

DOI: 10.20103/j.stxb.202311032394

李军豪,裴孝东,杨国靖,石贵,张聪,周立华.青海省畜牧 CO₂排放与经济效益的脱钩关系及其驱动效应.生态学报, 2024, 44(22): 10146-10161.
Li J H, Pei X D, Yang G J, Shi G, Zhang C, Zhou L H. Decoupling relationship and driving effect between livestock carbon emissions and economic efficiency in Qinghai Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10146-10161.

青海省畜牧 CO₂ 排放与经济效益的脱钩关系及其驱动效应

李军豪^{1,2,3}, 裴孝东^{2,4}, 杨国靖^{1,2,3}, 石 贵^{1,2,3}, 张 聪^{2,4}, 周立华^{2,4,*}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室, 兰州 730000

4 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

摘要: 温室气体排放量的增加是全球气候变暖的主要原因, 其中畜牧业则是温室气体排放的重要来源。为推动畜牧业的发展并有效减少温室气体排放, 青海省积极推进了生态畜牧业建设, 以统筹协调生态保护和畜牧业的可持续发展。为厘清生态畜牧业能否在促进碳减排的同时保持经济效益, 分析了 2008—2018 年青海省畜牧业 CO₂ 排放的演变特征, 并采用 Tapio 脱钩弹性和对数平均迪氏指数法 (LMDI) 模型, 对畜牧经济效益与畜牧 CO₂ 排放之间的脱钩关系及其驱动因素展开了研究。研究结果表明: (1) 在青海省生态畜牧业政策的大力推行下, 畜牧 CO₂ 排放量和畜牧业产值尽管均呈增加趋势, 但畜牧 CO₂ 排放强度下降了 48.05%, 表明青海省畜牧业正在逐渐走上绿色低碳的高质量发展道路。(2) 畜牧 CO₂ 排放量与畜牧经济效益之间呈现以弱脱钩为主的较理想状态, 但易受区域自然禀赋、生态保护政策调整和市场价格的影響。这说明青海省畜牧业低碳发展具有较大潜力, 建议持续加强生态畜牧业建设, 提高抗风险能力。(3) 在生态保护政策和生态畜牧业建设的背景下, 畜牧业技术效率、产业结构和农村人口比例是推动畜牧 CO₂ 排放与经济效益脱钩的重要因素。为实现畜牧业高质量发展, 研究提出了推进青海省畜牧业低碳发展的相应建议。以期统筹畜牧业在碳减排与经济效益之间取得平衡, 为生态畜牧业发展的相关政策制定和决策提供科学依据。

关键词: 温室气体; 畜牧业 CO₂; 经济效益; 脱钩效应; 畜牧业低碳发展

Decoupling relationship and driving effect between livestock carbon emissions and economic efficiency in Qinghai Province

LI Junhao^{1,2,3}, PEI Xiaodong^{2,4}, YANG Guojing^{1,2,3}, SHI Gui^{1,2,3}, ZHANG Cong^{2,4}, ZHOU Lihua^{2,4,*}

1 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Lanzhou 730000, China

4 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: The increase in greenhouse gas emissions is the main cause of global warming, and animal husbandry is a significant contributor to these emissions. In order to promote the development of animal husbandry and effectively reduce greenhouse gas emissions, Qinghai Province has actively promoted the construction of an ecological animal husbandry industry, aiming to integrate and coordinate ecological protection with the sustainable development of the animal husbandry

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA26010301); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0404); 中国科学院青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项项目 (LHZX-2020-09)

收稿日期: 2023-11-03; **网络出版日期:** 2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lhzhou@casisd.cn

sector. However, it remains unclear whether ecological animal husbandry can effectively promote carbon emission reduction while maintaining economic efficiency. To address this uncertainty and facilitate the low-carbon development of animal husbandry, this study analyzed the evolutionary characteristics of CO₂ emissions from animal husbandry in Qinghai Province from 2008 to 2018. Additionally, it employed the Tapio decoupling elasticity and log-mean Dee's index (LMDI) model to analyze the decoupling relationship between animal husbandry economic efficiency and CO₂ emissions, along with their driving factors. The results indicate that: (1) Despite the increasing trend in both animal husbandry CO₂ emissions and the value of animal husbandry output amidst the vigorous implementation of ecological animal husbandry policies in Qinghai Province, there has been a notable decrease of 48.05% in the intensity of animal husbandry CO₂ emissions. It suggests that the animal husbandry industry was gradually transitioning towards high-quality development in a green and low-carbon manner. (2) The relationship between livestock CO₂ emissions and livestock economic benefits demonstrated a desirable state dominated by weak decoupling. However, this relationship is vulnerable to regional natural endowments, adjustments in ecological protection policies, and market prices. It suggests that the low-carbon development of animal husbandry in Qinghai Province holds greater potential, and it is recommended to continuously strengthen the construction of ecological animal husbandry to enhance resilience against risks. (3) In the context of ecological conservation policies and the development of ecological animal husbandry, the technical efficiency of animal husbandry, industrial structure, and the proportion of rural population were important factors driving the decoupling of CO₂ emissions from economic benefits in animal husbandry. In order to achieve high-quality development of animal husbandry, this study proposed corresponding suggestions for promoting low-carbon development of animal husbandry in Qinghai Province. It is hoped to balance the economic benefits and carbon reduction of animal husbandry, provide scientific basis for the formulation and decision-making of relevant policies for the development of ecological animal husbandry, and is of great significance for promoting the sustainable development of green low-carbon animal husbandry in China.

Key Words: greenhouse gas; livestock CO₂; economic benefits; decoupling relationship; low-carbon development of animal husbandry

温室气体(GHG)排放量增加是全球气候变暖的主要原因^[1],也是各国关注的焦点问题之一。2016 年 178 个缔约方签订了《巴黎协定》,标志着如何有效降低 GHG 排放已成为各国经济发展中迫切需要解决的问题^[2]。为应对气候变化,我国也明确提出 CO₂排放要力争于“2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的“双碳”目标。联合国粮食及农业组织(FAO)报告指出,畜牧业排放的 GHG 占全球的 14.5%,是 GHG 排放的重要来源^[3],且主要来自于发展中国家^[4]。我国是全球第二大经济体和发展最快的发展中国家^[5],畜牧业是我国农业及农村经济的支柱产业^[6]。畜牧业碳排放占我国农业温室气体排放量的 54.3%^[7],这对落实“双碳”目标带来了严峻挑战,畜牧业绿色低碳、高质量发展已刻不容缓。

“双碳”目标已成为推动畜牧业高质量发展的内在要求^[8],畜牧业的碳排放问题也被广泛关注和探讨。目前,我国畜牧业碳排放的研究主要集中在饲养方式和不同物种的碳足迹等微观层面^[9]。近年来,一些学者开始关注畜牧业碳排放的时空演变特征研究。例如,顾沈怡等^[10]分析了全国畜牧业碳排放的时空特征,谢婷等^[11]分析了华中地区畜牧业的温室气体排放特征。这些研究尺度主要集中在省市一级的畜牧碳排放时间序列演变特征。有助于更好地了解我国畜牧业碳排放问题,但畜牧业的低碳发展还涉及经济方面。因此,如何均衡畜牧养殖经济效益与碳排放之间的关系,成为我国畜牧业可持续发展面临的主要问题。

随着人们对低碳经济认识的不断深入,CO₂排放量与经济效益之间的关系逐渐受到学界的关注^[12]。环境库兹尼茨曲线理论^[13]、Granger 因果关系检验^[14]和脱钩理论^[15]等方法也被广泛引入探究 CO₂排放量与经济效益之间的关系,其中,脱钩理论是判断发展模式是否符合低碳发展要求的重要手段^[16]。近年来,学者们利用 Tapio 脱钩模型对各行业 CO₂排放与经济发展之间的关系进行了大量研究。例如,Eng 等^[17]研究表明

Cameroon 交通部门的能源 CO_2 与经济增长主要是以弱脱钩状态为主。侯丽朋等^[16]认为碳排放与经济发展的脱钩是实现低碳经济发展的必要条件。另外,在实证研究中常将脱钩分析和脱钩影响因素相结合,通过综合考虑各种影响因素,更全面地理解碳排放与经济增长之间的脱钩状态,从而为制定针对性的政策和措施提供科学依据。脱钩影响因素分析包括因素分解法、系数分析法、因果法等方法^[18–19]。在因素分解法中,以 Kaya 恒等式为基础的 LMDI 模型因能有效解决传统线性回归模型所产生的残差项问题而被广泛应用,且常结合 Tapio 模型用来评估经济发展和环境压力的脱钩和驱动因素^[20]。例如,Shi 等^[21]分析了中国经济发展与环境污染的脱钩效应,发现经济规模的扩大是脱钩状态不稳定的关键因素。Wang 等^[22]通过研究中国城市层面碳排放部门经济产出,发现人均 GDP 和人口增长抑制了 CO_2 排放与经济产出的脱钩过程。

青海省是我国最大的有机畜牧业生产基地,年均畜牧业碳排放量达到了 1085.63 万 t,是我国畜牧碳排放的重要地区之一^[23]。青海省亦是我国生态保护的重点区域,自 2000 年以来,国家在青海省逐步实施了三江源生态保护和建设工程,以及三江源和祁连山国家公园建设,这些举措对畜牧业发展产生了一定影响。为协调畜牧业发展与生态环境保护之间的关系,保障畜牧业可持续发展,2008 年青海省在“生态立省战略”的指导下,建立了完善的草畜平衡机制,合理利用草地资源。将传统草食畜牧业转变为规模化养殖、集约化经营,推动了生态畜牧业的发展。畜牧业的规模化和集约化增加了畜牧业系统的碳排放^[24]。但 Bai 等^[15]的研究发现,国家生态建设政策的实施导致黄河源地区牲畜产出减少,温室气体排放量下降了 39%。因此,目前尚不清楚青海省生态畜牧业对碳减排的实际效果,且畜牧业的碳排放与经济效益之间的关系亦不清晰。在这种背景下,协调畜牧业的经济增长与温室气体排放之间的关系,探究其背后的影响因素,对于保障生态畜牧业的可持续发展至关重要。然而,类似的相关研究较少,难以为我国畜牧业的低碳发展提供有效的指导。本研究利用 Tapio 脱钩与 LMDI 模型,分析了青海省畜牧业的 CO_2 排放量,并探讨了畜牧业的 CO_2 排放与经济效益之间的脱钩效应及其驱动因素。基于这些分析结果,提出了畜牧业低碳发展的相关建议,能够为青海省乃至我国的生态畜牧业可持续发展提供科学指导依据。

1 研究区概况

青海省($89^{\circ}24'—103^{\circ}02'E$, $31^{\circ}36'—39^{\circ}05'N$)位于我国西北部内陆腹地、青藏高原东北部,地势西高东低,平均海拔为 4058 m,总面积 $7.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。全省属高原大陆性气候,年均气温为 $-5.7—8.5^{\circ}\text{C}$,年均降水量由东南向西北逐渐减少,大部分区域的年降水量在 400 mm 以下^[24]。青海省是长江、黄河以及澜沧江的发源地,有“中华水塔”之称。其特殊的气候和地理区位,造就了自然环境复杂、植被类型丰富多样的高原生态系统,自东南向西北依次呈现为森林植被、灌丛植被、高寒草甸、高寒草原、荒漠植被^[25](图 1)。据青海省 2015 年草地资源清查,天然草地面积约 $3.39 \times 10^5 \text{ km}^2$,可利用面积 $3.87 \times 10^5 \text{ km}^2$,畜牧业发展条件得天独厚。

青海省是我国的五大牧区之一,2022 年牧业总产值为 302.3 亿元,占农林牧渔总产值的 57.2%,畜牧业是其支柱型产业,也是当地农牧民主要生计来源。青海省作为生态保护的重点区域,国家近年来实施了退耕还林还草、休牧育草等多项生态保护措施,积极推进三江源、祁连山国家公园建设,生态环保资金累计投入 1906.9 亿元。通过统筹畜牧业经济发展和生态保护,将是推动青海省生态保护、民生改善以及不断筑牢国家生态屏障的有力举措。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 畜牧 CO_2 排放量测算

畜牧养殖业的 GHG 排放主要由牲畜肠道发酵和粪便管理产生,并排放到大气中的甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等气体^[24]。本文依据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[26]和《省级温室气体清单编制指南》对畜牧 CO_2 排放量的测算,选取了马、驴、骡、骆驼、猪、奶牛、黄牛、牦牛、山羊和绵羊等牲畜为畜牧 GHG 的主

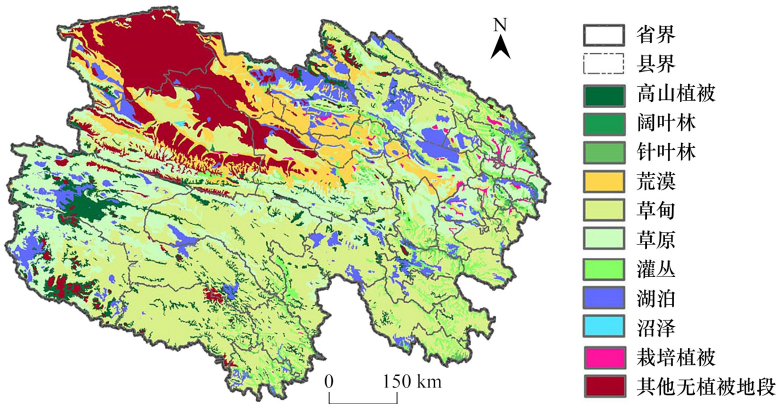


图 1 研究区地理位置与植被分布图

Fig.1 Location and vegetation distribution of the study area

要来源,这与相关研究的测算方法相一致^[15]。本文基于 GHG 排放系数(表 1)测度出 GHG 排放量,并将其转换为 CO₂排放量。据 2007 年 IPCC 第四次评估报告可知,每千克 CH₄、N₂O 引发的温室效应分别相当于 25 kg CO₂和 298 kg CO₂所产生的温室效应^[15]。因此,本文利用 1 kg CH₄ = 25 kg CO₂和 1 kg N₂O = 298 kg CO₂的转换系数确定畜牧养殖业 CO₂排放的总量,测算公式为:

$$\begin{aligned} T_C &= T_{CH_4} \times 25 + T_{N_2O} \times 298 \\ &= \sum_{i=1}^{10} N_i \times \lambda_{CH_4(i)} \times 25 + \sum_{i=1}^{10} N_i \times \lambda_{N_2O(i)} \times 298 \end{aligned} \tag{1}$$

式中, T_C 为畜牧养殖的二氧化碳排放总量; T_{CH_4} 和 T_{N_2O} 分别为牲畜排放的 CH₄和 N₂O 的总量; N_i 为每年饲养的牲畜种群数量; $\lambda_{CH_4(i)}$ 和 $\lambda_{N_2O(i)}$ 分别为单个物种的 CH₄和 N₂O 的排放因子。

表 1 主要牲畜品种的 CH₄和 N₂O 温室气体排放系数^[26]

Table 1 GHG emission factors for CH₄ and N₂O for major livestock species^[26]

牲畜类型 Livestock type	肠道发酵 CH ₄ 的排放因子 CH ₄ emission factor from enteric fermentation/(kg 头 ⁻¹ a ⁻¹)	粪便管理 CH ₄ 排放因子 Emission factor for CH ₄ from faecal management/(kg 头 ⁻¹ a ⁻¹)	粪便管理 N ₂ O 排放因子 Manure management N ₂ O emission factors/(kg 头 ⁻¹ a ⁻¹)
马 Horse	18	1.09	0.33
驴 Donkey	10	0.60	0.188
骡 Mule	10	0.60	0.188
骆驼 Camel	46	1.28	0.33
猪 Pig	1	1.38	0.195
奶牛 Dairy cow	99.3	5.93	1.447
黄牛 Cattle	85.3	1.86	0.545
牦牛 Yak	85.3	1.86	0.545
山羊 Goats	6.7	0.32	0.074
绵羊 Sheep	7.5	0.28	0.074

CH₄: 甲烷 Methane; N₂O: 氧化亚氮 Nitrous oxide; GHG: 温室气体 Greenhouse gas

2.1.2 Tapio 脱钩模型

碳排放脱钩是指经济效益与 CO₂排放的关系不断弱化甚至逐步消失的过程。Tapio 构建的脱钩弹性系数可用来衡量两者变化率之间的关系^[5],公式如下:

$$D = \frac{\Delta T_c / C_0}{\Delta G / G_0} \tag{2}$$

式中, D 为脱钩弹性系数, ΔT_c 和 ΔG 分别为 CO_2 和牧业产值的变化量; C_0 和 G_0 为基期的 CO_2 排放量和牧业产值; 脱钩状态依据脱钩弹性值 D 范围、 T_c/C_0 和 $\Delta G/G_0$ 的正负将脱钩状态分为 8 类^[21]。具体脱钩分类如表 2 所示。

表 2 Tapio 脱钩指标体系等级^[21]Table 2 Tapio decoupling indicator system levels^[21]

脱钩等级 Decoupling level		$\Delta T_c/C_0$	$\Delta G/G_0$	D	畜牧业脱钩状态特征 Decoupling state characteristics of animal husbandry	状态 status
脱钩 Decoupling	强脱钩	<0	>0	$D < 0$	经济水平增长, CO_2 排放量不断减少	理想状态
	弱脱钩	>0	>0	$0 \leq D < 0.8$	经济水平增长速度大于 CO_2 排放量增长速度	较理想状态
	衰退脱钩	<0	<0	$D > 1.2$	经济水平衰退速度小于 CO_2 排放量衰退速度	可允许状态
连接 Connection	扩张连接	>0	>0	$0.8 \leq D \leq 1.2$	经济水平与 CO_2 排放量增长速度相当	不可取状态
	衰退连接	<0	<0	$0.8 \leq D \leq 1.2$	经济水平与 CO_2 排放量衰退速度相当	可允许状态
负脱钩 Negative decoupling	扩张负脱钩	>0	>0	$D > 1.2$	经济水平增长速度小于 CO_2 排放量增长速度	不可取状态
	弱负脱钩	<0	<0	$0 \leq D < 0.8$	经济水平衰退速度大于 CO_2 排放量衰退速度	不可取状态
	强负脱钩	>0	<0	$D < 0$	经济水平衰退, CO_2 排放量不断增加	最不理想状态

CO_2 : 二氧化碳 Carbon dioxide; ΔT_c : CO_2 排放变化量 CO_2 emission change value; ΔG : 牧业产值的变化量 The change of animal husbandry output value; C_0 : 基期的 CO_2 排放量 CO_2 emissions in the base period; G_0 : 基期的牧业产值 The output value of animal husbandry in the base period; D : 脱钩弹性系数 Coefficient of decoupling elasticity

2.1.3 LMDI 的 CO_2 排放驱动力因素分解模型

本文采用 Kaya 恒等式^[26] 和对数平均迪氏指数法 (LMDI) 模型, 对畜牧 CO_2 排放的驱动因素进行了研究。依据 Kaya 恒等式的扩展模式对畜牧 CO_2 排放的影响因素进行全面分析, 扩展的表达式为:

$$T_c = F \times G \times T \times A \times P = \frac{T_c}{\text{LGDP}} \times \frac{\text{LGDP}}{\text{TGP}} \times \frac{\text{TGP}}{AP} \times \frac{AP}{TP} \times TP \quad (3)$$

式中, LGDP 和 TGP 分别为牧业生产总值和农林牧渔总产值; AP 和 TP 分别为农业人口数和总人口数。 $F = T_c/\text{LGDP}$ 为技术效率, 即指 CO_2 的排放强度, Gerber, P.J.^[27] 和 Capper, J.L 等^[28] 发现采用更先进的饲养管理和技术的畜牧系统往往具有较低的碳排放强度, 畜牧碳排放强度的降低通常需要先先进的技术和管理方法。因此, 本研究用畜牧 CO_2 的排放强度作为畜牧业生产技术效率, 表示畜牧业是否正朝着低碳方向发展, 其中畜牧 CO_2 的排放强度值越小则表明畜牧业生产技术效率越高; $G = \text{LGDP}/\text{TGP}$ 为产业结构, 产业结构的不同可以影响畜牧碳排放。例如, 农业中畜牧业的比例较高, 可能导致更多的碳排放^[27]; $T = \text{TGP}/AP$ 为农业经济产出, 反映了农业发展水平和技术升级, 随着农业经济产出的增加, 畜牧业的规模和生产水平可能会扩大, 从而导致更多的碳排放^[28]; $A = AP/TP$ 为农业人口比例, P 为人口数。随着农业人口比例的减少和人口数的增加, 畜牧业的规模和生产水平可能会发生变化, 进而影响畜牧碳排放^[29]。

本文根据式 5 采用 LMDI 模型“加和分解”法对影响畜牧碳排放量因素的综合效应进行分解^[20, 30], 公式如下:

$$\Delta T_c = T_{CK} - T_{C0} = \Delta CF + \Delta CG + \Delta CT + \Delta CA + \Delta CP; \quad (4)$$

$$\Delta CF = \frac{T_{CK} - T_{C0}}{\ln T_{CK} - \ln T_{C0}} \times \ln \left(\frac{CF_K}{CF_0} \right);$$

$$\Delta CG = \frac{T_{CK} - T_{C0}}{\ln T_{CK} - \ln T_{C0}} \times \ln \left(\frac{CG_K}{CG_0} \right);$$

$$\Delta CT = \frac{T_{CK} - T_{C0}}{\ln T_{CK} - \ln T_{C0}} \times \ln \left(\frac{CT_K}{CT_0} \right);$$

$$\Delta CA = \frac{T_{CK} - T_{C0}}{\ln T_{CK} - \ln T_{C0}} \times \ln \left(\frac{CA_K}{CA_0} \right);$$

$$\Delta CP = \frac{T_{CK} - T_{C0}}{\ln T_{CK} - \ln T_{C0}} \times \ln \left(\frac{CP_K}{CP_0} \right)$$

式中, K 代表目标年份, 0 代表基准年; ΔT_c 为畜牧 CO₂排放影响因素的总效应, ΔCF 、 ΔCG 、 ΔCT 、 ΔCA 和 ΔCP 分别表示技术效率效应、产业结构效应、经济产出效应、农业劳动力效应和人口因素效应对畜牧业碳排放的贡献值。

结合脱钩公式,得到畜牧碳排放与畜牧经济增长的脱钩效应分解量化模型:

$$\begin{aligned} D &= \frac{\Delta T_c / C_0}{\Delta G / G_0} = \frac{(\Delta CF + \Delta CG + \Delta CT + \Delta CA + \Delta CP) / C_0}{\Delta G / G_0} \\ &= \frac{\Delta CF / C_0}{\Delta G / G_0} + \frac{\Delta CG / C_0}{\Delta G / G_0} + \frac{\Delta CT / C_0}{\Delta G / G_0} + \frac{\Delta CA / C_0}{\Delta G / G_0} + \frac{\Delta CP / C_0}{\Delta G / G_0} \\ &= d_F + d_G + d_T + d_A + d_P \end{aligned} \quad (5)$$

式中, d_F 、 d_G 、 d_T 、 d_A 和 d_P 分别为畜牧业技术效率脱钩弹性、产业结构脱钩弹性、农业经济产出脱钩弹性、农业人口比例脱钩弹性和人口脱钩弹性。

为了便于比较,使用相对贡献度来描述各效应对碳排放量的影响程度^[31],公式如下:

$$d_\gamma = \frac{d_\chi}{\sum_{\chi} |d_\chi|} \times 100\% \quad (6)$$

式中, χ 为各影响因素; d_γ 为相对贡献度。由表2可知,当 $\Delta G > 0$ 时, D 值越小,解耦程度越好。因此, $d_\gamma < 0$ 表示正解耦效应, $d_\gamma > 0$ 表示负解耦效应;相反,当 $\Delta G < 0$ 越大, D 值越大。故 $d_\gamma > 0$ 表示正解耦效应 $d_\gamma < 0$ 表示负解耦效应。

2.2 数据来源及处理

由于难以收集到完备详细的县域统计数据,且所收集到的统计年鉴中有关畜牧数据统计口径存在差异,为保证研究的科学性,本研究仅依托中国青海省农业农村厅的2008—2018《青海省农牧业统计手册》开展研究,该手册提供了畜种、畜牧业产值、农林牧渔总产值和人口等数据,畜牧业产值指数、农林牧渔总产值指数来源于前瞻数据库,青海省的省级行政边界、县级行政边界等矢量数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。青海省植被图的数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>),比例尺为1:100万的中国植被数据。本研究以2008年作为基期,利用青海省畜牧业产值指数、农林牧渔总产值指数分别对牧业产值和农林牧渔总产值进行平减^[32],去除通货膨胀对研究结果的影响。然后,基于畜种数据和牲畜品种的温室气体排放系数(表1)测算出畜牧碳排放总量,接着利用Tapio脱钩模型对畜牧CO₂量和牧业产值进行脱钩分析,最后通过采用LMDI分解模型对影响碳排放脱钩过程驱动力因素进行了分析。

3 结果与分析

3.1 畜牧业 CO₂排放的时空变化分析

青海省2008—2018年畜牧CO₂排放量与牧业产值均呈现增长的趋势,分别增加了23.13%和136.92%,畜牧碳排放强度呈下降趋势,由2008年的20.75t/万元减少到2018年的10.78t/万元(表3)。畜牧CO₂排放量、牧业产值和畜牧碳排放强度的变化趋势大致可分为三个阶段:2008—2013年间,畜牧CO₂排放量增加了132.90万t,年均增加幅度较小;牧业产值逐年同比增加,年均增加约为12.36%;而畜牧碳排放强度则同比下降38.51%,呈现显著的下降趋势。2013—2016年间,畜牧CO₂排放量、牧业产值和畜牧碳排放强度均表现为增加趋势。尽管畜牧CO₂排放量同比增速明显,但牧业产值和畜牧碳排放强度增速缓慢,仅分别增加了7.41%和6.11%。2016—2018年间,畜牧CO₂排放量变化趋于平稳;牧业产值同比增加26.63%,呈明显增加趋势;畜牧碳排放强度则同比下降了20.38%。综上表明,随着畜牧经济水平的提高,单位畜牧经济产值的能耗呈减少

趋势,畜牧业逐步走上了可持续发展道路。

表 3 2008—2018 年青海省畜牧 CO₂ 排放总量、牧业总产值和畜牧 CO₂ 排放强度变化情况

Table 3 Changes in total livestock CO₂ emissions, total livestock production value, and livestock CO₂ emission intensity in Qinghai Province from 2008 to 2018

年份 Year	CO ₂ 排放量/(×10 ⁵ t) CO ₂ emissions	牧业产值/(×10 ⁵ 万元) livestock output value	畜牧 CO ₂ 排放强度/(t/万元) Livestock CO ₂ emission intensity
2008	184.86	8.91	20.75
2009	188.84	8.73	21.63
2010	195.34	9.63	20.28
2011	197.50	11.89	16.61
2012	198.21	13.39	14.80
2013	198.15	15.52	12.76
2014	208.80	16.18	12.90
2015	218.57	16.37	13.35
2016	225.83	16.67	13.54
2017	223.00	17.87	12.48
2018	227.62	21.11	10.78

受自然禀赋差异和生态保护政策的综合影响,青海省各地区的畜种结构和规模存在差异,使畜牧 CO₂ 排放量存在显著的空间分异特征,这反映出青海省各县的畜牧业发展水平极不均衡。其中,从市州畜牧业碳排放量的年均值大小来看,排序前三位的依次是玉树州、海南州和果洛州,共占畜牧碳排放量的 53.44%,是 CO₂ 排放主要贡献地区。从县域尺度来看,青海省各县域的 CO₂ 排放量差异较大,其中玉树市、河南县、兴海县、囊谦县和共和县的 CO₂ 排放量均超过 90 万 t,而西宁市的城东区 and 城西区的 CO₂ 排放量仅为 0.46 万 t 和 0.33 万 t。

青海省不同时期的畜牧 CO₂ 排放量均以增加为主,且表现出一定的空间特征(图 2)。2008—2010 年间,青海省畜牧 CO₂ 排放量增加了 104.80 万 t,有 36 个县区畜牧业 CO₂ 排放量呈增加趋势。但在 2010—2012 年,畜牧 CO₂ 排放量增速减缓,增加量仅占 2008—2010 年增加量的 27.37%,有 14 个县区的畜牧 CO₂ 排放量呈减

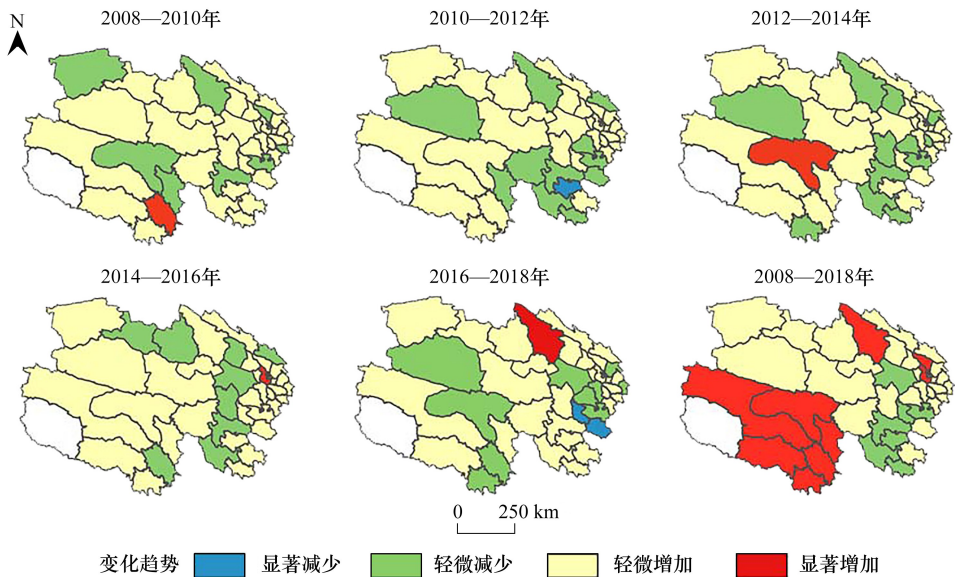


图 2 青海省不同时期畜牧业 CO₂ 排放量的空间演变情况

Fig.2 Spatial evolution of CO₂ emissions from animal husbandry in Qinghai Province in different time periods

少趋势,且逐渐向青海省东南部集中。在 2012—2014 年间分别有 32 和 13 个县区的畜牧业 CO₂排放量呈增加和减少趋势,其中大部分减少的县区呈现逐渐向东部迁移的现象。2014—2016 年有 34 个县区畜牧 CO₂排放量存在增加趋势。相比上一时段,由于受市场价格冲击和产业结构不均衡影响,青海省东端部分县区的畜牧业 CO₂排放量由减少转变为增加状态,其中贵南县与泽库县畜牧业 CO₂排放量的增幅最大。2016—2018 年间,该时段有 30 个县区的畜牧 CO₂排放量呈现增加趋势,但随着生态畜牧业发展战略和国家公园试点的红利逐渐显现,畜牧 CO₂排放量仅增加了 17.88 万 t。并促使青海东部以外的地区,如曲麻莱县、玉树市和囊谦县的畜牧业 CO₂排放量开始减少。综合来看,2008—2018 年间,青海省畜牧 CO₂排放量增加了 427.76 万 t,有 36 个县区的畜牧 CO₂排放量表现出不同程度地增加,尤其是玉树藏族自治州的畜牧 CO₂排放量显著增加。

3.2 畜牧 CO₂排放量和畜牧经济效益的脱钩关系分析

3.2.1 脱钩状态分析

表 4 反映了青海省畜牧 CO₂排放量和畜牧经济效益的脱钩关系。2008—2018 年青海省畜牧 CO₂排放量与畜牧经济效益之间的脱钩弹性为 0.17,呈现弱脱钩状态,处于畜牧业经济低碳发展较为理想的状态。历年脱钩状态的变化情况可大致分为 2008—2013 年、2013—2015 年和 2015—2018 年三个时期。

表 4 2008—2018 年青海省畜牧 CO₂排放量和畜牧经济效益的脱钩关系

Table 4 Decoupling of livestock CO₂ emissions and livestock economic benefits in Qinghai Province from 2008 to 2018

时段 Period	$\Delta T_c/C_0/\%$	$\Delta G/G_0/\%$	D	脱钩状态 decoupled state
2008—2009	2.15	-2.04	-1.06	强负脱钩
2009—2010	3.44	10.37	0.33	弱脱钩
2010—2011	1.10	23.37	0.05	弱脱钩
2011—2012	0.36	12.65	0.03	弱脱钩
2012—2013	-0.03	15.95	-0.00	强脱钩
2013—2014	5.38	4.24	1.27	扩张负脱钩
2014—2015	4.68	1.15	4.08	扩张负脱钩
2015—2016	3.32	1.87	1.77	扩张负脱钩
2016—2017	-1.25	7.18	-0.17	强脱钩
2017—2018	2.07	18.11	0.11	弱脱钩
2008—2018	23.13	136.88	0.17	弱脱钩

2008—2013 年间,畜牧 CO₂排放量增速放缓,畜牧碳排放强度年均下降 6.42%。导致在此时期,畜牧 CO₂排放量与畜牧经济效益之间的脱钩状态呈现出强负脱钩→弱脱钩稳定→强脱钩的逐步改善过程,且在 2012—2013 年出现了强脱钩。说明 2008 年青海省提出“生态立省战略”以来,通过推广“园区+企业+合作社+农户”、“公司+合作社+基地+农户”、“合作社+基地+牧户”等多种生态畜牧业发展模式,优化草场、牲畜、劳力等生产要素配置,推动了传统的粗放型草食畜牧业向规模化养殖、集约化经营的生态畜牧业转型,青海省逐步走上一条草食畜牧业可持续发展道路,并初步取得成效。

随着生态畜牧业的稳步发展,2013—2016 年牲畜数量增加了 4.44%,畜牧 CO₂排放量增加了 276.8 万 t,但由于牧业产值增速放缓,使得畜牧业经济水平增长速度小于畜牧业碳排放量增长速度,两者之间呈现出扩张负脱钩状态。至于畜牧业经济增长放缓的原因,一方面可能是草食畜牧产品价格持续低位运行,处于微利润时期,严重影响了畜牧业经济增长。另一方面,在三江源自然保护区生态保护和建设二期工程实施期间,为实现草原减畜、牧民增收、生态恢复的目标,加快了三江源地区畜牧业生产模式的转变,也一定程度影响了短期的畜牧业经济效益。

2016—2018 年间,畜牧 CO₂排放量与畜牧经济效益之间均表现脱钩的状态,整体属于较为理想的状态。究其原因在于三江源国家公园试点建设的红利不断释放,使畜牧业 CO₂排放强度下降了 20.38%,但随着国家

对畜牧产品的需求逐年增加,其脱钩状态仍未达到稳定的理想状态。说明还需大力探索生态畜牧业的发展潜力,以便逐渐实现生态、生活、生产“三生”共赢的良好局面。

3.2.2 脱钩状态时空演变特征

为揭示青海省县区的脱钩情况演变轨迹,对青海省 45 个县区的畜牧 CO₂排放量与畜牧经济效益之间的脱钩状态展开研究发现。在 2008—2010 年和 2010—2012 年两个时期(图 3),县区尺度上的畜牧 CO₂排放量与畜牧经济效益之间呈脱钩状态为主,兼有部分连接和负脱钩状态。在两个时期,分别有 31 个(弱脱钩 24 个,强脱钩 7 个)和 42 个(弱脱钩 29 个,强脱钩 13 个)县区处于脱钩状态。强脱钩状态的县区有向青海省东部迁移的趋势。这是由于东部区域属于多种资源富集区,能更高效地进行生态畜牧业建设,使得相较于 2008—2010 年,该区域畜牧碳排放量显著减少。导致 2010—2012 年的青海省畜牧业产值增速明显加快,同时畜牧碳排放强度显著下降(表 3),进而导致脱钩状态发生转移。

据图 3 所示,2012—2014 年间,大部分县区畜牧 CO₂排放量与畜牧经济效益之间依旧维持着脱钩状态,但相比 2010—2012 年,处于脱钩状态的县区减少了 6 个,减少的区域由原来的弱脱钩转变为扩张负脱钩或强负脱钩,使得青海省西南部演变为以负脱钩为主的状态。这是由于自 2011 年底青海省全面启动草原生态保护补助奖励机制后,通过实施“禁牧减畜”和“草畜平衡”等措施,造成了畜牧生产模式、畜群规模和结构发生较大调整,短暂影响了畜牧生产效率^[15]。2014—2016 年间,由于草食畜牧产品价格持续低迷,导致青海省畜牧业产值仅增加了 3.03%,生态畜牧业发展减缓,促使畜牧碳排放量与畜牧经济增长之间属于脱钩状态的县区仅剩余 13 个,而属于负脱钩状态的区域从 2012—2014 的 7 个县区扩张到 31 个县区(扩张负脱钩 20 个、弱负脱钩 3 个、强负脱钩 8 个)。

2016—2018 年间,随着生态畜牧业发展措施和三江源国家公园红利的逐步显现,截至 2018 年,青海省规模养殖比重达到 52%,生态畜牧业合作社达到 961 个,实现牧区和半农半牧区全覆盖,牲畜集约率和草场集约

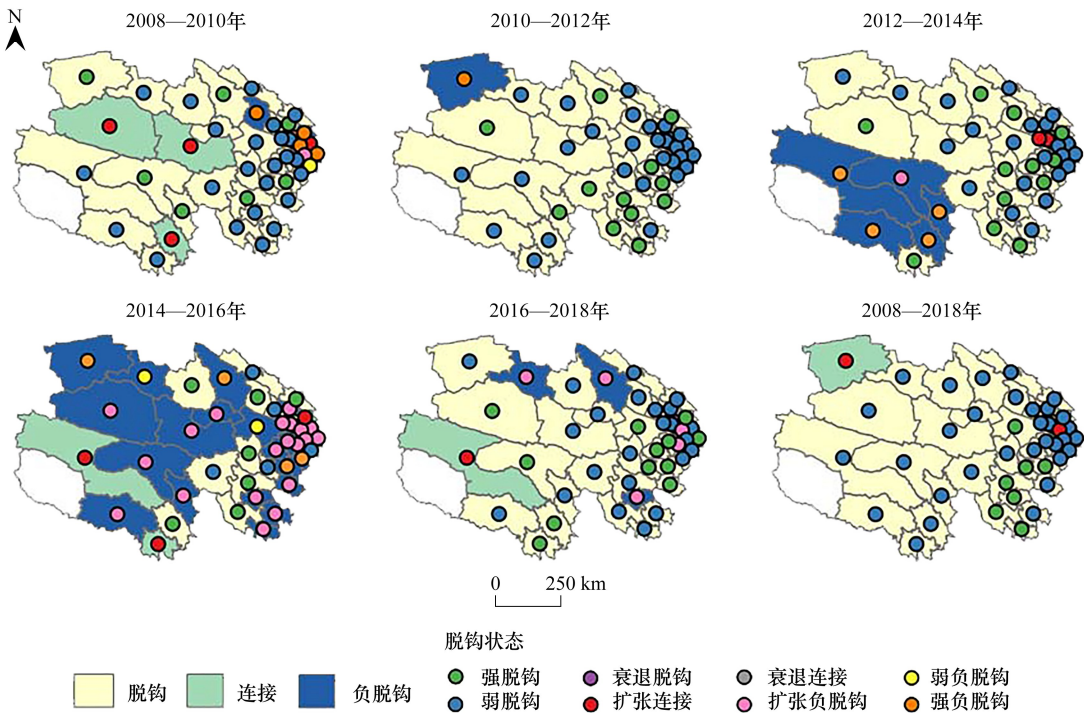


图 3 青海省不同时期的畜牧 CO₂排放量和畜牧经济效益脱钩的空间演变情况

Fig.3 Spatial evolution of the decoupling of livestock CO₂ emissions and livestock economic efficiency in different periods of Qinghai Province

率分别达 67.8% 和 66.9%, 有效提高了青海省畜牧业生产效率, 促进了生态畜牧业的发展。在此期间, 青海省畜牧业碳排放量仅增加了 17.88 万 t, 畜牧业碳排放强度却同比下降了 20.38%。这导致畜牧 CO₂ 排放量与畜牧经济效益之间的关系发生了根本性转变, 大部分负脱钩状态区域转变为脱钩状态(图 3), 脱钩状态区域增至 38 个县区(12 个强脱钩、23 个弱脱钩和 3 个衰退脱钩县区)。

2008—2018 年间, 青海省畜牧 CO₂ 排放量与畜牧经济效益的关系以弱脱钩为主, 且呈现出显著空间分布特征, 其中, 31 个处于弱脱钩状态的县区占据了青海省西部和中部的绝大部分区域, 7 个处于理想的强脱钩状态主要集中在青海省东南部, 脱钩状态在空间上仍不平衡。表明生态畜牧业的建设虽促使了青海省畜牧业发展正从数量型向质量效益型转变, 但其仍有当大的发展潜力。

3.3 畜牧 CO₂ 排放量与畜牧经济效益脱钩过程的驱动因素分析

3.3.1 脱钩过程的驱动因素

2008—2018 年间, d_F 、 d_G 和 d_A 的脱钩弹性分别为 -0.55、-0.09 和 -0.11, 均对脱钩过程具有显著促进作用, d_T 和 d_P 的脱钩弹性为 0.82 和 0.08, 对脱钩过程具有显著的抑制作用, 其中, d_F 和 d_T 分别为主要促进因素和抑制因素。并且在不同时期各因素对畜牧 CO₂ 排放与畜牧经济效益脱钩的影响也存在方向差异(表 5), 详细分析如下:

表 5 2008—2018 年青海省脱钩驱动因素的弹性指数及贡献率

Table 5 Elasticity index and contribution of decoupling drivers in Qinghai Province from 2008 to 2018

时期 Period	d_F		d_G		d_T		d_A		d_P	
	指数值 Index value	贡献率/% Contribution rate	指数值 Index value	贡献率/% Contribution rate	指数值 Index value	贡献率/% Contribution rate	指数值 Index value	贡献率/% Contribution rate	指数值 Index value	贡献率/% Contribution rate
2008—2009	-0.51	-12.25	-1.66	-40.00	0.67	16.17	-0.26	-6.18	-1.05	-25.40
2009—2010	-0.50	-13.59	-1.03	-27.90	1.96	53.10	-0.07	-1.80	0.13	3.61
2010—2011	-0.83	-38.25	0.04	1.97	1.03	47.44	-0.21	-9.66	0.06	2.68
2011—2012	-1.05	-39.15	-0.02	-0.58	1.18	43.85	-0.33	-12.19	0.11	4.23
2012—2013	-0.90	-42.23	-0.07	-3.48	1.01	47.35	-0.07	-3.20	0.08	3.74
2013—2014	0.39	19.36	-0.08	-4.19	1.00	49.66	-0.21	-10.70	0.32	16.09
2014—2015	3.97	25.27	-4.38	-27.89	4.85	30.92	1.53	9.72	-0.97	-6.20
2015—2016	-0.51	-14.91	0.86	25.04	0.58	16.80	-0.95	-27.83	0.53	15.42
2016—2017	-1.22	-55.35	0.13	6.00	0.71	32.26	0.02	0.72	0.12	5.67
2017—2018	-0.80	-39.18	0.32	15.51	0.77	37.30	-0.15	-7.15	0.02	0.85
2008—2018	-0.55	-33.35	-0.09	-5.45	0.82	49.72	-0.11	-6.64	0.08	4.84

d_F : 畜牧业技术效率脱钩弹性 Livestock technical efficiency decoupling elasticity; d_G : 产业结构脱钩弹性 Industrial structure decoupling elasticity; d_T : 农业经济产出脱钩弹性 Elasticity of output decoupling in the agricultural economy; d_A : 农业人口比例脱钩弹性 Elasticity of decoupling of the proportion of the population in agriculture; d_P : 人口脱钩弹性 Elasticity of population decoupling

(1) d_F 和 d_A 对脱钩过程的影响

d_F 和 d_A 的脱钩弹性指数均对脱钩具有明显的正向驱动特征, 多数时间 d_F 的相对贡献率要高于 d_A 。2008—2009 年青海省处于三江源生态保护和建设一期工程中期与生态畜牧业战略前期, 已完成了大量的生态移民、禁牧、休牧和舍饲圈养等工作, 加强了对天然草地的保护。但该时期青海省依旧有着较高的农业劳动力增加幅度, 生态畜牧业发展薄弱, 抗自然风险能力弱, 畜牧业经济增长依旧以粗放型增长为主。导致 d_F 和 d_A 的脱钩弹性分别为 0.51 和 0.26, 对脱钩起明显的抑制作用。2009—2013 年间, 青海省生态畜牧业发展稳步推进, 促进了农牧民收入持续增收, 推动草原生态畜牧业走向了可持续发展道路, 逐渐实现了生态改善、牧业发展、农牧民增收三方共赢, 使得 d_F 和 d_A 对脱钩的影响由抑制转为促进。

2013—2018 年间, 多批次的扶贫易地搬迁工程引起了农业劳动力再分配与调整^[33], 这导致 d_A 对脱钩过程的正负驱动影响呈交替变化。 d_F 对脱钩的影响在 2013—2015 和 2015—2018 年间呈现出相反的趋势,

2013—2015 年间,受到三江源生态保护和建设二期工程启动以及畜牧生产模式调整和牲畜价格低迷的综合影响,畜牧碳排放强度短暂上升,抑制了脱钩过程。2015—2018 年间,随着生态畜牧业发展战略和三江源国家公园建设的推进,草原畜牧业的规模化生产、集约化经营不断增强,逐步实现“禁牧不禁养、减畜不减收”的目标,这使得 d_F 重新对脱钩过程转为促进状态。

(2) d_C 对脱钩过程的影响

d_C 对脱钩过程影响呈现为促进-抑制的交替变化特征。在 2008—2015 年, d_C 对脱钩过程起主要促进作用,原因是畜牧业发展配合了多次生态保护建设工程和措施,对畜牧业生产方式和畜群结构进行了多次优化调整^[15],从而短暂时促进了脱钩过程。然而,畜牧业作为青海地区的支柱型产业,生产效益明显高于种植业,是当地农牧民主要的生计来源。随着经济增长,畜牧业在农业中所占比重逐渐增大,这对脱钩过程起到抑制作用,不利于畜牧业的低碳发展。这导致在 2015—2018 年间, d_C 对脱钩的影响表现出抑制作用(图 4)。

(3) d_T 和 d_P 对脱钩过程的影响

d_T 和 d_P 对脱钩呈现明显的负向驱动效应,其中, d_T 是导致脱钩过程最重要的抑制因素。这是由于随着经济的增长,农民的市场经济意识也在不断加强,提高了农民从事生产经济效益较高的畜牧业积极性。同时,人口数量的逐年增加导致畜牧产品的需求逐年增加,促进了畜牧业 CO_2 排放总量的增加,最终导致 d_T 和 d_P 抑制了畜牧 CO_2 排放量与畜牧经济效益之间的脱钩。

3.3.2 影响脱钩过程因素的空间差异

2008—2018 年间,青海省分别有 43、42 个县区的 d_F 、 d_T 对脱钩过程呈现出促进、抑制作用,并且所对应贡献率绝对值显著大于其他因素。表明县级层面上, d_F 、 d_T 分别是脱钩过程的主要促进、抑制因素(图 4)。 d_C 、 d_A 和 d_P 对脱钩过程的影响作用较小。此外,在不同时期各因素对脱钩过程的效应也有一定空间特征。详细分析如下:

(1) d_F 对脱钩过程影响的空间差异分析

2008—2010 年、2010—2012 年和 2012—2014 年分别有 39、44 和 42 个县区脱钩过程受 d_F 的正向影响,表明 d_F 是县区脱钩的主要动力。2014—2016 年间,青海省分别有 23、22 个县区的 d_F 对脱钩过程呈现为促进、抑制作用。其中处于抑制作用的区域主要集中在青海省东部和中西部,这是由于该区域畜牧养殖规模较大,畜牧产品价格下降严重影响了畜牧经济增长,进而增加了畜牧碳排放强度,不利于脱钩过程。2016—2018 年间,随着草食畜牧产品的价格回升和畜牧业的集约化发展,有 36 个县区的 d_F 对脱钩起促进作用,畜牧业碳的减排效果明显

(2) d_C 对脱钩过程影响的空间差异分析

d_C 对脱钩的抑制效应呈现波动增加趋势。2008—2010 年间,16 个县区的 d_C 对脱钩起抑制作用。随后,2010—2016 年间, d_C 对脱钩呈抑制作用的县区急剧增加,并且这些县区逐渐向与甘肃省接壤的区域转移(图 4),说明随着青海省与甘肃省之间畜牧业的贸易量增加,间接促进了两省相邻区域的农业结构调整,增大了畜牧业产值占农业产值的比重。2016—2018 年间,各县区的 d_C 对脱钩均为负向驱动效应,说明国家公园试点的建立促进了各县区的畜牧业发展。

(3) d_T 对脱钩过程影响的空间差异分析

d_T 对脱钩的贡献率显著大于 d_C 和 d_P ,是抑制脱钩的主要因素。2008—2010 年、2010—2012 年和 2012—2014 年间,分别有 36、41 和 42 个县区的经济产出因素明显抑制了其脱钩。而在 2014—2016 年间,受畜牧业价格持续低位的影响,青海省西部和东部共有 14 个县区的 d_T 对脱钩的作用由抑制转为了促进。2016—2018 年,除了西宁市的城西区 and 城中区外, d_T 对其余各县区的脱钩均呈现明显的负向驱动效应,表明在生态畜牧业发展和国家公园的红利显现过程中,畜牧业生产呈现良好、平稳增长的态势。

(4) d_A 对脱钩过程影响的空间差异分析

受到生态移民和扶贫易地搬迁的影响,各县区的农业劳动力调整较频繁,导致在不同时期 d_A 对脱钩影响

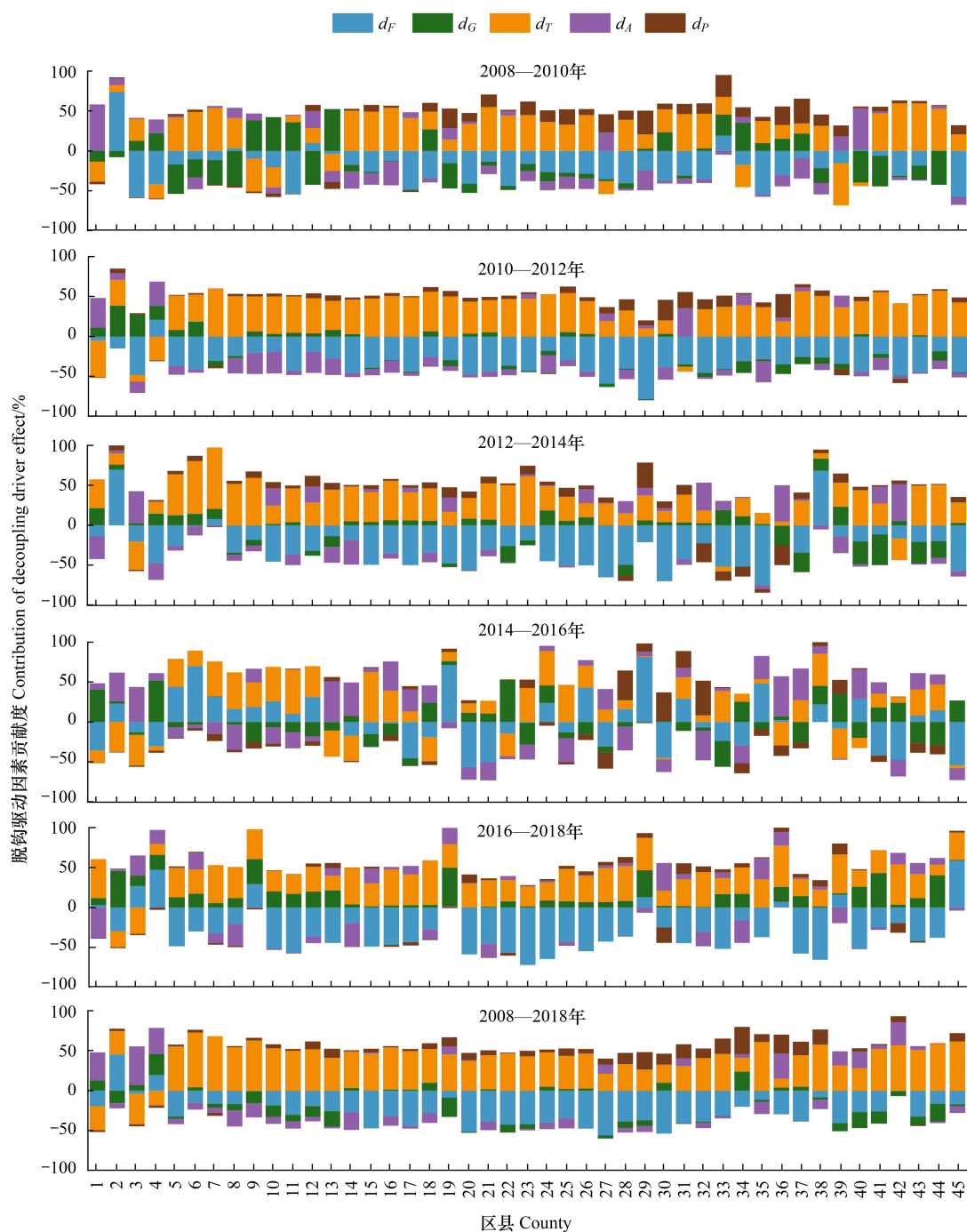


图4 青海省不同地区的脱钩驱动因素的贡献分析

Fig.4 Contribution analysis of decoupling drivers in different regions of Qinghai Province

西宁市:1.城东区;2.城西区;3.城北区;4.城南区;5.大通回族土族自治县;6.湟中区;7.湟源县,海东市;8.乐都区;9.平安区;10.民和回族土族自治县;11.互助土族自治县;12.化隆回族自治县;13.循化撒拉族自治县,海北藏族自治州;14.门源回族自治县;15.祁连县;16.海晏县;17.刚察县,海南藏族自治州;18.同仁市;19.尖扎县;20.泽库县;21.河南蒙古族自治县,海南藏族自治州;22.共和县;23.同德县;24.贵德县;25.兴海县;26.贵南县,果洛藏族自治州;27.玛沁县;28.班玛县;29.甘德县;30.达日县;31.久治县;32.玛多县,玉树藏族自治州;33.玉树市;34.杂多县;35.称多县;36.治多县;37.囊谦县;38.曲麻莱县;海西蒙古族藏族自治州;39.大柴旦行政区;40.格尔木市;41.德令哈市;42.茫崖市;43.乌兰县;44.都兰县;45.天峻县

未表现为明显的空间演变特征。 d_A 对脱钩呈正向驱动效应的县区数量呈先增加后减小的趋势,而呈负向驱动效应的县区数量表现为相反趋势,拐点在2010—2012年,分别有33和12个县区的 d_A 促进和抑制了脱钩过

程。这是由于该时段青海省政府开始对 16.3 万 hm^2 中度以上退化天然草原实施禁牧,对 15.3 万 hm^2 可利用草原实施草畜平衡,使从事畜牧业的人口大量减少,从而降低了畜牧业 CO_2 排放量。2012—2018 年期间,通过着力发展生态畜牧业,促进了畜牧经济不断增长,刺激了农业劳动力回流,填补新型畜牧生产模式的劳动力需求,从而抑制了脱钩。

(5) d_p 对脱钩过程影响的空间差异分析

d_p 对脱钩过程主要表现为微弱的抑制作用。在 2008—2010 年、2010—2012 年和 2012—2014 年分别有 35、39 和 37 个县区的 d_p 对脱钩起抑制作用。2014—2016 年间,由于草食畜牧产品价格持续走低,为增加收入维持生计,外出劳动力人口增加了 23250 人,造成 d_p 对脱钩起抑制作用的县区减少到 27 个。2016—2018 年间,随着畜牧产品价格稳步上升,畜牧业经济得以提高,导致外出务工人员减少了 13128 人,使得对脱钩起抑制作用的县区恢复到 30 个。

4 讨论

4.1 研究进展与局限性

在传统的畜牧养殖模式中,由于牧民受宗教信仰的影响,对牲畜的惜杀、惜售观念和轻商思想较强,更倾向于扩大牲畜数量而非追求经济利益,导致畜群结构不合理,对草食性畜牧业的发展造成了不利影响^[34—35]。随着休牧、禁牧、减畜等生态措施的实施,传统牧民的数量减少,传统畜牧产出下降,改善了当地脆弱的生态环境^[25]。与此同时,随着生态畜牧业的发展,多种生态畜牧业发展模式逐渐取代了传统的畜牧养殖方式。这推动畜牧业的集约化、规模化和产业化,优化了畜群结构、养殖、育种、防疫医疗和饲料加工等方面,提高了畜牧资源的利用效率。这些变化使得畜群结构发生了明显改变,例如,2008—2018 年间,牛、骆驼和绵羊的数量呈增加趋势。而其他牲畜数量呈减少趋势,但总体牲畜数量逐年增长,年均增加 0.60%。这表明畜牧生产方式的转变不仅保护生态环境,也促进了畜牧业的稳步发展,可能是导致畜牧碳排放量和牧业产值逐年增加的原因之一。此外,生态畜牧业模式更侧重于以盈利为主,所受宗教信仰影响小,能有效提高了畜牧经济效益水平。因此,畜牧碳排放和经济效益之间的脱钩不仅仅涉及牲畜数量与产品价格变化之间的博弈,还涵盖畜群结构、畜牧产品、饲料生产、养殖设备和服务等多方面的信息^[36]。深入研究畜牧碳排放和经济效益的脱钩可以帮助理解畜牧业经济发展和生态保护之间的平衡关系,为实现畜牧业的低碳化发展和经济可持续性提供科学依据。

研究结果显示,在生态保护背景下,生态畜牧业的发展促进了畜牧业的集约化和规模化,导致畜牧 CO_2 总排放量呈增加趋势,这与 Zhuang 等^[24]的研究结果一致。但国家生态建设政策也推动了传统畜牧业模式向生态畜牧业的转型,从而显著降低了单位畜牧经济产值的能耗值,促进了畜牧碳排放与畜牧经济效益的脱钩,使得畜牧 CO_2 排放量与经济效益的关系呈现脱钩状态,这与 Bai 等在黄河源区的研究结果相似^[15],表明生态畜牧业建设是保障畜牧业低碳、高质量发展的重要举措。但青海省脱钩状态不稳定,还需采取措施实现畜牧 CO_2 排放与经济效益的进一步脱钩。由脱钩驱动因素分析可知,畜牧业技术效率、产业结构调整 and 农村人口比例是促进畜牧业 CO_2 与经济增长脱钩的重要因素。这与姚成胜等^[30]对中国畜牧业碳排放量变化的影响因素的研究结果相符。同时,李玉波等^[37]对吉林省的畜牧养殖业碳排放与经济增长关系研究中发现,农业结构因素和生产效率因素分别是畜牧养殖碳减排的重要诱因和主要贡献者,农业劳动力的减少也是促进碳减排的重要因素,这与本文的结果也相一致。表明各地区在推动畜牧业碳减排方面采取了相似的政策和措施,其原因在于采用先进的畜牧技术和管理方法能提高生产效率和资源利用率,降低生产成本,减少每单位畜牧产品生产所排放的温室气体量,有助于畜牧业实现经济增长的同时减少碳排放,实现碳排放与经济增长的脱钩^[27—28]。通过优化产业结构调整,畜牧业可以朝着更可持续的方向发展,不仅有助于减少碳排放,还能提高产品附加值,促进畜牧业的经济增长^[15, 37];降低农村人口比例会减少传统粗放型畜牧业养殖规模,促进城镇化,能减少农村资源消耗和环境压力,同时提高农村居民的生活水平和社会福利,有利于实现畜牧 CO_2 排放与

经济增长的脱钩,促进农村的可持续发展^[29, 37]。综上,本研究所取得结果及提出的政策建议具备可供参考的价值。

本研究探讨了青海省畜牧业的 CO₂排放与经济效益之间的脱钩效应及其驱动因素,提出相关的政策建议,可为生态畜牧发展相关政策制定和决策提供科学依据。然而,研究还存在三个局限性:首先,由于数据获取的限制,本文仅使用了 2008—2018 年的时间序列数据进行建模,限制了对畜牧业碳排放与畜牧经济关系更长时间演变情况的分析。后续的研究中需要补充新数据以保持研究的最新进展。其次,数据限制导致在驱动效应分析中未考虑能源结构效应,并且仅利用畜牧碳排放强度来反映畜牧技术效率。但技术效率还涉及如饲养管理、饲料利用效率、疾病控制等,例如在规模化机械饲养所排放的温室气体。这些因素可能影响生产效率和资源利用效率。在后续研究将完善此方面。第三,本文未考虑饲料和畜牧产品生产加工过程中的温室气体排放量,也未对畜牧碳排放量时空变化的驱动效益进行分析,这将是下一步的研究重点。

4.2 政策建议

研究结果表明,青海省畜牧 CO₂与经济效益间的呈现弱脱钩状态,脱钩状态在空间分布不均匀,仍存在较大的脱钩潜力,有必要采取措施继续推动脱钩过程。通过对脱钩现象及其影响因素分析发现,生态畜牧业是保障畜牧业低碳、高质量发展的重要举措;畜牧业技术效率、产业结构调整和农村人口比例是推动畜牧业 CO₂排放量和畜牧经济效益脱钩的重要因素,其中,畜牧业技术效率是最主要因素;国家生态建设政策能推动了传统畜牧业向生态畜牧业的转型,可间接推进畜牧碳排放与畜牧经济效益的脱钩。基于以上结果,提出以下对应具体建议:

(1) 加大政策扶持力度,培育畜牧业低碳发展理念。青海省是我国草地生态畜牧业试验区,探索总结了一些较成熟的可持续生态畜牧发展模式。这提高了畜牧业生产效率,也有效降低了畜牧业碳排放强度。建议将畜牧业低碳发展理念融入生态畜牧业发展范畴,并加大政府政策扶持力度,制定相应奖励和补贴政策,从而激励畜牧养殖户采纳低碳清洁养殖技术。

(2) 加强低碳畜牧养殖技术与畜牧粪便管理,促进畜牧能源有效利用,提高生产效率。同时,在城镇化进程中,调整农业产业结构,降低畜牧碳排放。运用现代技术手段如人工授精、胚胎移植,培育低碳排放的优良畜种,优化饲料结构、使用高效能源的饲料减少肠道发酵产生的甲烷排放。政府设计专项资金,建立有效的粪便管理框架,利用废弃物资源化利用技术^[38],推动“畜牧养殖-粪便-沼气-有机肥-种植业”循环生态模式^[37],减少环境污染和温室气体排放。促进畜牧业合作社创新经营机制,培养龙头企业,推动草地畜牧业向规模化养殖、集约化和信息化经营转型。鼓励畜牧业企业采用清洁能源、节能设备和技术,提高能源利用效率。政府可通过利用丰富的高原畜牧旅游资源,将畜牧场打造成生态旅游景区,促进城市化人口再就业,既能优化农业产业结构,又能促进生态畜牧业的发展,减少碳排放。

(3) 持续推进生态保护工程,依托国家公园制度,提高草地生态系统固碳能力。草地生态系统是青海省境内分布最广、面积最大的生态系统,固碳能力十分可观^[39]。保护草地生态系统既能提高饲草产量,也可间接减少畜牧碳排放总量。建议增加青海省治理退化草地黑土滩比重,提高青海省草地覆盖度,降低畜牧碳排放总量的增速。

5 结论

(1) 2008—2018 年间,随着青海省畜牧经济发展水平的逐步提高,畜牧碳排放强度呈下降趋势。说明在青海省生态保护的大背景下,通过推进生态畜牧业的建设,畜牧 CO₂排放强度下降了 48.05%,实现了畜牧经济的增长与碳排放的减少的双赢局面,使得畜牧业逐渐走上了可持续发展的道路。

(2) 青海省畜牧 CO₂排放与经济效益之间的脱钩弹性为 0.17,呈现较理想的弱脱钩状态,并集中分布在青海省的西部和中部地区。根据脱钩状态的演变情况,生态畜牧业建设是实现畜牧业低碳发展的重要举措,有利于促进畜牧 CO₂排放与经济效益之间的脱钩。但其脱钩状态易受区域自然禀赋、生态保护政策调整和市场

价格的影响,说明青海省仍存在较大的脱钩潜力。建议加大对生态畜牧业建设的政策扶持力度,响应国家的“双碳”目标,加快建设低碳绿色的生态畜牧业高质量发展模式。

(3) 畜牧业技术效率、产业结构和农村人口比例是推动畜牧 CO₂ 排放与经济效益脱钩的重要因素。在国家生态保护政策和生态畜牧业建设的推动下,传统的粗放型草食畜牧业正转向规模化、集约化养殖经营^[35],从而提高了畜牧业技术效率、优化了产业结构、降低了农村人口比例,同时促进了城镇化进程。这有助于实现碳排放与经济增长的脱钩。基于此,为推动青海省畜牧业低碳发展,进一步实现畜牧 CO₂ 排放与经济现己间的脱钩,应加强生态畜牧业的发展,同时重视低碳畜牧养殖技术支持和畜禽粪便管理,继续推动畜牧业集约化、标准化和信息化发展,以提高生产效率。同时,需要调整产业结构,促进农村人口向城镇转移就业,实现区域经济的多元发展。另外,应继续依托国家公园制度推进生态保护工程,增强草地生态系统的碳固定能力^[15],这既能促进畜牧业经济发展,又能间接减少畜牧碳排放。

参考文献 (References):

- [1] Guo J, Zhang Y J, Zhang K B. The key sectors for energy conservation and carbon emissions reduction in China: Evidence from the input-output method. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179: 180-190.
- [2] Gao Y, Gao X, Zhang X H. The 2 °C Global Temperature Target and the Evolution of the Long-Term Goal of Addressing Climate Change—From the United Nations Framework Convention on Climate Change to the Paris Agreement, *Engineering*, 2017, 3: 272-278.
- [3] Cerri C C, Moreira C S, Alves P A, Raucci G S, Castigioni B D, Mello F F C, Cerri D G P, Cerri C E P. Assessing the carbon footprint of beef cattle in Brazil: a case study with 22 farms in the State of Mato Grosso. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2593-2600.
- [4] 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. *生态经济*, 2022, 38(4): 101-107.
- [5] Wang Q, Zhao M, Li R. Decoupling sectoral economic output from carbon emissions on city level: A comparative study of Beijing and Shanghai, China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 126-133.
- [6] Yang J, Zhang T F, Sheng P F, Shackman J D. Carbon dioxide emissions and interregional economic convergence in China. *Economic Modelling*, 2016, 52: 672-680.
- [7] 浦华, 鲁帆, 马莹. “双碳”背景下的中国奶业低碳发展路径研究. *农业经济问题*, 2023, 4: 123-133.
- [8] 陈昱龙, 李锦菲, 吴越强, 张皓媛, 祁乐. 内蒙古 21 年间家畜甲烷与氧化亚氮排放特征. *草业科学*, 2024, 41(3): 527-538.
- [9] Zhuang M H, Gongbuzeren, Li W. Greenhouse gas emission of pastoralism is lower than combined extensive/intensive livestock husbandry: A case study on the Qinghai-Tibet Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 514-522.
- [10] 顾沈怡, 邱子健, 詹永冰, 钱锟, 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. *农业环境科学学报*, 2023, 42(3): 705-714.
- [11] 谢婷, 张慧, 何家军, 刘煜, 黄凯葳, 宋明伟. 华中地区畜牧业温室气体排放特征分析与预测. *中国环境科学*, 2020, 40(2): 564-572.
- [12] Bel G, Rosell J. The impact of socioeconomic characteristics on CO₂ emissions associated with urban mobility: inequality across individuals. *Energy Economics*, 2017, 64: 251-261.
- [13] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [14] Latif K, Raza M Y, Adil S, Kouser R. Nexus between Economy, Agriculture, Population, Renewable Energy and CO₂ Emissions: Evidence from Asia-Pacific Countries. *Journal of Business and Social Review in Emerging Economies*, 2020, 6(1): 261-276.
- [15] Bai Y F, Guo C C, Li S S, Degen A A, Ahmad A A, Wang W Y, Zhang T, Huang M, Shang Z H. Instability of decoupling livestock greenhouse gas emissions from economic growth in livestock products in the Tibetan highland. *Journal of Environmental Management*, 2021, 287: 112334.
- [16] 侯丽朋, 王琳, 钱瑶, 唐立娜. “双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析. *生态学报*, 2022, 42(23): 9663-9676.
- [17] Engo J. Decoupling analysis of CO₂ emissions from transport sector in Cameroon. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101732.
- [18] Wang Q, Su M. The effects of urbanization and industrialization on decoupling economic growth from carbon emission—A case study of China. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101758.
- [19] 李思雅, 梁伟, 吕一河, 纪秋磊, 严建武, 兰志洋. 黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系及其驱动效应分析. *生态学报*, 2023, 43(13): 5417-5431.
- [20] Fan W, Meng M, Lu J, Dong X B, Wei H J, Wang X C, Zhang Q. Decoupling Elasticity and Driving Factors of Energy Consumption and Economic Development in the Qinghai-Tibet Plateau. *Sustainability*, 2020, 12(4): 1326.

- [21] Shi L Y, Vause J, Li Q, Tang L N, Zhao J Z. Decoupling analysis of energy consumption and economic development in China. *Energy Sources Part B Economics Planning and Policy*, 2016, 11(9): 788-792.
- [22] Wang Q, Wang S. A comparison of decomposition the decoupling carbon emissions from economic growth in transport sector of selected provinces in eastern, central and western China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 570-581.
- [23] 李明, 肖海峰. 畜产品进口对畜牧业碳排放的影响及其空间效应. *中国农业大学学报*, 2024, 29(2): 176-191.
- [24] 代子俊, 赵霞, 李冠稳, 王兴春, 庞龙辉. 2000—2015 年青海省植被覆盖的时空变化特征. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2018, 46(7): 54-65.
- [25] 魏晓旭, 魏伟, 刘春芳. 近 40 年青海省草地植被时空变化及其与人类活动的关系. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2541-2552.
- [26] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. International Panel on Climate Change, 2006.
- [27] Gerber, P J, Steinfeld, H, Henderson, B, Mottet, A, Opio, C, Dijkman, J, Falcucci, A, Tempio, G. Tackling Climate Change through Livestock- A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 2013.
- [28] Capper J L. The environmental impact of beef production in the United States: 1977 compared with 2007. *Journal of Animal Science*, 2011, 89(12): 4249-4261.
- [29] 刘杨, 刘鸿斌. 山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析. *中国生态农业学报*, 2022, 30(4): 558-569.
- [30] 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. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 10-19.
- [31] Zhao X, Zhang X, Shao S. Decoupling CO₂ emissions and industrial growth in China over 1993—2013: The role of investment. *Energy Economics*, 2016, 60: 275-292.
- [32] 魏梦升, 颜廷武, 罗斯炫. 规模经营与技术进步对农业绿色低碳发展的影响—基于设立粮食主产区的准自然实验. *中国农村经济*, 2023, 2: 41-65.
- [33] 蓝红星, 黄婉婷, 陈光燕. 易地搬迁脱贫户生计分化、组织嵌入与耕地撂荒行为—来自 24 个大中型集中安置区的证据. *农村经济*, 2023, 3: 10-19.
- [34] 赵好信, 李晓忠, 王保海. 发展农区畜牧业是增加农牧民收入的重要举措. *西藏科技*, 2003(10): 43-48.
- [35] 陈瑶瑶, 徐亢, 刘源, 郭凯文. 草地畜牧业的生态效益与经济效益协同—以青海省玛多县为例. *中国生态农业学报*, 2023, 31(7): 1001-1011.
- [36] 张振龙, 孙慧, 苏洋. 中国西北干旱地区农牧业生态系统碳排放的空间分布与演变趋势. *生态学报*, 2017, 37(16): 5263-5272.
- [37] 李玉波, 李广帅, 张凤恒, 刘金霖. 畜牧养殖业碳排放与经济增长关系-基于吉林省的统计数据. *内江师范学院学报*, 2021, 36(6): 91-98.
- [38] Llonch P, Haskell M J, Dewhurst R J, Turner S P. Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: an animal welfare perspective. *Animal*, 2017, 11(2): 274-284.
- [39] 安立伟, 李志刚. 退化荒漠草地恢复对土壤有机碳及其驱动因子的影响. *生态学报*, 2024(13): 1-13.