

# 基于 GOSAT L4B 数据的全球和中国区域近地面 CO<sub>2</sub> 含量变化分析

王舒鹏<sup>1</sup>, 张兴赢<sup>1</sup>, 王维和<sup>1</sup>, 方莉<sup>2</sup>

1. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081
2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101

**摘要** CO<sub>2</sub>作为最重要的温室气体,是造成全球温室效应的主要原因之一。利用 GOSAT L4B 全球分布数据,分析全球及中国地区近地面 CO<sub>2</sub>含量的时空分布特征。研究发现,北半球近地面 CO<sub>2</sub>含量明显高于南半球,CO<sub>2</sub>年增长率约 2 ppm。全球高值区主要出现在东亚、俄罗斯、欧洲和美国等人口众多、经济发达地区。北半球近地面 CO<sub>2</sub>含量季节分布显示,冬季的 CO<sub>2</sub>含量最高,夏季最低。中国区域近地面 CO<sub>2</sub>含量在空间分布上较为集中,东西差异显著,总体呈东高西低的特征,高值区主要集中于中国华北和长三角地区。中国范围内近地面 CO<sub>2</sub>含量具有明显的季节变化特征,月平均含量 4 月(春季)升至最高值,为 396.5 ppm;7 月(夏季)降至最低值,为 382.8 ppm。

**关键词** CO<sub>2</sub>分布;GOSAT;温室效应

**中图分类号** P407

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.17.006

## Global and China-based regional near-surface distributions of CO<sub>2</sub> concentrations based on GOSAT L4B data

WANG Shupeng<sup>1</sup>, ZHANG Xingying<sup>1</sup>, WANG Weihe<sup>1</sup>, FANG Li<sup>2</sup>

1. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract** CO<sub>2</sub> is the most important greenhouse gas and the main cause of the global warming. In this paper, GOSAT L4B data sets of CO<sub>2</sub> concentrations near the ground are used for the analysis of the global and regional distributions of CO<sub>2</sub>. It is found that the ground CO<sub>2</sub> concentration is significantly higher in the Northern Hemisphere than in the southern hemisphere. The yearly CO<sub>2</sub> concentration growth rate is about 2 ppm. The global high-value areas are in places of large populations and developed economics in East Asia, Russia, Europe and the United States. In the Northern Hemisphere seasonal distributions of CO<sub>2</sub> concentrations near the ground, the highest CO<sub>2</sub> concentration appears in winter and the lowest in summer. CO<sub>2</sub> concentration near ground in China has significantly high values in North China and the Yangtze River Delta region, with obvious seasonal variations, with the highest monthly average value of 396.5 ppm in April and the minimum value of 382.8 ppm in July.

**Keywords** CO<sub>2</sub> distribution; GOSAT; greenhouse effect

温室气体指可以在热红外波段吸收和辐射能量的气体,它是造成温室效应的主要原因。主要的温室气体包括二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)、臭氧(O<sub>3</sub>)等,而 CO<sub>2</sub>对温室效应的总体贡献最为显著。CO<sub>2</sub>作为最重要的温

收稿日期:2015-06-18;修回日期:2015-07-14

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA12A104);国家自然科学基金项目(41306185);高分辨率对地观测系统重大专项气象应用示范项目(E310/1112);高分辨率对地观测系统重大专项应用共性关键技术项目(Y20A-D23);中国气象局公益性行业(气象)科研专项(GY-HY201106045)

作者简介:王舒鹏,助理研究员,研究方向为大气成分卫星遥感,电子信箱:wangsp@cma.gov.cn;方莉(通信作者),助理研究员,研究方向为大气气溶胶及地表反射率遥感,电子信箱:fangli@radi.ac.cn

引用格式:王舒鹏,张兴赢,王维和,等.基于 GOSAT L4B 数据的全球和中国区域近地面 CO<sub>2</sub> 含量变化分析[J].科技导报,2015,33(17):63-68.

温室气体,其大气中的含量自工业革命后急剧增加,从工业革命前(约1750年)的280 ppm增加到2014年的超过400 ppm<sup>[1]</sup>。温室气体对大气能量的平衡影响主要可以用辐射强迫表示,CO<sub>2</sub>的直接辐射强迫约为1.66 W/m<sup>2</sup><sup>[2]</sup>,CH<sub>4</sub>的直接辐射强迫约0.48 W/m<sup>2</sup>,仅次于CO<sub>2</sub>,约为CO<sub>2</sub>的1/3。为了精确预测主要温室气体含量及其对气候变化的作用,首先需要明确其在全球及区域范围内的含量。Rayner等<sup>[3]</sup>研究证明,全球CO<sub>2</sub>柱含量精度优于1%(误差≤4 ppm),可以减小对区域CO<sub>2</sub>源汇估计的不确定性。Alkhaled等<sup>[4]</sup>利用CO<sub>2</sub>柱含量数据改进了区域碳循环的估算精度。

目前,可以通过地基观测网络精确获取CO<sub>2</sub>柱含量。然而因地基观测覆盖有限,很难获得全球碳源汇的分布情况,基于卫星载荷的温室气体监测由于其高时空分辨率、全球覆盖能力及低成本已经成为碳源汇监测的主要手段。到目前为止,已有多颗搭载红外高光谱观测仪载荷上天,其反演产品已经投入业务化运行。搭载在EOS AQUA平台上的热红外高光谱载荷AIRS(atmospheric infrared sounder)<sup>[5]</sup>,EOS AURA平台上的TES(tropospheric emission spectrometer)<sup>[6]</sup>和搭载在MetOp平台上的IASI(infrared atmospheric sounding interferometer)<sup>[7]</sup>都可以实现5~15 km高度上的温室气体探测,但它们对近地面温室气体的探测灵敏度不高,导致无法探测主要存在于对流层内的碳源汇信息<sup>[8]</sup>。

近红外高光谱遥感由于其对近地面CO<sub>2</sub>含量变化的高敏感性,逐渐成为监测与人类活动相关的碳源汇信息的主要手段。2002年,搭载在ENVISAT上发射的SCIAMACHY(scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography)<sup>[9]</sup>,2009年发射的近红外波段的高光谱探测仪GOSAT<sup>[10]</sup>及2014年发射的美国的OCO-2<sup>[8]</sup>是目前仅有的可以通过观测近红外波段的后向反射太阳光谱反演近地面CO<sub>2</sub>含量的载荷。即将发射的下一代近红外高光谱温室气体载荷,包括欧洲的CarbonSat<sup>[11]</sup>及中国的TanSat等<sup>[12,13]</sup>多个载荷,都将为更好地获取近地面温室气体源汇信息提供支持。

本研究基于GOSAT近红外波段对近地面CO<sub>2</sub>含量高敏感性的特性,利用GOSAT L4B全球分布数据,分析全球及中国地区近地面CO<sub>2</sub>含量的时空分布特征。

## 1 数据来源

采用2010年1月—2012年10月的6 h数据网格化GOSAT L4B产品(V02.03),水平分辨率为2.5°×2.5°,可从GUIG网站(<http://da-ta.gosat.nies.go.jp/GosatUserInterfaceGatewayGateway/guig/GuigPage/open.do>)获得。GOSAT于2009年1月23日起在轨运行,用于监测近地面CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的全球分布。它采用太阳同步轨道,轨道高度666 km,重访周期为3 d,降交点地方时为13:00。GOSAT上搭载了用于探测温室气体含量的傅里叶光谱仪(TANSO-FTS)和用于云及气溶胶观测的成像仪(TANSO-CAI)<sup>[10]</sup>。

GOSAT L4B产品是在L2级CO<sub>2</sub>柱总量反演产品<sup>[10]</sup>基础上加入碳通量数据库(包括人为排放源、生物燃烧数据、地气通量及海气界面通量),同时加入地基温室气体观测数据得到的。为了评价GOSAT L4B数据的可靠性,将GOSAT近地面数据与大气本底站的地面观测数据进行趋势统计比较分析。选取2010年1月—2012年10月在瓦里关(36°17'N,100°54'E)WMO大气本底站的月平均CO<sub>2</sub>观测数据与GOSAT L4B近地面(975 hPa)CO<sub>2</sub>含量对应产品进行对比分析,结果如图1所示。

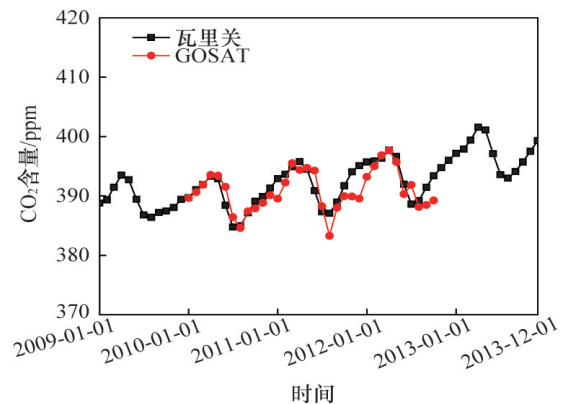


图1 GOSAT L4B近地面CO<sub>2</sub>含量与瓦里关地基观测数据对比

Fig. 1 Comparison of GOSAT L4B CO<sub>2</sub> products with the ground-based measurements at Waliguan station

经分析可知,2010年1月—2012年10月GOSAT(WLG)月平均结果与地面本底观测结果的均值差小于1 ppm;GOSAT(WLG)反演结果与地面本底观测结果的月均标准差为1.59 ppm,相关系数约为0.96。赵静等<sup>[14]</sup>利用2009年6月—2010年5月GOSAT L4B产品与地基观测站点比较也取得较高的一致性(均方根误差为2.26 ppm,相关系数为0.96)。可见,GOSAT L4B近地面CO<sub>2</sub>含量数据的精度高、稳定性好,可以作为分析全球范围内的CO<sub>2</sub>分布数据源。

## 2 分析与讨论

### 2.1 全球近地面CO<sub>2</sub>含量变化分析

图2给出了2010—2012年近地面CO<sub>2</sub>含量的年平均值全球分布。可以看出,北半球CO<sub>2</sub>含量明显高于南半球,是由于主要的陆地和人口在北半球,生物质燃料排放和陆地生物圈排放主要集中于北半球<sup>[15]</sup>。2010—2012年CO<sub>2</sub>含量呈现逐级递增趋势,分别为388.6、390.6和392.3 ppm。高值区主要出现在东亚、俄罗斯、欧洲和美国等人口众多,经济发达地区。北半球CO<sub>2</sub>平均比南半球高约8 ppm。CO<sub>2</sub>含量逐年递增是由于生物质燃料燃烧排放增加,然而并非所有的生物质燃料燃烧排放的CO<sub>2</sub>都在大气中,40%~50%的CO<sub>2</sub>被海洋和陆地生物圈吸收<sup>[16]</sup>。

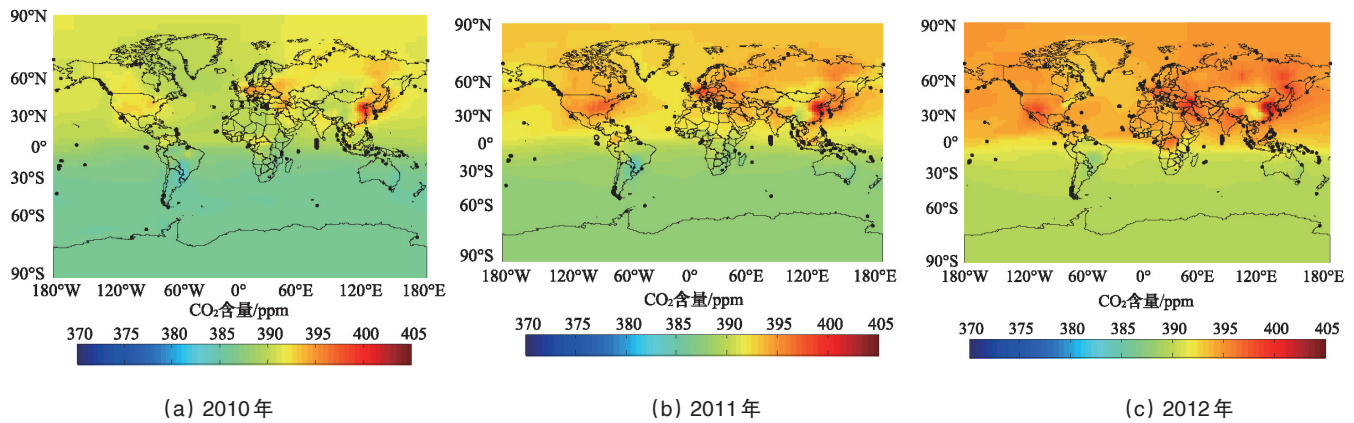


图2 2010—2012年近地面CO<sub>2</sub>含量年平均值全球分布

Fig. 2 Global distribution of the annual average of the near-surface CO<sub>2</sub> concentration during years of 2010–2012

图3为2010年3月—2011年2月全球近地面CO<sub>2</sub>含量季平均分布。春夏秋冬季分别对应于3—5月、6—8月、9—11月以及12月一次年2月。由于海洋碳通量贡献相比陆地低1个量级左右,所以同一季节,同一纬度带,近地面CO<sub>2</sub>含量在海洋上低于陆地。在北半球,冬季近地面CO<sub>2</sub>含量最高(约391.5 ppm),夏季最低(约386.5 ppm),春季(约389.8 ppm)高

于秋季(约388.4 ppm)。这是由于冬季和春季北半球陆地生物圈以呼吸作用为主<sup>[5]</sup>,且冬季为北半球高纬度地区供暖季,大量生物质燃料燃烧加剧了CO<sub>2</sub>排放。北半球夏秋季生物质燃料燃烧相应减少,且碳循环过程以陆地表面植被光合作用为主,光合作用吸收CO<sub>2</sub>释放O<sub>2</sub>,使CO<sub>2</sub>含量降低。南半球与北半球季节相反,夏秋季陆地表面CO<sub>2</sub>含量高于冬春季。

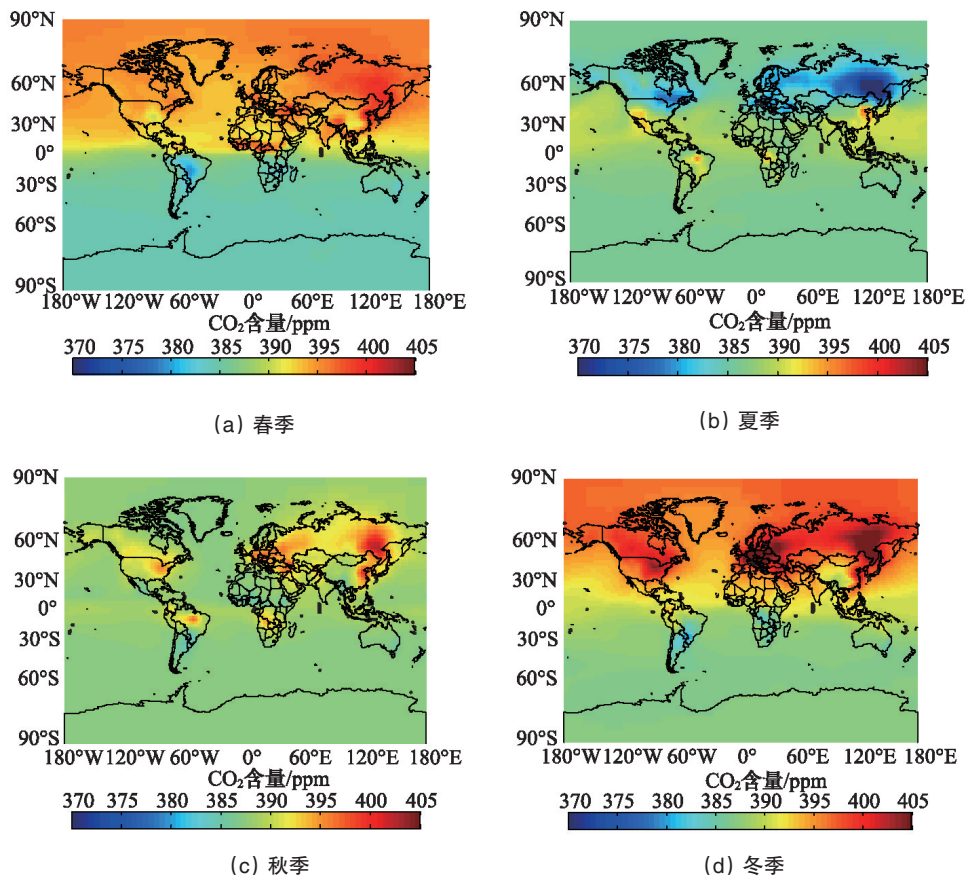


图3 近地面CO<sub>2</sub>含量的季平均值全球分布

Fig. 3 Global distribution of the seasonal average of the near-surface CO<sub>2</sub> concentration

## 2.2 中国区域近地面 CO<sub>2</sub> 含量变化分析

图4给出2010年3月—2011年2月中国区域不同季节近地面(975 hPa)的季平均 CO<sub>2</sub> 含量空间分布。可以看出,春季和冬季 CO<sub>2</sub> 含量(395.7 和 394.9 ppm)明显高于夏季和秋季(分别为 387.8 和 390.9 ppm)。这是由于冬季和春季为供暖季,大量生物质燃料燃烧,排放大量 CO<sub>2</sub>;此外,冬季和春季植

物的呼吸作用大于光合作用也会排放 CO<sub>2</sub>。而夏秋季,陆地表面植被的光合作用大于呼吸作用,CO<sub>2</sub> 被吸收转化为其他形式的碳通量。

月平均值分析表明,月平均最大值出现在4月,为 396.6 ppm;最小值出现在7月,为 387.1 ppm。季节变化可以达到约 7.9 ppm。

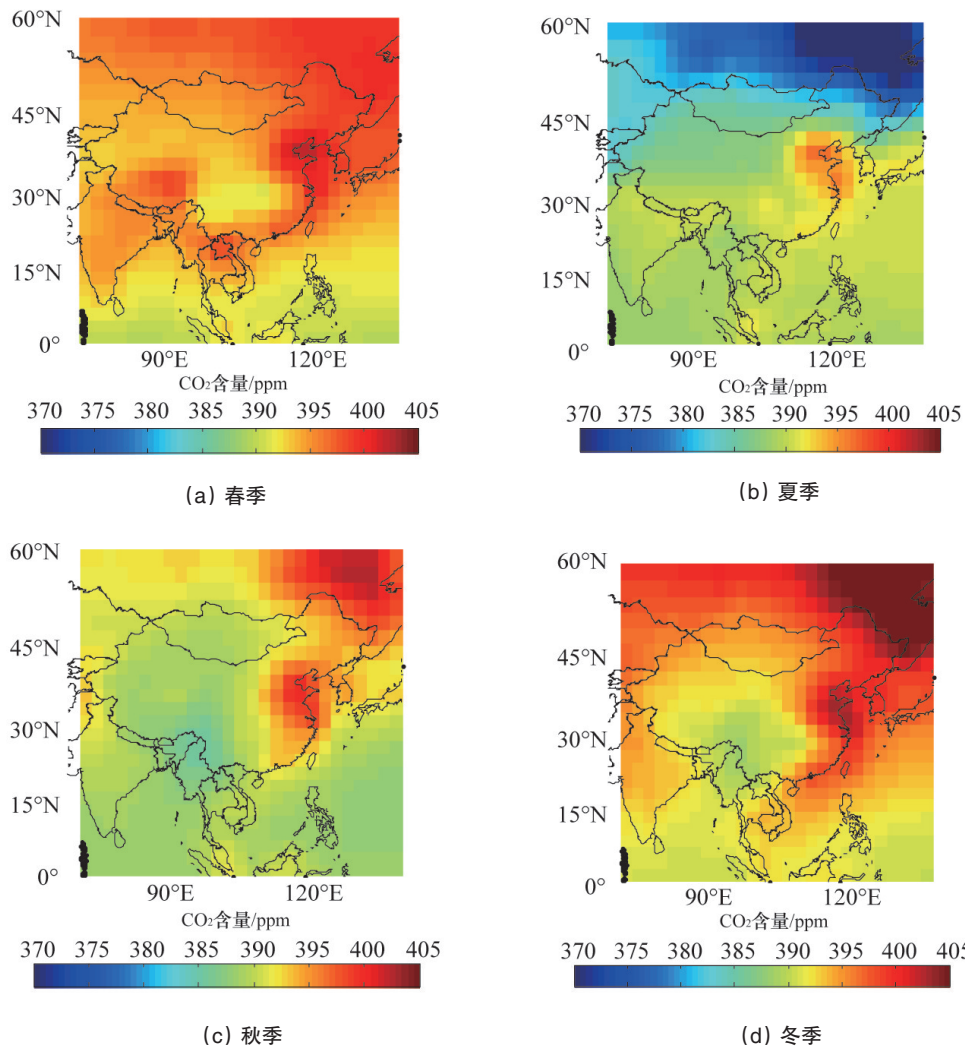


图4 2010年3月—2011年2月中国区域近地面 CO<sub>2</sub> 含量季平均

Fig. 4 Seasonal average of the near-surface CO<sub>2</sub> concentration over China during March 2010–February 2011

图5给出2010年3月—2011年2月中国典型地理区划不同季节的 CO<sub>2</sub> 含量分布统计(各地理区划对应经纬度范围见表1)。可以看出,春季 CO<sub>2</sub> 含量高值区主要集中于东北、华北和长三角地区,而西部地区及西南地区东部为低值区;夏季 CO<sub>2</sub> 含量高值区主要集中于华北、长三角地区、珠三角地区和华中地区,而此时的内蒙古中北部和东北平原则呈低值分布;秋季 CO<sub>2</sub> 含量高值区分布在长三角和华中地区,而西部地区 and 西南地区东部呈低值分布;冬季高值区主要集中于华北、东北和长三角地区,西部地区 and 西南地区东部同样为 CO<sub>2</sub>

含量低值区。以上结论与赵静等<sup>[16]</sup>的研究结果基本一致。白文广等<sup>[17]</sup>得出,中国区域对流层中层 CO<sub>2</sub> 最高值出现在春季,最低值出现在秋季,戴丽君等<sup>[18]</sup>得出,中国区域对流层中层 CO<sub>2</sub> 含量高值区春季含量最高,冬季最低。Gerbig<sup>[19]</sup>等认为,可能由于夏季高纬度急流活动频繁和强弱的程度不同,使得滞后的时间不等;地面观测结果最低值在夏季是因为对流层中层与底层 CO<sub>2</sub> 垂直输送混合、对流层中层 CO<sub>2</sub> 柱含量的降低需要一段时间,从而使 AIRS 观测结果滞后于地面观测结果。

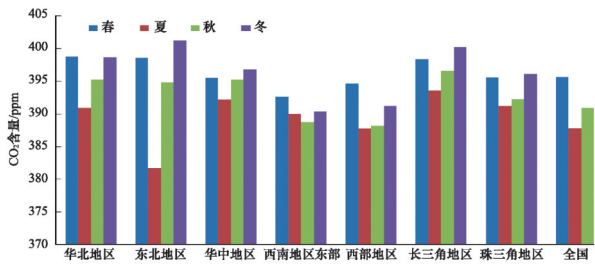


图5 2010年3月—2011年2月中国典型地理区划的近地面CO<sub>2</sub>含量季平均

Fig. 5 Seasonal average of the near-surface CO<sub>2</sub> concentration in different regions of China from March 2010 to February 2011

表1 中国不同地理区划经纬度范围  
Table 1 The longitudes and latitudes of main regions in China

地理区划	经纬度范围
华北地区	112°E~120°E, 35°N~43°N
东北地区	120°E~130°E, 40°N~50°N
华中地区	110°E~116°E, 27°N~35°N
西南地区东部	100°E~108°E, 23°N~33°N
西部地区	85°E~100°E, 30°N~40°N
长三角地区	116°E~122°E, 28°N~34°N
珠三角地区	111°E~117°E, 20°N~26°N
全国	85°E~130°E, 20°N~50°N

2010—2012年中国区域近地面年平均CO<sub>2</sub>含量分布见图6,可以看出年平均值呈现逐年增长趋势,2010年为392.15 ppm,2011年为393.82 ppm,2012年为395.36 ppm,平均每年

增长约1.6 ppm。CO<sub>2</sub>含量的年增长主要是由生物质燃料燃烧产生CO<sub>2</sub>累积所致。

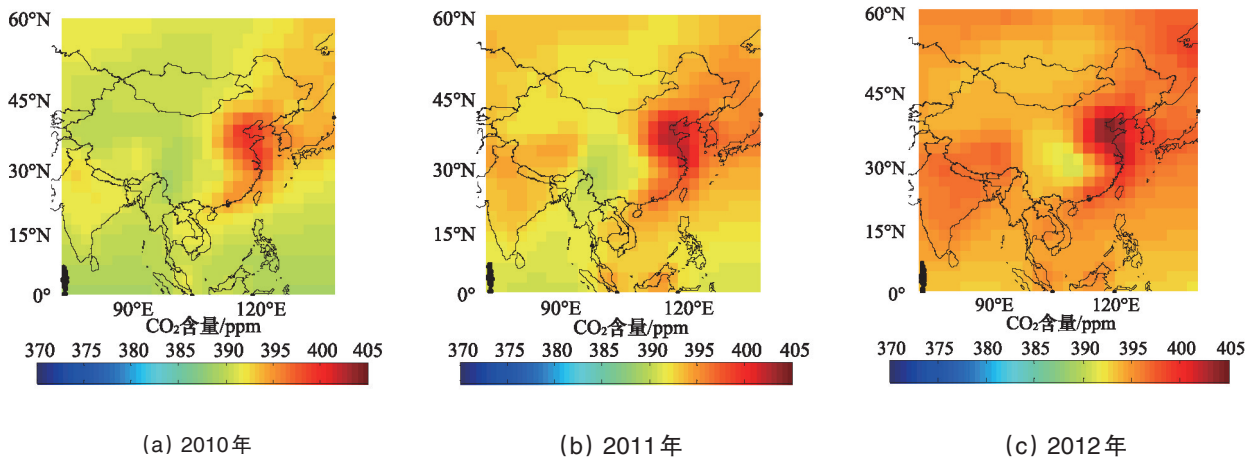


图6 2010—2012年中国区域近地面年平均CO<sub>2</sub>含量  
Fig. 6 Annual average of the near-surface CO<sub>2</sub> concentration in China during years of 2010–2012

### 3 结论

基于2010年1月—2012年10月GOSAT L4B近地面CO<sub>2</sub>含量分布数据,研究全球及中国范围内CO<sub>2</sub>分布情况。通过对季平均和年平均值的分布情况分析发现:

1) 依据近地面CO<sub>2</sub>含量全球分布结果可以看出,北半球CO<sub>2</sub>含量明显高于南半球,CO<sub>2</sub>含量年增长约2 ppm。高值区主要出现在东亚、俄罗斯、欧洲和美国等人口众多,经济发达地区。北半球近地面CO<sub>2</sub>含量季节分布显示冬季的CO<sub>2</sub>含量最高,夏季最低。

2) 中国区域近地面CO<sub>2</sub>含量在空间分布上较为集中,东西差异显著,总体呈东高西低的特征,高值区主要集中于中

国华北和长三角地区。中国区域近地面CO<sub>2</sub>含量具有明显的季节变化特征,月平均含量4月份(春季)升至最高值,为396.5 ppm;7月份(夏季)降至最低值,为382.8 ppm。

结论显示,通过近红外波段反演的CO<sub>2</sub>产品,可以在全球和区域尺度上对人类活动产生的碳排放进行定量化监测。然而影响利用近红外太阳反射光谱反演CO<sub>2</sub>含量的要素众多,为了提高近红外波段CO<sub>2</sub>的反演精度,还需要对影响反演精度的其他大气状态参数,尤其是云和气溶胶散射对反演结果的影响进行分析。

致谢:GOSAT研发中心提供L4级CO<sub>2</sub>含量数据。WDCGG(world data center for greenhouse gases)提供瓦里关地面CO<sub>2</sub>含量观测数据。

参考文献 (References)

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: The physical science basis, contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Frankenberg C, Meirink J F, van Weele M, et al. Assessing methane emissions from global space-borne observations[J]. Science, 2005, 308 (5724): 1010-1014.
- [3] Rayner P J, O'Brien D M. The utility of remotely sensed CO<sub>2</sub> concentration data in surface source inversions[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(1): 175-178.
- [4] Alkhaled A, Michalak A M, Kawa S R, et al. A global evaluation of the regional spatial variability of column integrated CO<sub>2</sub> distributions[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D20): D20303.
- [5] Maddy E S, Barnett C D, Goldberg M, et al. CO<sub>2</sub> retrievals from the atmospheric infrared sounder. Methodology and validation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D11): D11301.
- [6] Beer R, Glavich T A, Rider D M. Tropospheric emission spectrometer for the earth observing system's aura satellite[J]. Applied Optics, 2001, 40 (15): 2356-2367.
- [7] Crevoisier C, Chédin A, Matsueda H, et al. First year of upper tropospheric integrated content of CO<sub>2</sub> from IASI hyperspectral infrared observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(14): 4797-4810.
- [8] Boland S, Bösch H, Brown L, et al. The need for atmospheric carbon dioxide measurements from space: Contributions from a rapid reflight of the orbiting carbon observatory[R]. Pasadena, CA: OCO Science Team, NASA Jet Propulsion Laboratory, 2009.
- [9] Schneising O, Buchwitz M, Bovensmann H, et al. Three years of SCIAMACHY carbon dioxide and methane column-averaged dry air mole fraction measurements[C]. Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland, 23-27 April, 2007.
- [10] Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, et al. Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: First preliminary results[J]. Sola, 2009, 5: 160-163.
- [11] Reuter M, Bovensmann H, Buchwitz M, et al. Retrieval of atmospheric CO<sub>2</sub> with enhanced accuracy and precision from SCIAMACHY: Validation with FTS measurements and comparison with model results [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(4): 1-13.
- [12] 刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 卫星遥感大气 CO<sub>2</sub> 的技术与方法进展综述 [J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 247-254.
- Liu Yi, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(2): 247-254.
- [13] 施海亮, 熊伟, 罗海燕, 等. 新型超光谱大气 CO<sub>2</sub> 遥感探测技术[J]. 光电工程, 2013, 40(8): 36-41.
- Shi Hailiang, Xiong Wei, Luo Haiyan, et al. Novel hyper-spectral technology for atmospheric carbon dioxide detection[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(8): 36-41.
- [14] 赵静, 崔伟宏. 中国区域近地面 CO<sub>2</sub> 时空分布特征研究[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(2): 207-213.
- Zhao Jing, Cui Weihong. Spatial and temporal distribution characteristics of CO<sub>2</sub> column concentration in China from 2009 to 2010 [J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(2): 207-213.
- [15] Andres R J, Marland G, Fung I, et al. A 1 × 1 distribution of carbon dioxide emissions from fossil fuel consumption and cement manufacture [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(3): 419-429.
- [16] Keppel-Aleks G, Wennberg P O, Schneider T. Sources of variations in total column carbon dioxide[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(8): 3581-3593.
- [17] 白文广, 张兴赢, 张鹏. 卫星遥感监测中国地区对流层二氧化碳时空变化特征分析[J]. 科学通报, 2010, 55(30): 2953-2960.
- Bai Wenguang, Zhang Xingying, Zhang Peng. Temporal and distribution of tropospheric CO<sub>2</sub> over China based on satellite observation[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(30): 2953-2960.
- [18] 戴丽君, 崔伟宏. 2003—2010年中国对流层 CO<sub>2</sub> 时空分布研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1266-1270.
- Dai Lijun, Cui Weihong. Temporal and spatial distribution of tropospheric CO<sub>2</sub> over China during 2003-2010[J]. Ecology and Environment Sciences, 2012, 21(7): 1266-1270.
- [19] Gerbig C, Lin J C, Wofsy S C, et al. Toward constraining regional-scale fluxes of CO<sub>2</sub> with atmospheric observations over a continent: 2. Analysis of cobra data using a receptor-oriented framework[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D24): 4757.

(责任编辑 王媛媛)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。