



唐兰萍, 柯新利, 左成超, 余强毅, 吴绍华, 李飞. 中国耕地系统时空演变对陆地生态系统碳收支的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10): 278-289.
TANG Lanping, KE Xinli, ZUO Chengchao, YU Qiangyi, WU Shaohua, LI Fei. Impact of spatial-temporal changes in the cropland system on carbon budget of terrestrial ecosystems in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10): 278-289.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.24

中国耕地系统时空演变对陆地生态系统碳收支的影响

唐兰萍¹ 柯新利^{2*} 左成超² 余强毅³ 吴绍华¹ 李飞⁴

(1. 浙江财经大学 公共管理学院, 杭州 310018;

2. 华中农业大学 公共管理学院, 武汉 430070;

3. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

4. 西安交通大学 公共政策与管理学院, 西安 710049)

摘要 为揭示耕地系统时空演变对陆地生态系统碳收支的影响, 本研究将耕地资源和耕地利用统一纳入耕地系统, 采用 InVEST 模型、温室气体排放系数核算方法评估 1980—2018 年市级尺度下中国(统计数据未包含港、澳、台地区。下同)耕地系统时空演变对碳储量、碳排放的影响。研究表明: 1) 耕地系统时空演变导致碳储量减少 3×10^8 t, 碳排放增加 1×10^8 t, 因此导致碳收支共损失 4×10^8 t; 2) 林地、湿地被开垦为耕地是碳储量减少的主要原因, 而化肥、农机等农业生产资料投入的大幅增加是碳排放增加的主要原因; 3) 耕地系统时空演变对碳收支影响的空间差异明显, 东南沿海、西北地区的城市碳收支出现提升, 而东北地区的城市碳收支损失严重。因此, 应重视从“人类-自然”耦合系统视角剖析耕地系统变化的碳效应; 未来既要加强对耕地侵占林地、湿地等生态用地进行科学合理的管控以减少碳储量损失, 还需要提高化肥、农药等农业生产资料的利用效率, 促进耕地由传统集约利用模式向可持续集约利用模式的转型。

关键词 耕地系统; 碳收支; 时空演变; 影响评估

中图分类号 F301.2; X321 文章编号 1007-4333(2024)10-0278-12 文献标志码

Impact of spatial-temporal changes in the cropland system on carbon budget of terrestrial ecosystems in China

TANG Lanping¹, KE Xinli^{2*}, ZUO Chengchao², YU Qiangyi³, WU Shaohua¹, LI Fei⁴

(1. College of Public Administration, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China;

2. College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

4. School of Public Policy and Administration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract This study aims to reveal the impact of the spatial-temporal changes in the cropland system on the carbon budget of terrestrial ecosystems. The resources and utilization of cropland were integrated into the cropland system. InVEST model and greenhouse gas emission factor method are adopted to assess the impact of spatial-temporal changes of the cropland system on carbon storage and carbon emissions in China (The data do not include those of Hong Kong, Macao, and Taiwan regions. The same below)

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 国家社科基金重大项目(23&ZD113); 国家自然科学基金项目(42371278, 41971240, 42271310); 国家社会科学基金项目(19FGLB071); 教育部哲学社科后期资助(重大)项目(21JHQ019)

第一作者: 唐兰萍(ORCID: 0000-0002-8620-3110), 讲师, 主要从事耕地系统变化与生态环境效应研究, E-mail: tanglanping@zufe.edu.cn

通讯作者: 柯新利(ORCID: 0000-0003-3398-9903), 教授, 主要从事耕地保护与利用研究, E-mail: kexl@mail.hzau.edu.cn

between 1980 and 2018 at the municipal scale. The results show that: 1) The spatiotemporal changes in the cropland system led to a decrease of 3×10^8 t in carbon storage and an increase in carbon emissions of 1×10^8 t, resulting in a total loss of 4×10^8 t in the carbon budget. 2) The reclamation of forest and wetlands for cropland was the main reason for the reduction of carbon storage, and the increase in the input of agricultural materials such as fertilizers and machinery was the main reason for the increase in carbon emissions. 3) The spatial-temporal changes in the cropland system in the impact of the carbon budget showed a significant difference. The carbon budget of cities in the southeast coast and northwest China increased, but the loss of the carbon budget in Northeast China was massive. Therefore, more attention should be paid to the carbon effect of changes in cropland systems from the perspective of a “human-nature” coupling system. In the future, it is not only necessary to carry out scientific and reasonable control of cropland encroachment on natural lands such as forests and wetlands to reduce the loss of carbon storage but also necessary to improve the utilization efficiency of agricultural materials such as fertilizers and pesticides in order to promote the transform of cropland utilization mode from traditional intensive utilization mode into sustainable intensive utilization mode.

Keywords cropland system; carbon budget; spatial-temporal changes; impact assessment

气候变化导致海平面不断上升、极端天气频率出现,对人类活动与生命安全、生态系统、自然资源等造成了严重的威胁,应对气候变化已经成为全球亟待解决的重要议题之一^[1]。提高陆地生态系统的碳储存功能、减少碳排放是减缓气候变化的重要途径之一^[2],因此,陆地生态系统碳收支(又称为剩余碳预算)已经成为研究焦点。耕地系统作为土地系统的重要组成部分,既可能是“碳源”,也可能是“碳汇”,固碳减排潜力巨大,因此揭示耕地系统变化对陆地生态系统碳收支(简称碳收支)的影响对于应对气候变化具有重要意义。

国内外在耕地利用变化对碳储量、碳排放的影响开展了大量研究^[3-12]。首先是耕地利用变化对碳储量的影响:在中宏观层面,主要探究耕地利用变化通过影响植被和土壤碳密度而引起碳储量变化,研究发现耕地在扩张过程中侵占了大量生态用地,导致碳储量损失^[4-5];在微观尺度层面,主要通过采样和检测的方法评估耕地利用变化对碳储量的影响,发现以有机肥或以化肥形式配合施用化肥氮磷钾有益于增加耕地的土壤有机碳储量^[6]。其次是在耕地利用变化对碳排放的影响方面:不仅探究了土地利用变化(包括耕地利用变化)引起的碳排放变化^[7-9],也越来越关注农田活动导致的碳排放,因为从全生命周期的视角来看,农业生产资料(例如化肥、农药、农膜等)的制造和运输过程、农用机械的使用过程也会消耗能源,进而产生碳排放^[10-11],研究表明 1997—2016 年中国农业碳排放强度总体上呈下降趋势^[10]。

通过梳理已有研究发现鲜有研究从“人类-自然”耦合系统视角探究耕地系统时空演变对碳收支的影响。耕地系统涵盖了耕地资源及耕地利用(包括耕地利用集约度、熟制、种植结构等)的双重含义,是人类利用耕地从事的一切活动及其结果、效应的综合体^[13-14]。如果将耕地系统割裂,仅仅关注耕地利用及覆被变化单一方面的碳效应可能导致其碳效应被低估。因此,揭示耕地系统变化对碳收支的影响不仅能够弥补已有研究在评估耕地利用变化的碳效应方面研究的不足,同时也有助于发挥耕地系统在“碳达峰”、“碳中和”目标中的积极作用。

因此,为揭示 1980—2018 年中国(统计数据未包含港、澳、台地区,下同)市级尺度下耕地系统时空演变对碳收支的影响,将耕地资源和耕地利用统一纳入耕地系统,采用 InVEST 模型、温室气体排放系数核算方法评估 1980—2018 年市级尺度下中国耕地系统时空演变对碳储量、碳排放的影响,以期完善耕地利用政策应对气候变化提供科学依据。

1 研究框架与方法数据

1.1 研究框架

耕地系统时空演变对碳收支的影响评估的研究框架如图 1 所示。图 1 包括了耕地资源变化对碳储量的影响及耕地利用变化对碳排放的影响。首先,基于耕地与其他地类转换的土地利用图、各地类的碳密度,采用 InVEST 模型评估耕地系统时空演变对碳储量的影响;然后,基于全生命周期的视

角,结合单位耕地面积上农业生产资料(包括化肥、农药、农膜等)的变化及各类农业生产资料对应的碳排放系数,采用温室气体排放系数核算方法评估

耕地系统时空演变对碳排放的影响;最后,基于耕地系统时空演变对碳储量、碳排放的影响,得到其对碳收支的影响。

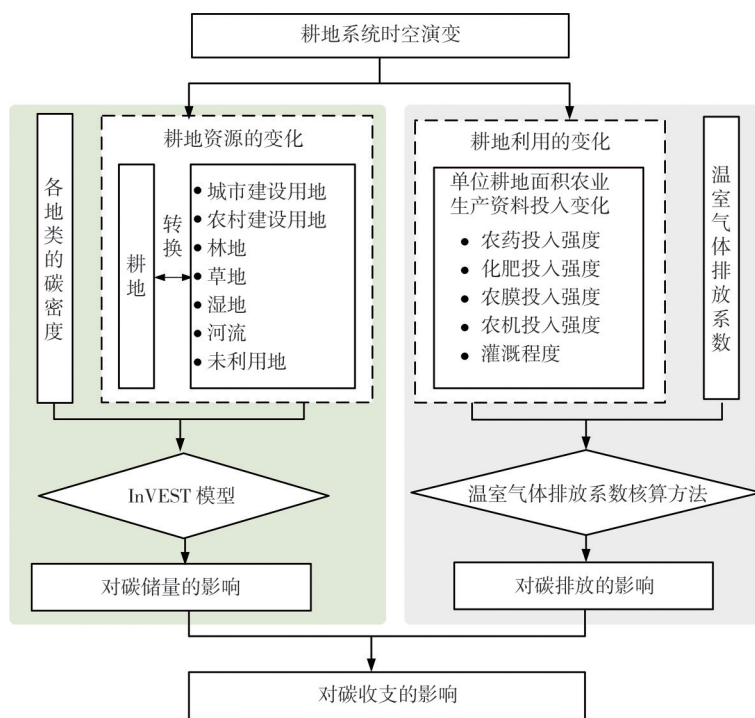


Fig. 1 Research framework

1.2 研究方法

1.2.1 InVEST模型

InVEST模型适用于测算土地利用类型变化引起的生态系统服务物质和价值量的变化,具有操作便捷、评估结果空间可视化的优点^[15]。目前,InVEST模型碳储存和固持模块在评估土地利用变化对碳储量的影响方面已经得到了广泛的应用^[16-19],该模块以土地利用类型为评估单元,利用区域土地利用/覆被信息、各地类的碳密度数据,通过栅格叠加评估碳储量。

本研究各地类的碳密度计算公式如下:

$$C_i = C_{i,above} + C_{i,below} + C_{i,dead} + C_{i,soil} \quad (1)$$

式中: C_i 为第 i 种地类的碳密度; $C_{i,above}$ 为第 i 种地类地上生物的碳密度; $C_{i,below}$ 为第 i 种地类地下生物的碳密度; $C_{i,dead}$ 为第 i 种地类的死亡有机质碳密度; $C_{i,soil}$ 为第 i 种地类的土壤有机质碳密度。

然后,基于各地类的碳密度和土地利用数据,碳储量计算公式如下:

$$C_{i,total} = C_i \times A_i \quad (2)$$

式中: $C_{i,total}$ 为区域内第 i 种地类总的碳储量; C_i 为第 i 种地类的碳密度; A_i 为第 i 种地类的面积。最后,将各地类的碳储量加总,得到区域内总的碳储量。

1.2.2 温室气体排放系数核算方法

根据 IPCC 碳排放核算清单,结合当前国内外碳排放测算的研究^[20-21],CE 为耕地上农业生产资料产生的 CO_2 排放总量,计算公式如下:

$$CE = \sum_i \alpha_i \beta_i \quad (3)$$

式中: i 为各项农业生产资料; α_i 、 β_i 分别农业生产资料 i 的投入数量及碳排放系数。

1.2.3 碳收支计算方法

碳收支(carbon budget),也被称为剩余碳预算、碳排放配额或允许碳排放量,是陆地生态系统植被与大气之间碳交换的净通量,可以反映陆地生态系统碳储存(输入)与碳排放(输出)的平衡状况^[22-24]。本文通过测算耕地系统变化引起的碳储量、碳排放的变化,便可得到耕地系统变化对碳收支的影响。图2为耕地系统变化对碳收支影响测算过程的示意图。可见:假设在年份 T_1 ,碳储量为 CS_1 ,碳排放

CE_1 , 那么碳收支为碳储量与碳排放的差值 CB_1 ; 在年份 T_2 , 耕地系统变化使得碳储量变化为 CS_2 (变化量为 ΔCS), 碳排放变化为 CE_2 (变化量为 ΔCE), 此时的碳收支则为 CB_2 。

那么, 耕地系统变化对碳收支影响的计算公式如下:

$$CB_2 - CB_1 = \Delta CS - \Delta CE \quad (4)$$

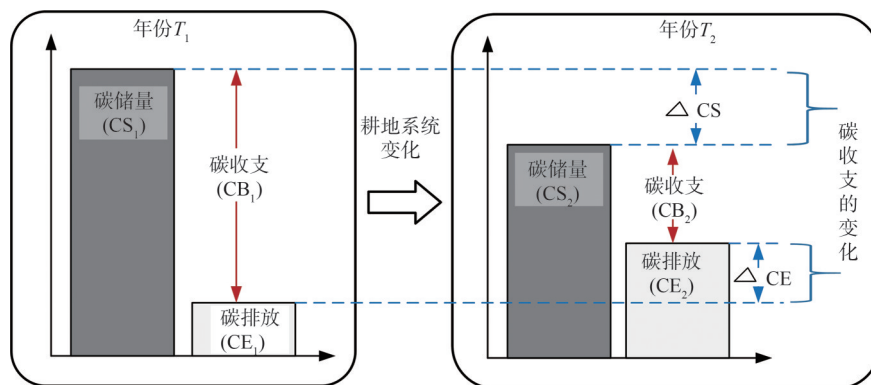


图 2 耕地系统变化对碳收支影响测算过程

Fig. 2 Schematic diagram of calculation on the impact of changes in cropland system on carbon budget

1.3 数据来源

1.3.1 耕地资源空间数据

考虑到耕地面积数据的可获取性和统一性, 本研究的耕地面积数据基于中国土地利用遥感监测数据集提取, 数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (Resource and Environment Science and Data Center, RESDC) 的全国土地利用数据库 (<http://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km, 土地利用类型包括 6 个一级地类及 25 个二级地类。

1.3.2 耕地利用数据

鉴于实物形态测度方法适用于长期大区域尺度耕地利用集约度评估, 因此, 本研究基于实物形态测度方法测算单位耕地面积上的农业生产资料

各项投入。农业生产资料主要包括农药、化肥、农膜、农业机械总动力及有效灌溉面积。农业生产资料各项投入的数据来源于《中国统计年鉴》^[25]、《中国农村统计年鉴》^[26]、《中国县域统计年鉴》^[27]、各县市统计年鉴、各县市农村统计年鉴、EPS (Easy Professional Superior) 数据平台。由于 1980 年全国农药及农膜的数据缺失, 因此假设 1980 年农药与农膜数据与 1990 年一致。

1.3.3 各地类的碳密度

InVEST 模型碳储存和固持模块需要输入各地类的碳密度数据^[15]。通过梳理文献, 获取不同地类的碳密度数据 (包括地上生物、地下生物、死亡有机质、土壤有机质碳密度), 见表 1。

表 1 各土地利用类型的碳密度
Table 1 Carbon density of each land-use type

土地利用类型 Land-use type	地上生物 Aboveground biomass	地下生物 Belowground biomass	死亡有机质 Dead organic matter	土壤有机质 Soil organic matter	总碳密度/ (t/hm ²) Carbon density	参考文献 References
耕地 Cropland	2.66	0.40	0.00	92.04	95.10	[28]
林地 Forest	44.60	11.10	1.90	106.10	163.70	[28]
草地 Grassland	0.43	4.40	0.08	85.40	90.31	[28]
河流 River	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	[17]
湿地 Wetland	7.58	0.00	0.00	173.60	181.18	[28-29]
城市建设用地 Urban land	6.72	0.00	0.00	70.36	77.08	[28, 30]
农村建设用地 Rural construction land	6.72	0.00	0.00	70.36	77.08	[28, 30]
未利用地 Unused land	3.63	0.00	0.00	48.16	51.79	[17, 31]

1.3.4 碳排放系数

首先通过权威数据库获取各项农业生产资料

的碳排放系数,对于无法获取的则采用文献中公布的数据,整理汇总结果详见表2。

表2 耕地利用过程的碳排放源及对应的碳排放系数

Table 2 Carbon emission sources and corresponding carbon emission coefficients in the process of cropland use

碳排放源 Carbon emission sources	碳排放系数 Carbon emission coefficients	单位 Unit	数据来源 Data sources
农药 Pesticide	4.94	t/t	[32]
化肥 Fertilizer	0.86	t/t	[32]
农膜 Plastic film	3.15	t/t	英国政府发布报告“Greenhouse gas reporting: conversion factors 2018”
农业机械总动力 Total power of farm machinery	0.06	t/kW	IPCC, 2006;英国政府发布报告“Greenhouse gas reporting: conversion factors 2018”
灌溉用电 Electricity for irrigation	0.19	t/hm ²	中国气候变化信息网发布文件“2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子”;英国政府发布报告“Greenhouse gas reporting: conversion factors 2018”;中国发展改革委员会《中国2019年农产品成本收益汇总》 ^[33]

2 结果与分析

2.1 耕地系统时空演变特征

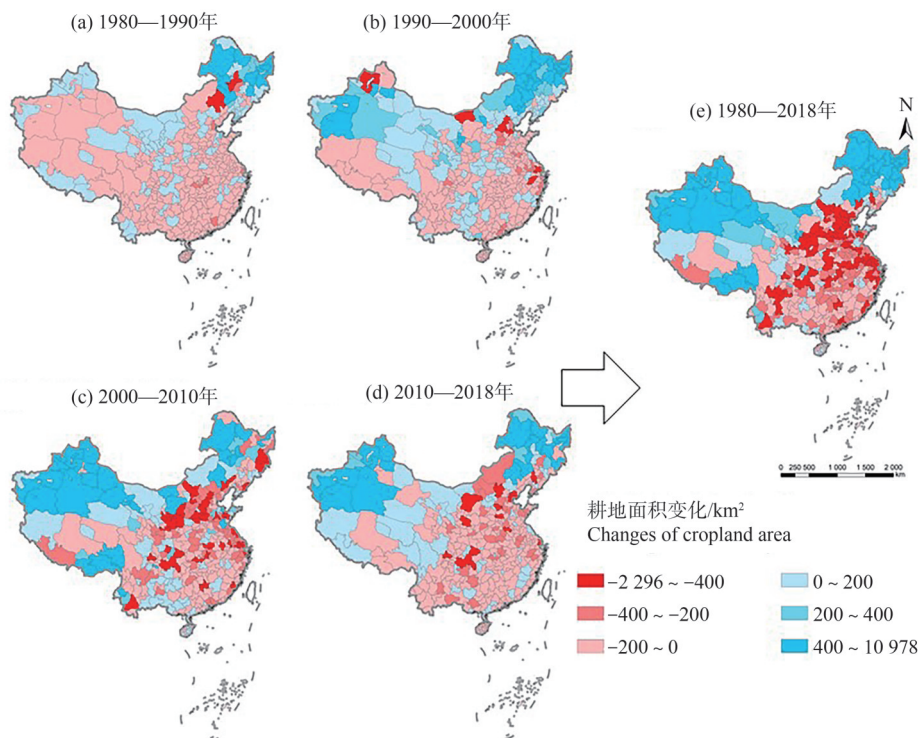
2.1.1 耕地资源的时空演变

由图3可见中国1980—2018年耕地面积总体有所减少,在空间上呈现“南减北增,东减西增”的变化特征。其中:华北、华中、华东及华南地区的城市的耕地在各阶段均遭受了不同程度的损失,损失较为严重的城市包括北京、上海、天津、重庆等;东北地区的城市的耕地面积变化却恰恰相反,总体上保持增加的趋势,例如黑龙江省的佳木斯市、双鸭山市、黑河市等;西北地区的部分城市的耕地在1980—1990年有所流失,但是之后则转变为增加,例如新疆的克拉玛依市、吐鲁番市、哈密市等(图3)。总而言之,1980—2018年,

东北、西北地区的城市的耕地资源大幅增加(均>400 km²),而其他城市的耕地资源均遭受不同程度的损失。

2.1.2 耕地利用集约度的时空演变

1980—2018年中国耕地利用集约度总体有所提升,其时空演变特征如图4所示。可见:绝大多数城市的农药使用强度均提升,但是少数城市的农药使用强度下降,例如广东省的珠海市、深圳市、广州市等(图4(a));几乎所有城市的化肥、农膜及农机使用强度均提升,尤其是东部沿海地区的城市(图4(b)~(d))。耕地灌溉程度(有效灌溉面积与耕地面积之比)保持上升的趋势,且大多数城市的耕地灌溉程度均得到提高,尤其是分布在长江中下游平原的城市(图4(e))。



基于审图号 GS(2023)2763, 底图无修改, 下同。

Based on the drawing approval number GS(2023)2763 and not modified. The same below.

统计数据未包含港、澳、台地区。下同。

The data do not include those of Hong Kong, Macao and Taiwan regions. The same below.

图 3 1980—2018 年中国耕地资源的时空演变

Fig. 3 Spatial-temporal changes of cropland in China from 1980 to 2018

2.2 耕地系统时空演变对碳收支的影响

2.2.1 对碳储量的影响评估

1980—2018 年耕地系统时空演变导致碳储量共减少 3×10^8 t, 由图 5(a) 可见 1980—1990 年、1990—2000 年碳储量分别减少 0.73×10^8 、 1.15×10^8 t, 主要原因是大量林地转为耕地, 贡献率分别为 57%、68%; 2000—2010 年碳储量小幅增加 (0.04×10^8 t), 归功于退耕还林、还草; 2010—2018 年碳储量减少 1×10^8 t, 湿地转为耕地是导致碳储量下降的主要原因, 贡献率为 54%。

由图 5(b) 可见在空间上, 1980—1990 年、1990—2000 年耕地系统变化对碳储量的影响格局较为相似, 黑龙江省的碳储量损失均较为严重; 2000—2010 年, 大多数城市的碳储量得到提升, 西北地区的城市碳储量由原来的减少状态转为增加状态, 在 2010—2018 年这个阶段更为明显。值得注意的是, 东北地区的城市碳储量依旧遭受严重的损失。总而言之, 1980—2018 年耕地系统变化让西北地区的

碳储量明显增加, 华南地区的碳储量小幅增加; 但是, 耕地系统变化导致东北地区的碳储量损失严重, 华东地区、华中以及西南地区的碳储量则遭受轻度损失。

2.2.2 对碳排放的影响评估

由图 6(a) 可见 1980—2018 年耕地系统变化导致碳排放共增加 1×10^8 t, 主要是由于耕地利用过程中化肥和农机的投入强度的提升。1980—2010 年 3 个阶段耕地系统变化导致的碳排放量依次递增。其中, 2000—2010 年这个阶段的碳排放量最高, 达到 0.40×10^8 t, 而 2010 年之后耕地系统变化导致的碳排放量大幅减少, 减少到 0.08×10^8 t。

由图 6(b) 可见虽然耕地系统变化导致绝大多数的城市碳排放增加, 但是碳排放减少的城市数量逐渐增加, 由东南沿海城市逐渐拓展至华中、西南及华北地区的城市。总而言之, 1980—2018 年耕地系统变化对碳排放影响呈现“西增东减、北增南减”的空间特征。

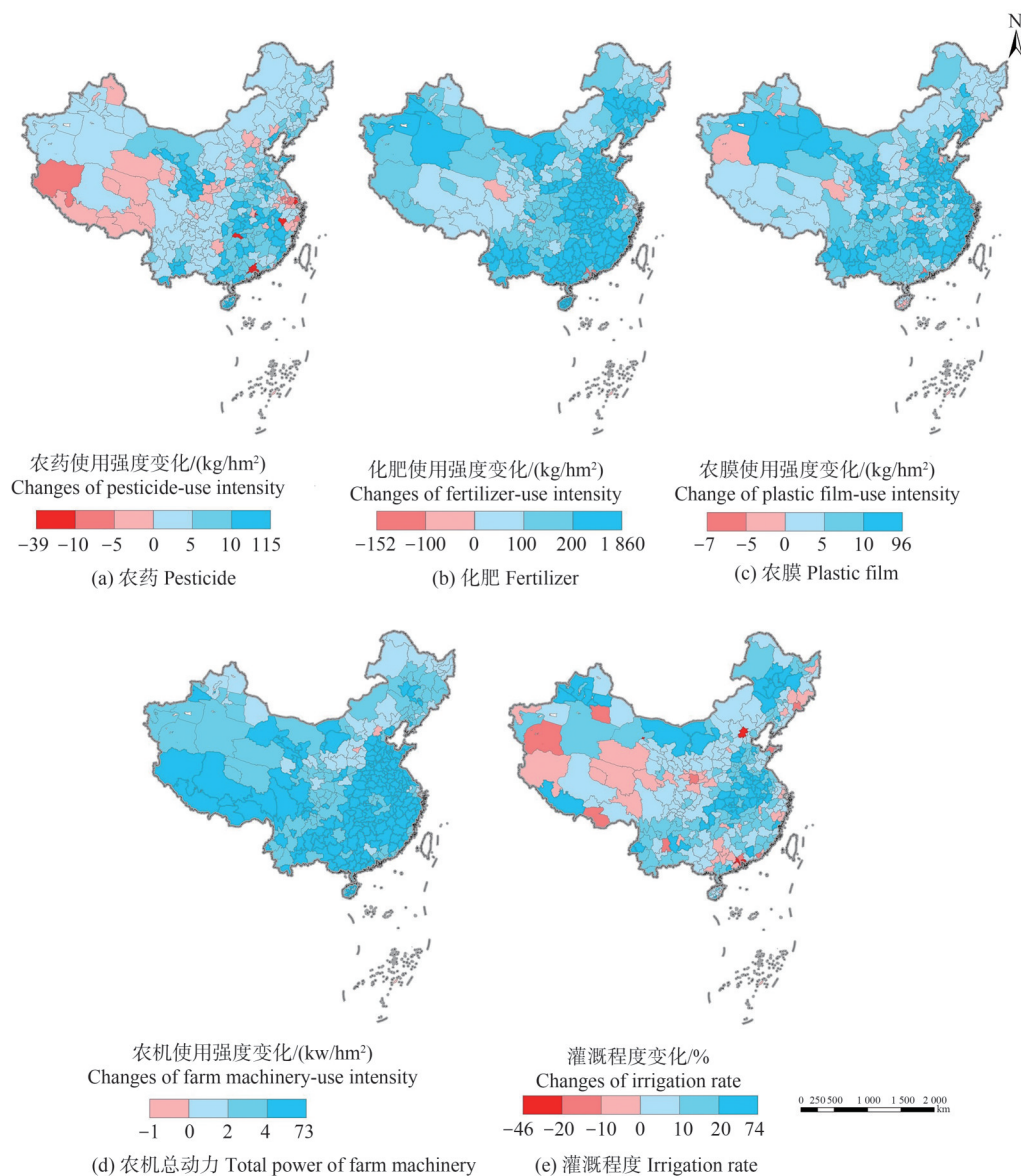


图4 1980—2018年中国耕地利用集约度的时空变化

Fig. 4 Spatial-temporal changes in cropland-use intensification in China between 1980 and 2018

2.2.3 对碳收支的影响评估

由上文可知,1980—2018年耕地系统变化导致碳储量共减少 3×10^8 t、碳排放共增加 1×10^8 t,因此碳收支共损失 4×10^8 t。具体而言,1980—2018年中国耕地系统时空演变对碳收支的影响见图7。由图7(a)可见1990—2000年的碳收支损失最多(-1.5×10^8 t),主要由碳储量的变化引起;而2000—2010年的碳收支损失最少(-0.4×10^8 t),主要由碳排放的变化引起。由图7(b)可见在空间上,1980—1990年、1990—2000年耕地系统变化导致大多数城市碳收支损失,并且碳收支损失较多的地区主要

集中在东北地区,尤其是黑龙江省的佳木斯市(-2×10^8 t),双鸭山市、鸡西市的碳收支损失均超过 10^8 t。2000—2010年东北地区的部分城市的碳收支转向增加,例如黑龙江省的鸡西市($+0.02 \times 10^8$ t)、伊春市($+0.18 \times 10^8$ t)等,但是这些地区的碳收支在2010—2018年又遭受损失。此外,2000—2010年、2010—2018年西北地区的部分城市耕地系统演变对碳收支的增加发挥了一定的积极作用,例如新疆的克拉玛依市($+0.06 \times 10^8$ t)、吐鲁番市($+0.05 \times 10^8$ t)等城市。综上,1980—2018年耕地系统变化导致碳收支损失最严重的地区主要集中

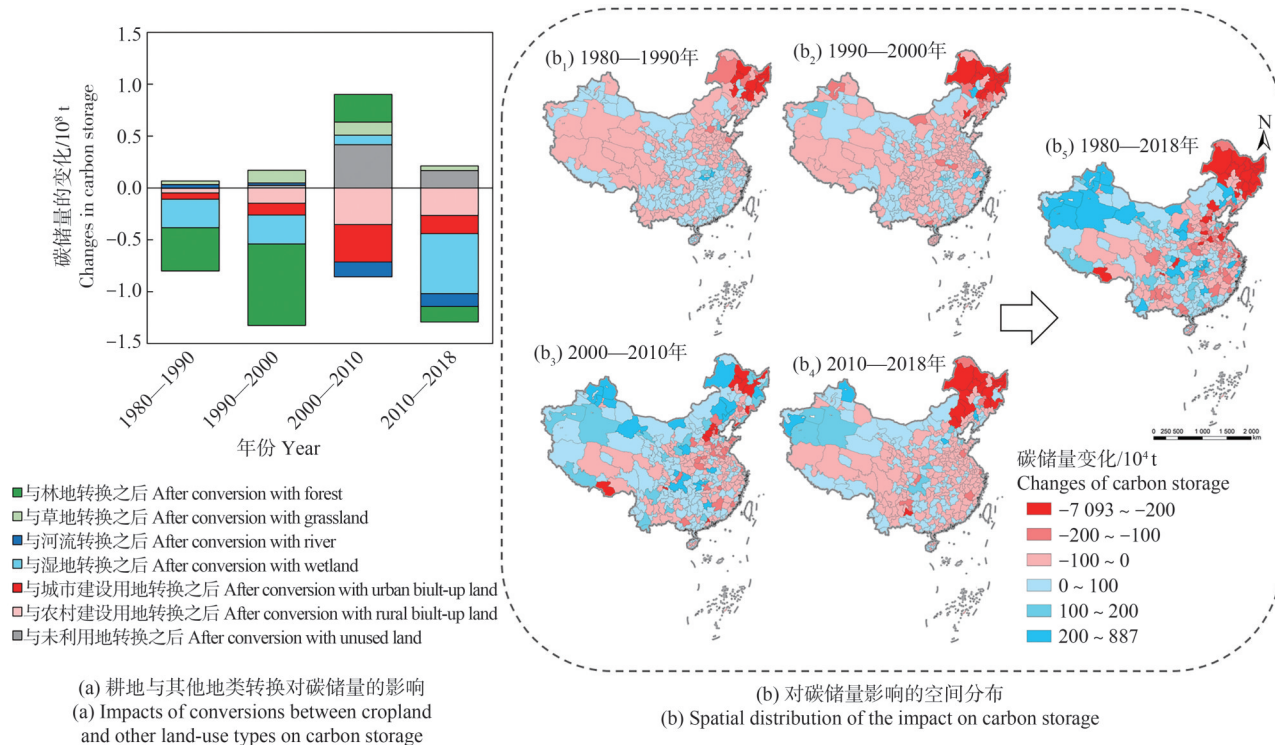


图 5 1980—2018 年中国耕地系统时空演变对碳储量的影响

Fig. 5 Impacts of spatial-temporal changes of cropland system on carbon storage in China between 1980 and 2018

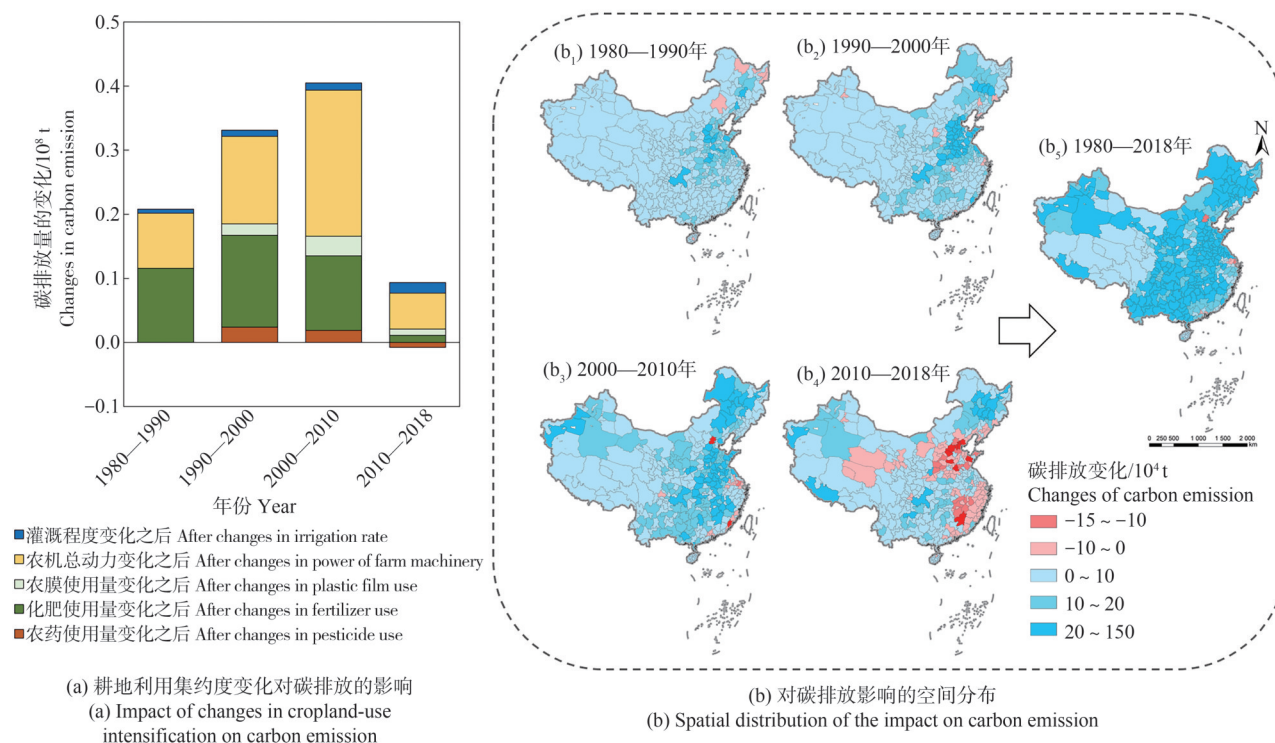


图 6 1980—2018 年中国耕地系统时空演变对碳排放的影响

Fig. 6 Impacts of spatial-temporal changes of cropland system on carbon emission in China between 1980 and 2018

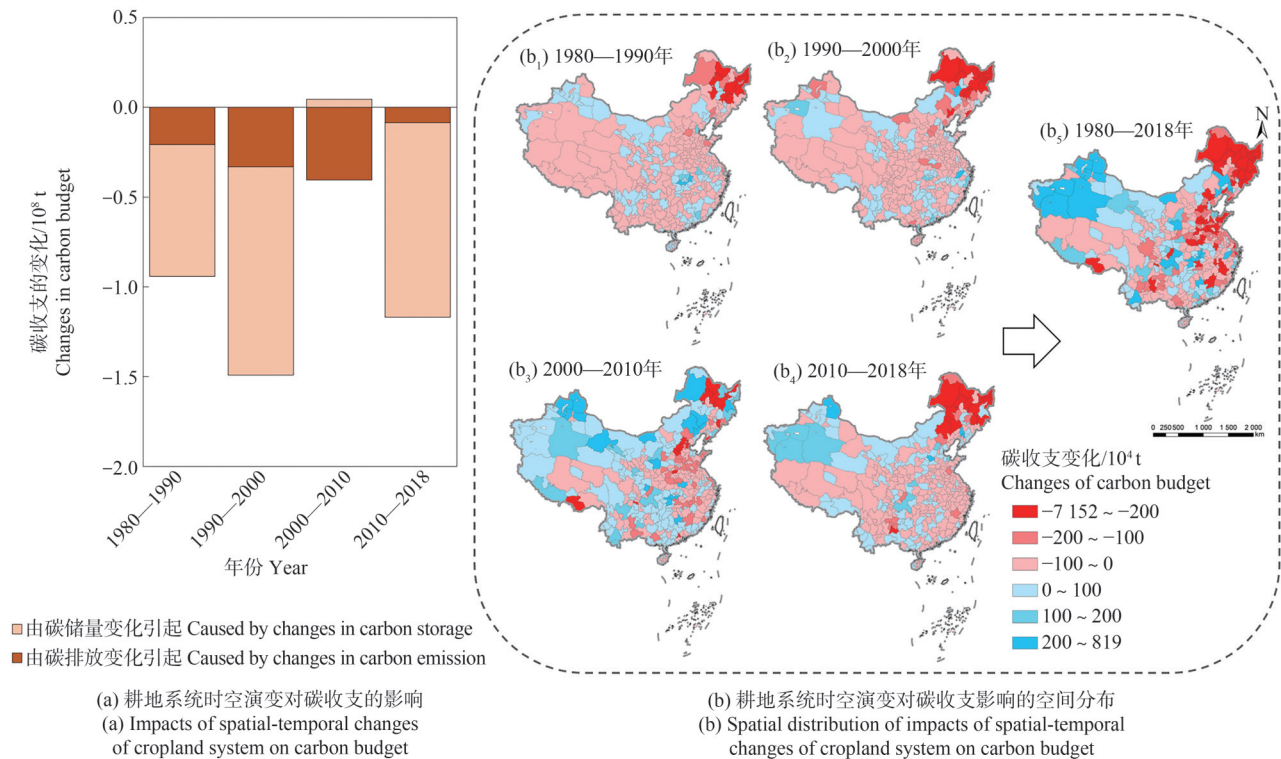


图7 1980—2018年中国耕地系统时空演变对碳收支的影响

Fig. 7 Impacts of spatial-temporal changes of cropland system on carbon budget in China between 1980 and 2018

在东北地区,而东南沿海、西北地区的城市的碳收支则有所增加。

3 结论与启示

本研究基于“人类-自然”耦合系统视角,将耕地资源和耕地利用统一纳入耕地系统,通过评估1980—2018年中国耕地系统时空演变对碳储量、碳排放的影响,揭示耕地系统时空演变对碳收支的影响。主要结论如下:

1)中国耕地系统在空间上经历了显著的变化。在耕地资源方面,虽然耕地总量保持稳定,但是耕地面积变化的空间差异大,呈现“南减北增,东减西增”的特征;在耕地利用集约度方面,总体上呈现明显的上升趋势,就提升的幅度而言,呈现“南高于北,东高于西”的特征。

2)中国耕地系统时空演变对碳收支具有负向影响。中国耕地系统变化导致碳储量减少、碳排放增加,进而导致碳收支遭受严重的损失,其中碳储量减少对碳收支损失起到主导性作用;林地、湿地被开垦为耕地是碳储量减少的主要原因,而耕地利用过程中化肥、农机等农业生产资料投入的增加则

是碳排放增加的主要原因。

3)耕地系统时空演变导致碳收支损失空间差异明显,碳收支损失最为严重的城市主要集中在东北地区,需要得到重视。

本研究发现对科学认识耕地系统时空演变的碳效应,并采取措施缓解耕地系统对碳收支的负面效应具有借鉴意义。针对上述结论,提出如下政策建议:

1)在制定耕地保护与利用的政策中,需要重视“人类-自然”耦合系统,不仅要关注耕地资源本身的变化,还要将耕地资源和利用统一纳入耕地系统中,综合考量耕地系统的变化及其效应在空间上的差异性。同时,在耕地保护方面也要从侧重数量保护进入到数量、质量保护与生态治理相结合^[34],并构建合理的耕地保护补偿机制^[35-36]。

2)为缓解耕地系统变化对碳收支的消极影响,一方面,需要对耕地侵占林地、湿地等生态用地进行科学合理的管控以减少碳储量的损失。另一方面,在耕地利用方面不能仅仅依靠化肥、农药的投入,而是要促进耕地由传统集约利用模式向可持续集约利用模式的转型,例如研发推广作物吸收、利

用率高新型肥料产品,推广优良品种和绿色高效栽培技术,提高化肥利用效率。

3) 鉴于东北地区耕地系统造成的碳收支损失最为严重,而东北地区又承担着我国粮食生产的重任,粮食生产与碳收支之间往往存在着冲突。因此,在保障粮食产量的同时应当大力推行固碳减排措施。例如,加强对林地的保护,防止其进一步被耕地侵占而导致碳储量损失;同时,还需要大力推进国家黑土地保护工程,以耕地土壤有机质提升为重点,构建用地养地结合的培肥固碳模式,提高土壤肥力,提升单产的同时也提高固碳潜力。

本研究尚存在以下不足之处:首先,本研究没有考虑土地覆被变化引发的土地利用活动变化而导致的碳排放变化,例如耕地转为建设用地而导致的碳排放,这属于耕地系统变化对碳排放的间接影响,不是本研究考虑的主要方面,并且这部分间接影响测算难度很大。因为耕地转为建设用地后产生的碳排放主要取决于建设用地的具体用途,例如建设化工厂、食品加工厂、住宅区等,但是获取精准的数据难度大,并且利用过程产生的碳排放测算过程复杂;其次,在碳排放方面,鉴于数据的可获取性,没有考虑农业生产活动对固碳的积极作用,例如秸秆还田。其次,在数据方面,由于本研究的研究时间跨度较大,从社会统计年鉴获取的市级耕地面积数据存在数据缺失、统计标准不统一的问题,所以本研究采用的耕地面积数据来源于中国土地利用遥感监测数据,而农业生产资料数据采用的社会经济数据,因此,计算得到的单位耕地面积的投入可能存在一定的误差;最后,在测算碳储量方面,采用的碳密度数据忽略了空间异质性,因为同一类型的用地在不用的地区碳密度存在差异。在今后的研究中,应当通过整合多源数据,以提高评估结果的准确性。

参考文献 References

- [1] Tokarska K B, Gillett N P. Cumulative carbon emissions budgets consistent with 1.5 °C global warming [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(4):296-299
- [2] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 刘国华, 赵新全. 中国陆地生态系统固碳效应: 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”之生态系统固碳任务群研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 848-857, 875
Fang J Y, Yu G R, Ren X B, Liu G H, Zhao X Q. Carbon sequestration in China's terrestrial ecosystems under climate change: Progress on ecosystem carbon sequestration from the CAS strategic priority research program[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(6): 848-857, 875 (in Chinese)
- [3] 解天琪, 李龙, 陈鑫, 周翼, 张国梁, 陈龙乾. 基于土地利用的淮海经济区碳储量估算与预测[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(1): 131-142
Xie T Q, Li L, Chen X, Zhou Y, Zhang G L, Chen L Q. Estimation and prediction of carbon storage based on land use in the Huaihai Economic Zone[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(1): 131-142 (in Chinese)
- [4] Molotoks A, Stehfest E, Doelman J, Albanito F, Fitton N, Dawson T P, Smith P. Global projections of future cropland expansion to 2050 and direct impacts on biodiversity and carbon storage [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(12): 5895-5908
- [5] Tang L P, Ke X L, Zhou T, Zheng W W, Wang L Y. Impacts of cropland expansion on carbon storage: A case study in Hubei, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 265: 110515
- [6] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687-692
Meng L, Ding W X, Cai Z C, Qin S W. Storage of soil organic c and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(6): 687-692 (in Chinese)
- [7] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 时小翠, 蔡春苗. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961
Zhou J, Wang Y X, Liu X R, Shi X C, Cai C M. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(12): 1955-1961 (in Chinese)
- [8] 杨蕴琦, 郝晋珉, 张金懿, 武子豪, 孙逸航. 曲周县土地利用碳排放测算及情景预测研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 160-175
Yang Y Q, Hao J M, Zhang J Y, Wu Z H, Sun Y H. Carbon emission measurement and prediction of land use in Quzhou County based on carbon neutrality target [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(2): 160-175 (in Chinese)
- [9] 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 76-83
Qu F T, Lu N, Feng S Y. Effects of land use change on carbon emissions [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(10): 76-83 (in Chinese)
- [10] 夏四友, 赵媛, 许昕, 文琦, 崔盼盼, 唐文敏. 近 20 年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 596-608
Xia S Y, Zhao Y, Xu X, Wen Q, Cui P P, Tang W M. Regional inequality, spatial-temporal pattern and dynamic evolution of carbon emission intensity from agriculture in China in the period of 1997-2016 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(3): 596-608 (in Chinese)
- [11] 张鹏岩, 何坚坚, 庞博, 逯承鹏, 秦明周, 卢谦成. 农田生态系统碳足迹时空变化: 以河南省为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 3050-3060
Zhang P Y, He J J, Pang B, Lu C P, Qin M Z, Lu Q C. Temporal and spatial differences in carbon footprint in farmland ecosystem: A case study of Henan Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(9): 3050-3060 (in Chinese)
- [12] 白雪冰, 胡浩, 周应恒, 张岳. 中国畜牧业碳排放的时空演进及其影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 260-274
Bai X B, Hu H, Zhou Y H, Zhang Y. Study on space-time evolution and influence factors of carbon emissions in China's animal husbandry [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 260-274 (in Chinese)

- Chinese)
- [13] 唐华俊, 吴文斌, 余强毅, 夏天, 杨鹏, 李正国. 农业土地系统研究及其关键科学问题[J]. 中国农业科学, 2015, 48(5): 900-910
Tang H J, Wu W B, Yu Q Y, Xia T, Yang P, Li Z G. Key research priorities for agricultural land system studies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(5): 900-910 (in Chinese)
- [14] Turner B L, Lambin E F, Verburg P H. From land-use/land-cover to land system science[J]. *Ambio*, 2021, 50(7): 1291-1294
- [15] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin-Kramer R. *INVEST Version 3.2.0 User's Guide*[M]. Stanford: Natural Capital Project, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stanford University, University of Minnesota, 2015
- [16] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, Li X, Wang S J, Wu C J, Cai Y L, Wu J G, Chen J, Feng K S, Liu J G, Hubacek K, Davis S J, Yuan W P, Yu L, Liu Z. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5558
- [17] Liu X P, Wang S J, Wu P J, Feng K S, Hubacek K, Li X, Sun L X. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(12): 6834-6844
- [18] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响: 以湖北省为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 672-683
Ke X L, Tang L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 672-683 (in Chinese)
- [19] 唐兰萍, 柯新利, 郑伟伟. 耕地占补平衡对碳储量影响的情景分析[J]. 土地经济研究, 2020(2): 76-93
Tang L P, Ke X L, Zheng W W. Scenario analysis on the impacts of cropland balance of occupation and compensation on carbon storage[J]. *Journal of Land Economics*, 2020(2): 76-93 (in Chinese)
- [20] 叶炳南, 孟海波, 冯晶, 丛宏斌. 海南省农业领域碳排放时空分布与预测[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(1): 157-166
Ye B N, Meng H B, Feng J, Cong H B. Spatio-temporal distribution and prediction of agricultural carbon emissions in Hainan Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(1): 157-166 (in Chinese)
- [21] Chen, Lu. Future grain consumption trends and implications on grain security in China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5165
- [22] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003
Yu G R. *Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003 (in Chinese)
- [23] Meinshausen M, Meinshausen N, Hare W, Raper S C B, Frieler K, Knutti R, Frame D J, Allen M R. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 degrees C[J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1158-1162
- [24] Matthews H D, Zickfeld K, Knutti R, Allen M R. Focus on cumulative emissions, global carbon budgets and the implications for climate mitigation targets[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(1): 010201
- [25] 中国统计年鉴编委会. 中国统计年鉴(1981, 1991, 2001, 2011, 2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1981, 1991, 2001, 2011, 2019
Editorial Board of China Statistical Yearbook. *China Statistical Yearbook (1981, 1991, 2001, 2011 and 2019)*[M]. Beijing: China Statistics Press, 1981, 1991, 2001, 2011, 2019 (in Chinese)
- [26] 中国农村统计年鉴编辑委员会. 中国农村统计年鉴(1985年, 1991年, 2001年, 2011年, 2019年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1985, 1991, 2001, 2011, 2019
Editorial Board of China Rural Statistical Yearbook. *China Rural Statistical Yearbook (1985, 1991, 2001 and 2019)*[M]. Beijing: China Statistics Press, 1985, 1991, 2001, 2011 and 2019 (in Chinese)
- [27] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴(2001年, 2011年, 2019年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011, 2019
Rural Socioeconomic Survey Department of the National Bureau of Statistics. *China County Statistical Yearbook (2001, 2011 and 2019)*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001, 2011, 2019 (in Chinese)
- [28] 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[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026
- [29] Yu D S, Shi X Z, Wang H J, Sun W X, Chen J M, Liu Q H, Zhao Y C. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 680-689
- [30] Fang J, Liu G, Xu S. Soil carbon pool in China and its global significance[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1996, 2: 49-254.
- [31] Chuai X W, Huang X J, Lai L, Wang W J, Peng J W, Zhao R Q. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China[J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25: 50-61
- [32] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232
- [33] 国家发展和改革委员会价格司. 中国2019年农产品成本收益汇总[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019
Price Department of National Development and Reform Commission. *Summary of Cost and Benefit of Agricultural Products in China in 2019*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019(in Chinese)
- [34] 孔祥斌. 中国耕地保护生态治理内涵及实现路径[J]. 中国土地科学, 2020, 34(12): 1-10
Kong X B. The connotation and realization path of ecological governance of cultivated land protection in China[J]. *China Land Science*, 2020, 34(12): 1-10 (in Chinese)
- [35] 崔宁波, 生世玉, 方袁意如. 粮食安全视角下省际耕地生态补偿的标准量化与机制构建[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(11): 232-243
Cui N B, Sheng S Y, Fang Y Y R. Standard quantification and mechanism construction of inter-provincial cultivated land ecological compensation from the perspective of food security[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(11): 232-243 (in Chinese)
- [36] 温良友, 张蚌蚌, 孔祥斌, 党昱讓, 王轩. 基于区域协同的我国耕地保护补偿框架构建及其测算[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 155-171
Wen L Y, Zhang B B, Kong X B, Dang Y X, Wang X. Construction and calculation of cultivated land protection compensation framework based on regional coordination in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 155-171 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介：唐兰萍，华中农业大学博士，荷兰阿姆斯特丹自由大学联合培养博士，浙江财经大学公共管理学院讲师。主要从事耕地系统变化与生态环境效应、国土空间优化配置等方面的教学与研究工作，在 *Nature Food*、*Land Degradation & Development*、*Journal of Environmental Management*、*Ecological Indicators*、*Land Use Policy*、《生态学报》等期刊发表论文 14 篇，先后参与国家自然科学基金项目、国家社会科学基金项目、教育部人文社科基金项目及其他各类科研课题 8 项、参与著作撰写 1 部。研究成果获武汉市社会科学优秀成果奖三等奖、土地经济研究新秀奖、联合国黑客松中国赛区最佳可视化奖等。



通讯作者简介：教授，博士生导师，华中农业大学公共管理学院院长。主要从事土地利用变化、耕地保护与利用、国土空间优化配置等方面的研究。主持国家自然科学基金和国家社会科学基金 7 项，其中国家社科基金重大项目 1 项，其它各类科研课题 20 余项。在 *Nature Food*、*Land Use Policy*、《地理学报（英文版）》、《中国土地科学》和《中国行政管理》等公开发表学术论文 100 余篇，独立出版专著 3 部。系统评估了我国耕地保护政策实施效果及其生态代价，服务粮食安全和生态文明建设战略；提出了权衡城市扩张、耕地保护与生态保育的土地利用优化配置策略，服务可持续发展；提出了基于布局优化的耕地保护区域补偿的理论与方法体系，服务区域协调发展，获得了广泛关注，并被 *Nature Sustainability*、*Nature Communications* 等国际一流期刊引用。自主研发了分区异步元胞自动机模型软件、LANDSCAPE 土地利用变化模型软件、生态安全评估系统各 1 套。研究成果获评“湖北省社会科学优秀成果奖”等学术奖励。