

· 前沿评述 ·

近地面 NO₂ 浓度卫星遥感估算问题

陈良富¹, 顾坚斌^{1,2}, 王甜甜³, 陶金花¹, 余超^{1,4}

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036; 4. 清华大学, 北京 100084)

摘要:对卫星遥感监测大气 NO₂ 的差分算法涉及的科学问题进行了综述, 包括去除大气散射和地表反射噪声影响、大气拉曼散射引起的 Ring 效应校正、不同大气成分分离和观测垂直归一化等问题。国际上通过剔除平流层 NO₂ 获得对流层柱浓度产品, 文章绕开平流层 NO₂ 获取问题, 提出了结合大气化学模式模拟的垂直廓线直接估算近地面 NO₂ 浓度技术途径, 以更好地满足环境空气质量的观测需求, 以及几个影响 NO₂ 反演精度的相关问题。

关键词:二氧化氮; 柱浓度; 拉曼散射; 大气质量因子; 差分吸收光谱算法

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1674-6732(2016)03-001-05

Scientific Problems for Ground NO₂ Concentration Estimation Using DOAS Method from Satellite Observation

CHEN Liang-fu¹ GU Jian-bing^{1,2} WANG Tian-tian³ TAO Jing-hua¹ YU Chao^{1,4}

(1. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100101, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210036, China*; 4. *Tsinghua University, Beijing 100084 China*;))

Abstract: This paper presented some scientific problems existed in ground NO₂ concentration retrieved from satellite observations using differential optical absorption spectroscopy (DOAS), including the noises caused by atmospheric aerosol scattering and land surface reflection, Ring effects resulted from atmospheric Raman scattering, separation method of different trace gases from the measurements and vertical normalization of NO₂ inclined column density etc. Generally, the NO₂ tropospheric vertical column density is the final product from satellite measurements for users over the world, but the ground NO₂ concentration is the most concerned by air quality monitoring and public health, so in this manuscript we put forward the ground NO₂ concentration estimation based on the combination of vertical profiles of NO₂ concentration from RAMS-CMAQ modeling and vertical column density from satellite. Finally, some other scientific issues affecting the NO₂ concentration inversed from space measurements are presented.

Key words: NO₂; Vertical column density; Raman scattering; AMF; DOAS

0 引言

二氧化氮(NO₂)是一种重要的大气痕量气体成分,是O₃、PAN等光化学污染物的重要前体物,其光化学反应会影响对流层O₃的产生;NO₂和OH基反应生成的HNO₃则是酸雨的主要成份;NO₂还直接或间接地导致辐射强迫^[1-2],影响到大气环境的质量状况和全球气候变化。卫星遥感监测手段可以实现空间覆盖的连续监测,遥感监测NO₂时空分布已经被广泛认可。

遥感技术在大气痕量气体NO₂监测中的应用

主要是利用卫星测量的光谱辐射值进行反演获得的。1995年4月搭载GOME(Global Ozone Monitoring Experiment)传感器的ERS-2(the Second European Remote Sensing Satellite)卫星的发射^[3],使得人类第一次有了全球尺度观测NO₂分布的能力^[2,4-5]。GOME采用天底观测,摆扫方式,全球

收稿日期: 2016-04-29
基金项目: “八六三”计划基金资助项目(2014AA06A500)
作者简介: 陈良富(1965—),男,研究员,博士,主要从事大气环境遥感方面的研究。

覆盖需要 45 轨, 大约 3 d^[6]。SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography) 于 2002 年 3 月 1 日搭载在 Envisat 上发射升空, SCIAMACHY 有 8 个近紫外-可见光-近红外的光谱通道, 波长范围为 220 ~ 2 400 nm, 光谱分辨率为 0.2 ~ 1.5 nm。全球覆盖在赤道地区需要 6 d。天底测量的 NO₂ 柱总量从 2002 年 8 月开始提供^[7]。

2004 年 7 月 15 日发射升空的 OMI (Ozone Monitoring Instrument) 传感器搭载在美国宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的 EOS/Aura 卫星上。主要用于大气化学成分的观测, 如 O₃、NO₂、SO₂、BrO 等。OMI 采用与 GOME、SCIAMACHY 基本相同的太阳同步轨道的天底测量方式, CCD 的曝光时间为 2 s, 对应地面沿轨长度大约 13 km; 星下点分辨率为 13 km × 24 km, 对应地面覆盖宽度大约为 2 600 km; 推扫式探测, 每行有 60 个像元, 每个像元对应地面垂直于轨道宽度从星下点的 24 km 到最边缘的 128 km。OMI 分为紫外 1、紫外 2 和可见光三个波段, 波长范围从 270 ~ 500 nm; 扫描视场角为 114°; 穿越赤道的时间在当地时间 13:40 到 13:50, 1 d 可完成全球覆盖^[8]。

GOME、SCIAMACHY、OMI 和 GOME2 的相继发射升空, 大大增加了人类对大气痕量气体监测的能力。由这些载荷探测并反演得到的 NO₂ 柱浓度产品数据被广泛应用^[3-4, 9-12]。反演获得的 NO₂ 对流层柱浓度显示了 NO₂ 的时空分布, 污染程度等^[9-10, 13]。Richter 等^[5, 14]利用 GOME 和 SCIAMACHY 产品获取了全球对流层 NO₂ 垂直柱浓度, 着重分析了美国、日本、西欧、中国等 NO₂ 变化趋势; Boersma 等^[8]利用 OMI 卫星数据提出实时反演对流层 NO₂ 浓度的算法; 张强等^[15]利用卫星遥感手段分析了中国 1996—2010 年 NO₂ 排放的变化趋势, 卫星遥感技术在监测大气污染时空演变趋势方面发挥着越来越重要的作用。

从卫星接收的太阳反射光谱中获得 NO₂ 浓度, 是利用各种气体分子在不同波段对其有不同的吸收特性来实现对各种气体定量测量的。但引起 NO₂ 的吸收带辐亮度发生改变的因素, 包括: (1) 大气分子的弹性散射和非弹性散射, 气溶胶散射与吸收, 地表反射噪声等。(2) 其中大气分子的非弹性散射又称拉曼散射, 即 Ring 效应。Ring 效应的存

在会引起 NO₂ 的低估; (3) 在 NO₂ 的吸收带中同时存在其他吸收气体的贡献问题; (4) 而且卫星大幅宽观测使星下点与边缘点像元不同观测天顶角引起了大气光程差异等问题。(5) 目前国际上普遍认可的是获得对流层柱浓度, 所以存在如何从整层柱浓度中剔除平流层 NO₂ 成为有一个关键问题, 但由于环境保护部门更加关注近地面 NO₂ 浓度。现对如何利用卫星观测技术获得近地面 NO₂ 浓度涉及的科学问题及其解决方法进行进行阐述。

1 大气散射与地表反射噪声的去除

差分吸收光谱方法 (DOAS, Differential Optical Absorption Spectroscopy) 最早由德国 Heidelberg 大学环境物理研究所的 Ulrich Platt 提出^[16]。DOAS 方法的基本原理是利用光在大气中传输时, 大气分子吸收光谱的高频特点与气溶胶散射、地表反射噪声的低频信号之间的差异来提取分子吸收信息的。DOAS 方法是由地基观测发展起来的^[17]。根据大气辐射传输理论, 一束直接太阳光的大气消光可由 Beer-Lambert 定律表示, 即波长为 λ , 强度为 $I(\lambda)$ 的一束辐射光在传播穿过某种吸收介质的无限薄层 ds 的时候有,

$$dI(\lambda) = I(\lambda) \cdot \sigma(\lambda, T) \cdot \rho(s) ds \quad (1)$$

式中: $\sigma(\lambda, T)$ ——此种吸收介质依赖于波长和温度的吸收截面; $\rho(s)$ ——物质的密度。

对公式 (1) 积分得到 Beer-Lambert 定律:

$$I(\lambda, \sigma) = I_0(\lambda) \exp[-\sigma(\lambda, T) \int \rho(s) ds] = \quad (2)$$

式中: $I_0(\lambda)$ ——入射的辐射强度, W/m^2 ; $I(\lambda, \sigma)$ ——卫星传感器测量到的经过大气消光的辐射强度, W/m^2 。

对公式 (2) 中的 $I(\lambda, \sigma)$ 和 $I_0(\lambda)$ 比值取自然对数可得到:

$$\tau = -\ln \frac{I(\lambda, \sigma)}{I_0(\lambda)} = \sigma(\lambda, T) \int \rho(s) ds \quad (3)$$

式中: τ ——光路上的光学厚度; $\int \rho(s) ds =$ SCD——光路上吸收介质的浓度, 称之为柱浓度或是斜柱浓度。

根据大气辐射传输理论, 在近紫外-可见光波段中, 不考虑发射的增强作用, Beer-Lambert 定律可用于描述大气消光过程, 分子吸收和散射, 气溶胶米散射, 即:

$$\tau = \sum_i \sigma_i(\lambda, T) \text{SCD}_i(\lambda) + \sigma_{\text{Ray}}(\lambda) \text{SCD}_{\text{Ray}}(\lambda) + \sigma_{\text{Mie}}(\lambda) \text{SCD}_{\text{Mie}}(\lambda) \quad (4)$$

式中： k ——第 i 种气体；Ray 和 Mie ——表示瑞利散射和米散射。

上式左边为总消光系数，右边第 1 项代表由所选光谱区间内各种气体吸收引起的消光部分，第 2 项是由所选光谱区间内各种气体瑞利散射引起的消光部分，第 3 项是由气溶胶米散射引起的消光。

由于米散射消光和波长成反比，而瑞利散射消光反比于波长的 4 次方，2 者均属于波长的低阶函数，即散射随波长发生缓慢变化；而气体吸收作用则随波长发生快速变化。所以，DOAS 方法的着眼点就是在此基础上将大气消光系数分解为 2 部分，随波长快速变化的部分和随波长缓慢变化的部分。

$$\tau = \sum_i \sigma'_i(\lambda) \text{SCD}_i(\lambda) + \sum_{k=0} b_k \lambda^k \quad (5)$$

式中： k ——多项式阶数 $k \leq -4$ ； b ——系数。
利用不同大气成分特有的指纹式的吸收截面，对式(5)进行线性最小二乘拟合可得到各种不同气体成分的倾斜气柱浓度。

2 大气拉曼散射 Ring 效应校正

在紫外-可见光谱波段，对来自太阳入射光谱经地表反射和大气散射辐射值，会受到太阳夫琅禾费结构和大气 Ring 效应的影响^[18]。即太阳光谱中含有多条由太阳表面大气中钾、钙等成分的消光效应影响产生的暗线结构；但太阳辐射进入地球大气层中，大气中的 N₂、O₂ 分子对太阳光的转动拉曼散射导致夫琅禾费线变短，这个结果可以近似地认为是对夫琅禾费线的填充。这将影响对大气痕量气体柱浓度的准确测量与反演，需要准确去除太阳夫琅禾费结构和 Ring 效应的干扰。

从上世纪 60 年代至今开展了一系列研究探讨形成大气 Ring 效应的原因。研究表明气溶胶散射、转动拉曼散射 (Rotational Raman Scattering, RRS)、地表反射、瑞利 - 布里渊散射与转动拉曼散射共同作用等，是 Ring 效应产生的原因^[19]。目前比较一致观点认为大气中的 N₂、O₂ 分子产生的转动拉曼散射是产生 Ring 效应的根本原因^[20-24]。

用 DOAS 算法反演大气痕量气体柱浓度时，一般把 Ring 效应当作伪吸收的过程参与运算^[25]。具体表示为计算 Ring 伪吸收截面，即 Ring 光谱。

使用较为广泛的是^[22]使用的方法，分别计算 N₂ 分子和 O₂ 分子的转动拉曼散射截面，并与太阳光谱卷积得到 Ring 光谱，计算相对快捷简便，即：

$$\tau = \sum_i \text{SCD}_i(\lambda) \cdot \sigma_i + \text{SCD}_{\text{Ring}} \cdot \sigma_{\text{Ring}} + P(\lambda) \quad (6)$$

式中： $P(\lambda)$ ——低阶多项式，表示差分慢变部分； SCD_{Ring} ——差分 Ring 伪吸收浓度； σ_{Ring} ——差分 Ring 伪吸收截面。通过最小二乘拟合可以求出光程上的痕量气体柱浓度。

3 大气成分分离与观测垂直归一化

由于同一光谱区间存在不同大气痕量气体的吸收谱线，如何区分不同痕量气体的吸收贡献，获得各中气体的浓度是关键的问题。目前差分吸收算法的解决办法，是利用实验室测量获得的各种痕量气体的吸收截面，和观测光谱建立方程进行矩阵求逆获得^[5,10]。痕量气体的吸收截面可在实验室通过不同温控条件下对标气进行吸收截面测量。

大气质量因子 AMF (Air Mass Factor, AMF)^[26]是气体测量斜柱浓度 SCD 与垂直柱浓度 VCD (Vertical Column Density) 的比值，或者是气体测量倾斜光学厚度 τ_s 与垂直光学厚度 τ_v 的比值^[20,27-28]。大气质量因子 AMF 研究是由地基测^[20,27-28]，发展到卫星遥感测量^[8,10,29]。

斜柱浓度、垂直柱浓度、倾斜光学厚度和垂直光学厚度都是指的测量值，不是几何光路上的柱浓度或光学厚度，因此反演大气痕量气体浓度时必须考虑大气散射的情况。最初的 AMF 计算是利用基于观测几何的经验公式，没有考虑大气散射，但大气散射对近紫外-可见光太阳光谱反演痕量气体浓度非常重要^[26]。实际应用中，当天顶角较小，大气散射作用允许忽略的时候，AMF 可以用光路上的观测几何关系近似计算，即经验公式如下所示：

$$\text{AMF} \approx \text{AMF}_G = \cos^{-1} \theta_s + \cos^{-1} \theta_v \quad (7)$$

式中： AMF_G ——几何关系近似表示的大气质量因子； θ_s ——太阳天顶角； θ_v ——卫星观测的天顶角。

后续相关研究表示反演痕量气体浓度时计算大气质量因子应该考虑散射因素，仅仅利用光路的几何关系近似计算大气质量因子是不精确的。考虑在一定的大气条件下，假设大气中存在目标痕量气体和不存在目标痕量气体两种模式，利用辐射传

输方程分别计算大气层顶的卫星模拟辐亮度值, 然后利用公式(8)计算:

$$AMF_{\lambda} = \frac{\ln(I_{nogas}(\lambda)) - \ln(I_{total}(\lambda))}{\tau_{vert}(\lambda)} \quad (8)$$

式中: AMF_{λ} ——气体在波长 λ 处的大气质量因子; $I_{nogas}(\lambda)$ ——除目标气体外包含所有吸收气体的卫星模拟辐亮度; $I_{total}(\lambda)$ ——包含所有吸收气体的模拟卫星辐亮度; $\ln(I_{nogas}(\lambda)) - \ln(I_{total}(\lambda))$ ——倾斜光路上目标气体的光学厚度; $\tau_{vert}(\lambda)$ ——目标气体在垂直光路上的光学厚度, 通过对先验目标气体廓线的积分得到。

大气质量因子是波长的函数, 一般采用拟合窗的中间点波长的大气质量因子进行柱总量的转换^[30]。文献[28]首次提出这种方法后, 无论是在单次散射还是多次散射的辐射传输模式中都被广泛使用, 如 discrete ordinates radiative transfer (DISORT), GOMETRAN, AMFTRAN, integral equation method radiative transfer models, 以及后向蒙特卡罗辐射传输模型都是用这种方法计算大气质量因子。

4 近地面浓度获取

采用基于 DOAS 方法反演大气痕量气体 NO₂ 整层和对流层柱浓度已广泛认可。但人为活动影响更多的发生在大气近地面, 利用卫星遥感数据无法直接反演近地面 NO₂ 浓度。尝试使用多尺度空气质量模式系统 RAMS - CMAQ 模式模拟的中国地区 NO₂ 对流层柱浓度垂直分布廓线, 结合卫星观测的柱浓度来获取大气近地面 NO₂ 浓度。其中, RAMS - CMAQ 模式主要由区域大气模拟系统 (Regional Atmospheric Modeling System, RAMS) 和多尺度空气质量模拟系统 (Community Multi-scale Air Quality Modeling system, CMAQ) 两部分耦合而成, 前者为后者提供模拟区域的三维气象场。CMAQ 的模式顶高度为 23 km, 分为间距不同的 14 层, 以便详细的探讨大气污染物在对流层内的演变过程。使用 RAMS - CMAQ 模式模拟的中国地区 NO₂ 垂直廓线分布信息来获取卫星观测大气近地面 NO₂ 浓度, 即:

$$S_{sat} = \frac{S_{cmap}}{\Omega_{cmaq}} \times \Omega_{sat} \quad (9)$$

式中: S_{sat} ——卫星观测大气近地面 NO₂ 浓度; S_{cmap} ——CMAQ 模式模拟的近地面 NO₂ 浓度; Ω_{cmaq} ——卫星观测 NO₂ 柱浓度; Ω_{sat} ——CMAQ 模

式模拟的 NO₂ 柱浓度。

获取 OMI 卫星近地面 NO₂ 浓度, 需要将 RAMS - CMAQ 模拟的 NO₂ 大气对流层垂直分布廓线资料 (空间分辨率为 16 或 64 km) 和 OMI 原始资料反演获得的 NO₂ 对流层垂直柱浓度资料 (空间分辨率为 13 km × 24 km) 采样到相同的网格尺度。

对卫星反演结果的验证是卫星观测不可或缺一步。卫星结果的验证中存在时空尺度分异问题, 即卫星反演获得的地面资料是一网格空间的平均浓度值, 而地面站点观测资料仅有点尺度范围, 2 者存在空间上的分异。由于人为排放源在空间上分布是非均匀的, 所以验证工作需要选择地面排放更均一, 或更多地面观测站点的区域。

5 结语

介绍了基于遥感观测反演大气痕量气体 NO₂ 近地面浓度的问题与解决途径。包括用于消除大气弹性散射、气溶胶消光和地表反射率噪声的 DOAS 算法; 大气 Ring 效应的概念和几种计算差分 Ring 效应光谱截面的方法; 利用辐射传输模式软件 SCIATRAN 建立了大气质量因子 AMF 查找表, 获得 NO₂ 整层柱浓度的观测角度归一化方法; 并在此基础上, 结合多尺度空气质量模式 RAMS - CMAQ 计算近地面 NO₂ 浓度的方法。这一方法的提出, 可以回避平流层 NO₂ 分子数估算带来的误差。

当然除了上述卫星观测反演 NO₂ 的关键科学问题外, 还存在以下几个问题值得探讨: (1) 云辐射噪声会给 NO₂ 的估算带来影响。所以, 如何利用 NO₂ 大气观测中其它载荷对云覆盖比例以及云物理参量的观测结果, 解决估算像元中云的影响, 是卫星遥感精细化发展需要关注问题。(2) 大气温度对痕量气体吸收截面具有一定程度的影响, 由于反演中所用的气体吸收截面是在标准大气中测试获得。所以考虑卫星观测时的大气温度变化和差异对 NO₂ 近地面浓度的影响, 也将是今后需要考虑的因素。目前利用卫星高光谱信息, 选择与温度变化相对不敏感的波段进行反演; (3) 大气质量因子 AMF 需要更加精确计算, 因为中国地区重霾天气条件下气溶胶多次散射对 AMF 的影响, 是我国痕量气体卫星遥感观测需要考虑的重要科学问题。

[参考文献]

[1] SOLOMON S. Stratospheric Ozone Depletion: A Review of Con-

- cepts and History[J]. *Rev Geophys*, 1999, 37(3): 275 – 316.
- [2] VELDERS G J M, GRANIER C, PORTMANN R W, et al. Global tropospheric NO₂ column distributions: Comparing 3-D model calculations with GOME measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 12643 – 12660.
- [3] BURROWS J P, WEBER M, BUCHWITZ M, et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission concept and first scientific results[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56: 151 – 175.
- [4] MARTIN R V, CHANCE K, JACOB D J, et al. An improved retrieval of tropospheric nitrogen dioxide from GOME[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D20): 4437.
- [5] RICHTER A, WITTROCK F, WEBER M, et al. GOME observations of stratospheric trace gas distributions during the splitting vortex event in the Antarctic winter of 2002. Part I: Measurements[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 62(3): 778 – 785.
- [6] MARTIN R V, JACOB D J, CHANCE K, et al. Global inventory of nitrogen oxide emissions constrained by space-based observations of NO₂ columns[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D17): 4537 – 4548.
- [7] BOVENSMANN H, BURROWS J P, BUCHWITZ M, et al. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56: 127 – 150.
- [8] BOERSMA, K F, ESKES H J, VEEFKIND J P, et al. Near-real time retrieval of tropospheric NO₂ from OMI[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7: 2013 – 2128.
- [9] LEUE C, WENIG M, WAGNER T, et al. Quantitative analysis of NO_x emissions from Global Ozone Monitoring Experiment satellite image sequences[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 5493 – 5505.
- [10] RICHTER A, BURROWS J P. Retrieval of tropospheric NO₂ from GOME measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2002, 29(11): 1673 – 1683.
- [11] EDWARDS, D P, LAMARQUE J-F, ATTIE J-L, et al. Tropospheric ozone over the tropical Atlantic: a satellite perspective[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D8): 4237.
- [12] SCHAUB D, WEISS A K, KAISER J W, et al. A transboundary transport episode of nitrogen dioxide as observed from GOME and its impact in the Alpine region[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5: 23 – 37.
- [13] BEIRLE S, PLATT U, WENIG M, et al. Weekly cycle of NO₂ by GOME measurements: A signature of anthropogenic sources[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, 3: 2225 – 2232.
- [14] RICHTER A, BURROWS J P, NUSS H, et al. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. *Nature*, 2005(437): 129 – 132.
- [15] ZHANG Q, GENG G, WANG S, et al. Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996 – 2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57: 2857 – 2864.
- [16] PLATT U, PERNER D, PATZ H. Simultaneous measurement of atmospheric CH₂O, O₃ and NO₂ by differential optical absorption[J]. *Geophys Res*, 1979, 84(C10): 6329 – 6335.
- [17] PLATT U. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) // *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques*[J]. *Chemical Analysis Series*, 1994, 127: 27 – 84.
- [18] GRAINGER J R, RING J. Anomalous Fraunhofer line profiles. [J]. *Nature*, 1962, 193: 762.
- [19] SIORIS C. The Filling in of Absorption Lines in Sky Spectra due to Rotational Raman Scattering, Doctor Dissertation[D]. Toronto: York University, 2001.
- [20] SOLOMON S, SCHMELTEKOPF A L, SANDERS R. W. On the interpretation of zenith sky absorption measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 8311 – 8319.
- [21] FISH D J, JONES R L. Rotational Raman scattering and the Ring effect in zenith-sky spectra[J]. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 811 – 814.
- [22] CHANCE K, SPURR R J D. Ring effect studies: Rayleigh scattering, including molecular parameters for rotational Raman scattering, and the Fraunhofer spectrum[J]. *Appl Opt*, 1997, 36: 5224 – 5230.
- [23] VOUNTAS M, ROZANOV V, BURROWS J P. Ring effect: impact of rotational raman scattering on radiative transfer in earth's atmosphere[J]. *J Quant Spectrosc Radiat. Transfer*, 1998, 60: 943 – 961.
- [24] SIORIS C, EVANS W F J. Filling in of Fraunhofer and gas-absorption lines in sky spectra as caused by rotational Raman scattering[J]. *Appl Opt*, 1999, 38: 2706 – 2713.
- [25] CHANCE K. OMI Algorithm theoretical basis document (Volume IV): OMI Trace gas algorithms[R]. ATBD – OMI – 04, Version 2.0, 2002.
- [26] PALMER P I, JACOB D J, CHANCE K, et al. Air mass factor formulation for spectroscopic measurements from satellites: Application to formaldehyde retrievals from GOME[J]. *Geophys Res*, 2001, 106(14): 539 – 550.
- [27] NOXON, J F. Nitrogen dioxide in the stratosphere and troposphere measured by ground-based absorption spectroscopy[J]. *Science*, 1975, 189: 547 – 549.
- [28] PERLISKI L M, SOLOMON S. On the evaluation of air mass factors for atmospheric near-ultraviolet and visible absorption spectroscopy[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 10363 – 10374.
- [29] SIERK B, RICHTER A, ROZANOV A, et al. Retrieval and monitoring of atmospheric trace gas concentrations in nadir and limb geometry using the space-borne SCIAMACHY instrument[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 120(1 – 3): 65 – 77.
- [30] HILD L, RICHTER A, ROZANOV V, et al. Air mass factor calculations for GOME measurements of lightning-produced NO₂, Adv[J]. *Space Res*, 2002, 29(11): 1685 – 1690.