

利用 O_4 测量去除 NO_2 柱浓度直射太阳光差分吸收光谱探测中云的影响

王 杨 谢品华 李 昂 司福祺 曾 议 吴丰成

(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)

摘要 直射太阳光差分吸收光谱(DS-DOAS)技术用于 NO_2 等气体的垂直柱浓度长期监测,当仪器视场中有云时,云内颗粒对光的多次散射会导致此技术的测量结果存在较大误差。针对此问题,采用 DS-DOAS 技术中同步测量 O_4 垂直柱浓度的方法,判断视场内是否有云,对 NO_2 垂直柱浓度的监测结果进行修正。统计得到了晴朗天气下由反演误差、大气扰动等因素引起的 O_4 垂直柱浓度测量值的变化幅度为 6%。 O_4 变化幅度大于 6%时,认为视场内有云。采用此方法修正了 4 天 NO_2 垂直柱浓度监测结果,证实了此方法可以有效地提高 DS-DOAS 技术的测量精度。

关键词 大气光学;直射太阳光差分吸收光谱;云; O_4

中图分类号 O433.5⁺1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0901002

Correcting the Impact of Clouds on NO_2 Column Density Measured by DS-DOAS Using Measurements of O_4

Wang Yang Xie Pinhua Li Ang Si Fuqi Zeng Yi Wu Fengcheng

(Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract NO_2 vertical column density (VCD) is measured by direct-sun differential optical absorption spectroscopy (DS-DOAS). When cloud exists in the field of view of instrument, measurement results of this technique are influenced by multiple scattering of particles in cloud. To solve this problem, a new method is proposed. Simultaneously inverting O_4 VCD is used to determine whether there is cloud in the field of view or not. Then the NO_2 VCD is corrected. Statistics show that the variation amplitude of O_4 VCD is 6% due to inversion error and atmosphere disturbance in cloud-free sky. If the magnitude of relative variation of O_4 VCD is larger than 6%, there is cloud in the field of view. This method is used to correct NO_2 results from a four-day field measurement. It is proved that this method can effectively improve the measurement precision of DS-DOAS when clouds exist in the field of view.

Key words atmospheric optics; direct-sun differential optical absorption spectroscopy; cloud; O_4

OCIS codes 010.1120; 010.1615; 010.1290; 280.4991

1 引 言

随着经济的发展和人口的快速增长,各种环境问题日渐突出。其中空气污染状况与人们的健康生

活息息相关,受到普遍关注。因此,对于各种污染气体的实时连续监测成为环保部门制定正确的环保策略的基础。光学遥感方法由于其具有实时、非接触

收稿日期: 2012-02-29; 收到修改稿日期: 2012-05-06

基金项目: 国家 863 计划(2009AA063006)和国家自然科学基金(40905010)资助课题。

作者简介: 王 杨(1986—),男,博士研究生,主要从事被动差分光学吸收光谱技术方面的研究。

E-mail: ywang@aiofm.ac.cn

导师简介: 谢品华(1968—)女,博士,博士生导师,主要从事环境光谱探测技术方面的研究。E-mail: phxie@aiofm.ac.cn (通信联系人)

和多组分等优点已广泛应用于污染气体的监测^[1]。

直射太阳光差分吸收光谱 (DS-DOAS) 技术除了具备一般光学遥感方法的优点外,还具有光通量大、时间分辨率高、大气质量因子的计算简单而准确、可以获得精度较高的垂直柱浓度信息等优势^[2]。DS-DOAS 对于平流层和对流层的吸收同样敏感,可用于卫星整层垂直柱浓度结果的校准,而且时间分辨率高,测量精度高,在痕量气体大气化学反应的研究中具有重要的意义。

2000 年周斌等^[3]利用 DS-DOAS 技术对北京、合肥地区的 NO₂ 浓度进行了测量。同年 Xue 等^[4]利用 DS-DOAS 技术实现了对城市地区 NO₂ 的监测。2007 年陈茂兴等^[5]利用此技术对新疆、北京、成都、厦门和香港等城市进行了 NO₂ 柱浓度的测量,通过各地区数据的对比,反映了中国西部地区工业的快速发展。2009 年 Herman 等^[2]利用 DS-DOAS 技术成功应用其自行研制的多功能 DOAS 系统(MF-DOAS)长期测量了 NO₂ 整层垂直柱浓度,并将结果与美国宇航局的臭氧监测卫星(OMI)获得的 NO₂ 整层垂直柱浓度进行了对比。2012 年本课题组利用大气外层高精度的太阳光谱与仪器函数卷积作为 DS-DOAS 技术的参考光谱,修正了由参考光谱引入的误差^[6]。

但是 DS-DOAS 技术用于长期自动监测时,仪器视场内可能会有云,由于云内颗粒对光的多次散射作用^[7],会使得 NO₂ 等气体的垂直柱浓度测量结果出现较大误差,因此应对测量结果进行必要的修正。当云层较厚时,直射太阳光难以穿透云层,仪器接收的光强会明显减弱,通过光强的变化可以较容易地判断仪器视场内是否存在厚云。当云层较薄时,仪器接收的直射太阳光光强变化不明显,但薄云内的多次散射作用依然会使 NO₂ 垂直柱浓度测量结果存在较大误差。针对此问题,本文提出在测量 NO₂ 的同时同步测量 O₄ 垂直柱浓度,根据 O₄ 垂直柱浓度的变化来判断仪器视场内是否有云,为 NO₂ 等气体测量结果的修正提供依据。O₄ 即氧的二聚体,其浓度与 O₂ 浓度的平方成比例,大气中 O₄ 和 O₂ 一样,在一定的区域内水平方向上均匀分布,垂直廓线基本稳定不变^[8,9]。O₄ 的垂直柱浓度与大气温度、压强有关^[8,9]。由于短时间内大气的温度和压强基本保持不变,O₄ 的垂直柱浓度也基本不变,所以,在短时间内 O₄ 垂直柱浓度测量值的明显升高必定是由于云内颗粒对光的多次散射使得 O₄ 吸收路径增加^[10]。本文研究了采用 O₄ 测量结果消除

NO₂ 柱浓度 DS-DOAS 测量中薄云影响的方法,并在合肥地区的实验中利用此方法有效修正了 NO₂ 垂直柱浓度的监测结果,证明了其可行性。

2 DS-DOAS 原理及装置

2.1 DS-DOAS 测量原理

DS-DOAS 技术以被动差分光学吸收光谱技术^[11]为核心,可同时反演多种气体的整层垂直柱浓度。根据 DOAS 拟合方法,可获得吸收气体的斜柱浓度(SCD),利用计算出的大气质量因子(AMF),可计算出垂直柱浓度 VCD:

$$D_{VC} = \frac{D_{SC}}{F_{AM}}. \quad (1)$$

DS-DOAS 技术的 AMF 代表了仪器接收到的光的传输路径。假设直射太阳光进入大气后不经过多次散射直接到达仪器,适用于无云的情况。当视场内有云时,因为计算的 AMF 与实际光的传输路径有较大差异,所以由(1)式得到的 VCD 就会有较大误差。AMF 为

$$F_{AM} = \sec \left\{ \arcsin \left[\left(\frac{r}{r + h_{EFF}} \right) \sin(A_{SZ}^*) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 r 为地球中心到测量点的距离,约等于 6370 km; h_{EFF} 为根据吸收层位置假设的有效高度^[2],主要是对流层吸收时假设 $h_{EFF} = 2$ km,主要是平流层吸收时假设 $h_{EFF} = 25$ km; A_{SZ}^* 为经过大气层折射修正后的太阳天顶角。

2.2 DS-DOAS 实验装置

装置由望远镜、光谱仪、面阵电荷耦合器件(CCD)和计算机组成^[6]。望远镜架设在寻星赤道仪上自动跟踪太阳^[12],跟踪精度高于 0.1°/h。光谱仪放在 20 °C 的恒温室内,以保证光谱的稳定。通过光纤将望远镜收集的光传输到光谱仪,计算机自动控制光谱仪采集光谱,并根据光强自动修改积分时间,保证数据的有效性,满足自动测量的要求。

3 反演 O₄ 的垂直柱浓度

3.1 O₄ 差分斜柱浓度的反演

反演采用 WinDOAS 软件^[13]选择 340 ~ 380 nm 波段反演 NO₂ 斜柱浓度,为了对其进行修正,在同一波段同时反演 O₄ 的斜柱浓度。实验中选取 2011 年 3 月 27 日 13:28:00 太阳天顶角较小且晴朗天气下的测量光谱作为夫琅禾费参考光谱。由于太阳光球层原子的选择性吸收和发射使得太阳光中含有夫琅禾费结构,这种结构会给地球大气吸

收气体的反演造成很大影响^[14],通过选取适当的夫琅禾费参考光谱可去除其在气体反演中的影响。由于参考谱中依然含有 O₄ 的吸收结构,所以反演得到 O₄ 的差分斜柱浓度(dSCD)。在 340~380 nm 波段 NO₂、O₄、O₃ 具有较大的特征吸收,应同时进行拟合,其中 O₄ 具有两个较大的特征吸收峰。反演选择气体吸收截面如表 1 所示^[15]。

图 1 是 3 月 28 日 16:00:23 的一条测量光谱反演 NO₂ 的例子,黑线表示痕量气体吸收结构的拟合

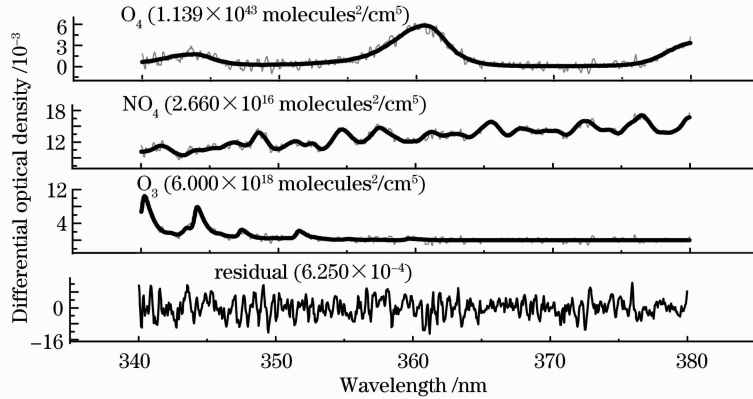


图 1 拟合 O₄ 差分斜柱浓度的例子

Fig. 1 Fitting example of dSCD of a measured spectrum taken at 16:00:23 on March 28, 2011

由以上拟合结果可以看出,O₄ 的 dSCD 为 $1.139 \times 10^{43} \text{ molecules}^2/\text{cm}^5$,拟合残差的均方根为 6.25×10^{-4} , O₄ 拟合误差为 $2.635 \times 10^{11} \text{ molecules}^2/\text{cm}^5$ 。

3.2 DS-DOAS 中 O₄ AMF 的计算

由于 O₄ 分布在对流层和平流层,因此对于(2)式,有效高度(h_{EFF})的取值就需要同时考虑 O₄ 在对流层和平流层中的分布。对流层的范围通常认为是 1~10 km,10 km 以上为平流层,根据美国标准大气的 O₄ 标准廓线^[16],可计算出对流层 O₄ 的垂直柱浓度($D_{\text{VC}}^{\text{tr}}$)为 $1.23 \times 10^{43} \text{ molecules}^2/\text{cm}^5$,平流层的垂直柱浓度($D_{\text{VC}}^{\text{st}}$)为 $1.2 \times 10^{42} \text{ molecules}^2/\text{cm}^5$,可计算出 O₄ 的 h_{EFF} 为

$$h_{\text{EFF}} = \frac{D_{\text{VC}}^{\text{tr}} \times 2 + D_{\text{VC}}^{\text{st}} \times 25}{D_{\text{VC}}^{\text{tr}} + D_{\text{VC}}^{\text{st}}}. \quad (3)$$

根据(2)式即可求出 O₄ 的 AMF。

3.3 计算 O₄ 垂直柱浓度

由于参考谱包含 O₄ 的吸收结构,因此所拟合出的结果为 dSCD。dSCD 表示测量光谱中 O₄ 的斜柱浓度(D_{SC})和参考光谱中 O₄ 的斜柱浓度($D_{\text{SC}}^{\text{ref}}$)的差,即

$$D_{\text{dsc}} = D_{\text{SC}} - D_{\text{SC}}^{\text{ref}}. \quad (4)$$

首先要得到 $D_{\text{SC}}^{\text{ref}}$,才能得到 D_{SC} 。通过最小值外推法

曲线,灰线表示气体吸收结构的测量曲线。

表 1 测量光谱反演所需的吸收截面

Table 1 Molecular absorption cross sections used for analyzing the measured spectra

Species	Data source
O ₄	Burkholder(1990)
NO ₂	K. Bogumil, J. Orphal and J. P. Burrows (2000)
O ₃	K. Bogumil, J. Orphal and J. P. Burrows(2000)

可获得 $D_{\text{SC}}^{\text{ref}}$ 。根据(1)式,可将(4)式写为

$$D_{\text{dsc}}^i = D_{\text{VC}}^i \times F_{\text{AM}}^i - D_{\text{SC}}^{\text{ref}}, \quad (5)$$

式中 i 代表第 i 条测量光谱。O₄ 的垂直柱浓度与大气的温度和压强有关^[7,8]。因为在一天的测量中,大气条件基本稳定,没有较大变化,所以晴朗无云的天气下,O₄ 全天的 D_{VC} 变化不大,可认为是常数 D_{VC}^0 。

此时根据(5)式,每条测量光谱的 D_{dsc}^i 和与其对应的 F_{AM}^i 呈线性关系。以 F_{AM}^i 为横坐标, D_{dsc}^i 为纵坐标画点,对点进行线性拟合,拟合直线与 y 轴的截距就是一 $D_{\text{SC}}^{\text{ref}}$,直线的斜率就是 D_{VC}^0 。

实验期间 3 月 27 日、3 月 28 日、3 月 29 日和 4 月 4 日天气晴朗。对 4 天的测量数据进行分析,分析结果如图 2 所示。

图 2 中灰点是测量得到的 O₄ 的 dSCD,黑线为拟合直线,图中还分别列出了拟合直线的表达式和线性相关系数 R^2 。4 天的 R^2 都接近 1,说明在测量期间 O₄ 的 VCD 满足几乎不变的条件。根据(5)式,通过 4 天的拟合直线与 y 轴的截距可以得到 $D_{\text{SC}}^{\text{ref}}$ 。由于 dSCD 的拟合误差以及大气折射等引起的 AMF 的计算误差,使得 4 天的拟合直线与 y 轴的截距有一定的差别。为了减少误差,把 4 天拟合

直线与 y 轴截距的平均值作为 D_{SC}^{ref} 。可得到 $D_{SC}^{ref} = 2.067 \times 10^{13}$ molecules²/cm⁵。即可获得每条测量光谱中 O₄ 的 VCD 为

$$D_{VC}^i = \frac{D_{dsc}^i + D_{SC}^{ref}}{F_{AM}^i} \quad (6)$$

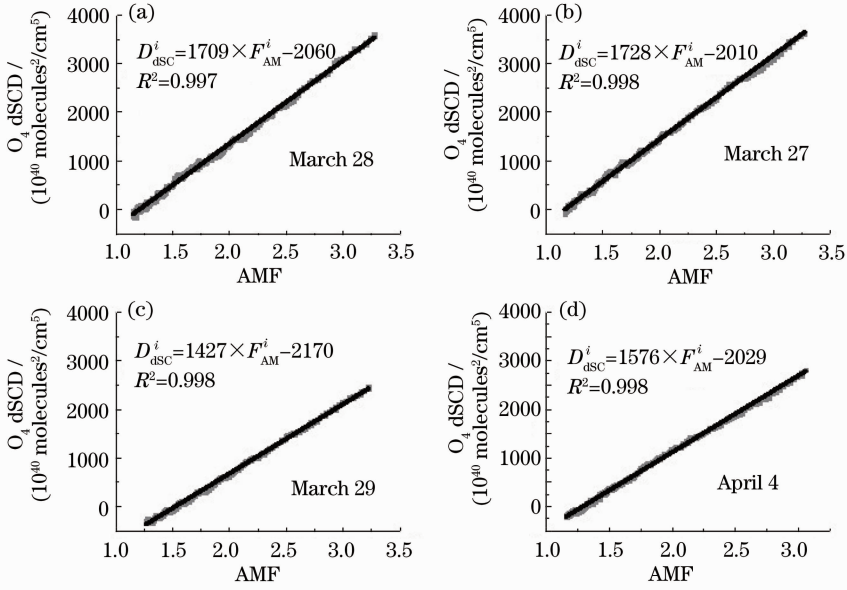


图 2 最小值外推法获得参考光谱中 O₄ 的斜柱浓度

Fig. 2 O₄ SCD_{ref} calculated with the minimum-amount Langley-extrapolation

4 晴朗天气下 O₄ 垂直柱浓度小时变化幅度

在较长时间之内,因为大气温度、压强等环境的变化或者大气流动等,会导致 O₄ 的 VCD 出现一定的变化。图 2 中 4 天拟合直线的斜率代表了当天 O₄ VCD 的平均值。根据拟合直线的方程,4 天的 O₄ VCD 平均值有一定的差别。但是在 1 h 内,大气条件的变化较小,理想情况下短时间内 O₄ 的 VCD 是稳定的。但是由于仪器存在误差以及大气条件的微小扰动,实验中仪器测得的 O₄ VCD 测量值在 1 h 内依然存在一定的变化。需要得到这一晴朗天气下的 O₄ VCD 小时变化幅度。当 O₄ VCD 在 1 h 内出现大于这一幅度的变化时,就代表仪器视场内有云,云内颗粒对光的多次散射增加了 O₄ 的吸收路径。

通过研究 3 月 27 日、28 日、29 日晴朗天气下 19 h 的 O₄ VCD 相对变化幅度来得到这一范围。每个小时内的变化幅度(A_i)为

$$A_i = \frac{D_{VC}^{max} - D_{VC}^{min}}{D_{VC}^{average}}, \quad (7)$$

式中 D_{VC}^{max} 是小时内的最大值, D_{VC}^{min} 是小时内的最小值, $D_{VC}^{average}$ 是小时平均值。由仪器误差和大气扰动引起的 O₄ VCD 的变化幅度在一个中心值附近随机分布,随机事件符合泊松分布规律。图 3 给出了

19 h 内 O₄ VCD 变化幅度的泊松分布直方图,泊松分布的期望值是 0.06。泊松分布的期望值代表了随机事件最可能发生的值,因此将 0.06 作为晴朗天气下 O₄ VCD 测量值小时变化的幅度。将此值作为判断仪器视场中是否有云的依据。

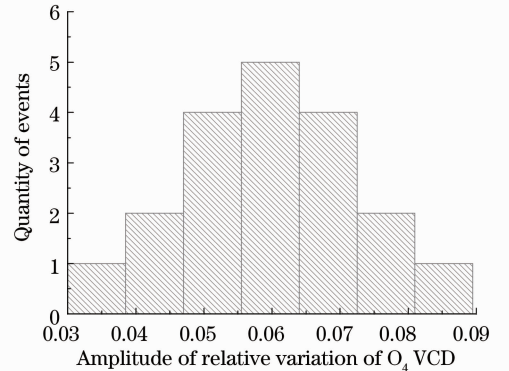


图 3 在晴朗天气条件下对 O₄ VCD 相对变化幅度(A_i)进行泊松分布统计

Fig. 3 Statistics of Poisson distribution of the amplitude of relative variation of O₄ VCD in cloud-free sky

5 NO₂ 结果修正及讨论

实验过程中,仪器视场内的云会产生两种效应,一方面会使部分在云内发生多次散射的光线到达望

远镜,增加云内的 NO_2 吸收路径;另一方面会使太阳光散射出望远镜视场,使云以上的 NO_2 探测的信噪比降低。

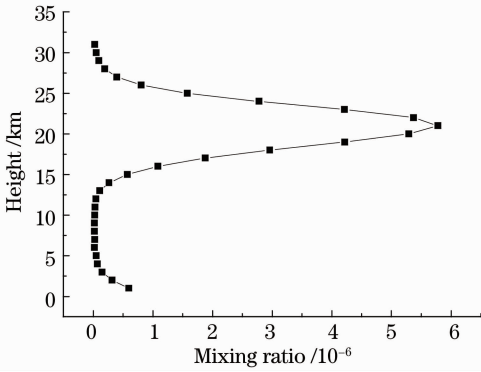


图 4 四月份北纬 35°地区的 NO_2 美国标准廓线

Fig. 4 NO_2 profile from the US standard atmosphere in April at 35° north latitude

图 4 所示的 NO_2 美国标准大气廓线^[14]显示出 5~10 km 范围内 NO_2 浓度较低,5 km 以下 NO_2 浓度值较高。根据以上两种效应的影响,当云层处于 5~10 km 范围时,云内颗粒对光的多次散射不会造成测量值的显著增大,云上部分 NO_2 探测的信噪比降低成为主要因素,此时 NO_2 测量值将出现谷值。当云层处于 5 km 以下范围时,云内颗粒对光的多次散射使得吸收路径增加成为主要因素^[15],造成 NO_2

的测量值出现大幅度增加。两种情况都可以通过 O_4 的变化幅度来修正,剔除 NO_2 SCD 无效数据。

图 5 反映出 1 h 内,当云在视场中出现时, O_4 VCD 的相对变化幅度以及 NO_2 SCD 的测量值变化情况。此处 O_4 VCD 的相对变化幅度(A_i)为

$$A_i = \frac{D_{VC}^i - D_{VC}^{\min}}{D_{VC}^{\text{average}}} \quad (8)$$

图 5 中黑线代表了 O_4 VCD 的 A_i ,灰线代表了 NO_2 SCD 的变化。虚线的纵坐标代表 $A_i = 0.06$,通过之前的分析可知,当 $A_i > 0.06$ 时视场内有云出现。图 5 (a)是 3 月 30 日 9:00~10:00 的测量结果。方框内的区域显示出当 $A_i > 0.06$ 时, NO_2 的 SCD 出现明显的谷值,这主要是由云上部分 NO_2 的测量信噪比降低导致的。相比视场内无云时, NO_2 SCD 由大于 1×10^{16} molecules/cm² 下降到 6×10^{15} molecules/cm²。图 5(d)是 4 月 3 日 14:00~15:00 的测量结果。方框内的区域反映出当 $A_i > 0.06$ 时, NO_2 的 SCD 也出现了较大的峰值,这是由于云内 NO_2 吸收路径的增加占主要因素导致的。相比视场内无云时, NO_2 SCD 由 1.8×10^{16} molecules/cm² 上升到 2.8×10^{16} molecules/cm²。图 5(b)、(c)也反映了相同的情况。如果不对这两种情况进行修正,会给 NO_2 的测量带来较大的误差。因此通过 O_4 VCD 的小时变化幅度可以有效地修正由云引入的 NO_2 测量误差,保证测量结果的准确性。

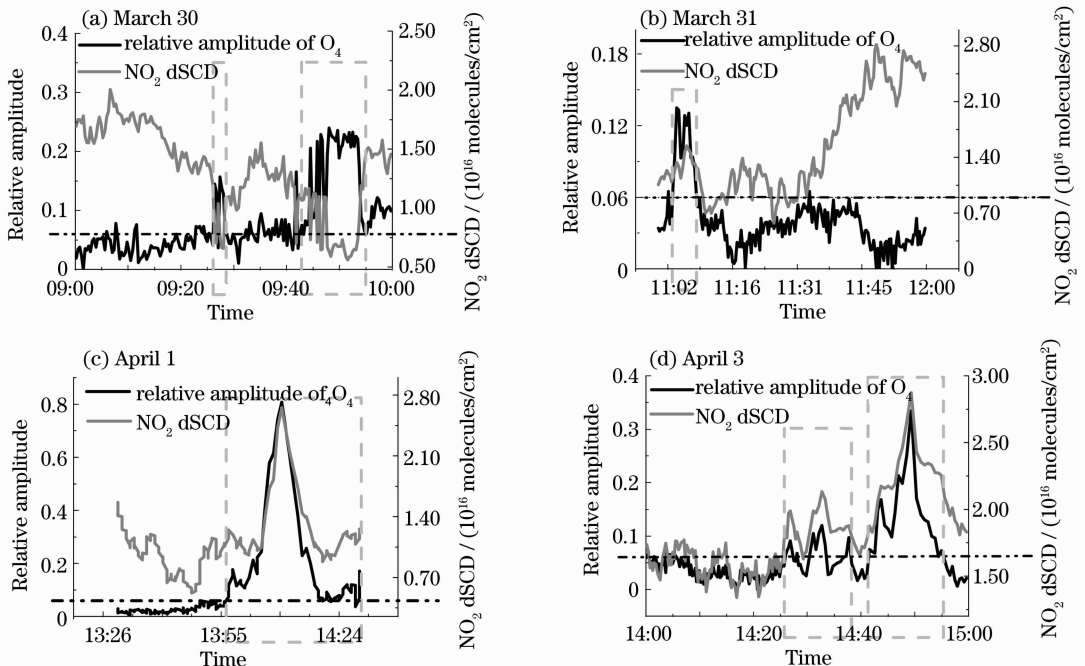


图 5 在有云条件下通过 O_4 VCD 的相对变化幅度对 NO_2 SCD 进行修正

Fig. 5 Correction of NO_2 SCD by the amplitude of relative variation of O_4 VCD under cloud cover

另外,由于实验采用的装置会根据光强自动调整积分时间以获得稳定的光强,较厚云层的遮挡会使仪器接收到的光强减弱,积分时间增大。图 6(a)~(d) 分别显示出 3 月 30 日 9:40~10:00 期间、3 月 31 日 11:00~11:12 期间、4 月 1 日 13:50~14:30 期间、4 月 3 日 14:40~15:00 期间的实验装置积分时间变化。在这些时段积分时间均出现了一定程度的增加,与图 6 中 O_4 VCD 相对变化幅度超过 0.06 的时段

相同。这进一步说明通过 O_4 VCD 的相对变化幅度可以有效判断视场内是否存在云。另外如图 6(b)、(d) 所示,当云层较厚时光强变化明显,由此也可以较好地判断仪器视场内存在云层。图 6(a)、(c) 与图 5(a)、(c) 比较显示出,当仪器视场内存在薄云时,变化不明显, O_4 VCD 的相对变化幅度可以更加灵敏地指示出视场内薄云的存在。

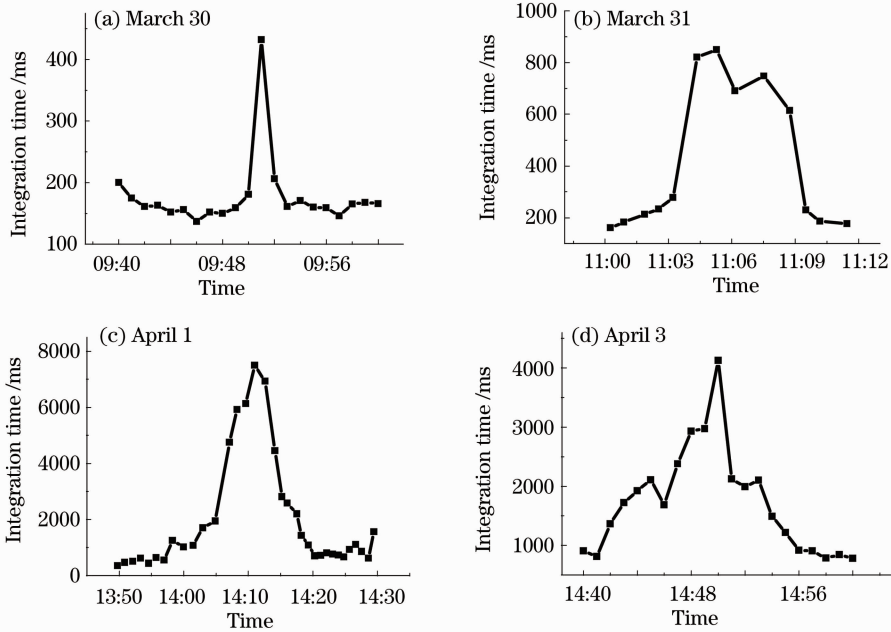


图 6 探测器积分时间的变化

Fig. 6 Variation of integration time of the detector

6 结 论

将 DS-DOAS 技术用于长期监测时,若视场内出现薄云,由于光子在云层能发生多次散射,使得气体浓度的测量出现较大误差,必须进行修正。本文提出了在测量过程中利用 O_4 信息来去除 DS-DOAS 测量中云影响带来的误差。利用外推法获得了 O_4 的 VCD,并对晴朗天气下由于测量误差和大气扰动等原因引起的 O_4 柱浓度测量值的变化幅度进行了研究。采用泊松分布统计方法得到这一变化幅度通常在 0.06 附近。变化幅度大于 0.06 表示望远镜视场内有云,此时 NO_2 测量结果会出现错误的峰值或谷值,需要剔除这些无效数据。这一方法有效地保证了 DS-DOAS 技术在长期自动测量中测量数据的准确性。

参 考 文 献

1 Zhou Bin, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Study on differential

optical absorption spectrometry for atmospheric pollutants monitoring [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001, **14**(5): 23~26

周 斌, 刘文晴, 齐 峰 等. 差分光学吸收谱法测量大气污染气体的研究[J]. *环境科学研究*, 2001, **14**(5): 23~26

2 J. Herman, A. Cede, E. Spinei *et al.*. NO_2 column amounts from ground-based Pandora and MFDOAS spectrometers using the direct-sun DOAS technique: intercomparisons and application to OMI validation[J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**: D13307

3 Zhou Bin, Liu Wenqing. Measurement of NO_2 concentration in the atmosphere by sun spectroscopy method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(12): 2507~2513

周 斌, 刘文清. 用太阳光谱测量空气中 NO_2 浓度的方法研究 [J]. *物理学报*, 2000, **49**(12): 2507~2513

4 Y. Q. Xue, J. G. Niu, Q. L. Wen. Daytime monitoring of urban NO_2 column density by solar spectroscopic method [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, **39**(2A): 622~627

5 Cheng Maoxing, Zheng Yuchen, Cheng Juan *et al.*. Solar spectroscopic measurements of nitrogen dioxide column density in Xinjiang by DOAS technique[J]. *J. Light Scattering*, 2007, **19**(12): 142~150

陈茂兴, 郑玉臣, 程 娟 等. 太阳光谱法差分光学吸收光谱 (DOSS) 技术测量新疆二氧化氮柱体密度[J]. *光散射学报*, 2007, **19**(12): 142~150

6 Wang Yang, Xie Pinhua, Li Ang *et al.*. Retrieval of NO_2 total

- vertical columns by direct-sun differential optical absorption spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(4): 893~897
- 王 杨, 谢品华, 李 昂等. 直射太阳光差分吸收光谱反演 NO_2 整层垂直柱浓度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(4): 893~897
- 7 Cheng Tianhai, Chen Liangfu, Gu Xingfa *et al.*. Gloud phase classification and validation based on multi-angular polarized characteristics of cloud [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1849~1855
- 程天海, 陈良富, 顾行发等. 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1849~1855
- 8 T. Wagner, B. Dix, C. V. Friedeburg *et al.*. MAX-DOAS O_4 measurements: a new technique to derive information on atmospheric aerosols. 1. Principles and information content[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D22205
- 9 G. D. Greenblatt, J. J. Orlando, J. B. Burkholder *et al.*. Absorption measurements of oxygen between 330 and 1140 nm [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(D11): 18577~18582
- 10 T. Wagner, F. Erie, L. Marquard *et al.*. Cloudy sky optical paths as derived from differential optical absorption spectroscopy observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103** (D19): 25307~25321
- 11 U. Platt, J. Stutz. Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications[M]. Berlin: Springer, 2008. 133
- 12 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 NO_3 自由基 [J]. *光学学报*, 2010, **30** (12): 3643~3648
- 13 C. Fayt, M. van Roozendael. winDOAS 2.1 Software User Manual [OL]. <http://bro.aeronomie.be/WinDOAS-SUM-210b.pdf>
- 14 G. Hönninger, C. von Friedeburg, U. Platt. Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2004, **4**(1): 231~254
- 15 Wu Fengcheng, Xie Pinhua, Li Ang *et al.*. Correction of the influence of multiple scattering on NO_2 emission flux during the pollutants source measurement by mobile differential optical absorption pectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1101003
- 吴丰成, 谢品华, 李 昂等. 利用 O_4 测量去除车载差分吸收光谱测量污染源 NO_2 排放通量计算中多次散射的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1101003
- 16 SCIATRAN Working Group, in University of Bremen. SCIATRAN: Radiative Transfer Model and Retrieval Ahgorithm [OL]. <http://www.iup.physik.uni-bremen.de/sciatran>

栏目编辑: 王晓球