

## 雅安市农业碳排放与农业经济增长的脱钩效应研究

何宗桂, 焦翠翠\*

四川轻化工大学经济学院 四川自贡

**【摘要】**目的 为促进雅安市农业绿色发展, 探究农业碳排放与农业经济发展之间的脱钩效应, 为雅安市未来农业的绿色发展以及农业经济的良性增长提供理论与数据参考。方法 采用排放系数法, 基于农地利用中 6 类碳源, 测算雅安市 2009 年-2020 年碳排放量、强度和结构, 而后运用 Tapio 脱钩模型计算雅安市农业碳排放的脱钩系数, 探讨农业碳排放和农业经济增长之间脱钩效应。结果 (1) 雅安市在研究时间区间内农业碳排放年际波动幅度较大, 农业碳排放总量呈先下降后波动上升再持续下降的反“N”型变化趋势, 化肥的使用是农业碳排放的主要来源。(2) 雅安市农业碳排放与经济发展呈现弱脱钩与强脱钩 2 种脱钩现象。结论 2014 年后, 主要以强脱钩为主, 由此可以说明雅安市采取的农业低碳发展策略取得了一定成效。今后, 雅安市需要继续保持从多方面推进农业低碳发展。

**【关键词】**农业碳排放; 农业经济发展; 脱钩效应; Tapio 模型

**【基金项目】**四川轻化工大学研究生创新基金资助项目(编号 Y2023148): 雅安市农业碳排放与农业经济增长的脱钩效应研究

**【收稿日期】**2023 年 8 月 10 日 **【出刊日期】**2023 年 9 月 8 日 **【DOI】**10.12208/j.aes.20230012

### Study on the decoupling effect between agricultural carbon emissions and agricultural economic growth in Ya'an

Zonggui He, Cuicui Jiao\*

School of Economics, Sichuan University of Light Industry and Chemical Technology, Zigong, Sichuan

**【Abstract】****Objective** To promote the green development of agriculture in Ya'an City, explore the decoupling effect between agricultural carbon emission and agricultural economic development, and provide theoretical and data reference for the future green development of agriculture and the benign growth of agricultural economy in Ya'an City. **Methods** The emission coefficient method was used to calculate the carbon emission, intensity and structure of Ya'an City from 2009 to 2020 based on six types of carbon sources in agricultural land utilization. Then, the Tapio decoupling model was used to calculate the decoupling coefficient of agricultural carbon emission in Ya'an City, and the decoupling effect between agricultural carbon emission and agricultural economic growth was discussed. **Results** (1) The annual fluctuation of agricultural carbon emissions in Ya'an City was large during the study period, and the total agricultural carbon emissions showed an inverse "N" trend of first decreasing, then fluctuating rising and then continuously decreasing. The use of chemical fertilizer was the main source of agricultural carbon emissions. (2) There are two decoupling phenomena between agricultural carbon emission and economic development in Ya'an city: weak decoupling and strong decoupling. **Conclusion** After 2014, strong decoupling is the main problem, which shows that the low-carbon agricultural development strategy adopted by Ya'an city has achieved certain results. In the future, Ya'an City needs to continue to promote the low-carbon development of agriculture from various aspects.

\*通讯作者: 焦翠翠(1987-)女, 汉族, 山西长治, 副教授, 研究方向: 农村区域发展、生态经济以及生态遥感。

**【Keywords】** Agricultural carbon emissions; Agricultural economic development; Decoupling effect; Tapio model

2022 年全球温室气体浓度再创新高, 根据联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 所公布的数据, 农业生产活动中直接或间接排放的温室气体, 如二氧化碳和甲烷等, 占全球人为温室气体排放的 13.5%<sup>[1]</sup>。因此, 世界各国也在寻求减少和控制农业温室气体的排放量, 促进低碳农业发展, 并改善农业发展的生态环境的方法。农业作为全球第二大温室气体排放源, 发展低碳农业已刻不容缓。温室气体尤其是 CO<sub>2</sub> 排放量增加, 导致全球气候变暖问题日趋严重。在农业生产过程中, 使用化肥和农药、翻耕、灌溉等活动所产生的温室气体已占全球总排放量的 1/5<sup>[2]</sup>。全球气候变化所带来的增温效应使得诸如冰川消融、极端天气、疾病传播、生物多样性减少等灾害问题日益加剧, 进而直接影响粮食生产、人民生活、国家安全<sup>[3]</sup>。鉴于此, 在农业碳排放领域内, 不同学者进行了广泛的研究, 主要涵盖了以下两个方面: 一是农业碳排放测算及其时空差异研究。田云等基于农业能源利用、农用物资投入、水稻种植和畜禽养殖对中国农业碳排放进行再测算, 最终得出中国农业碳排放总量处于下降态势且存在年际波动<sup>[4]</sup>, 各省份碳排放强度表现为西高东低态势; 朱丽君、王光宇等学者从农业生产投入、耕地面积和农业机械投入等因素入手, 对安徽省农田的碳排放量进行了计算<sup>[5]</sup>; 岳立等采用生命周期评价法测算了水稻生产过程所产生的碳排放<sup>[6]</sup>。

二是农业碳排放与经济发展的关系研究<sup>[7-10]</sup>。主要突出于两个方面, 一是碳排放与经济增长呈正相关。朱江玲和唐建荣等运用脱钩理论, 并以中间变量能源消耗作为分析方式, 研究了碳排放与经济增长之间的联系。研究表明, 这两者之间存在正向相关关系<sup>[11-12]</sup>。二是碳排放与经济增长呈负相关。田云、张俊飏等对农业经济增长与碳排放量的脱钩关系进行了分析, 结果显示两者之间呈现负相关关系<sup>[13]</sup>; 刘洁对山东省农地利用的碳排放与经济发展之间的脱钩关系进行了研究。结果显示, 主要的脱钩状态为强脱钩, 即两者呈现负相关关系<sup>[14]</sup>。除此之外, 吴昊明等在构建中国粮食主产区耕地碳排放测算框架的基础上分析其与粮食生产间的长期脱钩

关系, 最终得出前期脱钩状态存在波动, 后期主要表现为弱脱钩<sup>[15]</sup>。丁宝根等基于碳排放系数法探究了中国耕地资源利用的碳排放时空差异, 而后基于脱钩分析法揭示耕地碳排放与农业经济增长间的脱钩关系<sup>[16]</sup>; 孙秀梅和张慧利用脱钩理论, 也以山东省为案例, 对山东省经济发展与碳排放之间的关系进行了研究, 结果表明山东省的脱钩轨迹是“N”型<sup>[17]</sup>。

综上所述, 在农业碳排放测算方面, 大部分学者要么聚焦在全国和省级范围, 要么主要集中在作物研究, 如对水稻、秸秆焚烧、畜牧养殖的碳排放进行测算, 但少有学者就西部地级市范围的宏观层面碳排放进行研究。其次, 关于农业碳排放与经济发展关系研究上, 相关研究一是主要集中在环境、能源、交通运输、生态效率等细致领域, 二是要么也如碳排放测算相似, 集中在省级范围进行研究但在地级市范围的研究仍存在一些不足和研究空白, 特别是对雅安这类城市在农业领域运用脱钩理论研究则更为缺乏。

雅安市是我国重要的农业城市之一, 农业在地区生产总值中的占比一直处于较高状态, 因此研究雅安的农业低碳发展是雅安市缓解资源环境约束、如期实现“双碳”目标的重要战略选择, 然而现实中雅安市的农业碳排放的研究非常少。基于此, 文章借鉴已有研究, 在科学测算雅安市农地利用中碳源的碳排放量的基础上, 对雅安市农地利用过程中的碳排放的时间变化与结构特征进行细致研究, 并利用 Tapio 模型分析与其农业经济发展的脱钩类型, 在弥补研究空白的同时也为雅安市农业碳减排目标的实现提供合理化建议也为雅安市实现农业可持续发展提供重要参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

综合参考前人学者对农业碳排放的相关研究的同时考虑雅安市农业生产实际, 本文从化肥、农药、农膜、灌溉、翻耕、机械使用六大碳源入手, 采用碳排放系数法, 通过合理确定各类碳源的碳排放系数测算各类碳源的碳排放量并汇总分析。构建农业碳排放测算公式如下:

$$E = \sum T_i \times \delta_i \quad (1)$$

公式(1)中, E表示农地利用环节产生的碳排放总量,  $T_i$ 表示各类农业投入要素,  $\delta_i$ 表示各类投入要素对应的碳排放系数。特别说明的是机械使用主要是柴油的使用, 因此机械使用的排放系数采用柴油的排放系数, 并且总排放量的均折算成为  $CO_2$  当量。此外, 引入碳排放强度进行评价, 选取单位耕地面积碳排放强度进行研究, 农业碳排放强度计算公式如下:

$$C = \frac{A}{B} = \frac{\sum A_i}{B} = \frac{\sum T_i \delta_i}{B} \quad (2)$$

公式(2)中, B表示耕地面积, C表示农业碳排放强度。

脱钩效应用来描述两个密切相关的变量之间的关系从逐渐弱化到完全分离的动态演化过程的方法, 脱钩理论被最早被应用在物理学领域。在农业经济学领域常用的脱钩分析方法主要有两种。一种是基于初始值和最终值的经合组织脱钩模型, 该模型侧重于全年的分析。第二种是 Tapio 模型, 该模型侧重于个别年份的分析。由于后者比前者更直观和方便, 因此选择 Tapio 脱钩模型进行研究。脱钩弹性系数公式如下:

$$e = \frac{\Delta C/C}{\Delta AG/AG} \quad (3)$$

式(3)中 e表示脱钩弹性系数; C表示基准期的农业碳排放量,  $\Delta C$ 表示农业碳排放量变化; AG表示基准期的农业总产值,  $\Delta AG$ 表示农业总产值的变化。此外, 依据此模型依据弹性值的大小, 划分出 8 种脱钩类型。

## 1.2 数据来源

数据主要来自《雅安市统计年鉴(2010-2021)》和《四川省统计年鉴(2010-2021)》。化肥、农药、农用薄膜、农用柴油以《雅安市统计年鉴(2010-2021)》中雅安市当年实际使用数量为准; 由于翻耕面积在雅安统计年鉴中有缺失, 因此翻耕数据使用《四川省统计年鉴》中雅安市的农作物播种面积代替; 农业灌溉以当年雅安市实际有效灌溉面积为准; 经济指标选择农业总产值, 选取 2009 年作为价格基期对数据进行处理。利用 Origin2021 完

成绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 雅安市碳排放的特征分析

根据公式(1)和公式(2)计算出 2009 年-2020 年 12 年期间雅安市农地利用过程中碳排放源的碳排放量和农业碳排放强度(表 3)。

根据公式(1)测算出雅安市农地利用碳排放情况(图 1)。碳排放总量由 88864.16t 下降至 81782.72 t, 降幅为 7081.44 t, 变化率为-7.96, 表明雅安市农地利用产生的碳排放总体上是下降趋势。2009-2020 年碳排放总量呈“反 N”型变化趋势, 表现为下降期(2009-2010)一波动上升期(2011-2014)一迅速下降期(2015-2020)3 阶段。前两个阶段雅安市农地利用碳排放量波动上升, 2014 年达到峰值。2015—2020 年碳排放量呈迅速下降趋势, 2020 年达到最低值, 这一时期, 雅安市积极响应国家环保理念, 出台了一系列促进农业低碳绿色发展的措施, 碳排放得到有效控制。碳排放强度(图 2)从 2009 年的 2.09t/hm<sup>2</sup> 快速递减至 2012 年 1.72t/hm<sup>2</sup>, 随后进入 2012-2017 年的波动期, 在此时间段内碳排放强度在 1.73t/hm<sup>2</sup>-1.67t/hm<sup>2</sup> 内波动变化, 2017 年以后碳排放强度逐渐下降至 1.52t/hm<sup>2</sup>, 碳排放强度年均下降率为-0.27, 雅安市研究期内碳排放强度是下降的。

研究期内各类碳源的排放量保持平稳, 除灌溉、翻耕年均变化率为负值外, 其余均保持一定程度的正增长(图 3)。碳排放结构方面(图 4), 化肥作为占比最大的碳源, 占比呈现小幅度波动变化, 但总体还是处于持平状态。灌溉作为占比增加最多的碳源, 占比从 13%增至 18%, 灌溉造成的碳排放, 随着农业机械化的提升而愈发明显。

### 2.2 雅安市农业碳排放与农业经济发展的脱钩效应分析

根据弹性计算公式(3)计算得到雅安市 2009-2020 年农业碳排放与农业经济发展间的脱钩状态(表 4)。2009-2014 年为弱脱钩阶段, 除 2010 年表现为强脱钩外, 其余均表现为弱脱钩, 整体脱钩状态较为平稳和良好。农业总产值以 11.19 的年变化率大幅领先于农业碳排放 0.67 的年变化率, 有效控制碳排放中低速增长, 在个别年份甚至稳中有降, 而农业总产值却提升迅速, 从 497071 万元上升

至 839940 万元。2014—2020 年为强脱钩阶段, 伴随着前中期低碳农业举措的施行以及经济累积效应的不断凸显, 处于稳定期, 该阶段整体态势良好, 碳排放总量以-1.89%的年均增率远低于农业产值 10.12%的年均增率, 二者出现反方向增长态势。

十三五期间, 雅安紧跟农业农村部的步伐, 印发了《关于成立肥料和农药使用量零增长行动领导小组的通知》, 在此背景下, 雅安市大力发展低碳

绿色农业, 针对性地进行减排, 全面推进化肥用量零增长, 在落实关键技术的同时加强宣传培训, 增强农民科学施肥意识, 因而该阶段实现了碳排放与经济发展的最佳脱钩状态。

2009 年至 2020 年雅安市脱钩状态总体经历了“强脱钩—弱脱钩—强脱钩”的发展历程, 有力地表明了低碳农业理念以及农业碳减排在雅安市得到了真正落实和有效体现。

表 1 农地利用碳排放源的碳排放系数

| 项目   | 单位                                       | 排放系数   | 参考来源                       |
|------|--|--------|----------------------------|
| 化肥   | kg · CO <sub>2</sub> -eq/kg              | 0.89   | ORNL <sup>[21]</sup>       |
| 机械投入 | kg · CO <sub>2</sub> -eq/kg              | 4.1    | CLCD0.7                    |
| 农用薄膜 | kg · CO <sub>2</sub> -eq/kg              | 22.71  | Ecionvent2.2               |
| 农药   | kg · CO <sub>2</sub> -eq/kg              | 12.44  | 刘巽浩等 <sup>[18]</sup>       |
| 灌溉   | kg · CO <sub>2</sub> -eq/hm <sup>2</sup> | 266.48 | 段华平等 <sup>[19]</sup>       |
| 翻耕   | kg · CO <sub>2</sub> -eq/hm <sup>2</sup> | 312.63 | 中国农业大学生物学院 <sup>[20]</sup> |

表 2 Tapio 脱钩弹性状态

| 类别  | 状态    | $\Delta C/C$ | $\Delta AG/AG$ | 弹性系数 e      |
|-----|-------|--------------|----------------|-------------|
| 负脱钩 | 强负脱钩  | >0           | <0             | e<0         |
|     | 弱负脱钩  | <0           | >0             | 0≤e<0.80    |
|     | 扩张负脱钩 | >0           | >0             | e>1.20      |
| 脱钩  | 强脱钩   | <0           | >0             | e<0         |
|     | 弱脱钩   | >0           | >0             | 0≤e<0.80    |
|     | 衰退脱钩  | <0           | <0             | e>1.20      |
| 连接  | 增长连接  | <0           | <0             | 0.80≤e≤1.20 |
|     | 扩张连接  | >0           | >0             | e<0.80      |

表 3 2009-2020 年雅安市农地利用碳排放量

| 年份/碳源 | 化肥       | 农药       | 农膜       | 机械投入    | 灌溉       | 翻耕     | 总排放量 (t) | 碳排放强度 (t/hm <sup>2</sup> ) |
|-------|----------|----------|----------|---------|----------|--------|----------|----------------------------|
| 2009  | 43855.00 | 11606.52 | 18190.71 | 3509.60 | 11344.05 | 358.27 | 88864.16 | 2.09                       |
| 2010  | 44392.00 | 11270.64 | 15874.29 | 3374.30 | 11344.05 | 378.68 | 86633.96 | 2.04                       |
| 2011  | 44809.97 | 11307.96 | 15420.09 | 3456.30 | 11386.69 | 367.03 | 86748.04 | 2.03                       |
| 2012  | 44929.00 | 11507.00 | 15465.51 | 3394.80 | 13851.63 | 370.15 | 89518.10 | 1.72                       |
| 2013  | 44571.00 | 11768.24 | 15897.00 | 3526.00 | 13856.96 | 369.90 | 89989.10 | 1.73                       |
| 2014  | 45824.00 | 11643.84 | 15715.32 | 3550.60 | 14677.72 | 367.22 | 91778.70 | 1.67                       |
| 2015  | 45555.50 | 10486.92 | 15283.83 | 3456.30 | 14539.15 | 362.32 | 89684.02 | 1.64                       |
| 2016  | 45466.00 | 10996.96 | 14875.05 | 3468.60 | 14222.04 | 361.82 | 89390.47 | 1.67                       |
| 2017  | 45131.27 | 10785.48 | 14897.76 | 3468.60 | 14214.04 | 361.45 | 88858.60 | 1.67                       |
| 2018  | 44451.97 | 10561.56 | 14806.92 | 3243.10 | 14315.31 | 362.54 | 87741.39 | 1.63                       |
| 2019  | 42909.88 | 10151.04 | 14579.82 | 3218.50 | 14371.27 | 365.10 | 85595.60 | 1.59                       |
| 2020  | 40128.22 | 9255.36  | 14511.69 | 3148.80 | 14371.27 | 367.39 | 81782.72 | 1.52                       |

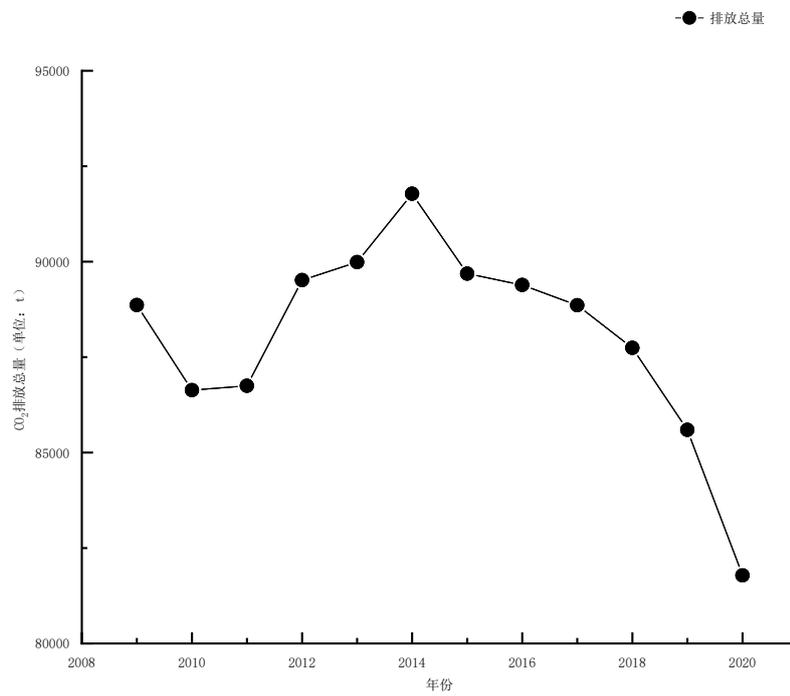


图1 雅安市农地利用碳排放总量变化示意图 (单位: 吨)

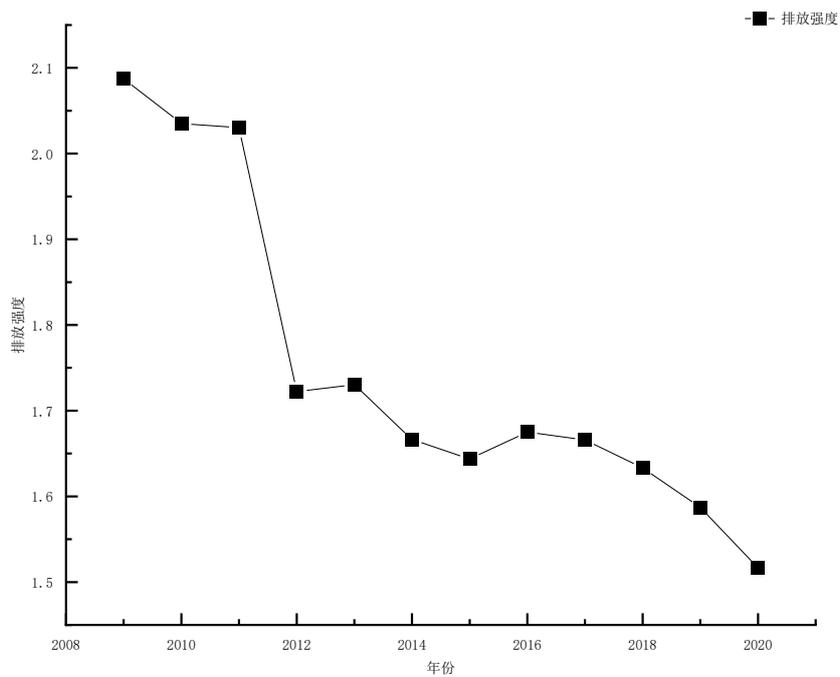


图2 雅安市农业碳排放强度变化示意图

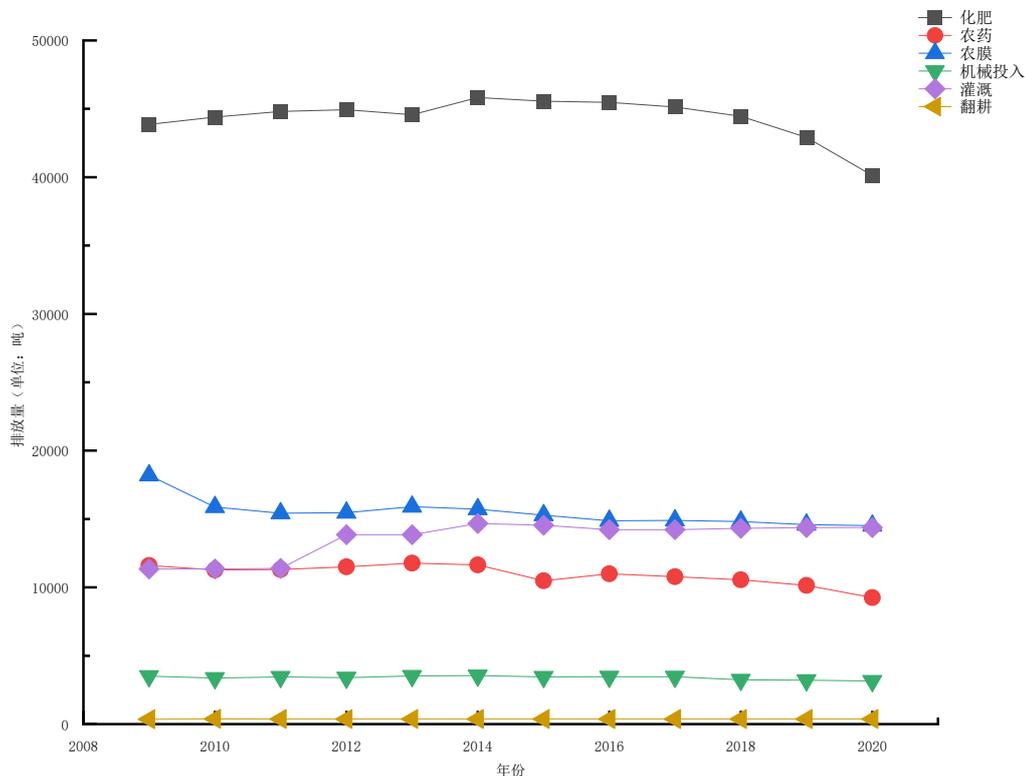


图 3 雅安市 2009-2020 年各类碳源排放量示意图

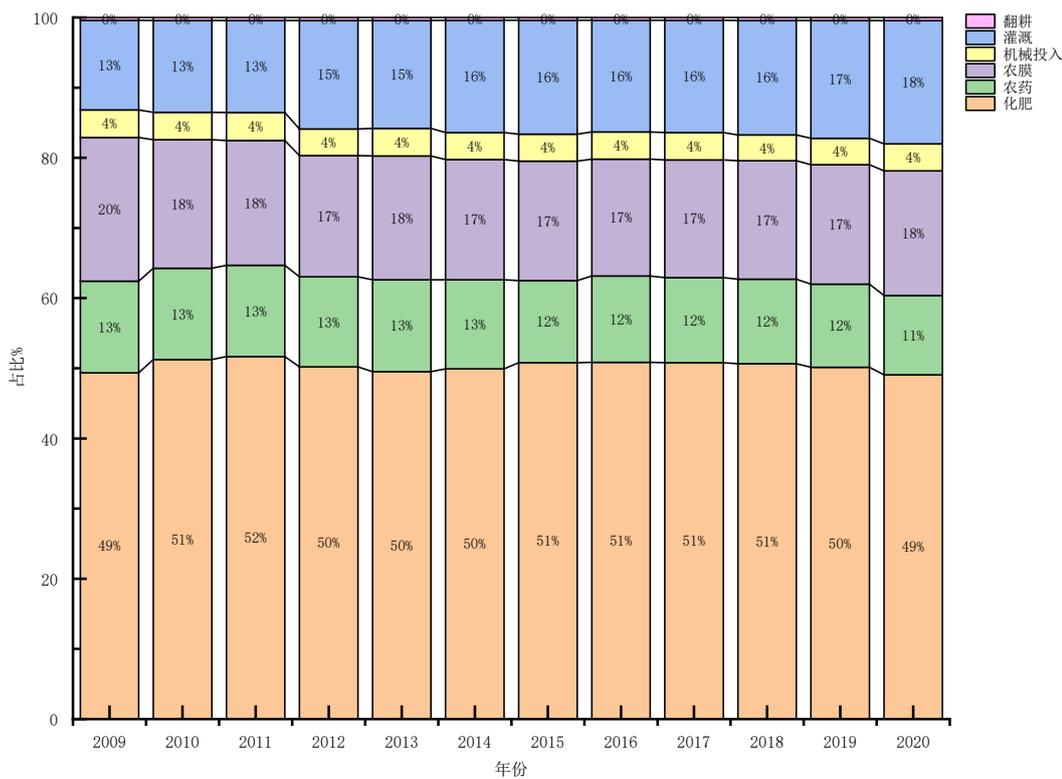


图 4 雅安市 2009-2020 年各类碳源排放量占比示意图

表 4 2009-2020 年年雅安市碳排放与农业经济发展的脱钩情况

| 年份        | 农业总产值 (万元) | 排放量 (t)     | $\Delta C/C$ | $\Delta AG/AG$ | e       | 脱钩状态 |
|-----------|------------|-------------|--------------|----------------|---------|------|
| 2009      | 497071     | 88864.15758 | —            | —              | —       | —    |
| 2009-2010 | 563680     | 86633.96121 | -0.0251      | 0.1340         | -0.1873 | 强脱钩  |
| 2010-2011 | 671781     | 86748.03592 | 0.0013       | 0.1918         | 0.0069  | 弱脱钩  |
| 2011-2012 | 756809     | 89518.0952  | 0.0319       | 0.1266         | 0.2523  | 弱脱钩  |
| 2012-2013 | 790089     | 89989.10321 | 0.0053       | 0.0440         | 0.1197  | 弱脱钩  |
| 2013-2014 | 839940     | 91778.69832 | 0.0199       | 0.0631         | 0.3152  | 弱脱钩  |
| 2014-2015 | 907523     | 89684.0233  | -0.0228      | 0.0805         | -0.2837 | 强脱钩  |
| 2015-2016 | 1013213    | 89390.47178 | -0.0033      | 0.1165         | -0.0281 | 强脱钩  |
| 2016-2017 | 1096030    | 88858.59963 | -0.0059      | 0.0817         | -0.0728 | 强脱钩  |
| 2017-2018 | 1136955    | 87741.39198 | -0.0126      | 0.0373         | -0.3367 | 强脱钩  |
| 2018-2019 | 1292660    | 85595.60468 | -0.0245      | 0.1369         | -0.1786 | 强脱钩  |
| 2019-2020 | 1491799    | 81782.72354 | -0.0445      | 0.1541         | -0.2892 | 强脱钩  |

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

雅安市在研究期内农业碳排放总量呈先下降后波动上升然后持续下降的反“N”型变化趋势,碳排放总量与碳排放强度均处于降低状态。在排放结构方面,化肥的使用是农地利用碳排放的主要贡献源,占比均在 49%以上。雅安市农业碳排放与经济发展脱钩弹性系数为-0.3367—0.3152。脱钩状态的分段点在 2014 年,在此时间前主要以弱脱钩为主,2014 年以后直至研究期期末以强脱钩为主。

#### 3.2 建议

为进一步控制并削减农业碳排放总量,降低农业碳排放强度,同时保持与农业经济发展间的良好脱钩状态,以期雅安市早日实现“双碳”目标,做出如下建议:

一是要加强农业低碳技术创新。控制化肥这类主要碳源的碳排放,大力推广减少化肥施用和农药增效技术,合理使用水溶性肥料和慢速控制肥料,提高肥料利用效率,控制化肥施用碳排放。二是要强化低碳农业政策支持,促进农业经济与碳排放脱钩,积极出台低碳农业发展相关扶持政策,探索推广低碳农业发展模式以及农业低碳发展的新方向,加快绿色低碳转型。三是通过相关机制增强农业主体内生动力。加强低碳农业价值实现机制的建立,以期激发农业经营者和消费者支持低碳农业发展的

内生动力,推动低碳农业的持续健康发展。

#### 参考文献

- [1] 初巧智,师帅.黑龙江省农业经济与碳排放的关系研究——基于 Tapio 脱钩模型[J].山西农经,2021(11):104-107.
- [2] FAO.The state of food and agriculture 2016:climate change,agriculture and food security[R].Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.
- [3] 张俊飏,何可.“双碳”目标下的农业低碳发展研究:现状、误区与前瞻[J].农业经济问题,2022,43(9):35-46.
- [4] 田云,尹斋昊.中国农业碳排放再测算:基本现状、动态演进及空间溢出效应[J].中国农村经济,2022(3):104-127.
- [5] 朱丽君,王光宇.农业碳足迹研究——以浙江省为例[J].湖北农业科学,2015(14):3546-3548.
- [6] 岳立,赵婷.甘肃省农业碳足迹动态变化研究[J].北方经济,2012(17):67-69.
- [7] 徐宥,王辉,韩秋风,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.
- [8] Cui Yu,Khan S U,Sauer J,et al.Exploring the spati-otemporal heterogeneity and influencing factors of agricultural carbon footprint and carbon footprint intensity: Embodying carbon sink effect[J]. Science of the Total Environment, 2022, 846:157507.
- [9] 桂河,李静,尚梦媛.“双减”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,2021,15(6):37-44.C
- [10] 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.-
- [11] 朱江玲,郑大立.碳排放与社会经济发展[J].科学与社会,2013(2).
- [12] 唐建荣,张白羽.中国经济增长的碳排放脱钩分析[J].统计与信息论坛,2014(1):66-70.
- [13] 田云,张俊飏,李波.基于投入角度的农业碳排放时空特征及因素分解研究---湖北省为例[J].农业现代化研究,2011(6):752-755
- [14] 刘洁,梁红梅,曾业隆等.基于投入视角的山东省农地利用碳排放与经济发展脱钩研究[J].水土保持通报,2016, 36(04):303-308.
- [15] 吴昊明,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.
- [16] 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.
- [17] 孙秀梅,张慧.基于脱钩模型的山东省碳排放与经济增长时空关系研究[J].资源开发与市场,2016, 32(2):131-134.
- [18] 刘巽浩,徐文修,李增嘉等.农田生态系统碳足迹法:误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率(续)[J].中国农业资源与区划,2014,35(01):1-7.
- [19] 段华平,张悦,赵建波,等.2011.中国农田生态系统的碳足迹分析.水土保持学报,25(5):203-208.
- [20] 中国农业大学生物学院.[http://cbs.cau.edu.cn/?key=%BB%AA%B6%AB%CA%A6%B7%B6%B4%F3%D1%A7&category\\_path=01.43.22.00.00.00&att=1000002:49](http://cbs.cau.edu.cn/?key=%BB%AA%B6%AB%CA%A6%B7%B6%B4%F3%D1%A7&category_path=01.43.22.00.00.00&att=1000002:49)
- [21] 美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL). [www.ornl.gov](http://www.ornl.gov).

**版权声明:** ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**