基于静止轨道卫星监测中国大气污染物的模拟分析

陈曦¹, 蔡兆男^{1*}, 刘毅^{1,2}, 杨东旭¹

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

* 通讯作者, E-mail: caizhaonan@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2017-07-24; 收修改稿日期: 2018-03-02; 接受日期: 2018-06-25; 网络版发表日期: 2018-09-10

国家自然科学基金项目(批准号: 41375035)和国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号: 41205018)资助

摘要 针对对流层主要污染物(对流层臭氧、NO₂、SO₂及HCHO)的高分辨率、高频次监测需求, 开展了基于静止轨道卫星监测中国大气污染物的模拟观测实验. 在参考现有极轨卫星载荷的遥感监测能力和仪器参数基础上, 根据静止卫星观测模型, 利用正演辐射传输模式模拟观测光谱. 根据最优估计反演理论, 分析光谱仪的主要指标参数对各目标气体的反演敏感性和反演误差. 基于各目标气体反演精度需求, 提出光谱仪的观测波段、光谱分辨率和信噪比等关键指标参数的建议方案. 为评估选定的光谱仪参数能否满足需求, 利用大气化学输送模式模拟中国区域大气成分的三维分布, 进行中国区域的模拟反演实验. 结果表明, 针对各目标气体, 满足反演需求的实验数目均达到90%左右. 臭氧总量和平流层臭氧的反演精度可达到2%, 且各气体反演在太阳天顶角高于70°范围内仍可以获得有效数据. 因此, 我们所提出的静止卫星观测方案和仪器参数方案具有一定可行性, 为优化将来中国静止轨道卫星光谱仪仪器指标提供了理论依据和模拟工具.

关键词 静止卫星, 大气污染物, 反演误差, 光谱仪参数

1 引言

当前, 空气质量特别是区域和城市尺度的空气污染是世界各国面对的主要环境问题之一. 中国高速发展的经济和城市化进程以及随之而来的大规模能源需求造成了大气中污染物的持续增加(张兴赢等, 2007, 2008; Wang等, 2012). 对流层大气主要污染物臭氧(O₃)、二氧化硫(SO₂)和二氧化氮(NO₂)等对人体呼吸

系统、眼睛有刺激作用, 高浓度污染物甚至可引发心脏病及呼吸系统疾病. 目前的环境空气质量标准中, 参与评价的污染物为SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、CO等六项, 用于计算空气质量指数(AQI). 其中, 大气臭氧是对流层大气化学过程的核心物质之一同时也是重要的污染物, 引起广泛的关注. 大气臭氧同时具有自然源和人为源, 其动力、物理、化学过程存在着复杂的非线性机制, 目前模式还无法准确描述对流层臭氧

中文引用格式: 陈曦, 蔡兆男, 刘毅, 杨东旭. 2018. 基于静止轨道卫星监测中国大气污染物的模拟分析. 中国科学: 地球科学, 48: 1352–1362, doi: 10.1360/N072017-00249

英文引用格式: Chen X, Cai Z, Liu Y, Yang D. 2018. Monitoring air pollution in China from geostationary satellite: A synthetic study using simulated observations. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9252-4>

的变化机制(Fusco和Logan, 2003). 通过卫星传感器同时监测对流层臭氧及其前体物是研究对流层特别是边界层内大气污染物的时空变化、源汇及输送过程的必要手段(Martin, 2008). 卫星观测数据可以为大气物理过程参数化提供重要信息, 用于约束大气模式, 研究生物质燃烧、污染物洲际输送及其气候效应(Bowman等, 2009; Zhang等, 2006; Worden等, 2008).

为对对流层的主要污染气体甲醛(HCHO)、CO、O₃、NO₂和SO₂进行全球范围的观测, 通常利用低轨道卫星平台载荷在紫外、可见光和热红外波段探测(Fishman等, 2008). 例如, 美国Aura卫星搭载的对流层热辐射光谱仪(TES)及臭氧监测仪(OMI)分别在热红外和紫外波段观测对流层臭氧(Beer, 2006; Liu等, 2010). 类似的具备观测对流层污染物能力的传感器还有欧洲极轨气象卫星Metop-A的红外大气探测干涉仪(IASI)(Boynard等, 2009)和全球臭氧监测仪(GOME-2)(Cai等, 2012). 基于这些仪器观测的大气后向散射的紫外辐射或红外发射辐射, 利用直接反演方法, 可以反演对流层臭氧的信息. 类似的, HCHO、NO₂和SO₂可利用差分吸收法(Platt, 1994)、直接光谱拟合法(Chance, 1998)或非线性最优估计方法(Nowlan等, 2011), 根据卫星接收的紫外和可见光大气后向散射反演.

目前中国有部分低轨道卫星平台用于对流层污染物观测, 如环境卫星和风云3号极轨气象卫星等. 这些低轨道卫星观测数据由于其时间、空间以及垂直分辨率的限制, 在空气质量监测和对流层大气物理化学过程研究中存在一定局限性. 例如为探测边界层臭氧浓度廓线, 需要边界层内臭氧的独立信息量超过2, 精度超过10ppbv(1ppbv=1nL L⁻¹); 要将NO₂污染过程从背景浓度中区分出来需要对流层NO₂的探测精度优于1×10¹⁵ molecules cm⁻², 水平分辨率优于8km的小时数数据(Fishman等, 2012); 为解析NO₂排放源和分析其输送的动力过程(不确定度在10%以内), 需要观测数据空间分辨率为4~12km(Valin等, 2011). 与低轨道卫星相比, 静止轨道卫星可以始终“凝视”同一区域从而提高光谱仪的积分时间以提高信号强度和信噪比. 同时, 其更高的空间分辨率可以提高视场内无云像元的比例, 获得更多来自对流层的信息. 因此基于静止卫星平台的观测数据在时空分辨率上将更具优势. 近年来美韩欧等国先后启动了利用静止轨道卫星监测对流层污染物的项目(表1), 计划在2018~2020年在北美、东亚

和欧洲分别发射TEMPO、GEMS(Geostationary Environment Monitoring Spectrometer), Sentinel-4卫星. 这些静止轨道卫星都计划搭载紫外-可见光(或近红外)光谱仪用于获得高时空分辨率(3km×5km, 30min~1h)的对流层臭氧、NO₂、SO₂和HCHO数据. 参考美国TEMPO和韩国GEMS可探测对流层主要污染物的精度以及大气污染监测和大气环境气候研究的需要, 总结大气污染气体的观测精度需求如表2.

本文以现有星载紫外-可见光光谱仪观测原理为基础, 以中国空气污染监测需求为目标, 探讨在中国地区利用静止轨道卫星观测大气主要污染物: 对流层臭氧、NO₂、SO₂和HCHO的可行性. 利用基于矢量辐射传输模式、仪器参数模型、地表参数和大气参数的正演模型, 模拟中国及周边地区静止轨道卫星光谱仪在紫外、可见光和红外波段的观测光谱及观测误差. 根据模拟观测光谱反演对流层臭氧、NO₂、SO₂及HCHO光学参数, 讨论光谱仪的光谱分辨率、波段选择、信噪比等指标参数配置对对流层污染气体反演的敏感性和反演精度的影响. 基于优化的仪器指标参数进行模拟反演实验, 评估选定的仪器参数是否满足反演精度的需求, 为中国未来的星载仪器指标论证提供理论依据和模拟工具.

2 方法和模型

2.1 研究方法

在紫外-可见光吸收谱段, 对流层臭氧、NO₂、SO₂和HCHO的吸收主要集中在300~500nm. 另外臭氧在520~650nm也有较弱的宽带吸收波段. 因此我们在紫外-可见光波段选择合适的仪器指标参数以满足这些主要大气污染气体的观测精度需求(表2). 仪器指标参数主要包括: 光谱分辨率、光谱采样频率、波段选取、信噪比和地面分辨率等.

图1描述我们模拟分析实验主要流程. (1) 首先根据主要指标参数和观测方式建立静止卫星光谱仪仪器模型; (2) 在目标观测区域内利用大气化学输送模式模拟大气成分的三维分布; (3) 基于仪器模型和大气成分数据利用正演辐射传输模式模拟卫星观测光谱; (4) 建立反演模型分析仪器模型参数对反演精度的影响; (5) 基于优化的仪器指标参数进行中国区域的反演实验. 其中正演辐射传输模型和反演模型是本研究的两个核

表 1 现有静止轨道大气污染监测卫星计划的关键参数

参数	TEMPO	GEMS	Sentinel-4
光谱范围	290~690nm	300~500nm	305~500/750~775nm
光谱分辨率 (nm)	0.6	0.6	0.6/0.12
空间分辨率	8km NS×4.5km EW	7km NS×8km EW	
时间分辨率	1h	30min	1h
星上定标	太阳	太阳/定标光源	太阳/定标光源
体积(m ³)	1.1×1.1×1.1	1.1×1.2×0.9	1.0×1.2×0.9
质量(kg)	100	140	150
功率(W)	100	200/100	180
数据率(Mbps)	40	9	25
信噪比	720(305nm) 1230(423~451nm)	252(300nm)	160(305nm)
		720(320nm)	320(310nm)
		1273(325nm)	630(315nm)
		1504(357nm)	900(320nm)
		1500(430nm)	1000(350nm)
		1459(500nm)	1200(400nm)
			1400(450nm)

表 2 臭氧廓线、臭氧总量、NO₂、SO₂和HCHO的观测精度需求^{a)}

观测目标	精度
臭氧垂直分布	对流层(DU)
	20%(小时, SZA<70°)
臭氧垂直分布	平流层(DU)
	5%(小时, SZA<70°)
臭氧总量(DU)	3%(小时, SZA<70°)
NO ₂ (mol cm ⁻²)	1.0×10 ¹⁵ (小时, SZA<70°, 本底浓度)
SO ₂ (mol cm ⁻²)	1.0×10 ¹⁶ (3次/日, SZA<50°, 污染)
HCHO(mol cm ⁻²)	1.0×10 ¹⁶ (3次/日, SZA<50°, 有机VOC源)

a) Fishman等(2012), 参考美国TEMPO和韩国GEMS

心问题.

2.2 辐射传输计算模型

正演模型基于矢量线性化离散纵坐标辐射传输模式VLIDORT(Spurr, 2006), 计算大气顶向上的后向散射太阳辐射和红外发射辐射, 并模拟大气辐射的偏振分量, 即同时模拟4个斯托克斯参数(I 、 Q 、 U 、 V)及其相应的雅克比矩阵. 以大气温度、湿度、气压、相关痕量气体、地表反照率、气溶胶光学参数、云的光学参数作为大气和地表状态参量. 辐射计算包括大气的瑞利散射, 大气气体的吸收, 云和气溶胶的散射过程. 利用该模型可以模拟不同几何角度, 下垫面和大气状态下大气顶向上的散射辐射及对各状态参量的权重函数.

2.3 反演模型

反演模型采用以非线性最优估计方法(Rodgers, 2000)为基础的直接反演算法, 即在先验值($\mathbf{x}_a$)的约束下利用迭代的方法找到使观测值同模拟值差别最小的解:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + (1 - \mathbf{A})\mathbf{x}_a. \quad (1)$$

根据最优估计算法, 考虑气体吸收、地表反射、气溶胶散射等干扰造成的误差, 最后给出观测目标的反演敏感性(由信号自由度DFS描述)、反演精度和反演误差. 信号自由度可由核函数矩阵 $\mathbf{A}$ 得到(式(2)).

$$\text{DFS} = \text{trace}(\mathbf{A}), \quad (2)$$

由观测噪音造成的随机误差项和反演误差项分别由式

图 1 模拟实验流程图

(3)和(4)计算, 其中 $\mathbf{K}$ 表示权重函数(或雅克比)矩阵, $\mathbf{S}_y$ 表示观测噪声协方差矩阵, $\mathbf{S}_a$ 表示先验误差协方差矩阵, $\mathbf{G}_y$ 表示贡献矩阵, 可由 $\mathbf{S}_a$ 、 $\mathbf{S}_y$ 和 $\mathbf{K}$ 计算得到. 表3列出了反演目标气体(臭氧、 SO_2 、 NO_2 和HCHO)选用的拟合波段.

$$\mathbf{S}_m = \mathbf{G}_y \mathbf{S}_y \mathbf{G}_y^T \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \quad (4)$$

3 静止卫星观测方案和仪器参数方案

3.1 静止卫星观测几何方案

假设静止卫星位于 0° , 105°E , 观测区域覆盖中国大陆及部分沿海地区($14^\circ\text{N} \sim 54^\circ\text{N}$, $75^\circ\text{E} \sim 135^\circ\text{E}$), 由此卫星观测的视场为东西向约 9.7° , 南北向约 5.2° .

假设同TEMPO和GEMS一样, 卫星采用自东向西扫描的方式实现视场范围内空间和光谱三个维度上的

表 3 痕量气体反演的波段选择

种类	反演波段(nm)
O_3	290~340
	520~650
SO_2	305~330
NO_2	420~450
HCHO	327~356

观测. 沿南北方向狭缝能够同时观测南北视场范围内的光谱. 卫星高度、光谱仪焦距、CCD像元尺寸、扫描速度等因素共同决定了光谱仪的空间分辨率. 这里我们仅讨论GEMS和TEMPO采用的两种CCD(像元数分别为1K、2K)条件下地面分辨率(假设扫描步长为135微弧度且不变). 图2给出了静止卫星观测区域示意图. 南北方向45微弧度视场对应地面分辨率为2km. 地面像元的大小和形状随观测角度变化, 轨道位置不同也会造成地面像元的差异. 表4对比了采用不同像元数CCD阵列瞬时视场及地面分辨率. 若采用2K CCD

图 2 静止卫星拟观测区域示意图

表 4 静止卫星观测瞬时视场及典型区域地面分辨率

CCD像元数		1K×1K	2K×2K
瞬时视场(微弧)		东西135×南北90	东西135×南北45
地面分辨率	北京	5.2km×5.0km	5.2km×2.5km
	上海	5.3km×4.2km	5.3km×2.1km
	广州	5.0km×3.7km	5.0km×1.9km

则地面分辨率最高可达5.0km×1.9km, 南北方向同时观测2048个地面像元, 东西向扫描1200像元. 这一分辨率是OMI/Aura的5倍, 是GOME-2/Metop的50倍, 同TROPOMI相当. 若有需要, 可以通过合并地面像元进一步提高仪器的信噪比, 地面分辨率也会发生相应的变化. 假定完成一次扫描时间(即时间分辨率)为1h, 每天可提供约12次观测. 每个像元总积分时间为3s, 为避免探测器饱和, 可以视探测器情况进一步细分若干子像元.

最后依据观测像元位置计算太阳天顶角(SZA), 卫星观测天顶角(VZA)和相对方位角(RAA)等观测几何信息(图3). 例如北半球夏季UTC05时目标观测区域的SZA都在50°以内, 而冬季SZA主要在30°~70°范围内. 目标观测区域的VZA一般在70°以内.

3.2 光谱仪参数方案

仪器信噪比(SNR)、光谱分辨率(FWHM)和光谱

采样频率是决定光谱仪探测能力能否满足反演需求的关键指标. 光谱采样频率(f)=光谱分辨率/光谱的采样步长, 在实际应用中一般需要 $f \geq 2.7$ 才能有效去除光谱采样造成的误差. 这里我们将 f 固定为3倍, 即光谱采样间隔为光谱分辨率/3. 仪器信噪比和光谱分辨率主要依据在极端条件下满足目标痕量气体的反演精度需求(表2)来衡量. 极端条件包括: 暗地表(假设兰伯特地表, 地表反照率=0.05), 痕量气体浓度为背景值, 太阳天顶角为50°或70°, 观测天顶角为50°或70°.

3.2.1 臭氧反演的需求

大气臭氧在300~340nm波段的吸收随波长变化, 因此可以依据这一性质反演从地面到大气顶的臭氧垂直分布. 如图4b所示, 大多数光谱分辨率和信噪比能够满足臭氧总量、平流层臭氧总量和对流层臭氧总量的精度需求, 即反演误差低于探测误差要求(黑色虚线).

图3 1月(a)和7月(b)UTC05卫星观测像元太阳天顶角及1月(c)UTC01观测天顶角分布

但是为了在对流层获得超过1.0的臭氧独立信息量(图4a), 即 $DFS > 1.0$, 信噪比需要达到1000左右($FWHM = 0.6\text{nm}$). 随着光谱分辨率的降低, 需要达到更高的信噪比才能满足要求.

以上分析表明, 紫外波段吸收光谱包含对流层臭氧柱总量的信息. 但针对边界层(0~2km)臭氧, 模拟分析发现信号自由度在极高信噪比条件下才能达到0.2(图5a), 表明紫外波段对边界层臭氧的敏感性很低. 为

提高对边界层臭氧的监测能力, 美国TEMPO卫星计划增加对边界层臭氧更敏感(图5b)的可见光波段(520~650nm)(Natraj等, 2011), 预计边界层臭氧的反演精度为10ppbv. 对此我们利用模拟反演实验进行了验证, 结果表明通过结合紫外和可见光波段能够显著提高边界层臭氧的反演敏感性, 例如在 $FWHM = 0.6\text{nm}$, 只需要信噪比达到1000即可实现边界层臭氧10ppbv的探测精度(图5c).

图4 300~340nm波段臭氧反演敏感性((a)、(c)和反演误差(e))和((b)、(d)和(f))随光谱分辨率和信噪比的变化
不同颜色实线表示不同信噪比。黑色虚线表示各目标要求的反演敏感性(a)和反演精度((b); 表2)。SZA=70°, VZA=68°

图5 300~340nm(a)和520~650nm(b)波段对流层低层(0~2km)臭氧反演敏感性反演误差(c)

3.2.2 SO₂、NO₂、HCHO反演需求

图6给出了SO₂、NO₂和HCHO反演精度随信噪比和FWHM的变化. 可以看出, 在所有痕量气体中SO₂对信噪比和FWHM的要求最高: SZA=50°, FWHM=0.6时 SNR=1800才能在1h分辨率条件下满足精度要求(图6a中实线), 若合并3个地面像元或时间分辨率降为3h(如图6a虚线)SNR=1000即可满足要求, 这也是目前在轨的光谱仪如OMI、GOME-2等能够达到的能力. SZA=70°时, 同时需要很高的光谱分辨率和信噪比才能满足要求(如图6b), 这在现有技术条件下是很难实现的. 相反, NO₂和HCHO在FWHM=0.6时, 信噪比仅达到700即可在1h分辨率条件下满足各自反演精度要求(图6c和6d), 对光谱仪探测能力要求较低.

因此仪器光谱分辨率和信噪比主要依据臭氧和二氧化硫的反演需求而定. 具体方案可以有两种选择: (1) 参考OMI和GOME-2利用两个探测器分别探测300~400nm和400~500nm. 此时FWHM=0.3, SNR=800, 每个光谱维像元数1000个. 这样做通常会提高系统复杂度, 两个波段定标不一致也会影响数据的应用. (2) 在1K CCD上实现300~500nm波段200nm带宽的观测, 则FWHM=0.6nm, 采样间隔0.2nm, 此时光谱维像元数1000个, SNR=1000能够满足需求. 图7给出了方案2信噪比需求随波长的变化. 卫星观测光谱强度动态变化范围最大值约为 $1.69 \times 10^{14} \text{ photons s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, 最小值约为 $2.13 \times 10^{10} \text{ photons s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 因此, 考虑实际技术条件, 选取方案2的光谱仪参数.

图6 SO₂反演误差在SZA=50°(a)和SZA=70°(b)时及NO₂(c)、HCHO(d)反演误差随FWHM和SNR的变化
黑色实线和虚线分别表示1h和3h分辨率下对目标气体反演精度的要求

图7 300~500nm波段信噪比要求

4 大气成分模拟反演实验

基于以上光谱仪参数方案, 我们进行模拟反演实验, 利用最优估计方法和模拟的卫星观测光谱计算痕量气体的反演敏感性和反演误差, 评估选定的光谱仪参数能否满足需求. 首先利用三维大气化学输送模式 GEOS-Chem 模拟中国及周边地区 H_2O 、臭氧、 NO_2 、 SO_2 和 HCHO 等三维分布. 结合 3.1 计算的卫星观测几何建立卫星观测像元大气成分的三维分布和地表反照率等物理信息. 共计生成 16700 大气成分廓线数据. 仪器参数采用 $\text{FWHM}=0.6\text{nm}$, 采样频率 0.2nm , 信噪比 $1000(6.36 \times 10^{12} \text{photons s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1})$. 利用正演辐射传输模型模拟卫星的观测光谱及相应雅克比函数, 根据先验信息和观测误差假设, 利用反演模型针对每

图8 对流层臭氧(a)、 SO_2 (b)、平流层臭氧(c)、 HCHO (d)、臭氧总量(e)和 NO_2 (f)反演误差随SZA变化
红色实线表示反演精度及SZA的需求

表 5 静止轨道卫星观测中国大气污染物的设计方案

关键指数参数	数值
卫星位置	0°, 105°E
观测范围	14°N~54°N, 75°E~135°E
视场范围	东西9.7°, 南北5.2°
像元视场	东西135微弧, 南北90微弧
地面分辨率	5.2km×5.0km(北京)
观测波段	300~500nm
光谱分辨率	0.6nm
光谱采样频率	0.2nm
信噪比	1000 (320nm)
光谱动态范围	$1.69 \times 10^{14} \text{ photons s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, 最小值约为 $2.13 \times 10^{10} \text{ photons s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

一大气成分廓线计算目标气体的反演敏感性反演误差。

图8给出模拟区域内所有大气成分廓线实验中臭氧、SO₂、NO₂和HCHO反演误差随太阳天顶角的变化。满足反演需求的臭氧总量、平流层臭氧总量、对流层臭氧总量、SO₂、NO₂和HCHO的实验数目分别为97%、100%、100%、90%、100%和89%。臭氧总量和平流层臭氧的反演精度可以提高到2%。虽然我们将多数指标SZA上限定为70°, 但反演结果显示在更高太阳角度范围内仍可以获得有效数据。

5 结论

本文通过建立理论模型分析基于静止卫星观测中国大气污染物臭氧、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)和甲醛(HCHO)的可行性。针对静止卫星拟观测的中国及附近区域, 计算卫星观测几何信息(太阳天顶角SZA、观测天顶角VZA和相对方位角RAA等)。由于目标气体在紫外-可见光波段存在吸收光谱, 利用正演辐射传输模式结合观测几何信息模拟卫星观测光谱。根据最优估计反演算法分析仪器主要指标参数(如信噪比、光谱分辨率等)对目标气体反演敏感性和反演精度的影响。参考美国和韩国静止卫星计划TEMPO和GEMS, 根据对目标污染气体的观测精度需求, 提出光谱仪的观测波段、光谱分辨率、信噪比等关键指标参数的建议方案。基于此优化的仪器指标参数, 利用三维大气化学输送模式GEOS-Chem模拟中国及周边地区H₂O、臭氧、NO₂、SO₂和HCHO三维分布, 进行中国

区域的模拟反演实验。结果表明, 满足各目标气体反演需求的实验比例均达到90%左右, 且在更高太阳角度范围内仍可以获得有效反演数据。综上所述得到静止轨道卫星观测大气污染物的设计方案(基于1K CCD)如下表5。此设计方案为中国未来基于静止卫星观测大气污染物计划提供重要的研究基础。

参考文献

- 张兴赢, 张鹏, 张艳, 李晓静, 邱红. 2007. 近10年中国对流层NO₂的变化趋势、时空分布特征及其来源解析. 中国科学: 地球科学, 37: 1409–1416
- 张兴赢, van Geffen J, 张鹏, 廖宏. 2008. 卫星遥感监测中国区域对流层二氧化硫的时空分布及其变化趋势研究. 见: 中国气象学会2008年年会大气环境监测、预报与污染物控制分会论文集
- Beer R. 2006. TES on the Aura mission: Scientific objectives, measurements, and analysis overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 44: 1102–1105
- Bowman K W, Jones D B A, Logan J A, Worden H, Boersma F, Chang R, Kulawik S, Osterman G, Hamer P, Worden J. 2009. The zonal structure of tropical O₃ and CO as observed by the tropospheric emission Spectrometer in November 2004—Part 2: Impact of surface emissions on O₃ and its precursors. *Atmos Chem Phys*, 9: 3563–3582
- Boynard A, Clerbaux C, Coheur P F, Hurtmans D, Turquety S, George M, Hadji-Lazaro J, Keim C, Meyer-Arnek J. 2009. Measurements of total and tropospheric ozone from IASI: Comparison with correlative satellite, ground-based and ozonesonde observations. *Atmos Chem Phys*, 9: 6255–6271
- Cai Z, Liu Y, Liu X, Chance K, Nowlan C R, Lang R, Munro R,

- Suleiman R. 2012. Characterization and correction of Global Ozone Monitoring Experiment 2 ultraviolet measurements and application to ozone profile retrievals. *J Geophys Res*, 117: D07305
- Chance K. 1998. Analysis of BrO measurements from the global ozone monitoring experiment. *Geophys Res Lett*, 25: 3335–3338
- Fishman J, Bowman K W, Burrows J P, Richter A, Chance K V, Edwards D P, Martin R V, Morris G A, Pierce R B, Ziemke J R, Al-Saadi J A, Creilson J K, Schaack T K, Thompson A M. 2008. Remote sensing of tropospheric pollution from space. *Bull Amer Meteorol Soc*, 89: 805–822
- Fishman J, Iraci L T, Al-Saadi J, Chance K, Chavez F, Chin M, Coble P, Davis C, DiGiacomo P M, Edwards D, Eldering A, Goes J, Herman J, Hu C, Jacob D J, Jordan C, Kawa S R, Key R, Liu X, Lohrenz S, Mannino A, Natraj V, Neil D, Neu J, Newchurch M, Pickering K, Salisbury J, Sosik H, Subramaniam A, Tzortziou M, Wang J, Wang M. 2012. The United States' next generation of atmospheric composition and coastal ecosystem measurements: NASA's geostationary coastal and air pollution events (GEO-CAPE) mission. *Bull Amer Meteorol Soc*, 93: 1547–1566
- Fusco A C, Logan J A. 2003. Analysis of 1970–1995 trends in tropospheric ozone at Northern Hemisphere midlatitudes with the GEOS-CHEM model. *J Geophys Res*, 108: 4449
- Liu X, Bhartia P K, Chance K, Spurr R J D, Kurosu T P. 2010. Ozone profile retrievals from the ozone monitoring instrument. *Atmos Chem Phys*, 10: 2521–2537
- Martin R V. 2008. Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmos Environ*, 42: 7823–7843
- Natraj V, Liu X, Kulawik S, Chance K, Chatfield R, Edwards D P, Eldering A, Francis G, Kurosu T, Pickering K, Spurr R, Worden H. 2011. Multi-spectral sensitivity studies for the retrieval of tropospheric and lowermost tropospheric ozone from simulated clear-sky GEO-CAPE measurements. *Atmos Environ*, 45: 7151–7165
- Nowlan C R, Liu X, Chance K, Cai Z, Kurosu T P, Lee C, Martin R V. 2011. Retrievals of sulfur dioxide from the global ozone monitoring experiment 2 (GOME-2) using an optimal estimation approach: Algorithm and initial validation. *J Geophys Res*, 116: D18301
- Platt U. 1994. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS). *Chem Anal Series*, 127: 27–83
- Rodgers C D. 2000. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. Singapore: World Scientific Publishing Co
- Spurr R J D. 2006. VLIDORT: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media. *J Quant Spectrosc Ra*, 102: 316–342
- Wang Y, Konopka P, Liu Y, Chen H, Müller R, Plöger F, Riese M, Cai Z, Lü D. 2012. Tropospheric ozone trend over Beijing from 2002–2010: Ozone sonde measurements and modeling analysis. *Atmos Chem Phys*, 12: 8389–8399
- Worden H M, Bowman K W, Worden J R, Eldering A, Beer R. 2008. Satellite measurements of the clear-sky greenhouse effect from tropospheric ozone. *Nat Geosci*, 1: 305–308
- Valin L C, Russell A R, Hudman R C, Cohen R C. 2011. Effects of model resolution on the interpretation of satellite NO₂ observations. *Atmos Chem Phys*, 11: 11647–11655
- Zhang L, Jacob D J, Bowman K W, Logan J A, Turquety S, Hudman R C, Li Q, Beer R, Worden H M, Worden J R, Rinsland C P, Kulawik S S, Lampel M C, Shephard M W, Fisher B M, Eldering A, Avery M A. 2006. Ozone-CO correlations determined by the TES satellite instrument in continental outflow regions. *Geophys Res Lett*, 33: L18804

(责任编辑: 王体健)