

基于太阳光度计测量确定分层大气消光系数

徐梦春^{1,2} 徐青山¹ 边 健^{1,2,3} 王艺然^{1,2} 李学彬¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)
(² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 合肥学院数学与物理系, 安徽 合肥 230601)

摘要 太阳光度计是地基探测整层大气光学参数的重要仪器,而在一些研究与工程应用中更需要了解低层大气光学参数。基于均匀平行球面大气分层的假定,提出了利用太阳光度计测量的数据确定分层大气平均消光系数的算法。应用该算法处理 POM-02 太阳光度计的实际测量数据,研究表明这种分层算法得到的大气总光学厚度与整层算法得到的大气总光学厚度的相对误差小于 3%。利用该分层算法求得的低层大气平均消光系数与激光雷达测量的消光系数进行比较,两者具有较好的一致性。因此,这种利用太阳光度计测量数据确定分层大气平均消光系数的算法是可行的,该算法拓展了太阳光度计的应用。

关键词 大气光学;太阳光度计;分层大气;消光系数;光学厚度;激光雷达

中图分类号 P407.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1201002

Extinction Coefficient of Stratified Atmosphere Measured by Sun-Photometer

Xu Mengchun^{1,2} Xu Qingshan¹ Bian Jian^{1,2,3} Wang Yiran^{1,2} Li Xuebin¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Department of Mathematics and Physics, Hefei University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract Sun-photometer is one of the main instruments for ground-based detecting atmospheric optical parameter of whole atmospheric layer. The atmospheric optical parameters of lower atmosphere are more desiderated in some researches and projects. Based on the assumption of uniform parallel sphere of stratified atmosphere, a new algorithm for average extinction coefficient of stratified atmosphere measured by sun-photometer is put forward. When dealing with the data measured by sun-photometer POM-02, the relative error of atmospheric optical depth gained by stratified atmospheric algorithm and whole atmospheric layer algorithm is less than 3%. The atmospheric average extinction coefficient of lower atmosphere got by stratified atmospheric algorithm is compared with the atmospheric average extinction coefficient by lidar. The results show that they have a good consistency. Therefore, the stratified atmospheric algorithm is feasible, and it extends the sun-photometer's application.

Key words atmospheric optics; sun-photometer; stratified atmosphere; extinction coefficient; optical thickness; lidar

OCIS codes 010.1290; 010.1320; 010.5620; 010.5630

1 引 言

利用太阳光度计消光和天空辐射测量能获得大

气气溶胶谱分布、光学厚度、单次散射反照率等多种光学参数,基于其测量的稳定性和可靠性,太阳光度

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-07-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41105021)、气象专项(GYHY201106002-03)

作者简介: 徐梦春(1986—),女,博士研究生,主要从事气溶胶光学特性及卫星遥感方面的研究。

E-mail: xumengchun1234@163.com

导师简介: 徐青山(1965—),男,博士,研究员,主要从事大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气校正等方面的研究。

E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

符合实际大气情况,如图 1 所示,均匀平行球面假定大气分层, OP 是地球半径, PH 是大气层总垂直高度, P 是太阳光度计观测点。第一层大气垂直厚度从 P 到 Z ,表示为 Z_1 ;第二层大气垂直厚度从 Z 到 H ,表示为 Z_2 。 PA [用 $L_1(\theta)$ 表示]和 AS [用 $L_2(\theta)$ 表示]是太阳光线通过第一层和第二层的路径。

太阳光度计在地面分光测量某一波段 λ 太阳直射辐射,仪器响应的电压值 V 按照比尔-布格-朗伯定律可以表示为

$$\ln \frac{V(\lambda)}{R} = -K_1(\lambda)L_1(\theta) - K_2(\lambda)L_2(\theta) + \ln V_0(\lambda), \quad (6)$$

式中 $L_1(\theta)$ 和 $L_2(\theta)$ 分别是太阳光束通过第一层和第二层大气的路径, $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 分别是第一层和第二层大气的平均消光系数。只要给定大气消光总垂直高度, $L_1(\theta)$ 和 $L_2(\theta)$ 便可从图 1 中的三角关

系求出, $L_1(\theta)$ 和 $L_2(\theta)$ 随太阳天顶角 θ 而变化。将 $\ln[V(\lambda)/R]$ 看作函数, $L_1(\theta)$ 和 $L_2(\theta)$ 作为自变量, $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 作为系数, $\ln V_0(\lambda)$ 为常数项,测量出多个太阳天顶角下的直射辐射, $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 就可以按(6)式通过多元线性回归求得。

3 实验与数据处理

2013 年 11 月 26 日~2013 年 12 月 12 日利用 POM-02 太阳光度计在合肥对大气进行观测实验,其中 11 月 28 日、11 月 29 日以及 12 月 2 日这几天的上午都是晴空无云。图 2 是这几天太阳光度计测量的电压值与大气质量的关系,从图中可以看出 3 天上午各波段 $\ln(V/R)$ 与大气质量 $m(\theta)$ 呈比较好的线性变化关系,线性关系越好,表明大气状况越稳定^[21]。因而图 2 表明这 3 天上午大气状况都较稳定。

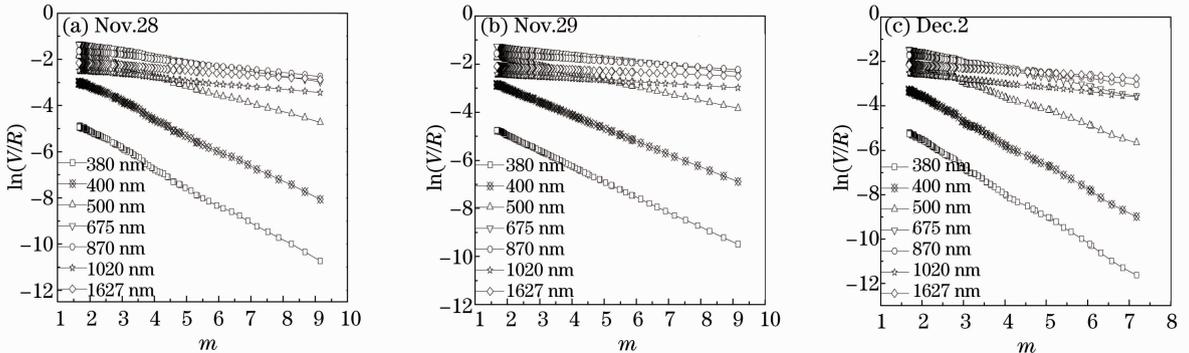


图 2 太阳光度计所测电压值与大气质量的关系

Fig. 2 Variation of voltage measured by sun-photometer with atmospheric mass

低层大气消光主要受气溶胶的影响,一般气溶胶主要聚集在 $0 \sim 5$ km^[14],20 km 以上分子消光占主导因素,100 km 以上分子光学厚度几乎等于 0,这里取大气消光总高度为 100 km。在对(6)式进行多元线性回归计算时,得到的参数 $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$

应是大于零的正数,小于零就没有物理意义。因此,在计算时 Z_1 与 Z_2 的取值要保证 $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 不小于零。图 3 与图 4 是按照两层算法,由(6)式计算的第一层大气厚度 Z_1 在 $0 \sim 5$ km 内分别取不同值时对应的平均消光系数 $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$,当 Z_1 大于

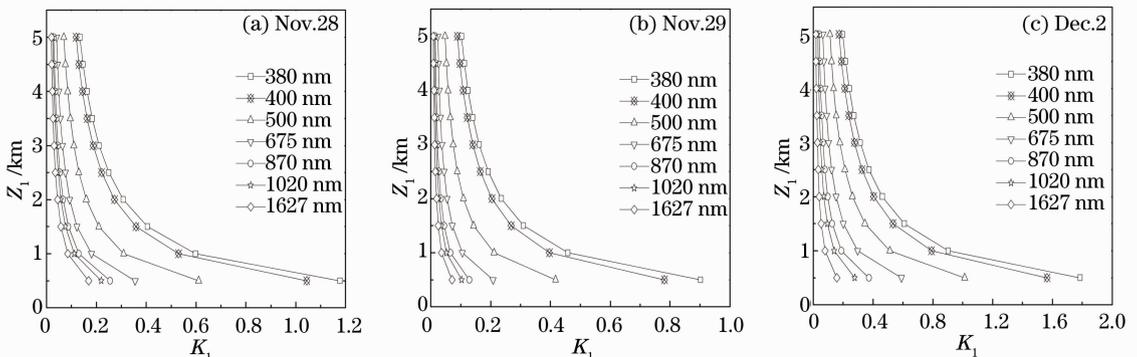


图 3 大气平均消光系数随第一层大气厚度的变化

Fig. 3 Variation of average extinction coefficient of atmosphere with depth of the first layer

5 km 时,第一层大气平均消光系数 $K_1(\lambda)$ 的变化趋缓,因此未在图中标出。而且当 Z_1 分别大于 10.08、13.56、13.86 km 时,3 个半天的第二层大气平均消光系数 $K_2(\lambda)$ 会小于零。从图 3、4 可以看出随着波长的增大第一层大气与第二层大气的平均消光系数 $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 递减; $K_1(\lambda)$ 随第一层大气厚度 Z_1 的增大而减小, $K_1(\lambda)$ 变化较快的大气厚度 Z_1 在 3 km 以下; $K_2(\lambda)$ 随第二层大气厚度 Z_2 ($Z_2 = 100 - Z_1$) 的增大而增大, $K_1(\lambda)$ 比 $K_2(\lambda)$ 大了两个数量

级,这主要是因为通常大气气溶胶消光系数(或质量浓度)呈指数递减分布于低层大气,大气分子光学厚度在 20 km 以上小于整层大气分子光学厚度的 10%^[14],因此在第二层大气厚度 Z_2 上消光系数取平均,这个值就非常小。由于一些研究与工程应用更需要了解低层的大气光学性质,因此,该算法的重要应用价值主要体现在从太阳光度计测量数据中获得低层的大气光学参数。

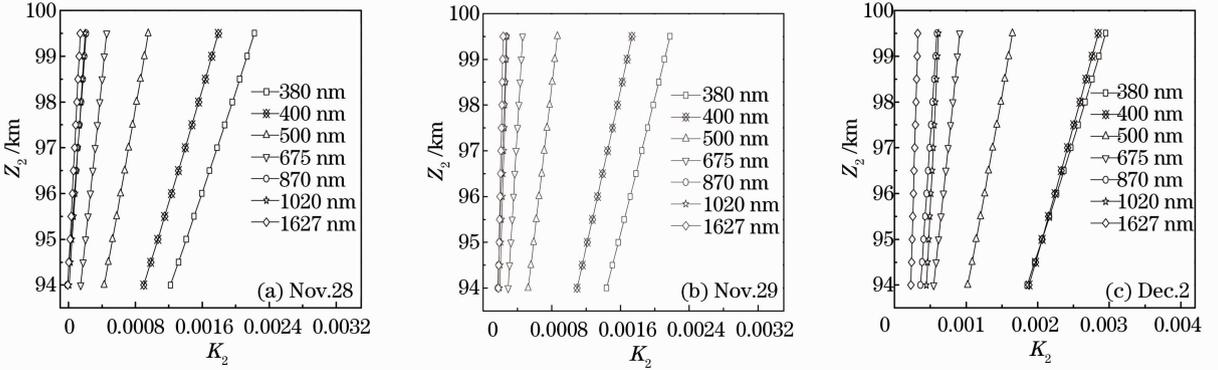


图 4 大气平均消光系数随第二层大气厚度的变化

Fig. 4 Variation of average extinction coefficient of atmosphere with depth of the second layer

4 两层算法的误差影响因素分析

4.1 第一层大气厚度的取值

第一层大气光学厚度为

$$\tau_1(\lambda) = K_1(\lambda)Z_1. \quad (7)$$

当总高度为 100 km 时,以 500 nm 波段为例,图 5 给出第一层大气光学厚度 $\tau_1(\lambda)$ 随第一层大气厚度 Z_1 的变化趋势图。

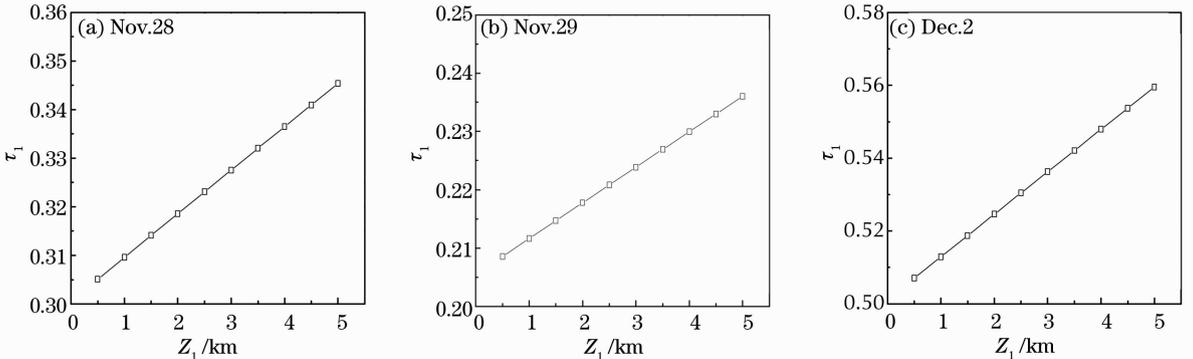


图 5 第一层大气光学厚度随第一层大气厚度的变化

Fig. 5 Variation of atmospheric optical depth of the first layer with depth of the first layer

从图 5 中看出,随着第一层大气厚度 Z_1 的增大,第一层大气光学厚度 $\tau_1(\lambda)$ 逐渐变大,这种变化趋势与实际情况是符合的。同时还可看到, $\tau_1(\lambda)$ 随 Z_1 呈线性变化关系,可用函数 $y = a + bx$ 进行拟合,即:

$$\tau_1(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)Z_1. \quad (8)$$

经计算得,3 个半天的拟合系数都大于 99.99%,截

距 $a(\lambda)$ 分别等于 0.3007、0.2056、0.5013,即当 Z_1 等于零时,第一层的大气光学厚度分别为 0.3007、0.2056、0.5013,这是不合理的,因为当 Z_1 趋近于零时第一层大气光学厚度应该是趋近于 0 的;因而进行两层分析时,第一层的厚度 Z_1 不能取值过小。另外,倘若第一层大气光学厚度 $\tau_1(\lambda)$ 随着第一层大气厚度 Z_1 的增大一直遵循(8)式的变化关系,当 Z_1

大于某个值 Z_1^0 时,必定会出现 $\tau_1(\lambda)$ 大于大气总光学厚度,从而导致计算的第二层大气光学厚度小于 0,因第二层大气平均消光系数 $K_2(\lambda)$ 小于 0 没有物理意义,故而 Z_1 也不能取值过大。

由于上层大气十分稀薄,可以分别取大气消光总垂直高度为 100、90、80、70、60、50 km 进行两层分析计算。表 1 给出 3 个半天 500 nm 波段不同总垂直高度时 Z_1 的临界点 Z_1^0 ,当 $Z_1 < Z_1^0$ 时有 $K_2 > 0$,因而两层分析时, Z_1 只能在小于 Z_1^0 的范围内取值。由表 1 知,11 月 28 日上午随着总高度的减小, Z_1^0 有缓慢增大的趋势,总高度在 50~100 km

表 1 不同总高度时 Z_1 的临界点 Z_1^0 Table 1 Critical point Z_1^0 of Z_1 for different total altitudes

Date	Whole altitude /km					
	100	90	80	70	60	50
Nov. 28	10.08	10.26	10.47	10.68	10.92	11.19
Nov. 29	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56
Dec. 2	13.86	13.86	13.86	13.86	13.83	13.80

4.2 大气总垂直高度对分层算法的影响

按照两层算法,得到的大气总光学厚度为

$$\tau'(\lambda) = K_1(\lambda)Z_1 + K_2(\lambda)Z_2. \quad (9)$$

大气消光总垂直高度分别取为 100、90、80、70、60、

之间取值时, Z_1^0 的取值范围为 10.08~11.19 km; 11 月 29 日上午随着总高度的减小, Z_1^0 保持不变,等于 13.56 km;12 月 2 日上午 Z_1^0 也基本保持不变,等于 13.86 km。结合图 2 的线性拟合结果,11 月 28 日、11 月 29 日和 12 月 2 日 3 天上午 500 nm 波段线性相关系数分别为 99.83%、99.98%、99.93%。因而 11 月 29 日大气最稳定,其次是 12 月 2 日。这说明 Z_1 临界点 Z_1^0 可能与大气稳定程度有很大关系;大气越稳定, Z_1 的临界点 Z_1^0 随总高度的变化越小。

50 km 时,根据(9)式计算当第一层大气厚度取不同值时的 500 nm 波段大气总光学厚度,结果如图 6 所示(图中直线为用整层算法计算的整个半天的大气总光学厚度的平均值 τ)。

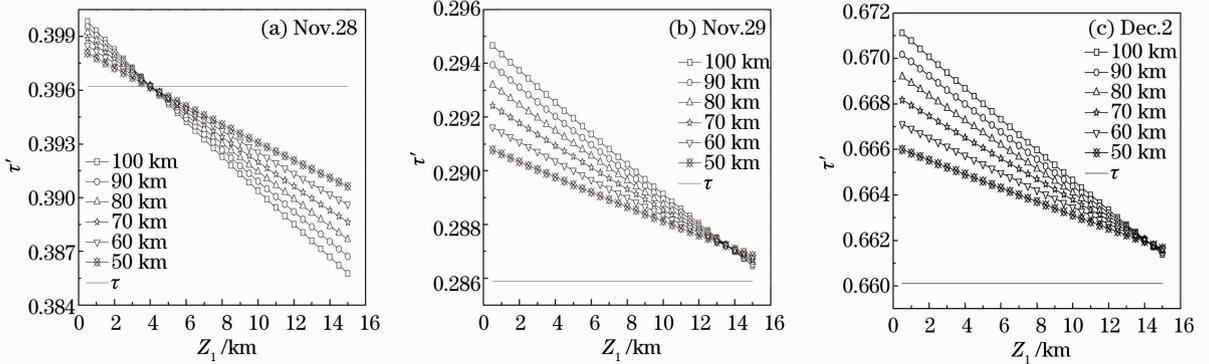


图 6 大气总光学厚度随第一层大气厚度的变化

Fig. 6 Variation of total atmospheric optical depth with depth of the first layer

从图 6 可看出,随着第一层大气厚度的增大,根据(9)式计算的大气总光学厚度逐渐减小;当取不同的总高度时,大气总光学厚度随第一层大气厚度的变化曲线都会有一个交点,3 个半天交点处 Z_1 分别为 4.11、13.59、14.25 km,11 月 28 日上午该交点在 Z_1 的取值范围内(即 $Z_1 < Z_1^0$),而 11 月 29 日上午和 12 月 2 日上午交点处对应的 Z_1 大于临界点 Z_1^0 不在其取值范围内;11 月 28 日上午两层算法计算的交点处的大气总光学厚度与整层算法的大气总光学厚度的平均值基本一致,11 月 29 日上午和 12 月 2 日上午在 Z_1 的取值范围内两层算法计算的大气总光

学厚度都大于整层算法的大气总光学厚度,交点处的大气总光学厚度与整层算法得到的大气总光学厚度接近,但有时该交点不在 Z_1 的取值范围内;在 Z_1 的取值范围内,当 Z_1 偏离交点处的值时,总高度越小,两层算法与整层算法得到的大气总光学厚度之间误差越小;而从纵坐标来看,在 Z_1 的取值范围内取不同大气总高度,两层算法得到的大气总光学厚度其实变化并不太大。

由以上分析,总高度取 100 km 时偏差相对较大,又根据图 5 知 Z_1 的取值不能太小。表 2 给出 500 nm 波段图 6 中交点处对应的大气总光学厚度

$\tau'(500)$,总高度为 100 km、 $Z_1=2$ km 时(Z_1 的最小取值与实际大气的垂直分布有关,这里之所以取 $Z_1=2$ km 是根据本文中后面将分层算法计算的第一层大气平均消光系数与激光雷达的测量结果相对比,一般当 $Z_1 \geq 2$ km 时两者偏差减小,而当 $Z_1 <$

2 km 时两者偏差相对较大)的大气总光学厚度 τ' (500, $Z_1=2$),以及总高度为 100 km、 Z_1 的临界点处的大气总光学厚度 τ' (500, Z_1^0)与整层算法计算得到的大气总光学厚度平均值 $\tau(500)$ 的相对误差。

表 2 大气总光学厚度的相对误差

Table 2 Relative errors of total atmospheric optical thickness

Date	$\tau(500)$	$\tau'(500)$	Relative error / %	$\tau'(500, Z_1=2)$	Relative error / %	$\tau'(500, Z_1^0)$	Relative error / %
Nov. 28	0.3962	0.3961	0.03	0.3983	0.53	0.3903	1.49
Nov. 29	0.2859	--	--	0.2937	2.73	0.2872	0.45
Dec. 2	0.6601	--	--	0.6701	1.51	0.6621	0.30

从表 2 可看出,图 6 中 11 月 28 日上午交点处所对应的大气总光学厚度与整层算法计算的大气总光学厚度的相对误差为 0.03%,而 11 月 29 日和 12 月 2 日上午由于交点处 Z_1 大于临界点 Z_1^0 不在其取值范围内不作分析;总高度为 100 km、 $Z_1=2$ km 时大气总光学厚度的相对误差分别为 0.53%、2.73%、1.51%;总高度为 100 km、 Z_1 的临界点 Z_1^0 处相对误差分别为 1.49%、0.45%、0.30%。这表明两层计算时不同总高度计算的大气总光学厚度曲线交点处的大气总光学厚度相对比较准确;不过由于大气总光学厚度随着 Z_1 的变化比较缓慢,因而在 Z_1 的取值范围内取不同的总垂直高度两层算法计算的大气总光学厚度变化并不大。

4.3 太阳天顶角对分层算法的影响

3 个半天太阳天顶角的变化范围为 $53^\circ < \theta < 84.4^\circ$,测量时间段为 7:25~12:00,清晨太阳光度计刚开始测量时太阳天顶角最大,正午时太阳天顶角最小。取不同的天顶角变化范围对太阳光度计所测数据进行分层分析,当选取的天顶角都小于 60° 时,分层算法不能计算出合理的两层大气平均消光系数;原因是在这种情况下,平行球面大气假定还没

有充分体现出来,只有存在较大的太阳天顶角时,平行球面大气才成立,并对(6)式的计算产生效果。所以分层算法所选取的数据中必须要含有早晚时间段天顶角较大的数据才能保证分层算法的稳定性和可靠性。

5 与激光雷达测量数据比对

实验时 532 nm 的激光雷达与 POM-02 进行同步测量,该激光雷达为中国科学院安徽光学精密机械研究所自行研制的单波长米氏散射微脉冲激光雷达,激光雷达每隔 325 s(即 5 分 25 秒)测一次数据,且在垂直高度上从地面开始每 0.03 km 计算一次各个高度处的大气气溶胶消光系数,大气气溶胶消光廓线采用 Fernald 方法来计算,误差小于 10%。现每 0.5 km 取一次高度,将从地面到该高度之间的各大气气溶胶消光系数进行累加平均,再将其对时间平均,将激光雷达测量的气溶胶消光根据分子模式加上分子消光(通过激光雷达数据计算气溶胶消光廓线时要通过分子模式扣除分子消光,现在使用相同的分子模式加上分子消光),最终得到这 3 个半天低层大气厚度为 Z_1 的大气平均消光系数。太阳

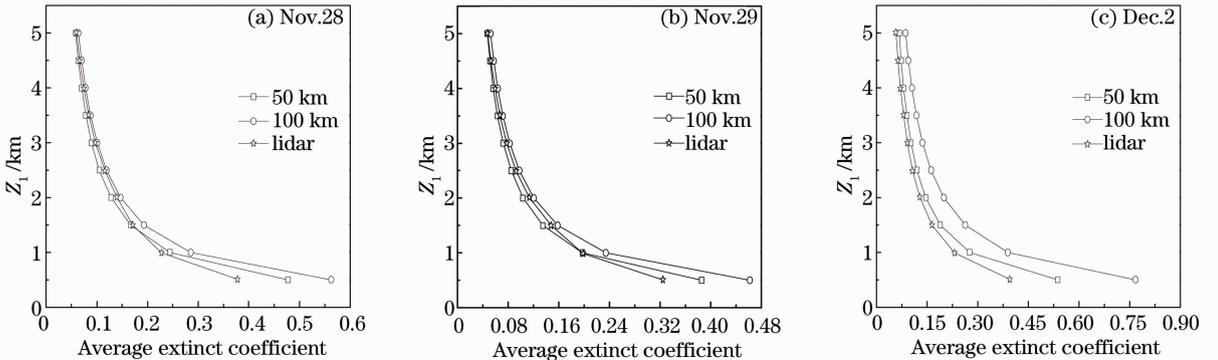


图 7 不同厚度大气平均消光系数与激光雷达测量值对比

Fig. 7 Comparison between average extinction coefficients of different atmospheric depths and the values measured by lidar

光度计可测量多个波段的大气平均消光系数,根据大气消光系数与波长的关系插值出 532 nm 波段的大气平均消光系数。将激光雷达的测量数据与取不同大气总高度时由太阳光度计多波段测量数据插值出的 532 nm 波段大气平均消光系数比较,如图 7 所示,这里仅给出总大气高度为 100 km 和 50 km 的结果,图中纵坐标 Z_1 表示低层大气厚度,横坐标表示低层大气厚度为 Z_1 的大气平均消光系数。

图 7 中,11 月 28 日与 29 日太阳光度计的计算结果与激光雷达测量的趋势非常一致,数值大小也比较接近;12 月 2 日太阳光度计与激光雷达的测量结果也具有相同的变化趋势,但利用太阳光度计计算的大气平均消光系数大于激光雷达测量的结果,当总高度为 50 km 时偏差相对比较小,总高度为 100 km 时偏差较大,但这些较大的偏差出现在第一层大气高度小于 2 km 的情况下。大气总高度假定为 50 km 与 100 km 时,对于第一层大气厚度取 1 km 以下时,两者计算的结果有较大的偏差;随着第一层大气厚度的增大,大气平均消光系数值的相对偏差越来越小,当第一层大气厚度增大到 5 km 时,两者计算的结果基本相同,其原因是第一层大气厚度不能取得太小。因此,由于大气气溶胶主要聚集在 5 km 以下,在对大气进行分层时,第一层大气厚度选取 5 km 左右的意义有待进一步研究。

6 结 论

基于均匀平行球面大气分层的假定,提出了利用太阳光度计测量的太阳直接辐射数据反演两层大气平均消光系数的算法。将该算法应用于太阳光度计实测数据,分析了不同总高度以及不同太阳天顶角取值范围时计算的大气总光学厚度的准确性与合理性。总高度在 50~100 km 取值时,总高度越小,分层分析时计算的大气总光学厚度越准确;在较大的太阳天顶角下,平行球面大气假定才能成立,所以分层算法所选取的数据中必须要含有早晚时间段天顶角较大的测量数据才能保障分层算法的稳定性和可靠性。随着第一层大气厚度取值的增加,不同大气总高度计算的第一层大气平均消光系数越来越接近,当第一层的大气厚度增大到 5 km 时,取不同大气总高度计算的结果基本吻合。与激光雷达的测量值比较,两者有较好的一致性;同样,随着第一层大气厚度的增加第一层大气的平均消光系数与激光雷达的测量值也愈发趋近。该算法的重要应用价值主要是实现了从太阳光度计测量数据中获得低层的大

气光学参数,拓展了太阳光度计的应用。

参 考 文 献

- 1 Teruyuki Nakajima, Masayuki Tanaka, Toyotato Yamauchi. Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data [J]. *Appl Opt*, 1983, 22: 2951-2959.
- 2 Y J Kaufman, B N Holben. Hemispherical backscattering by biomass burning and sulfate particles derived from sky measurement [J]. *Geophys R*, 1996, 101: 19433-19445.
- 3 B N Holben, T F Eck. Precipitable water in the Sahel measured using sun photometry [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1990, 52: 95-107.
- 4 B N Holben, T F Eck, I Slutsker, *et al.*. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sens Environ*, 1988, 66: 1-16.
- 5 Yan Hao, Jiao Meiyuan, Bi Baogui, *et al.*. Advances in aerosol observation network and corresponding science plan [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2006, 26(1): 110-117.
延 昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划[J]. *气象科学*, 2006, 26(1): 110-117.
- 6 J Freemantle, N O' Nerill, A Royer, *et al.*. AEROCAN: The Canadian sunphotometer network [J]. *Remote Sensing of Atmospheric Aerosols*, 2005. 32-35.
- 7 Y Qin, R M Mitchell. Characterisation of episodic aerosol types over the Australian continent [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9: 1943-1956.
- 8 Teruyuki Nakajima, Soon-Chang Yoon, *et al.*. Overview of the atmospheric brown cloud east Asian regional experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D24S91.
- 9 Bian Liang. Research on Monitoring Aerosol by High-Precision Optical Remote Sensing Based on the Ground-Based Network [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. 4-6.
卞 良. 基于地基网络的大气气溶胶高精度光学遥感监测研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. 4-6.
- 10 L S Gregory, O Dubovik, B N Holben, *et al.*. Inferring black carbon content and specific absorption from Aerosol Robotic Network (AERONET) aerosol retrievals [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D10S17.
- 11 B N Holben, D Tanre, A Smirnov, *et al.*. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(11): 12067-12097.
- 12 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 13 Thomas Kovacs. Comparing MODIS and AERONET aerosol optical depth at varying separation distances to assess ground-based validation strategies for spaceborne lidar [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D24203.
- 14 Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1991. 90.
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. *高等大气物理学* [M]. 北京: 气象出版社, 1991. 90.
- 15 Wu Fengcheng, Xie Pinhua, Li Ang, *et al.*. Research of aerosol extinction inverted with look-up table method based on multi-axis differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601002.
吴丰成, 谢品华, 李 昂, 等. 基于多轴差分吸收光谱技术的查找表法反演气溶胶消光廓线研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0601002.
- 16 Xu Qingshan, Hu Huanling, Wei Heli. Determination of the

- atmospheric aerosol model of ground-based spectral extinction measurements [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1451-1456.
- 徐青山, 胡欢陵, 魏合理. 地基消光测量确定大气气溶胶模型 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1451-1456.
- 17 Y J Kaufman, A Gitelson, A Karnieli, *et al.*. Size distribution and scattering phase function of aerosol particles retrieved from sky brightness measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(5): 10341-10356.
- 18 Lü Daren, Zhou Xiuji, Qiu Jinhuan. Theory and numerical experiment of remote sense of aerosol distribution based on extinction-low angle scattering [J]. Chinese Science, 1981, (12): 1516-1523.
- 吕达仁, 周秀骥, 邱金桓. 消光-小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验[J]. 中国科学, 1981, (12): 1516-1523.
- 19 Liu Houtong, Zhao Jianxin, Mo Xutao, *et al.*. Feasibility study for acquiring $S_a(z)$ value of background aerosol using two-point calibration method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301001.
- 刘厚通, 赵建新, 莫须涛, 等. 两点标定法求解背景气溶胶 $S_a(z)$ 值的可行性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301001.
- 20 Bo Guangyu, Liu Bo, Zhong Zhiqing, *et al.*. Rayleigh-Raman-Mie lidar for atmospheric temperature and aerosol profiles measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 20-24.
- 伯广宇, 刘 博, 钟志庆, 等. 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 20-24.
- 21 B Schmid, C Wehrli. Comparison of sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp [J]. Appl Opt, 1995, 34(21): 4501-4512.

栏目编辑: 王晓球