

## 结合自下而上和自上而下方法的中国陆地碳汇估算

张志彬 王训梅 王军 阎然 才其骧 何维 居为民

### Estimates of China's Terrestrial Carbon Sinks Using both Bottom-up and Top-down Approaches

ZHANG Zhicheng WANG Xunmei WANG Jun YAN Ran CAI Qixiang HE Wei JU Weimin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23152>

### 您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

#### 不同陆地生态系统碳通量对模型模拟全球 $\text{CO}_2$ 浓度的影响

Effect of Terrestrial Ecosystem Carbon Fluxes on Simulating Global  $\text{CO}_2$  Concentration Using the GEOS-Chem Model

气候与环境研究. 2019, 24(5): 552 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18060>

#### 1991~2019年中国农业生态系统旱涝脆弱性评估

Droughts and Floods Vulnerability Assessment of China's Agricultural Ecosystem from 1991 to 2019

气候与环境研究. 2022, 27(1): 19 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21073>

#### 中国半干旱区草甸草原和典型草原碳通量日变化特征

Diurnal Variations of the Carbon Fluxes of Semiarid Meadow Steppe and Typical Steppe in China

气候与环境研究. 2020, 25(2): 172 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19096>

#### 模型对年中国东北地区潜在植被分布和碳循环的模拟研究

Simulation of Potential Vegetation Distribution and Carbon Cycle in Northeast China from 1997 to 2010 by LPJ-WHyMe Model

气候与环境研究. 2019, 24(6): 678 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19033>

#### 南京地区城市化对陆地生态系统总初级生产力的影响

Impact of Urbanization on the Total Primary Productivity of Terrestrial Ecosystems in Nanjing Area

气候与环境研究. 2024, 29(1): 103 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23053>

#### 中国生态脆弱区高温热浪和干旱历史变化特征分析

Historical Changes of High Temperature, Heat Waves, and Drought in Ecological Fragile Zones in China

气候与环境研究. 2022, 27(5): 604 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21044>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



张志彬, 王训梅, 王军, 等. 2024. 结合自下而上和自上而下方法的中国陆地碳汇估算 [J]. 气候与环境研究, 29(3): 229–242. ZHANG Zhicheng, WANG Xunmei, WANG Jun, et al. 2024. Estimates of China's Terrestrial Carbon Sinks Using both Bottom-up and Top-down Approaches [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 29 (3): 229–242. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23152

## 结合自下而上和自上而下方法的中国陆地碳汇估算

张志彬<sup>1,2</sup> 王训梅<sup>1,2</sup> 王军<sup>1,2</sup> 阎然<sup>1,2</sup> 才其骧<sup>3</sup> 何维<sup>1,2</sup> 居为民<sup>1,2</sup>

1 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

2 南京大学地理与海洋科学学院/自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室/江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023

3 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球物理流体动力学数值模拟实验室, 北京 100029

**摘要** 利用自下而上的生态系统过程模型 BEPS 和 VEGAS 以及自上而下的 OCO-2 v10 MIP 中多个大气反演优化结果, 评估了中国 2015~2019 年碳汇规模及其空间分布, 并结合中国四大地理分区边界和土地利用数据, 进一步梳理了中国四大分区以及森林、草地、灌丛和农田 4 种主要生态系统的碳汇强度。总体上, 2015~2019 年期间, 中国陆地碳汇呈现出东南高西北低的空间分布格局, BEPS、VEGAS 和 OCO-2 v10 MIP 模型中估算的年均碳汇分别为  $0.38 \pm 0.04 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 、 $0.22 \pm 0.03 \text{ Pg(C) a}^{-1}$  和  $0.54 \pm 0.05 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ , 这表明自上而下和自下而上的估计之间存在一定的差异。在夏季 (6~8 月), 中国陆地生态系统对  $\text{CO}_2$  的吸收最强。在区域碳汇统计上, BEPS 和 OCO-2 v10 MIP 的集合平均结果一致显示中国南方地区碳汇规模最大, 而 VEGAS 表明中国北方地区碳汇较强。另外, BEPS 和 OCO-2 v10 MIP 的集合平均结果表明, 森林生态系统碳汇最强, 强度分别为  $0.21 \pm 0.02 \text{ Pg(C) a}^{-1}$  (47.2%) 和  $0.26 \pm 0.02 \text{ Pg(C) a}^{-1}$  (46.0%)。VEGAS 则显示森林生态系统碳汇为  $0.06 \pm 0.04 \text{ Pg(C) a}^{-1}$  (23.9%), 略低于农田生态系统。总体而言, 森林生态系统是中国显著的碳汇区域, 但不同方法欲得到一致的碳汇分布和强度仍任重道远。

**关键词** 中国碳汇 陆地生态系统 生态系统模型 大气反演

文章编号 1006-9585(2024)03-0229-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23152

## Estimates of China's Terrestrial Carbon Sinks Using both Bottom-up and Top-down Approaches

ZHANG Zhicheng<sup>1,2</sup>, WANG Xunmei<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1,2</sup>, YAN Ran<sup>1,2</sup>, CAI Qixiang<sup>3</sup>,  
HE Wei<sup>1,2</sup>, and JU Weimin<sup>1,2</sup>

1 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023

2 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology/ Key Laboratory for Land Satellite Remote Sensing Applications of Ministry of Natural Resources/ School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** The bottom-up terrestrial biosphere models, Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS), and

收稿日期 2023-12-31; 网络预出版日期 2024-04-21

作者简介 张志彬, 男, 2003 年出生, 本科, 主要研究方向为陆地碳循环对气候变化的响应与反馈。E-mail: 211830020@smail.nju.edu.cn

通讯作者 王军, E-mail: wangjun@nju.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金 42141005, 江苏省自然科学基金 BK20221449

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 42141005), Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant BK20221449)

VEgetation-Global-Atmosphere-Soil version (VEGAS), along with top-down optimization results from multiple atmospheric inversions in the OCO-2 v10 MIP were used to assess the size and spatial distribution of China's carbon sinks during 2015–2019. Additionally, combined with the boundaries of the four major geographic divisions in China and land-use data, the carbon sink intensities of the four major ecosystems—forests, grasslands, shrublands, and croplands—were further clarified. Overall, China's terrestrial carbon sink exhibited a spatial distribution characterized by higher uptake in the southeast and lower uptake in the northwest during 2015–2019. The annual average carbon sinks estimated by BEPS, VEGAS, and OCO-2 v10 MIP models were  $0.38 \pm 0.04 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,  $0.22 \pm 0.03 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ , and  $0.54 \pm 0.05 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ , respectively, demonstrating convergence between the top-down and bottom-up estimates. During the summer months (Jun–Aug), China's terrestrial ecosystems exhibited the highest capability for  $\text{CO}_2$  uptake. In terms of regional carbon uptake, BEPS and the ensemble average result from OCO-2 v10 MIP consistently indicated that the southern region of China had the largest carbon sink size. Conversely, VEGAS revealed that the northern region of China exhibited a larger carbon sink. Additionally, BEPS and the ensemble average result from OCO-2 v10 MIP indicated that the forest ecosystems had the largest carbon sinks, with intensities of  $0.21 \pm 0.02 \text{ Pg(C) a}^{-1}$  (47.2%) and  $0.26 \pm 0.02 \text{ Pg(C) a}^{-1}$  (46.0%), respectively. However, VEGAS showed a lower carbon sink of  $0.06 \pm 0.04 \text{ Pg(C) a}^{-1}$  for the forest ecosystems (23.9%), slightly lower than that of the crop ecosystems. In summary, the forest ecosystems emerged as significant carbon sinks in China. Nevertheless, achieving consistency in the distribution and intensity of carbon sinks using various methods remains a substantial challenge.

**Keywords** China's carbon sink, Terrestrial ecosystem, Ecosystem model, Atmospheric inversion

## 1 引言

全球陆地净碳吸收即净生物群区生产力 (Net Biome Productivity, NBP), 在近几十年来显著增加 (Fernández-Martínez et al., 2023)。全球碳计划估计, 在 1959~2019 年期间, 陆地生物圈吸收了约 1/3 的人为  $\text{CO}_2$  排放 (Seiler et al., 2022)。目前, 中国是年  $\text{CO}_2$  排放量最大的国家, 是制定管理碳排放和应对气候变化政策的焦点 (Fang et al., 2018)。于贵瑞等 (2022) 宣称中国生态系统具有巨大的碳汇效应且存在很大的提升空间, 在国家实现“碳中和”目标的过程中将扮演重要角色。因此, 准确对中国陆地生态系统碳汇能力现状和未来碳汇潜力进行核算是实现碳中和的当务之急 (谢立军等, 2023)。然而, 由于数据来源的多样性和方法的不一致以及大气观测和反演模型的约束, 目前中国区域的碳汇估算仍然存在较大的不确定性 (Tang et al., 2018; Wang et al., 2022a)。同时以往的研究往往聚焦于中国森林的碳汇 (Yan et al., 2023; 朱建华等, 2023), 但草地等自然生态系统和农田生态系统的固碳作用也应受到重视。

Piao et al. (2009) 综合清查资料、过程模型模拟和大气反演 3 种方法, 估算中国陆地生态系统的固碳能力为  $0.19 \sim 0.26 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。Fang et al. (2018) 基于森林、草地、灌丛、农田等生态系统的 17000 多

个样方数据, 评估了 2001~2010 年中国陆地生态系统的固碳能力为  $0.20 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。除此之外, Wang et al. (2020) 基于中国的 6 个地点进行反演, 认为 2010~2016 年中国陆地生物圈碳汇为  $1.11 \pm 0.38 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ , 但 Wang et al. (2022b) 认为因为高质量的地面站点数量的限制, 其高估了中国的碳汇。近年来, Tang et al. (2018) 通过野外实地采样数据, 估计中国森林、灌丛、草原和耕地的总碳库为  $79.24 \pm 2.42 \text{ Pg(C)}$ , 但森林生物量碳密度的估计高于以往研究。杨元合等 (2022) 综合以往研究结果, 评估目前我国陆地碳汇强度为  $0.20 \sim 0.25 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ , 预计 2060 年可能处于  $0.15 \sim 0.52 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。在空间上, 前人的研究发现到 1982~2010 年中国陆地生态系统碳汇呈现出较大的空间异质性, 东半部大部分地区为净碳汇, 而西部地区大多为净碳源 (He et al., 2019)。在小区域尺度上, 研究指出 2001~2016 年中国生态恢复项目区的碳汇每年增加  $74 \text{ Tg(C)}$  (Lu et al., 2018)。尽管前人已经提供了对中国陆地生态系统固碳能力的多角度估算, 但结果之间的不一致性揭示了当前对中国陆地碳汇估算的显著不确定性。此外, 空间异质性的发现强调了中国不同地区碳汇能力的差异, 这进一步增加了中国碳汇估算的复杂性。

近年来, 随着科技水平的进步, 适用于不同时空尺度的碳汇水平观测技术和碳汇强度评估方法不

断得到发展和完善。利用植被参数遥感信息驱动的陆地生态系统过程模型，如 BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator)，被证明可以降低碳通量估算结果的不确定性 (Chen et al., 2019)。同时，全球动态植被模型也可以用于研究陆地碳汇强度及其随环境条件变化的演变。大气反演是估计全球到区域尺度地表碳通量的重要方法 (He et al., 2023)，OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) MIP (Modeling Intercomparison Project) 大气反演比较计划提供了目前为止最高质量的空间 XCO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> column concentrations) 和后验碳通量数据，为我们探究区域尺度的碳汇提供了全新的视角 (Philip et al., 2022)。

因此，本研究将结合最新的 OCO-2 v10 MIP 多模型大气反演后验 NBP 数据和两个最新改进的陆地生态系统模型 (即基于卫星遥感数据驱动的陆地生态系统模型和考虑了农产品横向输送及牲畜呼吸等过程的全球动态植被模型) 的模拟结果，旨在揭示中国森林、草地、灌木和农田生态系统碳汇的分布和强度，以评估中国陆地生态系统的碳汇能力现状，为政府制定行之有效的生态系统增汇政策和有效适应气候变化措施提供重要依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 自下而上的过程模型模拟

本研究采用了 2 个陆地生态系统模型进行了长时间序列的模拟，即基于遥感数据驱动的 BEPS 和全球动态植被模型 VEGAS (VEgetation-Global-Atmosphere-Soil version 4.6)，模式介绍如下：

(1) BEPS 模型最初是为加拿大北方生态系统开发的，现已扩展至全球有植被的陆地地区 (Chen et al., 1999, 2012)。该模型是基于叶面积指数、聚集度指数、地表覆盖等遥感数据以及气象数据和大气 CO<sub>2</sub> 浓度等逐日驱动的机理性生态模型 (Chen et al., 2019; Wang J et al., 2021)。与其他模型相比，BEPS 在描述植物光合机理过程基础上，将遥感数据与机理模型进行了有机的结合，模型将植被冠层分为阳叶和阴叶两部分，采用 Farquhar 光化学模型分别模拟各自的总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP)，最终将阳叶和阴叶的 GPP 相加；在 GPP 模拟的基础上，考虑植被的生长和维持呼吸消耗 ( $R_a$ )，计算获得净初级生产力

(Net Primary Productivity, NPP)，即

$$NPP = GPP - R_a. \quad (1)$$

更进一步，采用 CENTURY 模型方法模拟生态系统异养呼吸 ( $R_h$ )，基于 NPP 模拟结果计算获得净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) (Chen et al., 2019; He et al., 2021)，即

$$NEP = NPP - R_h. \quad (2)$$

Ju et al. (2006) 通过对 BEPS-daily 进行完善和改进发展了小时步长尺度的 BEPS 模型 (BEPS-hourly)。BEPS-hourly 模型能够模拟植被日内小时尺度的碳循环变化。

本研究在 0.0727° (纬度) × 0.0727° (经度) 的水平分辨率上以小时步长驱动 BEPS 模型，时间覆盖为 1981~2019 年。模型驱动数据主要重构于小时尺度的 ERA5 气象再分析数据 (Hersbach et al., 2020) 以及 GLOBMAP LAI v3 数据集，其中 GLOBMAP LAI 提供 1981 年以来覆盖全球的高一致性长时间序列叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 产品，基于 AVHRR (1981~2000 年) 和 MODIS (2001~2019 年) 数据定量融合反演得到 (Liu et al., 2012)。

(2) VEGAS 模型被广泛用于研究陆地碳循环—气候反馈、碳循环年际变率及季节循环等 (Zeng et al., 2005, 2014; Wang et al., 2018; Wang M R et al., 2021)，其能模拟植被生长动态和不同植被功能类型 (Plant Functional Type, PFT) 之间的竞争，模型包含阔叶林、针叶林、C3 冷草、C4 暖草及农作物 5 种 PFT。不同植被 PFT 的物候由其生长、呼吸和周转之间的平衡来动态模拟，气候约束和资源分配策略的不同决定了不同植被类型之间的竞争，相对竞争优势决定了每种 PFT 的面积覆盖率及不同 PFT 之间的共存率。植被通过叶片进行光合作用，并将碳分配给根 (细根和粗根)、茎 (边材和心材) 和叶 3 大类植被碳库，考虑呼吸作用和胁迫凋落等过程，植被碳库周转为凋落物、微生物碳库、快速土壤碳库、中速土壤碳库和慢速土壤碳库等。碳库根据温度和湿度依赖关系分解将碳释放返回大气，从而形成闭合的陆地碳循环 (Zeng et al., 2005)。

本研究在 0.5° (纬度) × 0.5° (经度) 的水平分辨率上以小时步长驱动 VEGAS 模型，模型驱动数据主要重构于月平均尺度的英国气候研究所的全

球陆地格点分析数据集 (Climatic Research Unit Time-series version 3.22, CRU TS3.22) (University of East Anglia Climatic Research Unit et al., 2014) 和小时尺度 ERA5 数据的变率 (Hersbach et al., 2020), 其中值得一提的是, 热带降水额外结合了美国国家海洋和大气管理局陆地降水量重建数据 (NOAA's Precipitation Reconstruction over Land, PREC/L) (Chen et al., 2002), 耕地、牧场利用和不透水层等土地利用采用全球环境历史数据库 (History Database of the Global Environment, HYDE) (Klein Goldewijk et al., 2011)。利用固定的 1901 年的气候数据驱动模型 500 多年, 其中前 300 年开启碳库加速器, 使模型快速达到平衡, 然后利用真实的历史气候数据和大气 CO<sub>2</sub> 浓度驱动 VEGAS 模拟历史时期陆地碳汇的时空格局。

## 2.2 自上而下的大气反演

本研究使用了月度轨道观测者 2 号 (Orbiting Carbon Observatory-2, OCO-2) v10 模型比较项目 (Modeling Intercomparison Project, MIP) 中的 14 个大气反演模型优化的 NBP 产品 (表 1)。OCO-2 v10 MIP 是美国宇航局 (NASA) 牵头组织的 CO<sub>2</sub> 通量反演建模者的国际合作项目, 是通过观察从太空反射出来的地球表面和大气层的近红外太阳辐射, 推断大气中的 CO<sub>2</sub> 混合比的碳反演产品, 提供了近实时的国家尺度碳收支估算, 空间分辨率为 1° (纬度) × 1° (经度), 时间覆盖 2015~2020 年

(<https://gml.noaa.gov/ccgg/arc/?id=150>[2023-12-12])。在本研究工作中主要采用了比较计划中 LNLGIS 的试验结果, 即同化模型同时同化了地面定点观测 CO<sub>2</sub> 数据和 OCO-2 ACOS v10 中陆地上卫星天底和耀斑 (land nadir and glint) 的 XCO<sub>2</sub> 数据。

## 2.3 土地覆盖数据

土地覆盖数据基于 1:1000000 中国植被图集 (张新时, 2007), 采用面积最大化方法将数据重采样至 1° (纬度) × 1° (经度)。本研究保留了原有的灌木分类, 将针叶林、阔叶林和混交林整合为森林, 草地和草甸并为草地, 将栽培植被纳入作物。

## 2.4 方法

本研究将所有数据都保留或重采样为 1° (纬度) × 1° (经度), 分别基于 BEPS、VEGAS 和 OCO-2 NBP, 同时考虑了各数据的可用时间范围, 计算了中国 2015~2019 年平均碳汇的强度和空间分布。进而结合土地覆盖数据和中国地理四大分区 shapefile 数据, 提取了 2015~2019 年森林、灌丛、草地和农田生态系统以及中国四大地理分区 (图 1) 的固碳能力现状。

# 3 结果分析

## 3.1 全国陆地碳汇空间分布

基于 BEPS、VEGAS, OCO-2 多模型反演结果, 图 2 展示了 2015~2019 年期间中国陆地年均

表 1 本研究中使用的 OCO-2 v10 MIP 大气反演模型

Table 1 Models in Orbiting Carbon Observatory-2 v10 Modeling Intercomparison Project

模型	传输模型	反演方法	参考文献
Ames	GEOS-Chem	4D-Var	Philip et al. (2019, 2022)
Baker	PCTM	4D-Var	Baker et al. (2006, 2010)
CAMS	LMDz	Variational	Chevallier et al. (2005, 2019)
CMS-Flux	GEOS-Chem	4D-Var	Liu et al. (2021)
COLA	GEOS-Chem	EnKF	Liu et al. (2022)
CSU	GEOS-Chem	synthesis	Schuh et al. (2013)
CT	TM5	EnKF	Jacobson et al. (2020)
JHU	GEOS-Chem	geostatistical/4D-Var	Miller et al. (2020)、Chen et al. (2021a)
LoFi	GEOS-Chem	n/a	Chen et al. (2021b)、Weir et al. (2021)
NIES	NIES-TM/FLEXPART	4D-Var	Maksyutov et al. (2021)
OU	TM5	4D-Var	Crowell et al. (2019)
TM5-4DVAR	TM5	4D-Var	Basu et al. (2013, 2018)
UT	GEOS-Chem	4D-Var	Deng et al. (2014, 2016)
WOMBAT	GEOS-Chem	Synthesiswith MCMC	Zammit-Mangion et al. (2022)

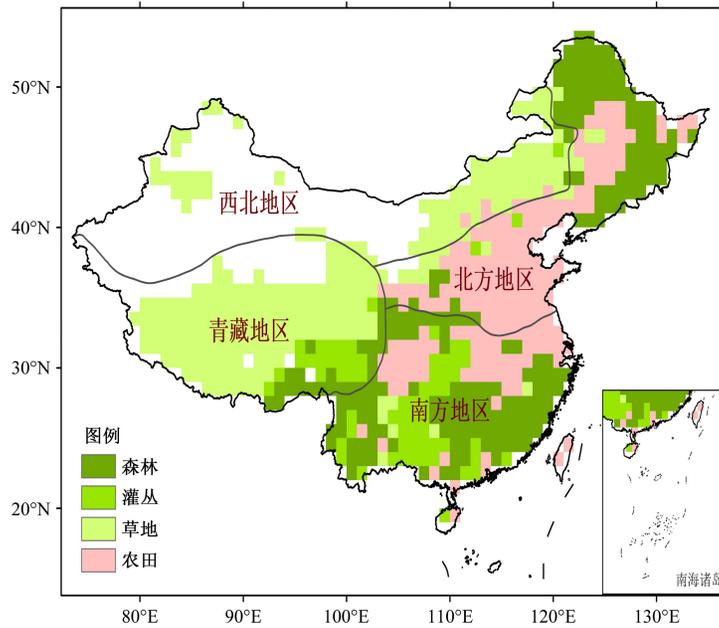


图 1 中国四大地理分区及土地植被覆盖的空间分布。

Fig. 1 Distributions of China's four major geographical regions and land covers.

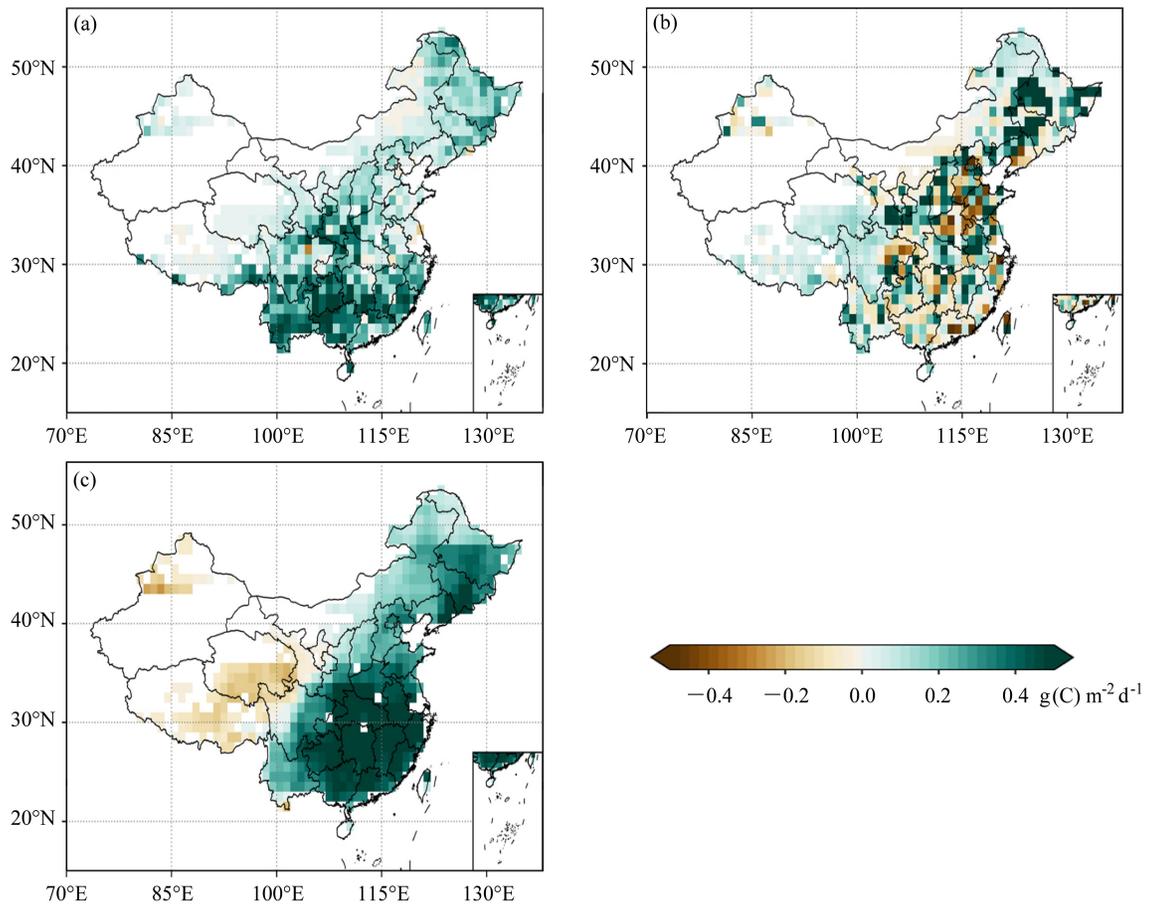


图 2 2015~2019 年平均的中国陆地碳汇强度的空间分布：(a) BEPS 模拟结果；(b) VEGAS 模拟结果；(c) OCO-2 多模式集合平均。

Fig. 2 Geographical distributions of China's carbon sinks averaged during 2015–2019 from (a) BEPS model, (b) VEGAS, and (c) OCO-2 v10 MIP multi-model ensemble mean.

碳汇的空间格局。整体而言,不同数据源估算的中国陆地碳汇的空间型仍存在较大差异性。具体来说, BEPS 模型模拟结果显示,中国绝大部分地区表现为碳汇,东北及南方地区的碳汇效应较为显著,尤其是云贵高原地区的碳汇效应最强。VEGAS 模型的结果表现出较大的空间异质性,各大城市所在的格点往往表现为碳源,其他地区表现为碳汇。这与模型利用不透水层信息和人口数据等,估算城市人类活动和家畜呼吸导致的碳排放有关,具体过程包含了农产品的收获和向城市的横向输送,以及城市内部的牲畜养殖和本地饲料的消费 (Cai et al., 2022)。这使得城市在 VEGAS 模型的模拟结果中显示为碳源,体现了城市特有的生态与非生态因素综合作用的影响。整体上, VEGAS 模型模拟结果显示东北地区的碳汇效应较强,而华北部分地区则表现为碳源。OCO-2 v10 MIP 集合结果显示,中国东部的大多数地区表现出明显的碳汇效应,特别是长白山脉与长江中下游平原区域,而西部新疆、西藏、青海与甘肃等省份的部分地区则为净碳源,这与其他两个模型的估计有所不同。总体上,中国陆地碳通量呈现出东南高西北低的空间分布格局,东北地区与南方地区的碳汇效应较为明显,而西北地区在一定程度上表现为碳源。

### 3.2 全国陆地碳汇时间演变

图 3 展示了 2015~2019 年期间基于 BEPS、VEGAS 和 OCO-2 产品的中国陆地碳吸收逐月变化及对应的中国陆地碳汇年平均强度。可以发现,所有数据均表现出中国陆地碳吸收存在明显的季节性波动,在夏季达到最大。主要原因在于,夏季中国植被处于生长旺盛期,生态系统光合作用显著强于

呼吸作用。相反,在冬季,植被生长停滞,光合作用偏弱,接近或小于生态系统呼吸强度,导致冬季中国碳吸收表现为中性或者较弱的碳释放。值得一提的是,不同数据之间中国碳吸收的季节波动强度存在明显差异,在生长季, VEGAS 和 OCO-2 多模式反演结果的碳吸收强度相当,但 BEPS 模拟结果明显偏小。相反,在冬季, VEGAS 表现为碳释放, BEPS 表现为中性,而 OCO-2 的结果介于中间,表现微弱的碳释放 (图 3b)。

从年平均总量来看,3 个数据源在年均碳汇的估算结果上存在差异。具体来说, BEPS 模型估算的中国年均碳汇为  $0.38 \pm 0.04 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ , VEGAS 模型为  $0.22 \pm 0.03 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,而 OCO-2 v10 MIP 模型的估算值最高,为  $0.54 \pm 0.05 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。但总的估算结果还是较为接近以往的研究结果 (杨元合等, 2022),并明显小于 Wang et al. (2020) 基于反演估算的  $1.11 \pm 0.38 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。

通过对中国陆地碳通量进行纬向平均 (图 4),进一步分析了碳通量的季节性循环特征以及中国南北植被生长的季节差异。结果显示,热带外地区不同纬度的碳通量均具有较为明显的季节性变化特征,而在  $25^{\circ}\text{N}$  以南地区,季节变化特征减弱或者不显著,与中国地区温度的季节变化较为一致。具体来说,夏季在  $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$  与  $40^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$  之间,表现为明显碳吸收,对应这些区域存在的大量农田和森林 (图 1)。反之,所有模型均表明冬季陆地为碳释放,这反映了植被进入非生长季节后生态系统呼吸作用导致的碳释放。

此外,纬向平均图还清晰地反映出从南到北植被生长季节的差异。南方地区的碳吸收从春季开始,

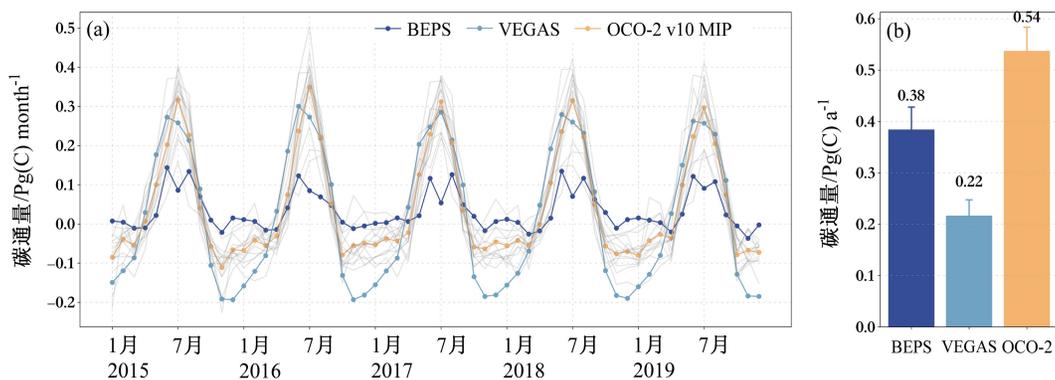


图 3 2015~2019 年 (a) 月平均的中国陆地碳吸收变化 (灰色线表示 OCO2 v10 MIP 中每个反演模型的结果) 及 (b) 年平均的碳汇强度。  
Fig. 3 (a) Monthly variations of China's terrestrial carbon uptake (grey lines indicate the results of each inversion model in OCO-2 v10 MIP) and (b) annual average carbon sink intensities during 2015–2019.

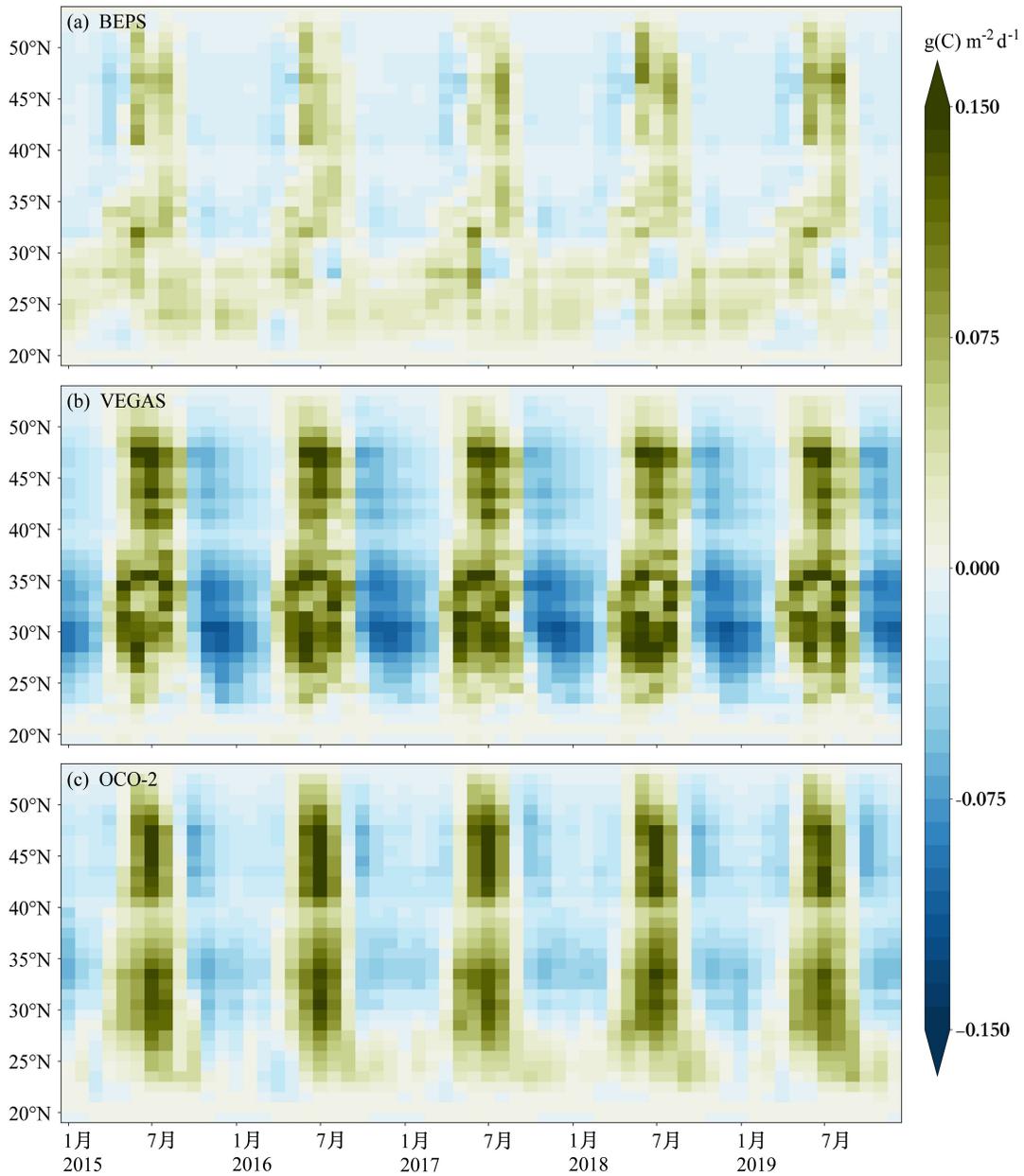


图4 2015~2019年纬向平均的中国陆地碳吸收强度随时间的变化：(a) BEPS 模拟结果；(b) VEGAS 模拟结果；(c) OCO-2 多模式集合平均。

Fig. 4 Latitude-time cross sections of zonal-mean China's terrestrial carbon uptake estimated by (a) BEPS model, (b) VEGAS model, and (c) OCO-2 v10 MIP multi-model ensemble mean during 2015–2019.

持续到秋季末，在 25°N 以南地区全年均显示出碳吸收。而北方地区由于受到温度限制，植被生长季节较短，碳吸收主要集中在每年的 6~8 月。

### 3.3 中国不同区域陆地碳汇强度

通过对中国不同地理分区陆地碳汇进行计算，本研究进一步分析了各个模型对这些区域碳汇强度的估算差异（图 5）。BEPS 模型的结果显示，北方地区的碳汇强度为  $0.093 \pm 0.013 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ，南方地区为  $0.241 \pm 0.057 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ，这两个地区都显现

出较强的碳汇效应。西北地区的碳通量为  $0.011 \pm 0.005 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ，青藏地区的碳通量则为  $0.039 \pm 0.006 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ，意味着在 BEPS 模型中，青藏地区也被视为一个重要的碳汇区域。

而 VEGAS 模型的结果显示，北方地区年均碳通量为  $0.123 \pm 0.035 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ，南方地区为  $0.050 \pm 0.061 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ，西北地区为  $0.013 \pm 0.020 \text{ Pg(C) a}^{-1}$  及青藏高原地区为  $0.031 \pm 0.013 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。这表明，在 VEGAS 模型中，北方地区的碳汇效应是所有区

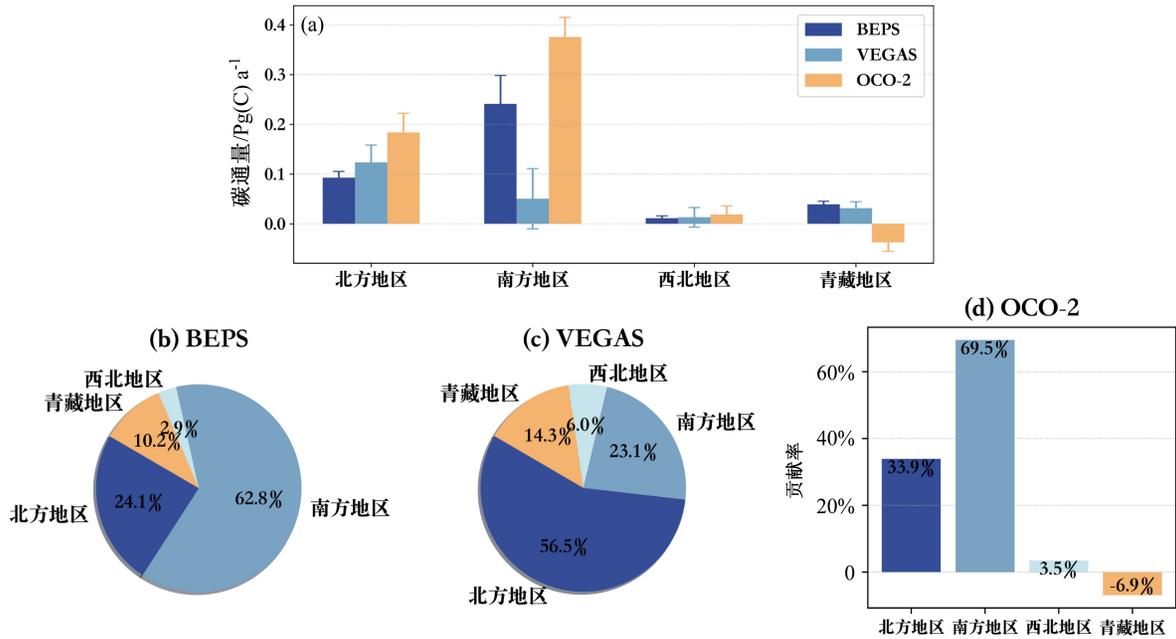


图5 2015~2019年中国不同地理分区的(a)年平均陆地碳汇强度以及(b)BEPS模拟、(c)VEGAS模拟、(d)OCO-2多模式集合平均的各区域对全国碳汇的贡献率(由于OCO-2反演结果高原地区为负值,故保留了柱图显示)。

Fig. 5 (a) Annual average terrestrial carbon sinks over China's different geographical regions and the contributions of each region to the national carbon sink from (b) BEPS simulation, (c) VEGAS simulation, and (d) OCO-2 v10 MIP multi-model ensemble mean during 2015–2019 (bar chart is adopted for it due to the negative values in the OCO-2 inversion result for the Tibetan Plateau region).

域中最为显著的,其次是南方地区与青藏地区,西北地区则相对较低。

在OCO-2模型的结果中,北方地区与南方地区都显示出了在3种模型中最强的年均碳汇估计,分别为 $0.183 \pm 0.039 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 与 $0.376 \pm 0.039 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,南方地区成为了最大的碳汇来源。西北地区的碳汇为 $0.019 \pm 0.017 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,与其他模型的结果基本一致。值得注意的是,青藏高原表现为碳源,强度约为 $-0.037 \pm 0.018 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,明显区别于其他两种过程模拟模型的结果。

这些结果进一步表明,中国不同地理区域的碳汇能力存在显著的空间异质性(图5b–5d)。3个模型的结果均显示南方地区具有较强的碳汇效应,对中国陆地总碳汇的贡献比例分别为62.8%、23.1%与69.5%。在BEPS模型与OCO-2模型中,北方地区的碳汇效应弱于南方地区,在总碳汇中占比分别为24.1%与33.9%,在VEGAS模型中则相反,占比达56.5%。西北地区的碳汇效应在3个模型中均不显著,分别占比2.9%、6.0%与3.5%。而对于青藏地区碳源汇属性的判断,不同模型的结果之间存在较大的分歧。BEPS模型与VEGAS模型的结果显示青藏地区是碳汇,在总碳汇中贡献比例

分别为10.2%与14.3%,而OCO-2模型的结果中,青藏地区则被认为是碳源,贡献比例为-6.9%。

利用土地覆盖数据,还计算了中国不同植被覆盖类型的陆地碳汇强度(图6)。结果显示,基于BEPS模型估算的森林生态系统年均碳汇为 $0.206 \pm 0.024 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,而VEGAS和OCO-2模型的结果分别为 $0.060 \pm 0.040 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 和 $0.257 \pm 0.022 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,其中VEGAS模型的估算结果显著偏低。BEPS模型与OCO-2模型对灌丛生态系统的碳通量估算结果较为接近,分别为 $0.086 \pm 0.018 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 与 $0.082 \pm 0.013 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,而VEGAS模型的估算结果同样较低,为 $0.027 \pm 0.012 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。草地生态系统在BEPS模型中的碳通量估算结果为 $0.050 \pm 0.012 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,在VEGAS模型中为 $0.044 \pm 0.028 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ,而OCO-2模型估算最低,为 $0.006 \pm 0.017 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。对于农田生态系统,OCO-2模型估算的年均碳汇最强,为 $0.214 \pm 0.021 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ; VEGAS模型次之,为 $0.119 \pm 0.025 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ; BEPS模型最弱,为 $0.094 \pm 0.016 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。

从不同模型中各生态系统对中国总碳汇的贡献比例(图6b–6d)来看,在BEPS模型中,森林生

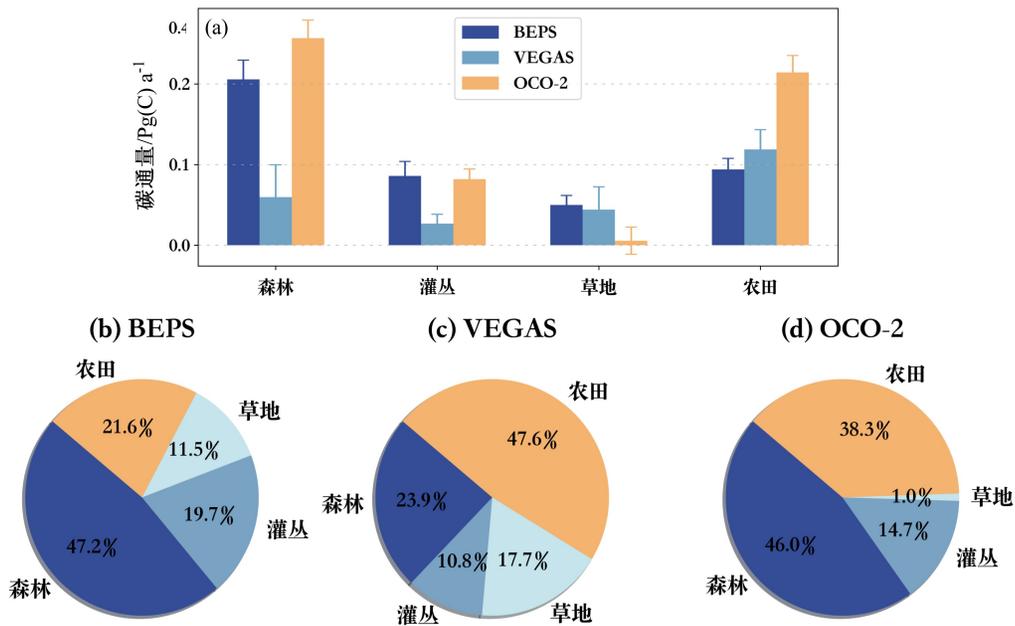


图6 同图5，但为不同植被覆盖类型。

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for different vegetation covers.

态系统贡献了47.2%的碳汇，其次是农田的21.6%，而灌丛和草地占比仅为19.7%和11.5%。相对地，VEGAS模型中农田的贡献比例最大，达到了47.6%，森林、灌丛和草地则分别贡献了23.9%、10.8%和17.7%。OCO-2模型显示，森林和农田共同贡献了中国大部分的碳汇，分别占比46.0%和38.3%，灌丛为14.7%，而草地只贡献了1.0%。总体而言，3种模型的结果均显示森林生态系统与农田生态系统是中国陆地碳汇的最主要来源，BEPS模型与OCO-2模型显示森林生态系统的碳汇贡献高于农田生态系统，而VEGAS模型则表明森林生态系统的碳汇略低于农田生态系统。

#### 4 结论与讨论

过去几十年，中国付出了大量努力来增强中国陆地碳汇，但中国陆地碳汇的估算仍然存在不确定性，基于BEPS、VEGAS和参与OCO-2 v10 MIP反演比较计划的模型，本研究估算了在2015~2019年期间，中国陆地碳汇分别为 $0.38 \pm 0.04 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 、 $0.22 \pm 0.03 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 和 $0.54 \pm 0.05 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 。与此同时，有研究表明OCO-2 v9的2015~2018年中国土地碳汇反演估计在 $0 \sim 1.14 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ 之间，总体平均值为 $0.61 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ，且该结果与TanSat XCO<sub>2</sub>的反演结果一致，但是反

演系统中大气传输模型GEOS-Chem往往会高估中国陆地碳汇 [ $0.90 \pm 0.17 \text{ Pg(C) a}^{-1}$ ] (Wang et al., 2022a)。同时，不可忽略的是，3个数据源得到的中国碳汇在空间分布上也略有差异，在BEPS模型中，中国全域几乎都为碳汇，VEGAS模型显示中国大部分城市所在网格为碳源，尤其是在东部发达地区。这与城市人口和家畜消耗农产品等导致的碳排放有密切关系(Cai et al., 2022)。在不同植被生态系统碳汇规模上，VEGAS显示农业碳汇占比最多(47.6%)，区别于BEPS和OCO-2显示的森林碳汇占主导。

目前，有研究提出由于很多生态系统模型没有考虑大气中的氮沉降等过程的影响，仍然不能很好地代表某些过程，例如森林再生、农田收获和管理、轮耕、木材采伐和退化，对生态系统碳汇的估算仍存在争议(Kondo et al., 2020; Zhou et al., 2022)。此外，大气反演后验NBP中包含了生物碳(如木材)的国际贸易对碳汇估算造成的影响，而在生态系统模型中并无国际贸易引起的碳源汇变化(Jiang et al., 2016)，这是导致自上而下和自下而上估算陆地碳源汇差别的重要因素之一。

不同于自下而上的模型BEPS和VEGAS，自上而下的OCO-2 v10 MIP大气反演模型显示青藏高原为碳源。然而，Gao et al. (2023)根据气候和土地利用信息以及实地采样数据的编制的碳强度数

据集, 预测青藏高原地区受土地利用和气候因素影响, 未来碳汇功能将持续增强, 同时, 最近结合机器学习和多尺度地面和遥感数据的新估算也表明青藏高原的碳汇功能在增强 (Zeng et al., 2023)。对比 OCO-2 反演结果和地面 CO<sub>2</sub> 观测结果 (Crowell et al., 2019; Peiro et al., 2022; Byrne et al., 2023), 我们推断 OCO-2 v10 MIP 大气反演很有可能低估了地形复杂的青藏高原地区的碳汇强度, 因此应对模型进行积极的调整和验证, 以减少碳汇估算的不确定性 (Tharammal et al., 2019)。

最近, Piao et al. (2022) 通过多模型比对研究, 强调了即使基于最先进的卫星观测, 反演的 CO<sub>2</sub> 通量仍然存在相当大的不确定性。这种误差主要源于 3 个方面: 一是由于遥感数据的空间分辨率较低, 导致不同生态系统类型的碳通量无法准确划分; 二是反演的准确性受到受大气传输模型误差的影响; 三是我国高标准的地面 CO<sub>2</sub> 观测站点较稀疏, 限制了中国陆地生态系统的大气反演估算。这些因素的叠加效应超过了非 CO<sub>2</sub> 碳排放和由于国际贸易导致的碳排放转移所带来的影响, 从而使得遥感反演的碳汇总体偏高。因此, 卫星设计、反演算法和反演技术还需不断改进 (Wang et al., 2022a)。Wang et al. (2023) 呼吁未来还应该在建设更多的观测站点, 以降低碳汇估算的不确定性。

森林碳汇在中国碳汇中占有极为重要的地位, 森林面积虽然只占我国植被覆盖总面积的 28.62%, 但 BEPS 和 OCO-2 v10 MIP 模型估算表明森林生态系统为我国 2015~2019 年碳汇分别贡献了 47.2% 和 46.0%。并且, BEPS 和 OCO-2 v10 MIP 模型中估算的 2015~2019 年森林碳汇规模略高于中国科学家基于第八次 (2009~2013 年) 和第九次 (2014~2018 年) 全国森林清查数据, 估算的 2010~2016 年的森林生物量碳汇 0.19 Pg(C) a<sup>-1</sup> (Wang et al., 2022b)。同时有研究表明由于中国的人工林面积大、生长年轻、碳密度低, 未来中国森林作为生物量碳汇的潜力很大 (Guo et al., 2013)。但值得注意的是, 最近的研究表明中国目前的森林年龄结构将导致森林碳汇在不久的将来减弱, 建议将优化林龄结构纳入森林可持续经营战略, 以增强中国未来的森林碳汇能力 (Shang et al., 2023)。

农田碳汇的强度仍存较大不确定性。值得一提的是, 尽管我们所用数据集显示农业碳汇也是中国

碳汇的重要组成部分, 但是由于农田的特殊性, 过往估算农田碳汇往往仅考虑土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 的变化, 而不是作物生长期间植被固碳的暂时存储, 因为收获后的产量部分很快就会被消耗, 并释放 CO<sub>2</sub> 回到大气中。通过对农田地区 SOC 的估算, Piao et al. (2009) 估计中国农田地区碳汇约为 0.026 ± 0.011 Pg(C) a<sup>-1</sup>。Lal (2004) 估计中国长达 50 年的土壤固碳潜力, 得到农田 SOC 增量为 0.012~0.023 Pg(C) a<sup>-1</sup>, 土壤无机碳 (Soil Inorganic Carbon, SIC) 增量为 0.001~0.014 Pg(C) a<sup>-1</sup>。Huang and Sun (2006) 对 132 份出版物中涉及 23 个土壤组和超过 60000 个土壤样本测量数据进行元分析, 估计中国农田 SOC 增量为 0.015~0.020 Pg(C) a<sup>-1</sup>。Xie et al. (2007) 估计中国农田土壤 SOC 年累积率为 0.024 Pg(C) a<sup>-1</sup>。Yu et al. (2013) 估计, 即便是作物产量每年增加 1% (相应地秸秆量亦增加) 和 90% 秸秆还田的情景下, 至 2050 年农田土壤碳汇也才能达到 0.088 Pg(C) a<sup>-1</sup>。Zuo et al. (2023) 设计了 4 种不同农作物秸秆、牲畜粪便和氮肥投入的情景来评估 2010~2060 年中国农田土壤的有机碳固存潜力, 结果表明农田土壤碳汇估计值约为 0.054 Pg(C) a<sup>-1</sup>。在此过程中, 农田利用管理方式的改进可能是农田碳汇强度增加的最主要因素 (Liu et al., 2024; Ma et al., 2024)。

而在本研究中, 我们发现使用的自下而上和自上而下的方法估算农田碳汇时偏高于已有研究结果。尤其是 OCO-2 模型所估算的农田碳汇年均强度为 0.214 ± 0.021 Pg(C) a<sup>-1</sup>, 远高于其他模型与已有研究的估算结果。这种差异很大的原因受制于 OCO-2 观测可用的 XCO<sub>2</sub> 数据量和传输模型误差, 且参与 OCO-2 v10 MIP 的反演模型空间分辨率普遍是 3° (纬度) × 4° (经度), 无法精细刻画农田碳汇。其次, 对于自下而上方法的生态系统模型, BEPS 模型虽然利用卫星观测的 LAI 和聚集度指数等数据驱动, 但是没有充分考虑农业生物量的消耗和作物残留物的管理, 比如秸秆的处理和使用, 把农田生态系统当作是自然生态系统处理。动态植被模型 VEGAS 虽然考虑了农产品往城市的横向输运以及城市人口和牲畜对农产品的消耗, 但该模型将剩余地上生物量直接简单粗暴地归入土壤碳库, 与实际的农田碳循环过程仍存在差异。

但是, 值得思考的是, 以往研究仅考虑土壤

SOC 变化, 这是否能全面反映农田碳汇能力? 我国自 1990 年代以来对秸秆焚烧实施的严格禁令已改变了农田的碳循环过程, 秸秆的焚烧显著减少 (Yin et al., 2021), 秸秆深埋或者打碎直接还田等增多, 因此农田地区地上生物量中虽然产量部分由于人口和牲畜的消耗会较快返回大气, 余下的部分深埋后由于分解速率较慢, 也能在较长时间上储存碳。因此, 以往研究仅考虑 SOC 的增加及目前陆地生态系统模型考虑的农田管理不够, 均导致目前农田生态系统碳汇估算存在较大不确定性和争议, 仍需较全面地评估。

总之, “碳达峰、碳中和” 理念已成为全球气候治理和中国生态文明建设的重大诉求。了解陆地生态系统碳汇功能的动态变化可以为工业减排赢得关键时间窗口, 还应加强对未来不同时期、不同排放情景下中国陆地生态系统碳汇的估算 (Zhou et al., 2022)。通过保护、恢复和管理森林、草地、湿地和农田生态系统, 可以增加固碳和减少温室气体排放, 从而提升生态系统的净碳汇能力, 未来应加强“什么时候”和“在哪里”植树造林等增汇路径问题研究 (Zhou et al., 2022; Xu et al., 2023)。

### 参考文献 (References)

- Baker D F, Bösch H, Doney S C, et al. 2010. Carbon source/sink information provided by column CO<sub>2</sub> measurements from the Orbiting Carbon Observatory [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(9): 4145–4165. doi:10.5194/acp-10-4145-2010
- Baker D F, Doney S C, Schimel D S. 2006. Variational data assimilation for atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 58(5): 359–365. doi:10.1111/j.1600-0889.2006.00218.x
- Basu S, Baker D F, Chevallier F, et al. 2018. The impact of transport model differences on CO<sub>2</sub> surface flux estimates from OCO-2 retrievals of column average CO<sub>2</sub> [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(10): 7189–7215. doi:10.5194/acp-18-7189-2018
- Basu S, Guerlet S, Butz A, et al. 2013. Global CO<sub>2</sub> fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO<sub>2</sub> [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(17): 8695–8717. doi:10.5194/acp-13-8695-2013
- Byrne B, Baker D F, Basu S, et al. 2023. National CO<sub>2</sub> budgets (2015–2020) inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> observations in support of the global stocktake [J]. *Earth System Science Data*, 15(2): 963–1004. doi:10.5194/essd-15-963-2023
- Cai Q X, Zeng N, Zhao F, et al. 2022. The impact of human and livestock respiration on CO<sub>2</sub> emissions from 14 global cities [J]. *Carbon Balance and Management*, 17(1): 17. doi:10.1186/s13021-022-00217-7
- Chen J M, Ju W M, Ciais P, et al. 2019. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink [J]. *Nature Communications*, 10: 4259. doi:10.1038/s41467-019-12257-8
- Chen J M, Liu J, Cihlar J, et al. 1999. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications [J]. *Ecological Modelling*, 124(2–3): 99–119. doi:10.1016/S0304-3800(99)00156-8
- Chen J M, Mo G, Pisek J, et al. 2012. Effects of foliage clumping on the estimation of global terrestrial gross primary productivity [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1): GB1019. doi:10.1029/2010GB003996
- Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 3(3): 249–266. doi:10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2
- Chen Z C, Huntzinger D N, Liu J J, et al. 2021a. Five years of variability in the global carbon cycle: Comparing an estimate from the Orbiting Carbon Observatory-2 and process-based models [J]. *Environmental Research Letters*, 16(5): 054041. doi:10.1088/1748-9326/abfac1
- Chen Z C, Liu J J, Henze D K, et al. 2021b. Linking global terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes and environmental drivers: Inferences from the Orbiting Carbon Observatory 2 satellite and terrestrial biospheric models [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(9): 6663–6680. doi:10.5194/acp-21-6663-2021
- Chevallier F, Fisher M, Peylin P, et al. 2005. Inferring CO<sub>2</sub> sources and sinks from satellite observations: Method and application to TOVS data [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 110(D24): D24309. doi:10.1029/2005JD006390
- Chevallier F, Remaud M, O'Dell C W, et al. 2019. Objective evaluation of surface- and satellite-driven carbon dioxide atmospheric inversions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(22): 14233–14251. doi:10.5194/acp-19-14233-2019
- Crowell S, Baker D, Schuh A, et al. 2019. The 2015–2016 carbon cycle as seen from OCO-2 and the global in situ network [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(15): 9797–9831. doi:10.5194/acp-19-9797-2019
- Deng F, Jones D B A, Henze D K, et al. 2014. Inferring regional sources and sinks of atmospheric CO<sub>2</sub> from GOSAT XCO<sub>2</sub> data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(7): 3703–3727. doi:10.5194/acp-14-3703-2014
- Deng F, Jones D B A, O'Dell C W, et al. 2016. Combining GOSAT XCO<sub>2</sub> observations over land and ocean to improve regional CO<sub>2</sub> flux estimates [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 121(4): 1896–1913. doi:10.1002/2015JD024157
- Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. 2018. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(16): 4015–4020. doi:10.1073/pnas.1700304115
- Fernández-Martínez M, Peñuelas J, Chevallier F, et al. 2023. Diagnosing destabilization risk in global land carbon sinks [J]. *Nature*, 615(7954): 848–853. doi:10.1038/s41586-023-05725-1
- Gao M N, Xu R H, Huang J L, et al. 2023. Increase of carbon storage in

- the Qinghai-Tibet Plateau: Perspective from land-use change under global warming [J]. *Journal of Cleaner Production*, 414: 137540. doi:10.1016/j.jclepro.2023.137540
- Guo Z D, Hu H F, Li P, et al. 2013. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008 [J]. *Science China Life Sciences*, 56(7): 661–671. doi:10.1007/s11427-013-4492-2
- He H L, Wang S Q, Zhang L, et al. 2019. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus [J]. *National Science Review*, 6(3): 505–514. doi:10.1093/nsr/nwz021
- He Q N, Ju W M, Dai S P, et al. 2021. Drought risk of global terrestrial gross primary productivity over the last 40 years detected by a remote sensing-driven process model [J]. *J. Geophys. Res: Biogeosci*, 126(6): e2020JG005944. doi:10.1029/2020JG005944
- He W, Jiang F, Ju W M, et al. 2023. Improved constraints on the recent terrestrial carbon sink over China by assimilating OCO-2 XCO<sub>2</sub> retrievals [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 128(14): e2022JD037773. doi:10.1029/2022JD037773
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(730): 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
- Huang Y, Sun W J. 2006. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(15): 1785–1803. doi:10.1007/s11434-006-2056-6
- Jacobson A R, Schuldt K N, Miller J B, et al. 2020. CarbonTracker CT2019B [J]. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://gml.noaa.gov/ccgg/carbontracker/CT2019B/>
- Jiang F, Chen J M, Zhou L X, et al. 2016. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches [J]. *Scientific Reports*, 6(1): 22130. doi:10.1038/srep22130
- Ju W M, Chen J M, Black T A, et al. 2006. Modelling multi-year coupled carbon and water fluxes in a boreal aspen forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140(1–4): 136–151. doi:10.1016/j.agrformet.2006.08.008
- Klein Goldewijk K, Beusen A, Van Dreht G, et al. 2011. The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1): 73–86. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00587.x
- Kondo M, Patra P K, Sitch S, et al. 2020. State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO<sub>2</sub> budget [J]. *Global Change Biology*, 26(3): 1068–1084. doi:10.1111/gcb.14917
- Lal R. 2004. Offsetting China's CO<sub>2</sub> emissions by soil carbon sequestration [J]. *Climatic Change*, 65(3): 263–275. doi:10.1023/B:CLIM.0000038203.81854.7c
- Liu D Y, Gong H R, Li J, et al. 2024. Continuous crop rotation increases soil organic carbon stocks in river deltas: A 40-year field evidence [J]. *Science of the Total Environment*, 906: 167749. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.167749
- Liu J J, Baskaran L, Bowman K, et al. 2021. Carbon monitoring system flux net biosphere exchange 2020 (CMS-Flux NBE 2020) [J]. *Earth System Science Data*, 13(2): 299–330. doi:10.5194/essd-13-299-2021
- Liu Y, Liu R G, Chen J M. 2012. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981–2011) from combined AVHRR and MODIS data [J]. *J Geophys Res: Biogeosci*, 117(G4): G04003. doi:10.1029/2012JG002084
- Liu Z Q, Zeng N, Liu Y, et al. 2022. Improving the joint estimation of CO<sub>2</sub> and surface carbon fluxes using a constrained ensemble Kalman filter in COLA (v1.0) [J]. *Geoscientific Model Development*, 15(14): 5511–5528. doi:10.5194/gmd-15-5511-2022
- Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. 2018. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(16): 4039–4044. doi:10.1073/pnas.1700294115
- Ma H H, Peng M, Yang Z, et al. 2024. Spatial distribution and driving factors of soil organic carbon in the Northeast China Plain: Insights from latest monitoring data [J]. *Science of the Total Environment*, 911: 168602. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.168602
- Makysyutov S, Oda T, Saito M, et al. 2021. Technical note: A high-resolution inverse modelling technique for estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes based on the NIES-TM-FLEXPART coupled transport model and its adjoint [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(2): 1245–1266. doi:10.5194/acp-21-1245-2021
- Miller S M, Saibaba A K, Trudeau M E, et al. 2020. Geostatistical inverse modeling with very large datasets: An example from the Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) satellite [J]. *Geoscientific Model Development*, 13(3): 1771–1785. doi:10.5194/gmd-13-1771-2020
- Peiro H, Crowell S, Schuh A, et al. 2022. Four years of global carbon cycle observed from the Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) version 9 and in situ data and comparison to OCO-2 version 7 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(2): 1097–1130. doi:10.5194/acp-22-1097-2022
- Philip S, Johnson M S, Baker D F, et al. 2022. OCO-2 satellite-imposed constraints on terrestrial biospheric CO<sub>2</sub> fluxes over South Asia [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 127(3): e2021JD035035. doi:10.1029/2021JD035035
- Philip S, Johnson M S, Potter C, et al. 2019. Prior biosphere model impact on global terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes estimated from OCO-2 retrievals [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(20): 13267–13287. doi:10.5194/acp-19-13267-2019
- Piao S, Fang J Y, Ciais P, et al. 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 458(7241): 1009–1013. doi:10.1038/nature07944
- Piao S, He Y, Wang X H, et al. 2022. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects [J]. *Science China Earth Sciences*, 65(4): 641–651. doi:10.1007/s11430-021-9892-6
- Schuh A E, Lauvaux T, West T O, et al. 2013. Evaluating atmospheric CO<sub>2</sub> inversions at multiple scales over a highly inventoried

- agricultural landscape [J]. *Global Change Biology*, 19(5): 1424–1439. doi:10.1111/gcb.12141
- Seiler C, Melton J R, Arora V K, et al. 2022. Are terrestrial biosphere models fit for simulating the global land carbon sink? [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(5): e2021MS002946. doi:10.1029/2021MS002946
- Shang R, Chen J M, Xu M Z, et al. 2023. China's current forest age structure will lead to weakened carbon sinks in the near future [J]. *The Innovation*, 4(6): 100515. doi:10.1016/j.xinn.2023.100515
- Tang X L, Zhao X, Bai Y F, et al. 2018. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(16): 4021–4026. doi:10.1073/pnas.1700291115
- Tharammal T, Bala G, Devaraju N, et al. 2019. A review of the major drivers of the terrestrial carbon uptake: Model-based assessments, consensus, and uncertainties [J]. *Environmental Research Letters*, 14(9): 093005. doi:10.1088/1748-9326/ab3012
- University of East Anglia Climatic Research Unit, Harris I C, Jones P D. 2014. CRU TS3.22: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.22 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901-Dec. 2013) [Z]. NCAS British Atmospheric Data Centre. doi:10.5285/18BE23F8-D252-482D-8AF9-5D6A2D40990C
- Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. 2020. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data [J]. *Nature*, 586(7831): 720–723. doi:10.1038/s41586-020-2849-9
- Wang J, Jiang F, Wang H M, et al. 2021. Constraining global terrestrial gross primary productivity in a global carbon assimilation system with OCO-2 chlorophyll fluorescence data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 304–305: 108424. doi:10.1016/j.agrformet.2021.108424
- Wang J, Zeng N, Wang M R, et al. 2018. Contrasting terrestrial carbon cycle responses to the 1997/98 and 2015/16 extreme El Niño events [J]. *Earth System Dynamics*, 9(1): 1–14. doi:10.5194/esd-9-1-2018
- Wang M R, Wang J, Cai Q X, et al. 2021. Considerable uncertainties in simulating land carbon sinks induced by different precipitation products [J]. *J Geophys Res: Biogeosci*, 126(10): e2021JG006524. doi:10.1029/2021JG006524
- Wang Y L, Tian X J, Chevallier F, et al. 2022a. Constraining China's land carbon sink from emerging satellite CO<sub>2</sub> observations: Progress and challenges [J]. *Global Change Biology*, 28(23): 6838–6846. doi:10.1111/gcb.16412
- Wang Y L, Tian X J, Duan M Z, et al. 2023. Optimal design of surface CO<sub>2</sub> observation network to constrain China's land carbon sink [J]. *Science Bulletin*, 68(15): 1678–1686. doi:10.1016/j.scib.2023.07.010
- Wang Y L, Wang X H, Wang K, et al. 2022b. The size of the land carbon sink in China [J]. *Nature*, 603(7901): E7–E9. doi:10.1038/s41586-021-04255-y
- Weir B, Crisp D, O'Dell C W, et al. 2021. Regional impacts of COVID-19 on carbon dioxide detected worldwide from space [J]. *Science Advances*, 7(45): eabf9415. doi:10.1126/sciadv.abf9415
- 谢立军, 白中科, 杨博宇, 等. 2023. 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展 [J]. *地学前缘*, 30(2): 447–462. Xie L J, Bai Z K, Yang B Y, et al. 2023. Carbon sequestration assessment methods at home and abroad for terrestrial ecosystems: Research progress in achieving carbon neutrality [J]. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 30(2): 447–462. doi:10.13745/j.esf.sf.2022.2.78
- Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. 2007. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s [J]. *Global Change Biology*, 13(9): 1989–2007. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01409.x
- Xu H, Yue C, Zhang Y, et al. 2023. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(41): e2304988120. doi:10.1073/pnas.2304988120
- Yan L Y, Meng S W, Yang F T, et al. 2023. Changes in forest vegetation carbon storage and its driving forces in subtropical red soil hilly region over the past 34 years: A case study of Taihe county, China [J]. *Forests*, 14(3): 602. doi:10.3390/f14030602
- 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 2022. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献 [J]. *中国科学: 生命科学*, 52(4): 534–574. Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. 2022. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J]. *Science China Life Sciences*, 65(5): 681–695. doi:10.1360/SSV-2021-0362.
- Yin S, Guo M, Wang X F, et al. 2021. Spatiotemporal variation and distribution characteristics of crop residue burning in China from 2001 to 2018 [J]. *Environmental Pollution*, 268: 115849. doi:10.1016/j.envpol.2020.115849
- 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 2022. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案 [J]. *中国科学院院刊*, 37(4): 490–501. Yu G R, Zhu J X, Xu L, et al. 2022. Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink in China: Nature-based solutions [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 37(4): 490–501. doi:10.16418/j.issn.1000-3045.20220121002
- Yu Y Q, Huang Y, Zhang W. 2013. Projected changes in soil organic carbon stocks of China's croplands under different agricultural managements, 2011–2050 [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 178: 109–120. doi:10.1016/j.agee.2013.06.008
- Zammit-Mangion A, Bertolacci M, Fisher J, et al. 2022. WOMBAT v1.0: A fully Bayesian global flux-inversion framework [J]. *Geoscientific Model Development*, 15(1): 45–73. doi:10.5194/gmd-15-45-2022
- Zeng J Y, Zhou T, Xu Y X, et al. 2023. The fusion of multiple scale data indicates that the carbon sink function of the Qinghai-Tibet Plateau is substantial [J]. *Carbon Balance and Management*, 18(1): 19. doi:10.1186/s13021-023-00239-9
- Zeng N, Mariotti A, Wetzel P. 2005. Terrestrial mechanisms of interannual CO<sub>2</sub> variability [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1): GB1016. doi:10.1029/2004GB002273
- Zeng N, Zhao F, Collatz G J, et al. 2014. Agricultural Green Revolution as a driver of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> seasonal amplitude [J]. *Nature*, 515(7527): 394–397. doi:10.1038/nature13893

- 张新时. 2007. 中华人民共和国植被图 (1: 1 000 000) [M]. 北京: 地质出版社, 274pp. Zhang X S. 2007. Vegetation Map of the People's Republic of China (1: 1 000 000) (in Chinese) [M]. Beijing: Geology Press, 274pp.
- Zhou G S, Zhou M Z, Zhou L, et al. 2022. Advances in the carbon sink potential of terrestrial ecosystems in China [J]. Chinese Science Bulletin, 67(31): 3625–3632. doi:[10.1360/TB-2022-0032](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0032)
- 朱建华, 田宇, 李奇, 等. 2023. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力 [J]. 生态学报, 43(9): 3442–3457. Zhu J H, Tian Y, Li Q, et al. 2023. The current and potential carbon sink in forest ecosystem in China [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 43(9): 3442–3457. doi:[10.5846/stxb202205201425](https://doi.org/10.5846/stxb202205201425)
- Zuo W G, Gu B X, Zou X W, et al. 2023. Soil organic carbon sequestration in croplands can make remarkable contributions to China's carbon neutrality [J]. Journal of Cleaner Production, 382: 135268. doi:[10.1016/j.jclepro.2022.135268](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135268)