甘肃省县域农业碳排放时空特征、影响因素及脱钩效应

陈玲玲[1], 李纯斌[1], 罗 君[1], 闫慧萍[2], 吴 静[1], 郑 中[1]
(1.甘肃农业大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2.榆中县农业技术推广中心, 甘肃 兰州 730100)

摘 要: [目的]在"双碳"目标下,探究农业碳排放时空特征、影响因素和脱钩效应,为区域农业碳减排工作提供科学依据。[方法]运用碳排放系数法,对2000—2022年甘肃省86个县(区)的农业碳排放量进行测算,结合ArcGIS空间分析、LMDI(对数平均迪氏指数)模型及Tapio脱钩模型,系统探讨甘肃省各县域农业碳排放的时序变化规律、空间分布格局、关键影响因子及其与农业经济发展水平之间的脱钩状态。[结果]①时序特征。甘肃省县域农业碳排放总量总体呈上升趋势,从6.08×10^6 t增至1.06×10^7 t;对农业碳排放贡献最大的碳源为畜禽养殖、其次是农地利用;种植业和畜牧业碳排放强度呈下降态势。②结构特征。畜禽养殖排放比例达60.10%,农地利用占34.16%,农作物种植占5.74%,碳排放结构呈现明显的畜牧主导特征。③空间特征:甘肃省县域农业碳排放存在显著的空间正相关性,高碳排放区集中在武威、张掖等地,农业碳排放重心向河西走廊转移。④影响因素。各因素累积贡献度顺序为:农业产业结构>经济增长水平>生产效率>劳动力规模。在驱动因素方面,农业生产效率与农业劳动力规模对碳排放起到了明显的减缓作用;与之相反,畜牧业主导的产业结构特征与农业经济增长水平则是推动碳排放持续增长的主要动因。⑤脱钩效应。甘肃省县域农业碳排放和农业经济增长之间以弱脱钩状态为主,总体经历了"弱脱钩—弱脱钩—强脱钩"的演化过程。空间上,脱钩类型的县域占主导,各县脱钩进程存在差异,区域空间分异特征突出。[结论]2000—2022年甘肃县域农业碳排放总量呈波动上升态势,空间上呈现西高东低的显著聚集特征,畜禽养殖为首要碳源;农业产业结构扩张是碳排放增长的核心驱动因素,区域农业经济与碳排放脱钩状态存在明显空间分异。

关键词: 农业碳排放; 县级尺度; 时空演变; LMDI模型; Tapio脱钩模型; 甘肃省
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0335-13 **中图分类号:** F321

文献参数: 陈玲玲, 李纯斌, 罗君, 等.甘肃省县域农业碳排放时空特征、影响因素及脱钩效应[J].水土保持通报, 2026, 46(5): 335-347. Chen Lingling, Li Chunbin, Luo Jun, et al. Spatiotemporal patterns, influencing factors and decoupling effect of agricultural carbon emissions at county level in Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(5): 335-347.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.013 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.013**

Spatiotemporal patterns, influencing factors and decoupling effect of agricultural carbon emissions at county level in Gansu Province

Chen Lingling[1], Li Chunbin[1], Luo Jun[1], Yan Huiping[2], Wu Jing[1], Zheng Zhong[1]
(1.*College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 2.*Yuzhong County Agricultural Technology Extension Center, Lanzhou, Gansu* 730100, *China*)

Abstract: [Objective] Under the framework of the "dual carbon" objectives, the spatiotemporal patterns, influencing factors and decoupling effects of agricultural carbon emissions were investigated in order to provide a scientific basis for regional agricultural carbon emission reduction. [Methods] The carbon emission coefficient method was used to measure agricultural carbon emissions across 86 counties (districts) in Gansu Province from 2000 to 2022. Using ArcGIS spatial analysis, the logarithmic mean Divisia index (LMDI) model, and the Tapio

收稿日期:2025-12-26 **修回日期:**2026-04-01 **采用日期:**2026-04-10
资助项目:甘肃省哲学社会科学规划项目"基于土地利用的甘肃省碳排放效应及低碳调控路径研究"(2023YB045)
第一作者:陈玲玲(2001—),女(汉族),甘肃省清水县人,硕士研究生,研究方向为资源利用与环境气候变化研究。Email:2306133518@qq.com。
通信作者:李纯斌(1972—),男(土族),湖北省长阳土家族自治县人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事资源利用与环境变化研究。Email:licb@gsau.edu.cn。
罗君(1985—),女(汉族),四川省武胜县人,博士,副教授,主要从事土地利用及其农业碳效应研究。Email:journeylj6@163.com。

decoupling model, this study conducted a systematic analysis of the spatiotemporal evolution patterns and key influencing factors of agricultural carbon emissions at the county level, and the decoupling relationship between agricultural carbon emissions and agricultural economic growth. [Results] ① Temporal characteristics. Total county-level agricultural carbon emissions in Gansu Province showed an overall upward trend, increasing from 6.08×10^6 t to 1.06×10^7 t. The largest carbon source was livestock and poultry breeding, followed by agricultural land use; the carbon emission intensity of both crop production and animal husbandry showed a declining trend. ② Structural characteristics. Livestock and poultry breeding accounted for 60.10% of total emissions, agricultural land use accounted for 34.16%, and crop planting accounted for 5.74%, showing a livestock-dominated emission structure. ③ Spatial characteristics. Agricultural carbon emissions among counties in Gansu Province showed significant positive spatial autocorrelation. Areas with elevated carbon emissions were primarily clustered in Wuwei, Zhangye and other areas, with the epicenter of agricultural carbon emissions shifting toward the Hexi Corridor. ④ Influencing factors. The cumulative contributions of various factors were ranked as follows: agricultural industrial structure > economic growth level > production efficiency > labor force scale. Agricultural production efficiency and agricultural labor force scale inhibited agricultural carbon emissions, whereas the livestock-dominated agricultural industrial structure and agricultural economic growth promoted the increase in agricultural carbon emissions. ⑤ Decoupling effect. The decoupling state was dominated by weak decoupling and evolved as "weak decoupling—weak decoupling—strong decoupling". Spatially, counties characterized by decoupling types were dominant, and the decoupling process differed significantly among counties, with prominent intercounty regional differences. [Conclusion] From 2000 to 2022, the total agricultural carbon emissions of counties in Gansu Province exhibited a fluctuating upward trend, with an obvious agglomeration pattern of high emissions in the west and low emissions in the east from a spatial perspective. Livestock and poultry breeding constituted the primary carbon source. The expansion of the agricultural industrial structure served as the core driving factor behind the growth of carbon emissions, and the decoupling status between regional agricultural economic development and carbon emissions displayed prominent spatial differentiation.

Keywords: agricultural carbon emissions; county-level scale; spatiotemporal evolution; LMDI model; Tapio decoupling model; Gansu Province

"碳达峰"和"碳中和"是国际社会普遍关注的议题,是全球气候变化治理的重要内容之一。农业作为重要的经济生态系统,既是碳排放源,又具有碳汇功能。据统计,中国农业源温室气体排放约占全国总量的17%,其中CH_4和N_2O分别占50%和92%,农业减排已成为生态环境治理的重要内容[1]。

国内外学者对农业碳排放的研究已形成多维度框架。测算体系方面,主要基于农资投入、农田利用[2]及畜禽养殖等核心碳源,采用IPCC系数法、生命周期法等方法,研究尺度多在国家[3]、省域[4]及市域[5]层面。时空特征方面,运用空间马尔可夫链[6]、莫兰指数[7]等方法论证了农业碳排放的空间格局及演化机制。影响因素方面,主要运用地理加权回归(GWR)模型[8]、地理探测器[9]、STIRPAT模型[10]和对数平均迪氏指数(LMDI)模型等[11]方法,研究表明经济发展、生产效率、产业结构、人口和城镇化等因素均会对农业碳排放产生显著影响。脱钩效应方面,主要通过脱钩理论[12]和环境库兹涅茨曲线(EKC)等[13]的广泛应用,探讨农业碳排放与经济发展的动态关系。此外,部分学者还围绕农业生产方式优化[14]、技术创新[15]以及政策管理等[16]方面开展低碳措施研究。

甘肃省地处西北内陆,是典型的干旱半干旱农牧交错区和国家西部生态安全屏障。"十年九旱",水资源短缺是制约该省农业发展的主要因素[17],受此自然条件影响,甘肃农业投入结构呈现显著的区域特征:灌溉能耗在农业生产成本中比例较高,覆膜保墒技术广泛应用带来农膜残留与碳排放的双重环境压力[18]。此外,化肥利用率受降水制约而低于全国平均水平,农业生产对化肥投入的依赖性较高。"十四五"以来,甘肃省出台《甘肃省农业农村减排固碳实施方案》等政策文件,明确提出推动农业绿色发展,开展特色农产品碳足迹核算,探索县域农业碳减排差异化路径等任务。县域作为农业碳排放核算的最小行政单元,也是碳减排政策精准落地的关键载体。因此,开展县域尺度的系统研究,对于甘肃省农业碳减排目标分解、实施县域差异化考核、推动政策精准落地具有不可替代的基础性作用。鉴于此,本

研究以甘肃省86个县域为基本单元,构建农地利用、农作物种植与畜牧养殖的农业碳排放指标体系,选取18种碳源,核算了2000—2022年甘肃省86个县域单元的农业碳排放量及单位产值碳排放强度,利用莫兰指数分析空间聚集特征,并借助LMDI模型进行驱动因素分解,并结合Tapio模型分析碳排放与农业经济增长的脱钩关系。研究旨在弥补甘肃县域尺度系统研究的不足,为制定甘肃省农业碳减排政策,促进区域低碳农业绿色发展提供理论依据,助力国家"双碳"目标的实现。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

甘肃地处中国西北内陆(32°11′—42°57′N,92°13′—108°46′E),呈西北-东南向狭长延伸,国土面积4.26×10^5 km^2,是连接西北五省(区)的枢纽地带,也是国家重要的西部生态安全屏障。自南向北跨越湿润区至干旱区,地貌与气候组合形成多种农业生态气候区。行政区划涵盖14个地级行政单位,其中包含2个少数民族自治州和86个县(区)。截至2024年年末,全省地区生产总值13 002.9亿元,粮食种植面积2.72×10^6 hm^2,农作物以小麦、玉米、马铃薯为主,马铃薯种植面积和产量居全国前列,年末牛存栏540.5万头,牛出栏287.0万头;羊存栏2 760.9万只,羊出栏2 872.9万只;生猪存栏704.1万头,生猪出栏965.3万头。

1.2　数据来源

考虑到行政区划的调整,剔除嘉峪关市和兰州新区的数据,以保证研究单元的连贯性和一致性。本文数据来源于2001—2023年《甘肃农村统计年鉴》《甘肃发展年鉴》以及甘肃省各地级市统计年鉴,部分数据来源于各县统计年鉴,考虑到单一年份的某个指标的缺失,采用均值法进行插值处理。本文所指农业产值为农业和牧业产值之和,经济数据均采用2000年可比价格,将其他年份进行折算,剔除价格因素干扰。化肥、农膜均为各县当年用量,其中化肥为实际折纯量,灌溉面积为有效灌溉面积,土地翻耕面积为农作物播种面积。

1.3　农业碳排放测算

参照IPCC和省级温室气体排放清单的测算方法,结合甘肃省县域数据的可获得性,选取农地利用、农作物种植和畜禽养殖3个碳排放维度,构建了甘肃省县域农业碳排放测算体系。测算公式为

$$C=\sum T_i\cdot\delta_i \tag{1}$$

式中:C为农业碳排放总量(10^4 t);T_i为第i种碳源实际投入量;δ_i为第i种碳源系数。本研究将CH_4,N_2O统一换算成碳排放系数,即1 t的CH_4产生温室效应约等于6.82 t的C(25 t的CO_2)产生的温室效应,1 t的N_2O产生的温室效应约等于81.27 t的C(298 t的CO_2)产生的温室效应。

农业碳排放强度计算公式为:

$$C_I=C/G \tag{2}$$

式中:C_I为碳排放强度(t/万元);G为农业生产总值(万元)。

1.4　种植业碳排放测算

农地利用生产过程主要包括化肥、农膜、灌溉、土地翻耕、农用机械总动力等投入产生的大量间接碳排放,考虑到农药使用量的统计口径在不同年份间存在差异和数据的可获取性,本研究暂不计农药碳排放;在农作物种植过程中,会直接导致含氮温室气体的释放,依据甘肃省的播种结构,本研究测算了小麦、玉米、棉花、油料、蔬菜、中药材及大豆等农作物在种植环节的碳排放量,各排放源的折算系数详见表1。

表1　种植业碳排放系数

Table 1　Carbon emission coefficients of crop cultivation

碳源类型	排放因子	排放系数	数据来源
农地利用(以C计)	化肥	0.90/(kg·kg^{-1})	ORNL(美国橡树岭国家实验室)
	农膜	5.18/(kg·kg^{-1})	IREEA(南京农业大学农业资源与生态环境研究所)
	灌溉	266.48/(kg·hm^{-2})	IREEA(南京农业大学农业资源与生态环境研究所)
	土地翻耕	312.60/(kg·hm^{-2})	伍芬琳等[19]
	农业机械总动力	0.18/(kg·hm^{-2})	李绵德等[20]
农作物种植(以N_2O计)	春小麦	0.40/(kg·hm^{-2})	田云等[21]
	冬小麦	2.05/(kg·hm^{-2})	田云等[21]
	玉米	2.53/(kg·hm^{-2})	田云等[21]
	棉花	0.48/(kg·hm^{-2})	李绵德等[20]
	油料	2.29/(kg·hm^{-2})	闵继胜等[22]
	蔬菜	4.21/(kg·hm^{-2})	李绵德等[20]
	中药材	0.95/(kg·hm^{-2})	闵继胜等[22]
	大豆	2.29/(kg·hm^{-2})	闵继胜等[22]

1.5 畜禽养殖碳排放测算

反刍动物养殖是农业温室气体的重要排放源，CH_4和N_2O主要来自消化道发酵及粪便处理系统[23]。中国的畜禽养殖中，只有生猪、兔和禽类的出栏率大于1，其平均生命周期分别按200，105，55 d计算。当饲养周期大于或等于1 a时，畜禽的平均饲养量根据年出栏数与饲养天数比例来折算；当饲养周期不足1 a时，则根据年末存栏量进行调整，即按公式(3)调整。

$$N_i=\begin{cases}D_i\times\dfrac{M_i}{365} & (D_i\geqslant 1\ \mathrm{a})\\ \dfrac{\left(C_{ij}+C_{i(j-1)}\right)}{2} & (D_i<1\ \mathrm{a})\end{cases} \tag{3}$$

式中：N_i为第i种畜禽饲养量；D_i为第i种畜禽饲养周期；M_i为i种畜禽年出栏量；C_{ij}，$C_{i(j-1)}$分别表示第i种畜禽第j年年末存栏量和第j-1年末存栏量。本文选取猪、牛、羊、马、驴5类牲畜，各碳源排放系数如表2所示。

表2 畜禽养殖碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficients of livestock and poultry farming

碳源因子	CH_4排放系数/〔kg·(头·a)$^{-1}$〕		N_2O排放系数/〔kg·(头·a)$^{-1}$〕	参考来源
	肠道发酵		粪便管理	
猪	1.0	1.38	0.195	《省级温室气体清单编制指南(试行)》中西北地区畜禽的排放系数
牛	67.9	1.86	0.545	
羊	5.0	0.15	1.390	
马	18.0	1.09	0.330	
驴	10.0	0.60	0.188	

1.6 空间相关性分析

莫兰指数是判断空间集聚的常用指标，本研究采用全局Moran's I检验区域是否存在空间自相关性，采用局部Moran's I并绘制LISA聚集图，识别农业碳排放量在子区域上的空间异质结果[24]，计算公式为

全局Moran's I计算公式为

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \tag{4}$$

局部Moran's I(I_1)计算公式为

$$I_1=\frac{n\left(x_i-\bar{x}\right)\sum_{j=1}^{m}w_{ij}\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_{j}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \tag{5}$$

式中：n为县域样本量；m表示与县域i相邻的县域个数；x_i，y_i分别表示第i个县域和第j个县域的农业碳排放量；$\bar{x}$表示x的均值；w_{ij}表示县域i和县域j的空间权重矩阵。本文采用地理距离矩阵定义空间权重矩阵，即如果j和i相邻或小于给定距离时，w_{ij}=1，否则w_{ij}=0。经过方差归一化处理后，I的取值范围在[−1，1]，I的绝对值越接近1，空间正相关的程度越强，空间相关性越显著；I=0表示空间不相关。局部Moran's I指数I_1>0时，代表区域间存在高-高聚集区或低-低聚集区；当指数I_1<0时，代表区域间存在高值与低值交错的空间异质格局。局部Moran's I指数的绝对值越大，表示空间集聚程度或异质性程度越显著。

1.7 LMDI模型

本文参考文献[25]的研究成果及甘肃省的实际情况，运用对数平均迪氏指数(LMDI)模型从农业生产效率、农业产业结构、农业经济增长水平和农业劳动力规模4个方面，分析甘肃省农业碳排放的影响因素。令$C_v=C/A$为农业生产效率；$C_S=A/G$，为农业产业结构；$C_I=G/P$，表示农业经济增长水平；$C_p=P$，表示农业劳动力规模。计算公式为

$$C=\frac{C}{A}\times\frac{A}{G}\times\frac{G}{P}\times P=C_V\times C_S\times C_I\times C_P \tag{6}$$

式中：C为碳排放总量；A为农业产值；G为农林牧渔业总产值；P为农业劳动力数量。

将基期的农业碳排放量设立为C_0，第t年的碳排放量设置为C_t，用ΔC来表示从目标年(t)到基期年甘肃省农业碳排放的变化量，计算公式为：

$$\Delta C=C_t-C_0 \tag{7}$$

公式两边取对数，再进行加和分解，处理后得到农业碳排放各影响因素贡献值公式

$$\begin{aligned}\Delta C_V&=\frac{C_t-C_0}{\ln C_t-\ln C_0}\times\ln\left(\frac{C_V^t}{C_V^0}\right)\\ \Delta C_S&=\frac{C_t-C_0}{\ln C_t-\ln C_0}\times\ln\left(\frac{C_S^t}{C_S^0}\right)\\ \Delta C_I&=\frac{C_t-C_0}{\ln C_t-\ln C_0}\times\ln\left(\frac{C_I^t}{C_I^0}\right)\\ \Delta C_P&=\frac{C_t-C_0}{\ln C_t-\ln C_0}\times\ln\left(\frac{C_P^t}{C_P^0}\right)\\ \Delta C&=\Delta C_V+\Delta C_S+\Delta C_I+\Delta C_P\end{aligned} \tag{8}$$

式中：ΔC_v，ΔC_S，ΔC_I，ΔC_P分别表示农业生产效率的碳排放效应、农业产业结构的碳排放效应、农业经济增长水平的碳排放效应和农业劳动力规模的碳排放效应；ΔC为各影响因素的农业碳排放总效应。

1.8 Tapio脱钩模型

资源环境学者将“脱钩”概念拓展到环境研究领域，用于研究经济增长与能源消耗的关系。本研究采用Tapio脱钩理论模型，通过计算脱钩弹性指数，

系统分析甘肃省农业经济增长与农业碳排放之间的脱钩关系[26]。计算公式为

$$\delta=\frac{\Delta C/C}{\Delta G/G} \tag{9}$$

式中:δ为脱钩弹性指数;ΔC,ΔG为碳排放与农业产值的变化量;C,G分别为农业碳排放总量和农业总产值。依据δ值将脱钩状态划分为8型(详见表3)。

表3　Tapio脱钩模型状态划分

Table 3　State classification of Tapio decoupling model

类别	脱钩类型	△C/C	△G/G	δ	主要特征
负脱钩	弱负脱钩	<0	<0	0<δ<0.8	碳排放与经济均下降,碳排放下降速度慢于经济下降速度,较不理想状态
	强负脱钩	>0	<0	<0	碳排放上升,经济下降。为最不理想状态
	扩张负脱钩	>0	>0	>1.2	碳排放与经济均上升,碳排放上升速度快于经济上升速度。为不理想状态
脱钩	弱脱钩	>0	>0	0≤δ<0.8	碳排放与经济均上升,经济上升速度快于碳排放上升速度。为较理想状态
	强脱钩	<0	>0	<0	碳排放下降,经济上升。为最理想状态
	衰退脱钩	<0	<0	>1.2	碳排放与经济均下降,碳排放下降速度快于经济下降速度。为可允许状态
连接	衰退连接	<0	<0	0.8≤δ≤1.2	碳排放与经济均下降,且二者下降的速度相当。为可允许状态
	增长连接	>0	>0	0.8≤δ≤1.2	碳排放量与经济均上升,且二者上升的速度相当。为不可取状态

注:δ为脱钩弹性指数;ΔC,ΔG分别为碳排放与农业产值的变化量;C,G分别为农业碳排放总量和农业总产值的变化量。

2　结果与分析

2.1　农业碳排放的时序演变特征

2.1.1　县域农业碳排放总量及强度特征

在研究期内,甘肃省县域农业碳排放总量波动上升,从6.08×10^6 t增至1.06×10^7 t(图1a),年均增幅2.73%。2006年出现研究期内最高增速(25.36%),通过中断时间序列分析(ITS)定量评估[27]结果表明,2006年取消农业税及国家奶牛补贴政策实施后,碳排放年均增速较政策前(2000—2005年)显著提升5.79%(p<0.01)。2005年全省取消农业税,2006年奶牛良种补贴投资180万元改良奶牛6万头,带动畜禽饲养量增长,导致碳排放大幅增加。2017—2019年碳排放总量下降,从9.28×10^6 t降至8.91×10^6 t,累计降幅3.99%。ITS分析结果表明,2017年"粮改饲"政策全面推广后,碳排放年均增速由政策前(2009—2015年)的3.21%转为−3.89%,降幅达7.10%(p<0.01)。2017年粮改饲推广至22个县区,临夏州、广河县等地推行"种养结合"模式,将玉米转向青贮种植,有效抑制碳排放增长。2020—2022年碳排放再度回升,2022年达历史峰值1.06×10^7 t。2006—2015年碳排放总量呈上升趋势,在2015年"镰刀弯"政策实施后,甘肃省调减非优势区玉米、优化种植结构,2016—2017年农业碳排放环比增速明显回落。

2000—2022年农业碳排放强度整体呈下降趋势,范围在1.41~2.41 t/万元,环比增速变化较大,为−25.76%~22.85%,年均降幅为0.89%(图1b)。2000—2006年呈现上升态势,2007—2017年先下降后波动上升,2017—2022年逐渐下降,2020年达到谷值。表明甘肃省县域在推进农业技术革新方面均取得显著成效,单位经济产出的碳排放量减少,已进入相对碳减排阶段,然而,与实现碳排放总量的"绝对减排"目标相比,尚存在一定的差距。

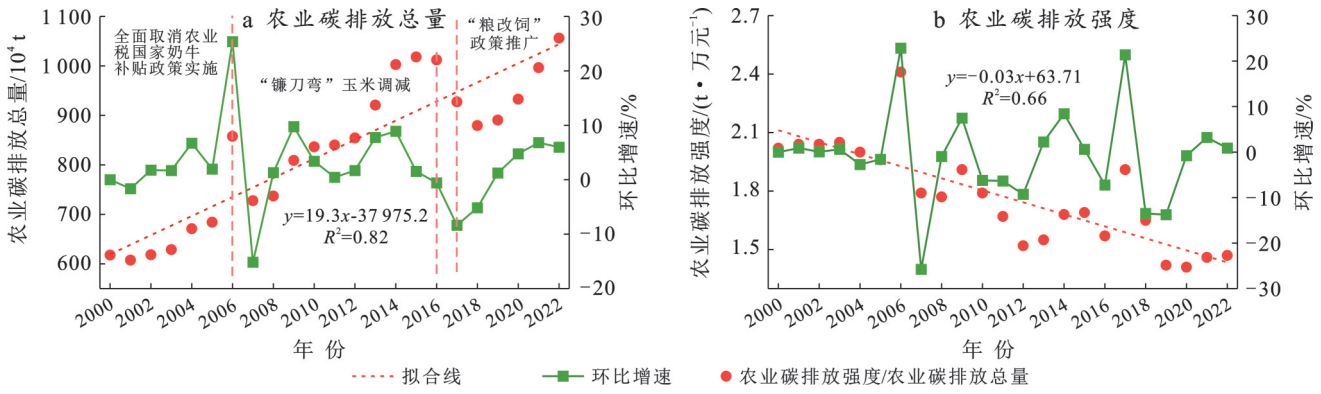


图1　甘肃省2000—2022年县级尺度农业碳排放总量及农业碳排放强度演变

Fig.1　Total agricultural carbon emissions and evolution of agricultural carbon emission intensity at county level in Gansu Province from 2000 to 2022

2.1.2 县域农业碳排放的结构特征

甘肃省县域农业碳排放结构特征如图2所示，研究期内，畜禽养殖碳排放累计量占农业碳排放累计总量的60.10%，农地利用占34.16%，农作物种植占5.74%，这表明畜禽养殖是甘肃省农业碳排放的最主要来源。

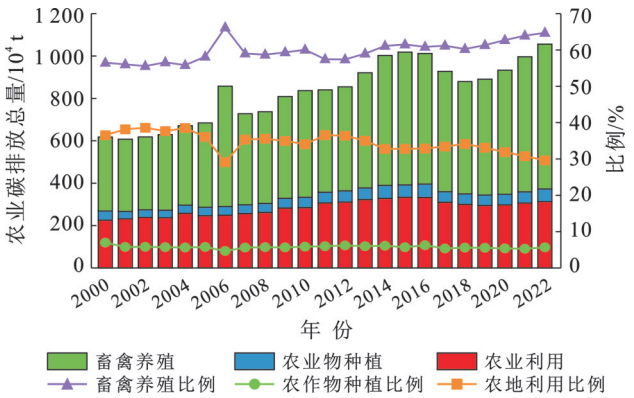


图2 甘肃省2000—2022年县域农业碳排放结构

Fig.2 Agricultural carbon emission structure at county level in Gansu Province from 2000 to 2022

2000—2006年畜禽养殖碳排放相对平稳，2006年达到阶段性最高。2007—2022年持续增长，碳排放量增加了59.09%。农地利用碳排放在2018年显著降低，与畜禽养殖呈反向变化趋势，这与畜牧业扩张政策有关。农作物种植碳排放比例变化幅度较小，总体保持稳定。退耕还林、测土配方施肥等政策的实施有效降低了土地碳排放，农业可持续发展政策取得一定成效。

结合农地利用与农作物种植的碳排放量以及产值数据计算碳排放强度（图3a）。研究表明，种植业碳排放强度下降趋势明显（R^2=0.86），介于1.21～0.69 t/万元，2002年为峰值，2022年为谷值。2017年较2016年明显增高，环比增速达到24.47%，这与农业生产投入结构调整密切相关。结合畜禽养殖的农业碳排放以及产值数据核算畜牧业碳排放强度（图3b）。结果显示，其整体呈现动态波动的趋势，经历了“下降—上升”的变化过程。范围在3.07～6.73 t/万元，其中2006年为峰值，2020年为谷值。2005—2006年出现明显的升高，环比增速达到了51.61%，后呈现波动式的下降。甘肃作为全国重要牛羊产业基地，形成了张掖武威肉牛、平凉红牛、甘南牦牛等特色产业带，草食畜牧业规模居西北前列。基于已有研究成果，选取同为西北农牧交错区的宁夏回族自治区和黄土高原区的陕西省作为对照区域，对3省农业碳排放强度及结构特征进行横向对比分析发现，从碳排放强度来看，西北五省农业碳排放强度排序为：青海＞宁夏＞甘肃＞新疆＞陕西。本研究发现，甘肃省畜牧业碳排放强度为6.73 t/万元，高于陕西（4.98 t/万元），与该研究的排序结论基本一致[28-29]。同时，甘肃省畜禽养殖碳排放总量占农业碳排放总量的60.10%，显著高于西北地区平均水平（约56%），反映出甘肃省农业碳排放具有典型的“畜牧业主导”特征。这一方面反映出甘肃省农业的“高畜牧业比重”结构特征，另一方面也揭示出当前畜牧业增长仍以高碳排放的粗放模式为主，与宁夏、陕西等省区相比，甘肃省在畜牧业低碳转型方面面临更大挑战。

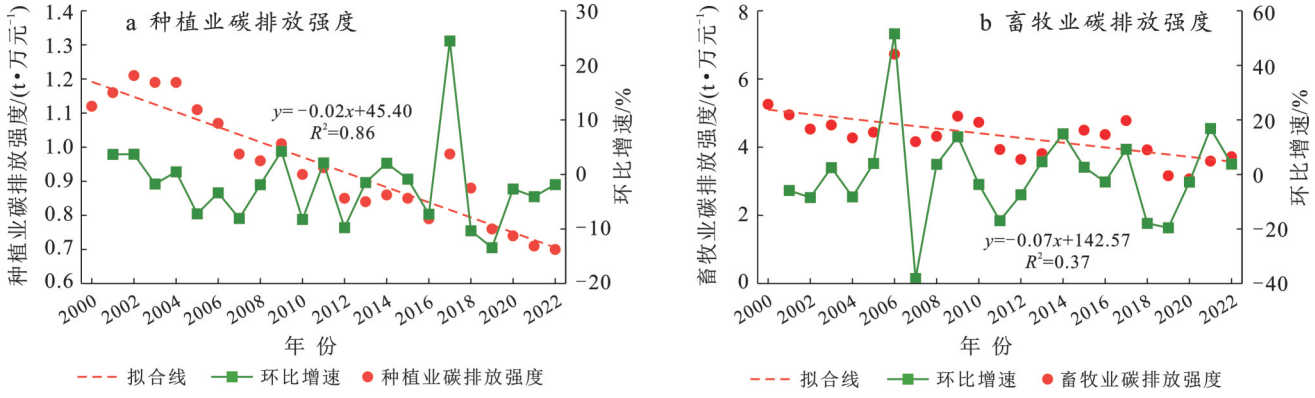


图3 甘肃省2000—2022年县域种植业及畜牧业碳排放强度特征

Fig.3 Characteristics of carbon emission intensity in crop production and animal husbandry at county level in Gansu Province from 2000 to 2022

2.1.3 县域农业碳排放的区域特征

为深入揭示甘肃省县域农业碳排放的区域异质性，本研究参考相关文献对甘肃农业生态气候类型的划分以及甘肃农业地域类型的聚类分析成果[17]，将甘肃省86个县域划分为河西、陇中、陇东、陇南和民族地区5类区域，分析甘肃省县域农业碳排放的区域特征。2000—2022年甘肃省县域的5个生态区域的农业碳排放总量的变化趋势整体一致，总体呈上升趋势，定基增长速度在不同年份和地区间存在差异（图4）。各生态分区对全省农业碳排放总量的贡

献度呈现显著的差异性,贡献度呈现“河西>陇中>陇东>民族地区>陇南”的递减格局。河西地区碳排放总量从2000年的1.82×10^6 t波动上升至2022年的4.20×10^6 t,定基增速达130.78%,是甘肃省农业碳排放的主要贡献区;陇中地区农业碳排放总量处于中等水平,呈缓慢上升趋势;陇东地区农业碳排放总量先升后降,2022年回落至1.78×10^6 t,增速相对平缓。民族地区农业碳排放总量呈上升趋势,总体呈中高水平;陇南地区农业碳排放总量最低,呈先升后降态势,2022年降至9.63×10^5 t,定基增速仅为2.35%,为甘肃省碳排放水平最低且增长最缓的区域。

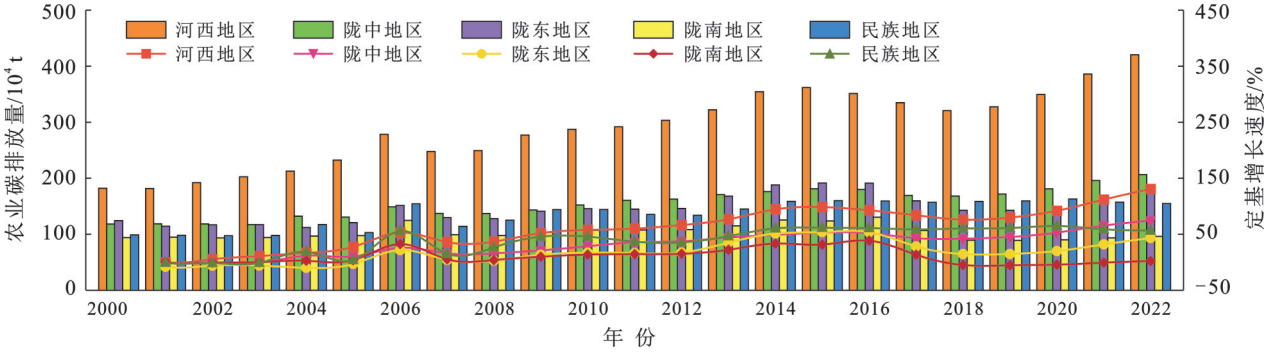


图 4　甘肃省 2000—2022 年县域农业碳排放量与定基增长速度

Fig.4　Agricultural carbon emissions and fixed-base growth rate at county level in Gansu Province from 2000 to 2022

2.2　农业碳排放空间演化特征

2.2.1　全局空间自相关分析

参考郑博福等[24]研究方法,按照县域年均排放量的0.5,1.0和1.5倍,将碳排放量分为低、中、较高和高碳排放区4种类型(图5)。研究期内,甘肃省县域农业碳排放的空间自相关指数均为正,均通过了1%的显著性检验[$Z(I)>2.58$,$p<0.01$],表明存在显著空间正相关性,且正相关性随着时间推移有所上升(表4)。

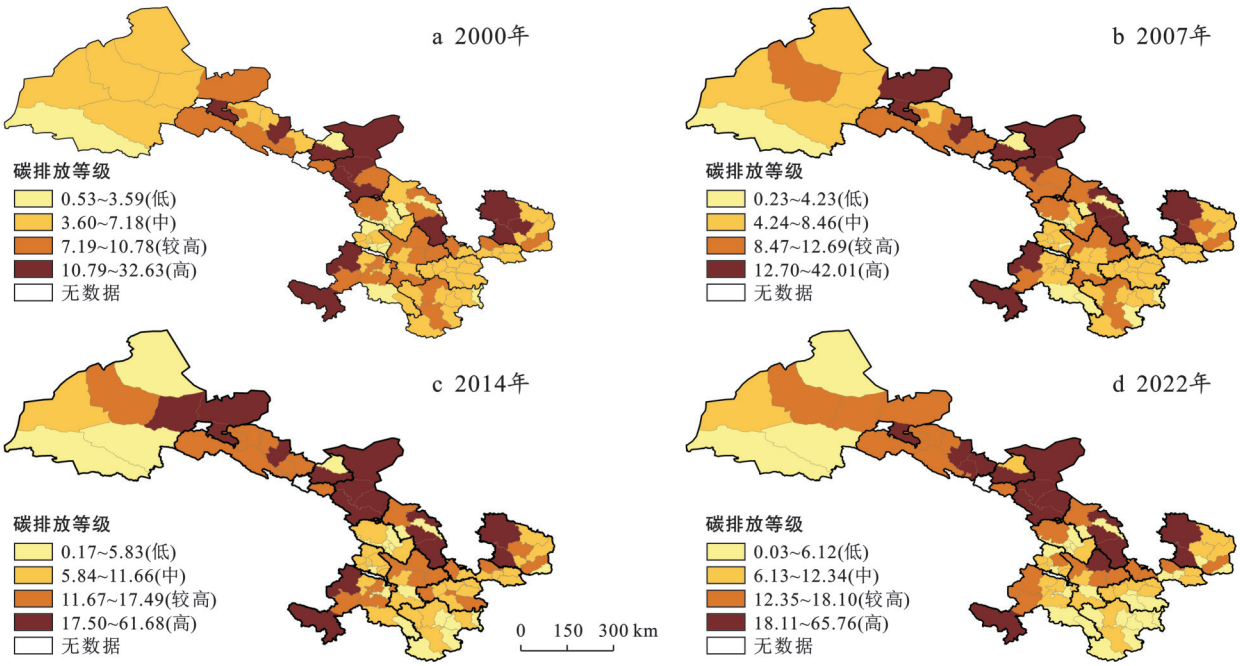
表 4　2000—2022 年甘肃省农业碳排放全局 Moran's *I* 指数

Table 4　Global Moran's *I* index of agricultural carbon emissions in Gansu Province from 2000 to 2022

年份	全局 Moran's *I* 指数	*Z*	*p*	年份	全局 Moran's *I* 指数	*Z*	*p*
2000年	0.235	6.89	<0.01	2012年	0.246	7.18	<0.01
2001年	0.231	6.78	<0.01	2013年	0.250	7.26	<0.01
2002年	0.228	6.72	<0.01	2014年	0.253	7.31	<0.01
2003年	0.234	6.84	<0.01	2015年	0.256	7.38	<0.01
2004年	0.215	6.38	<0.01	2016年	0.259	7.44	<0.01
2005年	0.230	6.76	<0.01	2017年	0.258	7.41	<0.01
2006年	0.223	6.57	<0.01	2018年	0.256	7.36	<0.01
2007年	0.226	6.62	<0.01	2019年	0.257	7.38	<0.01
2008年	0.227	6.65	<0.01	2020年	0.262	7.48	<0.01
2009年	0.231	6.79	<0.01	2021年	0.265	7.51	<0.01
2010年	0.236	6.92	<0.01	2022年	0.268	7.53	<0.01
2011年	0.241	7.05	<0.01				

农业碳排放时空特征呈现“西高东低,规模化农牧区高于传统农牧区”的空间格局。河西走廊地区及陇中部分牧区因规模化种植与集约化养殖,碳排放强度较高。较高、高碳排放区域不断扩张,从2000年的30个增长到2022年的34个,平均农业碳排放量达到1.71×10^5 t。高碳排放区向武威、金昌、张掖的山丹县、民乐县和甘州区等地聚集,较高碳排放区集中在酒泉、张掖等地。古浪县、安定区、民乐县从2000年的较高碳排放区域在2022年已转变为高碳排放区域。这种转变与这些县域近年来规模化养殖业快速扩张密切相关。例如民乐县依托“百万只肉羊”项目,畜禽存栏量大幅提升,导致碳排放显著上升;低、中碳排放区覆盖面积最大,县域主要集中分布在陇中、陇南一带。低碳排放区数量从2000年的17个增加到30个,平均碳排放量为3.08×10^4 t。中碳排放区域在研究期间逐渐减少,大部分转变为低碳排放区,陇南市的文县、康县以及定西市的岷县从较高碳排放区转入低碳排放区,这主要归因于这些地

区受制于复杂地形，农业规模小，农业机械化程度提升缓慢，农业生产强度下降，同时积极实施退耕还林、生态移民等政策，共同推动了碳排放水平的降低。



注：底图源自国家地理信息公共服务平台，审图号为GS(2024)0650。底图边界无修改。下同。

图5 甘肃省2000—2022年县域农业碳排放的时空分异特征

Fig.5 Spatiotemporal differentiation characteristics of county-level agricultural carbon emissions in Gansu Province from 2000 to 2022

2.2.2 局部空间自相关分析

为进一步揭示甘肃省县域农业碳排放空间集聚特征，本文选取2000，2007，2014和2022年4个年份来绘制甘肃省县域农业碳排放量的LISA聚类图。聚集态势以高-高集聚和低-低聚类为主，4个年份同质集聚县域（高-高和低-低）数量分别21，33，40和39，异质县域（高-低集聚和低-高集聚）总数分别为7，11，6，31（图6）。观测期内，碳排放高值区主要集聚在河西地区，受地理因素的影响较大。从时序演变来看，2000年以来，“高-高”集聚所涵盖的县域数量逐步增加，空间集聚效应持续增强，主要集中于武威市、张掖市和金昌市等部分县域。“低-低”集聚区呈现波动变化，至2022年已扩展至31个县域，主要分布于甘肃省中部与南部的临夏回族自治州大部分县域，以及陇南市和定西市的漳县、岷县一带。在局部空间关联类型方面，“高-低”集聚在2007年有所增加，但到2022年减少至3个县域，典型地区包括夏河县、临洮县和靖远县等。而“低-高”集聚则呈零散分布，分布在金川区、临泽县和高台县等地，金川区以有色金属工业为主，气候干旱，农业规模有限，因而农业碳排放水平较低；而邻近的民勤县作为典型的干旱荒漠绿洲农业区，受土壤贫瘠等因素影响，化肥与农膜投入强度大，从而导致农业碳排放处于较高水平。

2.3 县域农业碳排放影响因素分析

2.3.1 LMDI模型分解结果

从表5可知，2000—2022年4类因素共同导致甘肃省县域农业碳排放累积总效应为4.38×10^6 t。各因素贡献度排序为：农业产业结构（41.92%）＞农业经济增长水平（27.14%）＞农业生产效率（22.62%）＞农业劳动力规模（8.32%）。在驱动因素方面，农业生产效率与农业劳动力规模对碳排放起到明显的减缓作用；与之相反，畜牧业主导的产业结构特征与农业经济增长水平则是推动碳排放持续增长的主要原因。农业生产效率是推动甘肃省农业碳减排的关键因素，累计实现2.60×10^6 t的碳减排。甘肃省农业低碳技术和管理水平的提升，有效推动了化肥减量和作物增产，尤其在河西走廊等干旱地区，滴灌、喷灌等节水灌溉技术的推广[20]，在提高水资源利用效率的同时减少了农资投入，实现了减排与增产的双重效应。劳动力规模累计实现9.57×10^5 t减排。随着城镇化推进，农业从业人口减少，农业生产强度下降；农业机械替代人力，经营规模化和机械化程度提升，一定程度上抑制了碳排放。农业产业结构因素对农业碳排放表现为促进效应，累计增加4.82×10^6 t。甘肃省畜牧业比重持续上升，种植业低碳转型缓慢，产业结构对高碳路径的依赖是碳排放增加

的关键。农业经济增长水平累计造成3.12×10⁶ t碳增量。农业经济规模扩大带动化肥、农膜等农资消耗增加,表明现有增长模式仍高度依赖资源投入型路径。

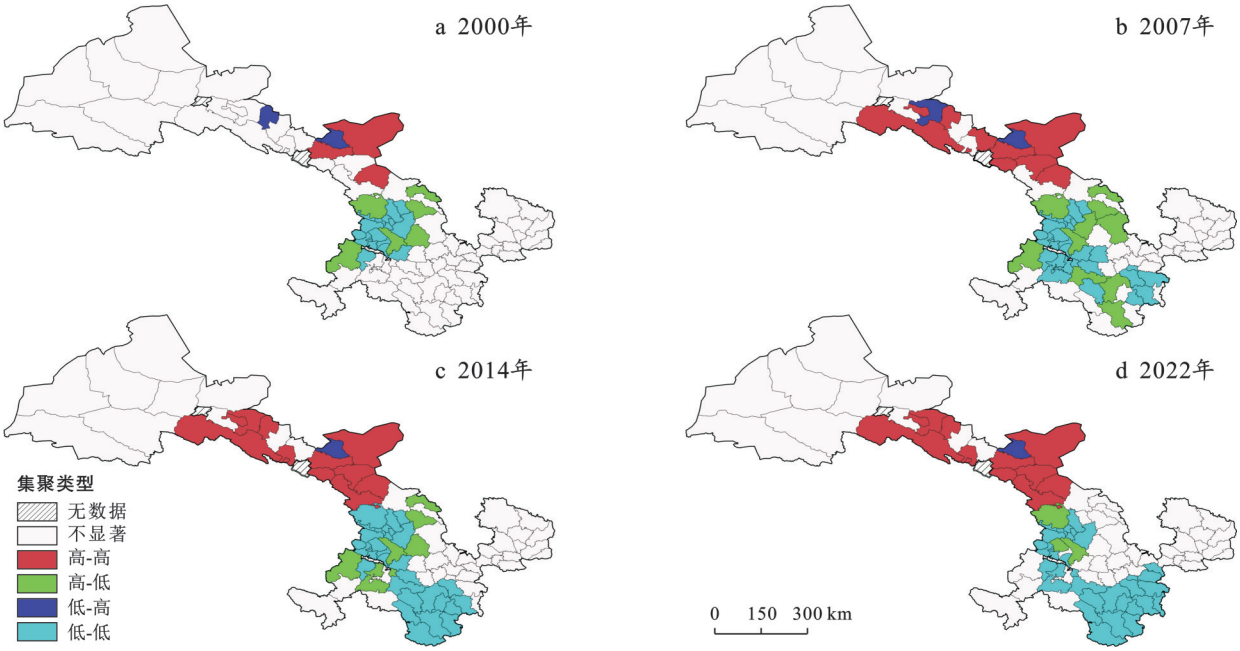


图 6　甘肃省 2000—2022 年县域农业碳排放 LISA 集聚图

Fig.6　LISA cluster map of agricultural carbon emissions by county in Gansu Province from 2000 to 2022

表 5　2000—2022 年甘肃省县域农业碳排放影响因素分析结果

Table 5　Analysis results of county-scale agricultural carbon emission drivers in Gansu Province from 2000 to 2022

年份	贡献值/10⁴ t				
	农业生产效率效应	农业产业结构效应	农业经济增长水平效应	农业劳动力规模效应	综合效应
2001	5.31	382.29	−397.14	−0.68	−10.22
2002	5.64	387.33	−427.59	35.14	0.52
2003	9.41	393.61	−446.19	54.21	11.04
2004	−8.17	377.87	−374.58	58.09	53.21
2005	−18.67	382.54	−354.62	57.10	66.34
2006	129.48	427.23	−371.04	54.15	239.82
2007	−81.05	406.30	−256.47	41.05	109.83
2008	−88.24	394.17	−215.18	28.59	119.34
2009	−41.60	415.27	−217.66	35.19	191.20
2010	−88.55	422.66	−143.32	27.80	218.59
2011	−136.13	432.45	−92.42	18.47	222.38
2012	−208.32	438.21	6.34	0.37	236.59
2013	−199.96	459.39	63.88	−20.32	302.99
2014	−145.00	476.26	84.20	−30.56	384.90
2015	−141.44	478.68	101.30	−38.26	400.29
2016	−201.14	476.69	167.10	−48.25	394.40
2017	−44.24	421.83	−18.17	−49.76	309.66
2018	−150.34	415.02	50.01	−52.92	261.79
2019	−261.66	432.57	164.24	−62.51	272.64
2020	−274.26	446.07	213.33	−70.04	315.10
2021	−259.04	463.28	259.20	−84.68	378.76
2022	−260.11	482.05	312.09	−95.65	438.38

2.3.2　产业结构与生产效率的碳排放效应分析

为进一步揭示LMDI分解结果的深层逻辑,本文对“农业产业结构促进碳排放”的内在驱动机制和“农业生产效率抑制碳排放”的技术减排路径进行探讨。

(1)政策补贴驱动下的畜牧业扩张,促进了碳排放。畜牧业扩张主要受政策补贴驱动而非单纯的市场需求拉动。2000—2022年甘肃省畜牧业产值比例从38.2%升至51.7%,2006年国家奶牛良种补贴项目在甘肃启动,年投资180万元改良奶牛6万头;此后相继出台《甘肃省“十二五”畜牧业发展规划》《甘肃省牛羊产业扶贫实施方案》等政策;粮改饲项目补助青贮1 830元/hm²,中央补助资金1.2亿元。在这些政策引导下,甘肃省形成了张掖武威肉牛、平凉红牛、甘南牦牛等特色产业带,全产业链产值将突破1 140亿元,玉米种植面积从4.87×10⁵ hm²增至6.83×10⁵ hm²,化肥投入增加,从而增加碳排放。

(2)农业生产效率的提升,如节水灌溉减少化肥使用,抑制碳排放。节水灌溉技术推广是核心环节,传统大水漫灌下氮肥利用率仅30%~40%,节水灌溉(滴灌、水肥一体化)通过精准水肥同步,使氮素淋失减少40%~60%,氮肥吸收利用率提升15%~25%。张掖市民乐县示范点数据显示,智慧水肥一体化技术使化肥利用率从40.3%提升至61.0%,马铃薯单产增产20%,N_2O排放强度降低27.1%。截至2022年,甘

肃省高效节水灌溉面积达6.80×10^5 hm^2，水肥一体化推广超2.00×10^5 hm^2，年减少化肥使用量2.40×10^4～3.60×10^4 t，折合碳减排约2.10×10^4～3.20×10^4 t。

2.4 县域农业碳排放脱钩效应分析

基于Tapio脱钩模型，分析甘肃省2000—2022年农业碳排放与农业经济增长的脱钩关系，结果如表6，图7所示。从表6可知，3个时期的主要脱钩类型为弱脱钩、弱脱钩和强脱钩。脱钩状态整体由弱脱钩向强脱钩转变，脱钩效应总体向好。2000—2007年甘肃省县域农业碳排放与经济增长的脱钩状态呈现明显空间分异。脱钩县域数量达到53个（比例61.63%），主要集中于东南部的靖远、宁县、渭源等地；而负脱钩县比例27.91%，其中扩张负脱钩尤为突出，连片分布在河西地区的金塔、瓜州、玉门、民勤等18个县域，表现为碳排放增速高于经济增长，属于不理想状态。其形成与西部大开发战略背景下河西地区基础设施与农业现代化投入加大、农业产出快速增长密切相关。2007—2014年脱钩类型县域比例为60.47%，弱脱钩县域数量增至45个，但强脱钩的数量由15个减少到5个，除舟曲县外，其他14个县的脱钩状态都出现不同程度的恶化；负脱钩类型数量升至20.93%，没有弱负脱钩县，但增长连接型县域数量上升，如七里河区、崇信县、陇西县等由脱钩状态转为增长连接，表明其碳排放与农业经济增长趋于同步上升，低碳转型进程放缓。2014—2022年甘肃省县域农业碳排放与经济增长的脱钩状态整体呈现向好趋势。脱钩县域比例达到63.95%，其中强脱钩县显著增至23个，主要分布于金塔、夏河、文县等地，而弱脱钩县则集中于河西一带。衰退脱钩与弱负脱钩县数量有所增加，主要集中在庆阳、敦煌等地。这一阶段脱钩格局的优化与甘肃省推动农业绿色高质量发展、实施“牛羊产业提升计划”与“节水农业行动”等政策密切相关，特别是河西地区通过推广高效节水技术，在保障农业产出的同时有效抑制了碳排放增长，实现了从负脱钩向强脱钩的转变。总体来看，甘肃省脱钩状态存在显著的空间异质性。河西地区在政策支持与技术推广的推动下逐步向强脱钩转型；陇东南部分县域受自然条件与经营模式限制，虽碳排放强度较低，但仍面临技术推广与结构转型的挑战；中部及南部部分县域因畜牧业比重上升与农业投入结构优化不足，脱钩状态出现波动。这一空间格局是区域资源禀赋、政策导向与经济发展阶段共同作用的结果，与田云等[26]提出的“地理分区视角下农业碳效应存在显著空间异质性”的研究结论形成呼应。

表6 甘肃省2000—2022年县域农业碳排放与农业经济增长脱钩状态统计

Table 6 Decoupling status between county-level agricultural carbon emissions and agricultural economic growth in Gansu Province from 2000 to 2022

脱钩类型	脱钩状态	脱钩县域数量/个		
		2000—2007年	2007—2014年	2014—2022年
负脱钩	弱负脱钩	2	—	10
	强负脱钩	4	1	5
	扩张负脱钩	18	16	6
脱钩	弱脱钩	36	45	21
	强脱钩	15	5	23
	衰退脱钩	2	2	11
连接	衰退连接	1	—	6
	增长连接	8	17	4

注：“—”表示未发现

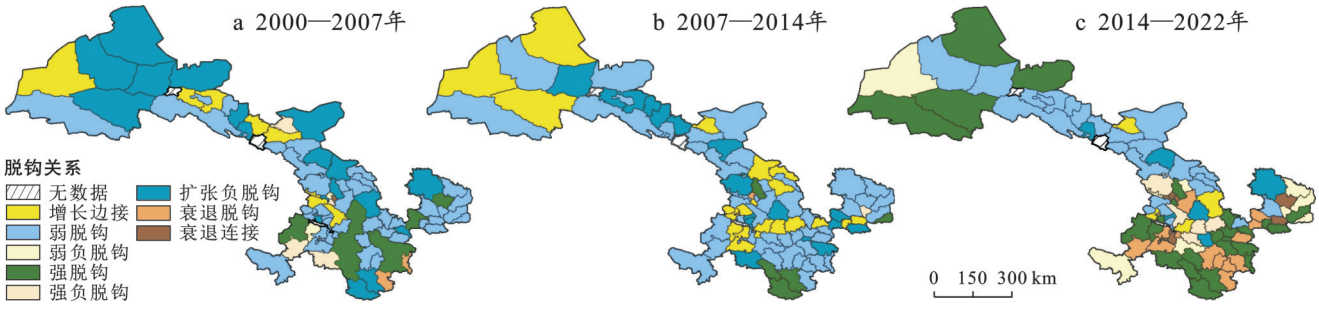


图7 甘肃省县域2000—2022年农业碳排放与农业经济增长的脱钩演变格局

Fig.7 Decoupling evolution pattern of agricultural carbon emissions and agricultural economic growth in counties of Gansu Province from 2000 to 2022

3 结 论

（1）甘肃省县域农业碳排放总量呈现波动上升的趋势，农业碳排放强度整体呈下降趋势。畜禽养殖业对农业碳排放的贡献率最大，碳排放量不断增长，各碳源的碳排放量及比例分别为畜禽养殖（1.45×10^8 t，60.10%）、农地利用（6.53×10^7 t，34.16%）、农作物种植（1.10×10^8 t，5.74%）。种植业

碳排放强度和畜牧业碳排放强度呈下降趋势,但畜牧业碳排放强度仍高于种植业。已有实践证明了畜牧业减排的可行性,张掖市依托“粮改饲”工程,通过青贮玉米替代籽粒玉米、增加苜蓿比例等饲料优化措施,可有效降低反刍动物肠道发酵甲烷排放;兰州大学团队发现本土牛种的日甲烷排放量几乎只有改良品种的1/2,青藏高原牦牛的甲烷排放被国际模型高估约39%[30]。因此,实施“品种改良(推广低甲烷排放牛种)+饲料优化(增加青贮玉米和苜蓿比例)+粪污资源化(配套沼气工程)”的畜牧业低碳转型路径有助于引导畜牧业的低碳转型。

(2)甘肃省县域农业碳排放存在较强的全局空间正相关性,高碳排放区县从2000年的30个增长至2022年的34个,集中在以河西走廊为代表的集约化农牧区等地,其高碳排放是种植业和畜牧业排放双重叠加的结果。低碳排放区分布在陇中、陇南为代表的传统小农农业区,地形限制了大机械使用,主要以小尺度种养循环为主,农业碳排放较低。针对河西走廊高碳排放区,应推广“节水节肥技术补贴+规模化养殖场碳交易”模式,加大智慧水肥一体化技术推广力度,探索畜牧业碳减排纳入碳交易市场;针对陇南传统小农农业区低碳排放区,应推进“林农复合系统建设+有机肥替代化肥奖励”,发展林下经济提升固碳能力,保护传统小尺度种养循环模式。

(3)2000—2022年甘肃省农业碳排放量增加4.38×10^6 t,各因素累积贡献度从大到小依次为农业产业结构(41.92%)、农业经济增长水平(27.14%)、农业生产效率(22.62%)和农业劳动力规模(8.32%)。从驱动机制来看,农业生产效率的提升和劳动力转移一定程度上抑制了农业碳排放,而畜牧业主导的产业结构和经济增长水平推动了农业碳排放的增长。因此,在未来提高农业生产效率,改进粗放要素投入,低碳科技赋能传统生产方式,优化劳动力结构是抑制农业碳排放和推动农业低碳转型的重要途径。

(4)甘肃省县域农业碳排放与农业经济增长以弱脱钩状态为主,总体经历了“弱脱钩—弱脱钩—强脱钩”的阶段性变化,空间上脱钩类型的县区占据主导,但脱钩进程具有显著的县际差异。金塔县、夏河县、和甘谷县等21个县已进入强脱钩阶段,呈现农业经济增长,但农业碳排放量下降的理想状态。武山县、古浪县和民乐县等6个县仍停留在扩张负脱钩状态,尚未呈现农业碳排放与经济增长之间的联动效应。针对脱钩状态波动的中部及东部农牧交错区(如临夏县、和政县等),应重点优化种养结构,推广“粮改饲”模式;对仍处于扩张负脱钩的县域,强化节能减排技术推广,加快向强脱钩转变。

参考文献(References)

[1] 崔永福,高策,王俊凤,等.河北省县域农业碳排放空间演化及对策[J].中国农机化学报,2023,44(5):241-248.
Cui Yongfu, Gao Ce, Wang Junfeng, et al. Spatial evolution and countermeasures of county agricultural carbon emission in Hebei Province [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(5):241-248.

[2] 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(4):558-569.
Liu Yang, Liu Hongbin. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(4):558-569.

[3] 李波,张俊飚,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80-86.

[4] 周思宇,郗凤明,尹岩,等.东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素[J].应用生态学报,2021,32(11):3865-3871.
Zhou Siyu, Xi Fengming, Yin Yan, et al. Accounting and drivers of carbon emission from cultivated land utilization in northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(11):3865-3871.

[5] 高标,王皓琨,于媛.农牧交错区农业碳排放时空特征及经济协调关系[J].环境科学与技术,2025,48(11):226-236.
Gao Biao, Wang Haokun, Yu Yuan. Spatiotemporal characteristics of agricultural carbon emissions and its economic coordination relationship in the agro-pastoral ecotone [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(11):226-236.

[6] 夏四友,赵媛,许昕,等.近20年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J].长江流域资源与环境,2020,29(3):596-608.
Xia Siyou, Zhao Yuan, Xu Xin, et al. Regional inequality, spatial-temporal pattern and dynamic evolution of carbon emission intensity from agriculture in China in the period of 1997-2016 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(3):596-608.

[7] 郑瑞,姜春,谢臻,等.2001—2020年福建省县域单元农业碳排放核算和时空演变特征分析[J].水土保持通报,2024,44(3):430-440.
Zheng Rui, Jiang Chun, Xie Zhen, et al. Accounting and

analyzing spatial-temporal evolution characteristics of agricultural carbon emissions at county units of Fujian Province during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):430-440.

[8] 李慧,李玮,姚西龙.基于GWR模型的农业碳排放影响因素时空分异研究[J].科技管理研究,2019,39(18):238-245.
Li Hui, Li Wei, Yao Xilong. Study on spatial and temporal variation of impacting factors of agricultural carbon emissions based on the GWR model [J]. Science and Technology Management Research, 2019,39(18):238-245.

[9] 尹忞昊,田云,卢奕亨.中国农业碳排放区域差异及其空间分异机理[J].改革,2023(10):130-145.
Yin Minhao, Tian Yun, Lu Yiheng. Regional differences and spatial divergence mechanisms of agricultural carbon emissions in China [J]. Reform, 2023(10):130-145.

[10] 刘丽辉,徐军.基于扩展的STIRPAT模型的广东农业碳排放影响因素分析[J].科技管理研究,2016,36(6):250-255.
Liu Lihui, Xu Jun. Analysis of influencing factors of agricultural carbon emission in Guangdong Province with the extended STIRPAT model [J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(6):250-255.

[11] 张小蓉,杨燕.山西省农业碳排放演化趋势及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2026,47(3):175-188.
Zhang Xiaorong, Yang Yan. The evolution trend and influencing factors of agricultural carbon emissions in Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2026, 47(3):175-188.

[12] 田云,张俊飚,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].资源科学,2012,34(11):2097-2105.
Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. Resources Science, 2012,34(11):2097-2105.

[13] 高标,房骄,卢晓玲,等.区域农业碳排放与经济增长演进关系及其减排潜力研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(1):13-18.
Gao Biao, Fang Jiao, Lu Xiaoling, et al. Evolution relationship between agricultural carbon emissions and economic growth and its reduction potential [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(1):13-18.

[14] 杨欣,董玥.农户低碳农业技术采纳行为的影响因素研究:基于潜江市、监利县的实证分析[J].国土资源科技管理,2019,36(3):118-128.
Yang Xin, Dong Yue. On the influencing factors of farmers' low-carbon agricultural technology adoption behavior: Based on empirical analysis of Qianjiang City and Jianli County [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2019,36(3):118-128.

[15] 夏文浩,张俊飚,马义光,等.农村产业融合的减排增汇效应分析:以典型干旱区新疆为例[J].中国生态农业学报(中英文),2026,34(3):646-661.
Xia Wenhao, Zhang Junbiao, Ma Yiguang, et al. Analyzing the carbon emission-reducing and sink-enhancing effects of rural industrial integration: A case study of Xinjiang, a typical arid zone [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2026,34(3):646-661.

[16] 田云,张银岭.中国农业碳排放减排成效评估、目标重构与路径优化研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(12):1-7.
Tian Yun, Zhang Yinling. Research on effectiveness evaluation, target reconstruction and path optimization of agricultural carbon emission reduction in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019,33(12):1-7.

[17] 白永平.甘肃农业生态气候资源系统分析[J].应用生态学报,2000,11(6):827-832.
Bai Yongping. Systematic analysis of agro-ecoclimatic resources in Gansu Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000,11(6):827-832.

[18] 张建军,党翼,赵刚,等.西北旱塬免耕的产量效应受降水特征和施肥显著影响[J].植物营养与肥料学报,2024,30(9):1694-1704.
Zhang Jianjun, Dang Yi, Zhao Gang, et al. Crop yield efficiency of no-tillage is significantly influenced by precipitation and fertilization in the dryland of northwest China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024,30(9):1694-1704.

[19] 伍芬琳,李琳,张海林,等.保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J].生态学杂志,2007,26(12):2035-2039.
Wu Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(12):2035-2039.

[20] 李绵德,周冬梅,朱小燕,等.河西走廊2000—2020年农业碳排放时空特征及其影响因素[J].农业资源与环境学报,2023,40(4):940-952.
Li Miande, Zhou Dongmei, Zhu Xiaoyan, et al. Spatial-temporal characteristics of agricultural carbon emissions and influencing factors in the Hexi Corridor from 2000 to 2020 [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023,40(4):940-952.

[21] 田云,张俊飚.中国农业生产净碳效应分异研究[J].自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.
Tian Yun, Zhang Junbiao. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production

in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8):1298-1309.

[22] 闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].中国人口·资源与环境,2012,22(7):21-27.
Min Jisheng, Hu Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7):21-27.

[23] 胡向东,王济民.中国畜禽温室气体排放量估算[J].农业工程学报,2010,26(10):247-252.
Hu Xiangdong, Wang Jimin. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(10):247-252.

[24] 郑博福,梁涵,万炜,等.江西省县域农业碳排放时空格局及影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(23):70-80.
Zheng Bofu, Liang Han, Wan Wei, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural carbon emissions at the county level in Jiangxi Province of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(23):70-80.

[25] 田云,张君.地理分区视角下的农业碳效应驱动机理研究[J].华中农业大学学报(社会科学版),2020(2):78-87.
Tian Yun, Zhang Jun. Research on driving mechanism of agricultural carbon effect from the perspective of geographical divisions [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2020(2): 78-87.

[26] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005,12(2):137-151.

[27] 董珊珊,黄文治,张伟.中断时间序列分析在医院科研激励中的应用[J].中国循证医学杂志,2021,21(9):1098-1101.
Dong Shanshan, Huang Wenzhi, Zhang Wei. Application of interrupted time series analysis in hospital scientific research incentive [J]. Chinese Journal of Evidence-Based Medicine, 2021,21(9):1098-1101.

[28] 王婧.陕西省农业碳排放时序特征及影响因素分析[J].山西农业科学,2016,44(9):1377-1382.
Wang Jing. Temporal characteristics and impact factors analysis of agricultural carbon emission in Shaanxi Province [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(9):1377-1382.

[29] 冉锦成,马惠兰,苏洋.西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J].江西农业大学学报,2017,39(3):623-632.
Ran Jincheng, Ma Huilan, Su Yang. A study on agricultural carbon emission and carbon emission reduction potential in five provinces in northwest China [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(3): 623-632.

[30] 石福于.牦牛高效能氮利用的瘤胃微生物学机制[D].甘肃 兰州:兰州大学,2022.
Shi Fuyu. Rumen microbiological mechanisms of efficient energy and nitrogen utilization in yak [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2022.

(上接第 299 页)

[21] 芦风英,庞智强,邓光耀.中国乡村振兴发展的区域差异测度及形成机理[J].经济问题探索,2022(4):19-36.
Lu Fengying, Pang Zhiqiang, Deng Guangyao. Measurement and formation mechanism of regional differences in rural revitalization in China [J]. Inquiry Into Economic Issues, 2022(4):19-36.

[22] 杨晨,张燕媛.粮食主产区农业碳排放效率与粮食安全耦合研究[J].中国农业资源与区划,2024,45(7):12-27.
Yang Chen, Zhang Yanyuan. Study on the coupling of agricultural carbon emission efficiency and food security in major grain-producing areas [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024,45(7):12-27.

[23] 何宇鹏,朱梦蝶.粮食产销区省际碳补偿的机制建构与测度[J].统计与决策,2024,40(24): 84-89.
He Yupeng, Zhu Mengdie. Mechanism construction and measurement of inter-provincial carbon compensation in grain production and marketing areas [J]. Statistics & Decision, 2024,40(24):84-89.

[24] 郭延景,孙学涛.山东省粮食供需现状及粮食增产驱动因素分析[J].中国农业资源与区划,2025,46(8):1-17.
Guo Yanjing, Sun Xuetao. The current situation of grain supply and demand in Shandong Province and its drivers of grain production increase [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(8):1-17.

[25] 贾伊龙,徐辉.农业机械化、环境规制与农业碳排放的关系研究[J].中国农机化学报,2024,45(12):208-215.
Jia Yilong, Xu Hui. Study of the relationship between agricultural mechanization, environmental regulation and agricultural carbon emissions [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024,45(12):208-215.

[26] Huang Jie, Lu Hongyang, Du Minzhe. Regional differences in agricultural carbon emissions in China: Measurement, decomposition, and influencing factors [J]. Land, 2025,14(4):682.