

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.002.

宁静, 李亚洁, 王震, 等. 中国粮食主产省区农业碳排放特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 450-459.

Ning Jing, Li Yajie, Wang Zhen, et al. Characteristics and Influencing Factors of Agricultural Carbon Emissions in Major Grain Producing Provinces in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 450-459.

# 中国粮食主产省区农业碳排放特征及影响因素

宁静<sup>1</sup>, 李亚洁<sup>1</sup>, 王震<sup>2</sup>, 陈凯<sup>2</sup>

(1.东北农业大学 公共管理与法学院, 哈尔滨 150030; 2.东北农业大学 公共管理与法学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** [目的] 分析粮食主产省区农业碳排放特征及影响因素, 为促进碳减排、农业可持续发展提供参考。 [方法] 基于农用投入物质、农作物种植、畜禽业养殖、秸秆焚烧 4 类农业碳排放源测算 2010—2020 年粮食主产区的农业碳排放并采用 TAPIO 脱钩模型和 LMDI 模型分析粮食主产区农业碳排放特征及影响因素。 [结果] 2010—2020 年粮食主产区碳排放呈现先增长后下降的趋势, 2010 年的 860.78 Mt 增长至 2020 年的 871.64 Mt, 增加了 10.86 Mt, 增幅 1.26%。2017 年达到峰值 927.68 Mt; 农用投入物质为主要碳排放源。碳排放强度呈下降趋势, 省域最高碳排放强度可达 3.99 t/万元。农业碳排放与经济增长的关系上, 低排高产区为理想状态, 目前, 除河北省为低排高产区域, 其余研究省域多数处于高排、低产区域。粮食主产区农业碳排放与农业经济的关系不断改善, 2020 年已有 7 省处于强脱钩状态。农业生产效率、地区产业结构、农村人口、农业产业结构是抑制碳排的主要因素。 [结论] 实现粮食主产区碳减排, 促进农业可持续发展应从提升农业生产效率、控制畜禽出栏量和存栏量等多方面协同推进。

**关键词:** 农业碳排放; 碳排放强度; TAPIO; LMDI

**中图分类号:** X322; F327

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)01-0450-10

## Characteristics and Influencing Factors of Agricultural Carbon Emissions in Major Grain Producing Provinces in China

Ning Jing<sup>1</sup>, Li Yajie<sup>1</sup>, Wang Zhen<sup>2</sup>, Chen Kai<sup>2</sup>

(1. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030,

China; 2. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University; Harbin 150030, China)

**Abstract:** [Objective] Analyzing the characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in major grain-producing provinces and regions can provide reference for promoting carbon emission reduction and sustainable agricultural development. [Methods] Based on four types of agricultural carbon emission sources, namely, agricultural input materials, crop cultivation, livestock and poultry breeding, and straw burning, the agricultural carbon emissions in the main grain producing areas from 2010 to 2020 were measured and the TAPIO decoupling model and LMDI model were used to analyze the characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in the main grain producing areas. [Results] From 2010 to 2020, the carbon emissions in the main grain producing areas increased first and then decreased. The carbon emissions in 2010 increased from 860.78 Mt to 871.64 Mt in 2020, with the increase of 10.86 Mt, or 1.26%. In 2017, it reached a peak of 927.68 Mt. Agricultural inputs were the main source of carbon emissions. The carbon emission intensity showed a downward trend, and the highest carbon emission intensity in the province could reach to 3.99 t/million. In terms of the relationship between agricultural carbon emissions and economic growth, low emission and high yield areas were ideal. Currently, most of the study provinces are in high discharge and low yield areas, except for Hebei Province which is a low discharge and high yield area. The

收稿日期: 2022-12-01

修回日期: 2022-12-23

资助项目: 国家自然科学基金“基于社会—经济系统分析框架的黑土区农田土地退化特征及适应性生态修复研究: 以宾县为例”(41971217)

第一作者: 宁静(1978—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 方向: 土地生态及 3S 技术。E-mail: jning@neau.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

relationship between agricultural carbon emissions and agricultural economy in the main grain producing areas had been continuously improved. By 2020, seven provinces could be in a strong decoupling state. Agricultural production efficiency, regional industrial structure, rural population and agricultural industrial structure are the main factors to curb carbon emissions. [Conclusion] Achieving carbon emission reduction in the main grain producing areas and promoting sustainable agricultural development should be promoted in a concerted manner by improving agricultural production efficiency and controlling the amount of slaughtered and stocked livestock and poultry.

**Keywords:** agricultural carbon emission; carbon emission intensity; TAPIO; LMDI

自 2006 年我国首次超越美国成为全球最大温室气体排放国后,我国就面临着保增长和降碳排并行的双重压力。2020 年我国政府在联合国一般性辩论会上提出分两个阶段实现“双碳”目标<sup>[1]</sup>,充分发挥了大国的责任担当积极应对气候变化,并于 2021 年向联合国提交了《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》和《中国 21 世纪中叶长期温室气体低排放发展战略》<sup>[2]</sup>,并在“十四五”规划中积极进行了战略部署,明确了产业结构和能源结构优化调整、节能减排、增加碳汇的发展战略。农业具有碳源和碳汇双重碳效应<sup>[3]</sup>,固碳减排的潜力十分巨大,在我国实现“双碳”目标中具有重要的战略地位<sup>[4]</sup>。据统计,农业碳排放已占我国碳排放总量的 17%,是我国碳排放的重要组成部分<sup>[1]</sup>。二十大中多次也提到生态保护,增加碳汇,并致力于协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。因此探究碳排放发展趋势及其影响因素迫在眉睫。

1977 年 Bolin 对农业生产活动碳源与其他生态系统碳汇的关系的探讨引起了国际关注,农业碳排放问题逐渐成为碳排放的焦点之一<sup>[5]</sup>。目前对农业碳排放的研究主要集中在以下几个方面:(1) 对农业碳排放因子的测算。农业碳排放主要来源被认为主要来自化学农业投入<sup>[6]</sup>,包括化肥、农药、农膜等化学产品生产和使用过程中的碳排放<sup>[7]</sup>;能源消耗,包括农业机械使用过程中消耗的化石燃料、灌溉等消耗的电量<sup>[8]</sup>;农业资源自身及其产出物,如水稻生长发育过程中产生的温室气体、动物养殖产生的碳排放等<sup>[9-10]</sup>;(2) 对农业碳排放的影响因素分析。何艳秋等<sup>[9]</sup>认为农业经济发展水平和机械化水平是影响碳排放的主导因素。周思宇等<sup>[11]</sup>认为土壤管理与农用品投入碳排放是东北地区耕地的主要碳排放源。张杰等<sup>[12]</sup>从农户尺度分析,认为年龄、务农年限、教育水平和农业技能培训均能影响米脂县的农业碳排。(3) 对农业碳排放的时空特征研究。吴义根等<sup>[13]</sup>利用 ESDA,分析农业碳排放的空间关联效应。农业碳排放总量及其强度空间分布存在明显的非均衡性,有

集聚的趋势,集聚的区域层次分明,有明显的地域特征。曹俐等<sup>[14]</sup>以山东 17 地级市为研究对象,发现 1997 年以来,山东省农业碳排放量和排放强度总体呈现出简单的倒“U”形变化,“上升—下降”两阶段演化特征突出。李远玲等<sup>[15]</sup>发现湖南省各县(市、区)农业碳排放在空间布局上存在显著同质性,空间均质性增强,空间异质性减弱。(4) 农业碳减排政策。田云等<sup>[16]</sup>提出注重顶层设计,厘清制约碳减排工作的关键性因素,加大政策扶持力度等方法来保证减排实施。吴昊玥等<sup>[17]</sup>提出立足实际、多措并举、联合控制区域显著因素等措施实现减排增汇。蒋添诚等<sup>[18]</sup>认为化肥农药零增长工程、畜禽粪便基本资源化利用行动等有利于碳减排。(5) 碳排放与经济增长脱钩。王太祥等<sup>[19]</sup>研究得出西北干旱区农地利用碳排放与农业经济增长以弱脱钩为主。陈红等<sup>[20]</sup>以黑龙江为研究区,探究发现 2016 年后,黑龙江碳排放与农业经济间存在强脱钩关系。蒋添诚等<sup>[18]</sup>发现湖北碳排放量与农业经济间存在强脱钩关系。

农业是国民经济的基础,粮食主产省区是我国主要产粮区域同时也是我国重要的畜禽业养殖基地。2003 年国家财政部印发《关于改革和完善农业综合开发若干政策措施的意见》对粮食主产区进行界定,包括黑龙江、吉林等 13 省。2020 年,粮食主产省粮食产量占全国 78.56%,对农业生产具有重要影响。本研究以粮食主产省区为研究区,从农用投入物质、农作物种植、畜禽业养殖、秸秆焚烧 4 个方面构建农业碳排放体系,测算 2010—2020 年的农业碳排放及强度,分析其时空变化规律,研究不同省域农业碳排放与农业经济的脱钩关系及碳排放影响因素,旨在为保障粮食安全,维护生态环境,实现农业低碳可持续发展提供理论依据。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

IPCC 在《2006 年温室气体排放清单指南》列举农业生产过程中温室气体的排放源主要包括 10 个方

面,但我国具体的案例研究往往根据 IPCC 推荐公式及我国特有的参数进行核算。由于农业碳排放源存在多样性、复杂性的特征,很难形成一套统一的测量标准<sup>[21]</sup>。综合考虑粮食主产省区特点及数据可得性,本文拟从农用投入物质(包括化学物质和化石能源)、农作物种植、畜禽养殖、秸秆燃烧 4 个方面产生的碳排放进行核算。

1.1.1 农用投入物质碳排核算 本文农用投入物质的碳排放来源选择借鉴丁宝根<sup>[7]</sup>、李波等<sup>[8]</sup>人的研究成果,即农业生产过程中化肥、农药、化石能源等使用过程中而产生的碳排放,具体公式如下:

$$E_{\text{农用投入物质}} = \sum [T_i \times \alpha_i \times (44/12)] \quad (1)$$

式中: $E_{\text{农用投入物质}}$ 为农用投入物质的碳排放量; $T_i$ 是*i*类碳源的使用量,包括化肥、农药、农膜、柴油使用量、农作物播种面积、有效灌溉面积; $\alpha_i$ 是*i*类碳源的排放系数,与碳源*i*一一对应,分别是 0.895 6 kg/kg, 4.934 kg/kg, 5.18 kg/kg, 0.592 7 kg/kg, 312.6 kg/km<sup>2</sup>, 266.48 kg/hm<sup>2</sup>。

1.1.2 农作物种植碳排核算 本研究对农作物种植活动产生的碳排放主要考虑农作物种植过程中产生的两部分占比较大的碳排放,一部分是种植过程中翻耕土壤有机碳矿化分解产生的 N<sub>2</sub>O,另一部分是水稻种植过程中因根系淹水发酵产生的 CH<sub>4</sub>。

$$E_{\text{农作物种植}} = E_{\text{农作物 N}_2\text{O}} + E_{\text{水稻种植}} \quad (2)$$

其中:

$$E_{\text{农作物 N}_2\text{O}} = \sum (S_i \times \tau_i) \quad (3)$$

式中: $E_{\text{农作物 N}_2\text{O}}$ 为农作物种植过程中产生的 N<sub>2</sub>O 排放量, $S_i$ 为*i*类农作物播种面积, $\tau_i$ 为*i*类农作物的 N<sub>2</sub>O 排放系数。其中,水稻为 0.24 kg/hm<sup>2</sup>,春小麦为 0.40 kg/hm<sup>2</sup>,冬小麦为 1.75 kg/hm<sup>2</sup>,大豆为 2.29 kg/hm<sup>2</sup>,玉米为 2.532 kg/hm<sup>2</sup>,油料为 0.95 kg/hm<sup>2</sup>,蔬菜为 4.944 kg/hm<sup>2</sup>。

水稻生长过程中会产生甲烷  $E_{\text{水稻种植}}$ ,借鉴何艳秋等<sup>[22]</sup>相关成果,考虑区域差异,具体排放系数见表 1。

$$E_{\text{水稻种植}} = \sum (C_i \times Z_i) \quad (4)$$

式中: $E_{\text{水稻种植}}$ 为水稻种植产生的 CH<sub>4</sub> 排放量; $C_i$ 为*i*省水稻种植面积; $Z_i$ 为*i*省水稻排放因子。

表 1 CH<sub>4</sub>排放因子

Table 1 CH<sub>4</sub> emission factors g/m<sup>2</sup>

区域	排放因子	区域	排放因子	区域	排放因子
河北	15.33	黑龙江	8.31	山东	21.02
内蒙古	8.93	江苏	32.40	河南	17.85
辽宁	9.24	安徽	31.91	湖北	38.23
吉林	5.57	江西	42.20	湖南	35.01
四川	16.91				

1.1.3 畜禽养殖碳排核算 由于我国大部分粮食主产省区与畜禽产品主产区高度重合<sup>[23]</sup>,即粮食主产省区是全国畜禽养殖碳排放的主要区域之一<sup>[24]</sup>,因此粮食主产区的畜禽养殖碳排也不可忽视,本研究中的畜禽养殖碳排主要考虑反刍动物胃肠发酵产生的 CH<sub>4</sub>和粪便处理过程中产生的碳排放。

$$E_{\text{畜禽业养殖}} = E_{\text{CH}_4} + E_{\text{NO}_2} \quad (5)$$

$$E_{\text{CH}_4} = \sum B_i \times (D_i + G_i) \quad (6)$$

$$E_{\text{NO}_2} = \sum (B_i \times G_i) \quad (7)$$

式中: $E_{\text{CH}_4}$ 和  $E_{\text{NO}_2}$ 分别为畜禽养殖产生的 CH<sub>4</sub>和 NO<sub>2</sub>排放量; $B_i$ 为*i*类动物的饲养量; $D_i$ 为肠胃发酵产生的 CH<sub>4</sub>; $G_i$ 为粪便管理产生的 CH<sub>4</sub>或 NO<sub>2</sub>。借鉴刘杨等<sup>[25-27]</sup>学者研究,具体排放系数见表 2。

表 2 肠胃发酵和粪便管理产生的 CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> 系数

Table 2 CH<sub>4</sub> and NO<sub>2</sub> coefficients generated by gastrointestinal fermentation and manure management system of livestock

畜禽名称	CH <sub>4</sub> 排放系数/ (kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )		NO <sub>2</sub> 排放系数/ (kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )
	肠胃发酵	粪便管理	粪便管理
非奶牛	51.40	1.50	1.37
奶牛	68.00	16.00	1.00
猪	1.00	3.50	0.53
羊	5.00	0.16	0.33
家禽	—	0.02	0.02

1.1.4 秸秆焚烧碳排核算 本研究对于秸秆焚烧的碳排放主要考虑我国主要粮食作物玉米、小麦、水稻秸秆焚烧带来的碳排放。具体排放系数借鉴程琳琳等<sup>[28]</sup>学者的相关研究。

$$E_{ij\text{秸秆焚烧}} = \sum (Q_{ik} \times M_k \times N_k \times P_k \times L_k) \quad (8)$$

式中: $E_{ij\text{秸秆焚烧}}$ 是*i*省*j*类气体排放量; $Q_{ik}$ 是*i*省*k*作物的产量; $M_K$ 是*k*的草谷比; $N_K$ 是*k*的露天焚烧比; $P_K$ 是*k*的燃烧效率; $L_K$ 是*k*的排放因子。

1.1.5 农业碳排放总量

$$E = E_{\text{农用投入物质}} + E_{\text{农作物种植}} + E_{\text{畜禽业养殖}} + E_{ij\text{秸秆焚烧}} \quad (9)$$

式中: $E$ 为农业碳排放总量; $E_{\text{农用投入物质}}$ 为农用投入物质温室气体排放量; $E_{\text{农作物种植}}$ 农作物种植产生的温室气体排放量; $E_{\text{畜禽业养殖}}$ 为畜禽养殖产生的温室气体排放量; $E_{ij\text{秸秆焚烧}}$ 为秸秆燃烧产生的温室气体排放量。此外,根据全球变暖潜能值,CO<sub>2</sub>的 GWP 为 1,CH<sub>4</sub>为 25,NO<sub>2</sub>为 310<sup>[29]</sup>。

1.1.6 碳排放强度 农业碳排放强度主要用来衡量地区农业经济同农业碳排放量之间的相关程度,即每单位国民生产总值所产生的二氧化碳排放量。碳排放强度越低代表该区域经济增加的碳排代价越小。

$A = E / GDP_n$  (10)

式中： $A$  为农业碳排放强度； $E$  为农业碳排放总量； $GDP_n$  为农牧业总产值<sup>[27]</sup>。

1.2 脱钩模型

OECD 首次提出脱钩概念，最初用来描述环境压力和驱动力的变化关系，但存在明显缺陷：一是对变量的基期和末期取值比较敏感，易产生结果偏差；二是过于笼统地划分脱钩类型，对环境压力与经济增长之间的具体关系类型无法详细区分<sup>[7]</sup>。TAPIO 在 OECD 脱钩模型的基础上克服了数据的敏感特

征，进一步提出了“脱钩弹性”的概念，充分考虑研究对象的总量及相对量的变化，可以较好地反映碳排放量与经济增长间的关系。因此本文选择 TAPIO 脱钩模型进行研究。根据脱钩弹性值大小，将其分为 8 类<sup>[30]</sup>（表 3）。

$$e = \frac{\Delta E / E}{\Delta GDP_n / GDP_n}$$
 (11)

式中： $e$  为脱钩弹性值； $\Delta E$  为农业碳排放变化量； $E$  为农业碳排放量； $\Delta GDP_n$  为农牧业产值变化量； $GDP_n$  为农牧业总产值。

表 3 脱钩类型划分  
Table 3 Classification of decoupling types

指标	状态	$\Delta E / E$	$\Delta GDP / GDP$	$e$	含义
负脱钩	扩张负脱钩	$>0$	$>0$	$e > 1.2$	农业经济增长，碳排放大幅增长
	强负脱钩	$>0$	$<0$	$e < 0$	农业经济衰退，碳排放增长
	弱负脱钩	$<0$	$<0$	$0 \leq e < 0.8$	农业经济衰退，碳排放缓慢衰退
脱钩	弱脱钩	$>0$	$>0$	$0 \leq e < 0.8$	农业经济增长，碳排放缓慢增长
	强脱钩	$<0$	$>0$	$e < 0$	农业经济增长，碳排放减少
	衰退脱钩	$<0$	$<0$	$e > 1.2$	农业经济衰退，碳排放大幅衰退
连接	扩张连接	$>0$	$>0$	$0.8 \leq e \leq 1.2$	农业经济增长，碳排放中速增长
	衰退连接	$<0$	$<0$	$0.8 \leq e \leq 1.2$	农业经济衰退，碳排放大幅减少

1.3 碳排放影响因素分析

LMDI 模型具有消除残差，因素可逆等优点<sup>[31]</sup>，在农业碳排放分解中应用广泛。本文采用 LMDI 模型从农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济发展水平、城镇化水平和农村人口 6 个方面进行分解<sup>[27]</sup>。

$$E = \frac{E}{GDP_n} \times \frac{GDP_n}{GDP_z} \times \frac{GDP_z}{GDP} \times \frac{GDP}{P_z} \times \frac{P_z}{P_n} \times P_n$$
 (12)

$$\alpha = \frac{E}{GDP_n}$$
 (13)

$$\beta = \frac{GDP_n}{GDP_z}$$
 (14)

$$\gamma = \frac{GDP_z}{GDP}$$
 (15)

$$\delta = \frac{GDP}{P_z}$$
 (16)

$$\epsilon = \frac{P_z}{P_n}$$
 (17)

式中： $E$  为农业碳排放总量； $GDP_n$  为农牧业 GDP； $GDP_z$  为农林牧渔总产业 GDP； $GDP$  为地区 GDP； $P_z$  为地区总人口； $P_n$  为农村人口。 $\alpha$  为农业生产效率； $\beta$  为农业产业结构； $\gamma$  为地区产业结构； $\delta$  为地区经济发展水平； $\epsilon$  为城镇化水平。

通过对数加和分解等处理，各分解因素贡献值的

表达式如下：

$$\Delta \alpha = \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} (\ln \Delta \alpha^T - \Delta \alpha^0)$$
 (18)

$$\Delta \beta = \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} (\ln \Delta \beta^T - \Delta \beta^0)$$
 (19)

$$\Delta \gamma = \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} (\ln \Delta \gamma^T - \Delta \gamma^0)$$
 (20)

$$\Delta \delta = \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} (\ln \Delta \delta^T - \Delta \delta^0)$$
 (21)

$$\Delta \epsilon = \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} (\ln \Delta \epsilon^T - \Delta \epsilon^0)$$
 (22)

$$\Delta p = \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} (\ln \Delta p^T - \Delta p^0)$$
 (23)

式中： $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \beta$ 、 $\Delta \gamma$ 、 $\Delta \delta$ 、 $\Delta \epsilon$ 、 $\Delta p$  表示第  $T$  年与基期相比，农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济发展水平、城镇化水平和农村人口对农业碳排放的贡献值。将逐年贡献值相加即为相应影响因素的累计贡献值。

1.4 数据来源

本文测算的原始数据主要来源于 2010—2020 年《中国农村统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国畜牧兽医年鉴》，从中获取测算原始数据包括化肥、农药、牛、羊、猪、农作物产量、家禽数量、农村人口、农业经济产值等。为进一步消除价格因素对指标相对可比性的扰动，以 2010 年为基期采用可比价对经济产值进行调整；



出栏率小于 1 牲畜,如牛、羊,饲养量等于本年与上年存栏量的均值;出栏率大于 1 的牲畜,如猪和家禽类,饲养量则采用当年出栏量 $\times$ (年均生长周期/365),猪、家禽的年均生长周期分别为 200 d,55 d<sup>[25]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业碳排放数量分析

2.1.1 粮食主产区碳排放量分析 从数量上来看,粮食主产省区总碳排从 2010 年的 860.78 Mt 增长至 2020 年的 871.64 Mt,增加了 10.86 Mt,增幅 1.26%。从年增长规律来看,以 2017 年为界点,呈现先增加后减少的趋势(图 1)。2010—2015 年碳排放量持续上升,这是由于 2010 年作为“十一五”和“十二五”的巩固和谋划交接之年,中央财政继续加大了农业补贴力度,建立完善农资综合补贴动态调整制度,提高粮食收购价格,激发农民生产积极性,整个“十二五”阶段农业农村经济呈现向好势头,农用投入物质增加,粮食产量同秸秆焚烧量也不断增加,导致这一阶段碳排放量呈增长趋势。2015 年 11 月 30 日,习近平在巴黎气候变化大会上发表《携手构建合作共赢、公平合理的气候变化治理机制》的讲话,并在“十三五”规划中进一步践行“生态文明”理念。2015 年制定发布《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》、推进秸秆综合利用等政策,由于农业政策具有效果滞后的特性,粮食主产省区碳排放量在 2017 年达到峰值 927.68 Mt,随后出现下降趋势。

从碳排放源的结构来看(图 1),粮食主产区近 11 年来碳排放源占比从高到低依次是农用投入物质(最大年排放量为 256.79 Mt)>畜禽养殖(最大年排放量为 249.93 Mt)>农作物种植(最大年排放量为 221.03 Mt)>秸秆焚烧(最大年排放量为 221.68 Mt)。农用投入物质是粮食主产区碳排放的主要排放源,年平均碳排放量约占总年平均排放量的 27.65%;秸秆焚烧所产生的碳排放占比最少约为 22.49%。由此可见,农业减排增效是控制农用投入物质碳排放的有效途径,如进行化肥减量提效、农药减量控害等政策宣传和推广,提高农业种植效率;秸秆焚烧控制,如鼓励引导农民采用秸秆粉碎还田、秸秆覆盖还田等方式促进秸秆综合利用,减少秸秆焚烧。

2.1.2 省际碳排放量对比分析 利用 ArcGIS 数据自然断点分级方法将粮食主产省区 13 个省份的碳排放量分成 5 个级别等级,吉林、辽宁位于第 1 等级,碳排放量最低;第 5 等级碳排放量最高。高排区主要位于华中地区,河南省和湖南省的碳排放量最多。河南省是我国传统农业大省,种植业的化肥使用占比较

高,同时也是我国养猪大省,生猪饲养过程中碳排放也较为突出;湖南省作物熟制为一年两熟(或三熟),农用投入物质及种植翻耕频次较多,导致累积碳排放量较高,此外,湖南省仅次于四川省是我国第二大生猪饲养大省,禽畜碳排占比仍然较大。低排区主要位于华北和东北南部,华北地区耕地资源利用的集约化水平相对较高,东北地区则主要是由于其熟制为一年一熟,农用物质投入频次较少。值得一提的是,黑龙江省的农业碳排放相较于周围省域较为突出,究其原因是该省种植业机械化水平较高,特别是三江平原地区,农业生产过程中化石能源的碳排放量较大;另外,黑龙江省养殖业发展迅速,2022 年已经跃居为我国第九养猪大省。

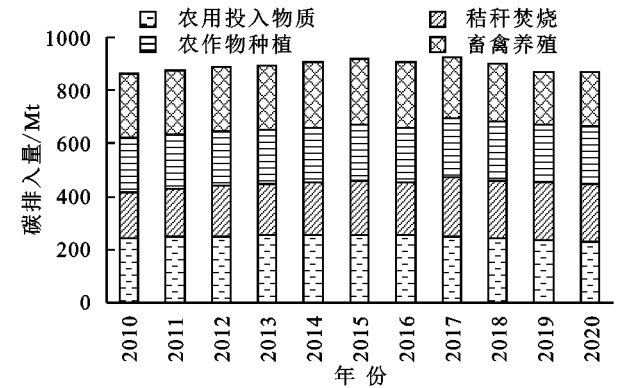


图 1 粮食主产区碳源结构

Fig. 1 Carbon source structure in major grain producing areas

从 2010 年和 2020 年碳排放源占比情况(图 2)可知,我国粮食主产省区碳排放源的构成相对稳定并具有明显的区域差异性。内蒙古、四川、辽宁、黑龙江 4 个省份畜禽养殖的碳排量占比较高,其中内蒙古占比最大高达 58.58%,主要是由于畜禽结构以反刍动物为主;河北、山东的碳排放结构则主要表现在农用投入物质的高比例碳排上,即农药、化肥、农膜等产生的碳排放,分别达到 44.94%和 40.99%;湖南、湖北、江西、江苏 4 个省份地处亚热带,一年两熟或三熟、水稻种植面积大、土壤翻耕频次高,因此农作物种植行为产生的碳排量在碳排结构中占比较大;吉林、安徽和河南在排放源结构上没有明显的高比例排放源。

从 2020 年相对 2010 年碳排放源结构比例变化(图 3)情况可以看出:畜禽养殖的碳排放源占比下降明显,其中河南和吉林最为显著,分别减少 11.32%和 10.33%,这是由于在 1 号文件的宏观指导下畜禽产业不断调整畜牧业结构,开展规模养殖,并积极改良畜禽品种、提升饲养技术和畜禽排泄物处理设施。自 2015 年我国提出农业绿色转型发展战略,进行低碳生产以来,粮食主产省区农用投入物质和碳排放占比也均有下降,河北、山东减排效果最为明显。秸秆焚

烧和农作物种植活动的碳排放源占比相对增加。

2.2 农业碳排放强度分析

粮食主产省区平均碳排放强度呈下降趋势,由 2010 年 2.17 t/万元下降到 2020 年 1.58 t/万元,降低 27.19%,说明我国在 2010—2020 年期间的农业技术效率提高、产业优化布局及相关农业政策对农业经济发展及减排增效作用显著。从碳排放的空间分异特征来看,碳排放强度存在地区性差异,华中、华东等地区碳排放强度由北向南递增,东北地区排放强度由南向北递增;以江西省为首,碳排放强度最高达 3.99 t/万元,以及一些南方省份如湖南、安徽其主要原因是这些省份的农业产值主要以水稻种植业为主,包括早

稻和晚稻均具有较高的碳排放量;黑龙江也具有和南方省份相同的高碳排放强度的特征,主要是由于该省水稻种植面积逐年增加,随着农业现代化水平的提高,大型农业机械对化石燃料的消耗也增大,另外禽畜养殖业也日益壮大;河北、沈阳和吉林等省份,位于北方,熟制为一年一熟且以旱作农业为主,碳排放强度较低;内蒙古主要以碳排较高的反刍牲畜养殖为主,所以碳排强度较大;高排放的地区并不一定高排放强度,例如山东省(83.08 Mt)碳排高于省域平均碳排放量(68.70 Mt),而碳排放强度(1.28 t/万元)低于省域平均排放强度(2.07 t/万元),该省份农业注重生产效率提升,农业经济由粗放向低碳绿色发展。

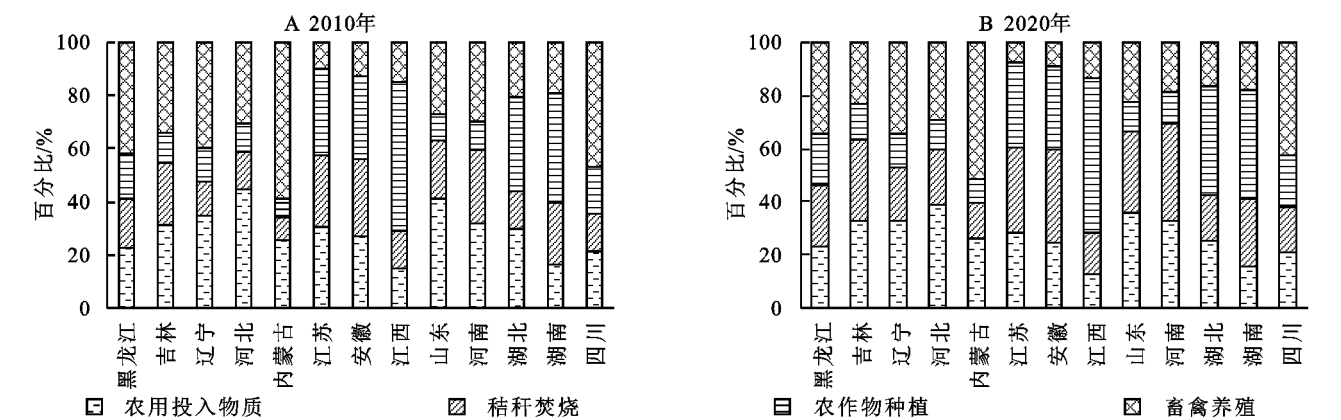


图 2 2010 年、2020 年省域碳源构成

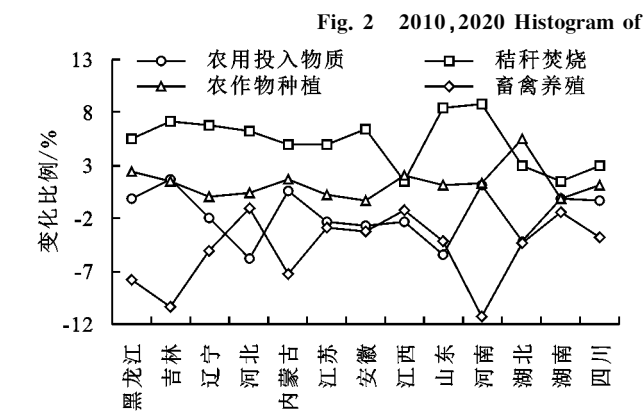


图 3 2010—2020 年碳排放源结构变化

Fig. 3 Line chart of carbon emission source structure change from 2010 to 2020

2.3 脱钩效应分析

将农业碳排放与农业经济产值两项指标作为坐标轴(图 4),以 2010—2020 年的各值的省份均值为分界点,将粮食主产区分为四类:高排高产、低排高产、低排低产、高排低产 4 类<sup>[32]</sup>。山东、湖南、四川、河南属于高排高产区,高投入高回报的传统农业模式依旧占主导地位。河北属于低排高产区,在农业碳排放与农业经济产值之间处于良性状态,农业碳排放量低但能实现农业产值高发展。辽宁、吉林、内蒙古、湖

北、江西属于低排低产区,农业碳排放量低但农业经济产值也低于各区平均水平。黑龙江、安徽、江苏属于高排低产区,农业碳排放量较高,但农业经济产值却相对较低,农业投入与收入不符,未来应促进相关农业技术发展,减排增产,促进农业经济发展。

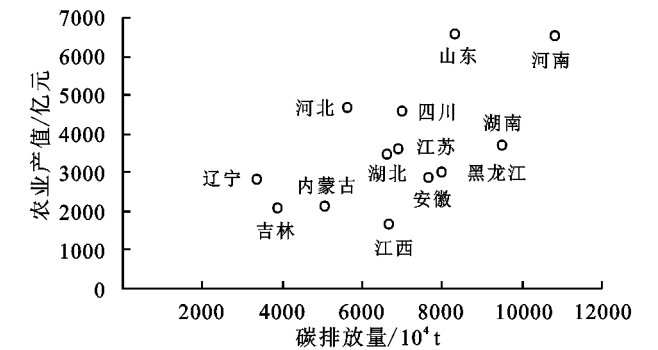


图 4 省域类别划分

Fig. 4 Provincial classification

测算粮食主产省区 2011 年、2014 年、2017 年及 2020 年的脱钩指数(表 4),总体来说,粮食主产区大部分省域处于弱脱钩状态,农业经济增速大于碳排放量的增速。各省域从弱脱钩或扩张连接趋势向强脱钩或弱脱钩转变。2011 年除黑龙江和吉林外,均属于弱脱钩状态,随后农业碳排放与农业经济的关系不

断改善,低碳农业可持续发展。

表 4 粮食主产省区脱钩状态

Table 4 Decoupling status of major grain producing provinces and regions

省份	2011 年	2014 年	2017 年	2020 年
粮食主产省区	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩
黑龙江	扩张连接	弱脱钩	扩张负脱钩	弱脱钩
吉林	扩张连接	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩
辽宁	弱脱钩	强脱钩	强脱钩	强脱钩
河北	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	强脱钩
内蒙古	弱脱钩	扩张负脱钩	弱脱钩	弱脱钩
江苏	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩
安徽	弱脱钩	弱脱钩	扩张负脱钩	强脱钩
江西	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
山东	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩
河南	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	弱脱钩
湖北	弱脱钩	弱脱钩	扩张连接	强脱钩
湖南	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
四川	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	弱脱钩

具体而言(表 4),江西、湖南一直处于弱脱钩状态,脱钩状态比较稳定。吉林由扩张连接向强脱钩转变,辽宁、河北、江苏、山东、湖北、安徽由弱脱钩向强脱钩转变,实施化肥农药零增长、畜禽粪便基本资源利用行动等促进农业碳减排,从而实现农业经济与农业碳排放强脱钩。黑龙江脱钩状态为扩张连接—弱脱钩—扩张负脱钩—弱脱钩;四川由弱脱钩向强脱钩再向弱脱钩转变,内蒙古脱钩状态为弱脱钩—扩张负脱钩—弱脱钩—弱脱钩,农业碳排放处于波动状态;现代化农业高速发展,农业利用效率提升,但人们为了追求更高的农业经济利益,加大农业物资的投入及秸秆处理不当等行为,使得农业碳排与农业经济的联系不稳定。总体而言,各省脱钩状态向好发展。

表 5 碳排放影响因素分解结果

Table 5 Decomposition results of factors affecting carbon emissions

省份	农业生产 效率/ $10^4$ t	农业产业 结构/ $10^4$ t	地区产业 结构/ $10^4$ t	地区经济 发展水平/ $10^4$ t	城镇化 水平/ $10^4$ t	农村人口 规模/ $10^4$ t
黑龙江	-2265.54	-131.34	-820.28	5934.71	2072.24	-3601.14
吉林	-1083.26	71.35	-951.89	2837.21	871.66	-1403.13
辽宁	-1041.64	-38.68	-725.57	1807.54	1032.56	-1125.42
河北	-2364.88	-103.06	-1997.27	3667.92	1916.44	-1707.18
内蒙古	-1039.88	51.47	-1629.56	3471.61	1580.03	-1725.56
江苏	-1334.32	-309.53	-3638.66	4764.59	2735.06	-2220.67
安徽	-1550.50	-369.41	-3737.26	6302.46	2379.79	-2190.05
江西	-2349.78	-230.63	-3169.56	5693.37	2105.46	-2020.43
山东	-3269.59	-114.43	-3190.97	5618.65	2580.32	-2084.62
河南	-4360.96	-387.09	-4083.11	7755.59	3487.67	-2884.05
湖北	-2343.32	-638.95	-2181.65	4980.48	2015.62	-1946.29
湖南	-2725.33	-663.17	-4526.43	7872.85	3041.30	-2933.08
四川	-2975.87	-126.08	-2911.50	5381.76	2260.37	-1981.12

## 2.4 碳排放影响因素分析

LMDI 分解结果(表 5)表明:粮食主产区省份碳排放影响因素受区位条件、农业资源禀赋及农业经济发展基础的影响,呈现明显的区域性特征。2010—2020 年,辽宁、河北、江苏、山东、河南、湖北、四川 7 省实现碳减排,黑龙江、吉林、内蒙古、安徽、江西、湖南 6 省仍处于碳排放增量阶段。农业生产效率、地区产业结构、农村人口因素对这些省份农业碳排放均起到不同程度抑制作用,地区经济发展水平和城镇化水平则促进碳排放量增加。农业产业结构仅促进吉林、内蒙古碳排放,分别增加 71.35 万 t 和 51.47 万 t,而对其他地区碳排放起到抑制作用;吉林、内蒙古的第一产业收入主要以农牧业为主,占比分别为 93.41%和 94.38%,在农牧业中投入农药等生产物资较多,因而促进碳排放。黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古以农村人口因素为抑制碳排的首要因素,分别减少碳排 3 601.14 万 t, 1 403.13 万 t, 1 125.42 万 t, 1 725.56 万 t;农业现代化水平提高及规模化经营意味着农业劳动力资源投入减少,劳动力向非农转移一定程度抑制碳排。河北、山东、河南、湖北、四川以农业生产效率因素为抑制碳排的首要因素,分别减少碳排 2 364.88 万 t, 3 269.59 万 t, 4 360.96 万 t, 2 343.32 万 t, 2 975.87 万 t,随着经济增长,生产技术投入、低碳环保政策落地,生产效率大幅提高,农业生产可持续发展,农业碳排对环境的影响程度逐渐减小。江苏、安徽、江西、湖南以地区产业结构为抑制碳排的首要因素,分别减少碳排 3 638.66 万 t, 3 737.26 万 t, 3 169.56 万 t, 4 526.43 万 t,地处东南沿海,二三产业发达,外出务工相比农业收益显著,一产比重逐渐减小,一定程度抑制农业碳排放。



3 结论与建议

3.1 结论

本文从农用投入物质、农作物种植、畜禽养殖、秸秆焚烧四方面计算粮食主产区碳排放量、碳排放强度、碳排放与经济的脱钩关系、碳排放影响因素，具体结论如下：

（1）粮食主产区碳排放处于先增加后减少趋势，以农用投入物质为主要碳源。华中地区是主要的高排放区域。碳排源的构成相对稳定并具有明显的区域差异性，2010—2020 年畜禽养殖的碳排放源占比下降明显。

（2）粮食主产区碳排放强度呈下降趋势，江西、黑龙江等省份碳排放强度较高，最高省域碳排放强度可达 3.99 t/万元；山东等省份碳排放强度较低。

（3）将 13 省划分为高排高产、低排高产、低排低产、高排低产 4 类，低排高产区是理想状态，目前仅有河北省低排高产。就脱钩指数而言，各省域从弱脱钩或扩张连接趋势向强脱钩或弱脱钩转变，农业碳排放与农业经济的关系在不断改善。

（4）2010—2020 年，辽宁、河北、江苏、山东、河南、湖北、四川 7 省实现碳减排，黑龙江、吉林、内蒙古、安徽、江西、湖南 6 省仍处于碳排放增量阶段。农业生产效率、地区产业结构、农村人口等因素对农业碳排具有明显抑制作用，农业产业结构对大多数地区具有抑制碳排的作用。

3.2 建议

（1）大力发展技术，提升农业生产效率。加大对农业技术的资金投入，促进化肥农药等减量提效。提高农用机械的动力效能，使用较为清洁的能源替换使用；提倡免耕或少耕、间歇性节水灌溉等种植措施，推进农业废弃物资源化利用技术发展。改良农作物品种，推广种植低碳作物。

（2）控制畜禽出栏量和存栏量，稳定畜禽养殖的规模和速度，宣传畜禽养殖的疾病预防技术，增强养殖人员的综合素质；深入研究微生物强化堆肥技术，减少环境污染；改良畜禽品种，考虑建立种养结合，促进畜禽粪便在农业内部循环使用。

（3）调整产业结构。在保障粮食安全的基础上，针对不同地区，因地制宜调整农牧产业结构，宜耕则耕，宜牧则牧，协调农牧比例，大力发展农业特色产业，实现农业转型发展，降低农业碳排。

（4）建立秸秆生态补偿机制。推进秸秆还田，秸

秆养畜，秸秆发电等，强化秸秆露天焚烧的实时监测，将卫星遥感、无人机等技术与秸秆监测相结合，提高秸秆焚烧监测效率和水平；给予财政支持，将耕地补贴与秸秆焚烧挂钩，促进农户提高低碳环保意识；鼓励企业积极参与秸秆收贮，设立收贮补贴等政策进行扶持，提高企业收贮积极性。

参考文献：

[1] 赵荣钦,黄贤金,鄢文聚,等.碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题[J].自然资源学报,2022,37(5):1123-1136.

Zhao R Q, Huang X J, Yun W J, et al. Key issues in natural resource management under carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1123-1136.

[2] 中华人民共和国生态环境部.中国应对气候变化的政策与行动 2022 年度报告[R/OL].(2022-10-27).https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/syqhbh/202210/W020221027551216559294.pdf.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China's Policies and Actions to Address Climate Change 2022 annual report [R/OL]. (2022-10-27). https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/syqhbh/202210/W020221027551216559294.pdf.

[3] 张卫建,严圣吉,张俊,等.国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略[J].中国农业科学,2021,54(8):3892-3902.

Zhang W J, Yan S J, Zhang J, et al. Win-win strategy for national food security and agricultural double-carbon goals [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021,54(8):3892-3902.

[4] 陈少鹏,段跃芳.中国农业碳效应研究的现状、热点与趋势[J].地球科学进展,2023,38(1):86-98.

Chen S P, Duan Y F. Research on ststus, and developing trend of agricultural carbon effect in China[J]. Advances in Earth Science, 2023,38(1):86-98.

[5] Dyer J A, Desjardins R L. Carbon dioxide emissions associatede with the manufacturing of tractors and farm machinery in Canada [J]. Biosystems Engineering, 2006,93(1):107-118.

[6] 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.

[7] 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.

Ding B G, Yang S W, Zhao Y, et al. Study on spatio-temporal characteristics and decoupling effect of carbon



- emission from cultivated land resource utilization in China [J]. *China Land Science*, 2019, 33(12): 45-54.
- [8] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 80-86.  
Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80-86.
- [9] 何艳秋, 戴小文. 中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(9): 1780-1790.  
He Y Q, Dai X W. Phase characteristics and regional differences in agriculture carbon emissions in China[J]. *Resources Science*, 2016, 38(9): 1780-1790.
- [10] 李俊杰. 民族地区农地利用碳排放测算及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(9): 42-47.  
Li J J. Research on characteristics and driving factors of agricultural land carbon emission in Provinces of minorities in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(9): 42-47.
- [11] 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.  
Zhou S Y, Xi F M, Yin Y, et al. Accounting and drivers of carbon emission from cultivated land utilization in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3865-3871.
- [12] 张杰, 陈海, 刘迪, 等. 农户农业碳排放效率差异及多层次影响因素: 以陕西省米脂县为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(9): 90-100.  
Zhang J, Chen H, Liu D, et al. Differences in carbon emission efficiency of farmers and its' multilevel influencing factors: A case of mizhi county, Shanxi province, China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(9): 90-100.
- [13] 吴义根, 冯开文. 中国省际农业碳排放的时空分异特征及关联效应[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(3): 180-190.  
Wu Y G, Feng K W. Spatiotemporal differentiation features and correlation effects of Provincial agricultural carbon emissions in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(3): 180-190.
- [14] 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.  
Cao L, Wang Y, Lei S J. Study on spatial-temporal characteristics and decoupling elasticity of agricultural carbon emissions in Shandong Province [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(17): 250-256.
- [15] 李远玲, 王金龙, 杨伶. 基于县域尺度的湖南省农业碳排放时空特征分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(4): 75-84.
- Li Y L, Wang J L, Yang L. Study on temporal and spatial characteristics of agricultural carbon emission in Hunan Province at county scale [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(4): 75-84.
- [16] 田云, 张银岭. 中国农业碳排放减排成效评估、目标重构与路径优化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(12): 1-7.  
Tian Y, Zhang Y L. Research on effectiveness evaluation, target reconstruction and path optimization of agricultural carbon emission reduction in China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(12): 1-7.
- [17] 吴昊玥, 何艳秋, 陈文宽, 等. 中国农业碳补偿率空间效应及影响因素研究: 基于空间 Durbin 模型[J]. *农业技术经济*, 2020(3): 110-123.  
Wu H Y, He Y Q, Chen W K, et al. Spatial effect and influencing factors of China's agricultural carbon compensation rate based on Spatial Durbin model [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(3): 110-123.
- [18] 蒋添诚, 胡纯, 王巧稚, 等. 湖北省农业碳排放时空特征及脱钩研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(11): 1476-1480.  
Jiang T C, Hu C, Wang Q Z, et al. Research on spatial-temporal characteristics and decoupling of agricultural carbon emission in Hubei [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(11): 1476-1480.
- [19] 王太祥, 王腾, 吴林海. 西北干旱区农地利用碳排放与农业经济增长的响应关系[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(4): 170-176.  
Wang T X, Wang T, Wu L H. Relationship between agricultural land carbon emission and economic development in the arid region of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(4): 170-176.
- [20] 陈红, 王浩坤, 秦帅. 农业碳排放的脱钩效应及驱动因素分析: 以黑龙江省为例[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(17): 247-252.  
Chen H, Wang H K, Qin S. Analysis of decoupling effect and driving factors of agricultural carbon emission: A case study of Heilongjiang Province [J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(17): 247-252.
- [21] 卢东宁, 张雨, 雷世斌. “双碳”目标背景下陕西农业碳排放驱动因素与脱钩效应研究[J]. *北方园艺*, 2022(20): 133-140.  
Lu D N, Zhang Y, Lei S B. Study on driving factors and

- decoupling effect of agricultural carbon emission in Shanxi Province under the background of ‘Double Carbon’ target[J]. *Northern Horticulture*, 2022(20):133-140.
- [22] 何艳秋,陈柔,吴昊玥,等.中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[J].*中国生态农业学报*, 2018, 26(9):1269-1282.
- He Y Q, Chen R, Wu H Y, et al. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9):1269-1282.
- [23] 刘维佳.黄土高原生态畜牧业雁门关模式研究[D].太原:山西农业大学, 2013.
- Liu W J. The study on Yanmen pass mode of ecological animal husbandry in loess plateau[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2013.
- [24] 翟郢秋,张芊芊,刘芳,等.我国畜禽养殖业碳排放研究进展[J].*华南师范大学学报:自然科学版*, 2022, 54(3): 72-82, 2.
- Zhai Y Q, Zhang Q Q, Liu F, et al. The progress in the research on carbon emissions from livestock and poultry breeding in China[J]. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 2022, 54(3): 72-82, 2.
- [25] 胡向东,王济民.中国畜禽温室气体排放量估算[J].*农业工程学报*, 2010, 26(10):247-252.
- Hu X D, Wang J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10):247-252.
- [26] 闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].*中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7):21-27.
- Min J S, Hu H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21-27.
- [27] 刘杨,刘鸿斌.山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J].*中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(4): 558-569.
- Liu Y, Liu H B. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4):558-569.
- [28] 程琳琳.中国农业碳生产率时空分异:机理与实证[D].武汉:华中农业大学, 2018.
- Cheng L L. Spatial and temporal differentiation of China's agricultural carbon productivity; mechanism and demonstration[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [29] 陈刚,钱志权,吴旭.中国碳达峰目标实现的预测和政策组合方案比较:以浙江省为例[J].*经济研究参考*, 2021(20):39-56.
- Chen G, Qian Z Q, Wu X. The forecast of China's carbon peak target and comparison of policy packages; the case of Zhejiang Province[J]. *Review of Economic Research*, 2021(20):39-56.
- [30] 桂河,李静,尚梦媛.“双碳”背景下的宁夏农业碳排放时序特征、驱动机理与脱钩效应研究[J].*中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2021, 15(6):37-44.
- Gui H, Li J, Shang M Y. Study on temporal characteristics, driving mechanism and decoupling effect of agricultural carbon emission in Ningxia under the background of “Double Carbon”[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology(Social Sciences)*, 2021, 15(6):37-44.
- [31] 黄锦东.福建省粮食生产的耕地利用效应时空分析[J].*浙江农业学报*, 2020, 32(5):923-930.
- Huang J D. Spatial and temporal analysis into effect of cultivated land use in grain production in Fujian Province[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(5): 923-930.
- [32] 吴昊玥,黄瀚蛟,陈文宽.中国粮食主产区耕地利用碳排放与粮食生产脱钩效应研究[J].*地理与地理信息科学*, 2021, 37(6):85-91.
- Wu H Y, Huang H J, Chen W K. Decoupling effects between carbon emissions from Cropland Use and Grain Production in the Major Grain-Producing Areas in China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(6):85-91.