

DOI: 10.5846/stxb202004271012

赵宁,周蕾,庄杰,王永琳,周稳,陈集景,宋珺,丁键滢,迟永刚.中国陆地生态系统碳源/汇整合分析.生态学报,2021,41(19):7648-7658.

Zhao N, Zhou L, Zhuang J, Wang Y L, Zhou W, Chen J J, Song J, Ding J X, Chi Y G. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7648-7658.

## 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析

赵宁<sup>1</sup>, 周蕾<sup>1,2</sup>, 庄杰<sup>1</sup>, 王永琳<sup>1</sup>, 周稳<sup>1</sup>, 陈集景<sup>1</sup>, 宋珺<sup>1</sup>, 丁键滢<sup>1</sup>,  
迟永刚<sup>1,3,\*</sup>

1 浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004

2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

**摘要:** 国家尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程的研究对于提升地球系统科学与全球变化科学的科技创新能力、提高我国参与应对全球气候变化国际行动和维护国家利益的话语权、保障国家生态安全和改进生态系统管理都具有重要意义。近年来,我国已经在气候变化与陆地生态系统碳循环领域开展了大量的研究工作,主要包括国家清查、生态系统模型模拟、大气反演等手段。然而,由于大尺度陆地生态系统碳源/汇的估算存在很大的不确定性,目前尚未形成国家尺度的陆地生态系统碳源/汇的整合分析。通过搜集已发表的关于中国陆地生态系统及其组分碳源/汇的 59 篇文献,整合国家清查、生态系统模型模拟、大气反演 3 种研究手段,分析中国陆地生态系统碳源/汇大小以及时间尺度上的动态变化。结果表明,在 1960s—2010s 期间中国陆地生态系统碳汇整体呈上升趋势,平均为 $(0.213 \pm 0.030)$  Pg C/a,其中森林、草地、农田和灌木生态系统碳汇分别为 $(0.101 \pm 0.023)$  Pg C/a、 $(0.032 \pm 0.007)$  Pg C/a、 $(0.043 \pm 0.010)$  Pg C/a 和 $(0.028 \pm 0.010)$  Pg C/a。森林生态系统中的植被碳汇远大于土壤碳汇,然而这种格局在草地和农田生态系统却相反,而且 1960s—2010s 期间中国主要植被类型的生态系统碳汇总体上随时间呈增加趋势。融合多源数据(地面观测、激光雷达、卫星遥感等)、多尺度数据(样地尺度、站点尺度、区域尺度)以及多手段数据(联网观测、森林清查、模型模拟),有助于全面准确地评估中国陆地生态系统碳源/汇及其对气候变化的响应。

**关键词:** 气候变化; 陆地生态系统; 碳汇; 清查; 生态系统模型; 大气反演

## Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China

ZHAO Ning<sup>1</sup>, ZHOU Lei<sup>1,2</sup>, ZHUANG Jie<sup>1</sup>, WANG Yonglin<sup>1</sup>, ZHOU Wen<sup>1</sup>, CHEN Jijing<sup>1</sup>, SONG Jun<sup>1</sup>,  
DING Jianxi<sup>1</sup>, CHI Yonggang<sup>1,3,\*</sup>

1 College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Estimating the national-scale terrestrial ecosystem carbon budget and their response to climate change is important to enhance the scientific and technological innovation capabilities of earth system science and global change science, to increase China's right to speak in international action to respond to global climate change, and to improve national ecological security and ecosystem management. The study of terrestrial ecosystems' carbon sources and sinks at the

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFB0504000); 国家自然科学基金项目(41871084, 31400393); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金

收稿日期: 2020-04-27; 网络出版日期: 2021-06-30

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chiyonggang@zjnu.cn

# 本文清查部分尚缺中国港、澳、台统计数据。

national scale is not only an urgent need to effectively mitigate greenhouse gases and tackle climate change, but also a task for the development of earth system science and global change science. In recent years, China has carried out a lot of research in the fields of climate change and terrestrial ecosystem carbon cycle, mainly using national inventory, ecological modelling, and atmospheric inversion. However, there is large uncertainties in the estimating large-scale terrestrial ecosystem carbon sources and sinks and a comprehensive analysis of carbon sources and sinks in China's terrestrial ecosystems has not yet been formed. In this study, we collected 59 published literatures on China's terrestrial ecosystems and their components, to analyze the magnitudes and dynamics of carbon sources and sinks in China's terrestrial ecosystems by integrating the three methods of national inventory, ecological modelling, and atmospheric inversion. The results found that from 1960s to 2010s, China's terrestrial ecosystem carbon sink showed an increasing trend, with an average of  $(0.213 \pm 0.030)$  Pg C/a, of which forest, grassland, cropland and shrub ecosystems were  $(0.101 \pm 0.023)$  Pg C/a,  $(0.032 \pm 0.007)$  Pg C/a,  $(0.043 \pm 0.010)$  Pg C/a and  $(0.028 \pm 0.010)$  Pg C/a, respectively. Vegetation carbon sinks in forest ecosystems were much larger than soil carbon sinks, but this pattern was reversed in grassland and cropland ecosystems. Moreover, the carbon sinks of the major vegetation types in China showed an increasing trend from 1960s to 2010s. Therefore, we recommend that the fusion of multi-source data (ground observation, lidar, and satellite remote sensing), multi-scale data (sample scale, site scale, and regional scale), and multi-method data (networked observation, national inventory, and modeling) to reduce the uncertainties in the large-scale terrestrial ecosystem carbon budgets, which is helpful for comprehensive assessment of carbon sources and sinks in China's terrestrial ecosystem and its response to climate change.

**Key Words:** climate change; terrestrial ecosystem; carbon sink; inventory; ecosystem model; atmospheric inversion

国家尺度陆地生态系统碳源/汇研究不仅是有效管理温室气体与积极应对气候变化的迫切需要,同时也是地球系统科学与全球变化科学发展的科技任务。陆地生态系统碳库是地球系统碳库的重要组成部分,对全球碳循环具有至关重要的作用<sup>[1]</sup>。陆地生态系统中绿色植物从大气中吸收二氧化碳(CO<sub>2</sub>)转化为有机物,不仅为生态系统中的生物提供生存的能量<sup>[2]</sup>,而且绿色植物能够大量地从大气中吸收 CO<sub>2</sub>,有助于减缓气候变暖<sup>[3]</sup>。自工业革命以来,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度从 1750 年约 277 μmol/mol<sup>[4]</sup> 增加到 2019 年的 408 μmol/mol<sup>[5]</sup> (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>)。有研究表明,全球陆地生态系统在 2007—2017 年平均从大气中吸收碳高达 3.61 Pg C/a,相当于工业活动和土地利用变化的人为总碳排放的 33.70%<sup>[2]</sup>。中国陆地生态系统占全球陆地面积的 6.40%,是全球和区域碳循环及其模式研究的重点地区<sup>[6-8]</sup>,因此,开展中国陆地生态系统碳源/汇研究是国家改进生态系统管理、保障生态安全的急迫需求。

不同研究手段估算的中国陆地生态系统碳源/汇结果差异巨大。最近 30 年来,估算陆地生态系统碳源/汇及其对气候变化响应的方法和数据来源层出不穷<sup>[2]</sup>,包括联网观测<sup>[9-10]</sup>、国家清查<sup>[3, 11-13]</sup>、模型模拟<sup>[1, 14-15]</sup>和大气反演<sup>[16-17]</sup>等。例如,Fang 等<sup>[11]</sup>利用清查资料对 1981—2000 年中国森林、草地、农田、灌丛 4 种主要植被类型的生物量碳汇进行估算,进而讨论了整个中国陆地生态系统碳源/汇大小及其动态变化。统计模型<sup>[18]</sup>、光能利用率模型<sup>[19-21]</sup>和生态系统过程模型<sup>[1, 8, 22-23]</sup>等也被应用到估算区域或者国家尺度陆地生态系统碳源/汇的研究中。Jiang 等<sup>[17]</sup>基于大气反演估算比较了 2002—2008 年中国、欧洲与北美陆地生态系统碳汇的大小,并与 CarbonTracker 2010 的结果等进行比对。Piao 等<sup>[1]</sup>利用清查资料、5 个生态系统过程模型、大气反演对中国陆地生态系统碳源/汇进行了评估。然而,基于不同研究手段估算的中国陆地生态系统碳源/汇结果有一定差异,急需国家尺度的陆地生态系统碳源/汇的整合分析。

中国生态系统研究网络(CERN)至 2019 年已成立 30 周年,依托于 CERN 的中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)于 2001 年正式创建<sup>[24]</sup>。基于 CERN 和 ChinaFLUX 的中国区域陆地生态系统碳循环方面的研究取得了丰硕的成果。《美国科学院院刊》(PNAS)以专辑形式发表了中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”研究论文,量化了中国陆地生态系统固碳能力的强度和空间

分布,并首次在国家尺度上通过数据证明,中国重大生态工程具有显著的固碳作用<sup>[25]</sup>。Yao 等<sup>[9]</sup>结合中国及周边地区 46 个通量站点的数据,利用机器学习技术将中国境内基于 FLUXNET 站点观测的净生态系统生产力(NEP)扩大到国家尺度,生成了 2005—2011 年中国陆地生态系统 NEP 的 1km×1km 数据集。值此 CERN 成立 30 周年之际,本研究通过搜集已发表的关于中国陆地生态系统及其组分碳源/汇的 59 篇文献,对比国家清查、生态系统模型模拟、大气反演 3 种研究手段,整合分析中国陆地生态系统碳源/汇。本文研究目标是:(1) 整合量化基于多手段估算的中国陆地生态系统碳源/汇的大小;(2) 比对分析中国陆地生态系统主要植被类型(森林、草地、农田和灌木)的碳源/汇及其随时间的动态变化;(3) 综述中国陆地生态系统碳源/汇的驱动机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本文数据来源于已发表的文献,其中中文文献来自中国知网(<https://www.cnki.net/>),英文文献来自 Web of Science 数据库(<http://apps.webofknowledge.com/>)。搜索文献的关键词限定为碳源/汇(carbon source/sink)、碳平衡(carbon balance)、碳循环(carbon cycle)、净生态系统生产力(Net Ecosystem Production, NEP)、净生态系统碳交换(Net Ecosystem Exchange, NEE)。搜集的数据主要包括中国陆地生态系统碳源/汇(或 NEP、NEE)、主要植被类型(森林、草地、农田、灌木)的碳源/汇(或 NEP、NEE)以及上述 4 种植被类型的植被碳源/汇和土壤碳源/汇和相应的研究时间段和研究方法。此外,1960—2010 年气候数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)逐日气候站点数据(日最高气温、日最低气温,日降水量),采用 ANUSPLIN 软件<sup>[26]</sup>插值 8km 的空间数据库。由于中国辐射气象站点较少,所以采用气象站点日照时数数据,通过太阳总辐射与日照时数的关系,再通过 ANUSPLIN 算法插值成 8km 空间分辨率的每日辐射数据库<sup>[27]</sup>。日气象数据库整合到年尺度,然后像元平均得到中国每年平均气温,总降水量和总辐射数据库。年均 CO<sub>2</sub> 浓度来源于 Mauna Loa 观测站(<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>)。最后根据每 10a 一个时期汇总气象数据和 CO<sub>2</sub> 浓度数据,与中国陆地碳源/碳汇匹配。

表征陆地生态系统生产力的概念有 4 个,分别是总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)、净生态系统生产力(NEP)、净生态系统碳交换量(NEE)。其中,GPP 为绿色植物在一定时间内生产的全部有机物的量;NPP 为 GPP 减去自养呼吸(即植物呼吸所消耗的能量);NEP 是由一定时间内生态系统 GPP 减去生态系统总呼吸所得<sup>[28]</sup>,也可以根据 NPP 减去异养呼吸计算<sup>[29]</sup>。NEP 为正值表明该生态系统在一定时间内对 CO<sub>2</sub> 的吸收大于排放,即该生态系统是碳汇,反之为碳源<sup>[11]</sup>。NEE 由生态系统呼吸减去 NPP 所得,和 NEP 相比,大小相等符号相反<sup>[2]</sup>。因此,常用 NEP(或 NEE)来衡量区域尺度上生态系统碳源/汇的大小<sup>[29-30]</sup>。

### 1.2 数据处理

建立中国陆地生态系统碳源/汇数据库,按照研究方法、研究时间段以及数据来源进行分类汇总。首先,将中国陆地生态系统碳源/汇的研究方法分为 3 类,即国家清查法、生态系统模型和大气反演,对中国陆地生态系统整体碳源/汇进行整理与分析。其次,收集中国主要植被类型包括森林、草地、农田、灌木生态系统的总体碳源/汇,查找并搜集这 4 种植被类型的植被(地上)碳源/汇和土壤碳源/汇的相关资料,进行整合分析。整理文献发现,研究时间段集中在 1960s—2010s 之间。因此,本文以 10a 为间隔,将整合的中国陆地生态系统碳源/汇数据进行时间动态分析,并对中国年均气温、降水、辐射和 CO<sub>2</sub> 浓度因子的时间动态进行对比分析。

对于清查法、生态系统模型模拟和大气反演 3 种方法估算的中国陆地生态系统碳源/汇,本文采用单因素方差分析检验不同估算方法之间的差异,并计算 3 种方法对应的 3 组数据的变异系数(Coefficient of Variation, CV)来衡量数据的离散程度。采用方差分析比较不同年代、不同植被类型(森林、草地、农田、灌木)的碳源/汇差异。在满足方差齐次性的前提下进行方差分析以及 LSD 多重检验,显著性水平  $P=0.05$ 。本研究采用 IBM SPSS Statistic25 进行方差分析,基于 OriginLab OriginPro 2018C 64-bit 平台进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 基于 3 种方法估算的中国陆地生态系统碳源/汇

汇总 3 种方法估算的中国 1960s—2010s 期间生态系统碳源/汇,结果均大于 0(图 1),并将搜集得到的数据进行均值处理,结果为 $(0.212 \pm 0.031)$  Pg C/a,说明中国陆地生态系统在这个时间段内总体上是碳汇。其中,基于清查法估算的中国碳汇结果在 0.008—0.201 Pg C/a 之间,平均值为 $(0.137 \pm 0.032)$  Pg C/a;基于生态系统模型模拟的碳汇范围为 0.017—0.290 Pg C/a,平均值为 $(0.138 \pm 0.017)$  Pg C/a;基于大气反演估算的碳汇结果在 0.260—0.966 Pg C/a 之间,平均值为 $(0.441 \pm 0.079)$  Pg C/a。方差分析表明,通过大气反演方法估算的中国陆地生态系统碳汇显著大于清查法( $P < 0.01$ )和生态系统模型模拟( $P < 0.01$ ),然而清查法与生态系统模型模拟的估算值之间差异不显著( $P = 0.98$ ),这表明生态系统模拟的碳源/汇和清查数据获得的中国陆地生态系统碳源/汇具有一致性。本文发现,收集的三种方法估算的碳汇数据变异系数均较大,在 0.5—0.6 之间,说明模型模拟、清查法以及大气反演三组数据的变异程度较大。

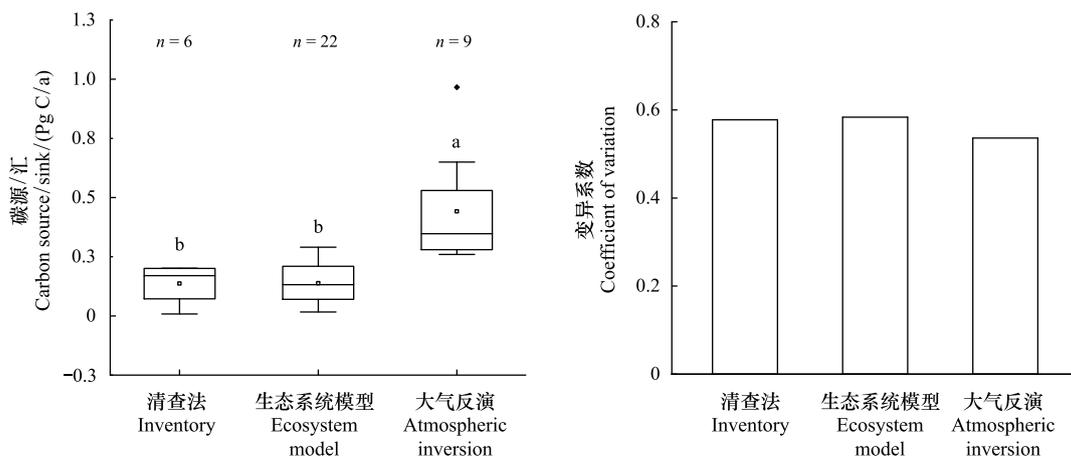


图 1 不同方法估算的中国陆地生态系统碳源/汇结果对比

Fig.1 Comparison of the carbon source/sink of terrestrial ecosystem in China by different methods

图中  $n$  为搜集到的样本数;箱型图上方的字母(a, b)代表方差分析的结果,在显著性水平为 0.05 时,不同字母表示对应的两组数据有显著差异,反之差异不显著

### 2.2 中国陆地生态系统 4 种植被类型碳源/汇

根据搜集到的数据可以看出中国陆地生态系统森林、草地、农田、灌木 4 种主要植被类型的碳源/汇的平均结果大于 0,即中国森林、草地、农田、灌木 4 种生态系统在 1960s—2010s 期间总体上为碳汇(图 2)。其中,森林生态系统碳源/汇范围为 $-0.122$ — $0.540$  Pg C/a,平均值为 $(0.101 \pm 0.023)$  Pg C/a;草地生态系统碳源/汇范围为 $-0.004$ — $0.084$  Pg C/a,平均值为 $(0.032 \pm 0.007)$  Pg C/a;农田生态系统的碳源/汇范围为 $-0.002$ — $0.120$  Pg C/a,平均值为 $(0.043 \pm 0.010)$  Pg C/a;灌木生态系统范围为 $0.001$ — $0.061$  Pg C/a,平均值为 $(0.028 \pm 0.010)$  Pg C/a(图 2)。森林生态系统碳汇约为草地碳汇的 4 倍,4 种植被类型中森林碳汇的变异程度最大( $>1$ ),其次是灌木,草地和农田次之。

### 2.3 中国陆地生态系统主要植被类型的植被与土壤碳源/汇

在森林生态系统中,植被碳汇的平均值为 $(0.094 \pm 0.010)$  Pg C/a(图 2),而土壤碳汇平均值为 $(0.038 \pm 0.013)$  Pg C/a(图 2),森林生态系统中植被碳汇为土壤碳汇的两倍多。在草地生态系统中,植被碳汇平均值为 $(0.005 \pm 0.001)$  Pg C/a(图 2),土壤碳汇平均值为 $(0.017 \pm 0.005)$  Pg C/a(图 2),草地生态系统土壤碳汇约为植被碳汇的 3 倍。在农田生态系统中,植被碳汇的平均值约为 0 Pg C/a(图 2),接近中性,土壤碳汇平均值为 $(0.017 \pm 0.005)$  Pg C/a(图 2),由此可见,虽然农田生态系统整体是一个碳汇,但是农田生态系统土壤碳汇

远大于植被碳汇。在灌木生态系统中,植被碳汇平均值为 $(0.025\pm 0.005)$  Pg C/a (图2)、土壤碳汇平均值为 $(0.026\pm 0.014)$  Pg C/a (图2),可以看出灌木生态系统的植被与土壤的固碳能力相当。然而,整体上土壤碳汇的变异系数比植被碳汇较高(图2),由于农田植被碳汇的研究较少(仅有一个样本),不能进行统计分析,没有计算变异系数。与森林植被碳汇和灌木植被碳汇相比,草地植被变异系数较高(图2),与森林生态系统总碳汇(图2)情况相反。

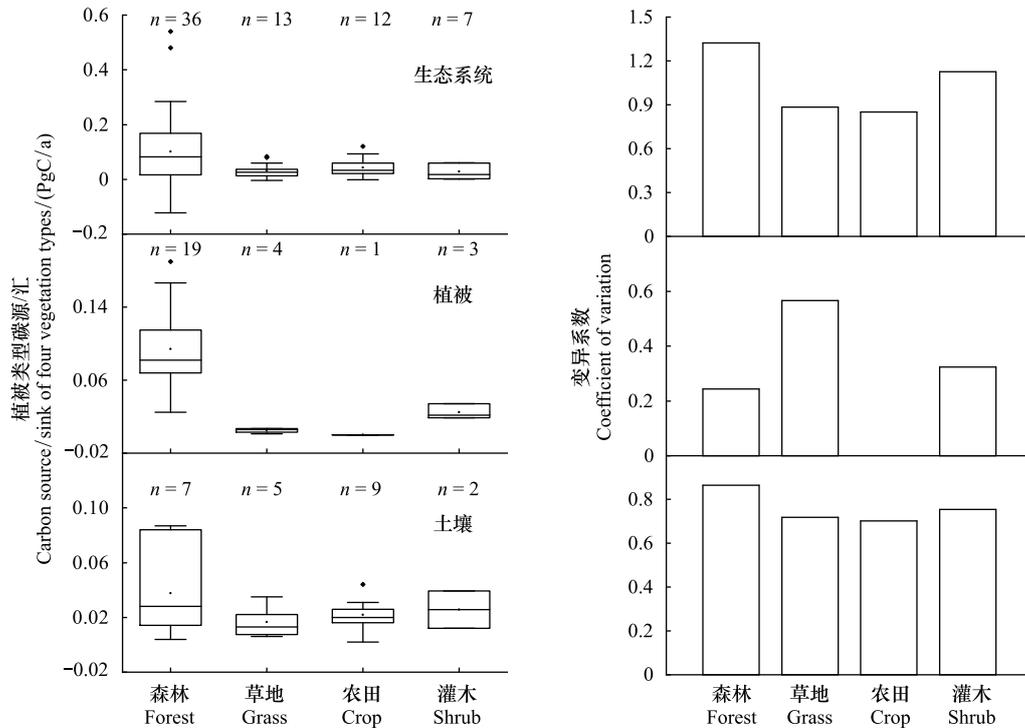


图2 中国主要植被类型碳源/汇

Fig.2 Carbon source/sink of major vegetation types in China (where  $n$  is the number of samples

图中  $n$  为搜集到的样本数

#### 2.4 中国陆地生态系统主要植被类型碳源/汇随时间的动态变化

中国陆地生态系统4种植被类型在1960s—2010s期间为碳汇且随时间在整体上呈增加的趋势,特别是进入2000s,4种生态系统的碳汇都显著增加,草地除外(图3)。具体表现为,森林生态系统从1960s的 $(0.033\pm 0.029)$  Pg C/a增加到2000s的 $(0.168\pm 0.036)$  Pg C/a(图3)。但是,在1980s期间内森林生态系统对 $\text{CO}_2$ 的吸收显著减少,随后1990s上升,到2000s中国森林生态系统碳汇较1960s有显著增加。相比森林来说,中国草地生态系统的在研究期间内没有显著的增加;但是方差分析结果显示2000s相比1960s—1970s有轻微显著的上升( $P=0.057$ ),从数值上看草地生态系统1960s的碳汇为 $(0.003\pm 0.008)$  Pg C/a,2000s的碳汇为 $(0.036\pm 0.015)$  Pg C/a(图3)。作为受人类活动影响较大的生态系统,农田生态系统的碳汇从1960s的 $(0.001\pm 0.016)$  Pg C/a增加到2000s的 $(0.050\pm 0.020)$  Pg C/a。灌木生态系统从1960s的 $(0.003\pm 0.001)$  Pg C/a增加到2000s的 $(0.027\pm 0.017)$  Pg C/a。

在1960—2010年期间,中国区域的年均温在 $9-10^\circ\text{C}$ 之间,随时间呈上升的趋势。年降水在时间上与气温变化较为一致,进入1980s以后明显增加。除此之外,年均辐射从1960年( $4570 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )至2010年间( $4480 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )有轻微的降低。 $\text{CO}_2$ 浓度亦随时间呈上升的趋势,从1960年约为 $320 \mu\text{mol/mol}$ 到2010年约为 $390 \mu\text{mol/mol}$ 。

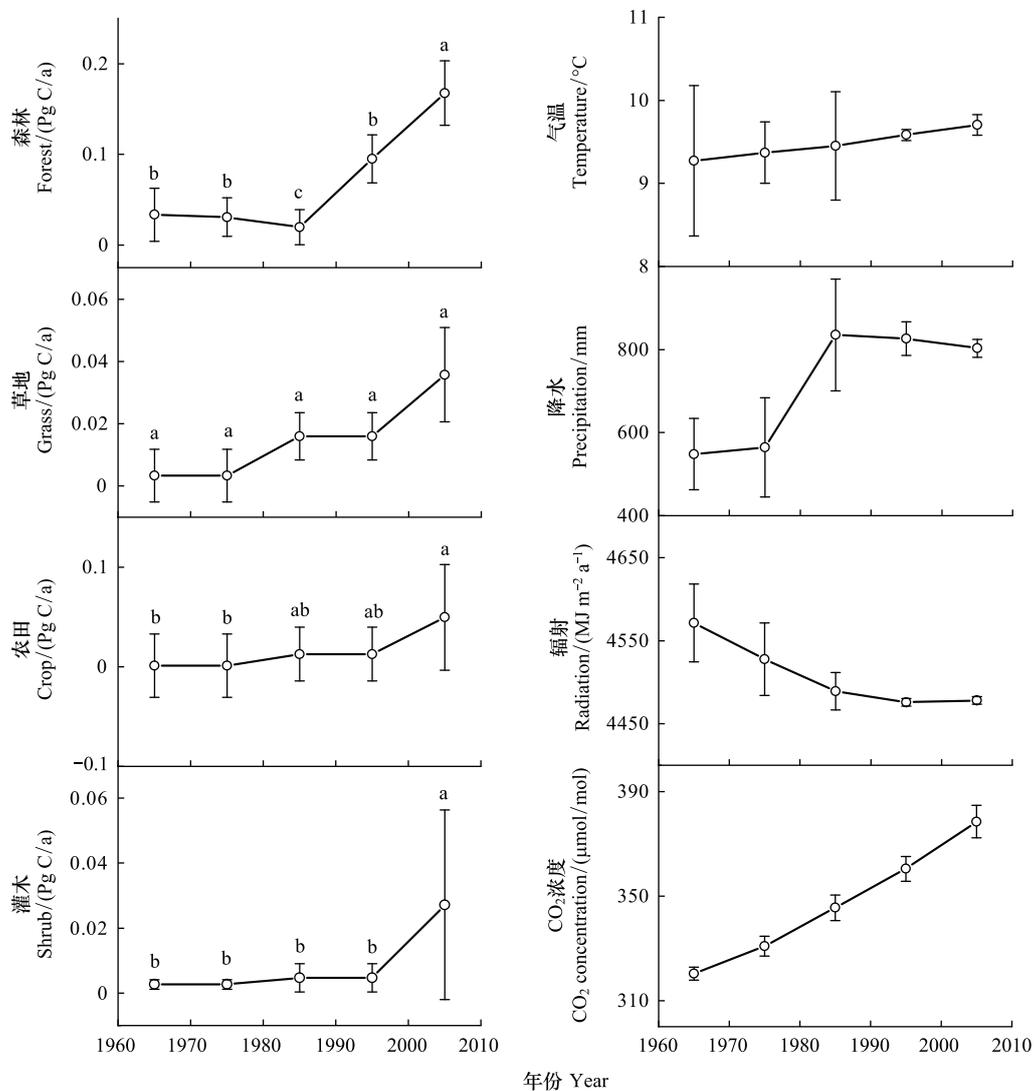


图 3 4 种植被类型碳源/汇的时间变化

Fig.3 The decadal variation of four vegetation types' carbon source/sink

图中的误差线为标准差 SD; 误差线上方的字母(a, b, c)代表方差分析的结果, 在显著性水平为 0.05 时, 不同字母表示对应的两组数据有显著差异, 反之差异不显著

### 3 讨论

#### 3.1 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析

本文通过整合分析发现中国陆地生态系统在 1960—2010 年间为碳汇, 平均每年从大气中吸收 CO<sub>2</sub> 达 (0.213±0.030) Pg C (图 1), 与美国(1980—1993 年间 0.04—0.26 Pg C/a)<sup>[31-32]</sup> 以及欧洲(1980—1998 年间 0.11—0.29 Pg C/a)<sup>[33]</sup> 的陆地生态系统碳汇相当。已有的研究表明, 中国陆地生态系统 CO<sub>2</sub> 吸收量占全球陆地碳汇的 8%—11%<sup>[1]</sup>, 是全球陆地生态系统碳汇的重要组成部分<sup>[1, 11, 14]</sup>。同时, 1960—2010 年中国主要植被类型的生态系统碳源/汇总体上随时间呈显著增加趋势(图 3)。自 20 世纪 70 年代中期以来, 中国的植树造林和林业管理、草地保护、农作制度改革和保护性耕作等措施发挥了固碳功能, 为缓解全球的气候变暖作出了贡献<sup>[34]</sup>。由此可见, 虽然中国是世界上最大的碳排放国, 但是陆地生态系统从大气中吸收了大量的 CO<sub>2</sub>, 起着强大的碳汇作用<sup>[8]</sup>。

3种研究手段估算的中国陆地生态系统碳源汇结果差异较大(图1),主要源于这3种研究方法本身属性的差异。首先,清查法虽然基于实际数据,但是很难获得详细而准确的森林、草地、农田等资源的清查资料。本研究中,搜集到利用清查法进行中国陆地生态系统碳汇估算的研究为6个。基于国家清单的碳源/汇估算(即生物量调查法)不仅存在较大的不确定性,而且耗时耗力,仅能计算一定时间间隔内的植被或土壤的平均碳汇,而不是整个生态系统的碳汇,更不能预测陆地生态系统碳汇的未来变化趋势<sup>[1]</sup>。其次,生态系统模型能够描述生态系统功能的时空变化及其对气候变化的响应机制,是估算区域植被碳源/汇的重要手段<sup>[14, 35]</sup>。本研究中,基于模型模拟方法进行中国陆地生态系统碳源/汇估算的研究较多,特别是生态系统过程模型、光能利用率模型等被广泛应用(图1)。但是,生态系统模型模拟结果的精度高度依赖于模型结构、模型参数和输入数据的精度,存在着较大的不确定性<sup>[14-15, 36]</sup>。最后,随着遥感卫星数据的发展,大气反演方法根据观测到的大气CO<sub>2</sub>浓度等来优化陆地碳通量估算,可以较好地追踪区域陆地生态系统碳源/汇的年内和年际变化规律。但是,大气反演方法受制于CO<sub>2</sub>观测点密度和先验地表碳通量的精度等<sup>[37]</sup>。因此,目前对中国陆地生态系统碳源/汇的估算具有很大的不确定性,而陆地生态系统碳源汇估算正在向多源数据综合分析、遥感监测、模型模拟、大气反演和数据同化综合集成研究方向发展<sup>[36]</sup>。

本文的整合结果表明,中国陆地生态系统碳汇和4种植被类型碳源/汇总和不一致。主要原因有,国家尺度和4个生态系统的碳汇均来自与已有研究结果的汇总统计,这些结果并非来自一种估算方法和完全一致的时间段。其次,森林、草地、农田和灌木4种生态系统是我国固碳能力较大的4种生态系统类型,然而事实上中国陆地生态系统还包括湿地、城市等其他各种生态系统,其他生态系统是碳源或者是碳汇在本研究尚无关注。因此,中国陆地生态系统碳汇与森林、草地、农田和灌木4种生态系统类型碳汇的总和不一致。

此外,本文中生态系统、植被和土壤(图2)的碳源/汇总和有差别,主要是植被和土壤的数据与生态系统是独立的数据,各来自不同的研究进行汇总,并非求和所得。生态系统和植被、土壤碳汇均为搜集到文献及其结果的统计值,来自不同的研究。而且整理的每一种生态系统类型的碳源和植被、土壤碳汇均为已有研究的统计值。其次不同研究在对土壤碳汇研究的时候,地下深度不一致。本文汇总生态系统碳汇和植被与土壤碳汇暂没有考虑这一点,具有一定的误差。而且由于不同研究估算的碳汇结果有很大的变异性,变异系数普遍较高(图1,图2)。

### 3.2 中国陆地生态系统主要植被类型的碳源/汇

森林生态系统是世界上巨大而持久的碳汇<sup>[3]</sup>,其生物量占陆地生物量的85%—90%,在区域和全球碳循环中起着主导作用。中国森林生态系统碳汇在1960s—2010s期间平均值为(0.102±0.098) Pg C/a,且在1980s以来,中国森林生态系统碳汇水平显著升高(图2)。Pan等人<sup>[3]</sup>根据大规模国家清查数据得出全球森林净碳汇为(1.1±0.8) Pg C/a,主要位于温带地区。同时,1990—2007年间,世界人工林的累积碳蓄积量为73 Pg C,相当于该时期累计化石排放量(126 Pg C)的60%。《京都议定书》明确建议通过植树造林增加碳固存<sup>[38]</sup>。自1970s后期以来,中国启动了6个关键的生态修复工程(分别是三北防护林计划、长江和珠江防护林项目、天然林保护项目、退耕还林工程、京津沙源治理项目、退耕还草项目),生态修复区域的碳汇有56%是由生态修复工程的实施引起的,实施生态修复项目对中国陆地生态系统CO<sub>2</sub>的吸收有重大意义<sup>[39]</sup>。由此可见,中国森林生态系统具有很大的碳汇潜力<sup>[40]</sup>,对中国森林碳源汇进行详细评估,不仅对国家碳预算至关重要,而且有助于制定有关气候变化的可持续森林管理政策<sup>[11]</sup>。

草地生态系统中的土壤碳汇远大于植被碳汇(图2)。中国草地生态系统资源丰富,分布范围广,约占总土地面积的41.7%<sup>[41]</sup>,是中国最大的陆地生态系统之一,在中国陆地生态系统以及全球生态系统碳循环中有重大的影响<sup>[7, 11, 42]</sup>。Tao等<sup>[6]</sup>研究表明,在1981—2000年间草地和灌木丛生态系统几乎占了全国总固碳的四分之三。Fang等<sup>[11]</sup>利用草地资源清查数据估算出草地生态系统碳库约为1.15 Pg C,并且草地地下生物量在全部生物量中占很大比重。有研究表明中国草地植被(生物量)碳库的估算范围是0.90—4.66 Pg C之间,土壤碳库估算范围是12.40—63.44 Pg C,中国草地生态系统碳库大小为14.50—64.46 Pg C,也就是说草地

生态系统中绝大部分的碳存储于土壤<sup>[42]</sup>。

农田生态系统碳汇相对较弱,甚至有的学者把农田作为一个中性(neutral)碳汇。Fang 等<sup>[11]</sup>认为,虽然中国农田生物量按 0.013—0.143 Pg C/a 的速率增加,但是考虑到作物的收获期短,农作物生物量碳汇效果不明显,因此把农田生物量碳汇看做中性。然而,近年来的研究结果表明,农田生态系统的碳汇大于 0<sup>[1, 14, 17, 43]</sup>。Xiao 等用生态系统过程模型 TEM 对中国农田生态系统碳汇进行估算,在 1999—2002 期间碳汇为 0.013 Pg C/a。农田生态系统碳汇主要来源于该生态系统土壤碳的累积<sup>[13]</sup>,在未来的 50—100a 中,全球农业土壤中的固碳可能达到 40—80 Pg C<sup>[44]</sup>。农田生态系统的碳汇估算的不确定性主要是由于农田生态系统受到气候、大气 CO<sub>2</sub> 浓度、臭氧(O<sub>3</sub>)、人为管理比如施肥灌溉以及土地覆盖/土地利用变化等多种因素的综合影响,其碳循环过程较为复杂,因此农田碳收支的估算精度不高<sup>[5, 43, 45-48]</sup>。农田生态系统由于易受人类活动的影响,其碳库是全球最活跃的碳库<sup>[35, 47]</sup>。但是,自 1980 年以来中国农田土壤有机碳连续增加,这说明中国耕地具有巨大的固碳潜力<sup>[45]</sup>。

灌木是中国分布广泛的生物群落类型,其土地面积约为中国总土地面积的 1/5<sup>[1, 7]</sup>。近年来有关对中国不同植被的碳汇效应的研究结果表明,灌木生态系统也有很大的 CO<sub>2</sub> 吸收能力(图 2),利用遥感绿度信息估算表明,中国 20 世纪 80 年代灌木林生物量的净碳汇量为 0.023 Pg C/a,是同期森林碳汇的 30%<sup>[1]</sup>。多种因素比如过度放牧、火灾、土壤、气候影响等作用导致干旱地区/半干旱地区发生的灌木入侵,对灌木生态系统生物多样性以及碳循环产生了很大的影响<sup>[49-51]</sup>。1980s 以来中国大规模人工林计划和灌木丛恢复对碳汇也产生了重要影响,灌木丛恢复被认为是造成碳汇最不确定的因素之一<sup>[1]</sup>。另外,草原很大一部分受到灌木丛侵袭,对植被覆盖和物种组成以及草原和灌木碳库亦具有重大影响。据估计,在美国灌木的“侵蚀”约占碳汇的三分之一<sup>[8, 52]</sup>。

### 3.3 中国陆地生态系统碳源/汇的驱动机制

温度、降水和太阳辐射是影响植物光合作用进而影响生态系统碳汇的三个关键气候因素,通常高温、充足的降雨和太阳辐射有利于植物生长并产生更强的碳汇。研究表明中国陆地生态系统碳汇与温度和降水呈强相关<sup>[17]</sup>。陆地生态系统碳吸收对降雨具有高度敏感性<sup>[8]</sup>,尤其是中国温带季风气候区的降水变化对 NEP 年变化影响最大<sup>[53]</sup>。Cao 等<sup>[30]</sup>研究了中国陆地生态系统 NEP 与降水和降水的关系,结果表明 NEP 与温度呈正相关,但与温度的关系较为复杂。He 等<sup>[8]</sup>研究了 2000—2010 年中国陆地生态系统 NEP,结果表明东亚夏季风的增强是导致中国碳吸收增加的关键气候因素。季风和年际变化较大的季风气候系统在驱动中国陆地碳汇的年变化方面有很大的影响<sup>[53]</sup>,并且预计未来东亚地区的降水增加,有助于中国乃至全球陆地生态系统的碳吸收增强<sup>[54]</sup>。东亚季风对中国陆地生态系统碳源/汇具有调节作用<sup>[30]</sup>,但其变化能够改变温度、降水的空间和时间特征,进而对陆地生态系统碳汇产生重大影响。

除气候因素外,其他环境因素,例如大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度、O<sub>3</sub> 以及大气中的氮沉降也影响着中国陆地生态系统的碳吸收<sup>[8, 14, 53, 55]</sup>。研究表明,虽然 CO<sub>2</sub> 浓度和氮沉降刺激了中国陆地植物生长及其对 CO<sub>2</sub> 的吸收,但是对于陆地碳汇的作用小于气候因素<sup>[35]</sup>。2000—2010 年间中国气候效应对碳吸收的贡献有 56.30%,然而大气 CO<sub>2</sub> 浓度和氮沉降对这一变化的贡献相对较小(分别为 8.60% 和 11.30%)<sup>[8]</sup>。另外,土地覆被变化<sup>[8, 55]</sup>等对中国陆地生态系统碳吸收也有一定的影响。Zhang 等<sup>[56]</sup>研究结果表明 1980—1995 年间中国陆地生态系统由于土地利用变化损失了 0.219 Pg C,在 1995—2010 年期间损失了 0.060 Pg C,并且中国土地利用变化不利于减碳。

中国复杂的气候条件以及植被覆盖的空间异质性,产生差异性的生态系统响应。森林生态系统对 CO<sub>2</sub> 的吸收不仅受到气候因素、大气 CO<sub>2</sub> 浓度以及氮沉降的影响,还受到大规模植树造林以及林龄的影响<sup>[3, 14]</sup>。草地生态系统对 CO<sub>2</sub> 的吸收不仅受到降雨影响,还受到放牧等人类活动的影响<sup>[1, 57]</sup>。农田生态系统除了受到气候因素影响以外,还受到灌溉条件和施肥等管理方式的影响<sup>[47, 58]</sup>。研究表明,气候变化、CO<sub>2</sub> 浓度升高、氮沉降以及对流层 O<sub>3</sub> 污染,在 1980—2005 年间对农田生态系统土壤碳的贡献不足 20%<sup>[14, 47, 55]</sup>。

#### 4 展望

随着遥感技术的飞速发展,比如日光诱导叶绿素荧光等遥感技术以及联网观测的广泛应用,有助于精确监测大气中 CO<sub>2</sub> 浓度和生态系统碳源/汇的时空分布,对全面了解全球碳循环并正确预测未来气候变化有重要的意义<sup>[59]</sup>。但是,陆地生态系统碳汇仍然是全球碳预算中最不确定的部分<sup>[60]</sup>。中国区域陆地生态系统碳汇的估算同样有很大的不确定性<sup>[1, 17]</sup>。包括生态系统的呼吸、人类活动导致的碳排放、极端气候(如干旱,洪涝等)、火灾等是目前估算生态系统净碳源/汇带来了很大的不确定性<sup>[61]</sup>。

融合多源数据(地面观测、激光雷达、卫星遥感)、多尺度数据(样地尺度、站点尺度、区域尺度)以及多手段数据(联网观测、森林清查、模型模拟),有助于全面准确地评估中国陆地生态系统碳汇。区域生态系统碳收支及其循环过程机制是一个非常复杂的问题,需要整合定点观测数据、联网控制实验、样带调查、生态系统网络观测、模型模拟以及卫星遥感反演等数据,基于多尺度、多过程、多学科、多途径的综合集成分析等手段,准确评估中国森林、草地、农田、灌丛以及湿地等生态系统的固碳现状、速率、潜力,客观评价中国陆地生态系统潜在固碳潜力、现实固碳潜力及其在全球碳收支中的贡献。综合研究中国国家尺度陆地生态系统碳源/汇及其格局变化规律,不仅是积极应对气候变化的迫切需要,同时也具有非常重要的全球意义。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458 (7241): 1009-1013.
- [ 2 ] Keenan T F, Williams C A. The terrestrial carbon sink. *Annual Review of Environment and Resources*, 2018, 43: 219-243.
- [ 3 ] Pan Y, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [ 4 ] Joos F, Spahni R. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(5): 1425-1430.
- [ 5 ] Friedlingstein P, Jones M W, O'Sullivan M, Andrew R M, Hauck J, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quéré C, Bakker D C E, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Anthoni P, Barbero L, Bastos A, Bastrikov V, Becker M, Bopp L, Buitenhuis E, Chandra N, Chevallier F, Chini L P, Currie K I, Feely R A, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Goll D S, Gruber N, Gutekunst S, Harris I, Haverd V, Houghton R A, Hurtt G, Ilyina T, Jain A K, Joetzier E, Kaplan J O, Kato E, Klein Goldewijk K, Korsbakken J I, Landschützer P, Lauvset S K, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Lombardozzi D, Marland G, McGuire P C, Melton J R, Metzl N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S, Neill C, Omar A M, Ono T, Peregon A, Pierrot D, Poulter B, Rehder G, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Séférian R, Schwinger J, Smith N, Tans P P, Tian H, Tilbrook B, Tubiello F N, van der Werf G R, Wiltshire A J, Zaehle S. Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1783-1838.
- [ 6 ] Tao B, Cao M K, Li K R, Gu F X, Ji J J, Huang M, Zhang L M. Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(5): 745-753.
- [ 7 ] 于贵瑞, 李轩然, 王秋风, 李胜功. 中国陆地生态系统的碳储量及其空间格局(英文). *资源与生态学报*, 2010, 1(2): 97-109.
- [ 8 ] He H L, Wang S Q, Zhang L, Wang J B, Ren X L, Zhou L, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Yu S Y, Yang Y H, Wang M M, Niu Z E, Ge R, Yan H M, Huang M, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Zhang L M, He N P, Wang Q F, Yu G R. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [ 9 ] Yao Y T, Li Z J, Wang T, Chen A P, Wang X H, Du M Y, Jia G S, Li Y N, Li H Q, Luo W J, Ma Y M, Tang Y H, Wang H M, Wu Z X, Yan J H, Zhang X Z, Zhang Y P, Zhang Y, Zhou G S, Piao S L. A new estimation of China's net ecosystem productivity based on eddy covariance measurements and a model tree ensemble approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 253-254: 84-93.
- [ 10 ] Yu G R, Ren W, Chen Z, Zhang L M, Wang Q F, Wen X F, He N P, Zhang L, Fang H J, Zhu X J, Gao Y, Sun X M. Construction and progress of Chinese terrestrial ecosystem carbon, nitrogen and water fluxes coordinated observation. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 803-826.
- [ 11 ] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [ 12 ] Lun F, Li W H, Liu Y. Complete forest carbon cycle and budget in China, 1999-2008. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 81-89.
- [ 13 ] Xu L, Yu G R, He N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 49-66.
- [ 14 ] Tian H Q, Melillo J, Lu C Q, Kicklighter D, Liu M L, Ren W, Xu X F, Chen G S, Zhang C, Pan S F, Liu J Y, Running S. China's terrestrial

- carbon balance: contributions from multiple global change factors. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(1): GB1007.
- [15] Ren W, Tian H Q, Liu M L, Zhang C, Chen G S, Pan S F, Felzer B, Xu X F. Effects of tropospheric ozone pollution on net primary productivity and carbon storage in terrestrial ecosystems of China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D22): D22S09.
- [16] White E D, Rigby M, Lunt M F, Smallman T L, Comyn-Platt E, Manning A J, Ganesan A L, O'Doherty S, Stavert A R, Stanley K, Williams M, Levy P, Ramonet M, Forster G L, Manning A C, Palmer P I. Quantifying the UK's carbon dioxide flux: an atmospheric inverse modelling approach using a regional measurement network. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(7): 4345-4365.
- [17] Jiang F, Wang H W, Chen J M, Zhou L X, Ju W M, Ding A J, Liu L X, Peters W. Nested atmospheric inversion for the terrestrial carbon sources and sinks in China. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5311-5324.
- [18] Gong P, Xu M, Chen J, Chen J M, Qi Y, Biging G, Liu J Y, Wang S Q. A preliminary study on the carbon dynamics of china's terrestrial ecosystems in the past 20 years. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 55-61.
- [19] 韩庆. 2000—2013 年中国土地利用变化对陆地植被碳吸收量的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- [20] Xiao J F, Davis K J, Urban N M, Keller K, Saliendra N Z. Upscaling carbon fluxes from towers to the regional scale: influence of parameter variability and land cover representation on regional flux estimates. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G3): G00J06.
- [21] Mahadevan P, Wofsy S C, Matross D M, Xiao X M, Dunn A L, Lin J C, Gerbig C, Munger J W, Chow V Y, Gottlieb E W. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM). *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(2): GB2005.
- [22] 杨延征, 马元丹, 江洪, 朱求安, 刘金勋, 彭长辉. 基于 IBIS 模型的 1960-2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究. *生态学报*, 2016, 36(13): 3911-3922.
- [23] Ji J J, Huang M, Li K R. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(6): 885-898.
- [24] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.
- [25] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin III F S. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [26] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4): 385-403.
- [27] 朱旭东, 何洪林, 刘敏, 于贵瑞, 孙晓敏, 高彦华. 近 50 年中国光合有效辐射的时空变化特征. *地理学报*, 2010, 65(3): 270-280.
- [28] Chapin III F S, Woodwell G M, Randerson J T, Rastetter E B, Lovett G M, Baldocchi D D, Clark D A, Harmon M E, Schimel D S, Valentini R, Wirth C, Aber J D, Cole J J, Goulden M L, Harden J W, Heimann M, Howarth R W, Matson P A, McGuire A D, Melillo J M, Mooney H A, Neff J C, Houghton R A, Pace M L, Ryan M G, Running S W, Sala O E, Schlesinger W H, Schulze E D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. *Ecosystems*, 2006, 9(7): 1041-1050.
- [29] Chuai X W, Qi X X, Zhang X Y, Li J S, Yuan Y, Guo X M, Huang X J, Park S, Zhao R Q, Xie X L, Feng J X, Tang S S, Zuo T H, Lu J Y, Li J B, Lv X. Land degradation monitoring using terrestrial ecosystem carbon sinks/sources and their response to climate change in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3489-3502.
- [30] 曹明奎, 陶波, 李克让, 邵雪梅, Prience S D. 1981—2000 年中国陆地生态系统碳通量的年际变化. *植物学报*, 2003, 45(5): 552-560.
- [31] Schimel D, Melillo J, Tian H, McGuire A D, Kicklighter D, Kittel T, Rosenbloom N, Running S, Thornton P, Ojima D, Parton W, Kelly R, Sykes M, Neilson R, Rizzo B. Contribution of increasing CO<sub>2</sub> and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 2000, 286(5460): 2004-2006.
- [32] Hayes D J, Turner D P, Stinson G, McGuire A D, Wei Y X, West T O, Heath L S, de Jong B, McConkey B G, Birdsey R A, Kurz W A, Jacobson A R, Huntzinger D N, Pan Y D, Post W M, Cook R B. Reconciling estimates of the contemporary North American carbon balance among terrestrial biosphere models, atmospheric inversions, and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory-based data. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1282-1299.
- [33] Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, Smith P, Nabuurs G J, Folberth G, Schlamadinger B, Hutjes R W A, Ceulemans R, Schulze E D, Valentini R, Dolman A J. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of european anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. *Science*, 2003, 300(5625): 1538-1542.
- [34] 王秋凤, 刘颖慧, 何念鹏, 方华军, 伏玉玲, 于贵瑞. 中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求与重要科学问题. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 78-87.
- [35] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, de Noblet-Ducoudré N, Cadule P, Viovy N, Wang T. Spatiotemporal patterns of terrestrial carbon cycle during the 20th century. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(4): GB4026.
- [36] Xiao J F, Chevallier F, Gomez C, Guanter L, Hicke J A, Huete A R, Ichii K, Ni W J, Pang Y, Rahman A F, Sun G Q, Yuan W P, Zhang L, Zhang X Y. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111383.
- [37] Jung M, Reichstein M, Margolis H A, Cescatti A, Richardson A D, Arain M A, Arneth A, Bernhofer C, Bonal D, Chen J Q, Gianelle D, Gobron N, Kiely G, Kutsch W, Lasslop G, Law B E, Lindroth A, Merbold L, Montagnani L, Moors E J, Papale D, Sottocornola M, Vaccari F, Williams C. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G3): G00J07.

- [38] Guo Z D, Hu H F, Li P, Li N Y, Fang J Y. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008. *Science China Life Sciences*, 2013, 56(7): 661-671.
- [39] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [40] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [41] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, Mohammad A, Shen H H. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 757-765.
- [42] 王穗子, 樊江文, 刘帅. 中国草地碳库估算差异性综合分析. *草地学报*, 2017, 25(5): 905-913.
- [43] Ren W, Tian H Q, Tao B, Chappelka A, Sun G, Lu C Q, Liu M L, Chen G S, Xu X F. Impacts of tropospheric ozone and climate change on net primary productivity and net carbon exchange of China's forest ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(3): 391-406.
- [44] Paustian K, Cole C V, Sauerbeck D, Sampson N. CO<sub>2</sub> mitigation by agriculture: an overview. *Climatic Change*, 1998, 40(1): 135-162.
- [45] Lal R. Offsetting China's CO<sub>2</sub> emissions by soil carbon sequestration. *Climatic Change*, 2004, 65(3): 263-275.
- [46] Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(15): 1785-1803.
- [47] Ren W, Tian H Q, Tao B, Huang Y, Pan S F. China's crop productivity and soil carbon storage as influenced by multifactor global change. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2945-2957.
- [48] Avnery S, Mauzerall D L, Liu J F, Horowitz L W. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(13): 2284-2296.
- [49] 蔡文涛, 来利明, 李贺祎, 周继华, 管天玉, 张晓龙, 高楠楠, 郑元润. 草地灌丛化研究进展. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 531-537.
- [50] 高琼, 刘婷. 干旱半干旱区草原灌丛化的原因及影响——争议与进展. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1202-1212.
- [51] 王迎新, 陈先江, 娄珊宁, 胡安, 任劲飞, 胡俊奇, 张静, 侯扶江. 草原灌丛化入侵: 过程、机制和效应. *草业学报*, 2018, 27(5): 219-227.
- [52] Zhou L H, Shen H H, Xu Y P, Li H, Chen L Y, Wang Y H, Zhang P J, Zhao X, Liu T Y, Hu H F, Fang J Y. Soil organic carbon components in inner Mongolian shrub-encroached grasslands. *Plant and Soil*, 2019, 442(1/2): 199-213.
- [53] Zhang L, Ren X L, Wang J B, He H L, Wang S Q, Wang M M, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X. Interannual variability of terrestrial net ecosystem productivity over China: regional contributions and climate attribution. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(1): 014003.
- [54] Chen H P, Sun J Q. Projected change in East Asian summer monsoon precipitation under RCP scenario. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2013, 121(1/2): 55-77.
- [55] Tian H Q, Xu X F, Lu C Q, Liu M L, Ren W, Chen G S, Melillo J, Liu J Y. Net exchanges of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G2): G02011.
- [56] Zhang M, Huang X J, Chuai X W, Yang H, Lai L, Tan J Z. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: a spatial-temporal perspective. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10233.
- [57] Xiao J F, Zhuang Q L, Liang E, Shao X M, McGuire A D, Moody A, Kicklighter D W, Melillo J M. Twentieth-century droughts and their impacts on terrestrial carbon cycling in China. *Earth Interactions*, 2009, 13(10): 1-31.
- [58] 朱燕茹, 王梁. 农田生态系统碳源/碳汇综述. *天津农业科学*, 2019, 25(3): 27-32.
- [59] Ran Y H, Li X. TanSat: a new star in global carbon monitoring from China. *Science Bulletin*, 2019, 64(5): 284-285.
- [60] Quéré C L, Andrew R M, Canadell J G, Sitch S, Korsbakken J I, Peters G P, Manning A C, Boden T A, Tans P P, Houghton R A, Keeling R F, Alin S, Andrews O D, Anthoni P, Barbero L, Bopp L, Chevallier F, Chini L P, Ciais P, Currie K, Delire C, Doney S C, Friedlingstein P, Gkritzalis T, Harris I, Hauck J, Haverd V, Hoppema M, Goldewijk K K, Jain A K, Kato E, Körtzinger A, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Lombardozi D, Melton J R, Metzl N, Millero F, Monteiro P M S, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, O'Brien K, Olsen A, Omar A M, Ono T, Pierrot D, Poulter B, Rödenbeck C, Salisbury J, Schuster U, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Stocker B D, Sutton A J, Takahashi T, Tian H Q, Tilbrook B, van der Laan-Luijkx I T, van der Werf G R, Viovy N, Walker A P, Wiltshire A J, Zaehle S. Global carbon budget 2016. *Earth System Science Data*, 2016, 8(2): 605-649.
- [61] Shiga Y P, Tadié J M, Qiu X M, Yadav V, Andrews A E, Berry J A, Michalak A M. Atmospheric CO<sub>2</sub> observations reveal strong correlation between regional net biospheric carbon uptake and solar-induced chlorophyll fluorescence. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(2): 1122-1132.