杨光, 等. 不同海面风速对量子卫星星舰通信性能的影响[J]. *物理学报*, 2021, 70(4): 040303.
Nie M, Zhang F, Yang G, et al. Effects of different sea surface wind speeds on performance of quantum satellite-to-ship communication[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(4): 040303.
- [3] Piazzola J, Tedeschi G, Demoisson A. A model for the transport of sea-spray aerosols in the coastal zone[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 155(2): 329-350.
- [4] Jensen D R, Gathman S G, Zeisse C R, et al. Electro-optical propagation assessment in coastal environments (EOPACE): summary and accomplishments[J]. *Optical Engineering*, 2001,

- 40(8): 1486-1498.
- [5] van Eijk A M J, Kusmierczyk-Michulec J T, Piazzola J J. The Advanced Navy Aerosol Model (ANAM): validation of small-particle modes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8161: 816108.
- [6] Gathman S G. Optical properties of the marine aerosol As predicted by the navy aerosol model[J]. *Optical Engineering*, 1983, 22(1): 220157.
- [7] Piazzola J, Bouchara F, de Leeuw G, et al. Development of the Mediterranean extinction code (MEDEX) [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(4): 912-924.
- [8] Gathman S G, Davidson K L. The navy oceanic vertical aerosol model[R]. San Diego, CA: NCCOSC RDT&E DIV, 1993.
- [9] Piazzola J, van Eijk A M J, de Leeuw G. Extension of the navy aerosol model to coastal areas[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(6): 1620-1631.
- [10] Chu Y J, Sheng L F, Liu Q, et al. Size distributions and source function of sea spray aerosol over the South China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2016, 15(4): 569-576.
- [11] Pan Y, Cui S, Rao R. A model for predicting coastal aerosol size distributions in Chinese seas[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(6): 1136.
- [12] Zhang C, Xu H A, Li Z Q, et al. Maritime aerosol optical and microphysical properties in the South China Sea under multi-source influence[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 17796.
- [13] Li Z Q, Zhang Y, Xu H A, et al. The fundamental aerosol models over China region: a cluster analysis of the ground-based remote sensing measurements of total columnar atmosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(9): 4924-4932.
- [14] Li J L, Ge X Y, He Q, et al. Aerosol optical depth (AOD): spatial and temporal variations and association with meteorological covariates in Taklimakan Desert, China[J]. *PeerJ*, 2021, 9: e10542.
- [15] Choi Y, Ghim Y S, Zhang Y, et al. Estimation of surface concentrations of black carbon from long-term measurements at aeronet sites over Korea[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3904.
- [16] Fu D S, Xia X G, Wang J, et al. Synergy of AERONET and MODIS AOD products in the estimation of PM_{2.5} concentrations in Beijing[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10174.
- [17] Zhang X D, Li L, Chen C, et al. Extensive characterization of aerosol optical properties and chemical component concentrations: application of the GRASP/Component approach to long-term AERONET measurements[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 812: 152553.
- [18] Schafer J S, Eck T F, Holben B N, et al. Intercomparison of aerosol volume size distributions derived from AERONET ground-based remote sensing and LARGE *in situ* aircraft profiles during the 2011-2014 DRAGON and DISCOVER-AQ experiments[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(10): 5289-5301.
- [19] Gordon I E, Rothman L S, Hargreaves R J, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 277: 107949.
- [20] Sinyuk A, Holben B N, Eck T F, et al. The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(6): 3375-3411.

Aerosol Optical Model of Dongsha Area Based on AERONET

Chen Shunping^{1,2,3}, Dai Congming^{1,3*}, Liu Nana^{1,3}, Lian Wentao^{1,3,4}, Zhang Cong^{1,2,3},
Wu Fan^{1,3,4}, Zhang Yuxuan^{1,3,4}, Wei Heli^{1,3,4}

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

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

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

⁴School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract

Objective Marine aerosol is the most important natural aerosol source, and can significantly affect radiative budget, climate change, and air quality prediction. A precise numerical model representing the optical characters of local aerosol could help much in relevant research. Photoelectric observation equipment working in the sea area is susceptible to marine aerosol, and the evaluation of its detection ability relies on an accurate aerosol optical model. There are some aerosol models applicable for this purpose, such as the navy aerosol model (NAM) and Mediterranean extinction code (MEDEX), which are based on the data acquired primarily near the sea surface at some specific field sites. It is necessary to build a counterpart model using aerosol observation data from China's sea areas. Ground-based remote sensing mainly provides the column averaged aerosol parameters, which can expand the spatial observation coverage by acting as a collaborative network like an aerosol robotic network (AERONET). We propose a tentative aerosol model based on AERONET to explore the database source in building an aerosol optical model.

Methods AERONET is a commonly employed data source in aerosol-related research, such as air pollution prediction, climate changing analysis, and aerosol physics. Observation sites of AERONET are distributed around the world, making the network suitable to characterize the aerosol parameters in different geographical locations. Level 2.0 products from an island site of AERONET, Dongsha_Island, are utilized because of its relatively long temporal covering range, and the island is far enough to minimize the influence of terrestrial aerosol. An aerosol optical model is proposed based on column averaged parameters, aerosol optical depth (AOD), and retrieved size distributions from spectral and angular AOD. AODs obtained originally at 440 nm and 675 nm by CE-318 sun photometer are spectrally converted to 550 nm using Angstrom exponent derived from the AOD spectrum. Size distributions are averaged to the corresponding month to form a monthly aerosol model. Combined with the sea salt refractive index from the HITRAN 2020 database, spectral AOD could be calculated by Mie theory. Comparisons are conducted between calculated AOD spectra and the observed ones to evaluate the accuracy of the proposed model. During calculating the AOD spectra, the relative distributions of AODs at different wavelengths are normalized according to the observed 550 nm AOD.

Results and Discussions Our efforts prove that building an aerosol optical model using column aerosol parameters acquired by ground-based remote sensing apparatus is viable. Monthly size distributions of local aerosols in Dongsha_Island are fitted by the lognormal distribution functions of three modes. Fitting coefficients show that the mode radii of fine mode, intermediate mode, and coarse mode are approximately 0.1, 0.28, and 2.2 μm respectively (Table 1). Although the fine mode radius of the built size distribution model is different from that of NOVAM, the intermediate and coarse mode radii conform to the values of their counterparts. Regional AOD is also analyzed and exhibits two peaks in the spring and autumn while concentrating on lower than 0.5. Local Angstrom exponent has the same seasonal tendency as AOD. Error analysis is carried out and the key index indicating the accuracy of the proposed model is root mean square error (RMSE). RMSE of spectral AOD is listed in Table 2 while that of the transmittance expressed in percent is tabulated in Table 3. RMSE of AOD is around 0.01–0.02 in the visible band, and takes a bit large value in the infrared band at around 0.01–0.03, while RMSE of transmittance is 1%–2% and 2%–3% in the corresponding band. Employing the proposed model to estimate the transmittance of the band of 3–5 μm (medium wave) and 8–12 μm (long wave) would result in the error of 0.0090 and 0.0039 respectively. The monthly variations of infrared transmittance demonstrate two peaks in the spring and autumn and have the same seasonal trend as AOD in both medium and long wave bands.

Conclusions Based on the long-term aerosol observation data of AERONET station Dongsha_Island, a local aerosol

optical model that can be adopted for calculating atmospheric radiative transport characteristics is built. The monthly aerosol properties are analyzed, and the built model is verified using spectral AOD acquired at the same place. The error analysis results show that this model performs better in infrared and visible bands. The proposed model consists of aerosol size distribution, 550 nm AOD, and Angstrom exponent. The results indicate that the regional aerosol optical model could be developed in a relatively simple way based on ground remote sensing data, and the accuracy could meet the optical calculation requirements. This approach adopts observation data from solar photometers instead of *in-situ* surface experiments to expand the data source in modeling. This model can be utilized in estimating aerosol optical properties at wavelengths other than the ones leveraged by field observation apparatus. However, the proposed model is a column mean aerosol one and does not consider the vertical aerosol distribution. Errors may appear when the aerosol optical properties are calculated at a specific altitude. In the future, a layered model would be built based on the vertical lidar profile to improve the model description accuracy on aerosol microphysical status.

Key words atmospheric optics; aerosol models; marine aerosol; aerosol optical properties; AERONET