

多轴差分吸收光谱仪反演大气 NO₂ 的比对试验*

王婷¹⁾²⁾ 王普才^{1)†} 余环¹⁾ 张兴赢³⁾ 周斌⁴⁾ 司福祺⁵⁾
王珊珊⁴⁾ 白文广³⁾ 周海金⁵⁾ 赵恒⁴⁾

1) (中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

4) (复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

5) (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)

(2012年9月14日收到; 2012年10月12日收到修改稿)

为了满足卫星遥感产品地基验证平台中不同仪器观测数据一致性的要求, 2011年9月, 将3台不同设计方案、不同操作方式的多轴差分吸收光谱仪 (MAX-DOAS) 集中在中国科学院大气物理研究所香河大气探测综合试验站, 进行了近20天的同步观测测试. 并对所有仪器统一观测方位角, 分别采用相同的紫外、可见光波段的特征吸收带及吸收截面进行 NO₂ 柱浓度的反演试验. 系统的比对分析表明: 3台 MAX-DOAS 的反演误差大都保持在6%以内, 说明仪器性能良好, 比较稳定; 紫外波段的反演结果略小于可见光波段, 尤其在阴天, 这是由于两波段对分子及气溶胶散射的敏感性不同造成的; 以可见光波段的反演结果为标准, 对紫外波段的反演结果进行系统订正, 订正后的各组数据一致性非常好, 满足卫星大气成分 NO₂ 柱浓度遥感产品不同地基验证站点数据稳定、一致的要求.

关键词: MAX-DOAS, NO₂, 斜柱浓度, 比对试验

PACS: 42.68.Ca, 42.68.-w, 42.79.Qx, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.62.054206

1 引言

与采用人工光源的主动差分吸收光谱技术 (DOAS) 不同^[1,2], 被动 DOAS 是以太阳光为光源, 利用气体分子的太阳辐射特征吸收对气体进行定量测量的一种光谱探测技术^[3]. 观测紫外、可见光波段散射太阳光是最简单的日常地基遥感 NO₂ 的方法^[4], 也是验证卫星数据的有效手段. 最早, 通过观测天顶太阳散射光, 可以反演出平流层的 NO₂ 柱浓度^[5], 近十几年, 利用不同观测仰角的多轴差分吸收光谱仪 (MAX-DOAS) 可以得到对流层 NO₂ 的分布信息^[6-11]. 国外有越来越多的 MAX-DOAS 用于观测对流层 NO₂^[4]. 国内也有几家单位用 MAX-DOAS 进行对流层 NO₂ 的观测^[12-17], 但尚不存在

观测对流层 NO₂ 等微量气体的标准观测仪器. 不同的 MAX-DOAS 观测结果是否具有可比性, 能否用于卫星反演的对流层 NO₂ 柱浓度等产品的地基检验是目前大家关注的问题. 因此, 有必要把各种不同的 MAX-DOAS 放在一起进行比对试验与评价. 迄今为止, 国外已经进行过不同 DOAS 仪器反演平流层、对流层 NO₂ 的比对试验^[4,18], 而国内 DOAS 发展处于起步阶段, 相关方面的比对试验尚未进行.

目前共有3台 MAX-DOAS 参加气象行业专项“卫星反应性气体地基遥感验证研究”项目, 分别部署在北京、香河和上海进行地基对流层 NO₂ 柱浓度观测, 作为卫星大气成分遥感产品的地基比对数据来源, 承担着国外卫星大气成分遥感产品的地基

* 气象行业科研专项 (批准号: GYHY201106045-52)、国家自然科学基金 (批准号: 41175030, 40975076) 和中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDA05000000) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: pcwang@mail.iap.ac.cn

验证工作,将来还可能作为我国卫星大气成分遥感的地基验证基地.因此,把这3台不同设计、不同操作的地基观测仪器进行比对,以便了解各仪器的性能、工作状态,评价其反演结果的一致性和精度是一项非常重要的基础性研究工作.为此,选择中国科学院大气物理研究所香河(117.0°N, 39.77°E)大气探测综合试验站(简称香河站)作为比对试验场地,从2011年9月27日起开展了近20天的比对观测试验,并对观测结果进行了详细的比对分析,根据分析结果评估了各仪器的性能.

下面分步介绍这次比对试验的方案设计,各参试仪器的性能指标及其差别,以及观测数据的比对分析结果.

2 比对试验方案

2011年9月,来自比利时高空大气物理研究所(简称BIRA)、中国科学院安徽光学精密机械研究所(简称AIOFM)、复旦大学(简称Fudan)的3台不同设计、不同操作方式的MAX-DOAS在香河站进行了近20天的NO₂观测比对试验.从2011年9月27日开始至10月17日结束,除去安装调试和仪器分别撤离时间,3台仪器同时有效观测天数为16天.

为了规范比对试验,对试验方案进行了设计,主要考虑如下几点:

- 1) 参加比对的各仪器安置在同一观测平台,并且平台没有周边景物的遮挡.
- 2) 观测仪器有供电和安全保障,有放置控制计算机的室内条件,可做到连续自动运行.
- 3) 用同一方法对不同仪器采集的太阳光谱进

行NO₂柱浓度反演,以避免由于反演方法不同可能带来的偏差.

4) 通过NO₂柱浓度的比对给出关于各仪器观测结果一致性程度的结论.

另外,对观测过程和数据处理做了如下规范:

1) 仪器安装时,必须保证方位角、仰角的精确指向,因为在低仰角情况下,指向的微小偏移对观测结果影响很大.

2) 固定方位角,所有仪器都指向正北,以剔除水平方向NO₂浓度变化的影响.

3) 在半小时内完成一轮所有仰角的扫描,以减少对流层NO₂随时间变化的影响,做到准同步观测.

4) 截取相同的特征光谱段进行NO₂反演,可见光波段取455—485 nm,紫外波段取338—370 nm^[4].

5) 只选择太阳天顶角小于80°的观测,以保证足够的信噪比.

6) 参考光谱:对于观测的太阳光谱,需用观测光谱减去参考光谱以消除太阳夫琅禾费线的影响,获得气体吸收引起的光谱差异.对于对流层NO₂的观测,需用测量光谱减去包括平流层NO₂总量的参考光谱,而理想的参考光谱应是每轮不同仰角扫描时的天顶测量光谱.为了避免各仪器非严格同步观测期间对流层NO₂随时间变化的影响,选择地方时正午天顶无云时的观测光谱作为参考光谱.

香河站的观测平台满足了上述比对试验要求,试验平台位于站内3层楼的顶层,在水平方向视野开阔无阻挡.站内还有完整配套的常规气象观测、大气辐射观测和大气气溶胶特性观测,有助于观测数据的分析.

表1 光谱分析中的参数设置

大气成分种类	数据来源	特征波段/nm	
		455—485 (VIS)	330—370 (UV)
NO ₂	Vandaele 等 ^[20]	x	x
O ₄	Hermans 等 ^{a)}	x	x
O ₃	Bogumil 等 ^[21]	x	x
H ₂ O	Rothman 等 ^[22]	x	
BrO	Fleischmann 等 ^[23]		x
H ₂ CO	Meller 和 Moortgat ^[24]		x
Ring	Chance and Spurr by QDOAS tool ^[25]	x	x

a) <http://spectrolabaeronomiebe/o2htm>.

整个比对试验期间,均记录了天气实况,尤其云量状况,因为云会显著改变观测光强及预期柱浓度,而且不同的采样频次也会使这种改变更加明显^[4].借助全天空成像仪对天气状况的自动记录及每隔两小时的人工天气记录,发现试验期间经历了多种天气类型,包括晴天,阴天,雨天,雾霾及多云天气,对全面评价3台仪器观测结果的一致性非常有利.

在分析比对阶段,针对评价参试仪器的反演一致性目标,为了尽量减少由于反演方法不同带来的影响,而更加关注仪器性能不同引起的差别,我们采用统一的吸收截面及特征波段,并沿用前人的选择^[4],如表1,利用BIRA开发的QDOAS光谱处理软件进行分析^[19].

3 观测仪器

3台MAX-DOAS的结构设计和操作方式存在一些差别:BIRA设计研发的MAX-DOAS主要由3部分组成,见文献[26]:包含有两台光谱仪的恒温箱置于室内;安装有光学探头的太阳跟踪器置于室外,光谱仪和前置进光系统(光学探头)通过光纤连接;另有两台计算机用于MAX-DOAS各部件的控制和数据接收.该仪器不仅能对太阳散射光进行观测,还可以观测太阳直射光.太阳光经由长约80cm的进光筒进入望远镜,然后通过光纤传到两台光谱仪内,一台光谱仪在紫外波段(300—390 nm)工作,仪器函数接近高斯函数,半高宽约为0.4 nm,另一台在可见光波段(400—720 nm)工作,半高宽约为0.9 nm.两台光谱仪置于一个恒温箱内,用于最小化机械和光学部件的热应力.在目前的观测中,望远镜指向北方(固定方位角),包含8个不同俯仰角(2°, 4°, 6°, 8°, 10°, 12°, 15°, 30°)的离轴观测,天顶观测及太阳直射光观测,扫描一次大约需要15 min^[27].

Fudan设计研发的MAX-DOAS^[14]光谱采集范围为380—560 nm,光谱分辨率在0.5 nm左右.采用反射式望远镜接收太阳散射光以避免色散和色差,望远镜口径80 mm,为提高光谱信噪比,将光谱进行多次叠加平均,每3 min输出一条测量光谱.在一个测量周期中望远镜分别指向俯仰角3°, 6°, 10°, 18°和90°,观测相应位置的5条光谱,仪器完成一次测量周期需时约15 min.每完成一次测量周期,望远镜回到标准位置,然后再一次转到设定的测量角度,以减小望远镜运动时的累积误差^[14].

AIOFM研制的MAX-DOAS^[13]由棱镜将散射光导入接收望远镜中,然后通过光纤传输到光谱仪中分光、采集.通过电机控制棱镜旋转至不同的俯仰角,测量不同位置的太阳散射光^[13].为保证光谱采集系统工作稳定,防止由于温度变化造成的光谱漂移给反演带来的误差,系统采用温度控制系统保证光谱仪工作温度恒定^[28].可观测俯仰角5°, 10°, 20°, 30°和90°.一个测量循环在15 min以内,光谱范围为290—420 nm,光谱分辨率0.65 nm.

3台仪器的主要性能指标列于表2,其中BIRA仪器包含可见光和紫外两个波段,并且采用二维的CCD,另外对光谱仪采取恒温措施;Fudan仪器只有可见光波段,采用一维CCD,对光谱仪没有采用恒温措施;AIOFM仪器的测量范围主要在紫外波段,也采用一维CCD,但对光谱仪采用了恒温措施.最终选择3台仪器共有的10°, 90°仰角的观测光谱,在可见光波段455—485 nm,紫外波段338—370 nm分别进行反演比对.

4 观测结果比对分析

BIRA的MAX-DOAS包括紫外和可见光两个波段,AIOFM的可观测紫外波段,Fudan的可观测可见光波段,因此利用NO₂的紫外和可见光吸收波段可同时获得四种NO₂反演结果,分别称作BIRA VIS, BIRA UV, Fudan VIS, AIOFM UV.

表2 各参试MAX-DOAS的性能指标

仪器	观测范围 /nm	分辨率 /nm	探测器类型	是否控温	观测仰角 / (°)
BIRA	400—700	0.90	2D-CCD	是	2, 4, 6, 8, 10, 12 15, 30, 90
	300—390	0.40	2D-CCD		
Fudan	380—560	0.55	1D-CCD	否	3, 6, 10, 18, 90
AIOFM	290—420	0.65	1D-CCD	是	5, 10, 15, 20, 90

MAX-DOAS 观测的太阳光谱利用基于最小二乘法的 DOAS 技术进行分析^[3], 通过 QDOAS^[19] 来实现. 分析拟合得到的结果称之为差分斜柱浓度 (DSCD). 所谓 DSCD, 是指吸收气体沿散射光子有效路径的积分浓度相对于参考光谱中所包含的吸收气体浓度的差值, 即

$$\text{DSCD} = \text{SCD}_\alpha - \text{SCD}_{\text{ref}}, \quad (1)$$

其中 SCD_α 指利用仰角为 α 时的观测光谱反演得到的整层大气的吸收气体沿散射光子有效路径的积分浓度, SCD_{ref} 指参考光谱中所包含的吸收气体的积分浓度. 由于地基观测中无法获得不经过地球大气散射和吸收的太阳光谱, 因此, 无法得到整层大气的斜柱浓度. 在地基 MAX-DOAS 观测中, 一般使用正午天顶观测光谱作为参考光谱进行反演, 这种方法可以消除平流层成分的影响, 得到对流层斜柱浓度^[27].

下面将这四种反演结果在紫外、可见光波段两两进行比对.

4.1 差分斜柱浓度 DSCD 的比对

首先选取不同天气情况下 10° 仰角的 NO_2

DSCD 进行比对, 如图 1 所示. 各色误差棒代表 NO_2 DSCD 的反演误差, 红线代表可见光波段的两个结果, 蓝线代表紫外波段的两个结果. 其中 10 月 3 日为晴天, 10 月 4 日为阴天, 10 月 13 日早上有雨, 傍晚有雾, 其他时间为晴天, 10 月 14 日为晴天但有风. 可以看出 3 家仪器的观测结果具有很好的 consistency, 但不同天气情况会有所差别, 晴天时, 四种反演结果非常一致, 且误差较小; 而多云阴天时, 观测结果略微分散, 误差也比晴天时的要大, 因为云会改变观测光强及预期斜柱浓度. 另外雾霾天气时结果最差, 因为雾滴都分布在边界层内, 严重影响散射光强和光程; 下雨也会影响反演结果, 而是否有风对结果无影响, NO_2 DSCD 曲线的凸起是因为低层小范围云的影响. 大多数情况下, 可见光波段的反演结果略大于紫外波段, 尤其在阴天, 这是由于两波段对分子及气溶胶散射的敏感性不同造成的: 分子瑞利散射和粒子的米散射强度在紫外波段比可见光波段强, 散射削弱了到达仪器的太阳光子数量, 对应减小了路径上吸收气体的信号, 从而紫外波段的反演结果小于可见光波段.

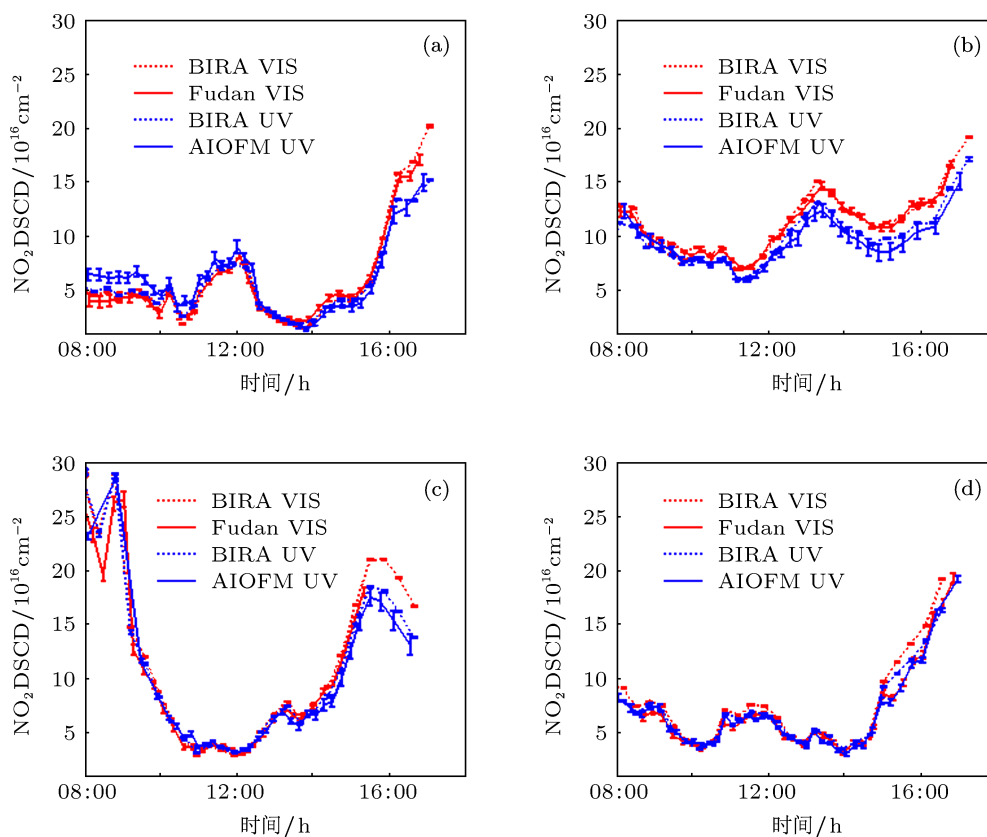


图 1 3 台 MAX-DOAS 在 10° 仰角反演的 NO_2 差分斜柱浓度及其误差的比对, 各色误差棒代表反演误差 (a) 10 月 3 日为晴天; (b) 10 月 4 日为阴天; (c) 10 月 13 日早上有雨, 傍晚有雾, 其他时间为晴天; (d) 10 月 14 日为晴天但有风

为了进一步考察各仪器工作状态是否稳定, 图 2 给出了整个试验期间 3 台仪器在 10° 仰角的 NO_2 DSCD 日平均反演误差, 可以反映仪器的测量精度. 对于 NO_2 这类吸收线强, 在特征波段受其他因素干扰较小的气体, 仪器的测量精度对观测结果影响不明显, 但对于特征吸收线相对较弱的 SO_2 , VOC 等气体, 如果仪器的测量精度不够高, 则很难进行观测反演. 图中, BIRA VIS 的反演误差最小, 不管晴天、多云还是阴天, 均保持在 1% 左右; BIRA UV 的基本上保持在 2% 以内, 且变化趋势较平缓; Fudan VIS 的反演误差约为 4%; 而 AIOFM UV 的反演误差约为 6%.

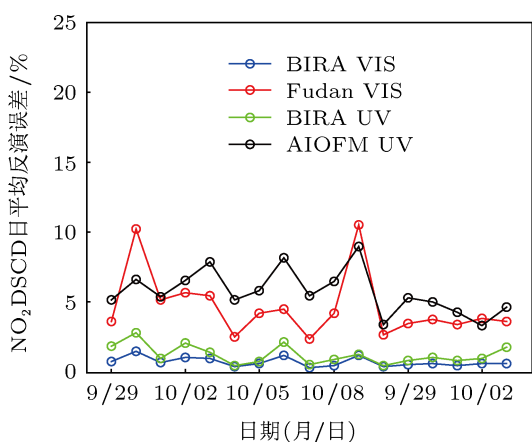


图 2 整个试验期间 3 台 MAX-DOAS 在 10° 仰角的日平均反演误差

BIRA 仪器误差最小, 主要是因为其采用二维 CCD 来记录光谱, 其中一维表达光谱波长, 另外一维表达重复采样次数, 每条可见光谱都是 100 条平均的结果, 而每条紫外光谱是 512 条平均的结果,

这样就大大降低了单次采样带来的误差, 当然仪器造价要高一些. 另外光谱仪置于温控箱内, 降低了由于温度变化引起的噪声并减小了波长的漂移. 但总的看来, 参试的各仪器反演误差都较小, 大都在 6% 以内, 说明各仪器性能良好, 比较稳定.

值得注意的是, 3 台仪器难以做到真正的同步观测, 即使同时开始一次观测, 由于扫描速度、光谱范围不同, 导致扫描一个光谱所需的时间也不同. 为了减少这种非严格意义上的同步带来的影响, 下面采用 30 min 平均的反演结果在可见光、紫外波段分别进行比对, 即 BIRA VIS 和 Fudan VIS, BIRA UV 和 AIOFM UV 分别进行比对, 如图 3 所示, 图中蓝色散点为 10° 仰角的反演结果, 而绿色实线为其最小二乘拟合线; 紫色散点为 90° 仰角的反演结果, 而紫色实线为其最小二乘拟合线. 另外两图中的黑色点线为 $Y = X$ 线. 可以发现, 无论可见光还是紫外波段, 数据点都比较集中地分布在拟合直线附近. Fudan VIS 与 BIRA VIS 的相关系数在 10° 和 90° 仰角分别为 0.97, 0.98, 10° 时二者之间存在约 12% 的系统偏差, 而 90° 时二者一致性较好; AIOFM UV 与 BIRA UV 的相关系数在 10° 和 90° 仰角分别为 0.98, 0.86, 10° 时散点比较集中, 90° 时分布则相对分散.

图 3 中可见光波段 10° 仰角的系统偏差可能来自于 Fudan MAX-DOAS 仰角指向的不精确, 用 Fudan 10° 的结果分别与 BIRA 12° , 15° 的结果进行比对, 如图 4 所示, 随着角度的增大, 拟合直线的斜率越来越接近 1, 两组数据的一致性越来越高. 而天顶观测时仰角的微小偏差对结果几乎没有影响^[4], 因此可见光波段 90° 的两组结果比较一致.

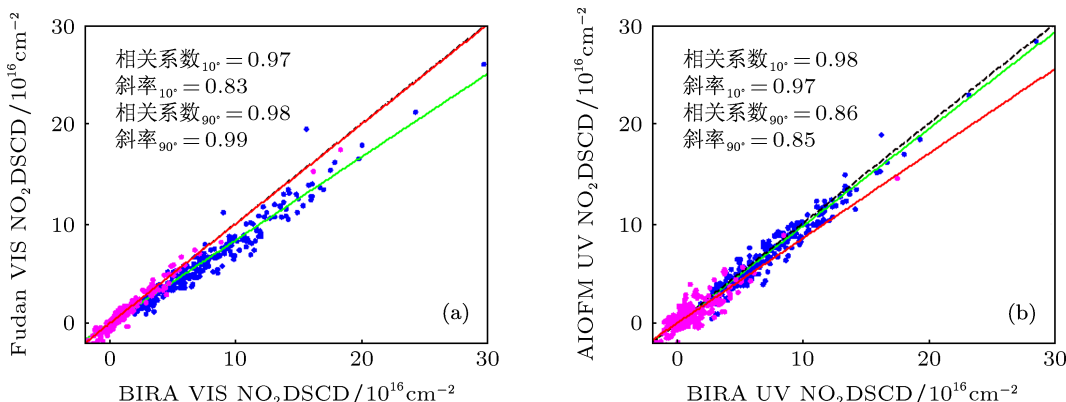


图 3 10° , 90° 仰角反演的 NO_2 DSCD 30 min 平均值在同波段的比对 (a) 为可见光波段; (b) 为紫外波段

紫外波段 90° 时散点分布相对分散, 一方面是仪器精度限制 (90° 时 DSCD 较小, 接近 AIOFM MAX-DOAS 的探测门限); 另一方面可能是由于 AIOFM MAX-DOAS 观测时, 其他方向的杂散光进入望远镜引起的. 该仪器通过棱镜折射将指定方向太阳光传递到望远镜, 然而将仪器置于室外环境中, 尤其在华北, 气溶胶浓度相对较大, 难免会在镜面附着一些灰尘颗粒, 使其他方向杂散光经过漫反射进入望远镜, 从而影响了有效光程. 但因 90° 的 DSCD 比其他仰角小很多, 即使相对分散对计算垂直柱浓度的影响也不大.

4.2 ΔDSCD 的比对

由于仪器观测的不完全同步性, 不同仪器的参考光谱会有几分钟甚至十几分钟的时差, 因此各仪器的 SCD_{ref} 不同, 而用同一观测循环内的 10° 仰角 DSCD 减去 90° 仰角 DSCD, 用 ΔDSCD 表示, 即可消除参考光谱不同带来的影响 [6]:

$$\begin{aligned} &= DSCD(10^\circ) - DSCD(90^\circ) \\ &= (SCD_{10^\circ} - SCD_{ref}) - (SCD_{90^\circ} - SCD_{ref}) \\ &= SCD_{10^\circ} - SCD_{90^\circ}. \end{aligned} \quad (2)$$

把 ΔDSCD 称为修正差分斜柱浓度. 对修正差分斜柱浓度进行比对, 以消除由于各仪器的观测参考光谱不同带来的影响.

另外, 对斜柱浓度进行比对以评估参试仪器观测结果的一致性, 比对时尽可能减少由非仪器性能相关因素带来的误差.

整个试验期间, 各仪器 ΔDSCD 在同波段的比对结果如图 5 所示, 可以看出, 无论可见光还是紫外波段, 散点都比较集中的分布在拟合直线附近, 相关系数分别为 0.95 和 0.97, 相关性较高. 可见光波段的拟合结果表明, 由于仪器指向不精确, 两组反演结果有大约 20% 的系统偏差; 而紫外波段的两组结果除了杂散光的影响使部分散点比较分散外, 多数情况下比较一致.

ΔDSCD

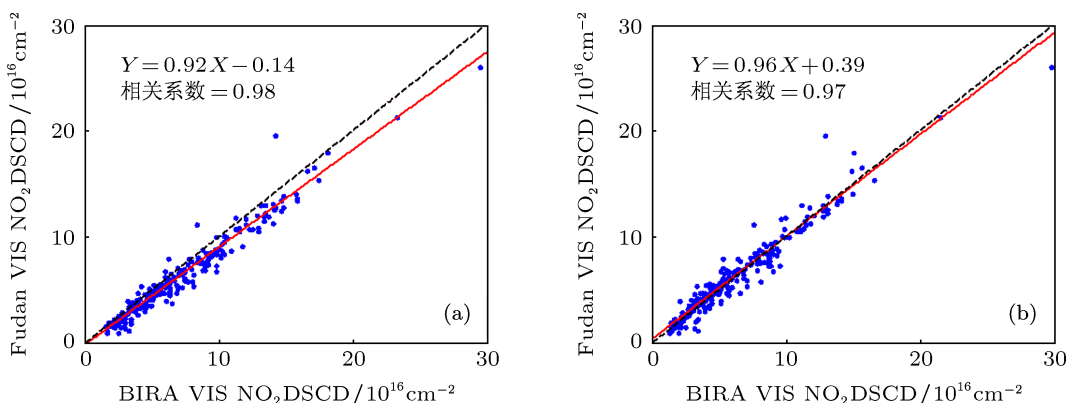


图 4 Fudan 10° 的反演结果与 BIRA 可见光波段 (a) 12° 与 (b) 15° 的反演结果比对

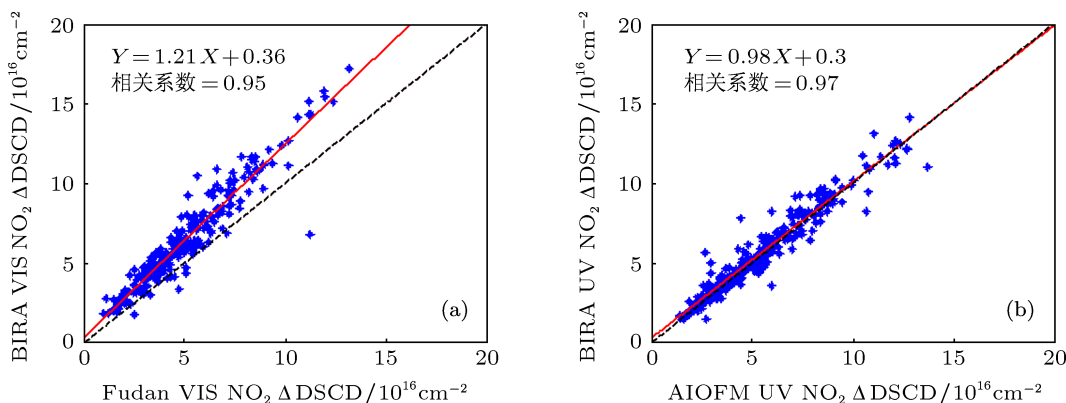


图 5 NO₂ ΔDSCD 30 min 平均值在同波段的比对 (a) 为可见光波段; (b) 为紫外波

为了更全面地比对不同仪器在同波段的反演结果,我们还分析了整个试验期间 $\text{NO}_2 \Delta \text{DSCD}$ 相对偏差的平均日变化,如图 6 所示,在可见光波段,由于仪器指向不精确, Fudan 与 BIRA 的结果全天都存在 20%左右的系统偏差,将其剔除后,偏差保持在 $\pm 10\%$ 以内;而在紫外波段,由于采光时受镜面漫反射产生的杂散光影响,偏差有明显的时段分布特征:上午 BIRA UV 偏大,下午 AIOFM UV 偏大. 但总的看来,两波段的非系统偏差都在 $\pm 10\%$ 以内,说明数据一致性较高.

4.3 各组数据与其平均值的比对

可见光、紫外波段对分子、气溶胶散射的敏感性不同,使后者的反演结果比前者偏小约 20%,如图 7 所示. 因为 BIRA 仪器曾参加过国际 MAX-DOAS 比对,性能良好,误差较小,且同时包含紫外、可见光两个波段^[4]. 因此,这里暂以 BIRA 可

见光波段的反演结果作为参照,对其他 3 组数据进行转换修订.

为了消除可见光波段由于 Fudan 仪器指向不精确带来的系统偏差,以 BIRA 仪器作为参照,对 Fudan 的数据进行修正,记为 VIS_F ,则根据图 5(a) 的拟合结果:

$$\text{VIS}_F = 1.21 \cdot \text{Fudan VIS} + 0.36.$$

另外,为了保持数据命名的一致性,参照值 BIRA VIS 另表示为

$$\text{VIS}_B = \text{BIRA VIS}.$$

再将两组紫外波段反演结果转换成等效的可见光波段的反演结果,分别记为 UV_B, UV_A . 根据图 7 的拟合结果:

$$\text{UV}_B = 1.23 \cdot \text{BIRA UV} - 0.17,$$

$$\text{UV}_A = 1.20 \cdot \text{AIOFM UV} + 0.22.$$

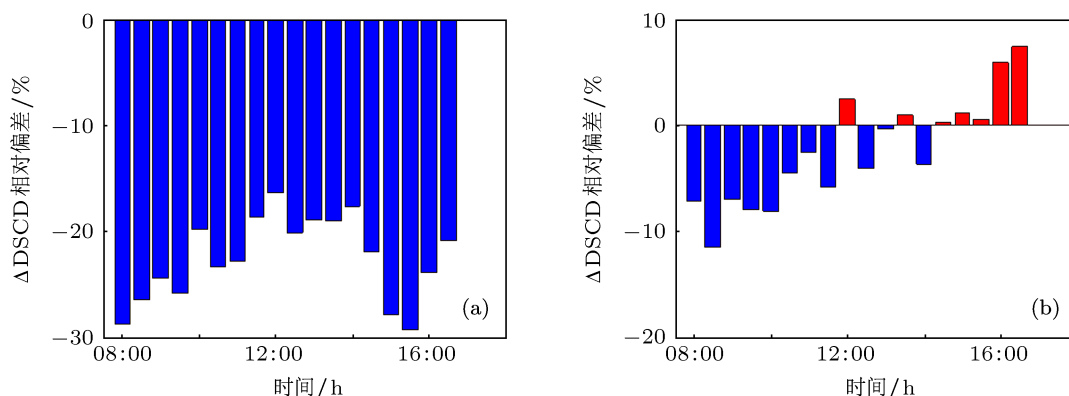


图 6 $\text{NO}_2 \Delta \text{DSCD}$ 相对偏差的平均日变化 (a) 可见光波段的相对偏差为 $(\text{Fudan VIS}-\text{BIRA VIS})/\text{BIRA VIS}$; (b) 紫外波段的相对偏差为 $(\text{AIOFM UV}-\text{BIRA UV})/\text{BIRA UV}$

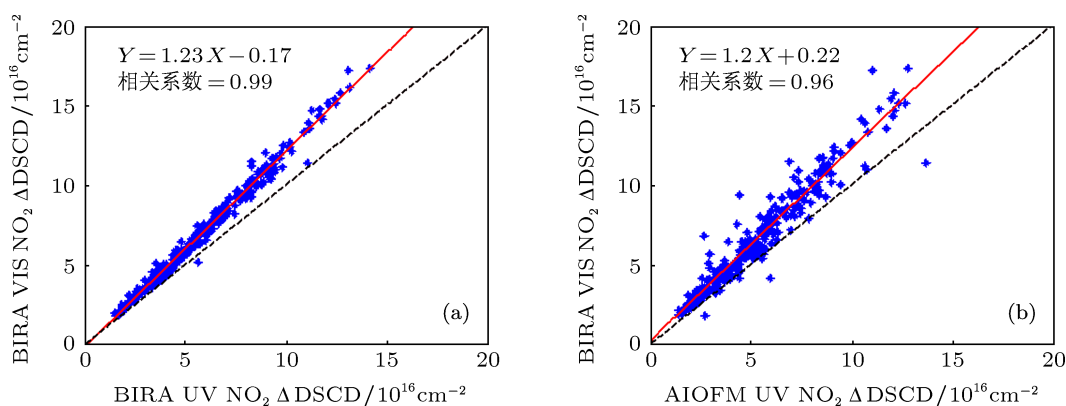


图 7 BIRA 可见光波段 $\text{NO}_2 \Delta \text{DSCD}$ 与 (a) BIRA 紫外波段; (b) AIOFM 紫外波段 $\text{NO}_2 \Delta \text{DSCD}$ 的比对

最后以转换后的四组反演结果的平均值作为参照, 与各组观测数据进行比对, 结果见图 8, 每张图上都有 306 个散点, 代表 306 个转换后的数据, 可以看出, 转换后的各组数据与参照值都有较高的一致性, 拟合直线几乎与 $Y = X$ 线重合, 散点分布集中, 且相关系数较高, 都在 0.97 以上. 说明 3 台仪器可以获得较为一致的对流层 NO_2 柱浓度观测结果, 满足卫星大气成分遥感产品地基比对数据稳定、一致的要求.

而转换后的各组数据与其平均值间的相对偏

差也说明了这一点, 如图 9 所示, 可以看出, 每组的 306 个数据中有近 300 个的相对偏差都小于 10%, 分布比较集中, 且形态上符合高斯分布, 左右对称. 相对偏差的分布情况同样表明所有仪器都比较稳定, 且观测结果比较一致^[4]. 图 10 为转换后的各组数据与其平均值的相对偏差平均日变化, 每个柱子代表整个试验期间该时段相对偏差的平均值, 可以看出, 四组观测数据偏差大多小于 5%, 全天都保持在 10% 以内, 进一步说明各仪器性能稳定, 工作状态良好, 观测结果一致性较高.

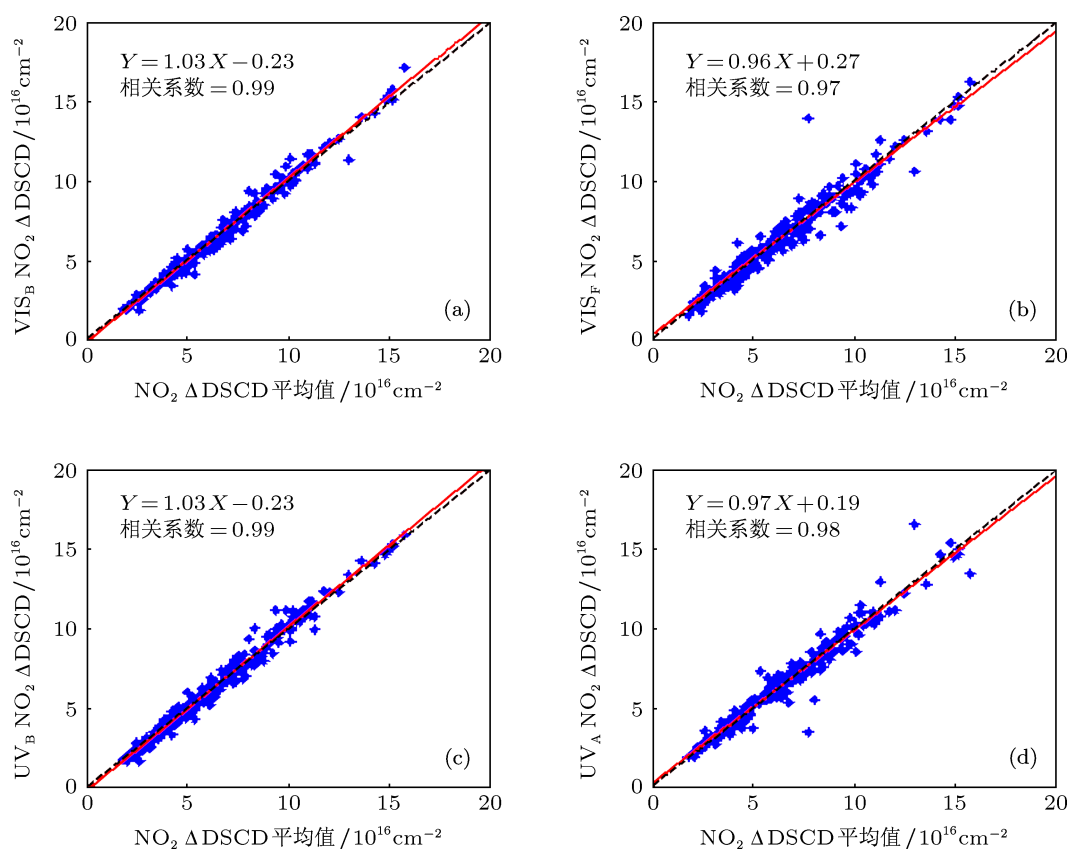


图 8 (a) VIS_B; (b) VIS_F; (c) UV_B; (d) UV_A NO_2 Δ DSCD 与其平均值比对 (图中红实线为散点的最小二乘拟合线, 黑点线为 $Y = X$ 线)

5 结论

为了满足卫星遥感产品地基验证平台中不同仪器观测数据一致性的要求, 对 3 台不同设计、不同操作方式的 MAX-DOAS 在香河站进行的近 20 天的观测与反演结果进行了比对, 得到如下结论:

1) 3 台 MAX-DOAS 的反演误差大都保持在 6% 以内, 说明各仪器性能良好, 比较稳定, 而采用二维 CCD, 可使仪器精度进一步提高, 反演误差可保持在 2% 以内;

2) 紫外波段的反演结果略小于可见光波段, 尤其在阴天, 这是由于两波段对分子及气溶胶散射的敏感性不同造成的;

3) 以 BIRA 仪器可见光波段的反演结果为标准, 对紫外波段的反演结果进行系统订正, 订正后的各组数据一致性非常好. 说明参加试验的 3 台仪器性能稳定, 工作状态良好, 可以获得较为一致的大气 NO_2 柱浓度反演结果, 满足卫星大气成分遥感产品不同地基验证站点数据稳定、一致的要求.

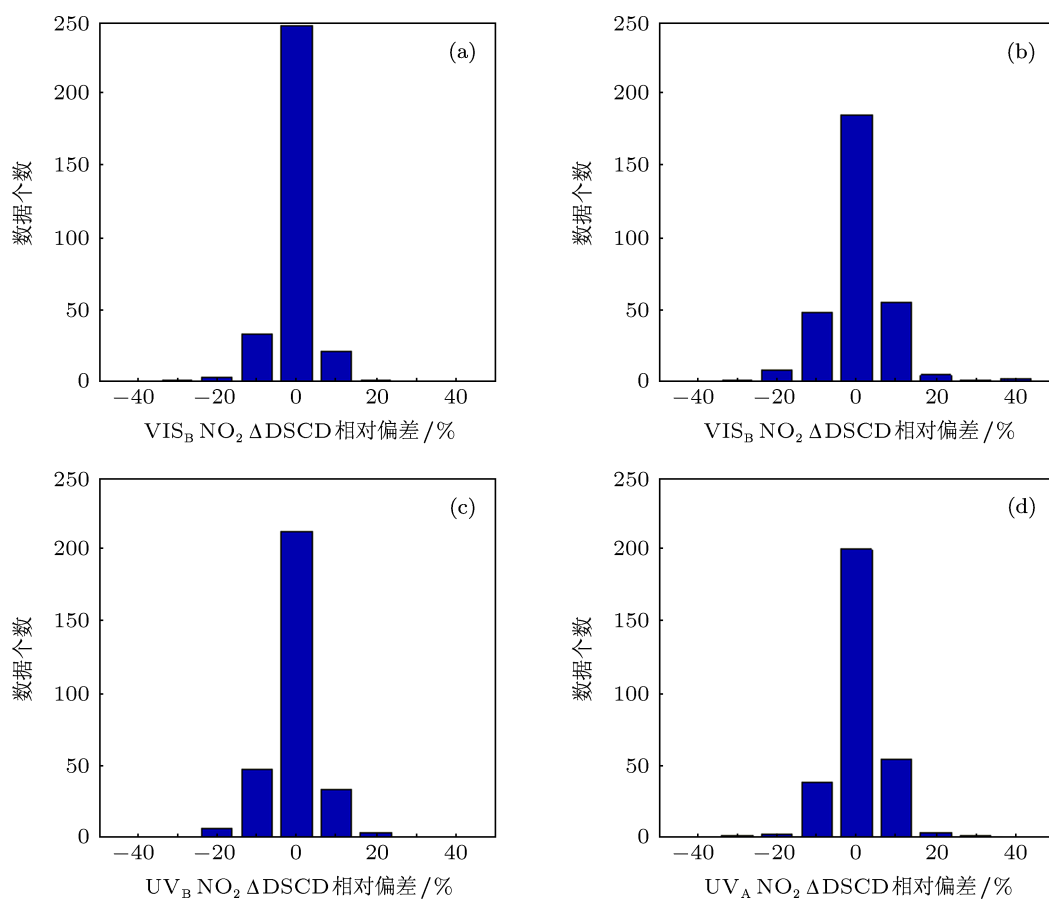


图9 (a) VIS_B; (b) VIS_F; (c) UV_B; (d) UV_A NO₂ ΔDSCD 与其平均值的相对偏差

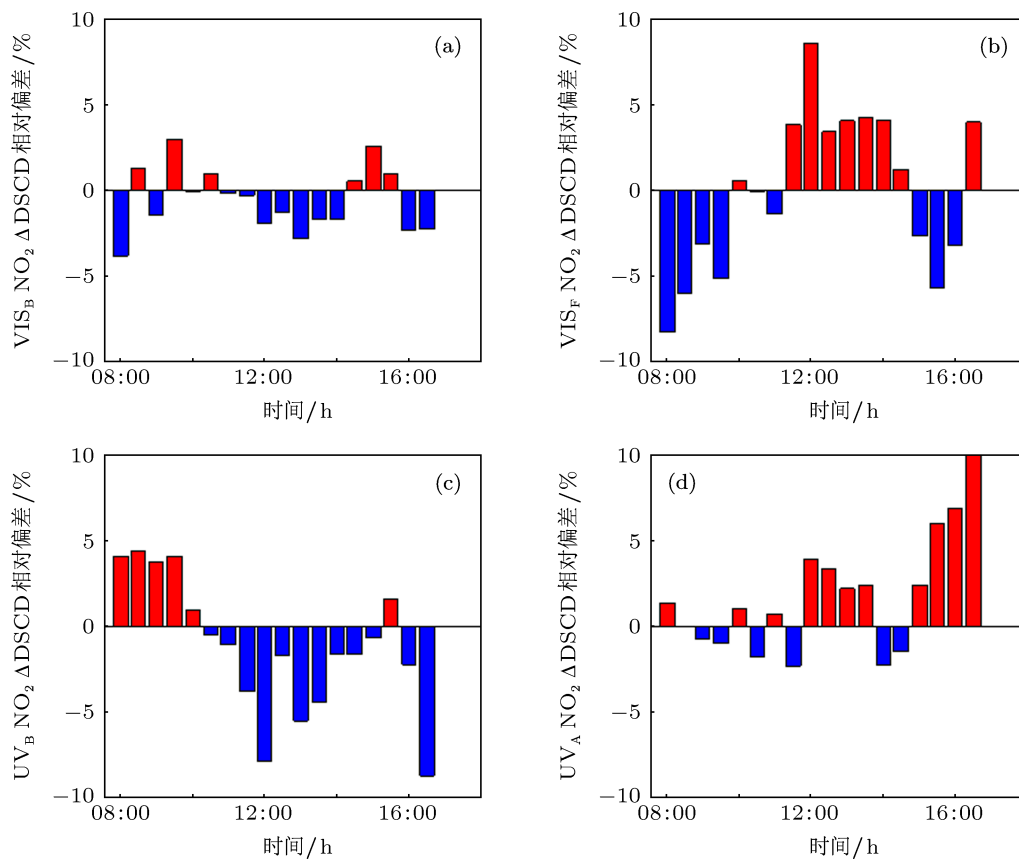


图10 转换后的各组 NO₂ ΔDSCD 与其平均值的相对偏差平均日变化 (a) VIS_B; (b) VIS_F; (c) UV_B; (d) UV_A

- [1] Zhou B, Liu W Q, Qi F, Li Z B, Chui Y J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1818 (in Chinese) [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, Zhang Y J, Dou K, Liu W Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3165 (in Chinese) [司福祺, 刘建国, 谢品华, 张玉钧, 窦科, 刘文清 2006 物理学报 **55** 3165]
- [3] Platt U, Stutz J 2008 *Differential optical absorption spectroscopy: Principles and applications* (1st Edn.) (Heidelberg: Springer Verlag) pp135–160
- [4] Roscoe H K, Roozendael M, Fayt C, Piesanie A, Abuhassan N, Adams C, Akrami M, Cede A, Chong J, Clemer K, Friess U, Ojeda M G, Goutail F, Graves R, Griesfeller A, Grossmann K, Hemerijckx G, Hendrick F, Herman J, Hermans C, Irie H, Johnston P V, Kanaya Y, Kreher K, Leigh R, Merlaud A, Mount G H, Navarro M, Oetjen H, Pazmino A, Perez C M, Peters E, Pinaridi G, Puentadura O, Richter A, Schonhardt A, Shaiganfar R, Spinei E, Strong K, Takashima H, Vlemmix T, Vreoussis M, Wagner T, Wittrock F, Yela M, Yilmaz S, Boersma F, Hains J, Kroon M, Piters A, Kim Y J 2010 *Atmos. Meas. Tech.* **3** 1629
- [5] Noxon J 1975 *Science* **189** 547
- [6] Hönninger G, Friedeburg C V, Platt U 2004 *Atmos. Chem. Phys.* **4** 231
- [7] Friedeburg C V, Pundt I, Mettendorf K U, Wagner T, Platt U 2005 *Atmos. Environ.* **39** 977
- [8] Wittrock F, Clémer K, Berkhout S, Boersma F, Brunner D, Friess U, Hay T, Irie H, Peters E, Piters A, Shaiganfar R, Sluis W, Spinei E, Vlemmix T, Wagner T, Yilmaz S, Roozendael M, Richter A, Burrows J P 2010 *American Geophysical Union Fall Meeting* San Francisco, USA, December 13–17, 2010 p219
- [9] Irie H, Takashima H, Kanaya Y, Boersma K, Gast L, Wittrock F, Brunner D, Zhou Y, Roozendael M 2011 *Atmos. Meas. Tech.* **4** 1027
- [10] Takashima H, Irie H, Kanaya Y, Syamsudin F 2012 *Atmos. Meas. Tech.* **5** 2351
- [11] Frins E, Osorio M, Casaballe N, Belsterli G, Wagner T, Platt U 2012 *Atmos. Meas. Tech.* **5** 1165
- [12] Si F Q, Xie P H, Heue K P, Liu C, Peng F M, Liu W Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6018 (in Chinese) [司福祺, 谢品华, Klaus-Peter Heue, 刘诚, 彭夫敏, 刘文清 2008 物理学报 **57** 6018]
- [13] Xu J, Xie P H, Si F Q, Dou K, Li A, Liu Y, Liu W Q 2010 *Spectrosc. Spect. Anal.* **30** 2464 (in Chinese) [徐晋, 谢品华, 司福祺, 窦科, 李昂, 刘宇, 刘文清 2010 光谱学与光谱分析 **30** 2464]
- [14] Yang S N, Wang S S, Wang Z R, Zhou B 2011 *J. Fudan Univ. Nat. Sci.* **50** 199 (in Chinese) [杨素娜, 王珊珊, 王焯如, 周斌 2011 复旦学报 (自然科学版) **50** 199]
- [15] Wang Y, Li A, Xie P H, Zeng Y, Wang R B, Chen H, Pei X, Liu J G, Liu W Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 114211
- [16] Xu J, Xie P H, Si F Q, Li A, Liu W Q 2012 *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]
- [17] Wang S, Zhou B, Wang Z, Yang S, Hao N, Valks P, Trautmann T, Chen L 2012 *J. Geophys. Res.* **117** D13305
- [18] Hofmann D, Bonasoni P, Maziere M D, Evangelisti F, Giovanelli G, Goldman A, Goutail F, Harder J, Jakoubek R, Johnston P, Kerr J, Matthews W A, McElroy T, McKenzie R, Mount G, Platt U, Pommereau J P, Sarkissian A, Simon P, Solomon S, Stutz J, Thomas A, Roozendael M, Wu E 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 16765
- [19] QDOAS Software User Manual Fayt C, Smedt I D, Letocart V, Merlaud A, Pinaridi G, Roozendael M <http://uv-vis.aeronomie.be/software/QDOAS/QDOAS-SUM-200-201203.pdf> [2012-04-01]
- [20] Vandaele A, Hermans C, Simon P, Roozendael M, Guilmot J, Carleer M, Colin R 1996 *J. Atmos. Chem.* **25** 289
- [21] Bogumil K, Orphal J, Homann T, Voigt S, Spietz P, Fleischmann O C, Vogel A, Hartmann M, Bovensmann H, Frerick J, Burrows J P 2003 *J. Photochem. Photobiol A* **159** 167
- [22] Rothman L, Barbe A, Chris D, Hitran T 2003 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **82** 5
- [23] Fleischmann O, Hartmann M, Burrows J P, Orphal J 2004 *J. Photochem. Photobiol A* **168** 117
- [24] Meller R, Moortgat G 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 7089
- [25] Chance K, Spurr R 1997 *Appl. Opt.* **36** 5224
- [26] Clémer K, Roozendael M, Fayt C, Hendrick F, Hermans C, Pinaridi G, Spurr R, Wang P, Mazière M 2010 *Atmos. Meas. Tech.* **3** 863
- [27] Yu H 2011 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [余环 2011 博士学位论文 (北京: 中国科学院大气物理研究所)]
- [28] Si F Q, Xie P H, Dou K, Zhan K, Liu Y, Xu J, Liu W Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2867 (in Chinese) [司福祺, 谢品华, 窦科, 詹铠, 刘宇, 徐晋, 刘文清 2010 物理学报 **59** 2867]

Intercomparison of slant column measurements of NO₂ by ground-based MAX-DOAS*

Wang Ting¹⁾²⁾ Wang Pu-Cai^{1)†} Yu Huan¹⁾ Zhang Xing-Ying³⁾ Zhou Bin⁴⁾
Si Fu-Qi⁵⁾ Wang Shan-Shan⁴⁾ Bai Wen-Guang³⁾ Zhou Hai-Jin⁵⁾ Zhao Heng⁴⁾

1) (Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

4) (Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

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

(Received 14 September 2012; revised manuscript received 12 October 2012)

Abstract

In September 2011, we used 3 ground-based multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) instruments of different designs and operation protocols to measure tropospheric NO₂ for about 20 days, at the Station of Atmospheric Comprehensive Observatory, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (Xianghe 117.0°N, 39.77°E). All instruments are oriented to an azimuth angle of 270° (north), in a common wavelength range and with a set of cross sections for the inversion of NO₂ slant column in visible and UV wavelength range respectively. Intercomparison of NO₂ slant columns among three MAX-DOAS is introduced. The results obtained from the different instruments are in good accordance with each other, and the correlation coefficients are all higher than 0.95, but systematical errors exist. Daily average errors of three MAX-DOAS instruments are almost below 6%, showing that the instruments work steadily and the data are cogent. The UV results are smaller than those in the visible range, especially on the overcast days, related to the wavelength dependence of Rayleigh and Mie scattering. After the correction of systematical errors, there is better consistency among different results, which indicates that the three MAX-DOAS instruments have a capability to validate the atmospheric component products of satellite.

Keywords: MAX-DOAS, NO₂, differential slant column density, intercomparison

PACS: 42.68.Ca, 42.68.–w, 42.79.Qx, 42.79.–e

DOI: 10.7498/aps.62.054206

* Project supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY201106045-52), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175030, 40975076), and the “Strategic Priority Research Program – Climate Change: Carbon Budget and Relevant Issues” of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA05000000).

† Corresponding author. E-mail: pcwang@mail.iap.ac.cn