

寿县国家气候观象台的冬季大气光学特征

范伟^{1,2,3,*}, 陈凯⁴, 凌新峰³, 荀尚培^{1,2,3}, 于彩霞^{1,2,3}

¹安徽省气象科学研究所, 安徽 合肥 230031;

²大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

³寿县国家气候观象台, 安徽 淮南 232200;

⁴安徽省大气探测技术保障中心, 安徽 合肥 230031

摘要 利用中国气象局寿县国家气候观象台的太阳光度计、浊度仪和颗粒物监测仪, 观测并分析了寿县冬季大气光学特性, 得到了气溶胶光学厚度、散射系数、吸收系数和单次散射反照率的日变化规律。结果表明, 随着气溶胶含量的增加, 颗粒物含量增加, 气溶胶光学厚度、散射系数和单次散射反照率增大, 气溶胶波长指数和大气浑浊度系数也增大。不对称因子、后向散射比、散射系数、单次散射反照率和波长指数表征了气溶胶粒子大小变化规律。

关键词 大气光学; 遥感; 大气光学特征; 多仪器观测

中图分类号 P422

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.050101

Atmospheric Optical Characteristics of National Climate Observation in Shouxian County in Winter

Fan Wei^{1,2,3,*}, Chen Kai⁴, Ling Xinfeng³, Xun Shangpei^{1,2,3}, Yu Caixia^{1,2,3}

¹Anhui Institute of Meteorology and Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China;

³Shouxian National Climatology Observatory, Huainan, Anhui 232200, China;

⁴Anhui Center of Atmospheric Detection Technology Support, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract By using the sun photometer, nephelometer and particle matter monitor of national climatology observatory in Shouxian, the atmospheric optical characteristics in Shouxian are observed and analyzed in winter. The daily variation rules of optical depth of aerosol, scattering and absorption coefficient, and single scattering albedo are obtained. Results show that, with the increasing of aerosol content, particle matter content also increases, the optical depth of aerosol, scattering coefficient and single scattering albedo increase, and the aerosol's wavelength index and atmospheric turbidity coefficient also increase. The size changing of aerosol particles can be characterized by asymmetric factors, backscattering ratio, scattering coefficient, single scattering albedo and wavelength index together.

Key words atmospheric optics; remote sensing; atmospheric optical characteristics; multi-instruments observation

OCIS codes 010.1110; 010.1290; 010.5620

1 引言

大气光学特性严重影响大气辐射和气候变化,

其随时空变化具有不确定性,且受到下垫面的影响。测量并统计当地大气光学参数特征,对于研究实验点气象特征及气候变化等具有重要意义。太阳光度

收稿日期: 2018-08-30; 修回日期: 2018-09-08; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0201902)、国家自然科学基金(41705014)、中国科学院 STS 科技服务网络计划区域重点项目(KFJ-STQ-QYZD-022)、安徽省自然科学基金(1708085MD95, 1608085MD84)、淮河流域气象开放研究基金(HRM201506)

* E-mail: warrenfw@126.com

计通过测量太阳直射,反演大气气溶胶参数(如气溶胶光学厚度、Ångström 系数变化等)得到气溶胶光学特性变化,实现对空气质量的监测等^[1];浊度仪直接测量气溶胶散射系数及后向散射系数,反演得到气溶胶后向散射比、不对称因子和单次散射反照率等,从而得到气溶胶大小成分变化、散射和吸收等大气光学特征,及其与颗粒物(PM)含量关系等^[2];颗粒物监测仪可以得到大气中污染物实时含量,如PM 浓度^[3]。

大气气溶胶光学特性的研究主要是对太阳光度计测量结果进行时间序列统计分析,如 Salinas 等^[4]在新加坡应用一年(2006 年 11 月至 2007 年 10 月)测量数据(数据质量控制在 1.5/2.0),研究气溶胶光学厚度逐月和逐季节的变化;美、法两国合作采用太阳光度计在全球布设 500 多个站点监测全球气溶胶变化,形成气溶胶网,并与南京信息工程大学合作,通过广泛布设太阳光度计,初步得到了不同代表性区域的气溶胶长期观测结果;李正强等^[5]、Xie 等^[6]详细介绍了典型区域建立的太阳-天空辐射计观测网(SONET)站点的基本情况,以及太阳光度计的参数、测量原理、功能和数据处理方法,得到了城市、乡村、海洋以及沙漠四种模式下的气溶胶参数模型和变化分析结果。另外,范伟等^[7-8]应用连续波长太阳光度计和能见度仪在合肥及沿海进行了大气透过率、大气光学厚度、气溶胶消光系数及气溶胶标高等方面的研究。

近几年,国内学者应用太阳光度计细致研究了气溶胶参数,得到了诸多有价值的结果。Che 等^[9]详细分析了 2009 年至 2013 年东北地区的气溶胶光学特征;李正强等^[10]研究了北京和印度坎普尔地区沙尘和精细粒子的气溶胶光学、物理特性和成分;Ma 等^[11]利用 SONET 测量反演了中国中部嵩山的气溶胶光学厚度。综合这些研究结果可以得出中国部分区域气溶胶特性。太阳光度计在仪器参数定标应用领域也有相关应用,其用来验证仪器标定方法和精度。邱刚刚等^[12]利用太阳光度计获得的大气参数以及地表反射和漫总比结果,对中分辨率成像光谱仪(MODIS)的 1~7 通道开展了场地自动化观测技术绝对辐射定标实验,获取的表观辐亮度与 MODIS 获取相对偏差小于 4%;黄红莲等^[13]利用偏振相机反演渤海湾上空气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数,并利用太阳光度计数据进行验证,两者具有很好的一致性;翟文超等^[14]和徐秋云等^[15]通过太阳光度计的偏振和无偏振通道研究

了通道定标方法,得到了可靠性很高的算法。应用应用浊度仪方面,国外通过反演退偏振比、极化因子,研究了近地面能见度、PM2.5 浓度、PM10 浓度与散射系数间的关系,以及单次散射反照率与不对称因子的变化规律^[16-19];国内进行了冬季大气气溶胶散射光学特性分析和气溶胶吸收和散射特性的日变化特征统计分析^[2,20]。而应用颗粒物监测仪方面,主要进行 PM 颗粒物浓度测量及分析,大气颗粒物 PM 浓度变化与气象因素关系分析,不同类型气溶胶分类和对比分析,以及夏季和冬季颗粒物浓度变化,分析其与气象要素关系等^[3,21-23]。目前,尚未发现综合应用三种仪器进行大气光学观测的研究,综合分析三种仪器测量反演的大气参数,可相互印证测量结果的准确性,因此进行这方面的研究很有必要。

为获取高准确性,高精度,且能反映年代——世纪时间尺度变化的气温、降水等基准观测数据,中国气象局选择了安徽寿县、内蒙锡林浩特、甘肃张掖、云南大理和广东电白 5 个具有区域代表性的气象观测站,建设了用于开展长期连续稳定进行气候观测的国家气候观象台,并已开展了多项气候观测与技术研发与实验。然而,局部复杂的气溶胶光学特性依然会给当地气候变化、直接间接强迫辐射等评估带来很大的不确定性^[6],因此,需要进行更多的气溶胶光学和微物理特性研究。

选择的实验点为寿县地处安徽省淮河南岸,属北亚热带半湿润季风气候,冬冷夏热、冬干夏湿特征明显,为气候敏感区。所处的淮河流域是我国的重要农业区之一,平坦农田是下垫面的最主要成分,农田覆盖区占该气候类型区总面积的 49.9%,属于中国气候观测系统(CCOS)确定的黄淮农业生态观测区。该地区能够代表东亚季风区的主要气候条件和生态环境状况,又是我国农业生产经营活动的典型区域之一,所以是进行大气光学参数测量和分析的理想地带,而且目前也尚未有详细的大气光学观测。

本文应用设置在安徽省寿县窑口镇—中国气象局寿县国家气候观象台(32°26'N,116°47'E)的太阳光度计(CE318)、浊度仪(Aurora3000)和颗粒物监测仪(Grimm180)获取的部分数据,对当地冬季(2015 年 11 月至 2016 年 2 月,以及 2016 年 11 月至 2017 年 2 月)干燥的大气光学参数进行监测及相互验证,经统计分析得到当地气溶胶光学厚度、气溶胶参数相互关系、气溶胶散射系数与 PM 间关系,以及气溶胶 Ångström 系数、散射系数、吸收系数、后向

散射比、不对称因子和单次散射反照率的多日测量结果平均值的变化规律,为进一步研究当地大气光学特征,分析气候变化,评估大气环境污染等打下基础。

2 仪器性能及测量算法

2.1 太阳光度计

大气气溶胶光学厚度可反映气溶胶粒子对太阳辐射的消光作用。测量太阳直接辐射后,可以反演得到整层大气气溶胶光学厚度、大气透过率和气溶胶光学特性等^[1]。设置在寿县观象台的 CE318 型太阳光度计(法国, CIMEL 公司)共有 9 个通道(不同波段),分别为 340, 380, 440, 500, 670, 870, 937, 1020 和 1640 nm 波段。其可以自动跟踪太阳进行太阳直接辐射测量和太阳等高度角天空扫描、太阳主平面扫描等。光学头瞄准筒视场角大小为 1.2°, 半波宽度在 340 nm 和 380 nm 为 4 nm, 其他波段为 10 nm, 四象限太阳跟踪器跟踪精度 $\geq 0.1^\circ$, 太阳直接辐射测量误差 $\leq 2\%$, 天空散射辐射测量误差 $\leq 5\%$ ^[24]。

采用 Ångström 经典方程^[25-27] 计算气溶胶 Ångström 系数, 大气气溶胶光学厚度 τ 随波长 λ 的变化为

$$\tau_\lambda = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (1)$$

式中 α 为气溶胶波长指数, 数值越大表示气溶胶粒子越小, β 为大气浑浊度系数, 表示大气中气溶胶含量(不包括云雾粒子), 用来监测空气污染状况。选择两个已知波长 λ_1 、 λ_2 及其对应的气溶胶光学厚度测量结果 τ_{λ_1} 、 τ_{λ_2} , 对(1)式两边取对数, 可计算得到

$$\alpha = \ln(\tau_{\lambda_1}/\tau_{\lambda_2})/\ln(\lambda_2/\lambda_1), \quad (2)$$

$$\beta = \tau_{\lambda_1} \lambda_1^\alpha = \tau_{\lambda_2} \lambda_2^\alpha. \quad (3)$$

当 $\alpha < 0.75$ 时, 气溶胶粒子以粗粒子为主; 当 $0.75 < \alpha < 1.2$ 时, 粗细粒子所占比例复杂; 当 $\alpha > 1.2$ 时, 气溶胶粒子以细粒子为主。粗粒子模式气溶胶主要来源为自然源, 而细粒子模式气溶胶的主要来源为人为源, 人类活动越活跃, 气溶胶粒子细粒子所占比例则越高^[2, 28]。

中心波长间隔越大, 计算出的 α 越可靠^[28]。选择 440 nm 和 870 nm 波段, 应用(2)式计算得到 α , 代入(3)式得到 β , 将任意 λ 代入(1)式, 反演出 λ 处气溶胶的光学厚度。

2.2 浊度仪

浊度仪 Aurora3000^[29] 可以在 3 个波长(450, 525, 635 nm)对大气中颗粒物的光学散射进行实时

连续测量。光散射角度为 $10^\circ \sim 170^\circ$, 测量范围为 $0.25 \sim 2000 \text{ mm}^{-1}$, 从总散射中除去后向散射值($90^\circ \sim 170^\circ$)可计算得到前向散射值。其用于能见度测量和颗粒物监测, 以及测量多种不同原因造成的空气污染和气溶胶光散射。采用 Ecotech 创新的发光二极管(LED)灯源, 可同时测量以上三种波长对应的气溶胶总散射系数和后向散射系数, 分析得到气溶胶后向散射比、不对称因子、单次散射反照率和吸收系数等, 从而得到气溶胶粒子大小随时间变化的规律。

450 nm(蓝)波段用于探测细、极细颗粒物(木材燃烧, 汽车尾气); 525 nm(绿)波段用于能见度测量; 635 nm(红)波段用于测量大颗粒物(例如花粉、海盐)。

气溶胶后向散射比 b 反映气溶胶细小粒子含量, 其计算公式为^[2]

$$b = \delta_{\text{bscat}}/\delta_{\text{scat}}, \quad (4)$$

式中 δ_{bscat} 为气溶胶后向散射系数, δ_{scat} 为总散射系数。

不对称因子 g 为相函数的一阶矩, 是辐射传输中一个重要参数, 表示前向散射的相对强度。单次散射反照率 ω 为散射系数与消光系数之比, 表示气溶胶散射强度。对于大气干燥的冬季, 两者的计算公式分别为^[2, 30]

$$\delta_{\text{bscat}}/\delta_{\text{scat}} = (1 - g)/2, \quad (5)$$

$$\omega = g + 0.2. \quad (6)$$

2.3 颗粒物监测仪

颗粒物监测仪(Grimm180^[23], Grimm 公司, 德国)利用 90° 激光散射原理, 采用受水汽影响较小的 685 nm 激光, 可以得到大气颗粒物的数量和所属粒径范围, 利用不同密度自动计算大气颗粒物的质量浓度并记录。其可实时测量 31 个粒径段的气溶胶数浓度, 以及连续时间大气中的 PM10、PM2.5 和 PM1.0 浓度, 质量浓度范围为 $1 \sim 1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 数据频率为 5 min, 其中各粒径段粒子直径的起始值分别为 0.25、0.28、0.3、0.35、0.4、0.45、0.5、0.58、0.65、0.7、0.8、1.0、1.3、1.6、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0、6.5、7.5、8.0、10.0、12.5、15.0、17.5、20.0、25.0、30.0 和 $32.0 \mu\text{m}$ 。

3 光学特征分析

选择寿县冬季晴天, 剔除云干扰数据, 得到白天无云遮挡, 每天测量超过 6 h 的太阳光度计数据, 共 164 天。从气溶胶含量较高的数据中选择 72 天数

据(选择能见度低于 10 km,下同)作为 I 类天气系统;选择气溶胶含量较低的 56 天数据(选择能见度高于 10 km,下同)作为 II 类天气系统。以能见度差异区分两类天气系统,比较分析大气光学参数。除 3.1.1 节外,所有结果均为多天测量结果平均值。

3.1 大气光学参数变化规律研究

3.1.1 气溶胶光学厚度日变化特征

选择具有代表性的 5 个日期的测量结果进行分析,通过(1)式计算 550 nm 处气溶胶光学厚度 τ ,结果如图 1 所示。

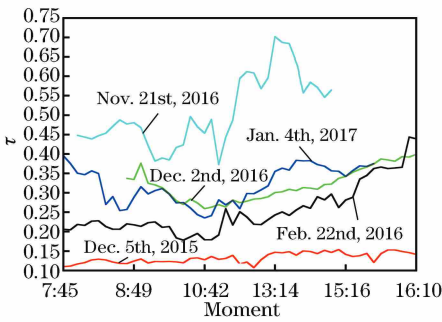


图 1 气溶胶光学厚度的日变化

Fig. 1 Daily variation of optical depth of aerosol

2015 年 12 月 5 日,大气气溶胶光学厚度全天变化稳定,当天冷锋刚过境,天气晴朗,无云,风速较小,能见度超过 25 km。气溶胶光学厚度日变化浮动在 0.05 数值范围内,激光雷达测得的边界层内气溶胶消光小于 0.2 km^{-1} ,污染不明显, τ 值日变化平缓,大气清洁,在局部区域内大气层结比较稳定。

2016 年 2 月 22 日,大气气溶胶光学厚度呈上升趋势,早晨,气溶胶光学厚度为 $0.20 \sim 0.25$;午后, τ 值明显上升,整个下午处于上升趋势,直至测量结束,数值飙升至 0.45,全天 τ 值变化幅度近一倍。出现这种情况是因为上午大气层结比较稳定,风速 1 级,能见度约为 18 km,激光雷达测量的边界层内气溶胶消光小于 0.3 km^{-1} ;午后大气层结不稳定,

起大风,风速增大到 5 级,带来大量粒子输入,能见度下降到 10 km 左右,边界层内气溶胶消光超过 0.5 km^{-1} ,污染增大。

2016 年 12 月 2 日,大气气溶胶光学厚度早晚大,中午小。早晨和傍晚气溶胶光学厚度在 0.35 左右,中午在 0.25 左右。气溶胶含量变化比较稳定,全天变化在 0.1 之间。实验记录显示,当日早晚有人在观测场附近进行焚烧,造成了大气污染,而中午焚烧停止,因此中午气溶胶光学厚度相比早晚较低,气溶胶消光系数同样从 0.35 km^{-1} 增大到约 0.5 km^{-1} 。

2017 年 1 月 4 日,大气气溶胶光学厚度在半上午和半下午处于峰值,其余较低,即双峰状。早晨 τ 值偏高,在 0.40 左右,后降至 0.25,在半上午和半下午数值均有升高,出现双峰值,气溶胶边界层稳定在 1 km 高度,这是因为冬季夜里形成逆温层,不利于污染物扩散,气溶胶消光系数达到 0.5 km^{-1} ,能见度低于 8 km,因此早晨 τ 值偏大;午后太阳辐射对地面进行加热,大气层结不稳定,形成对流,污染物扩散,此时 τ 值开始下降,能见度升至 15 km 左右,测量气溶胶消光系数为 $0.20 \sim 0.25 \text{ km}^{-1}$;但是在 8~9 时及 14~15 时, τ 值升高,观测场测量风速为 4~5 级,带来粒子输入造成,能见度再次降低至 10 km 以下,而同期测量气溶胶消光系数达到 0.4 km^{-1} 以上。

2016 年 11 月 21 日,全天能见度低于 10 km,在 14~15 时低于 5 km,属于 I 类天气。可以看到,气溶胶光学厚度全天起伏明显,相比之前个例,数值均较大,最大值达到 0.70,说明当天中午污染较严重;而消光系数全天超过 0.5 km^{-1} 。

3.1.2 散射系数

图 2 和图 3 给出了两类天气系统下总散射系数和后向散射系数的日平均变化,横坐标为时刻值,纵坐标分别为总散射系数和后向散射系数。

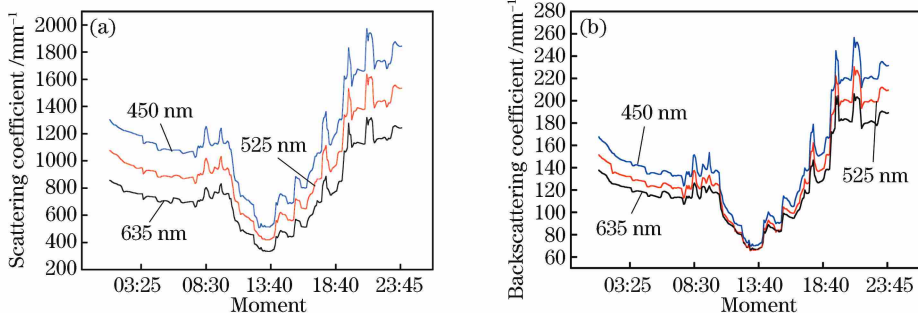


图 2 散射系数的日平均变化(I 类)。(a)总散射系数;(b)后向散射系数

Fig. 2 Daily average variation of scattering coefficient (the first kind). (a) Total scattering coefficient; (b) backscattering coefficient

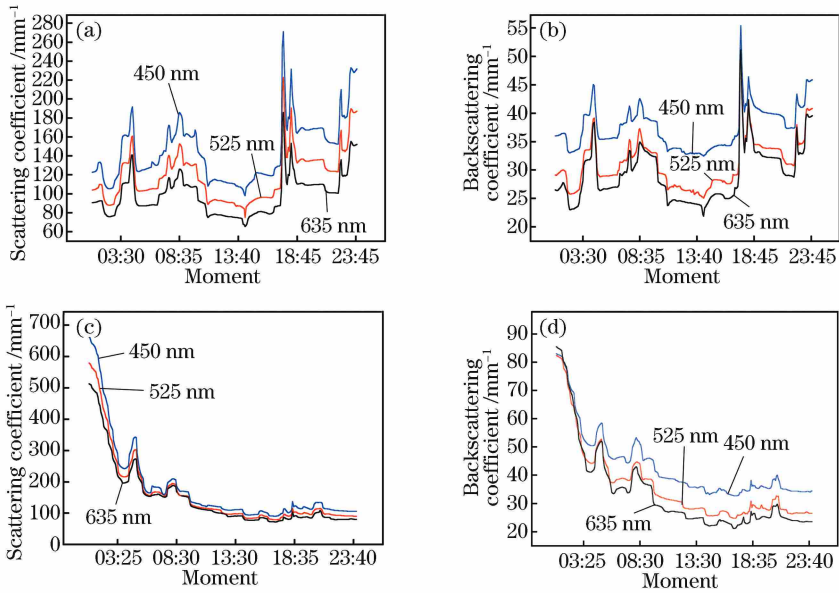


图3 散射系数的日平均变化(Ⅱ类)。(a)总散射系数(能见度高于20 km);(b)后向散射系数(能见度高于20 km);(c)总散射系数(能见度为10~20 km);(d)后向散射系数(能见度为10~20 km)

Fig. 3 Daily average variation of scattering coefficient (the second kind). (a) Total scattering coefficient with visibility above 20 km; (b) backscattering coefficient with visibility above 20 km; (c) total scattering coefficient with visibility within 10-20 km; (d) backscattering coefficient with visibility within 10-20 km

从图2可以看到,三种波长对应的曲线变化趋势基本一致,波长越短,对应的散射系数值越大;后向散射系数走势和总散射系数一致,总散射系数较后向散射系数大了近一个数量级。

两者均为夜间数值较大,然后缓慢减少,散射系数均出现2个峰值,峰值出现在9时和19时左右,两峰值之间数值呈现先减少再增大,峰值大小上也有区别,傍晚时分更大。

从图3可以看到,散射系数日变化毫无规律可循,三种波长对应的曲线变化趋势仍基本一致,后向散射系数和总散射系数走势也一致,且总散射系数数值明显大于后向散射系数。

3.1.3 单次散射反照率

单次散射反照率 ω 的结果如图4和图5所示。

从纵坐标可以看到,Ⅰ类天气散射在消光中所占比例较大,而Ⅱ类天气散射在消光中所占比例有所下降; ω 值越大,说明气溶胶浓度增加,空气污染加重,与实际情况相符。不论Ⅰ类还是Ⅱ类天气,午后 ω 值开始下降,傍晚开始上升,说明午后气溶胶散射能力下降,应该是测量点气溶胶浓度下降造成;傍晚气溶胶散射能力再次增强,说明测量点气溶胶浓度开始增加。上述结果均为波长越短, ω 值越大,与散射系数随波长变化一致。

3.1.4 吸收系数

利用单次散射反照率 ω 和散射系数可以得到

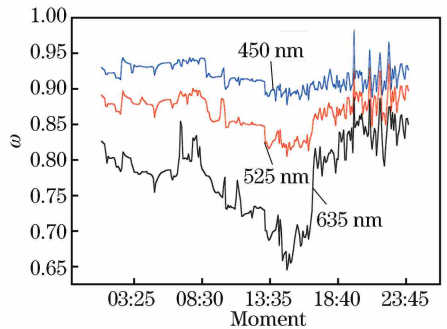


图4 单次散射反照率的日平均变化(Ⅰ类)
Fig. 4 Daily average variation of single scattering albedo (the first kind)

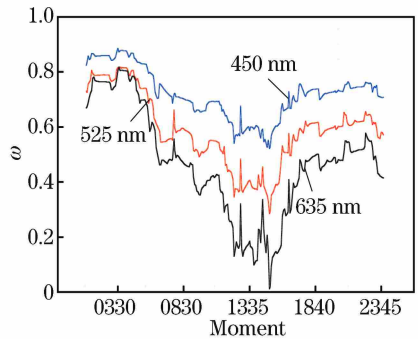


图5 单次散射反照率的日平均变化(Ⅱ类)
Fig. 5 Daily average variation of single scattering albedo (the second kind)

吸收系数,将散射系数除以 ω 可以得到消光系数,

消光系数再减去散射系数即可得到吸收系数 A 。图 6 和图 7 分别给出了两类天气系统下吸收系数日变化图。

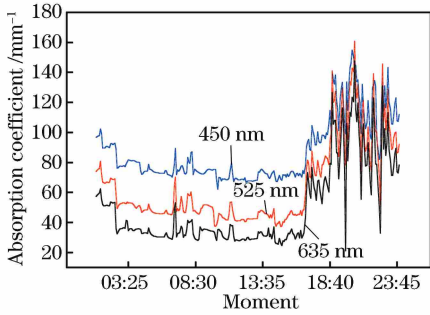


图 6 吸收系数的日平均变化(I类)

Fig. 6 Daily average variation of absorption coefficient (the first kind)

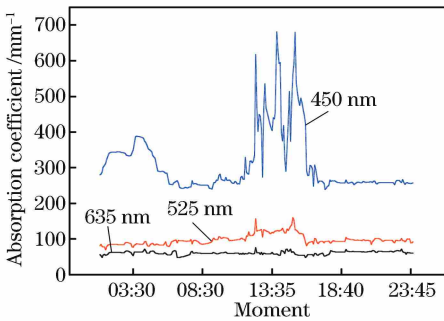


图 7 吸收系数的日平均变化(II类)

Fig. 7 Daily average variation of absorption coefficient (the second kind)

从图 6 和图 7 可以看到,随着波长增加,吸收系数减少,这与散射系数和单次散射反照率规律相同。I类天气气溶胶吸收系数数值是散射系数数值的 10%左右,而II类天气,短波 450 nm 对应的吸收系数增强,说明相比I类天气,II类天气在短波上吸收能力增加。

2017 年 12 月至 2018 年 2 月,当地气溶胶折射率虚部谱分布如图 8 所示,横坐标为波长,纵坐标为气溶胶虚部值。冬季虚部明显变化。0.44 μm 虚部值大于 0.675 μm 虚部,说明短波吸收增加。这可能是棕色碳导致短波区域吸收增加^[31],低温下碳不完全燃烧过程产生的^[32-33]。测量地点冬季采用煤炭及木材取暖、做饭,这可能是冬季气溶胶折射率虚部开始在短波偏大的原因。而气溶胶折射率虚部反映气溶胶吸收效应,数值越大气溶胶吸收越强。

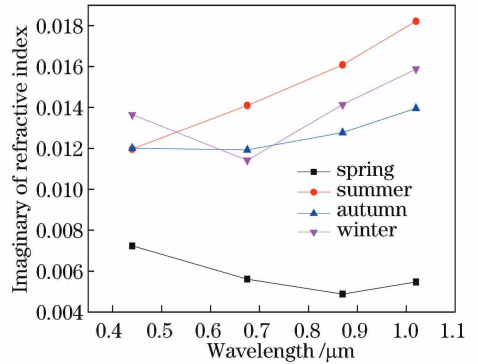


图 8 气溶胶折射率虚部的季节性平均结果

Fig. 8 Seasonal average results of imaginary of aerosol refractive indices

3.2 近地面气溶胶浓度变化及其与大气光学参数的关系

选择 450 nm 波长的散射系数,分别与 PM1.0、PM2.5 和 PM10 含量进行相关性分析,结果如图 9 和图 10 所示。横坐标为对应于 450nm 波长的总散射系数,纵坐标分别为对应 PM1.0、PM2.5 和 PM10 的含量。拟合公式中, x 为对应 450nm 波长的总散射系数, y 分别为对应 PM1.0、PM2.5 和 PM10 的含量, R 为相关性。

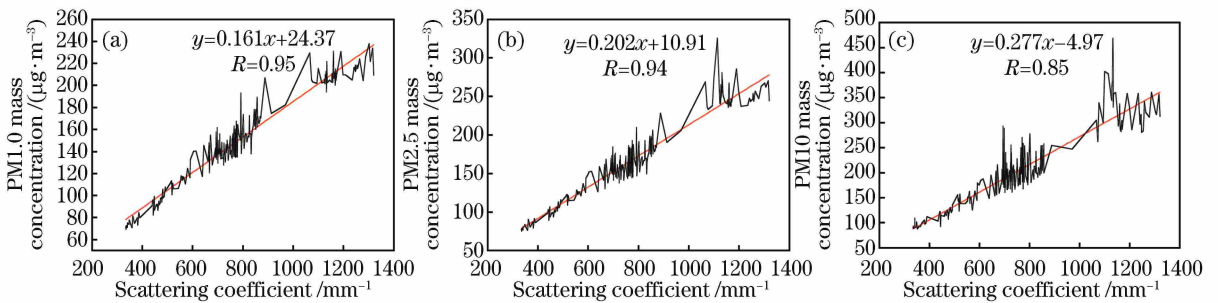


图 9 散射系数($\lambda = 450 \text{ nm}$)和 PM 质量浓度的日平均相关性(I类)。(a) PM1.0;(b) PM2.5;(c) PM10

Fig. 9 Daily average correlation between scattering coefficient ($\lambda = 450 \text{ nm}$) and PM mass concentration (the first kind). (a) PM1.0; (b) PM2.5; (c) PM10

I类天气,散射系数与 PM1.0、PM2.5 和 PM10 均具有良好的正相关关系。散射系数与 PM1.0 和

PM2.5 的相关性均大于 90%,与 PM10 则差一些; II类天气,散射系数明显下降,且和 PM 浓度也有很

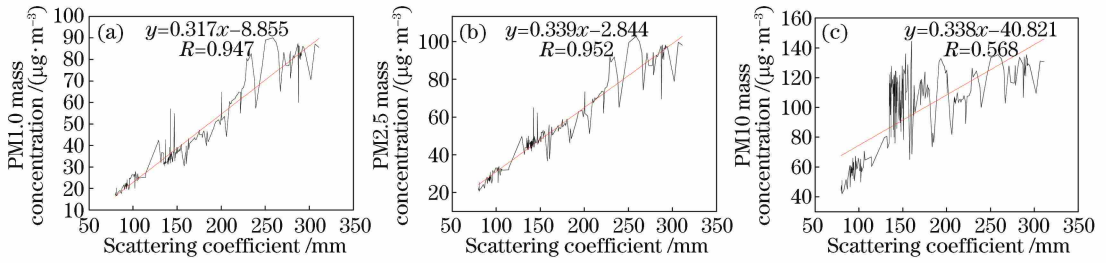


图 10 散射系数($\lambda=450\text{ nm}$)和 PM 质量浓度的日平均相关性(Ⅱ类)。(a) PM1.0; (b) PM2.5; (c) PM10
 Fig. 10 Daily average correlation between scattering coefficient ($\lambda=450\text{ nm}$) and PM mass concentration (the second kind). (a) PM1.0; (b) PM2.5; (c) PM10

好的正相关趋势,散射系数和 PM1.0、PM2.5 的相关性超过 90%,而与 PM10 则较差,这和 I 类天气得到结果一致,如图 10 所示。分析结果说明,散射系数能够反映气溶胶粒子乃至小粒子的浓度变化,对小粒子贡献更加敏感。

比较图 9 和图 10 可知,随着气溶胶增加,Ⅰ类天气 PM 含量更高,对应的气溶胶光学厚度 τ 、散射系数和单次散射反照率 ω 均上升(图 2~5), α 和 β 也随之升高,同时可以证明气溶胶浓度增加,大气浑浊度增加,PM 浓度随之增大。

3.3 气溶胶粒子大小与大气光学参数关系研究

3.3.1 气溶胶后向散射比

Ⅰ类天气测量结果如图 11 所示。

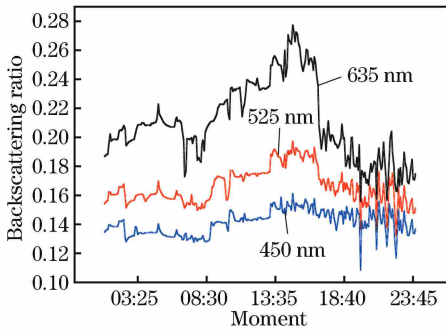


图 11 气溶胶后向散射比的日平均变化(Ⅰ类)
 Fig. 11 Daily average variation of backscattering ratio of aerosol (the first kind)

从图 11 可以看到,三种波长对应的后向散射比变化趋势基本接近,随着波长增加,对应的后向散射比数值逐渐增加。后向散射比数值 < 0.3 ,说明大气中气溶胶粒子主要是由细小粒子组成,其变化趋势与对应日期太阳光度计实测 α 日平均结果变化趋势一致,且实测 $\alpha > 1.20$,也说明Ⅰ类天气气溶胶主要由细粒子构成^[34]。而细粒子模式气溶胶的主要来源为人为源,人类活动越活跃,气溶胶粒子细小粒子所占比例则越高。因此,污染天气出现主要还是人类

自身活动造成。

Ⅱ类天气测量结果如图 12 所示。

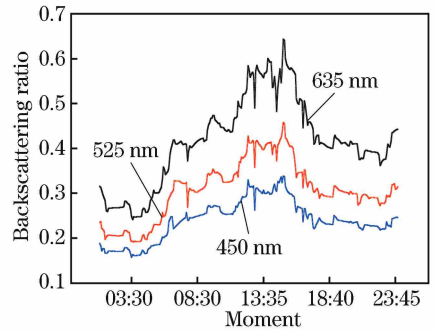


图 12 气溶胶后向散射比的日平均变化(Ⅱ类)
 Fig. 12 Daily average variation of backscattering ratio of aerosol (the second kind)

相比于Ⅰ类,Ⅱ类天气后向散射比数值明显增大,基本上数值 < 0.7 ,说明空气中粗粒子所占比例较大,其变化趋势与对应日期太阳光度计实测 α 日平均结果变化趋势一致,且实测 $\alpha < 0.75$,也说明Ⅱ类天气气溶胶主要由粗粒子构成^[34]。粗粒子主要来源为自然源,所以在观测点人工造成的气溶胶含量很少。

3.3.2 气溶胶不对称因子

Ⅰ类天气测量结果如图 13 所示。

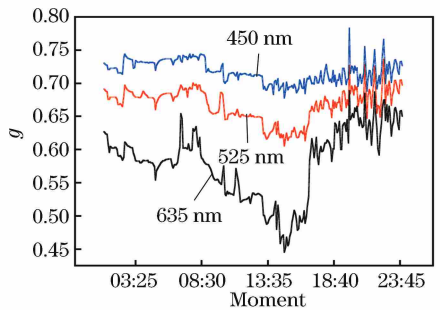


图 13 气溶胶不对称因子的日平均变化(Ⅰ类)
 Fig. 13 Daily average variation of asymmetry factor of aerosol (the first kind)

I类天气不对称因子在半上午均出现一次波峰值,半下午出现波谷值,说明在半上午对气溶胶的贡献大部分是细小粒子,而在半下午细小粒子数量减少。从纵坐标可以看出, g 值偏高,说明细小粒子对气溶胶散射系数贡献偏大。这和气溶胶后向散射比(图11)及实测 α 日平均结果走势相反,也相互印证了全天气溶胶粒子大小的变化。

II类天气测量结果如图14所示。

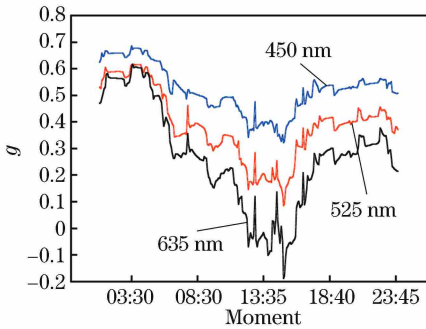


图14 气溶胶不对称因子的日平均变化(II类)

Fig. 14 Daily average variation of asymmetry factor of aerosol (the second kind)

全天均出现最大值和波谷值,最大值出现在3时左右,波谷值出现在12~16时左右。从走势看,凌晨细小粒子偏多,中午到半下午细小粒子数量开始减少,16时后细小粒子数量又开始增加,17时后开始骤增。与I类天气结果一样,不对称因子和后向散射比(图12)及实测 α 日平均结果走势相反。此外,相比于I类天气,II类天气气溶胶不对称因子数值有所下降,甚至635 nm对应的不对称因子出现负值,说明相函数峰值出现在朝后的方向($90^\circ \sim 180^\circ$)^[35],大粒子成分比例明显增多,因此细小粒子对散射系数贡献小于I类天气贡献,这也和2.2节结论一致。

而且可以看到,单次散射反照率 ω 和不对称因子 g 变化规律一致,I类天气气溶胶浓度较高时,小粒子成分增多,散射在消光中所占比例较大,而II类天气气溶胶浓度较低时,大粒子成分增多,散射在消光中所占比例有所下降。

综上所述,PM含量增加,对应着气溶胶光学厚度、散射系数、气溶胶波长指数和浑浊度均有上升,反之均下降;不对称因子、后向散射比、散射系数、单次散射反照率及波长指数和气溶胶粒子大小变化存在相关关系,可相互证明气溶胶粒子大小变化规律。

4 结 论

利用太阳光度计、浊度仪和大气颗粒物监测仪,

结合经验公式进行反演气溶胶粒子的性质、大小变化和PM浓度含量等大气光学参数,得到了对应两种气溶胶含量的干燥大气光学参数变化的准确规律,仪器测量结果相互验证,互为补充,而且计算公式简单易于操作,说明这三种仪器在大气光学参数,特别是辐射特性和物理属性监测方面具有广阔应用前景,也弥补了尚未使用三种仪器同时进行大气光学特征综合观测的空白。针对寿县位于淮河流域中部这一特殊位置,后续将进一步研究其他季节大气光学参数,以期对淮河流域中部全年大气光学特征、气候变化以及大气环境污染评估等奠定研究基础。

参 考 文 献

- [1] Yang Z F, Zhang X Y, Che H Z, *et al.* An introductory study on the calibration of CE318 sunphotometer [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(3): 297-306.
杨志峰, 张小曳, 车慧正, 等. CE318型太阳光度计标定方法初探[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 297-306.
- [2] Hu B, Zhang J, Zhang W, *et al.* A study of the properties of atmospheric aerosol over Lanzhou in winter and applications by using integrating nephelometer [J]. Journal of Lanzhou University, 2005, 41(3): 19-25.
胡波, 张婕, 张武, 等. 应用积分浑浊度仪研究兰州城市冬季大气气溶胶[J]. 兰州大学学报, 2005, 41(3): 19-25.
- [3] Wang X X, Wang J, Xiang X, *et al.* Particulate matter concentration change in the atmosphere in Anshan [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(6): 656-662.
王绪鑫, 王冀, 向旬, 等. 鞍山大气颗粒物浓度的变化特征[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 656-662.
- [4] Salinas S V, Chew B N, Liew S C. Retrievals of aerosol optical depth and Ångström exponent from ground-based Sun-photometer data of Singapore [J]. Applied Optics, 2009, 48(8): 1473-1484.
- [5] Li Z Q, Li D H, Li K T, *et al.* Sun-sky radiometer observation network with the extension of multi-wavelength polarization measurements [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 495-519.
李正强, 李东辉, 李凯涛, 等. 扩展多波长偏振测量的太阳: 天空辐射计观测网[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 495-519.
- [6] Xie Y S, Li Z Q, Li D H, *et al.* Aerosol optical and microphysical properties of four typical sites of

- SONET in China based on remote sensing measurements[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9928-9953.
- [7] Fan W, Han Y, Wang Y, *et al.* Analysis on aerosol scale height measured at inland and coastal zone[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 532-535.
范伟, 韩永, 王毅, 等. 内陆和沿海地区大气气溶胶标高的测量分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 532-535.
- [8] Fan W, Wang Y, Rao R Z. Measurement of theatmospheric transmittance from visible to near infrared bands[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(3): 402-407.
范伟, 王毅, 饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气光谱透过率的测量研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(3): 402-407.
- [9] Che H Z, Zhao H J, Wu Y F, *et al.* Analyses of aerosol optical properties and direct radiative forcing over urban and industrial regions in Northeast China [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2015, 127(3): 345-354.
- [10] Li Z Q, Li L, Zhang F X, *et al.* Comparison of aerosol properties over Beijing and Kanpur: optical, physical properties and aerosol component composition retrieved from 12 years ground-based sun-sky radiometer remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(4): 1520-1535.
- [11] Ma Y, Li Z Q, Li Z Z, *et al.* Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over mountains in central China based on a sun-sky radiometer site of SONET[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 111.
- [12] Qiu G G, Li X, Wei W, *et al.* Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0701001.
邱刚刚, 李新, 韦玮, 等. 基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标试验与分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0701001.
- [13] Huang H L, Yi W N, Qiao Y L. Validation of retrieving aerosol optical parameters over the sea using airborne directional polarized camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0601004.
黄红莲, 易维宁, 乔延利. 基于航空偏振相机的海上气溶胶光学特性反演与验证[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0601004.
- [14] Zhai W C, Li J J, Zheng X B, *et al.* Research on method of calibrating sun channels of sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412004.
翟文超, 李健军, 郑小兵, 等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412004.
- [15] Xu Q Y, Zheng X B, Zhang W, *et al.* Advanced calibration method for sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1337-1342.
徐秋云, 郑小兵, 张伟, 等. 太阳辐射计先进定标方法研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1337-1342.
- [16] Charlson R J. The integrating nephelometer [J]. *Atmospheric Technology*, 1980, 12: 10-14.
- [17] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, *et al.* Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(19): 3237-3250.
- [18] Shendrikar A D, Steinmetz W K. Integrating nephelometer measurements for the airborne fine particulate matter (PM_{2.5}) mass concentrations[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 1383-1392.
- [19] Delene D J, Ogren J A. Variability of aerosol optical properties at four north American surface monitoring sites[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(6): 1135-1150.
- [20] Cao X J, Zhang L, Li X, *et al.* Analyses on aerosol absorption and scattering properties in Zhangye region[J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(5): 1246-1253.
曹贤洁, 张镭, 李霞, 等. 张掖地区气溶胶吸收和散射特性分析[J]. *高原气象*, 2010, 29(5): 1246-1253.
- [21] Wang Y F, Ma Y J, Lu Z Y, *et al.* Atmospheric particle concentration characteristics in Benxi, Liaoning [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(2): 235-242.
王扬锋, 马雁军, 陆忠艳, 等. 辽宁本溪大气颗粒物浓度特征[J]. *环境化学*, 2012, 31(2): 235-242.
- [22] Sun Z, Yang Y Q, Xu X L, *et al.* Analysis of aerosol concentration characteristics under continuous synoptic systems in Qingdao[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2010, 31(4): 871-876.
孙贞, 杨育强, 徐晓亮, 等. 青岛市连续天气过程中不同气溶胶浓度特征对比分析[J]. *环境科学*, 2010, 31(4): 871-876.
- [23] Yan W L, Zhou D P, Wang Y F, *et al.* Concentrations and size distributions of inhalable

- particles in summer and winter in Shenyang [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(4): 435-443.
- 严文莲, 周德平, 王扬峰, 等. 沈阳冬夏季可吸入颗粒物浓度及尺度谱分布特征 [J]. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 435-443.
- [24] Bian L, Li B S, Li D H. Key Technologies and error analysis of sun photometer CE318 [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2013, 6: 156-160.
- 卞良, 李保生, 李冬辉. CE318 型太阳光度计关键技术及误差分析 [J]. *现代仪器技术*, 2013, 6: 156-160.
- [25] Ångström A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air [J]. *Geografiska Annaler*, 1929, 11: 156-166.
- [26] Ångström A. On the atmospheric transmission of sun radiation. II [J]. *Geografiska Annaler*, 1930, 12(2/3): 130-159.
- [27] Ångström A. Techniques of determining the turbidity of the atmosphere [J]. *Tellus*, 1961, 13(2): 214-223.
- [28] Song G N, Yang X Y, Fu P J. Aerosol optical parameter observations in Lanzhou City [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2013, 49(4): 470-473, 482.
- 宋广宁, 杨小银, 付培健. 兰州市大气气溶胶的太阳光度计观测分析 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(4): 470-473, 482.
- [29] Zhang L Y, Yan P, Mao J T, *et al.* Observatin study on aerosol scattering phase function at Raoyang of Hebei, China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(4): 436-446.
- 张霖逸, 颜鹏, 毛节泰, 等. 气溶胶散射相函数的单站观测研究 [J]. *应用气象学报*, 2017, 28(4): 436-446.
- [30] Hänel G. Single scattering albedo, asymmetry parameter, apparent refractive index, and apparent soot content of dry atmospheric particles [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(11): 2287-2295.
- [31] Bahadur R, Praveen P S, Xu Y, *et al.* Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(43): 17366-17371.
- [32] Xie Y S, Li Z Q, Li L, *et al.* Study on influence of different mixing rules on the aerosol components retrieval from ground-based remote sensing measurements [J]. *Atmospheric Research*, 2014, 145-146: 267-278.
- [33] Feng Y, Ramanathan V, Kotamarthi V R. Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation? [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(17): 8607-8621.
- [34] Hu F C, Zhang B, Chen Z C, *et al.* Improved algorithm for the retrieval of aerosol optical depth using the sunphotometer CE 318 [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(S1): 38-41, 43.
- 胡方超, 张兵, 陈正超, 等. 利用太阳光度计 CE318 反演气溶胶光学厚度改进算法的研究 [J]. *光学技术*, 2007, 33(S1): 38-41, 43.
- [35] Liao G N. An introduction to atmospheric radiation [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 106-108.
- 廖国男. 大气辐射导论(第二版) [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2004: 106-108.