科学通报 2020 年 第 65 卷 第 2-3 期: 194 ~ 202
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析

何江浩[1,3], 蔡玉林[1,2*], 秦鹏[1,2]

1. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590;
2. 山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室, 青岛 266590;
3. 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021

* 联系人, E-mail: caiyl@sdust.edu.cn

2019-05-07 收稿, 2019-08-26 修回, 2019-08-30 接受, 2019-11-19 网络版发表
国家自然科学基金(41807170)和山东省自然科学基金(ZR2017BD021)资助

摘要 利用大气本地站数据验证了2010~2015年温室气体观测卫星(Greenhouse Gases Observing SATellite, GOSAT)二氧化碳L4B浓度数据, 分析了二氧化碳浓度时空分布及其变化特征, 结合总初级生产力数据和人类二氧化碳排放数据, 分析了二氧化碳空间特征变化的影响因素. 结果表明: (1) GOSATL4B级数据与地面实测数据的相关系数均在0.95以上, 具有较高的精度和稳定性. (2) 二氧化碳在不同气压高度上空间分布特征差异较大, 近地面二氧化碳浓度波动幅度最大且有明显的空间差异性特性, 全球有4个高值中心, 分别为东亚、西欧、美国东海岸, 以及非洲中部地区; 北半球近地面的二氧化碳浓度整体高于南半球, 南半球的变化幅度相对较小且变化趋势与北半球相反. (3) 研究期间二氧化碳浓度呈现明显增长趋势, 二氧化碳浓度随季节变化规律明显. (4) 东亚地区样区二氧化碳浓度的变化与初级生产力具有明显的负相关关系, 充分证明了陆地生态系统重要的碳汇作用; 而与人类活动导致的二氧化碳排放呈显著正相关, 说明了人类活动是二氧化碳增加的重要因素.

关键词 温室气体观测卫星, 二氧化碳, 时空变化, 总初级生产力

二氧化碳(CO_2)是大气中最重要的人为排放的温室气体, 它贡献了约65%的长寿命温室气体辐射强迫[1]. 自1750年的工业化开始以来, 大气温室气体浓度处于不断上升的状态. 这使得大气二氧化碳、甲烷和其他主要温室气体的浓度增加到过去80万年以来史无前例水平(IPCC, 2014). 这些变化可能是自20世纪50年代以来气候变暖的主要的原因. 作为最主要的温室气体, 二氧化碳的累积排放量在极大程度上决定21世纪末期及以后全球平均表面的变暖情况[2].

早期, 对大气中二氧化碳浓度的监测主要依靠地面基站监测. 最早由美国斯克里普斯海洋研究所的科学家在位于夏威夷的莫纳罗亚火山观象台进行测量和记录[3]. 20世纪60年代末, 世界气象组织建立了大气本底污染监测网, 1957年成立了全球臭氧监测网. 1989年, 世界气象组织将上述两个监测网络合并, 建立了目前全球最全面的地面大气监测系统, 即全球大气监测网计划(Global Atmospheric Watch, GAW)[4]. 但是这种监测方法存在许多的问题. 由于资金或技术等原因, 全球地面监测站点数量有限, 截至目前不足300个. 并且这些站点大多都分布在发达国家和人口密集的区域, 分布不均匀, 而且地面站点监测的数据三维表现性差且空间覆盖范围不广[5].

随着遥感技术的快速发展, 凭借其数据稳定、长时间序列、空间范围广、有利于空间三维显示等优点, 迅速成为监测温室气体分布的一种重要手段. 通过遥感监测大气二氧化碳时空分布的方式, 补充了地面本

引用格式: 何江浩, 蔡玉林, 秦鹏. 二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析. 科学通报, 2020, 65: 194–202
He J H, Cai Y L, Qin P. Spatial and temporal variations of carbon dioxide and its influencing factors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 194–202, doi: 10.1360/TB-2019-0022

© 2019《中国科学》杂志社

底监测的局限性，可以更好地获取有关大区域范围二氧化碳分布的数据，进一步加深人们对全球碳过程的认知. 早期可以用来监测大气二氧化碳的传感器主要有大气制图扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)和大气红外探测仪(atmospheric infrared sounder, AIRS)等. 近些年来各国发射了专门对地球上大气层二氧化碳进行监测的嗅碳卫星，这类卫星数量较少，只有日本在2009年发射的GOSAT(the Greenhouse Gases Observing SATellite)、美国2014年发射的OCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2)，以及中国2016年发射的TANSAT(碳卫星)3颗卫星. 还有德国计划在2020年前发射CarbonSat[5]. 不断丰富的数据源也促进了国内外学者在二氧化碳反演算法[6~11]、产品数据精度[12,13]、二氧化碳时空分布[14~18]，以及大气模拟[19,20]等方面的研究. 之前关于时空分布特征的研究限于数据量，时间序列较短且仅分析了近地面低层大气中或者大气柱量的二氧化碳分布特征，对于二氧化碳浓度三维空间中的变化以及时空变化影响因素的分析少见报道. 本研究根据GOSAT L4B数据分析了2010~2015年二氧化碳时空分布特征，尤其是在垂直高度上不同层次上二氧化碳的分布特征，同时分析了对流层近地面二氧化碳浓度变化与总初级生产力、人类活动的关系.

1 研究数据与处理

(ⅰ) GOSAT二氧化碳产品数据. GOSAT卫星发射于2009年，由日本国家环境研究所NIES(National Institute for Environmental Studies)负责向用户提供数据信息. 包括4个级别的产品[21,22]，由NIES的GOSAT官网(https://data2.gosat.nies.go.jp/)发布共享. 本研究数据下载了自2010年1月~2015年10月全球范围内L4B级二氧化碳浓度数据. L4B数据产品存储了全球6 h二氧化碳和甲烷的分布，每天4次数据，空间分辨率为2.5°×2.5°，包括地表至大气顶层附近垂直方向上17个水平面的数据. 数据产品格式为.netCDF, 浓度单位为mol/mol. 利用IDL编程读取原始数据并求出8 d均值数据与月均值数据，将空间分辨率重采样至0.05°，以配合使用其他数据.

(ⅱ) 总初级生产力. 本研究使用的GPP(gross primary production)数据来自美国宇航局(NASA)提供的经蒙大拿大学拼接后的2010~2015年全球生产力数据MOD17A2H. 这是一个空间分辨率为0.05°的8 d累计数据. 数据具体下载地址为http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD17/GeoTIFF/MOD17A2/. 原数据格式为.Geotiff，利用IDL编程读取科学数据并乘以比例因子0.1以恢复真实值.

(ⅲ) 二氧化碳排放数据. 为了分析GOSAT卫星数据获取的二氧化碳浓度与人类活动的相关性，我们从全球大气研究排放数据库(Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR)中获取人类活动产生的二氧化碳数据. 数据获取地址为https://edgar.jrc.ec.europa.eu/. 该数据是由欧盟联合研究中心和荷兰环保局联合开发的. 数据库中二氧化碳排放源包括能源燃烧排放、工业过程排放和生物源排放等. 数据版本为V4.2，单位为t，网格大小为0.1°×0.1°，数据格式为.txt. EDGAR V4.2数据的时间序列从2000~2010年，我们下载了2010年的数据，使用IDL编程提取数据并重采样为2.5°×2.5°以配合GOSAT数据的使用.

2 结果与讨论

2.1 GOSAT L4B数据与地面监测数据比较

为了评估GOSAT L4B数据的可靠性，将GOSAT近地面数据(975 hPa)与3个GAW大气本底站的二氧化碳浓度地面观测数据进行了比较分析. 大气本底站数据来自NOAA(National Aeronautics and Space Administration)的地球系统研究实验室(ESRL)的官方网站(https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/). 选用的3个站点分别是美国的莫纳罗亚(19.53°N，155.57°W)和萨摩亚(14.24°S，170.56°W)、中国的瓦里关(100°54′E，36°17′N)，选取的时间范围为2010~2014年. 图1是GOSAT975 hPa数据与各个本底站数据逐月比较以及相关分析的结果.

2010~2014年GOSAT975 hPa月均值结果数据与莫纳罗亚地面本底观测结果的Pearson相关系数为0.9608，决定系数为0.9217；与萨摩亚地面本底观测结果的Pearson相关系数为0.9936，决定系数为0.9870；与中国的瓦里关站数据的Pearson相关系数为0.9791，决定系数为0.9580.

上述分析结果与以前研究对于GOSAT L4B数据验证的结果相近. 王舒鹏等人[14]对2010年1月~2012年10月GOSAT L4B月均值结果与瓦里关站观测结果进行比较分析，得到的相关系数为0.96. 赵静等人[15]对2009年6月~2010年5月的GOSAT L4B产品数据与瓦里关站观测数据比较分析，得到的相关系数也达到了0.96. 由

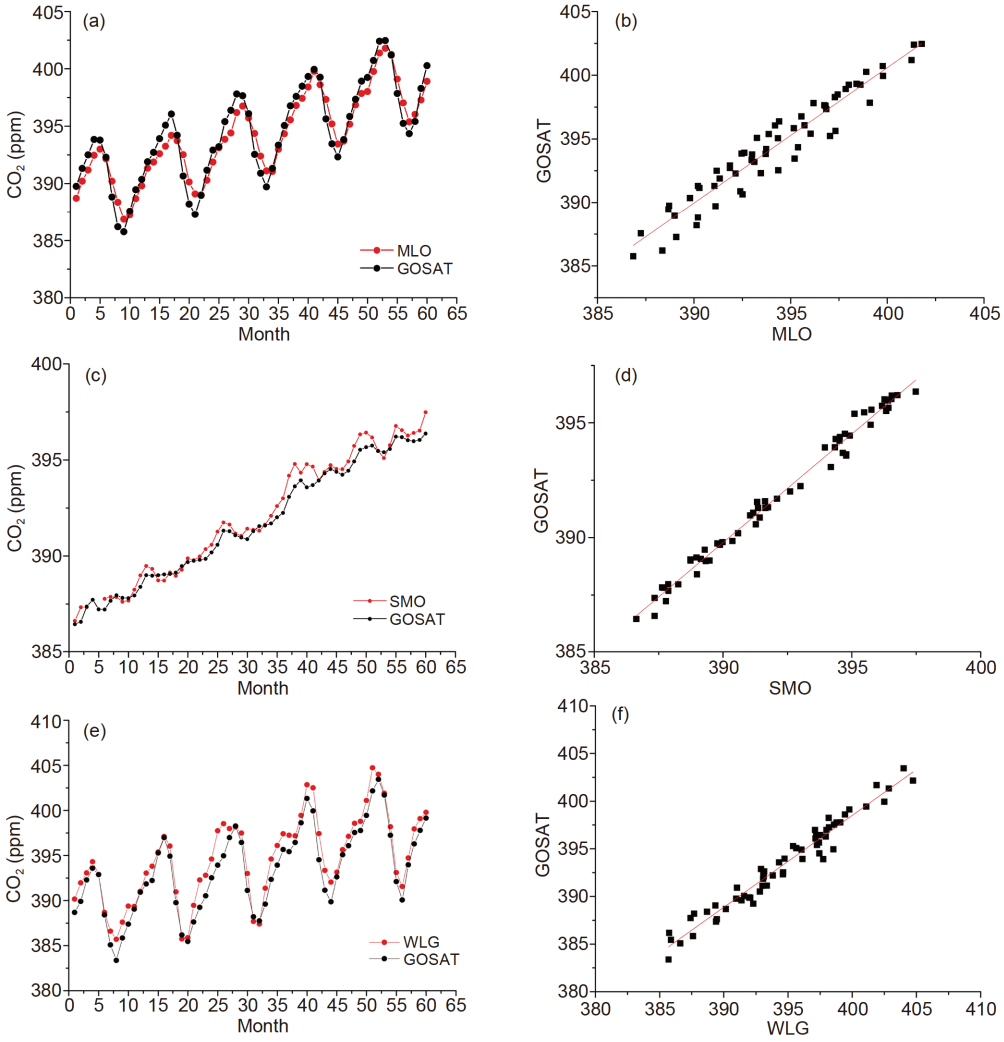


图 1 (网络版彩色)GOSAT L4B近地面数据与地基观测数据时间序列比较及相关性分析. (a), (b) 莫纳罗亚; (c), (d) 萨摩亚; (e), (f) 瓦里关

Figure 1 (Color online) Time series comparison of GOSAT L4B near-surface data and ground observation data and correlation analysis. (a), (b) Monaeroa; (c), (d) Samoa; (e), (f) Waliguan

此可见, GOSAT L4B二氧化碳浓度数据具有较高的精度并且稳定性很强.

2.2 二氧化碳时空分布特征

根据2010年1月~2015年10月的二氧化碳浓度数据, 分析了时空分布特征. GOSAT浓度原数据单位为mol mol^{-1}, 对其乘以一百万将其转化为二氧化碳浓度的常用单位ppm(parts per million), 即百万分之一. GOSAT L4B二氧化碳浓度数据垂直方向上总共有17个层次, 分别在陆地腹地和海洋上空(中国内陆和南海)任意选取一个样点比较不同层次的异同, 两点坐标分别为(33.75°N, 106.25°E)和(13.75°N, 113.75°E). 图2显示了这两个点2010年1月~2014年12月长时间序列年际垂直方向上17个层次二氧化碳浓度旬均值的变化. 可以看出陆地和海面上空二氧化碳浓度的变化趋势相近, 二氧化碳浓度一直在上升, 但在不同高度层次上浓度变化波动程度有所不同, 靠近地表的幅度相对较大. 在此选择了975, 700, 150和100 hPa波动变化比较明显但渐趋平缓的4个层次进一步分析其空间分布特征.

2.2.1 二氧化碳不同气压高度的空间变化特征

图3是大气压分别为975, 700, 150和100 hPa处全球二氧化碳浓度的分布图, 是近6年二氧化碳平均浓度. 图3(a)中975 hPa GOSAT L4B数据是离地面最近的二氧化碳浓度数据. 可以看到: 北半球二氧化碳浓度整体普遍高于南半球; 全球二氧化碳浓度高值主要分布在赤道至北纬60°之间. 究其原因应该是因为大气二氧化

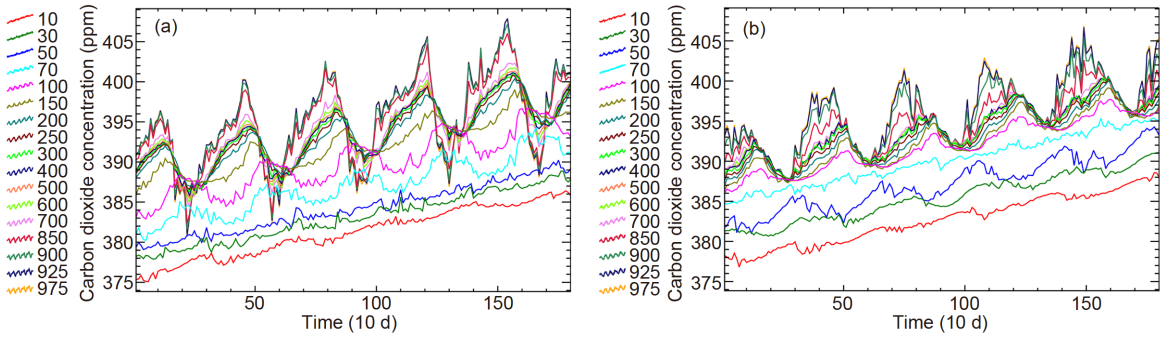


图 2 2010年1月~2014年12月中国大陆(a)和南海(b)样点CO_2浓度旬均值时序变化
Figure 2 The time-series variation of ten-day mean CO_2 concentration of sample points in mainland China (a) and South China Sea (b) from Jan. 2010 to Dec. 2014

碳浓度很大程度上受到地表生物圈的影响，主要是地表自养生物的光合作用的影响，而陆地主要分布在北半球，主要植被区与人口活动区也都分布在北半球，因而使北半球二氧化碳浓度分布呈现不规则变化且波动比较剧烈. 图3(a)中可以看出全球有4个明显的二氧化碳浓度高值中心区，分别是东亚地区、西欧地区、美国东海岸，以及非洲中部. 因为导致二氧化碳排放的世界人口、主要生产活动主要集中在北半球，所以北半球二氧化碳的长期平均值高于南半球. 结合高值中心出现的区域，可以明显看到二氧化碳浓度高的区域都是经济较发达，工业活动频繁的地区. 相较之下，南半球浓度分布较均匀. 而在同一纬度地区，陆地上空的二氧化碳浓度高于海洋上空的浓度，这也说明了二氧化碳浓度与人类活动以及地表类型密切相关. 图3(b)中700 hPa层次所体现的规律与975 hPa层次相近. 受地表类型(陆地或海洋)影响，北低南高，但总体浓度相对较低(图中由低到高为390.493~395.652 ppm)，且明显的高值区仅剩亚洲东部. 图3(c)，(d)为150和100 hPa高度的二氧化碳浓度多年平均空间分布图. 图中显示：随着高度的增加，二氧化碳浓度空间分布出现了较大的变化.

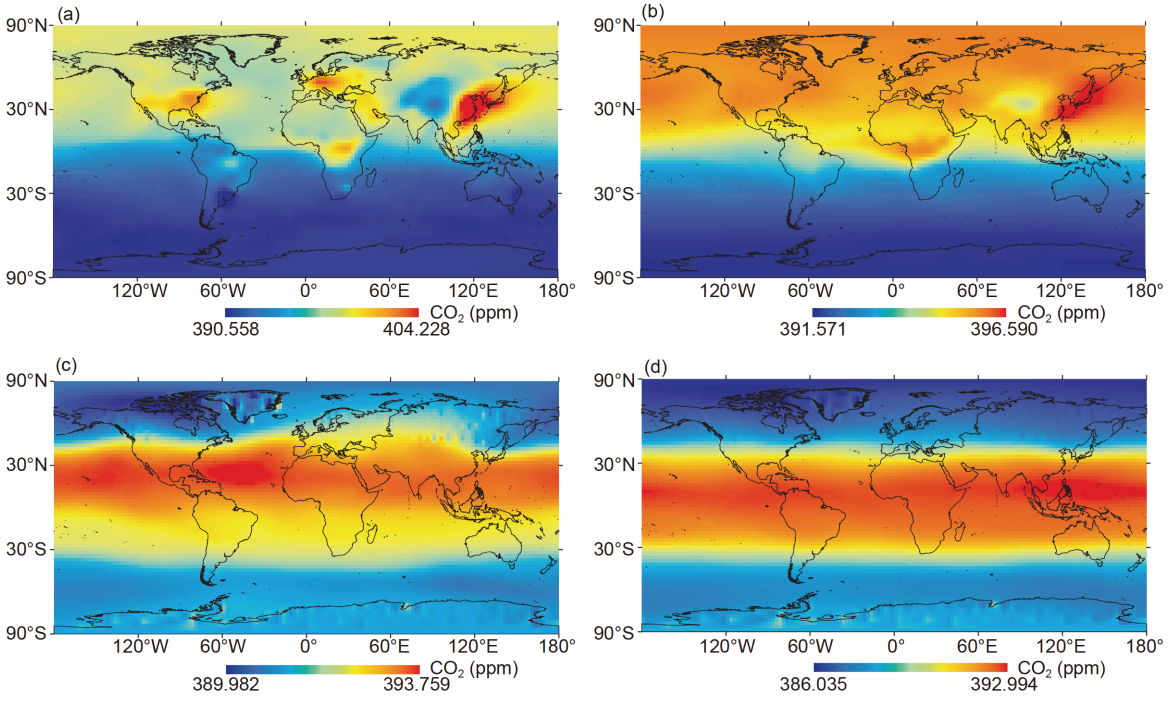


图 3 2010年1月~2015年10月975(a), 700(b), 150(c)和100 hPa(d) 全球平均CO_2浓度空间分布
Figure 3 Spatial distribution of global average CO_2 concentration at 975 (a), 700 (b), 150 (c) and 100 hPa (d) from Jan. 2010 to Oct. 2015

当大气气压达到150 hPa时, 在赤道至北纬30°内出现一条明显的二氧化碳高值带; 而在100 hPa时, 这一高值区移动到赤道南北纬30°内, 且不再存在明显的高值中心.

在不同海拔高度, 二氧化碳浓度空间分布存在巨大差异, 可能的主要原因还是由于地面因素对于大气二氧化碳浓度的影响. 离地面越近, 与地面进行二氧化碳的交换就越频繁, 受到的影响就越大. 海拔更高的区域受地面因素影响较少, 主要受大气环流因素影响, 因此二氧化碳浓度的分布更加均匀.

2.2.2 近地表二氧化碳时间变化特征

近地表的二氧化碳浓度变化受自然和人为因素影响变化相对剧烈, 受到的关注也较大[3,14,15]. 图4(a)显示了2010年1月~2015年10月975 hPa层次(海拔高度约300 m)全球年内逐月平均值的变化特征. 可以看出全球二氧化碳浓度在全年的大部分时间内都已经高于400 ppm, 而且逐年增高; 年内的浓度在7~8月份出现最低值, 其原因可能是因为此时恰逢北半球植被处于生长季. 图4(b)显示了南北半球二氧化碳浓度2010年1月~2015年10月70个月逐月平均值的时间变化特征, 也可以看出两半球的二氧化碳浓度一直呈现增长的趋势. 相比南半球, 北半球二氧化碳浓度的周期性变化明显且幅度较大, 而南半球变化趋势相对平缓、变化幅度较小. 为了突出南半球的变化趋势图, 图4(b)采用了双纵轴的办法. 图中可以看出, 南北半球关于二氧化碳浓度的周期性变化存在一个相反的变化, 当北半球二氧化碳浓度处于每年高值区时, 南半球正好处于二氧化碳浓度每年的低值区. 这应该与南北半球的季节相反导致植被物候变化有关. 而且在南半球虽然每年的下半年比上半年的二氧化碳浓度更高, 但与北半球每年有1个谷峰与1个谷底交替变化不同, 南半球每年二氧化碳浓度有2个谷峰和1个谷底, 而谷底出现在每年的6月左右. 图4(a), (b)都能体现出植被对于二氧化碳的影响, 图4(b)还显示出2010~2015年二氧化碳变化的幅度一直在增大. 这与Forkel等人[23]和Graven等人[24]对于北半球生态系统中高纬地区植被变化对于二氧化碳影响的结论一致.

2.3 二氧化碳浓度的影响因素分析

图3(a)以及图4中二氧化碳浓度时空变化规律显示了它可能受植被影响和人类活动的影响. 因此进一步分析了陆地植被和人类活动对于二氧化碳的影响.

2.3.1 陆地生态系统GPP对二氧化碳浓度的影响

选取了2010~2014年东亚4个国家(韩国、蒙古、日本和中国)来分析GPP空间分布数据与二氧化碳浓度间的关系. MODIS GPP数据是8 d累积值数据, 所以也相应进行了975, 700, 150和100 hPa气压高度处二氧化碳浓度每8 d平均值的相关分析. 结果显示, 4个区域在离地表较近的975, 700 hPa高度处二氧化碳浓度与GPP在0.01水平(双侧)呈显著负相关, 相关程度随高度上升减弱; 而在较高大气中150, 100 hPa高度处二氧化碳浓度与GPP在0.01水平(双侧)呈显著正相关, 相关程度随高度上升增强.

图5展示了东亚四国在2010~2014年近地表气压为975 hPa处二氧化碳与GPP累积值在8 d的时间粒度中的变化情况以及相互之间的关系. 从中可以看出, 二者具有明显的反相关关系: 当二氧化碳处于谷底时, GPP正好处于峰值; 而当二氧化碳到达峰值时, GPP降到谷底, 充分证明了陆地生态系统是碳循环中作为碳汇贡献者

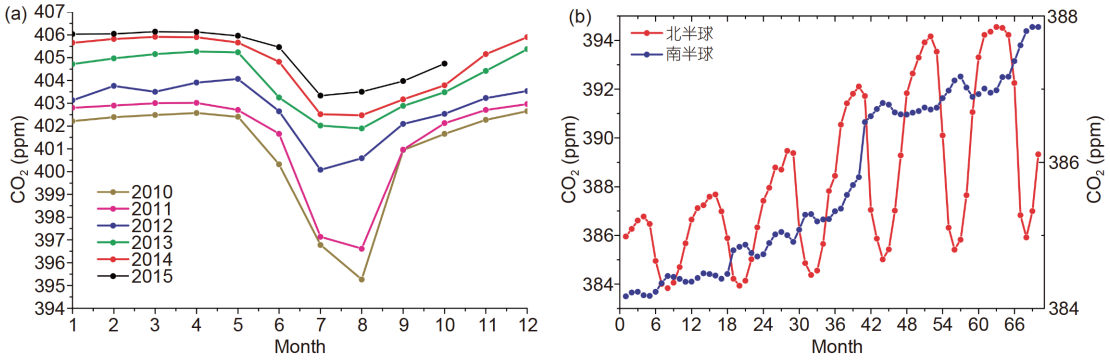


图 4 2010年1月~2015年10月CO_2浓度975 hPa层次月平均值折线图. (a) 全球不同年份逐月平均; (b) 半球逐月平均

Figure 4 Broken line graph of the monthly mean value of CO_2 concentration at 975 hPa from Jan. 2010 to Oct. 2015. (a) Global monthly average for different years; (b) hemispheric monthly average

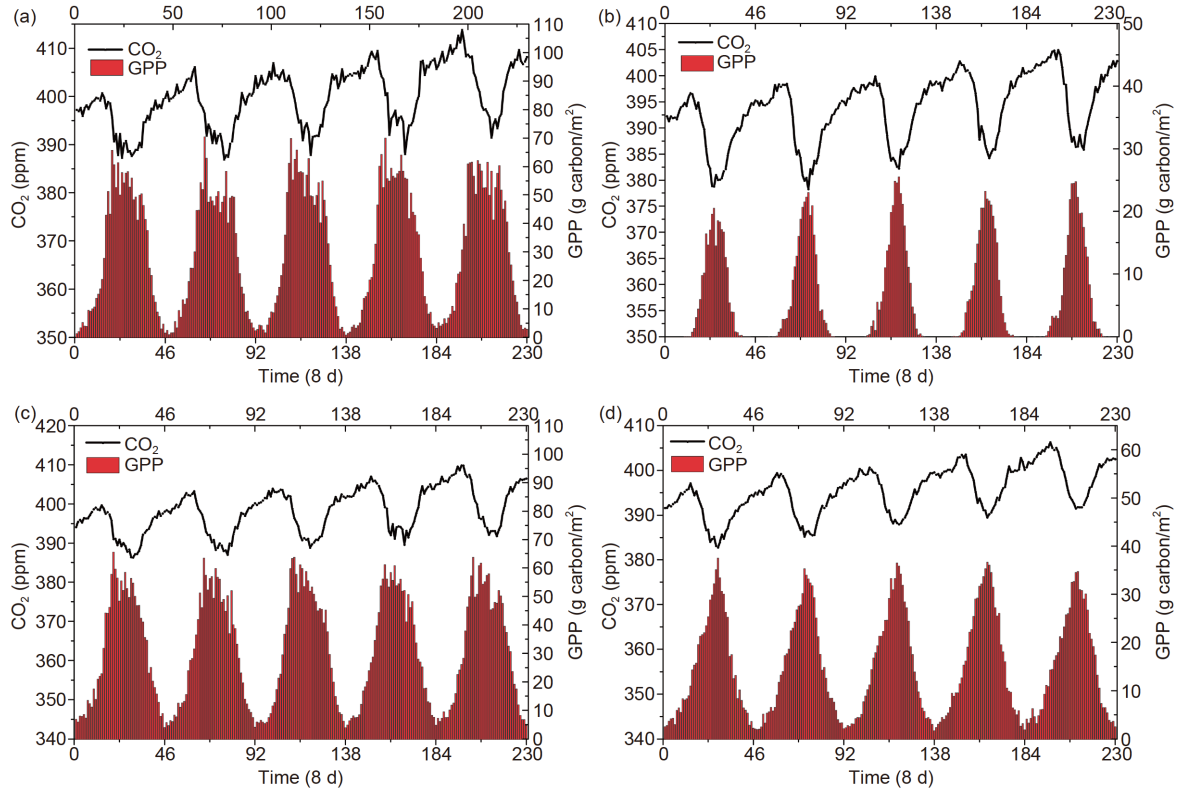


图 5 2010~2014年不同区域CO_2浓度与GPP关系. (a) 韩国; (b) 蒙古; (c) 日本; (d) 中国

Figure 5 Relationship between CO_2 concentration and GPP in different regions from 2010 to 2014. (a) Korea; (b) Mongolia; (c) Japan; (d) China

的重要作用.

2.3.2 人类活动的影响

EDGAR数据反映了人类活动导致的二氧化碳排放. 图6为其全球分布图, 可以明显看出二氧化碳排放高值区与图4(a)中GOSAT二氧化碳浓度高值区密切相关. 因为EDGAR数据来自人类活动, 在无人区域基本上没有数据分布, 所以选取了主要二氧化碳排放地进行了分析. 去除没有数据的异常区域后, 分析它与在不

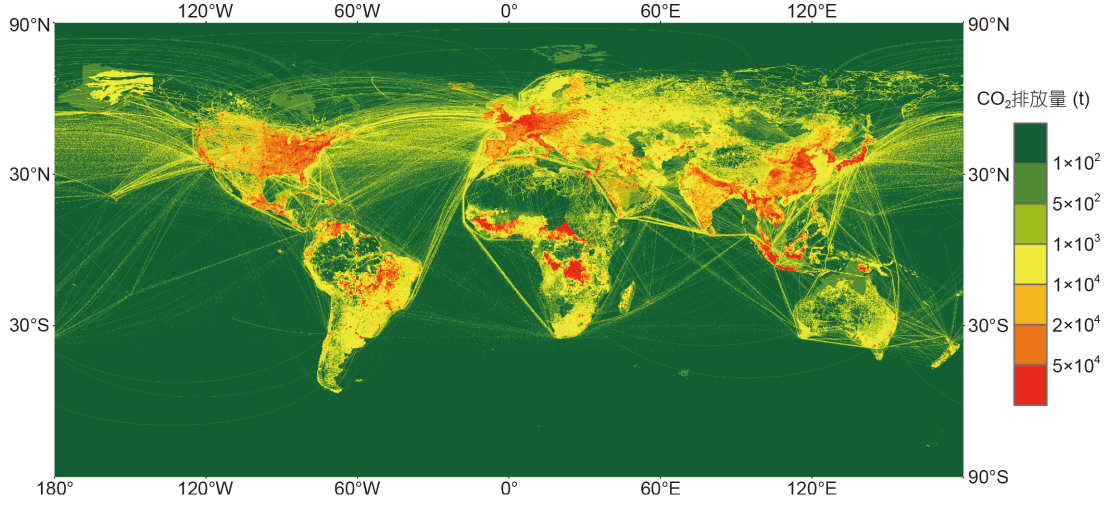


图 6 EDGAR V4.2数据(2010年)

Figure 6 EDGAR V4.2 data (2010)

同气压高度上(975, 700, 150和100 hPa)二氧化碳浓度的相关性. 在975 hPa高度上亚洲、欧洲、北美洲、南美洲、非洲EDGAR与GOSAT数据的皮尔逊相关系数分别为: 0.52, 0.62, 0.73, 0.21和0.17. 在0.01水平(双侧)显著正相关. 随着高度上升在各大洲两者相关程度都呈减弱趋势, 说明GOSAT卫星监测的二氧化碳浓度与人类活动存在着很高的相关性, 人类活动是导致二氧化碳浓度升高的重要因素. 由此我们可以通过GOSAT卫星的监测数据大致反映人类二氧化碳的排放.

3 结论

本研究利用2010年1月~2015年10月GOSAT L4B二氧化碳浓度数据进行了验证和时空变化分析, 揭示了全球范围内大气中不同高度层次上二氧化碳的时空变化规律, 并就典型区域分析了陆地生态系统和人类活动对于二氧化碳的影响, 发现GOSAT L4B与地面观测获得的站点数据具有较好的一致性.

全球二氧化碳浓度都呈现持续增长的趋势, 不同气压高度的空间分布有所不同. 近地表的二氧化碳浓度受下垫面影响明显, 空间分布差异大, 北半球近地面的二氧化碳浓度整体高于南半球. 全球有4个高值中心, 分别为东亚、西欧、美国东海岸, 以及非洲中部地区; 海拔越高, 空间分布差异小, 二氧化碳浓度的高值区分布于赤道地区周围. 近地表浓度空间差异高值区与人类二氧化碳排放相关关系显著, 受人类活动影响明显.

不同气压高度的浓度随时间变化还呈现季节波动, 近地表波动明显, 而海拔越高, 波动幅度小; 以东亚为样区研究结果表明: 全球近地面高度的二氧化碳浓度季节波动源于陆地植被物候变化. 陆地生态系统中植被碳汇作用明显.

致谢 感谢日本国家环境研究所NIES提供GOSAT二氧化碳浓度数据, 美国宇航局(NASA)提供MODIS总初级生产力数据, 欧盟联合研究中心提供二氧化碳排放数据.

参考文献

1 World Meteorological Organization. WMO Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Bsed on Global Observations Through 2016. 2017
2 Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report. In: Pachauri R K, Meyer L A, eds. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151
3 Hou Y F. Spatial and temporal distribution of atmospheric CO_2 concentration based on remote sensing and its influencing factors (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013 [侯艳芳. 基于遥感的中国大气CO_2浓度时空分布及影响因素研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2013]
4 Zhang Y Z, Yuan F J. Global atmosphere monitoring network and China monitoring station network (in Chinese). Meteorol Sci Technol, 2002, 1: 36, 57−59 [章育仲, 袁凤杰. 全球大气监测网与我国监测站网. 气象科技, 2002, 1: 36, 57−59]
5 Chen L F, Zhang Y, Zou M M, et al. The progress of satellite remote sensing of atmospheric CO_2 concentration (in Chinese). J Remote Sens, 2015, 1: 1−11 [陈良富, 张莹, 邹铭敏, 等. 大气CO_2浓度卫星遥感进展. 遥感学报, 2015, 1: 1−11]
6 O'Dell C W, Connor B, Bosch H, et al. The ACOS CO_2 retrieval algorithm—Part 1: Description and validation against syn-thetic observations. Atmos Meas Tech, 2012, 5: 99−121
7 Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, et al. Retrieval algorithm for CO_2 and CH_4 column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse Gases Observing Satellite. Atmos Meas Tech, 2011, 4: 717−734
8 Buchwitz M, Beek R D, Noël S, et al. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: Version 0.5 CO and CH_4 and impact of calibration improvements on CO_2 retrieval. Atmos Chem Phys, 2006, 6: 2727−2751
9 Wang W, Liu Y, Zhang H, et al. Effects of LM and CIA on the absorption spectra of TanSat Bands (in Chinese). Remote Sens Technol Appl, 2014, 5: 771−781 [王婧, 刘毅, 张华, 等. LM以及CIA效应对TanSat3个波段吸收光谱的影响. 遥感技术与应用, 2014, 5: 771−781]
10 Sang H, Wang X H, Ye H H, et al. CO_2 statistical inversion method based on principal component analysis (in Chinese). J Atmos Environ Opt, 2017, 12: 202−209 [桑浩, 王先华, 叶函函, 等. 基于主成分分析的CO_2统计反演方法. 大气与环境光学学报, 2017, 12: 202−209]
11 Liu Y, Yang D X, Cai Z N. A retrieval algorithm for TanSat XCO_2 observation: Retrieval experiments using GOSAT data. Chin Sci Bull, 2013, 58: 1520−1523 [刘毅, 杨东旭, 蔡兆男. 中国碳卫星大气 CO_2反演方法: GOSAT数据初步应用. 科学通报, 2013, 58: 996−999]
12 Qu Y, Zhang C, Wang D, et al. Comparison of atmospheric CO_2 observed by GOSAT and two ground stations in China. Int J Remote Sens, 2013, 34: 3938–3946
13 Meng X Y, Zhang X Y, Zhou M Q, et al. Validation and analysis of GOSAT XCO_2 measurements by TCCON Sites (in Chinese). Meteorol Mon,

2018, 44: 1306−1317 [孟晓阳, 张兴赢, 周敏强, 等. GOSAT卫星二氧化碳遥感产品的验证与分析. 气象, 2018, 44: 1306−1317]
14 Wang S Z, Zhang X Y, Wang W H, et al. Analysis of near-surface CO_2 content changes in global and Chinese regions based on GOSAT L4B data (in Chinese). Sci Technol Rev, 2015, 17: 63−68 [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_2含量变化分析. 科技导报, 2015, 17: 63−68]
15 Zhao J, Cui W H. Spatial and temporal distribution characteristics of near-surface CO_2 in China (in Chinese). J Geo-Inf Sci, 2014, 2: 207−213 [赵静, 崔伟宏. 中国区域近地面CO_2时空分布特征研究. 地球信息科学学报, 2014, 2: 207−213]
16 Meng Q W, Yin Q. A satellite remote sensing analysis of spatial and temporal changes of CO_2 in China (in Chinese). Remote Sens Technol Appl, 2016, (2): 203−213 [孟倩文, 尹球. 中国区域CO_2多年时空变化的卫星遥感分析. 遥感技术与应用, 2016, (2): 203−213]
17 Bai W G, Zhang X Y, Zhang P. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of tropospheric carbon dioxide in China by satellite remote sensing (in Chinese). Chin Sci Bull, 2010, 55: 2953−2960 [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. 科学通报, 2010, 55: 2953−2960]
18 Bu R, Lei L P, Guo L J, et al. Analysis of temporal and spatial potential applications of satellite remote sensing of atmospheric CO_2 concentration monitoring (in Chinese). J Remote Sens, 2015, 19: 34−45 [布然, 雷莉萍, 郭丽洁, 等. 大气 CO_2浓度时空变化卫星遥感监测的应用潜力分析. 遥感学报, 2015, 19: 34−45]
19 Zhang H F, Chen B Z, Xu G, et al. Comparing simulated atmospheric carbon dioxide concentration with GOSAT retrievals (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 380−386 [张慧芳, 陈报章, 许光, 等. 大气反演模型模拟的CO_2浓度与GOSAT卫星观测值的对比. 科学通报, 2015, 60: 380−386]
20 Lei L P, Guan X H, Zeng Z C, et al. Acomparison of atmospheric CO_2 concentration GOSAT-based observa-tions and model simulations (in Chinese). Sci China Earth Sci, 2014, 44: 61−71 [雷莉萍, 关贤华, 曾招城, 等. 基于GOSAT卫星观测的大气CO_2浓度与模型模拟的比较. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 61−71]
21 GOSAT Project Office. GOSAT/IBUKI DATA Users Handbook. 1st. Tsukuba: NIES GOSAT Project, 2011. 1−151
22 Hou S S, Lei L P, Guan X H, et al. A general introduction to Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) and its products (in Chinese). Remote Sens Technol Appl, 2013, 28: 269−268 [侯姗姗, 雷莉萍, 关贤华, 等. 温室气体观测卫星GOSAT及产品. 遥感技术与应用, 2013, 28: 269−268]
23 Forkel M, Carvalhais N, Rodenbeck C, et al. Enhanced seasonal CO_2 exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems. Science, 2016, 6274: 696−699
24 Graven H D, Keeling R F, Piper S C, et al. Enhanced seasonal exchange of CO_2 by northern ecosystems since 1960. Science, 2013, 341: 1085−1089

Summary for “二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析”

Spatial and temporal variations of carbon dioxide and its influencing factors

Jianghao He[1,3], Yulin Cai[1,2*] & Peng Qin[1,2]

[1] *College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*
[2] *Shandong Key Laboratory of Basic Geographic Information and Digital Technology, Qingdao 266590, China;*
[3] *College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China*
* Corresponding author, E-mail: caiyl@sdust.edu.cn

The increase in carbon dioxide in the atmosphere is one of the main causes of global warming. Remote sensing technology has become an important means of monitoring the distribution of carbon dioxide gas. By remotely monitoring the temporal and spatial distributions of atmospheric carbon dioxide, people can further deepen their understanding of the global carbon process. The GOSAT (Greenhouse Gases Observing SATellite) CO_2 L4B concentration data from 2010 to 2015 were validated using local station atmospheric data. The spatial and temporal distributions of the carbon dioxide concentration and its variation characteristics were analyzed. Based on the total primary productivity data and human emissions of carbon dioxide data, the influencing factors of spatial variations in carbon dioxide were analyzed. The results show that:

(1) The correlation coefficient between GOSATL4B data and ground-measured data is above 0.95, which indicates that the remotely acquired data have high precision and stability.

(2) The spatial distribution characteristics of carbon dioxide at different atmospheric pressure heights are quite different. The variation in the long-term series mean of carbon dioxide concentration levels at 17 vertical heights was studied. The fluctuations in concentration changes at different height levels vary, and the closer to the surface, the greater the fluctuation is. The near-surface carbon dioxide concentration (975 hPa) has the largest fluctuation. When the atmospheric pressure is low (for example, 150 or 100 hPa), the high carbon dioxide concentration region is banded and concentrated near the equator. The trends in carbon dioxide concentration over land and sea surfaces are similar, and the common pattern is that the concentration of carbon dioxide has been increasing.

(3) The near-surface carbon dioxide concentration (975 hPa) has clearly different spatial characteristics. There are four high-value centers across the globe: East Asia, western Europe, the US East Coast, and Central Africa. The concentration of carbon dioxide in the Northern Hemisphere near the ground is higher than that in the Southern Hemisphere. The fluctuation in the Southern Hemisphere is relatively small, and the trend is opposite that in the Northern Hemisphere.

(4) The concentration of carbon dioxide showed a significant growth trend during the study period. By studying the change characteristics of the monthly global average at the 975 hPa level (approximately 300 m above sea level) from January 2010 to October 2015, it can be seen that the global CO_2 concentration has been above 400 ppm for most of the year, and it is increasing each year.

(5) Compared with the Southern Hemisphere, the cyclical changes in carbon dioxide concentration in the Northern Hemisphere are obvious and large, while the trend in the Southern Hemisphere is relatively stable, and the change is small. There are opposite trends in the cyclical changes in the carbon dioxide concentration in the Northern and Southern Hemispheres. When the carbon concentration in the Northern Hemisphere resides over the annual high-value area, the Southern Hemisphere has a low-value area of carbon dioxide concentration every year. In addition, the change in carbon dioxide concentration during the year is obvious with seasonal changes. This should be related to changes in vegetation phenology and different seasons in the Northern and Southern Hemispheres.

(6) Four countries in East Asia (Korea, Mongolia, Japan and China) from 2010 to 2014 were selected to analyze the relationship between GPP (gross primary production) and near-surface carbon dioxide concentration. These two factors have a significant inverse correlation. When carbon dioxide is at a minimum, the GPP is at its peak, and when carbon dioxide reaches its peak, the GPP reaches a minimum. The above relationship fully indicates that terrestrial ecosystems play an important role as carbon sink contributors in the carbon cycle.

(7) The relationship between atmospheric carbon dioxide and carbon dioxide data from human activities from the Global Atmospheric Research Emissions Database was analyzed. The former is significantly and positively correlated with carbon dioxide emissions caused by human activities, indicating that human activities are an important factor in the increase in carbon dioxide.

Greenhouse Gases Observing SATellite, carbon dioxide, spatial and temporal variation, gross primary productivity

doi: 10.1360/TB-2019-0022