



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

河西走廊2000—2020年农业碳排放时空特征及其影响因素

李绵德, 周冬梅, 朱小燕, 祁海强, 马静, 张军

引用本文:

李绵德, 周冬梅, 朱小燕, 祁海强, 马静, 张军. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0584>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北方农村清洁供暖先行区农业废弃物的生物质能潜力及减排效应评估

赵晴云, 马若婧, 周璐芸, 朱钰铭, 尧可, 李晓婕, 张雪靓

农业资源与环境学报. 2023, 40(3): 667–679 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0297>

基于京津冀一体化的农田生态系统碳足迹年际变化规律研究

田志会, 刘瑞涵

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 167–173 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0222>

北京市农田生态系统碳足迹及碳生态效率的年际变化研究

田志会, 马晓燕, 刘瑞涵

农业资源与环境学报. 2015(6): 603–612 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0101>

中国生猪主产区养殖碳排放时空特征与脱钩效应研究

汪爱娥, 游梦琪, 王德海

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 269–275 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0327>

基于减排潜力与减排成本的水稻种植模式综合评价——以湖北省为例

周杏, 李晶, 于书霞, 刘微, 胡荣桂

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 568–575 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0115>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 M D, ZHOU D M, ZHU X Y, 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.

河西走廊 2000—2020 年农业碳排放 时空特征及其影响因素

李绵德¹, 周冬梅¹, 朱小燕¹, 祁海强¹, 马静¹, 张军^{1,2*}

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 兰州 730070)

摘 要: 农业是一个较为复杂的温室气体源/汇系统, 不同区域、不同种养情况导致农业系统呈现碳源或碳汇两种情况。分析农业系统中碳排放特征及其影响因素, 对实现农业绿色发展具有重要的意义, 也为推动实现“碳达峰”“碳中和”目标提供数据依据。本研究以河西走廊为例, 测算了 2000—2020 年河西走廊地区 20 个县市的农业碳排放量, 并分析了农业碳排放时空特征及其影响因素。结果显示: 2000—2020 年河西走廊地区农业碳排放呈现缓慢上升状态。农业碳排放量最大的区域为凉州区和甘州区, 占河西走廊地区农业碳排放总量的 31.74%。从种植业与养殖业来看, 河西走廊地区种植业为碳汇, 碳吸收量达 1.41×10^8 t, 养殖业为碳源, 碳排放量达 4.17×10^7 t。2000—2020 年河西走廊地区农业净碳排放量呈现起伏变化, 但总体呈下降趋势, 农业系统向碳汇转变。在种植业中对农业碳排放影响最大的因子为种植规模, 在规模稳定发展区域影响最大的因素为机械化程度, 在规模较小的区域主要影响因素为农村用电量; 在养殖业中对规模较大区域和养殖业占比较高区域影响最大的因素为养殖规模, 关联度在 0.90 以上。2000—2020 年河西走廊地区农业碳排放强度表现为从随机分布到显著聚集的过程, 农业碳排放重心缓慢向东南方向转移, 但仅在张掖市内迁移。

关键词: 农业碳排放; 灰色关联度; 空间自相关; 标准差椭圆; 河西走廊

中图分类号: X71

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)04-0940-13

doi: 10.13254/j.jare.2022.0584

Spatial-temporal characteristics of agricultural carbon emissions and influencing factors in the Hexi Corridor from 2000 to 2020

LI Miande¹, ZHOU Dongmei¹, ZHU Xiaoyan¹, QI Haiqiang¹, MA Jing¹, ZHANG Jun^{1,2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Research Center for Water-saving Agriculture in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Agriculture comprises a complex greenhouse gas source and sink system. Different regions and planting and breeding conditions lead to two types of carbon sources or sinks in the agricultural systems. Identifying the characteristics of carbon emissions in agricultural systems and influencing factors is of great significance to achieve green agricultural development, which will also provide a data basis to promote the realization of “carbon peak” and “carbon neutrality” goals. Taking the Hexi Corridor as an example, we calculated and analyzed the spatial and temporal characteristics of agricultural carbon emissions and influencing factors in 20 counties in the Hexi region from 2000 to 2020. The following results were obtained: from 2000 to 2020, agricultural carbon emissions in Hexi showed a slow increase.

收稿日期: 2022-08-25 录用日期: 2022-11-07

作者简介: 李绵德 (1996—), 男, 甘肃古浪人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业资源可持续利用。E-mail: 2690550047@qq.com

*通信作者: 张军 E-mail: zhangjun@gsau.edu.cn

基金项目: 甘肃省高等学校创新基金项目 (2021A-061); 甘肃省自然科学基金项目 (21JR7RA811); 甘肃省林业和草原科技创新计划项目 (LCKJCX202205); 甘肃省社科规划项目 (2022YB069)

Project supported: Innovation Fund for Higher Education of Gansu Province (2021A-061); Natural Science Foundation of Gansu Province (21JR7RA811); Gansu Forestry and Grassland Science and Technology Innovation Plan (LCKJCX202205); Social Science Planning Project of Gansu Province (2022YB069)

The regions with the largest agricultural carbon emissions were Liangzhou District and Ganzhou District, accounting for 31.74% of the total agricultural carbon emissions in Hexi. From the perspective of planting and stockbreeding, the planting industry in the Hexi region was determined to be a carbon sink, with carbon absorption of 1.41×10^8 t, and stockbreeding was considered a carbon source, with carbon emissions reaching 4.17×10^7 t. From 2000 to 2020, the net carbon emissions of agriculture in Hexi showed fluctuations, but the overall trend was decreasing, and the agricultural system changed to carbon sinks. In the planting industry, the factor with the greatest impact on agricultural carbon emission was determined to be planting scale, and in regions with stable scale development, the factor with the greatest impact was found to be the mechanization degree. The main influencing factors for smaller regions were the rural electricity consumption. In the agricultural area with a large scale and high proportion of stockbreeding industry, the most influential factor was the stockbreeding scale, and the correlation degree was greater than 0.9. From 2000 to 2020, the agricultural carbon emission intensity in the Hexi region showed a process of random distribution to significant aggregation, and the center of agricultural carbon emission shifted slowly to the southeast, but only in Zhangye City.

Keywords: agricultural carbon emission; grey correlation degree; spatial autocorrelation; standard deviation ellipse; the Hexi Corridor

21世纪以来,由CO₂、CH₄温室气体引发的全球变暖问题日益加重,已经威胁到人类生存发展^[1]。研究表明我国农业碳排放存在显著的省域差异,具有南北低、中部高的特点,农业温室气体收支比例为16%~17%^[2]。

农业碳排在很早之前就受到诸多学者的关注,在农业碳排放的影响因子研究过程中,学者主要从劳动力、农业技术、财政支出、国家政策、产业聚集等角度研究农业碳排放的影响^[3-5]。国内学者认为农业碳排放分为农田土壤碳排放、作物生长碳排放、农地利用过程碳排放、能源碳排放、养殖碳排放等^[6-8]。除了农业生产领域,也有学者从农民日常生活(如消费水平、城市化、人口、经济发展、生活方式、收入等)的角度进行测算^[9-11]。刘杨等^[12]利用IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)碳排放计算方法,从农资投入、农田利用等碳源测算了山东省2000—2020年的农业碳排放量并采用LMDI模型开展影响因素分析,结果表明地区经济水平和城镇化率是农业碳排放量增加的主要因素。

综上所述,现有研究对农业的碳排放测算方法不同,对不同区域、不同环境选取的温室气体因子和碳排放因子各不相同,大多以时间趋势和省级区域进行测算分析,而按照空间范围和县级区域分析较少。河西走廊气候属于大陆性干旱气候,绿洲农业发达,是甘肃省重要的农业区。该区属于灌溉农业区,历史悠久,是西北地区最主要商品粮基地和经济作物产区,提供了全省约2/3以上的商品粮。在现有河西走廊地区碳排放的研究成果中,主要针对河西走廊地区的农田碳汇和人类生活产生的碳排放进行研究,且时间较早,而对该区农业生产过程中所产生的碳排放研究很

少。本研究参考IPCC、美国橡树岭国家实验室发布的碳排放系数法^[1],从种植业中的农地利用、土壤、秸秆焚烧碳排放与作物生命周期中的碳固定,以及养殖业中动物的肠道、粪便碳排放,测算河西走廊地区农业碳排放总量和农业净碳排放量,采用灰色关联度与空间自相关方法,从时间与空间两个维度分析各因素对农业碳排放的影响程度和农业碳排在空间上的变化,以期对河西走廊地区农业碳减排提供决策依据,也为国家实现“双碳”目标提供数据支撑。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

河西走廊位于黄河以西,被两山夹峙,属于祁连山地槽边缘,地势平坦,海拔在1 500 m左右,处于37°17'~42°48'N、93°23'~104°12'E。山区河流运送下来的物质堆积,形成了相连的倾斜平原,其地势平坦,土壤质地肥沃,便于引水灌溉和开发利用。河西走廊属于大陆性干旱气候,降水少,风沙多。自东向西年降水量逐渐减少,武威年降水量为158.00 mm,敦煌则为36.00 mm,1961—2018年降水量变化倾向率为每10年4.34 mm($P < 0.05$)^[13]。尽管河西走廊地区降水稀少,但农业发展的其他条件较好,祁连山冰雪融水丰富,形成了较为发达的农业灌溉区。1961—2018年河西走廊地区气温呈现极显著上升趋势,气温变化倾向率为每10年0.36 °C($P < 0.01$)^[13]。当地云量稀少,日照时间长,光照资源丰富,对农作物的生长发育十分有利,该地区昼夜温差较大,有利于农作物的物质积累,特别适合瓜果糖分的积累。2000—2020年河西走廊地区生产总值从2000年的247.47亿元增加到2020年的2 291.43亿元,农业生产是河西走廊地区主要的

经济来源之一。

1.2 数据来源

农业播种面积、作物产量、机械用电量数据来自甘肃省统计年鉴(2001—2021),化肥、农膜、农药使用量等数据来源于甘肃农村统计年鉴(2001—2021)、张掖统计年鉴(2001—2021)以及实际调研。

2 研究方法

2.1 农业碳排放量测算方法

2.1.1 种植业碳排放计算

种植业碳排放测算方法有生命周期法、碳排放系数法等,本研究参考IPCC、美国橡树岭国家实验室发布的碳排放系数法^[1]和周思宇等^[14]的农业碳排放测算公式,提出河西走廊地区种植业碳排放测算公式:

$$E_x = \sum E_i \times Q_i \quad (1)$$

式中: E_x 为种植业碳排放总量,kg; E_i 为种植业的第*i*种碳源的量; Q_i 为第*i*种碳源的碳排放系数。

根据河西走廊地区实际情况,将种植业碳排放分为农地利用碳排放、土壤碳排放和秸秆焚烧碳排放三大部分,其中农地利用碳排放分为化肥、农药、农膜、翻耕和农业机械总动力5部分;在作物生长过程中土壤中的 N_2O 会排放到空气中,引起臭氧层破坏,根据不同作物的 N_2O 排放系数,测算出 N_2O 排放总量。参照现有研究将 N_2O 按照 $m_C:m_{N_2O}=1:81.27$ ^[15]把 N_2O 排放量转化为碳排放量(表1)。

焚烧是河西走廊地区部分农作物秸秆的处理方式,秸秆焚烧会产生大量的碳,对环境造成影响,由于

作物秸秆的数量没有详细的统计,本研究中按照草谷比^[16]的方法计算出农作物的秸秆产量,进而测算出秸秆焚烧产生的碳排放量。

$$S = \sum K_i \times f_i \quad (2)$$

式中: S 代表农作物秸秆的产量,kg; K_i 代表第*i*种农作物的经济产量,kg; f_i 代表第*i*种农作物的草谷比。

在测算农业碳排放时,焚烧产生的气体不仅有 CO_2 ,而且有 CH_4 等气体,由于 CH_4 等气体焚烧时排放量较难测量,参照以往的研究,不考虑 CH_4 等气体,本研究直接用系数测算碳排放量。

在秸秆利用过程中,河西走廊地区农业生产的秸秆并非全部用来焚烧。根据现有研究一般将秸秆分为两部分,一部分被收集利用,另一部分无法收集被焚烧在田地。在收集利用的这部分秸秆中,也有一定比例被焚烧。将河西走廊地区2000—2020年分为两个时间段:2000—2010年河西走廊地区的秸秆有23.00%未被收集利用,77.00%被收集利用,在收集利用秸秆中又有48.86%被焚烧^[19];2011—2020年河西走廊地区的秸秆有17.00%未被收集利用,83.00%被收集,收集的这部分中有20.00%被焚烧。

2.1.2 养殖业碳排放计算

养殖业的碳排放主要来源于反刍动物在养殖过程中肠道发酵产生的 CH_4 和粪便排放过程中产生的 CH_4 和 N_2O ^[20],根据河西走廊地区的养殖情况,本研究选择牛、羊、猪三类养殖动物,按照1 t CH_4 =6.82 t C和1 t N_2O =81.27 t C的换算方法将 CH_4 和 N_2O 排放量转化为碳排放量。

$$E_y = \sum M_i \times r_i \quad (3)$$

式中: E_y 为养殖业的碳排放总量,kg; M_i 为第*i*种动物的年末存栏数量,头; r_i 为第*i*种动物的粪便 CH_4 、 N_2O 排放系数和肠道发酵产生的 CH_4 排放系数,kg·头⁻¹(以C计)。养殖业碳排放系数见表2。

2.1.3 农业碳吸收量计算

农业生产过程中不仅会产生大量的碳排放,在农

表1 河西走廊地区种植业碳排放系数
Table 1 Carbon emission coefficients of planting industry in Hexi region

碳源 Carbon source	排放系数 Emission coefficient	文献 Reference
农地利用碳排放 Agricultural land uses carbon emissions	化肥 0.90 kg·kg ⁻¹ (以C计)	[16]
	农药 4.93 kg·kg ⁻¹ (以C计)	[16]
	翻耕 312.60 kg·hm ⁻² (以C计)	[16]
	农膜 5.18 kg·kg ⁻¹ (以C计)	[16]
	农业机械总动力 0.18 kg·kW ⁻¹ (以C计)	[17]
土壤 N_2O 排放 Soil N_2O emissions	小麦 2.05 kg·hm ⁻² (以 N_2O 计)	[18]
	玉米 2.53 kg·hm ⁻² (以 N_2O 计)	[18]
	棉花 0.48 kg·hm ⁻² (以 N_2O 计)	[18]
	油料作物 0.001 kg·hm ⁻² (以 N_2O 计)	[16]
	蔬菜 4.21 kg·hm ⁻² (以 N_2O 计)	[16]
秸秆焚烧碳排放 Straw burning carbon emissions	1.25 kg·kg ⁻¹ (以C计)	[16]

表2 河西走廊地区养殖业碳排放系数(kg·头⁻¹·a⁻¹,以C计)
Table 2 Carbon emission coefficients of stockbreeding in Hexi region(kg·head⁻¹·a⁻¹,calculated in C)

碳源 Carbon source	肠道发酵 Intestinal fermentation	粪便排放 Fecal discharge		文献 Reference
	CH_4	CH_4	N_2O	
牛 Cattle	47.00	1.00	1.39	[21]
羊 Sheep	5.00	0.15	1.39	[21]
猪 Pig	1.00	4.00	0.53	[21]

作物生长周期中作物秸秆会被还田,作物籽粒会被吃掉,同时作物也会吸收碳改变农田含碳量。参考田云等^[22]、吴昊玥等^[23]的测算方法,选取农作物的含碳率、经济产量、含水率等指标对农业碳汇进行计算,公式如下:

$$E_h = \sum_{i=1}^n E_{hi} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \times G_i \times (1 - R_i) \times (1 + T_i)}{H_i} \quad (4)$$

式中: E_h 为农业碳吸收总量,kg; E_{hi} 为第*i*类农作物的碳吸收总量,kg; F_i 为第*i*类农作物的含碳率; G_i 为第*i*类农作物的经济产量,kg; R_i 为第*i*类农作物的含水率; T_i 为第*i*类农作物的根冠比; H_i 为第*i*类农作物的经济系数。农作物碳吸收系数见表3。

2.2 农业碳排放量影响因子分析

2.2.1 影响指标选取

在现有研究中,对农业碳排放的影响因素主要从人口、经济、技术、规模等方面进行选取,本研究参考已有研究^[29-31],结合河西走廊地区农业碳排放特征,选择人均农业生产总值、非城镇化率、产业结构、机械化程度、化肥使用强度、农业种植规模、作物结构、农村用电量、养殖规模作为河西走廊地区农业碳排放的影响因素进行分析。

(1)人均农业生产总值。农业的经济发展是驱动碳排放的主要因素,已有研究表明农业经济发展与碳排放呈现倒“U”关系。该指标值越大,说明该区域农业经济水平越高,从而带来的农业碳排放量也较高。

(2)非城镇化率。该指标指该区域从事农业人口占当地总人口比例。非城镇化率越高表明该地区从事农业生产人数占比越高,已有研究表明,在人口城镇化早期二氧化碳的排放量增加,但随着城镇化水平进一步提高碳排放会受到抑制^[32]。

(3)产业结构。产业结构反映农业内部结构的优化程度,农业结构中占主导的产业对农业碳排放产生较大的影响。本研究以农业生产总值与农林渔牧生产总值的比值来量化该地区的产业结构。

(4)机械化程度。机械化程度反映农业的机械使用量,可以直接影响农业碳排放量。

(5)化肥使用强度。化肥是农业碳排放的主要来源之一,也是直接影响农业碳排放的因子。

(6)农业种植规模。规模化种植可以提高农业资源的利用效率,效率的提高可以减少资源的浪费,从而减少碳排放量。本研究以农村人均农作物播种面积来衡量农业种植规模。

(7)作物结构。不同的作物秸秆产量各不相同,作物的结构变化可以有效调节农业碳排放量,本研究以粮食作物播种面积与农作物播种面积来衡量作物结构。

(8)农村用电量。农村用电量反映该区域的经济水平与环保状况,已有研究表明农村用电量与种植业碳排放量呈正相关^[33]。

(9)养殖规模。养殖业是农业生产中碳排放的主要来源之一。由于养殖动物不同,养殖规模较难统一,本研究依据《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)(1头牛=5头猪,3只羊=1头猪),将牛、羊转化为猪当量,测算该区各县市养殖规模。

2.2.2 灰色关联模型

灰色关联度分析主要是用来解决多因素和非线性问题的分析方法,其基本思想是根据序列曲线的几何形状的相似性来判断其中关系的紧密程度,曲线越接近,各因素之间的关联度就越大,反之越小^[34]。

本研究的对象跨越了时间和区域,参考杨振等^[34]的研究,采用灰色关联度分析方法研究农业碳排放与人均农业生产总值、非城镇化率、产业结构、作物结构、化肥使用强度、机械化程度、农业种植规模、农村用电量和养殖规模的关联关系,建立对应的同一研究对象不同时间的时序关联度和同一时刻不同研究对象的截面灰色关联度。设河西走廊地区共有*M*个县市,每个县市有*N*个农业碳排放影响因子,观测时间为*T*,确定影响因子矩阵为:

$$X_i = \begin{bmatrix} x_i(1,1) & x_i(1,2) & x_i(1,3) & \cdots & x_i(1,T) \\ x_i(2,1) & x_i(2,2) & x_i(2,3) & \cdots & x_i(2,T) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_i(M,1) & x_i(M,2) & x_i(M,3) & \cdots & x_i(M,T) \end{bmatrix} \quad (5)$$

表3 河西走廊地区农作物碳吸收系数

Table 3 Carbon uptake coefficients of crops in Hexi region

农作物 Crop	含碳率 Carbon content	根冠比 Root-to- shoot ratio	含水率 Water content	经济系数 Economic coefficients	文献 Reference
小麦 Wheat	0.42	0.40	0.12	0.36	[17,24-27]
棉花 Cotton	0.45	0.12	0.11	0.28	[17,24-27]
油料作物 Oil Crop	0.42	0.04	0.11	0.23	[17,24-27]
甜菜 Beet	0.41	4.00	0.75	0.67	[24-28]
玉米 Maize	0.46	0.16	0.12	0.46	[17,24-27]
蔬菜 Vegetable	0.45	0.10	0.90	0.45	[17,24-27]
薯类 Potato	0.43	0.57	0.77	0.68	[17,24-27]

选取河西走廊地区各县市的农业碳排放量为参考数据,矩阵表示为:

$$x_0=[x_0(t)|t=1,2,\cdots,T]=[x_0(1),x_0(2),\cdots,x_0(T)] \quad (6)$$

选取各县市的影响因子作为比较数列,确定矩阵为:

$$x_i=[x_i(t)|t=1,2,\cdots,T]=[x_i(1),x_i(2),\cdots,x_i(T)] \quad (7)$$

对数据进行无量纲化处理,选取分辨率 $\rho=0.50$,灰色关联系数计算公式为:

$$\delta_i(m,t)=\frac{D+\rho\times L}{|x_i(m,t)-x_{i1}(m,t)|+\rho\times L} \quad (8)$$

$$D=\min_{i,m,t}|x_i(m,t)-x_{i1}(m,t)|$$

$$L=\max_{i,m,t}|x_i(m,t)-x_{i1}(m,t)|$$

其中 $i\in[1,N],m\in[1,M],t\in[1,T]$

最后对时序灰色关联度和截面数据关联度进行测算:

$$\delta_i=\frac{1}{M\times T}\sum_{m=1}^M\sum_{t=1}^T\delta_i(m,t) \quad (9)$$

2.2.3 空间自相关与标准差椭圆

空间自相关分析能够确定某一变量是否在空间

上相关,同时能够确定该要素在空间上的相关程度,本研究选取的研究区域不仅跨越时间,而且跨越了地域,空间自相关能够从全局和局部两个视角反映河西走廊地区农业碳排放格局。

标准差椭圆可以从多个角度反映河西走廊地区农业碳排放空间分布的整体特征,通过对比2000—2020年河西走廊地区农业碳排放强度的标准差椭圆及其质心的偏移程度,可以清楚看出农业碳排放的空间分布重心及扩散趋势,椭圆的长轴表示农业碳排放的主要趋势方向,短轴表示农业碳排放的次要趋势,观察长轴与正北方向产生的夹角偏转角度可以明确农业碳排放的方向趋势与形态变化。

3 结果与分析

3.1 2000—2020年河西走廊农业碳排放变化趋势

根据表4和表5测算结果,2000—2020年河西走廊地区农业碳排放总量为 1.33×10^8 t,其中养殖业碳排放量为 4.17×10^7 t,碳吸收总量为 1.41×10^8 t,主要来源于种植业。凉州区与甘州区农业碳排放量较大,合计占河西走廊地区农业碳排放总量的31.74%。从图1

表4 2000—2020年河西走廊地区农业碳排放量

Table 4 Agricultural carbon emissions in Hexi region from 2000 to 2020

区域 Region	各年份农业碳排放量 Agricultural carbon emissions per year/ 10^4 t							总量 Total/ 10^4 t	平均值 Average value/ 10^4 t	占比 Proportion/%
	2000	2001	2002	...	2018	2019	2020			
凉州区 Liangzhou	65.23	59.91	63.50	...	162.72	155.15	151.16	2 612.10	124.39	19.67
民勤县 Minqin	28.86	30.65	32.50	...	61.07	67.22	63.64	1 037.89	49.42	7.82
古浪县 Gulang	21.84	19.75	19.33	...	46.85	53.38	63.25	710.12	33.82	5.35
天祝县 Tianzhu	16.37	16.48	18.68	...	22.63	27.21	26.00	454.01	21.62	3.42
肃州区 Suzhou	27.18	27.46	24.14	...	61.07	60.49	60.18	970.45	46.21	7.31
金塔县 Jinta	17.84	18.01	19.11	...	35.40	38.49	39.18	616.50	29.36	4.64
瓜州县 Guazhou	10.32	10.41	14.84	...	21.65	20.61	20.96	329.57	15.69	2.48
肃北县 Subei	3.89	3.94	3.83	...	4.88	4.23	4.44	102.89	4.90	0.77
阿克塞县 Aksay	1.98	1.91	1.87	...	1.94	2.17	2.24	58.69	2.79	0.44
玉门市 Yumen	10.84	10.82	9.97	...	24.80	29.34	29.55	420.28	20.01	3.16
敦煌市 Dunhuang	11.47	9.98	10.47	...	12.71	9.98	10.69	312.14	14.86	2.35
甘州区 Ganzhou	38.52	39.28	37.13	...	103.56	105.79	106.19	1 602.34	76.30	12.07
肃南县 Sunan	9.70	8.59	8.68	...	15.27	15.91	16.48	287.52	13.69	2.17
民乐县 Minle	26.92	18.82	23.15	...	42.03	51.03	51.44	734.05	34.95	5.53
临泽县 Linze	14.22	13.81	11.38	...	38.54	40.41	39.43	622.51	29.64	4.69
高台县 Gaotai	15.04	15.26	13.06	...	38.02	35.64	35.77	640.15	30.48	4.82
山丹县 Shandan	17.39	12.54	14.79	...	32.68	34.30	34.99	508.13	24.20	3.83
嘉峪关市 Jiayuguan	2.26	1.95	1.67	...	6.33	7.24	8.30	103.56	4.93	0.78
金川区 Jinchuan	5.17	4.68	3.98	...	19.51	20.95	22.32	269.84	12.85	2.03
永昌县 Yongchang	26.68	22.26	20.44	...	60.38	62.18	63.01	886.50	42.21	6.68
总计 Total	371.72	346.51	352.52	...	812.04	841.72	849.22	1 3279.24	632.32	100

表5 2000—2020年河西走廊地区农业碳排放结构(10⁴t)

Table 5 Structure of agricultural carbon emissions in Hexi region from 2000 to 2020(10⁴t)

年份 Year	种植业碳排放 Carbon emission of planting industry							养殖业碳排放 Carbon emission of stockbreeding			碳吸收 Carbon uptake
	农业机械总动力 Total power of agricultural machinery	化肥 Chemical fertilizer	农膜 Plastic film	翻耕 Ploughing	农药 Pesticide	土壤 Soil	秸秆焚烧 Straw burning	牛 Cattle	羊 Sheep	猪 Pig	
2000	0.08	22.64	10.00	18.99	1.73	0.03	185.39	50.94	68.77	13.15	215.56
2001	0.09	23.74	9.92	18.63	1.64	0.03	155.45	51.34	71.52	14.15	173.30
2002	0.09	24.38	16.81	18.44	2.23	0.03	144.59	53.59	76.92	15.46	166.37
2003	0.09	23.62	13.48	18.98	2.25	0.03	135.59	54.65	87.64	16.53	158.73
2004	0.10	24.71	13.58	19.81	2.83	0.03	151.17	56.40	97.27	17.46	175.14
2005	0.11	26.03	13.90	20.30	2.99	0.03	343.59	57.58	108.19	18.91	594.86
2006	0.11	26.13	15.14	20.76	3.15	0.03	348.91	58.56	111.14	20.21	609.71
2007	0.12	27.35	15.14	20.88	3.29	0.03	345.48	59.51	113.26	19.79	641.18
2008	0.13	27.47	15.25	21.05	0	0.03	344.29	56.19	116.13	13.90	654.71
2009	0.14	28.12	0	21.43	0	0.03	374.45	58.51	125.38	14.71	692.77
2010	0.15	29.73	0	21.65	0	0.03	298.95	63.21	134.84	15.94	544.64
2011	0.16	29.99	0	22.15	0	0.03	438.56	65.80	141.38	16.25	806.25
2012	0.17	30.90	0	22.58	0	0.03	455.06	65.95	143.79	17.05	858.65
2013	0.15	31.27	24.44	22.97	0	0.03	472.09	66.61	147.68	17.67	918.22
2014	0.18	32.01	0	23.22	0	0.03	489.67	69.35	161.63	18.33	972.78
2015	0.18	31.54	0	23.77	0	0.03	507.12	59.15	160.07	15.64	1 032.08
2016	0.14	23.14	0	24.07	0	0.04	510.57	58.59	155.03	15.02	1 056.50
2017	0.15	25.33	0	24.98	0	0.04	525.53	47.18	141.82	13.75	878.71
2018	0.16	24.71	24.93	25.32	0	0.04	533.55	49.09	141.73	12.52	919.28
2019	0.16	23.45	22.97	25.20	0	0.04	552.51	52.38	154.15	10.85	987.55
2020	0.17	23.44	0	25.63	0	0.04	556.50	56.87	174.11	12.44	1 014.02
总计Total	2.83	559.7	195.56	460.81	20.11	0.68	7 869.02	1 211.45	2 632.45	329.73	14 071.01
年均增长率 Average annual growth rate	4.19%	0.46%	7.69%	1.52%	10.44%	1.52%	8.46%	0.80%	4.91%	0.32%	14.49%

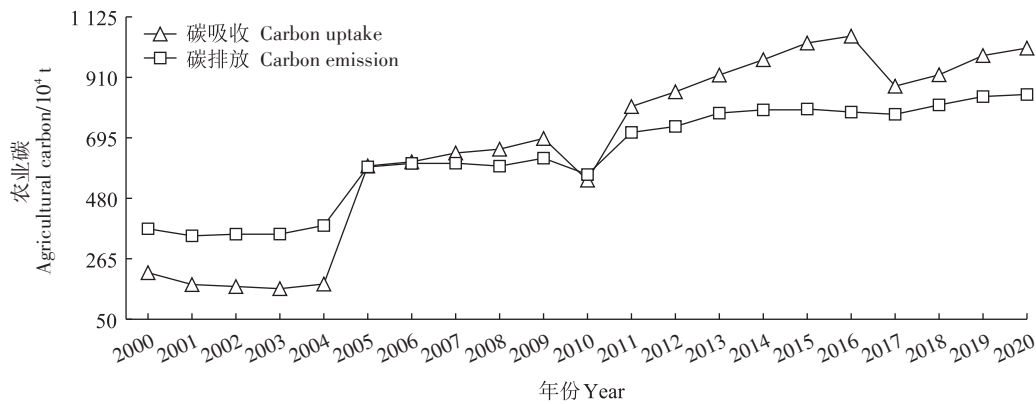


图1 2000—2020年河西走廊地区农业碳排放趋势

Figure 1 Agricultural carbon emission trends in Hexi region from 2000 to 2020

可以看出,河西走廊地区农业碳排放与碳吸收总体呈上升趋势,按照碳变化趋势可以分为两个阶段:2000—2010年呈现波动起伏的趋势,碳排放量高于碳

汇量;2010—2020年表现碳汇量高于碳排放量。2010年开始农业净碳排放量为负值,即农业作为碳汇存在。其主要原因是2010年开始河西走廊地区农业播种

面积显著上升,同时农业技术的进步使秸秆回收利用效率显著提高。

3.2 2000—2020年河西走廊地区农业碳排放结构特征

2000—2020年河西走廊地区农业碳吸收总量为 1.41×10^8 t,碳排放总量为 1.33×10^8 t,以养殖业排放和秸秆焚烧碳排放为主。由于农药与农膜数据缺失较多,本研究选取秸秆焚烧、养殖业、化肥、机械用电量进行分析。由表5可以看出秸秆焚烧碳排放量整体呈上升趋势,从2000年的 1.85×10^6 t增加到2020年的 5.57×10^6 t,但增长率逐年降低。2014年养殖业整体碳排放总量达到最大,化肥、农业机械总动力产生的碳排放量在2000—2014年呈现逐年增长的趋势,2014年以后呈现下降趋势。如表5所示,2000—2020年养殖业碳排放量从 1.33×10^6 t增加到 2.43×10^6 t,年平均增长率为3.23%。在种植业中秸秆焚烧碳排放占比最大,年均增长率为8.46%。化肥、土壤、农业机械总动力、翻耕碳排放从2000年的 2.26×10^5 、 3.00×10^2 、 8.00×10^2 、 1.90×10^5 t,增加到2020年的 2.34×10^5 、 4.00×10^2 、 1.70×10^3 、 2.56×10^5 t,年均增长率分别为0.46%、1.52%、4.19%、1.52%。

从表5可以看出,在已有完整数据中农业各碳源年均增长率最高的是秸秆焚烧碳排放,为8.46%,其次是养殖业中饲养羊产生的碳排放,为4.91%。对于不完整数据,选取数据充分年份进行分析,可以看出农药、农膜的年均增长率较高,其主要原因是农民低碳意识较为薄弱,大量农资投入导致农业碳排放量呈现较快的增长。

3.3 农业碳排放强度空间自相关分析

根据现有的研究,选择农业净碳排放量与农林渔业生产总值的比值作为河西走廊地区的农业碳排放强度。对2000—2020年河西走廊地区20个县市的农业碳排放强度进行空间自相关分析,可得农业碳排放强度全局Moran's *I*指数,结果如表6所示。从表6中可以看出,河西走廊地区农业碳排放强度在2000年

没有通过显著性检验,到2005年通过了10%显著性检验,2010—2020年通过了5%显著性检验。从全局Moran's *I*指数变化可以看出河西走廊地区农业碳排放放在2005年以前为随机分布,2005年后逐渐变为空间正相关,呈现空间聚集分布。

由图2可知,2005年在10%显著性水平下高-高聚集区域为肃南县,低-低聚集区域为玉门市和肃州区,高-低聚集区域为阿克塞县。2010年在5%显著性水平下,高-高聚集区域为肃南县,低-低聚集区域为高台县,高-低聚集区域为阿克塞县。2015年高-高聚集区域仍为肃南县,低-低聚集区域为玉门市和肃州区,无高-低聚集区域。2020年河西走廊地区聚集区域发生重大改变,高-高聚集区域为肃南县和肃北县,低-低聚集区域变为玉门市、嘉峪关市、肃州区、金塔县。

3.4 农业碳排放空间转移分析

采用标准差椭圆对2000—2020年河西走廊地区农业净碳排放时空特征及分布进行分析,从图3可以看出,2000—2005年标准差椭圆覆盖范围变小,但所包含的县市不变。从椭圆方向角度来看,2000—2005年角度在 $119.29^\circ \sim 120.13^\circ$ 变化,表明在这一时间段河西走廊地区的农业碳排放重心有向东南方向变化的趋势。2005—2010年转角在 $119.97^\circ \sim 122.74^\circ$ 内变化,这一时间段内转角变化不明显,但椭圆长轴从295.93 km减小到259.14 km,短轴从67.15 km减小到48.05 km,其覆盖范围缺少了玉门市、嘉峪关市和金塔县3个区域。2010—2015年标准差椭圆覆盖范围再次增大,恢复到2010年之前的范围。2015—2020年,转角从 120.11° 变为 120.31° ,表明在这一时间段碳排放没有发生明显的变化。

观察重心转移路径(图4)可以看出,2000—2004年农业碳排放重心向西北方向转移,2004—2010年向东南方向转移,并出现远距离的转移,2010—2016年农业碳排放重心从山丹县转移到甘州区,至2020年转回山丹县内。在重心转移图中农业碳排放重心发生很大的变化,但将其重心转移过程放在整个河西走廊地区来看,2000—2020年农业碳排放重心一直在张掖市内。其主要原因是张掖市是河西走廊地区最主要的农业生产地区,近年来随着城市化的发展,张掖市农业种植规模并没有出现下降,反而一直呈现上升状态,成为河西走廊地区最重要的农业生产基地。

3.5 农业碳排放影响因素分析

截面灰色关联度可反映不同时刻同一研究对象

表6 河西走廊地区全局莫兰指数
Table 6 Global Moran's *I* of Hexi region

年份Year	莫兰指数Moran's <i>I</i>	P值P-value	Z值Z-value
2000	0.20	0.10	1.40
2005	0.23	0.09	1.52
2010	0.46	0.02	2.76
2015	0.26	0.03	2.13
2020	0.62	0	3.44

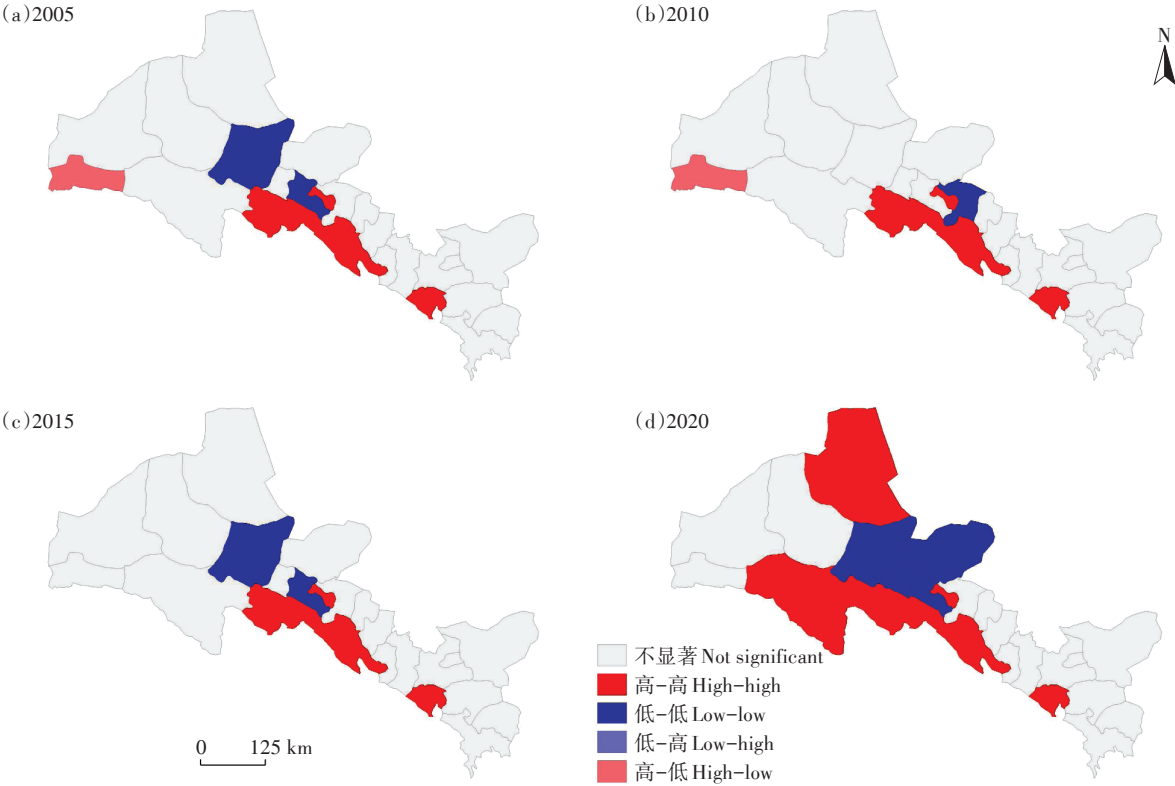


图2 河西走廊地区各县市LISA聚集分布图

Figure 2 LISA aggregation distribution map of counties in Hexi region

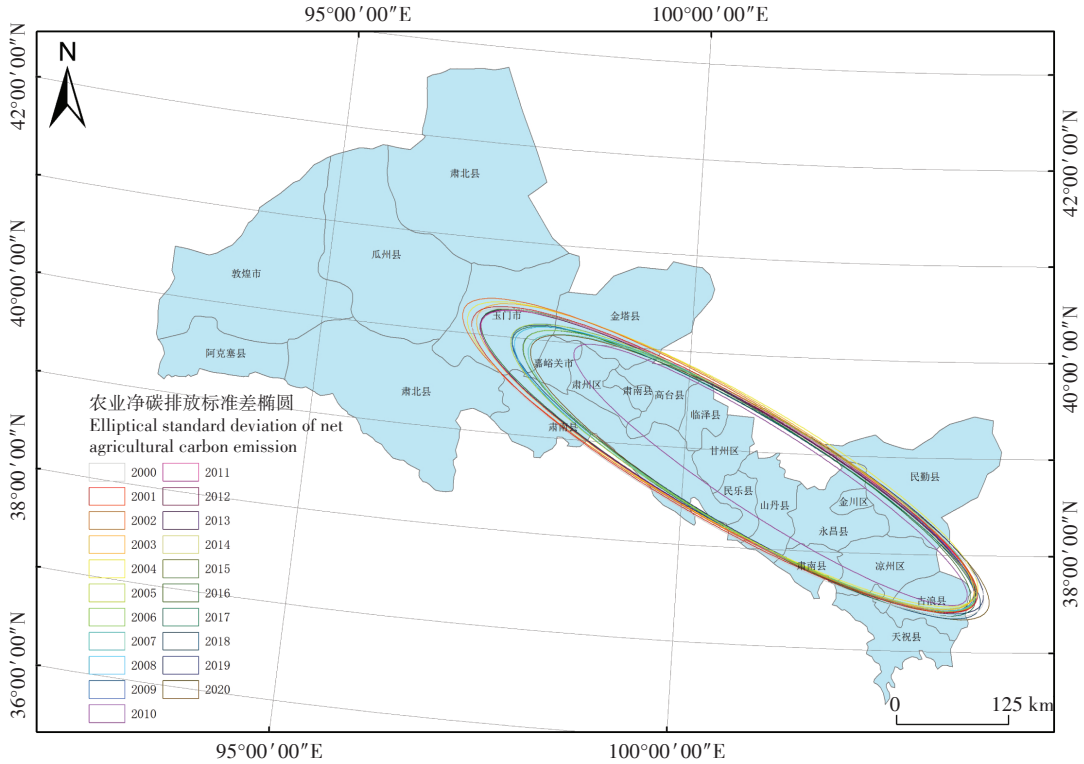


图3 河西走廊地区2000—2020年农业净碳排放标准差椭圆

Figure 3 Elliptical standard deviation of net agricultural carbon emissions in Hexi region from 2000 to 2020

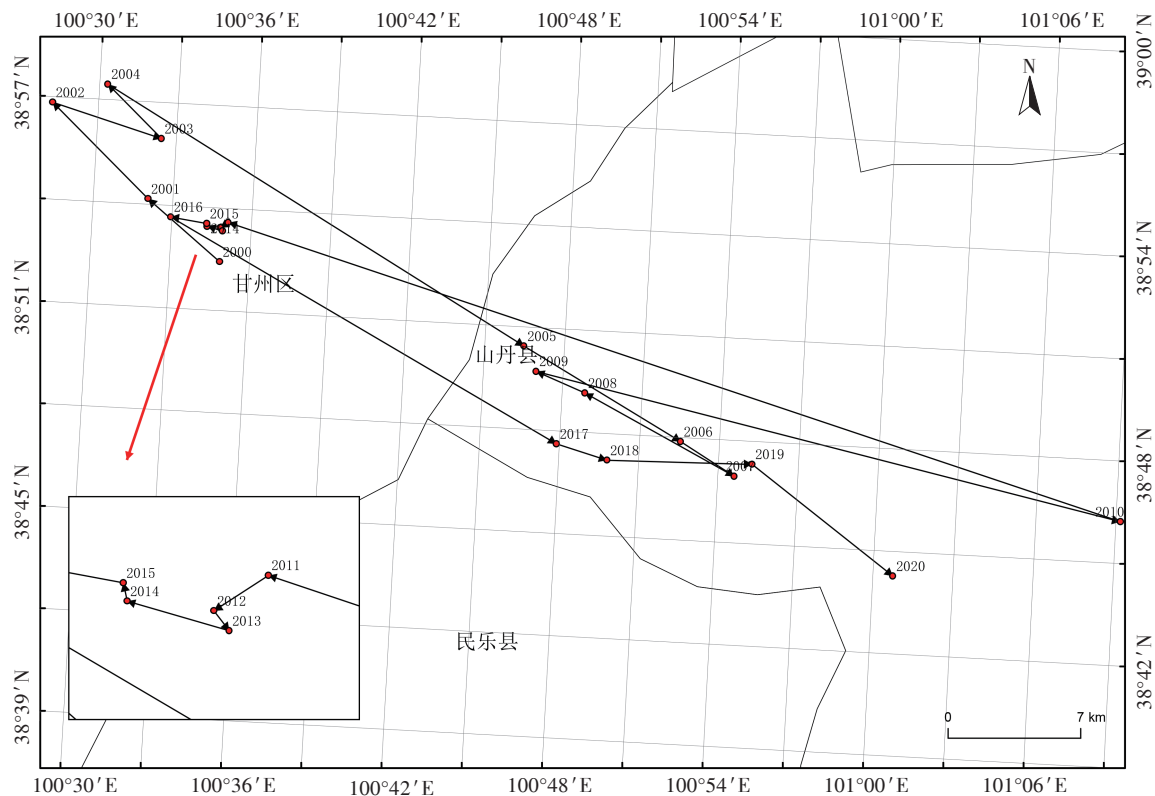


图4 河西走廊地区2000—2020年农业碳排放重心转移路径

Figure 4 Center of gravity shift path of agricultural carbon emission in Hexi region from 2000 to 2020

与关联指标灰色关联系数的平均值。从表7可以看出,整体上影响河西走廊地区农业碳排放的核心因素为养殖规模、农业种植规模与农村用电量,影响最小的要素为人均农业生产总值。但从各县市来看,影响农业碳排放的因素存在一定的差异。

从种植业来看,对武威市和张掖市而言,与碳排放关联度最高的影响因素为农业种植规模,武威市平均关联度为0.79,张掖市平均关联度达到了0.80。武威市和张掖市是河西走廊地区主要的农业产区,2000—2020年武威市农村人口从162.95万人减少到123.91万人,而播种面积从 $2.46 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 变为 $2.43 \times 10^5 \text{ hm}^2$,20年来保持相对稳定,而农村人口的减少导致武威市的农业种植规模不断增大,农业种植规模的增大使农业中机械、化肥、农药等投入增加,进而提高农业碳排放量。张掖市农村人口从2000年的104.34万人减少到2020年的89.63万人,播种面积却从 $1.84 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 增加到 $2.76 \times 10^5 \text{ hm}^2$;播种面积的大量增加会产生大量秸秆,秸秆的大量焚烧增加农业碳排放量。对于酒泉市,种植业中与碳排放关联度最高的因素是机械化程度,平均关联度达到了0.81。分析酒泉市的农业机械用电量可以看出,酒泉市农业机械用电

量从2000年的 $9.98 \times 10^5 \text{ kWh}$ 增加到 $2.47 \times 10^6 \text{ kWh}$,从各市数据来看,酒泉市农业机械用电总量并非最高,但年均增长率最大,达到了4.95%。农业技术的快速发展带来的碳排放酒泉市的农业碳排放中占主导地位。嘉峪关市是河西走廊地区农业种植规模最小的地区,同时也是河西走廊地区城镇化水平最高的区域,因而该区域与农业碳排放关联度最高的因素为农村用电量,关联度为0.79。农村能源的消耗可以反映该地区的经济状况,嘉峪关市是河西走廊地区经济发展水平较高的区域,同时从农村用电量的增长率来看,嘉峪关市年均增长率为6.82%,是河西走廊五市增长率最高的区域。高速的经济增长带来更多的环境问题,这在嘉峪关市表现最为明显。

从养殖业来看,养殖业是河西走廊地区农业碳排放的最主要来源之一,主要是因为对养殖业而言,碳固定数量远低于种植业,在河西走廊地区养殖业是碳源。天祝县、肃北县、肃南县、阿克塞县与碳排放关联度最高的因素是养殖规模,对应关联度在0.90以上。这些区域属于少数民族主要生活区,农业生产中养殖业占比高于其他区域。2000—2020年该区域的养殖业规模占河西走廊地区的12.46%,肃南县年均增长率

表7 河西走廊地区各县市截面灰色关联度
Table 7 Grey correlation degree of cross-section of counties in Hexi region

城市 City	县域 County	人均农业 生产总值 Gross agricultural production per capita	非城镇化率 Non- urbanization rate	产业结构 Industrial structure	机械化程度 Degree of mechanization	化肥使用度 Fertilizer use strength	农业种植模 Agricultural planting scale	作物结构 Crop structure	农村用电量 Rural electricity consumption	养殖规模 Scale of aquaculture
武威市 Wuwei	凉州区 Liangzhou	0.52	0.59	0.55	0.57	0.58	0.60	0.62	0.64	0.81
	民勤县 Minqin	0.53	0.70	0.63	0.67	0.76	0.82	0.55	0.61	0.71
	古浪县 Gulang	0.48	0.73	0.70	0.76	0.74	0.76	0.71	0.68	0.85
	天祝县 Tianzhu	0.62	0.96	0.95	0.94	0.82	0.97	0.92	0.86	0.96
酒泉市 Jiuquan	肃州区 Suzhou	0.50	0.58	0.53	0.76	0.66	0.67	0.61	0.81	0.69
	金塔县 Jinta	0.46	0.59	0.52	0.81	0.60	0.73	0.63	0.73	0.74
	瓜州县 Guazhou	0.52	0.92	0.89	0.94	0.91	0.96	0.87	0.81	0.91
	肃北县 Subei	0.68	0.89	0.90	0.95	0.63	0.91	0.92	0.86	0.96
	阿克塞县 Aksay	0.39	0.81	0.86	0.86	0.77	0.59	0.79	0.88	0.93
	玉门市 Yumen	0.61	0.77	0.63	0.57	0.71	0.72	0.61	0.61	0.78
	敦煌市 Dunhuang	0.57	0.90	0.81	0.79	0.85	0.91	0.67	0.56	0.92
张掖市 Zhangye	甘州区 Ganzhou	0.65	0.60	0.56	0.55	0.67	0.71	0.78	0.63	0.78
	肃南县 Sunan	0.63	0.89	0.84	0.91	0.82	0.77	0.85	0.88	0.95
	民乐县 Minle	0.40	0.83	0.75	0.71	0.82	0.82	0.81	0.51	0.71
	临泽县 Linze	0.60	0.74	0.71	0.69	0.65	0.86	0.73	0.63	0.86
	高台县 Gaotai	0.67	0.73	0.71	0.64	0.65	0.86	0.70	0.69	0.82
	山丹县 Shandan	0.41	0.76	0.75	0.69	0.81	0.80	0.84	0.58	0.82
嘉峪关市 Jiayuguan		0.44	0.64	0.67	0.64	0.67	0.75	0.61	0.79	0.84
金昌市 Jinchang	金川区 Jinchuan	0.59	0.65	0.68	0.66	0.61	0.84	0.70	0.72	0.63
	永昌县 Yongchang	0.41	0.69	0.69	0.66	0.51	0.74	0.67	0.57	0.65

达到了4.14%,肃北县达到了2.00%,远高于河西走廊其他区域。

时序灰色关联度是指同一时间不同研究对象与关联指标的灰色关联系数平均值,通过公式(9)计算得到河西走廊地区2000—2020年人均农业生产总值、非城镇化率、产业结构、机械化程度等影响因素的时间序列关联度,如图5所示。从图5可以看出养殖规模与农村用电量的关联系数2000—2020年变化较小,但总体呈缓慢增长趋势,对各时间段来说养殖规模与农村用电量均是影响河西走廊地区农业碳排放的主要因素。化肥使用强度的关联系数2000—2003年呈现下降趋势,2003—2013年对农业碳排放影响程度整体呈上升趋势,2013—2020年呈先下降后上升趋势;作物结构和产业结构与碳排放关联度2000—2010年一直在缓慢下降,2010年之后逐步上升,其主要原因是2000—2010年河西走廊地区农业结构一直处于稳定发展过程,作物种植结构比较单一,经济作物种植规模小,到2010年河西走廊地区种植模式开始转变,经济作物种植规模开始上升,对碳排放的影响也加大,同时种植模式改变也导致人均农业生产总

值、机械化程度等因素对碳排放的影响加大。

4 讨论

碳排放是全球热点问题,本研究对2000—2020年河西走廊地区20个县市的农业碳排放量进行测算,并分析河西走廊地区农业碳排放影响因素的时空特征,从时间与空间上详细分析各因子对农业碳排放的影响。从时间序列可以看出,2000—2010年河西走廊地区农业碳排放呈现上升趋势,这与张小平等^[35]对甘肃省1993—2011年农业碳排放量的研究结果一致。从空间变化来看,河西走廊地区农业碳排放强度莫兰指数逐渐变强,从LISA聚集分布可以看出河西走廊地区农业碳排放强度变化的空间性呈现增强趋势,这与夏四友等^[30]对1997—2016年中国农业碳排放率时空研究所得结论一致,其主要原因是随着“西部大开发”战略的实施,河西走廊地区农业取得较快的发展,农业规模增大,导致农业碳排放量增加。

5 结论

本研究以农业碳排放量、农业碳排放强度为研究

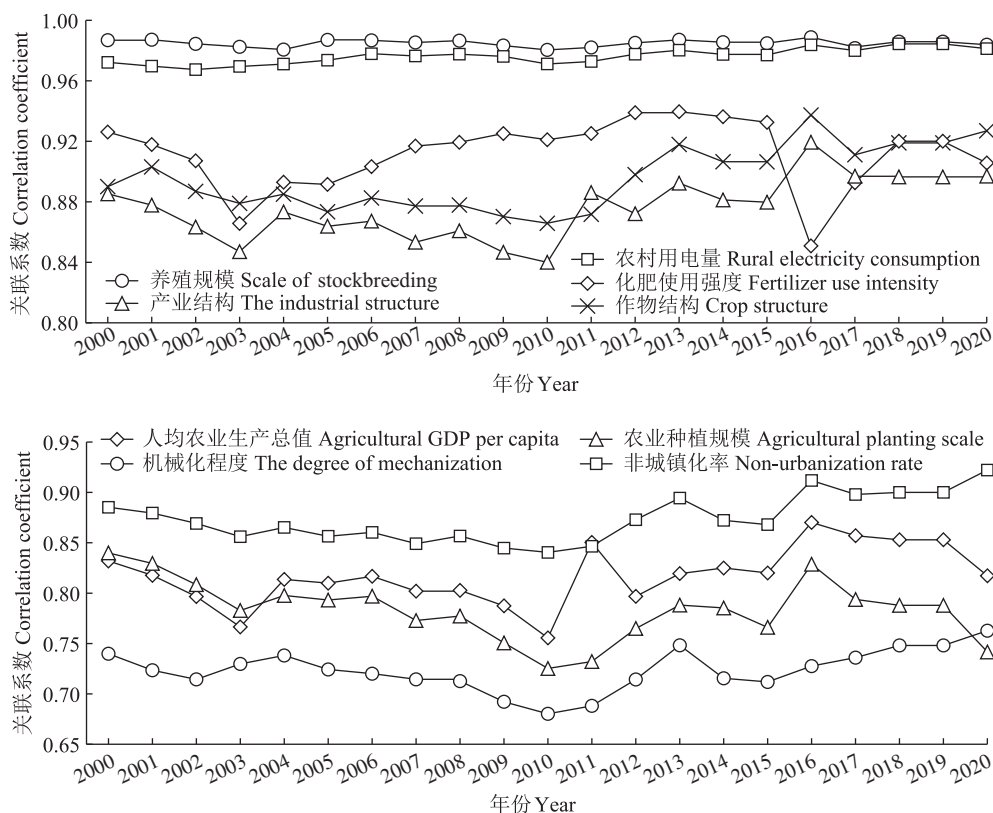


图5 河西走廊地区各影响因素时序关联度

Figure 5 Timing correlation of influencing factors in Hexi region

指标,采用IPCC碳排放测算方法对河西走廊地区农业碳排放进行测算,并且利用灰色关联度、空间自相关模型和标准差椭圆等研究方法,分析河西走廊地区农业碳排放影响因素及时空特征,结论如下:

(1)2000—2020年河西走廊地区农业碳排放总量呈现缓慢上升趋势。在河西走廊地区20个县市市中,农业碳排放总量最大的是凉州区,其次是甘州区,两者共占河西走廊地区农业碳排放总量的31.74%,是河西走廊地区农业碳排放的重点区域,同时也是碳汇的主要区域。

(2)从种植业来看,对于农业种植重点区域,农业碳排放的主要影响因素是农业种植规模;对于种植规模小且相对稳定区域,农业碳排放的主要影响因素为农村用电量;对于种植规模适中且稳定增长区域,农业碳排放的主要影响因素为农业机械化程度。从养殖业来看,对于规模大的区域和规模小但养殖规模在农业生产中占比高的区域,养殖规模是影响农业碳排放的最主要因素。

(3)从全局空间来看,河西走廊地区农业碳排放强度表现为逐步实现空间正自相关。从局部视角来

看,河西走廊地区农业碳排放强度空间分布经历了从随机分布到聚集分布的过程。

(4)2000—2020年,河西走廊地区农业碳排放重心在 $100^{\circ}30' \sim 101^{\circ}3'E$, $38^{\circ}42' \sim 38^{\circ}57'N$ 之间,总体上重心向东南方向偏移,但位置变化总是在张掖市内。

参考文献:

- [1] 周佰铨, 翟盘茂. IPCC第六次气候变化评估中的气候约束预估方法[J]. 气象学报, 2021, 79(6): 1063–1070. ZHOU B Q, ZHAI P M. The constraint methods for projection in the IPCC sixth assessment report on climate change[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(6): 1063–1070.
- [2] 刘宇峰, 原志华, 郭玲霞, 等. 中国农作物生产碳足迹及其空间分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2577–2587. LIU Y F, YUAN Z H, GUO L X, et al. Carbon footprint of crop production in China from 1993 to 2013 and its spatial distribution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2577–2587.
- [3] 田云, 尹恣昊. 产业集聚对中国农业净碳效应的影响研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2021(3): 107–117, 188. TIAN Y, YIN M H. Research on the impact of industrial agglomeration on China's agricultural net carbon effect[J]. *Journal of Huazhong Agricultural*

- tural University(Social Sciences Edition), 2021(3):107-117, 188.
- [4] 张金鑫, 王红玲. 环境规制、农业技术创新与农业碳排放[J]. 湖北大学学报(哲学社会科学版), 2020, 47(4):147-156. ZHANG J X, WANG H L. Analysis on environmental planning, agricultural technological innovation and agricultural carbon emission[J]. *Journal of Hubei University(Philosophy and Social Science)*, 2020, 47(4):147-156.
- [5] 林斌, 徐孟, 汪笑溪. 中国农业碳减排政策、研究现状及展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4):500-515. LIN B, XU M, WANG X X. Mitigation of greenhouse gas emissions in China's agricultural sector: current status and future perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4):500-515.
- [6] 李晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4):740-749. LI J, WANG M X, WANG Y S, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4):740-749.
- [7] 吴昊玥, 黄瀚蛟, 何宇, 等. 中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(10):1762-1773. WU H Y, HUANG H J, HE Y, et al. Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(10):1762-1773.
- [8] 何艳秋, 戴小文. 中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究[J]. 资源科学, 2016, 38(9):1780-1790. HE Y Q, DAI X W. Phase characteristics and regional differences in agriculture carbon emissions in China[J]. *Resources Science*, 2016, 38(9):1780-1790.
- [9] 姚亮, 刘晶茹, 王如松. 中国城乡居民消费隐含的碳排放对比分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(4):25-29. YAO L, LIU J R, WANG R S. Comparison and analysis of carbon emissions embodied in household consumption between urban and rural area of China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(4):25-29.
- [10] NEJAT P, JOMEHZADEH F, TAHERI M M, et al. A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector(with an overview of the top ten CO₂ emitting countries)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43:843-862.
- [11] LIU Q, ZHENG X Q, ZHAO X C, et al. Carbon emission scenarios of China's power sector: impact of controlling measures and carbon pricing mechanism[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(1):27-33.
- [12] 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 Y, LIU H B. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4):558-569.
- [13] 姚玉璧, 刘吉宁, 张民, 等. 气候变化对河西绿洲农业的影响及对策[J]. 生态环境学报, 2020, 29(8):1499-1506. YAO Y B, LIU J N, ZHANG M, et al. Impact of climatic change on the agriculture in Hexi Oasis and countermeasures[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(8):1499-1506.
- [14] 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 S Y, XI F M, YIN Y, 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.
- [15] 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 J C, MA H L, SU Y. 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.
- [16] 冉锦成. 西北五省农业碳排放及影响因素研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2017. RAN J C. Study on agricultural carbon emission and its influencing factors in five provinces of northwest China[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.
- [17] 周瑞娟, 燕振刚. 基于甘肃省农业碳排放和碳吸收近10年对比与分析[J]. 生产力研究, 2020(7):61-64. ZHOU R J, YAN Z G. Based on the comparison and analysis of agricultural carbon emissions and carbon absorption in Gansu Province in the past 10 years[J]. *Productivity Research*, 2020(7):61-64.
- [18] 吕迎. 甘肃省农业碳排放综合测算及驱动力分析[J]. 合作经济与科技, 2020(20):14-17. LÜ Y. Comprehensive calculation and driving force analysis of agricultural carbon emission in Gansu Province[J]. *Co-Operative Economy & Science*, 2020(20):14-17.
- [19] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2010. BI Y Y. Study on straw resources evaluation and utilization in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [20] 田成诗, 陈雨. 中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价: 基于衍生指标与TOPSIS法的运用[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2):395-410. TIAN C S, CHEN Y. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: based on the application of derivative indicators and TOPSIS[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2):395-410.
- [21] 桂河, 李静, 尚梦媛. “双碳”背景下的宁夏农业碳排放时序特征、驱动机理与脱钩效应研究[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2021, 15(6):37-44. GUI H, LI J, SHANG M Y. Study on temporal characteristics, driving mechanism and decoupling effect of agricultural carbon emission in Ningxia under the background of “Double Carbon”[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology(Social Sciences)*, 2021, 15(6):37-44.
- [22] 田云, 张俊彪. 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 Y, ZHANG J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8):1298-1309.
- [23] 吴昊玥, 何宇, 黄瀚蛟, 等. 中国种植业碳补偿率测算及空间收敛性[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(6):113-123. WU H Y, HE Y, HUANG H J, et al. Estimation and spatial convergence of carbon compensating rate of planting industry in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(6):113-123.
- [24] 张鹏岩, 何坚坚, 庞博, 等. 农田生态系统碳足迹时空变化: 以河南省为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9):3050-3060. ZHANG P Y, HE J J, PANG B, et al. Temporal and spatial differences in carbon footprint in farmland ecosystem: a case study of Henan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(9):3050-3060.

- [25] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数[J]. 中国农业科学, 1990(2): 83-87. ZHANG F C, ZHU Z H. Harvest index for various crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990(2): 83-87.
- [26] 苗果园, 尹钧, 张云亭, 等. 中国北方主要作物根系生长的研究[J]. 作物学报, 1998, 24(1): 1-6. MIAO G Y, YIN J, ZHANG Y T, et al. Study on root growth of main crops in north China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(1): 1-6.
- [27] 张剑, 罗贵生, 王小国, 等. 长江上游地区农作物碳储量估算及固碳潜力分析[J]. 西南农业学报, 2009, 22(2): 402-408. ZHANG J, LUO G S, WANG X G, et al. Carbon stock estimation and sequestration potential of crops in the upper Yangtze River basin[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(2): 402-408.
- [28] 魏国诚. 甜菜含水率与还原糖含量间的相关性及对贮藏的影响[J]. 甜菜糖业, 1990(6): 1-4. WEI G C. The relationship between the water content and reducing sugar content of sugarbeet and its effect on root storage[J]. *China Beet & Sugar*, 1990(6): 1-4.
- [29] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208. DUAN H P, ZHANG Y, ZHAO J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203-208.
- [30] 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 S Y, ZHAO Y, XU X, 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.
- [31] 王芳, 周兴. 人口结构、城镇化与碳排放: 基于跨国面板数据的实证研究[J]. 中国人口科学, 2012(2): 47-56. WANG F, ZHOU X. Population structure, urbanization and CO₂ emission: an empirical study base on crosscountry panel data[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2012(2): 47-56.
- [32] 周一凡, 李彬, 张润清. 县域尺度下河北省农业碳排放时空演变与影响因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 570-581. ZHOU Y F, LI B, ZHANG R Q. Spatiotemporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emissions in Hebei Province at the county scale[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 570-581.
- [33] 伍国勇, 孙小钧, 于福波, 等. 中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 46-57. WU G Y, SUN X J, YU F B, et al. Spatial correlation pattern and influencing factors of China's crop production carbon productivity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(5): 46-57.
- [34] 杨振, 李泽浩. 中部地区碳排放测度及其驱动因素动态特征研究[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 13-20. YANG Z, LI Z H. Research on the measurement of carbon emissions and dynamic characteristics of its driving factors in central regions of China[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(5): 13-20.
- [35] 张小平, 王龙飞. 甘肃省农业碳排放变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 1029-1035. ZHANG X P, WANG L F. Variations and influential factors of agricultural carbon emissions in Gansu Province[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(5): 1029-1035.