

大气气溶胶对臭氧观测影响的讨论

杨思鹏 曹念文 宋秀瑜 段晓瞳 王潇

南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044

摘要 使用三波长双重差分吸收激光雷达(D-DIAL)与双波长差分吸收激光雷达(DIAL)探测臭氧时,模拟了气溶胶影响造成的误差,并分析了气溶胶的波长指数和气溶胶含量等对探测结果的影响;讨论了三波长双差分方法中 C (为消去后向散射项及消光项误差引入的比值 C)的取值对探测结果的影响。研究表明,存在最佳值 C 使误差接近于零,并模拟了 C 的最佳取值。在对流层分别使用波长对266 nm和308 nm(DIAL)以及266,289,308 nm(D-DIAL)进行多波长差分吸收激光雷达探测臭氧的误差模拟,在平流层中使用波长对308 nm和351 nm(DIAL)以及308,339,351 nm(D-DIAL)进行多波长差分吸收激光雷达探测臭氧的误差模拟。模拟结果表明:对流层气溶胶散射比 R 为2时,D-DIAL方法的误差小于1%,而DIAL方法的误差在10%~45%之间。在相同气溶胶含量下,平流层臭氧的探测误差要明显小于对流层臭氧的探测误差;当气溶胶含量很高时,用D-DIAL方法探测对流层臭氧误差最大可达6%,而在平流层误差最大只有3.5%。

关键词 大气光学; 激光雷达; 臭氧探测误差; 差分吸收; 气溶胶

中图分类号 P431+.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.070102

Effects of Atmospheric Aerosol on Ozone Observation

Yang Sipeng Cao Nianwen Song Xiuyu Duan Xiaotong Wang Xiao

School of Atmospheric Physic, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract The error caused by aerosol is simulated when ozone is detected with three wavelength dual difference absorption lidar (D-DIAL) and two wavelength difference absorption lidar (DIAL). The effects of the aerosol parameters on ozone detection are analyzed, including wavelength exponent and aerosol content. The impact of the factor C , which is introduced by the elimination to the scattering and extinction errors, on the detection results is discussed by using the three wavelength dual differential method. It shows that C optimal values make the error close to zero, and the optimal value of C is simulated. Different wavelengths are used respectively to simulate the error in multi wavelength difference absorption lidar on ozone detection. In the troposphere, the wavelengths of 266 nm and 308 nm (in DIAL), and 266, 289, 308 nm (in D-DIAL) are used, and in the stratosphere, the wavelengths of 308 nm and 351 nm, and 308, 339, 351 nm are used. The simulated results show that when aerosol scattering ratio R is 2, the error of D-DIAL method is less than 1%, and the error of DIAL method is 10%~45%. In the same aerosol content, the error of stratospheric ozone is significantly less than the error of tropospheric ozone. When the aerosol content is high, the error of D-DIAL detecting tropospheric ozone can reach 6%, and in the stratosphere the maximum error is only 3.5%.

Key words atmospheric optics; lidar; error in ozone detecting; difference absorption; aerosol

OCIS codes 010.1110; 010.1290; 010.3640

1 引言

臭氧是大气的重要组成部分,对生物的生命活动至关重要。平流层臭氧能吸收太阳的紫外辐射,同时平

收稿日期: 2016-02-29; **收到修改稿日期:** 2016-03-02; **网络出版日期:** 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(41375044/D0503,41175033/D0503)

作者简介: 杨思鹏(1995—),男,硕士研究生,主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: 740352687@qq.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)

流层和高层大气的能量也主要来自于对紫外线的吸收。在近地面层,较高的臭氧含量对生物的危害极大,随着大气污染愈发严重,对流层臭氧的含量也在不断升高。所以测量大气中的臭氧含量具有重要的意义,不仅能监测臭氧含量的变化,还有利于研究臭氧物理与化学特性。

差分吸收激光雷达(DIAL)是探测臭氧浓度廓线的一个十分有效的手段,因具有高分辨率、高精度及实时观测等优点而被广泛采用。自1966年,Schotland等^[1]等使用差分吸收激光雷达技术探测水汽以来,差分吸收雷达技术得到不断地发展^[2-4]。当大气中气溶胶含量较高时,传统的差分吸收激光雷达方法的精度将会受到很大的影响^[5]。为了得到精确的探测结果,汪少林等^[6]提出了Raman方法测量臭氧,但是其信噪比太小易造成误差,且对于去噪有很高要求。Papayannis等^[7]提出了四波长双重差分测量大气臭氧的方法,随后又提出了三波长双重差分法^[8-9],这种方法能有效克服大气气溶胶对探测结果的影响。

消除气溶胶对臭氧探测的影响对提高臭氧探测的精度至关重要。要消除气溶胶对探测的影响,必须先了解气溶胶对探测的影响程度,并探究气溶胶对探测的影响规律。本文使用传统差分吸收雷达和三波长双重差分吸收激光雷达(D-DIAL)对臭氧进行探测,在气溶胶散射比均匀的大气下,主要分析了三波长双重差分方法中C取值、后向散射波长指数、消光波长指数等对探测误差的影响。

2 差分吸收激光雷达探测原理

2.1 双波长差分吸收激光雷达

利用双波长差分吸收激光雷达探测臭氧时,臭氧分子浓度可以表示为

$$N(z) = \frac{-1}{2[\delta_{\lambda_{\text{on}}}(T) - \delta_{\lambda_{\text{off}}}(T)]} \frac{d}{dz} \ln \frac{P_{\lambda_{\text{on}}}(z)}{P_{\lambda_{\text{off}}}(z)} + N_{\text{B}} + N_{\text{E}}, \quad (1)$$

式中 N_{B} 与 N_{E} 分别为大气的后向散射与消光对臭氧浓度探测造成的误差,可表示为

$$N_{\text{B}} = \frac{-1}{2[\delta_{\lambda_{\text{on}}}(T) - \delta_{\lambda_{\text{off}}}(T)]} \frac{d}{dz} \ln \frac{\beta_{\lambda_{\text{on}}}(z)}{\beta_{\lambda_{\text{off}}}(z)}, \quad (2)$$

$$N_{\text{E}} = \frac{-1}{[\delta_{\lambda_{\text{on}}}(T) - \delta_{\lambda_{\text{off}}}(T)]} [\alpha_{\lambda_{\text{on}}}(z) - \alpha_{\lambda_{\text{off}}}(z)], \quad (3)$$

其中 λ_{on} 与 λ_{off} 分别代表臭氧的强吸收与弱吸收波长, $\delta_{\lambda}(T)$ 为臭氧的吸收截面, $P_{\lambda}(z)$ 为回波功率, $\beta_{\lambda}(z)$ 为气溶胶和大气分子总的单位体积的后向散射系数, $\alpha_{\lambda}(z)$ 为包括臭氧吸收在内的消光系数。当气溶胶含量较高时,因 N_{B} 和 N_{E} 两项的值较大,若在臭氧探测中忽略这两项将会造成较大的误差。

2.2 三波长双重差分激光雷达方法

设两个波长对 $\lambda_{1\text{on}}, \lambda_{1\text{off}}, \lambda_{2\text{on}}, \lambda_{2\text{off}}$ 的DIAL方程中,后向散射浓度和消光浓度分别为 $N_{\text{B}1}, N_{\text{E}1}$ 与 $N_{\text{B}2}, N_{\text{E}2}$,则利用三波长双重差分激光雷达测臭氧时后向散射项和消光项的影响分别为

$$N_{\text{B}'} = N_{\text{B}1} - C \times N_{\text{B}2}, N_{\text{E}'} = N_{\text{E}1} - C \times N_{\text{E}2}, \quad (4)$$

式中

$$N_{\text{B}i} = \frac{d}{dz} \ln \frac{\beta_{\lambda_{i\text{on}}}(z)}{\beta_{\lambda_{i\text{off}}}(z)}, i = 1, 2, \quad (5)$$

$$N_{\text{E}i} = -2[\alpha_{\lambda_{i\text{on}}}(z) - \alpha_{\lambda_{i\text{off}}}(z)], i = 1, 2, \quad (6)$$

其中 $\lambda_{1\text{on}}, \lambda_{1\text{off}} = \lambda_{2\text{on}}, \lambda_{2\text{off}}$ 分别对应臭氧的强、中、弱吸收波段。 C 是根据 $N_{\text{B}'}, N_{\text{E}'}$ 项引入的因子,以达到削弱气溶胶影响的目的。由于大气气溶胶的光学特性比较难以测定,因此在臭氧的实际测量中常常忽略气溶胶的影响,通过选取合适的波长与 C 便能使 $N_{\text{B}'}, N_{\text{E}'}$ 变得很小,从而忽略这两项造成的误差。

3 数值模拟

3.1 模拟方法

差分吸收激光雷达测量臭氧的系统误差可以分为两部分,即忽略后向散射项造成的误差与忽略消光项所造成的误差,它们可分别表示为^[8]

$$\epsilon_{SB} = \frac{1}{2\Delta\delta N(z)\Delta z} \left[\ln \frac{\beta_{\lambda_{1on}}(z+\Delta z)\beta_{\lambda_{1off}}(z)}{\beta_{\lambda_{1off}}(z)\beta_{\lambda_{1off}}(z+\Delta z)} - C \ln \frac{\beta_{\lambda_{2on}}(z+\Delta z)\beta_{\lambda_{2off}}(z+\Delta z)}{\beta_{\lambda_{2on}}(z)\beta_{\lambda_{2off}}(z)} \right], \quad (7)$$

$$\epsilon_{SE} = -\frac{1}{2\Delta\delta N(z)} \{ [\alpha_{\lambda_{1on}}(z) - \alpha_{\lambda_{1off}}(z)] - C [\alpha_{\lambda_{2on}}(z) - \alpha_{\lambda_{2off}}(z)] \}, \quad (8)$$

式中 Δz 是距离分辨率,取 $\Delta z = 300$ m, $\Delta\delta$ 为臭氧在 λ_{on} 与 λ_{off} 波长处的吸收截面之差。

对流层中使用波长对 266 nm 和 308 nm (DIAL) 和 266, 289, 308 nm (D-DIAL) 进行模拟, $\Delta\delta = 2.7 \times 10^{-18}$, 臭氧分子浓度 $N(z)$ 假设为 1×10^{12} cm $^{-3}$ 。平流层中使用波长对 308 nm 和 351 nm (DIAL) 和 308, 339, 351 nm (D-DIAL) 进行模拟, $\Delta\delta = 2.6 \times 10^{-19}$, 臭氧分子浓度 $N(z)$ 假设为 4×10^{12} cm $^{-3}$ 。大气分子采用的是大气模式^[10], 气溶胶的激光雷达比设为 55。假设气溶胶的后向散射波长指数设为 η , 消光波长指数设为 ν , 则有

$$\alpha_{a,\lambda} = \alpha_{a,0}\lambda^{-\nu}, \beta_{a,\lambda} = \beta_{a,0}\lambda^{-\eta}, \quad (9)$$

式中 $\alpha_{a,\lambda}$, $\beta_{a,\lambda}$ 分别是大气气溶胶的消光系数和后向散射系数, $\alpha_{a,0}$ 和 $\beta_{a,0}$ 是常数。

气溶胶散射比 $R_\lambda(z)$ 常被用来表示气溶胶含量, 定义为大气总后向散射(气溶胶与大气分子后向散射之和)与大气分子后向散射的比值, 即

$$R_\lambda(z) = [\beta_{m,\lambda}(z) + \beta_{a,\lambda}(z)] / \beta_{m,\lambda}(z) = \beta_\lambda(z) / \beta_{m,\lambda}(z). \quad (10)$$

假设气溶胶在空间上均匀分布, 即 $R_\lambda(z)$ 不随高度发生改变。当大气较为洁净时, 或很浓的气溶胶经过一段时间扩散后, 以及大雾和沙尘暴等环境下, $R_\lambda(z)$ 不随高度发生改变是近似满足的, 因而此假设有其实际意义。根据 $R_\lambda(z)$ 的定义可以得到

$$N_{Bi} = \frac{d}{dz} \ln \frac{\beta_{\lambda_{ion}}(z)}{\beta_{\lambda_{ioff}}(z)} = \frac{d}{dz} \ln \frac{\beta_{m,\lambda_{ion}}(z)}{\beta_{m,\lambda_{ioff}}(z)} + \frac{d}{dz} \ln \frac{R_{\lambda_{ion}}(z)}{R_{\lambda_{ioff}}(z)} = \frac{d}{dz} \ln \frac{R_{\lambda_{ion}}(z)}{R_{\lambda_{ioff}}(z)} = 0, \quad (11)$$

即当气溶胶在空间上均匀分布时, 后向散射项对测量结果的贡献为零, 可以不用考虑它的影响。因此以下模拟中假设大气气溶胶的分布是均匀的。

3.2 三波长双差分方法中误差与 C 的关系

三波长双差分方法中, 为了达到较高的探测精度, C 的取值至关重要, 是能否有效削减气溶胶对探测影响的关键。一般认为 $C = (\lambda_{1off} - \lambda_{1on}) / (\lambda_{2off} / \lambda_{2on})$ ^[8] 是一个合适的取值, 通过这种方式取对流层中 $C = 23/19$, 平流层中 $C = 31/12$, 但是通过数值模拟发现这种取值并非最佳取值。

当 $\eta = 1, \nu = 1$ 时, 误差随 C 的变化曲线如图 1 所示。可以看出, 随着气溶胶散射比变化, 误差随 C 的变化曲线也发生改变。随着气溶胶散射比的增加, 曲线越来越陡, 且气溶胶散射比越大误差越大, 这说明气溶胶含量越高则对臭氧探测的影响越大, 造成的误差也越大。同时发现存在一个最佳的 C 使得误差很小而且接近于零, 但是在这个 C 值之外误差随着 C 的变化呈线性增长, 且气溶胶含量越高增长越快, 可见 C 值的选取对保证探测精度至关重要。图 1(a) 中取高度 $z_0 = 2.1$ km, 即模拟对流层中误差与 C 的关系。尽管各曲线的零点不一致, 但是基本都落在 $C = 1.7$ 附近, 可把 $C = 1.7$ 作为对流层三波长双差分臭氧探测时 C 的最佳取值。图 1(b) 中取高度 $z_0 = 22$ km, 即模拟平流层中误差与 C 的关系。发现误差最小时的 C 的取值是随气溶胶散射比变化的, 但是基本都在 $C = 3.5$ 左右, 因此取 $C = 3.5$ 作为平流层三波长双差分臭氧探测时的 C 值。模拟得到的最佳 C 值均不是 $(\lambda_{1off} - \lambda_{1on}) / (\lambda_{2off} / \lambda_{2on})$ ^[8]。

为了研究由 $(\lambda_{1off} - \lambda_{1on}) / (\lambda_{2off} / \lambda_{2on})$ 计算得出的 C (对流层为 23/19, 平流层为 31/12) 与模拟得到的 C (对流层为 1.7, 平流层为 3.5) 的数值, 哪个能更有效地减少误差, 分别对不同取值 C 的误差进行了计算。图 2 为不同 C 值下误差随高度的变化曲线, 图 3 为误差随气溶胶含量的变化曲线, 对不同 C 取值下的误差进行了对比研究, 且对对流层和平流层分别进行了计算和对比。其中波长指数 $\eta = 1, \nu = 1$, 当 $C = 0$ 时 D-DIAL 即是 DIAL。由图 2(a) 可以看出对流层中误差随着高度的增加而减少, 且在 C 的不同取值下, 误差随高度减小的趋势基本相同, 但是斜率却有所不同, 当 $C = 1.7$ 时误差最小且基本不随高度变化。图 3(a) 给出了对流层下误差随气溶胶含量的变化, 可以看出误差随着气溶胶含量的增加呈明显的线性增长趋势, 曲线的陡峭程度与 C 的取值有关, $C = 1.7$ 时误差最小, $C = 23/19$ 时变化最平缓。通过对比图 2(a) 和图 3(a) 中不同的 C 值, 发现当 $C = 0$ 时即常规的 DIAL 方法的误差是最大的, 最高可达 43%, 可见 D-DIAL 的确在减

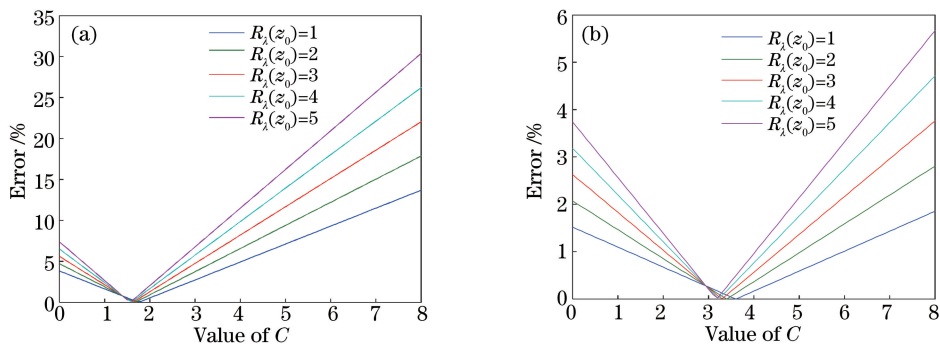


图1 气溶胶散射比取不同值时,高度 z_0 处的误差随 C 的变化曲线。(a) 对流层, $z_0 = 2.1$ km; (b) 平流层, $z_0 = 22$ km

Fig. 1 Error as a function of the value of C with different aerosol scattering ratios R at height of z_0 .

(a) Troposphere, $z_0 = 2.1$ km; (b) stratosphere, $z_0 = 22$ km

少误差方面效果显著,但在 D-DIAL 方法中 C 的取值也影响着削弱误差的效果。当 $C = 23/19$ 时相对误差较小,误差均在 10% 以内,但并不是使误差最小的值,当 C 取值为在其附近的 $C = 1.7$ 时误差达到最小。在 $z_0 = 2.1$ km 时模拟得到最佳 C 值于整个对流层上都适用,它使得气溶胶造成的误差削减,并接近于零。

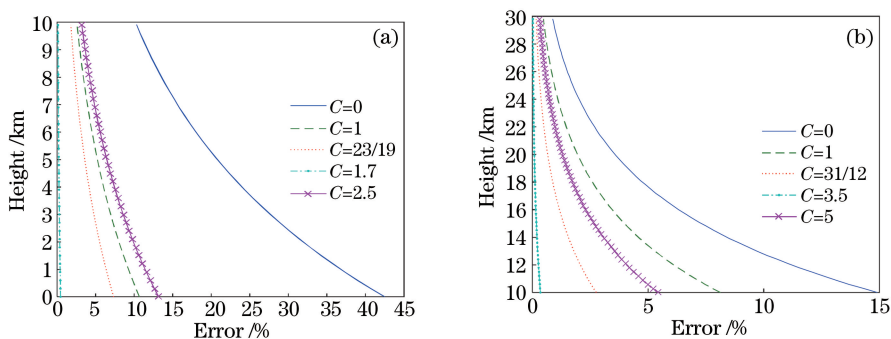


图2 波长指数 $\eta=1, \nu=1, R_\lambda(z_0)=2$ 时,不同 C 值下误差随高度的变化曲线。

(a) 对流层, $z_0 = 2.1$ km; (b) 平流层, $z_0 = 22$ km

Fig. 2 Error as a function of height with different value of C when wavelength dependence of $\eta=1, \nu=1, R_\lambda(z_0)=2$.

(a) Troposphere, $z_0 = 2.1$ km; (b) stratosphere, $z_0 = 22$ km

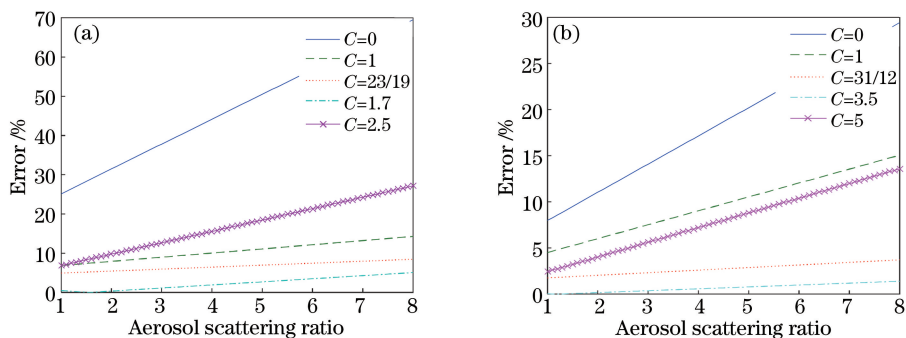


图3 波长指数 $\eta=1, \nu=1$, 不同 C 值下误差随气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)$ 的变化曲线。

(a) 对流层, $z_0 = 2.1$ km; (b) 平流层, $z_0 = 22$ km

Fig. 3 Error as a function of aerosol scattering ratio $R_\lambda(z_0)$ with different value of C at height z_0 when wavelength dependence of $\eta=1, \nu=1$. (a) Troposphere, $z_0 = 2.1$ km; (b) stratosphere, $z_0 = 22$ km

平流层的臭氧探测误差由图 2(b) 可以看出,误差随着高度的增加而减少,且对于 C 的不同取值减小速率有所不同,当 $C = 3.5$ 时误差最小且基本不随高度变化。图 3(b) 给出了平流层误差随气溶胶含量的变化,误差随着气溶胶含量的增加呈明显的线性增长趋势,曲线的陡峭程度与 C 的取值有关,当 $C = 3.5$ 时误差最小, $C = 31/12$ 时变化最平缓。平流层误差的变化趋势与对流层极为相似但误差值却小得多,当气溶胶散射

比 $R_\lambda(z_0)=2$ 时, DIAL 法 ($C=0$) 的最大误差为 15%, 而使用 D-DIAL 法时误差则减小到 10% 以下。同样在平流层中虽然 C 取为 31/12 时误差较小, 但是误差最小的还是模拟得到的 $C=3.5$, 可见通过模拟得到的 C 的取值在整个平流层依旧适用, 能有效地削减误差。因此在后续模拟中对流层的 C 值取为 1.7, 平流层的 C 值取为 3.5。

3.3 误差随后向散射波长指数 η 的变化

令消光波长指数 $\nu=1$, 后向散射波长指数 η 分别取 0, 1 和 2, 对对流层和平流层中误差与后向散射波长指数 η 的关系进行了模拟, 结果如图 4~7 所示。对于对流层, 在图 4(a)、图 5(a) 和图 6 中可以看出 D-DIAL 方法的误差要远小于 DIAL 方法。误差随着高度的增加而减少, 随着气溶胶含量的增加而增加。当气溶胶散射比 $R=2$ 时 D-DIAL 方法的误差小于 1%, 而 DIAL 方法的误差却在 10%~45% 之间, D-DIAL 方法的误差随气溶胶含量增加而增长的速度也要小于 DIAL 方法。对 η 取了三个不同的值, 但是图中只有一条曲线, 说明所有不同 η 的曲线完全重叠, 可见气溶胶的后向散射特性对误差无影响。正如前文所证明的, 当气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)$ 不随高度改变时, 气溶胶的后向散射项对计算结果的贡献为零, 忽略气溶胶后向散射项造成的误差。图 6 给出了不同 η 的取值下误差随高度和气溶胶散射比变化的三维图, 从图中可以看出随着 η 的变化图像并没有发生任何改变。对比 DIAL 和 D-DIAL 可以看出 D-DIAL 的误差要远小于 DIAL, 且随着 $R_\lambda(z_0)$ 的增加 DIAL 方法的误差增加趋势要大于 D-DIAL, 且 D-DIAL 的误差一直小于 6%, 保持在一个非常低的水平, 而 DIAL 的误差最大可达 90%, 当然这是在气溶胶散射比很大的情况下 DIAL 才有如此大的误差。

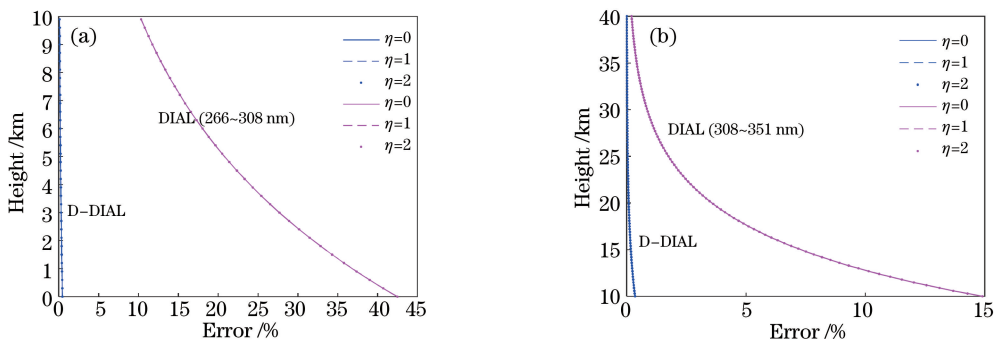


图 4 消光波长指数 $\nu=1$, 气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)=2$ 时, 不同的后向散射波长指数 η 下误差随高度的变化曲线。

(a) 对流层, $z_0=2.1$ km; (b) 平流层, $z_0=22$ km

Fig. 4 Error as a function of height with different value of η when $\nu=1, R_\lambda(z_0)=2$.

(a) Troposphere, $z_0=2.1$ km; (b) stratosphere, $z_0=22$ km

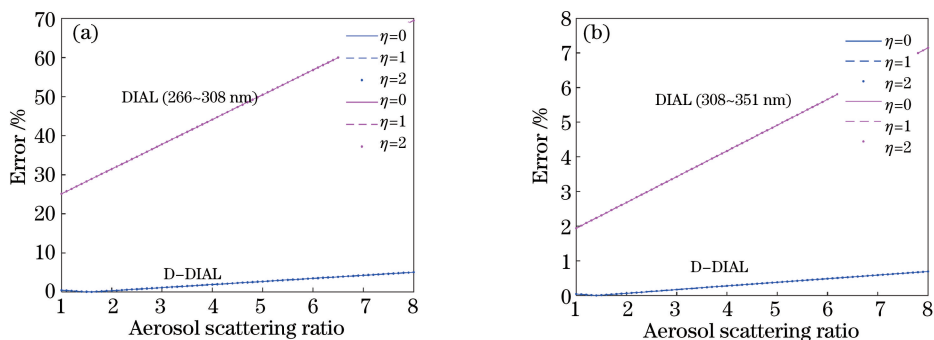


图 5 消光波长指数 $\nu=1$ 时不同的后向散射波长指数 η 下误差随气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)$ 的变化曲线。

(a) 对流层, $z_0=2.1$ km; (b) 平流层, $z_0=22$ km

Fig. 5 Error as a function of aerosol scattering ratio $R_\lambda(z_0)$ with different value of η when $\nu=1$.

(a) Troposphere, $z_0=2.1$ km; (b) stratosphere, $z_0=22$ km

图 4(b)、图 5(b) 和图 7 为平流层误差与后向散射波长指数 η 的关系模拟结果。可以看出平流层中后向散射项依旧对误差没有贡献, 同时 D-DIAL 的误差也是远小于 DIAL 的。当气溶胶散射比为 2 时 D-DIAL

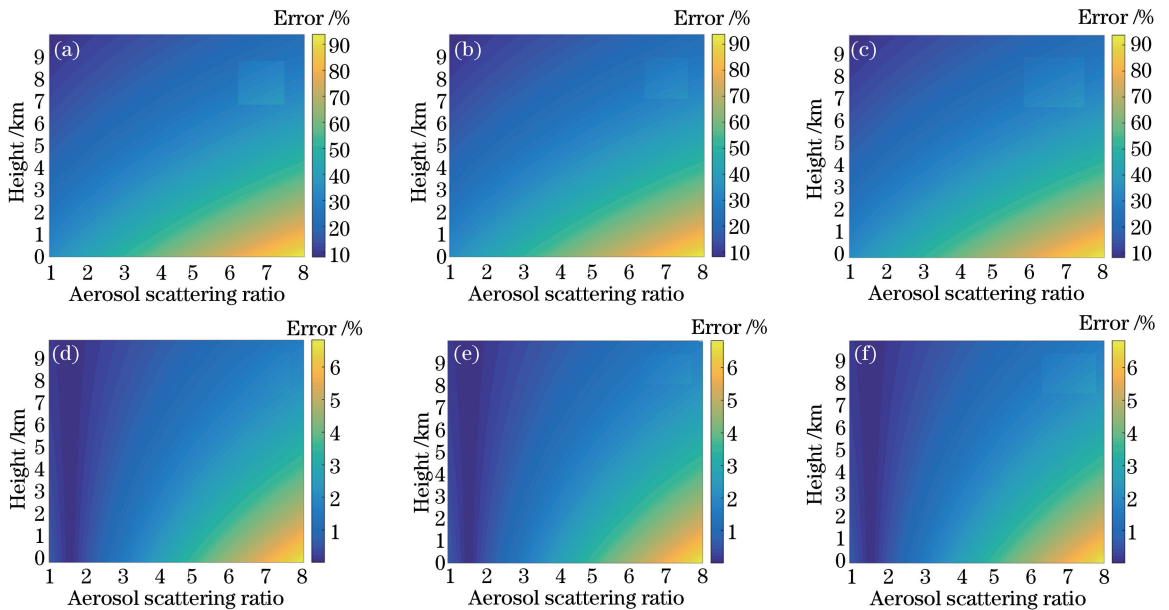


图 6 消光波长指数 $\nu=1$ 时, 对流层不同 η 下误差随高度与气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)$ 的变化曲线。(a)(b)(c) DIAL 方法的误差在 η 取 0, 1 和 2 时的变化曲线; (d)(e)(f) D-DIAL 方法的误差在 η 取 0, 1 和 2 时的变化曲线

Fig. 6 Error as a function of aerosol scattering ratio $R_\lambda(z_0)$ and height with deference value of η when $\nu=1$ in troposphere.

(a)(b)(c) Errors of DIAL when $\eta=0, 1, 2$, respectively; (d)(e)(f) errors of D-DIAL when $\eta=0, 1, 2$, respectively

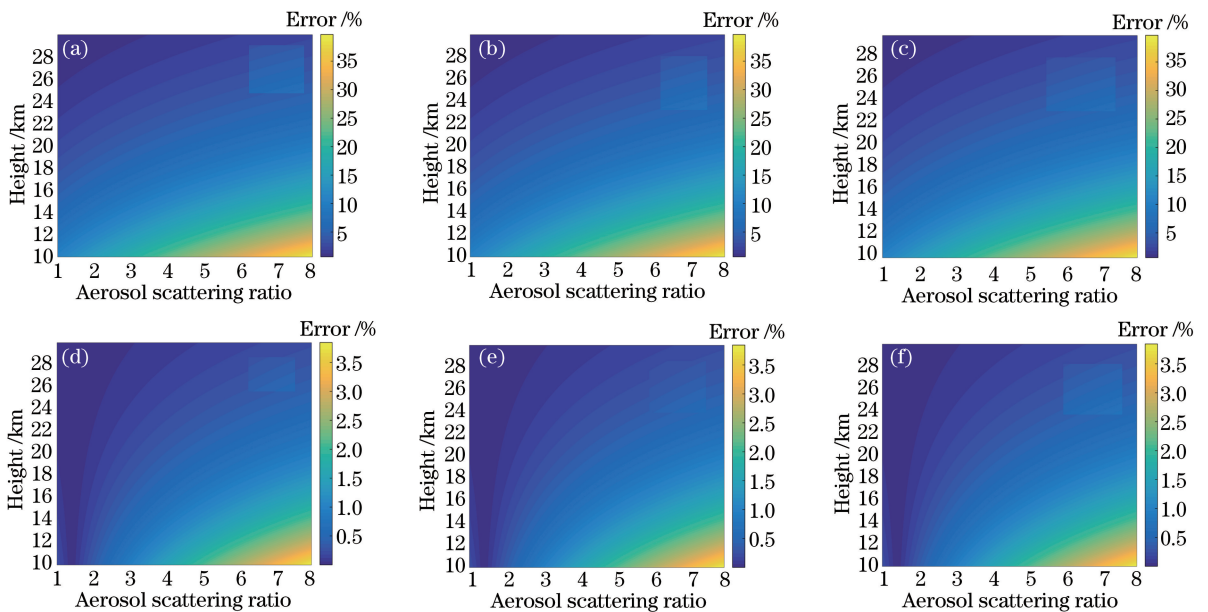


图 7 消光波长指数 $\nu=1$ 时, 平流层不同 η 下误差随高度与气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)$ 的变化曲线。(a)、(b)、(c) 分别为 DIAL 方法的误差在 η 取 0, 1 和 2 时的变化曲线; (d)、(e)、(f) 分别为 D-DIAL 方法的误差在 η 取 0, 1 和 2 时的变化曲线。

Fig. 7 Error as a function of aerosol scattering ratio $R_\lambda(z_0)$ and height with deference value of η when $\nu=1$ in stratosphere.

(a)(b)(c) Errors of DIAL when $\eta=0, 1, 2$, respectively; (d)(e)(f) errors of D-DIAL when $\eta=0, 1, 2$, respectively

方法的误差小于 1%, 而 DIAL 方法的误差在 1%~15% 之间。随着气溶胶含量的增大 D-DIAL 方法的误差增长速率也要远小于 DIAL 方法中误差的增长速率。当气溶胶含量极大时 DIAL 的误差最高可以达到 40%, 而 D-DIAL 方法的误差比其小一个量级。对比图 4、图 5、图 6 和图 7 可以看出误差都是随着高度减小, 随着气溶胶含量线性增加; 且差分吸收雷达探测平流层的臭氧误差比探测对流层的误差小。

3.4 误差随消光波长指数 ν 的变化

图 8~11 中分别模拟了对流层和平流层中误差与消光波长指数 ν 的关系。上文已经讨论了后向散射波

长指数 η 对探测结果无影响,这一部分分别取 $\nu=0,1$ 和 2 以研究对流层中消光波长指数对误差的影响。在对流层中,通过图 8(a)、图 9(a)和图 10 可以看出,无论用 DIAL 还是 D-DIAL 方法对臭氧进行探测,对流层误差均随着 ν 的增大而增加,同时误差随高度变化的趋势不随 ν 的变化而发生改变,不同的 ν 的取值下误差随高度变化的斜率基本一致。当 $R=2$ 时 D-DIAL 方法的误差小于 1% ,而 DIAL 方法的误差随着 ν 的不同分布在 $35\% \sim 70\%$ 之间。图 9(a)可以看出, ν 的值越大,则气溶胶的含量对误差的影响越大,误差随气溶胶增加的趋势越陡。由图 10 可以看出当 $\nu=0$ 时,气溶胶含量的改变对误差没有影响,上文已经证明当 R 与高度无关时后向散射项对探测结果没有贡献,即此时的误差皆是由大气分子的消光造成的,图中 $\nu=0$ 的图像即为大气分子的消光误差的图像。随着 ν 的增加气溶胶的影响越来越大,图像也越来越陡,可见气溶胶的种类对差分激光雷达臭氧探测影响是很大的。当 ν 的取值相同时 D-DIAL 方法中误差随气溶胶含量增加而增长的趋势要比 DIAL 方法更平缓。无论 ν 取何值 D-DIAL 的误差也总是远小于 DIAL,并接近为零。在 DIAL 方法中,当气溶胶含量不高时大气分子几乎贡献了一半的误差,最高可达 33% ,可见不止是气溶胶,大气分子消光项造成的误差也不能被忽略。而 D-DIAL 方法中无论大气分子还是大气气溶胶所造成的误差都很小。

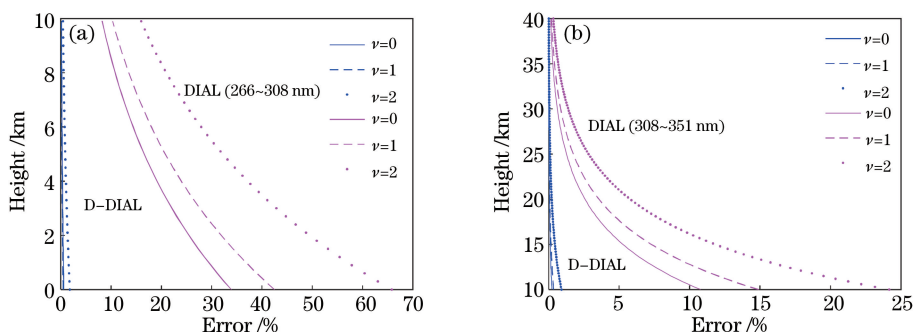


图 8 气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)=2$ 时,不同的消光波长指数 ν 下误差随高度的变化曲线。

(a) 对流层, $z_0 = 2.1$ km; (b) 平流层, $z_0 = 22$ km

Fig. 8 Error as a function of height with different value of ν when $R_\lambda(z_0)=2$.

(a) Troposphere, $z_0 = 2.1$ km; (b) stratosphere, $z_0 = 22$ km

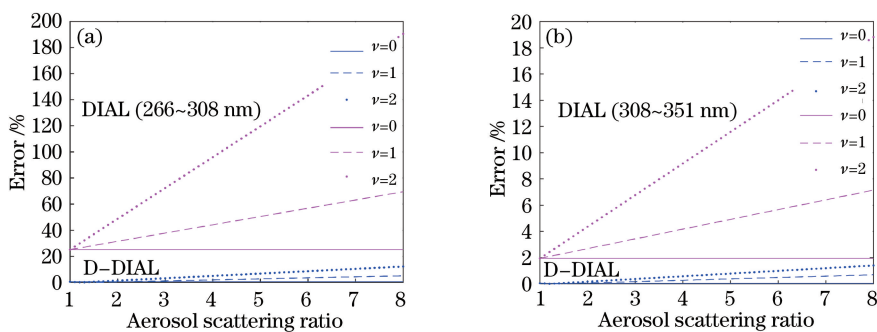


图 9 不同后向散射波长指数 ν 下误差随气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)$ 的变化曲线。

(a) 平流层, $z_0 = 2.1$ km; (b) 对流层, $z_0 = 22$ km

Fig. 9 Error as a function of aerosol scattering ratio $R_\lambda(z_0)$ with different value of ν .

(a) Troposphere, $z_0 = 2.1$ km; (b) stratosphere, $z_0 = 22$ km

图 8(b)、图 9(b)和图 11 模拟了平流层误差与消光波长指数 ν 的关系。分别取 $\nu=0,1$ 和 2 以研究平流层中消光波长指数对误差的影响。由图 8(b)和图 9(b)可以看出在平流层误差随 ν 的变化规律基本同对流层中一致, ν 的取值越大则误差越大,误差受气溶胶含量的影响也越严重,但是平流层的误差随气溶胶增加而增大的趋势较之对流层要缓一些,误差随气溶胶含量的变化略小于对流层中误差随气溶胶含量的变化。对比平流层与对流层的图像,可以看出平流层的大气分子消光造成的误差要小于对流层,这是因为平流层的空气较为稀薄,大气分子密度小。DIAL 和 D-DIAL 两种探测方法在平流层的误差都要小于对流层的误差,同时当 ν 不为零时,误差随气溶胶含量的增长趋势也比对流层缓慢。当气溶胶含量不高的时候,DIAL 探测平流

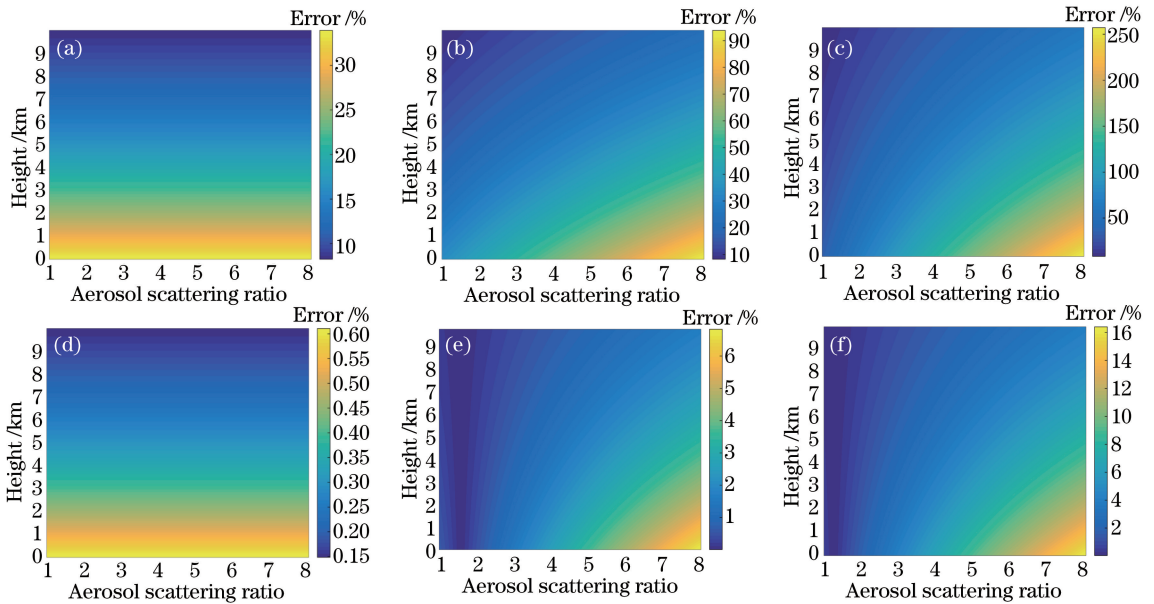


图 10 对流层不同 ν 下误差随高度与气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)$ 的变化曲线。(a)(b)(c) DIAL 方法的误差

在 ν 取 0, 1 和 2 时的变化曲线；(d)(e)(f) D-DIAL 方法的误差在 ν 取 0, 1 和 2 时的变化曲线

Fig. 10 Error as a function of aerosol scattering ratio $R_\lambda(z_0)$ and height with different value of ν in troposphere. (a)(b)(c) Errors of DIAL when $\nu=0, 1, 2$, respectively; (d)(e)(f) errors of D-DIAL when $\nu=0, 1, 2$, respectively

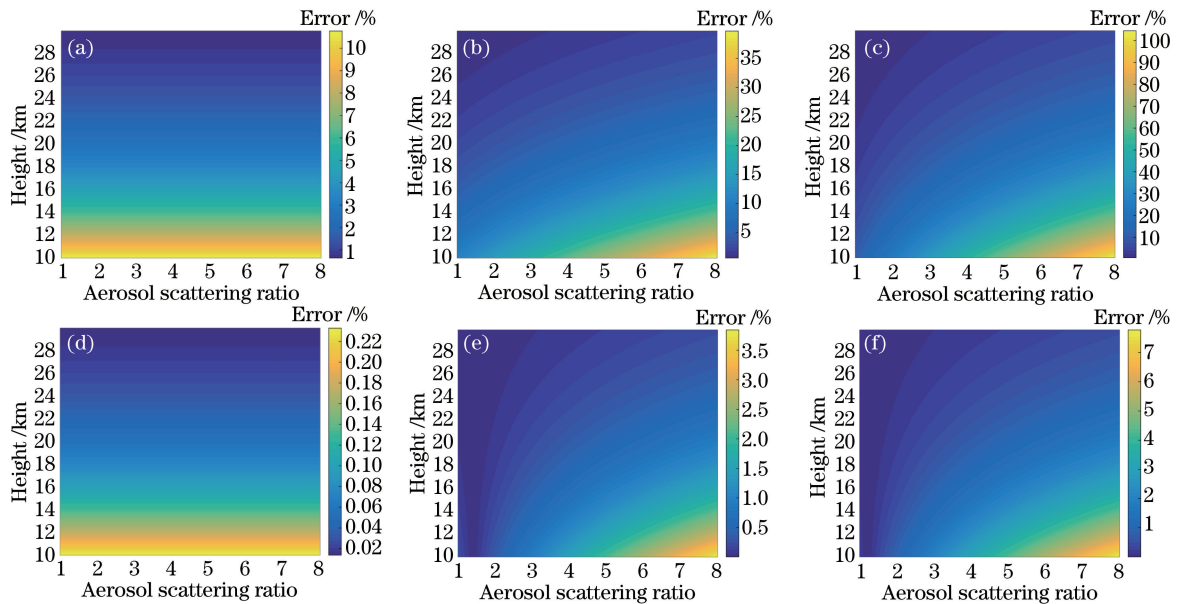


图 11 平流层不同 ν 下误差随高度与气溶胶散射比 $R_\lambda(z_0)$ 的变化曲线。(a)(b)(c) DIAL 方法的

误差在 ν 取 0, 1 和 2 时的变化曲线；(d)(e)(f) D-DIAL 方法的误差在 ν 取 0, 1 和 2 时的变化曲线

Fig. 11 Error as a function of aerosol scattering ratio $R_\lambda(z_0)$ and height with different value of ν in stratosphere. (a)(b)(c) Errors of DIAL when $\nu=0, 1, 2$, respectively; (d)(e)(f) errors of D-DIAL when $\nu=0, 1, 2$, respectively

层臭氧时大气分子消光的影响也贡献了近乎一半的误差,最高达 13%,可见在平流层中大气分子的影响也是不小的。然而使用 D-DIAL 方法的误差却要小得多,能够有效削减大气分子和大气气溶胶造成的误差。平流层受 ν 影响的误差变化规律与对流层相似,但是误差及误差随气溶胶含量增加的增长速度要小于对流层。

4 当气溶胶非均匀分布时对臭氧探测结果影响的讨论

本文是基于大气气溶胶在均匀分布的假设下进行模拟计算的,尽管此假设在大气较为洁净时以及大雾

和沙尘暴等环境下有其实际意义,但是在很多情况下大气气溶胶是不满足这一条件的,因此需对非均匀分布的气溶胶对以上模拟结果的影响进行简单讨论。

当气溶胶非均匀分布时,后向散射项对误差的贡献不再为零,此时要同时考虑后向散射项与消光项对探测的影响,臭氧探测的误差将会增大。当不能忽略后向散射项的影响时,后向散射波长指数 η 的不确定性也会对探测结果造成影响,从而使探测误差增大。

当气溶胶非均匀分布时,以上模拟得到的最佳 C 的取值未必依旧适用。尽管用传统方法取得的 C 的值^[8]只与探测波长有关而与气溶胶的分布无关,但是以上结果是通过模拟方法得到的,所以其值在非均匀分布的气溶胶中是否适用还需要具体的验证。

无论气溶胶的分布如何 D-DIAL 方法都能显著减小探测误差,且气溶胶含量越高,与 DIAL 方法相比它减小误差的能力就越明显。对于非均匀分布的气溶胶,不同的气溶胶分布情况对臭氧探测的误差的影响有所不同,需要更全面详细的实验,将在下一步的研究中对其进行更详细的讨论。

5 结 论

假设气溶胶散射比 R 不随高度改变,当大气较为洁净时,或很浓的气溶胶经过一段时间扩散后,以及大雾和沙尘暴等环境下,此条件是近似满足的,因而此假设有其实际意义。在此假设的基础上经过分析得到以下结论:

1) D-DIAL 方法测量臭氧的误差要远小于 DIAL 方法的误差,D-DIAL 方法削弱大气分子与大气气溶胶消光与后向散射的影响效果十分显著。

2) D-DIAL 方法中 C 取值为 $C = (\lambda_{1\text{off}} - \lambda_{1\text{on}}) / (\lambda_{2\text{off}} / \lambda_{2\text{on}})$ 确实能有效减少误差,但是这并不是最佳取值,通过数值模拟能得到更佳的 C 的值使误差十分接近于零。

3) 当 R 不随高度发生变化时,气溶胶后向散射项的贡献可以被忽略,即后向散射波长指数 η 的取值对探测结果并没有影响。

4) 当消光波长指数 $\nu=0$ 时,气溶胶消光项可以忽略,此时的误差完全是由大气分子的消光项造成的。同时大气分子的消光项对探测结果的影响也是不能忽略的。

5) 在对流层和平流层中,D-DIAL 与 DIAL 方法的测量误差均随着高度而增加。

6) 当 ν 不为零时,误差随着气溶胶散射比的增加线性增长。

7) 平流层中的探测误差要小于对流层的探测误差, ν 不为零时平流层误差随气溶胶含量的增长趋势要比对流层缓和。

参 考 文 献

- 1 Schotland R M, Sassen K, Stone R. Observations by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors[J]. Journal of Applied Meteorology, 1971, 10(5): 1011-1017.
- 2 Uehino O, Tabata I. Mobile lidar for simultaneous measurements of ozone, aerosols, and temperature in the stratosphere [J]. Applied Optics, 1991, 30(15): 2005-2012.
- 3 McDermond I S, Godin S M, Lindqvist L O. Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone[J]. Applied Optics, 1990, 29(25): 3603-3612.
- 4 McDermond I S, Haner D A, Klerman M M, *et al.*. Differential absorption lidar systems for tropospheric and stratospheric ozone measurements[J]. Optical Engineering, 1991, 30(1): 22-30.
- 5 Schotland R M. Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption[J]. Applied Meteorology, 1974, 13: 71-77.
- 6 Wang Shaolin, Xie Jun, Cao Kaifa, *et al.*. Monitoring O_3 in atmosphere by Raman-differential absorption method[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(5): 739-743.
汪少林, 谢 军, 曹开法, 等. 拉曼差分法探测大气中的臭氧[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 739-743.
- 7 Papayannis A, Ancellet G, Pelon J, *et al.*. Multiwavelength lidar for ozone measurements in the troposphere and the lower stratosphere[J]. Applied Optics, 1990, 29(4): 467-476.

- 8 Wang Z, Nakane H, Hu H, *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.
- 9 Wang Z, Zhou J, Hu H, *et al.*. Evaluation of dual differential absorption lidar based on Raman-shifted Nd:YAG or KrF laser for tropospheric ozone measurements[J]. *Applied Physics B*, 1996, 62(2): 143-147.
- 10 Vallar E A, Galvez M C D. Simultaneous two-wavelength lidar measurement of cloud and boundary layer aerosol extinction coefficients[C]. *SPIE*, 2001, 4153: 175-182.