

激光雷达反演气溶胶光学特性的 k 值准确度研究

孙海波, 曹念文

南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044

摘要 激光雷达方程求解时将后向散射消光对比 k 作为假设值, 推导了 k 与波长指数、探测波长及气溶胶消光系数之间的关系式, 提出了一种确定 k 值的新方法。利用 532 nm 瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达及微脉冲激光雷达, 结合 CE-318 太阳光度计观测数据, 对 k 在不同天气条件下的取值进行了初步研究, 引入能见度因子, 估算气溶胶消光系数, 对该方法进行验证。结果表明: 空气状况良好时, 仅在 k 取值 1.0 时气溶胶消光系数更接近能见度估算的结果; 在雾霾天气下, 由该方法计算的 k 值范围在 0.7~0.9 时所得气溶胶消光系数反演结果与能见度估算值的相对误差达到最小, 这说明在雾霾天气下, 该方法计算 k 值具有一定的可靠性。

关键词 遥感; 激光雷达; 太阳光度计; 气溶胶消光系数; 能见度

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.012802

Accuracy of Value k in Aerosol Inversion Optic Properties Based on Lidar

Sun Haibo, Cao Nianwen

Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract Logarithmic ratio k of aerosol backscatter-to-extinction is usually as an assumed value in solving lidar equation. The relationship expression among value k , wavelength exponent, measurement wavelength and aerosol extinction coefficient is derived. A new method to determine value k is put forward. The value of k under different weather conditions is initially analyzed by using the data of 532 nm Rayleigh-Raman-Mie lidar and micro pulse lidar and combining CE-318 sun-photometer data. To verify this method, the visibility is brought to estimate the actual condition of aerosol extinction coefficient. It shows that under better air condition, aerosol extinction coefficient is closer to the result estimated by visibility only in $k=1.0$, and under foggy weather, when the value of k calculated by this method changes from 0.7 to 0.9, the relative error between aerosol extinction coefficient and result estimated by visibility reaches the minimum. It shows that the calculating value of k using this method has certain reliability.

Key words remote sensing; lidar; sun-photometer; aerosol extinction coefficient; visibility

OCIS codes 280.3640; 140.3430; 280.1310

1 引言

气溶胶是悬浮在大气中直径为 0.001~100 μm 的固体或液体微粒与气体载体共同组成的多相体系^[1]。气溶胶种类复杂, 主要有自然来源(如火山的喷发、海水的溅沫、岩石风化及生物体燃烧等)和人为制造源(如汽车尾气、化工废气、垃圾焚烧及核武器试验等^[2])两种。气溶胶影响大气物理过程中的辐射、降水及大气的光电特性, 从而影响天气和气候的变化, 直接对人类的健康与生存环境造成影响。大气气溶胶粒子多数集中

收稿日期: 2016-08-18; **收到修改稿日期:** 2016-10-08; **网络出版日期:** 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(41375044, 41175033)

作者简介: 孙海波(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: shb1140963431@163.com

导师简介: 曹念文(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光大气探测方面的研究。

E-mail: nwcao@nuist.edu.cn(通信联系人)

在 2~3 km 以下的低空大气层中,其中有害气溶胶会造成近地面大气的污染。激光雷达作为大气监测的有效工具之一,具有高时空分辨率,通过高精度地连续探测,可获取大气气溶胶的后向散射回波、气溶胶消光系数的垂直分布等光学特性,以及大气中二氧化硫、臭氧等气体浓度的变化^[3-5]和大气温度、湿度^[6]等。

目前,求解激光雷达米氏散射方程的常用方法主要有 Collis 斜率法、Klett 方法^[7]及 Fernald 方法。对于单一波长激光雷达方程来说,Klett 方法的使用较为广泛,其中气溶胶后向散射消光对数比 k 为常数,与激光雷达的波长和所探测的气溶胶性质有关,一般取值为 0.67~1.0^[8-10]。通常选定 k 值后,在整个激光雷达探测高度范围内其值保持不变^[11]。Klett^[7]利用上述方法对气溶胶消光系数进行反演计算时,将 k 值默认为 1。Takamura 等^[12]讨论了不同波长激光雷达反演的气溶胶消光系数 σ 与后向散射系数 β 的幂律关系,给出了不同波长对应的 k 值,但并未详细讨论 k 值的选取。王治华等^[13]通过米氏散射激光雷达研究了成都地区不同天气条件下 k 值在 0.67~1.0 之间变化时对气溶胶消光系数反演结果的影响:在阴天天气条件下,当 k 从 0.7 变化到 1.0 时,气溶胶消光系数反演结果相差近 5 倍;对晴天天气条件,反演结果相差近 3 倍;而在有雾天气时,其反演结果变化不大。张文煜等^[14]利用 532 nm 激光雷达采集了兰州地区不同天气条件下气溶胶观测资料,通过初步研究发现:只有当 $0.7 \leq k \leq 1.0$ 时,气溶胶消光系数的大小与能见度估算出的值相接近。但在 $k = 0.7$ 时,计算出的气溶胶消光系数正、负参半; $k = 1.0$ 时,消光系数廓线在晴天无云的天气状况下与实际情况不符;结合同期太阳光度计观测资料,分析当地气溶胶光学特性得出了较合理的 k 值。由以上研究可以看出,不同天气条件下 k 值的取值范围与大小对气溶胶消光系数反演存在一定的影响。

本文提出一种计算 k 值的新方法。选取了南京信息工程大学校内观测场 2011—2012 年期间内不同日期、不同天气状况下经初步订正后的 532 nm 瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达和微脉冲激光雷达观测资料,结合同期标定后的太阳光度计资料及能见度数据,对南京北郊地区气溶胶后向散射消光对数比 k 的取值进行了初步研究。

2 雷达资料选取及数据处理

将实验采用的瑞利-拉曼-米氏三通道激光雷达(RRML)与微脉冲激光雷达(MPL)安装在南京信息工程大学校内的中国气象局-南京综合观测基地(32.2 °N, 118.7 °E),用于南京北郊大气气溶胶的常规观测。以激光雷达与 CE-318 太阳光度计(南京信息工程大学气象楼 12 楼顶层)日期相匹配作为筛选条件,选取了 2011 年 1 月 10 日、3 月 15 日,2012 年 5 月 9 日、6 月 5 日、6 月 14 日的观测数据。RRML 及 MPL 原始数据除了含有气溶胶和空气分子信号外,同时收集了其他的背景信号,一般情况下在 12 km 高度以上,雷达回波信号中激光后向散射回波十分微弱,因此可将该高度以上的雷达回波信号平均值作为背景噪声从原始信号中剔除^[15],同时对去噪后的信号进行几何重叠因子订正,得到更为准确的雷达信号。

3 k 值计算方法

计算激光雷达方程时,大气消光系数 σ 和气溶胶后向散射系数 β 存在一定的函数关系:

$$\beta(r) = B\sigma^k(r), \quad (1)$$

式中 B 为大气消光系数相关的比率参数。针对一次米氏散射的激光雷达方程主要应用 Klett 方法进行反演,激光方程可表示为

$$P(r) = ECr^{-2}\beta(r)\exp\left[-2\int_0^r\sigma(r')dr'\right], \quad (2)$$

式中 $P(r)$ 为激光雷达接收到的高度 r 处大气后向散射功率(单位:W), r 为探测距离(单位:km), E 为激光雷达的发射能量, C 为与雷达系统有关的常数(单位:W·km³·sr), $\beta(r)$ 为 r 高度处的气溶胶后向散射系数(单位:km⁻¹·sr), $\sigma(r')$ 为 r 高度处的气溶胶后向消光系数(单位:km⁻¹)。

对激光雷达信号进行距离校正,令 $S(r) = \ln[P(r)r^2]$,通过距离微分得

$$\frac{dS}{dr} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dr} - 2\sigma, \quad (3)$$

式中 Klett 方法中提到 $\beta(r)$ 与 $\sigma(r)$ 存在的关系为 $\beta(r) = B\sigma(r)^k$,将(1)式代入(3)式得到 $\sigma(r')$ 的最优解:

$$\sigma(r) = \frac{\exp[(S - S_m)/k]}{\sigma_m^{-1} + \frac{2}{k} \int_{r_0}^{r_m} \exp[(S - S_m)/k] dr'}, \quad (4)$$

式中 r_m 为标定高度, S_m 为 $S(r_m)$, σ_m 为 $\sigma(r_m)$, 可由 Collis 斜率法确定: $\sigma_m \approx (S_0 - S_m) / [2(r_m - r_0)]$ 。

Wang 等^[16]在提出的三波长差分吸收激光雷达方法中给出了气溶胶后向散射系数、大气消光系数与波长的幂指数关系:

$$\sigma_{a,\lambda} = \sigma_{a,0} \lambda^{-\nu}, \quad (5)$$

$$\beta_{a,\lambda} = \beta_{a,0} \lambda^{-\eta}, \quad (6)$$

式中 λ 为波长, $\sigma_{a,\lambda}$ 和 $\beta_{a,\lambda}$ 分别为该波长所对应的气溶胶消光系数和后向散射系数, $\sigma_{a,0}$ 和 $\beta_{a,0}$ 均为常数, ν 和 η 分别为假设值。结合(1),(5),(6)式,得到 k 值计算模型:

$$\lambda^\alpha = C_0 \sigma(r)^{k-1}, \quad (7)$$

式中 C_0 为常数, α 为 Angström 波长指数。Anders^[17]给出了波长指数 α 的计算方法:

$$\tau(\lambda) = \kappa \lambda^{-\alpha}, \quad (8)$$

其中 $\tau(\lambda)$ 为气溶胶光学厚度, κ 为 Angström 浑浊系数, 代表大气中的气溶胶浓度。将不同波长 λ_1 与 λ_2 及对应的气溶胶光学厚度 τ_1 与 τ_2 代入(8)式, 并相除取对数得到 Angström 波长指数:

$$\alpha = \frac{-\ln(\tau_1/\tau_2)}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)}. \quad (9)$$

在(9)式中, 波长 λ_1 与 λ_2 的选取对 Angström 波长指数的计算很重要。本文所用 CE-318 太阳光度计共采集了 1020, 870, 670, 500, 440, 380, 340 nm 共 7 个通道的数据。实验所用激光雷达探测波长为 532 nm, 因此分别选用最接近该波长的 440 nm 和 500 nm 通道气溶胶光学厚度数据计算 Angström 波长指数, 如图 1 所示。由于太阳光度计只能获取日间数据, 这里选取最接近激光雷达数据采集时刻的气溶胶光学厚度值代入(9)式计算。

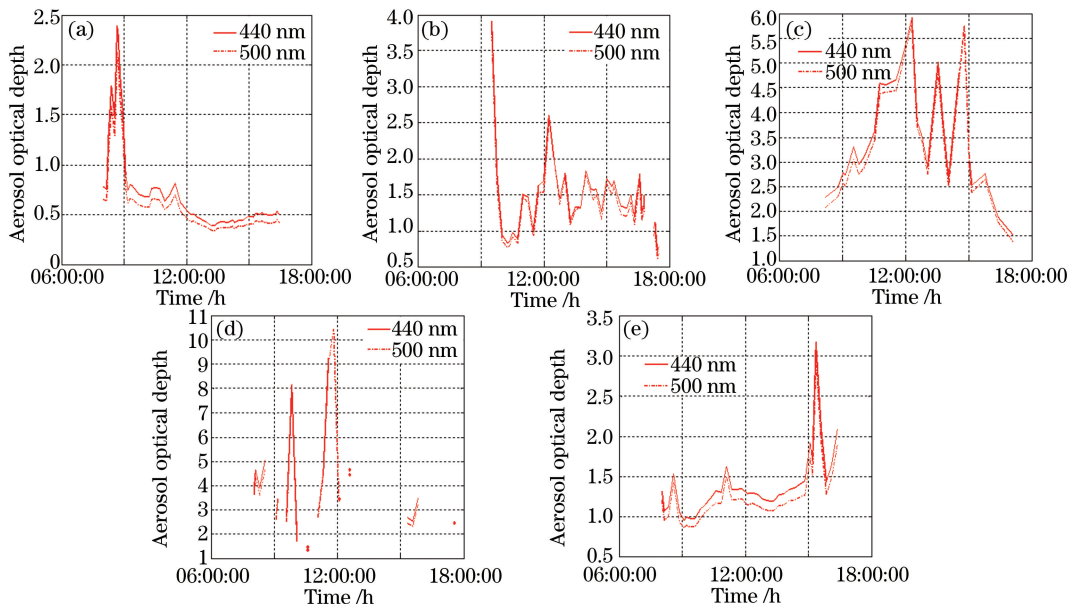


图 1 不同日期太阳光度计观测结果。(a) 2011 年 1 月 10 日; (b) 2011 年 3 月 15 日; (c) 2012 年 5 月 9 日; (d) 2012 年 6 月 5 日; (e) 2012 年 6 月 14 日

Fig. 1 Measurements of sun-photometer at different dates. (a) Jan 10th, 2011; (b) Mar 15th, 2011; (c) May 9th, 2012; (d) Jun 5th, 2012; (e) Jun 14th, 2012

图 1(a)~(e) 分别为 2011 年 1 月 10 日、3 月 15 日、2012 年 5 月 9 日、6 月 5 日、6 月 14 日 8 时~18 时范围内测得的气溶胶光学厚度。图中红色实线表示 440 nm 通道的光学厚度数据, 红色虚线表示 500 nm 通道的光学厚度数据, 两个通道的数值十分接近, 因此用于拟合 532 nm 通道来计算波长指数具有更好的效果。

通过(7)式确定 k 值时,考虑了实验中 RRML 及 MPL 的探测波长,将 λ 设定为 532 nm。 C_0 为常数,这里默认为 1。 σ 则可根据斜率法^[18]对 $\ln[P(r)r^2]$ 与 r 进行最小二乘法线性拟合的直线斜率的一半得到。当整段信号光路随高度呈均匀衰减时,可对整段有效信号进行拟合;若信号光路出现多个起伏,则分段进行信号拟合,并将拟合值相加。选取拟合结果最小值代入计算。

4 气溶胶消光系数的反演及模式验证

图 2 为南京信息工程大学中国气象局-南京综合观测实验基地(32.2°N,118.7°E)采集的激光雷达探测资料。RRML 中米氏散射通道数据采集卡为 2048 个点,距离分辨率为 30 m,理论上能够采集到 60 km 的高空信号,但是实际上由于雷达系统内部光电倍增管的动态范围限制,只能较为准确地采集到低空部分的气溶胶数据^[19]。MPL 的垂直通道与水平通道探测数据可各采集 1297 个点,最大探测高度为 38.8831 km。由于激光雷达高空信号微弱及噪声对信号的干扰,实验中观测数据仅选取低空 0.24~6 km 高度范围内的气溶胶回波信号作为有效数据进行分析。

图 2(a)~(d)分别为 2011 年 1 月 10 日 20:01:19,2011 年 3 月 15 日 19:18:20、2012 年 5 月 9 日 19:33:18、2012 年 6 月 5 日 20:07:44 夜晚时刻近地面到对流层的 RRML 大气实时观测数据,该信号为 RRML 中米氏散射通道距离校正信号。图 2(e)为 2012 年 6 月 14 日 10 时的 MPL 中由水平通道与垂直通道经过去噪后融合的距离校正信号。根据图 2 气溶胶距离平方校正信号波形可以判断当日时刻气溶胶数据反演的正确性。图 2(a)~(e)的距离平方校正信号在低空的回波较强,这是由于人为活动的影响使得低空气溶胶含量较多,从而造成激光回波衰减。图 2(a)在 3.7~3.9 km 高度附近出现了 1 个强回波,可以看出这里存在 1 个气溶胶层,使得激光雷达回波能量衰减很大。5~6 km 距离平方校正信号稳定,说明此时上层的空气比较稳定、干净。图 2(b)在 0.5~2.5 km 处出现了信号的衰减,之后随高度增加信号趋于稳定,起伏不大。图 2(c)~(d)的强回波主要集中在 0.5~2 km 高度内,说明这个范围内出现了不同性质的雾霾。图 2(e)回波出现在 500 m 左右,随高度信号值递减,并在 2 km 附近出现一段波形起伏,可见这一高度有较薄的雾霾层。表 1 为不同天气状况下的气象信息^[20]。通过表 1 中当地时间天气信息与实测数据的比对,可以判

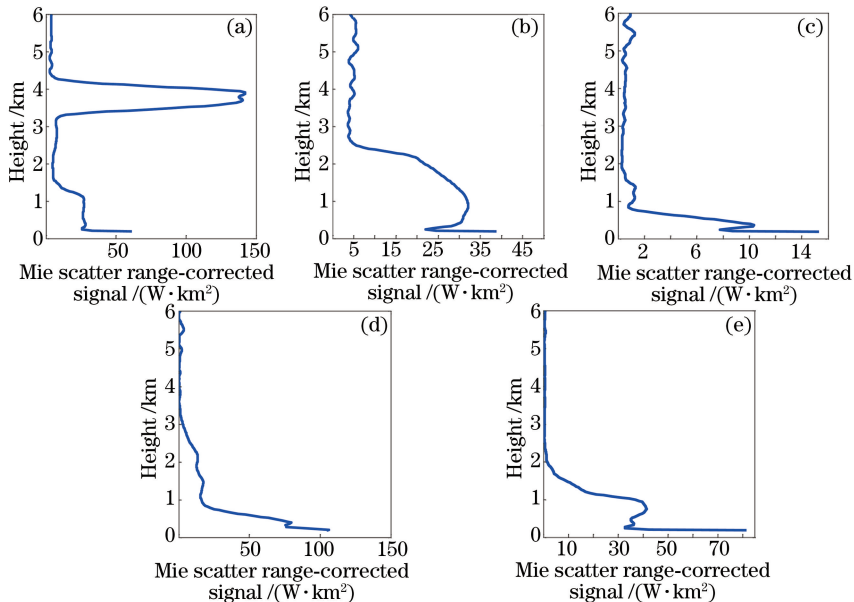


图 2 不同日期、不同时刻 RRML 和 MPL 观测结果。(a) 2011 年 1 月 10 日 20:01:19, PPML;

(b) 2011 年 3 月 15 日 19:18:20, PPML; (c) 2012 年 5 月 9 日 19:33:18, PPML; (d) 2012 年 6 月 5 日 20:07:44, PPML;

(e) 2012 年 6 月 14 日 10 时, MPL

Fig. 2 RRML & MPL aerosol measurements at different time. (a) 2011-01-10T20:01:19, PPML;

(b) 2011-03-15T19:18:20, PPML; (c) 2012-05-09T19:33:18, PPML; (d) 2012-06-05T20:07:44, PPML;

(e) 2012-06-14T10:00:00, MPL

断分析结果的准确性,表中 WNW 为西北西方向,ESE 为东南东方向,ES 为东南方向。

表 1 不同天气状况下的气象信息

Table 1 Meteorological information under different weather conditions

Time	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Humidity	Wind direction	Wind speed / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Weather
2011-01-10T20:00	-2	26%	—	0	Cloudy
2011-03-15T19:00	9	37%	WNW	3.0	Cloudy
2012-05-09T19:00	21	64%	ESE	4.0	Fog
2012-06-05T20:00	26	49%	ES	2.0	Mist
2012-06-14T10:00	30	37%	ES	5.0	Mist

将本文提出的 k 值计算模型代入 Klett 方法。先假定当地气溶胶消光系数边界值,反演得到大气气溶胶消光系数垂直廓线。气溶胶消光系数廓线对边界值的设定较为敏感,微调边界值的大小,当图 3(a)~(e) 气溶胶消光系数曲线在低空与高空部分都与图 2 对应的气溶胶距离平方校正信号波形相似,此时得到较为准确的气溶胶消光系数^[19]。

图 3(a)~(e) 中红色实线为美国 1976 标准大气气溶胶消光系数经 NASA\EOS 订正后的垂直廓线。蓝色圈线是由本文提出的 k 值计算模型求得的 k 值来反演得到的大气气溶胶消光系数垂直廓线,命名为 k_0 。洋红色星号线、青色十字线、黑色实心点线、红色叉号线、绿色三角线分别对应 k 为 0.67,0.7,0.8,0.9,1.0 时计算的大气气溶胶消光系数廓线。黑色实线为该时刻垂直方向上低空气溶胶消光系数最大值所在高度。如图 3(a)~(e),由本文所提出的方法计算得到的 k_0 值分别为 0.72,0.76,0.75,0.83,0.79。下文会对该模型进行验证。

图 3(a)~(b) 中低空气溶胶消光系数非常小,结合表 1 当日时刻的天气状况可知该时刻空气状况良好,此时 k 值变化对气溶胶消光系数的反演结果影响不大。图 3(c) 在 0.39 km 处出现了气溶胶消光系数的峰值, k 值越大对应的消光系数越小; $k=1$ 时计算得消光系数为 0.7053;由(7)式计算得 $k_0=0.75$,对应消光系数为 0.9354。图 3(d) 在低空 0.99 km 处反演得到气溶胶消光系数最大值; $k=1$ 时对应消光系数为 0.6869;由(7)式计算得 $k_0=0.83$,对应消光系数为 0.7846。图 3(e) 中气溶胶消光系数最大值集中在低空 0.42 km 附近; $k=1$ 时对应消光系数为 0.5449;由(7)式计算得 $k_0=0.79$,对应消光系数为 0.736。

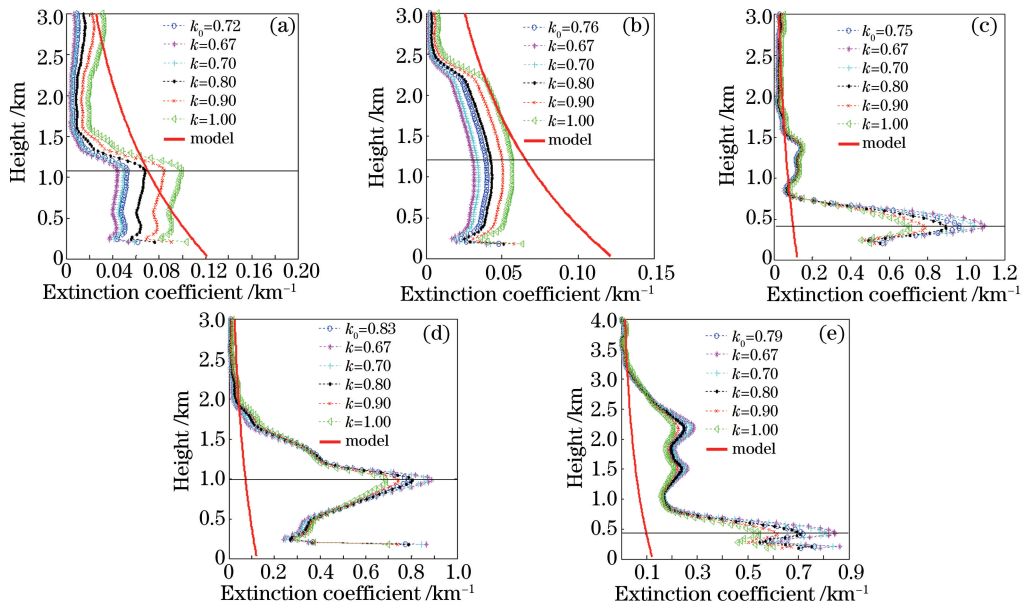


图 3 不同日期及天气条件下 k 值变化对应的大气气溶胶消光系数。(a) 2011 年 1 月 10 日 20:01:19; (b) 2011 年 3 月 15 日 19:18:20; (c) 2012 年 5 月 9 日 19:33:18; (d) 2012 年 6 月 5 日 20:07:44; (e) 2012 年 6 月 14 日 10 时

Fig. 3 Aerosol extinction coefficients with different values of k at different dates & weather conditions.

(a) 2011-01-10T20:01:19; (b) 2011-03-15T19:18:20; (c) 2012-05-09T19:33:18; (d) 2012-06-05T20:07:44;

(e) 2012-06-14T10:00:00

表 2 为图 3 中 0.25~3 km 低空范围内不同的 k 值反演所得的消光系数最大值。

表 2 不同天气状况下不同 k 值对应的气溶胶消光系数

Table 2 Aerosol extinction coefficients of different k under different weather conditions

Time	Weather	Aerosol extinction coefficient / km^{-1}					
		k_0	$k=0.67$	$k=0.70$	$k=0.80$	$k=0.90$	$k=1.00$
2011-01-10T20:01:19	Cloudy	0.1449	0.1334	0.1410	0.1627	0.1788	0.1906
2011-03-15T19:18:20	Cloudy	0.0479	0.0396	0.0424	0.0508	0.0578	0.0635
2012-05-09T19:33:18	Fog	0.9636	1.0943	1.0411	0.8958	0.7877	0.7053
2012-06-05T20:07:44	Mist	0.7846	0.8873	0.8680	0.8033	0.7415	0.6869
2012-06-14T10:00:00	Mist	0.7188	0.8456	0.8105	0.7052	0.6173	0.5449

为了进一步确定不同天气下的气溶胶消光系数,引入了大气能见度因子来确定气溶胶 k 值。大气能见度一般定义为具有正常视力的人在当时的天气条件下还能够看清楚目标轮廓的最大地面水平距离。大气水平能见度 R_v 与人眼最为敏感的 550 nm 波长大气水平消光系数 σ 、人眼的亮度对比感阈值 ϵ (平均值为 0.02) 之间的关系^[21]为

$$R_v = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{0.02} = \frac{3.912}{\sigma} \quad (10)$$

RRML 与 MPL 激光雷达发射波长均为 532 nm,比较接近人眼所敏感的波长 550 nm。当已知能见度大小时,根据(10)式得出大气气溶胶消光系数 σ 的大小,与不同 k 值反演的 σ 进行比较,可确定所得 k 值的可靠性。

表 3 为同期南京信息工程大学中国气象局-南京综合观测实验基地当日能见度仪每分钟所记录的能见度数值,将其代入(10)式得到当地同时刻 σ 值,分别与表 2 中的 σ 进行比对。

表 3 不同天气状况能见度及对应大气气溶胶消光系数 σ

Table 3 Visibility and extinction coefficient under different weather conditions

Parameter	Value				
Time	2011-01-10T	2011-03-15T	2012-05-09T	2012-06-05T	2012-06-14T
	20:01:19	19:18:20	19:33:18	20:07:44	10:00:00
Visibility /km	14.00	12.54	4.02	5.15	5.47
Extinction coefficient / km^{-1}	0.2794	0.3120	0.9712	0.7601	0.7148

表 3 中当地大气气溶胶消光系数是利用(10)式计算得到的,更为准确。与表 2 不同 k 值计算的气溶胶消光系数比对可知,2011 年 1 月 11 日 20:01:19 与 2011 年 3 月 15 日 19:18:20 不同 k 值反演的气溶胶消光系数较小,与能见度推算的消光系数结果有一定的差距;2011 年 1 月 11 日 20:01:19 的气溶胶消光系数反演值与能见度计算的气溶胶消光系数值相差近一倍,当 $k=1$ 时,反演值与估算值相对误差达到最小,为 31.78%;2011 年 3 月 15 日 19:18:20 k 值为 1 时的消光系数反演数据与能见度方程计算值相对误差最小,为 79.65%。上述两日探测时间内的空气状况良好,能见度均大于 12 km,从图 3(a)和(b)可以反映出 1 km 左右的低空范围内消光系数值相对较小,仅在 $k=1$ 时反演结果更接近于估算值,而此时本文提出的 k 值计算方法并不适用。2012 年 5 月 9 日 19:33:18 出现雾霾天气,此时由 k 值计算模型得到 $k_0=0.75$,其气溶胶消光系数反演结果与能见度估算消光系数值更为接近,相对误差最小,为 0.78%;其次 $k=0.7$ 时反演结果与估算值也较为接近,相对误差为 7.20%; $k=0.8$ 时反演结果与估算值相对误差为 7.76%,说明该时刻 k 值的选取范围在 0.7~0.8 更为合理。2012 年 6 月 5 日 20:07:44, $k_0=0.83$ 时对应的消光系数反演结果与能见度估算结果的相对误差为 3.22%, $k=0.8$ 时相对误差为 5.68%; $k=0.9$ 时相对误差达到最小,为 2.45%,此时该时刻 k 值选取在 0.8~0.9 范围内更为合理。2012 年 6 月 14 日 10 时反演结果与能见度估算消光系数值在 $k_0=0.79$ 时相对误差达到最小,为 0.56%, $k=0.8$ 时相对误差为 1.34%,而 $k=7$ 时相对误差达到 13.39%,相比较而言,此时 k 值选在 0.8 附近更为可靠。

5 结 论

提出一种计算激光雷达 k 值的算法,通过采集南京北郊地区激光雷达大气回波信号,对其进行气溶胶

特性反演,分析讨论了不同天气条件下气溶胶 k 对低空大气激光雷达回波信号反演的影响。结果表明:在雾霾天气下, k 对气溶胶消光系数反演结果影响较大;在空气质量良好的天气下, k 值变化对消光系数反演结果影响不大。大气气溶胶消光系数随 k 值增大而增大;在低空 300 m~1 km 范围内,气溶胶消光系数随 k 值增大而减小,当高度增加到 2~3 km 时,气溶胶消光系数随 k 值的增大而增大。通过两种方式验证了 k 值的计算模型。1)判断该模型计算的 k 值对应的气溶胶消光系数数值范围是否处于不同气溶胶消光系数数值范围来验证;2)引入能见度因子 R_v 对其进行验证;通过同期精确测定的大气能见度及其与能见度因子、大气消光系数的对应关系式,得到该时刻大气气溶胶消光系数的估算值,并将之与气溶胶消光系数的反演值进行比较,从而确定 k 值。

本文讨论的 k 值范围为 0.67~1.0。当空气状况很好时,低空范围的反演结果最大值仍比实际情况偏小,此时 k 值选为 1.0 更接近于能见度估算值,造成这一结果的原因可能是能见度经验公式的局限性,同时也反映出本文所提出的 k 值计算方法存在一定的不足,需要对算法进一步完善;对于雾霾天气,根据本文所提出的 k 值计算方法, k 值选取在 0.7~0.9 之间,可以得到与实际情况更为近似的结果,而 k 值为 1 时,其反演结果相对实际情况仍有一定差距,说明该方法确定 k 值具有一定的可行性。对于南京北郊地区而言,利用激光雷达分析光学特性时, k 值选取在 0.7~0.9 范围内更为合理。

参 考 文 献

- [1] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.* Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 25.
盛裴轩, 毛杰泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 25.
- [2] Zhou Faxiu. Introduction to atmospheric science[M]. Qingdao: Ocean University of Qingdao Press, 1991: 4.
周发秀. 大气科学概论[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991: 4.
- [3] Fan Guangqiang, Zhang Tianshu, Fu Yibin, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1014003.
范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014003.
- [4] Cao Nianwen, Xie Yinhai, Zhu Cunxiong, *et al.* SO₂-O₃-aerosol simultaneous measurements by multi-wavelength differential absorption lidar[J]. Optical Technique, 2015, 41(4): 289-295.
曹念文, 谢银海, 祝存兄, 等. 二氧化硫-臭氧-气溶胶多波长差分吸收激光雷达同时观测[J]. 光学技术, 2015, 41(4): 289-295.
- [5] Yang Sipeng, Cao Nianwen, Song Xiuyu, *et al.* Effects of atmospheric aerosol on ozone observation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070102.
杨思鹏, 曹念文, 宋秀瑜, 等. 大气气溶胶对臭氧观测影响的讨论[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070102.
- [6] Wang Yufeng, Gao Fei, Zhu Chengxuan, *et al.* Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0328004.
王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0328004.
- [7] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [8] Curcio J A, Knestrick G L. Correlation of atmospheric transmission with backscattering[J]. Journal of the Optical Society of America, 1958, 48(10): 686-689.
- [9] Fenn R W. Correlation between atmospheric backscattering and meteorological visual range[J]. Applied Optics, 1966, 5(2): 293-295.
- [10] Twomey S, Howell H B. The relative merit of white and monochromatic light for the determination of visibility by backscattering measurements[J]. Applied Optics, 1965, 4(4): 501-506.
- [11] Cao Nianwen, Yan Peng. Aerosol classification method by lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1101003.
曹念文, 颜鹏. 基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1101003.
- [12] Takamura T, Sasano Y. Ratio of aerosol backscatter to extinction coefficients as determined from angular scattering measurements for use in atmospheric lidar applications[J]. Optical and Quantum Electronics, 1987, 19(5): 293-302.
- [13] Wang Zhibua, He Yinghong, Li Zhensheng, *et al.* Effects of backscatter extinction logarithmic ratio on the inversion of

- aerosol extinction coefficient[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(3): 335-340.
- 王治华, 贺应红, 李振声, 等. 气溶胶后向散射消光对数比对消光系数反演的影响研究[J]. 量子电子学报, 2006, 23(3): 335-340.
- [14] Zhang Wenyu, Wang Yinqi, Song Jiayao, *et al.* Research on logarithmic ratio k of aerosol backscatter extinction using lidar[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(5): 1083-1087.
- 张文煜, 王音淇, 宋嘉尧, 等. 激光雷达反演参数 k 值的研究[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1083-1087.
- [15] Lü Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, *et al.* A new micro-pulse lidar for atmospheric horizontal visibility measurement[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0908005.
- 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0908005.
- [16] Wang Z, Nakane H, Hu H L, *et al.* Three-wavelength dual differential absorption lidar method for stratospheric ozone measurements in the presence of volcanic aerosols[J]. Applied Optics, 1997, 36(6): 1245-1252.
- [17] Anders A. The parameters of atmospheric turbidity[J]. Tellus, 1964, 16(1): 64-75.
- [18] 孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [19] Cao Nianwen, Shi Jianzhong, Zhang Yingying, *et al.* Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060101.
- 曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 南京北郊气溶胶观测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060101.
- [20] Weather Underground, Inc. Weather History for Nanjing, China [EB/OL]. [2016-07-01]. https://www.wunderground.com/history/airport/ZSNJ/2011/6/27/Daily_History.html?
- [21] Xie Chenbo, Han Yong, Li Chao, *et al.* Mobile lidar for visibility measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(7): 971-975.
- 谢晨波, 韩永, 李超, 等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 971-975.