

中国区域近地面CO₂时空分布特征研究

赵 静, 崔伟宏

(中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 本文利用2009年6月至2010年5月日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)、日本环境署(MOE)与日本环境研究(NIES)所等联合开发的全球首颗专用温室气体观测卫星“呼吸号”(GOSAT)上的被动红外探测器(TANSO)官方反演的近地面975hPa左右的CO₂浓度L4B数据产品,采用ArcGIS地统计分析方法,对比瓦里关全球大气本底站地面观测数据进行真实性检验,分析中国区域近地面CO₂浓度分布的时空变化特征。结果表明:中国区域近地面CO₂浓度空间分布集中,东高西低,差异显著;CO₂浓度具有明显的季节变化特征,月平均浓度4月份(春季)升至最高,7月份(夏季)降至最低。结合“中国统计年鉴2012”中的2009年人口密度、能源消费总量(煤)和GDP等辅助数据对比发现:导致中国近地面CO₂浓度空间分布规律的原因多种多样,不可轻易定论是人为或自然使然,需进一步深入研究。

关键词: 近地面; CO₂; GOSAT; 时空分布

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2014.00207

1 引言

自工业革命以来,大气中CO₂增长了约35%。大气中CO₂体积分数的波动取决于参与碳循环的各个碳库间碳交换通量的变化,其源自海洋释放、生物呼吸、化石燃料燃烧、土地利用变化等,而陆地生态系统光合作用、海洋呼吸、碳沉积等是大气中CO₂的重要汇^[1-2]。传统的地面CO₂观测方法都为单点测量,设备复杂、操作困难且价格昂贵,站点数目少且区域分布很不均匀^[3],缺乏对全球大范围、实时探测的能力和统一的探测方法,很难应用于中国区域CO₂空间分布特征的研究。卫星遥感监测方法可提供稳定、连续、全球系统的大气成分信息,更好地捕捉了CO₂全球时空分布与变化特征,提高了人类对碳源汇与碳循环的认识,增强预测大气CO₂浓度的能力^[4-5]。

2002年美国EOS/Aqua卫星搭载的AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)传感器,对全球CO₂进行了遥感探测研究(至今仍正常运作^[6])。2002年搭载于欧洲太空局的ENVISAT卫星上的SCIAMACHY(Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography)传感器观测数据

可反演得到大气中CO₂柱总量^[7]。2006年欧洲发射的第一颗极轨气象卫星METOP-A上搭载的IASI(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer),利用CO₂在15μm波段的发射特性也可反演获得对流层中上层的CO₂含量^[8]。2009年日本发射的全球首颗专用温室气体观测卫星GOSAT的主要任务是探测全球范围内2种最主要的温室气体CO₂和CH₄^[9-10]。继日本之后,2009年2月美国首颗专门用于探测大气中CO₂的“轨道碳观测者”(Orbiting Carbon Observatory, OCO)卫星升空,主要观测目标是服务于全球大气碳循环研究的大气低层CO₂的含量和分布,但由于其整流罩未能分离而导致发射失败^[11]。我国至今尚未有投入实用的星载高光谱探测仪器,差距明显。新一代极轨卫星风云三号增加了大气垂直探测仪器——红外分光计(Infrared Atmospheric Sounder IRAS)——可实现对全球大气CO₂浓度的连续监测,但其只具有一个CO₂探测通道^[12]。

本文针对温室气体与全球气候变化两者关系这一热点问题,选用GOSAT L4B全球分布数据,利用GOSAT近红外波段对近地面信息最为敏感、可获得边界层的CO₂浓度信息这一特性,采用ArcGIS地统计分析方法^[13],利用瓦里关全球大气本底站观

收稿日期:2013-05-23;修回日期:2013-10-20。

基金项目:国家科技支撑计划项目“我国绿色低碳发展的关键支撑政策与技术研究——跟踪全球气候变化不确定性研究及各国气候变化政策调整”研究课题(2012BAC20B00)。

作者简介:赵 静(1988-),女,江苏镇江人,硕士生,研究方向为遥感三维重建理论与方法。E-mail: zhaojingzjtozx@163.com

测数据对 GOSAT 卫星产品进行真实性检验, 结合“中国统计年鉴 2012”(http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2012/indexch.htm) 的 2009 年人口密度、能源消费总量(煤)和 GDP 等辅助数据, 分析了中国区域近地面 CO₂ 浓度的时空分布特征。

2 数据源分析与方法

本文涉及的 GOSAT 卫星遥感数据产品来自日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)、日本环境署(MOE)、日本环境研究所(NIES)等联合开发的全球首颗专用温室气体观测卫星“呼吸号”(GOSAT)上的被动红外探测器(TANSO)官方反演的 CO₂ 数据产品^[14-15]。本文所使用的 2009 年 6 月至 2010 年 5 月之间 GOSAT 的 CO₂ 柱总量 L4B 产品为水平分辨率为 2.5°×2.5°的 6 小时数据网格化 NC 数据, 可从 GUIG(Gosat User Interface Gateway)网站(http://data.gosat.nies.go.jp/GosatUserInterfaceGateway/guig/GuigPage/open.do) 获得。

为了验证 GOSAT 近地面数据用于中国区域近地面 CO₂ 时空分布特征研究的可靠性, 将 GOSAT 近地面数据与瓦里关全球大气本底站的地面观测数据进行趋势统计比较分析。分别选取 2009 年 6 月至 2010 年 5 月 GOSAT 近地面数据在瓦里关(36°17' N, 100°54' E)的反演结果、在中国区域的反演结果(以下用 GOSAT(WLG)和 GOSAT(China)表示)和瓦里关大气本底 CO₂ 浓度观测结果进行对比分析, 如图 1(a)、(b)所示。表 1 列出了 GOSAT 近地面数据与瓦里关地面本底观测的共同观测月数、年均增长率、均值差、月均标准差、相关系数等数据。

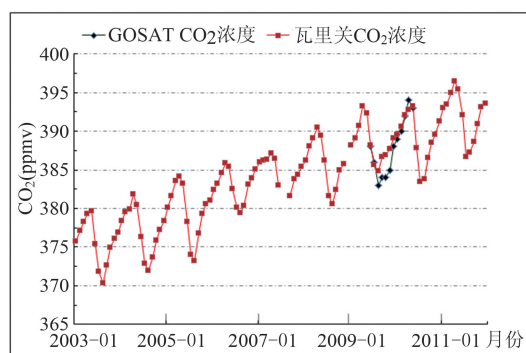
经趋势比较分析可发现: GOSAT 近地面数据

表 1 2009 年 6 月-2010 年 5 月本底站观测与 GOSAT 反演结果比较

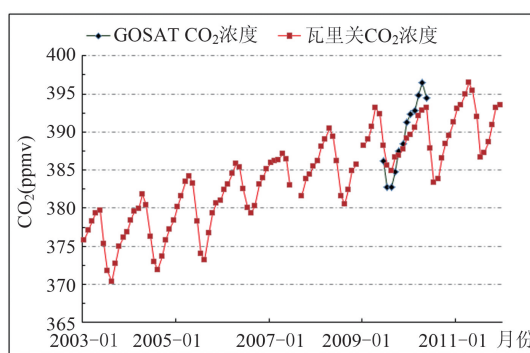
Tab.1 Comparison of GOSAT inversion results with Waliguan background atmospheric CO₂ concentration observations from June 2009 to May 2010

数据源	站点 ID	共同观测月数	均值 (ppmv)	均值差 (ppmv)	月均标准差 (ppmv)	相关系数
GOSAT(WLG)	WLG	12	388			
地面本底	WLG	12	388.945	-0.945	1.580	0.958
GOSAT (China)		12	389.560			
地面本底	WLG	12	388.945	0.615	2.258	0.961

在中国区域内的反演结果与瓦里关地面观测结果变化趋势吻合, 变化幅度相近, 可很好地捕捉近地面 CO₂ 的变化特征和规律; GOSAT 近地面数据无论在中国区域还是在瓦里关的反演结果与瓦里关大气本底站都有很好的一致性和相关性。经统计分析可知: 2009 年 6 月-2010 年 5 月 GOSAT(WLG)反演结果、GOSAT(China)反演结果与地面本底观测结果的均值差均小于 1, GOSAT(China)更小, 说明 GOSAT(China)近地面数据的系统误差更小; GOSAT(WLG)反演结果、GOSAT(China)反演结果与地面本底观测结果的月均标准差分别为 1.580ppmv 和 2.258ppmv, 均小于 2.5ppmv, GOSAT(WLG)更小, 说明 GOSAT(WLG)反演结果精度更高; GOSAT(WLG)反演结果、GOSAT(China)反演结果与瓦里关大气本底站观测结果的相关系数分别为 0.958 和 0.961, 均大于 0.95, GOSAT(China)更高, 说明 GOSAT(China)近地面反演结果与地面本底观测结果的相关性更高。综上所述, 表明 GOSAT 近地面数据在中国区域内精度高、稳定性好且相关性高, 并在 WLG 具体位置处的反演精度可得到保证。



(a) GOSAT(WLG)和瓦里关大气本底CO₂浓度观测对比



(b) GOSAT(China)和瓦里关大气本底CO₂浓度观测对比

图 1 2009 年 6 月-2010 年 5 月 GOSAT 反演结果和瓦里关大气本底 CO₂ 浓度观测对比

Fig.1 Contrast of GOSAT (WLG) (left) and GOSAT (China) (right) inversion results (from June 2009 to May 2010) with Waliguan background atmospheric CO₂ concentration observations

3 中国区域近地面CO₂时空分布特征分析

3.1 中国区域近地面CO₂空间分布规律

图2为2009年6月-2010年5月中国区域近地面(975hPa)月平均CO₂浓度空间分布图,图3为

2009年6月-2010年5月中国区域近地面(975hPa)CO₂浓度平均季节空间变化图,综合两幅图可以发现:12个月间中国区域近地面(975hPa)CO₂浓度在空间分布上具有明显的季节变化。春季(3-5月),CO₂浓度高值区主要集中于东北平原、内蒙古中北部、华东沿海地区,并延伸到了太平洋地区,其中,4

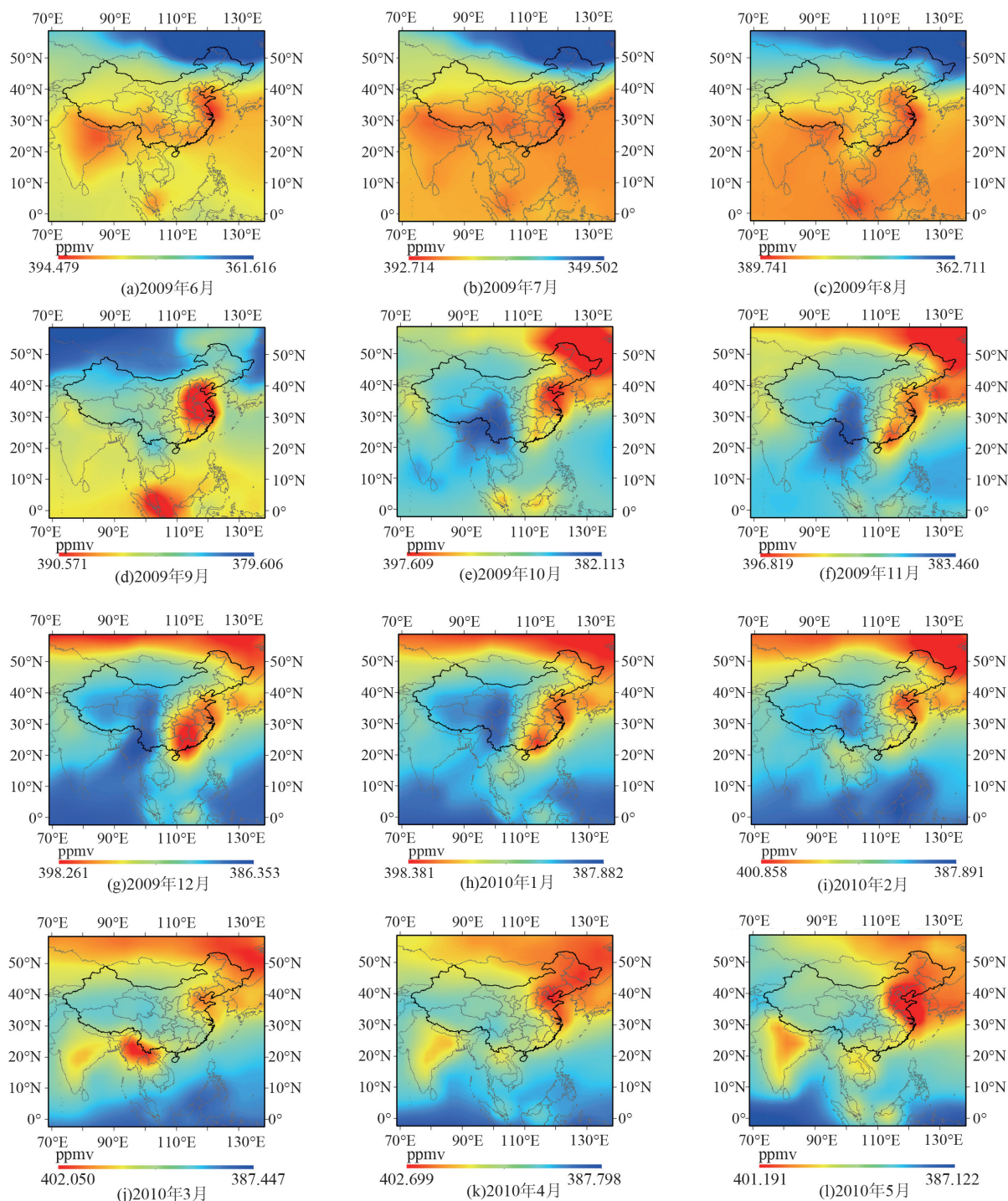


图2 2009年6月-2010年5月中国区域近地面(975hPa)月平均CO₂柱浓度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the monthly average CO₂ column concentration close to the ground surface (975 hPa) in China from June 2009 to May 2010

月份高值区均匀的分布于这3个区域,而5月份高值区几乎全部集中于华东沿海地区;夏季(6-8月),CO₂浓度高值区主要集中于华东沿海地区,而此时的内蒙古中北部和东北平原则呈低值分布;秋季(9-11月),CO₂浓度高值区覆盖范围更广,包括东北平原、内蒙古北部、华东沿海地区、华中地区、华南地区,并且延伸至太平洋地区的日韩一带,而云南、四川和西藏东部呈低值分布;具体来看,9月份,高值区主要集中于华东华中地区,到了10月份,高值区主要集中于东北北部、内蒙古北部、华东沿海地区,并且在云南、四川和西藏东部出现了低值,再到11月份,高值区就覆盖了东北北部、内蒙古北部、华东沿海地区、华南的广东地区,以及太平洋地区的日韩一带;冬季(12月至来年2月),高值区的总体分布特征和秋季类似,具体而言,12月份,高值区主要集中于东北北部、内蒙古北部、华东沿海地区,以及华南的广东地区,而低值几乎覆盖了整个西藏地区,1月份,高值区的分布和12月份类似,但是,到

了2月份时,高值区的覆盖范围就明显缩小了,包括东北北部、内蒙古北部,以及华东地区,而低值区此时显示就不明显了。因此,从空间分布特征和统计学知识可知:2009年6月-2010年5月中国近地面CO₂浓度值范围为386.338~395.027ppmv,多月平均浓度为389.034ppmv;中国区域近地面CO₂浓度空间分布较为集中,东西差异显著,总体呈东高西低的特征,高值区主要集中于110°~125°E的东部沿海地区;具体而言,高值区主要分布于中国华北、华东及华南等地区,同时向西延伸至部分华中地区,向东延伸至东北部分地区、太平洋、韩国及日本一带。

图4(a)、(b)、(c)为2009年中国各地区人口密度、能源消费总量(煤)及GDP空间分布图,中国各地区人口密度数据、能源消费总量(煤)数据、GDP数据来源于中华人民共和国国家统计局中国统计年鉴。对比图2、3可以看出:(1)2009年我国人口密度在北京、天津、河北、山东、河南、江苏、上海、安徽、浙江和广东等东部沿海地区呈高值分布,能源

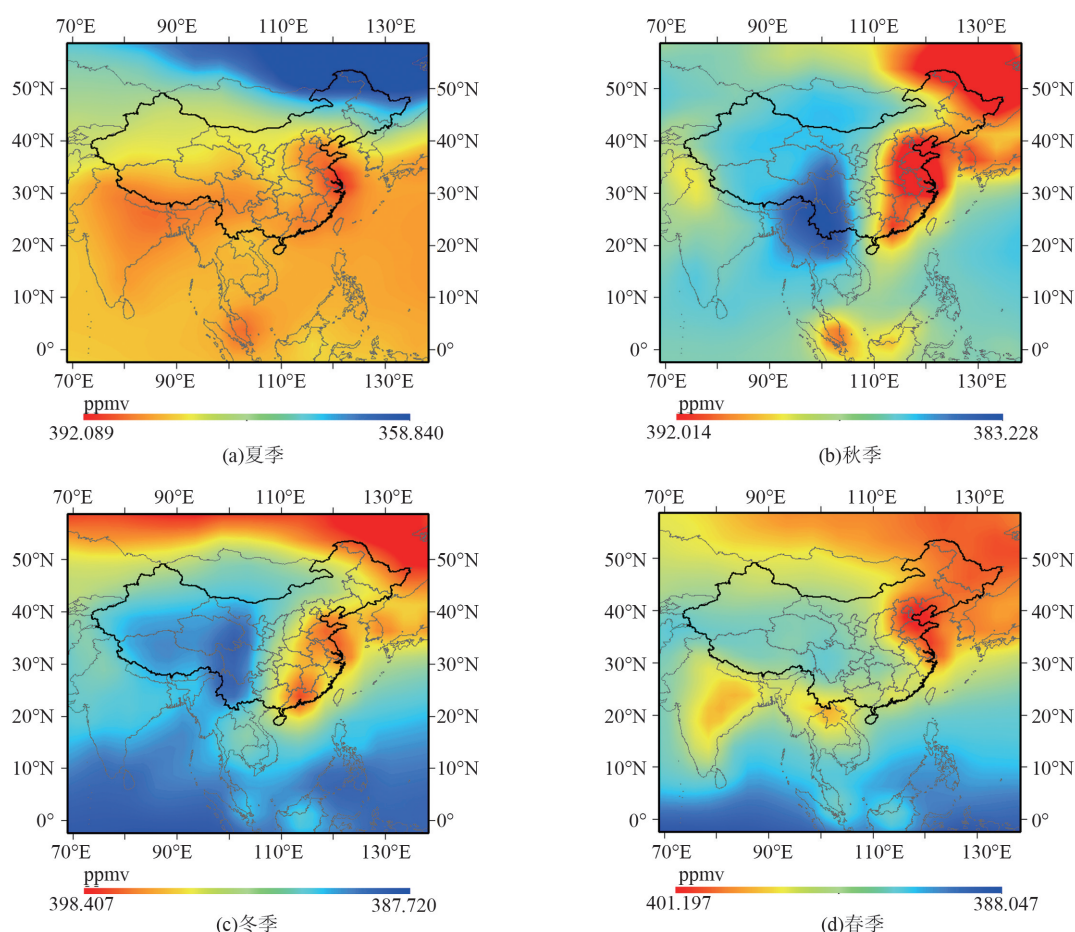


图3 2009年6月-2010年5月中国区域近地面(975hPa)CO₂柱浓度平均季节空间变化

Fig.3 Spatial distribution of the seasonal average CO₂ column concentration close to the ground surface (975 hPa) in China from June 2009 to May 2010

消费总量(煤)和GDP在辽宁、河北、北京、天津、山东、江苏、上海、浙江、广东等东部地区呈高值区分布;而2009年我国人口密度、能源消费总量(煤)和GDP在黑龙江、山西、陕西、重庆、贵州和广西地区呈现为低值分布,相比之下,在内蒙古自治区、四川和云南地区的值略高。(2)无论是CO₂浓度月平均分布还是季节平均分布,高低值区的空间分布均呈现出动态变化的特征,其具体位置随着月份或季度具有明显的变化。例如,2009年9月或秋季中国区域近地面CO₂浓度的高值分布与当年人口密度、能源消费总量(煤)及GDP高值分布一致,说明该时间段内我国东部沿海地区近地面CO₂浓度高值分布可能与人口密度、能源消费总量(煤)和GDP密切相关。但是,2009年12月、1月、2月或冬季中国区域近地面CO₂浓度高值区主要集中于华东沿海地区和华南的广东等地区,这与当时北方地区能源消耗量(煤)不一致;低值区分布于甘肃、四川、云南一带,而图4中四川的人口密度、能源消费总量(煤)和GDP却呈现略高值,这说明该时间段内我国东北地区和中部地区近地面CO₂浓度高值分布不一定和

人口密度、能源消费总量(煤)和GDP密切相关。因此,造成我国近地面CO₂浓度空间分布规律的原因可能是多样的,无法确定人为或自然所致,需要进一步深入研究。

3.2 中国区域近地面CO₂柱浓度时间变化规律

图5为2009年6月至2010年5月中国区域近地面(975hPa)CO₂浓度平均逐月变化和平均季节柱状图,其中,图5(a)为逐月变化图,图5(b)为平均季节柱状图。综合图5(a)、(b)可发现:2009年6月-2010年5月中国区域近地面(975hPa)CO₂浓度月、季度具有明显的变化规律:自2009年6月至2010年5月,中国区域近地面(975hPa)CO₂浓度总体呈先降低,然后逐渐上升,至最高值后再降低的规律;全年中CO₂月平均浓度7月份降至最低,为382.781ppmv,4月份升至最高,为396.512ppmv,季振幅约为13.731ppmv。由图1可知,瓦里关本底观测CO₂浓度最高值出现在每年的4月末至5月初,最低值出现在夏季的7、8月份。GOSAT获得的该时间段内中国区域近地面(975hPa)CO₂浓度春季显

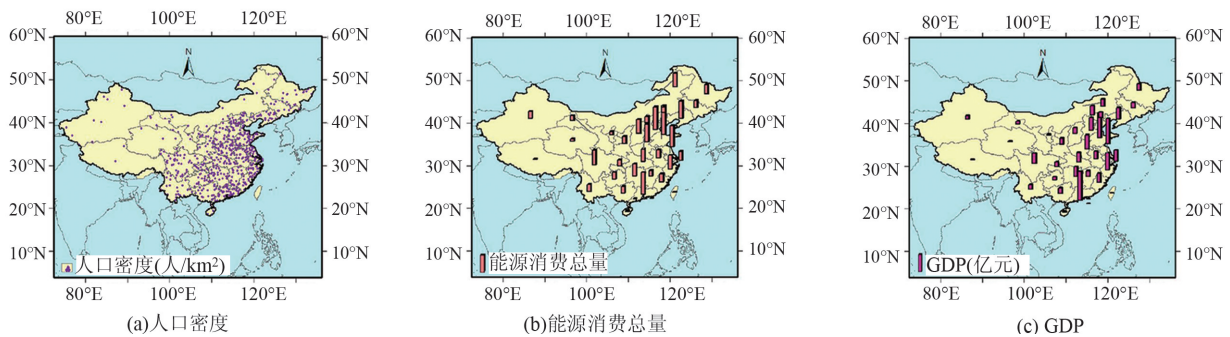


图4 2009年中国各地区人口密度、能源消费总量及GDP空间分布

Fig.4 Spatial distribution of regional population density (a), total energy consumption (b), and GDP (c) in China in 2009

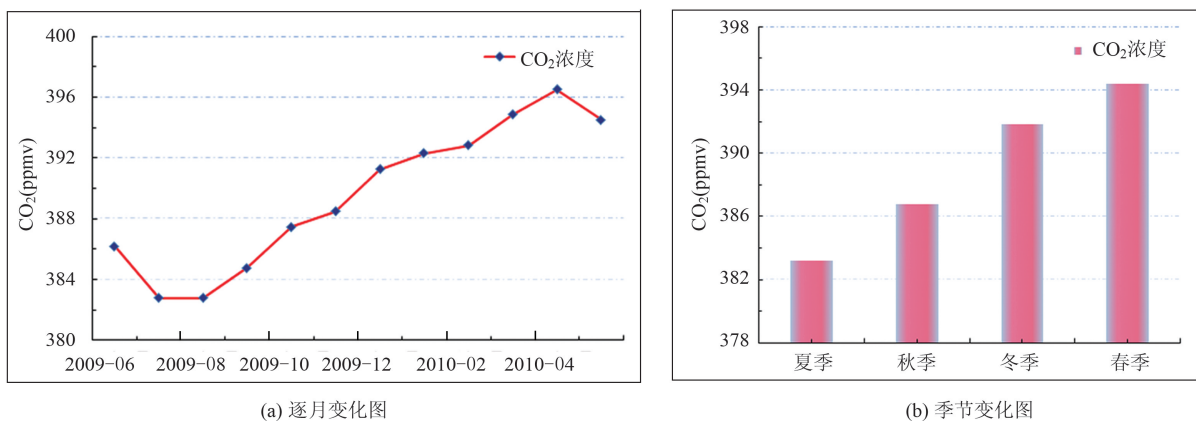


图5 2009年6月-2010年5月中国区域近地面(975hpa)CO₂柱浓度平均逐月变化和平均季节柱状图

Fig.5 Average changes from month to month and bar graph of seasonal changes of CO₂ column

著高于其他季节,夏季为最低,在不同季节的变化及波动程度也明显不同,这与瓦里关本底观测结果是一致的。白文广等^[1]得出,中国区域对流层中层CO₂最高值出现在春季,最低值出现在秋季,戴丽君等^[2]得出,中国区域对流层中层CO₂浓度春季最高,冬季最低。目前,两结论之间的差异,以及最低值均滞后于本底观测结果的原因相关学者已作出了解释。Gerbig C^[16]和Tiwari Y K^[17]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CO₂垂直输送混合、对流层中层CO₂柱浓度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。这些结论说明,GOSAT数据能更真实地反映近地表(975hPa)CO₂柱浓度的变化情况,更适合用于CO₂的“源”和“汇”的研究。

4 结论

(1)中国区域近地面CO₂浓度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东部沿海地区。

(2)2009年我国各地区人口密度分布、能源消耗总量(煤)分布和GDP分布与我国近地面CO₂浓度空间分布规律之间关系的不确定性说明,造成我国近地面CO₂浓度空间分布规律的原因是多种多样的,不能轻言定为人或自然导致。大气CO₂浓度的时空分布还与季风、植被CO₂吸收、大气输送等有关,是局地排放源贡献和大气传输等过程综合作用的结果,具体成因的相关因子分析是一项非常艰巨的问题,有待于进一步深入研究。

(3)中国区域近地面CO₂浓度具有明显的季节变化特征,月平均浓度4月份(春季)升至最高值,为396.512ppmv;7月份(夏季)降至最低值,为382.781ppmv。该结论与瓦里关本底观测一致。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 戴丽君,崔伟宏.2003-2010年中国对流层CO₂时空分布研究[J].生态环境学报,2012,21(7):1266-1270.
- [3] 李红林,张春华,王伟华.新一代温室气体观测卫星(GOSAT、OCO)传感器设置[J].气象科技,2011,39(5):603-607.
- [4] 张兴赢,张鹏,方宗义,等.应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J].气象,2007,33(7):3-14.
- [5] Fan S, Gloor M, Mahlman J, *et al.* A large terrestrial carbon sink in north america implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models[J]. Science, 1998,282(5388):442-446.
- [6] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, *et al.* AIRS/AMSU/HSB on the aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003,41(2):253-264.
- [7] Buchwitz M, de Beek R, Noël S, *et al.* Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: Version 0.5 CO and CH₄ and impact of calibration improvements on CO₂ retrieval[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006,6(9):2727-2751.
- [8] Crevoisier C, Chédin A, H Matsueda, *et al.* First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009,9(14):4797-4810.
- [9] Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, *et al.* Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results[J]. Scientific Online Letters on the Atmosphere, 2009(5):160-163.
- [10] 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[J].遥感技术与应用,2011,26(2):247-254.
- [11] Crisp D, Atlas R M, Breon F M, *et al.* The orbiting carbon observatory (OCO) mission[J]. Advances in Space Research, 2004,34(4):700-709.
- [12] 崔伟宏,S.弗雷德·辛格,万森·库尔提欧,等.自然是气候变化的主要驱动因素[M].北京:中国科学技术出版社,2012,154-178.
- [13] 朱小花,王荣辉.基于GIS的开发区土地集约利用潜力微观评价及空间分异规律研究[C].第十三届华东六省一市测绘学会学术交流会,中国江苏南京,2011,179-182.
- [14] NIES. GOSAT level 4 data product format description[J]. National Institute for Environmental Studies GOSAT Project Office, 2012.
- [15] NIES. GOSAT level 4 data product (Version 02.01) release note[J]. National Institute for Environmental Studies GOSAT Project Office, 2012.
- [16] Gerbig C, Lin J C, Wofsy S C, *et al.* Toward constraining regional-scale fluxes of CO₂ with atmospheric observations over a continent: 2. Analysis of cobra data using a receptor-oriented framework[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108: 4757. doi:10.1029/2003JD003770.
- [17] Tiwari Y K, Gloor M, Engelen R J, *et al.* Comparing CO₂ retrieved from Atmospheric Infrared Sounder with model predictions: Implications for constraining surface fluxes

and lower-to-upper troposphere transport[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 2006,

111: D17106, doi: 10.1029/2005JD006681.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of CO₂ Column Concentration in China from 2009 to 2010

ZHAO Jing* and CUI Weihong

(Institute Of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Data adopted was the official near the ground surface (975hPa) CO₂ concentration L4B retrieval data products of GOSAT-the world's first Greenhouse Gases Observing Satellite "Breathing No." - with a passive infrared detector (TANSO) from June 2009 to May 2010, which was jointly developed by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Japanese Environment Agency (MOE) and the Japan Institute for Environmental Studies (NIES). Based on the ArcGIS Geostatistical Analytical Method, authenticity inspection was processed by comparing the data mentioned above with the ground observation data of the Global Atmospheric Background Station (Waliguan), in order to analyze Chinese CO₂ concentration spatial and temporal variations near the ground surface. The results show that: (i) Chinese CO₂ concentration near the ground surface is concentrated and has a high value in the East, a low value in the West; (ii) Chinese CO₂ concentration has an obviously seasonal variation characteristic that monthly average concentration has a largest amount in April (spring) and a smallest in July (summer); (iii) Combining with 2009 Chinese population density, total energy consumption (coal), GDP and other auxiliary data from the *China Statistical Yearbook* 2012, we find that the reasons of Chinese CO₂ spatial and temporal distribution near the ground surface are various, and cannot be attributed easily to human or nature.

Key words: near the ground surface; CO₂; GOSAT; spatial and temporal distribution

*Corresponding author: ZHAO Jing, E-mail: zhaojingzjtoxz@163.com