

杨东旭, 刘毅, 蔡兆男, 等. 2016. 基于 GOSAT 反演的中国地区二氧化碳浓度时空分布研究 [J]. 大气科学, 40 (3): 541–550. Yang Dongxu, Liu Yi, Cai Zhaonan, et al. 2016. The spatial and temporal distribution of carbon dioxide over China based on GOSAT observations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 541–550, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.14121.

基于 GOSAT 反演的中国地区二氧化碳 浓度时空分布研究

杨东旭¹ 刘毅¹ 蔡兆男¹ 邓剑波²

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 湖南省气象科学研究所, 长沙 410118

摘 要 卫星遥感监测大气二氧化碳柱平均干空气体积混合比(XCO_2)是实现碳源汇全球监测的最有效手段, 本文对国际上 4 种应用 GOSAT 卫星观测的短波红外反演算法进行了介绍和结果分析。首先对于 4 种反演产品的有效数据量的分析表明: 现有单一反演产品还不足以支撑 XCO_2 时空分布研究。其次利用集合平均方法, 综合使用 4 种反演产品研究了 2010 年中国地区 XCO_2 时空分布特征, 结果表明: XCO_2 呈现显著的地理分布和季节变化, 不同地区季节变化趋势基本一致, 均在春季达到最高值、夏季达到最低值, 多数地区全年高于 380 ppm ($\times 10^{-6}$); 在地理分布上, 东部和西部地区存在较明显的差异, 东部地区人口密集、工农业生产等人为活动旺盛, 周边多被森林和草地覆盖, 碳源汇强度大, 因此 XCO_2 季节变化幅度较大, 全年约 8 ppm; 中、西部地区受人类活动影响较少, 植被覆盖稀疏, XCO_2 全年变化仅 5 ppm。

关键词 GOSAT 反演算法 CO_2 时空分布 中国地区

文章编号 1006-9895(2016)03-0541-10

中图分类号 P414.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.14121

The Spatial and Temporal Distribution of Carbon Dioxide over China Based on GOSAT Observations

YANG Dongxu¹, LIU Yi¹, CAI Zhaonan¹, and DENG Jianbo^{1,2}

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

² Hunan Institute of Meteorological Science, Changsha 410118

Abstract Satellite remote sensing is the most efficient way to monitor global CO_2 flux. ‘Full physics’ retrieval algorithms applied to Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) observations are introduced in this paper, and the differences among the algorithms are briefly summarized. The quantity of retrieval data from each algorithm is analyzed, and the spatial coverage indicates that use of only one dataset is insufficient for the study of XCO_2 (column-averaged CO_2 dry-air mixing ratio). Therefore, an ensemble average method that fuses four datasets is applied, which aims to increase

收稿日期 2014-01-27; 网络预出版日期 2015-08-06

作者简介 杨东旭, 男, 1985 年出生, 理学博士, 助理研究员。主要从事温室气体卫星监测方法研究。E-mail: yangdx@mail.iap.ac.cn

通讯作者 刘毅, E-mail: liuyi@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05040200, 国家高技术研究发展计划(863 计划)——全球二氧化碳监测科学实验卫星与应用示范重大项目 2011AA12A104

Funded by Strategic Priority Research Program—Climate Change: Carbon Budget and Relevant Issues (Grant XDA05040200), the National High-Tech R&D Program (Grant 2011AA12A104)

the data spatial coverage indirectly. Using the ensemble average results, the spatial and temporal distribution of XCO_2 over China is studied. The results indicate strong variation of XCO_2 , both spatially and temporally. A seasonal trend is identified, with the maximum and minimum appearing in spring and summer, respectively, over the whole of China, and most of the area shows large XCO_2 values [$>380 \text{ ppm} (\times 10^{-6})$]. However, there is a significant difference between east and west. In the east of China, strong CO_2 sources due to high levels of human activity, and sinks due to large areas of vegetation cover, lead to large variation in XCO_2 (8 ppm). Whereas, in the west of China, the relatively sparse human population and vegetation cover lead to small variation in XCO_2 (5 ppm).

Keywords GOSAT, Retrieval algorithm, CO_2 , Spatial distribution, Temporal distribution, China

1 引言

近年来, 极端天气和灾害的频繁发生, 使国际社会愈发关注气候变化对人类生存环境造成的影响。现有科学研究成果表明, 人类排放的温室气体, 尤其是含量高、温室效应强的大气二氧化碳 (CO_2) 是导致全球变暖和气候变化的主要原因之一 (IPCC, 2007)。中国是发展中国家, 并且是发展中的强国, CO_2 的排放不可小视, 因此了解中国地区大气 CO_2 时空分布特征极为重要。

卫星观测大气 CO_2 时空分布可以获取高空间覆盖的资料, 从而弥补地基观测的不足。早期用于大气温度廓线探测的热红外观测, 被用于大气 CO_2 研究。Bai et al. (2010) 等使用 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 卫星资料对中国地区大气 CO_2 的时空分布和变化进行深入分析。但是传统的热红外卫星遥感观测, 由于只对对流层大气中层敏感, 所以无法获取 CO_2 在整层大气中的含量信息, 特别是近地面排放信息。

利用短波红外高光谱观测可以有效获取包括低层大气的整层大气 CO_2 含量的信息 (刘毅等, 2011)。由日本太阳同步卫星 GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) 上搭载的高光谱分辨率傅里叶变换光谱仪 (TANSO-FTS) 可用于大气 CO_2 短波红外探测 (Kuze et al., 2009)。

短波红外光谱受到水汽、温度、云和气溶胶等大气和地表参数状态参量的影响 (杨东旭, 2013), 在反演结果中引入较大误差 (Cai et al., 2014)。因此目前国际上多选用基于最优估计理论的全物理反演方法 (Rodgers, 2008), 在反演过程中模拟辐射传输的物理过程, 全面考虑各类大气和地表参数等状态参量对光谱的影响, 并在反演过程中同步订正这些影响 (Liu et al., 2013)。针对 TANSO/GOSAT 观测, 国际上诸多科研团队开发了相应的反演算法, 以获得大气二氧化碳柱平均干空气混合比

(XCO_2) 卫星观测结果。由于各算法处理气溶胶等干扰因素的方法均基于特殊的假设, 因此不能广泛适用于所有观测条件, 特别是污染较为复杂的中国地区。

基于 GOSAT 标准产品资料, 利用地学统计方法, Zeng et al. (2013) 等人对中国地区 CO_2 时空分布进行研究。但是由于 GOSAT 标准数据空间覆盖较低, 在数据缺乏的地区, 插值有可能引入较大误差。为提高数空间覆盖和数据质量, EMMA (the ensemble median algorithm) 使用多探测器产品数据进行 CO_2 数据融合 (Reuter et al., 2013), Wang et al. (2014) 等使用 GOSAT 和 SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) 产品数据进行数据融合, 各观测平台间的相互校正会对数据质量产生影响。本研究仅使用基于 GOSAT 观测的多算法、高精度产品数据集, 使用集合平均的方法, 对中国地区 CO_2 观测结果进行优化, 并分析中国地区 CO_2 的时空分布。

2 产品数据

2.1 反演算法简介

NIES-FP 反演算法由 NIES 开发 (Yoshida et al., 2011), 用于处理 GOSAT 观测数据, 是 GOSAT 数据产品的标准算法。算法自 GOSAT 卫星在轨运行以来, 经过 1 次重要的更新, 从 V01.xx 版本更新为 V02.xx 版本, 对气溶胶模型、太阳光谱和分子吸收线计算过程等因素进行了改进, 反演精度 (偏差) 从 V01.xx 版本的 $3.36 \text{ ppm} (\times 10^{-6})$ 提高至 V02.xx 版本的 2.17 ppm (Oshchepkov et al., 2013)。

ACOS (NASA Atmospheric CO_2 Observations from Space) 算法由美国国家航空和宇宙航行局 (NASA, National Aeronautics and Space Administration) 的科学团队开发, 其主要目的是利用 GOSAT 实测卫星数据检验和发展未来应用于 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) 观测的反

演算法, 目前使用 GOSAT 观测光谱与 OCO-2 所对应的数据进行 XCO₂ 反演 (O'Dell et al., 2011)。目前最新的公开版本 B2.9 数据的精度约为 2.06 ppm, 较之前 B2.8 版本有大幅提高。

基于 OCO 原型算法, Leicester 大学的 Boesch et al. (2011) 研发了 UoL-FP (University of Leicester Full Physics) 算法。全球 TCCON 验证结果表明, 最新的 3G 版本数据精度为 2.45 ppm。

RemoTeC (Remote Sensing of Greenhouse Gases for Carbon Cycle Modelling) 反演算法由荷兰太空研究所 (SRON, Netherlands Institute for Space Research) 和德国 Karlsruhe 理工学院 (KIT, Karlsruhe Institute of Technology) 共同研发 (Butz et al., 2011)。1.0 版本数据精度为 2.66 ppm, 本文使用的 2.0 版本产品, 在反演算法中使用高分辨率 ECMWF 气象场数据和地表高度数据, 使反演精度得到进一步提升。

NIES-FP、ACOS、UoL-FP 和 RemoTeC 等 4 种反演算法在反演过程中均同步订正大气和地表等参数, 从而提高反演精度。但是各算法使用的订正方法存在差异, 其中最为重要的是对气溶胶光学性质和垂直分布订正方法。大气气溶胶作为大气辐射传输的强散射介质, 通过单次和多次散射改变辐射传输路径, 从而影响吸收光谱 (Yang et al., 2013)。由于气溶胶物理、化学组成的多样性, 导致其光学性质极为复杂。目前所使用的短波红外 XCO₂ 探测波段所提供的信息, 无法精细提取气溶胶光学性质和垂直分布参数。因此, 上述 4 种反演算法均采用简化的气溶胶模型对气溶胶散射和吸收效应进行订正。其中, NIES-FP 算法使用 SPRINTARS (Spectral Radiation Transport Model for Aerosol Species) 模式输出的气溶胶光学参数, 同步订正气溶胶柱总量和垂直分布; ACOS 和 UoL-FP 算法中假设大气中只存在几类典型的气溶胶, 同步订正各类气溶胶的柱总量和垂直分布; RemoTeC 中使用抽象的气溶胶模型, 同步反演气溶胶的尺度谱分布、柱总量和垂直分布。无论哪种方法, 均不能全面地描述气溶胶的光学性质, 因此在气溶胶含量较高的情况下, 各种算法的结果将会存在较大的差异。

NIES-FP 和 RemoTeC 算法同时使用甲烷的短波红外吸收带, 对 XCH₄ 的含量进行反演, 额外的波段将会提供更多的水汽和温度信息, 但是由于大

气和地表参数的不准确性和观测误差, 也将引入误差。地表气压直接关系到 XCO₂ 的计算结果, NIES-FP、ACOS 和 UoL-FP 算法使用 O₂A 吸收带同步订正地表气压; RemoTeC 算法为获取更多的气溶胶信息, 使用经过地表高度订正的等效地表气压。

除状态参量外, 反演过程中数据预处理和质量控制也决定着反演结果的精度。预处理可以有效的过滤受到云“污染”的观测结果, 从而降低云对反演结果的影响, 各算法对云检测的阈值判定存在差别, 部分取决于反演算法中对“卷云”的同步订正方法。反演结果的质量控制过程较为复杂, 主要是利用观测状态、气溶胶含量、地表气压和光谱拟合残差等参数对反演结果进行综合评定。经过质量控制, 部分反演结果被滤除, 通过质量控制的数据被分级。反演算法之间的差异导致在相同的大气和地表背景下, 反演结果的精度和质量等级不同。因此对于同一次观测, 4 种算法的反演结果有可能出现较大差异。

2.2 产品数据

一般来讲, 数据质量较低的产品精度较低, 因此本研究只选用各类算法判定的数据质量最好的产品数据。为降低偏差的影响, 使用 NIES-FP V02.xx、RemoTeC 2.0 和 UoL-FP:3G 经过偏差订正的产品数据。图 1 给出了 4 种反演产品的时间覆盖区间, 仅 2010 年 4 种算法产品全年覆盖, 因此本研究仅对 2010 年中国地区 XCO₂ 时空分布特征进行研究。

美国国家海洋和大气局 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration) 的 CarbonTracker 模式主要用于大气 CO₂ 源、汇及其分布的研究 (Peters et al., 2007)。本研究利用 CarbonTracker CT2011 数据产品与反演产品进行对比研究 (图 2)。观测和模式产品在一定程度上均反映出 XCO₂ 变化特征, 平均偏差在 2 ppm 以内, 数据离散程度在 3.5 ppm 以内, 4 种产品与模式的相关性均较低, 相关系数 (R) 均低于 0.7。ACOS B2.9 数据量明显高于其他 3 种产品; RemoTeC V2.0 与模式的平均偏差较低, NIES-FP V02.xx 偏差较高。各反演产品之间的差异要明显小于反演和模式产品之间的差异, 卫星观测 XCO₂ 的变化幅度远高于模式观测结果, 从全球 TCCON 验证结果来看, 卫星观测可以提供更多真实 XCO₂ 分布状态的信息, 从而弥补模式的不完善。



图1 NISE-FP V02.xx、ACOS B2.9、UoL-FP: 3G 和 RemoTeC V2.0 等 4 种算法的时间覆盖区间。黄色矩形表示数据的时间覆盖状态

Fig. 1 Temporal coverage of the NISE-FP V02.xx, ACOS B2.9, UoL-FP: 3G and RemoTeC V2.0 products

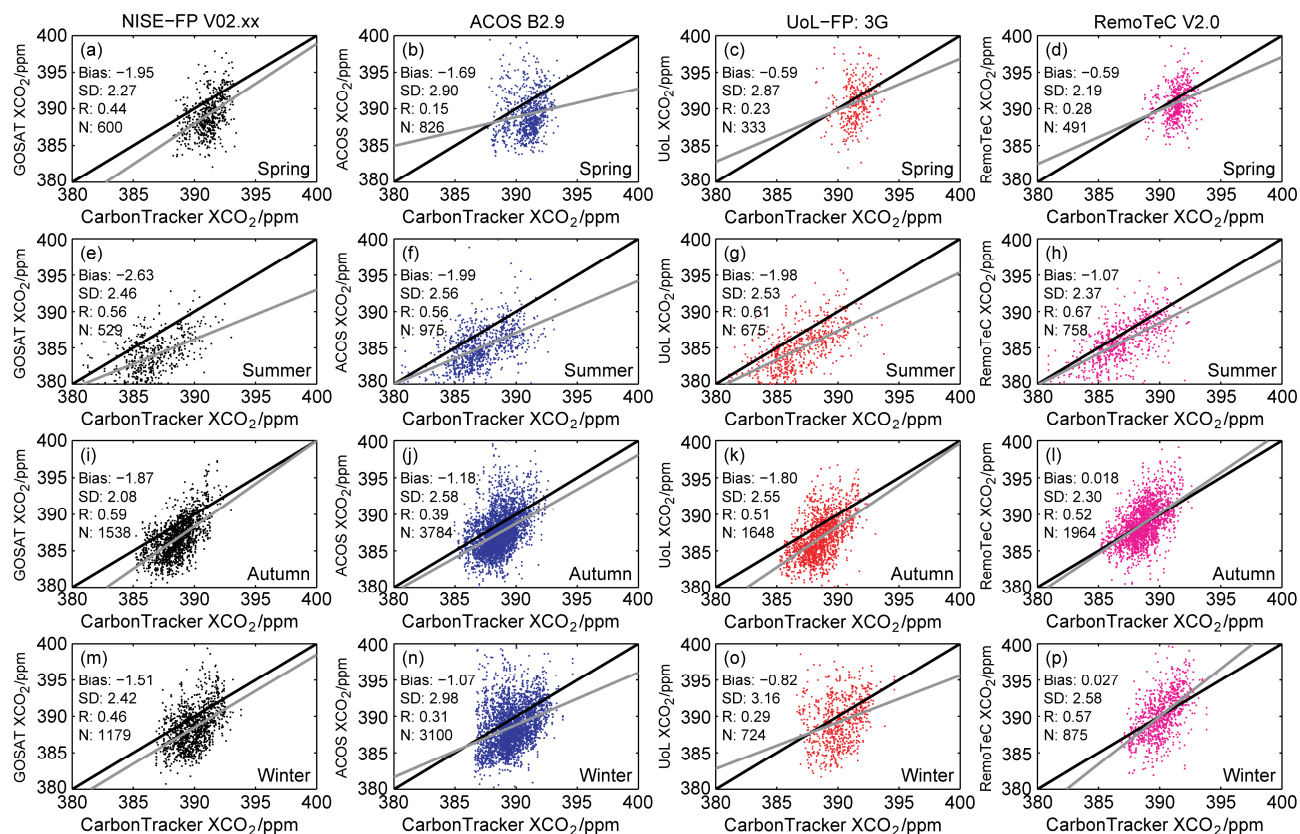


图2 中国地区反演产品与 CarbonTracker CT2011 模式产品在 (a-d) 春、(e-h) 夏、(i-l) 秋、(m-p) 冬四季的逐点对比结果 (各列从左到右分别表示 NISE-FP V02.xx、ACOS B2.9、UoL-FP: 3G 和 RemoTeC V2.0 等 4 类产品数据)。黑色实线表示 1:1 线, 灰色实线表示线性拟合结果, Bias、SD、 R 、 N 分别表示偏差、标准差、相关系数和数据数量等

Fig. 2 Comparison between retrieval products (columns, left to right: NISE-FP V02.xx, ACOS B2.9, UoL-FP: 3G and RemoTeC) and CarbonTracker CT2011 data over China: (a-d) Spring; (e-h) summer; (i-l) autumn; (m-p) winter. The black line is the 1:1 line, and the gray line is the linear fitting. Bias, SD, R and N indicates the bias, standard deviation, coefficient and quantity of data respectively

3 数据处理方法

3.1 有效数据量分析

由于傅里叶变换光谱仪观测时需要较长的采

样时间, 因此 TANSO/GOSAT 星下点观测采样较少; 同时, 其观测视场角较大, 易受到云的“污染”; 由于地表和气溶胶多次散射的耦合作用, 因此在气溶胶含量较多 ($1.6 \mu\text{m}$ 大气气溶胶光学厚度高于

0.1) 时, 反演算法无法进行有效的散射和吸收效应的订正。除此之外, 在反演过程中, 大气和地表参数的订正也将会直接影响数据质量。诸多因素导致 TANSO/GOSAT 的有效观测较少, 因此在使用反演产品之前, 需要对有效数据的数量进行分析。

NIES-FP V02.xx、ACOS B2.9、RemoTeC 2.0 和 UoL-FP:3G 等 4 种反演产品的有效数据量在图 3 中给出。4 种反演产品的有效数据量在空间分布上存在较大的差异, 表明各算法在同种背景情况的适用性不同; 各产品数据均表现出较强的空间变化特征, 其中 ACOS B2.9 的有效数据量明显多于其它产品。各季节有效数据量在表 1 中给出, 秋季和冬季的有效数据要多于春季和夏季, 部分因为春季多发沙尘天气, 夏季多云和雨水, 导致无法对 XCO₂ 进行反演。

表 1 中国地区内 2010 年以及各季节数据产品可使用数据总量
Table 1 Valid data for the quantity of retrieval products in China, 2010

	数据产品可使用数据总量				
	全年	春季	夏季	秋季	冬季
NIES-FP V02.xx	3846	600	529	1538	1179
ACOS B2.9	8685	826	975	3784	3100
UoL-FP: 3G	3380	333	675	1648	724
RemoTeC V2.0	4088	491	758	1964	875

仅使用一种产品数据对中国地区 XCO₂ 进行时空分布的研究, 需要进行大面积的插值, 才能获取较为完整的中国地区 XCO₂ 分布特征。但是对于大量缺乏数据的区域, 插值将会引入极大的误差。考虑到各产品有效数据量存在的时空分布差异, 4 种产品数据可以彼此互补, 如果使用一种合理的方法, 将 4 种数据有机的结合, 将得到更为完整的时空分布结果。

3.2 集合平均方法

各算法产品空间分布差异主要取决于各算法对不同背景状态参量的处理方法, 各算法都有其优势和劣势状态参量, 以最优估计理论为基础的各算法尽量过滤和回避劣势状态参量, 选取对优势状态参量进行反演。因此对于每一个采样点, 或者其只作为某一种算法的优势背景, 或者其为某几种算法的优势背景。对于前者, 反演结果可以有效的表征该背景下的 XCO₂; 对于后者, 没有统一的标准去衡量哪种算法的优势更强, 因此在一定时间和空间范围内, 只能通过有效数据量的大小来评价各优势

算法的优势性。基于这种假设, 本文引入一种集合平均方法, 综合利用 4 种反演产品数据, 其主要目的是尽可能多的获取有效观测结果。集合平均值的计算步骤如下:

(1) 假设在一定的时间和空间范围内大气 CO₂ 分布均匀, 对于每一种反演产品, 滤除与均值差异大于 3 倍标准差 (3σ) 的数据;

(2) 以相对反演误差的倒数作为权重, 计算各反演产品的加权平均值:

$$\overline{X}_{\text{algor}} = \frac{\sum w_i \cdot x_i}{\sum w_i}, \quad (1)$$

$$w_i = \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^{-1},$$

其中, x_i 和 Δx_i 分别表示第 i 个反演结果和反演误差。通过误差加权平均的计算, 可以有效地降低观测误差、获取平均状态;

(3) 以各反演产品的相对有效数据量作为权重, 通过加权平均各产品的加权平均值, 计算得到集合平均值:

$$\overline{X} = \frac{n_G}{N} \overline{X}_N + \frac{n_A}{N} \overline{X}_A + \frac{n_U}{N} \overline{X}_U + \frac{n_R}{N} \overline{X}_R, \quad (2)$$

其中, n_N 、 n_A 、 n_U 和 n_R 分别表示 NIES-FP V02.xx、ACOS B2.9、UoL-FP:3G 和 RemoTeC 2.0 产品数据的有效数据量, $\overline{X}_N$ 、 $\overline{X}_A$ 、 $\overline{X}_U$ 和 $\overline{X}_R$ 表示以上四个算法的反演产品加权平均值, N 表示有效数据总量。

集合平均值的计算需要假设在一定的时空区间内大气 XCO₂ 是均匀的, 从而间接增加有效数据量。大气 CO₂ 化学性质相当稳定, 因此在有限的时间、空间范围内, 大气 CO₂ 可以认为是比较均匀。时空区间的取值范围根据研究的目标可以有所不同, 本文选取 2.5°×2.5°网格作为空间的取值范围。

集合平均方法的实质是通过各算法高精度反演结果的数据量, 判断各算法在研究目标区域 (时间) 的适用性, 从而进行加权平均。由于参与计算的数据经过高质量控制和筛选, 从而保证了集合平均数据的质量, 代表了基于 GOSAT 观测的高质量结果。

3.3 合平均结果对比分析

瓦里关中国大气本底基准观象台全年对大气 CO₂ 浓度进行连续采样观测, 本文使用 NOAA 提供的 Gloor et al. (2012) 瓦里关观测的 7 天平滑数据

与卫星集合平均结果进行对比分析, 如图 4 所示。集合平均值选取瓦里关观测站 $\pm 1^\circ$ 范围内 7 天数据进行计算获得; 同时给出 CarbonTracker 模式 7 天平滑的空间差值结果。集合平均和瓦里关观测结果

随时间变化趋势相似, XCO_2 在春季达到最大值, 夏季达到最小值。集合平均值的最大和最小值分别低于和高于瓦里关观测结果, 这是由于 CO_2 的主要源、汇都集中于地面, 地面观测结果仅为地表 CO_2

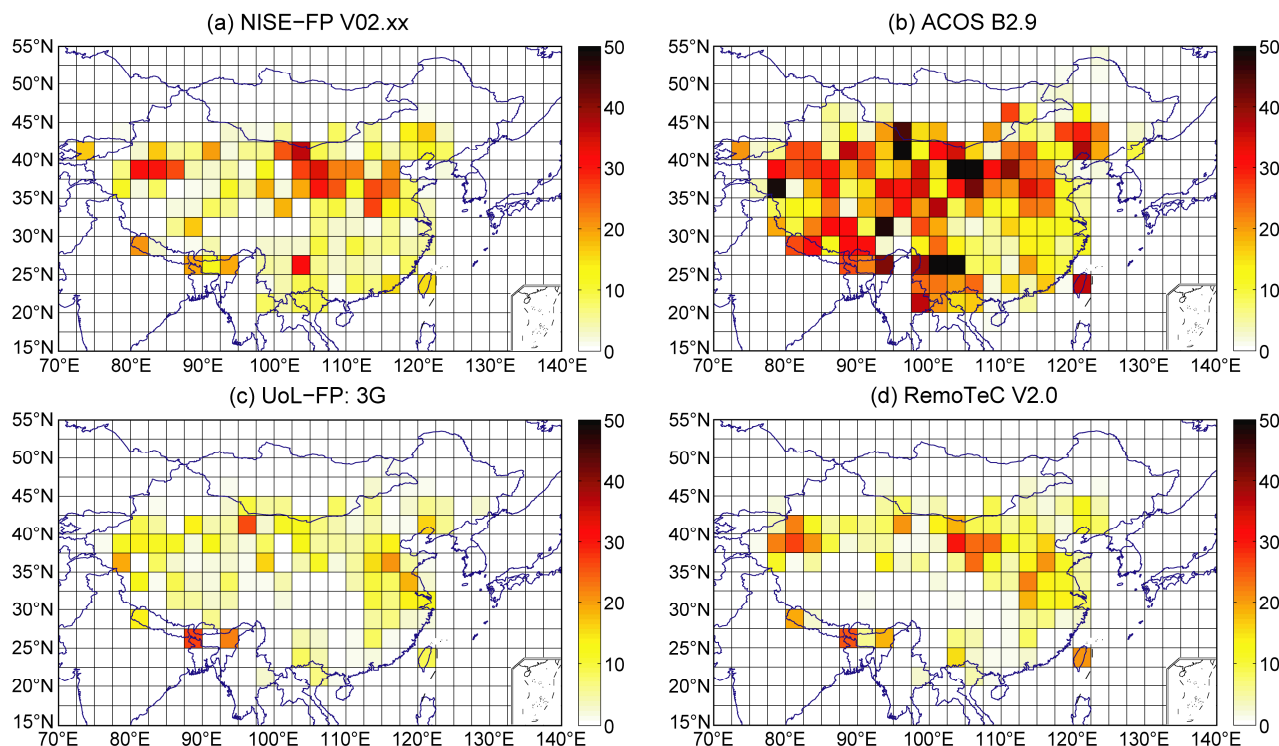


图 3 (a) NISE-FP V02.xx, (b) ACOS B2.9, (c) UoL-FP: 3G 和 (d) RemoTeC V2.0 等反演产品 2010 年中国地区有效数据量总量空间分布

Fig. 3 Valid data quantity of retrieval products (a) NISE-FP V02.xx, (b) ACOS B2.9, (c) UoL-FP: 3G and (d) RemoTeC V2.0 over China, 2010

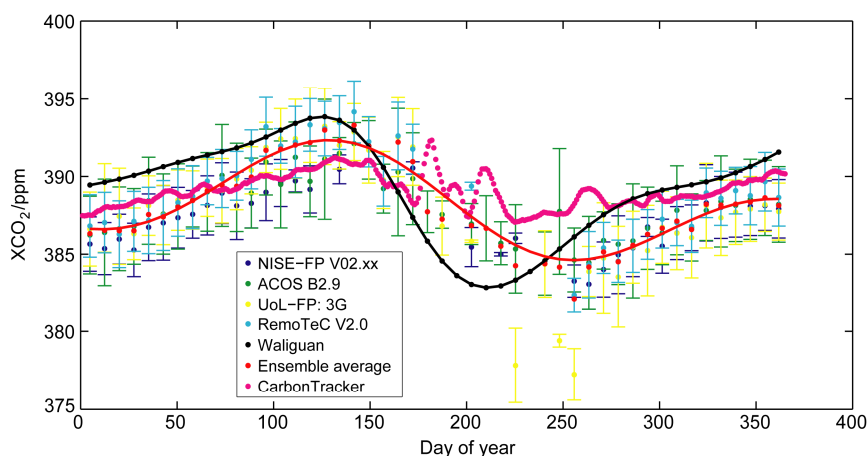


图 4 瓦里关观测站 2010 年观测与 TANSO/GOSAT 卫星观测和 CarbonTracker 模式模拟结果对比。黑色点线表示 NOAA ESRL (National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory) 全球大气 CO_2 联合观测数据集合计划 (GLOBALVIEW- CO_2) 提供的经过 7 天平滑处理的瓦里关观测结果; 蓝色、绿色、黄色、青色圆点 (误差条) 分别表示 NISE-FP V02.xx, ACOS B2.9, UoL-FP: 3G 和 RemoTeC V2.0 反演产品每 7 天的平均值 (标准差); 红色圆点和曲线分别表示集合平均和傅里叶拟合结果; 玫红色圆点表示经过 7 天平滑的 CarbonTracker 模拟结果

Fig. 4 Comparison among Waliguan in-situ measurements, TANSO/GOSAT observations, and CarbonTracker simulation results. The black dotted line indicates the 7-d smoothing of GLOBALVIEW- CO_2 Waliguan in-situ measurements; the blue, green, yellow and cyan circles (error bars) indicate the 7-d average (standard deviation) of the NISE-FP V02.xx, ACOS B2.9, UoL-FP: 3G, and RemoTeC V2.0 products, respectively; red circles and curved line indicate the ensemble-averaged and Fourier fitting results, respectively; magenta circles indicate the 7-d average of CarbonTracker simulation results

含量, 受到源、汇的影响较大, 而卫星观测结果表征大气柱平均状况, 是经过地面源、汇作用后的 CO_2 浓度在整层大气混合结果, 源、汇在近地面导致 CO_2 含量的上升和下降效应混合至大气柱平均后将被削弱, 因此 XCO_2 的变化幅度小于地面 CO_2 变化幅度。同时在热红外卫星观测的对比实验中也表现出类似的结果 (Bai et al., 2010)。

集合平均最高值出现时间与地面观测相近, 但是最低值却明显滞后于地面观测。这主要因为卫星观测 XCO_2 的变化主要依赖于大气混合作用, 而地面观测 XCO_2 的变化主要依赖于地面源、汇的强度。当夏季出现强汇的时候, 地面 CO_2 浓度会迅速下降, 但是对 XCO_2 的影响不大, 只有当大气充分混合, 地面对 CO_2 的削减作用传输至整层大气时, XCO_2 才会降至最小值。当源、汇强度有差别时, XCO_2 变化率在数值上会产生变化。地面观测 XCO_2 春、夏交际的变化率在数值上远高于夏、冬交际过程, 表明瓦里关地区源、汇强度不均一; 卫星观测 XCO_2 全年变化率在数值上相似, 表明影响柱 XCO_2 的主要因素全年较稳定。

集合平均与 CarbonTracker 结果对比表明, 模式结果全年 XCO_2 变化幅度较小, 与集合平均变化趋势相似, 同步达到最大值和最小值。模式在春、夏交际出现较大的波动, 这种波动在卫星观测中略有体现。集合平均结果介于各反演产品变化幅度内, 且有效数据量明显高于其他任何一种反演产品, 尤其在春、夏两季过渡区, 因此集合平均有效地弥补了使用单一反演产品有效数据量不足的缺点。

表 2 XCO_2 时空变化特征明显的区域划分

Table 2 Classification and geo references of key regions of XCO_2 significant variation

分类区域	纬度范围	经度范围
东部	32.5°~40.0°N	110.0°~120.0°E
中部	37.5°~42.5°N	95.0°~110.0°E
东北	40.0°~55.0°N	120.0°~140.0°E
西北	40.0°~50.0°N	70.0°~95.0°E
东南	20.0°~32.5°N	100.0°~120.0°E

4 中国地区 XCO_2 时空分布和变化研究

4.1 XCO_2 时空分布

中国地区春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月) 和冬 (12~次年 2 月) 四季 XCO_2 集合平均

结果如图 5 所示。 XCO_2 全国分布表现出较强的时空变化特征, 多数地区全年高于 380 ppm, 东部和西部地区出现明显的差异。东部地区在春季、秋季和冬季均出现高值 (>390 ppm); 西部地区仅西北春季出现高值, 其他地区全年 XCO_2 均较低。夏季则全国普遍出现低值, 并且空间分布的不均匀性降低, 中部地区全年 XCO_2 较低。

将 XCO_2 时空变化特征明显的区域进行简单的划分, 划分方法在表 2 中给出。同时利用 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 卫星观测 0.05° 格点陆地表面使用分类数据和 NASA SEDAC (SocioEconomic Data and Applications Center) 提供的 GPW V3.0 (Gridded Population of the World) 世界人口密度预估数据分别进行地表使用和人口密度的空间分类 (图 6)。

4.2 XCO_2 季节变化

利用分类的结果对不同区域的 XCO_2 季节变化进行研究。 XCO_2 的季节变化可以通过简单的数学方法计算得到。假设 XCO_2 随时间的变化 ΔX 可以分解为

$$\Delta X = \delta_{\text{annual}} + \delta_{\text{season}} + \delta_{\text{synoptic}} + \delta_{\text{daily}}, \quad (3)$$

其中, δ_{annual} 、 δ_{season} 、 δ_{synoptic} 和 δ_{daily} 分别表示年、季节、天气尺度和日变化。对于 TANSO/GOSAT 观测, 每天至多对同一地点进行 1 次采样观测, 因此该观测无法反应出日变化特征。天气过程变化通过 10 天的平均滤除, 年际尺度的变化通过 400 天的低通滤波滤除, 从而得到 XCO_2 季节变化。

典型区域分类结果表明, 春季东南、东北、西北和东部地区均出现高于 +4 ppm 的高值, 其中东部和东北部地区最高, 达到 +5 ppm 以上; 春季中部地区 XCO_2 有所上升, 但基本低于 +2 ppm; 夏季 5 个区域均出现全年最低值, 其中东北和中部地区较低, 约 -4 ppm; 夏季东南和东部地区仅有 -2 ppm。东北地区全年变化幅度最大, 春季最高值达到 +6 ppm, 夏季最低值降至 -5 ppm; 中部地区全年变化幅度最小, 春季最高值仅有 +2 ppm, 夏季最低值约 -3 ppm。

地表植被类型分类表明, 春季森林和耕地均出现大于 +5 ppv 的高值, 远高于低矮植物和裸土的 +2 ppm; 夏季耕地、森林和低矮植物均出现低于 -4 ppm 的低值, 裸土只出现 -2 ppm 的低值, 并且其低值出现滞后于其它各类地表。森林地区全年变化幅度最大, 最高和最低值相差约 10 ppm; 裸土地区全

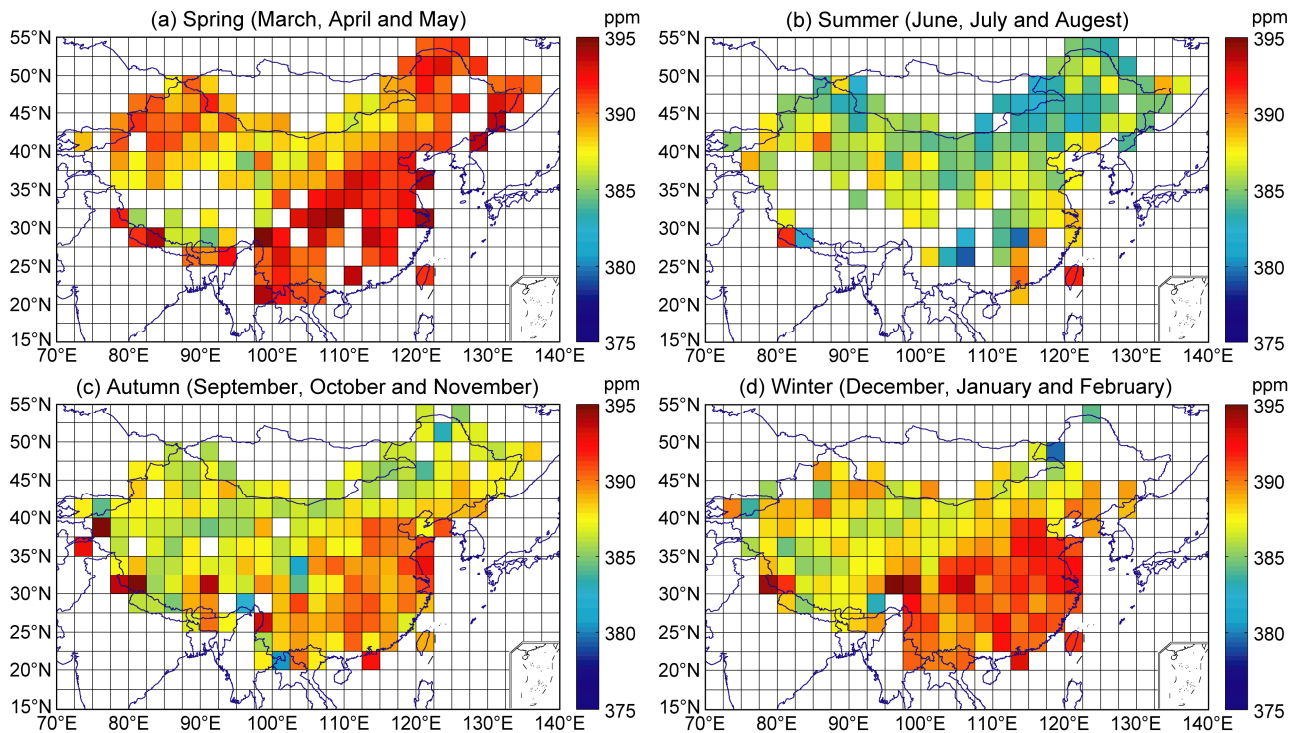


图5 2010年中国地区XCO₂集合平均结果在(a)春(3~5月)、(b)夏(6~8月)、(c)秋(9~11月)和(d)冬季(12~次年2月)的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of ensemble-averaged XCO₂ in (a) spring (March, April and May), (b) summer (June, July and August), (c) autumn (September, October and November), and (d) winter (January, February and December) over China

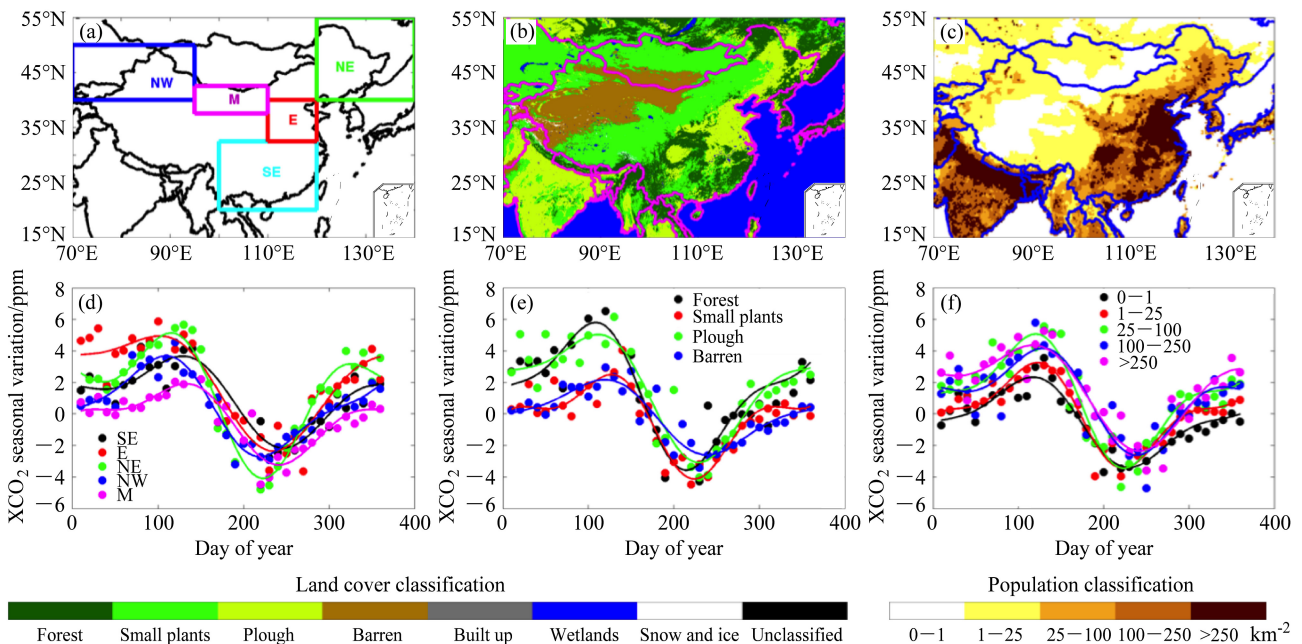


图6 (a) 时空变化特征明显区域、(b) 土地利用和(c) 人口密度等空间分类结果以及(d-f) 对应各分类方法的XCO₂季节变化。其中实心圆点和曲线分别表示分类平均结果和2阶傅里叶拟合结果

Fig. 6 (a) Key regions, (b) land cover, and (c) population density classification results and (d-f) temporal variation of the XCO₂ seasonal variation for the different classes (circles and curves indicate the ensemble-average and Fourier fitting results, respectively)

年变化幅度最小, 最高和最低值相差仅 5 ppm。

人口密度分类结果表明, 春季人口密度 $> 25 \text{ km}^{-2}$ 的地区出现 +5 ppm 的高值, 人口密度 $< 25 \text{ km}^{-2}$ 的地区, 只有 +3 ppm 的高值出现; 夏季人口密度 $> 100 \text{ km}^{-2}$ 地区有约 -2 ppm 的低值出现, 人口密度 $< 100 \text{ km}^{-2}$ 的地区约有 -4 ppm 低值出现。人口密度为 $25 \sim 100 \text{ km}^{-2}$ 的地区全年变化幅度较大, 约 9 ppm; 人口密度 $< 1 \text{ km}^{-2}$ 的地区全年变化幅度较小, 仅 5 ppm。

三种划分方法, 中国东南、东北和东部地区经济和生产品较为发达, 人口密集 ($> 25 \text{ km}^{-2}$), 多以耕地和森林地表覆盖; 中部和西北部地区人口稀少, 多裸土和稀疏植被覆盖。综合分类研究结果, 全国各地区季节变化趋势相同, 春末达到最高值, 夏末达到最低值; 各地区主要差异存在于冬季和春季, 冬季高值主要集中于经济和生产品较为发达、人口密度大的东南、东北和东部地区, 最大差异高于 4 ppm; 各地夏季差异最小, 仅为 1~2 ppm。

5 结论与讨论

本文对目前国际上反演精度高的 NIES-FP V02.xx、ACOS B2.9、RemoTeC 2.0 和 UoL-FP: 3G 等 4 种应用于 TANSO/GOSAT 观测的全物理反演算法进行了介绍, 并且根据各种算法的差异进行了归纳和总结。说明了反演结果的精度差异主要源于状态参量的模型、预处理和质量控制等过程的差异, 并着重强调了气溶胶和云的订正方法将会对反演结果产生较大的影响。

对比各反演产品的有效数据量, 本研究发现反演产品之间存在较大的差异, 并且各反演产品的时空变化程度较大。从单一反演产品的应用上看, 其不能够提供可靠的中国地区 XCO_2 时空分布。因此, 本研究利用一种集合平均的方法, 联合使用各反演产品, 获取一定时间范围内的格点数据, 间接地提高了有效数据的数量。2010 年中国地区 XCO_2 时空分布表现出较强的时空变化特征, 全国各地区季节变化趋势相似, 均在春季达到最高值, 夏季达到最低值, 多数地区全年高于 380 ppm。东部和西部地区差异明显, 东部地区生产活动旺盛、人口密集、周边多被耕地和森林所覆盖, 因此 XCO_2 季节变化幅度较大, 全年约 8 ppm; 中、西部地区受人类活动影响较少, XCO_2 全年变化幅度仅约 5 ppm。

大气 XCO_2 的时空分布特征, 部分源于地面

CO_2 源、汇的作用。大气 XCO_2 的分布同时受到大气动力混合和输送作用的影响。其中大气动力混合主要是垂直输送作用, 而大气输送是水平输送作用。一般情况下, 大气垂直输送速度较慢, 并且会耦合大尺度的水平输送作用, 这种作用主要表现为大尺度、长时间的背景变化。快速的大气水平输送主要存在于大气低层, 从大气动力学特征来看, 其影响范围较小、持续时间较短。因此, 对于区域性的季节平均结果, 虽不能忽视动力混合和输送作用, 但是约 10 ppm 的季节性地区差异, 足以表明地面源、汇的重要程度。

致谢 本文作者感谢 GOSAT、OCO、UoL-FP 和 RemoTeC 等科学团队提供 NISE-FP V02.xx、ACOS B2.9、UoL-FP: 3G 和 RemoTeC V2.0 等数据产品, NOAA ESRL 提供 CarbonTracker CT2011 数据, Goddard 飞行中心提供 MODIS 地面分类数据, SEDAC 提供 GPW V3.0 数据。

参考文献 (References)

- Bai W G, Zhang X Y, Zhang P. 2010. Temporal and spatial distribution of tropospheric CO_2 over China based on satellite observations [J]. Chinese Sci. Bull., 55 (31): 3612–3618, doi:10.1007/s11434-010-4182-4.
- Boesch H, Baker D, Connor B, et al. 2011. Global characterization of CO_2 column retrievals from shortwave-infrared satellite observations of the orbiting carbon observatory-2 mission [J]. Remote Sens., 3 (2): 270–304, doi:10.3390/rs3020270.
- Butz A, Guerlet S, Hasekamp O, et al. 2011. Toward accurate CO_2 and CH_4 observations from GOSAT [J]. Geophys. Res. Lett., 38 (14), doi:10.1029/2011GL047888.
- Cai Zhaonan, Liu Yi, Yang Dongxu. 2014. Sensitivity studies for the retrieval of XCO_2 from simulated Chinese Carbon Satellite (TanSat) measurements: A linear error analysis [J]. Chin. Sci. Bull., 8: 1–10.
- Gloor G, Fan S-M, Pacala J S S, et al. 2012. GLOBALVIEW-CO2: Cooperative Atmospheric Data Integration Project—Carbon Dioxide [OL]. Boulder, Colorado: NOAA ESRL.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report [R]. Geneva, Switzerland: International Panel Climate Change, 104pp.
- Kuze A, Suto H, Nakajima M, et al. 2009. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring [J]. Appl. Opt., 48 (35): 6716–6733, doi:10.1364/AO.48.006716.
- 刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2011. 卫星遥感大气 CO_2 的技术与方法进展综述 [J]. 遥感技术与应用, 26 (2): 247–254. Liu Yi, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2011. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO_2 [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 26 (2): 247–254, doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2011.2.247.
- Liu Yi, Yang Dongxu, Cai Zhaonan. 2013. A retrieval algorithm for TanSat

- XCO₂ observation: Retrieval experiments using GOSAT data [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58 (13): 1520–1523, doi:10.1007/s11434-013-5680-y.
- O'Dell C W, Connor B, Bösch H, et al. 2011. The ACOS CO₂ retrieval algorithm—Part 1: Description and validation against synthetic observations [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 5: 99–121, doi:10.5194/amt-5-99-2012.
- Oshchepkov S, Bril A, Yokota T, et al. 2013. Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space. Part 2: Algorithm intercomparison in the GOSAT data processing for CO₂ retrievals over TCCON sites [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118 (3): 1493–1512, doi:10.1002/jgrd.50146.
- Peters W, Jacobson A R, Sweeney C, et al. 2007. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: Carbon Tracker [J]. *PNAS*, 104 (48): 18925–18930, doi:10.1073/pnas.0708986104.
- Reuter M, Bösch H, Bovensmann H, et al. 2013. A joint effort to deliver satellite retrieved atmospheric CO₂ concentrations for surface flux inversions: The ensemble median algorithm EMMA [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13: 1771–1780, doi:10.5194/acp-13-1771-2013.
- Rodgers C D. 2000. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 253pp.
- Wang T X, Shi J C, Jing Y Y, et al. 2014. Combining XCO₂ measurements derived from SCIAMACHY and GOSAT for potentially generating global CO₂ maps with high spatiotemporal resolution [J]. *PLoS One*, 9 (8): e105050, doi:10.1371/journal.pone.0105050.
- Yang Dongxu, Liu Yi, Cai Zhaonan. 2013. Simulations of aerosol optical properties to top of atmospheric reflected sunlight in the near infrared CO₂ weak absorption band [J]. *Atmos. Oceanic. Sci. Lett.*, 6 (1): 60–64.
- 杨东旭. 2013. 短波红外大气 XCO₂ 卫星遥感反演算法研究 [D]. 中国科学院大学博士学位论文, 111pp. Yang Dongxu. 2013. A near infrared atmospheric XCO₂ retrieval algorithm for satellite observation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 111pp.
- Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, et al. 2011. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse Gases Observing Satellite [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 4: 717–734, doi:10.5194/amt-4-717-2011.
- Zeng Z C, Lei L P, Guo L J, et al. 2013. Incorporating temporal variability to improve geostatistical analysis of satellite-observed CO₂ in China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58: 1948–1954, doi:10.1007/s11434-012-5652-7.