

以 CCD 为探测器的长程差分吸收光谱系统*

朱燕舞, 谢品华, 刘文清, 彭夫敏, 林艺辉, 窦科, 李素文, 张英华

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

摘要:介绍了采用科研级面阵 CCD 作为探测器的长光程差分吸收光谱系统, 对该系统所使用的 CCD 探测器的偏置、暗电流、噪音、线性响应以及光谱仪的分辨率、光谱范围等性能进行了详细的测试, 并将北京外场实验 DOAS 系统测量 SO_2 、 NO_2 的结果与传统点式仪器的测量结果进行了比较。结果显示, 两种方法有着很好的一致性。性能测试和对比结果表明该系统的性能较为优越, 满足多种痕量气体的同时、长期监测, 给出了应用该系统进行外场观测 SO_2 、 NO_2 和 HONO 的变化趋势, 确定出相应光程下不同痕量气体的最低检测限。

关键词:差分光学吸收光谱; CCD; 测试

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)11-2257-7

0 引言

差分光学吸收光谱 (Different Optical Absorption Spectroscopy, DOAS) 法最初由 Noxon^[1] 和 Platt^[2-3] 等人在 20 世纪 70 年代末提出。DOAS 方法是利用光在大气中传输时, 各种气体分子在不同波段对其有不同的差分吸收特性实现对各种气体的定性识别和定量测量。该方法采用的是非接触、开放式光程测量, 可同时进行多种污染成分的连续、实时、在线测量, 且具有无需采样、高分辨率、高灵敏度探测等特点。已成为进行大气污染检测的常用方法之一^[4-6]。现已发展的机载、星载等 DOAS 系统在大气物理和大气化学研究领域均将会发挥重要的作用^[7-8]。就 DOAS 系统采用的探测器而言, 最初多采用结合扫描圆盘的光电倍增管 (PMT) 和其后的光电二极管阵列 (PDA)。近年来, 随着探测器技术的发展, CCD 的应用日益广泛。面阵 CCD 以电荷包的形式贮存和传送信息, 其既具有光电转换功能, 又具有信号电荷存储、转移和读出功能, 能把空间分布的光学信号转换成按时间分布的离散电信号^[9]。应用 CCD 和 PDA 作为 DOAS 系统的探测器, 可以克服大多数商用 DOAS 系统采用 PMT 作为探测器所产生的闪烁噪音的缺点^[10-11]。面阵 CCD 探测器具有低读出噪音和低暗电流的优点, 但是相对于 PDA, 其势阱小, 读出速率低, 时间分辨率受到限制。CCD 的噪音主要由光子噪音决定, 获得相同光子数的光强时, PDA 的剩余噪音大于 CCD。通常

面阵 CCD 还具有图像质量高、具有积分信号、多道同时检测信号和实时监测等优点^[12], 可将其应用于多轴探测^[13] 和断层扫描探测^[14-16] 等许多领域^[17-19]。基于面阵 CCD 的优点, 构建了采用 CCD 作为光谱探测器的长光程 DOAS 系统。

本文介绍了一种采用科研级面阵 CCD 作为探测器的差分吸收光谱系统, 对其整体性能进行了测试, 并应用该系统进行了北京冬季大气中 SO_2 、 NO_2 、HONO 等痕量气体的实地外场监测。并将 DOAS 系统测量的结果与传统点式仪器的进行了比较, 给出了北京外场实验中 SO_2 、 NO_2 和 HONO 浓度变化的时间序列。确定了该系统在相应光程下测量这些痕量气体的最低检测限。

1 DOAS 基本原理与实验装置

1.1 DOAS 基本原理

DOAS 技术的基本原理是利用气体分子对光辐射的差分吸收来实现定性和定量的测量。光源发出强度为 I_0 的光, 经过一定距离的传输后由于气体分子的吸收, 光谱强度变为 I , I 和 I_0 之间的关系可由 Lambert-Beer 定律得出

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n [\sigma_i(\lambda) + \epsilon_R(\lambda) + \epsilon_M(\lambda)] N_i L \right\} + B(\lambda) \quad (1)$$

式中 $I_0(\lambda)$ 表示发射光强, $I(\lambda)$ 表示接收光强, $\sigma_i(\lambda)$ 表示第 i 种气体分子的吸收截面, ϵ_R 和 ϵ_M 分别是瑞利散射系数和米氏散射系数, N_i 表示第 i 种气体分子在光程上的平均浓度, L 表示光程, i 是所测气体的种类数, $B(\lambda)$ 是与光源有关的各种噪音之和。

一束光穿过大气, 由于各种散射过程和气体分子吸收引起的消光很难进行区分, 所以引入了“差分”的概念。“差分”的概念即是把吸收截面分为随波

* 国家高技术研究发展计划 (863) (2005AA641010, 2006AA06A303) 和国家自然科学基金 (40675072) 资助
Tel: 0551-5593348 Email: zhuyw@aiofm.ac.cn
收稿日期: 2007-06-13

长做慢变化的部分 $\sigma_{i0}(\lambda)$ 和快变化的部分 $\sigma'_i(\lambda)$

$$\sigma_i(\lambda) = \sigma_{i0}(\lambda) + \sigma'_i(\lambda) \quad (2)$$

则式(1)可变为

$$\ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} = \sum_{i=1}^n [\sigma_{i0}(\lambda) + \sigma'_i(\lambda) + \epsilon_R(\lambda) + \epsilon_M(\lambda)] N_i L + B'(\lambda) \quad (3)$$

通过数字滤波去除慢变化部分,得到差分光学密度 OD,即由分子的快变化吸收所造成的光衰减,通过与参考光谱进行非线性最小二乘法拟合,从而得到各种气体的浓度.

$$OD = \sum_{i=1}^n \sigma'_i(\lambda) N_i L \quad (4)$$

1.2 实验装置

实验采用的 DOAS 系统,主要包括光源(高压氙灯 150 W,日本 Hamamatsu 产);Casegrain 型发射接收一体望远镜($f/4$,焦距 645 mm);由 13 个角反射镜组成的角反射阵列;光谱仪(美国 Acton 产,焦距 500 mm,光栅 $600 \text{ L} \cdot \text{mm}^{-1}$, $\lambda_B = 300 \text{ nm}$,狭缝为 $100 \mu\text{m}$,色散 3.2 nm/mm);CCD 探测器(美国 Princeton Instrument 产, $2048 \times 512 \text{ pixels}$,像元尺寸为 $13.5 \times 13.5 \mu\text{m}^2$).高压氙灯发出的光经望远镜准直后进入大气,经角反射镜反射回来被望远镜接收并聚焦在光纤束(由 7 根直径为 $100 \mu\text{m}$ 的紫外石英光纤组成)的入射端面.光通过光纤耦合到光谱仪的入射狭缝,经光谱仪分光后,由 CCD 探测器接收,经过 16 位 A/D 模数转换后输入计算机,最后以成像或光谱曲线的形式显示出来.

2 DOAS 系统的性能测试

为了确保 DOAS 系统测量的准确性和可靠性,详细了解所使用的 DOAS 系统的各部分性能,对 CCD 和光谱仪的一些重要性能如:CCD 的偏置、暗电流、线性响应、系统噪音,光谱仪的分辨率、光谱范围以及杂散光等方面进行了测试.

2.1 CCD 的性能测试

2.1.1 偏置(Offset)

偏置是指在黑暗背景、最小积分时间下加在 CCD 上的平均直流电流,这是为了保证任何情况下,从 CCD 进入 A/D 的电压值大于 0 (可参考:Princeton Instruments SPEC-10 System user manual,2003).测量方法为:黑暗背景下,光谱方式,取系统最短积分时间(5 ms),累计扫描 5 000 次,在如此短的积分时间下,暗电流的影响可以忽略.计算得到所有像元的平均值为 $159.3 \text{ counts/scan}$.

2.1.2 暗电流(Dark current)

对于所有 CCD 探测器,暗电流可以理解为渗漏

到 CCD 像元上的电荷.暗电流光谱一般是由于器件本身的热效应引起的.其个别像元可能会具有较高的暗电流,这是由于制造过程中产生的次点引起的.其测量仍在黑暗条件下,本次实验积分时间设置为 200 s,测量单次扫描光谱,并扣除偏置,得到所有像元的平均值为 $0.67 \text{ counts} \cdot \text{s}^{-1}$ (CCD 温度为 -40°C).图 1 显示了暗电流与温度之间的线性响应.根据斯普一玻尔兹曼定律,暗电流随着温度的下降呈指数下降,图 2 显示了暗电流随积分时间的关系.

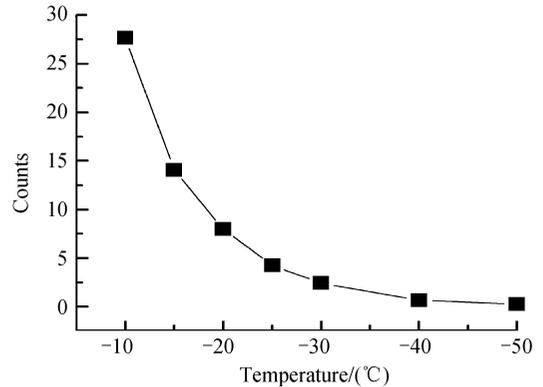


图 1 扣除偏置后得到的暗电流随温度的变化

Fig. 1 Dark signal variation as a function of the temperature after offset correction

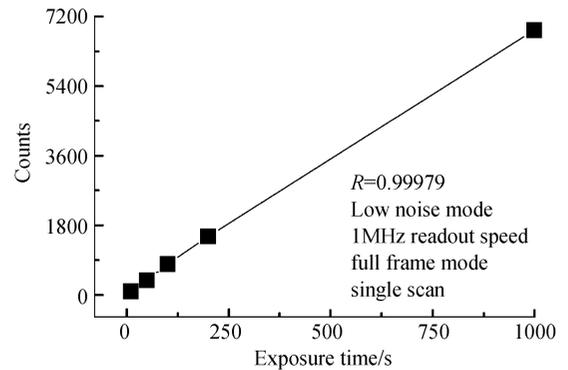


图 2 扣除偏置后得到的暗电流随积分时间的变化

Fig. 2 Dark signal variation as a function of the exposure time after offset correction

2.1.3 系统噪音(Residual noise)

系统噪音主要分为电子噪音和光子噪音,电荷从 CCD 芯片移出寄存器、经放大器、数字化,最后存储于计算机内存,此过程产生的噪音即是电子噪音又称读出噪音.主要是由放大器、ADC 以及整个电子线路所产生^[20],对于电子噪音的确定一般是通过连续测量两条偏置光谱,彼此相减,差值的标准偏差即相当于 1σ 噪音,需要指出的是剩余噪音中的峰峰值(最大值减最小值)通常是 1σ 噪音的 6~7 倍.为了得到单次扫描的电子噪音,标准偏差还要除以总扫描次数的均方根.本次实验中,测量的电子噪音为 $2.3 \text{ counts}/\sqrt{\text{scan}}$.

强度为 3×10^6 counts 的氙灯谱(积分时间为 5 ms,100 次扫描累加)的电子噪音为

$$2.3 \times \sqrt{100} / 3 \times 10^6 = 7.7 \times 10^{-6}$$

光子噪音主要来源于被测目标的背景和目标辐射源两个方面产生的干扰,其计算是根据 Poisson 统计学原理得出的光子数的平方根:

$$N/S = \frac{\sqrt{\text{photo electrons}}}{\text{photo electrons}}$$

对于相同的氙灯谱,计算其光子噪音为 2×10^{-4} ($1 \text{ count} = 8e^-$). 总系统噪音等于电子噪音与光子噪音之和,即

$$\text{sum} = \sqrt{(\text{electron noise})^2 + (\text{photo noise})^2}$$

由计算可见,光子噪音为主导噪音,高于电子噪音 1 个量级以上,所以电子噪音可忽略. 对于实际的 DOAS 系统,其系统噪音是通过测量连续两条灯谱进行计算的,对于系统噪音的测量采用氙灯为光源,光谱仪中心波长设为 330 nm,分别扣除偏置和暗电流后,两谱相除,作高通,结果如图 3,得到 300~700 通道 1σ 的剩余噪音为 3.6×10^{-4} ,接近计算值.

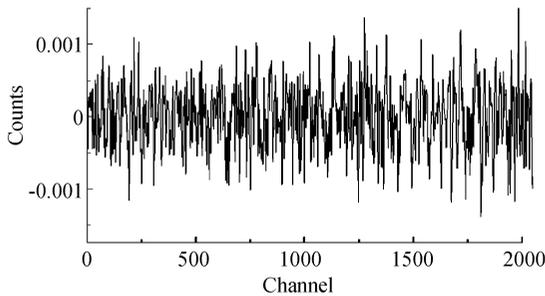
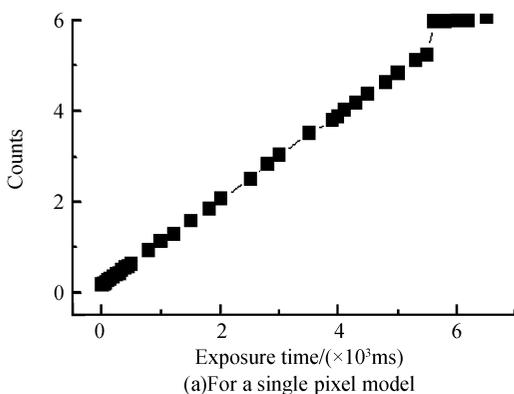


图 3 剩余噪音谱
Fig. 3 Spectrum of residual noise

2.1.4 CCD 的线性响应

探测器的输出信号与光强的线性关系对 DOAS 系统的定量测量非常重要. 图 4 给出了 CCD 单像元模式(像元 115×279)和全谱模式下对光强的响应,线性均好于 $R = 0.999$,单像元模式的饱和值约为 5 000,移位寄存器的单像元饱和值约为 65 500.

因 PDA 通常具有较深的势阱,一次扫描即可探测到一定强度的光强,但其暗电流和电子噪音较



(a)For a single pixel model

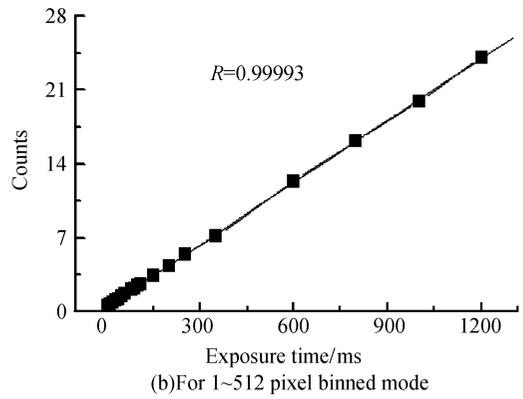


图 4 CCD 的线性响应
Fig. 4 Linearity of the CCD detector

高;对于 CCD,其势阱浅,一次扫描探测到的光强较低,因此要想获得与 PDA 相同光子数的光强则需要增加累加次数或通过 binned 的方式,但其暗电流低(可忽略),电子噪音也较低,将 CCD 性能测试结果与文献[10]中 PDA 测试结果进行对比可知,实验系统中所采用的 CCD 探测器在一些性能上有着一定的优势.

2.2 光谱仪的性能测试

2.2.1 光谱仪的分辨率和光谱范围

光谱仪的分辨率是指光谱仪分开两条邻近谱线的能力,取决于光栅的宽度、系统误差、探测器空间分辨率和入射狭缝的宽度. 实验中采用汞灯为光源进行波长校准和分辨率测试,利用汞灯的八个峰峰值(如图 5)所对应的波长与相应 CCD 像元数作图(如图 6),以标准波长为函数变量,像元数为自变量作线性拟合,得到光谱仪像元与波长间的函数关系式为: $Y = 283.79364 + 0.04374X$ (相关系数 $R = 1$).

由图 5 可见,100 μm 的狭缝可清晰分辨波长差约为 0.5 nm 的 365.48 nm 和 365.02 nm 的双峰. 根据函数关系式计算得到光谱范围约为 89.6 nm,色散约为 0.044 nm/pixel,光谱仪的分辨率约为 0.21 nm(334.15 nm 的汞灯峰),因此可满足多种痕量气体的同时测量.

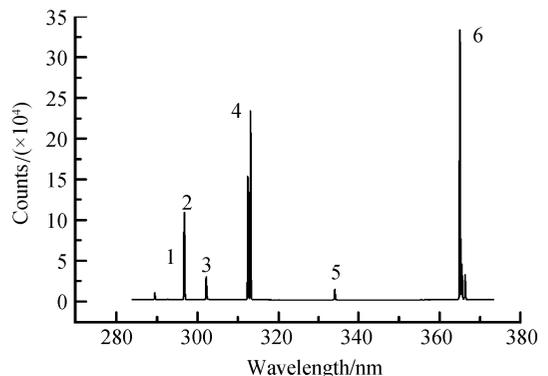


图 5 汞灯谱
Fig. 5 Spectrum of the Hg lamp

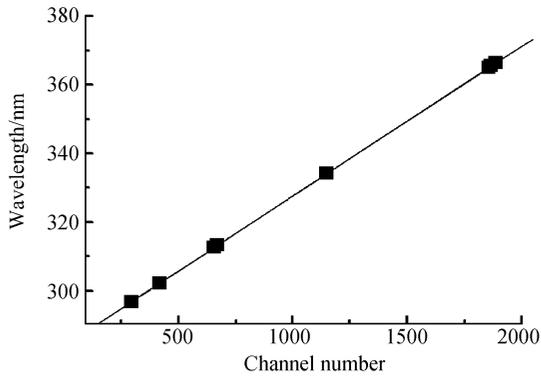


图6 CCD像元与波长之间的相互关系

Fig. 6 Correlation between channel number of the CCD and wavelength

2.2.2 光谱仪的杂散光

杂散光对 DOAS 系统测量的影响很大,会降低检测的灵敏度、提高检测限.其来源主要是光学元件对光的散射^[21-22].测量杂散光的方法如下:以卤钨灯为光源,设定光谱仪中心波长为 390 nm,采用 GG395 和 GG420 滤光片(SCHOTT, Germany)测量 395~420 nm 的光辐射产生的杂散光^[10].通过计算可知,该光谱仪的杂散光约为 1%,其影响较小.

3 实验结果与讨论

3.1 光谱数据反演

根据 DOAS 方法的测量原理,要测量大气中污染气体的浓度,将获得的大气吸收光谱,经过偏置和暗电流校正,除以灯谱,取对数以及经过数值滤波等处理后,可去除光谱中的瑞利散射和米氏散射等产生的宽带结构以及其他一些仪器的影响,从而得到窄带吸收结构,为了减小高频噪音的影响,再经过低通滤波,最后得到差分光学密度;同时利用文献中的参考截面与 DOAS 仪器函数卷积,并作与大气谱相同的数据处理后,作为参考谱;将得到的差分光学密度与参考谱进行非线性最小二乘法拟合,即可得到大气中痕量气体的浓度.本实验系统可同时观测 89.6 nm 的光谱范围,因此可实现多种痕量气体的同时测量. SO_2 的反演波段在 292~320 nm; NO_2 和 HONO 的反演波段在 336~370 nm.图 7 给出了 SO_2 、 NO_2 和 HONO 的浓度反演过程,其中图 7(a)是 2007 年 1 月 22 日凌晨记录的一条大气谱;图 7(b)是大气谱经过一系列处理后得到的差分光学密度 OD;图 7(c)是扣除了氙灯结构后的谱(灰线)与 58.6 ppb($1 \text{ ppb} = 1 \times 10^{-9} \text{ V/V}$) SO_2 参考谱(黑线)的叠加;图 7(d)是反演 SO_2 后的剩余噪音, 1σ 的剩余噪音为 1.8×10^{-4} ;图 7(e)是扣除了氙灯结构后的谱(灰线)与 41.2 ppb NO_2 参考谱(黑线)的叠加;图 7(f)是分别扣除氙灯结构、 NO_2 、HCHO 的吸收后的谱

(灰线)与 3.7 ppb HONO 参考谱(黑线)的叠加;图 7(g)是拟合 NO_2 、HONO 后的剩余噪音, 1σ 的剩余噪音为 1.1×10^{-4} ,因此, SO_2 、 NO_2 和 HONO 探测极限(光程为 92 000 cm)分别为 0.26 ppb、0.92 ppb 和 0.63 ppb.

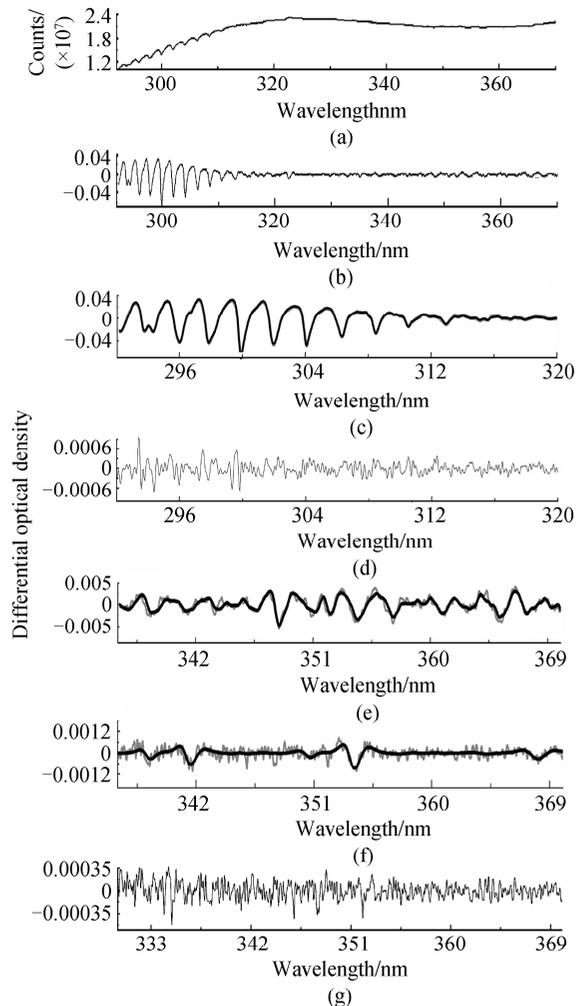


图7 DOAS系统拟合过程

Fig. 7 Example for retrieving trace-gases concentrations with DOAS

3.2 DOAS系统和点式仪器测量 SO_2 、 NO_2 的相关性比较

将 SO_2 、 NO_2 点式仪器测量结果分别与 DOAS 系统测量结果进行相关性比较,以点式仪器测量结果作为横坐标,以 DOAS 系统测量结果作为纵坐标,结果如图 8.图 8(a)为两种方法测量 SO_2 的比较结果,从对比结果来看,两种方法的相关性较好,相关系数 R 为 0.97;图 8(b)为两种方法测量 NO_2 的比较结果,可以看出,两种方法的相关性也较好,相关系数 R 为 0.96.从线性拟合的结果来看,DOAS 方法测量的 SO_2 、 NO_2 值稍高于点式仪器测量的值,两种方法之间 SO_2 值的偏差约为 19%,两种方法之间 NO_2 值的偏差仅约为 0.7%.两种仪器的测量地点不同可能造成了两种方法之间绝对值的偏

差.点式仪器放置于北京大学计算机科学技术系二号楼的五楼实验室.而 DOAS 仪器放置于北京大学计算机科学技术系一号楼的七楼办公室,角反射镜放置于东北方向距离 460m 外刚投入使用的政府管理学院五楼楼顶,所以 DOAS 测量的是光程内的平均浓度,并且光程内距离成府路、中关村北大街等交通道路很近,同时距离北京大学的供暖中心也很近,所以受交通污染、排放源的影响都较点式仪器显著,可能造成了 DOAS 系统的测量结果稍高于点式仪器的测量结果.

主要来自交通排放,测量的峰值一般出现在夜间,最高值在 1 月 23 日的夜间. SO₂ 的浓度变化主要受冬季采暖的影响,其最大值也出现在 1 月 23 日的夜间. HONO 表现出明显的每日变化,由于 HONO 白天发生光解,所以白天浓度较低,夜间和凌晨浓度较高,其峰值一般出现在夜间和凌晨.

4 结论

根据系统性能测试结果可知,应用 CCD 为探测器的 DOAS 系统具有系统噪音低、线性响应好;光谱仪的分辨率好、光谱范围宽等优点. 根据北京外场实验 DOAS 系统测量结果与传统点式仪器的测量结果进行对比的情况来看,两种方法具有很好的一致性. 由此可知,该系统的性能较为优越,能满足多种痕量气体的同时、长期监测,所得测量结果可信用度高. 为下一步将 CCD 应用于球载或多轴探测等方面奠定了一定的理论基础.

参考文献

[1] NOXON J F. Nitrogen dioxide in the stratosphere and troposphere measurement by ground-based absorption spectroscopy[J]. *Science*, 1975, **189**(4202): 547-549.

[2] PLATT U, PERNER D. Simultaneous measurements of atmospheric CH₂O, O₃ and NO₂ by differential optical absorption[J]. *Geophys Res*, 1979, **84**(10): 6329-6335.

[3] PLATT U, PERNER D. Direct measurements of atmospheric CH₂O, HNO₂, O₃ and SO₂ by differential absorption in the near UV[J]. *Geophys Res*, 1980, **85**(12): 7453-7458.

[4] XIE Pin-hua, LIU Wen-qing, ZHENG zhao-hui, et al. Differential optical absorption spectroscopy (doas) technique applied to monitor sulfur dioxide in flue gas [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(3): 271-276.

谢品华,刘文清,郑朝晖,等. 差分光学吸收光谱(DOAS)技术在烟气 SO₂ 监测中的应用[J]. *光子学报*, 2000, **29**(3): 271-276.

[5] XIE Pin-Hua, LIU Jian-guo, QIN Min, et al. Retrieval of monocyclic aromatic hydrocarbons with differential optical absorption spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(9): 1584-1588.

谢品华,刘建国,秦敏,等. 差分吸收光谱方法反演大气环境单环芳香烃有机物[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(9): 1584-1588.

[6] QI Feng, LIU Wen-qing, Zhang Yu-jun, et al. Error analysis and improvement method of concentration measurement of trace gas in the atmosphere by differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1234-1238.

齐锋,刘文清,张玉钧,等. 差分吸收光谱法测量大气痕量气体浓度误差分析及改善方法[J]. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1234-1238.

[7] GURLIT W, BOSCH H, BOVENSMANN H, et al. The UV-A and visible solar irradiance spectrum: inter-comparison of

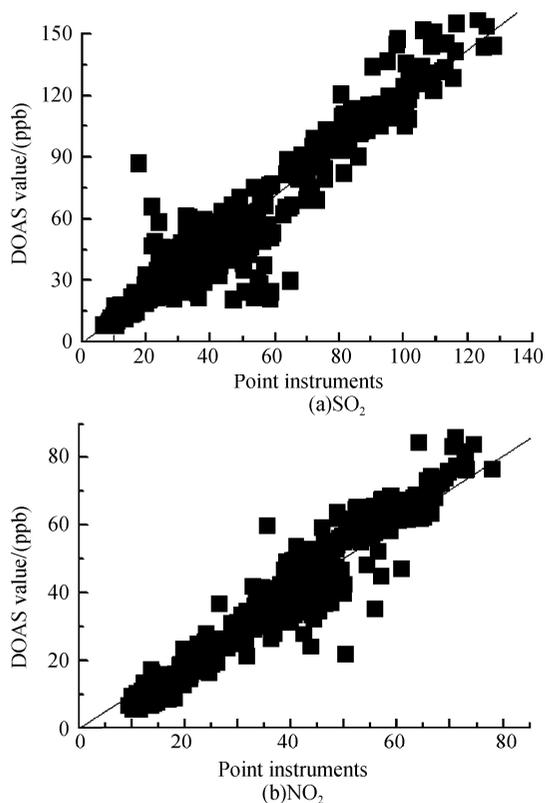


图 8 DOAS 系统与点式仪器监测 SO₂、NO₂ 结果的相关关系

Fig. 8 Correlativity of DOAS system and traditional point monitoring techniques

图 9 是北京外场实验中 2007 年 1 月 19 日~29 日 SO₂、NO₂ 和 HONO 的时间序列. 由图可知 NO₂ 的浓度表现出明显的变化,城市大气中 NO₂ 的污染

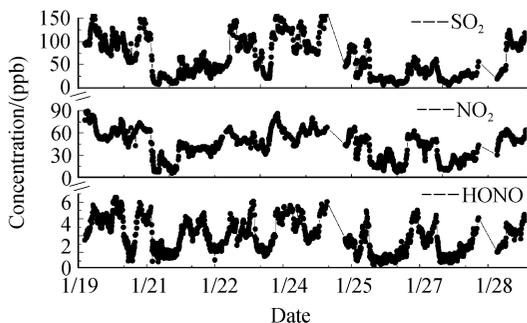


图 9 SO₂、NO₂ 和 HONO 浓度的时间序列

Fig. 9 Time series of SO₂、NO₂、HONO concentration

- absolutely calibrated, spectrally medium resolution solar irradiance spectra from balloon- and satellite-borne measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **26**(5):1879-1890.
- [8] DORF M, BOSCH H, BUTZ A, *et al.* Balloon-borne stratospheric BrO measurements: comparison with Envisat/SCIAMACHY BrO limb profiles[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **9**(6):2483-2501.
- [9] LIU Xian-de. Application and theory of ccd sensor [M]. Wuhan: Publishing House of Huazhong University of Science and Technology, 1990.
刘贤德主编. CCD 及其应用原理[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [10] QIN Min, XIE Pin-hua, LIU Jian-guo, *et al.* Study on UV-visible doas system based on photodiode array (pda) [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(9): 1463-1467.
秦敏, 谢品华, 刘建国, 等. 基于二极管阵列 PDA 的紫外-可见差分吸收光谱(DOAS)系统的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(9):1463-1467.
- [11] STUTZ J, PLATT U. Improving long-path differential optical absorption spectroscopy with a quartz-fiber mode mixer[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(6):1105-1115.
- [12] ZHANG Zhan-xia, LIU Hong-tao, HE Jia-yao. Progress in charge coupled device and its applications[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, **20**(2):160-166.
张展霞, 刘洪涛, 何家耀. 电荷耦合器件及其应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, **20**(2):160-166.
- [13] FRIEDEBURG C V, PUND T I, METTENDORF K U, *et al.* Multi-axis-doas measurements of NO₂ during the bab II motorway emission campaign[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(5):977-985.
- [14] HARTL A, SONG B C, PUNDT I. 2-D reconstruction of atmospheric concentration peaks from horizontal long path DOAS tomographic measurements: parametrisation and geometry within a discrete approach [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **17**(6):847-861.
- [15] PUNDT I, METTENDORF K U, LAEPPLE T, *et al.* Measurements of trace gas distributions using Long-path DOAS-Tomography during the motorway campaign BAB II: experimental setup and results for NO₂ [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(5):967-975.
- [16] LAEPPLE T, KNAB V, METTENDORF K U, *et al.* Longpath doastomography on a motorway exhaust gas plume: numerical studies and application to data from the bab ii campaign[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, **23**(4):1323-1342.
- [17] CHEN Ding-yue, ZHOU Ren-kui, LI Ying-cai, *et al.* Studies on the satellite tdiccd camera of kinetics modeling for interface jitter and resonance dot scanning[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1508-1511.
陈丁跃, 周仁魁, 李英才, 等. 星载 TDICCD 界面颤动的动力学模型及共振点扫描研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(12):1508-1511.
- [18] CHANG Ling-ying, YANG Jian-feng, ZHAO Bao-chang, *et al.* A new plane array ccd space three-dimensional photographic system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8):1165-1168
常凌颖, 杨建峰, 赵葆常, 等. 一种新型面阵 CCD 航天立体摄影测量光学系统[J]. 光子学报, 2005, **34**(8):1165-1168.
- [19] JIA Guang-ming, ZHANG Gui-zhong, XIANG Wang-hua. Using portable laser and ccd to do small particle sizing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9):1293-1295.
贾光明, 张贵忠, 向望华. 用全固态激光器和一维 CCD 测定微粒粒径[J]. 光子学报, 2006, **35**(9):1293-1295.
- [20] FRIEDER F, BAUER N, FITZENBERGER R, *et al.* Differential optical absorption spectroscopy instrument for stratospheric balloonborne trace-gas studies[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(15):2377-2386.
- [21] LU Tong-xing, LU Yiq-un. Theory and application of laser spectroscopy technique [M]. Hefei: Publishing House of University of Science and Technology of China, 1999:56.
陆同兴, 路轶群. 激光光谱技术原理及应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999:56.
- [22] PLATT U. Differential optical absorption spectroscopy (doas), air monitoring by spectroscopic techniques [M]. Edited by Sigrist M W, Chemical Analysis Series, John Wiley and Sons, Inc, 1994(127):27.

Long Path Differential Optical Absorption Spectroscopy Based on CCD

ZHU Yan-wu, XIE Pin-hua, LIU Wen-qing, PENG Fu-min, LIN Yi-hui,

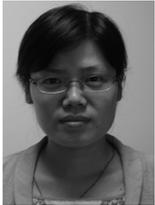
DOU Ke, LI Su-wen, ZHANG Yin-hua

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

Received date: 2007-06-13

Abstract: The long path differential optical absorption spectroscopy (LP-DOAS) technique was presented. A charge coupled device (CCD) was employed as the detector. The properties of the system were described, including offset, dark current, noise, linearity of the detector and spectral resolution, wavelength range, stray light of the spectrometer. Field observations for SO_2 , NO_2 and HONO were performed in Beijing, and time series of SO_2 , NO_2 and HONO concentration were listed, and the detection limits of this system for SO_2 , NO_2 and HONO over a 920 meter light path were determined. A comparison between the DOAS system and traditional point monitoring techniques for the results of SO_2 , NO_2 showed that quite good correlation could be established, so the system is suitable for monitoring many trace gases. The results of field observations show that this system is more predominant and it allows long-term measurements of many trace gases.

Key words: Differential optical absorption spectroscopy(DOAS); CCD; Measurement



ZHU Yan-wu was born in 1977. She works at Hefei University of Technology as a teacher. Now, she is a Ph. D. degree candidate at Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, CAS. Her research interests focus on optical methods for atmospheric pollution monitoring.