

多轴差分吸收光谱技术测量近地面 NO₂ 体积混合比浓度方法研究*

周海金¹⁾²⁾ 刘文清^{2)†} 司福祺²⁾ 窆科²⁾

1) (中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

2) (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, 合肥 230031)

(2012年6月13日收到; 2012年10月3日收到修改稿)

多轴差分吸收光谱技术 (MAX-DOAS) 通过测量不同角度的太阳散射光, 获取痕量气体的柱浓度信息, 广泛应用于整层 NO₂ 柱浓度的监测. 由于缺少有效观测距离的信息, MAX-DOAS 无法获取近地面 NO₂ 的体积混合比浓度. 本文分析了消光系数和有效观测距离的关系, 提出了利用能见度信息获取有效观测距离, 进而将 MAX-DOAS 测量的水平方向 NO₂ 斜柱浓度转换为体积混合比浓度的方法. 并在合肥开展了相应的观测实验, 成功实现了基于 MAX-DOAS 的 NO₂ 体积混合比浓度测量. 通过与主动式长程差分吸收光谱仪测量的 NO₂ 浓度进行对比, 结果呈现出较好的一致性, 说明了方法的可行性. 研究为 MAX-DOAS 监测近地面 NO₂ 体积混合比浓度提供了一种简单有效的方法, 拓展了 MAX-DOAS 的应用领域.

关键词: 多轴差分吸收光谱技术, 大气消光系数, 能见度, NO₂ 体积混合比浓度

PACS: 42.68.Ay, 42.68.Wt, 42.68.Kh

DOI: 10.7498/aps.62.044216

1 引言

氮氧化物是重要的大气对流层成分, 对环境和人类健康都有害. NO₂ 在对流层能导致区域性酸性物沉降. NO₂ 参与大气化学反应, 是臭氧形成的催化剂. 人体吸入 NO₂ 会导致气管不适, 长时间暴露会导致人体呼吸系统感染, 破坏免疫系统^[1,2]. 近年来, 我国氮氧化物污染十分严重^[3], 2011年, 氮氧化物的排放量相比2010年上升了5.73%, 说明我国的氮氧化物污染的减排形势还很严峻. 开展对 NO₂ 的长期监测对于环境污染的预测、防治具有重要意义.

多轴差分吸收光谱技术 (multi-axis differential optical absorption spectroscopy, MAX-DOAS) 通过测量多个仰角的太阳散射光, 基于差分吸收光谱 (differential optical absorption spectroscopy, DOAS) 算法, 可以监测大气 NO₂ 等痕量气体的柱浓度变

化, 用于痕量气体的时空分布、区域传输、卫星数据地面校验等相关研究, 因此在国内外国都广泛应用^[4-6]. 该技术直接定量获取目标气体的斜柱浓度 (slant column density, SCD), 即沿传输光程气体浓度的积分值. 但因为缺少 MAX-DOAS 观测距离的信息, 不能获取这些成分的体积混合比浓度, 这就限制了 MAX-DOAS 的应用. 同时, 由于人类活动主要集中在近地面, 近地面 NO₂ 体积混合比浓度对人类健康等因素的影响更加直接. 相对于柱浓度信息, 公众更加关注被列为环保部门必测指标之一的近地面 NO₂ 体积混合比浓度. 近年来, 学者采用多种方法将 MAX-DOAS 技术应用于近地面痕量气体体积混合比的监测, 如 Heckel 等^[7] 通过假设近地面 1 km 高度内痕量气体 HCHO 均匀分布计算出其体积混合比, Irie 等^[8] 通过结合 MAX-DOAS 和大气辐射传输模型反演出多种痕量气体的垂直廓线, 相应得到了气体的混合比浓度. 上述方法都

* 公益性行业 (气象) 科研专项经费 (批准号: GYHY201106045-1) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

依赖于大气辐射传输模型, 算法复杂, 也不能提供 MAX-DOAS 水平有效观测距离的信息.

为简单准确地测量近地面 NO_2 的体积混合比浓度信息, 本文分析了大气消光系数和 MAX-DOAS 有效观测距离的关系, 并提出了结合能见度信息, 将 MAX-DOAS 水平方向斜柱浓度转化为体积混合比浓度的方法. 该方法应用于合肥市近地面 NO_2 混合比浓度观测, 和主动式长程差分吸收光谱仪 (long-path differential optical absorption spectroscopy, LP-DOAS) 测量数据也具有较好的一致性, 说明了该方法的可行性. 最后对该方法的误差来源进行了分析, 同时也提出了相应的改进方法.

2 MAX-DOAS 测量 NO_2 气体浓度原理

2.1 MAX-DOAS 测量原理

MAX-DOAS 的基本原理是采集不同仰角 α (望远镜观测方向和水平的夹角) 的太阳散射光来获取大气中污染气体的空间分布^[9]. 对于仰角 α 的观测光谱, 利用 DOAS 方法测量出的光学厚度称为 SCD, 即沿光子传输路径 s 的积分浓度:

$$\text{SCD}_\alpha = \int C(s) ds = \frac{1}{\sigma} \lg \left(\frac{I_0}{I_\alpha} \right), \quad (1)$$

式中 σ 代表吸收截面, I_0 代表参考光谱, I_α 代表测量光谱. 因此, SCD 强烈依赖于观测的地理条件和气象条件, 通常需要转化为垂直柱浓度 (vertical column density, VCD), 即垂直穿过大气层的积分浓度.

如果测量针对对流层气体组分, 差值斜柱浓度 (differential slant column density, DSCD) 的思路应用广泛. 差值斜柱浓度 DSCD 代表 $\alpha \neq 90^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 的差值, 每个测量循环 $\alpha = 90^\circ$ 的光谱作为 DOAS 拟合的参考谱.

$$\text{DSCD}_\alpha = \text{SCD}_\alpha - \text{SCD}_{90^\circ} = \frac{1}{\sigma} \lg \left(\frac{I_{90^\circ}}{I_\alpha} \right). \quad (2)$$

为利用 MAX-DOAS 简单准确地获取近地面的 NO_2 浓度, 设置了水平观测, 望远镜观测仰角为 0° . 如图 1 所示, 望远镜在 0° 接收到的散射光传输路径可分为三部分: 平流层传输 S_1 , 对流层顶到地表传输 T_1 , 在水平方向传输至望远镜 L . 选用天顶方向, 即 90° 方向散射光作为参考光谱, 望远镜在 90° 接

收到的散射光传输路径, 可分为两部分: 平流层传输 S_2 , 对流层顶到地表传输 T_2 .

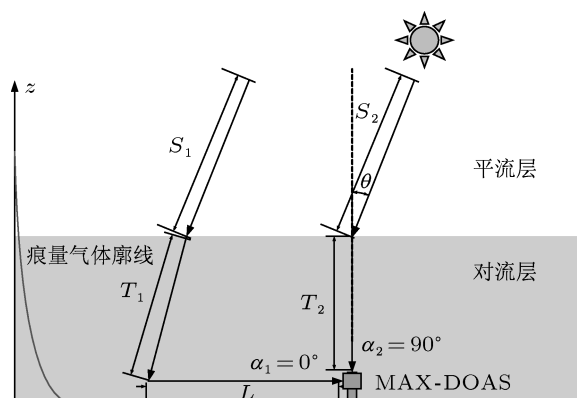


图 1 MAX-DOAS 测量 NO_2 气体浓度原理图

在平流层的传输光程主要和太阳方位角有关系, 因此对于同一观测循环中, $S_1 = S_2$, 各个角度的平流层吸收近似相同^[10]. 由于接收角度有差异, 对流层顶到地表传输的距离 T_1 和 T_2 也有差异 ΔT . 考虑到 NO_2 气体主要集中在近地面, ΔT 内的吸收相对于在水平方向传输至望远镜 L 的吸收是可以忽略. 因此, 也可以假设 $T_1 = T_2$. 因此, 同一观测循环 $\alpha = 90^\circ$ 的光谱作为参考光谱, 采用 $\alpha = 0^\circ$ 的测量光谱和参考光谱相除, 可以扣除平流层光程 S_1 和对流层光程 T_1 内痕量气体的吸收, 消除 MAX-DOAS 观测距离 L 外的痕量气体的吸收造成的影响. 采用 DOAS 方法, 计算出 0° 的 DSCD_{0° , 即为沿观测距离 L 的 NO_2 积分浓度, 因此观测距离 L 就相当于 MAX-DOAS 的有效观测距离.

2.2 大气消光系数量化 MAX-DOAS 有效观测距离

有效观测距离 L 量化了 MAX-DOAS 采集的散射光中近地面 NO_2 气体的吸收长度. 获取有效观测距离后, 就可以将斜柱浓度转化为该距离内的 NO_2 平均混合比浓度. 气溶胶的散射和吸收影响了光子传输路径, 因此有效观测距离主要取决于气溶胶的性质. 大气消光系数 σ 作为量化气溶胶消光能力的指标, 同样也可以量化 MAX-DOAS 的有效观测距离 L . 在 Lee 等^[11] 的研究中, 认为二者的关系为

$$L = \frac{1}{\sigma}. \quad (3)$$

为分析大气消光系数和 MAX-DOAS 观测距离的对应关系, 利用大气辐射传输模型 SCIATRAN

模型^[12]进行了理论分析. 在 SCIATRAN 模型中输入 NO₂ 气体廓线, NO₂ 集中在 0—0.2 km, 浓度为 $2.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 在 0—0.2 km 以上为零. 模型计算出的水平方向差值斜柱浓度, 可以认为等于有效观测距离 L 内的 NO₂ 积分浓度, 由此可以计算出有效观测距离 L . SCIATRAN 模型中输入 410 nm 的

气溶胶消光廓线, 通过改变廓线 0—0.5 km 高度内的消光系数, 计算出对应条件下水平方向、天顶方向的斜柱浓度 SCD_{0° , SCD_{90° . 利用差值斜柱浓度 DSCD_{0° 计算出有效观测距离, 以分析有效观测距离和消光系数的关系. 表 1 中给出了不同消光系数 σ 对应的有效观测距离 L .

表 1 不同消光系数对应的有效观测距离

σ/km^{-1}	$\text{SCD}_{0^\circ}/10^{17} \text{ cm}^{-2}$	$\text{SCD}_{90^\circ}/10^{15} \text{ cm}^{-2}$	$\text{DSCD}_{0^\circ}/10^{17} \text{ cm}^{-2}$	L/km	$(1/\sigma)/\text{km}$
0.50	0.549	3.93	0.510	2.07	2.00
0.40	0.657	4.10	0.616	2.46	2.50
0.30	0.823	4.34	0.780	3.12	3.33
0.20	1.120	4.80	1.070	4.29	5.00
0.15	1.380	5.21	1.330	5.31	6.67
0.10	1.790	5.88	1.730	6.92	10.00
0.07	2.180	6.55	2.110	8.46	14.28
0.05	2.560	7.21	2.490	9.95	20.00

结果表明, 在消光系数高于 0.3 的情况下, (3) 式近似成立. 但在消光系数低于 0.3 的情况下, 随消光系数降低, (3) 式偏差越大. (3) 式的适用范围有限, 为此需要给出更准确的计算公式. 图 2 中给出了有效观测距离 L 随 $1/\sigma$ 的变化情况, 可以看出二者呈指数关系, 图中给出了拟合曲线. 拟合公式如 (4) 式, 本文利用该公式计算有效观测距离.

$$L = 12.37 - 12.08 \exp\left(-\frac{1}{12.54\sigma}\right). \quad (4)$$

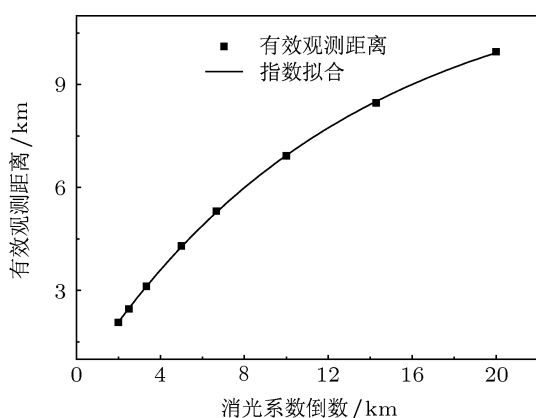


图 2 有效观测距离随消光系数倒数的变化及指数拟合曲线

2.3 能见度资料在 MAX-DOAS 测量 NO₂ 混合比浓度中的应用

利用能见度资料来计算大气消光系数, 进而获

取 MAX-DOAS 的有效观测距离. 能见度数据采用能见度仪测量, 仪器根据气溶胶粒子的前向散射特性, 测量出以“气象光学视程”表示的能见度. 以“气象光学视程”表示的能见度 V 与大气消光系数 $\sigma_{550 \text{ nm}}$ 的关系为^[13]

$$V = -\frac{1}{\sigma_{550 \text{ nm}}} \times \ln\left(\frac{1}{0.05}\right) \approx \frac{2.99}{\sigma_{550 \text{ nm}}}, \quad (5)$$

式中 $\sigma_{550 \text{ nm}}$ 代表在 550 nm 处的大气消光系数, 550 nm 是能见度测量的参考波长. 对于 MAX-DOAS 测量 NO₂ 的波段, 通常和能见度仪的参考波长不重合, 本文测量波长为 410 nm. 为此需要利用 Angstrom 波长指数 A , 将 550 nm 处的大气消光系数 $\sigma_{550 \text{ nm}}$ 转换为 410 nm 处的大气消光系数 $\sigma_{410 \text{ nm}}$ ^[14]. 转换公式如下:

$$A = \ln\left(\frac{\sigma_{410 \text{ nm}}}{\sigma_{550 \text{ nm}}}\right) / \ln\left(\frac{550}{410}\right), \quad (6)$$

计算出 410 nm 处的大气消光系数 $\sigma_{410 \text{ nm}}$, 可以计算出光子传输长度 $L_{410 \text{ nm}}$, 如 (5) 式所示.

$$L_{410 \text{ nm}} = 12.37 - 12.08 \exp\left(-\frac{1}{12.54\sigma_{410 \text{ nm}}}\right). \quad (7)$$

利用水平方向 NO₂ DSCD_{0° 除以传输长度 $L_{410 \text{ nm}}$, 可以计算出传输长度内近地面 NO₂ 的平均体积混合比浓度 c :

$$c = \frac{\text{DSCD}_{0^\circ}}{L_{410 \text{ nm}}} \times 2.5 \times 10^{10}, \quad (8)$$

式中 DSCD_{0° 单位为 cm^{-2} , $L_{410 \text{ nm}}$ 单位为 cm,

2.5×10^{10} 为单位换算因子, NO_2 体积混合比浓度 c 单位为 ppb ($1\text{ppb} = 1.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

3 测量实验和结果

3.1 测量区域

测量实验位于合肥市西郊科学岛 (31.91°N , 117.17°E), 科学岛附近是水库, 三面环水, 远离市中心位置. 该区域植被丰富, 车流量较小, 没有明显的局地污染源. 观测仪器安装在距地面高度 21 m 的实验楼第 7 层楼上, 观测点位置如图 3 所示. 测量时间为 2012 年 5 月 27 和 28 日, 两日天气晴朗.



图 3 观测点地图

3.2 观测仪器

测量点安装的仪器包括 MAX-DOAS、能见度仪、LP-DOAS. 其中 MAX-DOAS 测量斜柱浓度, 能见度仪提供观测距离信息, LP-DOAS 作为对比仪器.

MAX-DOAS 仪器采用望远镜收集太阳散射光, 聚焦到光纤上, 通过光纤传输到光谱仪. 光谱仪工作波段为 295—430 nm, 光谱分辨率为 0.35 nm. 光谱仪放置在控温装置中, 工作温度为 5°C . MAX-DOAS 的观测方位为正北方向, 电机带动望远镜旋转分别指向 0° , 2° , 4° , 6° , 8° , 15° , 30° 和 90° 仰角. 其中仰角 0° 和 90° 的测量光谱用于计算近地面 NO_2 混合比浓度.

能见度仪是散射式, 由发射器、接收器和控制系统的三部分组成. 发射器发出光脉冲, 接收器探测气溶胶粒子的前向散射光, 然后将该信号转换成偏频信号, 计算出能见度.

3.3 MAX-DOAS 斜柱浓度反演

利用 DOAS 方法计算水平方向 NO_2 差值斜柱浓度, 参考光谱使用同一观测循环的天顶光谱, 参与 DOAS 拟合的吸收截面包括 NO_2 , O_3 以及 Ring 结构, 拟合波段为 400—420 nm^[15,16]. 5 月 27 和 28 日, MAX-DOAS 测量的水平方向 NO_2 差值斜柱浓度变化情况如图 4 所示.

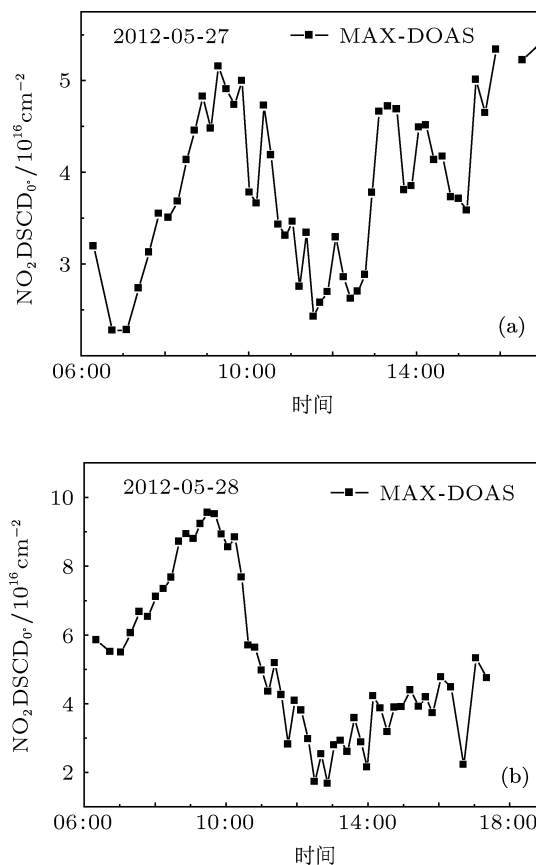


图 4 水平方向 NO_2 差值斜柱浓度变化情况 (a) 2012 年 5 月 27 日变化情况; (b) 2012 年 5 月 28 日变化情况

3.4 近地面 NO_2 混合比浓度计算

MAX-DOAS 测量的水平方向 NO_2 差值斜柱浓度, 并不能直接反映近地面 NO_2 变化情况. 图 5 中给出了 2012 年 5 月 27 日 MAX-DOAS 水平方向 NO_2 差值斜柱浓度和 LP-DOAS 测量的 NO_2 体积混合比浓度趋势对比图, 其相关性 R^2 仅为 0.605. 这是因为 NO_2 差值斜柱浓度受近地面 NO_2 浓度和 MAX-DOAS 的有效观测距离的共同影响.

为反映近地面 NO_2 变化趋势, 利用能见度信息将 MAX-DOAS 测量的水平方向斜柱浓度转化为体积混合比浓度. 如 (6) 式所示, 由于观测波长不一致, 转化中需要利用 Angstrom 波长指数. 针对观测地

区的地理位置和周边环境,文献 [17] 指出该类型地区 Angstrom 波长指数变化范围为 1.24—1.37, 本文取均值 1.30. 用 (5)—(8) 式计算出近地面 NO₂ 的体积混合比浓度, 如图 6 所示. 两天 NO₂ 观测结果呈现出相似的趋势: 在上午 7:00—9:00 都呈现高值, 是由于上班高峰造成的交通排放引起. 随后 NO₂ 混合比浓度呈现明显下降, 是由于交通水平下降导致 NO₂ 排放减少, 以及太阳光导致的 NO₂ 光解消耗造成. 在下午伴随着光照减弱 NO₂ 浓度开始增加, 在 17:00 下班高峰时出现小的峰值.

为验证结果的可信度, 将 MAX-DOAS 观测结果和 LP-DOAS 数据进行了对比, 结果在图 6 中给出. 图 6(a), (c) 中可以看出 MAX-DOAS 观测结果和 LP-DOAS 结果在趋势和量级上都接近. 对两种仪器的观测进行了线性回归的相关性分析, 如图

6(b), (d) 所示, 2012 年 5 月 27 日和 28 日的 R² 分别为 93.8% 和 90.1%. 较高的相关性说明了利用能见度信息将 MAX-DOAS 测量的水平方向斜柱浓度转化为体积混合比浓度的方法是可行的.

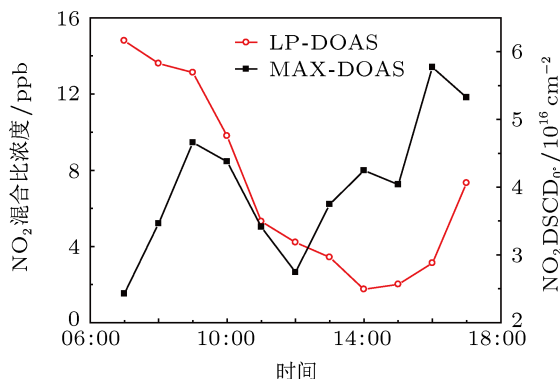


图 5 2012 年 5 月 27 日 MAX-DOAS 测量的 NO₂ DSCD_{0°} 和 LP-DOAS 测量的 NO₂ 混合比浓度对比

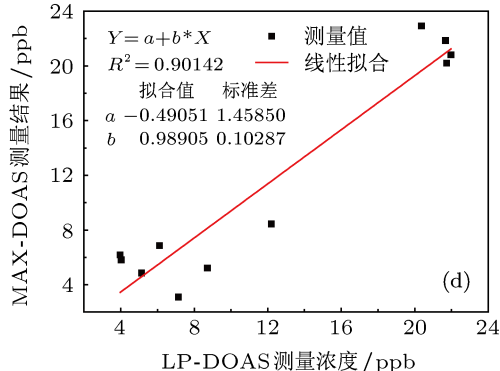
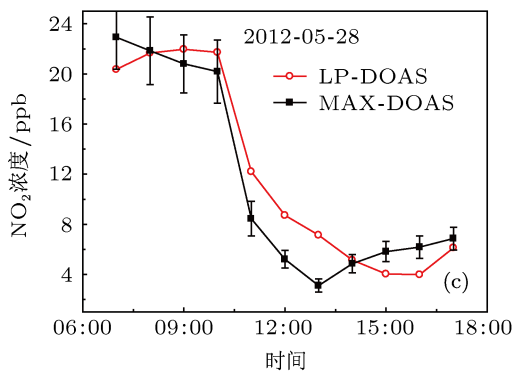
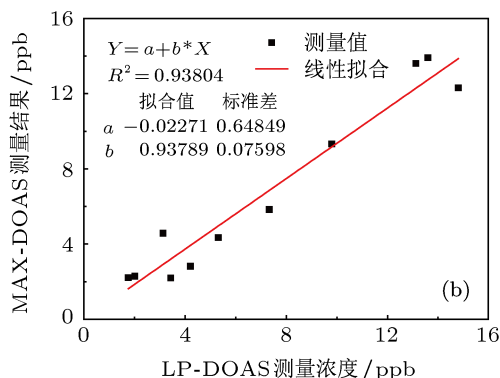
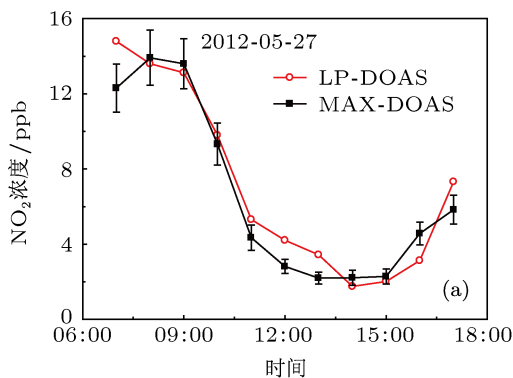


图 6 MAX-DOAS 和 LP-DOAS 测量的近地面 NO₂ 混合比浓度时均值变化对比 (a) 5 月 27 日结果对比; (b) 5 月 27 日相关性分析; (c) 5 月 28 日结果对比; (d) 5 月 28 日相关性分析

3.5 误差分析

NO₂ 体积混合比浓度的误差通过误差传递公式计算. 参照 (5)—(8) 式, 误差估计为

$$\epsilon_c = \left[\left(\frac{2.5 \times 10^6}{L_{410 \text{ nm}}} \right)^2 \epsilon_{\text{DSCD}_{0^\circ}}^2 + \left(\frac{2.88 \text{DSCD}_{0^\circ}}{L_{410 \text{ nm}}^2 \sigma_{410 \text{ nm}}^2 V^2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\times \exp \left(- \frac{A}{12.54 \sigma_{410 \text{ nm}}} \cdot \ln \frac{550}{410} \right)^2 \epsilon_V^2 \quad (9)$$

式中 ϵ_c 代表 NO₂ 体积混合比浓度误差, $\epsilon_{\text{DSCD}_{0^\circ}}$ 代表 NO₂ 斜柱浓度 DSCD 误差, ϵ_V 代表能见度测量

误差. 其中 ε_v 为 9%^[18], $\varepsilon_{\text{DSCD}_0}$ 在 DOAS 拟合时计算, 误差线在图 6 中给出. 图 6 中 NO_2 体积混合比浓度误差的均值分别为 13.2% 和 13.6%.

此外, 还有部分不确定度未考虑进误差估计, 包括 1) Angstrom 指数的估计误差; 2) 算法中近似假设造成的误差, 包括利用天顶谱作为参考光谱扣除观测距离外的吸收的假设等; 3) 大气消光系数到有效观测距离的转化误差等. 为改进算法, 下一步工作中拟安装太阳光度计, 用于实测 Angstrom 指数, 或者采用更换 MAX-DOAS 光谱仪, 利用 NO_2 在可见波段 550 nm 处的吸收计算斜柱浓度, 以摆脱对 Angstrom 指数的依赖. 另外, 对大气消光系数

和有效观测距离的关系需要开展更加深入的研究.

4 结论

本文介绍了 MAX-DOAS 观测近地面 NO_2 体积混合比浓度的新方法. 分析了大气消光系数和有效观测距离的关系, 提出了结合能见度信息, 将 MAX-DOAS 水平方向斜柱浓度转化为体积混合比浓度的方法. 在合肥开展了观测实验, 应用该方法实现了近地面 NO_2 浓度的简单准确测量. 与 LP-DOAS 结果对比表明两者呈现了很好的一致性, 说明了算法的可行性. 本文研究拓展了 MAX-DOAS 的应用范围.

-
- [1] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E 2003 *Nature* **424** 183
- [2] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, Rosenfeld D 2001 *Science* **294** 2119
- [3] Zhang Q, Kang S C, Huo H, He K B, Streets D 2010 *EGU General Assembly Vienna, Austria, May 2–7, 2010* p9847
- [4] Honninger G, Von Friedeburg C, Platt U 2004 *Atmos. Chem. Phys.* **4** 231
- [5] Wagner T, Ibrahim O, Shaiganfar R, Platt U 2010 *Atmos. Meas. Tech.* **3** 129
- [6] Si F Q, Xie P H, Dou K, Zhan K, Liu Y, Xu J, Liu W Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2876 (in Chinese) [司福祺, 谢品华, 窦科, 詹铠, 刘宇, 徐晋, 刘文清 2010 物理学报 **59** 2876]
- [7] Heckel A, Richter A, Tarsu T, Wittrock F, Hak C, Pundt I, Junkermann W, Burrows J P 2005 *Atmos. Chem. Phys.* **5** 909
- [8] Irie H, Takashima H, Boersma K F, Gast L, Wittrock F, Brunner D, Zhou Y, van Roozendaal M 2011 *Atmos. Meas. Tech. Discuss* **8** 341
- [9] Li A, Xie P H, Liu C, Liu J G, Liu W Q 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 2859
- [10] Li X, Brauers T, Shao M, Garland R M, Wagner T, Deutschmann T, Wagner A 2010 *Atmos. Chem. Phys.* **10** 2079
- [11] Lee H, Kim Y J, Jung J, Lee C, Heue K P, Platt U, Hu M, Zhu T 2009 *J. Environ. Manage.* **90** 1814
- [12] Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, Kokhanovsky A, Burrows J P 2005 *Adv. Space Res.* **36** 1015
- [13] Zhou X J 1995 *Advanced Atmosphere Physics* (Beijing: China Meteorological Press) p750 (in Chinese) [周秀骥 1995 高等大气物理学 (北京: 气象出版社) 第 750 页]
- [14] Angstrom A 1964 *Tellus* **16** 64
- [15] Fish D J, Jones R L 1995 *Geophys. Res. Lett.* **22** 811
- [16] Xu J, Xie P H, Si F Q, Li A, Liu W Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024204 (in Chinese) [徐晋, 谢品华, 司福祺, 李昂, 刘文清 2012 物理学报 **61** 024204]
- [17] Wang Y S, Xin J Y, Li Z Q, Wang P C, Wang S G, Wen T X, Sun Y 2006 *Environ. Sci.* **27** 1703 (in Chinese) [王跃思, 辛金元, 李占清, 王普才, 王式功, 温天雪, 孙扬 2006 环境科学 **27** 1703]
- [18] Li H, Sun X J 2009 *Infrared Laser Eng.* **38** 1094 (in Chinese) [李浩, 孙学金 2009 红外与激光工程 **38** 1094]

Retrieval of surface NO₂ mixing ratio from multi-axis differential optical absorption spectroscopy*

Zhou Hai-Jin¹⁾²⁾ Liu Wen-Qing^{2)†} Si Fu-Qi²⁾ Dou Ke²⁾

1) (*Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

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

(Received 13 June 2012; revised manuscript received 3 October 2012)

Abstract

The multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) technique, in which solar scattered light beams of different elevation angles are used and the spatial distribution of various trace gases is derived, has been widely used for monitoring the NO₂ slant column density. Due to the lack of information in a detectable horizontal range of the MAX-DOAS instrument, the concentration of trace gases including NO₂ is unable to yield directly. In this work, the relationship between extinction coefficient and light path length of MAX-DOAS observation is analyzed, and a retrieval algorithm to convert the horizontal NO₂ differential slant column density into the volume mixing ratio with the information of visibility is described. This algorithm has been used in the MAX-DOAS observation at Hefei, and volume NO₂ mixing ratio is derived from MAX-DOAS measurement combining the data of visibility. The NO₂ concentration measured with MAX-DOAS shows that it is in good agreement with the result obtained with long path differential optical absorption spectroscopy, proving the feasibility of the retrieval method. This research presents a simple and effective monitoring method of volume NO₂ mixing ratio with MAX-DOAS, there by expanding the application scope of MAX-DOAS technique.

Keywords: multi-axis differential optical absorption spectroscopy, extinction coefficient, visibility, NO₂ mixing ratio

PACS: 42.68.Ay, 42.68.Wt, 42.68.Kh

DOI: 10.7498/aps.62.044216

* Project supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY201106045-1).

† Corresponding author. E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn