人为排放所引起大气 CO₂ 浓度变化的卫星遥感观测评估

雷莉萍^{1*}, 钟惠^{1,2*}, 贺忠华^{1,2}, 蔡博峰³, 杨绍源^{1,2}, 吴长江^{1,2}, 曾招城^{1,4}, 刘良云¹, 张兵¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

3. 中国环境保护部环境规划院, 气候变化与环境政策研究中心, 北京 100012;

4. Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena CA91125, USA

* 联系人, E-mail: leilp@radi.ac.cn; zhonghui@radi.ac.cn

2017-03-06 收稿, 2017-05-13 修回, 2017-05-15 接受, 2017-06-26 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2016YFA0600303, 2016YFB0501505)资助

摘要 人为排放是引起大气CO₂浓度升高的主要原因, 由大气CO₂卫星遥感观测获取全球和区域大气CO₂浓度的变化已被认为是评估区域人为排放的有效手段之一. 为了深入定量分析区域人为碳排放对大气CO₂浓度变化的贡献, 本研究利用由温室气体观测卫星(GOSAT)获取的近5年(2010~2014年)大气CO₂柱浓度数据, 以同纬度带高人为排放区域的中国京津冀和美国东部城市密集区为研究对象区, 结合位温气象数据和人为碳排放清单数据圈定出对比背景区, 通过分析比较人为排放区与背景区的CO₂浓度差值, 评估人为排放对大气CO₂浓度增量变化的影响. 分析结果显示, 近5年中国京津冀和美国东部城市密集区的大气CO₂浓度比背景区分别显示平均1.8和2.0 ppm的升高; 且冬季均高于其他季节, 分别为 2.4 ± 0.6 和 2.8 ± 0.8 ppm. 进一步分析月变化特征时发现中国京津冀地区2014年11月亚太经合组织会议(APEC)期间大气CO₂浓度异常低于前期3.2 ppm, 反映了会议期间政府实施的减排控制效果. 论文研究结果表明CO₂卫星观测能够从区域大气CO₂浓度的变化定量评估人为排放的影响, 作为有效手段之一辅助于区域人为排放控制效果的评估.

关键词 人为排放, 大气 CO₂ 浓度, 温室气体观测卫星(GOSAT), 区域对比

大气二氧化碳(CO₂)浓度的升高是引起全球变暖的主要原因之一, 而人类活动排放是导致全球大气CO₂浓度升高的主要原因. 政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第5次综合报告指出, 1970~2010年间, 化石燃料燃烧和工业过程的CO₂排放量占温室气体总排放增量的约78%^[1]. 国际能源署(International Energy Agency, IEA)的估算结果同时指出, 城市能源利用CO₂排放占全球能源利用CO₂排放总量的71%^[2]. 大城市区域聚集着全球一半以上的人口, 随着城市化和工业化的快速发展, 巨大的能源消耗不可避免地将会使人为CO₂排放量逐年增长. 为减缓大气CO₂浓度的持续升

高, 世界各国一直致力于实施人为碳排放的减排控制措施, 特别是2016年正式生效的气候变化《巴黎协定》中制定了温室气体减排计划协议, 为此大气CO₂浓度的变化数据将成为评估人为排放减排控制效果的基础依据之一.

随着大气CO₂卫星观测技术的进步, 卫星遥感观测已经成为获取全球和区域大气CO₂浓度变化数据的主要手段之一^[3~7]. 利用星上传感器获取的大气CO₂高光谱吸收特征, 通过辐射传输理论定量反演得到大气CO₂柱浓度(XCO₂, column-averaged carbon dioxide dry air mole fraction)数据; 大气CO₂柱浓度是指从地表到大气顶层的空气柱中大气CO₂分子数与

引用格式: 雷莉萍, 钟惠, 贺忠华, 等. 人为排放所引起大气 CO₂ 浓度变化的卫星遥感观测评估. 科学通报, 2017, 62: 2941–2950

Lei L P, Zhong H, He Z H, et al. Assessment of atmospheric CO₂ concentration enhancement from anthropogenic emissions based on satellite observations (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2941–2950, doi: 10.1360/N972016-01316

空气总分子数的比率. 卫星遥感观测覆盖范围广, 能够以统一的观测方法为我们揭示大气 CO_2 浓度的时空变化特征. 目前在轨运行的温室气体观测卫星(Greenhouse Gases Observing Satellite, GOSAT)和轨道碳卫星OCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2)已经正在为我们提供2009年以来由各种反演方法得到的全球 XCO_2 数据^[6,8-10]. 近期许多研究已经指出 CO_2 卫星观测数据能够定量估计人为密集排放所引起的 CO_2 浓度变化的增量, 在人为碳排放监测方面显示出重要的应用潜力^[11-13]. 最早Bovensmann等人^[14]以光谱辐射传输为理论基础, 通过卫星观测模型模拟得出在平均气象风场下, $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 范围内德国黑磊电厂的工业排放($13\text{ Mt CO}_2/\text{a}$)引起了该区域约 4 ppm ($1\text{ ppm}=1\text{ }\mu\text{L/L}$, 余同)的大气 CO_2 柱浓度的升高. 以人为排放很小的区域作为背景区, 通过与人口密集的人为排放区域的 CO_2 浓度对比, 可以定量评估人为排放引起的区域大气 CO_2 浓度的升高^[15,16]. Schneising等人^[15]分析2003~2009年卫星ENVISAT(Environmental Satellite)获取的SCIAMACHY(Scanning Imaging Absorption Spectrometer For Atmospheric Chartography) XCO_2 数据时发现, 与背景区对比人为碳排放引起德国莱茵鲁尔工业区的大气 CO_2 浓度年均升高约 1.5 ppm , 美国东海岸地区约 1.1 ppm , 长江三角洲约 2.4 ppm . Keppel-Aleks等人^[16]以人为排放区的上风区作为背景区, 统计分析2009~2010年GOSAT卫星反演的大气 CO_2 柱浓度数据, 指出北半球在秋季(10~11月)时, 化石燃料燃烧导致美国东部沿海城市的 CO_2 浓度较其上风区高约 0.6 ppm , 中国京津冀地区与上风区的差异约为 1.9 ppm . 最新研究在剔除了GOSAT- XCO_2 中的背景浓度、生态吸收和生物燃烧所引起的变化量后, 指出2009~2012年在北京和天津人为排放引起的增量约为 1.9 ppm , 美国洛杉矶城市约为 2.8 ppm ^[12]. 上述研究结果显示不同城市以及工业密集区域在2009~2012年期间大气 CO_2 浓度年增量最小为 0.6 ppm 而最大到 2.8 ppm .

目前美国和中国作为全球两个排放大国, 1980~2014年由能源利用累积 CO_2 排放量分别约占全球 CO_2 总排放量的22%和16.5%^[2,17], 已是全球人为碳排放研究的重点区域. 针对这些区域, 由卫星观测捕捉的人为排放所引起 CO_2 浓度升高的定量特征, 我们还缺乏充分的认识. 本文以同纬度带($35^\circ\sim 50^\circ\text{N}$)的中国京津冀地区和美国东部的城市密集区为研究对象

区, 利用GOSAT卫星观测数据反演的大气 CO_2 柱浓度数据, 结合CDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center)人为排放清单数据集和NCEP(National Centers for Environmental Prediction)再分析系统的位温(potential temperature)数据资料, 选择与人为排放区处于同一气团且没有人为排放或很小的区域作为背景区域, 通过与背景浓度的对比评估人为排放所引起的大气 CO_2 浓度变化量, 并且比较两个研究对象区域的变化差异, 提升我们对高人为排放所引起的大气 CO_2 浓度升高的认识.

1 材料和方法

1.1 卫星 CO_2 观测数据

本文收集了日本GOSAT发布的2010年1月至2015年10月陆地区域的大气 CO_2 柱浓度数据(v02.xx), 该数据经过了质量控制筛选, 剔除了受到气溶胶光学厚度、云和传感器观测噪音等的影响^[18]. GOSAT卫星轨道平均高度为 666 km , 轨道倾角为 98° , 降交点过境时间约为地方时13:30, 直下观测点的空间分辨率为 10.5 km , 重访周期为 3 d . GOSAT卫星上搭载了温室气体探测器傅立叶变换光谱仪(Fourier transform spectrometer, FTS)和云与气溶胶成像仪(cloud and aerosol imagery, CAI)两个传感器; 利用FTS观测的短波近红外SWIR(ShortWave InfraRed)的大气 CO_2 高光谱吸收特征, 基于大气辐射传输模型和最小代价函数算法反演生成 XCO_2 数据产品^[4,8]. 许多研究已经指出气溶胶是影响 XCO_2 数据不确定性的主要因素之一, 对 XCO_2 的影响一般趋于呈反比关系^[19], 在城市群区域高气溶胶散射影响的情况下 XCO_2 的反演趋于低估. 为保障高精度数据的利用, XCO_2 (v02.xx)的数据产品剔除了高气溶胶下的 XCO_2 数据($1.6\text{ }\mu\text{m}$ 波段的AOD小于或等于0.1), 由此避开高气溶胶对数据分析的影响. 经与地面观测站网TCCON(Total Carbon Column Observing Network)对比, XCO_2 (v02.xx)显示有 1.5 ppm 的系统性偏差. 该系统偏差在空间和时间上的相对比较时可以被减小或抵消. 已有一些应用研究指出虽然GOSAT观测反演 XCO_2 的绝对精度还存在着偏差, 然而 XCO_2 与人为排放有着线性正比关系, 通过对比其在时间和空间上的相对变化可以揭示区域人为排放对大气 CO_2 浓度变化的贡献^[12,16,20].

1.2 研究区与背景区的选定

本文选择了位于 $35^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 同纬度带的高人为碳排放区域: 中国京津冀人口密集区(包括了北京、天津、石家庄等大城市)和美国东部城市密集区域(包括了纽约、费城、华盛顿等大城市)为人为排放研究对象区, 以下简称排放区。

由卫星观测反演的大气 CO_2 柱浓度信息既包含由化石燃料燃烧、水泥生产等人为活动排放到大气中的 CO_2 信息, 也受到气象风场的大气输送以及生态系统 CO_2 吸收与排放的平衡通量的影响。为了从大气 CO_2 浓度信息中获取人为排放所引起的 CO_2 浓度变化量, 可以考虑利用背景区来消除或最大限度地减小其他因素引起的 CO_2 浓度变化^[13,15,16]。相比于其他简单圈定背景区的研究^[13,15], Keppel-Aleks等人^[16]根据大气 CO_2 浓度的纬向梯度性变化与位温呈纬向梯度相关的特征, 利用位温选择人为排放区的上风区域作为背景区, 但该背景区的选择并没有考虑人为 CO_2 排放的空间分布。

位温参数是稳定的大气示踪物, 同一气团的位温不随其所处高度或压强的改变而变化, 相同位温下的区域受到外部大气输送的影响是相近的。由此本文首先利用气象位温的特性, 选择与排放区有着相同位温的区域作为背景区。在此基础上进一步利用CDIAC地面人为 CO_2 排放清单数据(<http://cdiac.ornl.gov/>)避开高人为排放区, 圈定出背景区。利用来自于大气再分析资料(NCEP)的位温数据^[21](<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>), 统计计算2010~2015年期间平均位温数据, 根据该位温将背景区限制在与排放区同一等值线之间。图1为本研究对象的人为排放区和背景区圈定的范围, 叠加了位温等值线、人为排放量和GOSAT观测点样例。图1所示排放区方框范围虽然延伸到海上, 但以下的数据分析仅为该区域的陆地数据。

如图1所示, 研究选定的中国背景区位于内蒙古中西部植被稀疏区域, 与Keppel-Aleks等人^[16]研究选择的上风区位置相近, 但根据人为排放CDIAC数

图1 中国京津冀和美国东部人为排放研究对象区(红色方框)和基于位温(黑色实线)与人为排放圈定的背景区(蓝色方框). (a), (b) 人为排放量的空间分布, 红色圆点为主要城市; (c), (d) 研究区域 2010 年GOSAT观测点 XCO_2 值样例

Figure 1 Emission region (red box) of Beijing-Tianjin-Hebei area in China and high-density urban region in eastern America, and background regions (blue box) delineated by potential temperature and anthropogenic emissions. (a), (b) The spatial distribution of anthropogenic emissions in the studying areas; (c), (d) the examples of XCO_2 footprints from GOSAT in 2010

据以格网(1°×1°)排放量在11 Tg CO₂/a以下为阈值避开高排放的城市区域,形成了不规则的形状区域.美国的背景区域位于与排放区基本同纬度带的中部地区(跨南达科他州、内布拉斯加州、堪萨斯州).统计CDIAC发布的2010年人为CO₂排放量,中国京津冀人为排放区(43万km²)的排放总量为950 Tg CO₂/a,背景区(53万km²)为127 Tg CO₂/a;美国东部人为排放区(55万km²)的排放总量为1312 Tg CO₂/a,背景区(46万km²)为123 Tg CO₂/a.由图1(c)和(d)可以发现人为排放区的XCO₂明显高于背景区的XCO₂.

2 结果与讨论

2.1 人为碳排放引起的大气CO₂浓度变化

区域大气CO₂浓度的变化量主要由3个变量组成,人为活动(化石燃料燃烧、水泥生产等)排放到大气中的CO₂分子量、地表生态系统吸收与排放的CO₂通量以及由气象风场输送的CO₂通量.基于位温选择的背景区(图1)与排放区有着相近的气象风场输送的CO₂通量,在没有大面积生物质燃烧情况下,由排放区浓度减去背景区浓度的差值可以抵消气象风场输送的CO₂通量.在忽略背景区很小的人为排放量和生态通量的情况下,排放区浓度减去背景区浓度的差值由两个特征量组成:一是排放区的人为排放所引起的大气CO₂增量,二是排放区的CO₂生态通量.

在区域年统计的计算中,根据XCO₂呈季节变化特征,将1年的XCO₂数据按季节(冬季为1~2月,春季为4~5月,夏季为7~8月,秋季为10~11月)进行分割计算均值后,再统计得到年均值.为保证数据统计的有效性,在统计计算前,对收集的GOSAT-XCO₂数据进行了预处理.即以月为单位,分别统计计算排放区和背景区(图1)内原始GOSAT观测点XCO₂样本中值,参考大型排放点源在其背景环境下引起CO₂浓度的增量最大约为4 ppm^[14]的研究结果,分别以不超出排放区中值±4.5 ppm和背景区中值±3 ppm值域对区域内的GOSAT观测点XCO₂进行了异常值剔除,以消除异常值对区域统计计算的影响.

表1给出了2010~2014年的XCO₂年统计结果,由于2015年冬季观测数据的不足,未进行该年的计算.统计结果显示,排放区各年的XCO₂标准偏差(std)特别是中国均大于背景区,显示了排放区地面人为排放引起的CO₂浓度值的扰动.从2010~2014年的5年排放区与背景区的平均XCO₂差值(contrasts),中国和美国分别为1.8和2.0 ppm.中国区域的差值最高显示在2010年达2.4 ppm,最低在2014年为1.3 ppm;而美国区域的差值最高显示在2012年达2.6 ppm,最低2010年为1.6 ppm.由于排放区有一定密度的植被覆盖,而在植被覆盖稀疏的背景区的生态通量很小到可以忽略时,人为排放所引起的实际大气CO₂增量应该是在上述排放区与背景区的差值之上累计排放

表1 中国京津冀和美国东部排放区与背景区的XCO₂年差值

Table 1 Yearly XCO₂ contrasts of emission-region and background-region which are shown in Figure 1

研究区域	年份	排放区			背景区			差值
		均值(ppm)	标准差(ppm)	样本数	均值(ppm)	标准差(ppm)	样本数	ΔXCO ₂ (ppm)
中国	2010年	388.4	2.0	319	386.0	1.3	251	2.4
	2011年	389.9	2.2	306	388.3	1.6	272	1.6
	2012年	392.3	2.0	298	390.4	1.4	342	1.9
	2013年	395.1	2.0	377	393.1	1.4	376	2.0
	2014年	396.4	2.1	206	395.1	1.2	299	1.3
	平均值	392.4	2.1	1506	390.6	1.4	1540	1.8
美国	2010年	388.7	1.5	295	387.1	1.4	207	1.6
	2011年	390.9	1.8	197	389.2	1.5	293	1.7
	2012年	393.7	1.7	253	391.1	1.5	298	2.6
	2013年	395.5	1.6	191	393.4	1.4	250	2.1
	2014年	397.4	1.6	144	395.6	1.2	132	1.8
	平均值	393.8	1.7	1080	391.9	1.4	1180	2.0

区的生态通量和背景区的排放量. 以中国区域为例, 根据Zhang等人^[22]统计计算中国2001至2010年的生态碳通量, 京津冀排放区的生态碳通量约为 $-100 \sim -30 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 背景区基本保持平衡为零. 如果将最大 $-100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 换算成与人为排放清单相同单位则为 $-157 \text{ Tg CO}_2/\text{a}$, 在此之上加上背景区人为排放量($127 \text{ Tg CO}_2/\text{a}$)合计占该区域人为排放总量($950 \text{ Tg CO}_2/\text{a}$)的三分之一. 因此京津冀区域人为排放所引起的 CO_2 浓度的实际增量, 在考虑剔除被生态系统吸收了的 CO_2 量和背景区人为排放量后, 其值应该是在上述 XCO_2 差值之上叠加上其三分之一的增量; 即京津冀区域人为排放实际引起的 CO_2 浓度增量5 a平均约为 2.4 ppm (差值 $1.8+0.6 \text{ ppm}$); 最大值年份2010年约为 3.1 ppm (差值 $2.4+0.7 \text{ ppm}$), 最小值年份2014年约为 1.7 ppm (差值 $1.3+0.4 \text{ ppm}$). 由此可以推测利用排放区与背景区的 XCO_2 差值(表1中的 ΔXCO_2 列)表征人为排放所引起的 CO_2 增量可能比实际值小 0.7

ppm以下.

2.2 区域 XCO_2 差值的季节变化

图2为统计计算所用的 XCO_2 数据样本值; 图3给出了利用图2显示的数据样本按月分割计算的区域 XCO_2 均值结果, 对月均值做显著性统计检验的结果显示, 中国和美国研究区域的 P 值分别为 0.015 和 0.016 (置信区间95%).

如图2和3所示, 可以发现排放区的 CO_2 浓度值明显高出背景区. 排放区与背景区的差值 ΔXCO_2 在夏季最小且有些年份呈现为负值, 而在冬季普遍偏高, 显示了夏季植被的 CO_2 吸收和冬季植被吸收的减小从而突出了人为排放的特征. 排放区虽然主要为高密度城市, 但同时混合覆盖有林地、草地以及农作物等植被, 这些植被在夏季的 CO_2 吸收活动可以降低大气 CO_2 浓度^[5]; 同时植被覆盖稀疏的背景区的弱吸收, 减小了排放区与背景区在夏季的差值, 特别当排放

图2 GOSAT观测反演的 XCO_2 数据的时间变化(2010年1月至2015年10月). (a) 中国京津冀排放区(CHN-Es)和背景区(CHN-Bk); (b) 美国东部排放区(US-Es)和背景区(US-Bk)

Figure 2 Timely variations of XCO_2 footprints from January 2010 to October 2015. (a) Emission-region (CHN-Es) and background-region (CHN-Bk) in China; (b) emission-region (US-Es) and background-region (US-Bk) in America which shown in Figure 1

图3 排放区与背景区的月均值及其差值的变化(2010年1月至2015年10月). (a) 中国研究区; (b) 美国研究区. CHN-Es和CHN-Bk分别代表中国京津冀排放区和背景区, US-Es和US-Bk分别代表美国东部排放区和背景区, 余同

Figure 3 Monthly averaged XCO_2 from January 2010 to October 2015. (a) Emission-region (CHN-Es) and background-region (CHN-Bk) in China; (b) emission-region (US-Es) and background-region (US-Bk) in America. The monthly enhancement (ΔXCO_2) is defined as the monthly averaged XCO_2 of background-region subtracted from emission-region

区植被 CO_2 吸收很强的时候它们的差值甚至出现为负值. 随着植被生长的停滞, 植被生态通量基本平衡, 受区域不同植被覆盖密度的影响减小, 因此冬季的差值主要表征了人为碳排放特别是入冬后为取暖的煤炭燃烧排放所导致的大气 CO_2 增量. 2010~2014年排放区与背景区差值的季节统计结果显示, 冬季差值普遍高于其他季节, 中国区域各年冬季的差值分别为3.4, 2.1, 2.5, 2.1和1.8 ppm; 美国区域的差值分别为2.2, 2.0, 4.1, 3.1和2.6 ppm.

另外, 在分析图3(a)中国区域 XCO_2 季节变化总体趋势时, 发现中国京津冀排放区在2014年11月显示了 XCO_2 及其与背景区差值 ΔXCO_2 的异常波动. 结

果显示中国排放区(CHN-Es)的 XCO_2 由2014年10月的398.8 ppm突然在11月降低为396.4 ppm, 异常于往年同期 XCO_2 升高的一般季节性变化规律, 而美国研究区在该年同期并没有出现此异常变化. 这或许与该时期中国京津冀地区人为排放的强力控制有关. 2014年11月1~12日间在中国北京召开了亚太经合组织第二十二次领导人非正式会议(以下称APEC), 为保证会议期间北京及周边地区的空气质量, 覆盖本文研究区的华北大范围地区采取了控制大气污染物排放的措施, 如与污染气体排放相关的企业临时限产和机动车限行等措施; 而这些大气污染源也就是化石燃料燃烧、水泥生产、机动车等大气 CO_2 排放源. 在下一节

我们进一步讨论了这个时期XCO₂的变化特征。

2.3 APEC会议期间异常低值的讨论

根据北京市环境保护局评估报告, 2014年的APEC期间北京减少排放的污染物总量超过40%, 天津、河北、山西、山东、内蒙古等周边省区市主要大气污染物实际减排量超过30%, 这期间有11天北京市空气质量达到了优良级别(<http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/413526/331443/331937/333896/416644/index.html>)。区域污染物排放量减少使得大气中的二次颗粒物含量大幅度降低, 大幅改善了APEC期间的空气质量^[23,24]。Sun等人^[25]利用搭载于北京325 m气象塔上的气溶胶质谱仪对地面和250 m高度处的气溶胶化学成分进行实时在线观测, 结果指出在APEC会议期间二次无机气溶胶在地面和260 m分别降低约50%和60%, 而二次有机气溶胶分别降低37%和55%, 其中含氧有机气溶胶(与CO₂吸收峰有很高的相关性 $R^2=0.98$)较会前降低了45%~74%。

本文单独抽取了2010~2014年5年间11月1~12日的APEC会议同期(inAPEC)和10月15~31日的会议之前(preAPEC)排放区和背景区的XCO₂数据点, 针对每个区域分别计算了每年会议同期与会议前期均值的差值(图4)以及两个时期的每年排放区与背景区的差值(图5), 由此对比两个时期XCO₂的变化特征。首先由图4的会议同期与会议前期XCO₂差值可以发现, 对比往年的变化规律, 2014年APEC期间中国京津冀地区的XCO₂并没有显示较会前升高的常规性季节变化特征, 而是异常下降了3.2 ppm。进一步由图5对比APEC会议同期和会议前期的排放区与背景区的差值显示, 2014年APEC会议期间的差值为1.0 ppm, 比同年会议前期的4.5 ppm差值减小了约77%, 此比例相似于上述含氧有机气溶胶(与CO₂吸收峰的相关性 $R^2=0.98$)较会前降低了45%~74%的地面观测结果^[25]。另外2014年会议前期中国京津冀地区与背景区的4.5 ppm差值也许与相关企业在APEC之前加大生产导致的大量人为碳排放有关。这些XCO₂的显著变化特征在美国区域并没有显示, 此分析结果指出了利用卫星观测反演的大气CO₂柱浓度的变化特征可以捕捉到强力减排措施下所取得的CO₂减排效果。

3 结论

利用温室气体卫星遥感观测可以获取覆盖全球

图4 研究区5年期间(2010~2014年)APEC会议同期(11月1~12日)与会议前期(10月15~31日)的差值($t_{\Delta XCO_2}$)

Figure 4 The difference ($t_{\Delta XCO_2}$) between averaged XCO₂ during the same days as APEC (1st-12th, November) and that before APEC (15th-31th, October) from 2010 to 2014 in emission-region (CHN-Es) and background-region (CHN-Bk) in China; emission-region (US-Es) and background-region (US-Bk) in America

图5 在APEC会议同期和会议前期排放区与背景区的XCO₂差值(ΔXCO₂)年变化。inAPEC-CHN, inAPEC-US, preAPEC-CHN和preAPEC-US分别为APEC会议同期(inAPEC)和会议前期(preAPEC)的中国(CHN)和美国(US)研究区

Figure 5 Contrasts of averaged XCO₂ (ΔXCO_2) between emission-region and background-region for Chinese and American studying areas during the same days as APEC (1st-12th, November) and that before APEC (15th-31th, October) from 2010 to 2014, where inAPEC-CHN and inAPEC-US denote the contrasts of XCO₂ during APEC in Chinese and American studying areas respectively; preAPEC-CHN and preAPEC-US denote the contrasts of XCO₂ before APEC in Chinese and American studying areas respectively

和区域的大气CO₂浓度数据的优势, 收集2010~2015年GOSAT卫星观测反演的大气CO₂柱浓度数据, 以人为碳排放高密度的排放区中国京津冀和美国东部城市密集区为研究对象区, 基于位温气象资料 and 人为排放清单确定对比背景区, 通过对比排放区与背景区的相对变化值, 评估了人为排放所引起的CO₂浓度变化的特征。

研究结果指出2010~2014年中国京津冀和美国东部城市密集区与背景区对比, 分别显示了1.8和2.0 ppm/a的增量。但从季节变化上夏季的很小差值结果指出如果考虑排放区植被生态系统对大气CO₂吸收

的影响,由此差值评估排放所引起的增量值或许偏低.而受植被CO₂吸收活动影响很小的冬季差值,在中国京津冀地区和美国东部城市密集区分别为2.4(±0.6)和2.8(±0.8) ppm/a,高于排放区与背景区年平均的差值,该差值更加客观地揭示了区域人为排放所引起的大气CO₂浓度的增量.进一步在缩小时间尺度进行对比分析时,我们发现2014年11月中国京津冀地区的CO₂浓度显示的异常低值,而在同纬度的美国东部地区未见此异常变化.结果表明卫星观测捕捉到了北京APEC会议期间减排控制所引起的区域大

气CO₂浓度的变化,从减排控制实例分析验证了卫星观测监测人为排放的有效性.随着即将发射和已在计划中的大气CO₂观测卫星数目的增加,卫星观测数据必将成为人为减排效果监测和评估的重要依据.但由于云覆盖以及观测条件的限制,卫星观测在空间尺度上还只能从区域统计上分析;另外,如何从卫星观测上定量地剔除生态系统CO₂通量还有非人为排放如生物质燃烧等影响以甄别出人为排放所引起的大气CO₂浓度变化量将是我们亟待突破的主要难题.

参考文献

- 1 Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, et al. Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- 2 International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook Special Report, Energy and Climate Change. Paris: OECD/IEA, 2015
- 3 Liu Y, Lü D R, Chen H B, et al. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO₂ (in Chinese). Remote Sens Technol Appl, 2010, 26: 247–254 [刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 卫星遥感大气 CO₂ 的技术与方法进展综述. 遥感技术与应用, 2011, 26: 247–254]
- 4 Lei L, Guan X, Zeng Z, et al. A comparison of atmospheric CO₂ concentration GOSAT-based observations and model simulations. Sci China Earth Sci, 2014, 57: 1393–1402
- 5 Zeng N, Zhao F, Collatz G J, et al. Agricultural green revolution as a driver of increasing atmospheric CO₂ seasonal amplitude. Nature, 2014, 515: 394–397
- 6 Crisp D, Miller C, The OCO Science Team. Contributions of the Orbiting Carbon Observatory (OCO) to the detection of anthropogenic CO₂ emissions. In: EGU General Assembly. Vienna: European Geosciences Union, 2010. 7342
- 7 Buchwitz M, Reuter M, Schneising O, et al. The Greenhouse Gas Climate Change Initiative (GHG-CCI): Comparison and quality assessment of near-surface-sensitive satellite-derived CO₂ and CH₄ global data sets. Remote Sens Environ, 2015, 162: 344–362
- 8 Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, et al. Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results. Sci Online Lett Atmos Sola, 2009, 5: 160–163
- 9 O'Dell C W, Connor B, Bösch H, et al. The ACOS CO₂ retrieval algorithm-Part 1: Description and validation against synthetic observations. Atmos Meas Tech, 2012, 5: 99–121
- 10 Cogan A J, Boesch H, Parker R J, et al. Atmospheric carbon dioxide retrieved from the Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT): Comparison with ground-based TCCON observations and GEOS-chem model calculations. J Geophys Res, 2012, 117: D21301, doi: 10.1029/2012JD018087.
- 11 Hakkarainen J, Ialongo I, Tamminen J. Direct space-based observations of anthropogenic CO₂ emission areas from OCO-2. Geophys Res Lett, 2016, 43: 11400–11406
- 12 Janardanan R, Maksyutov S, Oda T, et al. Comparing GOSAT observations of localized CO₂ enhancements by large emitters with inventory-based estimates. Geophys Res Lett, 2016, 43: 3486–3493
- 13 Kort E A, Frankenberg C, Miller C E, et al. Space-based observations of megacity carbon dioxide. Geophys Res Lett, 2012, 39: 26–33
- 14 Bovensmann H, Buchwitz M, Burrows J P, et al. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO₂ emissions from space and related applications. Atmos Meas Tech, 2010, 3: 781–811
- 15 Schneising O, Heymann J, Buchwitz M, et al. Anthropogenic carbon dioxide source areas observed from space: Assessment of regional enhancements and trends. Atmos Chem Phys, 2013, 13: 2445–2454
- 16 Keppel-Aleks G, Wennberg P O, O'Dell C W, et al. Towards constraints on fossil fuel emissions from total column carbon dioxide. Atmos Chem Phys, 2013, 13: 4349–4357
- 17 Guan D, Zhu L, Yong G, et al. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories. Nat Clim Change, 2012, 2: 672–675
- 18 NIES GOSAT Project. Algorithm theoretical basis document for CO₂ and CH₄ column amounts retrieval from GOSAT TANSO-FTS SWIR, NIES-GOSAT-PO-017, V1.0. 2010

- 19 Guerlet S, Butz A, Schepers D, et al. Impact of aerosol and thin cirrus on retrieving and validating XCO₂ from GOSAT shortwave infrared measurements. *J Geophys Res-Atmos*, 2013, 118: 4887–4905
- 20 Bu R, Lei L, Guo L J, et al. Temporal and spatial potential application of satellite remote sensing of atmospheric CO₂ concentration (in Chinese). *J Remote Sens*, 2015, 19: 35–45 [布然, 雷莉萍, 郭丽洁, 等. 大气 CO₂ 浓度时空变化的卫星遥感应用潜力分析. 遥感学报, 2015, 19: 35–45]
- 21 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1996, 77: 437–472
- 22 Zhang H F, Chen B Z, Laan-Luijckx I T V D, et al. Net terrestrial CO₂ exchange over China during 2001–2010 estimated with an ensemble data assimilation system for atmospheric CO₂. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 3500–3515
- 23 Chen C, Sun Y L, Xu W Q, et al. Characteristics and sources of submicron aerosols above the urban canopy (260 m) in Beijing, China, during the 2014 APEC summit. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15: 22889–22934
- 24 Xu W Q, Sun Y L, Chen C, et al. Aerosol composition, oxidative properties, and sources in Beijing: Results from the 2014 Asia-Pacific Economic Cooperation Summit study. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15: 23407–23455
- 25 Sun Y, Wang Z, Wild O, et al. “APEC Blue”: Secondary aerosol reductions from emission controls in Beijing. *Sci Rep*, 2016, 6: 20668, doi: 10.1038/srep20668

Summary for “人为排放所引起大气 CO₂ 浓度变化的卫星遥感观测评估”

Assessment of atmospheric CO₂ concentration enhancement from anthropogenic emissions based on satellite observations

LEI LiPing^{1*}, ZHONG Hui^{1,2*}, HE ZhongHua^{1,2}, CAI BoFeng³, YANG ShaoYuan^{1,2},
WU ChangJiang^{1,2}, ZENG ZhaoCheng^{1,4}, LIU LiangYun¹ & ZHANG Bing¹

¹ Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

² College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ The Center for Climate Change and Environmental Policy, Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China;

⁴ Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena CA91125, USA

* Corresponding authors, E-mail: leilp@radi.ac.cn; zhonghui@radi.ac.cn

Anthropogenic CO₂ emissions are the dominant factor driving atmospheric CO₂ concentration enhancement. However, the magnitude of the increase of CO₂ concentration due to regional anthropogenic emissions remains unclear. Satellite-derived observations of atmospheric CO₂ concentration provide a promising and effective means by which to monitor and evaluate regional anthropogenic CO₂ emissions. This study used the column-averaged dry air mole fraction of CO₂ (XCO₂) derived from the observations of the greenhouse gases observation satellite (GOSAT) to assess quantitatively the effect of anthropogenic emissions on CO₂ enhancement in two study areas located within the same latitudinal zone (35°–50°N): one in northern China and the other in the eastern USA. The study collected original XCO₂ data (v02.xx) from a five-year period (2010–2014), released by the GOSAT project of the National Institute for Environmental Studies in Japan. Two high-density urban areas were selected as anthropogenic emission regions (emission-regions). These areas comprised the Beijing-Tianjin-Hebei area centered on Beijing (43 million square kilometers) in northern China and the urban agglomeration that includes New York City (55 million square kilometers) in the eastern USA, for which the magnitudes of anthropogenic CO₂ emissions were about 950 and 1312 Tg CO₂/a, respectively, according to the CO₂ emission inventory in 2010 released by the Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Two regions with lower emissions, considered as background-regions for comparison with the emission-regions, were prepared according to the distribution of potential temperature and CO₂ emission data from CDIAC, where anthropogenic CO₂ emissions in 2010 were about 127 and 123 Tg CO₂/a, respectively. The yearly averaged XCO₂ data were calculated based on the seasonally averaged XCO₂ data using the original GOSAT XCO₂ retrievals from the four regions. In comparison with the background-regions, the results showed the enhancements of CO₂ concentration in the emission-regions were, on average, 1.8 and 2.0 ppm in the Beijing-Tianjin-Hebei area and urban agglomeration in the USA, respectively. The maximum and minimum enhancements in China were 2.4 ppm in 2010 and 1.3 ppm in 2014, respectively. The maximum and minimum enhancements in the USA were 2.6 ppm in 2012 and 1.6 ppm in 2010, respectively. Moreover, the enhancements were highest in winter (2.4±0.6 and 2.8±0.8 ppm in China and the USA, respectively). Intriguingly, analysis of the monthly variations revealed that CO₂ concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei area decreased anomalously by 3.2 ppm during the Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) summit in November 2014 compared with the period before the summit. This anomalous drop probably reflects the effects of the artificial control of CO₂ emissions implemented by the government during the APEC summit in order to improve air quality. The above enhancements of CO₂ concentration prefer to be slightly less than the actual enhancements of CO₂ concentration induced by anthropogenic emissions due to bio-ecological flux in the emission-regions. Based on an investigation of bio-ecological flux in the Beijing-Tianjin-Hebei area in earlier researches, the actual CO₂ enhancement induced by anthropogenic emissions should be added an increment of less than 0.6 ppm absorbed by the bio-ecological system to the above-mentioned 1.8 ppm enhancement. The study results demonstrate the efficacy of using satellite-derived observations for evaluating the impact of anthropogenic emissions on the enhancement of atmospheric CO₂ by analyzing changes in regional CO₂ concentration. This provides a promising method with which to verify regional anthropogenic emissions and to support governmental oversight, control, and decision making regarding CO₂ emission reduction.

anthropogenic emissions, atmospheric CO₂ concentration, greenhouse gases observation satellite (GOSAT), regional contrasts

doi: 10.1360/N972016-01316