

分类号 \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

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 西北五省（区）畜牧业碳排放的动态变化及影响因素研究

研究生姓名: 孔云霄

指导教师姓名、职称: 许静 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： 孔云霄 签字日期： 2023年5月30日

导师签名： 许静 签字日期： 2023年5月30日

## 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： 孔云霄 签字日期： 2023年5月30日

导师签名： 许静 签字日期： 2023年5月30日

**Study on dynamic changes and influencing  
factors of carbon emissions from animal  
husbandry in five provinces (regions) of  
Northwest China**

**Candidate: Kong Yunxiao**

**Supervisor: Xu Jing**

## 摘要

近年来,气候变化问题受到世界各国的广泛关注,联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 颁布了一系列纲领性文件以推进全球温室气体减排工作。2018年10月发布的特别报告中明确要求在2050年左右达到“净零排放”。为了实现这一目标,各国开始大力发展低碳经济,加快推进碳减排步伐。畜牧业作为国民经济重要的产业部门,为人类提供日常生活所需产品的同时,其生产过程也产生了大量的温室气体。因此,畜牧业碳排放问题得到了学者们的广泛关注,实现畜牧业生产低碳转型迫在眉睫。西北五省(区)是畜牧业生产的重点区域,由此产生的碳排放量也不容小觑。由此,本文通过开展该地区畜牧业碳排放的动态变化及影响因素研究,以为协调生态环境保护和经济发展提供必要的参考依据。

本文首先系统梳理了相关文献,依据 IPCC 公布的碳因子系数完成了对西北地区2000-2020年间畜牧业碳排放量的测度,使用 LMDI 模型分析了畜牧业碳排放的影响因素,在此基础上,利用 GTWR 模型分析其时空动态变化。研究表明:(1)西北地区畜牧业碳排放量呈逐年上升的趋势,其中新疆碳排放量最大,最大值为2225.67万吨,宁夏最小,最小值为244.99万吨。碳排放强度整体呈下降趋势,各省份间强度差距逐渐缩小。(2)生产效率因素对畜牧业碳强度均表现出负向抑制作用;人口规模因素对宁夏、陕西、青海、新疆表现出正向促进作用,对甘肃表现出负向抑制作用;结构因素对宁夏、陕西、甘肃、新疆起正向促进作用,对青海既有正向促进又有负向抑制,在不同年份表现不同。经济因素对各省畜牧业碳排放强度均具有正向促进作用。(3)经济发展水平的回归系数均为负值,表明经济水平的提升明显抑制了畜牧业碳排放的增加;畜牧业产业结构的回归系数在大多数年份表现为正值,表明畜牧业在农业中的比重增加会对畜牧业碳排放呈现促进作用;城镇化水平的回归系数在不同省份不同年份之间表现不同,宁夏和青海的城镇化水平与畜牧业碳排放强度呈正相关关系,新疆的城镇化水平与畜牧业碳排放强度呈负相关关系,陕西和甘肃的城镇化水平与畜牧业碳排放强度由负相关关系转为正相关关系。

**关键词:** 畜牧业 碳排放 LMDI 模型 GTWR 模型

## Abstract

In recent years, the issue of climate change has attracted wide attention from all countries in the world. The United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has issued a series of programmatic documents to promote global greenhouse gas emission reduction. A special report released in October 2018 explicitly called for "net zero emissions" by around 2050. In order to achieve this goal, countries began to vigorously develop low-carbon economy and accelerate the pace of carbon emission reduction. Animal husbandry, as an important industrial sector of national economy, not only provides products needed for human daily life, but also produces a lot of greenhouse gases in its production process. Therefore, the issue of carbon emissions in animal husbandry has been widely concerned by scholars, and it is urgent to realize the low-carbon transformation of animal husbandry production. The northwest is a key area for livestock production, and the resulting carbon emissions cannot be underestimated. Therefore, this paper studies the dynamic changes and influencing factors of carbon emissions from animal husbandry in Northwest China, in order to provide necessary reference for the coordination of ecological environmental protection and economic development.

Firstly, this paper systematically reviewed relevant literature and

measured the carbon emissions of animal husbandry in Northwest China during 2000-2020 according to the carbon factor coefficient published by IPCC. LMDI model was used to analyze the influencing factors of animal husbandry carbon emissions. On this basis, the GTWR model was used to analyze the temporal and spatial dynamic changes. The results showed that: (1) Carbon emissions from animal husbandry in Northwest China showed an increasing trend year by year, among which Xinjiang had the largest carbon emissions, with a maximum value of 22.2567 million tons, and Ningxia had the smallest carbon emissions, with a minimum value of 2.449 million tons. The overall carbon emission intensity showed a downward trend, and the intensity gap among provinces gradually narrowed. (2) Production efficiency factors had negative inhibitory effects on carbon intensity of animal husbandry; The population size factor has a positive promoting effect on Ningxia, Shaanxi, Qinghai and Xinjiang, and a negative inhibiting effect on Gansu. The structural factors had a positive promoting effect on Ningxia, Shaanxi, Gansu and Xinjiang, and had both positive promoting and negative inhibiting effect on Qinghai, which showed different performance in different years. Economic factors have positive promoting effect on carbon emission intensity of animal husbandry in provinces. (3) The regression coefficients of economic development level were all negative, indicating that the improvement of economic level significantly inhibited the

increase of carbon emissions from animal husbandry; The regression coefficient of animal husbandry industrial structure was positive in most years, indicating that the increasing proportion of animal husbandry in agriculture would promote the carbon emission of animal husbandry. The regression coefficient of urbanization level is different in different provinces and different years. The urbanization level of Ningxia and Qinghai is positively correlated with the carbon emission intensity of animal husbandry; the urbanization level of Xinjiang is negatively correlated with the carbon emission intensity of animal husbandry; the urbanization level of Shaanxi and Gansu is positively correlated with the carbon emission intensity of animal husbandry from negative correlation.

**Keywords:** Animal husbandry; Carbon emission; LMDI model; GTWR model

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景与研究意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
1.2 研究方法、思路和内容 .....	3
1.2.1 研究方法 .....	3
1.2.2 研究思路 .....	4
1.2.3 研究内容 .....	5
1.3 论文的创新之处 .....	6
1.4 本章小结 .....	7
<b>2 文献综述</b> .....	<b>8</b>
2.1 农业碳排放的测算和影响因素相关研究 .....	8
2.2 LMDI 分解法应用的相关研究 .....	10
2.3 GTWR 模型应用的相关研究 .....	12
2.4 文献述评 .....	13
2.5 本章小结 .....	13
<b>3 概念界定与理论基础</b> .....	<b>15</b>
3.1 概念界定 .....	15
3.1.1 畜牧业碳排放 .....	15
3.1.2 畜牧业碳强度 .....	15
3.2 理论基础 .....	16
3.2.1 循环经济理论 .....	16
3.2.2 环境承载力理论 .....	17
3.2.3 低碳经济理论 .....	17
3.3 本章小结 .....	18
<b>4 畜牧业碳排放量（强度）测算</b> .....	<b>19</b>



4.1 数据来源.....	19
4.2 碳排放量的测算.....	19
4.2.1 畜禽年均饲养量.....	20
4.2.2 碳排放系数的确定.....	20
4.2.3 碳排放量的测算与比较.....	21
4.3 碳排放强度的测算与比较.....	24
4.4 本章小结.....	25
<b>5 畜牧业碳排放影响因素分解.....</b>	<b>26</b>
5.1 LMDI 模型.....	26
5.2 LMDI 分解结果.....	27
5.3 本章小结.....	34
<b>6 畜牧业碳排放空间变化.....</b>	<b>36</b>
6.1 模型检验.....	36
6.1.1 多重共线性.....	36
6.1.2 空间自相关.....	36
6.1.3 变量选择.....	37
6.1.4 GTWR 模型.....	38
6.2 结果分析.....	40
6.2.1 VIF 值.....	40
6.2.2 莫兰检验.....	40
6.2.3 GTWR 模型拟合结果分析.....	40
6.3 本章小结.....	48
<b>7 研究结论与政策建议.....</b>	<b>49</b>
7.1 研究结论.....	49
7.2 政策建议.....	49
<b>8 研究不足与未来展望.....</b>	<b>52</b>
8.1 研究不足.....	52
8.2 未来展望.....	52

<b>参考文献</b> .....	<b>53</b>
<b>攻读学位期间的研究成果</b> .....	<b>60</b>
<b>致 谢</b> .....	<b>61</b>

## 图目录

图 1.1 技术路线图 .....	5
图 4.1 2000-2020 年西北五省（区）畜牧业碳排放量趋势图 .....	23
图 4.2 2000-2020 年西北五省（区）畜牧业碳排放强度趋势图 .....	25
图 6.1 2000-2020 年经济发展水平回归系数 .....	43
图 6.2 2000-2020 年畜牧业产业结构回归系数 .....	45
图 6.3 2000-2020 年城镇化水平回归系数 .....	47

# 表目录

表 4.1 畜禽肠道发酵 CH <sub>4</sub> 排放系数 .....	20
表 4.2 西北地区畜禽粪便管理 CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放系数 .....	20
表 4.3 2000-2020 年西北五省（区）畜牧业碳排放量 .....	22
表 4.4 2000-2020 年西北五省（区）畜牧业碳排放强度 .....	24
表 5.1 新疆 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果 .....	28
表 5.2 甘肃 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果 .....	29
表 5.3 青海 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果 .....	30
表 5.4 陕西 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果 .....	32
表 5.5 宁夏 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果 .....	33
表 6.1 主要变量及描述性统计 .....	38
表 6.2 各解释变量的 VIF 值 .....	40
表 6.3 GTWR 模型参数估计结果 .....	40

# 1 绪论

## 1.1 研究背景与研究意义

### 1.1.1 研究背景

政府间气候变化专门委员会（IPCC）正式发布的第六次评估（AR6）综合报告《气候变化 2023》中，近十年全球地表温度较工业革命时期上升了 1.1°C。人类活动导致全球气候变暖，引发了海平面持续上升、生物多样性锐减、人类健康损害、罕见灾害频发、极端天气事件等一系列问题。究其原因是人类向地球大气层排放的 CO<sub>2</sub> 等温室气体不断增加，加剧了温室效应。尽管大部分碳排放来自工业和服务业，但以动物为基础的农业系统占据了全球 45% 的土地面积，并贡献了很大比例的温室气体排放，因而农业碳排放也不应被低估。据 2019 年联合国粮农组织（FAO）估计，畜牧业造成的温室气体排放比例高达 15%，畜牧业已成为农业领域最大的温室气体排放部门。随着社会经济发展水平的提高，全球人均动物蛋白摄入量将增加，发展中国家或新兴经济体的增长率将高于发达国家。为了应对全球气候变化，到目前为止，世界上绝大多数国家签署了《巴黎协定》，这意味着他们已经制定了一个明确的目标，即到 21 世纪末，将全球气温上升控制在 2 摄氏度以内。为了实现这一预期目标，人类社会亟需在各个领域进行转型变革，实现人与自然的和谐发展。

人与自然和谐共生更是中国式现代化本质特征之一，十八大报告中将生态环境单列一章，二十大报告明确要求推进绿色低碳的生产方式和生活方式，由此可见，低碳发展已成为我国经济社会转型的重要目标之一。畜牧业是我国农业经济中最具活力的支柱部分，我国是全球最大的猪肉生产国和消费国，长期以来，猪肉在我国肉类消费中占据重要地位，是我国居民主要的肉类蛋白来源，然而，与发达国家相比，中国的人均肉类消费量仍然很低。为了提高人民的生活水平，我国政府投入了大量资源发展畜牧业。随着居民生活水平的提高，人们对畜牧产品的需求也会保持增长，同时我国人口规模庞大，市场的巨大需求也会促进畜牧业规模的扩大，由此引发的畜牧业碳排放问题不容忽视。此外，增加畜牧业产品和减少碳排放的双重压力有助于提高畜牧业发展效率，促进畜牧业的高质量发展。

西北地区在牛、羊、骆驼养殖方面驰名中外，相对稀少的人口和广袤的草原是发展畜牧业的独特优势，但同时也引发了一系列碳排放所带来的生态问题。在全国有序协调实现碳排放峰值和碳中和的背景下，实现畜牧业碳中和已成为必由之路。由此，本文以西北地区为研究区，以畜牧业碳排放为研究对象开展系统研究，一方面，利用 IPCC 因子法测度西北五省的畜牧业碳排放量和碳排放强度；另一方面，利用 LMDI 分解法剖析畜牧业碳排放强度变化的主要影响因素，并运用 GTWR 模型探析经济发展水平、农业产业结构及城镇化水平对畜牧业碳强度的作用，并针对西北五省提出碳减排的对策措施，以期减少西北地区畜牧业碳排放，提升畜牧业发展效率，促进畜牧业高质量发展。

### 1.1.2 研究意义

#### （1）理论意义

二十大报告提出“积极稳妥推进碳达峰碳中和”，是党中央统筹国内国际两个大局作出的重大决策部署，为推进碳双碳工作提供了根本遵循，对于全面建设社会主义现代化国家、促进中华民族永续发展和构建人类命运共同体都具有重要意义。畜牧业作为与人类息息相关的产业，对农业减碳减排的发展至关重要，但由于经营集中在广大农村，比较分散，减排任务重，因此该选题具有一定研究价值，研究结果有助于我们了解西北地区畜牧业碳排放现状，为如何推进畜牧业低碳生产提供必要的的数据支持，并以此为基础进行有效决策，具有较强的理论意义。

#### （2）实践意义

考虑到我国巨大的需求市场和长期的消费习惯，畜牧业实现“碳达峰、碳中和”的压力较大。因此，了解畜牧业碳排放主要影响因素，实现畜禽养殖碳减排，促进畜牧业低碳发展是当前政府面临的重大课题之一。故本文对西北五省（区）的十种畜禽进行了调查研究，在规模化养殖模式下通过 IPCC 法计算出畜禽肠道发酵和粪便管理产生的  $\text{CO}_2$ ，利用 LMDI 模型和 GTWR 模型对碳排放影响因素及其时序规律和空间特征进行了深入探索和实证分析，以为政府制定合理、可行的政策提供数据支持，并助力推进畜牧行业的绿色可持续发展和低碳循环经济建设。

## 1.2 研究方法、思路和内容

### 1.2.1 研究方法

#### (1) LMDI 指数分解法

在现有研究中，研究能源环境问题常用的方法有指数分解法（IDA）和结构分解方法（SDA）。SDA 对数据要求较高，需要投入产出数据，而 IDA 中的对数平均迪氏指数分解法（LMDI）能够很好地测量某一因素在事物整体变化的贡献程度，没有残差，有效避开了伪回归问题，是一种比较完全的分解方法。相比其他分解方法，LMDI 方法操作性和适应性强，可以有效分析总体指标，能够保持各个分解指标之间的高度一致性，具有完全分解和结果唯一性的优势<sup>[1]</sup>，因此是近年来碳排放分解方面应用最广泛的方法之一。

LMDI 分解方法实质上是将碳排放的计算公式表示为相关因素相乘的形式，并根据对数平均权重进行分解，从而确定各个因素对碳排放增长的贡献值。

#### (2) 时空地理加权回归模型（GTWR）

传统 OLS 回归模型假设区域内部是同质的、无差异的，无法反映研究对象的空间非平稳性。根据 Tobler 提出的地理学第一定律：任何事物之间都是空间相关的，距离越近的事物之间的空间相关性越大。因此，不同于传统的截面数据，空间数据的空间相关性会导致回归关系的空间非平稳性（空间异质性）。为了探索空间数据的空间非平稳性，Brunsdon 等<sup>[1]</sup>（1996）首次提出了地理加权回归（GWR）模型，设定如下：

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \sum_{j=1}^p \beta_j(\mu_i, \nu_i) X_{ij} + \varepsilon_i$$

不同于普通最小二乘回归模型的拟合系数为常数，GWR 模型的拟合系数  $\beta_j(\mu, \nu) (j=0, 1, 2, \dots, p)$  是样本点地理位置的函数。

作为一般线性回归模型的扩展，GWR 模型将研究对象的空间位置参数引入回归模型中，其回归系数不再是整体性回归的平均值，而是通过局部回归得到的、随空间位置变化而发生改变的回归系数。用以探索研究对象在某一尺度下的空间

变化及相关驱动因素，当自变量存在空间自相关关系，OLS 模型中残差项独立假设将无法满足研究需要，而 GWR 模型允许研究过程中直接模拟某些不平稳的数据，以实现用局部参数估计来代替全局参数估计。因此 GWR 模型能够反映参数在不同空间的非平稳性，使变量间关系可以随空间位置的变化而变化，且由于 GWR 模型考虑了空间对象的局部效应，其结果具有更高的准确性，更符合客观实际，因而 GWR 模型被广泛应用于地理学及涉及空间分析的相关研究领域中。

GWR 模型通过对空间截面数据进行局部回归分析，可揭示截面数据的空间异质性，但仅考虑了样本数据的空间非平稳性，忽略了时间非平稳性，对现实经济活动的反映较为有限。因此，Huang 等<sup>[2]</sup>（2010）在原有的地理加权回归模型中引入了时间特性参数，构建了考虑时间非平稳性和空间非平稳性的 GTWR 模型。设定如下：

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i, t_i) + \sum \beta_k(\mu_i, \nu_i, t_i)x_{ik} + \varepsilon_i$$

其中， $y_i$  为第  $i$  个样本点的被解释变量， $(\mu_i, \nu_i, t_i)$  表示是第  $i$  个样本点的时空坐标位置， $\beta_0(\mu_i, \nu_i, t_i)$  是第  $i$  个样本点的时空截距， $\beta_k(\mu_i, \nu_i, t_i)$  是第  $k$  个自变量在第  $i$  个样本点处的回归系数， $x_{ik}$  为第  $k$  个自变量在第  $i$  个样本点处的观测值， $\varepsilon_i$  是指残差。

## 1.2.2 研究思路

本文遵循“问题的提出—理论分析—实证分析—结论建议”研究思路，首先通过收集资料和整理文献，分析研究西北地区畜牧业碳排放的必要性和重要性，在已有相关研究基础上，根据生态保护和经济发展相互协调的角度发展低碳畜牧业的现实可能性，依据相关理论，探究西北五个省份畜牧业碳排放的影响因素，并在此基础上做了时空格局演变的可视化，更加直观的分析了随着时间的变化各影响因素对畜牧业碳排放的作用是否有所转变，得出相应结论并提出相关建议。本文的技术路线图如图 1.1 所示：



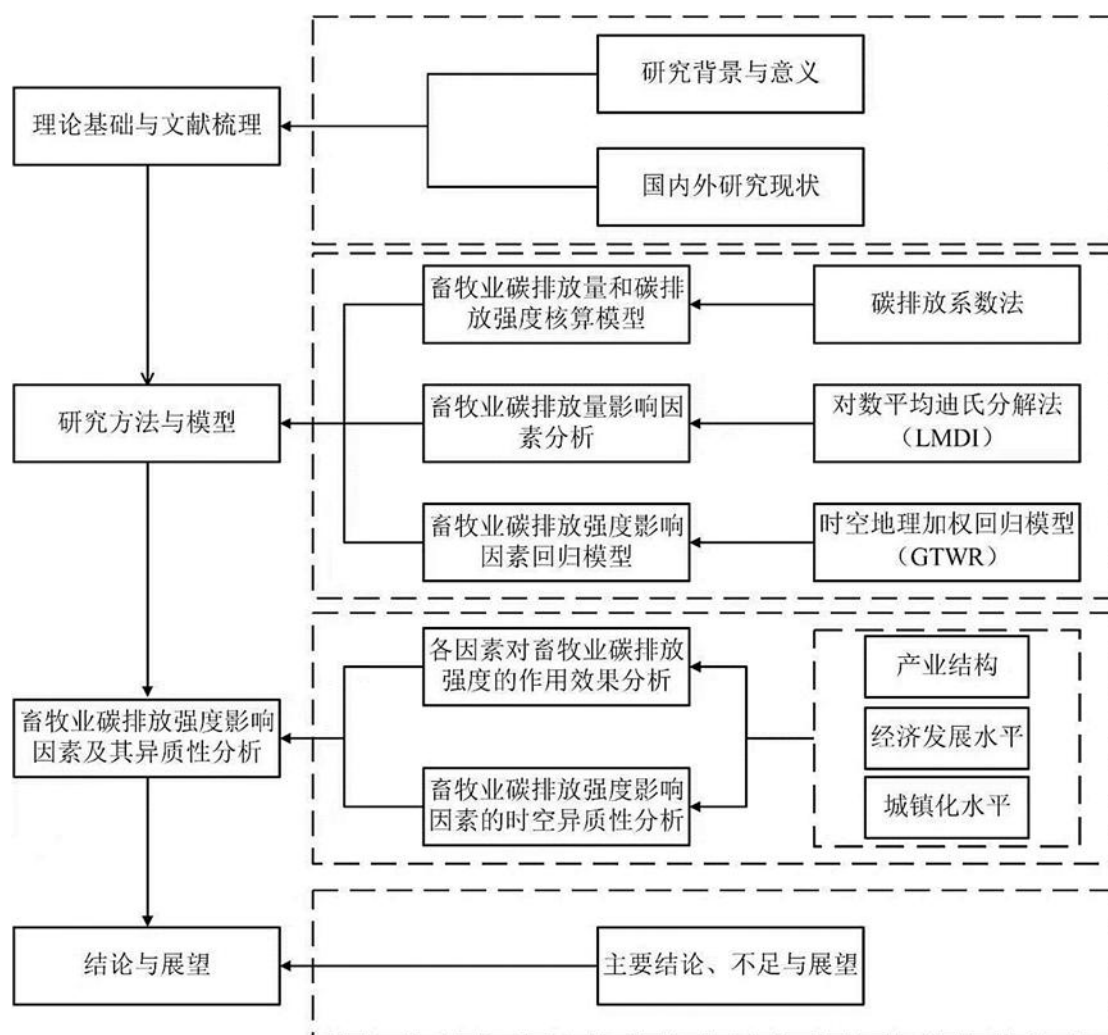


图 1.1 技术路线图

### 1.2.3 研究内容

本文厘清了畜牧业低碳发展的相关理论和内涵，采用 IPCC 因子法分别对西北五个省份十种牲畜的碳排放、碳强度进行测算，并利用 LMDI 分解法在此基础上对畜牧业碳排放影响因素进行测定分解，用时空地理加权模型对三大影响因素的回归系数进行时空格局演变分析，最后根据结论提出相关建议。

论文分为四部分，共八章，主要研究内容如下：

第一部分包括第一章绪论与第二章文献综述。第一章主要分析了本文选题的背景与意义，确定研究的内容与方法。第二章文献综述部分对国内外畜牧业碳排放研究和研究方法进行梳理与评价，获得研究启示。

第二部分为论文的第三章。第三章对畜牧业碳排放和碳排放强度的相关概念进行界定，进而主要介绍了循环经济理论、环境承载力理论、低碳经济理论，为

论文的进一步开展奠定理论基础。

第三部分包括论文的第四、五、六章。第四章先说明了测算畜牧业碳排放的相关依据和公式、演化，然后列明 IPCC 公布的因子法对十种牲畜的产生的温室气体统一换算成碳排放的系数，第五章利用相关公式测度了牲畜产生的碳排放量与碳排放强度。第六章基于 LMDI 分解法对西北五省（区）畜牧业碳排放的影响因素分解为效率因素、结构因素、劳动力规模、人口规模 and 经济发展水平 5 个方面，在此基础上，运用 GTWR 模型对经济发展水平、农业产业结构和城镇化水平的回归系数进行了可视化分析。

第四部分为论文的结论建议部分，即第七章。根据前文的研究总结归纳出三点结论，并逐条列出针对西北地区畜牧业碳减排的保障措施。

### 1.3 论文的创新之处

本研究从畜牧业碳排放的估算和来源分析以及畜牧业碳排放的影响因素两个方面对已有文献进行了整理，以期为本研究提供一些启示。本文在对西北地区畜牧业温室气体排放量进行量化分析的基础上，将重点放在影响畜牧业碳排放的驱动因素上。

#### （1）丰富了畜牧业碳排放研究的内容

本文将视角聚焦在生态环境脆弱的西北五省（区）的畜牧业碳排放上，整体区域研究与个体研究共存，并选取肉牛、奶牛、绵羊、山羊、马、驴、骡、骆驼、猪、家禽十种牲畜作为调查对象，研究了其肠道发酵和粪便管理两大方面所产生的温室气体，并将其转换成 CO<sub>2</sub> 量，更便于比较分析，将有助于丰富相关研究成果。

#### （2）扩展了畜牧业碳排放影响因素的研究方法

本文在原有常用的 LMDI 分解法对畜牧业碳排放强度影响因素研究的基础上，创新性的引入 GTWR 模型。该模型可有效针对面板数据从而提升分析能力，将解释变量的回归系数进行可视化分析，从而揭示在不同时间和空间上影响畜牧业碳排放的因素变化，提高了实证结果的可信度。

## 1.4 本章小结

人类对能源使用的增多及对生活品质的提升带来温室气体的增多,由此引发的一系列生态问题对人类的生存带来了威胁,在这样的背景下,碳排放逐渐被人类重视并采取了一系列措施进行碳减排,本文选取西北地区为研究区域,以农业中的畜牧业作为研究对象开展系统研究,并对本文选取研究碳排放的方法即LMDI分解法和GTWR模型进行了具体讲解,以技术路线图的形式对总体框架进行了呈现,最后归纳了研究中可能存在的创新点。

## 2 文献综述

### 2.1 农业碳排放的测算和影响因素相关研究

如何正确的测算农业碳排放，碳源的选取是关键。有学者认为农业碳排放源主要集中在对农业物资焚烧、森林资源砍伐以及农业化肥的使用等<sup>[3]</sup>，也有学者证实了部分碳源是动物肠道发酵和粪便管理<sup>[4]</sup>。Yao 等<sup>[5]</sup>(2017)基于生命周期评价(LCA)综合测算了 2000—2014 年中国大陆 31 个省份的畜牧业碳排放，并基于对数平均分工指数(LMDI)方法分解了畜牧业生产效率、农业结构调整、农业单位劳动生产率收益、城镇化和总人口增长 5 个主要影响因素，从而从时间和空间两个维度揭示畜牧业碳排放的驱动效应。Aleksander Grzelak 等<sup>[6]</sup>(2019)研究发现较高的资本禀赋和较低的劳动强度有利于环境可持续价值的提高。具有较高劳动力禀赋的农业可能较低的生态效率的结果与这一问题的普遍认知相矛盾。Wang 和 Shi<sup>[7]</sup>(2012)以保定市为例，在分析保定市当前碳排放结构及其影响因素的基础上，从农、林、牧三个部门构建了碳排放统计指标体系，计算了保定市 2005 年和 2010 年的碳排放量。结论表明，在中国农村生产生活过程中，碳排放的主体是塑料生产和应用、农机柴油消耗，而碳储量主要来自有机肥的施用和秸秆土壤产生的碳固存。

姚成胜等<sup>[8]</sup>(2017)基于生命周期评估(LCA)，综合测算了 2000—2014 年中国大陆 31 个省份的畜牧业碳排放量，并分解出农业结构调整、畜牧业生产效率、农业生产力收益等 5 个主要影响因素。基于对数平均(LMDI)方法的劳动力、城市化和总人口增长，从而从时间和空间两个维度揭示了对畜牧业碳排放的驱动效应。王兴等<sup>[9]</sup>(2017)将视角放在西南地区，研究了 2000—2014 年间的农业碳排放趋势、驱动因素及贡献率，结果表明，重庆碳排放占比由高及低依次是四川、云南、贵州、重庆、西藏。农业效率、农业结构及劳动力规模等因素在一定程度上缓解了农业碳排放压力，而农业经济发展水平是该区农业碳增排的最主要因素。郎慧等<sup>[10]</sup>(2019)采用 Tapio 脱钩模型探究了 1999—2016 年四川省农业碳排放与农业经济之间的脱钩效应，结果表明，农业物资投入与农地利用和牲畜养殖是四川省两大农业碳源，具体来看，翻耕、化肥、牛和猪对农业碳排放贡献最大。Pang 等<sup>[11]</sup>(2020)通过泰尔指数和空间数据分析，研究了 1991—2018

年中国农业生产碳排放强度的区域差异、时空格局和动态演变。结果表明，农业生产碳排放强度的总体差异较初期有所扩大，区间差异和区内差异趋势相反，前者呈缩小趋势，后者呈扩大趋势。从区域角度看，东部和中部地区差距较小，两者与西部地区的差异逐渐扩大。宁成佳和杨松<sup>[12]</sup>（2020）同样对我国农业碳排放的驱动因素做了实证研究，不同的是，作者运用 ARDL-ECM 模型发现仅有农业外国直接投资呈现负效应，农业市场化改革呈现正效应，而农业出口、农业财政支出、农业技术进步因素与不同基期相比较作用不同。张荧楠等<sup>[13]</sup>（2021）对山东省 17 个地级市 2000—2017 年的农业生态效率采用包含非期望产出的 SBM 模型进行了测度，结果发现，农业生态效率均值表现为缓慢下降，2013—2017 年稳定在中等效率水平；劳动力投入、农药投入、农业面源污染物排放是造成生态效率损失的主要原因。贺青等<sup>[14]</sup>（2021）将视角放到农业产业集聚，从省域层面选取 2003—2018 年面板数据。结果显示，该因素对农业碳排放的影响具有双重门槛效应，也即随着农业产业聚集水平的提高，农业碳排放曲线呈现“倒 U”形状；

徐清华和张广胜<sup>[15]</sup>（2022）基于 282 个城市的面板数据，采用空间 Dubin 模型研究了 1999—2019 年农业机械化水平对农业碳排放强度的影响，研究发现，农业碳排放强度总体呈下降趋势，农业机械化程度的提升显著降低了本地农业碳排放强度，存在显著的负向空间溢出效应，是促进农业低碳减排行之有效的措施。曹俐和范黎明<sup>[16]</sup>（2022）利用 STIRPAT 模型对我国沿海 11 个省份的海洋渔业碳排放驱动因素进行了考察，研究结果显示，财政分权、经济发展水平、产业结构和科研投入是我国海洋渔业碳排放的重要驱动因素。其中财政分权是正向驱动因素，经济发展水平的正向驱动随着自身的提高逐渐减弱，产业结构和科研投入是负向驱动因素。苏旭峰等<sup>[17]</sup>（2022）通过测算 2000—2018 年间中国 30 个省份畜牧业碳排放量，发现未来畜牧业碳减排的重要方向是农业结构变化、地区生产总值变化、城镇化水平变化。Shi 等<sup>[18]</sup>（2022）利用 2000—2018 年中国 30 个省级行政区的数据，采用 Thiel 指数法、核密度分析和收敛分析，量化了畜牧业结构对畜牧业碳排放的影响。统计结果表明，畜牧业碳排放呈上升和下降趋势。其中，畜牧业碳排放以农业区最高（呈下降趋势），农牧区次之（呈下降趋势），牧区最低（呈上升趋势）。进一步揭示了畜牧业碳排放不存在  $\delta$  收敛和  $\beta$  收敛。尚莉媛等<sup>[19]</sup>

(2023)通过对京津冀 2000—2023 年畜牧业碳排放研究, 结果发现, 碳排放效率的主要驱动因素是乡村从业人员文化水平、抑制因素是畜牧业碳排放强度, 城镇化水平能改善邻近区域碳排放效率值。

## 2.2 LMDI 分解法应用的相关研究

目前, 国内外相关学者多采用指数分解分析和结构分解分析研究碳排放的影响因素。指数分解分析是运用数理公式对各影响因素进行逐一分解, 在碳排放领域应用较为广泛。Achão 和 Schaeffer<sup>[20]</sup> (2009) 以巴西居民电力消耗为研究视角, 运用 LMDI 分解法将影响因素分为活动效应、强度效应和结构效应, 其中贡献最大的是活动效应, 此外高收入消费群体占比的上升也对其增长有所影响。Das 和 Paul<sup>[21]</sup> (2014) 对印度 1993—1994 年 和 2006—2007 年两个时间段内的居民 CO<sub>2</sub> 排放的影响因素作了研究, 结果显示, 对碳排放起主要推动作用的是居民人口规模、消费支出结构、人均消费支出三种效应。Karmellos 等<sup>[22]</sup> (2016) 将视角转向欧盟 28 个国家的电力部门, 运用该模型对驱动因素进行了分解, 结果表明起主要促进作用的是因素电力强度和电力贸易。Kopidou 等<sup>[23]</sup> (2017) 面向西班牙、葡萄牙、意大利和希腊四个南欧国家的工业, 运用 LMDI 分解法, 结果显示对工业碳排放起主导作用的是经济活动和能源强度。李艳梅等<sup>[24]</sup> (2010) 运用 LMDI 方法探究了 1991—2004 年中国城乡居民能源消费碳排放的影响因素。结果表明导致其上升和下降的主要因素分别是能源强度和收入效应, 同时收入效应对城镇居民的影响始终大于农村居民。李国志和李宗植<sup>[25]</sup> (2010) 利用 LMDI 模型对 1981—2007 年中国农业能源消费的碳排放影响因素进行了分解, 实证发现, 农业碳排放最主要的驱动因素来自于经济增长, 其次是能源消费结构的不断恶化, 技术进步对农业碳增加有较强的抑制作用但具有一定随机性。Chung 等<sup>[26]</sup> (2011) 将视角放在国内香港的居民生活能源消费, 采用 LMDI 的实证方法, 结果表明人口数量的增加对能源增长起主导作用。Zhao<sup>[27]</sup> (2012) 同样探究的是居民的能源消费因素, 选取我国 1998—2007 年的数据进行 LMDI 分解, 结果表明, 对能源消费起抑制作用的是能源价格改革, 拉动能源消费增加的因素是城镇化水平和收入水平的提高。徐晓等<sup>[28]</sup> (2014) 从整体的角度对影响中国碳排放分解成了五大效应, 其中, 起负向抑制作用的是能源强度效应, 起正向

促进的因素是经济产出效应。Jiang<sup>[29]</sup>（2016）将 AMDI 和 LMDI 两个模型结合，对我国 1996—2012 年城镇居民碳排放进行了分析，实证结果显示，能源强度、人均居住面积、家庭总人口三个效应是主要影响因素。王强等<sup>[30]</sup>（2019）利用 LMDI 方法探讨了中国和印度经济增长与能源消费之间的脱钩弹性的五个关键效应（劳动力投入、投资、能源结构、能源强度、技术水平），分解结果表明，两国脱钩的主要影响是相似的，即投资效应是最大的驱动因素，而能源强度效应是最大的抑制因素。

郑杰等（2019）<sup>[31]</sup>采用 LMDI 方法对 2000 年以来中国 CO<sub>2</sub> 排放变化的 7 个社会经济驱动因素进行了估算。结果表明，2012 年以来中国碳排放趋于平稳，主要原因是能源效率的提高和结构升级（即产业结构、能源结构和区域结构）。以各省经济增长份额衡量的区域结构自 2012 年以来大幅减少了 CO<sub>2</sub> 排放。由于各区域发展模式不同，这些驱动因素对排放变化的影响各不相同，产业结构和能源结构导致了部分地区的碳排放增长，但这两个驱动因素导致了国家层面的碳排放减少。Wang 和 Jiang<sup>[32]</sup>（2019）采用 Cobb-Douglas (C-D) 生产函数与 LMDI 方法相结合识别出更多影响脱钩弹性的驱动因素（劳动力投入、投资水平、碳系数、能源结构、能源强度、经济结构和技术状态）。结果发现，六个部门的贡献促进解耦效果排名如下：建设 > 农业 > 贸易 > 其他 > 运输 > 行业。推动 CO<sub>2</sub> 排放量增加的最关键因素是投资效应，而能源强度效应抑制了累计 CO<sub>2</sub> 排放量减少。Luo 等<sup>[33]</sup>（2023）分析了粤港澳大湾区及周边城市碳排放的驱动因素、未来趋势和政策含义，构建了基于对数平均划分指数（LMDI）和系统动力学（SD）的研究框架。结果表明，人均 GDP 增长对 CO<sub>2</sub> 排放的影响最大，其次是交通工具数量和人口。负面影响是能源强度、交通工具平均产量和居民能源强度，其中能源强度最为关键。杨绍华等<sup>[34]</sup>（2023）基于 LMDI 分解法探究了 2000—2019 年影响长江经济带交通碳排放的因素，结果表明，起正向促进作用的首要因素是经济规模的持续扩张，次要因素则是人口规模；负向抑制的关键因素则是运输结构和经济结构的转变，次要因素则是技术水平的进步。此外，基于人均碳排放和碳排放强度的 Theil 指数均显示该地区交通碳排放量具有明显的区域异质性，其中区域内差异大于区域间差异。

## 2.3 GTWR 模型应用的相关研究

武敏<sup>[35]</sup>（2019）利用 GTWR 模型分析了影响我国各省建筑业碳排放强度的因素，起正向促进作用的是能源强度和施工强度，既有正向作用又有负向作用的是劳动效率、行业需求和城镇化水平。针对不同时期以及不同省域建筑业碳排放强度的影响，各因素呈现时空异质性。分布在北部和西部的省域，行业需求多起负效应，集中在东南沿海的省域行业需求主要为正向作用；主要分布在北部地区的省域城镇化水平起正效应，而对分布在中部和南部的省域起负向作用，且其数量不断增加。Yuan 等<sup>[36]</sup>（2020）选取了中国 285 个地级市的面板数据，利用双变量空间关联局部指标（BLISA）模型和 GTWR 模型，从全球和本地两个角度考察了金融集聚对绿色发展的时空影响差异。结果表明，2003—2015 年金融集聚与绿色发展存在显著空间依赖性，以低-低（L-L）和低-高（L-H）空间集聚类型为主；从区域看，金融集聚对绿色发展的促进作用呈现出显著的空间异质性，从东南沿海向西北内陆呈逐渐减弱的趋势。Zhu 等<sup>[37]</sup>（2022）分析了 2000—2017 年长江三角洲城市群 CO<sub>2</sub> 排放的时空异质性及其驱动因素。结果表明，CO<sub>2</sub> 排放时空分布具有空间一致性，高排放地区集中在上海、苏州、无锡等经济发达地区；区域聚集是一个新趋势，目标城区的 CO<sub>2</sub> 排放逐渐向经济中心城市和各类城市趋同，如上海和宁波；不同经济发展水平的城市，碳排放的驱动因素不同。在发达城市发展初期，第二产业和城市基础设施占主导地位，第三产业的影响在发展后期更为显著。

李泽坤等<sup>[38]</sup>（2021）利用 GTWR 模型对浙江省 1995—2015 年碳排放进行了研究，碳排放总量总体上呈上升趋势，能源活动碳排放是主要来源，很大程度上是来源于工业碳排放，而次要来源则是非能源活动碳排放，主要体现在水泥生产和水稻种植。吴小影等<sup>[39]</sup>（2021）采用 GTWR 模型对长三角地区 41 个地级市的城市建设用地扩展强度的驱动因素进行了探究。结果表明，城镇化快速推进致使该地区城市建设用地扩展强度的区域差异不断扩大，空间不均衡性逐渐凸显。Hu 等<sup>[40]</sup>（2022）利用 2000—2017 年中国 31 个省区面板数据，运用 GTWR 模型实证检验了税收竞争对区域环境污染（区域 SO<sub>2</sub> 排放和废水排放）的影响存在显著的空间异质性，此外通过利用 LISA 方法发现税收竞争对区域环境污染的影响存在显著的空间依赖性。分开来看，对区域 SO<sub>2</sub> 排放和区域污水排放的影响分别



呈现“低-低”空间相关格局和“高-高”空间相关格局。李晓娟<sup>[41]</sup>（2022）基于 GTWR 模型探索了我国 2009—2018 年的肺结核发病情况的基本时空特征，并与 OLR 模型和 GWR 模型作了对比，结果发现，GTWR 模型拟合效果最好；各种宏观因素对肺结核的影响程度大小是文化素养>经济>环境>卫生>交通>城乡差异，且在省域层面存在显著时空异质性。Xu 等<sup>[42]</sup>（2023）从水足迹的角度，计算分析了中国农业用水绿色效率的演变趋势、区域差异和驱动因素。结果表明，1997—2020 年，中国农业用水绿色效率呈现先下降后上升的波动趋势，从区域来看，东部地区农业用水绿色效率最高，高于全国平均水平，其次是西部地区，中部地区最低，区域差异显著；城镇化水平、节水水平和农业贸易对农业用水绿色效率的影响始终为正，工业化水平对农业用水绿色效率的影响始终为负。其中，城镇化水平、节水水平和工业化水平对东北地区影响较大，农产品贸易对东南地区影响较大。

## 2.4 文献述评

从总体来看，国内外学者从不同行业不同角度对碳排放的影响因素作了分析，包括宏观因素和微观因素，但是关于区域碳排放的异质性研究则较为欠缺，尤其是低碳畜牧业。国外学者对畜牧业的研究相对较少，大多集中在碳减排的具体措施和实现路径上，包括建立完善相关的法律法规体系、改善饲料结构和喂养方式、加强森林草地的保护等方面，对具体某个区域碳排放的度量和影响因素的分解还不够全面。国内学者聚焦低碳畜牧业的本质，视角大多集中在全国领域，影响因素的测定方法大多集中在 LMDI 模型，对区域的空间异质性研究较少。

中国作为世界上最大的肉类消费国，相关学者关于中国分区域探索低碳畜牧业的研究较少且缺乏系统性，此外关于畜牧业如何实现碳减排的具体实施还处在借鉴国外经验的阶段，对本土特色化发展仍需要进一步探索。

## 2.5 本章小结

本章梳理了国内外对于农业碳排放的发展变化、现状、测算、影响因素及模型使用的现状，首先对农业碳排放的现状进行了说明，农业作为农林牧渔业的统称，在碳排放中占据了很大比例，农业农村减排固碳是我国碳达峰、碳中和的重要组成部分，如何开发农业农村碳汇资产、推动农业“双碳”目标是亟待研究探

索的课题，其次对农业碳排放的影响因素进行了综述，主要集中在能源结构、城镇化水平、人口规模、技术水平、经济发展水平等方面。最后对农业碳排放的测算进行了综述，包括 LMDI 分解法和 GTWR 模型的有关使用作了介绍，其中 LMDI 分解法是研究碳排放领域较常用的方法，GTWR 模型将回归系数可视化，可以利用在不同领域进行对比研究。

### 3 概念界定与理论基础

#### 3.1 概念界定

##### 3.1.1 畜牧业碳排放

畜牧供给链产生的碳排放主要来自四个方面：肠道发酵、粪便管理、饲料生产及能源消耗。肠道发酵造成反刍动物消化过程产生  $\text{CH}_4$ ，虽然非反刍动物品种也会在消化过程中产生  $\text{CH}_4$ ，但产生的量远低于反刍动物。饲料质量与肠道排放密切相关，难消化的日料，例如高纤维成分，会产生更多的肠道  $\text{CH}_4$  排放。粪便既会造成  $\text{CH}_4$  排放也会造成  $\text{N}_2\text{O}$  排放， $\text{CH}_4$  在有机物厌氧发酵分解过程中释放出来， $\text{N}_2\text{O}$  主要是在粪便氨分解过程中产生。不同的粪便管理系统可以导致不同的排放水平，一般而言，如果粪便通过液体系统储存和处理（粪塘或粪池）则  $\text{CH}_4$  排放量较高，而干粪便管理系统，例如干圈舍或固体系统，则更多排放  $\text{N}_2\text{O}$ 。还有一些排放和饲料生产相关， $\text{CO}_2$  排放来自饲料作物和牧场向森林等自然区域扩张、饲料作物所用化肥农药的生产以及饲料运输和加工， $\text{N}_2\text{O}$  的排放由氮肥的使用以及直接向牧场及作物田块施用动物粪便造成。能源消耗贯穿于整个供给链，肥料生产以及使用机械进行饲料作物的作物管理、收获、加工及运输会造成温室气体排放，这部分排放计入饲料生产排放，畜禽养殖场所的通风、照明、挤奶、降温等也要消耗能源，最后，畜禽产品要进行加工、包装和运输到零售点，这要进一步消耗能源。肠道发酵产生的碳排放占畜牧业排放总量的 44%，饲料生产是第二大排放来源，占排放总量的 41%，粪便管理造成的排放占排放总量的近 10%，农场及农场养殖阶段之后的能源消耗占排放总量近 5%。

目前，大多文献实证结果一致认为畜牧业碳排放的主要活动是反刍动物肠道发酵以及粪便管理，有鉴于此，本文也将畜牧业碳源限定为以下两个方面：一是肠道发酵引起的碳排放，二是粪便管理引起的碳排放。

##### 3.1.2 畜牧业碳强度

所谓畜牧业碳强度是指畜牧业产生的碳排放总量与牧业生产总值的比值，反

映碳排放资源的利用效率。碳强度取决于其碳排放系数、畜牧业结构、畜牧业产值在农林牧渔总产值中的比重等。它受经济增长、技术进步、产业结构变化、技术水平、政策因素、工业化和城镇化进程以及农业规模等因素的影响。根据碳强度的定义，它是一个反向指数，数学表达式如下：

$$c = \sum \sum \frac{C_i}{Y_i}$$

式中  $c$  为碳强度（万吨/万元）； $C_i$  是第  $i$  年畜牧业的碳排放量（万吨）； $Y_i$  是第  $i$  年的牧业生产总值（万元）。

具体而言，碳排放强度越大，说明该地区资源利用效率越低，也表明该地区的经济发展存在着较大的提升空间。

## 3.2 理论基础

### 3.2.1 循环经济理论

美国经济学家伯尔丁是最早提出关于“循环经济”一词的。该理念认为，在自然生态系统和和经济社会系统中，物质循环和能量流动是其基本功能，且不断转换变化。人类的一切经济活动也应当遵循自然界生态系统的物质循环和能量流动的规律，并能够恰当的将经济系统融入整个自然生态系统的物质能量循环中，形成资源循环高效利用、清洁产品生产和废物回收再利用为主的生态经济发展理念。该理念要求在不违背生态和经济发展理念的前提下，对自然资源合理适当利用并能动的优化周围自然环境，在可循环的基础上使经济实现可持续发展。

该理论倡导经济发展不能以破坏生态环境为代价，要遵循“低开采、高利用、低排放”的发展模式。其机理主要是围绕“3R”准则，“减量化”，在生产和消费过程中要注重资源的节约，从源头上减少污染，节约资源；“再利用”，主要是提高产品的可循环利用，主要是提升产品和相关服务的利用效率，避免产生一次性的污染；“再循环”是指生产的产品在其使用之后，依然能够进行回收再利用，变为可再生资源。即整个社会的经济活动形成“资源—产品—再生资源”的反馈机制，其中的物质和能源在该循环活动过程中能最大限度的实现合理利用，

将对自然生态环境的危害程度降为最低。循环经济理念的提出，是人类开始对自然生态给予重视，也对整个经济社会发展进行深刻反思的结果，其目的在于能够让人类经济社会实现可持续，避免陷入能源危机、环境和生存危机。

### 3.2.2 环境承载力理论

“环境承载力”顾名思义，是指在某种环境状态下的某一时刻，某区域环境对人类社会经济活动最大支持能力的限度，因此又称“环境忍耐力”。区域环境作为提供人类生产活动的空间与载体，能够为人类生产提供丰富资源并容纳所产生的相关废物，是人类赖以生存和发展不可或缺的重要系统。该系统在物质组成和空间分布上具有一定规律，因此会对人类生产活动具有一定支持能力的限度。环境承载力的本质一方面环境系统组成与其结构的外在表现，另一方面也体现了人类活动与环境之间的密切关系，具有三大特点，即客观性、变动性、可控性。该理论的研究对象不仅仅是大气、水体、土壤等单一要素，而是整个环境，它为整个社会经济发展的提供物质基础，并对整体特征进行深入剖析，寻求实现社会、经济与生态之间的最大公约数。然而。当今社会生产活动存在各种环境问题，并且相当一部分已经接近或超过该区域环境做承载的最大限度。当人类经济活动超过环境承载限度以后，自然会受到环境的“反作用力”。因此，人类生产活动应当遵循客观规律、可循环、良性的发展。

### 3.2.3 低碳经济理论

“低碳经济”最早是出现在英国政府所发表的一篇政府文件——《我们能源的未来：创建低碳经济》当中，并在2009年12月，联合国召开了《气候变化框架公约》的第15次缔约方会议，即《哥本哈根协议》中提出。该协议虽不具备法律约束力，但也在全球掀起了一场关于低碳经济相关的研究热潮。低碳经济是在人类意识到全球气候不断升温，造成对人类社会、经济生产、生活严峻挑战的背景下应运而生。该理念旨在通过各种技术、制度创新促进产业转型升级和开发新能源等手段，尽可能降低对于不可再生能源的高依赖、高消耗，更大限度的降低能源消耗和温室气体排放，使得社会经济发展与生态环境之间协调可持续。其本质在于提升传统能源的利用效率，并推进对于区域的清洁能源发展，降低碳排放，

维持生态平衡。该理念从根本上对人类生产生活产生了巨大扭转，迫切要求在技术上和制度上寻求创新，实现产业结构转型升级，以此维持经济可持续发展。低碳经济是指低耗、低排、低污染的经济发展模式，是继农业和工业文明以来的又一次巨大进步，也是倡导生态文明理念的重大举措，其实质在于提升传统能源的利用率，并提升新能源在能源利用中的比重，从而实现低碳经济发展。

其核心是对清洁技术进行不断创新和推广应用，提升社会公众环保意识，以此实现低碳生产方式发展。潘家华等<sup>[43]</sup>（2011）研究认为，只有对碳排放量进行严格控制和约束才能实现低碳经济，要实现良性经济发展，就必须要求碳利用率、转化率、生产力和处理净化能力提高到一定程度，并提出低碳经济概念所具备的三个核心特征即低碳排放、高碳生产、阶段发展。此外，王军<sup>[44]</sup>（2014）还对低碳经济的特征做了更深刻的诠释，即低碳经济是通过各种技术、制度等手段，对碳的利用转化率进行提升，进而达到控制温室气体排放的目的，经济发展模式也必须以低耗、低排、高效为目标，可以发展以低碳为主的相关产业体系。其模式是主要是低能耗、低污染、低排放为基础，是落实和实现生态文明的重大举措。张立军等<sup>[45]</sup>（2013）认为，要实现低碳经济发展必须进行技术创新，技术创新是根本；而制度创新则是为实现低碳经济发展“保驾护航”；切实的实现人与自然的高度融合，由此实现低碳经济发展。新型消费价值观的倡导和全民参与实现低碳经济的不二之选，同时，树立忧患意识为低碳经济发展提供内在动力，通过监督与计量为低碳经济发展指明方向。资源的稀缺性是经济活动的约束边界，由于资源的有限性和人类欲望无限性之间的矛盾，低碳经济发展模式就成为当前实现经济的可持续发展的最优解。

### 3.3 本章小结

本章对论文的相关概念、理论基础作了系统性说明。首先对畜牧业碳排放和畜牧业碳强度的概念进行了界定，包括畜牧业碳排放的来源和碳排放强度的计算公式，方便后文相关概念的提及。然后对碳排放的相关理论进行总结和归纳，主要介绍了围绕生态可持续发展的三种理论，为之后进一步深入围绕碳排放研究做铺垫。

## 4 畜牧业碳排放量（强度）测算

### 4.1 数据来源

本文的研究对象是 2000—2020 年西北五省（区）肉牛、奶牛、绵羊、山羊、马、驴、骡、骆驼、猪、家禽十种牲畜，各种畜禽年末存栏数、年出栏量数、畜牧业产值、农林牧渔业产值、总人口数、农村人口数均来源于《中国农村统计年鉴（2000—2021）》、《新疆统计年鉴》、《青海统计年鉴》、《陕西统计年鉴》、《甘肃统计年鉴》、《宁夏统计年鉴》及各省统计局。CO<sub>2</sub> 排放系数来源于国家发展和改革委员会编制的《省级温室气体清单编制指南(试行)》，其中历年产值以 2000 年的不变价为基准进行了调整。图像数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心的西北五省土地利用矢量数据集。

### 4.2 碳排放量的测算

目前 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SF<sub>6</sub>、HFCs、PFCs 是联合国规定的六种主要温室气体。根据 IPCC 的第四次评估报告，增温效应最高的前三位是 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O，贡献率分别为 63%、18%、6%，其他温室气体贡献率约为 13%<sup>[46]</sup>，由此可见，CO<sub>2</sub> 排放贡献了最大的增温效应，是最主要的温室气体<sup>[47]</sup>。因此将 CO<sub>2</sub> 当量作为度量温室效应的基本单位，以统一度量是便于进行比较的。

基于生命周期评价(LCA)，畜牧业产生的温室气体包括 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O，主要来自畜牧业生产、农资生产、能源消耗和粪肥处理 4 个来源。具体而言，畜牧业生产通过肠道发酵产生 CH<sub>4</sub>，农业材料生产通过种植和加工粮食作物生产饲料产生 CO<sub>2</sub>，电力、煤炭和柴油等能源消耗以满足照明和取暖需求产生 CO<sub>2</sub>，粪肥处理产生 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O。由于发改委编制的《省级温室气体清单编制指南(试行)》仅将畜牧业 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的来源纳入省级农业温室气体清单，因此本研究仅估算了牲畜肠道发酵和粪肥处理的温室气体排放。排放量参照 IPCC<sup>[46]</sup>排放因子系数法，将 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 转化为 CO<sub>2</sub> 当量。

### 4.2.1 畜禽年均饲养量

由于畜禽数量在养殖过程中会因繁殖和屠宰而变动，因此本文对畜禽年平均饲养量进行调整，调整依据为畜禽出栏率。出栏率大于 1 的畜禽品种为奶牛、肉牛、马、驴、骡、绵羊、山羊、骆驼，年末存栏量即为年均饲养量；出栏率小于 1 的畜禽品种为生猪、兔和家禽，它们的平均生命周期分别为 200 天、105 天和 55 天<sup>[48]</sup>，年均饲养量的确定公式如式（4-1）所示：

$$\text{牲畜年均饲养量} = \begin{cases} \text{年末存栏量, 出栏率} \geq 1 \\ \text{饲养周期} \times \frac{\text{年末出栏量}}{365}, \text{出栏率} < 1 \end{cases} \quad \text{式 (4-1)}$$

### 4.2.2 碳排放系数的确定

本文参考 IPCC 编制的《省级温室气体清单编制指南(试行)》，及参考了相关文献中确定的相应碳排放系数（表 4.1 和表 4.2）

表 4.1 畜禽肠道发酵 CH<sub>4</sub> 排放系数

		千克/头/年							
饲养技术	奶牛	肉牛	绵羊	山羊	猪	家禽	马	驴/骡子	骆驼
规模化	88.1	52.9	8.2	8.9					
佃户	89.3	67.9	8.7	9.4	1	0	18	10	46
放牧	99.3	85.3	7.5	6.7					

表 4.2 西北地区畜禽粪便管理 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放系数

		千克/头/年							
	奶牛	肉牛	绵羊	山羊	猪	家禽	马	驴/骡子	骆驼
CH <sub>4</sub>	5.93	1.86	0.28	0.32	1.38	0.01	1.09	0.6	1.28
N <sub>2</sub> O	1.447	0.545	0.074	0.074	0.195	0.007	0.330	0.188	0.330

值得注意的是，表 4.1 中不同饲养模式下奶牛、肉牛、山羊、绵羊肠道发酵的 CH<sub>4</sub> 排放系数并不一致。考虑到各省在不同饲养模式下饲养的牛羊数量难以统计，因此本研究仅测算了规模化养殖、农户饲养的养殖方式下畜牧业 CH<sub>4</sub> 排



放的影响，未考虑自由放牧饲养的情况。同时，考虑到省级奶牛、肉牛和水牛数量难以区分，本研究采用表 4.1 中规模化养殖饲养方式下奶牛、肉牛和水牛肠道发酵甲烷排放因子的平均值（剔除遗漏条目）作为牛肠道发酵  $CH_4$  排放因子，并采用奶牛粪便管理  $CH_4$  排放因子的平均值。以表 4.2 中放牧饲养模式下的肉牛和水牛为牛粪管理的  $CH_4$  排放因子（剔除缺失项），以奶牛、肉牛和水牛粪管理的  $N_2O$  排放因子（剔除缺失项）的平均值为牛粪管理的  $N_2O$  排放因子（剔除缺失项）。

### 4.2.3 碳排放量的测算与比较

根据 IPCC 第二次评估报告（SAR）的全球变暖潜能值， $CH_4$  的全球变暖潜能值是  $CO_2$  的 21 倍，而  $N_2O$  是二氧化碳的 310 倍。为了规范整体温室效应的计量， $CO_2$  当量被指定为比较不同温室气体排放量的计量单位，温室气体排放量一般称为碳排放量。畜禽  $CH_4$  排放主要来自畜禽肠道发酵和畜禽粪便管理，而畜禽  $N_2O$  排放主要来自畜禽粪便管理。因此，

$$M = M_{CH_4} + M_{N_2O} \quad (2)$$

$$M_{CH_4} = \sum_{i=1}^n (u_i + v_i) \cdot Q_i \quad (3)$$

$$M_{N_2O} = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot Q_i) \quad (4)$$

其中， $M_{CH_4}$  和  $M_{N_2O}$  分别为牲畜产生的  $CH_4$  和  $N_2O$  排放量， $u_i$  为第  $i$  类畜禽肠道发酵  $CH_4$  排放系数， $v_i$  和  $w_i$  分别为第  $i$  类畜禽粪便管理  $CH_4$  和  $N_2O$  排放系数， $Q_i$  为第  $i$  类畜禽的平均饲养量。

进一步，根据 IPCC 第二次评估报告(SAR)的全球变暖潜能值， $CH_4$  的全球变暖潜能值是二氧化碳的 21 倍，而  $N_2O$  是二氧化碳的 310 倍。将两者排放量转化为畜牧业碳排放量，计算公式为：

$$C = 21 \cdot M_{CH_4} + 310 \cdot M_{N_2O} \quad (5)$$

由此得到 2000 年到 2020 年西北五省区的畜牧业碳排放量，见表 4.3。

表 4.3 2000-2020 年西北五省（区）畜牧业碳排放量

单位：万吨

年份	陕西	甘肃	宁夏	青海	新疆
2000	787.15	1175.79	245.79	1309.72	1800.83
2001	788.05	1193.36	244.99	1340.78	1818.8
2002	836.50	1233.00	265.79	1375.71	1915.07
2003	905.24	1268.05	285.62	1369.15	2050.60
2004	957.35	1318.65	324.42	1365.45	2152.73
2005	973.71	1421.15	356.55	1371.12	2225.67
2006	628.07	1475.33	323.86	1423.14	2126.80
2007	571.12	1418.54	324.2	1430.49	1786.02
2008	575.78	1488.74	332.55	1446.61	1739.62
2009	578.97	1566.40	331.53	1465.36	1722.80
2010	562.2	1622.38	328.12	1502.08	1689.04
2011	526.34	1656.02	330.50	1501.30	1646.29
2012	520.03	1642.84	341.72	1466.10	1710.95
2013	510.37	1670.78	357.47	1565.48	1792.21
2014	542.19	1762.55	383.51	1590.59	1880.76
2015	532.90	1506.77	388.64	1617.01	1947.57
2016	553.09	1475.10	389.85	1716.12	1968.24
2017	574.00	1470.50	399.05	1619.78	1998.27
2018	570.71	1518.74	419.81	1532.14	2025.61
2019	558.76	1579.05	464.78	1481.88	2103.25
2020	572.61	1678.90	560.00	1862.39	2221.61

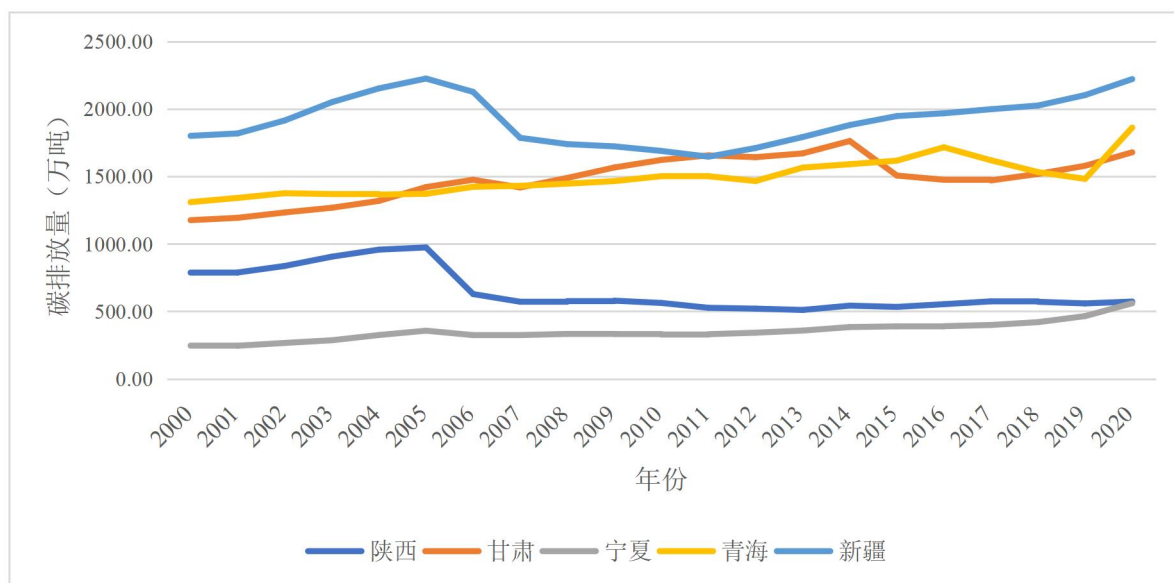


图 4.1 2000-2020 年西北五省（区）畜牧业碳排放量趋势图

由表中数据观测发现，碳排放量最小的是宁夏，最大的是新疆。辽阔的地域、广袤的草原和绿洲为新疆畜牧业的发展提供了物质基础，也由此产生了巨大的碳排放量，宁夏区域面积在五省市中，因此其畜牧业碳排放的测算受疆域的影响。分时间段来看，第一次农业普查时间段（2000—2005 年）内，五省区畜牧业碳排放呈现持续走高的趋势。第二次农业普查时间段（2006—2015 年）内，2006 年受禽流感、口蹄疫、猪链球菌病以及不断曝光的还原奶、注水肉、瘦肉精等畜产品质量卫生事件的影响，畜产品消费快速减少，畜产品价格大幅下滑，畜禽存栏量急剧降低，兽药饲料业陷于困境，畜牧业进入发展的低谷期。上述卫生质量问题导致了养殖结构发生了变化，牛、羊等反刍动物数量显著降低，造成了肠道发酵过程中  $\text{CH}_4$  排放量的降低，最终导致 2006—2007 年的畜牧业碳排放量于 2005 年后呈现出“断崖式”的下降，并在后面几年疫病缓解的同时也未大幅度的增加。所以在 2005 年出现一个拐点，新疆、陕西、宁夏在 2006 年同比呈现下降趋势。新疆继续下降至 2011 年达到最小值后逐年上升；甘肃逐年递增至 2014 年达到最大值后下降；青海畜牧业碳排放量逐年递增；陕西畜牧业碳排放比较稳定，在 510—570 万吨之间小幅波动；宁夏畜牧业碳排放则是小幅上升。第三次农业普查时间段（2016—2020 年）内，除青海畜牧业碳排放先下降后上升，其余四个省份都是上升阶段。

### 4.3 碳排放强度的测算与比较

碳排放总量受疆域大小、牧草质量等外在因素影响，而碳排放强度表示每单位国民生产总值的增加所带来的碳排放量，可用于表征低碳发展状况，相比之下碳排放强度更具有说服力，见下表 4.4。

表 4.4 2000-2020 年西北五省（区）畜牧业碳排放强度

年份	吨/万元				
	陕西	甘肃	宁夏	青海	新疆
2000	7.40	17.09	9.55	42.95	15.73
2001	6.91	15.72	8.09	41.29	13.57
2002	6.69	15.27	8.30	40.29	12.94
2003	6.22	14.83	7.86	33.64	12.66
2004	5.34	12.47	7.87	29.37	11.48
2005	4.89	12.43	7.75	26.52	12.13
2006	2.93	12.47	7.71	26.31	11.25
2007	2.08	10.81	6.02	21.35	7.64
2008	1.49	12.22	4.45	16.23	5.36
2009	1.47	12.59	4.54	16.26	5.25
2010	1.26	11.46	3.83	14.81	4.32
2011	0.93	10.10	3.21	12.58	3.78
2012	0.84	9.11	3.03	10.70	3.32
2013	0.76	8.47	2.76	9.91	2.77
2014	0.80	8.44	2.78	9.40	2.67
2015	0.76	6.93	2.87	10.21	2.74
2016	0.75	5.16	2.66	10.36	2.73
2017	0.83	4.76	2.56	8.85	2.67
2018	0.84	4.76	2.38	7.09	2.54
2019	0.74	3.99	2.35	5.91	2.30
2020	0.64	3.39	2.27	6.31	2.14

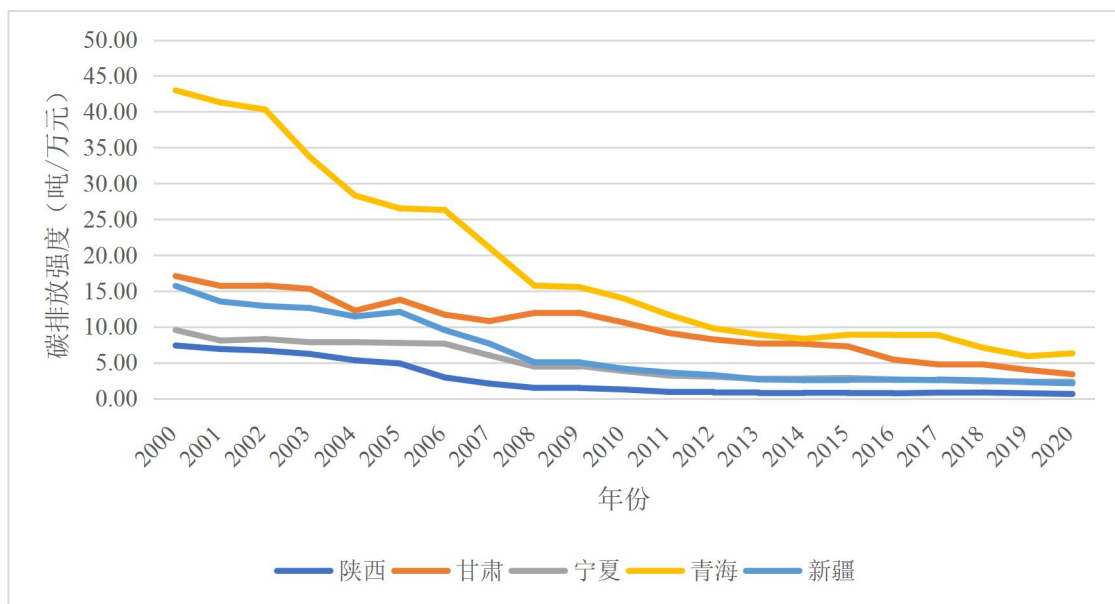


图 4.2 2000-2020 年西北五省（区）畜牧业碳排放强度趋势图

整体来看，陕西的畜牧业碳排放强度是最小的，与 2000 年相比，2020 年底碳强度下降了 91.35%，青海的畜牧业碳排放强度是最高的，与 2000 年相比，2020 年碳强度下降了 85.31%。五个省份的碳排放强度都是呈现逐年递减的趋势，且最终维持在一个稳定的区间内。

#### 4.4 本章小结

本章先对数据来源和处理进行了说明，其次介绍了计算碳排放所依据的公式和相关政策，接着根据 IPCC 的相关系数法对西北五省（区）的畜牧业碳排放进行了测算并作了对比，碳排放量最小的是宁夏，最大的是新疆，省域面积的大小很大程度上影响碳排放总量。为了更能很好的衡量生态保护和经济发展之间的协调程度，选取碳排放强度作为考察对象，计算结果表明，陕西的畜牧业碳排放强度最小，青海的畜牧业碳排放强度最高，五个省份的碳排放强度都是呈现逐年递减的趋势，且最终维持在一个稳定的区间内。对比来看，碳排放总量在逐年上升，碳排放强度是逐年下降的，即单位 GDP 的碳排放是下降的，总体是改善的。

## 5 畜牧业碳排放影响因素分解

上一章节得到了西北五个省（区）的历年畜牧业碳排放值和碳排放强度值，本章将在上一章的基础上利用 LMDI 模型分解影响碳排放变化的因素。

### 5.1 LMDI 模型

LMDI 模型最初是由 Kaya 恒等式演变而来，在 1989 年于 IPCC 研讨会上由 Kaya 提出，因此得名，其基本公式如下式（6）所示：

$$CO_2 = \frac{CO_2}{PE} \times \frac{PE}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP \quad (6)$$

Kaya 恒等式将碳排放的变化分解成了三者共同作用的结果：能源消耗、经济发展和人口增长，在研究环境问题领域得到国内外学者的一致赞同。扩展后的 Kaya 恒等式如式（7）所示：

$$C = \frac{C}{A_g} \times \frac{A_g}{A_n} \times \frac{A_n}{P_g} \times \frac{P_g}{P_n} \times P_n \quad (7)$$

式中：C 为畜牧业碳排放总量； $A_g$  为牧业生产总产值； $A_n$  为农林牧渔业总产值； $P_g$  为乡村人口数； $P_n$  为总人口数。

LMDI 分解方法的目的是得到各个因素对碳排放增长的贡献值，首先将碳排放的计算公式表示为相关因素相乘的形式，然后分解对数平均权重，因此，可以写成：

$$C = ES \times EI \times IS \times ED \times PS \quad (8)$$

式中， $ES = \frac{C}{A_g}$  为畜牧业排放量与畜牧业生产总产值之比，表示效率因素；

$EI = \frac{A_g}{A_n}$  为畜牧业生产总产值与农林牧渔业生产总产值之比，表示产业结构因素；

$IS = \frac{A_n}{P_g}$  为农林牧渔生产总产值与乡村人口数之比，表示经济因素； $ED = \frac{P_g}{P_n}$  为乡

村人口数与年末常住人口数之比，表示人口结构； $PS$  为年末常住人口数量，表

示人口规模。

本文将影响西北五省畜牧业碳排放的效应分解为：效率效应、结构效应、经济效应、劳动力效应和人口规模效应，构建如式（9）所示的碳排放影响因素分解公式。而畜禽的碳排放系数不随时间变化，即可以忽略不计碳排放系数效应。

由于 LMDI 模型的“加和分解”比“乘积分解”更容易操作，两者的结果是一致的，故本文采用前者模式，将差分分解为

$$\Delta C = C_T - C_0 = \Delta C_{ES} + \Delta C_{EI} + \Delta C_{IS} + \Delta C_{ED} + \Delta C_{PS} \quad (9)$$

式中： $\Delta C$  为第 0 年至第 T 年畜牧业碳排放的变化量； $C_T$  为末期第 T 年的碳排放量； $C_0$  为基期畜牧业碳排放量； $\Delta C_{ES}$  为畜牧业生产效率变化引起的各省份碳排放变化量； $\Delta C_{EI}$  为畜牧业结构变化引起的各省份碳排放变化量； $\Delta C_{IS}$  为经济发展变化引起的各省份碳排放变化量； $\Delta C_{ED}$  为农村人口变化引起的各省份碳排放变化量； $\Delta C_{PS}$  为人口规模变化引起的各省份碳排放变化量。不同影响因素贡献值的公式分别如式（10）～式（14）所示：

$$\Delta C_{ES} = \sum \frac{C^T - C^0}{(\ln C^T - \ln C^0)} \ln \frac{ES^T}{ES^0} \quad (10)$$

$$\Delta C_{EI} = \sum \frac{C^T - C^0}{(\ln C^T - \ln C^0)} \ln \frac{EI^T}{EI^0} \quad (11)$$

$$\Delta C_{IS} = \sum \frac{C^T - C^0}{(\ln C^T - \ln C^0)} \ln \frac{IS^T}{IS^0} \quad (12)$$

$$\Delta C_{ED} = \sum \frac{C^T - C^0}{(\ln C^T - \ln C^0)} \ln \frac{ED^T}{ED^0} \quad (13)$$

$$\Delta C_{PS} = \sum \frac{C^T - C^0}{(\ln C^T - \ln C^0)} \ln \frac{PS^T}{PS^0} \quad (14)$$

## 5.2 LMDI 分解结果

根据以上公式，得到五个省（区）的畜牧业碳排放驱动因素分解结果，如下表 5.1 至表 5.5。

表 5.1 新疆 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果

单位：万吨

时间	效率 因素	结构 因素	经济 因素	劳动力 因素	人口规模 因素	总效应
2000-2001	-268.31	248.85	9.31	0.01	25.97	15.83
2001-2002	-89.25	82.25	76.88	-2.54	28.55	95.89
2002-2003	-43.17	-357.27	522.12	-16.53	29.61	134.75
2003-2004	-204.57	124.42	174.84	-24.50	31.35	101.55
2004-2005	118.07	-268.37	238.30	-68.23	51.88	71.66
2005-2006	-473.31	-63.01	108.92	-25.34	39.14	-413.61
2006-2007	-396.03	37.51	340.30	-35.39	39.19	-14.42
2007-2008	-710.73	376.60	170.73	-13.86	28.91	-148.34
2008-2009	-5.19	-152.52	153.87	-5.74	21.37	11.79
2009-2010	-317.77	-295.58	654.45	-90.99	19.89	-29.99
2010-2011	-218.97	72.01	91.45	-6.29	17.49	-44.31
2011-2012	-163.91	14.47	251.17	-11.35	17.48	107.86
2012-2013	-344.99	191.03	198.36	-22.07	23.97	46.31
2013-2014	-71.88	0.45	179.55	-56.36	26.54	78.31
2014-2015	42.24	-41.33	77.89	-71.61	48.38	55.56
2015-2016	-20.18	-91.69	148.04	-57.64	30.17	8.70
2016-2017	40.30	-22.48	113.25	-55.04	37.44	113.46
2017-2018	-96.30	-54.89	236.95	-91.73	33.93	27.95
2018-2019	-210.17	168.96	153.43	-66.49	29.91	75.64
2019-2020	-155.31	25.60	269.08	-76.18	52.20	115.38

效率因素是新疆畜牧业减排减碳的主要因素，其在绝大多数年份都表现出了减排效应。相比基期 2000 年（1798.26 万吨），2000—2020 年其累计实现了 3589.42 万吨的碳减排量，表明生产效率的提高促使新疆畜牧业碳排放量年均递减 179.47 万吨。劳动力因素是新疆畜牧业减排减碳的次要因素，与基期相比，其累



计实现了 797.85 万吨的碳减排，表明乡村劳动人口的减少能让新疆畜牧业碳排放量年均递减 39.89 万吨。促使新疆畜牧业碳排放量增加的关键动因则是经济因素和人口规模因素，两种效应其在所有年份均表现出了增碳效应。测算结果表明，与基期相比，整个研究期间经济效应累计增加了 4168.87 万吨的碳，人口规模效应累计增加了 633.36 万吨的碳，表明若其他因素维持不变，新疆畜牧业经济发展水平的不断提升促使畜牧业碳排放量年均递增 208.44 万吨，人口量的逐年递增促使畜牧业碳排放量逐年递增 31.67 万吨。

表 5.2 甘肃 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果

单位：万吨

时间	效率 因素	结构 因素	经济 因素	劳动力 因素	人口规模 因素	总效应
2000-2001	-98.11	46.39	74.19	-7.81	3.78	18.45
2001-2002	3.86	28.57	67.30	-23.91	3.61	79.43
2002-2003	-38.88	-174.66	270.32	-24.98	3.27	35.08
2003-2004	-287.96	65.14	232.14	-22.25	2.20	-10.74
2004-2005	166.59	-14.37	152.22	-28.56	2.04	277.92
2005-2006	-241.97	-63.29	135.50	-22.76	0.98	-191.54
2006-2007	-111.06	-57.87	211.97	-10.19	0.77	33.61
2007-2008	143.42	-239.12	142.90	-11.80	1.51	36.91
2008-2009	1.76	-76.36	116.33	-10.88	2.32	33.18
2009-2010	-180.55	25.84	242.47	-78.97	2.96	11.75
2010-2011	-222.16	71.63	180.28	-26.74	-4.84	-1.83
2011-2012	-153.36	-21.67	201.93	-36.82	-0.93	-10.85
2012-2013	-108.74	-16.37	200.76	-42.71	-7.67	25.27
2013-2014	-6.52	-0.39	140.76	-47.16	-3.71	82.98
2014-2015	-79.48	-29.28	152.70	-54.81	-4.95	-15.83
2015-2016	-452.91	365.28	117.24	-52.27	-1.92	-24.58
2016-2017	-200.88	-0.15	174.81	-58.59	1.18	-83.62

续表 5.2

时间	效率 因素	结构 因素	经济 因素	劳动力 因素	人口规模 因素	总效应
2017-2018	1.06	-45.45	142.69	-45.92	-4.15	48.23
2018-2019	-273.48	134.21	234.71	-31.41	-3.74	60.31
2019-2020	-266.24	189.63	232.31	-50.65	-5.20	99.85

甘肃畜牧业减排减碳的主要因素效率因素，其在绝大多数年份都表现为负值，表明整体上是抑制了碳排放的增加。相比基期 2000 年（1174.91 万吨），研究期间累计实现了 2405.60 万吨的碳减少量，表明在其他效应不变的情况下，甘肃畜牧业生产效率的提高碳排放量年均减少 120.28 万吨。畜牧业减排减碳的次要因素则是劳动力因素和人口规模因素，与基期相比，其累计分别实现了 689.22 万吨、12.46 万吨的碳减排，表明随着人口的往外迁移尤其是劳动力人口的流失抑制了碳增加，人口规模因素在前期明显表现出碳增效应，后期为减排效应，观察甘肃省的年末常住人口数据发现，在 2010 年达到峰值，2011 年后逐年减少，这也解释了 2010 年后人口规模因素抑制碳增加的表现。甘肃省畜牧业碳排放量增加的关键动因是经济效应，与基期相比，研究期间经济效应累计增加了 3423.55 万吨的碳，结构效应累计增加了 187.72 万吨的碳，说明在其他效应维持不变的情况下，提高畜牧业经济发展水平会使得畜牧业碳排放量年均增加 171.18 万吨，农业内部生产结构的调整则导致了甘肃畜牧业碳排放量逐年增加 9.39 万吨。表明甘肃省畜牧业占比逐渐上升。

表 5.3 青海 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果

单位：万吨

时间	效率 因素	结构 因素	经济 因素	劳动力 因素	人口规模 因素	总效应
2000-2001	-52.89	-56.23	154.70	-32.10	16.83	30.31
2001-2002	-33.46	19.92	63.48	-29.21	14.21	34.93
2002-2003	-247.73	22.16	216.68	-11.10	13.44	-6.55
2003-2004	-230.82	19.26	154.97	-7.59	12.02	-52.16

续表 5.3

时间	效率 因素	结构 因素	经济 因素	劳动力 因素	人口规模 因素	总效应
2004-2005	-88.34	32.42	114.52	-15.90	11.43	54.13
2005-2006	-11.99	10.58	41.06	-0.18	11.52	50.98
2006-2007	-316.12	-3.21	315.64	-19.01	10.05	-12.65
2007-2008	-406.89	70.74	342.69	-18.71	6.87	-5.30
2008-2009	-17.65	-20.46	52.51	-24.88	7.57	-2.92
2009-2010	-153.73	-180.19	401.92	-70.03	15.50	13.47
2010-2011	-249.54	35.96	227.12	-46.75	11.61	-21.60
2011-2012	-242.27	6.53	194.29	-23.49	12.02	-52.92
2012-2013	-126.76	-28.39	239.91	-28.23	11.03	67.55
2013-2014	-96.19	20.85	97.42	-35.16	13.65	0.57
2014-2015	93.18	-56.77	-33.19	-14.69	12.04	0.57
2015-2016	-6.36	-20.23	113.25	-40.10	12.24	58.80
2016-2017	-0.76	41.79	144.74	-46.39	12.73	152.11
2017-2018	-348.89	89.88	206.00	-47.34	12.72	-87.64
2018-2019	-275.51	55.45	193.02	-34.65	11.42	-50.26
2019-2020	109.63	88.00	404.54	-178.85	-42.81	380.51

畜牧业减排减碳的主要效应是效率因素，其在绝大多数年份都为负值，整体上是抑制作用。相比基期 2000 年（1310.46 万吨），研究期间累计减少了 2703.10 万吨的碳，表明在其他效应不变的情况下，提高生产效率会让青海畜牧业碳排放量每年平均减少 135.16 万吨。此外，劳动力效应在所有年份呈现为负值，相比青海每年常住人口的增加，乡村人口数却是逐年减少的，意味着城镇化的提高明显呈现出碳减排效应。畜牧业增排增碳的主要因素则是经济因素和人口规模因素，其在所有年份均为正值，说明两者均表现出了增碳效应，与基期相比，研究期间累计分别导致了 3645.26 万吨、186.1 万吨的碳增量，根据数据不难发现，青海省的畜牧业产值和农林牧渔业总产值增长迅速，养殖规模扩大带来碳排放的大量增加。结构因素在不同年份表现值有正有负，最终表现为碳增效应，其累计导致

了 148.06 万吨的碳增量，农林牧渔业中畜牧业占比逐年缓慢上升，因此内部结构的调整带来部分碳排放量的增加。

表 5.4 陕西 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果

单位：万吨

时间	效率因素	结构因素	经济因素	劳动力因素	人口规模因素	总效应
2000-2001	-54.00	31.63	37.13	-15.79	1.94	0.91
2001-2002	-26.60	25.32	60.18	-12.45	2.00	48.45
2002-2003	-63.19	88.78	53.03	-12.25	2.37	68.74
2003-2004	-142.48	11.50	192.57	-11.77	2.28	52.10
2004-2005	-83.55	-11.32	122.42	-13.55	2.36	16.36
2005-2006	-400.88	-34.64	114.66	-24.06	1.92	-342.99
2006-2007	-207.56	28.40	133.24	-14.94	1.46	-59.41
2007-2008	-190.58	56.39	151.95	-14.46	1.55	4.85
2008-2009	-9.95	-14.04	40.14	-14.15	1.40	3.40
2009-2010	-85.09	-56.94	147.06	-22.78	1.22	-16.53
2010-2011	-169.85	18.46	128.20	-13.67	1.17	-35.69
2011-2012	-50.15	-14.86	80.03	-22.45	1.40	-6.04
2012-2013	-49.57	-14.95	72.26	-18.61	1.51	-9.36
2013-2014	25.55	-28.89	48.27	-14.32	1.56	32.18
2014-2015	-26.22	2.94	31.52	-19.93	2.55	-9.14
2015-2016	-30.01	-5.04	47.96	-18.92	2.75	-3.27
2016-2017	72.84	-45.63	32.35	-20.51	3.23	42.29
2017-2018	7.01	-39.72	47.54	-22.49	4.37	-3.29
2018-2019	-70.36	8.91	70.91	-23.13	1.72	-11.95
2019-2020	-79.65	15.94	96.40	-29.91	11.08	13.85

畜牧业减排减碳的主要因素同样是效率因素，其在绝大多数年份是负值，表现出了抑制碳增加的效应。相比基期 2000 年（1175.92 万吨），研究期间其累计

减少了 1634.29 万吨的碳量，表明在其他效应不变的情况下，提高生产效率会促使陕西畜牧业碳排放量每年平均减少 81.71 万吨。畜牧业减排减碳的次要因素则是劳动力因素，在所有年份均为负值，虽然减排效应要小于效率因素，但在一定程度上对畜牧业碳排放量的增加起了抑制作用，与基期相比，其累计分别实现了 360.14 万吨的碳减排，表明在其他因素不变的情形下，乡村人口的占比逐年下降让陕西畜牧业碳排放量年均递减 18 万吨。导致陕西畜牧业碳排放量增加的关键动因是经济效应，其在所有年份均为正值，表现出了显著的增碳效应。与基期相比，研究期间经济因素其累计增加了 1707.81 万吨的碳，导致陕西畜牧业碳排放量增加的次要动因是人口规模因素和结构因素，分别累计增加了 49.85 万吨、22.24 万吨的碳，表明在其他效应保持不变的情况下，提升畜牧业经济发展水平会促使新疆畜牧业碳排放量每年增加 85.39 吨。

表 5.5 宁夏 2000-2020 年畜牧业碳排放影响因素分解结果

单位：万吨

时间	效率 因素	结构 因素	经济 因素	劳动力 因素	人口规模 因素	总效应
2000-2001	-40.66	17.12	21.67	-2.85	3.91	-0.80
2001-2002	6.48	-6.35	20.31	-3.39	3.74	20.80
2002-2003	-14.98	11.86	30.47	-11.65	4.14	19.83
2003-2004	0.37	-29.21	82.00	-18.29	3.92	38.80
2004-2005	-5.02	4.91	37.13	-9.76	4.88	32.13
2005-2006	-4.63	-55.00	23.85	-4.01	4.25	-35.54
2006-2007	-77.13	12.08	70.84	-6.07	3.47	3.19
2007-2008	-98.87	35.55	73.34	-5.64	3.98	8.35
2008-2009	6.52	-30.51	25.81	-6.84	4.01	-1.01
2009-2010	-56.49	-21.98	82.60	-11.59	4.06	-3.40
2010-2011	-57.95	11.30	55.80	-14.49	7.71	2.37
2011-2012	-19.08	2.51	28.68	-0.33	-0.39	11.39
2012-2013	-32.18	9.00	47.56	-12.25	3.76	15.90

续表 5.5

时间	效率 因素	结构 因素	经济 因素	劳动力 因素	人口规模 因素	总效应
2013-2014	1.93	10.79	22.94	-13.57	4.14	26.24
2014-2015	13.16	-38.01	45.95	-19.54	3.69	5.25
2015-2016	-29.77	21.80	19.43	-14.11	4.08	1.42
2016-2017	-15.53	7.40	32.31	-19.84	4.01	8.35
2017-2018	-29.72	6.74	53.94	-13.97	3.78	20.76
2018-2019	-6.39	44.45	19.95	-17.23	4.19	44.97
2019-2020	-17.39	18.54	110.22	-35.13	18.97	95.22

畜牧业减排减碳的主要动因是效率因素，其在绝大多数年份为正值，表现出了明显的减排效应。相比基期 2000 年（245.80 万吨），研究期间其累计减少了 477.31 万吨的碳，表明在其他效应保持不变的情况下，提高生产效率会促使宁夏畜牧业碳排放量平均每年减少 23.86 万吨。畜牧业减排减碳的次要动因是劳动力因素，在一定程度对畜牧业碳排放量的增加起了抑制作用，与基期相比，其累计减少了 240.56 万吨的碳，表明在其他效应保持不变的情况下，乡村人口占比的减少带来宁夏畜牧业碳排放量年均递减 12.03 万吨。畜牧业增排增碳的主要动因则是经济因素，其在所有年份为正值，表现出了显著的增碳效应，与基期相比，研究期间经济因素其累计增加了 240.56 万吨的碳。畜牧业增排增碳的次要动因是人口规模因素和结构因素，分别导致了 94.29 万吨、32.98 万吨的碳增量，表明在其他效应保持不变的情况下，提升畜牧业经济发展水平会促使宁夏畜牧业碳排放量每年增加 4.71 万吨，人口量的逐年递增促使宁夏畜牧业碳排放量逐年递增 1.65 万吨，畜牧业在农林牧渔业所占比重的增加同样促使宁夏畜牧业碳排放量逐年递增。

### 5.3 本章小结

本章先具体介绍了 LMDI 分解法的公式演变，然后根据公式将畜牧业碳排放分成了五个影响因素，其中效率因素对五个省份的畜牧业碳排放均起到抑制作用，

且抑制作用最大，其次起抑制作用的是劳动力因素，生产效率的提高和乡村劳动力人口的减少均对西北五省畜牧业碳排放起负向抑制作用。经济因素对五个省份的畜牧业碳排放均起到促进作用，表明经济发展水平的提高会提高畜牧业碳排放；人口规模因素对宁夏、陕西、青海、新疆表现为正向促进，对甘肃表现为负向抑制作用；结构因素对宁夏、陕西、甘肃、新疆起正向促进作用，对青海既有正向促进又有负向抑制，在不同年份表现不同。并依次对五个省域的畜牧业碳排放影响因素数值化，以便更加直观分析各个省份的结构。

## 6 畜牧业碳排放空间变化

本章在上一章的基础上，对影响西北五省（区）畜牧业碳排放的五个影响因素中，进行了多重共线性分析，排除掉具有多重共线性的效率因素和人口规模因素，选取剩余的三个解释变量产业结构、经济水平和劳动力因素进行空间分析，为了更能体现出人口流动对畜牧业碳排放的影响，劳动力因素用城镇化水平指标代替。之后，对这三个指标进行了多重共线性检验和空间自相关检验，检验通过后对三个影响因素利用 GTWR 模型分别得出回归系数，并选取了其中的三个年份进行了可视化分析。

### 6.1 模型检验

#### 6.1.1 多重共线性

多重共线性意味着几个特定的解释变量彼此之间有很强的线性相关性，在解释其他解释变量的意义和影响时会产生偏差。为了消除这种现象，采用可以衡量多重共线性严重程度的指标——方差膨胀因子（VIF）。

#### 6.1.2 空间自相关

最常用的空间异质性检验是莫兰检验，它显示了每个解释变量的空间相关性。

Moran's  $I$  指数的结果范围在 $[-1,1]$ 之间，较高的正值意味着近距离观察往往具有相似的属性值，而远处的观测值具有不同的属性值，这表示空间集聚。负值表示空间分散，零值表示空间随机分布，Moran's  $I$  指数的零假设检验是解释变量在空间上市独立的，这意味着莫兰指数值的统计量接近于零。

Z 分数通常用作 Moran's  $I$  指数统计的显著性指标，以验证零假设，其公式如下：

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}}$$

其中， $E(I)$  和  $\text{Var}(I)$  分别是 Moran's  $I$  统计量的期望值和标准差。其中的显



著性水平本文设为  $P < 0.05$ 。

### 6.1.3 变量选择

#### （1）被解释变量的选择

对于被解释变量的选择，本文主要探索畜牧业碳强度影响因素分析，因此本文选取畜牧业碳强度作为被解释变量，即利用每年西北五省畜牧业碳排放总量与畜牧业生产总值的比值来表征。

#### （2）解释变量的选择

针对畜牧业碳强度影响因素，本文基于西北地区的实际情况，参考国内外学者关于碳强度的研究成果，考虑数据的可得性和完整性，主要三个方面进行分析。

①畜牧业经济发展水平（ $X_1$ ）。畜牧业经济发展水平体现在农业生产和社会发展的方方面面，可以从侧面反映牧民的生活水平。一般而言，经济发展水平与其城镇化水平和工业化程度表现一致，这会促进畜牧业的现代化发展。与此同时，科技的进步则会使得农业机械投入比重上升，这在单位时间内增加了  $CO_2$  等温室气体的排放。此处以人均畜牧业产值作为畜牧业经济发展水平的替代指标。畜牧业产值均以 2008 年为基期进行了价格折算。

②农业产业结构（ $X_2$ ）。该指标可以从数量层面上表征地区农业产业的具体布局情况。农业由种植业、畜牧业、渔业和林业四大类组成，由于不同产业部门生产效率有所区别，改变其在农业总体所占的比重必然会对碳强度水平产生影响。一个更加合理并与区域条件特征匹配的产业布局会给地区带来极大的内生发展动力，并且可以加速畜牧业生产方式向绿色高效方向转型升级，进一步提高资源配置效率。此处，选取畜牧业产值与农林牧渔业总产值的比值来衡量农业产业结构。

③城镇化水平（ $X_3$ ）。城镇化主要发生在农业人口向非农人口转入的过程中，城镇化水平则可以反映这一过程的阶段效果。更高的城镇化水平会为城镇带来大量的劳动力，进而推动城镇第二、三产业的发展，反过来溢出的技术和劳动力也会促进第一产业的整体发展，进而影响畜牧业碳排放水平。另一个角度来看，城镇化的稳步推进意味着更大的城镇规模，这在一定程度上会挤占部分草地，饲料的生产由此受到影响，客观上也会导致碳排放量的减少。在此以城镇人口与总人

口的比值作为衡量指标。各变量描述性统计表格如表 6.1 所示。

表 6.1 主要变量及描述性统计

类型	变量名称	符号	变量定义	均值	标准差
被解释变量	碳强度	Y	碳排放/生产总值	174.56	117.53
	畜牧业经济发展水平	X <sub>1</sub>	畜牧业产值/农业人口	1581.37	776.01
解释变量	农业产业结构	X <sub>2</sub>	畜牧业产值/农林牧渔总产值	31.8%	8.74
	城镇化水平	X <sub>3</sub>	城镇人口/总人口	51.3%	15.87

### 6.1.4 GTWR 模型

受当年政策和居民需求水平的影响，每年畜牧业的碳排放量是有明显区别的，因此，位置和时间都可以视为影响畜牧业碳排放的重要因素。将 GWR 模型中的二维空间坐标加入时间维度，改进成三维时空坐标得到 GTWR 模型，其数学表达式如下：

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(\mu_i, \nu_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中， $y_i$  为第  $i$  个位置的被解释变量； $\beta_0(\mu_i, \nu_i, t_i)$  是截距项， $x_{ik}$  为在第  $i$  个观测位置的第  $k$  个解释变量， $\mu_i, \nu_i, t_i$  分别表示经度、纬度和时间； $\beta_k(\mu_i, \nu_i)$  表示第  $k$  个解释变量在坐标位置  $(\mu_i, \nu_i)$  处对  $y_i$  的影响系数， $\varepsilon_i$  为独立随机误差项，满足正态分布，数学期望为 0，方差为  $\sigma^2$ ，即  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ 。不同样本点  $i$  和点  $j$  的随机误差相互独立，协方差为 0，即： $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 (i \neq j)$ 。

依据局部加权最小二乘法估计出 GTWR 回归系数，其估计值如下：

$$\hat{\beta}(\mu_i, \nu_i, t_i) = [X^T W(\mu_i, \nu_i, t_i) X]^{-1} X^T W(\mu_i, \nu_i, t_i) y$$

式中，时空权重矩阵  $W(\mu_i, \nu_i, t_i) = \text{diag}(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in})$  是一个  $n \times n$  矩阵，并且随着地理要素间的作用随着距离的增加而减少。表示如下：

$$\alpha_{ij} = \exp\left[-(d_{ij}^{ST})^2 / h^2\right]$$

式中， $d_{ij}^{ST}$  为两个样本点之间的时空距离，本文依据 Huang<sup>[1]</sup> 提出的公式，定义时间距离  $d_{ij}^T$  与空间距离  $d_{ij}^S$  的组合函数为样本  $i$  和  $j$  之间时空距离  $d_{ij}^{ST}$ ：

$$(d_{ij}^{ST})^2 = \lambda(d_{ij}^S)^2 + \mu(d_{ij}^T)^2 = \lambda[(\mu_i - \mu_j)^2 + (\nu_i - \nu_j)^2] + \mu(t_i - t_j)^2$$

式中  $\mu$  和  $\lambda$  是比例因子，用于平衡时间距离和空间距离； $(\mu_i, \nu_i)$  和  $(\mu_j, \nu_j)$  是不同样本点的空间位置坐标； $t_i$  和  $t_j$  为不同样本点的时间观测值。因此，利用高斯函数计算出的权重  $\alpha_{ij}$  为：

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= \exp\left\{-\left\langle \frac{\lambda[(\mu_i - \mu_j)^2 + (\nu_i - \nu_j)^2] + \mu(t_i - t_j)^2}{h_{ST}^2} \right\rangle\right\} \\ &= \exp\left\{-\left\langle \frac{(\mu_i - \mu_j)^2 + (\nu_i - \nu_j)^2}{h_S^2} + \frac{(t_i - t_j)^2}{h_T^2} \right\rangle\right\} \\ &= \exp\left\{-\left\langle \frac{(d_{ij}^S)^2}{h_S^2} + \frac{(d_{ij}^T)^2}{h_T^2} \right\rangle\right\} \\ &= \exp\left[-\frac{(d_{ij}^S)^2}{h_S^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(d_{ij}^T)^2}{h_T^2}\right] \\ &= \alpha_{ij}^S \times \alpha_{ij}^T \end{aligned}$$

式中， $h_{ST}$ 、 $h_S$ 、 $h_T$  分别表示时空带宽、空间带宽和时间带宽，通常选用交叉确认方法作为带宽的确定方法。

$$CV = \sum_i \left[ y_i - \hat{y}_i(h) \right]^2$$

式中， $y_i$  表示因变量  $y$  在第  $i$  个样本点处的观测值； $\hat{y}$  是拟合值。最优带宽为  $CV$  达到最小时所对应的  $b$  值。

## 6.2 结果分析

### 6.2.1 VIF 值

各解释变量 VIF 值均小于 10，因此不存在严重的多重共线性。

表 6.2 各解释变量的 VIF 值

变量	VIF 值
X <sub>1</sub>	4.732385
X <sub>2</sub>	3.350732
X <sub>3</sub>	1.825910

### 6.2.2 莫兰检验

研究期间畜牧业碳强度的 Moran's *I* 指数在 0.0545—0.2190 之间，均表现为正值，且大部分年份的 P 值均小于 0.01，在显著性水平 1% 下通过检验，表明五个省份之间呈现显著的空间正相关，存在空间集聚性。从内部变化来看，2000—2020 年，畜牧业碳排放强度的 Moran's *I* 指数在均值 0.1336 上下波动，期间 2010 年的值最高，之后开始波动式下降，在 2016 年到达最低点，随后出现小幅上升，说明在 2010—2016 年畜牧业碳强度的空间集聚性呈现先下降后增加的趋势。

### 6.2.3 GTWR 模型拟合结果分析

本文利用 *ArcGIS* 软件操作 GTWR 模型，被解释变量选取西北地区畜牧业碳排放强度，通过多元逐步回归，解释变量确定为畜牧业经济发展水平、农业产业结构和城镇化水平，并检验了相互之间的多重共线性，通过之后构建西北地区的 GTWR 模型。通过 GTWR 模型回归结果如表 6.3 所示：

表 6.3 GTWR 模型参数估计结果

名称	数值
$R^2$	0.9256
调整 $R^2$	0.9235
残差平方和	3.8433
$AIC_c$	-1421.44
带宽	5.9514

经济发展水平的提升表现出对畜牧业碳排放的正向促进，生活水平的提高使得人们增加了肉类尤其是反刍动物牛肉的消费及奶制品的需求，进而推动了畜牧业的发展。

农业产业结构对这种正向促进作用主要是因为牧业产业占比的提高，使得更容易通过集中化的种植业所占比例下降，而种植业在某种程度上具有碳汇的功能，牧业不具备碳汇功能，因此该因素会对碳排放产生正向影响。

城镇化水平的提高对畜牧业碳排放的减少主要表现在：（1）城镇化水平的提高，代表城镇人口的比例的增加，乡村人口比例的减少。在农村从事畜牧业养殖业人数的减少，使得畜牧业碳排放也相应地减少；（2）随着经济的发展，城镇的工资水平高于乡村，且城乡工资水平的差距也正不断扩大。根据国家统计局公布的最新数据，2021年农村居民人均可支配工资性收入为13726元，城镇居民人均可支配工资性收入为35946元，城镇的高工资水平，再加上低利润的传统畜牧业生产，使得农民更倾向于进城务工，农户小规模养殖业相应减少，也减少了农户养殖产生的碳排放；（3）城镇化水平的提高，有利于引进外来资金和技术，在帮助畜牧业集约化和规模化建设的同时，也有助于提高畜牧业的生产效率，降低碳排放强度，减少碳排放。

因此，本文将从不同时空位置深入分析各因素对西北地区畜牧业碳排放强度影响的异质性，如下图 6.1 至 6.3 所示。

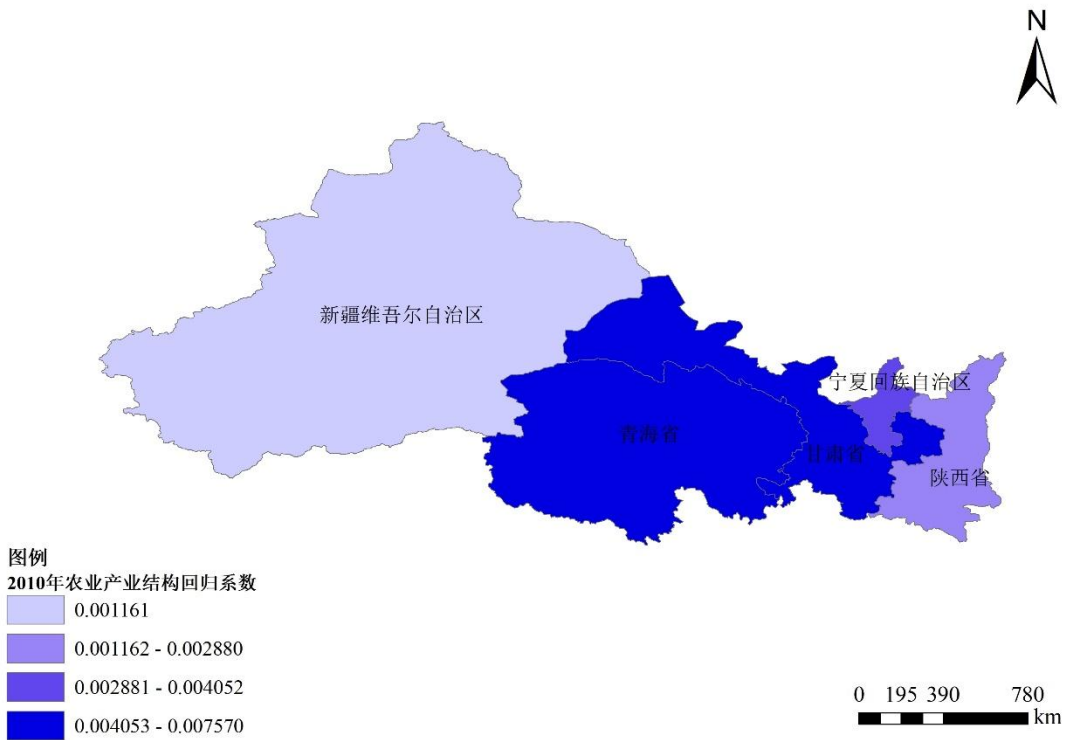
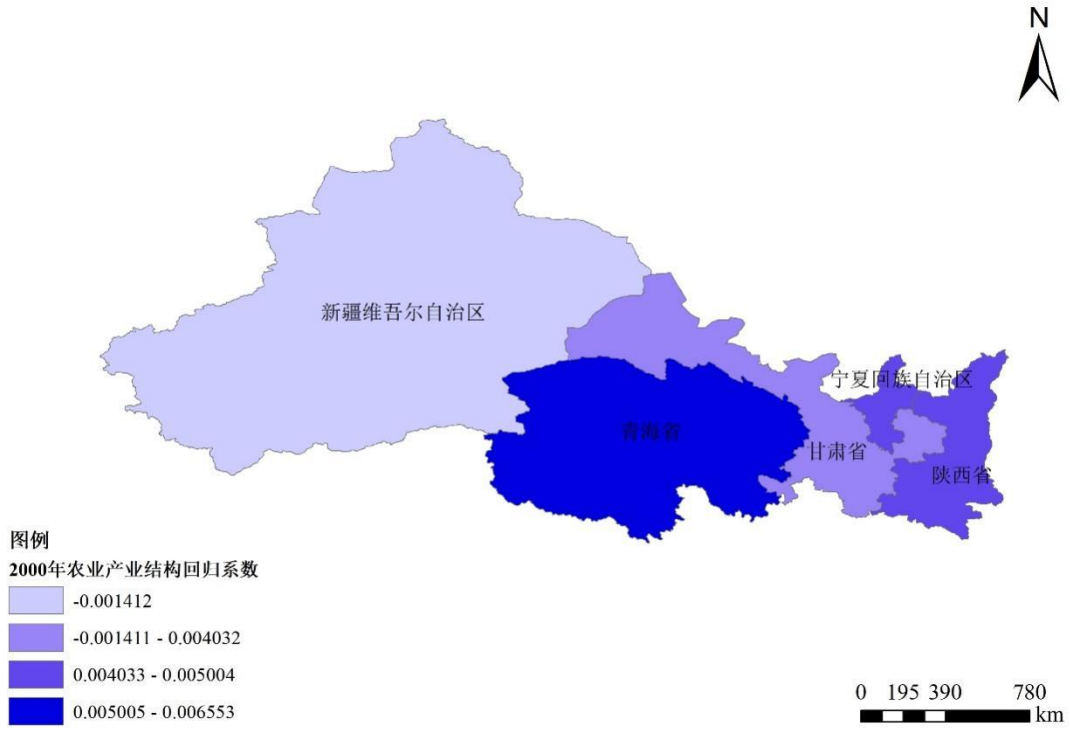




图 6.1 2000-2020 年经济发展水平回归系数

图 6.1 分别展示了 2000 年、2010 年、2020 年西北五省（区）经济发展水平因素回归系数，均表现为负值，说明西北五省（区）经济发展水平与碳排放强度均为负相关关系，即提高人均牧业产值抑制了畜牧业碳排放强度的增长。

研究期间，新疆的经济发展提升对畜牧业碳排放的抑制作用保持得比较稳定，在 2000 年、2010 年、2020 年表现为同一个颜色；青海在 2000 年和 2010 年保持比较稳定，但在 2020 年后经济的发展对畜牧业碳排放的抑制程度减弱，表明经济的提升未能跟上畜牧业扩张的程度；甘肃的经济发展提升对畜牧业碳排放的抑制作用逐年增强，人口尤其是农村人口的流失致使畜牧业规模缩减、禁止自由放牧并加强生态保护在一定程度上对畜牧业碳排放起到了很好的抑制作用；宁夏的经济发展提升对畜牧业碳排放的抑制作用也在逐年减弱，经济发展还有很大的提升空间；陕西的经济发展提升对畜牧业碳排放强度的抑制作用先下降后增强，表明后期陕西省逐渐加强了对畜牧产品碳排放的控制。





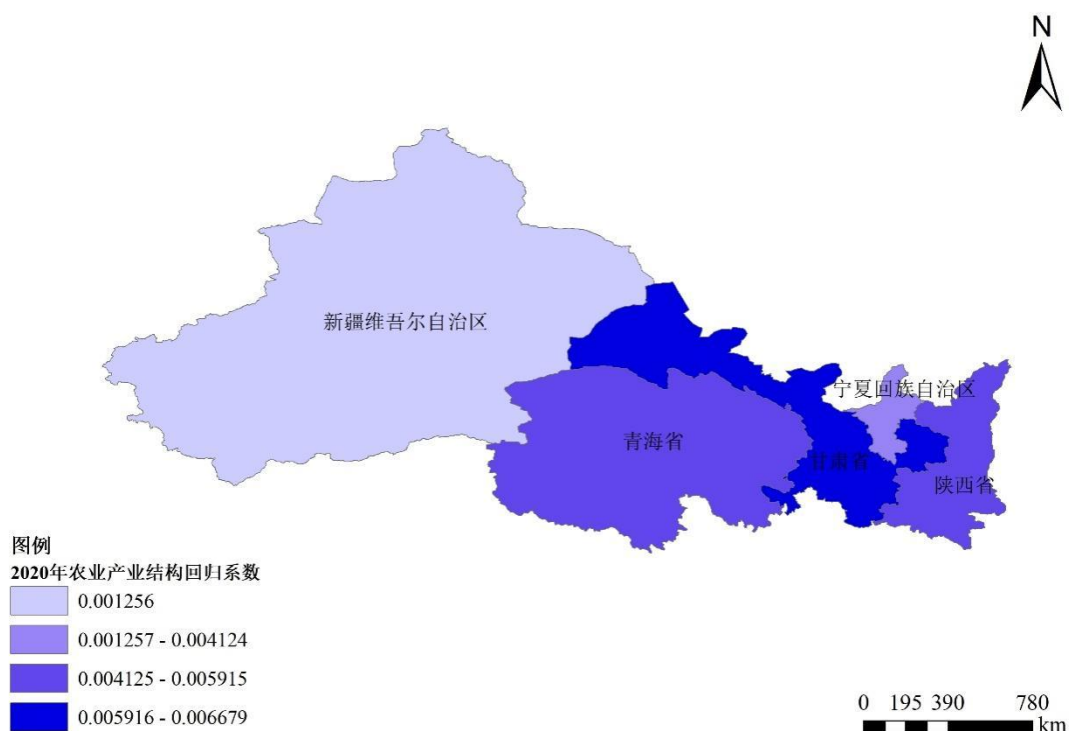
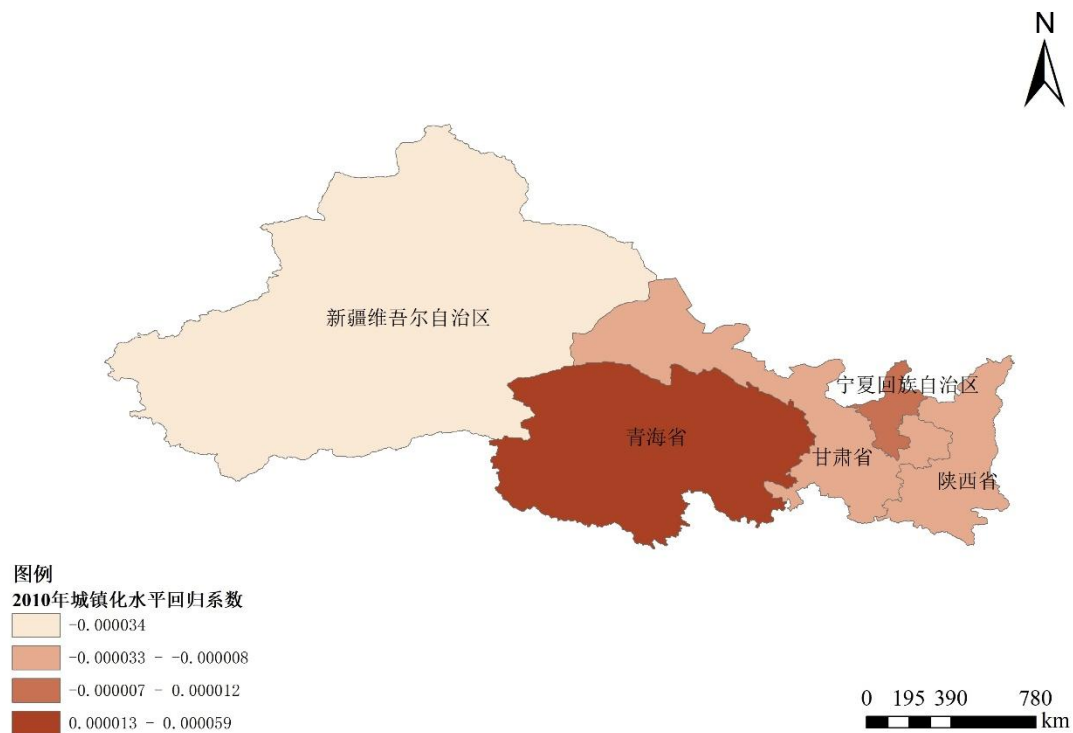
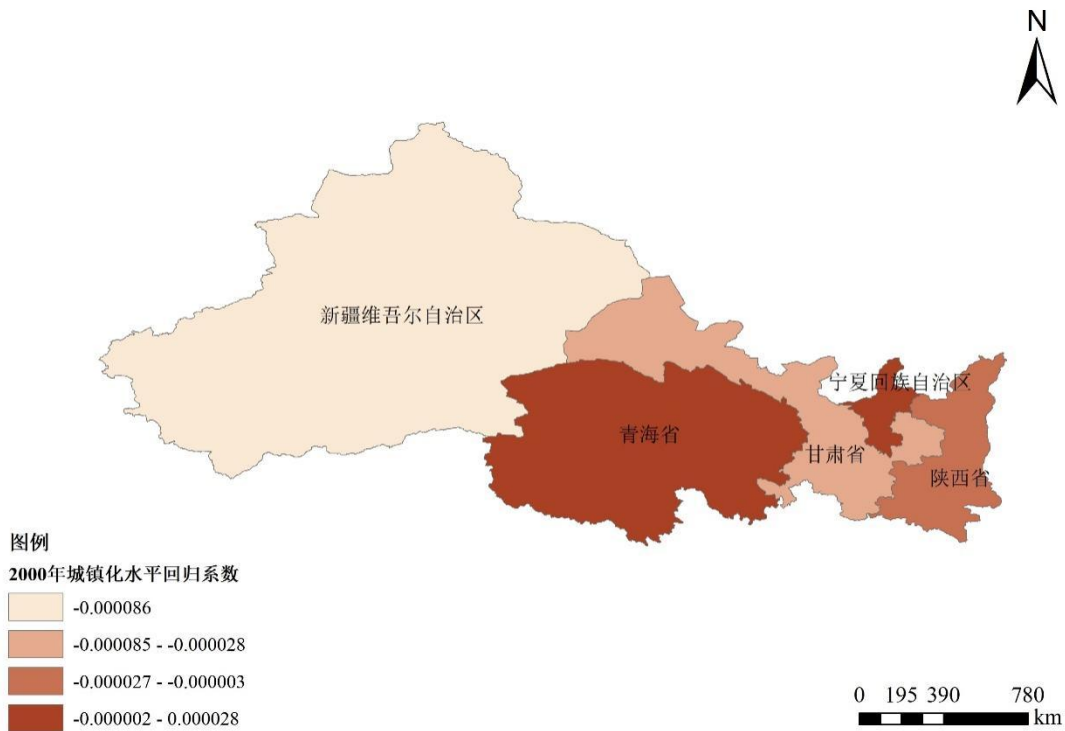


图 6.2 2000-2020 年农业产业结构回归系数

图 6.2 展示了 2000 年、2010 年、2020 年西北五省（区）畜牧业产业结构因素回归系数，在研究期间的绝大多数年份表现为正值，说明随着畜牧业产值在农林牧渔业产值的比重增加，对畜牧业碳排放强度是促进作用。分开来看，陕西、宁夏畜牧业产业结构对碳强度的作用是先下降后上升，甘肃、青海畜牧业产业结构对碳强度的作用是先上升后下降，新疆畜牧业产业结构对碳强度的作用则是逐年上升的。

新疆在 2000 年、2010 年、2020 年农业产业结构因素对畜牧业碳排放的促进作用较一致，表明畜牧业在农业中的占比保持比较稳定；青海在 2020 年相较于 2000 年和 2010 年，农业产业结构因素对畜牧业碳排放的促进作用减弱，也可以说是农业产业结构的优化抑制了一定碳排放；甘肃在 2000 年农业产业结构因素对畜牧业碳排放是负效应，后期随着畜牧业占比的扩大转变为正效应；宁夏在 2000 年和 2010 年农业产业结构因素对畜牧业碳排放的促进作用保持一致，在 2020 年促进作用减弱；陕西农业产业结构因素对碳强度的作用是先下降后上升，表明后期畜牧业所占农业比重逐渐提升。



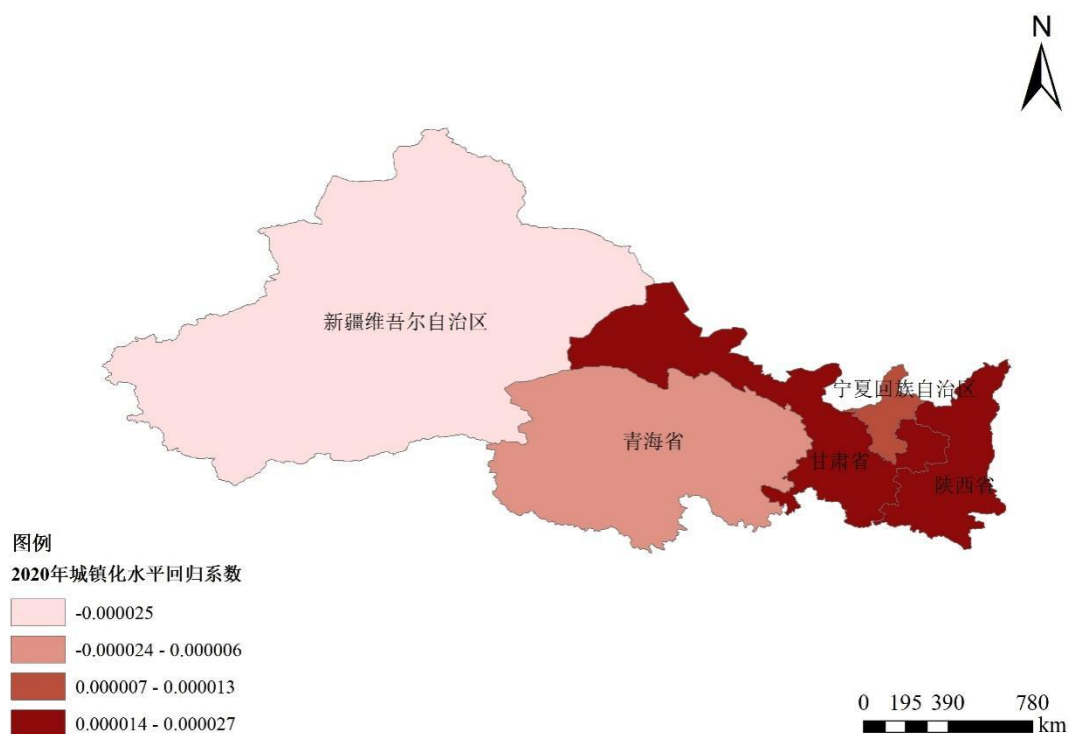


图 6.3 2000-2020 年城镇化水平回归系数

图 6.3 分别展示了 2000 年、2010 年、2020 年西北五省（区）城镇化水平因素回归系数。数值有正有负，说明城镇化水平与碳排放强度对不同地区呈现不同的相关关系。

观察发现，城镇化水平与畜牧业碳排放强度为正相关关系的是宁夏和青海，说明城镇化率的提高促进了这两个省份畜牧业的碳排放，不同的是，宁夏的促进作用先下降后上升，青海的促进作用是先上升后下降，表明前期宁夏的城镇化率提升快于畜牧业碳排放的增长，青海的城镇化率提升慢于畜牧业碳排放的增长，后期则表现相反。呈负相关关系的是新疆，说明城镇化率的提高对新疆畜牧业的碳排放是抑制作用，且抑制作用保持得比较稳定，表明新疆城镇化水平与畜牧业碳排放同比例上升。由负相关关系转为正相关关系的是陕西和甘肃。陕西在 2000—2010 年城镇化水平对碳强度的抑制作用是增强的，在 2010—2020 年呈现了加强的促进作用，甘肃城镇化水平对碳强度的抑制作用逐渐减弱后转变为促进作用。

### 6.3 本章小结

本章首先在使用 GTWR 模型前做了相关检验，包括多重共线性检验和空间相关性分析，符合条件后接着介绍了 GTWR 模型的相关原理，选取畜牧业碳排放强度作为被解释变量，经济发展水平、畜牧业产业结构和城镇化水平作为解释变量，最后截取 2000 年、2010 年和 2020 年三个年份，利用 ARCGIS 将解释变量的回归系数分别可视化，更加直观的表现出时空演变情况。其中，西北五省（区）经济发展水平与碳排放强度均为负相关关系；城镇化水平与畜牧业碳排放强度为正相关关系的是宁夏和青海，呈负相关关系的是新疆；陕西、宁夏畜牧业产业结构对碳强度的作用是先下降后上升，甘肃、青海畜牧业产业结构对碳强度的作用是先上升后下降，新疆畜牧业产业结构对碳强度的作用则是逐年上升的。

## 7 研究结论与政策建议

### 7.1 研究结论

本文在梳理相关文献的基础上，根据 IPCC 公布的碳排放因子系数测算出西北五个省（区）2000—2020 年畜牧业的碳排放值，碳源选取的是牲畜饲养过程中肠道发酵和粪便管理产生的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ，并进一步使用 LMDI 模型探究了影响畜牧业碳排放的因素，在此基础上，利用 GTWR 模型分析其时空动态变化。

研究结果表明：（1）西北地区畜牧业碳排放量呈逐年上升的趋势，其中新疆碳排放量最大，最大值为 2225.67 万吨，宁夏最小，最小值为 244.99 万吨。碳排放强度整体呈下降趋势，各省份间强度差距逐渐缩小。（2）生产效率因素对畜牧业碳强度均表现出负向抑制作用；人口规模因素对宁夏、陕西、青海、新疆表现出正向促进作用，对甘肃表现出负向抑制作用；结构因素对宁夏、陕西、甘肃、新疆起正向促进作用，对青海既有正向促进又有负向抑制，在不同年份表现不同。经济因素对各省畜牧业碳排放强度均具有正向促进作用。（3）经济发展水平的回归系数均为负值，表明经济水平的提升明显抑制了畜牧业碳排放的增加；畜牧业产业结构的回归系数在大多数年份表现为正值，表明牧业在农业中的比重增加会对畜牧业碳排放呈现促进作用；城镇化水平的回归系数在不同省份不同年份之间表现不同，宁夏和青海的城镇化水平与畜牧业碳排放强度呈正相关关系，新疆的城镇化水平与畜牧业碳排放强度呈负相关关系，陕西和甘肃的城镇化水平与畜牧业碳排放强度由负相关关系转为正相关关系。

### 7.2 政策建议

#### （1）提高规模化生产，减少自由放牧模式

畜牧业生产效率的提高对西北五省（区）碳排放都带来显著的抑制效应，因此提高畜牧业生产的规模化和集约化可以有效降低碳排放。不同饲养模式下大牲畜的肠道发酵所产生的  $\text{CH}_4$  系数不同，规模化模式小于佃户模式小于放牧模式，选择规模化饲养比放牧产生的  $\text{CO}_2$  排放少。鉴于此，政府部门应制定相应的标准化、规模化养殖规划，同时综合考虑区域布局、生产水平、社会服务、企业管

理等多方面因素，使畜牧业养殖系统形成一个包含饲料使用、养殖、畜禽产品加工、运输以及畜禽废弃物有效利用等一系列生产活动的产业链。

### **(2) 完善饲草料生产加工体系，扩大优质牧草供给**

鉴于牲畜肠道发酵过程中所产生的  $\text{CH}_4$  也是西北地区牧业碳排放重要来源的现实情况，故在畜禽养殖过程中还应加强对  $\text{CH}_4$  防控技术的利用，如采取在饲料中添加混合剂、调控瘤胃微生物区系构成、调整饲料配方等，由此形成一种生态饲养模式，进而减少  $\text{CH}_4$  的排放量。同时合理搭配畜禽喂养的精粗饲料比，可采用推广秸秆青贮、氨化处理、合理搭配日粮、营养添加剂等方法以达到最大程度降低动物肠道发酵  $\text{CH}_4$  排放的效果。

优质牧草的短缺是畜牧业面临的一大难题，自然环境下的牧草生长较慢并且具有季节性，因此需要人工建设饲草地，实现为养而种的机制。此外，加强对边际土地的利用，充分挖掘优质牧草的生产潜力，扩大优质牧草的供应。同时，钻研种植业秸秆等副产物的营养价值，促进饲草作物种植与草食动物养殖匹配发展，实现畜牧业低消耗、低排放、高效率的养殖。

### **(3) 构建畜禽粪污资源化利用体系，实现良性循环**

由前文研究结果可知，畜牧业碳排放的主要来源之一就是牲畜粪便管理引发的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ，因此，实现西北地区畜牧业低碳发展的关键在于对畜禽粪便进行科学化处理。具体而言，应做好以下几方面措施：首先，建设大中型的畜禽养废弃物处理场，将畜禽粪便集中处理，同时改变处理方式，固液分离干湿粪便从而阻碍在厌氧环境下发酵，在一定程度上避免了  $\text{CH}_4$  的产生。其次，规模化处理可以储存粪便便于后期利用，通过覆盖不同的材料制取沼气并集中回收供居民回收利用，实现循环发展，因地制宜地推广畜禽粪污资源化利用模式，满足不同区域、不同养殖规模粪污资源化利用需求。最后，畜禽粪污资源化利用整县推进，逐步落实到家家户户。以此同时，加大对生态保护方面的财政支出，提高粪污处理配套设施比例，加大对牲畜饲料等投入品的监控力度，做好全面的消毒，不断提高畜禽粪污资源化利用水平。

### **(4) 大力发展低碳养殖技术，完善畜牧业风险承担体系**

大力鼓励各类企业积极对畜牧业低碳技术的研发和低碳设备的生产制造,并将实现的高效技术成果进行生产转化和应用推广。同时,针对优良畜种的繁育体系做好配套流程,协调企业及技术推广单位与牧民之间的美好沟通交流,提升牧民的知识水平,共同开展技术合作。畜牧业企业家承担的市场风险比较大,不仅仅是市场与供求的影响,而且畜牧产品保质期短,受天气自然条件影响较大,因此需要政府给予企业一定的风险保障服务。引导广大养殖场(户)充分积极参保,可以有效避免市场风险和自然风险。政府出台畜禽及其产品运输绿色通道政策,创造良好的营商环境。

### **(5) 转变饮食观念, 优化生活方式**

对比畜禽肠道发酵和粪便排放产生的温室气体排放系数,可以发现畜禽品种结构对畜牧业的碳排放有显著的影响作用,牛羊等反刍动物所产生的碳排放量远大于猪及家禽等动物,因此倡导在饮食结构中减少牛羊等反刍动物的消费比例,增加猪及家禽在肉类消费中的比例。此外,增加植物性食物在饮食中所占比例,减少肉类食品的消费,转变生活观念,向健康低脂的方向迈步。

## 8 研究不足与未来展望

### 8.1 研究不足

受时间、数据获取以及笔者现有水平等因素的影响，研究仍然存在一定的局限性，有待以后进一步完善。

(1) 碳排放清单计算存在一定的不确定性和误差，在碳排放的清单编制问题中，笔者仅考虑主要碳排放来源，如牲畜的粪便管理与肠道发酵，但纵观整个畜牧业发展过程，温室气体的产生还应包括其他环节，如牧草种植过程中化肥农药的投入、畜禽饲养过程中的饲料兽药的使用以及畜禽产品生产加工环节，因此今后对畜牧业碳源的处理还有待进一步完善。

(2) 不同畜禽在不同饲养模式的肠道发酵产生  $\text{CH}_4$  排放系数是不同的，但本文受限于公开数据的统计，所研究的畜禽肠道发酵所产生的二氧化碳是按照规模化饲养模式下计算的，存在一定的误差，若能将不同畜禽按照不同饲养模式进行分类计算，结果将更具有说服力。

(3) 影响畜牧业碳排放的因素较多，本文所选取的影响因素可能不够全面，若将微观因素如农户养殖意愿、农户文化程度等指标加入会更具丰富性。

### 8.2 未来展望

西北五省（区）由于独特的地理位置，具有发展大牲畜的比较优势，但其生态环境脆弱，一定要兼顾经济发展和生态保护，做好两者之间的协调需要人类的无限探索，本文参照已有研究，尽量考虑了各系统边界的碳排放，但由于数据的可得性和问题的复杂性，仍有部分因素未能予以全面考虑，少量的自由放牧牲畜所产生的碳排放也应该计入等。此外，本文主要研究的是畜牧业碳排放的宏观影响因素，难以全面涵盖畜牧业养殖行为、废弃物处理方式和农户养殖生产意愿等微观影响因素，这也是本文需要改进的地方。



## 参考文献

- [1] Brunson C, Fotheringham, A.S. Charlton, M.E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geogr. Anal.* 1996, 28,281–298.
- [2] Huang B, Wu, B, Barry, M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. *Int. J. Geogr. Inform. Sci.* 2010, 24, 383–401.
- [3] Johnson J M F. Agricultural Carbon Sequestration for Enhancing Soil Resilience and Mitigating Greenhouse Gas Emission[C]//ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings (2019). ASA-CSSA-SSSA, 2019.
- [4] MacLeod M J, Hasan M R, Robb D H F, et al. Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture[J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1): 11679.
- [5] Yao CS, Qian SS, Mao YH, et al. Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* ,2017,33 (12):10-19.
- [6] Grzelak A, Guth M, Matuszczak A, et al. Approaching the environmental sustainable value in agriculture: How factor endowments foster the eco-efficiency[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118304.
- [7] Wang J, Shi T. Research on carbon emission statistical index system in rural China[J]. *Advances in Information ences & Service ences*, 2012.
- [8]姚成胜,钱双双,毛跃华,李政通.中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异[J].*农业工程学报*,2017,33(12):10-19.
- [9]王兴,马守田,濮超,赵鑫,王钰乔,张海林.西南地区农业碳排放趋势及影响因素研究[J].*中国人口·资源与环境*,2017,27(S2):231-234.
- [10]郎慧,肖诗顺,王艳.四川省农业碳排放与经济增长的脱钩效应分析[J].*山东农业大学学报(社会科学版)*,2019,21(02):69-78+158.
- [11] Pang J, Li H, Lu C, et al. Regional differences and dynamic evolution of carbon emission intensity of agriculture production in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(20): 7541.

- [12]宁成佳,杨松.基于 ARDL 模型的中国农业经济发展驱动因素与农业碳排放关系研究[J].西南科技大学学报(哲学社会科学版),2020,37(03):47-52.
- [13]张荧楠,张兰婷,韩立民.农业生态效率评价及提升路径研究——基于山东省 17 个地级市的实证分析[J].生态经济,2021,37(04):118-124+131.
- [14]贺青,张虎,张俊飏.农业产业聚集对农业碳排放的非线性影响[J].统计与决策,2021,37(09):75-78.
- [15]徐清华,张广胜.农业机械化对农业碳排放强度影响的空间溢出效应——基于 282 个城市面板数据的实证[J].中国人口·资源与环境,2022,32(04):23-33.
- [16]曹俐,范黎明.基于 STIRPAT 模型的中国海洋渔业碳排放驱动因素研究[J].海洋开发与管理,2022,39(05):39-46.
- [17]苏旭峰,杨小东,冉启英.基于碳排放视角的中国畜牧业绿色增长分析[J].生态经济,2022,38(04):101-107.
- [18] Shi R, Irfan M, Liu G, et al. Analysis of the impact of livestock structure on carbon emissions of animal husbandry: a sustainable way to improving public health and green environment[J]. *Frontiers in Public Health*, 2022: 145.
- [19]尚莉媛,崔妮,赵慧峰.京津冀畜牧业碳排放效率时空演变特征及影响因素分析[J/OL].中国农业资源与区划:1-11[2023-03-24].
- [20] Achão C, Schaeffer R. Decomposition analysis of the variations in residential electricity consumption in Brazil for the 1980–2007 period: Measuring the activity, intensity and structure effects [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(12):5208-5220.
- [21] Das A, Paul S K. CO<sub>2</sub> emissions from household consumption in India between 1993–94 and 2006–07: A decomposition analysis [J]. *Energy Economics*, 2014, 41(1):90-105.
- [22] Karmellos M, Kopidou D, Diakoulaki D. A decomposition analysis of the driving factors of CO<sub>2</sub> (Carbon dioxide) emissions from the power sector in the European Union countries [J]. *Energy*, 2016,94(09): 680-692.
- [23] Kopidou D, Diakoulaki D. Decomposing industrial CO<sub>2</sub> emissions of Southern European countries into production-and consumption-based driving factors [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167:1325-1334.

- [24]李艳梅,张雷,程晓凌.中国碳排放变化的因素分解与减排途径分析[J].资源科学,2010,32(02):218-222.
- [25]李国志,李宗植.中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析——基于 LMDI 模型[J].农业技术经济,2010(10):66-72.
- [26] Chung W, Kam M S, Ip C Y. A study of residential energy use in Hong Kong by decomposition analysis, 1990–2007 [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 5180-5187.
- [27] Zhao X L, Li N, Ma C B. Residential energy consumption in urban China: a decomposition analysis [J]. *Energy Policy*, 2012, 41: 644-653.
- [28] SC, ZX, Long, et al. Factors that influence carbon emissions due to energy consumption in China: Decomposition analysis using LMDI[J]. *APPL ENERG* , 2014,127(-):182-193.
- [29] Jiang J H. China's urban residential carbon emission and energy efficiency policy [J]. *Energy*, 2016, 109(15):866-875.
- [30] Qiang W, Rui J, Lza B. Is decoupling economic growth from fuel consumption possible in developing countries? – A comparison of China and India[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019.
- [31] Zheng J, Mi Z, Coffman D, et al. Regional development and carbon emissions in China[J]. *Energy Economics*, 2019, 81(JUN.):25-36.
- [32] Wang Q, Jiang R. Is China's economic growth decoupled from carbon emissions? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225(JUL.10):1194-1208.
- [33] Luo X, Liu C, Zhao H. Driving factors and emission reduction scenarios analysis of CO<sub>2</sub> emissions in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and surrounding cities based on LMDI and system dynamics[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 870: 161966.
- [34]杨绍华,张宇泉,耿涌.基于 LMDI 的长江经济带交通碳排放变化分析[J].中国环境科学,2022,42(10):4817-4826.
- [35]武敏. 基于 GTWR 模型的中国建筑业碳排放强度时空特征及影响因素分析 [D].长安大学,2019.
- [36] Yuan H, Feng Y, Lee J, et al. The spatio-temporal heterogeneity of financial agglomeration on green development in China cities using GTWR model[J].

Sustainability, 2020, 12(16): 6660.

[37] Zhu Z, Yu J, Luo J, et al. A GDM-GTWR-Coupled Model for Spatiotemporal Heterogeneity Quantification of CO<sub>2</sub> Emissions: A Case of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2000 to 2017[J]. Atmosphere, 2022, 13(8): 1195.

[38]李泽坤,任丽燕,马仁锋,刘永强,姚丹.基于时空地理加权回归模型的浙江省碳排放时空格局及驱动因素分析[J].宁波大学学报(理工版),2021,34(06):105-113.

[39]吴小影,杨山,尹上岗,徐晗泽宇.基于 GTWR 模型的长三角地区城市建设用地时空动态特征及其驱动机理[J].长江流域资源与环境,2021,30(11):2594-2606.

[40] Hu X. Tax Competition, Spatial Effect, and Environmental Pollution: An Empirical Analysis of the GTWR Model[J]. The International Journal of Business & Management, 2022, 10(8).

[41]李晓娟. 基于改进的 GTWR 模型对我国肺结核发病率的宏观因素分析及预测研究[D].山东大学,2022.

[42] Xu R, Gao J. Evolutionary Trends, Regional Differences and Influencing Factors of the Green Efficiency of Agricultural Water Use in China Based on WF-GTWR Model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(3): 1946.

[43]潘家华.经济要低碳,低碳须经济[J].华中科技大学学报(社会科学版),2011,25(02):76-81+92.

[44]王军. 低碳经济条件下碳会计理论体系研究[D].首都经济贸易大学,2014.

[45]张立军,徐红梅,张同建.浅析低碳经济的内涵——基于经济学与非经济学的视角[J].萍乡高等专科学校学报,2013,30(05):12-14.

[46]IPCC. Fourth Assessment Report: Climate Change [R]. Cambridge: Inter governmental Panel on Climate Change, 2007.

[47] IPCC. Climate change 2014 synthesis report [R]. Copenhagen: Inter governmental Panel on Climate Change, 2014.

[48]姚成胜,钱双双,毛跃华,李政通.中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异[J].农业工程学报,2017,33(12):10-19.

[49] Wang H, Qiao J. Decoupling and predictive analysis of greenhouse gas emission from animal husbandry in China. Chin. J.Eco-Agric. 2019, 27, 793–802.

- [50] Zhang Y, Zheng X, Zhang H, Chen G, Wang X. Carbon emission analysis of a residential building in China through life cycle assessment. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2014, 10, 150–158.
- [51] Xiong C, Yang D, Huo J. Spatial-temporal characteristics and LMDI based impact factor decomposition of agricultural carbon emissions in Hotan Prefecture, China. *Sustainability.* (2016) 8:262.
- [52] 贺亚亚,田云,张俊飏.湖北省农业碳排放时空比较及驱动因素分析[J].华中农业大学学报(社会科学版),2013(05):79-85.
- [53] 吴义根,冯开文.中国省际农业碳排放的时空分异特征及关联效应[J].环境科学与技术,2019,42(03):180-190.
- [54] 郭娇,齐德生,张妮娅,孙铝辉,胡荣桂.中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测[J].农业环境科学学报,2017,36(10):2106-2113.
- [55] 韦沁.我国农牧业碳排放的时空差异和影响因素分析及预测研究[D].兰州大学,2018.
- [56] 陈苏,胡浩.中国畜禽温室气体排放时空变化及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(07):93-100.
- [57] 师帅,李翠霞,李媚婷.畜牧业“碳排放”到“碳足迹”核算方法的研究进展[J].中国人口·资源与环境,2017,27(06):36-41.
- [58] 刘月仙,刘娟,吴文良.北京地区畜禽温室气体排放的时空变化分析[J].中国生态农业学报,2013,21(07):891-897.
- [59] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,彭小培,李娜,朱志平.中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J].农业工程学报,2008(10):269-273.
- [60] 彭继勇.发展低碳畜牧业必要性及应对措施[J].畜牧兽医科学(电子版),2020(06):189-190.
- [61] 尚杰,杨果,于法稳.中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究[J].中国生态农业学报,2015,23(03):354-364.
- [62] 冉锦成,苏洋,胡金凤,唐洪松,汪晶晶,崔盼.新疆农业碳排放时空特征、峰值预测及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(08):16-24.
- [63] 杜强,陈乔,杨锐.基于 Logistic 模型的中国各省碳排放预测[J].长江流域资源与

- 环境,2013,22(02):143-151.
- [64]田云,王梦晨.湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素[J].中国农业科学,2020,53(24):5063-5072.
- [65]刘杨,刘鸿斌.山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(04):558-569.
- [66]吴昊玥,黄瀚蛟,何宇,陈文宽.中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(10):1762-1773.
- [67]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.
- [68]王锋.中国碳排放峰值及其倒逼机制研究的发展动态[J].中国人口·资源与环境,2018,28(02):141-150.
- [69]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(09):42-47.
- [70]顾沈怡,邱子健,詹永冰,钱锬,熊若男,戴海洋,尹君,申卫收.我国畜牧业碳排放时空特征与趋势预测[J/OL].农业环境科学学报:1-16[2023-03-25].
- [71]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(09):1269-1282.
- [72]韦玉琼,龙飞,岳欣冉.乡村振兴背景下农村碳排放变动及减排策略[J].农业经济问题,2022(09):62-73.
- [73]邱子健,靳红梅,高南,徐轩,朱津宏,李庆,王子清,徐拥军,申卫收.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(03):658-669.
- [74]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].中国农村经济,2022(03):104-127.
- [75]桂河,李静,尚梦媛.“双碳”背景下的宁夏农业碳排放时序特征、驱动机理与脱钩效应研究[J].中南林业科技大学学报(社会科学版),2021,15(06):37-44.
- [76]刘杨,刘鸿斌.山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(04):558-569.
- [77]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(社会科学

版),2020,29(05):32-37+132.

[78]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.

[79]丁宝根,赵玉,罗志红.长江经济带农业碳排放的 EKC 检验及影响因素研究[J].中国农机化学报,2019,40(09):223-228.

[80]吴昊玥,黄瀚蛟,何宇,陈文宽.中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(10):1762-1773.

[81]尚杰,吉雪强,石锐,朱美荣.中国农业碳排放效率空间关联网络结构及驱动因素研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(04):543-557.

[82]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(04):51-58.

## 攻读学位期间的研究成果

- [1]许静,孔云霄.乡村振兴视角下甘肃农业多系统的耦合协调发展研究[J].河西学院学报,2023,39(02):65-72.
- [2]孔云霄,甘崎旭.非认知能力对创业的影响研究[J].产业创新研究,2023(06):27-29.
- [3]Jing Xu, Dong Chen, Rongrong Liu, Maoxian Zhou, Yunxiao Kong. Environmental Regulation, Technological Innovation, and Industrial Transformation: An empirical study based on city function in China. *Sustainability* 2021,13(22),12512. <https://doi.org/10.3390/su132212512>.



## 致 谢

凡是过往，皆为序章。所有将来，皆为可盼。

始于 2020 年初秋，终于 2023 年盛夏。这三年，是疫情的三年，感谢国家、学校、老师在新冠疫情时期给我们提供了一个安全舒适的学习环境以及生活上的殷切关怀和照顾。

桃李不言，下自成蹊。感谢我的导师许静老师，既是我的学术导师，也是我的生活导师，治学态度严谨，指导有方，涓涓师恩，铭记于心。愿老师永远年轻，事业越来越好！

吾行千里路，至亲亦艰辛。感谢父母二十七载对我不计付出的养育之恩，还有老弟孔晓旭对我一直的鼓励和肯定，我没有高超的智商没有引以为傲的天赋，一路在他们的理解和支持下慢慢走来，没有很优秀却也在笨拙地追求变好，愿他们身体健康开开心心！

海内存知己，天涯若比邻。感谢我的师门和室友们，山水一程，三生有幸，愿以后即使我们在祖国的不同角落也能发光发热！感谢一直陪伴着我的挚友李华、王煜杰、朱玉婷、李灿国，在我人生难过崩溃时刻给予的倾听和开导，祝我们的友谊天长地久，永远不负心中热爱！

以梦为马，不负韶华。感谢那个像蜗牛一般的自己不断在前行的路上，祝愿一下自己吧，该祝自己什么呢？想祝自己平顺，可漫漫长路并非是坦途，崎岖险峰不在少数；想祝自己快乐，但未来之行并非都是欢欣，失意低谷在所难免。那就祝自己勇敢且坚强乐观且豁达吧！

寥寥数语，难诉衷肠。感谢所有评阅我拙文及参加答辩的各位老师，感谢您在论文从开题到完成过程中指出的不足与建议，为最后文章的呈现提供了莫大的帮助。现世当下，且行且珍惜，茫茫人海，相遇不易。愿诸君多保重，纵四方也要在一方水土继续灿烂且热烈的生活！

纸短情长，感慨万千。唯此去经年，于万物众生中磊落做人，身怀赤诚，心怀感恩。山水有相逢，往来皆可期。

最后的最后，祝愿我伟大的祖国海晏河清，万象升平！