

分类号 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_  
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

# 硕士学位论文

论文题目 甘肃省农业碳排放驱动因素与脱钩效应研究

研究生姓名: 梁蒙蒙

指导教师姓名、职称: 武翠芳 教授

学科、专业名称: 理论经济学(人口、资源与环境经济学)

研究方向: 生态经济与可持续发展

提交日期: 2023年5月30日

## 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 梁蒙蒙 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 武翠芳 签字日期： 2023.5.30

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 梁蒙蒙 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 武翠芳 签字日期： 2023.5.30

# **A Study on the Driving Factors and Decoupling Effects of Agricultural Carbon Emissions in Gansu Province**

**Candidate: Liang Mengmeng**

**Supervisor: Wu Cuifang**

## 摘 要

气候变化是人类面临的全球性问题,碳排放的急剧增加使温室效应愈演愈烈。冰川消融、灾害频发,气温升高正在影响人类生活的方方面面。农业既受气候变化的影响又影响气候变化。一方面,农业系统十分脆弱,极易受到气候变化的影响,全球每年因气候变化而减产的稻米、小麦、大豆大约为 300 万吨、900 万吨和 200 万吨,气候变化可以解释全球粮食产量波动的 32%-39%。另一方面,人口增加导致农业生产的扩大,增加了温室气体排放,加剧了气候变化,全球至少五分之一的温室气体来自农业产生的排放,包括种植业、林业、渔业和畜牧养殖。农业不仅是主要的温室气体排放源,也是国家发展的支柱产业,在全社会节能降碳大环境下,农业低碳转型也成为业内关注的热点,如何实现农业减排目标和实现其可持续发展是当前迫切需要解决的问题。

甘肃省是全国主要的粮食作物和畜牧业生产基地,其低碳农业的发展对促进“双碳”目标的实现具有重大的意义。本文根据甘肃省种植业和畜牧业的发展现状,合理构建了甘肃省农业碳排放体系,选择 17 个农业碳源对甘肃省 2005~2020 年间农业碳排放进行了测算;其次,从时间和空间视角对甘肃省农业的碳排放变化特征、结构变化特征、农业的碳排放强度变化特征进行了研究。在此基础上,利用 LMDI 模型研究甘肃省农业碳排放的驱动因素,并利用 TAPIO 脱钩模型对农业碳排放与农业经济发展之间的脱钩效应进行研究。

本文具体研究结果如下:

**碳排放总量方面:** 2005~2020 年甘肃省农业碳排放总量总体呈波动上升趋势,其中畜牧业碳排放增幅最大,增幅为 42.39%,种植业的碳排放在此期间上升了 35.57%。截止到 2020 年,种植业和畜牧业碳排放分别占甘肃省农业碳排放的 29.15%和 70.85%。

**碳排放强度方面:** 甘肃省农业碳排放强度逐年递减,下降幅度为 37.75%;甘肃省 14 地市农业碳排放量及碳排放强度呈现一定的空间差异性,以畜牧业为主、粮食作物种植面积占比大的地市碳排放量大、碳排放强度高,工业相对发达城市农业碳排放强度低。

**碳排放结构方面:** 畜牧业碳排放占农业碳排放的比重在六成左右,碳源以牛

和羊为主，两者分别占畜牧业碳排放的 55.44%和 34.77%，种植业占农业碳排放的四成左右，主要碳源是化肥和农膜，两者分别占 39%和 24.24%；

驱动因素方面：通过 LMDI 模型分析得出，总效应呈上升状态，农业生产效率因素和农业劳动力因素对农业碳排放具有抑制作用，农业经济发展水平因素和产业结构因素对农业碳排放具有正向驱动作用。其中，农业生产效率因素对碳排放的抑制作用最强，农业经济发展水平因素对碳排放的驱动作用最强，是甘肃省农业碳排放增加的主要驱动因素。

脱钩效应方面：2005~2020 年甘肃省农业碳排放与农业经济增长之间的脱钩状态出现弱脱钩、扩张链接和强脱钩 3 种类型，呈现波动期—强脱钩期—弱脱钩期的发展趋势，整体以弱脱钩和强脱钩为主，由弱脱钩逐渐向强脱钩转变，脱钩状态良好。

本文对甘肃省农业碳排放做了全面综合的分析，基于得出的研究结论，提出关于甘肃省农业碳减排的对策建议如下：1) 推进科技运用，提升畜禽养殖业低碳发展水平；2) 提高农业物资利用的效率，减少单位农业物资的投入；3) 尊重区域差异，因地制宜制定碳减排措施；4) 立足资源优势，积极调整农业产业结构；5) 加大技术创新力度，提高农业生产效率。

**关键词：**农业碳排放 甘肃省 LMDI 模型 脱钩效应 低碳农业

## Abstract

Climate change is a global issue facing humanity, and the sharp increase in carbon emissions has intensified the greenhouse effect. Glacier melting, frequent disasters, and rising temperatures are affecting all aspects of human life. Agriculture is influenced by both climate change and climate change. On the one hand, the agricultural system is extremely fragile and vulnerable to the impact of climate change. The annual reduction in global production of rice, wheat, and soybeans due to climate change is approximately 3 million tons, 9 million tons, and 2 million tons. Climate change can explain 32% -39% of global food production fluctuations. On the other hand, the increase in population has led to the expansion of agricultural production, increased greenhouse gas emissions, and exacerbated climate change. At least one fifth of global greenhouse gas emissions come from agriculture, including farming, forestry, fisheries, and animal husbandry. Agriculture is not only the main source of greenhouse gas emissions, but also a pillar industry for national development. In the context of energy conservation and carbon reduction in the entire society, the low-carbon transformation of agriculture has become a hot topic of industry attention. How to achieve agricultural emission reduction goals and achieve sustainable development is an urgent problem that needs to be solved.

Gansu Province is the main production base for grain crops and animal husbandry in China, and the development of low-carbon agriculture in Gansu Province is of great significance for promoting the achievement of the "dual carbon" goal. Based on the current development status of planting and animal husbandry in Gansu Province, this article reasonably constructed the agricultural carbon emission system in Gansu Province, and selected 17 agricultural carbon sources to calculate the agricultural carbon emissions in Gansu Province from 2005 to 2020; Secondly, the characteristics of carbon emission changes, structural changes, and carbon emission intensity changes in agriculture in Gansu Province were studied from a temporal and spatial perspective. On this basis, the LMDI model is used to study the driving factors of agricultural carbon emissions in Gansu Province, and the TAPIO decoupling model is used to study the decoupling effect between agricultural carbon emissions and agricultural economic development.

The specific research results of this article are as follows:

In terms of total carbon emissions: From 2005 to 2020, the total agricultural carbon emissions in Gansu Province showed a fluctuating upward trend, with the largest increase in carbon emissions from animal husbandry at 42.39%, while carbon emissions from planting increased by

35.57% during this period. As of 2020, carbon emissions from planting and animal husbandry accounted for 29.15% and 70.85% of agricultural carbon emissions in Gansu Province, respectively.

In terms of total carbon emissions, the intensity of agricultural carbon emissions in Gansu Province has been decreasing year by year, with a decrease of 37.75%; There are certain spatial differences in agricultural carbon emissions and carbon emission intensity among 14 cities in Gansu Province. Cities with animal husbandry as the main industry and a large proportion of grain crop planting area have higher carbon emissions and carbon emission intensity, while cities with relatively developed industries have lower agricultural carbon emission intensity.

In terms of carbon emission structure: The proportion of carbon emissions from animal husbandry to agricultural carbon emissions is about 60%, with cattle and sheep as the main carbon sources, accounting for 55.44% and 34.77% of the carbon emissions from animal husbandry, respectively. Planting accounts for about 40% of agricultural carbon emissions, with fertilizers and agricultural film as the main carbon sources, accounting for 39% and 24.24% respectively;

In terms of driving factors: Through LMDI model analysis, it is found that the total effect is on the rise, agricultural production efficiency factors and agricultural labor factors have inhibitory effects on agricultural carbon emissions, and agricultural economic development level and industrial structure factors have a positive driving effect on agricultural carbon emissions. Among them, agricultural production efficiency factors have the strongest inhibitory effect on carbon emissions, while agricultural economic development level factors have the strongest driving effect on carbon emissions, making them the main driving factor for the increase in agricultural carbon emissions in Gansu Province.

In terms of decoupling effect: From 2005 to 2020, there were three types of decoupling states between agricultural carbon emissions and agricultural economic growth in Gansu Province: weak decoupling, expansion linkage, and strong decoupling, showing a trend of fluctuation period - strong decoupling period - weak decoupling period. Overall, weak decoupling and strong decoupling were the main forms, gradually transitioning from weak decoupling to strong decoupling, and the decoupling state was good.

This article provides a comprehensive and comprehensive analysis of agricultural carbon emissions in Gansu Province. Based on the

research findings, suggestions for reducing carbon emissions in agriculture in Gansu Province are proposed as follows: 1) Promote the application of technology to enhance the low-carbon development level of livestock and poultry breeding industry; 2) Improve the efficiency of agricultural material utilization and reduce the input of agricultural materials per unit; 3) Respect regional differences and develop carbon reduction measures tailored to local conditions; 4) Based on resource advantages, actively adjust the agricultural industrial structure; 5) Increase technological innovation efforts and improve agricultural production efficiency.

**Keywords:** Agricultural carbon emissions; Gansu Province; LMDI model; Decoupling effect; Low-carbon agriculture

# 目 录

<b>1 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的与意义	2
1.2.1 研究目的	2
1.2.2 研究意义	3
1.3 国内外研究综述	3
1.3.1 国内研究综述	4
1.3.2 国外研究综述	6
1.3.3 文献述评	8
1.4 研究内容、方法、创新点及技术路线	9
1.4.1 研究内容	9
1.4.2 研究方法	10
1.4.3 创新点	10
1.4.4 技术路线	11
<b>2 概念界定与理论基础</b>	<b>12</b>
2.1 基本概念	12
2.1.1 农业	12
2.1.2 农业碳排放	12
2.1.3 农业碳排放强度	13
2.2 理论基础	13
2.2.1 可持续农业理论	13
2.2.2 农业碳脱钩理论	14
<b>3 甘肃省农业碳排放量测算及时空特征分析</b>	<b>15</b>
3.1 甘肃省农业发展现状	15
3.1.1 甘肃省地理概况	15
3.1.2 甘肃省农业经济发展概况	15
3.2 甘肃省农业碳排放测算方法及数据来源	18

3.2.1 农业碳排放测算 .....	18
3.2.2 数据来源与处理 .....	20
3.3 甘肃省农业碳排放测算及时空变化分析 .....	20
3.3.1 农业碳排放时序变化分析 .....	21
3.3.2 农业碳排放结构动态变化分析 .....	23
3.3.3 农业碳排放空间变化分析 .....	26
<b>4 甘肃省农业碳排放驱动因素分析 .....</b>	<b>30</b>
4.1 LMDI 模型 .....	30
4.2 驱动因素计算结果及分析 .....	31
4.2.1 农业生产效率因素 .....	33
4.2.2 农业产业结构因素 .....	34
4.2.3 农业经济水平因素 .....	34
4.2.4 劳动力因素 .....	35
<b>5 甘肃省农业碳排放与农业经济脱钩分析 .....</b>	<b>36</b>
5.1 TAPIO 脱钩模型 .....	36
5.2 甘肃省农业碳排放与农业经济增长脱钩状态分析 .....	37
<b>6 结论、建议与展望 .....</b>	<b>40</b>
6.1 研究结论 .....	40
6.2 研究建议 .....	41
6.3 研究展望 .....	43
<b>参考文献 .....</b>	<b>44</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>48</b>

# 1 绪论

## 1.1 研究背景

人类活动导致的温室气体排放是造成气候变暖的主要驱动因素，因此，低碳经济成为全球多个领域关注的焦点。中国是一个负责任的大国，不断为全球气候的治理工作做出中国贡献，我国确定了 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的碳减排总目标，并且 2021 年我国将碳达峰、碳中和首次写入政府工作报告，我国推进双碳战略，为全球的可持续发展贡献中国力量，这不仅仅是作为大国的责任担当，也是中国从高速发展转向高质量发展的重大转折。中国用世界占比 9% 的耕地满足了世界 20% 人口的粮食需求，因此，在确保粮食安全的前提下减少温室气体排放是中国面临的重要任务。

为实现低碳目标，各产业都应该积极促进低碳减排，推动低碳循环经济的发展。农业作为基础产业，它的生产和运营过程中会产生很多温室气体，主要是 CO<sub>2</sub>(二氧化碳)、CH<sub>4</sub>(甲烷)和 N<sub>2</sub>O(氧化亚氮)三种气体。2016 年世界资源研究所将碳排放大致分为四大类来显示全球温室气体排放的来源，包括能源消费(73.2%)、农业生产(18.4%)、工业过程(5.2%)和垃圾(3.2%)。其中农业作为第二大类排放的产业，其碳源分布主要为畜禽粪便(5.8%)、农业土壤(4.1%)、作物燃烧(3.5%)、耕地(1.4)、水稻栽培(1.3%)和其他(1.5%)。中国作为农业大国，农业活动基数大，增长快，如果不采取相对应的减排措施，农业活动产生的温室气体将进一步增大，我国农业生产活动产生的温室气体排放比例为 16%-17%，且排放水平以年均 5% 的速度增长，高于世界农业生产活动排碳平均水平<sup>[1]</sup>。当前我国农业温室气体排放以“非碳”气体为主，CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 两类温室气体在农业碳排放中占比超过七成；在农业碳排放总量中，种植业占比超过五成，养殖业占比四成。由于农业机械化的发展，农业碳排放来源从种植业、养殖业两大碳源为主逐步发展为种植业碳排放、养殖业碳排放、能源消耗碳排放三大碳源为主的局面。截至 2018 年，能源消耗带来的碳排放占比已达到农业碳排放的 27.18%。面对如此大的减排压力，2021 年 10 月 26 日，国务院印发了《2030 年前碳达峰行动方案》，特别指出“推进农业农村减排固碳”；随后，农业农村部、

国家发展改革委印发《农业农村减排固碳实施方案》，在保障粮食和重要农产品有效供给的前提下，我国将实施化肥减量增效、畜禽低碳减排、秸秆综合利用等 10 大行动，降低农业温室气体排放量和碳排放强度，推进农业生产节能降耗，增强农田水产固碳增汇的能力，积极发展农村的可再生能源。随着农业碳减排理念和行动的深入贯彻，农业碳减排对国家双碳目标的实现具有越来越重要的意义。

近些年来，国家倾斜更多的资源来推进西部大开发，推动经济重心西移，西部农业的发展也越来越引起国家重视，传统农业改造滞后、农业资源利用效率低、农业技术水平不高等原因导致西部农业发展呈现高投入高消耗的状态，更加加剧了农业碳排放的增长。作为西部地区重要的农业大省，甘肃总土地面积居全国第 7 位，全省耕地面积 7814.21 万亩，占全省土地面积的 10.97%，耕地面积位居全国第 10 位，是全国现代种业三大核心基地之一。根据国家统计局公布的 2022 年全国及各省（区市）粮食产量数据，甘肃在 2020 年播种粮食面积为 4049.7 万亩，粮食总产量为 1265 万吨，较去年同期增长了 34 万吨，甘肃省粮食产量已经连续三年保持在 1200 万吨以上。现有天然草场 2.69 亿亩，草场面积位居全国第 6 位，作为我国五大牧区之一，其羊、牛存栏分别跃居全国第 3 位和第 9 位，是我国重要的牛羊肉生产基地之一。甘肃省农业快速发展的同时也加剧了温室气体的排放，每年因农业活动所产生的碳排放量不断增加，严重影响国家碳达峰目标的实现，为了更好的响应党中央碳减排政策，2022 年 7 月，甘肃省发布了《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实施意见》，积极推进“双碳”目标的工作落实。所以，对甘肃省农业的碳排放进行科学、精确的评估，对于制定有效的农业减排措施具有重大的意义。

## 1.2 研究目的与意义

### 1.2.1 研究目的

本文从甘肃省农业碳排放角度入手，结合相关研究和甘肃省的实际合理选取了 17 个碳源指标，利用碳源系数法对甘肃省的农业碳排放进行测算，并在此基础上运用 LMDI 模型对甘肃省农业碳排放的驱动因素进行定量分析，然后运用 TAPIO 脱钩模型计算甘肃省农业碳排放和经济发展水平的脱钩关系，最后对甘

肃省农业碳减排提出相应的对策建议。研究目的具体包括三个方面，一是根据甘肃省实际选取碳源构建农业碳排放测算指标体系，对甘肃省农业碳排放水平进行测算，然后对其结构以及时空变化进行分析；二是运用 LMDI 模型定量分析甘肃省农业碳排放的驱动因素，三是运用 TAPIO 脱钩模型研究甘肃省农业碳排放和农业经济发展水平之间的脱钩关系，对甘肃省农业碳减排进行全面的研究，为实现甘肃省低碳农业发展提出相应的对策建议，期望为提升甘肃省农业现代化水平、推动甘肃省低碳农业发展贡献力量。

## 1.2.2 研究意义

### （1）理论意义

农业碳减排是全行业碳减排的重要组成部分，目前学术界对农业碳减排的研究主要集中在国家或者区域层面，对甘肃省的农业碳减排研究较少，而且多以种植业为主，只是对狭义的农业进行了相关研究，缺少对甘肃省低碳农业发展的综合评价及农业碳排放影响因素的相关研究，本研究以甘肃省为研究对象，完善了整个广义的农林牧渔低碳农业的研究框架，主要运用低碳农业、可持续农业理论和农业碳脱钩理论等多个不同的研究理论对甘肃省农业碳排放的现状进行分析研究，为甘肃省低碳农业的发展决策提供了量化的指标依据。

### （2）实践意义

本文通过合理构建了农业碳排放测算体系，对甘肃省农业碳排放总体情况进行研究，同时对甘肃省 2005-2020 年的农业碳排放总量、碳排放强度以及碳排放结构进行了空间和时间上的差异性分析，对甘肃省农业碳排放的现状进行系统的研究，然后在这个基础上运用 LMDI 模型对其驱动因素进行研究，最后运用 TAPIO 脱钩模型对甘肃省农业碳排放和经济发展的脱钩关系进行分析，完善甘肃省农业碳排放的相关数据信息，为甘肃省农业碳减排提供参考信息，对于促进甘肃省农业碳减排具有一定的现实意义。

## 1.3 国内外研究综述

本章将围绕本文的研究目的，从农业碳源和碳排放量核算、农业碳排放影响因素研究、农业碳排放效率的分析以及农业碳排放与农业经济发展关系的研究等

方面,对国内外相关文献展开了梳理和评论,为后续研究框架的构建打下了基础。

### 1.3.1 国内研究综述

#### (1) 农业碳源和碳排放量核算

李国志、李宗植(2010)利用 LMDI 模型计算中国农业能耗碳排放,并在此基础上提出了中国农业能耗碳排放的测算方法,随后其他学者相继开展了关于中国农业能耗碳排放的相关指标及计量方法的研究<sup>[2]</sup>。他们从能源消费角度对中国农业 CO<sub>2</sub> 排放量进行了测算,紧接着国内学者又陆续对农业碳排放的指标体系和碳排放测算方法进行了研究。田云(2011)以化肥、农药、农膜和农用柴油为主要碳源,在湖北开展了农田碳排放的调查<sup>[3]</sup>。李俊杰(2012)在田云碳源研究的基础上加入翻耕和农业灌溉两类碳源,从农业能源投入和土地利用两方面测算农业碳排放总量<sup>[4]</sup>。冉锦成(2017)以 9 类反刍动物肠道发酵和粪便排放所产生的温室气体作为衡量碳排放指标,对新疆畜牧业碳排放进行了测算,并利用 TAPIO 脱钩模型探讨新疆畜牧养殖经济效益与碳排放的脱钩情况<sup>[5]</sup>。何艳秋(2018)在以上研究的基础上又加入了秸秆燃烧对农业碳排放的影响<sup>[6]</sup>。随着碳源研究的进一步发展,很多学者从更为全面的角度对农业碳排放进行了综合测算,基本上覆盖了农业生产的各大行业,其中的碳源包括了农用物资投入、水稻种植、畜禽养殖以及土壤排放等。韦玉琼(2022)将 18 个碳源划分为产业碳源、生活碳源和生态碳源三个类型,并选择其中碳排放量较多或增长较快的 6 类碳源对全国农业碳排放进行了分析<sup>[7]</sup>。邱子健(2022)从种植业和畜牧业两方面对江苏省农业碳排放进行了测算分析,种植业主要包含以几个碳源:农药、化肥、农膜生命周期隐含碳、农业用电、农业柴油、水稻种植以及农用地 N<sub>2</sub>O 排放。畜牧业碳源主要包含动物肠道发酵和动物粪便管理<sup>[8]</sup>。田云(2022)在水稻种植碳排放和畜禽养殖碳排放测算路径不变的基础上,对农用物资投入碳排放方面,在农用柴油、电力的基础上增加了其他能源类别,包括原煤、洗精煤、汽油、天然气等<sup>[9]</sup>。

#### (2) 农业碳排放影响因素研究

我国学者对农业碳排放影响因素主要是运用 Kaya 恒等式变形、LMDI 分解方法、STIRPAT 模型和灰色关联分析法等方法进行研究。桂河(2021)以农地利用、农田土壤、水稻种植和畜牧业等四大类农业碳源为依据,测量了宁夏农业的

碳排放,并使用 Kaya 恒等式对宁夏农业的碳排放进行了研究。结果显示,农业生产效率、农业产业结构、农业劳动力等因素对农业的碳排放起到了负面的推动作用,农业的经济发展水平和城市化水平对农业的碳排放起到了积极的作用<sup>[10]</sup>。刘杨(2022)运用农资投入、耕地利用和牲畜养殖 3 种碳源对山东省农业的碳排放进行了测算,并利用 LMDI 模型对其进行了分析,结果表明:农业生产效率,农业产业结构,区域产业结构,劳动力资源等因素对山东省农业的碳排放产生了很大的影响,而地区的经济发展水平以及城市化率等因素是导致农业碳排放增长的重要因素<sup>[11]</sup>。李兰兰(2020)运用 STIRPAT 模型对长江经济带农业碳排放影响因素进行分析,结果表明农业产业结构、农业就业人员、农村居民可支配收入、农业技术水平、城镇化率对区域农业碳排放影响显著<sup>[12]</sup>。宋艺(2020)基于 6 种碳排放源并利用灰色关联法对全国农业碳排放影响因素进行动态分析,认为对全国碳排放总量的关联度从大到小依次为化肥、柴油、农药、农膜、灌溉和翻耕<sup>[13]</sup>。信猛(2023)等人利用我国 30 个省份 2007~2017 年的面板数据,构建区域间农业贸易碳排放转移网络,探究各省在农业贸易碳排放转移网络中角色对各省份农业直接碳排放的影响。实证表明农业贸易碳排放流入强度、城镇化水平、农业机械投入强度以及平均每一农业劳动力生产粮食产量对农业直接碳排放有促进作用;农村居民人均纯收入、农业产业结构对农业直接碳排放有抑制作用;农业贸易碳排放流出强度、传输介质能力以及影响力对农业直接碳排放没有显著性影响<sup>[14]</sup>。常青(2023)基于碳排放公平性评价模型研究河南省农业碳排放时空演化,发现农业从业人口、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、财政教育支出是农业碳排放空间分异的关键因素,且各因子交互作用较强<sup>[15]</sup>。同时,有学者围绕金融对低碳农业发展的影响问题开展了多角度深层次的研究,仇冬芳等(2016)构建农业碳减排与农村金融支持耦合协调度模型,发现我国农业碳减排与农村金融支持耦合协调度整体水平较低,即农村金融对减少农业碳排放有正向作用<sup>[16]</sup>。张跃超(2013)的研究认为农村金融发展对农业碳排放有明显的抑制作用<sup>[17]</sup>。在农业碳排放影响因素的研究中,经济因素在行政区域和大多省份中是推动农业碳排放增加的最主要的因素,产业结构因素、效率因素、产业结构因素、城市化水平和劳动力规模因素对碳排放量的增加具有一定的抑制作用,但在不同的省份这些因素对碳排放量的抑制与否或者抑制作用的大小又存在明显的差异。

### (3) 农业碳排放与农业经济发展关系的研究

国内学者对农业碳排放和农业经济发展两者关系的研究主要是运用 EKC 曲线和 TAPIO 脱钩模型进行分析。比如张再杰 (2022) 用 Tapio 弹性指数分析了贵州省农业碳排放和经济发展之间的关系, 研究得出贵州农业碳排放与经济发展呈现强负脱钩、扩张连接、弱脱钩交替的波动阶段以及由弱脱钩到强脱钩的协调发展阶段<sup>[18]</sup>。黄伟文(2021)分析并验证了福建省农业碳排放与农业经济增长关系的环境库兹涅茨曲线 (EKC), 结果显示福建省农业碳排放和农业经济增长之间的关系符合库兹涅茨曲线, 呈“倒 U”形, 而且福建省农业碳排在“倒 U”型曲线的右端, 处于下降阶段<sup>[19]</sup>。丁宝根 (2019) 和梁滢月 (2022) 分别对长江经济带和长三角地区进行 EKC 检验分析, 得出长江经济带和长三角农业碳排放与农民人均收入之间均呈现 EKC 曲线关系<sup>[20][21]</sup>。蒋添诚 (2021) 基于种植业和畜牧业包括的 8 类碳源对湖北省农业碳排放强度进行了测算, 然后对农业碳排放和农业经济发展水平进行 TAPIO 脱钩分析, 结果显示湖北省农业碳排放强度在 2012 年以来呈持续下降趋势, 在 2015~2018 年表现强脱钩阶段<sup>[22]</sup>。马光辉 (2022) 创新研究了中国渔业经济碳排放和渔业经济的脱钩关系, 2009~2020 年期间, 中国渔业经济的碳排放呈现出先增长后下降的趋势, 渔业经济的脱钩状态由弱脱钩向强脱钩转变<sup>[23]</sup>。除此之外, 一些学者还围绕农业碳足迹、农业与农产品贸易隐含碳等问题展开了深度探讨。结果显示, 隐含碳在农业碳排放中占据较大比重。

## 1.3.2 国外研究综述

### (1) 农业碳源和碳排放量核算

相对于其他产业碳排放的来源, 农业碳源呈现多样性的特点, 国外农业碳排放的碳源测算与研究起步相对较早。2008 年世界银行指出农业排放的温室气体主要包括 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>。其中, N<sub>2</sub>O 主要来自农田的直接和间接排放、田间焚烧、放牧以及动物粪便<sup>[24]</sup>, CH<sub>4</sub> 主要来自反刍牲畜肠道发酵、水稻种植、动物粪便<sup>[25]</sup>, 在学术界, 人们一般都认为, 畜禽养殖活动会产生 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 两类温室气体, 主要来源是畜禽粪便处理与反刍牲畜肠道发酵。一些学者发现, 家庭畜牧养殖肠道发酵产生的 CH<sub>4</sub> 中 N<sub>2</sub>O 大概占总排量的 69.3%<sup>[26]</sup>, CO<sub>2</sub> 主要来自农机、化肥和其他化学投入品的生产和使用<sup>[27]</sup>。除此之外, Peipei (2021) 秸秆焚

烧和稻田  $\text{CH}_4$  排放等碳源基础上提出农业灌溉也是导致作物生产过程中碳排放的原因之一<sup>[28]</sup>。从农业源温室气体排放内部结构来看, FAO 指出了农业前五位碳源, 依次是:土壤、反刍牲畜肠道发酵、生物质燃烧、水稻种植和畜禽粪便。许多研究表明, 农业碳源具有多样性和广泛性, 因地制宜的确定农业碳源是降低区域农业碳排放的关键。

### (2) 农业碳排放影响因素的研究

国外不同的学者们对影响因素的研究所采用的方法是多种多样的, Rehman(2020)指出在提高农业产值的同时, 还会降低  $\text{CO}_2$  的排放。所以, 经济因素是造成温室气体排放增加的一个重要原因, 其影响趋势主要呈现为“先促进后制约”的倒 U 型非线性效应<sup>[29]</sup>; Zhang(2020)研究发现土壤 pH、生物炭碳氮比生物炭施用量对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响最大<sup>[30]</sup>; Yadav (2017) 利用修订后的反硝化分解模式对加拿大地区的碳排放量进行了预测, 研究发现, 加强对灌溉和施肥的管理, 有利于降低农业碳排放量<sup>[31]</sup>; Lina (2020) 等使用对数平均迪氏指数 (LMDI)定量研究了农业碳排放受农业效益提高、从业人员规模的变化以及农业结构的影响程度<sup>[32]</sup>。通过众多国内外学者运用 LMDI 模型等农业碳排放影响因素的分析来看, 能源消耗的增加、经济增长、人均收入水平的提高等因素会促进农业碳排放的产生, 因为经济发展所消耗大量的物质能源增加了农业碳排放, 而农业产值的增加、生产效率等因素对农业碳排放有抑制作用, 这是由于先进的技术以及合理的政策会提高农业的生产效率, 间接的减少了农业碳排放。

### (3) 农业碳排放和农业经济发展关系的研究

经济发展和碳排放的相互关系一直是国外研究的热点, 从目前的研究成果来看, 一般采用定量分析的研究方法, 运用最广范的一般是 EKC 和 TAPIO 脱钩模型。Li and Jiang (2020) 利用弹性脱钩模型研究了中、美、印、俄、日、德六个国家碳排放与经济脱钩关系, 发现相对于发展中国家来说, 发达国家的脱钩状态更加稳定, 技术研发水平是影响碳排放脱钩关系的重要因素<sup>[33]</sup>。Sajjad Ali (2019) 通过自回归分布滞后模型(ARDL)探讨了巴基斯坦农业发展水平和农业  $\text{CO}_2$  放量之间的因果关系<sup>[32]</sup>。Lantz 和 Feng (2006) 利用加拿大五个地区 30 年的面板数据, 研究发现这五个地区的碳排放量与其人均生产总值之间没有明显的相关性<sup>[33]</sup>, 但是也有学者提出了相反的观点, Alamdarlo 运用 EKC 的研究方法对

伊朗的农业碳排放量和人均国内生产总值的关系进行了检验,结果表明人均国内生产总值和人均收入的关系呈现“倒 U 型”的曲线关系。Muhammad 等(2016)采用了自回归分布滞后(ARDL)协整方法,评估了 1972-2013 年期间巴基斯坦的金融发展、人均实际收入、人均实际收入的平方、人均能源消费和开放程度与人均二氧化碳排放的关系,以此来判断各个变量对人均二氧化碳的排放程度<sup>[34]</sup>。LiR(2020)使用弹性脱钩理论研究世界主要六大碳排放国(中国、美国、印度、俄罗斯、日本和德国)的经济脱钩水平,研究结果发现发达地区因先进技术带来的环境效益优于欠发达地区,而经济发展状态也更理性、更稳定<sup>[35]</sup>。KANG Wenmei(2021)运用 TAPIO 脱钩指数测度中国 264 个地级市碳排放与经济增长的脱钩关系,探究碳排放与人均 GDP、产业结构等社会经济发展特征的关系,结果证明随着时间的推移,实现强脱钩的城市数量显著增加,人均碳排放量与人均 GDP 之间存在倒 U 型曲线关系,符合 EKC 曲线假<sup>[36]</sup>。

### 1.3.3 文献述评

综上所述,国内外学者在农业碳排放方面进行了许多有价值的研究,主要侧重于对农业碳源和农业碳排放影响因素方面的研究,围绕低碳农业开展了大量的实证和模型研究,并逐渐减落实到排措施等方面。学术界对农业碳排放测算体系的构建越来越完善,基本上以农用物资、水稻种植、畜禽养殖、农田土壤利用为主要的四大类,并在每个大类中,根据研究区域农业生产活动的特点进行适当地调整,农业碳排放计算主要以碳源系数法为主。在农业碳排放影响因素的研究方面,主要是运用 Kaya 恒等式变形、LMDI 分解方法、STIRPAT 模型和灰色关联分析法等方法进行研究,碳排放影响因素的指标体系已经相对完善,并且根据研究区域的差异在指标上各有侧重。在研究对象上,国内当前的研究多聚焦于全国范围或农业大省以及特定领域的研究。

尽管学术界对农业碳排放的研究逐渐完善,但是仍有深入研究的空间:

在双碳背景下,甘肃省低碳农业的发展至关重要,可是目前缺少对甘肃省农业碳排放相关的系统性研究,对甘肃省农业碳排放的研究局限于种植业的碳排放研究。国际粮农组织(FAO)曾指出在农业碳排放中,动物肠道发酵产生的碳排放占比高达 32%,畜禽粪便处理产生的碳排放占比为 7%,因此畜牧业是农业碳

排放来源的重要组成部分。那么作为我国重要的粮食生产基地和畜牧业养殖基地,甘肃省畜牧业的碳排放更是不容忽视。本研究以甘肃省为研究对象,完善了甘肃省低碳农业的研究框架,丰富了甘肃省农业碳排放的相关研究。另外,对甘肃省农业碳排放的相关研究多以时序比较来研究,甘肃省地域辽阔,省域内生态环境和资源禀赋差别较大,目前缺少对甘肃省时空特征的整合比较和分析,不利于有针对性的提出相关的碳减排建议。基于上述情况,本研究在借鉴前人的经验基础上,将甘肃省的种植业和畜牧业共同研究,采用面板数据对甘肃省农业碳排放进行横向和纵向比较,突破了横截面数据的片面性,旨在对甘肃省的低碳农业发展情况开展较为系统的综合测评研究。

## 1.4 研究内容、方法、创新点及技术路线

### 1.4.1 研究内容

第一章,绪论。本章主要包括研究背景、研究目的与意义、国内外研究综述和研究内容、方法、创新点与技术路线四个小节。通过对碳排放严峻形势进行论述,引出农业碳排放减排的紧迫性,从农业碳排放的碳源和碳排放量的核算、农业碳排放的影响因素、农业碳排放的效率的分析以及农业碳排放和农业经济发展关系的研究 4 个方面,梳理了国内外对农业碳排放研究的相关文献,发现其不足部分并引出甘肃省农业碳排放研究的重要性。

第二章,概念界定与理论基础。阐述了相关概念和相关理论依据,为本文提供研究的理论基础。

第三章,甘肃省农业碳排放量测算及时空特征分析。结合国内外学者对碳排放源系数的研究,立足甘肃省低碳农业发展现状,确定碳源因子并对甘肃省农业碳排放量进行计算,最后对甘肃省农业碳排放总量、农业碳排放结构特征以及农业碳排放强度进行时空变化的对比分析。

第四章,甘肃省农业碳排放驱动因素分析。本章在变形的 Kaya 恒等式的理论上,选取了 LMDI 模型分析不同因素对甘肃省农业碳排放的驱动情况。

第五章,甘肃省农业碳排放与农业经济增长的脱钩分析。本章采用 TAPIO 脱钩模型分析农业碳排放量与农业经济增长的脱钩关系。

第六章，结论、建议与展望。通过总结甘肃省农业碳排放的研究结果，为甘肃省农业碳减排提出相关性建议，并讨论本文所存在的不足之处以及对未来的展望。

## 1.4.2 研究方法

### (1) 算术平均迪氏指数分解法（LMDI 模型）

算术平均迪氏指数分解法（LMDI）是一种常见的指数分解分析方法，主要思想就是将目标变量分解为不同影响因素的组合进行研究，分析每个指标对总指标的影响情况，揭示了事物变化特征及其作用的原因，而且对样本容量也没有严格限制，其本质是把整体变量分解成多个影响因子的乘积，然后以分解后的影响因子在整体变量变化中的作用为基础，计算出各个分解后的影响因子在整体变量变化中所占的比重。本文基于 Kaya 恒等式构建 LMDI 模型定量分解四个因素，分别是农业内部结构因素、农业生产效率因素、农业经济发展水平因素和农业劳动力因素，并计算各因素对农业碳排放的驱动情况。

### (2) 弹性分析法（TAPIO 脱钩模型）

“脱钩”是评价资源和环境利用过程的常用方法。脱钩指标是用来描述“脱钩”的程度与趋势的，通常是以 GDP 总量为驱动量，以能源消费为被解释量，利用能源消耗与经济增长的环比增长来反映二者之间的脱钩关系。一国或者地区的能源消耗的脱钩状态，可以理解为 GDP 增长和能源消耗增长相脱离。学术界目前使用两种模型进行脱钩分析，分别是 OECD 脱钩模型和 TAPIO 脱钩模型。其中，OECD 脱离指标方法用结束年和基本年的变化来衡量，它可以被用来做为该期间内两个研究变量脱离关系的一个重要参考。基于 OECD“脱钩”模式逐渐形成 TAPIO“脱钩”模式，并逐步在碳排放领域得到应用。TAPIO 脱钩模型采用弹性形式定义碳脱钩指数为一定期间内基期和当前碳排放的变化率与 GDP 变化率之比，然后给出了 8 个脱钩类型的判断准则。本文在借鉴碳排放的 TAPIO 脱钩模型的基础上，来研究甘肃省农业碳排放与甘肃省农业经济增长之间的脱钩关系。

## 1.4.3 创新点

第一，在研究视角方面。现阶段学者对农业碳排放的研究主要集中在国家或

区域层面，对甘肃省农业的碳排放还没有形成系统性的研究成果，少量关于甘肃省农业的碳排放问题的研究也仅限于从狭义的农业角度去进行，比如以种植业投入构建指标体系，甘肃省畜牧业具有重要地位，畜牧养殖对碳排放的影响更是不容忽视。本文基于大农业视角，将甘肃省的种植业和畜牧业共同研究，以甘肃省的农业发展的现实情况有针对性的构建农业碳排放测算指标，从种植业投入、土地利用和畜牧业三个方面进行指标划分，完善甘肃省农业碳排放测算框架。

第二，在研究内容方面。目前对甘肃省农业碳排放的研究局限于时序的分析，缺乏对甘肃省省域内各地区进行对比研究。甘肃省地域辽阔，省域内生态环境和资源禀赋差别较大，对甘肃省农业碳排放整体的研究分析，不利于有针对性的提出相关的碳减排建议。本研究在借鉴前人经验的基础上，利用面板数据，在时空尺度上对甘肃省的农业碳排放量进行了对比，从而突破了横截面数据的片面性，旨在对甘肃省的低碳农业发展情况开展较为系统的综合测评研究。

### 1.4.4 技术路线

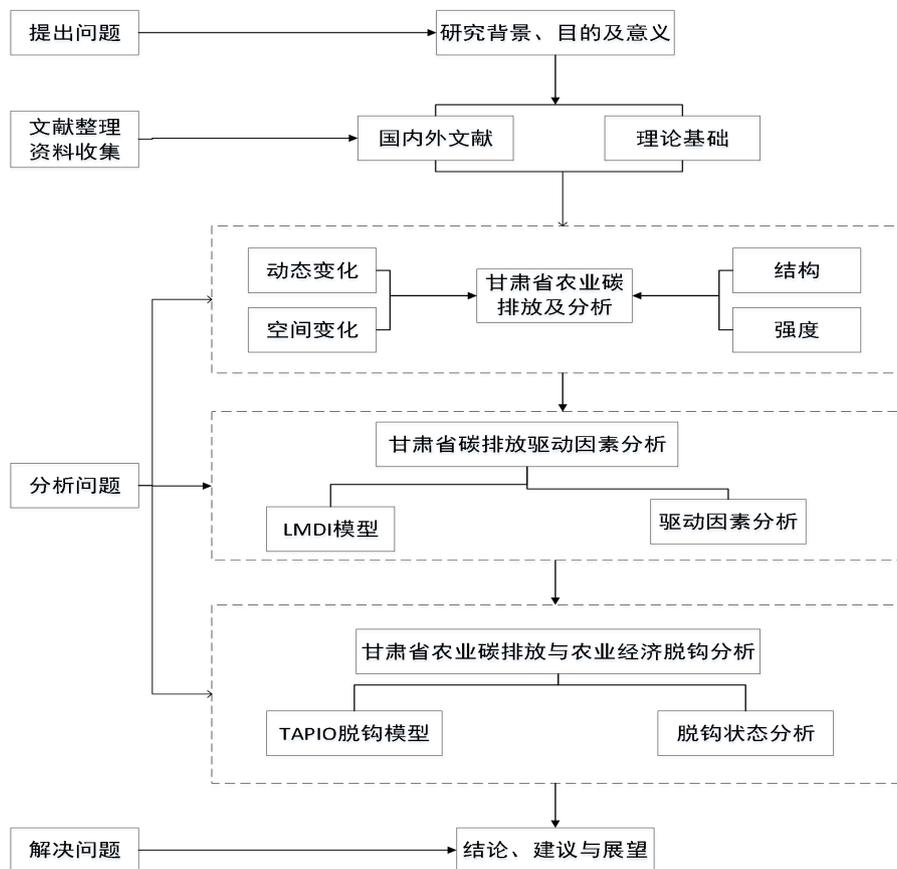


图 1.1 技术路线图

## 2 概念界定与理论基础

本章主要包括基本概念的界定和理论基础的分析和这一部分主要是对农业与农业碳排放的基本概念进行界定，并且对相关的三个理论基础进行总结归纳，为后续研究的内容提供有利的理论支撑。

### 2.1 基本概念

#### 2.1.1 农业

农业作为国民经济中的一个主要行业，其生产对象是土地资源，是通过种植植物和养殖动物来生产或者制造食物和工业原材料的行业，涵盖了农业经济各个领域，是农业经济发展的基础，属于第一产业。广义的农业包括了种植业，林业，畜牧业，渔业和副业，而狭义的农业则包括了种植业，指生产粮食、经济作物、饲料作物以及绿色肥料等作物的生产性活动。甘肃省的农业构成主要以种植业和畜牧业为主，林业和渔业占比相对较小，本文根据甘肃省农业发展的现状，选取了种植业和畜牧业对甘肃省农业碳排放进行分析。

#### 2.1.2 农业碳排放

农业碳排放是指在农业生产和养殖过程中，由于能源的投入、种植和养殖的生长和各种废物的处置而导致的各种排放。在这些污染物中，能量的排放量主要是由农用化学品的生产、农机所需的能量的消耗所引起的直接与间接的排放量；其中，自然来源的排放量包括：水稻的种植、家畜反刍的排放和农田播种的直接排放；垃圾处理产生的废气，主要是指秸秆燃烧和动物粪便的处理等。农业碳排放气体主要是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  三种气体，以  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  两类非二氧化碳温室气体为主，占据了农业排放的 70%。近年来我国农业碳排放的趋势是：来源于  $\text{CH}_4$  的农业碳排放占比逐渐减少，而来源于  $\text{N}_2\text{O}$  的比例平稳上升，来源于  $\text{CO}_2$  的比例呈上升趋势且占比增加越来越大。 $\text{CH}_4$  占比从 1961 年的 72.62% 下降至 2018 年的 32.88%； $\text{N}_2\text{O}$  占比从 1961 年的 27.38% 增加至 2018 年的 41.58%； $\text{CO}_2$  占比从 1979 年的 6.5% 增加到 2018 年的 25.53%。另外据《国家信息通报》显示，农业

活动产生的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  分别占全国  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的 40.2% 和 59.5%，农业排放的“非二氧化碳”占比较高，在全球同样也是如此。IPCC 第四次评估报告显示，全球范围内农业领域所排放的  $\text{CH}_4$  占人类活动引起的  $\text{CH}_4$  排放总量的 50%， $\text{N}_2\text{O}$  占 60%。根据甘肃省农业发展现状，本文从三个大类确定农业碳源指标。第一是种植业投入，主要包括化肥、农膜、农药等农用物资排放的  $\text{CO}_2$ ，第二是农田土壤利用排放  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体，第三是畜牧养殖过程中动物肠道发酵及粪便排放的  $\text{CH}_4$  和粪便管理产生的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ 。

### 2.1.3 农业碳排放强度

碳强度 (carbon intensity) 是指单位 GDP 的二氧化碳排放量，碳强度高并不表明效率的高低。一般情况下，碳强度指标是随着技术进步和经济增长而下降的。《2023 中国农业农村低碳发展报告》显示，我国农业碳排放总体强度较低，单位农业 GDP 碳排放、人均碳排放及人均农业人口碳排放均远低于美国。在作物生产过程中，关键排放环节是化肥生产和施用，占碳排放强度的 79.7%~89.5%。从农业碳排放强度的时间变化来看，近年来，我国采取了一系列稳定粮食生产政策措施和专项行动，其中每年投入 1000 亿元左右的资金支持高标准农田建设。高标准农田建设既能提高节水灌溉等新技术采纳率，又可以抑制碳排放强度，具有显著的粮食增产与碳减排协同作用。数据显示，2003 年以后，我国进入了粮食安全和碳排放的脱钩期，粮食产量快速增长，农业碳排放总量稳中有降，单位粮食产量的碳排放强度持续下降。此外，我国大豆、马铃薯、甘蔗等单位农作物的碳排放强度也呈下降趋势。

## 2.2 理论基础

### 2.2.1 可持续农业理论

自从 1981 年世界银行提出可持续农业的概念以来，该理论随着时代的进步蓬勃发展。可持续农业指的是在既能满足当代人的需求，又不影响到未来满足其需求的发展条件下，采取不会消耗资源，不会对环境造成危害的生产方式，进行技术变革和机制改革，降低农业生产对环境的破坏程度，保持土地、水、生物、

环境不退化,技术运用得当、经济上可行、社会可接受的农业发展战略。它是一个“生态-经济-社会”的立体复合体系,具有生态、社会和经济三个方面的特点。其中,可持续发展的经济是主要的,可持续发展的生态是基本的,可持续发展的社会是主要的。可持续发展农业的发展,是一种与传统发展观完全不同的发展方式,是一种既符合农业发展规律,又符合社会发展规律的可持续发展。这对于适应中国国情,科学合理地进行农业发展策略的调整,正确地处理与生态环境相关的问题,正确地根据中国国情,走出一条适合中国国情的现代化农业道路具有重要意义。

### 2.2.2 农业碳脱钩理论

脱钩理论最早被用于对区域经济发展与资源环境压力之间的耦合性进行研究,脱钩指的是经济总量增加,社会资源量消耗的越少,也就是社会资源的消耗不随经济总量的增加而增加,所以脱钩也为解耦。农业碳脱钩指的是一个国家或地区在实现农业经济高速发展的过程中,其生产活动所造成的碳排放却呈下降的趋势,从而呈现出一种绿色、理想的农业发展状态。农业碳排放的脱钩分析模型主要有 OECD 和 TAPIO 两种<sup>[43]</sup>, TAPIO 模型由于能够考虑到时间弹性,并且能够规避基期的选取,因此在农业碳排放的研究中得到了广泛的应用。为定量研究农业碳排放与经济发展之间的关系,可用脱钩指数来描述。根据碳排放脱钩系数,可以将脱钩状态划分为三种类型:负脱钩、脱钩与连接。再根据具体的数值,再将脱钩划分为强脱钩、弱脱钩、扩张连接、扩张负脱钩、强负脱钩、弱负脱钩、衰退连接、衰退脱钩,这八种类型分别表示了农业经济增长和衰退的过程中,与之相对应的农业碳排放量增加或减少的状态。在理论界,这一指标体系被称为 TAPIO 脱钩指标体系。其中,强脱钩是二者关系中比较好的状态,也就是比较理想的状态,弱脱钩是一种相对乐观的状态。其中,扩张性连结是指经济发展中比较不可持续和比较理想的状态,但还有改善的空间。其余的情况,都意味着双方的关系已经到了崩溃的边缘,改善的空间很小。

### 3 甘肃省农业碳排放量测算及时空特征分析

#### 3.1 甘肃省农业发展现状

##### 3.1.1 甘肃省地理概况

甘肃省位于黄河上游,地处中国地理中心,幅员广阔,位于北纬 32°11'-42°57'、东 92°13'-108°46'之间,东部与陕西接壤,东北部与宁夏接壤,南部与四川接壤,西部与青海和新疆接壤,北部与内蒙接壤,与蒙古人民共和国相连接。甘肃省区域面积为 45.4 万平方公里,占全国国土面积 4.72%,排名第七。甘肃地形十分复杂,有山区,高原,平川,河谷,沙漠,戈壁等,种类繁多,且相互交织,从西南到东北,山区和高原所占据的陆地面积超过 70%,而西北地区则有较大的戈壁和沙漠,其比例为 14.99%。甘肃省属大陆性很强的温带季风气候,省内年平均气温在 0~16°C 之间,全省各地年降水量在 36.6~734.9 毫米,大致从东南向西北递减。从森林植被资源的角度看,甘肃属于少林型地区,其森林覆盖面积达 6385.37 万公顷,但其森林覆盖率却只有 9.37%,而全国平均的森林覆盖率为 23%,相对全国来说较低。另外,甘肃省具有良好的成矿地质和丰富的矿产资源,是甘肃经济发展的一项主要内容。在 84 种已探明的矿物资源中,《甘肃省矿产储量表》编制的矿物资源储量占全国前 5 位,其中 32 种矿物资源储量占全省前五;拥有 56 种矿物资源,在国内排名前 10。从水资源方面来看,甘肃省的水资源分布在黄河、长江和内陆河三大流域和九大水系之间,年总水量达 603 亿立方米,而超过一亿立方米的河道占 78 条,发电量 14,264,000 千瓦。

##### 3.1.2 甘肃省农业经济发展概况

甘肃省国土面积大,类型齐全,总量丰富,为甘肃省农、林、渔、牧等产业的发展提供了有利的自然环境。

在种植业方面:甘肃耕地 5229.25 万亩,占总土地面积的 7.68%,是西部的农业大省,受资源条件、地理环境等原因的影响,农业优势产业主要集中在粮食、

药材和果品上。2020 年全省粮食总产量 1202.2 万吨，首次突破 1200 万吨，比上年增长 3.4%，其中，玉米的种植面积共 1500 万亩、马铃薯的种植面积共 1030 万亩，为保障全省的粮食安全提供了强有力的支撑。蔬菜、马铃薯、草食畜牧业、中药材、优质林果、制种和酿酒原料，是甘肃农业特色产业的六大支柱。围绕制种、蔬菜、水果、中药材、啤酒原料、棉花等区域性优势产业及食用百合、蚕豆、烤烟、球根花卉、黄花菜、油橄榄、小杂粮等一批地方性特色产品的小产业集群也逐步成形，如金昌的啤酒麦芽加工集群，张掖的玉米制种加工集群，庆阳的白瓜子加工集群等。许多特色农产品成为满足全国需求的主要供应源，且大量出口海外。例如甘肃省紫花苜蓿留床面积目前已达到 750 万亩，居全国第一；中药材、啤酒大麦达 210 万亩和 134 万亩，年产量分别达 34 万吨和 38 万吨，面积、产量均居全国第一位；杂交玉米制种面积发展到 123 万亩，制种量占全国用种量的 53%；全国 50 强制种企业已有一半以上在甘肃省落户；脱水蔬菜、番茄酱、果酒果汁、优质小杂粮、油橄榄等农产品还出口日本、韩国、欧美及东南亚等国家。

畜牧业方面：畜牧业在甘肃省的农业中占有举足轻重的地位，是甘肃省实现脱贫攻坚、实现“乡村振兴”目标的关键。2020 年，甘肃省草场 2.69 亿亩，有天然草地、人工草地和半人工草地三种，是全国的五大牧区之一。其中，全省人工种草面积达到 2800 万亩，多年生牧草达到 2600 万亩，苜蓿种植面积达到 1200 万亩，牧草良种化率达到 90%以上，草产品加工产能达到 200 万吨，牧草种子田面积达到 120 万亩。甘肃省继续加强牧草良种繁育基地建设，扩大牧草面积，提高牧草品质，“十二五”期间，建设规模化、标准化草产业基地 2500 万亩，同时，改建牧草生产加工企业 10 个，新建牧草生产、加工企业 10 个，使牧草加工规模达到 180 万吨，已成为全国产量最大、品质最佳的商品草生产和储备基地。值得一提的是，甘肃省农作物秸秆饲料化利用量达到 1489 万吨，占全省秸秆总量的 59.6%，有效解决了 2900 多万个羊单位的饲草问题，为草食畜牧业发展提供了有力支撑。目前，甘肃省已经培育出“陇东”、“河西”、“甘南”三大肉牛产业，“河西”、“临夏甘南”、“中部”、“陇东”等四大肉牛产业，产业空间格局初步形成，区域优势逐渐显现，牛、羊存栏量在全国排名第九，山羊存栏量在全国排名第三，基本确定了甘肃省“肉牛”、“肉羊”大省的位置。2020 年甘肃省猪肉、牛肉、羊肉、家禽等肉类的总产量为 108.9 万吨，同比增长 8.3%。其中包括 49.17 万吨牛肉，

27.6 万吨羊肉，生猪出栏大约 622 万头。

在产业结构方面：根据甘肃省统计局公布的数据来看，2020 年甘肃省居民人均消费支出 16175 元，比上年增长 1.9%。其中，城市居民的人均消费增加了 161 元，增加了 0.7%；农民人均消费额为 229 元，同比增加 2.4%。全省 GDP 为 9016.7 亿元，在可比价格不变的情况下，比去年增长 3.9%。其中，甘肃省第一产业的增加值是 1198.1 亿元，增长 5.4%；第二产业的增加值是 2852.0 亿元，增长了 5.9%；第三产业的增加值为 4966.5 亿元，增长 2.2%。第一产业、第二产业和第三产业的增加值分别为 13.29%、31.63%和 55.08%，三次产业结构比为 13.3: 31.6: 55.1，同期全国的三次产业结构比为 7.7: 37.8: 54.5。甘肃省的一产增加值远高于全国平均，其中武威第一产业比重高达 30.7%，是甘肃省一产比重最高的市州。张掖一产比重为 27.54%，平凉一产比重为 23.1%，白银一产比重为 20.21%，定西一产比重为 20%，甘南州、天水、陇南的一产比重也接近 20%，农业在地区经济中的比重均非常大。从 2005~2020 年，甘肃省的农业生产总量在农业生产总量中占有最大的比例，见表 3.1，甘肃省种植业总量在整个农业生产总量中的占比最大，其他依次为畜牧业，林业及渔业。2020 年甘肃省农林牧渔总产值达到 2103.61 亿元，其中，种植业总产值为 1423.85 亿元，占农林牧渔总产值的 67.7%，畜牧业的总产值最多达到 495.28 亿元，占整个农林牧渔总产值的 23.6%，林业总产值为 31.74 亿元，渔业只有 1.97 亿元。甘肃省农业主要是以种植业和畜牧养殖业为主，在 2020 年，甘肃省全省范围内建立了 1189 个绿色标准化种植示范基地，344 个标准化规模养殖示范基地，种植业和畜牧业快速发展将带来巨大的碳排放量，因此本文将种植业和畜牧业作为探索甘肃省农业碳排放研究的重点。

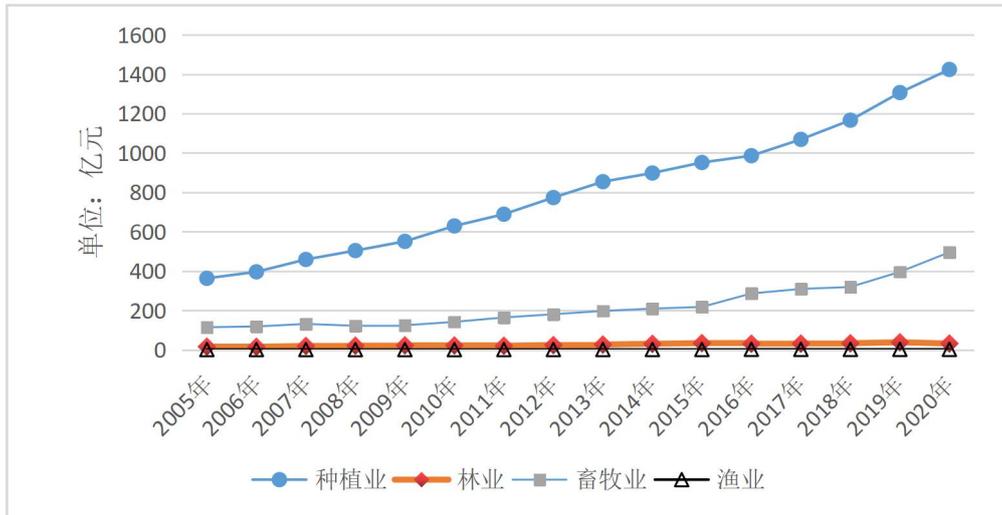


图3.1 2005~2020年甘肃省农林牧渔产值变化

## 3.2 甘肃省农业碳排放测算方法及数据来源

### 3.2.1 农业碳排放测算

根据以往的文献,农业碳排放的来源主要分为四个方面:第一是种植业产出过程中的投入产生的碳排放,主要包括化肥、农膜、农药、农用柴油、农用灌溉和农业翻耕等排放的  $\text{CO}_2$ ;第二是农田土壤利用排放  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ;第三是牲畜养殖过程中来自动物肠道发酵及粪便排放的  $\text{CH}_4$  和粪便管理产生的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ;第四是农业生产过程中废弃物处置产生的温室气体排放,主要包括秸秆焚烧产生的  $\text{CO}_2$  排放。根据甘肃省农业的实际情况以及数据的可得性,本文主要选取种植业投入、土地利用、畜牧养殖对甘肃省农业碳排放进行测算。种植业投入包括化肥、农膜、农药、农用柴油、农用灌溉和农业翻耕六类,农田土壤利用选取小麦、玉米、马铃薯和蔬菜进行测算,畜牧养殖选取牛、马、骡子、驴、骆驼、猪、羊测算碳排放。2020年秸秆综合利用率达80%以上,甘肃省“十四五”生态环境保护规划发布2023年甘肃省秸秆综合利用率达86%,资源化利用率相对来说较高,进一步减排的空间不大,所以没有把秸秆焚烧碳纳入甘肃省农业碳排放的测算。

碳排放量由碳排放源与其相对于的碳排放系数乘积的之和表示,测算公式为:

$$C = \sum C_{ij} = \sum T_{ij} \times \theta_i \quad (3.1)$$

式中 $C$ 为农业碳排放总量， $C_{ij}$ 为第 $i$ 类碳源 $j$ 年的农业碳排放量， $T_{ij}$ 为第 $i$ 类碳源 $j$ 年的总量， $\alpha_i$ 为各类碳源的碳排放系数。

农业碳排放强度是指一个国家或者地区生产一单位农业生产总值（GDP）所产生的二氧化碳排放量。农业碳排放强度主要用来衡量农业经济的发展同农业碳排放量增长的关系，如果一个地区在农业经济增长的同时，每一单位农业生产总值所产生的二氧化碳呈下降状态，那么说明该地区实现了一个低碳的发展模式。其计算公式为：

$$CI_j = C_j / GDP_j \quad (3.2)$$

其中 $CI_j$ 为 $j$ 时期农业碳排放强度， $C_j$ 为 $j$ 时期农业碳排放量， $GDP_j$ 为 $j$ 时期农牧业生产总值。

根据 IPCC 公布的数据按照  $1tCH_4=6.82tCO_2$ 、 $1tNO_2=81.27tCO_2$  的碳折算系数进行计算。具体的碳源和碳排放系数以及参考来源如表所示：

表 3.1 种植业碳排放源、碳排放系数及参考来源

类别	碳源	碳排放系数	参考来源
种植业活动	化肥	0.8956kgC/kg	美国橡树岭国家实验室
	农药	4.9341kgC/kg	美国橡树岭国家实验室
	农膜	5.18kgC/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
	农用柴油	0.5927kgC/kg	IPCC
	农业灌溉	25kgC/hm <sup>2</sup>	冉锦成等 <sup>[5]</sup>
	农业翻耕	3126kgC/hm <sup>2</sup>	中国农业大学生物与技术学院
	冬小麦	2.05kgN <sub>2</sub> O/hm <sup>2</sup>	冉锦成等 <sup>[5]</sup>
农田土壤利用	玉米	2.532kgN <sub>2</sub> O/hm <sup>2</sup>	刘杨等 <sup>[11]</sup>
	马铃薯	0.77kg(N <sub>2</sub> O)/hm <sup>2</sup>	刘杨等 <sup>[11]</sup>
	蔬菜	4.21kg(N <sub>2</sub> O)/hm <sup>2</sup>	刘杨等 <sup>[11]</sup>

表 3.2 畜禽养殖碳排放源碳、排放系数及参考来源

类别	碳源	肠道发酵排放		粪便排放		来源
		KgCH <sub>4</sub> /年	KgCH <sub>4</sub> /年	KgN <sub>2</sub> O/年	KgN <sub>2</sub> O/年	
畜牧业	牛	47	1	1.39		IPCC
	马	18	1.64	1.39		IPCC
	骡子	10	0.9	1.39		IPCC
	驴	10	0.9	1.39		IPCC
	骆驼	46	1.92	1.39		IPCC
	猪	1	4	0.53		IPCC
	羊	5	0.15	1.39		IPCC

### 3.2.2 数据来源与处理

通过查阅甘肃省统计年鉴发现，2020年甘肃省种植业产值和畜牧业产值占农业总产值的九成左右。由此可见，种植业和畜牧业在甘肃省农业经济发展中占据重要地位，故本文选取种植业和畜牧业的17类碳源作为研究对象。需要说明的是，本文所需的数据主要来自于2006~2021年的《甘肃省统计年鉴》、《甘肃省农村统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》，综合考虑数据可获得性及甘肃省区域特色后，对2005~2020年15年间甘肃省种植业、畜牧业的碳排放量进行测算。种植业活动中的化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉、翻耕分别为化肥折纯量、农药使用量、农膜使用量、农用柴油使用量、有效灌溉面积、农作物总播种面积，畜禽养殖量数据选取年底存栏量，农业总产值以2005年为不变价，将其其他年份进行折算，以剔除价格因素干扰，保证计算结果的科学性和有效性。

### 3.3 甘肃省农业碳排放测算及时空变化分析

根据公式(3.1)计算出2005~2020年甘肃省种植业和畜牧业CO<sub>2</sub>排放量、NO<sub>2</sub>排放量以及CH<sub>4</sub>排放量，然后运用碳折算系数将NO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>统一转化为标准二氧化碳(CO<sub>2</sub>eq)，最后运用公式(3.2)计算出2005~2020年甘肃省农业的碳排放强度，进行下一步分析。

### 3.3.1 农业碳排放时序变化分析

根据以上测算公式算出的甘肃省农业碳排放量和碳排放强度，结果如表 3.3 所示，从整体来看，甘肃省碳排放总量由 2005 年的 577.78 万吨增加到 2020 年的 810.79 万吨，15 年间增加了 233.01 万吨，整体呈现出波动上升的趋势。2014 年甘肃省碳排放达到峰值，总量为 902.29 万吨。造成这一现象的主要原因可能是畜牧养殖业的快速发展，以牛、马、羊为代表的牲畜养殖数量增加导致了牲畜养殖碳排放量持续快速增长。可以看出，甘肃省畜牧业的碳排放量远远大于种植业的碳排放量。其中，畜牧业碳排放量占农业碳排放总量的比重达到了将近六成。

表 3.3 2005~2020 年甘肃省农业碳排放总量及强度

年份	种植业/万 t	畜牧业/万 t	总量/万 t	强度 kg/万元
				GDP
2005	174.32	403.46	577.78	1210.74
2006	173.15	447.77	620.92	1243.81
2007	191.86	427.35	619.21	1189.13
2008	199.7	444.28	644.01	1152.08
2009	217.88	467.41	685.29	1158.82
2010	232.96	545.40	778.37	1245.35
2011	258.00	555.12	813.12	1266.17
2012	274.76	559.19	833.95	1190.54
2013	287.62	570.21	857.83	1167.48
2014	299.37	602.92	902.29	1165.54
2015	290.14	515.99	806.12	985.16
2016	283.77	501.61	785.38	911.50
2017	259.63	496.36	755.98	833.81
2018	258.36	508.89	767.25	816.12
2019	248.62	525.36	773.98	777.82
2020	236.32	574.47	810.79	774.24

为了直观的看出甘肃省 2005~2020 年的农业碳排放总量的变化以及趋势，进一步详细绘制了图 3.2，从图中可以看出，根据总量的变化情况，可以把甘肃省碳排放情况大致上分为三个不同的阶段：

第一个阶段是 2005~2014 年，为“上升”阶段，碳排放量由 577.78 万吨上升到 902.29 万吨，年均增速 6.24%，这其中的主要原因是种植业中以小麦、玉米和马铃薯为代表的作物的种植规模不断扩张，导致了农药、化肥和农膜等农用材料投入的不断增加，进而导致了种植业和农田土壤的碳排放的增加；以奶牛、马匹和绵羊为代表的家畜养殖业的快速发展，使得家畜养殖业的碳排放量不断上升。

第二个阶段是 2014~2017 年，为“下降”阶段，碳排放量由 902.29 万吨下降到 755.98 万吨，年均降速 5.4%，主要原因是畜牧业合理控制了牛、马、羊的饲养数量，导致牲畜养殖碳排放快速下降。另外，党和政府期间出台了促进低碳农业发展、绿色发展的优惠政策，人们的环保意识随着时代的发展也有所提高，所以，这一阶段的碳排放呈现快速下降趋势。

第三个阶段是 2017~2020 年，为缓慢“上升”阶段，碳排放量由 755.98 万吨上升到 810.79 万吨，年均增速 2.41%。虽然这一阶段农业科技的发展使得化肥农药的施用量等效率增加，种植业碳排放量明显下降，但是近年来国家实施了一系列的畜牧良种补贴政策，投入资金支持发展畜禽标准化规模养殖，促进了畜牧业的养殖规模，带来了畜牧业碳排放量的增加，导致农业总碳排放量出现了小幅上升。

从农业碳排放强度方面来看，2005~2020 年甘肃省农业的碳排放强度整体呈现波动下降的趋势，从 2005 年的 1210.74 吨千克/万元 GDP 下降到 2020 年的 774.24 千克/万元 GDP。2005~2014 年间，农业碳排放强度呈现波动下降趋势，2014 年以来，农业碳排放强度呈现快速下降趋势，这在一定程度上得益于农业技术的进步，更为重要的是，2014 年甘肃省逐步引入了碳排放交易系统，并规定甘肃省发展和改革委员会联合农业部门制定一套针对农村的温室气体排放的管理制度，并要求在农村的能源管理部门有计划地组织和实施农村的碳排放交易。这对甘肃省农业碳减排产生了重大的意义。农业碳排放强度的下降趋势也侧面反映了近年来甘肃省有关农业的低碳减排效果较为显著。

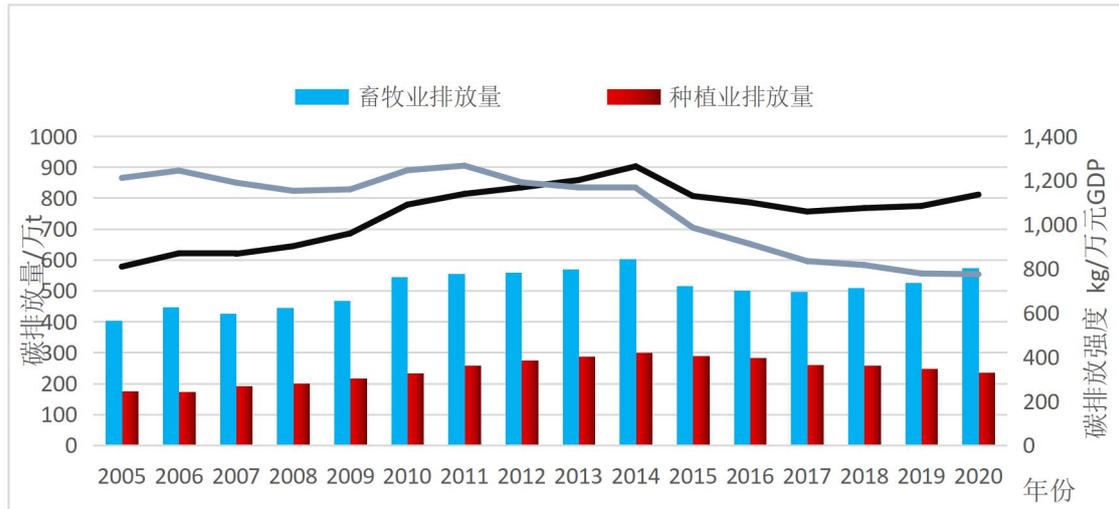


图3.2 2005~2020年甘肃省农业碳排放变化情况

### 3.3.2 农业碳排放结构动态变化分析

上一节研究了2005~2020年甘肃省农业碳排放的时序变化情况，为了更加详细地研究各个碳源具体的碳排放情况，本节对甘肃省农业碳排放的结构进行了分析。根据上述计算结果，甘肃省种植业碳排放情况见表3.4。2005~2020年甘肃省种植业的碳排放量处于波动上升状态，由2005年的174.32万吨增长到2020年的236.32万吨，增加了62万吨，年平均增长率为2.22%。从具体碳源的时间变化来看，化肥、农药、农膜、柴油和灌溉变化一致，2005~2017年这些碳源的碳排放量处于上升阶段，这与甘肃省种植业种植面积的增加趋势相一致。2017~2020年化肥等碳排放量处于缓慢下降阶段，这不仅得益于科技进步带来了种植业投入效率的提高，更得益于国家相关限制农药和化肥相关政策的实施，比如，2016年以来，中央财政深入推进测土配方施肥，到2020年化肥使用量零增长行动”，选择一批重点县开展化肥减量增效试点。促进化肥减量增效、提质增效，着力提升科学施肥水平。农药政策方面，按照《到2020年农药使用量零增长行动方案》，大力推进统防统治、绿色防控、科学用药，减少农药使用量，提高利用率，这些政策极大减少了农业碳排放的产生。另外，翻耕碳排放量变化相对比较稳定，农田土壤利用呈现先上升后下降的趋势，2005~2014年为上升阶段，种植业种植面积的提高同样带来了农田土壤利用碳排放量的上升，2014~2020为下降阶段，主要是农作物结构的合理变化降低了农田土壤利用碳排放量。

在种植业碳源排放占比方面，各个碳源相差较大。根据2020年的数据来看，

化肥施用这一碳源形成的碳排放量最大，在种植业中所占比重高达 39%，其次是农膜和农田土壤利用，分别占种植业碳排放总量的 23.24%和 23.06%，最后是农用柴油、农药、有效灌溉和土地翻耕，所占种植业碳排放总量的比重依次为：6.73%、5.89%、1.487%和 0.61%。随着甘肃省农业经济的快速发展，种植业面积整体呈现上涨趋势，增加了对化肥、农药和农膜等农资投入的需求量，因而导致碳排放增加。因此，甘肃省应该在强化粮食安全保障能力的基础上，积极推广优良品种和绿色高效栽培技术，提高化肥等农用物质的利用效率，降低农业碳排放量。

表 3.4 2005~2020 年甘肃省种植业碳排放量 单位:万吨

年份	化肥	农药	农膜	柴油	灌溉	翻耕	农田土壤利用	总量
2005	67.99	10.27	40.51	11.73	2.58	1.06	40.19	174.32
2006	68.51	15.77	41.03	13.40	2.63	1.07	40.75	173.15
2007	71.77	17.42	43.82	13.45	2.66	1.08	41.66	191.86
2008	72.88	18.01	46.98	14.90	2.67	1.09	43.22	199.74
2009	77.12	19.69	54.60	16.21	2.69	1.09	46.49	217.88
2010	76.31	22.01	64.08	17.18	2.75	1.25	49.40	232.96
2011	78.08	33.75	74.28	17.51	2.76	1.25	50.36	258.00
2012	82.46	38.14	77.91	19.60	2.83	1.27	52.57	274.76
2013	84.77	38.39	85.88	20.36	2.85	1.29	54.08	287.62
2014	87.36	38.39	91.26	22.85	2.90	1.09	55.53	299.37
2015	87.64	38.88	95.17	25.31	2.91	1.09	39.12	290.14
2016	77.96	34.49	102.47	26.18	2.95	1.31	38.41	283.77
2017	75.62	25.66	89.19	26.99	2.98	1.15	38.04	259.63
2018	74.44	21.17	85.00	24.16	3.04	1.16	49.40	258.36
2019	72.39	20.67	78.87	23.17	3.14	1.18	49.20	248.62
2020	71.92	20.65	79.23	22.82	3.22	1.21	37.28	236.32

甘肃是我国五大牧区之一，庞大的畜牧养殖规模带来了大量的碳排放，再加上技术设备的相对落后也不利于畜牧粪便的处理和再利用，更加重了畜牧业碳减

排的压力。畜牧养殖是甘肃省农业碳排放最主要的碳源，占甘肃省农业碳排放总量的 60%以上，由表 3.5 可知，畜牧业碳排放量由 2005 年的 403.46 万吨上升到 2020 年的 574.47 万吨，上升了 171.01 万吨。2005~2020 年，畜牧养殖中牛和羊的碳排放持续增长，尤其是 2015 年以来，国家为调动地方政府发展生猪(牛羊)养殖积极性，促进生猪(牛羊)生产、流通，引导产销有效衔接，保障市场供应，2015 年中央财政安排生猪(牛羊)调出大县奖励资金 35 亿元，这极大的促进了甘肃省畜牧养殖的积极性。其中羊的碳排放量增长最快，增长了 91.17%，牛的碳排放量增长了 24.94%。猪的碳排放量呈波动上升趋势，马、驴和骡子碳排放量持续下降，骡子碳排放则呈现上升趋势，这些变化分别与近年来畜禽的养殖数量相一致。

在畜牧养殖碳源排放占比方面，羊和牛的养殖产生的碳排放量最多，成为畜牧业碳排放的主要来源。2020 年羊和牛占整个畜牧养殖业的 55.44%和 34.77%，其次是猪的碳排放量，占畜牧养殖排放总量的 8.06%左右，马、骆驼、驴和骡子的占比相对较低。甘肃省农业碳减排过程中，畜牧业是重要的一环。减少畜牧业碳排放应积极依靠农业科学技术，推广畜牧业精准饲料喂养技术，推进畜禽品种改良，提高畜禽单位产量水平，降低反刍动物肠道甲烷排放量。另外，提高畜禽养殖粪污资源利用率，降低畜禽粪污产生的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量，促进畜牧业减排降碳。

表 3.5 2005~2020 年甘肃省畜牧业碳排放量 单位:万吨

年份	牛	马	骡子	驴	骆驼	猪	羊	总和
2005	159.87	3.57	8.60	20.56	0.62	44.13	166.12	403.46
2006	178.6	5.75	10.80	20.34	0.94	52.77	178.55	447.77
2007	172.08	3.24	7.99	18.46	0.60	41.85	183.12	427.35
2008	181.31	3.24	7.98	18.32	0.60	43.09	189.74	444.28
2009	192.49	3.21	7.80	18.27	0.60	44.73	200.32	467.41
2010	201.01	3.20	7.74	18.50	0.76	49.96	264.23	545.40
2011	206.53	3.35	7.60	14.63	0.83	46.29	275.88	555.12
2012	202.60	3.39	7.81	14.86	0.88	48.80	280.85	559.19
2013	205.64	3.52	7.99	15.09	0.91	50.32	286.75	570.21

年份	牛	马	骡子	驴	骆驼	猪	羊	总和
2014	216.33	3.56	7.88	14.97	1.00	51.22	307.97	602.92
2015	173.62	3.02	3.10	6.04	0.99	39.37	289.84	515.99
2016	170.66	2.74	2.77	5.40	1.05	37.54	281.45	501.61
2017	175.84	2.80	2.86	5.33	1.12	41.06	267.35	496.36
2018	182.49	2.77	2.71	5.03	1.24	40.60	274.04	508.89
2019	189.88	2.73	2.33	4.66	1.25	35.77	288.74	525.36
2020	199.74	2.62	1.73	4.18	1.38	46.32	318.48	574.47

### 3.3.3 农业碳排放空间变化分析

对 2020 年甘肃 14 个地州市农业碳排放情况进行比较, 结果如图 3.3 所示。碳排放量较高的城市分别是武威市、张掖市和酒泉市, 三个地区碳排放量总量占甘肃省农业碳排放总量的 38.11%。碳排放量较少的城市分别是嘉峪关市、金昌市和陇南市, 3 个地区碳排放量之和仅占甘肃农业碳排放总量的 6.70%。在农业碳排放结构方面, 庆阳市、平凉市、天水市和平凉市等地区以种植业排放为主; 甘南州、临夏州、酒泉市和白银市等地区以畜牧业为主; 武威市和张掖市种植业和畜牧业碳排放处于双高的状态, 而嘉峪关、金昌市、兰州市处于双低的状态。碳排放强度方面, 位于首位的是甘南州, 单位农业生产总值的碳排放强度为 1237.58 千克/万元 GDP, 其他地区差别相对较小, 大致处于 400-800 千克/万元 GDP 之间, 天水市和陇南市碳排放强度相对较小, 单位农业产值的碳排放强度为 334.21 千克/万元 GDP 和 338.66 千克/万元 GDP, 甘南州排放强度为天水市的 3.7 倍。

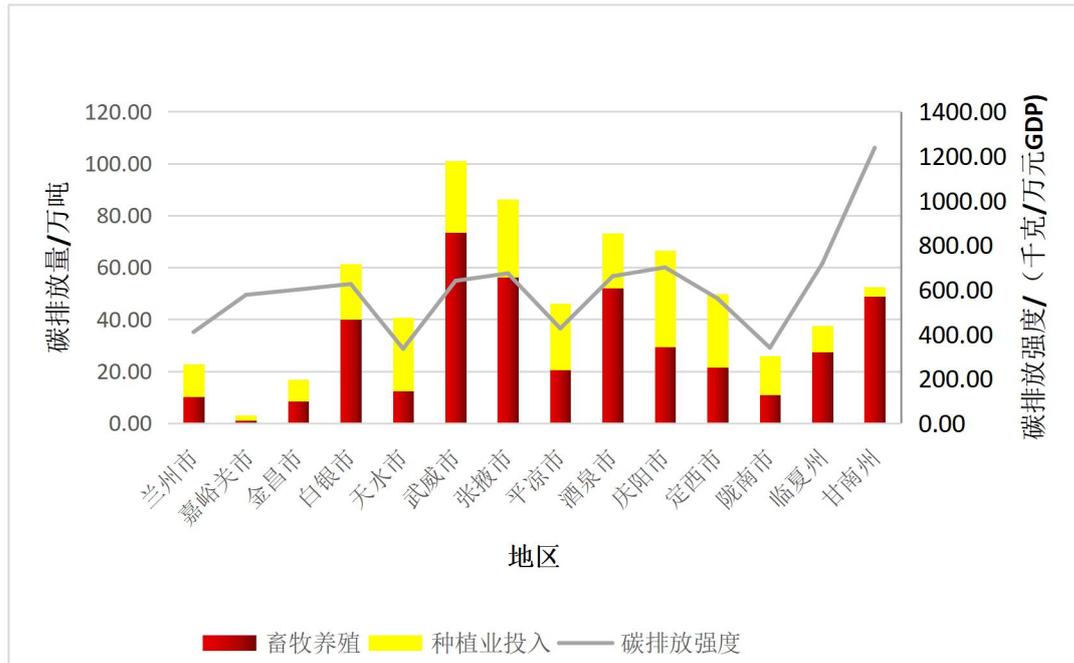
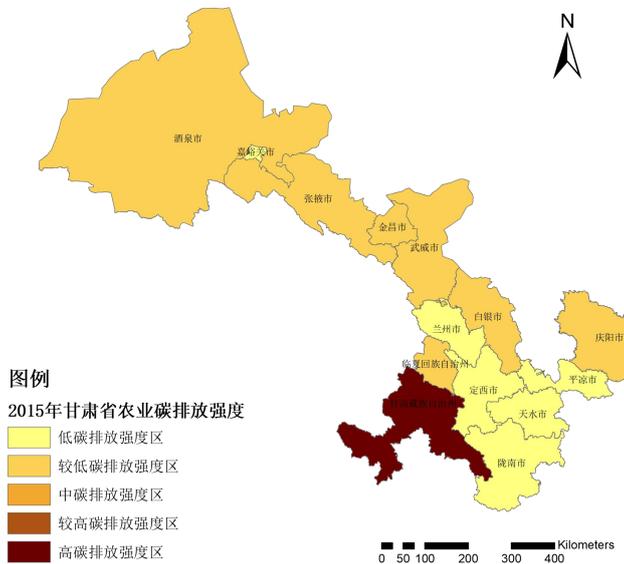
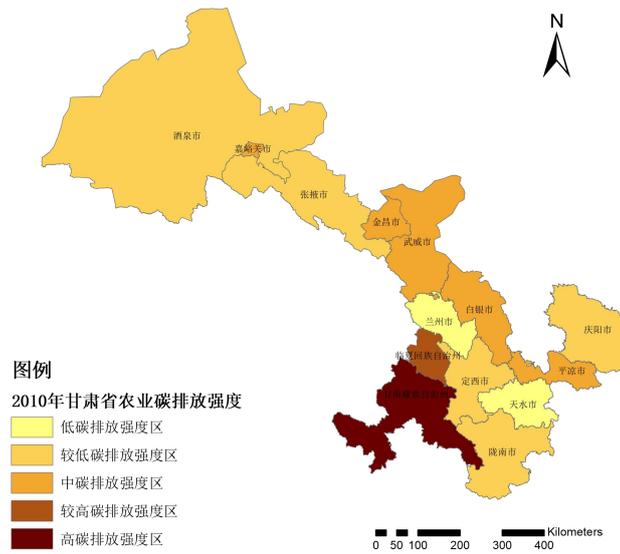


图3.3 2020年甘肃省14个地州市农业碳排放量和碳排放强度

甘肃省农业碳排放量和碳排放结构之所以区域差别如此之大，主要是因为各个地区资源禀赋不同，耕地总量和畜牧养殖数量有较大差别。由于农业碳排放强度因不受资源总量、农业种植规模和畜牧业养殖规模影响，所以能更加准确的反映各地的农业碳排放水平，便于甘肃省不同地区的横向对比。另外，考虑到甘肃省的实际情况和数据的可获得性，本文选取2005年、2010年和2020年的甘肃省各地级市的碳排放强度进行空间的差异分析。由图3.4所示，2005~2020年，甘肃省整体的农业碳排放强度呈现降低的趋势。高碳排放强度和中高碳排放强度主要分布在甘南高地，主要原因是甘南地区畜牧养殖数量较其他地区多，产生了大量的碳排放。中碳排放强度区重要分布于河西地区，河西地区种植业面积大，畜牧业发展水平较高，种植业和畜牧业快速发展的同时也带来了经济发展水平的提高，所以该地农业碳排放强度处于中等水平。低碳排放强度区和较低碳排放强度区黄土高原和陇南山地区域，以兰州为代表的城市经历了快速工业化的发展，产业结构呈现多元化趋势，低耗能的第三产业逐渐成为经济增长的主要推动力量，这些经济发展水平相对较高的地区以较低的碳排放贡献较大的经济份额，因此成为碳排放强度较低的集聚区。

从演变趋势来看，碳排放强度的高值区呈现逐渐减少的趋势，主要表现在甘南州由高碳排放区向较高碳排放区转变，以及武威市、金昌市和白银市碳排放强

度由较高碳排放强度逐渐向中碳排放强度和低碳排放强度转变;集中于河西地区的中碳排放强度区也逐渐向较低碳排放强度区和地碳排放强度区转变;陇中黄土高原则由较低碳排放强度区向低碳排放强度区转变,陇南山地变化相对稳定,一直处于较低水平。总体来说,2005~2020年甘肃省各地区碳排放强度呈现逐渐下降的良好趋势。



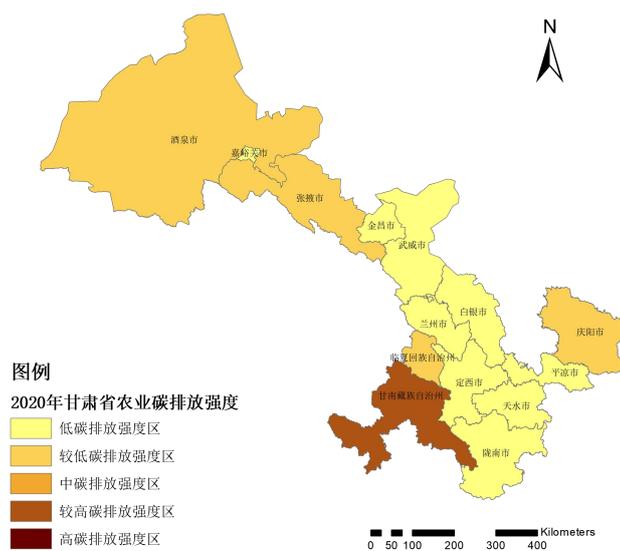


图3.4 甘肃省农业碳排放强度空间格局的演变

## 4 甘肃省农业碳排放驱动因素分析

为进一步实现低碳农业发展与可持续农业的发展目标,必须深入的分析甘肃省农业碳排放的驱动因素。本章通过建立 LMDI 模型对甘肃省农业碳排放的驱动因素进行实证分析,为甘肃省农业碳减排提供相应参考依据。

### 4.1 LMDI 模型

算术平均迪氏指数分解法 (Logarithmic Mean Divisia Index) 是一种常见的指数分解分析方法,主要思想就是将目标变量分解为不同因素的组合进行研究。以 LMDI 分解方法为代表的指数分解方法最早是为了量化分解各因素对工业部门能源需求和能源强度的相对影响程度,后来随着人们对气候问题的关注, LMDI 分解方法逐渐应用于对碳排放和其驱动因素分解上。本文基于 Kaya 恒等式构建 LMDI 模型分解甘肃省农业碳排放的驱动因素,不仅可以满足因素可逆,也能消除残差,是目前比较适合农业碳排放因素分解模型。Kaya 恒等式是日本学者 Yoichi Kaya 在上世纪 90 年代首次提出的,主要是用来研究人口、经济和政策等因素对 CO<sub>2</sub> 排放量影响的一个重要因素。当前, Kaya 恒等式已被用于多个国家或区域的农业碳排放驱动因素的分析与研究中。本文在借鉴日本学者茅阳一的相关成果基础上,结合甘肃省农业生产现状,对甘肃省农业生产中的碳排放因素分解,主要分解为四个方面:分别为农业产业结构、农业劳动力规模、农业生产效率和农业经济发展水平。农业的产业结构主要是指农业体系中各个产业中所占有的比重,在农业结构的调整过程中,农业的碳排放也会随之改变;农业劳动力规模指的是参与到农业中的劳动力数量,劳动力规模直接影响农业的生产方式和投入行为,进而对农业的碳排放产生间接影响;农业生产效率表示单位农业投入所产生的农业生产总值,也就是说,农业效率越高,其单位产出的投入就越少,其资源的利用率越高,相对而言产生的单位农业碳排放就越少,反之亦然;农业经济发展水平指的是一个国家或者是一个地区的农业经济发展的速度和发展的规模,其反映的是农业投入和农业资源消耗的多少,对农业碳排放有直接的影响。在 Kaya 恒等式理论的基础上,对 Kaya 恒等式作了进一步的完善,得到了以下的公式:

$$C = \frac{C}{A} \times \frac{A}{G} \times \frac{G}{P} \times P \quad (4.1)$$

其中,  $C$  表示农业碳排放总量;  $A$  代表农牧业 GDP;  $G$  代表农林牧渔业 GDP;  $P$  代表农村人口。令  $\alpha = \frac{C}{A}$ , 表示生产效率因素;  $\beta = \frac{A}{G}$ , 代表内部结构因素;  $\gamma = \frac{G}{P}$ , 表示农业经济发展水平因素;  $P$  表示人口规模因素。

则式 (4.1) 可简化为:  $\Delta C = C^j - C^0 = \Delta\alpha + \Delta\beta + \Delta\gamma + \Delta P$

$\Delta C$ 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 和 $\Delta P$  分别表示目标年与基期年相比的农业碳排放的变化量、因农业生产效应变化导致的碳排放变化量、因农业内部结构变化导致的碳排放变化量、因农业经济发展水平变化导致的农业碳排放变化量和因农业人口变动而导致的农业碳排放变化量。 $\Delta C$ 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 和 $\Delta P$  的表达式如下:

$$\Delta\alpha = \frac{C^j - C^0}{\ln C^j - \ln C^0} \ln \frac{\alpha^j}{\alpha^0} \quad (4.2)$$

$$\Delta\beta = \frac{C^j - C^0}{\ln C^j - \ln C^0} \ln \frac{\beta^j}{\beta^0} \quad (4.3)$$

$$\Delta\gamma = \frac{C^j - C^0}{\ln C^j - \ln C^0} \ln \frac{\gamma^j}{\gamma^0} \quad (4.4)$$

$$\Delta P = \frac{C^j - C^0}{\ln C^j - \ln C^0} \ln \frac{P^j}{P^0} \quad (4.5)$$

本文根据研究内容选取 2005 年的数据作为基准期, 将 2005 年的农业碳排放总量设立为  $C^0$ ,  $j$  期总量为  $C^j$ 。

## 4.2 驱动因素计算结果及分析

运用上述公式, 结合甘肃省农业产业、农业碳排放等相关数据计算得出甘肃省 2005~2020 年农业碳排放驱动因素分解结果数据如表 4.1 所示。根据 LMDI 分解结果, 甘肃省农业碳排放各驱动因素变化所引起的碳排放变化量显示为正值, 表示该因素对碳排放的变化呈现正效应; 反之, 若引起的碳排放变化量显示为负值, 则该因素对碳排放的变化呈现为负效应。基于此, 可以将分解结果分为两大类, 一类是甘肃省农业碳排放的抑制因素, 另一类是甘肃省农业碳排放的驱动因素<sup>[41]</sup>。

表 4.1 基于 LMDI 模型的甘肃省农业碳排放驱动因素分解结果

年份	农业生产效率因素	农业产业结构因素	农业经济水平因素	农业劳动力因素	总效应
2005-2006	-1.50	-1.48	45.94	0.83	43.80
2006-2007	-85.39	-5.77	132.15	1.66	42.65
2007-2008	-98.92	-26.48	180.73	2.54	57.87
2008-2009	-110.93	-25.56	218.04	3.49	85.04
2009-2010	-129.62	-13.26	352.70	4.63	214.46
2010-2011	-170.45	-12.22	442.18	-4.20	255.31
2011-2012	-233.00	-11.17	544.34	-21.72	278.45
2012-2013	-285.55	-13.29	640.26	-41.23	300.19
2013-2014	-294.29	-18.18	717.00	-47.04	357.49
2014-2015	-390.16	-19.97	728.42	-50.89	267.42
2015-2016	-459.00	10.05	761.42	-58.65	253.81
2016-2017	-528.46	11.41	812.07	-60.85	234.17
2017-2018	-572.51	20.20	871.41	-65.50	253.59
2018-2019	-659.90	25.34	975.42	-73.15	267.71
2019-2020	-727.64	33.93	1186.89	-81.50	411.69
总贡献量	-4320.96	26.12	7679.40	-504.73	2879.83

注：正值表示对碳排放的促进效应，负值表示对碳排放的抑制效应

由表 4.1 可知，在农业碳排放驱动因素中，生产效率因素和劳动力因素的累计效应为负值，表明这两个因素抑制了甘肃省的农业碳排放，农业经济水平因素和农业产业结构因素的累积效应均为正值，表明这两个因素推动了甘肃省的农业碳排放的增加。2005-2020 年间，生产效率因素和劳动力因素分别累计实现了 4320.96 万吨和 504.73 万吨的碳减排量，农业经济发展水平因素和农业产业结构

因素累积带来了的 7679.40 万吨和 26.12 万吨的碳排放量。

#### 4.2.1 农业生产效率因素

由图 4.1 可知,农业生产效率是抑制农业碳排放的最主要的因素。2005~2020 年农业生产效率因素对甘肃省农业碳排放的效应一直是负值状态,尤其是 2020 年,农业生产效率因素对甘肃省农业碳减排贡献量达到 727.64 万吨,说明近年来甘肃省农业生产效率的提高有效抑制了农业碳排放。2005 年以来生产效率因素累计效应值为-4320.96 万吨,也就是说,在其他的三个影响因素不变的前提下,甘肃省农业生产效率的提高使得甘肃省近年来累计减少了 4320.96 万吨碳排放,其中 2020 年抑制作用最大,累计减少了 727.64 万吨碳排放。总的来说,2005 年以来,甘肃省农业技术的快速发展和成果转化,使其单位投入效益不断提高,促进了农业生产的集约化经营,成为制约农业碳减排的重要推动力。所以,提高农业资源的使用效率是甘肃省今后切实降低农业碳排放量的一项重要措施,促进农业科技进步、提高农业生产效率以更好地促进甘肃省农业碳减排,是未来实现甘肃省低碳农业发展的重中之重。

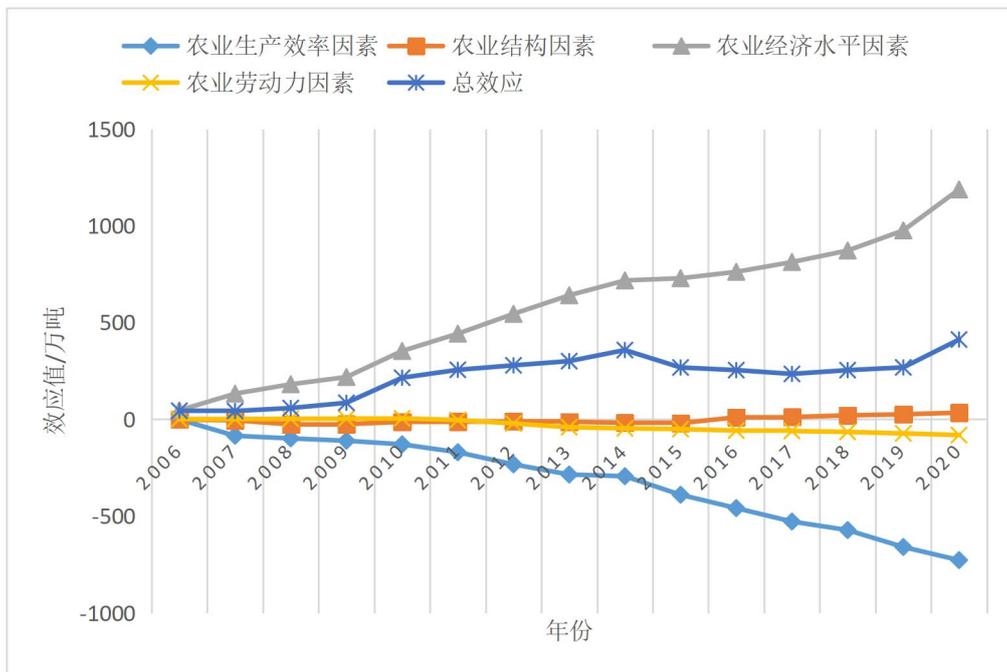


图4.1 甘肃省农业碳排放LMDI分解结果

### 4.2.2 农业产业结构因素

如图 4.1 可知, 农业产业结构因素总体促进了甘肃省农业碳排放的增加且具有波动性, 有些年份抑制了碳排放的增长, 有些年份促进了碳排放的增长。2005~2020 年农业产业结构因素累计带来了 26.12 万吨的碳排放, 农业结构因素对农业碳排放起到了一定的促进作用。主要原因是甘肃省农业产业结构调整过程相对缓慢, 内部结构比例变动小。2005 年甘肃省农林牧渔的产值占比情况为: 农业占比 66.01%、林业占比 2.89%、牧业占比 20.80%、渔业 0.19%、农林牧渔服务业占比 10.11%, 经过 15 年的农业内部结构调整, 2020 年甘肃省农林牧渔的产值占比情况为: 农业占比 67.69%、林业占比 1.51%、牧业占比 23.54%、渔业占比 0.09%、农林牧渔服务业占比 7.17%。可以看出甘肃省农业产业结构调整并不明显, 而且种植业和畜牧业占比有小幅度上升, 因此期间农业结构因素带来了农业碳排放的少量增长。从时间上看, 2005~2015 年, 农业产业结构因素效应为负值, 农业产业结构对碳排放起到了一定的抑制作用。2016~2020 年, 年结构因素效应出现正值, 对农业碳排放又起到了一定的促进作用, 主要是因为近年来农牧比重增加带来了农业排放量的增加。从这一角度来看, 甘肃省的农业产业结构直接影响了农业的碳排放量, 所以, 要想减少农业的碳排放, 就要对甘肃省农业产业结构进行不断调整和完善, 寻求一种高产出、低排放的农业发展方式。

### 4.2.3 农业经济水平因素

由表可知, 农业经济水平是促进甘肃省农业碳排放量增加的最主要因素, 2005~2020 年经济因素效应值均呈正值, 农业经济水平因素累计带来了 7679.40 万吨的碳排放, 其中 2020 年的效应值最大, 为 1186.90 万吨, 这主要是因为 2020 年甘肃省的农业生产规模扩大, 农业生产总值的大幅度提高导致的。

图 4.1 结果显示, 经济因素导致的碳排放总体不断上升趋势, 对农业碳排放量的促进作用远远大于总效应和农业结构因素, 说明甘肃省农业碳排放量的增加主要来源于农业经济的快速发展。2005~2020 年甘肃省农业碳排放与农业经济发展水平具有高度的一致性。甘肃省农业生产总值从 2005 年的 549.71 亿元上升到 2020 年的 2103.61 亿元, 提高了近 4 倍。其中, 种植业 2005 年产值为 363.89

亿元，2020 年达到 1423.84 亿元，增加了 292.36%；畜牧业 2005 年产值 114.32 亿元，2020 年达到 495.29 亿元，增加了 333.23%。与此同时，农业碳排放从 2005 年的 577.78 亿吨增长到 2020 年的 810.79 亿吨，同比增长 40.33%。总体上经历了快速增长、平稳下降和缓慢增长三个阶段。

甘肃省农业经济快速发展的同时带来了农业碳排放的增长，因此，如何在促进甘肃省经济增长的同时降低农业碳排放，真实意义上实现低碳农业，可持续农业的发展仍是需要关注的重点。

#### 4.2.4 劳动力因素

劳动力因素对甘肃省农业碳排放的起到了抑制作用，该因素在 15 年间累积效应为-504.73 万吨的碳排放，这意味着假定在其它因素不变的情况下，劳动力因素减少了 504.73 万吨的农业碳排放量。其中，2005~2010 年劳动力因素促进了少量的碳排放，该阶段研究区劳动力水平有待加强，仍采用粗放的经营方式，劳动力因素对农业碳排放量的增长起着推动作用；2010~2020 年劳动力因素对甘肃省农业碳排放的起到持续的抑制作用，通过分析发现，这一阶段劳动力因素驱动力呈现逐年上升的趋势，出现这一趋势的原因与劳动力数量的降低有关。甘肃省的农业就业人数，从 2005 年的 1027.3 万人下降到 2020 年的 713 万人，期间农业就业人数不断下降。通过甘肃省农村劳动力在一二三产业的转移，推动了甘肃省农业现代化、工业化，进一步提高了农业生产效率。然而，甘肃省的农业劳动科技知识水平还不够高，其影响程度远低于生产效率因素，所以对农业碳排放的抑制作用较小，其影响程度仅为农业劳动科技知识积累的 1/12。随着甘肃省城镇化的不断发展，农业劳动力逐渐由第一产业转移到第二、第三产业的，农业劳动力的规模不断减少，农业劳动力的流失使得单位耕地面积农资投入相对减少，这是劳动力因素贡献值呈负的主要原因。

## 5 甘肃省农业碳排放与农业经济脱钩分析

### 5.1 TAPIO 脱钩模型

为了进一步探究甘肃省农业碳排放与农业经济增长之间的关系,本文再借鉴学者的基础上构建碳排放脱钩模型来进行分析。根据脱钩弹性系数将农业碳脱钩分为八种类型,详细划分情况见表 5.1。本文选用 TAPIO 模型来分析甘肃省的农业碳排放与农业经济增长之间的脱钩关系,建立了以下脱钩弹性系数模型,具体公式如下:

$$e^j = \frac{(C_j - C_{j-1})/C_{j-1}}{(G_j - G_{j-1})/G_{j-1}} = \frac{\Delta C/C_{j-1}}{\Delta G/G_{j-1}} \quad (5.1)$$

公式(5.1)中,  $e^j$ 表示脱钩弹性指数,  $C_j$ 、 $G_j$ 和 $C_{j-1}$ 、 $G_{j-1}$ 分别表示第  $j$  年甘肃省的农业碳排放量、农业总产值和第  $j-1$  年的农业碳排放量、农业总产值<sup>[44]</sup>。

参照 TAPIO 所建立的脱钩分类,并结合本文的实际,建立了脱钩关系分类体系,主要分为八种类型,它们分别是在农业经济增长或衰退过程中相应的农业碳排放量增加或减少的状态,其中强脱钩农业经济增长和农业碳排放之间较理想的状态,弱脱钩为一种相对理想的状态,扩张性连结表示不可持续和较理想的状态,但仍有改善的空间,其余的脱钩状态都意味农业经济增长和农业碳排放之间关系发展不可持续<sup>[40]</sup>。

根据弹性系数值划分的各种脱钩状态及其经济含义见表 5.1

表 5.1 TAPIO 脱钩指数评价指标表

脱钩类型	脱钩状态	碳排放 $\Delta C/C$	农业经济增		弹性系数 $e$	经济含义
			长率 $\Delta G/G$			
	强脱钩	<0	>0		$e < 0$	农业经济增长; 碳排放减少
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
	衰弱脱钩	<0	<0		$e > 1.2$	农业经济衰退; 碳排放大幅衰退
	强负脱钩	>0	<0		$e < 0$	农业经济衰退; 碳排放增加
负脱钩	弱负脱钩	<0	<0		$0 \leq e < 0.8$	农业经济衰退; 碳排放缓慢衰退

	扩张负脱钩	>0	>0	$e > 1.2$	农业经济增长；碳排放大幅增长
连接	增长连接	>0	>0	$0.8 \leq e \leq 1.2$	农业经济增长；碳排放中速增加
	衰弱连接	<0	<0	$0.8 \leq e \leq 1.2$	农业经济衰退；碳排放大幅减少

## 5.2 甘肃省农业碳排放与农业经济增长脱钩状态分析

利用公式(5.1)可得到甘肃省 2005~2020 年的农业碳排放量与农业经济增长之间的 TAPIO 脱钩指数，由表 5 的计算结果可以看出，甘肃省农业碳排放量与农业 GDP 之间主要以弱脱钩和强脱钩为主，分别有 11 个年份呈此状态，4 个年份呈现扩张连接状态，整体脱钩状态良好。

甘肃省农业碳排放与农业总产值两者的脱钩状态呈现弱脱钩、强脱钩和扩张连接 3 种状态。前期多以弱脱钩为主，后期连续三年呈现强脱钩状态。从整体来看，农业碳排放与经济发展的关系以脱钩为主，说明甘肃省业经济的增长速度快于农业碳排放增长速度，呈现良好的态势，甘肃省的农业碳减排工作取得了明显的成效，农业生产与资源环境之间的矛盾日趋缓和。依据甘肃省农业碳排放与农业生产总值的变化状况，将两者脱钩状态的演变过程划分为三个阶段：

表 5.2 2005~2020 年甘肃省农业碳排放脱钩状态

年份	$\Delta C/C$	$\Delta G/G$	$e$	特征
2005-2006	0.075	0.061	1.230	增长连接
2006-2007	-0.003	0.071	-0.039	强脱钩
2007-2008	0.040	0.051	0.793	弱脱钩
2008-2009	0.064	0.056	1.141	增长连接
2009-2010	0.136	0.684	0.199	弱脱钩
2010-2011	0.045	0.684	0.065	弱脱钩
2011-2012	0.026	0.064	0.403	弱脱钩
2012-2013	0.029	0.049	0.585	弱脱钩
2013-2014	0.052	0.054	0.967	增长连接
2014-2015	-0.107	0.057	-1.870	强脱钩
2015-2016	-0.026	0.053	-0.486	强脱钩

2016-2017	-0.037	0.052	-0.716	强脱钩
2017-2018	0.015	0.037	0.404	弱脱钩
2018-2019	0.009	0.058	0.150	弱脱钩
2019-2020	0.048	0.052	0.908	增长连接

第一个阶段是 2005 年~2014 年，为波动阶段。

在此期间，甘肃省农业生产总值的增长速度高于农业碳排放量增长速度，表现为弱脱钩、强脱钩和扩张连接 3 种脱钩状态，脱钩状态随着农业碳排放总量的变化而变化，但主要是以弱脱钩和扩张连接为主。随着农业的迅速发展，以及牲畜养殖规模的迅速扩大，在推动农业经济发展的同时，也导致了农业碳排放的不断增加，尤其是 2014 年畜牧业中牛羊的数量猛增导致该年碳排放量处于顶峰，脱钩状态为增长连接。在 2005 年~2014 年，农业碳排放总量递增，由 577.78 万吨增至 902.29 万吨，年均增长率为 5.61%；农业生产总值由 308.41 亿元增至 739.70 亿元，年均增长率为 13.98%。期间得益于甘肃省农业科技水平的不断提高以及农业产业结构的不断调整，农业碳排放增速得到有效抑制。

第二个阶段是 2014 年~2017 年，为强脱钩阶段。

该阶段脱钩态势良好，出现弱脱钩和增长连接两种状态，具体体现在为农业经济缓慢增长，农业碳排放呈下降趋势。这一阶段农业总产值快速增长，农业总产值由 2014 年的 739.70 亿元增加到 2017 年的 896.00 亿元，年均增长率为 7.04%；农业碳排放量由 2014 年的 902.29 万吨减少至 2017 年的 755.98 万吨，年均减少率为 5.40%。低碳绿色农业的发展使得甘肃化肥、农药施用量持续减少，并且畜牧业养殖规模也得到了合理的控制，农业碳排放呈持续下降状态，因而碳排放弹性特征呈现出以强脱钩为主的较理想状态。

第三个阶段是 2017~2020 年，为弱脱钩阶段。

这个阶段总体态势良好，呈现弱脱钩和增长链接两种状态，也就是说，甘肃省该阶段农业经济稳步增长，而农业碳排放却在缓慢增长，农业经济增长速度高于农业碳排放增长速度。农业碳排放由 2017 年的 755.98 万吨上升到 2020 年的 810.79 万吨，年均增速 2.41%；农业生产总值由 896.00 亿元上升到 1237.34 亿元，年均增速 12.69%。这一时期随着国家对农业发展的政策倾斜，使得甘肃省牲畜数量和种植业面积呈现上升趋势，农业碳排放总量处于增长趋势。随着农业技术

的进步、新型农机具的研制与推广，农业生产效率不断提升，降低了农业碳排放，使得农业碳排放速度低于农业经济增长速度，因此这一时段的脱钩关系主要表现为弱脱钩类型。

## 6 结论、建议与展望

本文基于相关研究和甘肃省的实际，选取甘肃省 2005~2020 年的农业发展相关数据，计算出甘肃省 2005~2020 年的农业碳排放的总量和农业碳排放强度，对甘肃省农业碳排放的时序变化特征、空间变化特征、农业碳排放的驱动因素以及农业碳脱钩进行了系统的分析。本章在分析前几章研究结果基础上提出相关的对策建议，为加快实现甘肃省低碳农业目标提供参考。

### 6.1 研究结论

通过测算甘肃省 2005~2020 年农业碳排放量及碳排放强度，分析其时间和空间变化规律、碳排放结构，并对其驱动因素进行分析，最后对农业碳排放与经济发展的脱钩关系进行研究。得到结论如下：

碳排放总量方面：2005~2020 年甘肃省农业碳排放量呈现持续上升—迅速下降—缓慢上升的特征，整体呈波动上升趋势。其变化过程大致可以分为三个阶段，从 2005~2014 年，碳排放总量呈现上升趋势；2014~2017 年呈下降趋势；2017~2020 年，碳排放总量开始缓慢上升。其中，截止到 2020 年，种植业碳排放为 236.32 万吨，畜牧业碳排放为 574.47 万吨，分别占甘肃省农业碳排放的 29.15%和 70.85%。细分来看，农业碳排放主要来源中畜牧业增幅最大，从 2005 年的 403.46 万吨，增加到 2020 年的 574.47 万吨，增加幅度高达 43.39%；种植业从 2005 年的 174.32 万吨，到 2020 年的 236.62 万吨，累计增加 35.74%。

碳排放强度方面：甘肃省农业碳排放强度整体呈持续下降趋势，从 2005 年的 1210.74 千克/万元 GDP 下降到 2020 年的 774.24 千克/万元 GDP，说明甘肃省农业正由粗放型向低碳绿色农业转变。甘肃省 14 地市农业碳排放量及碳排放强度均呈现一定的空间差异性，以畜牧业为主、粮食作物种植面积占比大的地市碳排放量大、碳排放强度高，其中甘南州碳排放量和碳排放强度处于双高状态，工业相对发达城市农业碳排放强度低，各地市的农业可持续发展水平差异比较明显。

碳排放结构方面：从甘肃省农业碳排放的结构来看，畜牧养殖是最大的农业碳源，其次是种植业投入。其中，畜牧养殖中数量最多并且排放量最多的是羊、牛、猪，种植业投入中农膜和化肥的碳排放量最高。以 2020 年为例，甘肃省牛、

羊、猪和化肥、农膜所产生的碳排放量分别占了甘肃省农业碳排放总量的 24.6%、39.22%、5.71 和 8.87%、9.69%。

在驱动因素方面：通过 LMDI 因素分解后发现，总效应呈上升状态。其中，农业生产效率因素和农业劳动力因素对甘肃省的农业碳排放起抑制作用，农业生产效率因素的抑制作用远远大于农业劳动力因素。农业经济因素和农业结构因素促进了甘肃省农业碳排放的增加，农业经济因素大于农业结构因素。综上所述，甘肃省农业碳排放量增长的主要驱动因素是农业经济水平因素和产业结构因素，农业生产效率和劳动力规模在一定程度上抑制了碳排放量的增长，因此甘肃省农业碳减排工作重点应该放在优化产业结构和提高生产效率上面。

脱钩效应方面：2005~2020 年甘肃省农业碳排放与农业经济增长之间的脱钩状态出现弱脱钩、扩张链接和强脱钩 3 种类型，呈现波动期—强脱钩期—弱脱钩期的发展趋势，脱钩弹性系数为-1.84~0.96。总体来看，农业经济增速保持持续正向增长，而农业碳排放量呈波动发展，且农业碳排放量平均增速始终低于农业经济增速，脱钩状态良好。

## 6.2 研究建议

基于以上结论，得到如下政策启示：

第一、推进科技运用，提升畜禽养殖业低碳发展水平。畜禽养殖业碳排放量占甘肃省农业碳排放量的 50%以上，具有较大的减排空间。促进畜牧业低碳发展，要在稳定供给的同时，推进畜禽品种改良，推广新型绿色环保饲料和精准饲喂技术，提高畜禽粪污处理水平，减少畜禽养殖  $\text{CH}_4$  和  $\text{NO}_2$  排放。具体包括：1) 推进畜禽品种改良。建设畜禽资源库，持续实施畜禽遗传改良计划，扎实推进现代种业提升工程。2) 推广精准饲喂技术。饲料质量是影响反刍动物肠道发酵  $\text{CH}_4$  排放的主要因素，采用各种饲料处理方法实施精准饲喂，同时显著提高饲料转化率，减少肠道  $\text{CH}_4$  排放。优化饲料结构，推广饲料精准配制、提升饲料产品品质和利用效率。3) 推进畜禽粪污资源化利用水平。以畜牧重点区域为主，提高畜禽粪污综合利用率。推进标准化规模养殖，推广节新装备、新工艺、新技术提高畜禽粪污处理水平。推进种养结合农牧循环发展，因地制宜推广农牧结合和第三方集中处理模式，促进粪肥就近就地还田利用。

第二、减少单位农业物资的投入，提高农业物资利用的效率。种植业是甘肃省农业碳排放的第二大来源，农业碳减排目标的实现需要在保证粮食产量的前提下提高农业物资利用的效率，减少单位农业物资的投入。主要包括以下几点：1) 开展化肥减量增效行动。通过推广高效施肥技术、调整化肥使用结构、改进施肥方式、有机养分替代部分化肥等措施提高化肥的利用效率。通过物质鼓励的方式让群众能够自发的使用有机化肥，同时，进一步增加土壤施肥的覆盖率，提高化肥的使用效率，减少农田  $\text{NO}_2$  排放。2) 在使用农药时，应采取激励和宣传的方式，引导农民使用低毒和可降解的农药；普及化肥和农药等对环境及土壤所造成的危害意识，从根本上减少人们对其的使用数量和使用频率。3) 提高农膜回收使用率。可以把薄膜研究的最新技术应用到实际的农业生产中，在农膜使用量较高的地区推进农膜回收利用，提高重点用膜区域农膜回收率。4) 开发利用新能源。可以采用清洁能源代替柴油的使用，支持节能环保型生产方式，开发太阳能、风能等新能源，减少高耗能资源的使用，减少温室气体的排放。

第三、尊重区域差异，因地制宜制定碳减排措施。甘肃各地市自然条件和社会发展状况差异较大，每个区域所面临的农业碳排放状况不同，因此要根据每个区域的特殊情况有针对性的制定相应的农业碳减排措施。从碳排放的强度看，兰州市、陇南市和天水市等碳排放强度较低，农业减排压力相对较小，甘南州、庆阳市和张掖市等地区碳排放强度较高，减排压力相对较大，应加强高排放区减排的监管。各个区域要结合自身的特点，对其发展中面临的问题和今后的发展趋势做出正确的判断，并制订出适合自己的发展策略。如甘南州，武威市，张掖市等地区以畜禽养殖碳排放为主，畜牧业碳排放量较大，应该加大畜牧业碳减排的推进，未来的减排重点将致力于优化畜禽粪便管理系统，培育新型畜禽品种，提高提升畜禽养殖业低碳发展水平。

第四、立足资源优势，积极调整农业产业结构。甘肃省农业产业结构以发展畜牧业和种植业为主，15年来农业结构调整相对缓慢，进而导致了大量的农业碳排放。近些年以来，甘肃省农业产业结构对农业碳排放的驱动作用越来越大，这也意味着甘肃省农业碳排在结构方面尚存在较大的减排潜力。所以，要尊重地域差异的前提下，发展优势地区的林业和生态农业旅游产业，强化林业的碳汇能力，各个地区要根据当地的实际情况，发展低碳农业。以市场需要为依据，对

农、林、牧、渔业的比例进行合理安排，以市场为指导，在保证粮食的稳定的前提下，利用农业科技，加大高产量、低污染的农作物的新品种的种植力度，对种植业的内部结构进行调整，合理选取作物种类、提高农业种植技术，来增强植物的生产力和固碳能力。要充分利用各个地区的综合优势，促进畜牧业、水产、农产品加工业的合理分布，从而加速甘肃省的农业产业化进程。

第五、从 LMDI 模型的分解结果可以发现，农业生产效率是抑制甘肃省农业碳排放增加的最重要的因素，因此，降低甘肃省农业碳排放着重发挥农业生产效率因素的作用。但是，甘肃省现代农业发展水平相对较低，某些地区仍然存在着“靠天吃饭”的现象，所以需要加大技术创新力度，将以原本资源优势为依托的产业转变为以技术创新为依托的产业，以提升农业劳动生产率，从而促进农业的碳减排，促进了我国农业的高效、绿色的发展。技术创新能够在某种程度上提升农业的生产力，进而对农业增产、减少碳排放起到积极作用。

### 6.3 研究展望

农业碳排放的核算是评价低碳农业发展的基础，本文的研究还存在着一些不够完善的地方，存在一定的局限性。相比于其他产业，农业碳排放特殊的一点就在于其受碳源和碳汇双重因素影响，因此为了更好地评估农业碳排放影响，应该准确评估农业自身的碳汇潜力。特别是草原碳汇，是未来甘肃省碳汇研究的重点方向。草原是甘肃省最大的生态系统，据统计，甘肃省草原总面积 2.68 亿亩，其中可利用面积 2.41 亿亩。2021 年，全省完成人工种草 203 万亩、草原改良 208 万亩。随着退牧（耕）还草、草原补奖等工程政策的实施，进一步推进了人工草地建设和草牧业转型升级，促进了草原生态生产协调发展。研究人工草地碳储量对陆地生态系统碳源、碳汇的影响及碳收支评估的准确性对甘肃省具有重要意义。农业碳汇是一个复杂的过程，系统中包含了多种不确定和不可量化的因素，以笔者的理论知识水平还无法对其进行较为透彻的分析。未来随着这一领域研究的进一步深入，有望在农业碳汇方面，做出更为全面、详细的研究，以促进甘肃省农业低碳化的进一步发展。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 李国志,李宗植.中国农业能源消费碳排放因素分解实证研究—基于 LMDI 模型[J].农业技术经济,2010(10):66-71.
- [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] 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):42-46.
- [5] 冉锦成,苏洋,胡金凤,汪晶晶.新疆畜牧养殖经济效益与碳排放脱钩关系的实证研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(1):17-23.
- [6] 何艳秋,陈柔,吴昊玥,徐杰,宋艺.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.
- [7] 韦玉琼,龙飞.乡村振兴背景下农业农村碳排放变动及减排策略[J].农业经济问题,2022,4:1-14.
- [8] 邱子健,靳红梅,高南.江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J].农业环境科学学报,2022,41(3):658-669.
- [9] 田云,尹恣昊.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].中国农业经济,2022,447(03):104-127.
- [10] 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,2021,15(6):37-44.
- [11] 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,2022,30(04):558-569.
- [12] 李兰兰,於冉,於忠祥,秦岩,曹益君.基于 STIRPAT 模型的长江经济带农业碳排放时空特征及影响因素分析[J].安徽农业大学学报,2020,29(5),32-37.
- [13] 宋艺,谢彤云,王澜熹,吴倩,许鲜.我国农业碳排放影响因素的实证研究--基于灰色关联模型[J].农业与技术,2020,40(08),143-147.
- [14] 信猛,陈菁泉,彭雪鹏,师岚,钱辉.农业碳排放驱动因素——区域间贸易碳排放

- 转移网络视角[J].中国环境科学,2023,43(03):1460-1472.
- [15] 常青,蔡为民,谷秀兰,吴云青,张佰林.河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测[J].水土保持通报,2023,43(01):367-377.
- [16] 仇冬芳,邵华洋,胡正平.基于熵权法的农业碳减排与农村金融支持耦合研究[J].江西农业学报,2016,28(02):112-117.
- [17] 张跃超.低碳农业与农村金融协调发展研究[J].农业经济,2013(05):96-98.
- [18] 张再杰,陆品妮.农业碳排放的测度与脱钩弹性研究——以贵州省为例[J].农村经济与科技,2022,33(13):1-3.
- [19] 黄伟文.EKC 视角下福建省农业碳排放与经济增长关系的实证研究[J].台湾农业探索,2021,4,51-58.
- [20] 丁宝根,赵玉,罗志红.长江经济带农业碳排放的 E K C 检验及影响因素研究[J].中国农机化学报,2019,40(9):223-228.
- [21] 梁滢月,李兰英.农业碳排放的 EKC 检验及影响因素研究——以长三角地区为例[J].福建农业科技,2022,53(1):72-80.
- [22] 蒋添诚,胡纯,王巧稚,吴尔希.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.
- [23] 马光辉,张迎春,姚芳斌.中国渔业经济碳排放驱动因素研究—基于 LMDI 和脱钩模型的双视角分析[J].青岛大学学报(自然科学版),2022,35(1):117-123.
- [24] Mosier, A.R, Duxbury, J.M, & Freney, J.R. et al Mitigating agricultural emissions of methane[J]. Climate Change, 1998, 40(1):39-80.
- [25] 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
- [26] Vida Dabkiene, Tomas Balezentis, Dalia Streimikiene Calculation of the carbon footprint for family farms using the Farm Accountancy Data Network A case from Lithuania[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 26(2):1352-1360.
- [27] Smith P, Martino D, Eory V, et al. Developing greenhouse gas marginal abatement cost curves for agriculture emissions from crops and soils in the UK[J]. Agriculture Systems, 2010, 103(4):198-209.
- [28] Peipei Tian, Dan Li, Hongwei Lu, et al. Trends distribution and impact factors of carbon footprints of main grains production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 27(8):123-347.

- [29] Rehman Abdul Ma Hengyun Irfan Muharmad et al. Does carbon dioxide methane, nitrous oxide, and GHG emissions influence the agriculture Evidence from China[J]. Environmental Science and Pollution Research 2020,27(23):28768-28779
- [30] ZHANG Q, XIAO J, XUE J, et al. Quantifying the Effects of Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils:A Global Meta-Analysis [J]. Sustainability, 2020, 12(8).
- [31] YADAV D, WANG J. Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada [J]. Environmental Pollution, 2017.
- [32] Lina Zhang, Donghui Chen, Sha Peng, Qing hua Pang, Fangjuan Li. Carbon emissions in the transportation sector of Yangtze River Economic Belt: decoupling drivers and inequality[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(2): 21098-21108.
- [33] Li R, Jiang R. Investigating effect of R&D investment on decoupling environmental pressure from economic growth in the global top six carbon dioxide emitters. Science of the total environment, 2020.
- [34] Sajjad Ali, Li Gu cheng, Liu Ying, et al. The Relationship between Carbon Dioxide Emissions Economic Growth and Agricultural Production in Pakistan[J]. An Autoregressive Distributed Lag Analysis, 2019, 12(24): 4644-4667
- [35] V Lantz, Q Feng. Assessing income population and technology impacts on CO<sub>2</sub> Emissions in Canada: where's the EKC[J]. Ecological Economics, 2006, 5(7): 229-238.
- [36] MUHAMMAD, JAVID, FATIMA, et al. Environmental Kuznets curve and financial development in Pakistan [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016.
- [37] Rongrong Li, Rui Jiang. Investigating effect of R&D investment on decoupling environmental pressure from economic growth in the global top six carbon dioxide emitters[J]. Science of the Total Environment, 2020, 7(40): 631-658.
- [38] KANG Wenmei, LIANG Benfan, XIA Keyu, XUE Fei, LI Yu. Decoupling of Carbon Emissions from Economic Growth: An Empirical Analysis Based on 264

Prefecture-Level Cities in China[J].Chinese Journal of Urban and Environmental Studies,2021,03(09).

[39]IPCC.IPCC fourth assessment report,working group II : summary for policy makers [M] //Climate change.Cambridge: Cambridge University Press,2007.

[40]张义琼.近 29 年来德阳市农牧业碳排放估算及脱钩关系研究[D].四川:四川师范大学,2021.

[41]范博群.吉林省农业碳排放变化机理研究[D].吉林:吉林大学,2010.

[42]刘处菊.湖南省农业碳排放与经济发展脱钩研究[D].湖南:湖南农业大学,2019.

## 致谢

行文至此，感慨万千，求学近二十年的征程终将画上句号。回顾读研的三年，有遗憾，有喜悦，有满足，更多的是感谢，借此论文完成之际，对所有陪伴和帮助过我的人致以最诚挚的感谢。

感谢我的导师武翠芳老师三年来在学术上和生活上给予我的帮助，武老师学识渊博，治学严谨，待人真诚，在论文撰写期间，耐心地为我修改错误，提出方向，本文才得以顺利完成。真诚的祝您身体健康，工作顺利。其次感谢各位任课老师在这三年中授予的专业知识和做人的道理，承蒙教诲，心存感激。

感谢我的父亲母亲，这一路走来，父母之恩，不必多言，作为一个农村长大的孩子，在二十多的年纪，还不能为家里做些什么，我的内心一度非常惭愧，唯有今后万般努力才能成为你们的骄傲，也希望你们身体健康，万事顺遂，这也是我最大的期望和心愿。

感谢一路上的伙伴们，你们都是我一路走来最宝贵的精神财富。感谢同师门的师姐和师妹们在生活上和学习上的帮助，祝福你们学业顺利，前程似锦。感谢 214 的全体室友：苏文杰、孔云霄和杨春月谢谢你们三年来给予我的帮助，感谢疫情封控的日子有你们的陪伴，我们一同度过了很多美好的时光，感谢这一路的相伴让我的校园生活不曾孤单和落寞，我会记得我们相册里互相留下的照片，记得西关逛街路上捧腹大笑的我们，真心祝福即将远行的你们前程似锦，取得更多的辉煌。

感谢我的男朋友张峰，非常感谢命运再一次眷顾了我，让我们相遇。相识的两年来，你一直在包容着我，支持我，一直坚定我是最棒的，时时刻刻鼓励着我，让我对未来充满希望，得友如此，吾复何求，愿未来的日子里依旧不负彼此，携手余生。

最后，我要感谢一直坚持心中理想的自己，感谢你一直默默努力，感谢你做出的每一个选择，每一次的尝试和付出，或许你还不够完美和优秀，但我依然相信未来的你充满无限可能，同时也希望你能不忘初心，成为更好的自己。