

林伟立, 徐晓斌. 卫星遥感 NO<sub>2</sub> 资料地面验证对中国大气本底观测的潜在需求[J]. 气象, 2011, 37(5): 571-575.

# 卫星遥感 NO<sub>2</sub> 资料地面验证对中国大气本底观测的潜在需求<sup>\* 1</sup>

林伟立<sup>1,2</sup> 徐晓斌<sup>1</sup>

1 中国气象科学研究院大气成分观测与服务研究中心, 中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081

2 西藏高原大气环境科学研究所, 拉萨 850000

**提 要:** 受各种因素的影响, 卫星反演大气成分的数据质量存在一定的误差和不确定性, 系统和全面的验证工作是获得准确可靠的卫星数据的一个重要组成部分。卫星观测资料的验证主要涉及反演算法中所用的输入参数和卫星反演产品的直接验证这两个部分的内容。本工作以对流层 NO<sub>2</sub> 卫星资料验证的需求出发, 对当前中国大气本底站的观测现状进行评述, 讨论了大气本底观测站在卫星资料地面试验中可能起到的作用和不足之处。区域本底站近地面准确的观测结果和良好的区域代表性有利于对卫星资料的验证, 加强地基上对大气物理和化学特性的垂直探测有助于对卫星资料进行准确和定量验证。因此, 有必要加强对有利于验证工作的新技术和仪器设备预先进行技术储备。

**关键词:** 卫星资料, 地面验证, 大气本底站, NO<sub>2</sub>, 遥感

## The Demands on Atmosphere Background Observations in China to Meet the Validations of NO<sub>2</sub> Satellite Remote Sensing Data

LIN Weili<sup>1,2</sup> XU Xiaobin<sup>1</sup>

1 Key Laboratory for Atmospheric Chemistry, Centre for Atmosphere Watch and Services of CMA,  
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science, Lhasa 850000

**Abstract:** Affected by various factors, there exist certain errors and uncertainties during the retrieval of atmospheric compositions from satellite data. Systematic and comprehensive validation work is very important to obtain accurate and reliable satellite data. The validation of satellite data is mainly related to two parts of contents; one is the validation of the input parameters used in the retrieval algorithm, and the other is the direct validation of satellite retrieval products. In the work, we firstly reviewed the validation demands when obtaining the tropospheric NO<sub>2</sub> satellite data and the current status of the atmosphere background observation stations in China, and then discussed the role of the latter might play in satellite data validation. Accurate surface observations at regional background stations and their good regional representations are beneficial for the validation of satellite data. The capability of vertical measurements of atmospheric physical and chemical properties can strengthen the ability for the accurate and quantified validation of satellite data. Therefore, we strongly recommend that some new technologies and technical equipments which can help the validation work should reserve in advance.

**Key words:** satellite data, validation, atmosphere background station, NO<sub>2</sub>, remote sensing

\* 由风云三号气象卫星遥感开发与应用项目“大气成分遥感开发应用”和国家重点基础研究发展计划项目(2005CB422202)共同资助  
2010年5月4日收稿; 2010年12月8日收修定稿  
第一作者: 林伟立, 从事大气化学相关方向研究. Email: linwl@cams.cma.gov.cn

## 引 言

大气中的一些痕量气体成分,如  $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $HCHO$ 、 $SO_2$  等,与大气光化学、二次气溶胶形成、温室效应、酸雨和大气氧化能力等重要的大气环境与气候变化问题紧密关联<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代以来,卫星环境遥感应应用领域越来越广,越来越多的大气成分能够从卫星上进行观测<sup>[2-5]</sup>。与有限的地面或地基遥感观测相比,卫星观测具有空间覆盖范围广,能够测量柱总量和反演垂直廓线,可以获得常规观测手段无法获得的重要参数等优势。卫星遥感资料在研究大气中微量气体的长期变化趋势<sup>[6-7]</sup>,观测重大污染事件的发展过程<sup>[8]</sup>,辅助源排放清单验证<sup>[9]</sup>等方面具有独特的作用。由于卫星遥感产品的数据质量受到多方面的影响,需要从多方面进行验证,包括定性和定量的验证,这样才能获得准确可靠的数据<sup>[10]</sup>。

我国目前利用卫星对大气成分的遥感观测尚处于起步阶段,大量的相关工作需要开展预研<sup>[2,11]</sup>。本文以卫星遥感对流层  $NO_2$  的验证为例,总结验证的需求并回顾当今世界上地基验证卫星观测  $NO_2$  资料的方法和手段,结合我国大气本底观测的现状,探讨大气本底观测站在今后卫星资料地基验证中的潜在价值以及相关技术和观测手段储备的必要性,为今后我国发展大气成分卫星遥感观测的地基验证工作提供参考。

## 1 卫星反演 $NO_2$ 的误差和不确定性

基于紫外 DOAS 技术测量大气  $NO_2$  含量的卫星传感器有欧洲空间总局 (ESA) 1995 年发射的 Global Ozone Monitoring Experiment (GOME), 2002 年发射的 Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY), 以及 GOME-2 和美国国家航空航天局 (NASA) 在 2004 年发射的 Ozone Monitoring Instrument (OMI) 传感器。卫星反演  $NO_2$  的产品受时空分辨率的影响,如 GOME 的空间分辨率是  $320\text{ km} \times 40\text{ km}$ ,约 3 天覆盖全球,而 GOME-2 的空间分辨率是  $40\text{ km} \times 40\text{ km}$ ;SCIAMACHY 的空间分辨率是  $60\text{ km} \times 30\text{ km}$ ,约要 6 天覆盖全球;OMI 的空间分辨率是  $13\text{ km} \times 24\text{ km}$ ,扫描全球需要约 1 天的时间。

$NO_2$  卫星产品资料已经得到了众多的应用。

尽管如此,卫星遥感  $NO_2$  产品的数据质量仍然受到多方面的影响<sup>[10, 12-13]</sup>。其影响因素首先来自光谱测量上,由于地面反射光谱与太阳照射光谱不是同时测量,光谱拟合存在近似,且受热和电磁信号的不同影响,反射光谱与照射光谱测量上存在明显的噪音。其次,大气质量因子的计算是基于假设(如  $NO_2$  垂直廓线的基本形状等),但至今未能与真实数据进行比对。此外,云、地表反照率、痕量气体的垂直廓线、平流层  $NO_2$  柱浓度,以及气溶胶廓线等的不确定性,使得从卫星数据准确、定量反演地面确定网格的对流层  $NO_2$  柱浓度面临着极大的挑战,反演结果存在着很大的不确定性。

(1) 最大的不确定性在于云的确。云会挡住卫星的视角,从而无法探测近地面的  $NO_2$  含量。反演  $NO_2$  时对云的存在十分敏感,甚至小的云量(5%~20%)就有较大的影响。因此,对云特性(至少是云高和云量)进行高质量的观测,是定量反演所必须的。

(2) 地表反照率直接影响了边界层  $NO_2$  反演的敏感性。因此,相关光谱范围内高质量的地表反照率分布图是十分必要的。

(3)  $NO_2$  的垂直廓线的时空分布具有极大的可变性。 $NO_2$  的垂直廓线受排放源的分布,边界层高度及其稳定性、干湿沉降,以及对流混合程度和长距离输送的影响。在源排放区, $NO_2$  的浓度在近地面出现极值,而在源区的下游地区, $NO_2$  的极值会出现在距地面更高的高度。

(4) 平流层  $NO_2$  和对流层的  $NO_2$  对总的  $NO_2$  柱浓度的贡献是可比的。因此,平流层的背景浓度必须准确定量才能获得对流层的  $NO_2$  柱浓度。大气的动力学过程通常会显著地影响平流层示踪剂的含量,从而影响平流层与对流层的分离。

(5) 另外,气溶胶的影响也是产生不确定性的来源。气溶胶层厚薄会影响辐射场和近地面  $NO_2$  反演的灵敏度。

## 2 $NO_2$ 卫星观测的地基验证

由于卫星资料在反演过程中存在着众多的不确定性,因此,需要系统的、综合的验证才能提高卫星产品的数据质量。

### 2.1 $NO_2$ 卫星观测验证的基本思路

$NO_2$  卫星观测资料的验证主要涉及 2 个部分的内容,一个是反演算法中所用的输入参数的验证,

一个是卫星反演产品的验证。反演过程中所用的输入参数有:

(1) 预先假定的输入数据和参数。包括 NO<sub>2</sub>、温度和压力的垂直廓线,地表反照率,气溶胶和云对光的散射和吸收。

(2) 气溶胶的处理。气溶胶的类型、光学厚度和垂直分布。

(3) 云的影响。云的影响是复杂的,至今未能很好解决。

NO<sub>2</sub> 反演产品的验证包括:

(1) 卫星数据与“真实”观测数据的比较,包括定性和定量的比较。

(2) 确定在不同情况下卫星数据的不确定性。

(3) 确定时空变化特征。

理想的“真实”值是利用气球探空或飞机观测来实际获得对流层 NO<sub>2</sub> 浓度的垂直廓线。但目前这些观测是非常稀少的。对于小型飞机或小的气球来说,很难有合适的、轻便的、准确的仪器可以搭载来进行可靠观测。而大型气球或飞机航测不但成本高,也很难与卫星的扫描观测很好地匹配起来。

## 2.2 当前验证的手段和方法

地基或空基遥感观测的仪器如 Multi-axis DOAS、球载 DOAS、直接太阳光谱观测(PANDO-RA)、激光雷达和 Brewer 光谱仪可获得相对准确的 NO<sub>2</sub> 浓度<sup>[14-20]</sup>,它们的观测结果常用于卫星观测资料的验证。通过对地基 Brewer 观测和 OMI 卫星观测的 NO<sub>2</sub> 月均值柱浓度结果进行比较,二者在季节变化上存在着良好的一致性,且反演的结果在量级上也非常接近<sup>[12]</sup>。此外,基于排放源和地面观测的模式计算也可对对流层的 NO<sub>2</sub> 进行估算,也可用于卫星数据的比对和验证<sup>[21-24]</sup>,但其验证结果也受到排放源、气象场及化学过程等方面不确定性的影响。在 2005 年 6 月 22—23 日 Aura 验证实验中得到了一个较好的例子,其模式模拟结果与卫星观测的结果相匹配的<sup>[25]</sup>。

尽管有很多成功的例子可以对卫星观测的 NO<sub>2</sub> 的结果进行比较成功的验证,但是卫星反演 NO<sub>2</sub> 的验证工作受到多种因素的影响,因而十分复杂。最大的影响因素在于卫星观测的结果是在其扫描视角范围内的有效平均,其空间分辨率通常在 10<sup>2</sup> km<sup>2</sup> 的尺度(如 OMI 的最小视角为 340 km<sup>2</sup>),而地基的观测是在一个单点的观测<sup>[12]</sup>。对流层 NO<sub>2</sub> 的分布是极其不均匀的,在几十米至几千米范围内都可能有显著的变化,偏远或农村地区的浓度通

常小于 10<sup>15</sup> cm<sup>2</sup>,而在城市或工业化地区则常常大于 10<sup>16</sup> cm<sup>2</sup>。在同一个地方同一个时段,地基 MAX-DOAS 在不同方向的扫描得到的结果也往往不同,这表明了对流层 NO<sub>2</sub> 分布的不均一性<sup>[20]</sup>。因此,相对于卫星观测的平均效果而言,在不同的地方观测,其对卫星观测结果的验证很可能是高估或低估的。地基上不同仪器对对流层 NO<sub>2</sub> 的观测结果,在绝对值上也通常不完全一致,尽管临近仪器之间观测结果的相关性都很好<sup>[12]</sup>。总体而言,当前验证的数据仍然偏少且时间跨度太短,影响统计的结论。

因此,当前大多数地基观测与卫星反演结果的比对是相当定性的。为了表征卫星反演的对流层 NO<sub>2</sub> 浓度在不同区域条件下的不确定度,需要在不同的区域进行系统的观测,包括在清洁的和污染的地区,距离污染源远近不同的区域,在不同类型云存在的情况下,在不同的地形条件,以及不同的季节里进行必要的观测。模式可用来评价卫星所反演的 NO<sub>2</sub> 资料在反映大气 NO<sub>2</sub> 浓度的时空变化特征、趋势及季节平均值上的好坏。相关的测量应该有助于优化 NO<sub>2</sub> 的反演技术,而不仅仅是直接的比较,因此测量也要针对反演中所用假设的正确性进行检验,包括平流层的贡献、地表反照率、对流层廓线的形状、气溶胶和云等。

## 2.3 地面 NO<sub>2</sub> 在线观测数据在比对验证中的作用及其不足之处

在一定程度上,地面 NO<sub>2</sub> 的观测结果能够反映对流层 NO<sub>2</sub> 的变化情况。这些情况通常是边界层内 NO<sub>2</sub> 充分混合,以及边界层内的 NO<sub>2</sub> 对对流层中 NO<sub>2</sub> 的贡献起决定作用,例如 Brinksmas 等<sup>[20]</sup> 模式计算的结果表明,就全年平均而言,大于 80% 的 NO<sub>2</sub> 积聚在最底层 1000 m 内。另外,在假定对流层内 NO<sub>2</sub> 的廓线没有大的变动下,地面观测的结果也会与对流层 NO<sub>2</sub> 浓度有很好的相关性。例如,Max-DOAS 测量的 NO<sub>2</sub> 柱浓度与近地面观测的 NO<sub>2</sub> 浓度值之间存在着良好的相关性 ( $R = 0.63$ )<sup>[20]</sup>,这结果正反映了地面 NO<sub>2</sub> 的观测结果与对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度之间的正相关关系。Boersma<sup>[26]</sup> 等把 OMI 和 SCIAMACHY 过境扫描时间对应的地面 NO<sub>2</sub> 观测浓度乘以所观测到的边界层高度,得到 NO<sub>2</sub> 的积分浓度,然后与卫星 NO<sub>2</sub> 柱浓度进行比对验证,可获得良好的相关性。因此,近地面的观测结果对卫星资料的验证是有意义的。

地面观测是评价和验证基于排放源资料的模式结果准确性的一个重要指标。Brinksmas 等<sup>[20]</sup> 用

MOZART-2 模式输出的  $\text{NO}_2$  垂直廓线把地面观测的结果按比例积分成为对流层  $\text{NO}_2$  垂直柱浓度,并与卫星反演的结果进行比对,发现在无云的条件下,二者相当一致。在缺少实际测量廓线的情况下,不同高度的实际观测结果是评价利用激光雷达等方法获取的垂直廓线是否准确的一个重要手段<sup>[20]</sup>。

但是,地面  $\text{NO}_2$  在线观测也存在不足之处,主要在于:

商业化仪器利用钼转化炉测量大气中的  $\text{NO}_2$  有一个很大的缺点就是其他氧化性物质如硝酸( $\text{HNO}_3$ ),过氧乙酰硝酸酯(PAN)和有机硝酸盐也能够部分被转化为直接测量的  $\text{NO}_2$  进而形成干扰。因此, $\text{NO}_2$  常常被高估,特别是对那些光化学老化的空气团<sup>[18]</sup>。单点的观测往往很难与代表较大的空间平均的卫星数据直接比对,除非这个点的空间代表性非常好。在一个区域内,多个点的观测的平均值的比对效果往往更加有效。例如,Cappellani 等<sup>[27]</sup>就发现地面不同站点的近地面  $\text{NO}_2$  浓度平均结果与 Brewer 观测反演的  $\text{NO}_2$  柱浓度有很好的一致性。

反过来而言,在一些区域背景站点,它不受局地人为排放直接影响,但能够接收到特定区域内污染气团输送的影响,其观测结果在一定程度上能够代表该区域大气的平均混合状态,其地面观测的结果若与卫星观测的结果有很好的相关性,则可表明该站点具有良好的区域代表性,是一个验证卫星产品的理想站点。由于仪器检测限等原因,受区域污染更为显著的背景站点的观测往往更容易和更准确,卫星在这些区域的观测误差也相对小。

### 3 大气本底观测在卫星遥感 $\text{NO}_2$ 资料中的作用和前景

大气本底观测是在具有全球和区域代表性的站点对与气候变化和空气质量相关的大气化学成分和大气物理特性进行可靠、全面和准确的观测,为科学界提供预测将来大气状态和评估环境政策所需的数据。这种趋势性观测目标对观测项目的质量保证和质量控制具有严格的要求<sup>[28]</sup>。近地面大气成分如  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CO}$  等实际观测数据,以及地基 Brewer 光谱仪反演的  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  等柱浓度资料可以直接用来与卫星资料进行比对。观测的数据也可用于模式结果的验证工作,改进模式模拟效果,后者得到的柱浓度可用于卫星资料的比对和验证。一些大气物理特性的观测,如气溶胶光学厚度等观

测结果也可应用在卫星资料反演参数的输入上。然而,目前本底站的观测主要集中在近地面的观测,Brewer 光谱仪(龙凤山、临安和瓦里关大气本底站用的是 MK II 型 Brewer 光谱仪)主要是为了测量臭氧的柱浓度,限于仪器的光谱分辨率(0.6 nm)和光谱观测范围(290 nm 到 325 nm),以及大气中  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  浓度相对于  $\text{O}_3$  总量而言要低两个数量级,浓度越低测量的相对误差越大,因此对  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的反演尚存在较大的误差,Brewer 光谱仪反演的  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  产品也需要进一步验证。可用于标准传递的 Brewer MK III 光谱仪是双光栅光谱仪,能够有效地抑制了杂散光对测量的影响,提高测量光谱的精度,提高反演产品的准确性;Brewer MK III 和 MK IV 型光谱仪都扩展了观测的光谱宽度(286.5~363 nm),进而能够在更合适的波段反演  $\text{NO}_2$  的柱浓度,但光谱分辨率仍为 0.6 nm。

在前文提到,理想的“真实”值是实际观测的垂直廓线浓度,而对垂直廓线的探测正是本底站观测所缺乏的。因此,有必要装备必要的探空或可垂直观测设备,对大气成分和大气物理特性进行廓线观测,以获得中国地区上空的真实参数,为卫星资料反演和验证提供数据基础。此外,应注重一些地基柱浓度和垂直廓线观测仪器,如 MAX-DOAS 的装备,从而进行技术贮备。

具有良好的空间(区域)代表性也是大气本底站的一个优势。通过对临安、上甸子、龙凤山和固城四个站点地面  $\text{NO}_2$  数据与 OMI 100 km 范围内的对流层  $\text{NO}_2$  柱浓度格点平均值(月均值)进行比对分析,二者存在着较好的相关性。特别是在临安和固城地区,OMI 数据与地面数据的相关系数  $R^2$  分别可达到 0.73 和 0.64。这些结果表明,大气本底站的观测结果具有较好的空间代表性,在较大的卫星扫描视角范围(空间分辨率通常在  $10^2 \text{ km}^2$  的尺度)内的有效平均值的比对上具有一定的优势。

## 4 结 论

受各方面因素的影响,通过卫星遥感获得的大气  $\text{NO}_2$  等产品的数据质量存在较大的不确定性。只有通过实际的观测资料来验证才能评估卫星数据的可靠性和不确定性。卫星观测资料的验证主要涉及两个部分的内容,一个是反演算法中所用的输入参数的验证,一个是卫星反演产品的验证。验证工作是系统的、具有挑战性的工作,需要多方面的准备工作。同时需要在清洁地区、轻度污染地区、污染地

区及不同下垫面区域进行全面验证。

卫星观测有些只能取得整个柱总量,有些能区分平流层和对流层柱含量,有少数能得到垂直廓线。但是,不管是哪一种情况,仅通过近地面浓度观测来验证是远远不够的。需要结合地基柱总量和廓线观测、地面浓度观测、航测、模式等多种手段来实现。具有较好区域代表性的大气本底站的近地面观测资料和地基遥感资料可以在一度程度上用于对卫星资料的验证,在这些站点上进一步开展大气成分和大气物理特性的垂直廓线的观测将有助于获得中国地区上空真实的参数和大气成分浓度值。一些能够有利于卫星资料验证工作的新技术和仪器设备有必要预先进行技术贮备。

## 参考文献

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [2] 张兴赢,张鹏,方宗义,等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象, 2007, 33(7):3-14.
- [3] Fishman J, Balok A E, Vukovich F M. Observing tropospheric trace gases from space: Recent advances and future capabilities [J]. Adv Space Res, 2002, 29(11):1625-1630.
- [4] Borrell P, Burrows J P, Richter A, et al. New directions: New developments in satellite capabilities for probing the chemistry of the troposphere[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 2567-2570.
- [5] Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Turquety S, et al. Trace gas measurements from infrared satellite for chemistry and climate applications [J]. Atmos Chem Phys, 2003, 3:1495-1508.
- [6] 张兴赢,张鹏,张艳,等. 近十年中国对流层 NO<sub>2</sub> 变化趋势、时空分布特征及其来源解析[J]. 中国科学 D, 2007, 37(10):1-8.
- [7] Richter A, Burrows J P, Hendrik N, et al. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. Nature, 2005, 437:129-132.
- [8] Martin R V. Satellite remote sensing of surface air quality[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42:7823-7843.
- [9] Konovalov I B, Beekmann M, Burrows J P, et al. Satellite measurement based estimates of decadal changes in European nitrogen oxides emissions[J]. Atmos Chem Phys, 2008, 8:2623-2641.
- [10] Boersma K F, Eskes H J, Brinkma E J. Error analysis for tropospheric NO<sub>2</sub> retrieval from space[J]. J Geophys Res, 2004, 109, D04311, doi:10.1029/2003JD003962.
- [11] 张兴赢,张鹏,廖宏,等. 地基傅立叶红外高光谱遥感观测大气成分平台建设及其反演技术研究[J]. 气象, 2009, 35(1): 9-17.
- [12] Celarier E A, Brinkma E J, Gleason J F, et al. Validation of ozone monitoring instrument nitrogen dioxide columns[J]. J Geophys Res, 2008, 113, D15S15, doi:10.1029/2007JD008908.
- [13] Richter A, Burrows J P. Tropospheric NO<sub>2</sub> from GOME measurements[J]. Advances in Space Research, 2002, 29(11): 1673-1683.
- [14] Petritoli A, Bonasoni P, Giovanelli G, et al. First comparison between ground-based and satellite-borne measurements of tropospheric nitrogen dioxide in the Po Basin [J]. J Geophys Res, 2004, 109, D15307, doi:10.1029/2004JD004547.
- [15] Wang P, Richter A, Bruns M, et al. Measurements of tropospheric NO<sub>2</sub> with an airborne multi-axis DOAS instrument [J]. Atmos Chem Phys, 2005, 5: 337-343.
- [16] Heue K P, Richter A, Wagner T, et al. Validation of SCIAMACHY tropospheric NO<sub>2</sub>-columns with MAXDOAS measurements [J]. Atmos Chem Phys, 2005, 5: 1039-1051.
- [17] Bruns M, Buehler S A, Burrows J P, et al. NO<sub>2</sub> profile retrieval using airborne multi axis UV-visible skylight absorption measurements over central Europe [J]. Atmos Chem Phys, 2006, 6: 3049-3058.
- [18] Ordóñez C, Richter A, Steinbacher M, et al. Comparison of 7 years of satellite-borne and ground-based tropospheric NO<sub>2</sub> measurements around Milan, Italy [J]. J Geophys Res, 2006, 111, D05310, doi:10.1029/2005JD006305.
- [19] Fix A, Ehret G, Flentje H, et al. SCIAMACHY validation by aircraft remote sensing: Design, execution, and first measurement results of the SCIA-VALUE mission [J]. Atmos Chem Phys, 2008, 5: 1273-1289.
- [20] Brinkma E J, Pinardi G, Volten H, et al. The 2005 and 2006 DANDELIONS NO<sub>2</sub> and aerosol intercomparison campaigns [J]. J Geophys Res, 2008, 113, D16S46, doi:10.1029/2007JD008808.
- [21] Ma J, Richter A, Burrows J P, et al. Comparison of model-simulated tropospheric NO<sub>2</sub> over China with GOME-satellite data [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 593-604.
- [22] Konovalov I B, Beekmann M, Vautard R, et al. Comparison and evaluation of modelled and GOME measurement derived tropospheric NO<sub>2</sub> columns over Western and Eastern Europe [J]. Atmos Chem Phys, 2005, 5: 169-190.
- [23] Lauer A, Dameris M, Richter A, et al. Tropospheric NO<sub>2</sub> columns: A comparison between model and retrieved data from GOME measurements [J]. Atmos Chem Phys, 2002, 2: 67-78.
- [24] Velders G J M, Granier C, Portmann R W, et al. Global tropospheric NO<sub>2</sub> column distributions: Comparing 3-D model calculations with GOME measurements [J]. J Geophys Res, 2001, D106: 12643-12660.
- [25] Fishman J, Bowman K W, Burrows J P, et al. Remote sensing of tropospheric pollution from space [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89: 805-821.
- [26] Boersma K F, Jacob D J, Trainic M, et al. Validation of urban NO<sub>2</sub> concentrations and their diurnal and seasonal variations observed from the SCIAMACHY and OMI sensors using in situ surface measurements in Israeli cities [J]. Atmos Chem Phys, 2009, 9: 3867-3879.
- [27] Cappellani E, Bielli A. Correlation between SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> measured in an atmospheric column by a brewer spectrophotometer and at ground-level by photochemical techniques [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1995, 35: 77-84.
- [28] 林伟立,徐晓斌,于大江,等. 龙凤山区域大气本底台站反应性气体观测质量控制 [J]. 气象, 2009, 35(11):93-100.