探寻我国碳汇分布: 从大气CO₂探测入手

王婧, 刘毅, 杨东旭*

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

* 联系人, E-mail: yangdx@mail.iap.ac.cn

To explore the distribution of carbon sink in China: From atmospheric CO₂ measurements

Jing Wang, Yi Liu & Dongxu Yang*

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

* Corresponding author, E-mail: yangdx@mail.iap.ac.cn

doi: 10.1360/TB-2020-1491

二氧化碳(CO₂)是地球大气的重要组成部分, 体积组分约占大气的0.04%。大气中的CO₂会产生较强的温室效应, 含量过高将导致地表温度升高。自工业革命以来, 人类对化石燃料的消耗, 导致CO₂等温室气体被大量释放, 超过了大自然的调节能力, 导致残留在大气中的CO₂含量急剧上升, 是造成全球升温的主要原因。目前, 中国是世界上最大的CO₂排放国之一^[1], 一直是国际气候变化谈判的焦点。我国自20世纪80年代末开始注重环境保护, 植树造林等多项工程增加了陆地生态系统碳汇。无论对国际谈判还是气候变化研究, 都需要对我国的陆地碳收支进行研究。

计算陆地碳交换的方法主要有“自下而上”和“自上而下”两大类。“自下而上”方法一般包括基于过程的模型和基于经验模型的升尺度计算, 基于过程的模型通过考虑各种指定植被类型的碳流动内部生化机制(如: 光合作用、呼吸和分解)来模拟生态系统尺度的碳循环。基于经验模型的升尺度计算将环境因素(如: 空气温度、降水、辐射和植被参数等)作为输入数据, 并由经验获得的CO₂通量与这些环境因素之间的关系开展计算。“自上而下”方法主要是根据大气中CO₂的浓度变化对地表的CO₂通量进行优化计算。一般以大气化学传输模式作为正向模式, 结合CO₂先验清单(如生物质和化石燃料的燃烧排放等)计算模拟的CO₂浓度场, 结合数据同化方法寻求观测值和模拟值之间的一致性, 进而计算陆地碳通量, 该方法一般称为碳同化反演。我们结合GEOS-Chem大气化学传输模式和集合卡尔曼滤波算法^[2]对中国地区陆地生态系统碳通量进行计算。图1给出了该研究所用的同化反演模式框架图。

尽管中国的碳收支研究对全球碳循环至关重要, 但一直以来, 由于地面观测数据的缺乏, 利用碳同化反演算法计算

中国碳源汇的研究较少且结果的不确定度较大。该研究在传统使用的NOAA ESRL观测数据集的基础上, 主要加入了中国气象局的6个区域背景站观测、西伯利亚地区日俄联合高塔观测网数据, 从而增加了欧亚大陆的约束信息。

研究设置了两组实验, 一组仅使用通用的NOAA数据集(SR-1), 另一组同时使用NOAA数据集、WDCGG香港HKG站点、日俄-联合高塔观测网以及中国气象局区域背景观测网数据进行同化反演计算(SR-2)。相较于SR-1, SR-2明显降低了欧亚大陆北部和温带地区的通量不确定度, 中国地区不确定度下降了0.14 GtC/a(26.9%)。中国地区SR-1和SR-2计算的后验大气净通量分别为 1.82 ± 0.52 和 1.37 ± 0.38 GtC/a, 陆地生态系统通量分别为 -0.66 ± 0.52 和 -1.11 ± 0.38 GtC/a, 该结果较前人研究结果偏大^[3,4]。根据SR-2计算结果, 2010~2016年中国陆地生态系统碳汇平均吸收了人为碳排放的44.8%。相较于SR-1, SR-2增大的碳汇主要位于西南地区(全年)以及东北地区(仅夏季)。本研究对影响同化结果的观测数据过滤条件、先验通量不确定度和人为碳排放清单等进行了敏感性测试。综合考虑各敏感性实验, SR-1和SR-2计算的中国地区陆地生态系统碳汇的范围分别为 $-0.55 \pm 0.52 \sim -0.89 \pm 0.52$ GtC/a以及 $-0.89 \pm 0.38 \sim -1.47 \pm 0.38$ GtC/a。

卫星观测覆盖范围广, 在地面观测站点稀疏及缺乏的区域可提供额外的观测信息。本研究分别使用GOSAT(ACOS产品)和OCO-2(ACOS产品)观测进行反演(试验分别简称GO-SAT-ACOS和OCO2-ACOS)。研究表明, 使用卫星观测有效降低了地面观测稀少的南美洲、非洲、大洋洲以及赤道地区的通量不确定度。GOSAT-ACOS计算2010~2015年我国陆地生态系统碳汇的平均值为 -0.83 ± 0.47 GtC/a, OCO2-ACOS计

图1 (网络版彩色)研究所用CO₂同化反演模式框架结构

Figure 1 (Color online) Frame structure of the CO₂ inversion model

算2015~2016年我国陆地生态系统碳汇的平均值为 -0.88 ± 0.43 GtC/a, 两组卫星数据计算的年均陆地生态系统碳汇较SR-2均略偏小。卫星数据反演结果在主要的生长季(5~9月)的碳汇较SR-2反演结果偏大, 全年平均碳汇偏小主要是由于在11月份到第二年3月份的碳排放更高, 这种差异GOSAT ACOS相比OCO-2ACOS数据的反演结果更明显。卫星数据反演结果的地理空间分布以及季节循环变化基本与SR-2相同, 表明了卫星数据在反演区域碳通量上的巨大潜力。

由于计算的后验陆地生态系统碳汇主要分布于中国的森林覆盖地区, 分别利用卫星遥感数据和中国林业和草原局森林清查数据分析全国以及SR-1和SR-2差异明显的西南、东北地区的森林变化情况。MODIS土地利用覆盖类型数据表明我国中部、西南、东南以及东北地区的森林区域有明显增加趋势, 并且西南地区增加最为明显。中国林业和草原局森林清查数据表明, 自20世纪80年代开始, 我国森林资源进

入到了迅速增加的阶段。从第1次~第8次森林清查, 全国森林面积增加了70.2%、蓄积量增加了75%。从第6次~第9次森林清查, 广西、贵州和云南的森林覆盖率分别提高了18.8、20以及18.5个百分点, 森林覆盖率分别达到了60.2%、43.8%和59.3%。森林的迅速增加导致我国的森林年龄结构较为年轻, 中幼龄林占到了65%。辽宁、贵州和广西的幼龄林占比最大, 分别为47%、50%以及46%。由于我国森林相对年轻, 因此我国的森林有着巨大的碳吸收潜力。

尽管由于观测数据较少的限制, 目前我们的研究结果仍有较大的不确定性, 但这个研究结果揭示我国陆地生态系统巨大的碳吸收能力, 肯定了我国近40年来对恢复天然森林植被、加强人工林培育的巨大投入取得的成果。未来, 需要更多的地面观测, 结合融合的多颗卫星观测数据, 尤其是我国碳卫星(TanSat)^[5]数据, 来对我国碳源汇进行进一步的研究。相关研究结果发表在Nature上^[6]。

致谢 感谢国家重点研发计划(2016YFA0600203)、中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2019-1)和国家自然科学基金(41905029)资助。

推荐阅读文献

- 1 Friedlingstein P, Jones M W, O'Sullivan M, et al. Global carbon budget 2019. *Earth Syst Sci Data*, 2019, 11: 1783–1838
- 2 Feng L, Palmer P I, Bösch H, et al. Estimating surface CO₂ fluxes from space-borne CO₂ dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman Filter. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 2619–2633
- 3 Jiang F, Chen J M, Zhou L X, et al. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. *Sci Rep*, 2016, 6: 22130
- 4 Zhang H F, Chen B Z, van der Laan-Luijkx I T, 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
- 5 Liu Y, Wang J, Yao L, et al. The TanSat mission: Preliminary global observations. *Sci Bull*, 2018, 63: 1200–1207
- 6 Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586: 720–723