

# 摘要

## 吉林省生态循环模式下肉牛养殖温室气体排放研究

当今世界，百年未有之大变局加速演进，气候变化挑战突出，给全人类生存和发展带来极为繁重艰巨的挑战。农业不仅是全球第二大温室气体排放源，亦是我国国民经济基础，如何平衡农业减排与经济增长的协同发展是我国持续关注要点。力争率先实现农业现代化的吉林省高度重视应对气候变化工作，特别是2021年由吉林省人民政府办公厅印发的《关于实施“秸秆变肉”暨千万头肉牛建设工程的意见》提出的秸秆饲料化、粪污肥料化等农业废弃物资源化综合利用方式能够有效避免温室气体大量排放，是推动种养循环发展的根本路径，促进吉林省农业实现绿色低碳可持续发展。

本文以吉林省为例，首先，选取其2003-2021年种养业相关数据，采用排放因子法核算温室气体排放量，分析吉林省种养业温室气体排放变化趋势；然后，借助Kaya恒等式和LMDI模型，识别导致种养业温室气体排放变动的影响因素及机理，估算其贡献度；最后，根据生命周期评价方法（Life Cycle Assessment, LCA），比较分析生态循环（Ecological Cycle, EC）模式与非生态循环（Non-Ecological Cycle, non-EC）模式下养殖1000万头肉牛各环节年温室气体排放差异，由此解释吉林省“秸秆变肉”政策的现实意义。本文主要研究结论表明：

第一，种养业仍是吉林省农业系统中的重要支撑，且目前已形成了种植业与养殖业并驾齐驱的格局；2003年至2021年吉林省种养业实现了温室气体排放“低强度—低密度”发展模式，在该阶段养殖业温室气体排放量波动幅度较大，但整体呈现下降趋势，且其排放量持续超过同一时期种植业平缓上升的排放量，两者排放量差距也在逐步缩小。

第二，能源结构、能源强度、产业结构和农业劳动力因素对吉林省种养业温室气体排放具有抑制作用，而经济水平因素呈现显著的驱动温室气体排放作用。因此可通过能源结构优化、产业结构转型升级以及农业劳动力素质提升等方式实现温室气体减排目标，应避免因一味地追求经济增长而忽略环境承载力的极限。

第三，non-EC模式下养殖1000万头肉牛的年温室气体排放量约为EC模

式的 4 倍。从各个环节角度，EC 模式的温室气体排放量都显著低于 non-EC 模式，特别是饲料粮种植、粪便管理以及秸秆焚烧环节两模式排放量相差最为悬殊，分别相差  $36.74 \times 10^7 \text{t}$ 、 $14.44 \times 10^7 \text{t}$  和  $4.19 \times 10^7 \text{t}$ ，由此确定秸秆饲料化和粪便肥料化利用是促进种养结合的 EC 模式良好运行之关键；从各个种类温室气体角度，non-EC 模式下产生的每种温室气体排放量都显著多于 EC 模式，特别是  $\text{CO}_2$  排放量差距最大，分别占各自种养系统比例的 68.01% 和 56.17%。

第四，实施“秸秆变肉”暨千万头肉牛建设工程对吉林省种养殖业温室气体具有显著减排作用，是一种能将生态效益更好转化为经济效益和社会效益的前瞻性举措，对我国发展低碳农业具有深刻的理论与实践意义。

基于上述研究结论，本文对完善吉林省肉牛养殖种养结合机制提出五点对策建议：第一，大力推广生态循环模式；第二，构建新能源高效开发利用的肉牛产业链；第三，促进肉牛产业转型升级；第四，提高肉牛养殖相关劳动力素质；第五，提升肉牛产业科技创新。

**关键词：**

生态循环肉牛养殖，温室气体排放，Kaya 恒等式，对数平均迪氏指数法，生命周期评价法

## **Abstract**

### **Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Breeding**

#### **Based on the Ecological Cycle Model in Jilin Province**

The world is experiencing profound shifts unseen in a century. Especially, the challenge of climate change has been prominent, posing an extremely onerous and serious threat to the survival and development of all the human beings. As the world's second largest source of greenhouse gas emissions and the foundation of China's national economy, the agriculture shoulders the great responsibility to reduce emissions. In this way, how to keep an appropriate balance between the economic growth and emission reduction from agriculture, is a hot point for the Chinese government.

Jilin Province, which strives to be the first to realize agricultural modernization, pays great attention to the issue of tackling the climate change. In particular, the government of Jilin Province unveiled the implement of “the Straw into Cattle Meat” in 2021, namely the construction project of breeding 10 million heads of beef cattle, which revealed the comprehensive utilization of agricultural wastes, such as straw fodder and manure fertilization, can effectively avoid a large proportion of greenhouse gas emissions. In addition, it is also a fundamental path to promote the development of the planting and breeding system with green, low-carbon and sustainable agriculture.

Taking Jilin Province as an example, this paper selects data related to the planting and breeding industry from 2003 to 2021, and uses Emission-Factor Approach to calculate the quantity of greenhouse gas emissions so that analyze its trend. Besides, estimating the influential factors and mechanism that lead to emit emissions of planting and breeding system via the Kaya identity and LMDI model, at the same time, analyzing each value of its contribution. Finally, according to the life cycle assessment (LCA), predicting the annual greenhouse gas emissions of 10 million heads of beef cattle under both the ecological cycle model (EC model) and the non-ecological cycle model (non-EC model), respectively, in order to compare the differences between these

two production models in each process, and thus explore which one is more sustainable and environmentally friendly. The main conclusions of this paper are as follows.

First, the planting and breeding system is still the important support for the agricultural industry of Jilin Province and it has already formed a pattern that the planting and breeding go hand in hand. In addition, from 2003 to 2021, the system in Jilin Province achieved the “low intensity-low density” emitting pattern. During this period, greenhouse gas emissions from breeding industry fluctuates considerably, however, showed an overall downward trend, and its emissions continued to exceed the steadily rising emissions from planting industry, and the gap between these two emissions were gradually narrowing.

Second, the energy structure, energy intensity, industrial structure and agricultural labor factors have the suppressive effect on greenhouse gas emissions, while the economic level factor shows a significant driving effect on emitting emissions. Therefore, it can achieve greenhouse gas emission reduction through adjusting the first four factors, at same time, avoiding the obsessive pursuit of economic growth at the expense of the limits of the environmental carrying capacity.

Third, the annual greenhouse gas emissions from breeding 10 million heads of beef cattle under the non-EC model are approximately 4 times higher than those under the EC model. In almost all processes of the LCA, the greenhouse gas emissions of the EC model are significantly lower than those of its counterpart has, especially the processes of corn planting, manure management and straw burning are the main emission sources with the most differences in amounts of emissions in both models,  $36.74 \times 10^7$ t、  $14.44 \times 10^7$ t and  $4.19 \times 10^7$ t respectively. That means for the sake of promoting waste and resource recycling in the breeding system, it is worth noting that utilizing straw as livestock feed and manure as fertilizers are core methods of the EC model. On the other hand, regardless of which kind of greenhouse gas emissions are produced in the non-EC model, the amount of emissions is dramatically higher than that in the EC model. In particular, the difference in CO<sub>2</sub> emissions is the largest compared with CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions, and the large proportions of CO<sub>2</sub> emissions account for 68.01% and 56.17% in their respective breeding systems as well.

Forth, in terms of the implementation of “the Straw into Cattle Meat”, it makes theoretical and practical implications in Jilin Province that it would have a significant effect on greenhouse gas emission reduction in both the planting industry and beef cattle breeding industry, and it is also a forward-looking initiative that can translate ecological benefits into economic and social benefits.

Based on the above findings, this paper puts forward five policy suggestions in order to enhance the mechanism of Jilin Province’s planting and breeding system. First of all, to vigorously push the implement of the EC model. Second, to strengthen the construction of efficient new energy development and utilization system of the beef cattle’s industrial chain. Third, to promote the transformation and upgrading of the beef cattle’s industry. Forth, to improve the quality of the labor force. Finally, to encourage the scientific and technological innovation in the beef cattle’s industry.

**Keywords:**

Ecological cycle, Greenhouse gas emissions, Kaya identity, LMDI decomposition model, Life cycle assessment

# 目 录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的及意义 .....	3
1.2.1 研究目的 .....	3
1.2.2 研究意义 .....	3
1.3 国内外研究现状 .....	3
1.3.1 关于种养殖业温室气体排放量核算的研究 .....	3
1.3.2 关于种养殖业温室气体排放影响因素的研究 .....	5
1.3.3 关于种养殖业温室气体减排对策的研究 .....	7
1.3.4 文献评述 .....	10
1.4 研究设计 .....	10
1.4.1 研究内容 .....	10
1.4.2 研究方法 .....	11
1.4.3 技术路线 .....	12
1.5 研究创新之处 .....	13
第二章 概念界定和理论基础 .....	15
2.1 概念界定 .....	15
2.1.1 温室气体排放 .....	15
2.1.2 生态循环模式 .....	15

2.2 理论基础 .....	16
2.2.1 外部性理论 .....	16
2.2.2 物质循环理论 .....	17
2.2.3 低碳农业理论 .....	17
2.2.4 可持续发展理论 .....	18
2.3 本章小结 .....	19
第三章 吉林省种养业温室气体排放核算及影响因素分析 .....	21
3.1 吉林省种养业发展现状 .....	21
3.2 吉林省种养业温室气体排放核算模型构建 .....	24
3.2.1 种植业温室气体排放核算 .....	25
3.2.2 养殖业温室气体排放核算 .....	25
3.3 吉林省种养业温室气体排放核算结果及动态变化分析 .....	26
3.3.1 种养业温室气体排放结构 .....	26
3.3.2 种养业温室气体排放总量及强度与密度分析 .....	30
3.4 吉林省种养业温室气体排放影响因素分析 .....	33
3.4.1 Kaya 恒等式 .....	33
3.4.2 LMDI 模型 .....	34
3.4.3 影响因素计算结果分析 .....	35
3.5 本章小结 .....	39
第四章 吉林省不同模式下肉牛养殖温室气体排放分析 .....	41
4.1 吉林省肉牛养殖与玉米种植发展状况 .....	41
4.2 研究方法 .....	44

4.2.1 生命周期评价方法 .....	44
4.2.2 生态循环模式下肉牛养殖温室气体排放核算 .....	46
4.3 指标选取与数据来源 .....	50
4.4 不同模式下肉牛养殖温室气体排放核算结果对比分析 .....	53
4.4.1 饲料粮种植环节 .....	54
4.4.2 粪便管理环节 .....	55
4.4.3 秸秆焚烧环节 .....	56
4.4.4 不同种类温室气体 .....	56
4.5 不确定性分析 .....	57
4.6 本章小结 .....	57
第五章 推进吉林省肉牛养殖生态循环发展的对策建议 .....	59
5.1 大力推广生态循环模式 .....	59
5.2 构建新能源高效开发利用的肉牛产业链 .....	60
5.3 促进肉牛产业转型升级 .....	61
5.4 提高肉牛养殖相关劳动力素质 .....	62
5.5 提升肉牛产业科技创新 .....	63
第六章 结论与展望 .....	65
6.1 主要研究结论 .....	65
6.2 论文不足及展望 .....	66
参考文献.....	67
作者简介及在学期间所取得的科研成果 .....	78
致谢.....	79



## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

气候变化是当前世界面临的最严峻挑战之一，与之密切相关的温室气体排放问题已成为国内外关注的焦点。2021年8月，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）在第六次评估报告中发布《2021年气候变化：自然科学基础》指出近年来温室气体肆意排放引发极端高温、海洋热浪、农田干旱等全球变暖现象加剧，因此要限制累计二氧化碳排放量，同时大幅减少其他温室气体排放量<sup>①</sup>。2022年10月，世界气象组织（WMO）发布《2021年全球温室气体公报》指出二氧化碳一直是最重要的碳源，约占气候变暖效应的66%；而甲烷、一氧化二氮分别约占气候变暖效应的16%和7%，其中约60%的甲烷来自反刍动物、水稻农田、化石燃料开采、垃圾填埋和生物质燃烧等，约40%的一氧化二氮产生于生物质燃烧、化肥施用等人为活动<sup>②</sup>。同年11月，WMO发布《2022年全球气候状况临时声明》根据近几年温室气体浓度上升趋势、热量积累，预测过去八年有望成为自气象记录以来最热的阶段，将造成数十亿元的经济损失，更为严重的是，估计2022年全球平均气温较1850-1900年（工业化前）平均气温高出约1.15℃<sup>③</sup>。

我国是全球应对气候变化的积极践行者和重要贡献者。2020年9月，习近平总书记于第七十五届联合国大会上提出“采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”。2022年10月发布“二十大”报告提出要基于人与自然和谐共生、绿水青山就是金山银山理念，坚决推动绿色发展，从绿色生产全面转型、农业环境污染防治、农业生物多样性保护以及农业减排固碳的角度达到降碳、减污、扩绿、增长的效果。2023年1月，中国气象局发布《2021年中国温室气体公报》对国家级和省级二氧化碳、甲烷、一氧化二氮等温室气体观测数据质量、观测能力提出了更高水平的要求<sup>④</sup>。

<sup>①</sup> IPCC《2021年气候变化：自然科学基础》，

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM>

<sup>②</sup> WMO《2021年全球温室气体公报》，

[https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202205/t20220523\\_4846229.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202205/t20220523_4846229.html)

<sup>③</sup> WMO《2022年全球气候状况临时声明》，

[https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202211/t20221115\\_5179780.html](https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202211/t20221115_5179780.html)

<sup>④</sup> 中国气象局《2021年中国温室气体公报》，

[http://www.gov.cn/xinwen/2023-01/10/content\\_5736043.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2023-01/10/content_5736043.htm)

作为重要温室气体排放源的农业,其温室气体排放量占全球总排放量约 25%,仅在中国,农业温室气体排放量占全国总排放量就高达 15%<sup>[1]</sup>,而畜牧业对农业温室气体排放的贡献举足轻重。《第二次全国污染源普查公报》指出我国畜禽养殖业废水排放居农业污染源之首,占农业污染源的 93.76%<sup>[2]</sup>,其中反刍动物甲烷排放是主要的农业温室气体排放源之一<sup>[3]</sup>。值得注意的是,肉牛产业的逐步壮大,在一定程度上满足了人们对高品质肉类的迫切需求,却迫使环境承载力面临前所未有的巨大压力,亦潜在打破僵局的机遇。2015 年中央一号文件《关于加大改革创新力度加快农业现代化建设的若干意见》中强调要开展粮改饲和种养结合模式试点。此后,国家相关部门先后发布一系列政策规划,如 2023 年发布的《新时代的中国绿色发展》白皮书、2023 年中央一号文件等。

吉林省长期致力于壮大肉牛产业的过程中,不断探索以种养结合为核心的生态循环路径。近年来,吉林省全省牛肉产量占全国牛肉的比重保持在约 6%,然而吉林省传统的粪便处理方式无法将大量粪便通过种植业消纳,使得环境承载力负荷过大。另一方面,吉林省作为我国重要的粮食作物主产区,多年来在黑土地保护、高标准农田建设以及种业创新发展等方面取得显著成效,全省主要农作物良种覆盖率 100%,对粮食增产贡献率达到 45%<sup>①</sup>,然而,其丰富的秸秆资源却主要以家庭燃用、直接露天焚烧等高排放低效益的方式使用,综合利用率极低。两个方面共同作用,阻断资源在种植业与养殖业间的循环,导致种养分离、农牧脱节,造成严重的资源浪费和环境污染。

在国家政策的引导下,吉林省较早意识到上述问题并采取治理行动。为实现“双碳”目标,吉林省大力推行种养系统的生态循环模式,与我国高质量发展阶段要求高度契合。特别是 2021 年 9 月,吉林省人民政府办公厅下发的《关于实施“秸秆变肉”暨千万头肉牛建设工程的意见》指出要以种养结合、农牧循环、绿色发展为导向,力争到 2025 年秸秆饲料化利用占秸秆总量 60%,全省肉牛养殖规模达到 1000 万头,进一步做大做强肉牛产业。该政策的落实,能够促进肉牛产业规模化发展,有效衔接种植业与养殖业,避免温室气体过渡排放具有一定现实意义。

<sup>①</sup> 吉林省农业农村厅《全省主要农作物良种覆盖率 100% 对粮食增产贡献率达到 45%》, [http://agri.jl.gov.cn/xdny/zycxfz/202212/t20221222\\_8650974.html](http://agri.jl.gov.cn/xdny/zycxfz/202212/t20221222_8650974.html)

## 1.2 研究目的及意义

### 1.2.1 研究目的

吉林省长期以来的传统种养模式高投入、高耗能、高排放的弊端日益凸显，新发展格局下以种养结合为核心的生态循环模式是否能够取代传统模式，是否能够平衡好经济、社会与生态效益三者的互促共进，是本文研究的要点。鉴于此，本研究目的为：第一，探究吉林省种养业温室气体排放概况；第二，分析其温室气体排放的影响因素；第三，对比采用种养结合方式的生态循环模式与种养脱节的非生态循环模式下分别养殖 1000 万头肉牛的各个环节年温室气体排放差异；第四，解释吉林省“秸秆变肉”暨千万头肉牛建设工程的现实意义，为相关政策出台提供参考依据。

### 1.2.2 研究意义

#### (1) 理论意义

第一，本文通过分析吉林省种养业温室气体排放影响因素，明晰其排放机理，从而给出减排路径，对秸秆饲料化和粪污肥料化利用提供了理论借鉴；第二，本文通过对吉林省肉牛养殖的不同方式进行对比，以定量的方法使温室气体排放量的估计值更加精准，从而提出针对性对策建议；第三，本文经实证分析提出一种新的肉牛养殖模式，为吉林省肉牛产业提供节能减排发展路径。

#### (2) 现实意义

第一，本文通过对吉林省肉牛养殖的温室气体排放情况的测度评价，了解吉林省当前种养业温室气体排放水平现状；第二，本文通过对生态循环模式和非生态循环模式下肉牛养殖造成的排放量差异性分析，为具有相似环境资源禀赋的地区推进农业碳减排指明方向，并对种养业废弃物资源化利用、种养业低碳转型提供政策建议。

## 1.3 国内外研究现状

### 1.3.1 关于种养业温室气体排放量核算的研究

### (1) 国外研究现状

核算方法的选择是温室气体排放量核算过程的必要步骤。目前适用范围较广的核算方法主要是排放因子法,是由 IPCC 根据《联合国气候变化公约》(UNFCCC)要求所提供的方法。世界资源研究所(WRI)于 2014 年发布的《温室气体议定书—城市核算报告标准》为城市碳排放核算提出 GPC 框架法,通过活动水平数据和相关参数来核算碳排放量,相比 IPCC 推荐方法更加具体、全面,且 GPC 框架法作为一种自下而上的核算方法,能够根据需要来收集较为详实的数据,其核算结果更有利于分析排放结构、识别关键排放源等。WRI 与世界持续发展商业理事会(WSCSD)在企业(组织)层面发布相关碳排放核算标准。

此外,实测法、模型法、全生命周期法、物料平衡法等<sup>[4-9]</sup>方法同样适用于农业温室气体排放量的核算。Cederberg 和 Stadig (2003)利用生命周期评价方法计算了不同方式处理有机牛奶产品的温室气体排放量,同时强调牛奶和牛肉相互结合的生产方式是十分重要的,并预测了该方式下对环境造成的影响情况,指出每千克肉牛的温室气体排放量为 22.3kg CO<sub>2</sub>-eq<sup>[10]</sup>。Nguyen 等(2010)认为由于研究地区、系统边界、计算参数等多种因素的不一致导致估计结果差异性,在考虑土地机会成本和土地复耕等因素的基础上,通过生命周期评估方法计算出欧盟每生产 1 千克牛肉的温室气体排放量范围是 16.0 至 27.3kg CO<sub>2</sub>-eq<sup>[11]</sup>。Amon 等(2021)在选择温室气体清单指南进行温室气体排放量测算的过程中,总结出排放清单指南作为一种强有力的参考工具,其测算方法的选择将对温室气体减排措施的制定造成明显影响,因此为制定更全面、与时俱进的政策措施,应选择和使用具有最新参数和数据的排放清单报告进行计算<sup>[12]</sup>。

### (2) 国内研究现状

中国对于种养业温室气体排放量的核算方法借鉴国外 IPCC、OECD 等全球公认的权威方法,同时主要参考国家发展与改革委编制的《省级温室气体清单编制指南(试行)》以及地方政府出台的省市级排放清单,如《上海市温室气体排放核算与报告指南》等,而国内无论哪个级别排放清单采用的核算方法整体上仍遵循 IPCC 提供及排放因子法<sup>[13,14]</sup>,但基于计算的物料平衡法和基于测量的实测法对于温室气体排放主体的投入-产出量数据以及相关测量系统(CEMS)要求较高,在种养业温室气体排放量核算中的应用较少。

董红敏等(1995, 2008)根据 OECD 的测算方法,初步估算了中国反刍动物

甲烷排放量，提出推广秸秆青贮、氨化以及合理日粮搭配不仅使采食量提高至 20%，还可降低单个肉牛甲烷排放 15%~30%，推行缓释肥和长效肥可减少 50%~70% 单位面积农田氧化亚氮排放量，而改进粪便收集和贮存方式也有助于减排<sup>[3]</sup>。<sup>[5]</sup>王效琴等（2012 年）则以奶牛为研究对象，计算出养殖奶牛过程中排放量最大的三个环节是粪便贮存、饲料加工和肠道发酵，其排放量分别占整个系统的 16.39%、18.97% 和 48.86%<sup>[16]</sup>。吴贤荣等（2014）采用含有期望产出和非期望产出的 DEA-Malmquist 指数分解法对省域农业碳排放量、排放效率及影响因素进行测度。然而，我国种养业温室气体排放量核算亦存在局限性<sup>[17]</sup>。胡永浩等（2023）梳理了我国农业碳排放测算的主要核算方法，指出现有的碳排放因子数据滞后、测算方法粗放、系数的选取较为主观随意<sup>[18]</sup>。这与赵敏娟等（2022）的研究观点一致<sup>[19]</sup>。

综合国内外关于种养业温室气体排放量核算的文献来看，国外较早进行了一系列温室气体排放量核算研究，奠定了国内研究的基础，但国内外仍尚未形成统一核算方法。现有物料平衡法、全生命周期法、实测法、模型法等核算方法，其中 IPCC 推荐的排放因子法虽然存在系数选取主观性较强等弊端，但其便捷性与权威性使得该方法仍为国内外学术界较普遍采用的核算方法。

### 1.3.2 关于种养业温室气体排放影响因素的研究

#### (1) 国外研究现状

近年来，农业温室气体排放已达到全球总排放的 10%-20%，为了有效减缓气候变暖，明晰导致排放的因素尤为重要。从温室气体排放影响因素模型的选取角度，Davis 等（2002）采用 Divisia 指数分解模型探析美国能源强度和碳排放强度下降的影响因素，得出燃料混合使用不是碳排放密度增加的主要原因<sup>[20]</sup>。York 等（2003）解释了 IPAT、ImPACT 和 STIRPAT 三种分析方法的关系、交叉概念以及不同用途，相比于前两种方法，STIRPAT 模型能够更有效地分析二氧化碳排放量和能源足迹的驱动因素<sup>[21]</sup>。Ang 和 Liu（2007）认为采用对数平均迪氏指数分解法（LMDI）能够消除残差剩余项问题，且可化解分解过程中的零值和负值问题，满足因素分解可逆并能够分解完全<sup>[22]</sup>。Guo 等（2021）利用 LMDI 模型揭示了经济因素对吉林省农业碳排放表现出促进作用，与之相反的是，生产效率

因素、产业结构因素和劳动力因素具有显著的抑制作用<sup>[23]</sup>。Alamdarlo (2016) 则利用的是库兹涅茨理论 (EKC) 来探究 2001-2013 年伊朗农业二氧化碳排放量与人均收入之间的倒 U 型关系<sup>[24]</sup>。

另一方面,针对不同研究对象的影响因素选取不尽相同。Ruviaro 等 (2015) 针对巴西南部农场进行了案例研究,发现当干物质摄入消化率 (DMID) 从 52% 上升到 59% 的过程中,生产系统实现了最低的 CO<sub>2</sub> 排放量和最高的饲料转化率,推导出饲喂策略是影响温室气体排放量并决定环境有利条件的重要因素<sup>[25]</sup>。Vaarst 等 (2019) 假设了东非小农农场有机乳制品不同生产模式,认为回收作物秸秆和有机肥作为牲畜饲料和土壤改良剂,能够促进作物种植和动物养殖的融合发展,从而有助于饲料和粪便的再循环利用<sup>[26]</sup>。Selm 等 (2021) 对新西兰整合乳制品和牛肉生产方式进行研究,计算出种养循环模式下牛肉生产的温室气体排放量减少近 22%<sup>[27]</sup>。Ridoutt 等 (2022) 从调整饲料成分角度,促进牲畜活体增重的同时减少温室气体排放,如为减少甲烷排放,可在饲料中适量添加芦笋藻提取物,这种方式能够使畜牧业在 2030 年碳足迹减少 1-4%<sup>[28]</sup>。

## (2) 国内研究现状

温室气体排放影响因素的分解是制定低碳农业发展模式的前提和基础,对科学制定种养业温室气体减排对策方案具有重要意义。李波等 (2011) 从化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉、翻耕六个方面对 1993-2008 年我国 31 个省份农业温室气体排放进行核算,通过修正的 Kaya 恒等式分解影响因素,得出农业生产效率因素、结构因素、劳动力规模因素能够促进农业减排增强,而农业经济发展对碳排放具有显著推动作用<sup>[29]</sup>。这与李国志和李宗植 (2010) 基于 LMDI 模型,认为经济增长是农业碳排放最主要驱动因素观点一致<sup>[30]</sup>。戴小文等 (2015) 在以上因素基础上,引入了农业低碳技术因素、间接城镇化因素等,并认为相比于一般技术因素而言,农业低碳技术因素对农业碳减排的正向驱动力更强劲,而城镇化水平对农业碳减排呈现相对温和的负向驱动作用<sup>[31]</sup>。刘丽娜等 (2019) 的创新之处在于基于 LMDI 模型,利用 Tapio 脱钩模型探究影响因素与农业经济增长关系<sup>[32]</sup>。另外,学术界普遍采用影响因素分解模型与岭回归、偏最小二乘回归等分析法结合,探究碳排放影响机理及设计调控情景进行碳达峰预测,相较于一般的最小二乘回归,可在一定程度上避免多重共线性<sup>[33-37]</sup>,如张哲等 (2020) 采用

STIRPAT 模型分析上海市碳排放影响因素, 并利用偏最小二乘法 (PLS) 构建多元线性回归模型预测 2025 年碳达峰情形<sup>[34]</sup>。

也有学者致力于辨析 LMDI 和 STIRPAT 模型的差异。刘茂辉等 (2022) 认为 LMDI 方法主要揭示各影响因素对碳排放量的贡献率, STIRPAT 方法注重分析碳排放量受不同影响因素的变化趋势, 两种方法结合使用将最大限度地减少政策制定的不确定性<sup>[38]</sup>。潘崇超等 (2022) 利用二阶段 LMDI 模型分解中国钢铁行业投入产出过程中碳排放影响因素, 随后通过 STIRPAT 模型构建碳达峰预测模型, 从而借助情景分析法预测 2021 年至 2030 年碳排放趋势<sup>[39]</sup>。该研究框架同样适用于种养业研究。

除以上分析方法和研究视角外, 陈银娥等 (2018) 通过构建 SEM 模型, 发现产业升级虽然能够提升农业机械化进程, 但也是导致农业碳排放的重要因素<sup>[40]</sup>。颜光耀等 (2022) 借助 2001-2020 年我国 31 个省市面板数据门槛回归模型, 分析我国农业碳排放主要影响因素并提出对策建议<sup>[41]</sup>。陶秀萍等 (2017) 指出长期以来我国农牧脱节造成环境污染的根源在于畜禽粪便处理及农田利用配套技术因素的滞后, 造成农田无法吸纳大量的畜禽粪便<sup>[42]</sup>。张晓雷等 (2020) 借助 Tobit 模型分析出教育水平和禀赋结构因素显著促进黑龙江省 2005—2017 年畜牧业碳排放效率, 而畜牧业经济水平因素与能源消耗因素呈现明显抑制作用<sup>[43]</sup>。李丹阳等 (2021) 证实种养结合模式下奶牛粪污处理环节温室气体排放比非种养结合模式降低 23.2%, 因此种养模式的选择是温室气体减排的关键<sup>[2]</sup>。

综合国内外关于种养业温室气体排放影响因素的文献来看, Kaya 恒等式及其拓展形式、LMDI 模型和 STIRPAT 模型是较为普遍的分析方式, 而影响因素的确定会根据因素分解方法的选取而有所差异。可结合 OLS、PLS、岭回归等方法构建多元线性回归模型, 从而预测温室气体排放峰值。

### 1.3.3 关于种养业温室气体减排对策的研究

#### (1) 国外研究现状

由于能源是农业发展的重要物质基础, 学者多以能源为切入点, 探究种养业减排的对策方案。通过构建模型, 定量研究温室气体减排的政策效果是学术界普遍使用的方法, 包括自上而下类型的 CGE 模型、EPPA 模型、SGM 模型等; 自下而上类型的 LEAP 模型、MARKAL 模型、MESSAGE 模型等。Zhang (1998)

认为 CGE 模型能够被广泛用于分析国家之间、国际之间由于限制二氧化碳排放而引起经济效应的变化<sup>[44, 45]</sup>。Gielen 和 Chen (2001) 借助 MARKAL 模型分析 2000-2020 年上海市减少 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 排放最佳政策, 发现能源效率的提高将显著减少当地温室气体排放<sup>[46]</sup>。Yophy 等 (2011) 构建台湾 LEAP 模型进行中长期二氧化碳排放预测, 认为对能源进行合理定价将激励能源利用效率提高以及温室气体减排<sup>[47]</sup>。

从消费侧角度, Mogensen 等 (2009) 认为如果每位居民肉类消费量都减少约 100 克, 将减少 25% 的温室气体排放量和 31% 的营养损失, 同时居民膳食结构中常见蔬菜摄入的占比较大, 不仅可以替代对肉产品的消耗, 还可以降低温室气体排放, 因此改变饮食可能是减少温室气体排放最有效的方法之一<sup>[48]</sup>。从供给侧角度, Jiang 等 (2017) 通过建立农业碳封存和碳减排的反硝化分解模拟平台 (DNDC), 评估出减少氮肥施用、推广秸秆还田等低碳农业发展模式, 对碳封存和温室气体减排具有显著效果<sup>[49]</sup>。Tellez-Rio 等 (2015) 认为农田在休耕期间 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 减排量并不显著, 建议在作物轮作期间减少休耕周期频率<sup>[50]</sup>。Costa 等 (2019) 为测度巴西南部圣卡塔琳娜州联邦政府针对肉牛产业的政策措施绩效, 评估了圣卡塔琳娜州 170 个肉牛农场温室气体排放情况, 提出鼓励投资于减少温室气体的可持续技术, 例如生物固氮、综合农牧系统等<sup>[51]</sup>。Guo 等 (2022) 针对吉林省独特的黑土地资源禀赋特征, 提出应完善吉林省保护性耕作技术推广体系、落实有关土地政策、提高黑土地保护宣传力度等对策建议, 不仅可以改善土壤质量, 还可以降低能源消耗, 减少温室气体排放<sup>[52]</sup>。另外, 从系统动力学角度对农业碳排放系统结构进行政策优化分析也是国外学术界惯用的一种方法<sup>[53]</sup>。

## (2) 国内研究现状

郭正权 (2011) 构建了能源与二氧化碳排放的 11 部门静态 CGE 模型, 发现征收碳税对农业、轻工业等部门减排幅度不显著, 而提高能源效率对于这些部门化石能源的使用量有明显降低的作用<sup>[54]</sup>。魏玮等 (2018) 基于 GTAP-E 模型 (能源-经济 CGE 模型), 分析 2012-2030 年中国农业技术进步对农业能源使用和碳排放的作用机理, 认为降低农业碳排放量需高度重视农业能源使用, 且农业技术的提高具有极大的减排贡献<sup>[55]</sup>。常征 (2012) 根据上海实际情况, 构建了 LEAP-Shanghai 模型, 基于国际前沿的能流碳脉分析理论对上海能源利用进行分析, 通



过仿真结果总结出应摒弃追求国民生产总值增长至上的理念,需落实转变生活方式、采用清洁能源替代煤炭等传统化石能源的减排方案<sup>[56]</sup>。

此外,学者们研究路径的创新,提出多元化政策建议。李楠(2014)借助 SECA 模型,即中国农业能源消费仿真与分析模型,随后建立中国农业温室气体排放量核算(GEMA)模型、中国农业能源需求及温室气体排放的预测(FEFA)模型,提出应减轻因人口快速增长造成的农业能源和温室气体排放压力、适度合理推进农业机械化进程、对畜牧业禽肉类产量进行限制、大力扶植新能源发电产业等对策建议<sup>[57]</sup>。田徽(2010)通过 2000-2005 年辽宁省农林渔牧、工业、建筑业等七大部门的二氧化碳排放量及其变化趋势来分析该地区能源消费结构、消费强度及能源利用效率变动规律,得出开发利用可再生清洁能源、提高能源利用效率、优化产业结构、开发节能技术等建议<sup>[58]</sup>。米松华(2013)运用碳足迹理论以及全生命周期法,对全国以及各省区农业温室气体排放进行精确核算,认为应实行制定低碳农业发展规划、推广区域分异低碳农业发展主导模式、加强低碳农业技术推广机制和提高农户气候变化知识水平等政策措施<sup>[59]</sup>。马大来(2018)比较 1998-2016 年我国 30 个省份农业能源碳排放效率,认为发展绿色低碳农业应加大对传统高能耗、高排放农业发展模式的改造力度,优化农业产业结构,并结合地域资源禀赋发展特色农业,还要把农业技术创新放在主导地位<sup>[60]</sup>。胡剑波和王青松(2019)对中国农业能源消费碳排放区域差异进行测度,通过分析泰尔指数,证实低碳农业发展离不开产业结构的优化、低碳农业生产技术创新<sup>[61]</sup>。在农业碳排放仿真方面,超效率 DEA 评价法与系统动力学原理相结合,能够进行农业碳减排政策优化<sup>[62, 63]</sup>。

近年来,国内学者更倾向于根据我国“双碳”目标提出对策建议。田云和尹恣昊(2021)根据回弹效应与空间溢出效应,强调为实现“双碳”目标应加大对碳减排颠覆性技术的研发应得到财政支持<sup>[64]</sup>。张俊飏和何可(2022)指出农业碳排放和碳汇测算体系的构建、低碳发展的相关认证体系仍有待建立健全,如农业碳排放、碳汇核算方法体系应进一步完善<sup>[65]</sup>。路剑和刘振涛(2023)从效率和公平视角分析畜禽粪污肥料化利用对于碳减排潜力的影响,认为政府部门在制定粪污肥料化碳减排规划时务必考虑各效率和公平指数配比情况<sup>[66]</sup>。吴正玉(2023)针对秸秆还田问题提出应改进传统农业耕作方式,可通过保护性耕作或轮作、沤制还田、过腹还田等方式取代秸秆焚烧,避免温室气体排放<sup>[67]</sup>。除此之外,还有

学者建议加强农业碳减排政策与国际衔接<sup>[19]</sup>、建立资源共享的农业碳排放平台<sup>[68]</sup>、新型二氧化碳捕获与封存（CCUS）材料研发<sup>[69]</sup>、吸取工业领域碳减排经验转化至农业<sup>[70]</sup>、完善农业碳交易市场运行机制<sup>[29,71-78]</sup>等政策措施具有重要意义。

综合国内外关于种养业温室气体减排对策的文献来看，国外研究相比于国内更倾向于通过构建减排模型预测减排效果最佳的情景，从而提出温室气体减排对策。此外，国内外研究均根据研究地区的实际情况及政策背景，提出更具当地特色、多元化的政策建议。

### 1.3.4 文献评述

综上所述，国内外学者对种养业温室气体排放的核算、影响因素、减排对策方面已取得丰富研究成果，但是目前关于吉林省“秸秆变肉”暨千万头肉牛的新政策下肉牛产业温室气体减排效果评估的研究较少，且大部分评估温室气体排放量相关研究所需参数、计算方法以及相关数据都过于陈旧，不适用于吉林省，需更新替换。因此，有必要在现有理论基础上，以吉林省为例，分析生态循环模式相较于其他模式的优势所在，更加有针对性的为吉林省及具有类似种养业特征的地区提供理论依据，进一步深入对我国施行生态循环种养模式温室气体排放情况作出研究。

## 1.4 研究设计

### 1.4.1 研究内容

本文各章节具体内容如下：

第一章，绪论。从国际、中国到吉林省温室气体排放情况展开论述，以种养业温室气体排放量核算、影响因素以及减排对策三个维度进行归纳梳理文献，揭示该研究领域研究空白，阐明本文研究视角、研究方法、技术路线以及创新之处。

第二章，概念界定和理论基础。对种养结合、温室气体排放和生态循环模式进行概念界定，以外部性、物质循环、低碳农业和可持续发展理论为理论基础。

第三章，吉林省种养业温室气体排放概况及影响因素分析。通过分析 2003 年至 2021 年吉林省种养业温室气体排放变化趋势，采用 Kaya 恒等式、LMDI 模

型测算排放影响因素贡献值，由此掌握吉林省种养业温室气体排放机理。

第四章，吉林省生态循环模式下肉牛养殖温室气体排放分析。整理 2010 年至 2021 年吉林省肉牛养殖与玉米种植相关数据分析种养业发展情况，根据生命周期评价方法，探究肉牛养殖的种养系统生态循环模式与传统种养脱节的非生态循环模式下养殖 1000 万头肉牛各个环节年温室气体排放差异。

第五章，完善吉林省肉牛养殖种养结合机制的对策建议。基于研究结果，立足吉林实际情况，提出完善吉林省肉牛养殖种养结合机制的对策建议。

第六章，结论与展望。梳理研究结论，剖析研究不足之处，提出进一步研究展望。

### 1.4.2 研究方法

(1) 文献综述法。通过查阅国内外相关文献、温室气体排放清单、统计年鉴以及政策文本，对不同种养结合模式的生态循环养殖系统进行对比分析。

(2) 图表分析法。借助文献综述法获取到的统计数据、政策红文以及实证分析结果等制作为简洁、直观的图表，便于展示和了解本文研究逻辑与结论。

(3) 数据分析法。依据《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《吉林省统计年鉴》、《省级温室气体清单编制指南》、《IPCC 国际温室气体清单指南》等收集到相关数据，分析吉林省种养业发展现状，如种养业温室气体排放总量、排放结构以及排放强度和密度的动态变化特征。

(4) 定量与定性分析结合。定量分析吉林省 2003-2021 年种养业温室气体排放情况，运用排放因子法构建了吉林省种养业温室气体排放核算体系、运用 Kaya 恒等式、LMDI 因素分解模型的方法分析吉林省种养业温室气体排放的影响因素、运用生命周期评价方法分别对生态循环模式与非生态循环模式下温室气体排放量进行核算，同时分别界定两模式的系统边界，并给出相应的定性结论，定性与定量分析结合探究吉林省种养业温室气体排放影响因素及排放机理，从而探索实现肉牛养殖温室气体减排路径。

### 1.4.3 技术路线

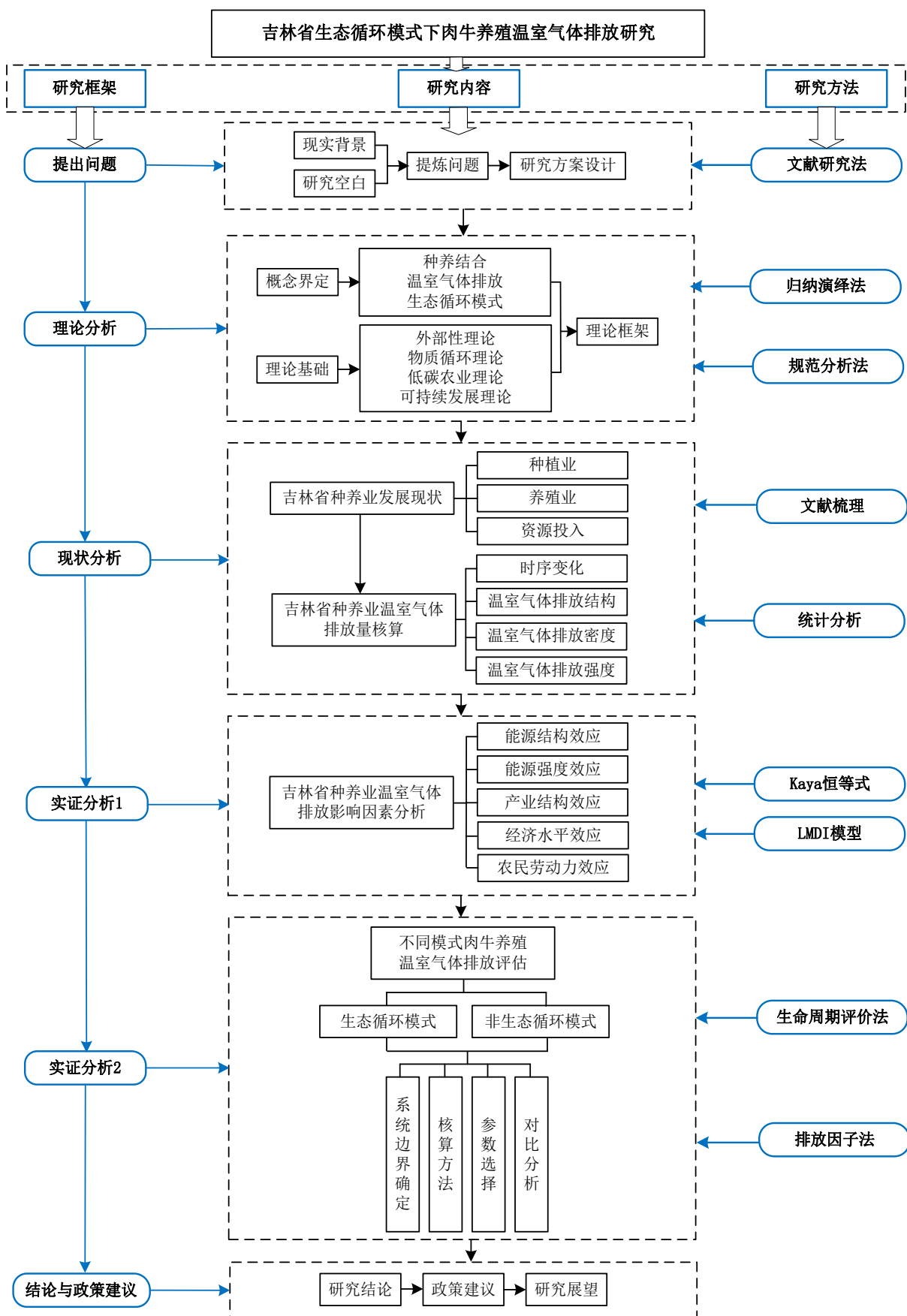


图 1.1 技术路线图

## 1.5 研究创新之处

第一，本文以党的二十大报告纲领、“双碳”目标以及吉林省“秸秆变肉”暨千万头肉牛建设工程的实施为关键切入点，结合政策前沿热点，探究在该背景下的吉林省肉牛养殖模式转变对种养业温室气体排放的影响机理，有利于拓宽基于以上政策背景下农业温室气体排放情况的研究视角。

第二，本文基于生态循环的理念，聚焦于采用种养结合、农牧循环方式的农业新模式的温室气体减排作用效果，从种养系统各个环节、不同种类温室气体排放情况分析该模式的温室气体减排内在机制，丰富了肉牛养殖模式相关学术研究。

第三，本文通过系统边界的设定，经对比分析生态循环模式与非生态循环模式下养殖一千万头肉牛各环节温室气体排放差异，由此能够提出更具有针对性的对策建议。

## 第二章 概念界定和理论基础

### 2.1 概念界定

#### 2.1.1 温室气体排放

所谓温室气体排放,也就是学术界普遍定义的碳排放<sup>[23, 79, 80]</sup>,但温室气体除二氧化碳外还分为许多种类,将不同种类的温室气体排放量转变为二氧化碳当量后求和,即为碳排放量。

关于温室气体的种类,1997年12月,《京都议定书》中规定了六种主要温室气体,分别为二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、六氟化硫(SF<sub>6</sub>)、全氟化碳(PFC<sub>5</sub>)和氢氟碳化物(HFC<sub>5</sub>)。2011年5月,国家发展与改革委印发的《省级温室气体清单编制指南(试行)》,将温室气体定义为大气中吸收和重新放出红外辐射的自然的和人为的气态成分,包括水汽、二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等。2012年12月,上海作为我国七个省市开展区域碳排放交易试点之一,印发的《上海市温室气体排放核算与报告指南(试行)》中明确指出该指南中的温室气体仅指二氧化碳,上述其他温室气体种类暂不纳入核算。张志强等(2008)除上述种类外,认为臭氧(O<sub>3</sub>)、氢代氯氟烃类化合物(HCFC<sub>5</sub>)、氯氟烃类化合物(CFC<sub>5</sub>)等都归为温室气体。

在农业生产中,受限于农业设施和生产要素,所排放的温室气体种类相比工业更为单一。结合排放来源和排放物成分来看,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O被视为农业领域最为主要的温室气体三大种类<sup>[81-83]</sup>。而种养系统在饲料粮生产、化肥施用、饲料加工、秸秆焚烧、畜禽胃肠道发酵、粪便管理等方方面面均会产生大量温室气体,因此本文将种养业温室气体仅分为二氧化碳、甲烷、一氧化二氮进行核算。

#### 2.1.2 生态循环模式

生态循环模式是指依托种养结合的农业生态循环理念,将种植园、养殖场、发电厂、沼气工程等进行对接,形成植物生产-动物生产-生态环境紧密结合体,确保农业废弃物循环利用<sup>[84, 85]</sup>。生态循环模式是一种更为具体的发展模式,能够提出较为详实的行动方案,其核心仍为种养结合。生态循环模式的构建方式较为

多元,“畜禽养殖-肥料生产-田园种植”是较为具有代表性的生态循环模式,还有更为具体的模式,如果园-土鸡共生生态模式<sup>[86]</sup>、稻-鱼-貉模式、猪-沼-果-鱼模式、猪-沼-菜模式、牛-沼-茶模式等<sup>[87]</sup>,有效削减种养业生产过程中污染物排放,还能带动一、二、三产业联动,是实现乡村可持续发展、改善乡村生态环境的新思路、新理念、新业态。因此,由于不同区域空间异质性的存在,应基于当地特色农业,因地制宜地构建适合本地区的生态循环模式,进一步推进可持续发展。本文针对吉林省肉牛养殖的实际情况,所构建的生态循环模式为“玉米种植-青贮饲料-肉牛养殖-有机肥料”。

## 2.2 理论基础

### 2.2.1 外部性理论

由于研究角度的不同,对外部性的定义尚未形成统一。从宏观来看,外部性理论经历了三个发展阶段,依次为马歇尔“外部经济”学、庇古的“庇古税”学说以及科斯的“科斯定理”<sup>[88]</sup>。马歇尔虽然没有明确定义外部性理念,但在其《经济学原理》<sup>[89]</sup>中指出依赖于行业内各企业之间的相互协调来实现经济增长的形式即为“外部经济”,是外部性理念的早期雏形。而后的庇古在其《福利经济学》<sup>[90]</sup>中将外部性分为“正外部性”和“负外部性”两类,才带领经济学界深入挖掘外部性理念。在三大外部性理论思想的引导下,学术界形成了两类主流的观点。一方面,以诺德豪斯和萨缪尔森指出外部性是那些生产或消费对其他团体强征了不可补偿的成本或给予了无需补偿的收益的情形;另一方面,兰德尔等从外部性的接受主体来定义,将外部性定义为用来表示当一个行为的某些效益或成本不在决策者的考虑范围内时所产生的的一些低效率现象,也就是某些效益被给予,或某些成本被强加给没有参加这一决策的人<sup>[91]</sup>。

本文主要采用的外部性理论是指某区域经济主体的经济行为对该区域内其他经济主体产生了影响,却没有为其产生的正向影响得到报酬,或没有为其产生的负向影响承担成本的现象。在肉牛规模养殖过程中,伴随着大量温室气体排放,然而养殖从业者却不为其所排放温室气体造成的环境污染承担代价,使得区域内居民均遭受温室气体排放所带来的不利影响,从而不得不制定相关政策来引导低碳肉牛养殖。因此,外部性理论是实现肉牛生态循环养殖模式的理论基础。

### 2.2.2 物质循环理论

生态系统中的物质和能量等能够在各营养级之间传递并被逐一吸收利用,是物质循环理论的底层逻辑<sup>[92,93]</sup>。物质循环、再生利用是物质循环理论的基础<sup>[94]</sup>。物质循环理论遵从质量守恒定律,是随后发展起来的循环经济理论的根基。黄显雷(2021)依据循环空间的大小,从微观的生物个体新陈代谢活动,延展到食物链、食物网,再到宏观的整个地球生态系统角度,将物质循环分为生物个体层次、生态系统层次、地球生物圈层次<sup>[93]</sup>。

另一方面,人类经济系统内部对自然资源的循环利用是衔接经济系统与自然环境良性发展的前提条件。能量转换、物质加工、消费使用和废弃物处理是现代经济系统四个主要组成部门,该四个部门之间以及由这四个部门组成的经济系统与生态环境之间均存在着物质流动关系。当经济系统的资源进口或出口受到阻碍,也就是不能够进行物质净积累时,那么该封闭的经济系统在一段时间内产生并排入自然环境的残余物的物质量基本等于从自然环境流入经济系统的资源的物质量。如果经济系统的废弃物排放量加重,则会导致对自然资源的需求和开采增大,反之亦然。因此自然资源的开发利用,也意味着经济系统产生环境污染大量排放、难以消纳的风险。

在肉牛养殖过程中,促使物质和能量等能够在经济系统与生态环境中循环的最有效的途径就是提高经济系统内部资源的综合利用效率,从而减少对外部资源的摄取量和污染物的排放量,提高内部资源的综合利用效率,基本途径有两个,首先是提高肉牛养殖技术水平,采用能源效率和资本利用率较高的技术手段,开发利用清洁能源或新能源;另一种途径,就是提高养殖环节产生的废弃物资源化综合利用效率。因此,物质循环理论是研究肉牛养殖生态循环模式的理论基础。

### 2.2.3 低碳农业理论

农业作为一个较为特殊的生态系统,既是排放温室气体的主要源头,又是农田碳汇的主要源泉。近年来,农业生产生活中产生的温室气体排放量逐年加剧,伴随而来的气候变暖、极端气候频繁发生,使人们意识到低碳农业发展战略的必要性,特别是在我国“双碳”目标背景下,亟待探索出有效的循环农业发展模式,实现农业可持续发展。因此,低碳农业是指以减缓温室气体排放为目标,以较少



碳排放、增加碳汇和适应气候变化技术为手段，通过加强基础设施建设、调整产业结构、发展农村可再生能源等农业生产和农民生活方式转变，实现高效率、低能耗、低排放、高碳汇的农业<sup>①</sup>。2022年中央1号文件重点强调了“研发应用减碳增汇型农业技术，探索建立碳汇产品价值实现机制”，意味着发展以农业碳汇为抓手的低碳农业，是我国破解农业物质资源过度消耗、能源区域不平衡、污染物无节制排放等严峻问题的新思路。通过制度、技术及其他手段实现低排放、高碳汇、低投入、高效率的农业高质量发展，即为低碳农业的发展理念<sup>[95]</sup>。

低碳农业理念相比于人们所熟知的绿色农业、循环农业、生态农业等理念的独特之处在于，低碳农业是结合经济效益、社会效益和生态效益为综合目标的新兴经济学范式，且其生产成果主要为低碳农产品，达到二氧化碳低排放与高固化目标<sup>[96]</sup>。关于低碳农业的实现路径，张颂心和严先锋（2015）认为可以通过体制机制创新、加强政府主导的政策激励措施、有机整合农业全产业链等的途径来达到激活要素投入、强化制度保障和降低耕种成本的效果<sup>[97]</sup>。丁国安（2019）在此基础上，特别强调了培育良好低碳文化的必要性<sup>[98]</sup>。杨长进（2020）更为全面的从种植业和养殖业等角度细化低碳农业发展路径，如采用低碳化种子优选技术、低碳化农家肥和化肥配合施用、“碳交易+养殖业”的养殖业低碳化发展新业态等<sup>[99]</sup>。

肉牛养殖的生态循环模式实施的最终目标正是实现种养系统的低碳发展，因此，低碳农业理论是实现肉牛产业生态循环发展的理论基础。

#### 2.2.4 可持续发展理论

可持续发展理论有着相对较长且悠久的发展进程<sup>[100]</sup>。20世纪70年代，可持续发展理论在国际环境和发展委员会上第一次被提及，旨在既能满足当代人的需要、又不对下一代人满足其需要的能力造成损害的发展理论。1978年，经联合国发布的《我们共同的未来》报告，可持续发展理论被正式引入国际视野，得到全球广泛关注和认可。目前，可持续发展理论能够兼具公平性、前瞻性、持续性等为一体，且该理论仍在不断深化、具化，能够充分渗透到各个行业领域，而农业系统正是可持续发展理论应用范围广泛的一大重要领域。

<sup>①</sup> 农业农村部《大力发展低碳农业是应对气候变化的有效途径》，[http://www.kjs.moa.gov.cn/gzdt/201904/t20190418\\_6184535.htm](http://www.kjs.moa.gov.cn/gzdt/201904/t20190418_6184535.htm)

农业可持续发展是可持续发展理论在农业领域的重要延展。本区域的农业生产活动，不应以牺牲其他区域农业生产活动发展为代价，同时，还应秉持代内公平和代际公平的原则，规范农业系统进行自然资源适度消耗的边界和底线，并实现经济效益、社会效益、生态效益协调统一的全新农业可持续发展范式。2017年国务院办公厅印发《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》，提出建立健全畜禽养殖废弃物资源化利用的具体制度，包括完善畜禽养殖污染监管制度、构建种养循环发展机制等均对促进畜禽养殖废弃物肥料化和能源化利用、畜牧业与环节的协调可持续发展产生深远影响。推动农业可持续发展，是促进传统农业向现代农业转变的重大任务<sup>[101]</sup>。

肉牛养殖过程中，涉及秸秆青贮饲料加工、粪污肥料化综合利用等关键环节，均为可持续发展理念的具体体现。因此，可持续发展理论是实现肉牛产业生态循环发展的重要理论基础。

### 2.3 本章小结

本章节主要包括概念界定和理论基础两部分。首先对温室气体排放和生态循环模式的概念做出界定。随后阐述了外部性理论、物质循环理论、低碳农业理论以及可持续发展理论，以期为接下来展开的研究提供理论支撑。

## 第三章 吉林省种养殖业温室气体排放核算及影响因素分析

吉林省是我国重要的农业大省之一，特别是以种养殖业为主要组成部分，然而其农业现代化水平滞后，仍倾向于采用传统种植业与养殖业脱节的非生态循环模式，造成吉林省农业生产生活伴随大量农药、化肥、农膜、化石燃料等资源投入，导致严峻的农业面源污染、能源高投入低产出、种养殖业废弃物产量大且资源化利用效率低等资源环境问题尚未得到妥善治理。本章以吉林省种养殖业温室气体排放情况为切入点，结合有关统计资料，通过分析 2003-2021 年其排放变化趋势以及排放影响因素，掌握吉林省种养殖业温室气体排放机理，从而为进一步提出减排对策做好铺垫。

### 3.1 吉林省种养殖业发展现状

吉林省地跨东经 121°38'-131°19'、北纬 40°52'-46°18'，与同纬度的美国玉米带、乌克兰玉米带并称为“三大黄金玉米带”，是我国玉米总产量最多、出口量及外调量最多、单产水平最高的省份<sup>[102-104]</sup>。全省东西长 769.62 公里，南北宽 606.57 公里，土地总面积 18.74 万平方千米，占中国国土面积的 2%，属温带大陆性季风气候。据吉林省农业农村厅公开数据显示，全省辖区面积 18.74 万平方公里，包括人均耕地 0.21 公顷，是全国平均水平的 2.18 倍，耕地面积为 553.78 万公顷，占总面积的 28.98%。其中，吉林省耕地资源极为丰富，以有机质和矿物质高含量的“耕地中的大熊猫”——黑土区耕地面积达到 0.69 亿亩，占全省耕地面积的 65.5%，占全国黑土区耕地总面积的 24.8%<sup>[105]</sup>。此外，吉林省山水林田湖草资源丰富，具有发展种植业、养殖业的明显资源禀赋优势，同时，吉林省作为老工业基地，其工业基础雄厚，具有谋划打造低碳农产品和绿色食品加工业的潜力。

作为全国重要的种植业和养殖业大省之一，吉林省依托丰富的粮食资源和强大的畜牧业优势，在农业现代化道路上的不断探索促使种植业与畜牧养殖紧密结合的关键。吉林省种植业生产成果丰硕，农作物总播种面积 6151 千公顷，其中最为突出的是玉米播种面积达 4287.2 千公顷，排名全国第二，仅次于黑龙江（5480.7 千公顷），并且吉林省连续 7 年粮食产量超过 3500 万吨，粮食单产同

样名列前茅，肩负着保障国家粮食安全的重大责任。吉林省粮食作物结构由玉米、大豆为主，水稻、高粱等多元发展的格局逐渐转变为玉米为主，大豆、水稻、高粱等占比减少的结构，目前形成玉米占比高达 74.83%的“一粮独大”局面<sup>[106]</sup>。

2021 年吉林省全省玉米产量达到 3198.4 万吨，虽然由于新冠肺炎疫情诸多因素导致相比往年有所下降，但相比于全国其他省份，吉林省玉米产量仍名列前茅。随着吉林省种植业规模逐年扩大，当地农民及农业从业人员仍旧习惯于传统的种植方式，农膜、化肥、农药、农业机械等要素的高强度投入，其产生的农业污染，如温室气体排放量居高不下。特别是秸秆过剩问题，较为传统的农耕技术无法达到高效的秸秆综合利用，将近 24.15%的玉米秸秆直接焚烧处理。为解决种植业秸秆焚烧问题，吉林省大力推广秸秆青贮，经青贮和氨化等技术加工为优质畜禽饲料，有效的提高秸秆饲料的适口性和畜禽消化率，促进秸秆综合利用率提高的同时，还降低了畜禽胃肠道发酵产生的甲烷排放，优化种养结构。

基于吉林省丰富的种植业资源，可为畜禽提供优质饲料，因此其养殖业同样发展壮大。2021 年吉林省畜产品肉类总产量为 295.7 万吨，约占全国肉类产量的 3.29%；奶类总产量为 32.6 万吨，禽蛋类总产量为 104.7 万吨，约占全国产量分别为 0.86%和 3.07%；大牲畜年底头数，如牛年底头数达 338.3 万头，约占全国牛年底头数的 3.45%。吉林省畜牧养殖业总产值保持波动上升趋势（见图 3.1），特别是在 2020 年达到 1547.38 亿元，是吉林省 1978-2021 年的历史最高，约占全省农林牧渔业总产值的 51.99%，揭示畜禽养殖业逐渐成为带动吉林省农业经济发展的支柱产业。

然而传统的畜牧业养殖过程中，为刺激生长或抗病增产的目的，富含超标的 Cu、Zn、As、Cr、Pb 等重金属饲料添加剂被广泛施用<sup>[107]</sup>，并且这些重金属随着畜禽粪便排放至田间地头，大部分累积在农田土壤中，不仅损害了土壤的肥力和品质<sup>[108]</sup>，还会随地表径流和淋流向地表水渗透<sup>[109,110]</sup>。并且传统粗饲料加工制作粗糙严重影响其饲料品质，在畜禽胃肠道消化过程中难以充分消化，产生大量甲烷等温室气体，通过暖气和排气等方式排放至环境中。同时，对畜禽粪便的处理方式的不当也是吉林省农业高污染、高排放的症结之一，亟待寻求先进的现代化技术手段处理和加工畜禽粪便，达到既提高农业废弃物资源化利用效率，提供优质有机肥还田，又能减少温室气体排放的目标。

通过统计吉林省 1978-2021 年间种养业总产值数据（见图 3.2），可发现种植业产值占比农林牧渔业产值先是下降，再保持相对稳定，相反，养殖业产值占比先是上升，再趋于不变，而从 2006 年至今吉林省种植业与养殖业的占比几乎一致，养殖业占比略微较高，并且种养业总产值在农林牧渔业总产值占比中持续保持着极大份额。因此，说明种养业仍旧是吉林省农业系统中的重要支撑，其中，存在着养殖业不断扩张、种植业占比相对缩减的趋势，由以前种植业为主、养殖业起步转变为目的养殖业与种植业并驾齐驱的格局。

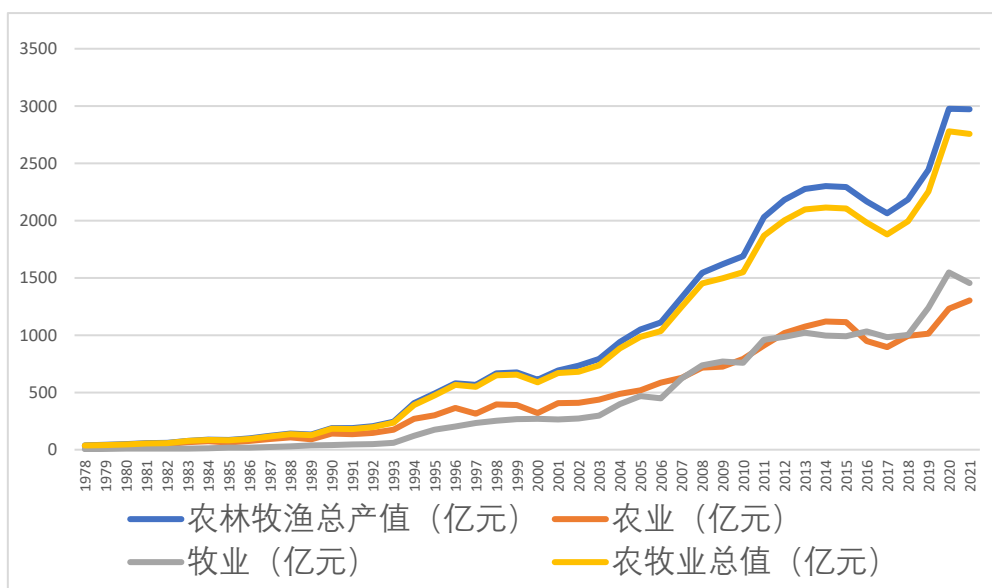


图 3.1 1978-2021 年吉林身农林牧渔业总产值变化情况

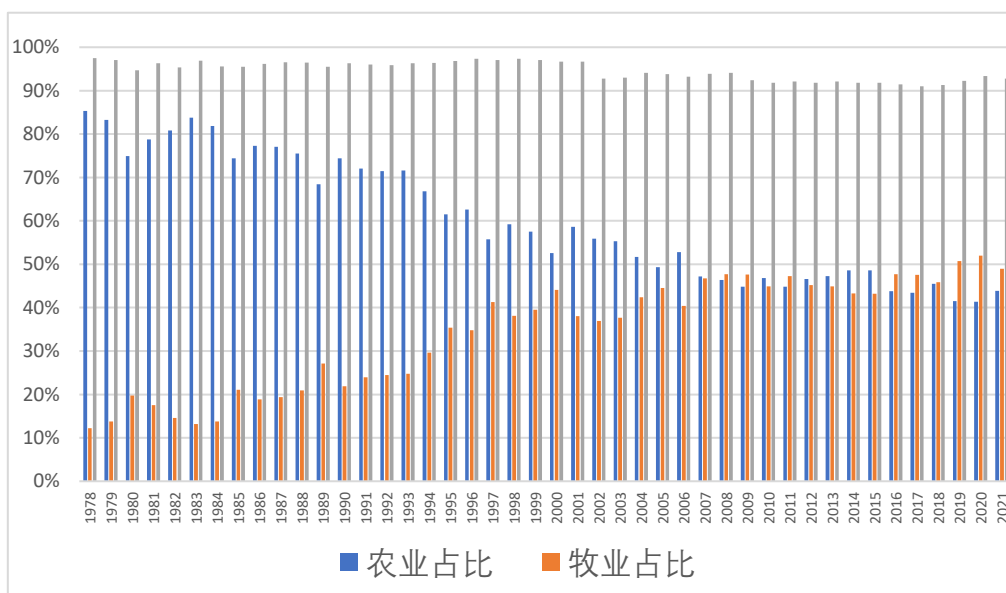


图 3.2 1978-2021 年吉林省种养业总产值占比变化情况

### 3.2 吉林省种养殖业温室气体排放核算模型构建

种养殖业温室气体排放量,是指在种植业与养殖业生产环节中农业生产要素投入量导致的 CO<sub>2</sub> 排放量,意味着不同种类的温室气体排放量应折算为二氧化碳排放当量进行加总即为所求。

关于温室气体排放量核算,是有效开展各项碳减排工作的基本前提,作为应对气候变化、制定减排政策的基础工作,各国和组织机构先后发布各自的碳排放核算指南与标准,从国家层面、省市层面、企业/组织层面以及产品层面,无论处于哪个层面,排放核算方法的选择都是核算过程的必要步骤。

目前,学界主要采用三大方法,分别是排放因子法、物料平衡法和实测法。其中,排放因子法一般指通过活动水平数据和相关参数之间的计算来获得排放主体温室气体排放量的方法,且在 IPCC 提供的相关排放清单指南中,该方法主要从六个方面进行碳排放量的核算,包括能源单元,工业过程单元,产品使用单元,农、林业和其他土地利用单元,废弃物单元以及其他,已成为适用范围较广的温室气体排放核算方法。物料平衡法则根据质量守恒定律,对排放主体的投入量和产出量中含碳量进行平衡计算的方法。而实测法通过连续监测系统(CEMS)及相关仪器设备对温室气体的浓度或体积等进行连续测量得到温室气体排放量。总之,后两种方法更适用于工业中核算化石燃料温室气体排放量,而碳排放因子法可以对特定区域的整齐情况进行宏观把控,核算结果具有可获得性、可比性和连续性,因此本文采用排放因子法。

由于各系统排放的温室气体种类不同,本文将吉林省种养殖业温室气体排放源从种植业系统和养殖业系统分别进行设定,便于核算。基于吉林省实际情况,种植业排放源设定为化肥(折纯量)、农药、农膜、柴油、农业用电、农业灌溉、土地翻耕七个方面,养殖业排放源主要来自动物胃肠道发酵和粪便管理,选取了猪、牛、羊三种牲畜。

本文选取数据的时间范围是 2003-2021 年,总跨度 19 年,所选取的数据如种植业的化肥折纯量、农药和农膜用量、柴油用量、电力消耗量、有效灌溉面积、土地翻耕面积以及养殖业的牲畜年末存栏量等数据均来源于《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《吉林省统计年鉴》以及 IPCC 相关指南。根据种养殖业温室气体排放特质,本文选取 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 三种温室气体核算为二氧化碳

当量 (CO<sub>2</sub>-eq) 后加总即为总温室气体排放量。依据国家发展改革委发布的《省级温室气体清单编制指南 (试行)》，在 100a 时间尺度上，将 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 全球增温潜势值 (GWP) 分别设定为 25 和 298，从而统一转换为二氧化碳当量，计算公式如下：

$$E_T = E_{CO_2} + E_{CH_4} \times GWP_{CH_4} + E_{N_2O} \times GWP_{N_2O} \dots\dots\dots (3.1)$$

式 (3.1) 中， $E_T$  为种养业温室气体排放总量，万吨； $E_{CO_2}$ 、 $E_{CH_4}$ 、 $E_{N_2O}$  分别为种养业产生 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放总量，单位均为万吨。

### 3.2.1 种植业温室气体排放核算

种植业温室气体排放因子如表 3.1 所示，该系统计算公式如下：

$$E = \sum e_i = \sum Q_i \times EF_i \dots\dots\dots (3.2)$$

式 (3.2) 中， $E$  为种植业温室气体排放总量，万吨； $e_i$  为各类温室气体排放源的排放量，万吨； $Q_i$  为各温室气体排放源的消耗量，万吨； $EF_i$  为各温室气体排放源的排放因子。

表 3.1 种植系统温室气体排放因子参数

碳排放源	数据选取	选取值	单位	数据来源
化肥	农用化肥施用量 (折纯量)	0.8956	kg·kg <sup>-1</sup>	美国橡树岭国家实验室
农药	农药使用量	4.9341	kg·kg <sup>-1</sup>	美国橡树岭国家实验室
农膜	农用塑料薄膜使用量	5.18	kg·kg <sup>-1</sup>	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
用电	农村用电量	2.72	t·万 kWh <sup>-1</sup>	《中国能源统计年鉴》
柴油	农用柴油使用量	0.5927	kg·kg <sup>-1</sup>	IPCC
有效灌溉	有效灌溉面积	25	kg·hm <sup>-2</sup>	IPCC
土地翻耕	农作物总播种面积	3.126	kg·hm <sup>-2</sup>	中国农业大学生物与技术学院

### 3.2.2 养殖业温室气体排放核算

养殖业温室气体排放由两部分构成，分别是动物胃肠道发酵过程产生的 CH<sub>4</sub>、粪便管理过程同时产生的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O。养殖系统具体计算公式如下：

$$E_{CH_4-胃肠道, i} = EF_{CH_4-胃肠道, i} \times AP_i \times 10^{-7} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$E_{CH_4-粪便, i} = EF_{CH_4-粪便, i} \times AP_i \times 10^{-7} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$E_{N_2O-粪便, i} = EF_{N_2O-粪便, i} \times AP_i \times 10^{-7} \dots\dots\dots (3.5)$$

上述式中,  $E_{CH_4-胃肠道, i}$ 、 $E_{CH_4-粪便, i}$ 、 $E_{N_2O-粪便, i}$  分别为不同种类动物胃肠道发酵产生的  $CH_4$  排放量、粪便管理所产生的的  $CH_4$  排放量以及粪便管理所产生的  $N_2O$  排放量, 单位分别为万吨  $CH_4 \cdot a^{-1}$  (a 表示“年”)、万吨  $CH_4 \cdot a^{-1}$  和万吨  $N_2O \cdot a^{-1}$ ;  
 $EF_{CH_4-胃肠道, i}$ 、 $EF_{CH_4-粪便, i}$ 、 $EF_{N_2O-粪便, i}$  分别为不同种类动物胃肠道发酵的  $CH_4$  排放因子、粪便管理产生  $CH_4$  排放因子以及粪便管理产生  $N_2O$  排放因子;  $AP_i$  为不同种类动物年末存栏量, 单位为头/只。养殖业温室气体排放因子如表 3.2 所示。

表 3.2 养殖系统温室气体排放因子参数

碳排放源	胃肠道发酵		粪便管理		单位	数据来源
	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O		
猪	1	3.50	0.53		kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	IPCC
牛	47.80	1	1.39		kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	IPCC
羊	5	0.16	0.33		kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	IPCC

### 3.3 吉林省种养殖业温室气体排放核算结果及动态变化分析

根据公式 (3.1) 至 (3.5), 计算出 2003 年至 2021 年吉林省种植业与养殖业温室气体排放量, 并将其统一转化为二氧化碳当量进行加总, 据此展开下一步研究分析。

#### 3.3.1 种养殖业温室气体排放结构

通过计算, 吉林省 2003-2021 年种植业温室气体排放情况见表 3.3, 整体呈现出持续上升、后保持稳定的趋势。从种植业温室气体排放总量来看, 主要呈现两个阶段, 第一阶段由 2003 年 232.19 万吨连续增长至 2017 年 457.08 万吨, 增长幅度为 96.86%, 年平均增长率为 6.46%。第二个阶段, 2018 年至今, 种植业温室气体排放量趋于稳定, 保持在 450 万吨左右。充分说明, 吉林省种植业从传统的高投入、高能耗、高产出模式中得到快速发展, 但由于落后的农耕技术水平限制, 种植业规模不断扩张的同时伴随大量温室气体排放, 并且传统种植业的生产效率也达到阈值。面临着资源与环境的约束, 吉林省开始转变种植业生产模式, 逐步探索农业现代化路径, 将农业建立在现代科学的基础上, 致力于创建一个高质量发展、低能耗低排放的农业生产体系。因此, 第二阶段表明吉林省近些年在



种养业温室气体减排方面的政策措施取得显著成效，特别是在合理利用资源、提高农业废弃物资源化利用效率上的举措贡献较大。

在种植业农业资源投入要素方面，吉林省化肥施用所产生的温室气体排放量最大，2003-2021年平均占种植业温室气体排放总量的45.78%，其次是农业用电产生温室气体排放量平均占比为30.08%，且在2016年达到历史最大值209.21万吨。农业柴油、农膜、农药和有效灌溉所产生温室气体排放量平均占比分别为9.18%、7.36%、5.82%和1.21%，然而土地翻耕过程产生温室气体排放量平均占比最小，仅有0.47%。值得注意的是，仅有农业用电和土地翻耕产生温室气体排放量呈现逐年递增的趋势，且前者增幅较大，而其余投入要素，如化肥等，虽在总体上排放量大，但已到达峰值呈现回落的状态。总言之，种植系统温室气体总排放量保持逐年增长，但关键排放要素排放量有所降低。

表 3.3 2003-2021 年吉林省种植系统温室气体排放总量 单位：万吨

年份	化肥	农药	农膜	用电	柴油	有效灌溉	土地翻耕	总量
2003	109.53	11.63	22.17	62.83	20.69	3.87	1.47	232.19
2004	142.49	12.68	21.68	71.26	23.95	3.99	1.53	277.58
2005	123.68	14.26	21.61	78.06	24.00	4.03	1.55	267.19
2006	131.38	17.00	23.63	82.14	25.96	4.09	1.56	285.76
2007	138.28	18.61	24.48	88.67	29.93	4.10	1.57	305.64
2008	146.70	20.00	25.96	94.38	31.59	4.20	1.59	324.42
2009	156.01	20.91	26.93	102.00	34.20	4.21	1.59	345.85
2010	163.72	21.11	27.22	107.44	36.15	4.32	1.64	361.60
2011	174.82	22.50	29.56	115.60	37.87	4.58	1.66	386.59
2012	185.12	25.28	29.37	125.39	39.59	4.63	1.70	411.08
2013	194.17	25.17	30.30	131.10	40.72	4.63	1.76	427.85
2014	203.03	29.37	29.97	132.74	38.70	4.07	1.84	439.72
2015	207.06	30.73	30.65	134.91	39.53	4.48	1.87	449.23
2016	209.21	28.88	30.85	139.07	39.71	4.58	1.90	454.20
2017	206.88	27.78	31.47	144.05	40.07	4.93	1.90	457.08
2018	204.47	25.16	29.12	149.19	39.89	4.81	1.90	454.54
2019	203.39	24.01	27.52	149.27	38.94	4.85	1.91	449.89
2020	201.78	23.16	26.61	153.84	39.00	4.84	1.92	451.15
2021	199.72	22.27	24.68	160.97	38.41	4.84	1.93	452.82

数据来源：根据公式计算得出

吉林省养殖系统温室气体排放总量结构见表 3.4。相比于种植业排放情况，养殖业呈现出显著波动状况。2003-2008 年显现为上升阶段，特别是在 2008 年达

到峰值 1426.56 万吨，是同一时期种植业温室气体排放量的约 4.39 倍；随后，2009 年下降至 947.31 万吨，下降了 479.25 万吨；2010 年至今，大体上保持波动下降趋势，且 2020 年降至该阶段最低排放量 635.05 万吨，而 2021 年再次反弹至 776.82 万吨。

在吉林省养殖业发展初期，由于注重拓宽养殖规模，一味追求养殖数量的扩大，而落后的养殖技术水平难以跟上养殖规模的扩张，饲料加工品质低劣，适口性差、不易消化等缺点，牲畜暖气、排气导致大量温室气体排放，并且动物粪便难以得到资源化利用，通常直接露天排放，不经加工处理的粪便往往重金属含量高，破坏土壤、腐蚀土地，综合利用率极低，同样伴随着严重温室气体排放。因此该阶段养殖系统温室气体排放量骤然上升，不断临近生态阈值。随着农业机械的广泛应用，一定程度上取代了大型牲畜劳动力，同时，吉林省也逐渐意识到重视养殖数量而忽视环境污染的问题，出台一系列相关政策措施，促使牲畜饲养规模更加合理扩大。

养殖业温室气体排放结构中，动物胃肠道发酵产生的  $\text{CH}_4$  是第一大气体排放源，其 2008 年达到最高排放量 967.25 万吨二氧化碳当量。2003-2021 年平均占养殖业温室气体排放总量的 67.71%。为缓解牲畜胃肠道引起甲烷过多排放，吉林省逐步改善饲料质量、优化饲养方式的行动方案，其中大力推广秸秆青贮较为突出，提高秸秆综合利用率的同时减少动物胃肠道发酵产生甲烷排放。另一方面，吉林省在牲畜粪污资源化利用上持续创新，具体体现在粪便管理技术上，如采用沼气化利用粪污处理技术、蚯蚓养殖粪污处理技术、卧床垫料化粪污处理技术等。

表 3.4 2003-2021 年吉林省养殖系统温室气体排放总量 单位：万吨

年份	CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O	总量
	胃肠道发酵	粪便管理	粪便管理	
2003	26.79	3.26	0.50	973.76
2004	28.15	3.50	0.53	1025.19
2005	29.54	3.85	0.55	1080.67
2006	32.13	4.20	0.60	1176.24
2007	35.61	4.90	0.67	1310.56
2008	38.69	5.43	0.72	1426.56
2009	25.81	3.53	0.47	947.31
2010	24.76	3.45	0.46	910.81
2011	23.20	3.46	0.42	858.84
2012	23.59	3.50	0.43	873.00
2013	23.90	3.50	0.44	883.27
2014	23.65	3.50	0.43	874.47
2015	24.78	3.40	0.45	908.58
2016	23.57	3.32	0.43	865.97
2017	19.05	3.19	0.34	712.02
2018	18.40	3.05	0.33	686.76
2019	18.65	2.77	0.33	687.72
2020	16.83	3.15	0.29	635.05
2021	20.56	3.98	0.34	776.82

数据来源：根据公式计算得出

吉林省 2003-2021 年种植业与养殖业温室气体排放趋势如图 3.3 所示。养殖业波动幅度较大，且排放量一直超过平缓上升的种植业，但整体呈现下降趋势，近年来两者排放量差距不断缩小。

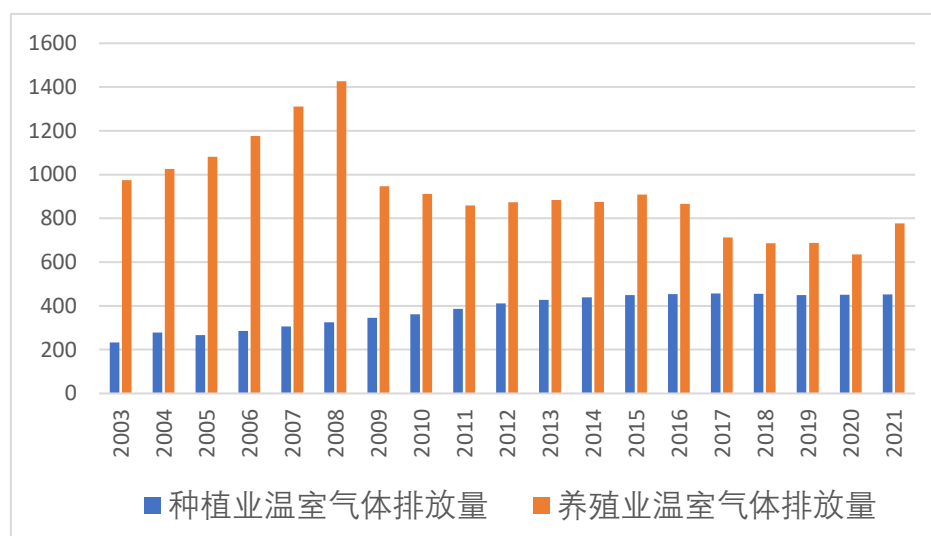


图 3.3 吉林省 2003-2021 年种养业温室气体排放量

### 3.3.2 种养业温室气体排放总量及强度与密度分析

此部分将吉林省 2003-2021 年种植业与养殖业温室气体排放量进行加总，即为种养业温室气体排放，如表 3.5 所示。计算结果显示，2003-2008 年种养业温室气体排放量呈现上升趋势，由 2003 年 1205.95 万吨上升至 2008 年 1750.97 万吨，即达到种养业排放量峰值，增加了 545.02 万吨。导致这一现象如前所述是由于养殖业的迅猛发展，造成动物胃肠道发酵以及粪便处理过程温室气体排放严重。2009 年至今，种养业排放量波动在 1244 万吨上下，但波动幅度较小，整体呈现略微下降趋势，且 2020 年降至该阶段最低排放量 1086.2 万吨，随后 2021 年显著提高（1229.64 万吨）。2020 年以来吉林省实施的“秸秆变肉”政策鼓励肉牛养殖的扩大，但大量温室气体的排放造成环境污染不应成为肉牛产值提高的代价。

从环比增速的角度分析（见图 3.4），种养业温室气体排放总量的环比增速变化幅度显著，显示出波动特征。2007 年环比增速最高为 10.55%。2009 年环比增速低至-26.15%，是该时段的谷值，而 2010 年、2011 年环比增速也为负值，是由于遭受自然灾害，如风雹、洪涝灾害等，影响了农业要素的正常投入。而 2016-2020 年环比增速均为负值，分别为-2.77%、-11.44%、-2.38%、-0.32%和-4.52%，说明近年来吉林省坚固农业的高质量发展和可持续发展，推出多项种养业温室气体减排措施，并取得一定成效。特别是 2021 年环比增速反弹至 13.21%，其原因不仅是受新冠肺炎疫情、极端天气、电力供应紧张、油气市场疲软以及地缘政治等全球大背景影响，导致吉林省 2021 年种养业煤炭消费量大幅增长，燃煤带来的二氧化碳排放量创下历史最高水平，还与肉牛养殖加大规模相关。

表 3.5 2003-2021 年吉林省种养殖业温室气体排放情况

年份	种植业 (万吨)	畜牧业 (万吨)	种养殖业 (万吨)	环比增速 (%)	碳排放强度 (吨·万元 <sup>-1</sup> )	碳排放密度 (吨·公顷 <sup>-1</sup> )
2003	232.19	973.76	1205.95	0.00%	1.64	2.56
2004	277.58	1025.19	1302.76	8.03%	1.47	2.66
2005	267.19	1080.67	1347.86	3.46%	1.37	2.72
2006	285.76	1176.24	1462.00	8.47%	1.41	2.93
2007	305.64	1310.56	1616.20	10.55%	1.29	3.21
2008	324.42	1426.56	1750.97	8.34%	1.21	3.45
2009	345.85	947.31	1293.16	-26.15%	0.86	2.54
2010	361.60	910.81	1272.41	-1.60%	0.82	2.42
2011	386.59	858.84	1245.42	-2.12%	0.67	2.35
2012	411.08	873.00	1284.09	3.10%	0.64	2.36
2013	427.85	883.27	1311.12	2.11%	0.63	2.33
2014	439.72	874.47	1314.18	0.23%	0.62	2.23
2015	449.23	908.58	1357.81	3.32%	0.64	2.26
2016	454.20	865.97	1320.17	-2.77%	0.67	2.18
2017	457.08	712.02	1169.10	-11.44%	0.62	1.92
2018	454.54	686.76	1141.30	-2.38%	0.57	1.88
2019	449.89	687.72	1137.61	-0.32%	0.50	1.86
2020	451.15	635.05	1086.20	-4.52%	0.39	1.77
2021	452.82	776.82	1229.64	13.21%	0.45	1.99

数据来源：根据公式计算得出

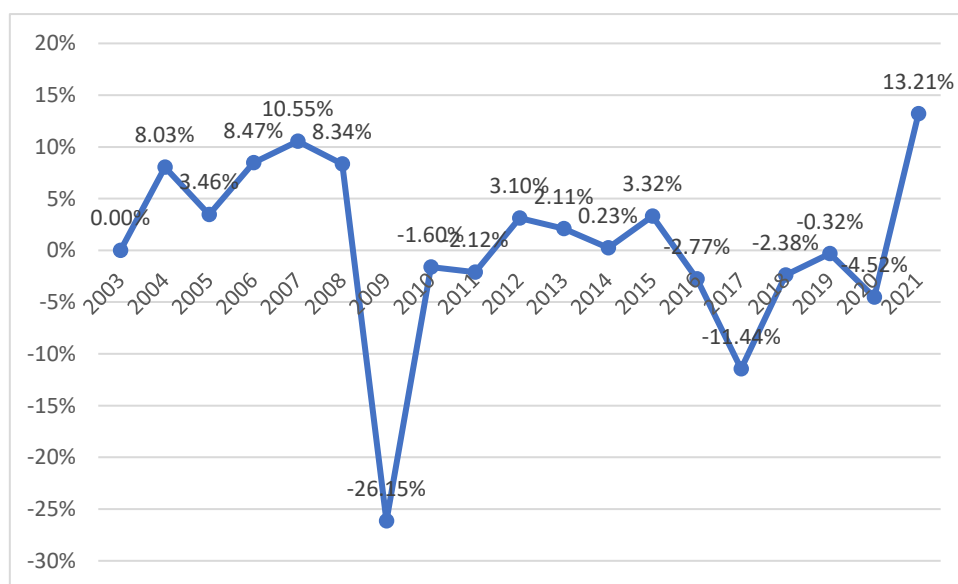


图 3.4 2003-2021 年吉林省种养殖业温室气体排放量环比增速

基于上述吉林省种养殖业温室气体排放总量，能够得到其温室气体排放强度和

排放密度。温室气体排放强度是指单位 GDP 的 CO<sub>2</sub> 排放量，体现了某区域经济产出与温室气体排放量之间的关系，是衡量农业要素利用情况的重要指标。温室气体排放强度越低，说明投入农业物资的利用效率越高，产生的温室气体排放量越少，反映了该区域农业经济的低碳发展水平较高。本文将以 2003 年为基年，对 2003-2021 年种养殖业总产值按 2003 年不变价格进行测算。

温室气体排放密度是指单位耕地面积上二氧化碳排放量，也就是温室气体排放总量除以该区域土地面积即可得出温室气体排放密度。其主要反映一个地区温室气体排放的集中度，温室气体排放密度越大，则表明单位土地面积上的温室气体排放浓度较大。

温室气体排放强度与密度的具体计算公式如下 (3.6) 至 (3.7)，计算结果如表 3.5 所示。

$$C_g = \frac{E_T}{G} \dots\dots\dots (3.6)$$

$$D = \frac{E_T}{A} \dots\dots\dots (3.7)$$

式 (3.6) 中， $C_g$  为种养殖业温室气体排放强度，吨·万元<sup>-1</sup>； $G$  为种养殖业总产值。式 (3.7) 中， $D$  为种养殖业温室气体排放密度，吨·公顷<sup>-1</sup>； $A$  为耕地面积。为便于对计算结果有进一步更直观的分析，绘制了图 3.5。

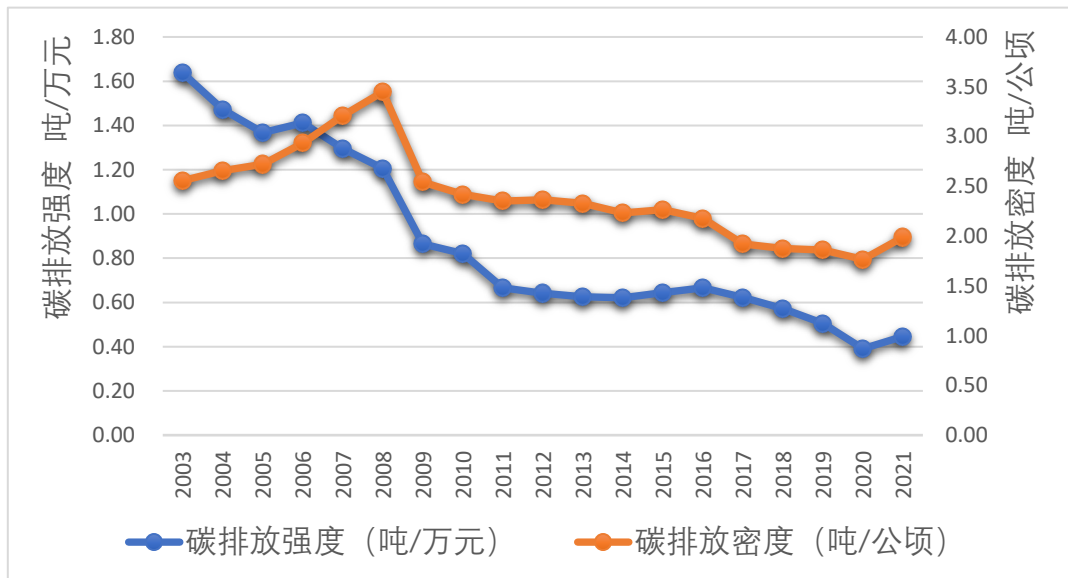


图 3.5 2003-2021 年吉林省种养殖业温室气体排放强度与密度变化趋势

结合表 3.5 和图 3.5 来看，2003-2021 年吉林省种养殖业温室气体排放强度整体上逐年下降，由 2003 年的 1.64 吨·万元<sup>-1</sup> 下降到 2020 年的 0.39 吨·万元<sup>-1</sup>，

年均下降 4.23%。温室气体排放密度的持续下降再次证明了吉林省由高污染、高耗能、高排放的传统种养模式逐渐向资源节约型、环境友好型的低碳农业转变,逐渐形成农业废弃物资源化综合利用率较高的农业生态系统,农业现代化水平不断提升。另一方面,温室气体排放密度呈现出“先升后降”的变化趋势,从 2003 年的 2.56 吨·公顷<sup>-1</sup>下降至 2020 年的 1.77 吨·公顷<sup>-1</sup>,而 2008 年温室气体排放密度最大为 3.45 吨·公顷<sup>-1</sup>,原因是由于吉林省种养殖业尚未扩大至一定规模,在较为有限的区域进行生产便造成温室气体集中排放,对生态环境造成危害,但随着之后种养殖业规模的调整,温室气体排放的分散促使局部浓度有所下降,从而温室气体排放密度有所减缓。此外,2020-2021 年阶段吉林省种养殖业温室气体排放强度和密度均呈现上升趋势,如前文所述,这与国内外背景密切相关。

通过以上分析可得知,2003 年至 2021 年吉林省种养殖业实现了“低强度—低密度”的排放模式,这在较大程度上得益于采用以“种养结合”方式的生态循环模式,能够将畜禽养殖过程中产生的粪污及有机物加工为有机肥提供给种植业,同时,种植业可以为畜禽提供高质量饲料,如青贮玉米秸秆,从而农业废弃物转变为资源在种养系统中循环利用,减少了不必要的排放。虽然吉林省在种养殖业温室气体减排方面取得显著成效,但其自身还有不足之处有待解决,如吉林省种养殖业能源结构、产业结构、种养殖业劳动力质量等有待调整和改善,因此还存在较大的进步空间,应加强探索可持续农业、低碳农业、现代农业等的实现路径。

### 3.4 吉林省种养殖业温室气体排放影响因素分析

此部分,首先采用 Kaya 恒等式分解得出影响因素,并用 LMDI 模型计算出吉林省种养殖业温室气体排放驱动分解结果,从而对各因素进行的贡献程度进行探析。其中选用的数据均来自《中国统计年鉴》和《吉林省统计年鉴》。

#### 3.4.1 Kaya 恒等式

日本学者 Yoichi Kaya 于 1990 年 IPCC 研讨会上首次提出 Kaya 恒等式,该等式是 IPAT 模型的额经典扩展形式,旨在分析人类活动产生的二氧化碳或温室气体排放与经济、政策、人口因素之间的关联程度<sup>[111, 112]</sup>。表达式如下:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{EN} \times \frac{EN}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times P \dots\dots\dots (3.8)$$

式(3.8)中,  $CO_2$  为某区域二氧化碳排放总量;  $EN$  为该区域能源消费总量;  $GDP$  为该区域生产总值;  $P$  为该区域人口总量。

Kaya 恒等式能够简明清晰的分解出驱动因素, 被广泛应用于不同国家或地区的能源与环境经济碳排放影响因素分析中。然而, 随着学术界的深入研究, 发现一个地区的温室气体排放除了与能源结构、人均产出因素外, 还与能源强度、产业结构等因素有紧密关联。鉴于 Kaya 恒等式的局限性, 本文在此基础上引入能源结构、能源强度、产业结构、经济水平和劳动力因素, 构建了扩展的 Kaya 恒等公式。得到如下公式:

$$C = \frac{C}{ENERGY} \times \frac{ENERGY}{AGDP} \times \frac{AGDP}{PGDP} \times \frac{PGDP}{POP} \times POP \dots\dots\dots (3.9)$$

在扩展的 Kaya 恒等式中,  $c$  为种养业温室气体排放量, 即吉林省种养业温室气体排放总量, 万吨;  $ENERGY$  为农业能源消费量, 即吉林省农林牧渔业终端消费量(等价值), 万吨标准煤;  $AGDP$  为种植业与养殖业总产值, 即吉林省种养业总产值, 亿元;  $PGDP$  为, 农业总产值, 即吉林省农林牧渔业总产值, 亿元;  $POP$  为吉林省农业劳动力总量, 万人。

令  $ES = \frac{C}{ENERGY}$  表示能源结构;  $EI = \frac{ENERGY}{AGDP}$  表示能源强度;  $SI = \frac{AGDP}{PGDP}$  表示产业结构;  $CI = \frac{PGDP}{POP}$  表示经济水平;  $AI = POP$  表示劳动力。由此得到种养业温室气体排放分解模型表达式:

$$C = ES \times EI \times SI \times CI \times AI \dots\dots\dots (3.10)$$

### 3.4.2 LMDI 模型

ANG (1997) 通过对比分析不同分指数分解分析 (IDA) 发现采用对数平均迪式指数分解法 (LMDI) 能够消除残差剩余项问题, 且可以有效化解分解过程中的 0 值和负值问题, 满足因素分解可逆并分解完全。因此, 基于 Kaya 恒等式, 建立出 LMDI 模型。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/898034004004006040>