

机载多轴差分吸收光谱技术获取对流层 NO₂ 垂直柱浓度的研究*

徐晋 谢品华[†] 司福祺 李昂 刘文清

(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)

(2011年3月3日收到; 2011年5月4日收到修改稿)

介绍了一种基于机载平台获取对流层 NO₂ 垂直柱浓度的多轴差分吸收光谱技术. 研究了利用差分吸收光谱技术结合不同观测角度的测量光谱反演差分斜柱浓度, 并利用辐射传输模型 SCIATRAN 计算对流层 NO₂ 垂直柱浓度的方法. 研究了不同海拔高度、不同地面反照率以及不同太阳天顶角等条件对天顶和天底两个观测角度的大气质量因子的影响. 报道了该系统在 2008 年 12 月 10 日在珠三角地区的实验结果, 结合天顶和天底两个方向反演得到了珠三角地区对流层 NO₂ 垂直柱浓度的分布信息. 同时还将机载测量结果跟安装在珠海市的一台地基多轴差分吸收光谱仪的结果进行了对比, 二者相差仅为 8%. 实验结果表明, 机载多轴 DOAS 技术可以实现对大区域对流层 NO₂ 浓度的快速获取.

关键词: 多轴差分吸收光谱技术, 机载, 对流层, 垂直柱浓度

PACS: 42.68.Ca

1. 引言

差分吸收光谱 (DOAS) 技术自 Platt 等人于 20 世纪 70 年代引入测量大气痕量气体以来, 已成功地应用于对流层和平流层污染气体的观测, 成为环境监测领域的一个新的有力手段^[1,2]. DOAS 技术能够利用各种痕量气体的特征吸收截面, 在紫外-可见波段测量 NO₂, SO₂, O₃, BrO, HCHO, NH₃, NO₃, CS₂ 和芳香烃等多种气体的浓度. 与传统点式仪器相比, DOAS 技术有其独特的优点, 首先, 它能够实现多种气体的同时测量, 这对于研究气体间的相互作用有很大优势; 其次, DOAS 技术采用光学非接触式测量, 不会改变气体化学性质, 同时也缩短了测量时间, 且能进行连续监测; 此外, 基于太阳散射光为光源的被动 DOAS 技术还能够获得污染物气体在对流层和平流层内的区域分布, 这为测量气体的区域变化和输送等提供了很大方便.

作为被动 DOAS 的一种应用, 机载多轴差分吸收光谱技术 (AMAXDOAS) 以太阳散射光为光源, 利用 Lambert-Beer 定律能够获得整层 NO₂ 的浓度分布, 结合不同的离轴角度还能得到对流层 NO₂ 的垂直柱

浓度信息及廓线信息. 与地基多轴 DOAS 设备相比, 基于机载平台的多轴 DOAS 设备不仅能够更及时、迅速地获取更大区域的污染分布特征, 还能够实现在相同观测模式下对卫星数据的校验. 机载 DOAS 测量最早见于海德堡大学, 1994 年 Petritoli 等人使用一个天顶观测的望远镜来探测平流层痕量气体^[3]. 1999 年 McElroy 等人测量水平观测方向来提取飞行高度附近廓线信息^[4]. 2003 年为了定量测量人为排放 Melamed 等人结合使用了天底观测和天顶观测^[5]. 机载多轴 DOAS 最先搭载于 DLR-Falcon 不仅能用于对流层 NO₂ 的测量^[6], 还实现了 SCIAMACHY 的 NO₂ 的结果验证^[7], 而且从测量结果中提取得到了 NO₂ 的垂直廓线^[8]. AMAXDOAS 还应用在对烟羽中 SO₂ 的浓度及通量测量上^[9].

该技术在国外已经比较成熟, 并应用于环境遥感监测领域, 但在我国尚属空白. 为此, 本文研究了基于机载平台的多轴 DOAS 技术反演对流层 NO₂ 的方法. 结合天顶、天底两个方向实现了对流层和平流层痕量气体的分离, 利用 DOAS 算法并结合辐射传输模型 SCIATRAN^[10] 得到了对流层 NO₂ 的垂直柱浓

* 国家自然科学基金 (批准号: 40805015, 40905010) 和国家高技术研究发展计划 (863) 资助项目 (批准号: 2006AA06A303) 资助的课题.

[†]E-mail: phxie@aiofm.ac.cn

度 (vertical column density, VCD), 并利用该技术对珠三角地区对流层 NO₂ 浓度进行了测量.

2. 原理

作为被动 DOAS 技术的一种应用, 机载多轴 DOAS 技术是以太阳散射光为光源, 利用气体分子对太阳散射光的特征吸收对气体进行定性、定量测量的一种光谱探测技术. 入射光经过气体吸收后的光强和原始光强的定量关系可由 Lambert-Beer 定律给出:

$$\ln \left[\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right] = -\sigma(\lambda) \int_0^L c(l) dl \quad (1)$$

其中, $I(\lambda)$ 为经过气体吸收的光谱强度, $I_0(\lambda)$ 为光的原始强度 (或称参考光谱强度), $\sigma(\lambda)$ 是气体在波长 λ 处的吸收截面, l 是入射光穿过大气的路径长度, $c(l)$ 是气体浓度.

由于大气中存在多种气体的吸收、瑞利散射和气溶胶米散射, 如果定义 i 气体的柱浓度 $S_i = \int c_i(l) dl$, 则方程 (1) 可写为

$$\ln \frac{I(\lambda, \sigma)}{I_0(\lambda)} = -\sum_i \sigma_i(\lambda, T) \int c_i(l) dl + P(\lambda), \quad (2)$$

$\sigma_i(\lambda, T)$ 表示气体 i 在温度为 T 时在波长 λ 处的吸收截面, $P(\lambda)$ 为瑞利散射和米散射引起的消光强度. 由于瑞利散射和米散射引起的光强衰减随波长为“慢变化”, 因此, 将测量到的光谱进行高通数字滤波, 即可除去光谱中的“慢变化”, 再经过低通滤波, 可减少高频

噪声的影响, 最终得到差分光学厚度 $\tau(\lambda)$ 为

$$\tau(\lambda) = \ln \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = -\sum_i \sigma_i(\lambda, T) \int c_i(l) dl, \quad (3)$$

最后将标准拟合参考光谱 (实验室精确测定的气体的标准光谱) 与处理后得到的差分吸收光谱进行最小二乘拟合, 可同时获得多种气体的斜柱浓度 S_i . 由于 S_i 为气体浓度沿光程的积分, 所以也叫做斜柱浓度, 它不能直接反映污染气体在大气中的分布信息, 为此需要将其转化为污染气体在大气中分布的垂直柱浓度.

机载多轴 DOAS 技术通过测量天顶方向和几个离轴方向的大气吸收光谱来获取大气中污染气体的垂直柱浓度区域分布及空间分布, 图 1 所示为机载多轴 DOAS 的原理示意图. 实验中选取了天顶、天底和一个离轴方向三个观测角度. 在计算中, 定义天底观测方向的角度为 0°, 天顶方向角度为 180°, 离轴观测角度为 α (实验中选取了水平向下 10°). 由于在测量中选择的参考光谱为“相对干净”区域的测量光谱, 因此通过计算得到的斜柱浓度不仅包括对流层浓度信息, 还含有平流层部分, 为得到对流层 NO₂ 垂直柱浓度结果, 首先需要考虑的是扣除平流层部分的干扰. 对固定位置的地基多轴 DOAS 而言, 可以考虑利用在同一个测量循环中天顶方向的测量光谱作为参考光谱来扣除平流层部分的影响, 得到仅反映对流层信息的差分斜柱浓度 ΔSCD , 然后再利用辐射传输模型 SCIATRAN 计算对流层大气质量因子 ΔAMF , 代入公式

$$VCD = \frac{\Delta SCD}{\Delta AMF} \quad (4)$$

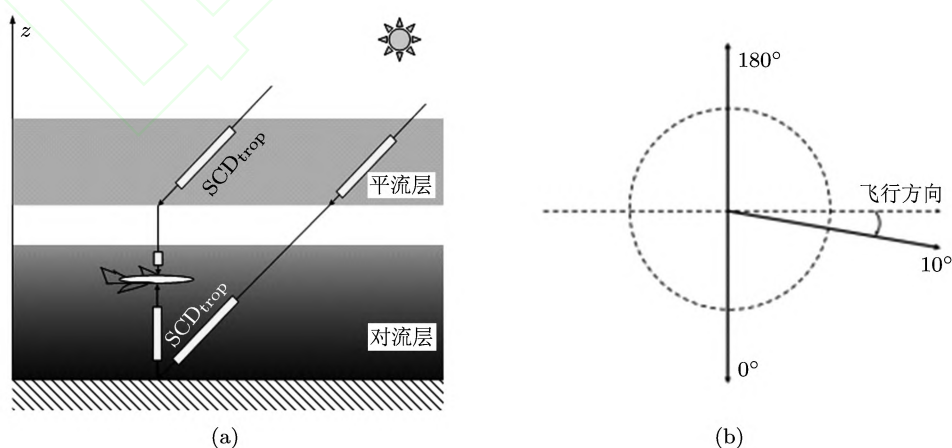


图 1 机载多轴 DOAS 原理示意图, (a) 为测量原理示意图; (b) 为在实验中所选取的角度天底方向 (0°), 水平向下 10° 和天顶方向 (180°)

计算得到对流层污染气体的垂直柱浓度 VCD. 对于基于移动平台的机载多轴 DOAS 而言, 观测平台的移动使得太阳天顶角和方位角在不断的变化, 同时所观测的气团也在不断发生变化, 利用一个望远镜扫描不同角度的方法大大降低了时间和空间分辨率, 因此在实验中使用了 3 套仪器分别观测不同的角度, 而在计算中选择了在较小太阳天顶角下天顶方向的某一“干净”地区的单一弗朗和费参考光谱, 由于飞机在 3 km 以上, 所以对流层部分 NO₂ 可以忽略, 而平流层部分随时间变化比较慢, 计算中采用最小值线性拟合的方法得到平流层部分 (dSCD_{strat}) 来修正, 进而扣除平流层部分, 再利用公式

$$VCD = \frac{SCD_{trop}}{AMF_{trop}} = \frac{DSCD_{\alpha} - dSCD_{strat}}{AMF_{trop}} \quad (5)$$

计算得到对流层垂直柱浓度.

3. 实验系统

机载多轴 DOAS 系统结构示意图如图 2 所示, 它是由三个相同的光谱仪、望远镜、光纤及一台控制计算机等组成. 太阳散射光分别由三个望远镜接收, 经光纤进入光谱仪. 光谱仪的光谱范围为 290–420 nm, 分辨率为 0.56 nm, 系统中选用了三个方向即天顶方向、天底方向和水平向下 10° 来探测散射太阳光, 利用不同观测方向的测量结果, 可以实现对流层与平流层痕量气体的分离.

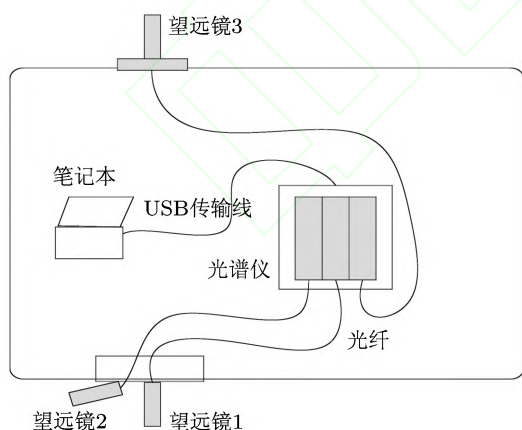


图 2 机载多轴 DOAS 系统结构示意图

4. 灵敏度研究

在测量中, 飞机飞行高度、太阳天顶角、地面反照率等因素都会对探测器的接收光的散射过程和强度产生影响, 为研究机载多轴 DOAS 测量大气中 NO₂

的灵敏度, 利用辐射传输模型 SCIATRAN 研究了以上因素对大气质量因子的影响. 模型中选了一个“盒子模型”的 NO₂ 廓线, 假定在 0–1 km 浓度均匀混合为 10 ppb, 1–2 km 浓度均匀混合为 5ppb, 选用的气溶胶廓线在 0–1 km 消光系数为 0.8 km⁻¹, 1–2 km 线性衰减至 0, 如图 3 所示.

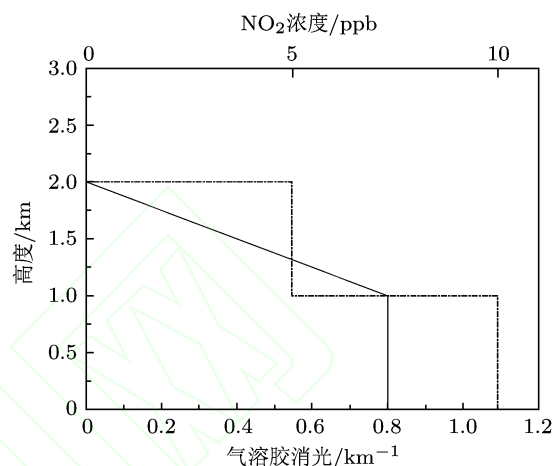


图 3 模型中选用的 NO₂ 廓线和气溶胶消光廓线

4.1. 飞行高度对大气质量因子的影响

对流层中的 NO₂ 主要来自地面人类活动排放^[7], 因此它主要位于近地面 2 km 以下, 随飞机飞行高度的变化, 探测器对对流层 NO₂ 的探测灵敏度也会变化, 为此研究了大气质量因子随飞机飞行高度的变化. 计算中假定地面反照率为 0.05, 太阳天顶角为 55°. 由于飞机起飞后迅速到达了 3 km 的高度, 因此只研究了 0.5–10 km 高度范围内的变化情况. 图 4 为计算的天顶和天底两个方向的大气质量因子结果.

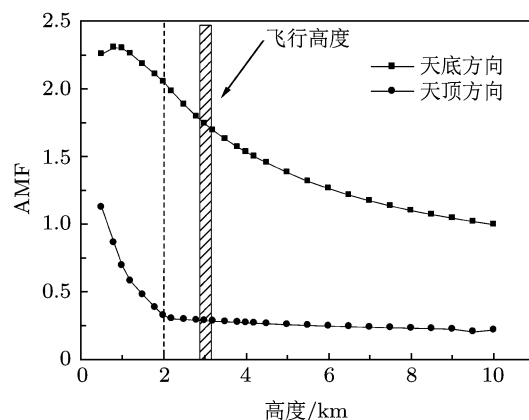


图 4 天顶和天底方向的对流层大气质量因子结果

从图 4 计算结果可以看出, 由于 NO₂ 主要位于近地面, 在天底方向, 对流层 AMF 值随飞行高度的升高

而逐渐减小, 在距离地面 2 km 以下, AMF 值与正常飞行高度 3 km 的 AMF 差别在 18%-32% 之间. 而在飞行过程中, 飞机飞行高度变化范围在 2.8-3.2 km 以内, 计算得到的 AMF 值的变化范围在 3% 以内. 随高度的增加, AMF 值逐渐变小, 这也说明对近地面 NO_2 的探测灵敏度减小了. 而在天顶方向, 由于计算中输入的廓线为 2 km 内的“盒子型”, 所以在飞行高度小于 2 km 时 AMF 值较大, 而随飞行高度升高逐渐减小, 当飞行高度超过 2 km 后 AMF 值基本保持不变.

4.2. 太阳天顶角对对流层大气质量因子的影响

由于光子大量发生散射的高度与太阳天顶角有很大关系, 因此太阳天顶角对 AMF 的计算有很大影响. 在模型中分别计算了太阳天顶角在 10° 到 80° 之间对 AMF 计算的影响, 计算结果如图 5(a) 所示. 在太阳天顶角小于 65° 时, AMF 结果随太阳天顶角的增大而逐渐增大, 变化范围从 1.575 到 1.7727, 而当太阳天顶角大于 65° 时则开始降低. 由于实验时间是从 11 点 03 分到 15 点 58 分, 太阳天顶角变化范围在 45° 到 60° 之间 (阴影部分), AMF 值的变化不超过 1.7%.

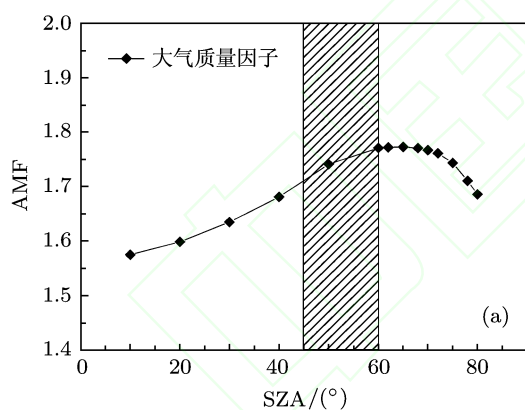


图 5 AMF 随太阳天顶角和地面反照率的变化

4.3. 地表反照率对对流层大气质量因子的影响

在低对流层, 地表反照率对辐射的多次散射和地面反射有很大影响, 随着地表反照率的升高, 地面反射的光子数增多, 从而使得多次散射增强, 因此地表反照率在 AMF 的计算中起着非常重要的作用. 为研究地表反照率对 AMF 计算的影响, 计算了地表反照率在 0.01 到 1 范围内的 AMF 值, 如图 5(b). 从图中可以看出, 随着地表反照率的升高, AMF 值也在逐渐增大. 由于飞行中经过的地表特征主要为城市和海洋,

因此在计算中主要考虑 2 种地表状况, 即土壤 (0.05) 和水面 (0.1) 在 AMF 中计算的差别. 从计算结果可见, 水面上空计算的 AMF 值比土壤上空高约 11%, 说明不同的地表反照率在 AMF 计算中影响较大, 因此在实际计算中针对不同的地表分别不同的地表反照率代入计算.

5. 结果与分析

5.1. NO_2 斜柱浓度计算

利用 DOAS 方法分析了 2008 年 12 月 10 日在珠三角地区进行的一次机载实验数据. 计算中选用的拟合波段为 360-387 nm, 参与拟合的气体包括 $\text{NO}_2^{[11]}$, $\text{O}_3^{[12]}$, $\text{O}_4^{[13]}$, 同时参与拟合的还有为消除“ing 效应”^[14] 而利用参考光谱计算得到的 Ring 光谱. 在进行拟合之前, 所有的气体吸收截面都与仪器函数进行了卷积, 选取了在太阳天顶角较小且飞机经过干净地区时分别使用天底和水平向下 10° 方向的光谱仪测量的天顶方向的光谱作为参考光谱, 拟合结果如图 6 所示, 计算得到的 NO_2 的斜柱浓度约为 9.61×10^{16} molec./ cm^2 , 剩余噪声均方根值约为 2.57×10^{-3} .

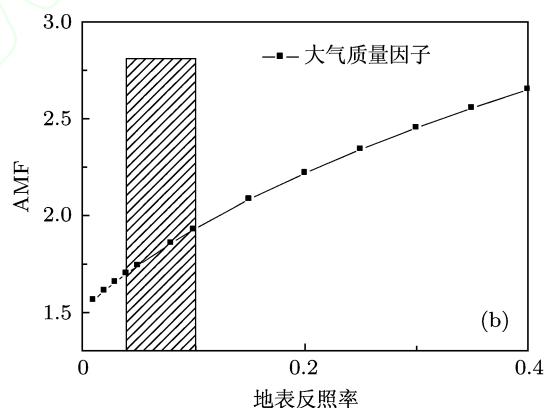


图 6 12 月 10 日 12:08 测量的一条光谱的 DOAS 拟合的结果

利用 WinDOAS 软件^[15] 计算了实验中天顶和天底 2 个方向的 NO_2 斜柱浓度结果, 如图 7(a) 所示. 从计算结果可以看出, 在实验中共观测到了 4 次高值区域, 分别为图中的 I, II, III, 和 V 部分, 而在 IV 区域时却观测到了一段低值区域. 由于对流层 NO_2 主要来自人类活动排放等地面排放源, 因此天顶方向的测量结果相对天底方向要小得多, 仅在污染源附近浓度略有升高. 由于计算中选取的参考光谱为太阳天顶角较小且相对“干净地区”的一条天顶方向的测量谱, 随着飞机飞行区域的变化, 太阳天顶角和方位角也在发生变化, 从而导致在 NO_2 的反演结果中存在部分平流层的

贡献. 为得到对流层 NO_2 的斜柱浓度信息, 就需要把平流层部分扣除. 由于平流层部分 NO_2 浓度随太阳天顶角变化较慢, 而对流层部分则主要来自地面人为排放等因素, 因此随不同的地区变化比较大, 可见反演得到的 NO_2 柱浓度结果为一个慢变化部分加上一个快变化部分. 此外, 飞机排放是唯一的对流层上部和平流层下部 NO_2 的人为排放源, 其对大气的影响依赖于它的存在时间和高度. 由于本实验中飞机飞行高度为 3 km, 而普通民航飞机的高度一般都在 6 km 以上, 采用天顶方向的测量光谱作为参考谱基本可以扣除其影响; 同时由于使用的是天顶和天底两个观测方向进行计算, 故飞机尾部排放对实验的影响很小, 在计算中没有考虑. 当飞机飞过深圳东北部和增城上空时, 观测到了低值区域, 由于 DOAS 计算中选取了该区域天顶方向的测量光谱为参考谱, 故在该区域假定计算得到的斜柱浓度中没有平流层部分, 并在计算中假定在这两个区域飞机上部的对流层 NO_2 忽略, 对这两个区域的最小值取线性拟合, 便得到了平流层慢变化部分的大小, 如图 7(b) 所示.

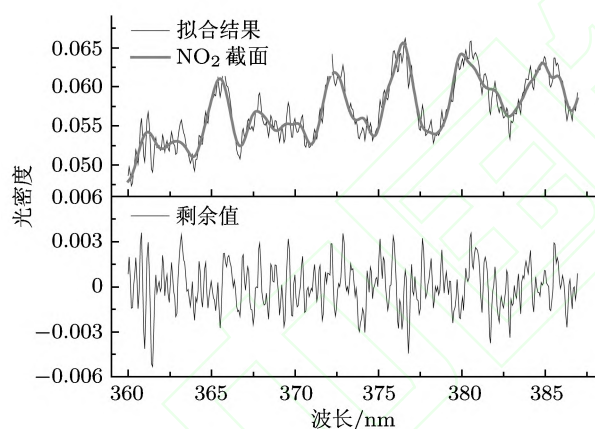


图 7 NO_2 斜柱浓度计算结果 (a) 为天顶和天底方向的斜柱浓度结果; (b) 为利用最小值线性拟合方法对平流层部分进行的修正, $y=a+bx$, $a=-6.31 \times 10^{15} \text{ molec./cm}^2$, $b=1.68 \times 10^{14}$.

5.2. NO_2 垂直柱浓度的计算

为得到反映本地实际浓度信息分布的对流层垂直柱浓度结果, 利用辐射传输模型 SCIATRAN, 结合飞行的 GPS 信息, 计算了在飞行轨迹上对应的天底、天顶方向的 AMF 值. 气溶胶是影响大气辐射传输的一个重要因素, 参考当时的气象数据知, 气流主要来自于内陆地区, 因此在模型中代入的气溶胶模式为陆地型气溶胶, 其在 380 nm 处的光学厚度为 0.5(Isjanet, 2008, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). 输入的大气模式为美国标准大气, 地面反照率取 0.05^[16] 和 0.1^[17], 分别代表陆地和海洋两种地表特征. O_4 是

大气中 O_2 的二聚体, 由于其化学性质比较稳定, 故在大气中的浓度分布是不变的. 云的存在会增加光在大气中的多次散射, 增加光程, 从而使得实验测得的 O_4 SCD 值变大. 我们利用机载测量的 O_4 的斜柱浓度的变化来反映云量的大小, 图 7(a) 中给出了在 347–375 nm 波段反演的天底方向的斜柱浓度结果. 从 O_4 SCD 结果可以看出, 在飞行过程中其 SCD 值变化不大, 平均值为 $1.558 \times 10^{43} \text{ molec./cm}^2$, 说明在整个飞行过程中云量很小, 因此在计算中没有考虑云的影响.

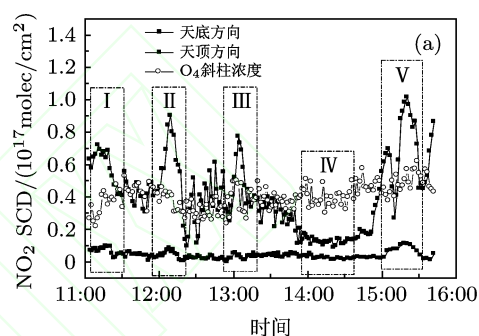


图 8 沿飞行轨迹上的对流层 NO_2 垂直柱浓度分布图, (浅灰色到深灰色分别代表浓度由低到高的变化)

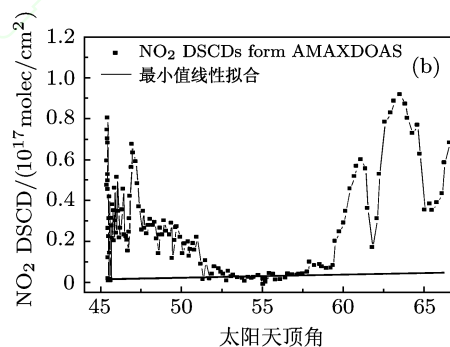


图 9 利用后向轨迹模型计算的 2008 年 12 月 10 日的气流后向轨迹, (从上到下的三条线分别代表 500 m, 1000 m 和 1500 m 三个高度的气流轨迹)

图 8 所示为计算得到的 NO_2 垂直柱浓度沿飞行轨迹的分布图, 并结合 GPS 数据, 将沿飞行轨迹的浓度分布图叠加到地图上, 从灰色到黑色分别表示的是浓度由低到高的变化. 从图中可以明显看出 4 个高值区域, 分别位于珠海西南部、珠海与深圳之间的海面上空、深圳西北部以及虎门地区上空. 由于虎门地区和珠海西南部地区存在发电厂, 来自电厂的排放是观测到 NO_2 高值的主要原因. 而对于在珠海到深圳的海面上空观测到的高值, 由于本地没有污染源, 推断可能来自区域输送. 利用气流后向轨迹模型 (<http://www.arl.noaa.gov/>) 计算了 11 点至 13 点期间 500 m, 1000 m, 100 m 三个高度气流的 backward 轨迹, 如图 9 所示, 从图中结果可以看出, 在 1000 m 以下气流

主要来自东北方向,而在该方向对应的深圳西南部地区存在较多的发电厂,可见来自电厂区域的污染输送是产生海面上空 NO_2 高值的主要原因.

5.3. 机载测量结果与地基多轴 DOAS 结果的对比

为验证机载测量的准确性,将机载测量结果与一台地基多轴 DOAS 的结果进行了对比.地基多轴 DOAS 安装在珠海市西南部(北纬 $22^\circ 10' 20''$,东经 $113^\circ 17' 45''$),距离珠海市区约 30 km.在飞机飞行过程中,地基多轴 DOAS 仪器也在同步运行.由于飞机飞行于地基多轴 DOAS 站点上空的时间为 11 点 19 分到 11 点 27 分,将该段时间内的测量结果进行了对比.

从对比结果可见,在此期间地基多轴 DOAS 测量的 NO_2 平均值结果为 2.46×10^{16} molec./ cm^2 ,

机载多轴 DOAS 的测量结果的平均值为 2.68×10^{16} molec./ cm^2 ,二者相差约 8%,进一步验证了机载多轴 DOAS 技术的可行性.

6. 结论

以太阳光为光源的地基多轴 DOAS 技术已在国内外成功地运用在了环境监测上,作为地基多轴 DOAS 技术的发展,机载多轴 DOAS 技术弥补了地基设备测量方式的单一、固定等不足,可以实现短时间内大区域污染分布的测量.

同时,机载多轴 DOAS 技术在遥感测量领域还有着广泛的应用前景,如火山、海洋、森林等区域的污染分布测量;在已知风廓线数据的情况下,还能实现点源、面源污染气体排放通量的精确解析;卫星数据的机载对比校验等.

-
- [1] Zhou B, Liu W Q, Qi F, Li Z B, Chui Y J 2001, *Acta phys. sin.* **50** 1818 [周斌, 刘文清, 齐峰, 李振壁, 崔延军 2001 物理学报 **50** 1818]
- [2] Si F Q, Liu J G, Xie P H, et al., *Acta phys. Sin.* **55** 3165 [司福祺, 刘建国, 谢品华等 2006 物理学报 **55** 3165]
- [3] Pfeilsticker K, Platt U 1994 *Geophysical Research Letters* **21** 1375
- [4] McElroy C T, McLinden C A, McConnell J C 1999 *Nature* **397** 338
- [5] Melamed M L, Solomon S, Daniel J S, Langford A O, Portmann R W, Ryerson T B, Nicks D K, Jr, McKeen S A 2003, *J. Environ. Monit* **5** 29
- [6] Wang P, Richter A, Bruns M, Rozanov V V, Burrows J P, Heue K P, Wagner T, Pundt I, Platt U 2005 *Atmos. Chem. Phys.* **5** 337
- [7] Heue K P, Richter A, Bruns M, Burrows J P, Friedeburg C V, Platt U, Pundt I, Wang P, Wagner T 2005 *Atmos. Chem. Phys.* **5** 1039
- [8] Bruns M, Buehler S A, Burrows J P, Richter A, Rozanov A, Wang P, Heue K P, Platt U, Pundt I, Wagner T 2006 *Atmos. Chem. Phys.* **6** 3049
- [9] Wang P, Richter A, Bruns M, Burrows J P, Scheele R, Junkermann W, Heue K P, Wagner T, Platt U, Pundt I 2006 *Atmos. Chem. Phys.* **6** 329
- [10] Rozanov A, Rozanov V, Burrows J P 2001 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **69** 491
- [11] Burrows, J P, Dehn A, Deters B, Himmelmann S, Richter A, Voigt S, Orphal J, 1998 *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **60** 1025
- [12] Burrow J P, Dehn A, Deters B, Himmelmann S, Richter A, Voigt S, Orphal J, 1999 *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **61** 509
- [13] Greenblatt G D, Orlando J J, Burkholder J B, Ravishankara A R 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 18577
- [14] Grainger J F, Ring J 1962 *Nature* **193** 762
- [15] Fayt, C, Van Roozendaal M 2001 WinDOAS 2.1 software User Manual
- [16] Feister U, Grewe R 1995 *Photochem. Photobiol* **62** 736
- [17] Payne, Richard E 1972 *Journal of Atmospheric Sciences* **29** 959

Determination of tropospheric NO₂ by airborne multi axis differential optical absorption spectroscopy*

Xu Jin Xie Pin-Hua[†] Si Fu-Qi Li Ang Liu Wen-Qing

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

(Received 3 March 2011; revised manuscript received 4 May 2011)

Abstract

The airborne multi axis differential optical absorption spectroscopy (AMAXDOAS) is employed to retrieve tropospheric vertical columns of NO₂. The differential slant columns of NO₂ are retrieved combined with the spectra in different viewing directions by the DOAS method and the vertical columns are calculated with the radiative transfer model SCIATRAN. The dependences of AMF on altitude, surface albedo, and solar zenith angle are studied. The measurement campaign in pearl region delta region on December 10 in 2008 is reported. The NO₂ vertical column distribution is obtained in zenith and nadir directions. The results from airborne multi axis DOAS are compared with those from a ground-based multi axis DOAS in Zhuhai, with a deviation of 0.08. The results show that AMAXDOAS can be used to measure the tropospheric NO₂ in a large area within a short time.

Keywords: multi axis DOAS, airborne, troposphere, vertical column

PACS: 42.68.Ca

* Project supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40805015), a grant from the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40905010) and a grant from the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (Grant No. 2006AA06A303).

[†] E-mail: phxie@aiofm.ac.cn