

基于 MAX-DOAS 观测大气 Ring 效应的气溶胶光学参数反演

牟福生^{1,2}, 李 昂¹, 吴丰成¹, 谢品华^{1,3,4}, 王 杨⁵, 陈 浩¹, 徐 晋¹, 李素文²

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淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000;

³中国科学院城市环境研究所中国科学院城市大气环境研究卓越创新中心, 福建 厦门 361021;

⁴中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230031;

⁵马普化学研究所, 美因茨 D-55128, 德国

摘要 Ring 效应是指大气分子对太阳光的转动拉曼散射致使太阳光中夫琅禾费线变浅的现象。气溶胶能够改变光子在大气中的路径和大气散射性质, 最终影响夫琅禾费线的填充程度, 因此可以通过观测 Ring 效应强度获取气溶胶信息。分析了 Ring 效应对气溶胶光学参量(气溶胶光学厚度、单次散射反照率、非对称因子等)的敏感性, 发展了一种结合大气辐射传输模型并利用地基多轴差分吸收光谱(MAX-DOAS)仪器观测的 Ring 效应获取气溶胶光学特性的新方法。将 MAX-DOAS 反演结果和太阳光度计的观测结果进行了对比, 两者一致性较好。研究表明, 基于地基 MAX-DOAS 观测的 Ring 效应可以实现气溶胶光学特性的探测。

关键词 大气光学; 大气 Ring 效应; 多轴差分吸收光谱; 气溶胶; 非对称因子

中图分类号 X122 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0701001

Retrieval of Aerosol Optical Parameters Based on Ring Effect Observed by MAX-DOAS

Mou Fusheng^{1,2}, Li Ang¹, Wu Fengcheng¹, Xie Pinhua^{1,3,4},
Wang Yang⁵, Chen Hao¹, Xu Jin¹, Li Suwen²

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

²School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China;

³Innovation Excellent Center for Urban Atmospheric Environment of CAS, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361021, China;

⁴School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

⁵Max-Planck Institute for Chemistry, Mainz D-55128, Germany

Abstract Ring effect is defined as the phenomenon that the depth of solar Fraunhofer lines shallows caused by solar rotational Raman scattering of sunlight. Aerosol can change the atmospheric light paths of photons and atmospheric scattering properties, and then influence the filling-in of Fraunhofer lines, so we can retrieve the aerosol information from the intensity of Ring effect. Sensitivity of the Ring effect to optical parameters of aerosol is analyzed, including aerosol optical depth, single scattering albedo and asymmetry factor. A new method for determining aerosol optical

收稿日期: 2016-12-12; 收到修改稿日期: 2017-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(41275038, 41475017, 91544104)、国家 863 计划(2014AA06A511, 2014AA06A508)、安徽省科技攻关计划(1301022083)、安徽省自然科学基金(1308085QF124, 1508085QD71)

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

导师简介: 谢品华(1968—), 女, 博士, 研究员, 主要从事大气探测技术方面的研究。E-mail: phxie@aiofm.ac.cn (通信联系人)

properties by ground-based multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) observation and the atmospheric radiative transfer model is developed. The MAX-DOAS retrieval result is in good agreement with the measurement result from sun photometer. The study shows that the Ring effect observed by ground-based MAX-DOAS can be used to detect the aerosol properties.

Key words atmospheric optics; atmospheric Ring effect; multi-axis differential optical absorption spectroscopy; aerosol; asymmetry factor

OCIS codes 010.1290; 120.0280; 300.6540; 320.7140

1 引 言

大气中的气溶胶粒子可直接或间接通过各种辐射强迫机制影响地气系统的辐射收支,进而影响全球气候^[1]。由于气溶胶辐射强迫机制非常复杂,因此评估气溶胶的气候效应难度较大,到目前为止气溶胶的气候效应仍然是人类活动引起的气候变化预测中不确定性最大的一个因素^[2-3]。气溶胶光学特性参数的确定是准确估算气溶胶辐射强迫的前提条件,已经成为了国际研究的热点^[4]。这些光学参数不但取决于气溶胶浓度、化学组成和粒子形状,还取决于气溶胶粒子谱分布等物理参数。气溶胶光学参数(如光学厚度、单次散射反照率和非对称因子等)的准确测量一直是气溶胶探测技术中的关键问题^[5]。

在气溶胶光学参数的现场监测过程中,常用的仪器有光学粒子计数器、浊度计等,通过监测可得到所监测地点的气溶胶粒谱分布以及散射系数^[6]。近年来光学遥感技术在光学参数测量方面得到了广泛应用,其中地基遥感气溶胶光学特性的测量方法有太阳光度计和激光雷达等。太阳光度计可以提供高精度的气溶胶光学厚度以及非对称因子信息,在此基础上 Dubovik 等^[7]获得了气溶胶粒谱分布、单次散射反照率等信息。激光雷达是一种主动遥测技术,可以获取气溶胶的垂直分布信息,是研究单点气溶胶光学特性的有效手段^[8]。

近年来差分吸收光谱技术(DOAS)逐步发展,主要用于对流层气体柱浓度的测量和廓线反演,在此基础上出现了通过测量四聚氧(O_4)气体吸收反演大气气溶胶光学特性的方法^[9]。在 DOAS 反演过程中一般将大气 Ring 效应作为干扰扣除,由于 Ring 效应受大气散射和气溶胶光学特性的影响,因此通过测量 Ring 效应强度可以获取气溶胶光学参量(如非对称因子)。2007 年德国马普化学研究所 Wagner 等^[10]第一次利用蒙特卡罗大气辐射传输(McArtim)模型对 Ring 效应进行了定量模拟,2009 年第一次利用多轴差分吸收光谱(MAX-DOAS)仪器测量 Ring 效应并与模型结果进行了定量对比,研究了基于 Ring 效应获取气溶胶性质的可能性^[11]。2016 年 Ortega 等^[12]通过地基 MAX-DOAS 观测 Ring 效应,获取了气溶胶光学厚度和非对称因子信息。国内学者中裴显等^[13]利用 McArtim 模型对 Ring 效应进行了初步模拟,但基于 Ring 效应获取气溶胶信息的研究较为少见。

本文开展了利用地基 MAX-DOAS 观测的大气 Ring 效应获取气溶胶光学特性(光学厚度和非对称因子)的研究,基于合肥科学岛的地基 MAX-DOAS 仪器对 Ring 效应进行观测,通过光谱解析获取了差分 Ring 效应强度,利用查表法获取了气溶胶光学厚度和非对称因子信息,并将反演结果与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 实验原理和观测

实验地点位于合肥西北郊区科学岛,在晴朗无云天气下观测,时间分别为 2013 年 10 月 11 日(高气溶胶)和 10 月 13 日(低气溶胶),实验仪器有二维 MAX-DOAS 系统和太阳光度计 CE318。二维 MAX-DOAS 系统(图 1)能够通过改变望远镜指向获取不同方向的测量光谱^[14],利用 DOAS 方法解析光谱可以获得测量光谱的 Ring 效应强度,即拉曼散射概率(RSP)。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 RSP 与参考谱 RSP 之差,称之为差分拉曼散射概率(dRSP)。太阳光度计通过观测不同方向的天空辐射强度可以获取准确的气溶胶光学参量,在实验中可为 MAX-DOAS 反演结果提供对比验证。

2.2 基于 Ring 效应反演气溶胶光学参数的算法

通过观测和模型相结合,利用 McArtim 模型对地基被动 DOAS 观测到的 Ring 效应进行模拟,分析 Ring 效应在不同大气状态和观测姿态下对气溶胶光学参量的敏感性,从而确定反演关键参数和最佳测量方

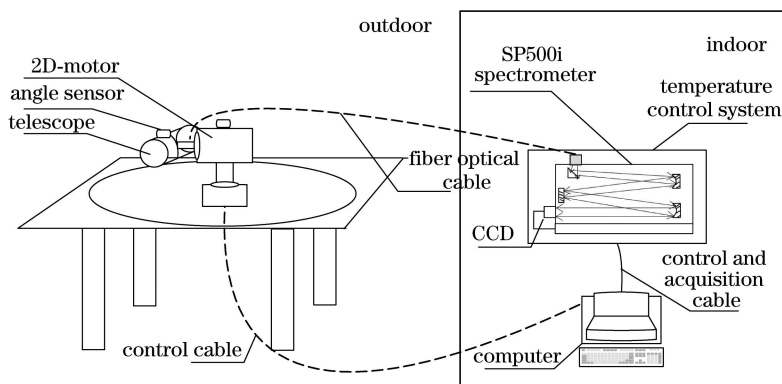


图 1 MAX-DOAS 系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of MAX-DOAS system

法^[10]。基于敏感性分析结果对大气气溶胶状态进行参量化假设,通过设置不同参量可以获取不同气溶胶状态,代入模型可以得到不同气溶胶条件下的 Ring 效应强度。将模拟结果与测量结果相比,通过最小化过程即可获得与真实大气状态最符合的气溶胶光学参量^[15],具体算法如图 2 所示。

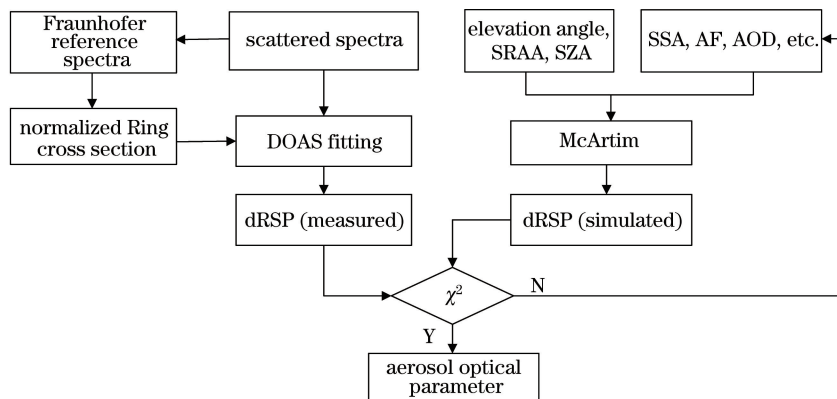


图 2 基于 MAX-DOAS 观测 Ring 效应的气溶胶光学参量反演示意图

Fig. 2 Schematic of aerosol optical parameter inversion based on Ring effect observed by MAX-DOAS

气溶胶光学参量主要有气溶胶光学厚度(AOD)、气溶胶边界层高度(BH)、单次散射反照率(SSA)、非对称因子(AF)等。图 3 所示为固定太阳天顶角(SZA)时平纬圈扫描下 RSP 对 AOD 和 BH 的敏感性。为提高运算效率,在模拟中选取反演波段(337~370 nm)的中心波长为 350 nm。考虑到中国城市地区大气气溶胶含量较高且近地面污染严重,低仰角的吸收光程多位于近地面,因此选取仰角为 6°进行观测和模拟,同时通过增加模拟中的光子数来提高模型结果的稳定性。模拟结果表明:平纬圈观测中 RSP 对 AOD 十分敏感且在不同方位角的敏感性存在差异,RSP 一般随 AOD 的增加而减小,这主要是因为随着气溶胶的增多,大气瑞利散射减少而米散射增加,发生转动拉曼散射的概率降低^[16]。在望远镜指向和太阳方向一致时 Ring 效应对低气溶胶最为敏感,AOD 从 0 增加到 0.05 时 RSP 变化 19.6%;两者方向相差约 90°时对中等气溶胶敏感,AOD 从 0.2 增加到 0.5 时 RSP 变化 18.4%,在高气溶胶下不是十分敏感。边界层高度敏感性研究表明 RSP 随气溶胶 BH 增加而增大,但是在 BH 超过 1 km 后变化较小,本文固定气溶胶 BH 为 1 km。

在平纬圈扫描模式下对 AF 和 SSA 进行灵敏度分析。由图 4 可知:多方位角扫描方式下 RSP 随 AF 的增加而增大,在相对方位角(SRAA)较大时 RSP 对 AF 最为敏感^[10];各方位角 RSP 基本不随 SSA 发生变化,因此 RSP 对 SSA 不敏感。此外,地表反照率对 RSP 的影响较小,因此在模型输入中假设边界层高度不变(1 km),同时固定 SSA 为 1,地表反照率为 0.05。

由上述分析可知平纬圈扫描模式下 AOD 和 AF 对 RSP 影响较大,因此可以利用平纬圈测量方式下获取的 RSP 对两者进行反演。假设稳定大气条件下气溶胶在边界内均匀分布,利用模型建立查找表即可获得不同 AOD 和 AF 对应的大气气溶胶状态。根据表 1 参数设置并基于模拟可以获取不同大气状态下的 RSP

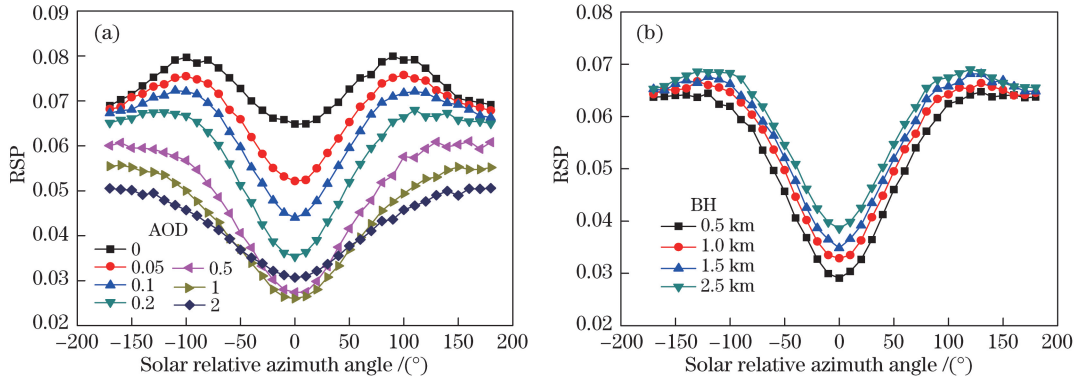


图 3 350 nm 处 RSP 的敏感性(SZA 为 50°,SSA 为 1,AF 为 0.72,地表反照率为 0.05)。(a)对气溶胶光学厚度的敏感性 (假设 BH 为 1 km 且在边界层内气溶胶均匀分布);(b)对边界层高度的敏感性(AOD 为 0.2)

Fig. 3 Sensitivity of RSP at 350 nm (SZA is 50°, SSA is 1, AF is 0.72, surface albedo is 0.05). (a) Sensitivity to aerosol optical depth (suppose that BH is 1 km and aerosol has uniform distribution in boundary layer); (b) sensitivity to boundary height (AOD is 0.2)

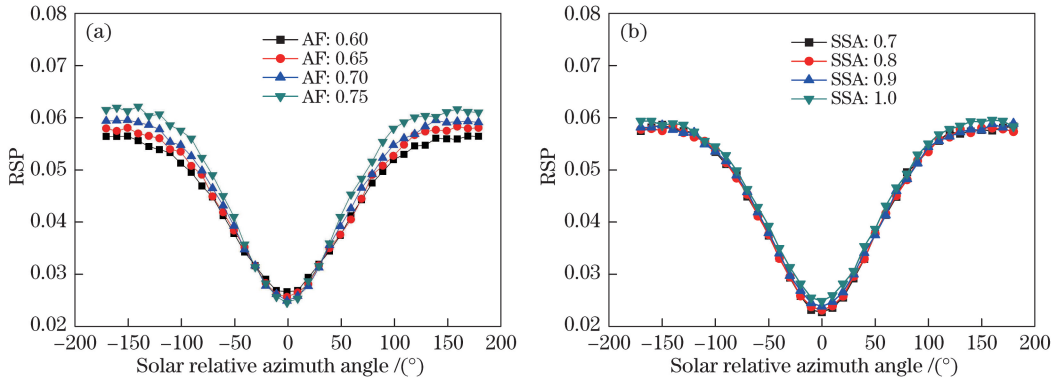


图 4 350 nm 处 RSP 对(a)非对称因子和(b)单次散射反照率的敏感性(假设 BH 为 1 km 且在边界层内气溶胶均匀分布, AOD 为 0.2,SZA 为 50°,SSA 为 1,AF 为 0.72,地表反照率为 0.05)

Fig. 4 Sensitivity of RSP at 350 nm to (a) asymmetry factor and (b) single scattering albedo (AOD is 0.2, SZA is 50°, SSA is 1, AF is 0.72, surface albedo is 0.05, suppose that BH is 1 km and aerosol has uniform distribution in boundary layer)

值。对测量值和模拟值进行最小化可以获取最优化结果并重建真实大气状态,采用的公式为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{P_{RS,meas}(i) - P_{RS,simu}(i)}{\sigma_{RSP,meas}(i)} \right]^2, \quad (1)$$

式中 $P_{RS,meas}(i)$ 和 $P_{RS,simu}(i)$ 分别为第 i 个方位角测量以及查找表中模拟的 RSP 绝对值, $\sigma_{RSP,meas}(i)$ 为第 i 个方位角的测量误差, χ^2 为代价函数, n 表示平纬圈扫描中相对方位角的个数。

表 1 McArtim 模型的输入参数

Table 1 Input parameters of McArtim model

Parameter	Value
SZA	Measurement result
SRAA	Measurement result
AF	0.62-0.76, step size of 0.02
SSA	1
Albedo	0.05
Photon number	10^6
AOD	0-2.0, step size of 0.02
Weighting function	1
BH /km	1
Free tropospheric height /km	5
Trace gas profile	O ₄ US standard atmosphere
Wavelength /nm	350
Elevation angle / (°)	6, 90

3 实验结果和分析

3.1 光谱反演

利用 DOAS 方法对测量光谱进行处理,反演软件采用 WinDOAS^[17],选取 337~370 nm 波段反演获取差分 Ring 效应强度 dRSP。反演气体包含二氧化氮(NO_2)(298 K, vanDaele), O_4 (296 K, Hermans),臭氧(O_3 , 223 K, Bogumil),HCHO(297 K, Meller)^[18-20]和 Ring 结构。在反演中将 Ring 效应作为一种伪吸收气体,其差分吸收截面通过 Wagner 等^[10]的方法计算得到。参考谱选择 2013 年 11 月 29 日中午时段的天顶光谱(RSP 为 6.25×10^{-2})。图 5 所示为 2013 年 10 月 13 日 10:14 时刻 186° 方位角的反演结果,其中相对参考谱的差分 Ring 效应强度 dRSP 为 -2.30×10^{-2} ,绝对 RSP 为差分 Ring 效应强度和参考谱 Ring 效应强度之和(3.77×10^{-2})。反演残差为 1.99×10^{-3} ,主要来源于噪声和未知结构。

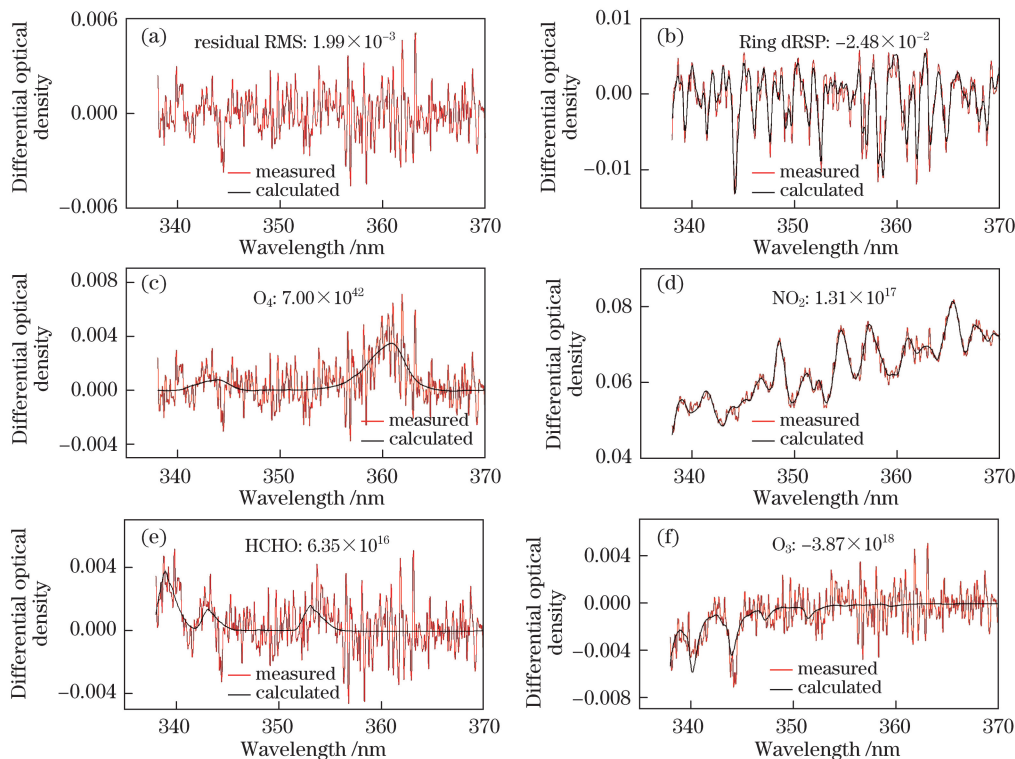


图 5 测量光谱拟合过程示例

Fig. 5 Fitting example of measurement spectrum

3.2 AOD 和 AF 反演以及和太阳光度计对比

敏感性研究(图 3 和图 4)结果表明 AOD 和 AF 对方位角变化较为敏感,因此选取平纬圈扫描方式对两者进行观测,结果如图 6 所示。根据第 3.1 节所述方法对测量光谱进行反演,以 2013 年 10 月 13 日平纬圈扫描(SZA 为 44.9°)结果为例,研究气溶胶水平不均匀性对反演的影响,将相对方位角分为 4 部分: $-180^\circ \sim 0^\circ$, $0^\circ \sim 80^\circ$, $80^\circ \sim 180^\circ$, $-180^\circ \sim 180^\circ$ 。为了研究反演对 AF 的敏感性,每次反演选出 4 个较为接近的 AF 值和相应的 AOD 值。残差定义为测量和模拟的 RSP 之差(图 6),并用均方根误差(RMSE)表示模拟值和测量值之间的接近程度。由图 6 可知,相对方位角为 $-180^\circ \sim 0^\circ$, $0^\circ \sim 80^\circ$, $80^\circ \sim 180^\circ$ 时最优化反演结果各不相同,这是由气溶胶的水平不均匀性引起的^[12]。整圈反演中 AF 为 0.68 时模拟结果与测量结果最为接近,故反演结果选 AF 为 0.68。MAX-DOAS 反演结果(AF 为 0.68)与太阳光度计观测结果(AF 为 0.69)差别较小,验证了该方法的准确性。

为进一步验证该方法在不同大气条件下的适用性,将二维 MAX-DOAS 反演的气溶胶光学参量(AOD, AF)结果与太阳光度计观测结果进行对比,发现在高低两种气溶胶条件下两者一致性较好,如图 7 所示,这表明基于地基 MAX-DOAS 观测的大气 Ring 效应反演 AF 是可行的。在模拟中,RSP 结果相对太阳方位角是对称的,因此在后续研究中可只进行单侧测量,以增加光谱的时间分辨率并减小气溶胶的水平不均匀性对反演的影响。

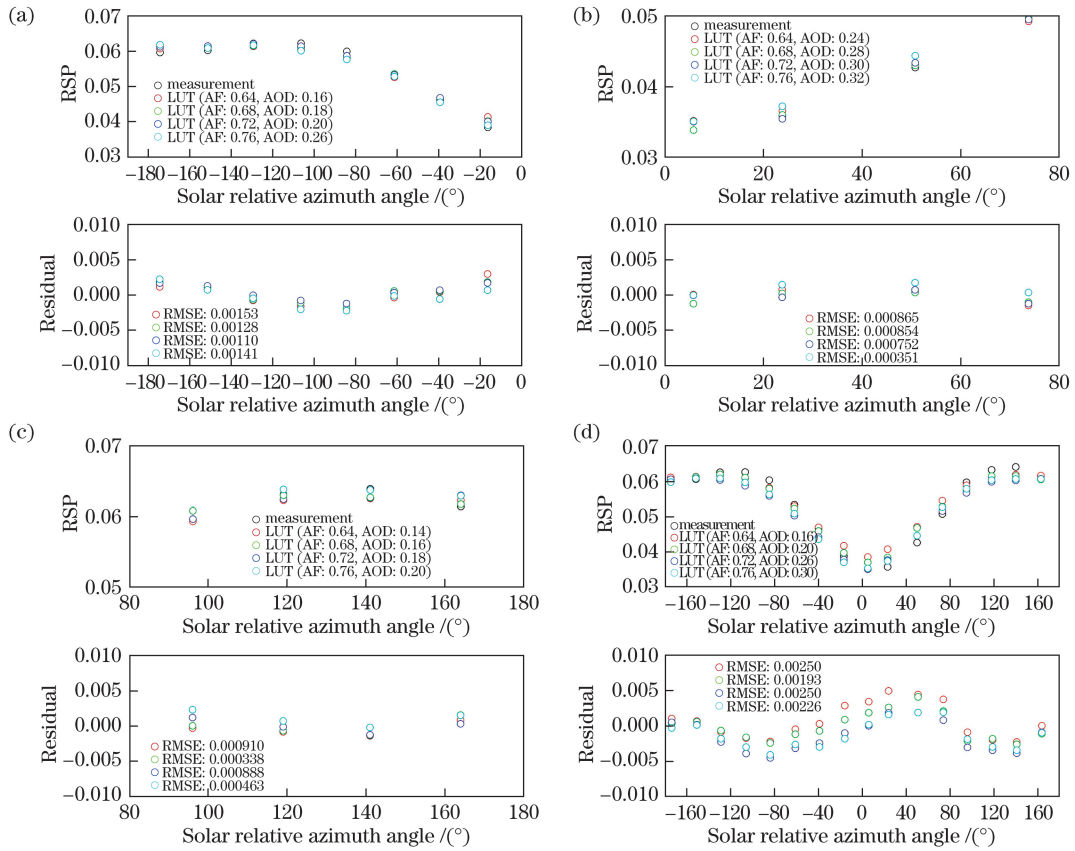


图 6 测量得到的 RSP 和利用查表法(LUT)模拟得到的 4 个不同 AF 条件下在不同 SRAA 范围内的最优化 RSP 结果。

(a) $-180^{\circ}\sim 0^{\circ}$; (b) $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$; (c) $80^{\circ}\sim 180^{\circ}$; (d) $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$

Fig. 6 Measured RSP and simulated RSP that is the best fit in different SRAA ranges with look-up table (LUT) for four different AFs. (a) $-180^{\circ}\sim 0^{\circ}$; (b) $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$; (c) $80^{\circ}\sim 180^{\circ}$; (d) $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$

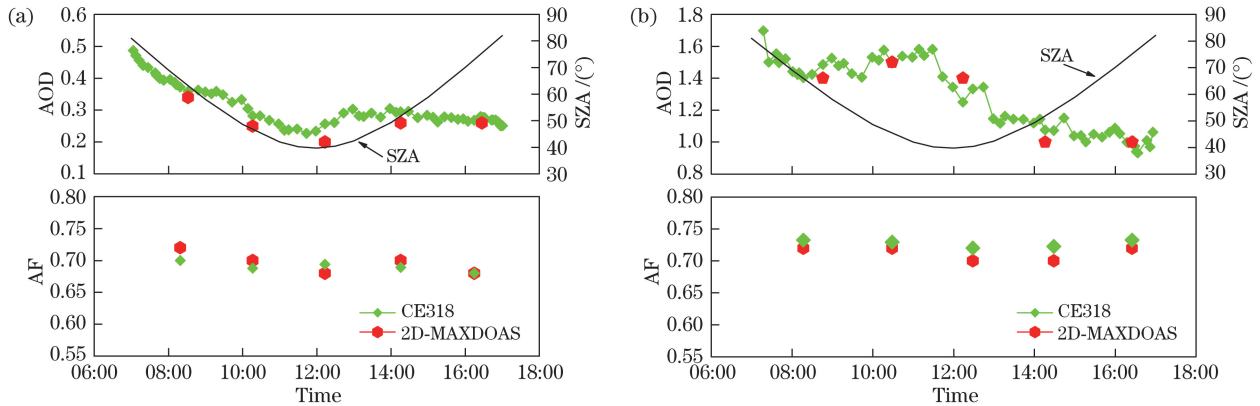


图 7 2D MAX-DOAS 和 CE318 太阳光度计测量的 AOD 和 AF 对比。(a)2013 年 10 月 13 日, 低气溶胶 (黄色区域表示反演示例所用的时间段); (b)2013 年 10 月 11 日, 高气溶胶

Fig. 7 Comparison of AOD and AF results from 2D MAX-DOAS and sun photometer CE318.

(a) Low aerosol on October 13, 2013 (yellow shading represents the time period used for example in Fig. 6);

(b) high aerosol on October 11, 2013

4 结 论

针对气溶胶光学参数难以获取的问题,提出了一种利用地基 MAX-DOAS 观测大气 Ring 效应反演气溶胶光学特性(AOD, AF)的新方法。通过 McArtim 模型研究了 Ring 效应在不同大气条件和观测姿态下对

气溶胶光学特性的敏感性,确定了反演关键参数和最佳测量方法,建立了基于参量化查表方法的反演模式以及基于代价函数循环迭代的反演算法,根据测量需求选取多方位角扫描方式。开展外场实验,在不同大气气溶胶含量下利用二维地基 MAX-DOAS 对 Ring 效应进行了观测,结合模型和算法反演获取了气溶胶光学参量(AOD, AF)并与太阳光度计观测结果进行了对比,两者一致性较好。研究表明利用地基 MAX-DOAS 观测的大气 Ring 效应可以反演更多的气溶胶光学参数。该方法拓展了被动 DOAS 在反演气溶胶光学特性方面的应用,并可为准确估算气溶胶的辐射强迫提供观测数据。

致谢 感谢德国马普化学研究所 Thomas Wagner 教授在模型使用和数据反演方面给予的指导,感谢中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心王珍珠老师在太阳光度计结果反演方面给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Rosenfeld D. Aerosols, clouds, and climate[J]. *Science*, 2006, 312(5778): 1323-1324.
- [2] Finlayson-Pitts B J, Pitts J N. Chemistry of the upper and lower atmosphere: Theory, experiments, and applications[M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [3] Huebert B J, Bates T, Russell P B, *et al.* An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosol and their climatic impacts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D23): 8633.
- [4] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, *et al.* Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2119-2124.
- [5] Wu Fengcheng. Observations of distribution and emission for air pollution in urban area by mobile differential optical absorption spectroscopy[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
吴丰成. 基于车载差分吸收光谱技术的城市大气污染物探测研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2013.
- [6] Li Fei, Deng Xuejiao, Tan Haobo. Comparative study of tapered element oscillating microbalance technology and principle of single particle laser scattering used in measuring aerosol loading[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(4): 497-504.
李 菲, 邓雪娇, 谭浩波. 微量振荡天平法与激光散射单粒子法在气溶胶观测中的对比试验研究[J]. *热带气象学报*, 2015, 31(4): 497-504.
- [7] Dubovik O, Holben B, Eck T F. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 590-608.
- [8] Ancellet G, Francois R. Compact airborne lidar for tropospheric ozone: Description and field measurements[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5509-5521.
- [9] Wagner T, Dix B, Friedeburg C V. MAX-DOAS O₄ measurements: A new technique to derive information on atmospheric aerosols - Principles and information content [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D22): D22205.
- [10] Wagner T, Beirle S, Deutschmann T. Three-dimensional simulation of the Ring effect in observations of scattered sun light using Monte Carlo radiative transfer models[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, 2(1): 113-124.
- [11] Wagner T, Deutschmann T, Platt U. Determination of aerosol properties from MAX-DOAS observations of the Ring effect[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, 2(2): 495-512.
- [12] Ortega I, Coburn S. The CU 2-D-MAX-DOAS instrument - Part 2: Raman scattering probability measurements and retrieval of aerosol optical properties[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(8): 3893-3910.
- [13] Pei Xian, Li Ang, Xie Pinhua. Ring effect simulation based on Monte Carlo atmospheric radiative transfer model[J]. *Journal of atmospheric and Environment Optics*, 2013, 8(5): 354-363.
裴 显, 李 昂, 谢品华. 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.
- [14] Wang Y, Li A, Xie P H. A rapid method to derive horizontal distributions of trace gases and aerosols near the surface using multi-axis differential optical absorption spectroscopy[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(6): 1663-1680.
- [15] Wu Fengcheng, Xie Pinhua, Li Ang, *et al.* Research of aerosol extinction inverted with look-up table method based on muti-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] Mou Fusheng, Xie Pinhua, Li Ang, *et al.* Retrieval of aerosol profile based on the Ring effect observed by MAX-DOAS[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1101001.
牟福生, 谢品华, 李 昂, 等. 基于 MAX-DOAS 观测大气 Ring 效应的气溶胶消光廓线反演[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101001.
- [17] Fayt C, van Roozendaal M. WinDOAS 2.1 software user manual[A/OL]. [2016-06-03]. <http://www.oma.be/BIRA-IASB/Molecules/BrO/WinDOAS-SUM-210b.pdf>.
- [18] Vandaele A C, Hermans C. Measurements of the NO₂ absorption cross-sections from 42000 cm⁻¹ to 10000 cm⁻¹ (238-1000 nm) at 220 K and 294 K[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1998, 59(3/5): 171-184.
- [19] Bogumil K, Orphal J, Homann T. Measurements of molecular absorption spectra with the SCIAMACHY pre-flight model: Instrument characterization and reference data for atmospheric remote sensing in the 230-2380 nm region[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2003, 157(2/3): 167-184.
- [20] Meller R, Moortgat G K. Temperature dependence of the absorption cross sections of formaldehyde between 223 and 323 K in the wavelength range 225-375 nm[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2000, 105(D6): 7089-7101.