

基于机载平台的 NO₂ 垂直廓线反演灵敏度研究*

徐晋 谢品华[†] 司福祺 李昂 周海金 吴丰成 王杨 刘建国 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学中心, 合肥 230031)

(2012年12月26日收到; 2013年1月23日收到修改稿)

研究了基于机载多角度观测方式反演 NO₂ 垂直廓线的灵敏度, 利用计算的权重因子和平均核分析了不同波长、不同观测角度、不同地表反照率、不同气溶胶模式、不同高度对廓线反演灵敏度的影响. 结果表明, 中心波长在 370 nm 的紫外波段的平均核比中心波长在 500 nm 的可见波段垂直分辨率更高, 更有利于廓线反演; 向上观测角度的测量结果中没有明显的廓线信息, 而向下观测角度的测量结果包含更多的廓线信息; 地表反照率对廓线反演没有明显影响; 高气溶胶模式使得廓线反演的灵敏度升高; 较低的飞行高度计算的平均核差异不明显, 不利于廓线信息的反演.

关键词: 多轴差分吸收光谱技术, 机载, 垂直廓线, 灵敏度

PACS: 42.68.Ca

DOI: 10.7498/aps.62.104214

1 引言

由于其光化学反应产物与 O₃ 有关, NO₂ 是一个重要的对流层痕量气体. 在人口稠密地区, 最主要的排放源是人类活动排放. 由于 NO₂ 和 O₃ 对人类健康和植物生长都非常有害, 在这些区域观测 NO₂ 浓度就显得非常必要. 由于所有的 NO₂ 排放都会影响边界层, 对边界层 NO₂ 浓度的监测就显得越来越重要. 为详细研究 NO₂ 在大气中的化学特性, 获取其垂直分布是非常必要的, 这就需要有一个能够分辨其垂直分布信息的仪器或方法. 使用紫外可见光谱仪研究对流层^[1] 和平流层^[2,3] 成分已经是一个广为人知的技术. 近几年, 不同的研究小组利用差分吸收光谱技术 (DOAS) 方法和基于机载平台的不同的观测角度获得了部分气体的垂直柱浓度信息^[4] 和廓线信息^[3,5].

除了传统的天顶散射光测量外, 近年来发展起来的紫外可见吸收光谱测量的地基多轴 DOAS 技术采用多个角度进行探测, 利用不同角度在大气中的光程不同来获得不同的斜柱浓度, 结合观测结果, 使得大气中痕量气体 (如 NO₂, BrO 及 O₃ 等) 的垂

直分布信息的测量成为可能. 本文主要研究了基于机载平台的 NO₂ 廓线反演的灵敏度, 分析了不同波长、不同观测角度、不同地表反照率、不同气溶胶模式以及不同高度对廓线反演灵敏度的影响.

2 原理

2.1 基于 DOAS 方法的斜柱浓度反演

作为被动 DOAS 技术的一种应用, 机载多轴 DOAS 技术同样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和散射衰减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, $I(\lambda)$ 为经过气体吸收和散射后的光谱强度, $I_0(\lambda)$ 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

* 国家自然科学基金 (批准号: 41275038, 41275037) 和环保公益性行业科研专项 (批准号: 201109007) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: phxie@aiofm.ac.cn

和米散射, 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 $\tau(\lambda)$:

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

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 .

2.2 基于斜柱浓度的廓线反演算法

在某一太阳天顶角下, 机载多轴 DOAS 不同观测角度测量的一组差分斜柱浓度中包括着大气中痕量气体的垂直分布信息. 为了获得这些信息, 就需要采用一定的算法进行反演, 这里研究的廓线反演算法是 2000 年 Rodgers^[6] 最先提出的最优化算法. 利用前向模型 F ^[7], 一组测量结果矩阵 \mathbf{y} 便与垂直廓线信息矩阵 \mathbf{x} 之间建立的相互联系:

$$\mathbf{y} = F(\mathbf{x}, \mathbf{b}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (4)$$

\mathbf{b} 为前向模型参数矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为包含了测量误差和模型误差的各项误差总和, 此处, \mathbf{y} 是一个斜柱浓度的矩阵, 它是观测角度 α 的函数, \mathbf{x} 是所研究气体的垂直廓线. 在真实大气中, 痕量气体的廓线是连续的, 在我们的算法中, 将其变为离散的矩阵. 上式则可以写作一个线性关系:

$$\mathbf{y} = \mathbf{K}\mathbf{x}, \quad (5)$$

其中, $\mathbf{K} = \frac{d\mathbf{y}}{d\mathbf{x}}$, 矩阵 \mathbf{K} 代表权重函数, 每一行代表一次测量结果. 权重函数代表了在每一个观测角度上斜柱浓度与气体垂直廓线的依赖关系, 即斜柱浓度随廓线的变化关系. 本研究中使用的前向模型是辐射传输模型 SCIATRAN. 由于条件约束的限制, (2) 式是一个病态方程, 它没有惟一解. 为了减少可能的解的数量, 这里我们采用最优化算法 (optical

estimation method, OE) 添加一个先验信息. 最优化算法使用的前提是所研究的问题具有线性或中等非线性的规律, 由于大部分痕量气体 (如 NO_2) 光学厚度较小 (吸收小于 2%), 天空散射光吸收的测量问题的反演一般都是线性的.

本文采用 Rodgers^[6] 在 2000 年提出的最大后验概率法 (maximum a posteriori, MAP), 其反演廓线 $\hat{\mathbf{x}}$ 的表达式如下:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{y} + \mathbf{S}_a^{-1} \mathbf{x}_a), \quad (6)$$

其中, \mathbf{K} 为权重函数矩阵, \mathbf{S}_ε 为测量误差的协方差矩阵, \mathbf{S}_a 为先验误差的协方差矩阵, \mathbf{y} 为测量矩阵, \mathbf{x}_a 为先验廓线信息.

为更加精确地定义反演廓线, 引入分配函数矩阵 \mathbf{D} , 它表示反演廓线对斜柱浓度变化的灵敏度, 即

$$\mathbf{D} = \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{y}} = \mathbf{S}_a \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{S}_a \mathbf{K}^T + \mathbf{S}_\varepsilon)^{-1}, \quad (7)$$

它给出了反演廓线随某一角度的斜柱浓度的变化情况. 反演得到的廓线可以看作是真实廓线和先验廓线的权重平均值. 这里用平均核矩阵 \mathbf{A} 表示真实廓线的权重

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}\mathbf{K}, \quad (8)$$

矩阵 \mathbf{D} 为分配函数, 平均核反映了在反演廓线的每一层随真实廓线变化的灵敏度. 当在某一特定高度改变真实大气中的廓线信息时, 反演廓线中所有高度处的值都会发生改变, 而平均核矩阵 \mathbf{A} 反映的就是这个特定高度, 它表征某一观测角度对廓线信息的灵敏度.

2.3 前向模型

本文使用了辐射传输模型 SCIATRAN^[8] 作为前向计算模型, 计算了权重函数来研究廓线反演的灵敏度. SCIATRAN 是一个完全的球形辐射传输模型, 由于它考虑了折射, 因此能够用来计算在特定飞行高度下特定观测角度的辐射能. 权重函数是通过连续“扰动”先验廓线中每一层浓度的大小来进行计算的, 使用这些扰动廓线就必须计算扰动辐射能, 权重函数矩阵元素可以近似表达为

$$K_{ij} = \frac{dy_i}{dx_i} \approx \frac{\Delta I_i}{\Delta x_i} = \frac{I_i - I_i^p}{x_j - x_j^p}, \quad (9)$$

其中, i 表示所有测量的序号, j 表示每一层的序号, I_i 为没有扰动 NO_2 廓线时计算的辐射强度, I_i^p 为廓

线经过扰动的辐射强度计算结果, x_j 表示在第 j 层廓线没有经过扰动, x_j^p 表示在第 j 层廓线受到扰动.

在计算权重函数时消耗的时间较长, 因此辐射传输模型 SCIATRAN 通过使辐射传输方程线性化来计算权重函数. 由于 NO_2 在大气中吸收光学厚度较小, SCIATRAN 计算的权重函数可以很容易地转换为斜柱浓度变化的权重函数^[9]

$$WF_{\text{SC}}(h, \lambda) = \frac{-WF_I(h, \lambda) \cdot \Delta VMR}{I_0(\lambda) \cdot \sigma(\lambda) \cdot VMR(h)}, \quad (10)$$

其中, WF_{SC} 是与斜柱浓度变化相关的权重函数, h 为海拔高度, λ 为波长, WF_I 是与强度变化有关的权重函数, 它可以通过 SCIATRAN 计算得到, ΔVMR 为每一层的体积混合比变化, I_0 是大气层顶的绝对强度, σ 为吸收气体的吸收截面, VMR 是所研究气体的廓线, 其单位是体积混合比. WF_{SC} 的单位与 ΔVMR 的单位和使用的反演栅格的间隔有关, 如 ΔVMR 的单位是 1 ppbv, 反演间隔为 2 km, 则 WF_{SC} 的单位就是 $\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ppbv}^{-1} \cdot 2 \text{ km}^{-1}$. 通过 (4) 式计算出分配函数, 再利用 (5) 式计算出平均核.

3 灵敏度研究

选取 12 种场景计算得到平均核、权重函数, 研究机载多轴 DOAS 对廓线信息反演的灵敏度. 计

算中使用的场景设置如表 1 所示, 主要研究了波长、表面光谱反照率、气溶胶、飞行高度以及观测角度选取的影响. 同时, 研究主要针对 NO_2 气体的反演进行, 对于其他痕量气体在对应的吸收截面和波长处同样适用.

研究中为分析不同的垂直分辨率, 考虑了不同的反演间隔. 第一个反演间隔用于飞行高度为 10 km 的情况, 为 0, 1, 3, ..., 39 km 每隔 2 km 一层, 共 21 个间隔; 第二个反演间隔为 1, 4, 7, 9, 11, ..., 39 km 共 19 个间隔, 用于四个观测角度和 3 个波长的情况. 而在飞行高度为 3 km 的时候, 使用了第三种反演间隔, 即 0, 0.2, ..., 3.8 km, 每隔 0.2 km 一层, 共 20 个间隔.

计算中除非特殊说明, 都使用 LOWTRAN^[10,11] 提供的低气溶胶类型, 在边界层 (0—2 km) 能见度为 23 km, 气溶胶类型为海洋型, 相对湿度为 80%. 在自由对流层 (2—10 km) 能见度为 23 km, 相对湿度为 80%. 平流层气溶胶则使用为背景. 在所有的计算中都假定没有云的影响, 太阳天顶角设置为 50° .

不同观测角度的选取对廓线反演是非常重要的, 为研究不同角度的灵敏度, 选取了 10 个角度: 0° (天底方向), 60° , 80° , 85° , 88° , 92° , 95° , 100° , 120° 和 180° (天顶) 进行计算.

表 1 不同场景下的参数设置

场景	地表反照率	波长/nm	气溶胶	太阳天顶角/(°)	观测角度/(°)
1	0.05	370	LOWTRAN	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
2	0.05	500	LOWTRAN	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
3	0.90	370	LOWTRAN	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
4	0.90	500	LOWTRAN	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
5	0.05	370	无	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
6	0.05	500	无	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
7	0.05	370	干净陆地型	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
8	0.05	500	干净陆地型	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
9	0.05	370	城市型	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
10	0.05	500	城市型	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
11 [□]	0.05	370	LOWTRAN	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180
12 [□]	0.05	500	LOWTRAN	50	0, 60, 80, 85, 88, 92, 95, 100, 120, 180

其中 □ 所对应的场景是飞行高度为 3 km, 反演间隔是 0 km, 0.2 km, ..., 4 km, 5 km, 7 km, 9 km, ..., 39 km.

计算中, 需要首先假定先验误差 e_a ($e_a = \sqrt{S_a} \cdot 1$) 和测量误差 e_ε ($e_\varepsilon = \sqrt{S_\varepsilon} \cdot 1$). 由于测量的斜柱浓度在 1.0×10^{16} molec/cm² 到 5×10^{16} molec/cm² 的量级, 选择标准偏差 1×10^{15} molec/cm² 作为系统的测量误差, NO₂ 廓线的混合体积比约为 10 ppbv, 因此选择 1 ppbv 的标准偏差作为先验误差.

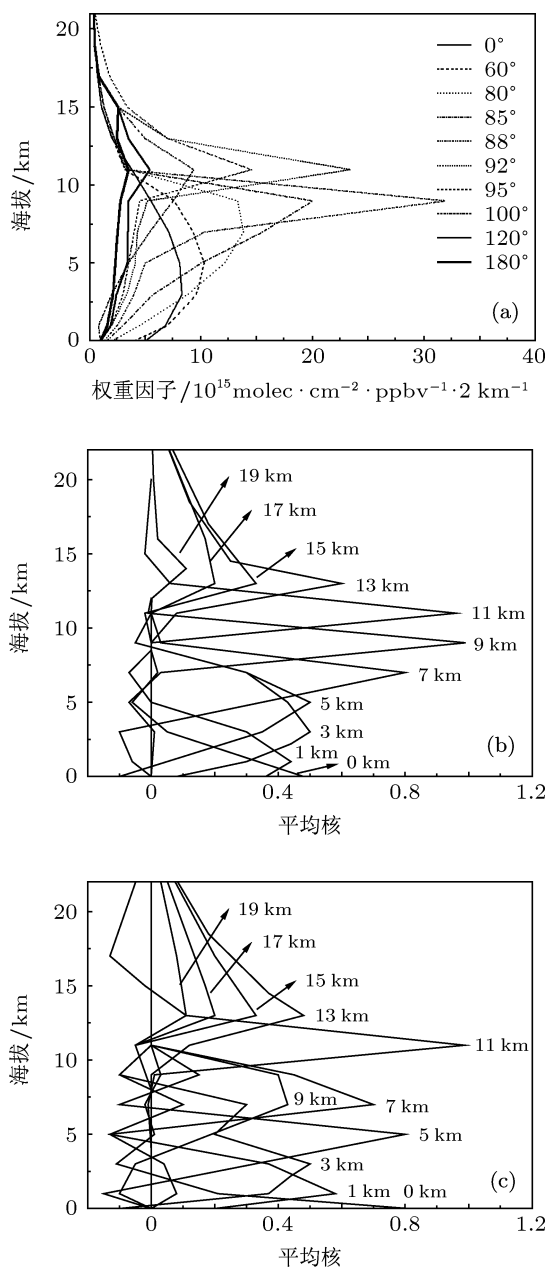


图 1 (a) 计算的波长 370 nm 的权重因子结果; (b), (c) 分别为波长 370 nm 和波长 500 nm 条件下计算的平均核结果

图 1(b) 是利用场景 1 计算的平均核结果, 该场景假定飞机飞行高度为 10 km, 中心波长为 370 nm, 地表反照率为 0.05. 可以看出, 在飞机飞行高度附近平均核的值较大, 灵敏度较高; 在 9 km

和 11 km 附近平均核出现了两个明显的峰值, 其垂直分辨率分别为 2.3 km 和 2.1 km, 表明在此处具有非常高的灵敏度. 随着高度的降低, 平均核分辨率降低, 与 9 km 处的平均核相比, 1 km 的平均核半高宽 (FWHM) 值为 4.9 km. 由于平均核峰值高度和 FWHM 的变化主要是受大气能见度的影响引起的, 通过不同海拔高度层的平均光程差别越大, 垂直分辨率的结果就越好. 为更好地分析平均核的特性, 计算了 NO₂ 廓线的权重函数. 权重函数的最大值可以反映出在给定的观测角度下哪一个海拔高度处包含最多的反演信息. 图 1(a) 给出了场景 1 的权重函数的计算结果. 从结果可以看出, 向下观测角度的峰值位于不同的海拔高度, 这说明了不同的观测角度对不同海拔高度的灵敏度是有差异的. 而在飞机上部, 平均核的垂直分辨率降低了. 在 11 km 处的平均核 FWHM 为 2.1 km, 而在 13 km 处的平均核 FWHM 却为 3.7 km. 除了 11 km 外, 其他所有的平均核的峰值均出现在 13 km 处. 图 1(a) 的权重函数结果也进一步验证了平均核的结果. 向上观测的角度在 13 km 以上灵敏度很小, 故认为其不含廓线信息.

3.1 波长对廓线反演的影响

由于不同的气体在不同的波段吸收是存在差异的, 所以研究波长对反演的影响是非常必要的. 这里分别考虑了紫外波段中心波长 370 nm 和可见波段中心波长 500 nm 两种情况进行研究. 利用场景 1 和场景 2 的参数计算了平均核, 并进行了对比. 从对比结果可见, 二者存在一定的差异. 第一个差异是平均核在 9 km 处的垂直分辨率变化明显, 在波长为 370 nm 时为 2.0 km, 而在 500 nm 却变成了 4.5 km. 第二个差异是在 0 km 和 5 km, 平均核的垂直分辨率在 500 nm 时有了明显的提高. 与场景 1 相比, 0 km 的垂直分辨能力从 3.5 km 增加到 1.3 km, 而 5 km 的垂直分辨能力从 4.9 km 提高到 2.4 km. 第三个差异是在 0 km 处, 波长为 500 nm 计算得到的平均核比波长为 370 nm 计算得到的结果大得多, 这说明波长为 500 nm 的测量对低对流层具有更好的探测灵敏度. 从图 1(c) 可以看出, 波长在 500 nm 处其在 7—9 km 内的垂直分辨能力比波长 370 nm 处要高, 而在 5 km 处却较低.

3.2 地表反照率对廓线反演的影响

由于对低对流层大气多次散射的影响和对地表反射光的影响,地表反照率也是廓线反演中必须考虑的一个重要参数.随着地表反照率的提高,地表反射的光子数增多,从而使得多次散射增加.为了研究地表反照率对廓线反演的影响,分别选取地表反照率为 0.05 和 0.9 两种情况计算了平均核,结果见图 2.从计算结果可见,场景 4 和场景 2 相比没有明显的变化.而在紫外波段,平均核在 1 km 处却增加了 50%,这主要是由于在紫外波段随着地表反照率的提高,地面反射了大量光子使多次散射增加了,而由于多次散射主要发生在大气厚度较大的地方,所以增加的多次散射主要集中在近地面区域.可见,较大的地表反照率将会提高紫外测量在近地面层的探测灵敏度,但对廓线的反演影响较小.

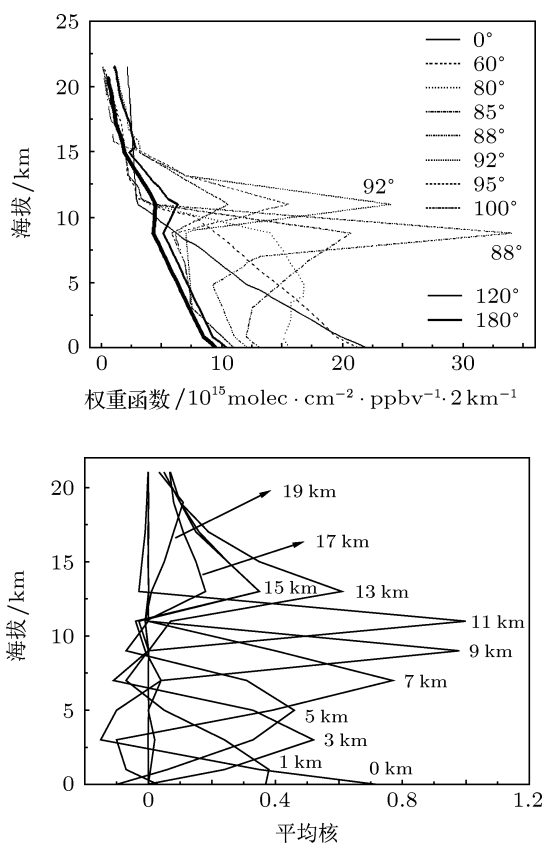


图 2 利用场景 3 计算的 370 nm 附近的权重因子和平均核结果

3.3 气溶胶对廓线反演的影响

由于气溶胶不仅能够使光线发生散射,还能吸收光强,因此在廓线反演中气溶胶消光是一个非常重要的参数.由于多次散射与气溶胶厚度有很大关

系,气溶胶的存在会使得多次散射增加从而增加吸收光程,使得测量的斜柱浓度变大.在这里研究气溶胶对廓线反演的影响.计算时,选取了 3 个气溶胶参数场景,即无气溶胶、干净陆地型气溶胶和城市气溶胶,将计算结果分别与利用 LOWTRAN 气溶胶廓线计算的结果进行对比.

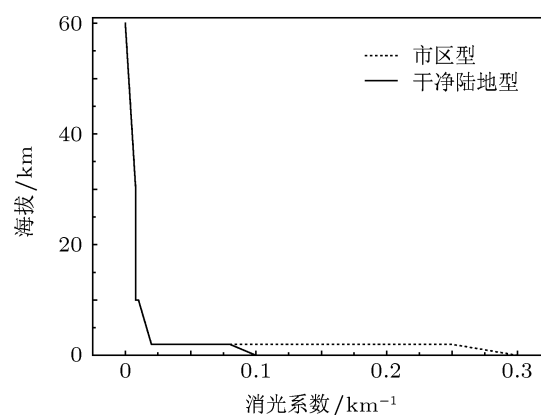


图 3 计算中使用的两种气溶胶类型:干净陆地型和城市型

计算中使用的干净陆地型气溶胶消光廓线如图 3 所示,包括 4 层不同的气溶胶类型.同时,图中也给出了市区型气溶胶消光系数廓线.

3.3.1 无气溶胶的情况

如图 4 所示,在波长 370 nm 处,场景 5 的计算结果与场景 1 相比除了在 1 km 处外没有明显的差别.在 1 km 处,场景 1 的 FWHM 值为 5 km,而场景 5 的 FWHM 值为 6.2 km,这是由于在低对流层不考虑气溶胶的情况下发生多次散射的次数减少了,从而使得光程变短引起的.结果表明,在不考虑气溶胶的情况下,近地面大气层的垂直分辨率会降低,从而不利于对近地面痕量气体廓线的反演.

3.3.2 干净陆地型气溶胶

该气溶胶类型也包括 4 层,表 2 给出了其参数的详细信息.从边界层向上到 2 km 相对湿度为 80%,包含两种气溶胶类型.该层气溶胶主要为水溶性的,包括硫酸盐、硝酸盐和其他水溶性物质,另含少量的非水溶颗粒,如灰尘.第二层为 2 km 到 10 km 部分,相对湿度为 70%,气溶胶成分和第一层相同.第三层为 10 km 到 30 km 部分,该层非常干燥,没有水汽,主要是硫酸盐形式的平流层气溶胶背景.最后一层也没有水汽,只有宇宙尘埃形成的气溶胶.图 5 给出了利用场景 7 的参数计算的干净陆地型气溶胶在 370 nm 处的平均核结果.与场景 5

相比, 平均核计算结果没有明显的差异, 可见, 在该波长处平均核在对流层对低气溶胶含量的情况灵敏度较高, 干净陆地型气溶胶仅影响低对流层反演结果.

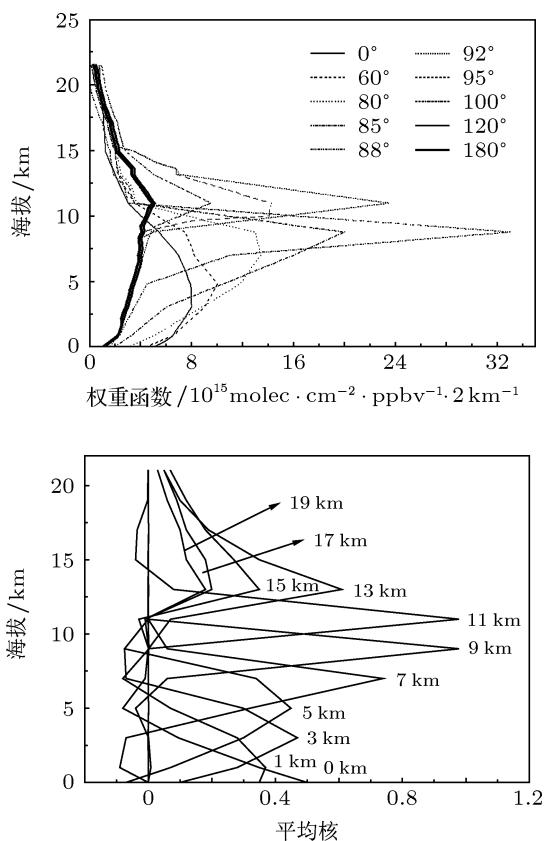


图4 在没有气溶胶的情况下计算的 370 nm 处的权重因子及平均核结果

表2 干净陆地型气溶胶参数

每层上边界	相对湿度/%	气溶胶组分	相对体积混合比
2	80	水溶性化合物	0.999942
		非水溶性颗粒(灰尘)	0.000058
10	70	水溶性化合物	0.999942
		非水溶性颗粒(灰尘)	0.000058
30	0	硫酸盐	1.00000
60	0	宇宙尘埃	1.00000

3.3.3 城市型气溶胶

该气溶胶设置同样包括 4 层, 具体参数见表 3. 从边界层向上到 2 km 相对湿度为 80%, 包含三种气溶胶类型. 该层气溶胶主要为煤烟型, 其相对体积混合比约为 80%, 其次是水溶性气溶胶, 约占 18%, 而非水溶性气溶胶则相对要少得多. 第二层为 2 km 到 10 km 部分, 相对湿度为 70%, 气溶胶成

分和第一层相同, 但相对比例却有所不同, 水溶性气溶胶相对比例升高, 烟煤型气溶胶相对比例降低了. 第三层和第四层与前面相同.

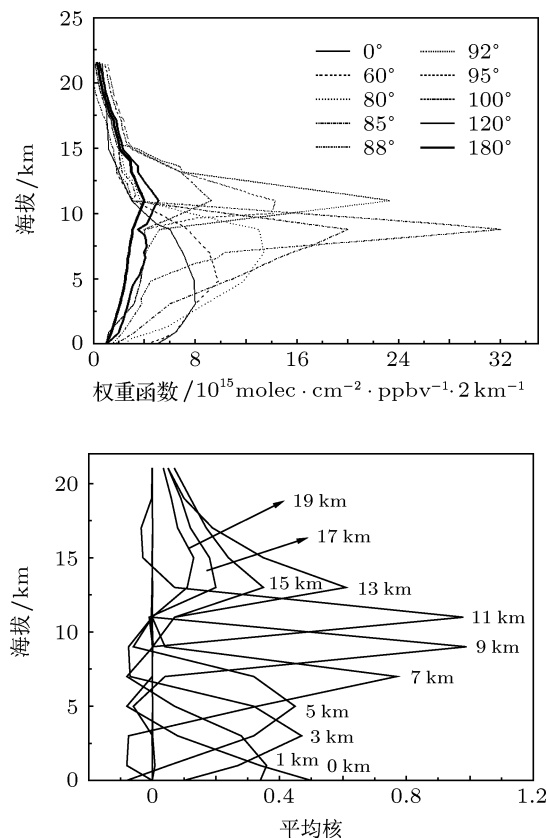


图5 在干净陆地型气溶胶的情况下计算的 370 nm 处的权重因子及平均核结果

表3 城市型气溶胶参数

每层上边界	相对湿度/%	气溶胶组分	相对体积混合比
2	80	水溶性化合物	0.17700
		非水溶性颗粒(灰尘)	0.000009
10	70	煤烟	0.822991
		水溶性化合物	0.457987
30	0	非水溶性颗粒(灰尘)	0.000026
		煤烟	0.541987
60	0	硫酸盐	1.00000
60	0	宇宙尘埃	1.00000

在波长 370 nm 处, 场景 9 和场景 5 的计算结果没有差异, 这是由于在该波段气溶胶不会影响能见度. 如图 6 所示, 在波长 500 nm 处, 与场景 6 相比平均核计算结果在 5 km 以下存在明显的差异. 每一个平均核峰的位置没有发生改变, 但是随着分辨能力的提高 FWHM 值降低了. 在海拔 0 km 处, FWHM 值从 2.8 km 降低到 1.5 km, 在海拔 1 km 处,

从 6.3 km 降低到 3.5 km, 而在海拔 3 km 处, 从 5 km 降低到 3.4 km. 这同样是由于城市型气溶胶提高了低对流层多次散射引起的. 从计算结果还可以看出, 在 3 km 以上二者仍然存在差异.

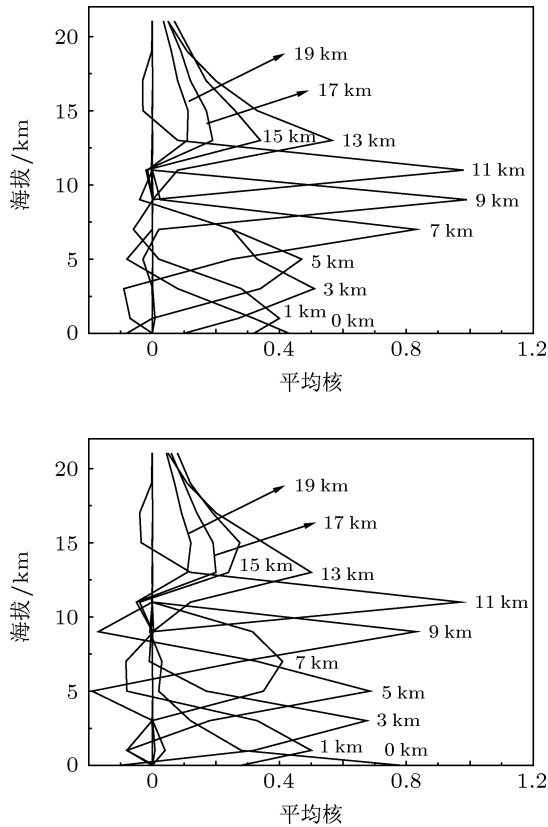


图 6 在城市型气溶胶的情况下计算的 370 nm 和 500 nm 处的权重因子及平均核结果

3.4 飞行高度对廓线反演的影响

由于对不同的观测方向几何路径的影响, 飞机的飞行高度对廓线反演至关重要. 这部分研究了飞行高度为 3 km 和 10 km 两种情况的对比, 研究低海拔高度与高海拔高度下廓线反演的差异. 如图 7 所示, 对于飞行高度为 3 km 的场景 11, 计算得到的平均核之间的差异并不像海拔为 10 km 的计算结果差别那么大, 平均核的值在飞机上部 and 下部出现了快速的降低. 计算结果表明, 在 3 km 高度进行测

量时得到的廓线信息较少, 仅在飞机飞行高度附近具有比较高的灵敏度, 但不同高度处的分辨能力较差, 因此能够比较容易获得飞机上部和下部的柱浓度信息, 反演廓线的信息较少.

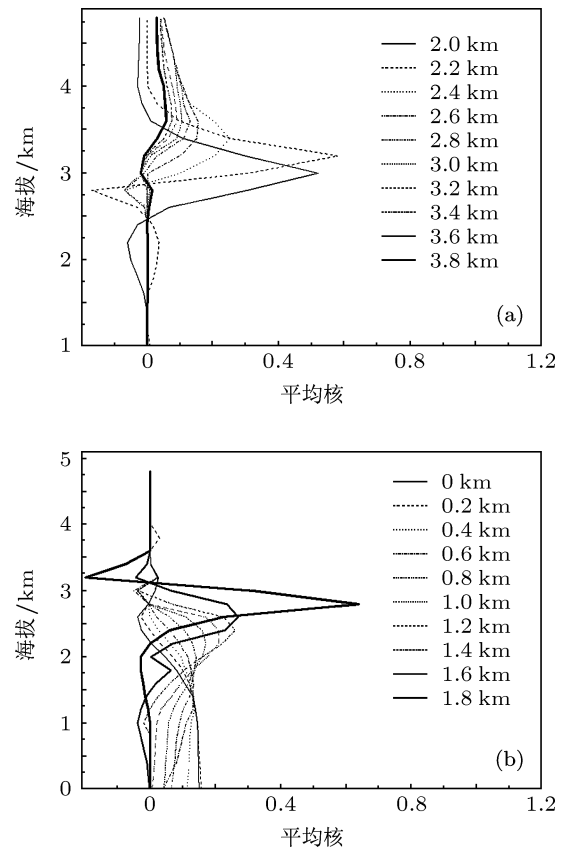


图 7 在 3 km 飞行高度下计算的 370 nm 处平均核结果 (a) 飞机上部的结果; (b) 飞机下部的结果

4 结论

本文研究了 NO_2 垂直廓线反演的灵敏度, 选取几种不同的场景设置, 分别研究了不同地表反照率、中心波长、气溶胶模式、观测高度、观测角度情况下的平均核变化, 分析了在不同情况下廓线反演的灵敏度. 该研究有利于优化廓线反演参数, 为下一步开展机载飞行实验以及基于机载平台的廓线反演提供了理论依据.

[1] McElroy C T, McLinden C A, McConnell J C 1999 *Nature* **397** 338
 [2] Pfeilsticker K, Platt U 1994 *Geophys. Res. Lett.* **21** 1375
 [3] Andrea P, Fabrizio R, Giorgio G, Daniele B, Ubaldo B, Ivan K, Alexey O 2002 *Appl. Opt.* **41** 5593
 [4] Xu J, Xie P H, Si F Q, Li A, Liu W Q 2002 *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]
 [5] Melamed M L, Solomon S, Daniel J S, Langford A O, Portmann R W, Ryerson T B, Nicks D K, McKeen S A 2003 *J. Environ. Monit.* **5** 29
 [6] Rodgers C D 2000 *Series on Atmospheric, Ocean and Planetary Physics, (Vol. 2)* (London: World Scientific Publishing)
 [7] Rodgers C D 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 5587

- [8] Rozanov A, Rozanov V, Burrows J P 2001 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **69** 491
[9] Richter A 2003 *Technical Report*, University Bremen
[10] Shettle E P, Fenn R W 1979 *Technical Report*, AFGL-TR-79-0214,

- Project 7670, Air Force Geoph Lab. Hanscom AFB, MA
[11] Kneizys F X, Shettle E P, Abreu L W, Chetwynd J H 1986 *Technical report*, AFGL-TR-88-0177, (NTIS AD A206773), Air Force Geophysics Laboratory AFGL, Hanscom AFB, MA

The sensitivity study of NO₂ vertical profile retrieval by airborne platform*

Xu Jin Xie Pin-Hua[†] Si Fu-Qi Li Ang Zhou Hai-Jin Wu Feng-Cheng
Wang Yang Liu Jian-Guo Liu Wen-Qing

(Centre of Environmental Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 26 December 2012; revised manuscript received 23 January 2013)

Abstract

The retrieval sensitivity of NO₂ profile based on airborne multi-axis observation is studied, and the influences of different wavelengths, different view angles, different surface albedos, different aerosol modes, and different altitude are evaluated by calculating the weighting function and average kernels. The results show that higher vertical resolution is obtained at 370 nm than at 500 nm for averaging kernels, more conducive to profile retrieval; not too much profile information is found in upper view angles, while more profile information is achieved in downward looking angles; surface albedos have no obvious influence on profile retrieval; high aerosol mode increases the sensitivity of profile retrieval; the averaging kernels at low flight attitude have no obvious differences in different altitudes, nor are they conducive to the profile retrieval.

Keywords: multi axis DOAS, airborne, vertical profile, sensitivity

PACS: 42.68.Ca

DOI: 10.7498/aps.62.104214

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41275038, 41275037), and The National Environmental Protection Public Welfare Industry Targeted Research Fund, China (Grant No. 201109007).

[†] Corresponding author. E-mail: phxie@aiofm.ac.cn