

基于MAX-DOAS观测大气Ring效应的气溶胶消光廓线反演

牟福生¹ 谢品华^{1,2} 李昂¹ 王杨^{1,3} 吴丰成¹ 陈浩¹ 徐晋¹ 张杰¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230031

³Max-Planck Institute for Chemistry, Mainz, Germany, D-55128

摘要 Ring效应指大气中O₂和N₂分子对太阳光的转动拉曼散射导致太阳夫朗禾费线变浅(被填充)的现象。气溶胶能够改变光子在大气中的光程和大气散射性质,进而影响散射次数和转动拉曼散射几率,所以可以通过观测Ring效应强度获取气溶胶信息。研究了一种利用地基多轴差分吸收光谱(MAX-DOAS)仪器观测反演气溶胶信息的新方法,基于MAX-DOAS仪器在晴朗天气下对大气Ring效应进行观测,结合McArtim大气辐射传输模型可以获取气溶胶消光廓线。将MAX-DOAS反演气溶胶光学厚度结果和太阳光度计观测结果进行了对比,一致性较好。研究表明,基于地基MAX-DOAS观测大气Ring效应反演气溶胶消光廓线是可行的。

关键词 大气光学; 大气Ring效应; 多轴差分吸收光谱; 气溶胶; 太阳光度计

中图分类号 X122 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1101001

Retrieval of Aerosol Profile Based on the Ring Effect Observed by MAX-DOAS

Mou Fusheng¹ Xie Pinhua^{1,2} Li Ang¹ Wang Yang^{1,3} Wu Fengcheng¹
Chen Hao¹ Xu Jin¹ Zhang Jie¹

¹Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

³Max-Planck Institute for Chemistry, Mainz, Germany, D-55128

Abstract Ring effect is defined as the phenomenon that the depth of solar Fraunhofer lines in scattered light shallows (is filled up) and is caused by rotational Raman scattering by atmospheric O₂ and N₂ molecules. Aerosol can change the atmospheric light path of photons and atmospheric scattering properties, and then influence the scattering number and Roman scattering possibility, so the aerosol information can be retrieved from the observation of Ring effect. A new method for determining aerosol profile by ground-based multi axis differential optical absorption spectra(MAX-DOAS) observation is studied. Aerosol extinction profile information can be obtained through the MAX-DOAS observation under clear days and combination with McArtim. The comparison between retrieval result and measurement result from sunphotometer has a good agreement. The results show the retrieval of aerosol profile from Ring effect observed by ground-based MAX-DOAS is feasible.

Key words atmospheric optics; atmospheric Ring effect; multi axis differential optical absorption spectra;

收稿日期: 2015-04-10; 收到修改稿日期: 2015-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(41275038, 61275151)、环保公益性项目(201109006)、国家863计划(2014AA06A511, 2014AA06A508)、安徽省科技攻关计划项目(1301022083)、安徽省自然科学基金(1308085QF124)

作者简介: 牟福生(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事大气光谱探测方面的研究。E-mail: fsmou@aiofm.ac.cn

导师介绍: 谢品华(1968—), 女, 博士, 研究员, 主要从事环境光谱探测方面的研究。

E-mail: phxie@aiofm.ac.cn(通信联系人)

1 引言

随着城市以及工业的发展,大气中硫氧化物、氮氧化物和挥发性有机物等痕量气体的浓度以及一次气溶胶的含量大幅度增加^[1-2]。这些气体和气溶胶在大气物理和化学中起了重要作用,其中痕量气体不仅对城市光化学反应有重要影响,并且是二次颗粒物的重要前体物;大气气溶胶的含量和组成强烈地影响了气候系统的能量平衡,进而影响全球气候^[3]。两者含量不仅对城市空气质量有直接影响,而且对中国大范围雾霾的形成也起了不可忽视的作用。因此研究这些痕量气体浓度以及气溶胶含量的时空演化特征和区域传输是理解其在大气化学中所起的作用和制定污染防治方案的基础。

利用差分吸收光谱技术(DOAS)可以从地基仪器或者卫星探测到的信号中解析痕量气体柱浓度和气溶胶信息^[4]。而在这些利用太阳散射的大气遥测应用中,精确的 Ring 效应纠正是影响反演结果的一个关键因素^[5]。受太阳表面元素吸收影响,太阳光到达地球大气层顶时含有一定数量的黑暗特征谱线,称之为夫琅禾费线。Ring 效应是指由于太阳光在大气传输过程中会有一定几率发生非弹性转动拉曼散射,导致接收到的夫琅禾费线变浅(被填充)的现象^[6]。

虽然 Ring 效应对夫琅禾费线填充只占其深度的百分之几,但和很多大气痕量气体吸收相比, Ring 效应对夫琅禾费线的结构改变更加明显。因此在利用 DOAS 技术进行光谱解析时,都会将 Ring 效应当作一种伪吸收结构参与反演来排除其对反演过程的影响^[7-9]。在这个过程中, Ring 有效吸收结构的获取成为关键,研究者采用了不同的方法获取 Ring 差分吸收截面。其中 Chance 等^[10]通过将大气 N₂ 和 O₂ 分子的转动拉曼散射截面和太阳光谱卷积获取了 Ring 截面。这种方法相对快捷简便且能够明显减少 DOAS 反演中 Ring 效应造成的干扰,因此使用较为广泛。上述的研究在光谱解析过程中仅将 Ring 效应作为痕量气体反演过程的一种干扰进行去除,少有通过 Ring 效应本身对大气污染物传输和大气组分进行分析。最近的研究结果表明观测到的 Ring 效应可以对大气传输进行研究:除受观测几何和地表反照率影响,其强度也取决于大气散射和气溶胶以及云的光学特性,因此可以通过对 Ring 效应强度变化进行研究获取气溶胶和云的相关信息^[11-12]。近年来利用 Ring 效应测量云高和云压已经成功运用于臭氧总量测绘光谱仪(TOMS)、全球臭氧监测仪(GOME-2)和臭氧监测仪(OMI)等卫星观测仪器上,但是利用地基仪器遥测大气 Ring 效应并根据观测结果研究大气气溶胶和云性质方面尚少有研究。

德国马普化学所首次提出了利用 McArtim 模型定量模拟 Ring 效应,并给出了归一化 Ring 截面的计算方法^[13],并首次利用多轴差分吸收光谱(MAX-DOAS)仪器测量 Ring 效应并和大气辐射传输模型 McArtim 模拟结果进行了定量对比,研究了通过测量 Ring 效应获取气溶胶性质的可能性^[14]。2013年,国内学者裴显等^[15]利用 McArtim 模型对 Ring 效应进行了初步模拟。

本文研究了一种利用 Ring 效应反演气溶胶消光廓线的新方法。基于中国科学院合肥物质科学研究院的地基 MAX-DOAS 仪器对大气 Ring 效应进行观测,计算了 Ring 有效吸收截面,利用测量光谱解析获取了 Ring 效应强度因子,结合 McArtim 辐射传输模型,利用查表法获取了气溶胶消光廓线信息,并将结果和同一地点安装的太阳光度计观测结果进行了对比。

2 实验原理和反演算法

2.1 外场观测

MAX-DOAS 系统通过改变望远镜所指方向能够观测不同方向的光线,利用 DOAS 方法对测量光谱进行解析获取不同仰角 Ring 效应的强度,即拉曼散射几率(RSP, P_{RS})。在采用 DOAS 方法获取 RSP 时,需要选定一条参考光谱,反演结果即为测量角度的拉曼散射几率和参考谱的拉曼散射几率之差,称之为差分拉曼散射几率(dRSP, P_{dRS})。一般采用两种方法确定参考光谱:一条固定光谱作为参考光谱或者每个测量循环选取当圈 90° 方向测量光谱为参考谱。本文采用了一条固定光谱作为参考谱,本文望远镜的测量仰角为 6 个,分别为 2°、3°、6°、8°、10°、90°。

2.2 基于大气 Ring 效应反演气溶胶消光廓线算法

为了研究气溶胶各参量以及外界条件对于 Ring 效应强度的影响,本文采用了 Sasano 等^[16]的方法,对气溶胶消光廓线进行参量化假设:用气溶胶光学厚度(t)、气溶胶边界层高度(h)和气溶胶在边界层内权重(w)3 参量组成不同气溶胶消光廓线,加上单次散射反照率(SSA, A_{ss})和非对称因子(g)等大气条件构建多参量查找表,对大气气溶胶状态进行重建,并通过 McArtim 大气辐射传输模型计算了不同大气条件下的测量循环中各仰角的 Ring 效应差分强度因子 $P_{dRS, Ring, simu}$, 比较模型输出结果 $P_{dRS, Ring, simu}$ 和测量反演结果 $P_{dRS, Ring, meas}$, 并对两者结果进行最小化处理以获取与实际大气状态最相符的气溶胶消光廓线。算法示意图见图 1。

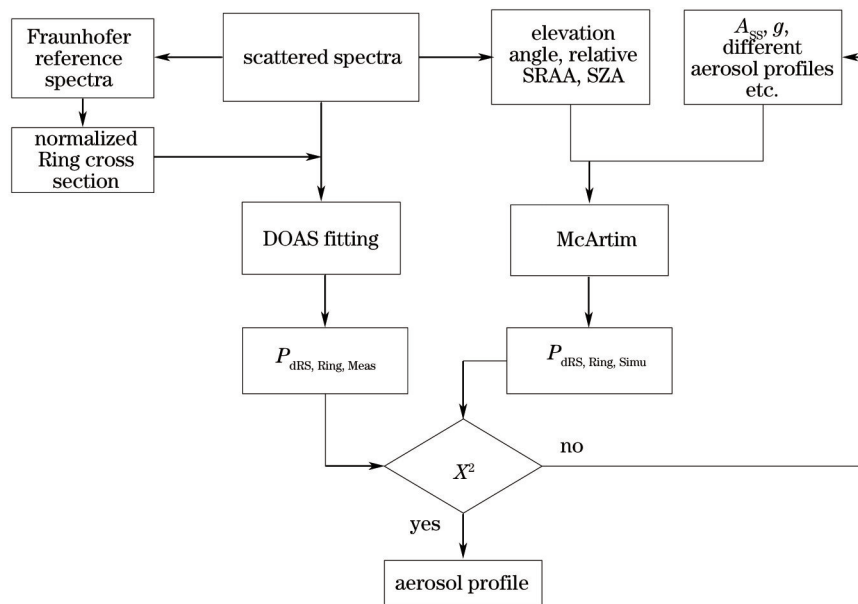


图 1 基于 MAX-DOAS 观测 Ring 效应反演气溶胶消光廓线示意图

Fig.1 Schematic diagram of aerosol profile retrieved based on the Ring effect observed by MAX-DOAS

本文采用全球形蒙特卡罗辐射传输模型 McArtim。它和其他大气传输模型相比,结果具有较好的一致性^[17]。McArtim 能够在给定大气条件下模拟大量光子的运行轨迹,基于统计规律对散射事件进行模拟,并能直接输出所有光子中发生转动拉曼散射光子所占的比例(即 P_{RS}),因此极为适合对 Ring 效应进行模拟。因对光子运行轨迹进行模拟耗时较长,因此在模型输入中需要选取合适的光子数,本文将其设置为 660000。在调用模型计算时,需先确定模型输入参数,有海拔高度、温度、湿度、压力、太阳天顶角(SZA)和相对方位角(SRAA)、大气气溶胶状态和痕量气体浓度等。其中太阳天顶角和相对方位角等根据测量时段计算获取,温度、湿度、压力以及痕量气体浓度等参数来自美国标准大气。

在气溶胶各参量中,除了气溶胶消光廓线外,还有单次散射反照率(A_{ss}),非对称因子(g)等。为了更全面了解其他气溶胶参量(A_{ss}, g)等外界条件对 Ring 效应的影响,减少模型输入造成的误差,利用 McArtim 研究了 A_{ss}, g 在低中高 3 种气溶胶条件下对拉曼散射几率的影响。如图 2 所示, A_{ss} 和 g 不变, P_{RS} 都随着气溶胶增加而减少,这主要是因为气溶胶粒子增加后,大气中米氏散射增加,减少了大气散射中瑞利散射所占比例,致使拉曼散射几率降低。在中高气溶胶条件下 P_{RS} 对 A_{ss} 变化较为敏感, A_{ss} 增加 0.2, P_{RS} 最大增加 5.8%。在 3 种气溶胶状态下 P_{RS} 对 g 都较不敏感。考虑到冬季合肥地区的气溶胶光学厚度较高, A_{ss} 和 g 的选取会对 P_{RS} 模拟结果有一定影响。因此在本次实验中选取了合肥地区冬季的典型值 $A_{ss} = 0.92, g = 0.72$ ^[18]。

此外,地表反照率也会对模型输出结果有一定的影响。本文研究了在低中高 3 种不同气溶胶状态下,不同地表反照率下 Ring 效应的 P_{RS} (如图 3 所示)。从图 3 中发现,在中气溶胶和高气溶胶($t=0.6$ 和 $t=2$)含量下, P_{RS} 值对反照率不敏感,在低气溶胶($t=0.19$)状态下, P_{RS} 值在反照率大于 0.1 时较为敏感,根据合肥实际地表情况其反照率小于 0.1,因此在低中高 3 种气溶胶状态下反照率对 P_{RS} 值影响不大,在模型中选取地表反照率为 0.05。

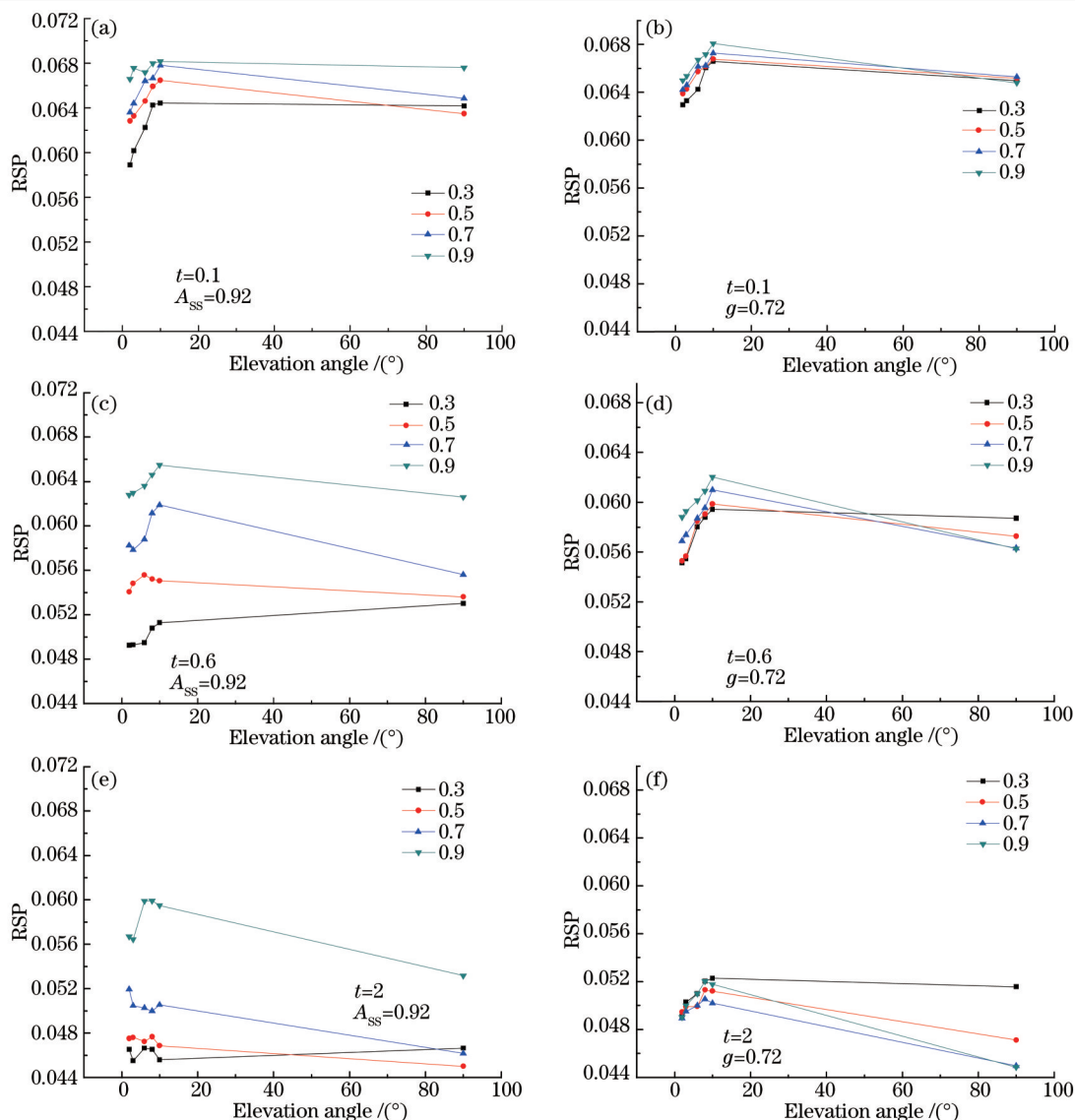


图2 不同气溶胶含量下,不同(a)、(c)、(e) A_{ss} 和(b)、(d)、(f) g 情况下 Ring效应的 P_{rs} 模拟值

Fig.2 Simulated P_{rs} values of Ring effect under different aerosol contents for different (a), (c), (e) A_{ss} and (b), (d),(f) g

完成上述参量确定后,需要设置气溶胶消光廓线参数。气溶胶主要来源于外来输送和本地积累,后者气溶胶主要位于边界层内,本文拟采用了 Sasano 研究组的研究思路,假设边界层内气溶胶消光系数为一常数,边界层上则随指数衰减,并以此确定廓线形状,如下式所示:

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} w \cdot \frac{t}{h}, & z \leq h \\ C \cdot \exp(-z/\beta), & z > h \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\varepsilon(z)$ 为气溶胶总消光系数, t 为气溶胶总光学厚度, w 为边界层内气溶胶光学厚度所占比重, C 为常数, h 为边界层高度, β 为自由对流层高度,在此设 β 为 5 km。不考虑平流层气溶胶,气溶胶消光系数沿垂直方向的积分即为对流层气溶胶光学厚度,设对流层高度为 15 km,因此 t 可以表示为

$$t = \int_0^{15 \text{ km}} \varepsilon(z) \cdot dz. \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,有

$$t = \int_0^h w \cdot \frac{t}{h} \cdot dz + \int_h^{15 \text{ km}} C \cdot \exp(-z/\beta) \cdot dz. \quad (3)$$

通过(3)式获取归一化常数 C , (1)式最终可表示为

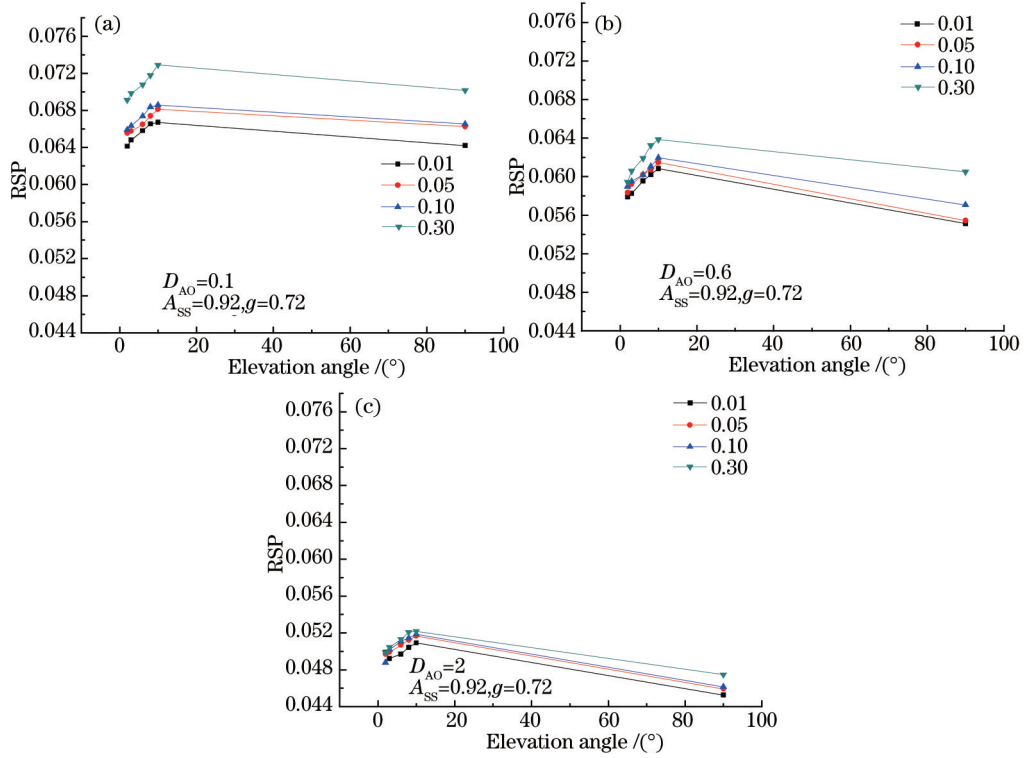


图3 在不同气溶胶含量下,不同地表反照率情况下Ring效应的 P_{rs} 模拟值

Fig.3 Simulated P_{rs} values of Ring effect under different ground albedo rates for different aerosol contents

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} w \cdot \frac{t}{h}, & z \leq h \\ \frac{t \cdot (w - 1)}{\beta \left[\exp\left(\frac{-15}{\beta}\right) - \exp\left(\frac{-h}{\beta}\right) \right]} \cdot \exp(-z/\beta), & z > h \end{cases} \quad (4)$$

在上述假设下,气溶胶消光廓线可以用 t 、 w 、 h 3个参量表示。建立查找表时代入不同的 t 、 w 、 h 即可获取对应的气溶胶消光廓线并作为已知量代入模型。查找表的具体设置如表1所示。

表1 建立查找表的输入参数

Table 1 Input parameters for look-up table

Parameter	Value
SZA $l(^{\circ})$	53.85
SRAA $l(^{\circ})$	171.46
g	0.72
A_{ss}	0.92
Ground albedo	0.05
Photon number	660000
t	0.1,0.15,0.2,0.25,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1
w	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0
h /km	0.2,0.4,0.6,0.8,1,1.2,1.4,1.6,1.8,2
β	5
Trace gas profile	O ₄ US standard
Wavelength /nm	350
Elevation angle $l(^{\circ})$	2,3,6,8,10,90
#	7200

建立查找表后,可以获得不同仰角下模拟的 Ring 效应强度因子 dRSP 值。根据图 1 的流程结合测量,找到最小的 χ^2 即可,详见下面章节。

3 实验结果和分析

3.1 光谱分析

由图 1 可知,基于查表法反演气溶胶消光廓线需要通过 DOAS 方法对 MAX-DOAS 仪器获取的不同观测方向的光谱进行反演,得到不同高度角下 Ring 效应的差分强度因子 P_{ars} 。反演中拟合波段为 337~370 nm,除了 Ring 结构外,其他包含气体截面有 NO_2 (298 K,vanDaele), O_4 (296 K,Hermans), O_3 (223 K,Bogumil)。其中 Ring 有效截面采用 Wagner 的计算方法由参考谱计算获取。参考谱选择 2013 年 11 月 29 日中午 11:59 天顶方向的测量光谱。图 4 给出了 2013 年 11 月 29 日 11:11 10° 方向一条测量谱的反演过程。图 5 给出了 2013 年 11 月 29 日~12 月 2 日 4 天 11:00~12:00 MAX-DOAS 测量的不同仰角下 Ring 效应 P_{ars} 值。从图 4 的反演过程可知 Ring 的 P_{ars} 为 $(8.25 \pm 0.16) \times 10^{-3}$, 拟合残差为 5.87×10^{-4} , 主要来源为杂散光噪声和其他结构。

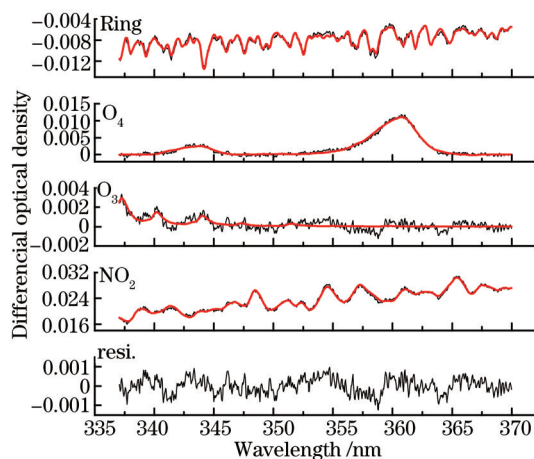


图 4 测量光谱拟合过程示例

Fig.4 Fitting example of a measurement spectrum

按以上光谱处理方法对 2013 年 11 月 29 日~12 月 2 日 4 天 11:00~12:00 MAX-DAOS 测量的光谱进行反演,得到的 Ring 的 P_{ars} 如图 5 所示。11 月 29 日天空在 4 天内 t 最低,之后 3 天随着 t 增加,大气中米散射增加,减少了光子发生非弹性散射的几率, P_{rs} 也随之减少。其中 12 月 1 日 P_{ars} 为负值且在 4 天内最小,说明该天 t 较大,望远镜接收到的光子非弹性散射所占比例在 4 天内最小。

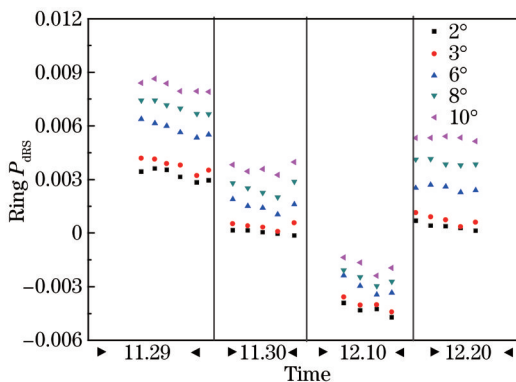


图 5 11 月 29 日~12 月 2 日 4 天的 11:00~12:00 的 P_{ars} 变化

Fig.5 Variation of P_{ars} in 11:00~12:00 between 29 November and 2 December

3.2 气溶胶垂直分布反演

将表 1 的参数输入到模型中,通过模拟获取了 2013 年 11 月 29 日~12 月 2 日 4 天 11:00~12:00 中国科学院合肥物质科学研究院(117.16°E, 31.91°N)晴朗天气下地基 MAX-DOAS 仪器在不同气溶胶消光廓线下 5 个

仰角的 P_{ars} 模拟值。根据图 1 的处理流程, 获取模拟值以及测量值后, 需要对两者进行最小化:

$$\chi^2(t, w, h) = \sum_{\alpha=2}^{\alpha=10} \left[\frac{\alpha_{\text{Meas}} - \alpha_{\text{Sim}}(t, w, h)}{\sigma(\alpha_{\text{Meas}})} \right]^2, \quad (5)$$

式中 α_{Sim} 表示模拟值, α_{Meas} 表示测量值, $\sigma(\alpha_{\text{Meas}})$ 表示测量值的标准差。如果一个测量循环中 5 个角度最小化结果 $\chi^2(t, w, h)$ 最小, 即可认为设定的廓线参量较为符合真实情况。但是在有限的参数设置情况下不能找到最为符合的 t, w, h , 因此在计算过程中对组成廓线参量 (t, w, h) 进行线性插值, 获取更加精细的气溶胶消光廓线, 重建查找表并重复最小化过程, 直至获取最合理的 t, w, h 即为气溶胶消光廓线。研究中为确保测量稳定性并减少单次测量误差, 对测量结果进行了小时平均。图 6 给出了 2013 年 11 月 29 日~12 月 2 日 4 天 11:00~12:00 MAX-DOAS 测量和模拟的不同仰角下的 Ring 效应的 P_{ars} 值。由图可知在低气溶胶含量[图 6(a), $t=0.3$]时, 各仰角 P_{ars} 相差较大, 最大值最小值相差约为 3.6×10^{-2} 。在高气溶胶状态下[如图 6(c), $t=1$], 各仰角之间的 P_{ars} 相差较小, 最大值与最小值相差约 2.56×10^{-2} , 这是因为高气溶胶下不同角度光子平均自由程差别不明显。此外 P_{ars} 一般随仰角增大而增大, 这是因为高仰角的平均自由程相对较大, 传输过程中发生非弹性散射的几率更大。

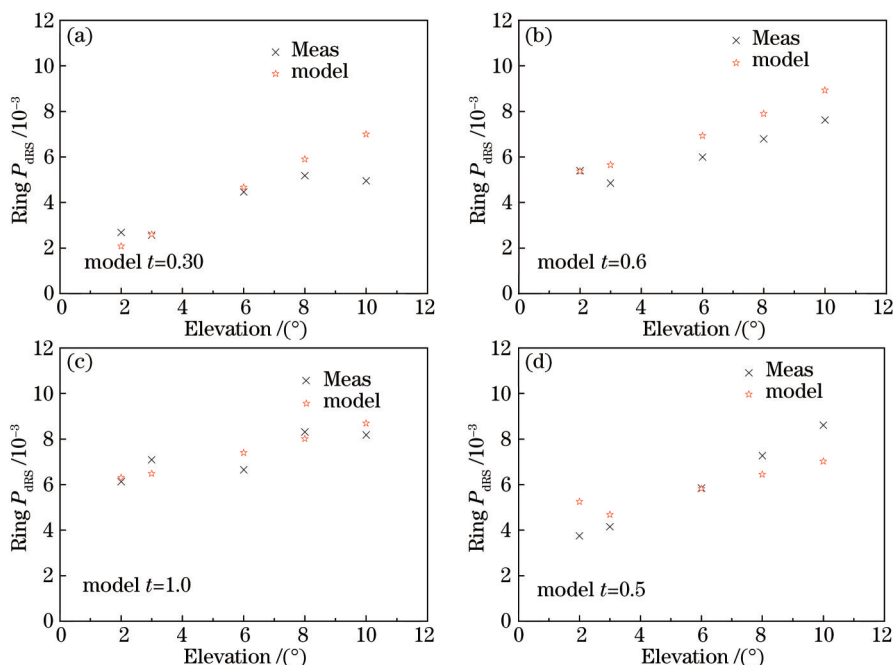


图 6 模拟和测量的 Ring 的 P_{ars} 值。(a)11 月 29 日; (b)11 月 30 日; (c) 12 月 1 日; (d)12 月 2 日

Fig.6 Simulated and measured values of P_{ars} for Ring effect.(a) November 29; (b) November 30; (c) December 1; (d) December 2

依据(5)式, 对 P_{ars} 模拟值和测量值进行最小化得到气溶胶消光廓线中的三参量 t, w, h , 并据此得到 11 月 29 日~12 月 2 日 4 天 11:00~12:00 的气溶胶消光廓线, 如图 7 所示。由图可知, 12 月 1 日 11:00~12:00 的气溶胶光学厚度 t 较大, 由 P_{ars} 4 天的变化也可以看出(图 5 第 3 部分), 相比其他 3 天 12 月 1 日 P_{ars} 有明显谷值, 这从侧面验证了该时间段内气溶胶消光作用较强。另外, 从图 7 中发现, 气溶胶造成的消光作用基本位于近地面而非其他高度, 这说明在实验过程中气溶胶主要来源于本地积累, 没有外来输送产生。

3.3 与太阳光度计观测结果对比

测量过程中 MAX-DOAS 系统附近还安装了一台太阳光度计 CE318。由于 MAX-DOAS 是通过 350 nm 处观测到的 Ring 效应强度反演的气溶胶状态, 因此需要利用太阳光度计输出的 Angstrom 因子, 将 CE318 测量的 380 nm 波段气溶胶光学厚度转化到 350 nm^[19], 再与 MAX-DOAS 结果对比。

由表 2 可知 4 天 11:00~12:00 基于 Ring 效应反演的气溶胶光学厚度和太阳光度计观测结果具有较好的一致性。其中 11 月 29 日 Ring 效应反演结果和太阳光度计测量结果相差较大, 这可能是因为廓线形状假设与真实情况有差异造成的, 此外单次散射反照率, 非对称因子以及痕量气体廓线等模型输入参量也会引入一定的误差。

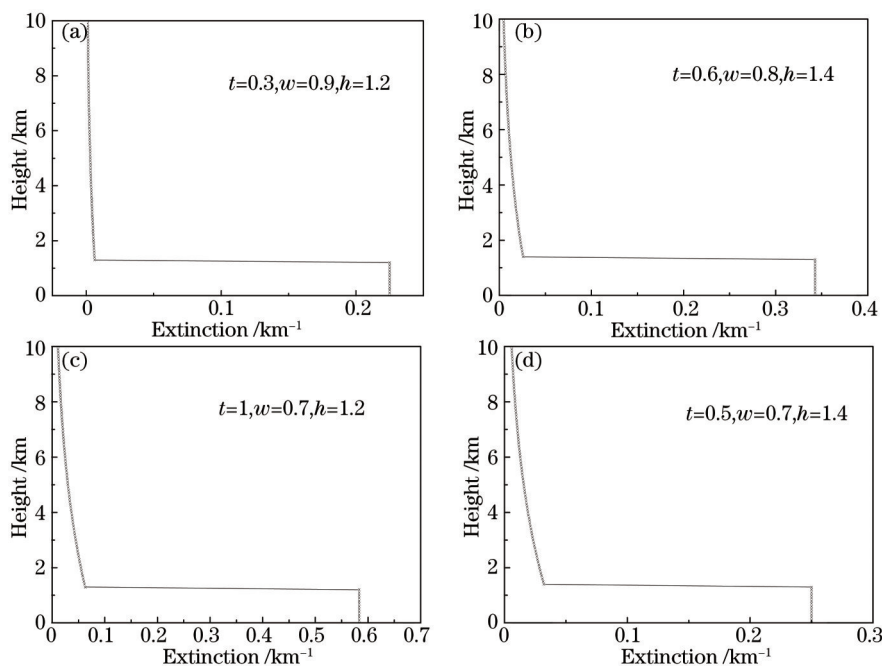


图7 气溶胶消光廓线。(a)11月29日; (b)11月30日; (c)12月1日; (d)12月2日
Fig.7 Aerosol profiles. (a) November 29 ; (b) November 30; (c) December 1 ; (d) December 2

表2 360 nm时的消光系数对比

Table 2 Comparison of extinction coefficients at 360 nm

	Nov. 29	Nov. 30	Dec. 1	Dec. 2
Look-up table for Ring /km ⁻¹	0.3	0.6	1	0.5
Sunphotometer /km ⁻¹	0.22	0.56	0.99	0.53

4 结 论

研究了一种利用大气 Ring 效应反演气溶胶消光廓线的新方法,利用该方法反演了11月29日~12月2日4天11:00~12:00的气溶胶消光廓线,并和太阳光度计观测的气溶胶光学厚度进行了对比,一致性较好。结果表明,利用大气 Ring 效应反演气溶胶消光廓线这种方法是可行的,且查表法相比其他算法(如最优估算法)较为简单,只需进行简单参量化假设即可获取气溶胶消光廓线。但在实际应用中,气溶胶状态通常较为复杂,需要对廓线形状等其他相关参量进一步研究以适应不同情况(如外来输送等)下获取气溶胶消光廓线。在接下来的工作中,将研究利用 Ring 效应获取更多气溶胶参量并改进模型计算速率。

致谢 感谢德国马普化学所 Thomas Wagner 教授在模型使用和反演数据以及研究思路方面给予的大力指导。

参 考 文 献

- Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. Atmospheric Aerosol Tutorial[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995: 32- 35, 299-323. 章澄昌,周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 32-35, 299-323.
- Wang Mingxing. Atmospheric Chemistry[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 467-469. 王明星. 大气化学[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 467-469.
- Rosenfeld D. Aerosols, clouds, and climate[J]. Science, 2006, 312(5778): 1323-1324.
- Platt U, Stutz J. Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Application[M]. New York: Springer-Verlag, 2008: 613.
- Wagner T, Friedeburg C von, Wenig M, et al.. UV/vis observations of atmospheric O₃ absorption using direct moon light and zenith scattered sunlight under clear and cloudy sky conditions[J]. J Geophys Res, 2002, 107(D20): 4424.
- Brinkmann R T. Rotational Raman scattering in planetary atmosphere[J]. The Astrophysical Journal, 1969, 154: 1087-1093.
- Wang Shanshan, Zhou Bin, Ye Qing, et al.. Application of vehicle-borne passive differential optical absorption spectroscopy for urban traffic air pollution monitoring[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2645-2649.

- 王珊珊,周 斌,叶 庆,等. 车载被动差分吸收光谱在城市道路空气污染监测中的应用[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2645-2649.
- 8 Zhou Haijin, Liu Wenqing, Si Fuqi, *et al.*. Retrieval of atmospheric NO₂ vertical profile from multi-axis differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101007.
- 周海金,刘文清,司福祺,等. 被动多轴差分吸收光谱技术监测大气 NO₂垂直廓线研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101007.
- 9 Shi Peng, Xie Pinhua, Li Ang, *et al.*. Measurement of nitrate radical in the atmosphere by direct moonlight passive differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3643-3648.
- 石 鹏,谢品华,李 昂,等. 基于直射月光的差分吸收光谱技术测量大气 NO₃自由基[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3643-3648.
- 10 Kelly V Chance, Robert J D Spurr. Ring effect studies: Rayleigh scattering, including molecular parameters for rotational Raman scattering, and the Fraunhofer spectrum[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(21): 5224-5230.
- 11 J Joiner, P K Bhartia. The determination of cloud pressures from rotational Raman scattering in satellite backscatter ultraviolet measurements[J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(D11): 23019-23026.
- 12 R deBeek, M Vountas, V V Rozanov, *et al.*. The Ring effect in the cloudy atmosphere[J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(4): 721-724.
- 13 T Wagner, S Beirle, T Deutschmann. Three-dimensional simulation of the Ring effect in observations of scattered sun light using Monte Carlo radiative transfer models[J]. *Atmos Meas Tech*, 2009, 2(1): 113-124.
- 14 T Wagner, T Deutschmann, U Platt. Determination of aerosol properties from MAX-DOAS observations of the Ring effect[J]. *Atmos Meas Tech*, 2009, 2(2009): 495-512.
- 15 Pei Xian, Li Ang, Xie Pinhua, *et al.*. Ring effect simulation based on Monte Carlo atmospheric radiative transfer model[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(5): 354-363.
- 裴 显,李 昂,谢品华,等. 基于 Monte Carlo 大气辐射传输模型的 Ring 效应模拟[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(5): 354-363.
- 16 Yasuhiro Sasano. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(24): 4941-4952.
- 17 Tim Deutschmann, Steffen Beirle, Udo Frieß, *et al.*. The Monte Carlo atmospheric radiative transfer model McArtim: Introduction and validation of Jacobians and 3D features[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2011, 112(6): 1119-1137.
- 18 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.
- 19 K Clémer, M Van Roozendaal, C Fayt, *et al.*. Multiple wavelength retrieval of tropospheric aerosol optical properties from MAXDOAS measurements in Beijing[J]. *Atmos Meas Tech*, 2010, 3(4): 863-878.

栏目编辑: 史 敏