



重庆市农业投入品碳排放特征、影响因素及脱钩分析

闫 帅, 陈玉成, 蒋乙玮, 管宏友

Characteristics, influencing factors, and decoupling analysis of carbon emissions from agricultural inputs in Chongqing City

YAN Shuai, CHEN Yucheng, JIANG Yiwei, and GUAN Hongyou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20240572>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重庆三峡库区农业碳排放脱钩效应及驱动因素

Decoupling effects and drivers of agricultural carbon emissions in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing
中国生态农业学报(中英文). 2025, 33(1): 14–24

山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析

Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province
中国生态农业学报(中英文). 2022, 30(4): 558–569

中国种植业碳排放达峰进程初判及脱钩分析

Peaking process and decoupling analysis of carbon emissions of crop production in China
中国生态农业学报(中英文). 2023, 31(8): 1275–1286

湖南省农业碳排放特征及碳达峰分析

Characteristics of agricultural carbon emissions and carbon peak analysis in Hunan Province
中国生态农业学报(中英文). 2024, 32(2): 206–217

TOE框架下我国省域农业碳排放影响因素组态分析

Configuration analysis of factors influencing carbon emissions from provincial agriculture in China under the TOE framework: Combining NCA and fsQCA methods
中国生态农业学报(中英文). 2024, 32(9): 1566–1577

基于时空视角的广东省农业碳排放动态演化特征及发展趋势研究

Dynamic evolution characteristics and development trend of agricultural carbon emissions in Guangdong Province based on spatial and temporal perspective
中国生态农业学报(中英文). 2023, 31(8): 1287–1300



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20240572

CSTR: 32371.14.cjea.20240572

闫帅, 陈玉成, 蒋乙玮, 管宏友. 重庆市农业投入品碳排放特征、影响因素及脱钩分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(5): 1-11

YAN S, CHEN Y C, JIANG Y W, GUAN H Y. Characteristics, influencing factors, and decoupling analysis of carbon emissions from agricultural inputs in Chongqing City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(5): 1-11

重庆市农业投入品碳排放特征、影响因素及脱钩分析*

闫帅, 陈玉成, 蒋乙玮, 管宏友**

(西南大学资源环境学院 重庆 400716)

摘要: 农业投入品在使用过程中会产生碳排放, 分析农业投入品碳排放特征与影响因素, 对农业绿色发展、助推“双碳”目标的实现具有重要意义。作为重要的农业发展区域, 重庆市在农业生产活动中使用大量农业投入品。基于2013—2022年《重庆统计年鉴》和《中国农业年鉴》对重庆市农业投入品量、粮食产量、耕地面积、播种面积、农村人口数以及各类GDP的数值进行整合, 采用经典碳排放理论, 研究重庆市农业生产过程中投入品碳排放量及其动态变化态势, 运用对数均值迪氏分解法(logarithmic mean divisia index, LMDI)模型和Tapio脱钩模型, 探讨农业生产投入品碳排放的影响因素与脱钩效应, 为农业投入品碳减排提供科学支撑。结果表明: 1) 2013—2022年重庆市农业投入品碳排放总量为452.01万~482.70万t CO₂-eq, 化肥与灌溉用电是碳排放的主要来源, 占比分别为31.01%和39.48%。2) 重庆市农作物单位播种面积碳排放、单位产量碳排放、单位产值碳排放以及单位耕地面积碳排放与基期相比均呈下降态势, 且单位耕地面积碳排放与单位播种面积碳排放变化趋势基本一致。3) 农业投入品投入与种植结构影响碳排放量, 农业生产效率、地区产业结构及农村人口数等因素对农业碳减排具有正向作用, 农业产业结构调整、地区经济发展水平和劳动力水平是重庆市碳排放量增加的主要原因。4) 重庆市农业投入品碳排放与经济增长的脱钩状态主要表现为弱脱钩向强脱钩转变。农业经济增长逐渐摆脱对高碳排放的依赖, 实现了相对绿色的发展。基于以上结果, 本文针对重庆市农业投入品碳减排提出以下建议: 政府应加快研发精准施肥、节水灌溉和智能化设备等绿色农业技术, 调整农业产业结构, 推动有机农业和生态农业发展。同时, 要提高农民环保意识和低碳生产能力, 发挥农业投入品碳排放驱动因素的抑制作用。

关键词: 农业投入品; 碳排放; LMDI模型; Tapio脱钩模型; 重庆市

中图分类号: X321

Characteristics, influencing factors, and decoupling analysis of carbon emissions from agricultural inputs in Chongqing City*

YAN Shuai, CHEN Yucheng, JIANG Yiwei, GUAN Hongyou**

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Chongqing City is an important agricultural development area, and many agricultural inputs are used in agricultural production activities. Carbon emissions are generated during the use of agricultural resources. Analyzing the characteristics and influen-

* 国家自然科学基金项目(42301353)和重庆市社会科学规划项目(2020ZDSH10)资助

** 通信作者: 管宏友, 研究方向为环境规划与管理。E-mail: ghywau@126.com

闫帅, 研究方向为环境规划与管理。E-mail: ys8181103@163.com

收稿日期: 2024-09-14 接受日期: 2025-01-06

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (42301353) and the Social Science Planning Fund Program of Chongqing (2020ZDSH10).

** Corresponding author, E-mail: ghywau@126.com

Received Sep. 14, 2024; accepted Jan. 6, 2025

cing factors of carbon emissions of agricultural inputs in Chongqing City is vital for green agricultural development and promoting the achievement of the “dual carbon” goals. The number of agricultural inputs, grain output, cultivated land area, sown area, rural population, and various GDP values of Chongqing City were integrated based on the Chongqing Statistical Yearbook and China Agricultural Yearbook for 2013–2022. Classical carbon emission calculation theory was used to study the carbon emissions of inputs and their dynamic changes in agricultural production in Chongqing City from 2013 to 2022. The logarithmic mean divisia index (LMDI) and Tapio decoupling models were used to explore the influencing factors and decoupling effects of agricultural input carbon emissions, providing scientific support for agricultural input carbon reduction. The results were as follows. 1) In the past 10 years, the amount of agricultural inputs in Chongqing City showed an increasing trend before 2015 and a decreasing trend (apart from compound fertilizer) after 2015. The total carbon emissions from agricultural inputs in Chongqing City have fluctuated within the range of 452.01×10^4 to 482.70×10^4 t CO₂-eq, and reached the lowest in 2021. Fertilizer and electricity for irrigation were the primary sources of carbon emissions of agricultural inputs, accounting for 31.01% and 39.48%, respectively. 2) Compared to the base period, carbon emissions per unit sown area, unit output, unit output value, and unit cultivated land area of Chongqing City showed downward trends, and the trend of carbon emissions per unit cultivated land area was consistent with that of carbon emissions per unit sown area. 3) Both changes in agricultural inputs and planting structure affected agricultural input carbon emissions, whereas factors such as agricultural production efficiency, regional industrial structure, and rural population positively affected agricultural carbon reduction. The agricultural industrial structure, regional economic development level, and labor force level were the main reasons for the increase in carbon emissions of agricultural inputs in Chongqing City. 4) The decoupling state between carbon emissions from agricultural inputs and economic growth in Chongqing City mainly manifested as a transition from weak to strong decoupling. Agricultural economic growth has gradually eliminated the dependence on high carbon emissions, achieving relatively green development. The findings of this study provide recommendations for Chongqing’s decision-making on carbon emission reduction from agricultural inputs. The government should accelerate the research and development of green agricultural technologies, such as precision fertilization, water-saving irrigation, and intelligent equipment, adjust the structure of the agricultural industry, and promote the development of organic and ecological agriculture. Simultaneously, farmers’ environmental awareness and low-carbon production capacity should be improved. Exerting the inhibition effect of agricultural production efficiency, regional industrial structure, and rural population on carbon emissions from agricultural inputs in Chongqing City.

Keywords: agricultural input; carbon emissions; LMDI model; Tapio decoupling model; Chongqing City

目前, 温室气体排放导致的全球气候变化已成为国际社会的广泛共识。相关研究表明, 农业活动受气候变化影响, 也直接或间接影响温室气体排放。统计数据显示, 化肥投入量自 20 世纪下半叶以来翻了两翻^[1], 过去 20 年间, 我国农膜使用量增加了 271.10%, 农药使用量增加了 136.20%, 柴油使用量增加了 124.60%^[2]。这些农资投入品的大量应用是作物增产的主要原因。然而, 农业生产过程中使用的化肥、农药、农膜以及灌溉等会产生大量的温室气体^[3-4]。研究表明, 种植业碳排在农业温室气体排放中占比高达 34.30%^[5]。因此, 过度使用化肥、农药和农膜来提高作物产量已经成为农业温室气体排放的重要驱动因素。作为农业生产大国, 农业源温室气体排放是我国温室气体排放的第二大来源^[6], 农业生产对我国碳排放影响不容忽视^[7]。CO₂ 当量 (CO₂-eq) 是评估温室效应的关键参数, 定量计算农业生产过程中的温室气体排放量, 可以明确农业碳排放构成, 并确定农业生态系统碳排放中各碳排放源占比^[8]。因此, 农业生产过程中的碳排放研究受到了广泛关注, 这些研究结果对我们理解和应对气候变化具有重要的参考价值。

当前, 农业碳排放研究主要关注碳排放计算、时空特征及影响因素分析。现有碳排放测算方法包括排放因子法^[9]、模型模拟法^[10]及实地测量法^[11]等, 其中由联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 提出的排放因子法被广泛应用^[12]。但 IPCC 提供的碳排放系数或国外机构基于国家统计局数据计算得出的系数不能直接应用于我国^[13-14], 主要是因为我国与国外能源结构存在很大不同, 我国现阶段农业生产主要依靠化石能源, 尤其是煤炭资源, 其转换系数通常较低。其次, 我国在农业生产过程中过度施用化肥和农药, 而国外农业生产过程中化肥和农药使用量较低, 更多依赖生物肥料和自然防治等农业可持续发展措施, 这一差异导致生产同等量的农产品时, 我国碳排放量更高, 从而意味着我国碳排放系数一定程度上高于国外^[8]。若采用国外碳排放系数计算我国农业生产碳排放量, 会导致计算结果偏低^[15]。另外, 由于技术进步和产业变革, 碳排放特性在不断变化, 而现有碳排放系数更新速度较慢, 并且我国地域广阔, 各地区能源使用和工业水平差异较大, 使得我国在碳排放估算中没有合适的碳排放系数^[16]。因此, 选取合适的系数, 并全面考虑农业生产过程中各个

碳排放过程,对于碳减排和推动农业绿色低碳发展具有重要意义。此外,由于农业碳排放来源广,影响因素相对复杂,明确其影响因素可以有效制定农业碳减排措施。研究表明,农业生产效率^[17]、农业产业结构、地区产业结构^[18]和农村人口数^[19]等因素均对农业碳排放产生一定影响。目前,常用脱钩模型探究碳排放与经济发展间的关系。脱钩这一概念源于物理学领域,之后世界经济合作与发展组织(OECD)^[20]将其引入农业政策研究中,提出了脱钩理论,但该理论易受到基期选择的影响。Tapio^[21]对该理论加以改良,构建了脱钩弹性指数模型,广泛应用于探究碳排放与经济的脱钩状态。在农业碳排放研究中,陈柔等^[22]发现,中国各省农业碳排放与经济增长之间主要呈弱脱钩状态,碳排放与经济发展间的冲突得到了缓解。胡剑波等^[23]指出,西南经济区在2000—2015年基本处于弱脱钩状态,显现出较好的低碳发展趋势。

尽管现有研究从不同角度对农业碳排放进行了研究,但因农业投入品多样、排放机理复杂并且碳排放系数未统一,目前针对农业生产中各类投入品碳排放的研究有限。然而,掌握农业生产过程中各类农业投入品的碳排放特征对全面了解农业生产对气候变化的影响非常重要,不仅能全面评估农业碳足迹,优化投入品使用,还能提高农业可持续性,帮助农业部门制定有效的减排策略。本文拟采用经典碳排放理论,研究2013—2022年重庆市农业生产过程中投入品碳排放量,并定量分析其动态变化态势,运用对数均值迪氏分解法(logarithmic mean division index, LMDI)模型和Tapio脱钩模型探讨影响农业生产投入品碳排放的因素及脱钩效应,为农业投入品碳减排提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

1.1.1 研究区概况

重庆市位于中国西南部、长江上游地区,地处28°10′~32°13′N、105°17′~110°11′E,年平均气温16~18℃,属亚热带季风性湿润气候,是我国中西部唯一的直辖市,集大城市、大农村、大山区和大库区于一体。根据第3次国土调查数据,重庆市坡地面积占比61.17%,西北部和中部以丘陵、低山为主,属典型的山地丘陵地区,耕地面积有限,但土壤肥沃,适合多种作物的种植。主要农作物包括水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)和油菜

(*Brassica napus*)等粮食作物,以及柑橘(*Citrus reticulata*)、茶叶(*Camellia sinensis*)、蔬菜和中药材等经济作物。其中,水稻种植面积较大,占比32.35%,玉米次之。另外,“十三五”期间,经济作物种植面积比例也存在一定程度增加,由59.90%升至63.90%。受地形影响,灌溉业在农业生产和改善农民生活等方面发挥着重要作用。近年来,随着农业生产集约化、农村城镇化和农民老龄化趋势加剧,为了保证粮食产量,农户逐渐增大化肥和农药投入量,导致重庆市农业生产碳减排面临严峻挑战。

1.1.2 数据来源

本研究所需的原始数据主要源于2013—2022年《重庆统计年鉴》(http://tj.cq.gov.cn/zwgk_233/tjnj/)和《中国农业年鉴》(<http://www.tjnjw.com/>),获取的数据主要包括农业投入品量以及有效灌溉面积、耕地面积、播种面积、作物产量、农村人口数以及各类GDP数值等。统计的重庆市农作物主要包括各类粮食作物[如谷物、小麦、玉米、高粱(*Sorghum bicolor*)、薯类和豆类]、油料作物[如花生(*Arachis hypogaea*)、油菜籽、芝麻(*Sesamum indicum*)]、麻类[苧麻(*Boehmeria nivea*)、黄麻(*Corchorus capsularis*)和红麻(*Hibiscus cannabinus*)]、糖料、烟草、蔬菜和瓜果等。

1.2 指标计算方法

1.2.1 投入品碳排放

农作物生产投入品碳排放是指从播种到收获整个农业生产过程中使用的化肥、农药、柴油和农膜等农业投入品在其生产、运输过程中产生的及农业灌溉的温室气体排放总和^[24]。碳排放总量(以CO₂-eq计)的计算公式为:

$$CE = \sum_{i=1}^n AI_i \times EF_i \quad (1)$$

式中:CE为农业生产投入品碳排放总量,单位为万t CO₂-eq; n为农业生产过程中的投入品,包括化肥、农药、农膜、柴油等及农业灌溉用电; AI_i为第i种投入品(灌溉用电)的投入量; EF_i为第i种投入品(灌溉用电)的排放参数,详见表1。

1.2.2 碳排放强度

碳排放强度指单位产出的碳排放量。本文选取单位播种面积碳排放、单位耕地面积碳排放、单位产量碳排放和单位产值碳排放等指标表示。碳排放强度的计算式公为:

$$CE_a = \frac{CE}{TA} \quad (2)$$

表 1 不同农业投入品(碳源)的碳排放系数^[24-25]
Table 1 Carbon emission coefficients of different agricultural inputs (carbon sources)^[24-25]

| 碳源 Carbon source | 碳排放系数 Carbon emission coefficient |
|--|--|
| N | 1.526 kg(CO ₂ -eq)·kg ⁻¹ |
| P ₂ O ₅ | 1.631 kg(CO ₂ -eq)·kg ⁻¹ |
| K ₂ O | 0.654 5 kg(CO ₂ -eq)·kg ⁻¹ |
| 复合肥(折纯) Compound fertilizer (pure equivalent) | 1.772 kg(CO ₂ -eq)·kg ⁻¹ |
| 农药 Pesticides | 12.44 kg(CO ₂ -eq)·kg ⁻¹ |
| 农膜 Agricultural film | 22.72 kg(CO ₂ -eq)·kg ⁻¹ |
| 柴油 Diesel fuel | 0.885 6 kg(CO ₂ -eq)·kg ⁻¹ |
| 农业灌溉 Agricultural irrigation | 2.71 t(CO ₂ -eq)·hm ⁻² |

$$CE_c = \frac{CE}{TC} \quad (3)$$

$$CE_y = \frac{CE}{TY} \quad (4)$$

$$CE_v = \frac{CE}{TV} \quad (5)$$

式中: CE_a 为单位播种面积的作物生产碳排放; CE_c 为单位耕地面积的作物生产碳排放; CE_y 为单位产量的作物生产碳排放; CE_v 为单位产值的作物生产碳排放; TA 为播种面积; TC 为耕地面积; TY 为作物产量; TV 为作物产值。

1.3 农业碳排放影响因素分析

基于定量测算的投入品碳排放量,采用 Kaya 碳排放恒等式对其影响因素进行分解,通过分解公式进一步确定各相关因素对碳排放量的影响效果,从而制定相应的减排策略^[26]。该恒等式于 1989 年在 IPCC 会议提出,应用数学方法将碳排放量与经济、产业结构和人口等因素建立相应联系^[27],结合相关研究与实际农业发展状况对该恒等式进行以下拓展:

$$CE = \frac{CE}{GDP_a} \times \frac{GDP_a}{GDP_T} \times \frac{GDP_T}{GDP} \times \frac{GDP}{P_T} \times \frac{P_T}{P_r} \times P_r \quad (6)$$

$$A = \frac{CE}{GDP_a} \quad (7)$$

$$B = \frac{GDP_a}{GDP_T} \quad (8)$$

$$C = \frac{GDP_T}{GDP} \quad (9)$$

$$D = \frac{GDP}{P_T} \quad (10)$$

$$E = \frac{P_T}{P_r} \quad (11)$$

式中: CE 为农业碳排放总量; GDP_a 为农业生产总值;

GDP_T 为农林牧渔生产总产值; GDP 为生产总值; P_T 为总人口数; P_r 为农村总人口数; A 为农业生产效率; B 为农业产业结构; C 为地区产业结构; D 为地区经济发展水平; E 为劳动力水平。

由于 LMDI 模型具有可消除残差项、因素可逆和不产生余值等优点^[28],采用 LMDI 加和分解方式对上述农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济发展水平、劳动力水平及农村人口数等因素进行进一步分解,以量化各因素对碳排放的影响大小,各因素贡献值表达式如下:

$$\Delta CE = CE_t - CE_0 = \Delta A + \Delta B + \Delta C + \Delta D + \Delta E + \Delta P \quad (12)$$

$$\Delta A = \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} (\ln A_t - \ln A_0) \quad (13)$$

$$\Delta B = \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} (\ln B_t - \ln B_0) \quad (14)$$

$$\Delta C = \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} (\ln C_t - \ln C_0) \quad (15)$$

$$\Delta D = \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} (\ln D_t - \ln D_0) \quad (16)$$

$$\Delta E = \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} (\ln E_t - \ln E_0) \quad (17)$$

$$\Delta P = \frac{CE_t - CE_0}{\ln CE_t - \ln CE_0} (\ln P_t - \ln P_0) \quad (18)$$

式中: ΔCE 为基期年(2013年,下标为 0)与第 t 年间农业碳排放的总变化量; ΔA 、 ΔB 、 ΔC 、 ΔD 、 ΔE 和 ΔP 分别为从基期年到第 t 年的农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济发展水平、劳动力水平和农村人口数对农业碳排放的贡献值。

1.4 Tapio 脱钩模型

为了确定重庆市农业投入品碳排放量与经济增长之间的脱钩关系,采用 Tapio 脱钩模型计算脱钩弹性系数,该系数可以通过对比重庆市的投入品碳排放量和经济增长率的变化趋势来计算,计算公式如下:

$$e = \frac{GDP_{a(t-1)}(CE_t - CE_{t-1})}{CE_{t-1}(GDP_a - GDP_{a(t-1)})} \quad (19)$$

式中: e 为经济发展与碳排放的脱钩指数; t 为时期 ($t=1, 2, \dots, 10$), 表示 2013—2022 年。脱钩状态判定标准见表 2。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行统计分析,计算重庆市 2013—2022 年碳排放量与碳排放强度,

表 2 农业投入品碳排放量与经济增长之间脱钩状态判定标准

Table 2 Criteria for determining the decoupling status between agricultural input carbon emissions and economic development

| 指标 Index | 状态 State | 碳排放量变化/碳排放量 Change in carbon emissions / carbon emissions | 农业生产总值变化/农业生产总值 Change in agricultural GDP/ agricultural GDP | 脱钩指数 Decoupling index (e) |
|----------------------------|--|---|--|---------------------------------|
| 连接 Connection | 扩张连接 Expand connection | >0 | >0 | $0.8 \leq e \leq 1.2$ |
| | 衰退连接 Recession connection | <0 | <0 | $0.8 \leq e \leq 1.2$ |
| 脱钩 Decoupling | 弱脱钩 Weak decoupling | >0 | >0 | $0 \leq e < 0.8$ |
| | 强脱钩 Strong decoupling | <0 | >0 | $e < 0$ |
| | 衰退脱钩 Recessive decoupling | <0 | <0 | $e > 1.2$ |
| 负脱钩 Negative decoupling | 扩张负脱钩 Expansion of negative decoupling | >0 | >0 | $e > 1.2$ |
| | 强负脱钩 Strong negative decoupling | >0 | <0 | $e < 0$ |
| | 弱负脱钩 Weak negative decoupling | <0 | <0 | $0 \leq e < 0.8$ |

并应用 Origin 2019 进行数据可视化。

2 结果与分析

2.1 农业生产变化特征

2.1.1 生产投入品变化

《重庆统计年鉴》显示 (图 1a), 重庆市化肥投入量从 2013 年的 96.64 万 t 增长到 2015 年的 97.73 万 t, 增长了 1.13%; 2015 年后化肥投入量开始逐年降低, 到 2022 年化肥投入量降为 88.74 万 t, 比基期 (2013 年) 下降 8.17%。2013—2022 年, 柴油投入量

21.18 万~22.46 万 t, 变化幅度较小。由图 1b 可知, 2013—2020 年有效灌溉面积变化幅度较大, 呈逐渐增加的趋势, 从 67.52 万 hm^2 增至 69.83 万 hm^2 , 增加 3.42%, 2021 年明显降低, 但在 2022 年存在增加趋势, 且比 2013 年增加 0.19%, 总体变化幅度较小; 2013—2021 年农药投入量呈逐渐降低的趋势, 2022 年与 2021 年投入量保持一致, 比 2013 年下降 13.04%; 农膜投入量从 2013 年的 4.29 万 t 增至 2017 年的 4.55 万 t, 增长 6.06%, 2017 年后投入量开始下降, 到 2022 年农膜投入量降至 4.08 万 t, 与最高投入量 (2017 年) 相比减少 10.33%。

2022 年重庆市化肥投入量较 2013 年下降 8.17% (图 1a), 并且肥料组成结构也发生了较大变化 (图 2a)。2013—2022 年氮肥投入量呈先增加后降低趋势, 从 2013 年的 49.67 万 t 增加到 2014 年的 49.88 万 t, 2014 年之后开始逐年下降, 到 2022 年降为 42.12 万 t, 比 2014 年减少 15.56%; 2013—2022 年磷肥投入量逐年降低, 2022 年较 2013 年降低 14.39%; 钾肥投入量在 2013—2015 年逐年增加, 从 5.40 万 t 增至 5.57 万 t, 2016 年起有所减少, 但在 2017 年又有所增加, 比 2016 年增加 0.10 万 t, 自 2017 年后, 钾肥投入量开始逐年减少, 2022 年钾肥投入量比 2015 年减少 7.36%; 复合肥投入量则从 2013 年开始持续增加至 2017 年, 从 23.64 万 t 增长到 25.84 万 t, 尽管 2018 年投入量有所减少, 但之后投入量开始逐年增加, 整体呈上升趋势, 2022 年复合肥投入量比 2013 年增加 10.49%。

2.1.2 种植结构变化

重庆市主要农作物播种和种植面积统计数据示, 2013—2022 年重庆市农作物种植结构发生了较大变化 (由于麻类和糖料种植面积较少, 本文未考虑这两类作物)。这一现象间接反映了农业生产模式及农作物市场需求等因素的变化, 可能对农业碳排放具有重要影响。因此, 在研究农业碳排放时, 农

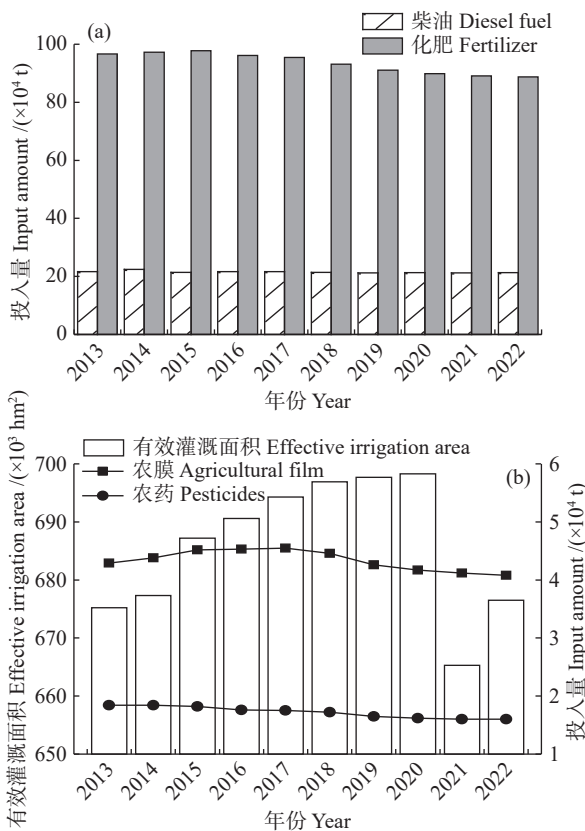


图 1 2013—2022 年重庆市各农业投入品投入量和有效灌溉面积变化

Fig. 1 Changes in input amount of agricultural inputs and effective irrigation area from 2013 to 2022 in Chongqing City

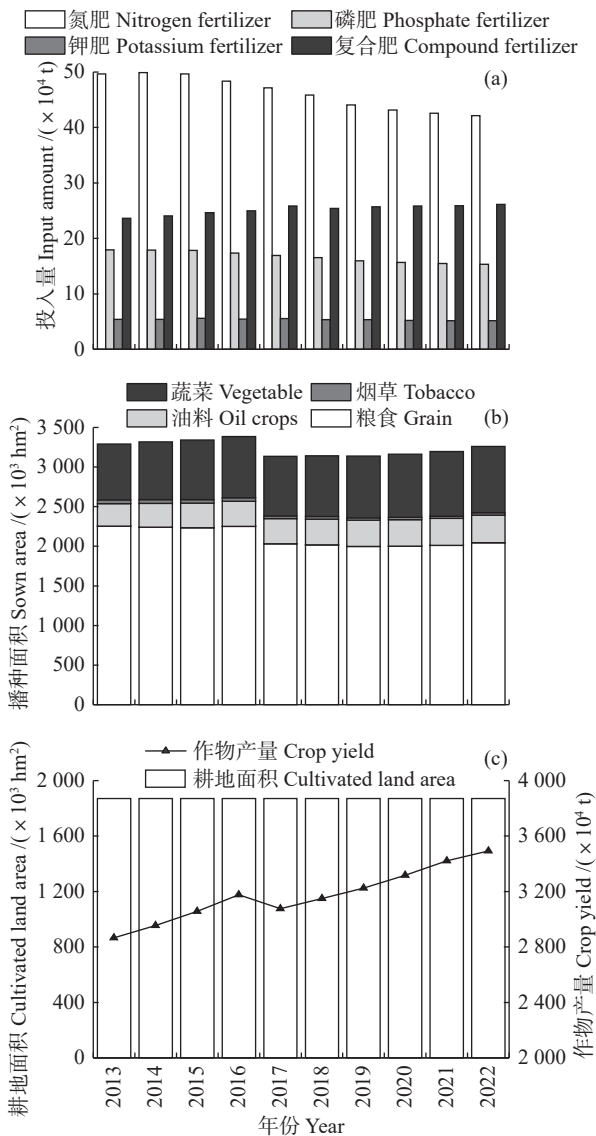


图 2 2013—2022 年重庆市化肥投入量、作物播种面积、作物产量及耕地面积变化

Fig. 2 Changes in chemical fertilizer input amount, crop sown area, crop yield and cultivated land area in Chongqing City from 2013 to 2022

作物种植结构的改变对其影响不可忽视。由图 2b 可知,重庆市粮食作物播种面积最广,约占总种植面积的 60% 以上,其在 2013—2015 年略微下降,2016 年种植面积达最大,2017—2019 年逐年降低,但随后逐年增加;油料和蔬菜播种面积在研究期间内呈增加趋势,与 2013 年相比,2022 年分别增加 22.29% 和 19.21%;烟草 (*Nicotiana tabacum*) 播种面积则呈减少趋势,与 2013 年相比,2022 年烟草播种面积减少 42.42%。

2.1.3 作物产量和耕地面积变化

通过对比 2013—2022 年重庆市作物产量和耕地面积变化(图 2c)发现,全市作物产量总体呈增加趋

势。2013—2022 年,作物产量由 2865.85 万 t 增至 3493.44 万 t,增长 21.89%;其中 2013—2016 年作物产量持续增长,2017 年有所降低,较 2016 年降低 3.11%;2017 年后农作物产量逐年增加,在 2022 年达最大。2013—2022 年重庆市耕地面积基本保持稳定,始终维持在 187.02 万 hm^2 左右。

2.2 投入品碳排放量及排放强度变化特征

从《重庆统计年鉴》和《中国农业年鉴》中确定各农业投入品的投入量,并结合选取的碳排放系数,应用经典碳排放理论,计算得到 2013—2022 年重庆市不同农业投入品的碳排放量(表 3)。2013—2022 年,农业投入品碳排放总量为 452.01 万~482.70 万 $\text{t CO}_2\text{-eq}$,变化幅度较小,其中 2021 年碳排放总量最低,与 2015 年相比减少 6.36%。农业投入品碳排放总量的变化趋势与其投入量基本保持一致。2013—2022 年间,碳排放量总体呈下降趋势,化肥、农药、柴油、农膜和灌溉用电最高碳排放量分别为 152.19 万、22.89 万、19.89 万、103.38 万和 189.24 万 $\text{t CO}_2\text{-eq}$,分别出现在 2015 年、2013—2014 年、2014 年、2017 年和 2020 年;化肥、农药和农膜最低排放量均出现在 2022 年,柴油最低碳排放量出现在 2019 年,灌溉最低碳排放量出现在 2021 年,分别为 138.97 万、19.90 万、92.70 万、18.76 万和 180.30 万 $\text{t CO}_2\text{-eq}$,比其最高值分别降低 8.68%、13.06%、10.33%、5.68% 和 4.72%。氮肥和复合肥是在农业生产过程中施用较多的两种肥料,相应的碳排放量占比也较高,分别为化肥总排放量的 46.25%~50.37% 和 27.84%~33.30%,磷肥占比相对较少,为 18.01%~19.44%,钾肥占比最低 (<3.00%)。2013—2022 年,柴油、农药、农膜、化肥和灌溉用电的碳排放平均占比分别为 4.05%、4.54%、20.92%、31.01% 和 39.48%,化肥和灌溉是碳排放的主要来源。

将重庆市逐年农业投入品碳排放量(以 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 计)与相同时期农作物播种面积、耕地面积、产量和产值进行比较,计算其碳排放强度,具体结果见表 4。2013—2015 年,单位播种面积碳排放强度呈上升趋势,之后逐年降低,其中 2015 年最高,2022 年最低。2013—2022 年总体呈下降趋势,下降 9.09%,其碳排放平均变化率为 $-0.13 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。单位耕地面积碳排放强度为 $2.42\sim 2.58 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,2015 年达最高值,2021 年为最低值,最高碳排放强度比最低值高 6.61%,平均变化率为 $-0.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。单位产量碳排放强度在 2013 年最高 ($0.17 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$),随后开始下降,但在 2017 年略有上升,之后便逐年降低,到 2022 年

表3 2013—2022年重庆市不同农业投入品碳排放量
Table 3 Carbon emissions from different agricultural inputs from 2013 to 2022 in Chongqing City

| 年份 Year | 化肥 Chemical fertilizer | | | | | 农药 Pesticides | 柴油 Diesel fuel | 农膜 Agricultural film | 灌溉用电 Electricity for irrigation | 总计 Total |
|------------|------------------------|-------------------------------|------------------|----------------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------|
| | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | 复合肥 Compound fertilizer | 合计 Total | | | | | |
| 2013 | 75.80 | 29.24 | 3.53 | 41.89 | 150.46 | 22.89 | 19.16 | 97.47 | 182.98 | 472.96 |
| 2014 | 76.12 | 29.21 | 3.55 | 42.62 | 151.49 | 22.89 | 19.89 | 99.51 | 183.55 | 477.33 |
| 2015 | 75.75 | 29.10 | 3.65 | 43.70 | 152.19 | 22.64 | 18.94 | 102.69 | 186.23 | 482.70 |
| 2016 | 73.83 | 28.31 | 3.56 | 44.25 | 149.95 | 21.89 | 19.16 | 102.92 | 187.15 | 481.07 |
| 2017 | 71.97 | 27.61 | 3.63 | 45.79 | 148.99 | 21.77 | 19.19 | 103.38 | 188.16 | 481.49 |
| 2018 | 69.97 | 26.99 | 3.50 | 45.06 | 145.52 | 21.40 | 18.95 | 101.33 | 188.86 | 476.06 |
| 2019 | 67.24 | 26.06 | 3.50 | 45.54 | 142.33 | 20.53 | 18.76 | 96.79 | 189.08 | 467.48 |
| 2020 | 65.82 | 25.54 | 3.41 | 45.77 | 140.54 | 20.15 | 18.84 | 94.74 | 189.24 | 463.51 |
| 2021 | 64.95 | 25.22 | 3.38 | 45.84 | 139.38 | 19.90 | 18.82 | 93.61 | 180.30 | 452.01 |
| 2022 | 64.28 | 25.04 | 3.38 | 46.28 | 138.97 | 19.90 | 18.84 | 92.70 | 183.33 | 453.74 |

其碳排放强度降低 23.53%, 单位产量碳排放强度平均变化率为 $-0.04 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。单位产值碳排放强度呈逐年下降趋势, 2013 年最高, 为 $0.55 \text{ t} \cdot (\text{¥}10^4)^{-1}$,

2022 年最低, 为 $0.24 \text{ t} \cdot (10^4 \text{ ¥})^{-1}$, 至 2022 年单位产值碳排放强度下降了 56.36%, 其平均变化率为 $-0.31 \text{ t} \cdot (10^4 \text{ ¥})^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

表4 2013—2022年重庆市农业投入品碳排放强度(以 CO₂e-eq 计)
Table 4 Carbon emission intensities of agricultural inputs from 2013 to 2022 in Chongqing City (on CO₂-eq basis)

| 年份 Year | 单位播种面积碳排放强度 Carbon emission intensity per unit sown area / [t(CO ₂ -eq)·hm ⁻²] | 单位耕地面积碳排放强度 Carbon emission intensity per unit cultivated land area / [t(CO ₂ -eq)·hm ⁻²] | 单位产量碳排放强度 Carbon emission intensity per unit production / [t(CO ₂ -eq)·t ⁻¹] | 单位产值碳排放强度 Carbon emission intensity per unit output value / [t(CO ₂ -eq)·(10 ⁴ ¥) ⁻¹] |
|------------|--|---|--|--|
| 2013 | 1.43 | 2.53 | 0.17 | 0.55 |
| 2014 | 1.45 | 2.55 | 0.16 | 0.53 |
| 2015 | 1.46 | 2.58 | 0.16 | 0.50 |
| 2016 | 1.44 | 2.57 | 0.15 | 0.43 |
| 2017 | 1.44 | 2.57 | 0.16 | 0.41 |
| 2018 | 1.42 | 2.55 | 0.15 | 0.37 |
| 2019 | 1.40 | 2.50 | 0.15 | 0.33 |
| 2020 | 1.37 | 2.48 | 0.14 | 0.29 |
| 2021 | 1.33 | 2.42 | 0.13 | 0.26 |
| 2022 | 1.30 | 2.43 | 0.13 | 0.24 |

2.3 重庆市农业投入品碳排放影响因素及其经济脱钩效应分析

2.3.1 碳排放影响因素分析

重庆市农业投入品碳排放影响因素分解结果见表5。与基期(2013年)相比较, 2014—2022年重庆市农业投入品碳排放量累计减少21.26万t, 平均每年累计减少2.36万t。农业生产效率、地区产业结构及农村人口数等因素在减少农业投入品碳排放方面发挥着积极作用。对农业投入品碳减排影响最大的因素为农业生产效率, 农业生产效率的提高使碳排放量与基期(2013年)相比累计减少约1800.43万t, 若其他影响碳排放的因素保持不变, 年均碳排放量可减少约200.05万t。在农业碳减排中, 地区产业结构调整与农村人口数因素也起到一定作用, 源于农

村人口数的碳减排量总计494.65万t, 若其他因素保持不变, 碳排放年均均可递减约54.96万t, 而源于地区产业结构的碳减排量总计304.42万t, 年均递减量为33.82万t。农业产业结构、地区经济发展水平和劳动力水平是造成农业投入品碳排放量增加的主要因素, 其累计增加量分别为15.29万、2017.68万和545.27万t, 其中地区经济发展水平是碳排放量增加的主要原因, 表明重庆市农业发展仍未达到“库兹涅兹曲线”拐点处, 碳排放量仍与经济发展存在一定关联^[29]。因此, 今后在发展农业经济的同时需要同时加强碳减排工作。

2.3.2 投入品碳排放与经济增长脱钩分析

2014—2022年, 重庆市农业投入品与经济增长脱钩弹性及其对应关系见表6。重庆市农业投入品

表 5 2014—2022 年重庆市农业投入品碳排放的影响因素分解
Table 5 Driving factors decomposition of carbon emissions of agricultural inputs in Chongqing City from 2014 to 2022
×10⁴ t CO₂-eq

| 年份 Year | 贡献值 Contribution value | | | | | | 碳排放变化量 Changes in carbon emissions |
|-------------|--|---|---|---|----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| | 农业生产效率 Agricultural production efficiency | 农业产业结构 Agricultural industrial structure | 地区产业结构 Regional industrial structure | 地区经济发展水平 Regional economic development level | 劳动力水平 Labor force level | 农村人口数 Rural population | |
| 2014 | -23.11 | 5.38 | -32.82 | 52.55 | 5.04 | -2.67 | 4.37 |
| 2015 | -46.83 | -3.73 | -39.11 | 97.50 | 9.93 | -8.03 | 9.74 |
| 2016 | -122.02 | 2.96 | -27.65 | 150.06 | 64.68 | -59.91 | 8.11 |
| 2017 | -139.11 | 7.48 | -65.98 | 201.70 | 70.76 | -66.32 | 8.53 |
| 2018 | -192.77 | 20.50 | -64.31 | 233.33 | 73.67 | -67.32 | 3.10 |
| 2019 | -236.23 | -4.25 | -44.51 | 271.47 | 77.29 | -69.26 | -5.48 |
| 2020 | -301.45 | -17.87 | 3.91 | 298.45 | 78.37 | -70.87 | -9.45 |
| 2021 | -354.49 | -2.85 | -18.68 | 347.40 | 80.18 | -72.50 | -20.95 |
| 2022 | -384.42 | 7.67 | -15.26 | 365.21 | 85.35 | -77.77 | -19.22 |
| 合计 Total | -1 800.43 | 15.29 | -304.42 | 2 017.68 | 545.27 | -494.65 | -21.26 |

碳排放与经济增长的脱钩弹性包括弱脱钩与强脱钩 2 种状态,并主要由弱脱钩向强脱钩转变。其中,2014—2015 年处于弱脱钩状态,排放量与农业生产总值同步增长,但农业生产总值增长率高于碳排放增长,属

于较理想状态,表明了生产总值可以在一定程度上降低碳排放量的增长。2018—2021 年为强脱钩状态,重庆市农业生产总值不断增加而农业投入品碳排放量不断下降,在此期间达到了理想状态。

表 6 2014—2022 年重庆市农业投入品碳排放与经济增长脱钩弹性
Table 6 Decoupling elasticities of carbon emissions of agricultural inputs and economic growth in Chongqing City from 2014 to 2022

| 年份 Year | 碳排放量变化/碳排放量 Changes in carbon emissions / carbon emissions | 农业生产总值变化/农业生产总值 Changes in agricultural GDP / agricultural GDP | 脱钩弹性 Decoupling elasticity | 脱钩状态 Decoupling state |
|------------|---|---|-------------------------------|--------------------------|
| 2014 | 0.01 | 0.06 | 0.16 | 弱脱钩 Weak decoupling |
| 2015 | 0.01 | 0.06 | 0.18 | 弱脱钩 Weak decoupling |
| 2016 | 0.00 | 0.17 | -0.02 | 强脱钩 Strong decoupling |
| 2017 | 0.00 | 0.04 | 0.02 | 弱脱钩 Weak decoupling |
| 2018 | -0.01 | 0.11 | -0.10 | 强脱钩 Strong decoupling |
| 2019 | -0.02 | 0.08 | -0.22 | 强脱钩 Strong decoupling |
| 2020 | -0.01 | 0.14 | -0.06 | 强脱钩 Strong decoupling |
| 2021 | -0.02 | 0.10 | -0.24 | 强脱钩 Strong decoupling |
| 2022 | 0.00 | 0.07 | 0.06 | 弱脱钩 Weak decoupling |

3 讨论

本文基于 2013—2022 年重庆市面板数据,分析农业生产变化,发现 2015 年之前农资投入不断增加(图 1 和图 2),2015 年后除复合肥呈增长趋势外,其余农资投入均呈下降趋势,这主要受国家减排政策的影响^[30]。重庆市近年来大力推广有机肥替代化肥,减少了化肥的施用量;推广生物农药和高效低毒低残留农药,其利用率达 40.60%,主要农作物病虫害绿色防控覆盖率达 42.81%。此外,重庆市还完善了废弃农膜和农药回收处理制度,农膜回收率达 87.70%。在农业设备方面,重庆市优化农机装备结构,推广应用先进高效农业机械,提升农机化综合服务能力。这些措施使重庆市在农业减排方面取得了显著成效。

种植结构的改变主要受自然、政策、市场需求和科学技术等因素的影响^[31]。重庆市多为丘陵山地,农业规模化生产难度较大,重庆市立足自身优势,发挥区位优势,在山地丘陵区域种植水稻、玉米等粮食作物,在地势较高、气温较低的区域种植果树等特色农产品,建立“四带二基地”发展区域特色农业。就代表性作物来说,粮食作物与烟草的种植面积近几年呈下降趋势,油料作物和蔬菜的种植面积则呈明显的上升趋势,总播种面积也有一定增长^[32]。其次,政府的农业政策、土地政策、农业补贴政策等均会影响到农民的决策行为。政策通过鼓励、补贴和市场调控等多种手段,激发农民种植积极性,对种植结构产生影响^[33-34]。此外,市场需求是影响农资投入及种植结构的重要因素之一,市场需求的变化会直接影

响农民对不同农产品的种植选择。近年来,重庆市大力发展蔬菜种植产业,蔬菜种植面积不断扩大,这不仅优化了种植结构,也提升了农业经济效益。

本文对农业投入品碳排放量及排放强度进行了测算,并分析了其变化特征。研究表明,农业碳排放总体呈先升后降趋势,这与刘宗源^[35]的研究结果一致。该变化与国家“三农”政策密不可分。具体而言,随着“三农”政策的深入推进,尤其是农业供给侧结构性改革和绿色发展理念的实施,重庆市通过建立科学施肥体系以及推广测土配方施肥和水肥一体化等措施,提高了肥料利用率;通过改善农田灌溉方式、使用清洁能源等方式降低了灌溉用电的碳排放量,提高了农业生产效率。此外,碳排放强度下降反映农业生产向低碳化和高效化的转型趋势,是衡量经济、社会和环境协同发展的重要指标。与刘宗源^[35]和周恒阳等^[36]对重庆市农业碳排放的研究相比,本文在关注农业碳排放量的同时,充分考虑了碳排放强度,并发现单位产值碳排放减少幅度最明显,之后依次为单位产量碳排放、单位播种面积碳排放和单位耕地面积碳排放。由于重庆市在“十三五”期间进行了产业结构调整,农业发展总体平稳,基础地位持续巩固;工业结构转型升级,建筑业占比持续提升;服务业结构提档升级,支撑作用明显增强;能源结构优化,碳排放总量下降,间接导致单位产值碳排放强度逐年降低的情况。单位耕地面积碳排放的变化与单位播种面积碳排放的变化具有相同的趋势,均呈现出先增加后降低的趋势。

通过LMDI模型对2013—2022年农业投入品碳排放进行影响因素分解发现,农业生产效率、地区产业结构和农村人口数对农业投入品碳排放起抑制作用,这与周恒阳等^[36]研究结果相一致。随着城镇化的不断发展,重庆市农村人口逐年递减,农村人口占比由2013年的59.98%下降至2022年的49.89%,农业生产规模下降,从而抑制农业碳排放。但作物产量呈增加趋势,由此可见农业生产效率不断提高可能受农业机械化水平提升以及实行规模化和集约化经营的影响。就生产总值来看,三产比例由2013年的7.20:46.00:46.80调整为2022年的6.90:40.10:53.00,第三产业占比明显提升,一系列变化均表明重庆市正在紧跟国家决策部署,逐步对地区产业结构进行调整,并取得一定减排效果。

目前,关于重庆市农业投入品碳排放的研究已取得很多成果,但较少研究将碳排放与农业经济相关联,本文在现有研究基础上将农业投入品碳排放

与农业经济相结合,分析脱钩效应,弥补了现有研究的不足。结果表明,重庆市脱钩状态由弱脱钩向强脱钩状态转变,这主要受农业技术和国家政策的影响。近年来,重庆市广泛推广节能减排技术和高效农业投入品的使用,有效降低了碳排放量。中央颁布的一号文件中提出了加快建设现代化农业强国的总体要求,颁布了农业科技创新、农业现代化等相关政策,绿色低碳理念日益深入人心,重庆市农业绿色低碳发展取得阶段性成果。这不仅为实现区域经济高质量发展提供了实践经验,也为制定减排政策提供了重要依据。

4 结论

1) 2013—2022年,重庆市农业投入品量在2015年前呈增加趋势,2015年后呈降低趋势(复合肥除外),其碳排放总量为452.01万~482.70万t CO₂-eq,2021年碳排放总量达最低;柴油、农药、农膜、化肥和灌溉用电的碳排放平均占比分别为4.05%、4.54%、20.92%、31.01%和39.48%,化肥和灌溉用电是碳排放的主要来源。

2) 2013—2022年,重庆市单位播种面积碳排放平均变化率为 $-0.13 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、单位耕地面积碳排放平均变化率为 $-0.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、单位产量碳排放平均变化率为 $-0.04 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、单位产值碳排放平均变化率为 $-0.31 \text{ t}\cdot(10^4\text{¥})^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$,均呈降低趋势。其中,单位耕地面积碳排放的变化与单位播种面积碳排放的变化均呈先增加后降低的趋势。

3) 农业投入品和农业种植结构的改变均对农业碳排放量产生影响。农业生产效率、地区产业结构及农村人口数等因素在农业碳减排方面发挥着积极作用,而造成农业碳排放量增加的主要原因为农业产业结构、地区经济发展水平和劳动力水平。

4) 2014—2022年,重庆市农业投入品碳排放与经济增长的关系主要表现为由弱脱钩状态向强脱钩状态的转变。2014—2015年处于弱脱钩状态,农业生产总值增长速率高于碳排放增长速率,属于较理想状态。2018—2021年为强脱钩状态,农业生产总值增加而农业投入品碳排放量下降,该阶段达到了理想状态。

参考文献 References

- [1] FOLEY J A, RAMANKUTTY N, BRAUMAN K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342
- [2] 张丹,张卫峰. 低碳农业与农作物碳足迹核算研究述评[J]. 资

- 源科学, 2016, 38(7): 1395-1405
- ZHANG D, ZHANG W F. Low carbon agriculture and a review of calculation methods for crop production carbon footprint accounting[J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1395-1405
- [3] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. *中国农业气象*, 2002, 23(4): 47-52
- XIE J F, LI Y E. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils[J]. *Agricultural Meteorology*, 2002, 23(4): 47-52
- [4] LAL R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981-990
- [5] 戴小文, 杨雨欣. 2007—2016 年中国省域种植业碳排放测算、驱动效应与时空特征[J]. *四川农业大学学报*, 2020, 38(2): 241-250
- DAI X W, YANG Y X. Calculation, driving effect and temporal and spatial characteristics of carbon emissions in China's provincial planting industry from 2007 to 2016[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, 38(2): 241-250
- [6] 韦沁, 曲建升, 白静, 等. 我国农业碳排放的影响因素和南北区域差异分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(4): 318-325
- WEI Q, QU J S, BAI J, et al. Influencing factors of agricultural carbon emission and regional differences between south and north in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(4): 318-325
- [7] 齐晔, 李惠民, 王晓. 农业与中国的低碳发展战略[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(1): 1-6
- QI Y, LI H M, WANG X. Agriculture and low-carbon development strategy in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(1): 1-6
- [8] 山楠, 肖广敏, 串丽敏, 等. 河北省农作物生产投入品碳排放变化特征[J]. *中国农业气象*, 2023, 44(2): 96-105
- SHAN N, XIAO G M, CHUAN L M, et al. Dynamics change of carbon emission from crops production inputs in Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(2): 96-105
- [9] HAN H B, ZHONG Z Q, GUO Y, et al. Coupling and decoupling effects of agricultural carbon emissions in China and their driving factors[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(25): 25280-25293
- [10] ZHANG X X, SUN H F, BI J G, et al. Estimate greenhouse gas emissions from water-saving and drought-resistance rice paddies by deNitrification-deComposition model[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2022, 24(1): 161-171
- [11] 胡永浩, 张昆扬, 胡南燕, 等. 中国农业碳排放测算研究综述[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(2): 163-176
- HU Y H, ZHANG K Y, HU N Y, et al. Review on measurement of agricultural carbon emission in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 163-176
- [12] 丁宝根, 赵玉, 邓俊红. 中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(5): 1-11
- DING B G, ZHAO Y, DENG J H. Calculation, decoupling effects and driving factors of carbon emission from planting industry in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(5): 1-11
- [13] 杜江, 罗珺, 王锐, 等. 粮食主产区种植业碳功能测算与时空变化规律研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(10): 1242-1251
- DU J, LUO J, WANG R, et al. The estimation and analysis of spatio-temporal change patterns of carbon functions in major grain producing area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(10): 1242-1251
- [14] 李明琦, 刘世梁, 武雪, 等. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8822-8834
- LI M Q, LIU S L, WU X, et al. Temporal and spatial dynamics in the carbon footprint and its influencing factors of farmland ecosystems in Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8822-8834
- [15] 夏龙龙, 颜晓元. 中国粮食作物生命周期生产过程温室气体排放的研究进展及展望[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 665-672
- XIA L L, YAN X Y. Research progress and prospect of greenhouse gas emissions from the life-cycle production of food crops in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 665-672
- [16] 刘志红. 中国区域能源消费碳排放测算、收敛及脱钩研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2018
- LIU Z H. Research on the calculation, convergence and decoupling of China's regional carbon emissions of energy consumption[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2018
- [17] 田云, 张俊彪, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. *资源科学*, 2012, 34(11): 2097-2105
- TIAN Y, ZHANG J B, LI B. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105
- [18] 宁静, 李亚洁, 王震, 等. 中国粮食主产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 J, LI Y J, WANG Z, 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
- [19] 许悦, 许紫浩. 河北省农业碳排放效率与影响因素[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(12): 1981-1993
- XU Y, XU Z H. Agricultural carbon emission efficiency and influencing factors in Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(12): 1981-1993
- [20] Organisation for Economic Co-operation and Development. Sustainable Development: Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth[R/OL]. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, (2002-05-16).
- [21] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [22] 陈柔, 何艳秋, 朱思宇, 等. 我国农业碳排放双重性及其与经济协调性研究[J]. *软科学*, 2020, 34(1): 132-138
- CHEN R, HE Y Q, ZHU S Y, et al. Duality of agricultural carbon emissions and coordination with economic development in China[J]. *Soft Science*, 2020, 34(1): 132-138

- [23] 胡剑波, 吴大华. 西南民族地区碳排放与经济增长脱钩关系研究[J]. 江西社会科学, 2017, 37(3): 55-62
HU J B, WU D H. Decoupling relationship between carbon emission and economic growth in southwest ethnic areas[J]. Jiangxi Social Science, 2017, 37(3): 55-62
- [24] CHENG K, PAN G X, SMITH P, et al. Carbon footprint of China's crop production — An estimation using agro-statistics data over 1993-2007[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3/4): 231-237
- [25] 王占彪, 王猛, 陈阜. 华北平原作物生产碳足迹分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 83-92
WANG Z B, WANG M, CHEN F. Carbon footprint analysis of crop production in North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(1): 83-92
- [26] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国农业碳排放特征及影响因素研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(5): 56-62
HU W L, ZHANG J X, WANG H L. Characteristics and influencing factors of agricultural carbon emission in China[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(5): 56-62
- [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] 李月, 孔祥斌, 张安录, 等. 基于LMDI模型的我国省域粮食生产变化影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(1): 129-140
LI Y, KONG X B, ZHANG A L, et al. Analysis of influence factors on crop production change in China at provincial level based on LMDI model[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(1): 129-140
- [29] 梁青青. 基于经典环境库茨涅茨曲线的我国农业碳排放拐点预测及区域比较[J]. 科技与经济, 2017, 30(3): 106-110
LIANG Q Q. Prediction and regional comparison of China's agriculture carbon emissions based on classical environmental Kuznets curves[J]. Science & Technology and Economy, 2017, 30(3): 106-110
- [30] 褚力其, 姜志德, 任天驰. 中国农业碳排放经验分解与峰值预测——基于动态政策情景视角[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 187-201
CHU L Q, JIANG Z D, REN T C. Empirical decomposition and peak prediction of agricultural carbon emissions in China: From the perspective of dynamic policy scenarios[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(10): 187-201
- [31] 孙芳, 刘明河, 刘立波. 京津冀农业协同发展区域比较优势分析[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(1): 63-70
SUN F, LIU M H, LIU L B. Analysis on region comparative advantage of agricultural synergetic development in the region of Jing-Jin-Ji[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(1): 63-70
- [32] 陈明书. 优化重庆市种植业结构中灰色分析法的应用探析[J]. 现代农业科技, 2017(20): 53-54
CHEN M S. Analysis on the application of grey analysis method in optimizing planting structure in Chongqing[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(20): 53-54
- [33] 杜国明, 张扬, 李全峰. 21世纪以来三江平原农作物种植结构演化研究[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(5): 736-744
DU G M, ZHANG Y, LI Q F. The evolution path of crop structure in the Sanjiang Plain in the 21st century[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(5): 736-744
- [34] 安悦, 谭雪兰, 谭杰扬, 等. 湖南省农作物种植结构演变及影响因素[J]. 经济地理, 2021, 41(2): 156-166
AN Y, TAN X L, TAN J Y, et al. Evolution of crop planting structure in traditional agricultural areas and its influence factors: A case study in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2021, 41(2): 156-166
- [35] 刘宗源. 重庆市农业碳排放测度与影响因素研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2024
LIU Z Y. Research on the measurement and influencing factors of agricultural carbon emissions in Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2024
- [36] 周恒阳, 张军以, 彭国川. 重庆三峡库区农业碳排放脱钩效应及驱动因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(1): 14-24
ZHOU H Y, ZHANG J Y, PENG G C. Decoupling effects and drivers of agricultural carbon emissions in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(1): 14-24