

DOI: 10.11686/cyxb2024167

http://cyxb.magtech.com.cn

李军豪, 杨国靖, 裴孝东, 等. 青海省畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的时空演变特征及其影响因素研究. 草业学报, 2025, 34(3): 1-16.

LI Jun-hao, YANG Guo-jing, PEI Xiao-dong, et al. Research into the spatial and temporal changes in patterns of animal husbandry-related CO<sub>2</sub> emission intensities and the factors influencing those emissions in Qinghai Province. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 1-16.

## 青海省畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的时空演变特征及其影响因素研究

李军豪<sup>1,2,3</sup>, 杨国靖<sup>1,2,3</sup>, 裴孝东<sup>2,4</sup>, 石贵<sup>1,2,3</sup>, 王娅<sup>1,3</sup>, 周立华<sup>2,4\*</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 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, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190)

**摘要:** 畜牧CO<sub>2</sub>排放是温室气体的重要来源。本研究分析了青海省2008—2018年畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的时空分布特征, 并利用地理探测器探究了各因素对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度时空演变的影响强度及其交互作用。研究发现: 1) 随着青海省生态保护措施的实施和生态畜牧业建设, 2000—2018年畜牧CO<sub>2</sub>排放强度减少了48.05%, 畜牧业显示出低碳发展的趋势; 2) 2008—2018年间, 畜牧业的CO<sub>2</sub>排放强度重心向西偏南迁移了17.99 km。截至2018年, 畜牧CO<sub>2</sub>排放强度表现出明显的南强北弱格局。这表明青海省南部地区仍具有较大的畜牧CO<sub>2</sub>减排潜力, 急需加快产业结构调整, 促进畜牧业养殖技术升级; 3) 畜牧CO<sub>2</sub>排放强度变化的影响因素从自然、经济、市场需求等综合因素转变为牧业产值、城镇化等经济发展水平指标; 4) 畜牧经济水平与产品结构因子的交互作用逐渐替代自然禀赋与其他因子间的交互作用, 成为影响畜牧CO<sub>2</sub>排放强度空间分布的关键因素。研究结果表明, 青海省通过生态畜牧业建设, 逐渐摆脱了依靠自然禀赋的传统粗放型的畜牧业发展方式, 提高了生产效率, 促进了畜牧CO<sub>2</sub>减排。但其仍存在较大的畜牧CO<sub>2</sub>减排空间, 需继续推动生态畜牧业建设与农村产业结构调整, 加快产业转型和升级, 保障畜牧业的低碳发展。本研究可为青海省畜牧业的低碳可持续发展, 以及我国制定畜牧业减排的政策提供科学参考。

**关键词:** 青海省; 畜牧业; 排放强度; 地理探测器; CO<sub>2</sub>减排

## Research into the spatial and temporal changes in patterns of animal husbandry-related CO<sub>2</sub> emission intensities and the factors influencing those emissions in Qinghai Province

LI Jun-hao<sup>1,2,3</sup>, YANG Guo-jing<sup>1,2,3</sup>, PEI Xiao-dong<sup>2,4</sup>, SHI Gui<sup>1,2,3</sup>, WANG Ya<sup>1,3</sup>, ZHOU Li-hua<sup>2,4\*</sup>

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:** Livestock CO<sub>2</sub> emissions constitute a significant source of greenhouse gases. This study analyzed the spatial and temporal distribution patterns of livestock CO<sub>2</sub> emissions intensity in Qinghai Province from 2008 to 2018. In this study, a geographical model was utilized to explore the intensity of the impact and the interactions of various factors on the spatial and temporal changes in livestock CO<sub>2</sub> emission intensities. The study found that: 1)

收稿日期: 2024-05-07; 改回日期: 2024-07-15

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)“创建生态草业科技体系”子课题“牧区畜牧资源调查与评估”(XDA26010301)和第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0404)资助。

作者简介: 李军豪(1994—), 男, 河南许昌人, 在读博士。E-mail: lijunhao@nieer.ac.cn

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lhzhou@casisd.cn

With the implementation of ecological protection measures and the formulation of ecological animal husbandry practices in Qinghai Province, the intensity of animal husbandry CO<sub>2</sub> emissions decreased by 48.05% from 2008 to 2018, and the animal husbandry industry showed a trend towards development of a low-carbon status; 2) Between 2008 and 2018, the center of gravity of CO<sub>2</sub> emission intensity of animal husbandry migrated westward and southward by 17.99 km, and as of 2018, the CO<sub>2</sub> emission footprint of the livestock industry showed an obvious pattern of stronger intensity in the south and weaker intensity in the north. This indicates that the southern region of Qinghai Province still has a large potential for livestock CO<sub>2</sub> emission reduction, and there is an urgent need to accelerate agricultural industrial structure adjustment and promote the upgrading of livestock farming technology; 3) The factors influencing the change in livestock CO<sub>2</sub> emission intensity have shifted from combined factors such as the natural resource endowment, economy, and market demand to economic development indicators such as livestock output value and urbanization; 4) The interaction between the economic level of livestock and product structure factors has gradually replaced the interaction between natural resource endowment and similar factors, and the former is now becoming the key factor affecting the spatial distribution of livestock CO<sub>2</sub> emission intensity. The results of the study indicate that Qinghai Province, through the development of ecologically improved livestock farming practices, has gradually moved away from the traditional extensive mode of livestock development relying on natural endowments, has improved production efficiency, and has achieved carbon emission reduction in the livestock industry. However, there still exists considerable space for reducing carbon emissions in the livestock industry, requiring continued promotion of ecologically improved livestock farming practices and rural industrial structure adjustment, together with acceleration of industrial transformation and upgrading, to ensure the development of a low-carbon livestock industry. This study provides scientific analysis to assist the formulation of livestock emission reduction policies as part of the development of a sustainable, low-carbon livestock industry in Qinghai Province and in China.

**Key words:** Qinghai Province; animal husbandry; emission intensity; geographical detector; CO<sub>2</sub> emission reduction

随着温室气体排放的不断增加,全球正面临着越来越严重的气候问题,如全球变暖等<sup>[1-2]</sup>。畜牧业是全球温室气体排放的重要来源,对气候变化和环境影响至关重要<sup>[3]</sup>。据联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)估算数据,畜牧业的温室气体排放量约占全球总排放的18%<sup>[4]</sup>。预计到2050年,全球对牲畜产品的需求将增加一倍<sup>[5]</sup>,这将会增加温室气体排放,从而使全球畜牧业的低碳发展面临严峻挑战<sup>[6]</sup>。因此,如何有效降低畜牧温室气体排放已成为全球畜牧业生产国亟须解决的问题。

为应对温室气体排放引起的气候变化,我国政府提出了2030年实现“碳达峰”和2060年实现“碳中和”的目标<sup>[7]</sup>。同时,我国也是畜牧业生产大国,其畜禽产品年产量稳居世界第一<sup>[8]</sup>。近年来,得益于农业政策的扶持和消费需求的增长,中国畜牧业呈现出更强劲的发展势头<sup>[9]</sup>。然而,畜牧业的快速发展也造成了大量的温室气体排放,根据《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》<sup>[10]</sup>,我国畜牧业占农业温室气体排放量的54.3%,这对于实现“双碳”目标造成了严重阻碍<sup>[11]</sup>。因此,深入了解畜牧业碳排放的现状、特征及其影响因素,对于推进畜牧业的可持续发展,在实现“双碳”目标下缓解碳减排压力至关重要。

FAO公布数据表明,全球畜牧部门的温室气体减排潜力高达30%<sup>[12]</sup>。为推动畜牧业的温室气体减排,畜牧业碳排放的问题备受学界的关注。长期以来,学者在畜牧碳排放的测算、时空演变、影响因素、产生机理等方面的研究成果较为丰富<sup>[13-14]</sup>,但关于畜牧碳排放的研究仍存在亟须改进之处。一是较少有从畜牧CO<sub>2</sub>排放强度探究畜牧业减排机理的研究。CO<sub>2</sub>排放强度一般指单位产值的CO<sub>2</sub>排放量<sup>[15]</sup>,探究CO<sub>2</sub>排放强度更可以反映碳减排目标的实现情况<sup>[16]</sup>。CO<sub>2</sub>排放强度的相关研究主要集中在宏观区域层面,如刘华军等<sup>[15]</sup>的研究结果表明中国CO<sub>2</sub>排放强度的地区差异呈增大趋势。李虹等<sup>[16]</sup>通过预测二氧化碳排放强度,提出了“十三五”减排路径建议。

然而,目前针对不同产业CO<sub>2</sub>排放强度的研究较少。在畜牧碳减排的相关研究中,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度常表征畜牧业生产效率指标,参与探究畜牧碳排放量演变的内在机理。Bai等<sup>[6]</sup>研究发现畜牧业CO<sub>2</sub>排放强度的降低有助于抑制碳排放的持续增长。由此可见,畜牧业CO<sub>2</sub>排放强度的降低可能意味着在畜牧业生产过程中采用更环保的方式,能更有效地利用资源和能源,从而降低温室气体排放。因此,监测和改善畜牧业CO<sub>2</sub>排放强度不仅有助于减少温室气体排放,提高畜牧业的可持续性和竞争力,也能补充扩展畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的相关研究。二是现有研究常采用动态数据面板模型(dynamic data panel models, GMM)<sup>[17]</sup>、Kaya恒等扩展模型<sup>[6]</sup>、对数平均迪氏分解指数法(logarithmic mean division index, LMDI)模型<sup>[6,18]</sup>等方法来探究畜牧业碳排放量变化的影响因素。如姚成胜等<sup>[17]</sup>利用动态数据面板模型(GMM)对2000—2014年中国畜牧业碳排放量变化的影响因素进行了分析,表明畜牧业生产效率是抑制中国畜牧业碳排放持续增长的最重要因素。陈瑶等<sup>[18]</sup>采用LMDI模型分析了我国畜牧经济效益与CO<sub>2</sub>之间脱钩的影响因素,得出经济因素是影响我国畜牧业CO<sub>2</sub>排放的最大诱因。这些方法有助于较好地理解各影响因素对畜牧业碳排放的影响。但以上研究却都忽略了因素之间的交互作用对畜牧碳排放量变化的影响,通过研究影响因子之间的协同效应能够提供更全面、更系统的视角,有助于制定更加有效、经济和可持续的碳减排策略,推动畜牧业向绿色低碳方向发展。三是目前畜牧碳排放的研究区域多集中在省、市等尺度<sup>[14,17]</sup>,鲜有县域尺度的畜牧业碳排放的相关研究。然而,从县区尺度开展畜牧CO<sub>2</sub>排放强度研究,能够更好地反映地方特色和实际情况,有助于识别出具体县区内的碳排放影响因素和潜在问题。政府和决策者可以根据不同县区的实际情况来制定畜牧业碳减排政策和管理措施,从而更好地理解 and 解决当地畜牧业碳排放问题,促进地方化减排措施的实施和推广。鉴于此,本研究对2008—2018年青海省45个县区的畜牧业CO<sub>2</sub>排放强度进行了测算,全面分析了其时空演变特征。同时,运用地理探测器探究了各因子及其交互作用对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响程度与作用机制,以期更好地推动青海省畜牧业的低碳发展,为我国畜牧业温室气体减排政策的制定提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

青海省位于我国西北部内陆腹地(31°39′—39°11′ N, 89°25′—103°04′ E)<sup>[19]</sup>,面积约为7.24×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。青海省下辖2个地级市、6个自治州,45个县级行政区(图1)。其属于高原大陆性气候,年均气温为-5.7~8.5℃,年降水量自东南向西北逐渐减少,大部分区域的年降水量在400 mm以下<sup>[20]</sup>。青海省是我国的五大牧区之一,植被类型丰富多样,天然草地面积约3.39×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,可利用面积3.87×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,为畜牧业发展提供了优越的条件<sup>[20]</sup>。2022年牛出栏205.70万头,羊出栏676.08万只,牧业产值达302亿元。为保障畜牧业可持续发展,2008年青海省开始积极推动生态畜牧业的建设,旨在提高畜牧业生产效率,推动畜牧业低碳化发展。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 畜牧CO<sub>2</sub>排放的测算** 畜牧养殖业的温室气体主要来自牲畜肠道发酵和牲畜粪便所引起的甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)排放<sup>[21]</sup>。依据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)评估报告和相关研究,牛、马、驴、骡、骆驼、猪、羊等动物是温室气体主要排放源。因此,根据青海省的畜种类型,选取如表1所示的畜种作为畜牧CO<sub>2</sub>排放来源,并且依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》<sup>[22]</sup>和《省级温室气体清单编制指南(试行)》<sup>[23]</sup>颁布的温室气体排放系数进行测算<sup>[24]</sup>。为测算畜牧CO<sub>2</sub>排放总量,本研究采用第4次IPCC评估报告提出的1 kg CH<sub>4</sub>=25 kg CO<sub>2</sub>和1 kg N<sub>2</sub>O=298 kg CO<sub>2</sub>的转换系数测算畜牧CO<sub>2</sub>排放量<sup>[6]</sup>,公式如下:

$$C_i = C_{CH_4} + C_{N_2O} = 25 \times \sum_{i=1}^{10} u_i \times ef_{CH_4(i)} + 298 \times \sum_{i=1}^{10} u_i \times ef_{N_2O(i)}$$

式中: $C_i$ 为畜牧养殖的CO<sub>2</sub>排放总量; $C_{CH_4}$ 和 $C_{N_2O}$ 分别为来自牲畜排放的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O折算后的畜牧养殖碳总量; $u_i$ 为每年饲养的第*i*种的牲畜数量; $ef_{CH_4(i)}$ 和 $ef_{N_2O(i)}$ 分别为第*i*种牲畜的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放因子。

**1.2.2 畜牧CO<sub>2</sub>排放强度测算** 畜牧CO<sub>2</sub>的排放强度表示畜牧业生产效率,能反映畜牧业是否正朝着低碳的方向发展<sup>[6,12]</sup>,其中CO<sub>2</sub>的排放强度值越小则表明畜牧业生产效率越高<sup>[6,25]</sup>。公式如下:

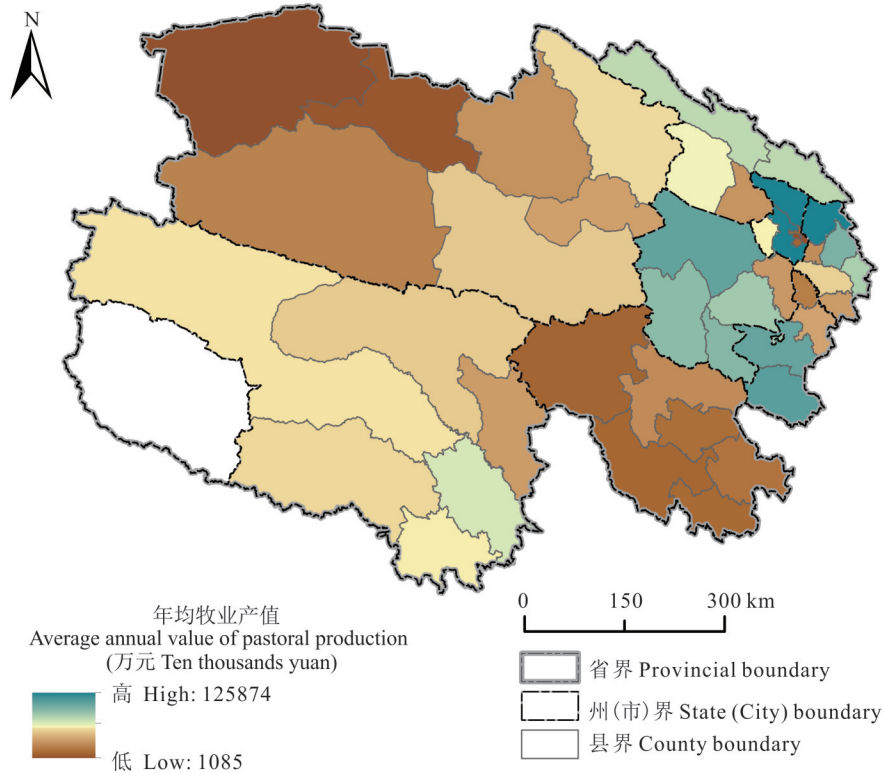


图1 青海省行政区划及其2008–2018年年均畜牧业产值分布

Fig. 1 The administrative division of Qinghai Province and its distribution of animal husbandry output value in 2008–2018

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)3266号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2019)3266 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

$$D_{c(i)} = \frac{C_{t(i)}}{\text{LGDP}(i)}$$

式中:  $D_{c(i)}$  为第  $i$  年的畜牧  $\text{CO}_2$  排放强度;  $C_{t(i)}$  为第  $i$  年畜牧养殖的  $\text{CO}_2$  排放总量;  $\text{LGDP}(i)$  为第  $i$  年的牧业生产总值。

**1.2.3 标准差椭圆分析** 标准差椭圆分析 (standard deviation ellipse, SDE) 是一种衡量地理要素分布特征和时空演变的空间统计方法,能够反映要素在空间上的方向分布以及在区域内发展的总体趋势,在空间分布格局方面的研究应用广泛<sup>[26–27]</sup>。本研究利用标准差椭圆分析青海省畜牧碳排放强度的空间分布中心性、展布性、方向性和空间形态等整体性特征。

**1.2.4 地理探测器** 地理探测器包括因子探测器、交互探测器、风险探测器和生态探测器等4个模块,是探测空间分异性、揭示因变量空间分布特征背后驱动力的空间统计方法<sup>[28]</sup>。本研究利用地理探测器

的因子探测器和交互探测器解析各因子及因子相互作用对畜牧碳排放强度空间分布的影响。因子探测器能用于探测各驱动因子对畜牧碳排放强度空间分异的解释程度<sup>[29]</sup>,用  $q$  值度量,公式如下:

表1 主要牲畜品种的甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )温室气体排放因子系数

Table 1 Greenhouse gas emission factors for methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) for major livestock breeds ( $\text{kg}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ )

牲畜类型 Livestock type	胃肠发酵 $\text{CH}_4$ 的年 排放因子 Annual emission factor for gastrointestinal fer- mentation $\text{CH}_4$	粪便管理 $\text{CH}_4$ 排放因子 $\text{CH}_4$ for manure man- agement	粪便管理 $\text{N}_2\text{O}$ 排放因子 $\text{N}_2\text{O}$ for manure management
马 Horse	18.000	1.090	0.330
驴 Donkey	10.000	0.600	0.188
骡 Mule	10.000	0.600	0.188
骆驼 Ninny	46.000	1.280	0.330
猪 Pig	1.000	1.380	0.195
奶牛 Milk cow	99.300	5.930	1.447
黄牛 Cattle	85.300	1.860	0.545
牦牛 Yak	85.300	1.860	0.545
山羊 Goat	6.700	0.320	0.074
绵羊 Ovine	7.500	0.280	0.074

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中:  $q$  值为影响因变量的解释度, 取值范围为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越大, 则解释度越强;  $h=1, 2, \dots, L$  为因子  $X$  的分层;  $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的样本数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $h$  和全区域  $Y$  的离散方差。

交互探测器可以识别不同自变量因子间的交互作用对因变量的解释程度<sup>[28]</sup>。表 2 为因子之间的交互因子作用关系及其判断依据。

表 2 交互作用类型与判断依据

Table 2 Factor interaction type and basis for determination

交互作用类型 Interaction type	判断依据 Judgment basis
非线性减弱 Reduction of nonlinearity	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱 Single factor nonlinear weakening	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双因子协同增强 Two-factor enhancement	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强 Enhancement of nonlinearity	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
相互独立 Mutual independence of factors	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

注:  $X_1$  和  $X_2$  代表畜牧  $\text{CO}_2$  排放强度的影响因子, 符号“ $\cap$ ”表示  $X_1$  和  $X_2$  之间的交互作用。

Note:  $X_1$  and  $X_2$  represent the influence factors of livestock  $\text{CO}_2$  intensity, and the symbol “ $\cap$ ” indicates the interaction between  $X_1$  and  $X_2$ .

**1.2.5 影响因子选择** 畜牧业的发展受区域自然条件的制约和影响, 这必然导致畜牧业  $\text{CO}_2$  排放强度的空间分布差异性<sup>[30]</sup>。本研究选取了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、年降水量和年均气温作为自然因素, 探讨它们对畜牧业  $\text{CO}_2$  排放强度的影响, 以揭示其关系并为区域减排策略提供科学依据。畜牧业经济发展水平是指区域畜牧业在经济方面的发展程度, 畜牧业经济发展水平的提高可以促进畜牧业现代化和技术创新<sup>[31]</sup>, 提高畜牧业生产效率, 降低畜牧产值的  $\text{CO}_2$  排放量, 以达到畜牧  $\text{CO}_2$  减排的目的。由于青海省是我国生态环境重点保护区, 随着生态移民、易地扶贫搬迁等生态保护措施的逐步实施, 青海省从事畜牧业的人口显著减少, 城镇化进程明显加快, 对传统畜牧业的经济发展产生巨大影响。故在构建畜牧业经济发展水平指标时, 本研究将城镇化与牧业人口占比指标亦归纳为畜牧经济发展程度的评价指标。畜牧业现代化程度指畜牧业在生产、管理、营销等方面运用的先进设备、技术和管理模式。提高现代化程度能有效提升产品质量, 降低生产成本, 减少在畜牧业生产、经营和销售过程中产生的环境污染和  $\text{CO}_2$  排放量<sup>[32]</sup>。因此, 本研究基于数据可得性原则, 选取了牧草收割机、剪毛机及农用运输车等现代机械化设备。同时, 统计了畜牧业企业与合作社的数量, 以此表征当前较先进的畜牧管理方式。通过以上指标综合反映畜牧业的现代化程度。产品结构是指区域畜牧业产品的种类和比例, 不同产品对畜牧  $\text{CO}_2$  排放强度的影响各异, 一般来说生产肉类和奶制品的  $\text{CO}_2$  排放强度相对较高。合理调整畜牧业产品结构可以降低畜牧业的碳排放强度<sup>[33-34]</sup>。因此, 本研究从自然因素、畜牧业经济发展水平、现代化程度和产品结构 4 个方面, 选取了 16 个影响因子探究畜牧  $\text{CO}_2$  排放强度时空分布的驱动机制(表 3)。

### 1.3 数据来源与处理

由于畜牧相关的县域统计数据难以获取, 为确保研究的科学性, 遵循数据可获得性原则, 本研究基于中国青海省农业农村厅的 2008—2018《青海省农牧业统计手册》<sup>[35-45]</sup> 开展研究。该手册提供了畜种、畜牧业产值、农林牧渔总产值、牧草收割机、剪毛机、农用运输车、畜牧产品产量以及人口等数据。企业与合作社数据来源于天眼查数据(<https://www.tianyancha.com/>)。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 NDVI、年降水量、年均气温等自然因子数据与县级、省级行政边界等矢量数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。本研究首先以 2008 年作为基期, 利用畜牧业产值指数、农林牧渔总产值指数获得平减指数, 分别对牧业产值和农林牧渔总产值进行了定基处理, 消除了通货膨胀对研究结果的影响。

接着基于畜种数据及其温室气体排放系数(表1)测算出的畜牧CO<sub>2</sub>排放总量,获得畜牧CO<sub>2</sub>排放强度。随后,利用标准差椭圆对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的时空特征进行分析。最后,运用地理探测器分析了各因素对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响程度及其交互作用。

表3 畜牧CO<sub>2</sub>排放强度影响因子

Table 3 Factors affecting CO<sub>2</sub> emission intensity of livestock

类型 Type	探测因子 Detecting factor	指标 Indicator
自然因素 Natural factor	X <sub>1</sub>	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)
	X <sub>2</sub>	年降水量 Annual precipitation
	X <sub>3</sub>	年均气温 Annual average temperature
畜牧业经济发展水平 Level of economic development of livestock	X <sub>4</sub>	牧业产值 Value of livestock production
	X <sub>5</sub>	城镇化 Urbanization
	X <sub>6</sub>	农村人均收入 Rural income per person
	X <sub>7</sub>	农业产业结构 Agricultural industrial structure
	X <sub>8</sub>	牧业人口占比 Percentage of pastoral population
畜牧业现代化程度 Degree of modernization of animal husbandry	X <sub>9</sub>	牧草收割机 Forage harvester
	X <sub>10</sub>	剪毛机 Shearing machine
	X <sub>11</sub>	农用运输车 Agricultural transport vehicle
	X <sub>12</sub>	畜牧业企业与合作社数量 Number of livestock enterprises and cooperatives
产品结构 Product structure	X <sub>13</sub>	肉类总产量 Total meat production
	X <sub>14</sub>	奶类总产量 Total milk production
	X <sub>15</sub>	山羊绒产量 Cashmere output
	X <sub>16</sub>	羊毛产量 Wool output

## 2 结果与分析

### 2.1 畜牧业产值与CO<sub>2</sub>排放强度变化分析

2008—2018年间,青海省牧业产值增长136.92%,而畜牧CO<sub>2</sub>排放强度下降了48.05%,表明随着青海省畜牧经济的发展,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度总体呈下降的趋势(图2)。2008—2013年间,牧业产值同比增加了74.19%,年均增速约为12.36%;而畜牧CO<sub>2</sub>排放强度则呈下降趋势,同比下降了38.51%。2013—2016年间,受一系列生态措施实施的影响,畜牧业经济增长放缓,仅增加了7.41%。此时畜牧CO<sub>2</sub>排放强度同比下降了6.11%,表明单位畜牧经济产值的能耗仍呈下降趋势。2016—2018年间,牧业产值同比增加26.63%,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度则同比下降了20.38%,呈下降趋势。说明青海省通过生态畜牧业建设,进一步提高了畜牧业的生产效率,促进了畜牧业低碳发展。综合来看,青海省通过生态畜牧业建设,有效降低了畜牧CO<sub>2</sub>排放强度,青海省畜牧业逐渐走上了低碳可持续道路。

2008—2018年间,在青海省大部分地区,随着畜牧经济发展水平的提高,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度呈下降趋势(图3)。州市尺度上,各州牧业产值均明显增加,海西蒙古族藏族自治州的牧业产值增幅最大,达到了207%。而各州畜牧CO<sub>2</sub>排放强度均呈减小趋势,尤其是海北藏族自治州的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度降幅最大,从2008年的28.29 t·万元<sup>-1</sup>降低到2018年的11.23 t·万元<sup>-1</sup>。县区尺度上,除城东区、城西区 and 城北区之外,青海省其余各县区的牧业

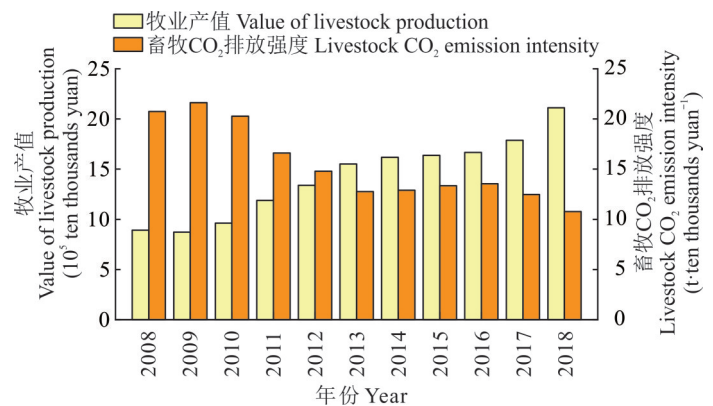


图2 2008—2018年青海省畜牧业产值与CO<sub>2</sub>排放强度变化情况

Fig. 2 The changes of animal husbandry output value and CO<sub>2</sub> emission intensity in Qinghai Province from 2008 to 2018

产值均呈增长趋势。其中,位于海西蒙古族藏族自治州的乌兰县、都兰县、德令哈市和大柴旦行政区的牧业产值增幅较大,年均增速达 20% 以上。相对应的,西宁市城中区、城东区 and 城西区的畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度均呈增加趋势,而其余县区畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度均呈减小趋势。其中,大柴旦行政区、达日县、泽库县、门源回族自治县和贵南县的畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度降幅较大,年均降幅可达 6% 以上。

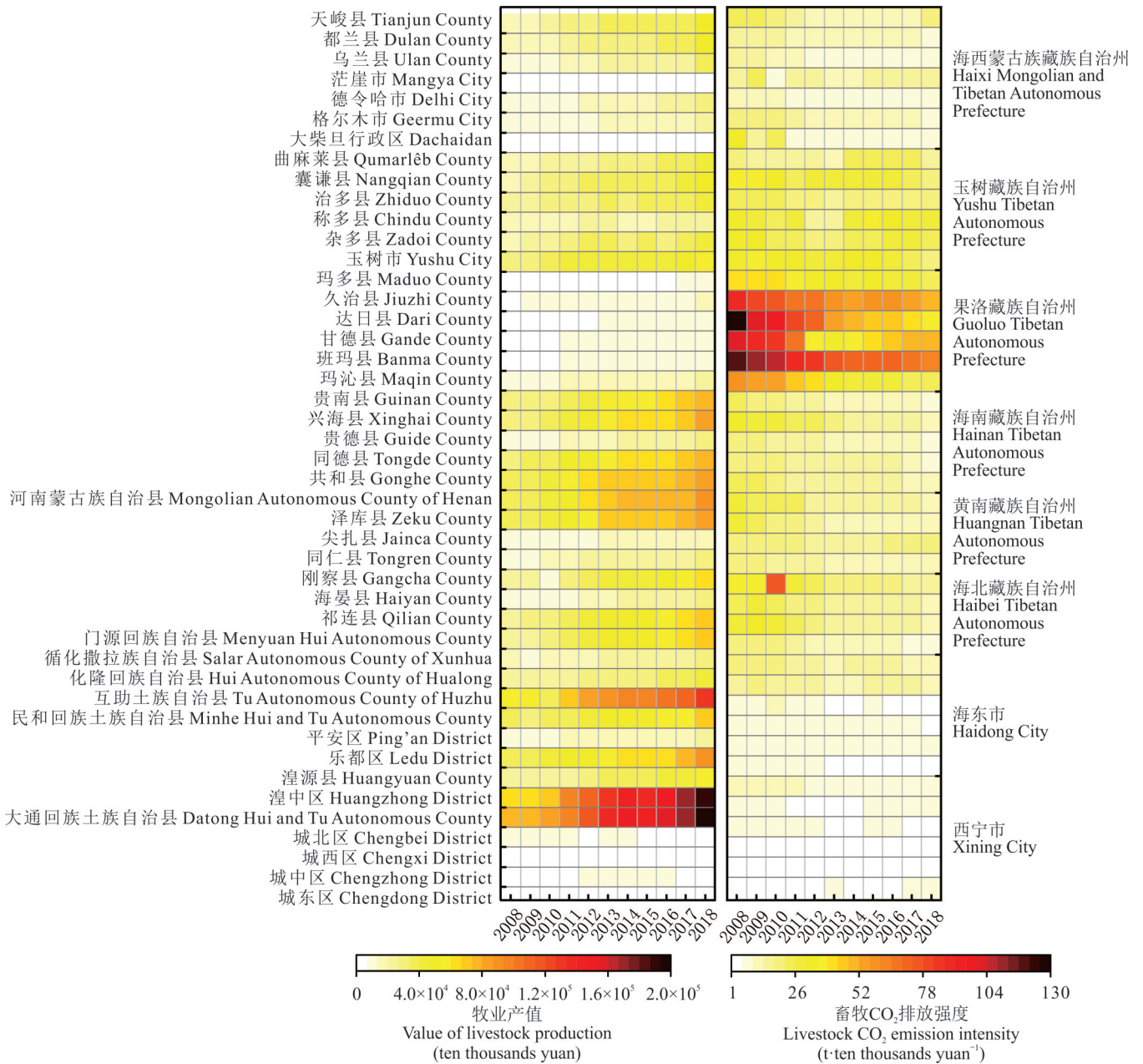


图 3 2008–2018 年青海省各县域的畜牧业产值与 CO<sub>2</sub> 排放强度变化情况

Fig. 3 The changes of animal husbandry output value and CO<sub>2</sub> emission intensity in counties of Qinghai Province from 2008 to 2018

## 2.2 畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度时空演变特征

### 2.2.1 畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的时空分布特征

2008 年青海省畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度呈现自西北向东南阶梯式增强的分布格局(图 4A)。全省分别有 24.44% 和 40.00% 的县域呈现出低和较低畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度,主要交错分布在青海省北部。处于中等和高等级畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的县区集中在青海省南部,其中,在果洛藏族自治州区域,除玛多县之外的其余县域畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度均处于高值。2008–2013 年间,低等级畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的县区数

量增加了17个,果洛藏族自治州的达日县、久治县、甘德县和玛沁县畜牧CO<sub>2</sub>排放强度也均有不同程度的下降(图4B)。表明青海省通过生态畜牧业建设,鼓励推行“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,提高了畜牧业的生产效率,降低了畜牧CO<sub>2</sub>排放强度。

截至2018年,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度分布呈现出明显的南北分异格局,北部县域的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度总体保持在低水平范畴(图4C)。其中,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度处于低等级的县区占青海省总县区的68.89%。南部的玉树藏族自治州畜牧CO<sub>2</sub>排放强度表现为较低水平,果洛藏族自治州的玛多县、玛沁县和达日县的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度也呈下降趋势。综合来看,2013—2018年间,青海省畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的降幅减缓,这可能是由牲畜市场行情低迷与生态保护措施综合导致的。

2008—2018年间,青海省畜牧CO<sub>2</sub>排放强度由西北向东南阶梯式增强的状况转变为明显的南北分异格局。畜牧CO<sub>2</sub>排放强度呈逐年降低的趋势,但少部分县域的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度依旧较高,存在较大的减排压力。例如:班玛县的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度始终处于高值范围,玉树藏族自治州和果洛藏族自治州大部分县域的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度也均在较低水平之上,这是由于这些县域的经济结构单一,对传统畜牧业的依赖程度较大,在保障经济增长的同时难以快速转变为生态畜牧业发展模式,短期内较难快速实现产业结构调整及技术升级,这也意味着这些县区存在较大的CO<sub>2</sub>减排潜力。

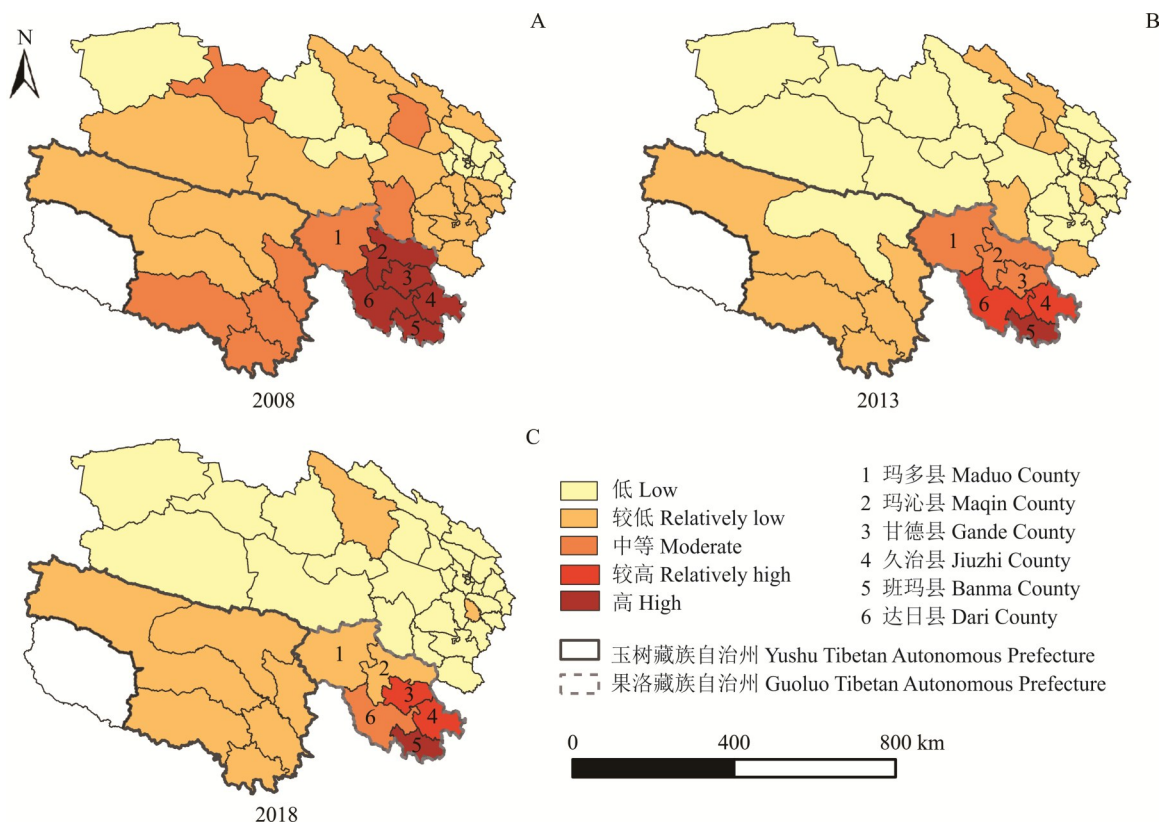


图4 青海省畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的空间分布格局变化情况

Fig. 4 The change of spatial distribution pattern of livestock CO<sub>2</sub> emission intensity in Qinghai Province

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)3266号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2019)3266 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

**2.2.2 畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的重心迁移和空间格局变化** 2008—2018年间,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度重心位于99.06°—99.41° E, 34.87°—35.04° N(图5),大致位于青海省东南部。并且该重心一直位于青海省几何中心(98.20° E, 35.60° N)的东南方,远远偏离几何中心。说明青海省东南部的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度较高,其生态畜牧业发展进程较缓,产业结构和畜牧业发展模式亟须转变。

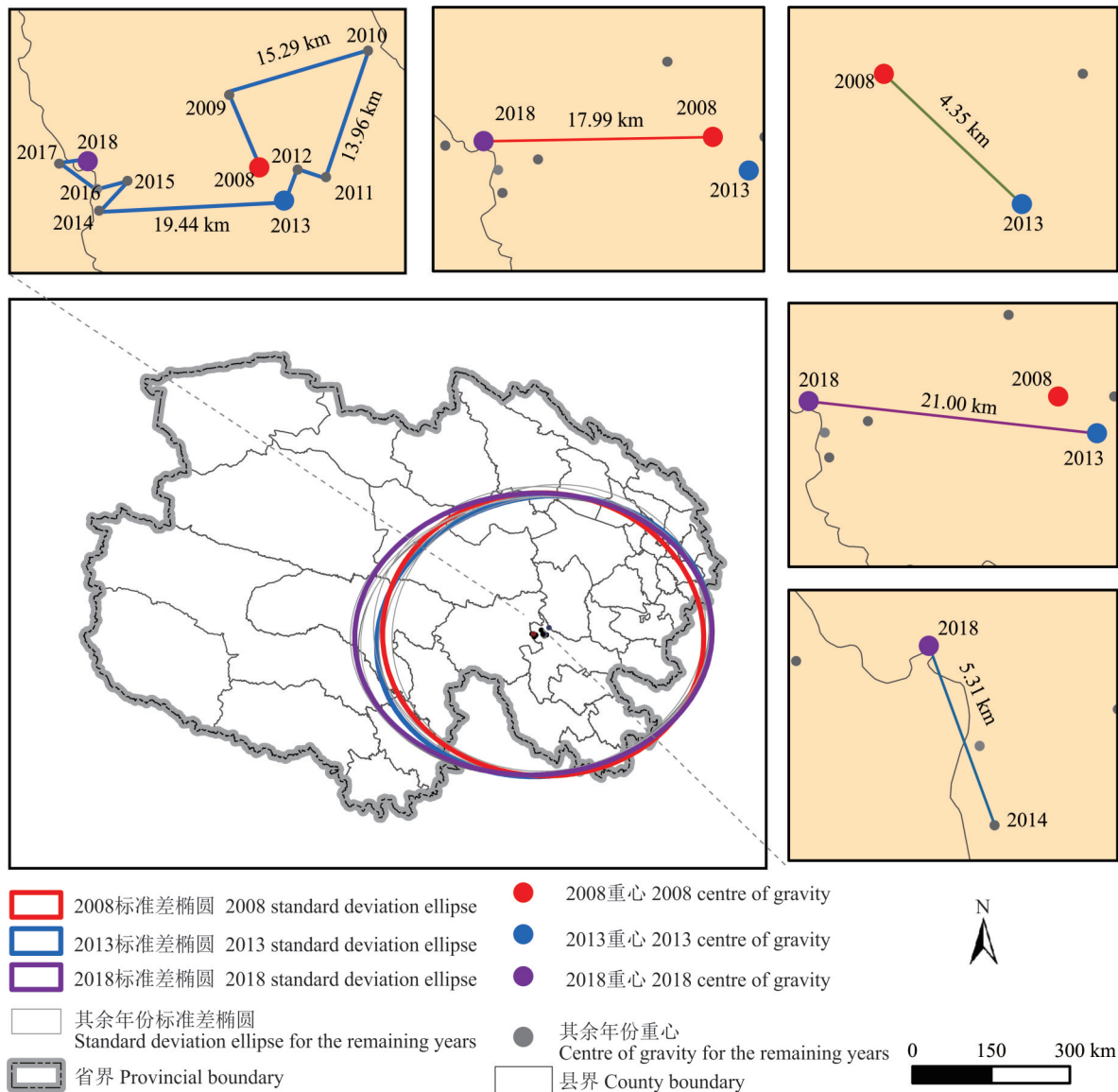


图 5 青海省畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的重心迁移与标准差椭圆变化情况

Fig. 5 The center of gravity migration and standard deviation ellipse change map of livestock CO<sub>2</sub> emission intensity in Qinghai Province

基于自然资源部标准地图服务网站 GS (2019) 3266 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2019) 3266 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

综合来看, 2008—2018 年间, 青海省畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的重心整体向西偏南方向迁移了 17.99 km, 并呈现出明显的阶段性特征。2008—2013 年间, 重心迁移波动性较大, 但仅向东南方向迁移了 4.35 km。其中, 2009—2010 年由于青海省东北部畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度有所增加, 重心大幅向东北方向迁移了 15.29 km。之后, 2010—2011 年间, 由于海西蒙古藏族自治州畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度下降了 15.60%, 导致重心向西南方向迁移了 13.96 km。而在 2013—2014 年间, 由于曲麻莱县畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度增加了 124.37% (图 3), 重心急剧向西偏南方向移动了 19.44 km。随后, 畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度重心呈缓慢向北迁移趋势, 截至 2018 年, 仅向西北方向迁移了 5.31 km, 这说明该阶段青海省各县域的畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度基本保持相对稳定。

根据标准差椭圆分析 (表 4), 2008—2018 年椭圆面积呈增长趋势, 由 2008 年 259463.40 km<sup>2</sup> 增加到 2018 年的 287520.60 km<sup>2</sup>, 表明畜牧业 CO<sub>2</sub> 排放强度呈空间扩散的态势。其中, 2008 和 2009 年畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的方位角分别为 90.29° 和 89.82°, 2008—2009 年标准差椭圆的长轴和短轴均呈增加趋势, 说明畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度在空间分

布呈“西北—东南”的变化趋势,并且呈空间发散状态。2010—2018年间,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的空间格局转变为“东北—西南”的变化趋势。长轴长度整体有所增加,而短轴长度基本维持不变,说明青海县域畜牧CO<sub>2</sub>排放强度“东北—西南”方向上出现空间发散现象(图5)。其可能是在该阶段所实施的生态畜牧业建设、三江源生态保护工程以及三江源国家公园等政策措施逐步取得成效,使得畜牧CO<sub>2</sub>排放强度严重区域逐渐减小,缩小了各县域间的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度差距,从而导致畜牧CO<sub>2</sub>排放强度呈现发散趋势。

表4 2008—2018年畜牧CO<sub>2</sub>排放强度标准差椭圆参数

Table 4 Livestock CO<sub>2</sub> emission intensity standard deviation ellipse parameters from 2008 to 2018

年份 Year	标准差椭圆面积 Standard deviation ellipse area (km <sup>2</sup> )	平均中心坐标 Mean central coordinate	长轴标准差 Major axis standard deviation (km)	短轴标准差 Minor axis standard deviation (km)	方位角 Azimuth angle (°)
2008	259463.40	99.29° E, 34.89° N	341.46	238.65	90.29
2009	275403.07	99.25° E, 34.96° N	356.95	242.43	89.82
2010	255847.96	99.41° E, 35.01° N	333.00	241.56	83.91
2011	256781.75	99.37° E, 34.89° N	344.97	233.69	85.17
2012	267546.98	99.34° E, 34.89° N	352.88	238.04	85.67
2013	268016.37	99.32° E, 34.86° N	355.49	236.65	84.15
2014	277089.68	99.11° E, 34.84° N	371.89	233.80	83.69
2015	276520.96	99.14° E, 34.87° N	370.70	234.15	84.63
2016	282779.88	99.11° E, 34.86° N	379.96	233.59	84.50
2017	288516.60	99.06° E, 34.88° N	385.19	235.16	86.95
2018	287520.60	99.09° E, 34.89° N	379.38	237.94	86.98

### 2.3 畜牧CO<sub>2</sub>排放强度空间分异的影响因素分析

**2.3.1 因子探测结果及分析** 由因子探测结果可知不同影响因子对青海省畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的解释程度 $q$ 值存在一定的差异。本研究仅对通过 $P$ 值0.05水平显著性检验的影响因子进行分析。如表5所示,2008年各因素对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的解释程度从大到小依次为年降水量( $X_2$ )>农用运输车( $X_{11}$ )>农村人均收入( $X_6$ )>羊毛产量( $X_{16}$ )>牧业人口占比( $X_8$ )>奶类总产量( $X_{14}$ )>年均气温( $X_3$ )。从各因素对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的解释力度来看,降水量、农用运输车、农村人均收入的解释度均超过了0.50,可被视为主要的影响因素。综上所述,影响畜牧CO<sub>2</sub>排放强度分布的因素包括自然因素、畜牧业经济发展水平、现代化程度以及产品结构4个方面,这表明2008年青海省主要采用传统依赖自然资源的粗放型畜牧业生产方式和生产结构,导致畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的空间分布受到自然、经济、市场需求等综合因素的影响。

2013年畜牧业经济发展水平和自然因素是影响畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的重要因素。各因子解释度排序为:年降水量( $X_2$ )>农村人均收入( $X_6$ )>牧业人口占比( $X_8$ )>城镇化( $X_5$ )>农业产业结构( $X_7$ )>NDVI( $X_1$ )>年均气温( $X_3$ )>畜牧业企业与合作社数量( $X_{12}$ )。相比2008年,自然因素中增加了NDVI指标,解释度为0.43;畜牧业经济发展水平中增加了城镇化、农业产业结构,解释度分别为0.51和0.48。此外,年降水量、农村人均收入和牧业人口占比的解释度均有显著提高,分别增加了28.79%、24.13%和12.50%。这可能是由于青海省依据各县域的自然禀赋特点,合理实施了生态移民、草原补奖等生态保护措施,减少了牧民比例,提高了城镇化率。同时,通过科学规划畜牧业集约化、专业化、产业化等生产经营方式的转变方案,优化了畜牧业的产业结构,提高了资源的利用率,增加了农牧民的收入。这不仅降低了畜牧CO<sub>2</sub>排放强度,还提高了畜牧经济发展水平。

2018年畜牧经济发展水平是影响畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的主要因素。影响畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的各因子解释度排序为:牧业产值( $X_4$ )>城镇化( $X_5$ )>肉类总产量( $X_{13}$ )>农村人均收入( $X_6$ )>农业产业结构( $X_7$ )>牧业人口占比( $X_8$ )>年均气温( $X_3$ )>NDVI( $X_1$ )>年降水量( $X_2$ )。2018年自然因素的解释度均少于0.45,明显低于畜牧业经济发展水平的解释度,说明随着生态畜牧业的发展,传统依赖自然资源的粗放型畜牧业方式正在改变,标志着畜

表5 青海省畜牧CO<sub>2</sub>排放强度空间分布特征的影响因素地理探测结果Table 5 Geographical detection results of influencing factors of spatial distribution characteristics of livestock CO<sub>2</sub> emission intensity in Qinghai Province

类型 Type	探测因子 Detecting factor	指标 Indicator	2008	2013	2018
自然因素 Natural factor	X <sub>1</sub>	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	0.32	0.43*	0.43*
	X <sub>2</sub>	年降水量 Annual precipitation	0.66**	0.85**	0.42*
	X <sub>3</sub>	年均气温 Annual average temperature	0.43*	0.42*	0.44*
畜牧业经济发展水平 Level of economic development of livestock	X <sub>4</sub>	牧业产值 Value of livestock production	0.32	0.28	0.66**
	X <sub>5</sub>	城镇化 Urbanization	0.25	0.51**	0.60**
	X <sub>6</sub>	农村人均收入 Rural income per person	0.58**	0.72**	0.54**
	X <sub>7</sub>	农业产业结构 Agricultural industrial structure	0.33	0.48*	0.53**
	X <sub>8</sub>	牧业人口占比 Percentage of pastoral population	0.48*	0.54*	0.47*
畜牧业现代化程度 Degree of modernization of animal husbandry	X <sub>9</sub>	牧草收割机 Forage harvester	0.00	0.09	0.19
	X <sub>10</sub>	剪毛机 Shearing machine	0.01	0.03	0.06
	X <sub>11</sub>	农用运输车 Agricultural transport vehicle	0.65**	0.39	0.22
	X <sub>12</sub>	畜牧业企业与合作社数量 Number of livestock enterprises and cooperatives	0.33	0.39*	0.35
产品结构 Product structure	X <sub>13</sub>	肉类总产量 Total meat production	0.26	0.28	0.55*
	X <sub>14</sub>	奶类总产量 Total milk production	0.45*	0.29	0.40
	X <sub>15</sub>	山羊绒产量 Cashmere output	0.10	0.14	0.15
	X <sub>16</sub>	羊毛产量 Wool output	0.57*	0.24	0.37

\*表征  $P$  值  $< 0.05$ ; \*\*表征  $P$  值  $< 0.001$ 。\* represents  $P$ -value  $< 0.05$ ; \*\* represents  $P$ -value  $< 0.001$ .

牧业发展进入了新阶段。牧业产值和城镇化的解释度分别为0.66和0.60,是主要的驱动因素。相比2013年,农村人均收入和牧业人口占比的解释度下降了25.00%和12.96%,而农业产业结构的解释度增加了10.42%。表明在2013—2018年间,受到三江源自然保护区保护建设工程和国家公园建设等的影响,青海省大规模实施了生态移民和易地扶贫搬迁,导致牧业人口显著减少,城镇化率提高。同时,通过产业转型和产业融合,合理利用草地资源,不仅提高了畜牧业总产值,也结合当地实际,拓宽了农牧民的收入渠道,如从事运输、建筑、体验旅游等工作。这使得农村人均收入和牧业人口对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响减弱,农业产业结构对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响增强。此外,2018年畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响因子增加了肉类总产量,解释度达0.55,这可能是由于随着经济社会发展水平的提高,市场对肉类的需求逐年增加,这促使产品结构调整,导致肉类总产量的增加,从而使肉类成为影响畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的一个重要因素。

**2.3.2 因子交互作用探测结果及分析** 由交互探测结果(图6)可知,2008、2013和2018年任意两个因素之间的交互作用结果主要呈双因子协同增强或非线性增强,双因子交互作用的驱动强度大于单因素,仅有少量的因子之间交互作用表现出减弱关系,不存在独立的关系。表明畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的空间分异是多个驱动因素共同作用的结果。其中,在2008—2018年因子交互探测结果中,交互作用为双因子协同增强的数量呈增加趋势,增加了53.33%;非线性增强数量呈减少趋势,减少了56.86%;因子交互贡献度大于最大单因子贡献度数量呈倒“U”型减小趋势,说明因子交互作用对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的解释程度呈减小趋势,单因子对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的解释程度存在增加的现象。为详细了解因子交互作用对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响过程,将以排名前10位的因子交互作用作为主要对象进行分析。2008年各因素的交互作用值均在0.92以上,且呈现出双因子协同增强和非线性增强两种方式,表明多个因子交互作用是畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的决定因素。具体来看,交互作用力最大的是农用运输车(X<sub>11</sub>)∩奶类总产量(X<sub>14</sub>),解释度高达0.96,其余的因子交互主要以自然因素为核心,与奶类总产量(X<sub>14</sub>)、牧业产值(X<sub>4</sub>)、城镇化(X<sub>5</sub>)和农村人均收入(X<sub>6</sub>)形成交互作用(图6A)。这进一步验证了畜牧CO<sub>2</sub>排放强度分布格局受自然、经济、市场需求等因素综合影响。

2013年排名前3位的交互作用是牧业人口占比(X<sub>8</sub>)∩肉类总产量(X<sub>13</sub>)、牧业产值(X<sub>4</sub>)∩牧业人口占比(X<sub>8</sub>)和农村人均收入(X<sub>6</sub>)∩肉类总产量(X<sub>13</sub>),交互作用值分别为0.97、0.94和0.93(图6B)。说明畜牧经济发展和

产品结构的因子交互作用是影响畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度空间分布的关键因素,这可能是由于一方面,随着社会经济的发展,人们对优质牛羊肉的需求量增大;另一方面,在生态移民、易地扶贫搬迁的影响下,加快了城镇化规模,移民牧户的生活方式、生计来源发生转变,相较以往更依赖市场供应,拉动了肉类的内需,间接影响了畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的分布格局。此外,其余的交互作用主要涉及自然因素与畜牧经济水平因素的交互,表明在 2013 年自然因素对畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度空间分布仍存在相当大的影响。

由图 6C 可知,2018 年交互作用值最大为牧业产值(X<sub>4</sub>)∩羊毛产量(X<sub>16</sub>),呈双因子增强,交互因子值为 0.95。其次是牧业人口占比(X<sub>8</sub>)∩羊毛产量(X<sub>16</sub>)和年降水量(X<sub>2</sub>)∩畜牧业企业与合作社数量(X<sub>12</sub>),均为非线性增强,交互因子值均为 0.94。其余交互作用主要以所属自然因素、畜牧业经济发展水平和产品结构中因子间的两两交互。综合来看,2018 年畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度分布格局所受因子交互作用的影响机制较为复杂,但畜牧经济发展水平和产品结构的交互作用依旧是影响畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的主要因素。此外,由年降水量(X<sub>2</sub>)∩畜牧业企业与合作社数量(X<sub>12</sub>)交互作用可知,畜牧现代化程度对畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度分布格局的影响程度逐渐加深,说明在生态畜牧业的大力发展下,企业合作社的扩张提高了畜牧业集约化、专业化、产业化水平,进而提高畜牧业生产效率。然而,目前畜牧现代化程度较弱,对畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的分布格局影响作用有限。因此,仍存在较大的 CO<sub>2</sub> 减排空间,未来可以通过加强低碳理念并推进畜牧业的现代化建设来降低畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度。

### 3 讨论

通常来说降低畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度需要采用先进的技术和管理方法,这直接地反映了生产效率和环境友好性<sup>[12]</sup>。与简单衡量畜牧业碳排放量相比,深入了解畜牧业 CO<sub>2</sub> 排放强度的时空演变规律及其影响因素,更有助于指导实际的生产和管理实践,推动畜牧业的绿色发展。本研究对畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度的时空演变及其影响因素进行了分析,结果发现,2008—2018 年青海省畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度呈明显的下降趋势,这与 Bai 等<sup>[6]</sup>在黄河源区的研究结果相一致。这表明青海省自 2008 年以来积极推动生态畜牧业建设,提高了畜牧业生产效率,逐渐走上低碳发展道路。此外,受自然资源分布不均影响,畜牧资源的空间分配不均衡。在生态畜牧业建设推进下,畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度在 2018 年呈明

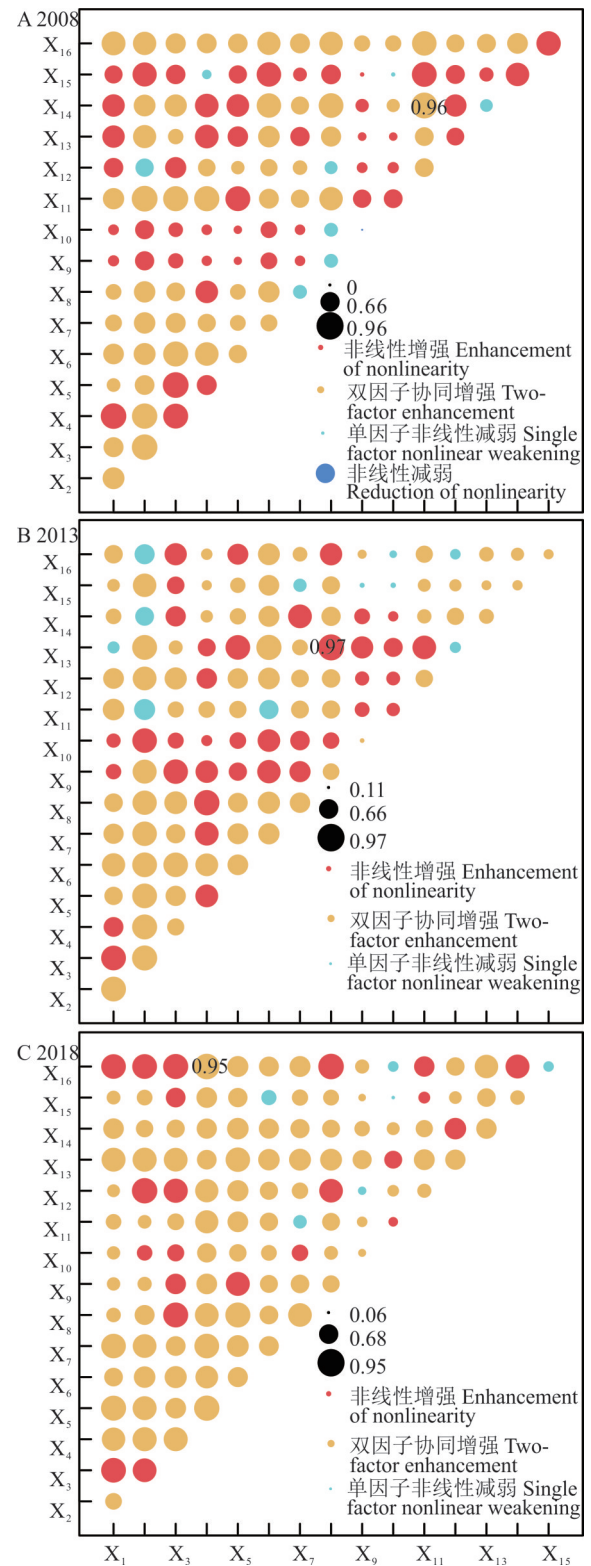


图 6 青海省畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度空间分布演变的因子交互探测结果

Fig. 6 The factor interaction detection results of the spatial distribution evolution of livestock CO<sub>2</sub> emission intensity in Qinghai Province

呈明显的下降趋势,这与 Bai 等<sup>[6]</sup>在黄河源区的研究结果相一致。这表明青海省自 2008 年以来积极推动生态畜牧业建设,提高了畜牧业生产效率,逐渐走上低碳发展道路。此外,受自然资源分布不均影响,畜牧资源的空间分配不均衡。在生态畜牧业建设推进下,畜牧 CO<sub>2</sub> 排放强度在 2018 年呈明

显的南强北弱格局,表明南部区域对畜牧业的依赖程度较大,经济结构单一,农业产业结构调整困难,因此畜牧业的养殖技术升级相对缓慢,但也意味着存在较大的畜牧CO<sub>2</sub>减排潜力。需要制定合理的畜牧CO<sub>2</sub>减排措施,例如通过现代技术培育低碳排放的优良畜种,改良牲畜饲料和使用添加剂减少肠道发酵和粪肥储存产生的温室气体,强化低碳养殖技术和粪便清洁处理技术的研发与应用<sup>[46]</sup>,还需要科学规划不同牲畜的饲养规模、优化牲畜饲养结构,来降低CO<sub>2</sub>排放总量<sup>[47]</sup>。

由单因子探测结果可知,2008—2018年间,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响因素逐渐由自然、经济、市场需求等综合因素转变为经济发展水平。2008年,青海省主要采用传统依赖自然资源的粗放型畜牧业生产方式,导致畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的空间分布受自然、经济、市场需求等因素的影响。随着畜牧经济的发展,到2018年畜牧经济发展水平成为影响畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的主要因素。表明在生态保护措施的实施和生态畜牧业建设的背景下,青海省畜牧业逐渐摆脱对自然条件的依赖,转向集约化和经济化的生产方式,提高了生产效率,推动了低碳发展和可持续性提升。并且截至2018年,除牧业产值外,城镇化对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响最为显著。城镇化的推进加速了农业产业结构转变,降低了畜牧CO<sub>2</sub>排放强度,起到了抑制畜牧CO<sub>2</sub>排放的作用。这与姚成胜等<sup>[8]</sup>的中国畜牧业碳排放量变化影响因素的研究结果相一致,也与李玉波等<sup>[13]</sup>的研究结果相似。此外,本研究发现因子交互作用是畜牧CO<sub>2</sub>排放强度空间分异的决定因素,尤其是畜牧经济水平和产品结构之间的交互作用。这表明通过生态畜牧业建设,企业合作社的扩张提高了畜牧业集约化、专业化、产业化水平,降低了畜牧CO<sub>2</sub>排放强度,促进了畜牧业向低碳发展的转变。然而,目前青海省畜牧业的合作社存在规模小,未形成完整产业链、专业技术人才相对匮乏、市场化程度不高、尚未形成品牌效应等问题<sup>[48]</sup>,长期来看,这些问题势必会制约生态畜牧业的可持续发展,因此需要进一步提高畜牧业生产效率。为此,建议青海省积极推进产业升级和转型,继续培养畜牧业龙头企业,鼓励畜牧企业与合作社使用清洁能源、节能设备和技术,以提高生产效率并实现减排的目标<sup>[49]</sup>。此外,可以通过创建畜牧业生态旅游景区,增加农牧民收入来源,减少他们对传统草食畜牧业的依赖<sup>[50]</sup>。以上措施既可解决由生态工程产生的城镇化后人口就业问题,又能促进畜牧CO<sub>2</sub>减排。

本研究通过深入分析各因子及其交互作用对县域尺度畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响程度和作用机制,不仅有助于了解生态脆弱区草食畜牧业CO<sub>2</sub>排放强度的主要驱动因素,还能为制定有效的减排策略提供科学依据。这项研究不仅丰富了当前关于畜牧碳排放的研究领域,还为未来的研究提供了新的视角和方法,为相关政策的制定和实施提供了重要的参考依据。然而,由于数据获取的限制,本研究仅就2008—2018年的畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的时空变化及其影响因素进行了分析,这限制了对当前畜牧业CO<sub>2</sub>排放强度现状的精准分析,可能会对研究结果产生一定的影响。在后续的研究中需要补充新的数据,以保持研究的最新进展。另外,本研究可能在草食畜牧业碳排放的微观层面考虑不足,例如本研究未深入分析畜种种群构成对畜牧CO<sub>2</sub>排放的影响,也未考虑诸如牲畜养殖行为、废弃物处理方式等因素对畜牧CO<sub>2</sub>排放强度的影响。这些将成为今后进一步研究的重点。

#### 4 结论

1)2008—2018年间,在生态保护措施的实施和生态畜牧业建设的背景下,随着畜牧经济的发展,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度下降了48.05%,呈明显的下降趋势。同时,畜牧CO<sub>2</sub>排放强度重心向西偏南迁移了17.99 km,最终形成南强北弱的空间分布格局。这表明畜牧生产过程中生产效率明显提高,畜牧业呈现出低碳可持续发展的态势。然而,青海省仍存在较大的畜牧CO<sub>2</sub>减排潜力,亟须加快产业结构调整,促进养殖技术升级,实现绿色低碳发展。

2)2008—2018年间,影响畜牧业CO<sub>2</sub>排放强度的因素从自然、经济、市场需求等综合因素逐渐转变为牧业产值和城镇化等经济发展指标。这表明生态保护背景下的生态畜牧业建设促使传统粗放型畜牧业向集约化、专业化、产业化转变,加快了经济发展与升级,促进了畜牧业低碳化发展。同时,畜牧经济水平与产品结构因子的交互作用逐渐成为影响CO<sub>2</sub>排放强度空间分布的关键因素。但青海省畜牧业仍存在企业与合作社规模小、产业链不完整、市场化程度低等问题,制约了低碳可持续发展,说明其减排空间仍较大。因此,需要继续推动生态畜牧业建设,培养龙头企业,鼓励清洁能源和技术应用,加快产业转型升级,并创建生态旅游景区,通过农村产业结构调整等一系列措施实现畜牧CO<sub>2</sub>减排。

**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(4): 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(2): 272–278.
- [3] Wu H W, Sun X Q, Liang B W, *et al.* Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1168–1176.  
吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1168–1176.
- [4] Steinfeld H, Gerber P J, Wassenaar T, *et al.* *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- [5] Zubir M A, Bong C P C, Ishak S A, *et al.* The trends and projections of greenhouse gas emission by the livestock sector in Malaysia. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2022, 24(1): 363–377.
- [6] Bai Y F, Guo C C, Li S S, *et al.* Instability of decoupling livestock greenhouse gas emissions from economic growth in livestock products in the Tibetan highland. *Journal of Environmental Management*, 2021, 287: 112334.
- [7] Gu S Y, Qiu Z J, Zhan Y B, *et al.* Spatial-temporal characteristics and trend prediction of carbon emissions from animal husbandry in China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 705–714.  
顾沈怡, 邱子健, 詹永冰, 等. 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.
- [8] Yao C S, Qian S S, Mao Y H, *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.  
姚成胜, 钱双双, 毛跃华, 等. 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.
- [9] Wang R Y, Xiao H F. Spatial-temporal evolution and emission reduction path of carbon emission from mutton sheep breeding in China. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2024, 45(3): 46–54.  
王如玉, 肖海峰. 中国肉羊养殖碳排放时空演化及减排路径研究. *家畜生态学报*, 2024, 45(3): 46–54.
- [10] National Communication. *The People's Republic of China third national communication on climate change*. Beijing: State Information Center, 2018.  
国家信息通报. 中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报. 北京: 国家信息中心, 2018.
- [11] Pu H, Lu F, Ma Y. Low-carbon development of China's dairy industry based on greenhouse gas emission reduction. *Issues in Agricultural Economy*, 2023(4): 123–133.  
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.
- [12] Gerber P J, Steinfeld H, Henderson B, *et al.* *Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013.
- [13] Li Y B, Li G S, Zhang F H, *et al.* Empirical study on the relationship between carbon emission and economic growth in animal husbandry industry: Based on statistical data of Jilin Province. *Journal of Neijiang Normal University*, 2021, 36(6): 91–98.  
李玉波, 李广帅, 张凤恒, 等. 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.
- [14] Zhang J X, Wang H L. Regional difference, dynamic evolutionary and convergence analysis on the Chinese animal husbandry—Based on the animal husbandry data in 31 provinces from 1997 to 2007. *Jiangnan Tribune*, 2020(9): 41–48.  
张金鑫, 王红玲. 中国畜牧业碳排放地区差异、动态演进与收敛分析—基于全国31个省(市)1997–2017年畜牧业数据. *江汉论坛*, 2020(9): 41–48.
- [15] Liu H J, Zhao H. Empirical analysis of the regional differences of China's carbon dioxide emissions intensity. *Statistical Research*, 2012, 29(6): 46–50.  
刘华军, 赵浩. 中国二氧化碳排放强度的地区差异分析. *统计研究*, 2012, 29(6): 46–50.
- [16] Li H, Lou W. Carbon dioxide emissions intensity forecast and path discussion to reduce emissions during the period of the 13th five-year based on STIRPAT model. *Science and Technology Management Research*, 2016, 36(5): 233–240.  
李虹, 娄雯. 二氧化碳排放强度预测与“十三五”减排路径分析—基于STIRPAT模型的构建. *科技管理研究*, 2016, 36(5): 233–240.
- [17] Yao C S, Qian S S, Li Z T, *et al.* Provincial animal husbandry carbon emissions in China and temporal-spatial evolution mechanism. *Resources Science*, 2017, 39(4): 698–712.

- 姚成胜, 钱双双, 李政通, 等. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制. 资源科学, 2017, 39(4): 698—712.
- [18] Chen Y, Shang J. Disconnect analysis and influence factors of animal husbandry in China. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(3): 101—107.  
陈瑶, 尚杰. 中国畜牧业脱钩分析及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(3): 101—107.
- [19] Tang W J, Zhang Z P, Zhang Z J, *et al.* Spatial-temporal changes of ecological environment quality in Qinghai Province from 2000 to 2020. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(5): 229—237.  
唐文家, 张紫萍, 张志军, 等. 2000—2020年青海省生态环境质量时空变化. 环境科学与技术, 2023, 46(5): 229—237.
- [20] Dai Z J, Zhao X, Li G W, *et al.* Spatial-temporal variations of vegetation coverage in Qinghai from 2000 to 2015. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(7): 54—65.  
代子俊, 赵霞, 李冠稳, 等. 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.
- [21] Zhuang M, Gongbuzeren, Li W. GHG 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.
- [22] IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme. National 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.  
IPCC国家温室气体清单计划. 2006年IPCC国家温室气体清单指南. 神奈川, 日本: 全球环境战略研究所, 2006.
- [23] National Development and Reform Commission. Guidelines for the preparation of provincial greenhouse gas inventories (Trial). Beijing: National Development and Reform Commission, 2011.  
国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行). 北京: 国家发展和改革委员会, 2011.
- [24] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Japan: Institute for Global Environmental Strategies IGES, 2006.
- [25] Capper J L. The environmental impact of beef production in the United States: 1977 compared with 2007. *Journal of Animal Science*, 2017, 89(12): 4249—4261.
- [26] Zhang Y, Jiang P, Cui L, *et al.* Study on the spatial variation of China's territorial ecological space based on the standard deviation ellipse. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 982734.
- [27] Xu L, Qu J S, Li H J, *et al.* Analysis and prediction of household carbon emission in northwest China. *Arid Land Geography*, 2019, 42(5): 1166—1175.  
徐丽, 曲建升, 李恒吉, 等. 西北地区居民生活碳排放现状分析及预测. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1166—1175.
- [28] He Q, Yan M, Zheng L, *et al.* The effect of urban form on urban shrinkage—A study of 293 Chinese cities using geodetector. *Land*, 2023, 12(4): 799.
- [29] Ju H R, Zhang S R, Yan Y C. Spatial pattern changes of urban expansion and multi-dimensional analysis of driving forces in the Guangdong Hong Kong-Macao Greater Bay Area in 1980—2020. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1086—1101.  
鞠洪润, 张生瑞, 闫逸晨. 1980—2020年粤港澳大湾区区域用地空间格局类型演变及其驱动力多维探测. 地理学报, 2022, 77(5): 1086—1101.
- [30] Dai Q, Yang H. The contradictions among the functions of grassland contract management system and the legal right construction of “Three Rights Division”. *China Rural Survey*, 2019(1): 98—114.  
代琴, 杨红. 草原承包经营制度功能间的矛盾与草原“三权分置”的法权构造. 中国农村观察, 2019(1): 98—114.
- [31] Yang B M, Zhang L, Xu H Y. Research on countermeasures for the sustainable development of animal husbandry ecological economy in China. *Private Technology*, 2014(7): 223—224.  
杨冰梅, 张丽, 徐慧艳. 我国畜牧生态经济可持续发展的对策研究. 民营科技, 2014(7): 223—224.
- [32] Zhang J J, Wang Y L, Ju F, *et al.* Formation mechanism and optimization path of green supply chain of grassland livestock products from the perspective of pastoral modernization. *Supply Chain Management*, 2023, 4(8): 66—78.  
张建军, 王雅莉, 句芳, 等. 牧区现代化视域下草原畜产品绿色供应链的形成机理及优化路径. 供应链管理, 2023, 4(8): 66—78.
- [33] Vermeulen S J, Campbell B M, Ingram J S. Climate change and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012(37): 195—222.
- [34] Tilman D, Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 2014, 515(7528): 518—522.
- [35] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2008.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2008.
- [36] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of

- Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2009.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2009.
- [37] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2010.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2010.
- [38] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2011.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2011.
- [39] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2012.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2012.
- [40] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2013.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2013.
- [41] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2014.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2014.
- [42] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2015.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2015.
- [43] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2016.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2016.
- [44] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2017.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2017.
- [45] Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province. Manual of Agricultural and Animal Husbandry Statistics of Qinghai Province. Xining: Department of Agriculture and Rural Areas of Qinghai Province, 2018.  
青海省农业农村厅. 青海省农牧业统计手册. 西宁: 青海省农业农村厅, 2018.
- [46] Llonch P, Haskell M J, Dewhurst R J, *et al.* Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: an animal welfare perspective. *Animal*, 2017, 11(2): 274–284.
- [47] Tian Y, Wu H T. Research on fairness of agricultural carbon emissions in China's major grain producing areas from the perspective of industrial structure. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(1): 45–55.  
田云, 吴海涛. 产业结构视角下的中国粮食主产区农业碳排放公平性研究. *农业技术经济*, 2020(1): 45–55.
- [48] Zhou W L, Wu J B. Study on the high quality development of Qinghai farmers and herdsmen cooperatives under the rural revitalization strategies—Based on the investigation and analysis of three cooperatives in Qinghai. *Modern Agriculture*, 2023, 48(4): 10–15.  
周伟亮, 吴佳宝. 乡村振兴战略下青海农牧民合作社高质量发展研究—基于青海3个合作社的调查分析. *现代农业*, 2023, 48(4): 10–15.
- [49] Bai X B, Hu H, Zhou Y H, *et al.* Study on space-time evolution and influence factors of carbon emissions in China's animal husbandry. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 260–274.  
白雪冰, 胡浩, 周应恒, 等. 中国畜牧业碳排放的时空演进及其影响因素分析. *中国农业大学学报*, 2023, 28(9): 260–274.
- [50] Deng W J, Yin X M. Study on traditional animal husbandry patterns of Tibetan Plateau communities and income-generating pathways of tourism development—taking Harama village in Hongyuan county, Sichuan province as an example. *Rural Economy*, 2015(5): 50–54.  
邓维杰, 尹雪梦. 青藏高原社区传统畜牧业形态与旅游开发增收途径研究—以四川省红原县哈拉玛村为例. *农村经济*, 2015(5): 50–54.