

徐 玥,王 辉,韩秋凤,等. 我国耕地碳排放时空特征与影响因素[J]. 江苏农业科学,2022,50(16):218-226.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.16.032

# 我国耕地碳排放时空特征与影响因素

徐 玥<sup>1</sup>,王 辉<sup>1,2,3</sup>,韩秋凤<sup>4</sup>,姜念念<sup>1</sup>,温丹丹<sup>5</sup>

(1. 中国矿业大学公共管理学院,江苏徐州 221116; 2. 中国资源枯竭型城市转型发展与乡村振兴研究中心,江苏徐州 221116;  
3. 中国矿业大学土地利用与生态安全治理研究中心,江苏徐州 221116; 4. 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏徐州 221116;  
5. 徐州市自然资源和规划局,江苏徐州 221008)

**摘要:**耕地是碳汇,同时也是重要的碳源。为探究我国耕地碳排放时空特征及其影响因素,采用联合国政府间国际气候变化专门委员会(IPCC)碳排放系数法,基于化肥、农药、农用薄膜、农用柴油、翻耕、农业灌溉共计6类碳源,间接测算我国2000—2019年耕地碳排放总量与碳排放强度,并运用对数平均迪氏指数分解法(LMDI)模型对耕地碳排放影响因素进行分解研究。结果表明,我国耕地碳排放总量从2000年的6 013.69万t按照先增后减的趋势逐渐递减排至2019年的8 093.62万t,年均递增率为1.58%,其中化肥、农药、农用薄膜、农用柴油、翻耕、农业灌溉所产生的碳排放量年均递增率分别为1.40%、0.44%、3.15%、1.70%、0.32%、1.29%。耕地碳排放总量较高的省份有河南、山东、河北、新疆、江苏等省(区),大多集中在传统农业大省;耕地碳排放强度较高的省份有福建、广东、上海、浙江、海南等省(市),大多集中在沿海发达地区。农业生产结构、单位化肥人均使用量、农业生产效率因素对耕地碳排放的增长具有抑制作用,农业经济水平和化肥施用量因素对耕地碳排放的增长具有促进作用。近20年来我国耕地碳排放量总体呈波动递减趋势,预计未来耕地碳排放量还将持续下降。

**关键词:**耕地;碳排放;时空特征;影响因素;LMDI

**中图分类号:**F323.211 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)16-0218-09

耕地不仅是粮食生产的最主要载体,同时也是重要的碳排放源之一。伴随着城市扩张和更新速度的加快以及人们对土地资源的过度投入开发,农业温室气体排放现状日益恶化。在相对有限的耕地面积上,农业化学化和农业机械化使得化肥、农

药、农用柴油等农业生产资料的投入不断加大,导致农地利用碳排放总量增长显著<sup>[1]</sup>。根据《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》,2014年农业活动产生的温室气体排放量为8.30亿t二氧化碳排放当量,占当年全国温室气体排放总量的6.7%,已成为我国温室气体的第三大排放源。我国作为传统的农业大国,耕地碳减排压力日益增大。2020年9月,习近平总书记在第75届联合国大会一般性辩论上提出我国二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。2021年3月,习近平总书记在中央财经委员会第九次会议上强调实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的

收稿日期:2021-12-20

基金项目:江苏国土资源智库中国矿业大学研究基地项目(编号:2019CXNL08)。

作者简介:徐 玥(1998—),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事农业碳源碳汇研究。E-mail:2196673429@qq.com。

通信作者:王 辉,博士,副教授,主要从事土地利用与生态安全治理研究。E-mail:wanghuei@cumt.edu.cn。

[23]王 鑫,吴 际,刘 超,等. 基于LSTM循环神经网络的故障时间序列预测[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(4):772-784.

[24]张宇帆,艾 芊,林 琳,等. 基于深度长短时记忆网络的区域级超短期负荷预测方法[J]. 电网技术,2019,43(6):1884-1892.

[25]Wang Y S, Liao W L, Chang Y Q. Gated recurrent unit network - based short - term photovoltaic forecasting[J]. Energies, 2018, 11(8):2163.

[26]Wang B W, Kong W W, Guan H, et al. Air quality forecasting based on gated recurrent long short term memory model in Internet of Things[J]. IEEE Access, 2019, 7:69524-69534.

[27]Wang Z P, Zhao B, Ji W J, et al. Short - term load forecasting method based on GRU - NN Model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5):53-58.

[28]贾 睿,杨国华,郑豪丰,等. 基于自适应权重的CNN-LSTM & GRU组合风电功率预测方法[J]. 中国电力,2021,10(11):1-10.

经济社会系统性变革,要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局。2021 年 9 月,中共中央、国务院发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,对“双碳”工作提出了具体的意见和目标。2021 年 10 月,国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》,明确要求到 2030 年,非化石能源消费比重达到 25% 左右,单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65% 以上。在全国努力实现“双碳”目标的大背景下,耕地资源的低碳化利用已然成为实现该目标的关键一环且势在必行,成为当前农业方面的研究热点。对耕地碳排放量的测算及其时空变化与影响因素研究不仅可以更深入地理解农业碳产生机理,还能够为探寻适宜的耕地碳减排策略与措施提供借鉴,同时对农业的可持续发展以致促进乡村振兴及国家碳减排战略具有十分重要的意义。

前人对我国农地利用碳排放的研究主要集中在以下几个方面:第一,农地碳排放测算及影响因素研究。李国志等对中国农业 1981—2007 年能源消费排放的二氧化碳进行测算,并用对数平均迪氏指数分解法(LMDI)模型将农业碳排放的影响因素分解成能源结构、能源强度和经济水平<sup>[2]</sup>。田云等基于农地利用的 6 类主要碳源指标,测算我国 1993—2008 年农地利用碳排放量,通过对 Kaya 恒等式的适当变形将农地碳排放的影响因素分解成效率因素、结构因素和规模因素<sup>[3]</sup>。尚杰等基于 1993—2011 年中国农业生产的相关统计数据,测算中国农业生产过程中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  排放量,并得出农业碳排放量与大气温度、土壤温度、地表温度、土壤水分、化肥、农药等相关<sup>[4]</sup>。邱怡慧等利用 IPCC 法、标准差法和变异系数法对 2004—2016 年我国农地利用碳排放总量和碳排放强度的时序与空间演化进程进行测量,并用 LMDI 模型将农地碳排放影响因素分解成农业效率因素、农业结构因素、农业劳动力因素和农业经济因素<sup>[5]</sup>。周思宇等采用生命周期法构建东北地区 1979—2015 年耕地碳排放核算框架体系,并用 LMDI 模型构建影响农业碳排放的驱动因素体系<sup>[6]</sup>。第二,农地利用方式变化及空间差异研究。李波等通过差值法计算我国农地利用方式转变所带来的碳功能变化,发现 2001 年以来由生态退耕引起的碳汇效应和由建设占用引起的碳排放效应分别为下降和上升<sup>[7]</sup>。李林潼等通过差值法计算贵州省 2001—2012 年因生

态退耕和建设占用的碳排放变化,在碳源碳汇效应变化上得出与李波相同的结论<sup>[8]</sup>。李波等运用 LMDI 模型和聚类分析法,分析湖北省农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异,又基于核密度估计法研究其时空动态演进趋势<sup>[9]</sup>。魏燕茹等从不同土地利用方式视角研究福建省碳排放量,用基尼系数衡量各市碳收支的空间差异,运用社会网络分析法对土地利用碳排放空间网络结构的整体特征进行考察<sup>[10]</sup>。第三,农地碳排放特征趋势及脱钩效应研究。杨果等根据化肥、农药、农用薄膜、农用柴油、农业灌溉面积等测算河南省农地利用碳排放情况,发现我国农地利用碳排放问题呈现排放量总体递增且结构变化小的特征<sup>[11]</sup>。张红丽等基于农地利用、稻田、畜牧养殖 3 个方面的碳源测算新疆维吾尔自治区的农业碳排放量,又运用 Tapio 脱钩理论分析新疆农业碳排放与农业经济增长之间的动态演变关系<sup>[12]</sup>。丁宝根等采用 IPCC 碳排放系数法得出我国耕地资源碳排放总体呈增长趋势,但 2010 年后增速下降并于 2016 年开始转入负增长,又用 Tapio 脱钩分析法得出我国 2000—2012 年耕地碳排放量与农业经济增长之间以弱脱钩为主<sup>[1]</sup>。曹俐等运用 Tapio 脱钩模型计算得出山东省农业碳排放与经济发展之间呈现出扩张负脱钩、弱脱钩、强脱钩 3 种类型的弹性特征,且 2008 年之后以强脱钩为主<sup>[13]</sup>。上述研究成果都不约而同地表现出土地利用结构及其变化与碳排放量之间有着密切的关联,农地利用方式及农业生产资料的投入对区域乃至整个国家的碳排放格局具有重大影响。但现有研究大多集中于农地这个整体概念,且研究省级层面或中观地区层面较多,对具体的耕地碳排放量测算及其时空特征和影响因素的研究却少有涉及。本研究在科学建立耕地资源碳排放量测算体系的基础上,基于耕地利用的 6 个主要方面碳源,对我国 2000—2019 年耕地碳排放总量与碳排放强度进行测算,并对 2019 年我国 31 个省份(不含香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省)的碳排放时空特征进行系统分析,再通过 LMDI 模型将耕地碳排放的影响因素进行分解,从而得出本研究结论并提出思考,以期为我国耕地低碳化利用和农业高质量发展提供数据与决策参考。

## 1 数据来源与计算方法

### 1.1 数据来源

化肥、农药、农用薄膜、农用柴油、翻耕、农业灌

溉数据均来自于 2000—2020 年《中国农村统计年鉴》。其中,化肥、农药、农用薄膜、农用柴油以当年我国实际使用数量为准,翻耕以当年我国农作物实际播种面积为准,农业灌溉以当年我国实际灌溉面积为准。各年份谷物产值、农业产值、耕地面积数据均来自 2000—2020 年《中国农村统计年鉴》。我国耕地面积数据主要来自《第三次全国国土调查主要数据公报》《2017 中国土地矿产海洋资源统计公报》以及 2000—2016 年《中国国土资源公报》。

1.2 耕地碳排放计算方法

耕地作为人类生产生活的物质资料载体,一方面在对其进行耕作利用过程中会因人的各种活动而产生直接或间接的碳排放,另一方面耕地资源本身及其长成物也具有一定的碳汇作用。但农作物生长的果实和秸秆后期会因人的生活消费需要和废料焚烧等将前期所汇聚的碳又释放出来,且本研究主要探讨耕地碳排放的时空特征和影响因素,故认为耕地主要表现为碳源。根据 IPCC 碳排放系数法和前人研究成果,本研究对耕地碳排放的测算主要以下列 6 种要素为主要测算依据:一是在生产和施用化肥过程中所产生的碳排放;二是在生产和施用农药过程中所产生的碳排放;三是在生产和使用农用薄膜过程中所产生的碳排放;四是使用农业机械耕作时耗费的农用柴油所产生的碳排放;五是对耕地进行翻耕所导致的土壤有机碳库变化时所释放出的碳排放;六是在生长发育过程中对耕地进行灌溉耗费的电能所产生的碳排放。耕地碳排放测算公式为

$$E = \sum T_i \times \delta_i \tag{1}$$

式中: $E$  表示耕地碳排放总量; $T_i$  表示各碳源排放的量; $\delta_i$  表示各碳源的碳排放系数。

本研究为测算方便及数据所限,综合参考和总结前人相关研究成果,最终归纳出耕地各碳排放源碳效应系数(表 1)。

1.3 耕地碳排放影响因素分解方法

Kaya 恒等式作为日本教授 Yoichi Kaya 在 1989 年联合国政府间气候变化专门委员会上最先提出的一种分解工具,巧妙地运用数学中的销项方法将人类社会产生的碳排放与能源、经济、人口等因素建立起联系<sup>[9]</sup>。具体公式如下:

$$C = \frac{C}{E} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times P;$$
$$CI = \frac{C}{E}, EI = \frac{E}{GDP}, G = \frac{GDP}{P} \tag{2}$$

表 1 耕地碳排放系数及来源

碳源	碳排放系数	参考来源
化肥	0.895 6 kg/kg	West 等 <sup>[14]</sup> 、美国橡树岭国家实验室
农药	4.934 1 kg/kg	美国橡树岭国家实验室 <sup>[15]</sup>
农用薄膜	5.18 kg/kg	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)
农用柴油	0.592 7 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)
翻耕	312.6 kg/km <sup>2</sup>	伍芬琳等 <sup>[16]</sup>
农业灌溉	17.739 kg/hm <sup>2</sup>	Dubey 等 <sup>[17]</sup>

注:农业灌溉的碳排放来自于火力发电过程由于消耗化石燃料而形成碳排放,水电和核电则无碳排放,故测算农业灌溉所消耗的能源需在原系数 25 kg 的基础上乘以火电比重(火电占发电总量的比重)。根据《中国统计年鉴》,2000—2019 年平均火电比重为 0.709 6,故测算农业灌溉碳排放系数采用 17.739 kg/hm<sup>2</sup>。

式中: $C$ 、 $E$ 、 $GDP$ 、 $P$  分别表示碳排放量、能源消耗总量、国内生产总值、人口总量; $CI$ 、 $EI$ 、 $G$  分别表示能源结构因素、能源效率因素、经济发展因素。

由于本研究主要探讨耕地碳排放的影响因素,综合参考前人的相关研究成果,同时结合各碳源具体的碳排放量以及农业生产的实际情况,对该恒等式进行如下变形

$$C = \frac{C}{CGDP} \times \frac{CGDP}{AGDP} \times \frac{AGDP}{AP} \times \frac{AP}{AF} \times AF;$$
$$\alpha = \frac{C}{CGDP}, \beta = \frac{CGDP}{AGDP}, \gamma = \frac{AGDP}{AP}, \mu = \frac{AP}{AF}, \rho = AF \tag{3}$$

式中: $C$ 、 $CGDP$ 、 $AGDP$ 、 $AP$ 、 $AF$  分别表示耕地碳排放量、谷物产值、农业产值、农业从业人口、农用化肥施用量; $\alpha$  表示单位谷物生产总值的碳排放量,即农业生产效率; $\beta$  表示谷物生产总值占农业生产总值的比重,即农业生产结构; $\gamma$  表示单位农业从业人口的农业生产总值,即农业经济水平; $\mu$  表示单位化肥的农业人口使用量; $\rho$  表示化肥施用量。

对数平均迪氏指数分解法(LMDI)作为一种分解结果中不包含残差,且加法分解与乘法分解得到的结果能够相互转换,同时各影响因素效应总和与总效应结果相同的分解工具,在工业能源及农业碳排放等方面得到广泛应用。本研究采用 LMDI 模型对上述耕地碳排放影响因素进行分解,具体公式如下:

$$C = \alpha \times \beta \times \gamma \times \mu \times \rho \tag{4}$$

目标年份  $t$  年相对于  $(t-1)$  年的耕地碳排放量的变动可表示为

$$\Delta C = C_t - C_{t-1} = \Delta\alpha + \Delta\beta + \Delta\gamma + \Delta\mu + \Delta\rho。 (5)$$

5 种效应的影响值分别为  $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta\mu, \Delta\rho$ , 计算公式如下:

$$\Delta\alpha = \sum \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \alpha_t - \ln \alpha_{t-1});$$

$$\Delta\beta = \sum \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \beta_t - \ln \beta_{t-1});$$

$$\Delta\gamma = \sum \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \gamma_t - \ln \gamma_{t-1});$$

$$\Delta\mu = \sum \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \mu_t - \ln \mu_{t-1});$$

$$\Delta\rho = \sum \frac{C_t - C_{t-1}}{\ln C_t - \ln C_{t-1}} \times (\ln \rho_t - \ln \rho_{t-1})。 (6)$$

## 2 我国耕地碳排放时空特征分析

### 2.1 耕地碳排放时间特征分析

2.1.1 耕地碳排放总量特征 经公式(1)测算, 2000—2019 年我国耕地碳排放量情况见表 2、图 1。2000 年我国耕地碳排放总量为 6 013.69 万 t, 2019 年为 8 093.62 万 t, 年均增长率为 1.58%, 环比增速总体处于下降趋势, 2016 年首次出现负增长, 且之后呈加速下降态势。可见我国近 20 年耕地碳排放总量先升后降, 这与近年来重视对农业实行绿色生产、逐渐减少化肥农药等农资的投入力度有关, 对耕地资源的利用逐步良性化和低碳化。其中化肥、农药、农膜、农用柴油、翻耕、农业灌溉所产生的碳排放都有不同程度的增长, 年均递增率分别为 1.40%、0.44%、3.15%、1.70%、0.32%、1.29%。化肥作为耕地最主要且增长量最多的碳源, 每年对耕地碳排放量的贡献率均在 59% 以上, 从 2000 年的 3 713.52 万 t 增长到 2019 年的 4 839.46 万 t, 共计增加了 1 125.94 万 t; 农膜作为增长最快的碳源, 从 2000 年的 691.53 万 t 增长到 2019 年的 1 247.34 万 t, 年均递增率为 3.15%; 农用柴油和农业灌溉的年均增长率均在 1.29% 以上, 其中农用柴油从 2000 年的 832.74 万 t 增长到 2019 年的 1 146.28 万 t, 共计增加了 313.54 万 t; 农药和翻耕作为增长较缓慢的碳源, 年均增长率均在 0.45% 以下, 其中翻耕从 2000 年的 48.86 万 t 增长到 2019 年的 51.87 万 t, 共计仅增加了 3.01 万 t。由此可见, 化肥依然是耕地碳排放的最主要碳源, 虽然近几年的施用量有所下降, 但对耕地碳排放的贡献率依旧居高不下; 农药的碳排放量总体呈波动递减趋势, 预

计未来会继续减少; 农膜和农用柴油的增长势头虽然在近几年有所放缓, 但贡献率却在不断上升, 其中农膜的占比上升更快; 翻耕和农业灌溉的碳排放量总体占比较少, 且翻耕占总碳排放量的比重不足 1%。

2.1.2 耕地碳排放强度特征 为更好地了解耕地碳排放强度与农业经济发展水平和耕地面积之间的关系, 同时反映环境压力的变化情况, 本研究以单位 GDP 碳排放强度和地均碳排放强度 2 个指标来综合分析我国耕地近 20 年的碳排放情况。由图 2 可知, 近 20 年我国耕地单位 GDP 碳排放强度总体呈波动下降趋势, 2000 年我国耕地单位 GDP 碳排放强度为 0.476 t/万元, 2019 年降至 0.352 t/万元, 年均递增率为 -1.58%。由此可知, 我国谷物产值的增长速度要高于耕地碳排放量的增长速度, 我国在耕地利用方面的减排理念与措施已经取得了一定成效, 粮食作物的产量和经济价值在不断提高, 农业生产资料的利用效率也在随之提高。值得注意的是, 2003 年我国耕地单位 GDP 碳排放强度断崖式升高至 0.796 t/万元, 可能是因为当年我国农业经济发展受到非典疫情的影响, 再加之严重的自然灾害, 使得农业从业人员的正常耕作受到一定的限制, 粮食、油料等农产品减产, 最终导致谷物产值大幅度减少。地均碳排放强度总体表现为“M”形波动态势, 2000 年我国耕地地均碳排放强度为 0.462 t/hm<sup>2</sup>, 2009 年达到第一阶段顶点, 为 0.662 t/hm<sup>2</sup>, 2010 年则降至阶段性谷值, 为 0.617 t/hm<sup>2</sup>, 而后又逐渐上升至第二阶段顶点(2015 年的 0.674 t/hm<sup>2</sup>), 之后则呈逐步递减之势, 年均递增率为 1.67%。同样值得注意的是, 2010 年地均碳排放强度突然降低至 0.617 t/hm<sup>2</sup>, 可能是因为通过 2008 年以来对黑龙江省三江平原东部和湖北省仙洪等地农村土地整治工程, 使得当年我国新增耕地面积 37.37 万 hm<sup>2</sup>, 创历年新高。由此可见, 随着低碳农业理念和减排举措的推广以及“双碳”背景下的行动, 耕地碳排放量的逐渐减少使得地均碳排放近几年亦呈波动下降趋势, 也从侧面说明耕地低碳化利用的成效有了初步显现。

### 2.2 耕地碳排放空间特征分析

2.2.1 我国各省份耕地碳排放总量特征 再通过公式(1)具体测算 2019 年我国 31 个省份(不含香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省)耕地碳排放总量(表 3), 同时借助 ArcMap 10.5 软件, 采用自然间断点分级法, 将各省(市、区)碳排放总量分为 5

表 2 2000—2019 年我国耕地碳排放情况

年份	碳排放量(万 t)							环比增速 (%)
	化肥	农药	农用薄膜	农用柴油	翻耕	农业灌溉	总量	
2000	3 713.52	631.56	691.53	832.74	48.86	95.47	6 013.69	—
2001	3 809.70	629.10	750.58	880.34	48.67	96.23	6 214.63	3.34
2002	3 886.37	646.86	793.06	893.50	48.34	96.42	6 364.54	2.41
2003	3 951.03	653.77	824.66	933.27	47.64	95.82	6 506.18	2.23
2004	4 152.54	683.87	870.24	1 078.42	48.00	96.64	6 929.70	6.51
2005	4 268.61	720.38	912.72	1 127.73	48.61	97.62	7 175.66	3.55
2006	4 413.25	758.37	955.71	1 139.64	47.56	98.90	7 413.43	3.31
2007	4 574.55	800.80	1 003.37	1 197.73	47.83	100.26	7 724.53	4.20
2008	4 692.05	824.98	1 039.63	1 118.96	48.63	103.72	7 827.97	1.34
2009	4 840.18	843.24	1 077.44	1 161.63	49.15	105.12	8 076.77	3.18
2010	4 981.06	867.41	1 125.61	1 199.09	49.57	107.05	8 329.80	3.13
2011	5 108.68	881.72	1 188.81	1 219.42	50.13	109.42	8 558.18	2.74
2012	5 229.23	891.10	1 234.39	1 249.17	50.66	110.85	8 765.41	2.42
2013	5 294.70	889.12	1 291.37	1 277.21	51.17	112.60	8 916.17	1.72
2014	5 369.93	891.59	1 336.44	1 289.89	51.64	114.49	9 053.98	1.55
2015	5 393.84	879.75	1 348.87	1 302.58	52.15	116.85	9 094.04	0.44
2016	5 359.63	858.53	1 348.35	1 254.81	52.19	119.10	8 992.61	-1.12
2017	5 247.68	816.59	1 309.50	1 241.77	52.00	120.30	8 787.84	-2.28
2018	5 063.19	742.09	1 277.91	1 187.42	51.86	121.11	8 443.56	-3.92
2019	4 839.46	686.83	1 247.34	1 146.28	51.87	121.83	8 093.62	-4.14
年均递增率	1.40%	0.44%	3.15%	1.70%	0.32%	1.29%	1.58%	—

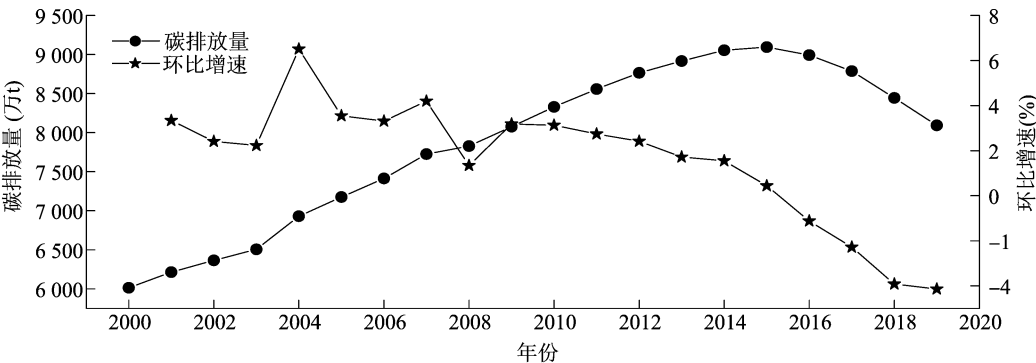


图1 2000—2019 年我国耕地碳排放总量与环比增速变化情况

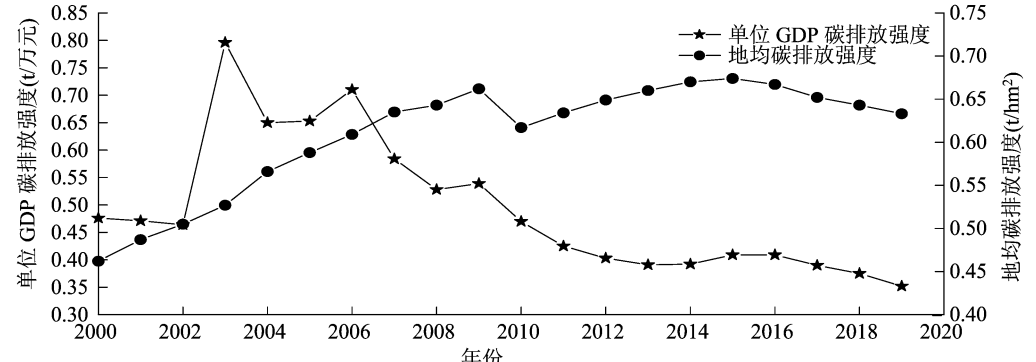


图2 2000—2019 年我国耕地单位 GDP 碳排放强度与地均碳排放强度变化情况

个等级,其中1级最低,5级最高(图3)。耕地碳排放量8万~77万t为1级,>77万~198万t为2级,>198万~335万t为3级,>335万~477万t为4级,>477万~801万t为5级。其中河南省、

表 3 2019 年我国 31 个省份耕地碳排放情况

省份	碳排放量(万 t)						总量
	化肥	农药	农用薄膜	农用柴油	翻耕	农业灌溉	
北京	5.55	1.11	3.99	1.07	0.03	0.19	11.94
天津	14.51	1.07	4.19	1.24	0.13	0.54	21.69
河北	266.26	28.29	53.46	118.60	2.54	7.95	477.11
山西	97.08	12.49	25.15	15.65	1.10	2.70	154.17
内蒙古	195.60	13.46	48.79	45.87	2.78	5.68	312.18
辽宁	125.29	25.20	58.80	35.50	1.32	2.89	249.00
吉林	203.39	24.01	27.52	38.94	1.91	3.39	299.16
黑龙江	199.99	31.71	37.21	81.44	4.62	10.96	365.92
上海	6.72	1.37	6.84	7.71	0.08	0.34	23.05
江苏	256.32	33.25	59.13	64.55	2.33	7.46	423.04
浙江	64.93	19.03	34.57	112.91	0.63	2.49	234.56
安徽	266.89	43.55	53.73	44.27	2.75	8.13	419.32
福建	95.20	22.44	30.31	48.13	0.50	1.91	198.49
江西	103.53	30.94	26.95	17.84	1.73	3.61	184.59
山东	354.03	59.38	138.36	81.56	3.42	9.35	646.10
河南	597.10	52.91	78.09	59.33	4.60	9.45	801.48
湖北	245.30	47.87	30.46	37.64	2.44	5.27	368.98
湖南	205.09	52.08	43.40	26.55	2.54	5.63	335.30
广东	202.23	43.17	22.71	50.68	1.36	3.15	323.29
广西	225.69	33.62	24.64	31.65	1.87	3.04	320.52
海南	41.47	10.54	15.82	9.31	0.21	0.52	77.86
重庆	81.59	8.16	22.05	12.57	1.05	1.24	126.65
四川	199.54	22.84	63.84	27.86	3.03	5.24	322.34
贵州	74.51	4.54	22.85	6.70	1.71	2.05	112.37
云南	182.70	23.41	63.27	15.53	2.17	3.41	290.49
西藏	4.30	0.40	0.77	1.96	0.08	0.49	8.00
陕西	181.36	6.04	23.20	55.60	1.29	2.28	269.76
甘肃	72.45	20.69	78.87	23.17	1.20	2.36	198.74
青海	5.55	0.69	4.03	3.91	0.17	0.38	14.74
宁夏	34.39	1.11	8.08	12.74	0.36	0.95	57.64
新疆	230.89	11.32	136.07	55.83	1.93	8.80	444.83

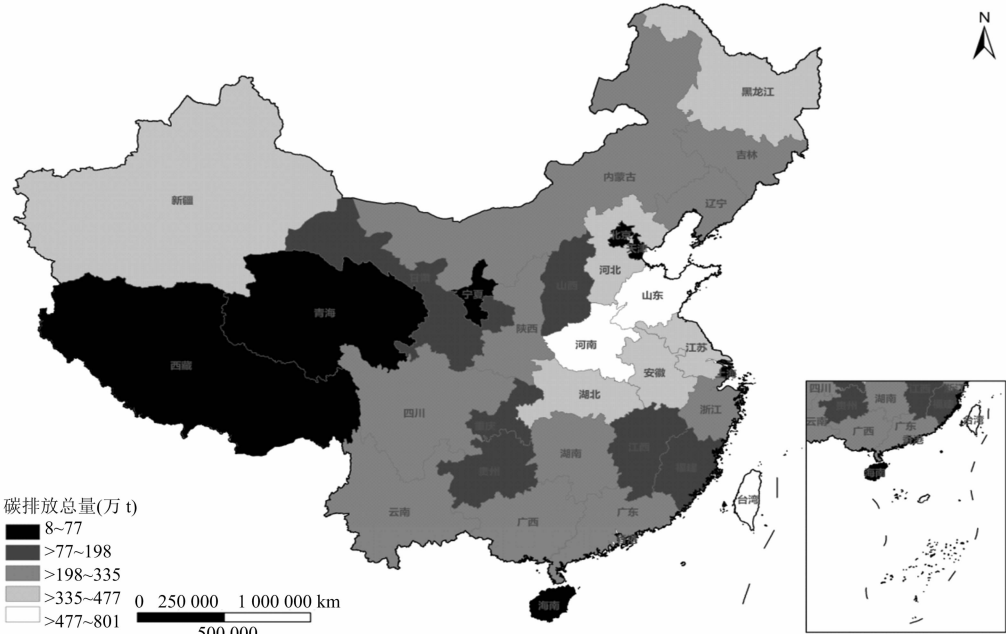
山东省、河北省耕地碳排放总量归属于 5 级区间,这些省份均属于耕地较多的传统农业大省。新疆、江苏、安徽、湖北、黑龙江、湖南等省(区)耕地碳排放总量归属于 4 级区间,这些省份主要位于华中地区、华东地区和少数东北、西北地区,也都是传统的粮食大省。广东、四川、广西、内蒙古、吉林等省(区)耕地碳排放总量归属于 3 级区间,主要位于东部沿海地区、东北地区 and 西南地区。江西、山西、重庆、贵州、海南省(市)耕地碳排放总量归属于 2 级区间,主要位于西南地区和中部地区,因地理位置等原因耕地资源较匮乏。宁夏、上海、天津、青海、北京、西藏省(市、区)耕地碳排放总量归属于 1 级区

间,主要是经济高度发达的沿海省份和西北偏远省份,产业和位置等因素使得第一产业空间进一步被压缩。通过进一步归纳可知,从 1 级到 5 级各区间内省份的数量分别为 6、5、11、6、3 个,不同等级的区间内各省份耕地碳排放总量占全年总碳排放量的比重分别为 1.69%、8.10%、37.30%、29.13%、23.78%。可见我国各省(市、区)耕地碳排放总量无论在数量上还是比重上大多都位于 3 级区间内,其中耕地碳排放总量最高的河南省(801.48 万 t)是西藏自治区(8.00 万 t)的约 100 倍。

2.2.2 我国各省份耕地碳排放强度特征 通过 2019 年我国 31 个省份(不含香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省)耕地单位 GDP 碳排放强度和地区生产总值构建耕地单位 GDP 碳排放强度和经济发展水平四象限图(图 4),本研究根据各省份地区生产总值的平均值(31 784.94 亿元)和耕地单位 GDP 碳排放强度的平均值(0.45 t/万元)构建象限坐标轴。第一象限表示经济发展水平高、耕地碳排放强度高;第二象限表示经济发展水平低、耕地碳排放强度高;第三象限表示经济发展水平低、耕地碳排放强度低;第四象限表示经济发展水平高、耕地碳排放强度低,其中第四象限为理想型发展区间。由图 4 可知,浙江省、福建省、北京市、上海市、河北省分布在第一象限内,经济发展水平高的同时耕地碳排放强度也高,大都属于东部沿海发达地区和环渤海经济圈。陕西省、宁夏回族自治区、海南省分布在第二象限内,经济发展水平较低的同时耕地碳排放强度却很高,主要位于西北偏远地区 and 我国南部。辽宁、吉林、黑龙江、云南、广西、贵州、青海、西藏等省(区)分布在第三象限内,经济发展水平较低的同时耕地碳排放量也较低,主要分布于我国东北地区、西部地区 and 西南地区。广东、江苏、山东、河南、安徽、湖北等省分布在第四象限内,经济发展水平较高的同时耕地碳排放强度却较低,主要分布在中部地区、华东地区和少数沿海省份。总体而言,分布于第一、第二、第三、第四象限内的省份分别为 5、3、15、8 个,绝大多数省份都位于经济发展水平低、耕地碳排放强度也较低的第三象限内,因此,在减排的同时也要加强对经济的提速,要在不断发展中逐步减少碳排放量。

### 3 我国耕地碳排放影响因素分析

综上,根据耕地碳排放影响因素分解方法中的



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载，审图号为 GS(2020)4619 号，底图无修改

图3 2019 年我国 31 个省份耕地碳排放分层设色

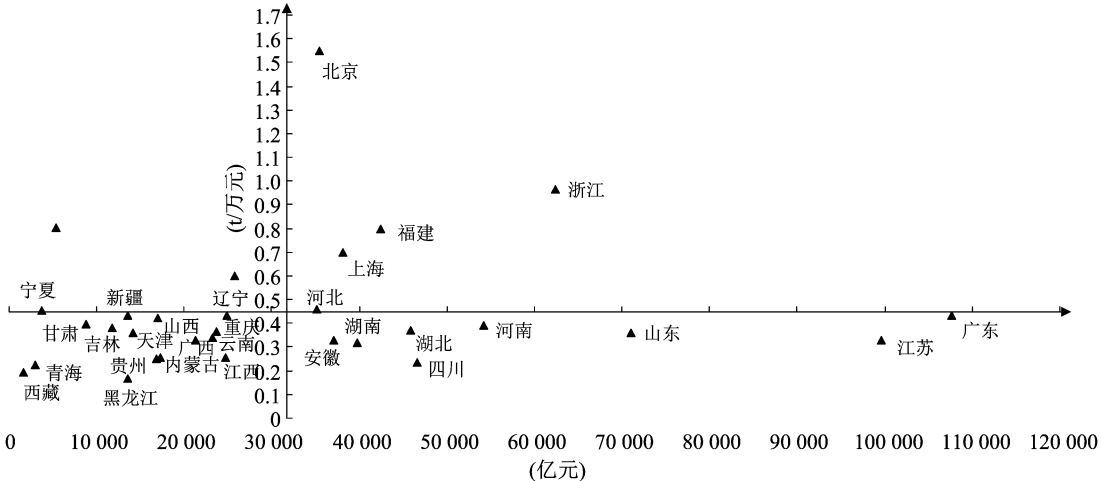


图4 2019 年我国 31 个省份单位 GDP 碳排放强度与经济发展水平四象限

计算公式和相关统计数据,借助 Excel 软件,按照农业生产效率、农业生产结构、农业经济水平、单位化肥人均使用量、化肥施用量等 5 个因素对我国耕地碳排放总量进行因素分解和影响程度计算,结果见表 4、图 5。近 20 年来,5 类影响因素共计促进耕地碳排放 2 079.93 万 t,其中农业生产效率、农业生产结构、单位化肥人均使用量因素对耕地碳排放的增长具有抑制作用,对耕地碳减排的作用效果大小排序为农业生产结构因素 > 单位化肥人均使用量因素 > 农业生产效率因素。农业生产结构因素对耕地碳排放的抑制作用最显著,与基期 2000 年相比,2001—2019 年共计减少碳排放 7 122.82 万 t,减排

贡献率达到 118.44%。可见随着农业的结构性调整和农业科技的进步,粮食作物在整体农业生产中的结构下降有利于减少因人类活动和对农作物的施肥打药所导致的碳排放。单位化肥人均使用量因素对抑制耕地碳排放的效果也较明显,与基期 2000 年相比,2001—2019 年共计减少碳排放 4 939.30 万 t,减排贡献率为 82.13%。虽然化肥使用量总体呈波动递增趋势,但城镇化率的进一步提高和社会节奏的进一步加快使得农业人口进一步缩减,规模化、集约化的农业经营方式使得承包大户能够更加科学合理且更经济地对耕地进行切实的农业生产资料投入,从而有效地减少因小农户分

表 4 我国耕地 2000—2019 年碳排放影响因素分解结果

万 t

年份	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	$\Delta\mu$	$\Delta\rho$	合计
2001	-70.69	17.35	351.40	-253.46	156.34	200.94
2002	-85.64	34.95	305.99	-230.68	125.30	149.91
2003	3 468.97	-3 300.79	88.82	-221.54	106.19	141.64
2004	-1 366.79	456.04	1 435.17	-434.96	334.07	423.52
2005	40.57	-345.95	660.32	-303.39	194.41	245.96
2006	607.63	-1 049.56	816.40	-379.75	243.05	237.77
2007	-1 478.29	762.11	1 201.39	-445.78	271.66	311.10
2008	-783.53	-113.30	1 120.50	-317.46	197.22	103.44
2009	157.07	-647.72	906.21	-413.92	247.16	248.80
2010	-1 116.54	-127.86	1 717.50	-455.41	235.34	253.03
2011	-856.76	3.73	1 266.73	-398.93	213.61	228.38
2012	-454.30	-304.06	1 156.86	-393.28	202.01	207.23
2013	-257.23	-411.10	994.40	-285.31	109.99	150.76
2014	21.06	-437.07	711.45	-284.40	126.76	137.81
2015	369.27	-791.75	688.26	-266.04	40.32	40.06
2016	15.67	198.36	-107.33	-150.59	-57.54	-101.43
2017	-428.59	-151.45	575.28	-12.36	-187.65	-204.77
2018	-328.89	-504.63	679.57	117.98	-308.32	-344.28
2019	-538.33	-410.13	782.16	189.98	-373.62	-349.94
合计	-3 085.34	-7 122.82	15 351.09	-4 939.30	1 876.30	2 079.93

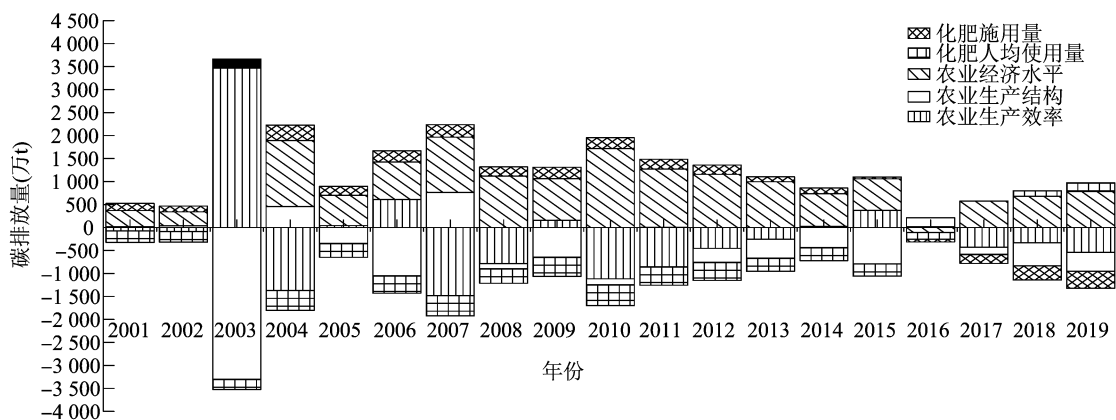


图5 基于 LMDI 模型的我国耕地碳排放影响因素分解结果

散经营而导致的粗放化耕地碳排放。农业生产效率因素的减排抑制效果位居第三,与基期 2000 年相比,2001—2019 年共计减少碳排放 3 085.34 万 t,减排贡献率达到 51.31%。农业科技的进一步提升以及谷物产量的提高使得可以在降低农业生产资料投入的同时谷物产值不断上升,农业经济的增长速度已经逐渐超越农业碳排放的增长速度,达到一定程度的脱钩效果。农业经济水平因素和化肥施用量因素对耕地碳排放具有明显的促进作用,其中尤以农业经济水平因素最显著。与基期 2000 年相比,

2001—2019 年共计产生碳排放 15 351.09 万 t,对碳排放的贡献率达到 255.27%。这有力地说明了农业经济水平正在不断提高,而我国作为一个传统的农业大国,农业经济水平的提高不可避免地会造成环境的破坏,农业增产在提高农民生活水平的同时也会加大对农业生产资料的需求,对耕地的投入力度可能进一步加剧,从而导致耕地碳排放量的不断提升。化肥施用量因素也是促进耕地碳排放的一个重要方面,与基期 2000 年相比,2001—2019 年共计产生碳排放 1 876.30 万 t,对碳排放的贡献率为



31.20%。虽然相较于前者的贡献率可能不是很高,但化肥在耕地的 6 类碳源中的贡献率却是最高,由于近 20 年内化肥的施用量总体表现为先增后减,因此后期对碳排放具有一定的抑制作用,但总体还是表现为促进作用。

#### 4 结论与讨论

本研究基于 IPCC 碳排放系数法间接测算我国 2000—2019 年耕地碳排放总量与碳排放强度,并对二者的时间和空间特征进行分析,随后运用 LMDI 模型对耕地碳排放的影响因素进行分解研究。结果表明,我国耕地碳排放量正随着低碳理念和减排措施的推广呈波动递减趋势,前期碳排放总量不断上升,但环比增速却逐渐减缓,到达 2015 年这个顶点后,后期碳排放总量呈逐步下降趋势,但环比增速却逐渐上升。单位 GDP 碳排放强度整体表现为随着时间的推移呈波动递减趋势,这直观地表明我国单位农业经济效益的碳排在逐渐降低,农业经济发展对环境的压力也在逐渐减小,也从侧面说明我国农业产值中的生产资料投入变得逐渐合理。其中,2003 年单位 GDP 碳排放强度突然断崖式的升高,究其原因可能是因为当年我国农业经济发展受到非典疫情和自然灾害的双重影响,使得农业从业人员的正常耕作受到限制,粮食、油料等大宗农产品减产,最终导致谷物产值大幅度减少。地均碳排放强度总体表现为波动上升态势,但近年来有下降势头,较直观地呈现出“M”形。以 2010、2015 年分别为阶段性谷值和峰值,后期强度逐渐下降,这也能直观地表明单位耕地面积上的碳排放量在逐渐降低,虽然还未达到先前的状态,但已有好转之势。其中,2010 年地均碳排放强度突然降低至谷值,究其原因可能是因为通过 2008 以来对黑龙江和湖北等省农村土地整治工程,使得当年我国新增耕地面积 37.37 万  $\text{hm}^2$ ,创历年新高。值得注意的是,本研究通过测算耕地碳排放的 6 类主要碳源,发现我国耕地碳排放总量自 2015 年就已达到峰值,且之后呈加速下降状态,这与刘雪琪等对于农地利用碳源的测算结果<sup>[18]</sup>相符合。相较于力争我国整体二氧化碳排放量在 2030 年前达到峰值,我国农业中耕地的碳排放量是否已经在 2015 年就已提前到达峰

值值得进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 丁宝根,杨树旺,赵玉,等. 中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J]. 中国土地科学,2019,33(12):45-54.
- [2] 李国志,李宗植. 中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析——基于 LMDI 模型[J]. 农业技术经济,2010(10):66-72.
- [3] 田云,李波,张俊飏. 我国农地利用碳排放的阶段特征及因素分解研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2011,11(1):59-63.
- [4] 尚杰,杨果,于法稳. 中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究[J]. 中国生态农业学报,2015,23(3):354-364.
- [5] 邱怡慧,王璞,苏时鹏. 中国农地利用碳排放时空演变特征及驱动因素研究——基于 IPCC 法与 LMDI 指数分解模型[J]. 资源开发与市场,2019,35(5):625-631.
- [6] 周思宇,郝凤明,尹岩,等. 东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素[J]. 应用生态学报,2021,32(11):3865-3871.
- [7] 李波,张俊飏. 基于我国农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异研究[J]. 经济地理,2012,32(7):135-140.
- [8] 李林潼,舒英格. 贵州省农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异[J]. 湖北农业科学,2015,54(15):3630-3637.
- [9] 李波,刘雪琪,梅倩,等. 湖北省农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(10):62-70.
- [10] 魏燕茹,陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. 生态学报,2021,41(14):5814-5824.
- [11] 杨果,尚杰. 农地利用碳排放的特征及趋势[J]. 经济纵横,2014(12):108-111.
- [12] 张红丽,刘芳. 新疆农业碳排放与农业经济增长的响应关系[J]. 江苏农业科学,2018,46(22):358-363.
- [13] 曹俐,王莹,雷岁江. 山东省农业碳排放的时空特征与脱钩弹性研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(17):250-256.
- [14] 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(1/2/3):217-232.
- [15] 智静,高吉喜. 中国城乡居民食品消费碳排放对比分析[J]. 地理科学进展,2009,28(3):429-434.
- [16] 伍芬琳,李琳,张海林,等. 保护性耕作对农田生态系统净碳排放量的影响[J]. 生态学杂志,2007,26(12):2035-2039.
- [17] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA [J]. Journal of Crop Improvement, 2009, 23(4):332-350.
- [18] 刘雪琪. 中国农地利用碳减排潜力及实现机制研究[D]. 武汉:中南民族大学,2019.