

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.04.034

CSTR:32310.14.stbcb.2025.04.034

徐昊文, 黄亚浩, 吴洋洋, 等. “双碳”视角下宁夏农田生态系统净碳汇时空演变及驱动因素[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4): 380-392.

XU Haowen, HUANG Yahao, WU Yangyang, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of net carbon sink in farmland ecosystems of ningxia under "dual carbon" goals[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 380-392.

“双碳”视角下宁夏农田生态系统净碳汇 时空演变及驱动因素

徐昊文¹, 黄亚浩¹, 吴洋洋¹, 贾振江¹, 韩金朝², 李王成^{1,3,4,5}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 3. 旱区现代农业水资源
高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021; 4. 省部共建西北土地退化与生态恢复国家重点实验室,
银川 750021; 5. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 银川 750021)

摘要: [目的] 为探究“双碳”目标下宁夏农田生态系统净碳汇的时空演变规律及其驱动效应。[方法] 以该地区农田生态系统为研究对象, 基于IPCC发布的碳排放系数法, 将作物生育期碳吸收量和农业生产活动中碳排放量的差值作为农田净碳汇构建测算体系, 测算2003—2022年宁夏农田净碳汇量及净碳汇强度, 综合运用ArcGIS可视化方法、重心迁移模型和标准差椭圆刻画农田净碳汇时空特征, 进而结合LMDI模型明确宁夏农田净碳汇的主要驱动因素。[结果] 1) 就时序特征而言, 研究期内宁夏农田净碳汇总量总体呈上升趋势, 由2003年的 3.38×10^6 t增加至2022年的 7.56×10^6 t; 农田净碳汇强度总体呈上升趋势, 由2003年的 2.55 t/hm²增长到2022年的 6.35 t/hm²。2) 就空间格局而言, 宁夏县域间农田净碳汇空间分布格局由“西北部高, 东南部低”变为“北部高, 南部低”; 农田净碳汇重心由银川市灵武市向吴忠市红寺堡区移动, 迁移距离为40.15 km。3) 就净碳汇来源而言, 宁夏农田生态系统碳排放来源主要是化肥施用, 占碳排放总量的36.06%; 碳吸收量贡献最大的作物是玉米, 占碳吸收总量的50.90%。4) 农田净碳汇效率和农业劳动力是宁夏农田净碳汇的负向驱动因素, 经济发展水平、城镇化水平和农业产业结构因素是促进宁夏农田净碳汇的驱动因素。[结论] 宁夏农田生态系统净碳汇呈显著的时空分异特征, 净碳汇效应随时间推移不断增强, 通过优化农业产业结构与作物种植结构, 能够增强农田碳汇功能。为干旱区农业生态碳汇管理提供理论支撑, 对我国西北地区制定碳减排政策实现“双碳”目标具有重要战略意义。

关键词: “双碳”目标; 净碳汇; 时空动态; 重心转移; LMDI模型

中图分类号: X321.0

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0380-13

Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Net Carbon Sink in Farmland Ecosystems of Ningxia under “Dual Carbon” Goals

XU Haowen¹, HUANG Yahao¹, WU Yangyang¹, JIA Zhenjiang¹, HAN Jinzhao², LI Wangcheng^{1,3,4,5}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Sciences, Beijing 100048, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 4. State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China; 5. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] To investigate the spatiotemporal evolution patterns and driving effects of net carbon sink in Ningxia's farmland ecosystems under the "dual carbon" goals. [Methods] Taking the region's farmland ecosystem as the research object and based on the carbon emission factor method released by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a calculation system for net carbon sink in farmland was established by measuring the

收稿日期: 2025-03-09

修回日期: 2025-04-05

录用日期: 2025-05-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(52169010); 国家重点研发计划项目(2021YFD1900600); 宁夏自然科学基金重点项目(2021AAC02008); 宁夏重点研发计划项目(2019BEH03010); 清华大学-宁夏银川水联网数字治水联合研究院项目(sklhse-2023-Iow013)

第一作者: 徐昊文(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态与资源统计研究。E-mail: xuhaowen0316@163.com

通信作者: 李王成(1974—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术、生态与资源统计研究。E-mail: liwangcheng@126.com

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

difference between carbon absorption during the crop growth period and carbon emissions from agricultural production activities. The net carbon sink volume and net carbon sink intensity in Ningxia from 2003 to 2022 were calculated. ArcGIS visualization, center of gravity shift model, and the standard deviation ellipse were employed to characterize the spatiotemporal characteristics of net carbon sink in farmland. Furthermore, the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) model was applied to identify the main driving factors of net carbon sink in Ningxia's farmland. [Results] 1) In terms of temporal characteristics, total net carbon sink in Ningxia's farmland showed an overall increase during the study period, increasing from 3.38×10^6 t in 2003 to 7.56×10^6 t in 2022. Additionally, the net carbon sink intensity exhibited a rising trend, rising from 2.55 t/hm² in 2003 to 6.35 t/hm² in 2022. 2) For spatial characteristics, the distribution of net carbon sink in Ningxia's farmland across counties shifted from a pattern of "higher in the northwest and lower in the southeast" to "higher in the north and lower in the south". The center of gravity of net carbon sink in farmland moved from Lingwu City in Yinchuan to Hongsibao district in Wuzhong, with a shift distance of 40.15 km. 3) In terms of net carbon sink sources, chemical fertilizer application was the primary source of carbon emissions in Ningxia's farmland ecosystem, accounting for 36.06% of the total. Corn was the main contributor to carbon absorption, representing 50.90% of total carbon absorption. 4) Net carbon sink efficiency in farmland and agricultural labor were negative driving factors for net carbon sink in Ningxia's farmland, whereas economic development level, urbanization level, and agricultural industrial structure were positive driving factors. [Conclusion] Farmland ecosystems in Ningxia exhibit significant spatiotemporal differentiation in net carbon sink, with the carbon sink effect strengthening over time. Optimizing both agricultural industrial structure and crop planting structure can effectively strengthen carbon sink capacity of farmland. This study provides theoretical support for ecological carbon sink management in arid regions, offering strategic guidance for developing carbon emission reduction policies and achieving "dual carbon" goals in northwest China.

Keywords: dual carbon goals; net carbon sink; spatiotemporal dynamics; center of gravity shift; LMDI model

Received: 2025-03-09

Revised: 2025-04-05

Accepted: 2025-05-06

Online(www.cnki.net): 2025-06-03

自工业革命以来,全球气温不断上升,全球气候变暖已成为重大挑战。为实现经济社会的可持续发展,我国积极响应碳减排政策,在第七十五届联合国大会上作出承诺,中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。“碳中和”“碳达峰”已成为当前社会发展的重大任务指标。农田作为陆地生态系统的重要组成部分,具有碳源与碳汇的双重属性。一方面,农田生态系统作为碳源对温室气体的排放贡献巨大,约占碳排放总量的30%^[1];另一方面,农田生态系统作为碳汇具有固定大气中CO₂和提高土壤有机碳的功能,对于保持农田土壤的固碳能力、缓解气候变化和保障粮食安全具有重要作用^[2],可为我国实现“双碳”目标提供重要支持。

近年来,关于农业碳排放的研究主要集中在2个方面:一是碳排放核算研究。目前,最常用的农业碳排放量测算方法是基于联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)清单的碳排放系数法,该方法适用范围广,广泛应用于农用物资投入^[3]、粮食生产^[4]、牲畜养殖^[5]、土地利用等^[6]方面的测算。在研究区域的选择上,从

全球^[7-8]、国家^[9-10]范围逐渐聚焦于某个区域、省(市)的碳排放研究,如研究沿海地区^[11]、京津冀城市圈^[12]、长江经济带^[13]和各省市区^[14]农业的碳排放趋势等。当前多用于指导宏观层面的农业碳排放政策制定,而鲜见与农业活动关系更为密切的县域层面的农业碳排放研究,无法为日益精细化的农业管理提供支持。农业碳排放量的测算及其特征虽然受到一些学者^[15]关注,但对农业碳排放时空变化特征的分析仍然需要补充,利用标准差椭圆和重心转移模型深入刻画其空间转移路径,一定程度上充实农业碳排放时空特征的研究;二是农田碳排放驱动因素的研究。研究方法主要有扩展随机性环境影响评价模型(stochastic impacts by regression on population, affluence and technology, STIRPAT)、环境影响评估模型(impact of population, affluence and technology, IPAT)、对数平均迪氏指数分解法(logarithmic mean divisia index method, LMDI)和地理探测器等^[16-17]。其中,LMDI加法模型可避免由结构因素对其他因素产生间接贡献,而导致的结构因素的影响被低估的情况,被广泛应用于探究农业碳

强度、农业产业结构和经济发展水平等因素对农业碳排放的影响。如戴小文等^[18]利用LMDI指数分解将中国农业碳排放的影响因素分解为5个因素,表明农村生活水平提高是促成农业碳排放的最主要因素。近年来,农田碳源碳汇的双重属性也逐渐引起学者的广泛关注,将农田碳源碳汇综合分析,着眼于农田净碳汇的研究^[19]。目前,对区域农田碳排放及其驱动因素等内容已进行大量研究,但核算时多数忽略N₂O及CH₄的影响,在研究区域的选择上,聚焦于宁夏特别是县域尺度,同时关注农田作物碳汇的研究鲜有涉及,有待进一步完善。

基于此,拟在建立宁夏全面系统的农田净碳汇测算指标体系基础上,分析农田净碳汇的时序变化,再基于县域尺度农田净碳汇的空间格局分析宁夏农田净碳汇重心移动路径和空间集聚特征,并结合LMDI模型分析农田净碳汇驱动因素,以期为宁夏农田生态系统净碳汇核算清单编制提供依据,进而为国家农业领域实现碳达峰、碳中和目标提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区(图1)位于我国西北地区,与陕西、甘肃和内蒙古自治区接壤,总面积为6.64万km²,下辖5个市级行政区。从地形分布来看,自北向南分为北部引黄灌区、中部干旱带和南部山区3大区域,全区平均海拔>1 000 m。宁夏回族自治区水资源相对匮乏,且空间分布不均衡。

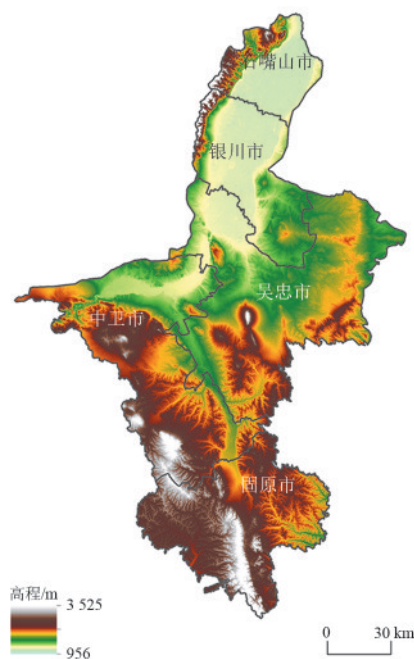


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源与处理

本研究使用的数据均来源于2003—2022年的《宁夏统计年鉴》^[20]《宁夏调查年鉴》^[21]《中国区域统计年鉴》^[22]和宁夏回族自治区统计局(<https://tj.nx.gov.cn/>)。其中碳排放测算的化肥使用量为化肥折存量,农药使用量、农膜使用量和农用柴油消耗量为当年实际数据,农田翻耕为当年实际农作物播种面积,农田灌溉为有效灌溉面积;农田作物碳吸收测算中的水稻、小麦、玉米、大豆、蔬菜等为当年实际数据,个别年份数据缺失,采用插值法估算予以补全。

1.3 研究方法

1.3.1 农田净碳汇估算方法 农田净碳汇指作物生育期碳吸收与农业生产活动中碳排放的差值。其中,碳吸收量主要指作物生育期内通过光合作用扣除自身呼吸消耗后固定的碳,依据农作物产量数据、经济系数和碳吸收率进行估算;碳排放量主要包括农业生产投入碳排放、土壤呼吸碳排放、稻田CH₄排放和农田N₂O排放。

碳吸收估算公式^[23]为:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times (1 - W_i) \times (1 + R_i) \times Y_i}{H_i} \quad (1)$$

式中: C 为农田生态系统碳吸收总量换算为CO₂当量值, t ; i 为农作物种类; C_i 为第 i 种农作物的碳吸收率, $\%$; W_i 为第 i 种作物经济产品部分水分, $\%$; R_i 为第 i 种农作物的根冠比; Y_i 为第 i 种农作物的经济产量, t ; H_i 为第 i 种农作物的经济系数。主要农作物碳吸收估算系数^[23-24]见表1。

表1 主要农作物碳吸收估算系数

Table 1 Estimation coefficients of carbon absorption for major crops

| 作物 | 经济系数 | 水分体积分数 | 根冠比 | 碳吸收率 |
|----|-------|--------|-------|-------|
| 水稻 | 0.489 | 0.120 | 0.125 | 0.414 |
| 小麦 | 0.434 | 0.120 | 0.166 | 0.485 |
| 玉米 | 0.438 | 0.130 | 0.170 | 0.470 |
| 薯类 | 0.667 | 0.700 | 0.050 | 0.422 |
| 豆类 | 0.425 | 0.130 | 0.130 | 0.450 |
| 油料 | 0.250 | 0.090 | 0.040 | 0.450 |
| 药材 | 0.400 | 0.150 | 0.620 | 0.450 |
| 蔬菜 | 0.830 | 0.900 | 0.250 | 0.450 |
| 瓜果 | 0.700 | 0.900 | — | 0.450 |

农业生产投入碳排放采用IPCC发布的碳排放系数法^[12],计算公式为:

$$E_c = \sum_{i=1}^n P_i E_f \quad (2)$$

式中: E_c 为农业生产投入碳排放总量换算为CO₂当量值, t ; i 为第 i 种碳源; P_i 为农田生产过程中第 i 种

碳源的投入量,主要考虑农膜、农药、化肥、灌溉、柴油; E_j 为农田生产过程中第*i*种碳源的碳排放系数。碳排放系数借鉴田云等^[25]、WEST等^[26]研究见表2。

表 2 农田主要碳源的碳排放系数

Table 2 Carbon emission factors of major carbon sources in farmland

| 碳源 | 碳排放系数 | 参考来源 |
|----|------------------------------|--------------------------------------------|
| 农膜 | 5.180 0 kg/kg | 南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA) ^[27] |
| 农药 | 4.934 1 kg/kg | 美国橡树岭国家实验室 |
| 化肥 | 0.859 6 kg/kg | WEST等 ^[26] 、美国橡树岭国家实验室 |
| 灌溉 | 266.480 0 kg/hm ² | 田云等 ^[25] 、WEST等 ^[26] |
| 柴油 | 0.592 7 kg/kg | 政府间气候变化专门委员会(IPCC) |
| 翻耕 | 312.600 0 kg/hm ² | 中国农业大学生物与技术学院(LACAV) ^[28] |

土壤呼吸碳排放计算公式为:

$$E_{CO_2} = S \times T \times EF_1 \quad (3)$$

式中: E_{CO_2} 为土壤呼吸产生的总量,t; S 为耕地面积, hm²; T 为时间,a; EF_1 为土壤呼吸碳排放速率, g/(m²·a),结合江国福等^[29]、丁杰萍等^[30]研究,宁夏土壤呼吸碳排放速率取值为 333.85 g/(m²·a)。

稻田CH₄的排放量遵循《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[24]的计算方法,具体计算公式为:

$$E_{CH_4} = \sum_{i=1}^n S_i \times EF_i \times GWP_{CH_4} \quad (4)$$

式中: E_{CH_4} 为稻田CH₄排放总量换算为CO₂当量值,t; i 为稻田类型; S_i 为第*i*种水稻的播种面积, hm²; EF_i 为第*i*种类型水稻的甲烷排放因子, kg/hm²,根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[24]推荐的甲烷排放因子,取值 231.2; GWP_{CH_4} 为甲烷的全球增温潜势值,取值 29.8^[24]。

农田N₂O排放计算公式为:

$$E_{N_2O} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR}) \times EF_2 + (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR}) \times EF_3 \quad (5)$$

式中: E_{N_2O} 为农田直接排放N₂O量换算为CO₂当量值,t; F_{SN} 为农田土壤中施用化肥的氮施入量,t; F_{ON} 为农田土壤中动物粪肥的氮施入量,t; F_{CR} 为秸秆还田中氮的还田量,t; EF_2 为氮元素投入产生旱地N₂O排放的排放因子,取值为 0.010 5; EF_3 为氮元素投入产生水田N₂O排放的排放因子,取值为 0.004 1。公式和数据参考文献[31]。

净碳汇估算公式为:

$$C_t = C - E_c - E_{CH_4} - E_{CO_2} - E_{N_2O} \quad (6)$$

$$C_q = \frac{C_t}{S_t} \quad (7)$$

式中: C_t 为净碳汇总量换算为CO₂当量值,t; C 为农田生态系统碳吸收总量换算为CO₂当量值,t; E_c 为农业生产投入碳排放总量换算为CO₂当量值,t; E_{CH_4} 为稻田CH₄排放总量换算为CO₂当量值,t; E_{CO_2} 为土壤呼吸产生的总量,t; E_{N_2O} 为农田直接排放N₂O量换算为CO₂当量值,t; C_q 为净碳汇强度,t/hm²; S_t 为农作物播种面积, hm²。

1.3.2 重心移动模型 引入重心模型分析宁夏农田净碳汇的空间变化规律,以研究对象的属性数据作为权重,借助GIS技术,计算研究对象的空間重心坐标。

$$X = \frac{\sum_{k=1}^m P_k X_k}{\sum_{k=1}^m P_k} \quad (8)$$

$$Y = \frac{\sum_{k=1}^m P_k Y_k}{\sum_{k=1}^m P_k} \quad (9)$$

式中: X 、 Y 分别为宁夏农田净碳汇重心的经纬度坐标; P_k 为第*k*个地级市农田净碳汇值; X_k 、 Y_k 分别为第*k*个地级市的经纬度坐标; m 为宁夏所包含的地级市个数。

$$D_{(u-v)} = R \times \sqrt{(X_v - X_u)^2 + (Y_v - Y_u)^2} \quad (10)$$

式中: $D_{(u-v)}$ 为从第*u*年到第*v*年重心移动的距离, km; (X_u, Y_u) 、 (X_v, Y_v) 分别为第*u*和*v*年宁夏农田净碳汇重心坐标; R 为将地理坐标转换为平面坐标的系数,取值为 111.11^[15]。

1.3.3 标准差椭圆 标准差椭圆是用于揭示地理要素空间分布特征的空间统计方法^[32],可通过椭圆中心、长轴、短轴、方位角等基本要素,定量分析宁夏农田净碳汇的空间分布及演变特征。

1.3.4 LMDI模型 LMDI模型是研究净碳汇驱动因素的常用方法,具有分解完全无残差的特点^[33]。本研究基于扩展LMDI模型,对可能影响宁夏农田净碳汇的驱动因素分解变形,从农田净碳汇效率、农业产业结构、农业经济发展水平、城镇化水平、农业劳动力等5个方面的因素,分析对农田净碳汇的影响。遵循LMDI分析框架,宁夏农田净碳汇的驱动因素分解式为:

$$C = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \quad (11)$$

式中: X_1 为农田净碳汇效率,是农田净碳汇与农业总产值的比值,t/元; X_2 为农业产业结构,是农业总产值与农林牧渔业总产值的比值,无量纲; X_3 为农业经济发展水平,是农林牧渔业总产值与全社会总人口的比值,元/人; X_4 为城镇化水平,是全社会总人口与农村总人口

的比值,无量纲; X_5 为农业劳动力,是农村总人口,人。

根据LMDI分解法的相关推导,可分解为:

$$\Delta C = C_t - C_0 = \sum_{w=1}^m \Delta X_w \quad (12)$$

$$\Delta X_w = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} (\ln X_w^t - \ln X_w^0) \quad (13)$$

式中: t 表示时期($t=1, 2, \dots, T$); 0 为基期; C_T 为 T 期的农田净碳汇; C_0 为基期的农田净碳汇; ΔX_w 分别为因素 w 对农田净碳汇的变化量的贡献值, t 。

2 结果与分析

2.1 宁夏农田净碳汇时序特征

根据公式(1)~公式(7)测算得到宁夏2003—2022年农田净碳汇的动态变化情况(图2)。由图2a净碳汇总量变化曲线和拟合曲线可知,宁夏农田净碳汇总量在研究期内总体呈上升趋势。2022年宁夏农田净碳汇量达到 7.56×10^6 t,相较于2003年的 3.38×10^6 t增长123.67%,总体上升趋势明显($R^2=0.91$),年平均增长率为4.10%。具体来看,2003—2007年,净碳汇总量变化趋势较为平稳。2007—2016年,净碳汇总量总体呈上升趋势,2016年净碳汇量(7.16×10^6 t)是2007年净碳汇量(4.07×10^6 t)的1.762倍。2016—2018年,净碳汇量呈“V”形急剧下降态势后回升,2017年农田净碳汇量为 6.04×10^6 t,较2016年环比下降15.70%,下降趋势较大,2017年

农田净碳汇量是2012—2022年的最低值。2018年净碳汇总量为 7.29×10^6 t,较2017年环比增长20.72%。2018—2022年,净碳汇量波动变化,2022年净碳汇总量较2018年有略微上升,共增加 2.70×10^5 t。

由图2b可知,净碳汇强度与净碳汇总量变化趋势相近,由拟合曲线可知,总体呈上升态势且增加趋势明显($R^2=0.94$),农田净碳汇强度由2003年的 2.55 t/hm²增长到2022年的 6.35 t/hm²,年平均增长率为4.67%。其中,2017年环比增长值最小,为-15.70%,2018年环比增长值最大,为20.72%。

由图2c可知,宁夏各市农田净碳汇总量均为正值。2003—2022年,宁夏各市的净碳汇量呈不同的变化趋势。吴忠市的农田净碳汇量增长最为显著,吴忠市的农田净碳汇量总体呈波动上升趋势,从2003年的 6.04×10^5 t上升至2022年的 2.49×10^6 t,年平均增长率为7.32%。银川市的农田净碳汇整体呈先增加后减少趋势,从2003年的 9.34×10^5 t增加至2016年的 1.71×10^6 t,后又减少至2022年的 1.50×10^6 t。石嘴山市农田净碳汇整体变化较为平稳,最大值出现在2018年,为 1.17×10^6 t,最小值出现在2003年,为 6.91×10^5 t。固原市的农田净碳汇量变化趋势在5市中波动最大,总体上看,2006年农田净碳汇总量最低为 0.45×10^5 t,2014年和2020年农田净碳汇总量出现2次峰值,其中2020年净碳汇量最高,为 1.53×10^6 t。

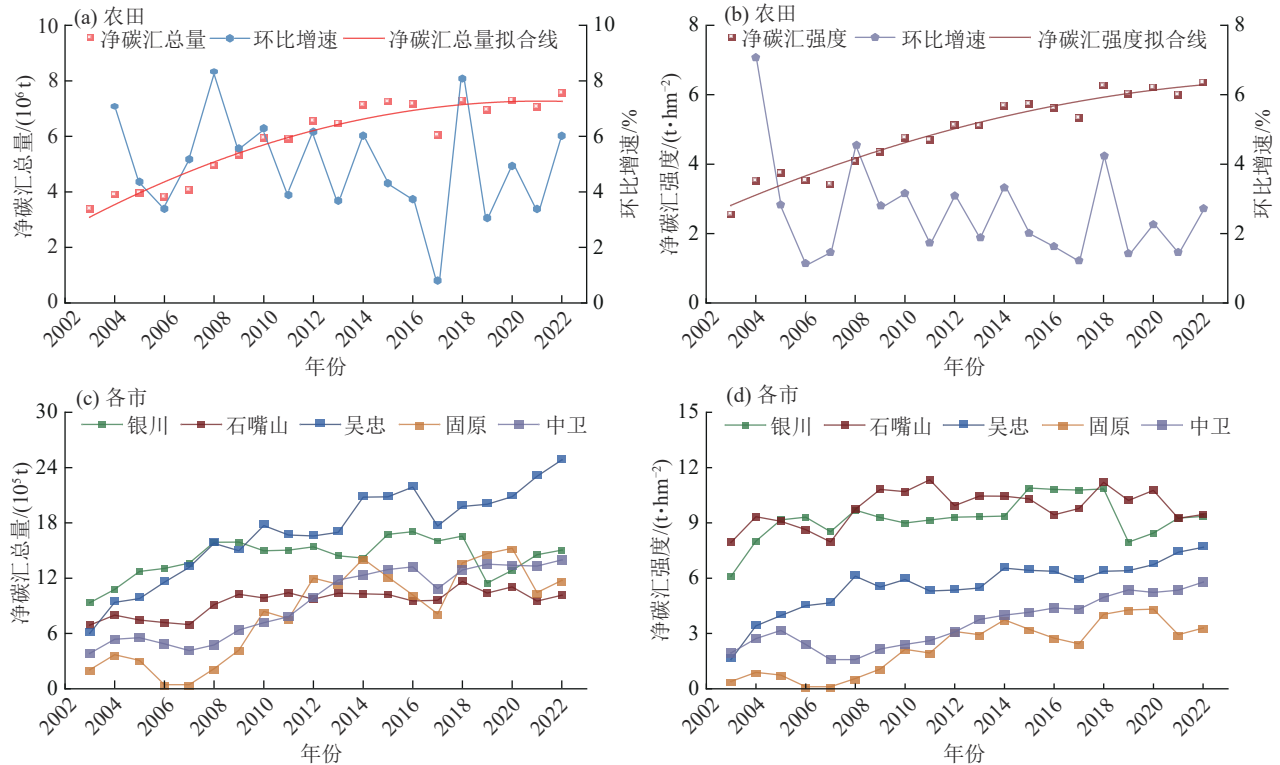


图2 2003—2022年宁夏农田净碳汇时空变化

Fig. 2 Spatiotemporal variation of net carbon sink in Ningxia's farmland from 2003 to 2022

2003—2022 年,宁夏农田净碳汇强度总体呈波动上升趋势,宁夏全区平均净碳汇强度 4.90 t/hm^2 ,石嘴山市年均净碳汇强度最高(9.84 t/hm^2),其次是银川市(9.23 t/hm^2),固原市年均净碳汇强度最低(2.25 t/hm^2)。其中上升幅度最大的是固原市,净碳汇强度由 2003 年的 0.40 t/hm^2 上升到 2022 年的 3.29 t/hm^2 ,上升幅度为 716.68%。

2.2 宁夏农田净碳汇空间特征

2.2.1 宁夏县域农田净碳汇空间格局特征 基于构

建的农田碳汇测算体系,利用县际面板数据,使用 ArcGIS 可视化地图来展示宁夏农田净碳汇的空间演进特征与规律(图 3)。由于年份较多,数据体量较大,仅展示 2003 年、2009 年、2015 年和 2022 年 4 个具有代表性年份的空间数据变化。考虑到同年中各县区农田净碳汇数据差异较大,本研究采取“自然间断法”将同年份的原始数据分为 5 组,依据净碳汇量数据大小由低到高分别定义为低碳汇区、中低碳汇区、中等碳汇区、中高碳汇区与高碳汇区。

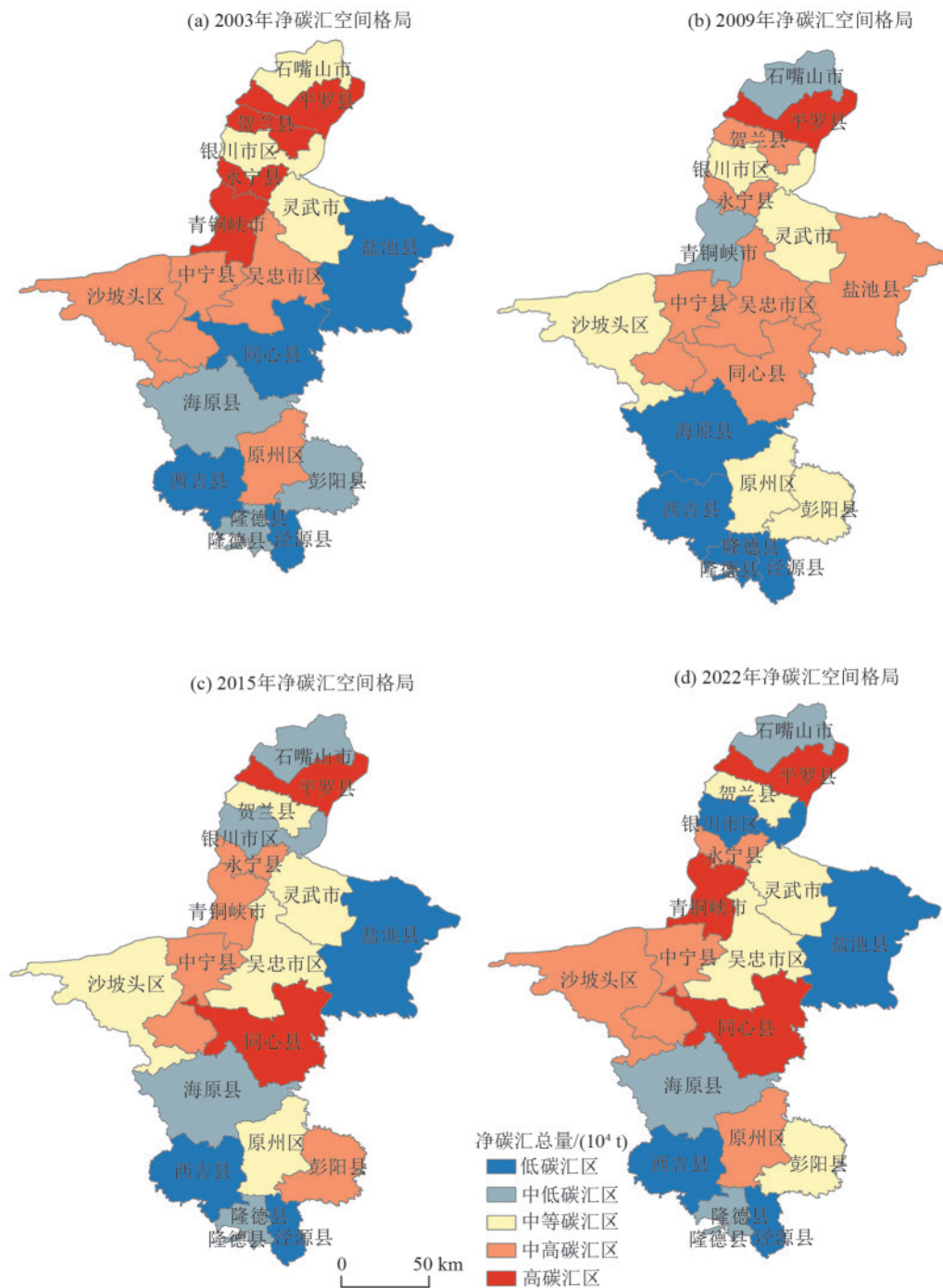


图 3 2003—2022 年宁夏农田净碳汇空间格局

Fig. 3 Spatial distribution patterns of net carbon sink in Ningxia's farmland from 2003 to 2022

总体而言,宁夏县域间农田碳汇量空间差异较为明显。2003年农田净碳汇总量均呈“西北部高,东南部低”的时空格局,2009年净碳汇总量向东部扩散,总体呈“北部高,南部低”空间格局,2015年农田净碳汇总量分布较为分散,中部和南部县区净碳汇总量进一步扩大,2022年净碳汇量进一步升高,净碳汇量无较大空间格局变化。

分析各市县的农田净碳汇量变化情况显示,平罗县 2003—2022 年农田净碳汇量为 $4.64 \times 10^5 \sim 8.82 \times 10^5$ t,始终为高碳汇区,占宁夏农田净碳汇的 7.87%~14.9%。永宁县和青铜峡市虽然在 2009 年处于中等碳汇区,但其余年份均处于中高碳汇区。中宁县和沙坡头区多年一直保持在中等和中高碳汇区,同心县的农田净碳汇总量均呈上升趋势,分别从低碳汇区和中低碳汇区升高为中高碳汇区和高碳汇区,变化较为明显,增长幅度为 25.63%。西吉县一直处于低碳汇区。

2.2.2 宁夏县域农田净碳汇空间迁移特征 为进一步揭示宁夏农田净碳汇的迁移变化,利用重心迁移模型和标准差椭圆对其展开分析(图 4)可知,2003—2022 年,宁夏农田净碳汇重心位于 $37^{\circ}43' \sim 37^{\circ}84'N$, $106^{\circ}21' \sim 106^{\circ}40'E$,位于宁夏几何中心 ($37^{\circ}19'N$, $105^{\circ}97'E$) 的东北方向。2003 年,农田净碳汇重心在银川市灵武市,到 2022 年,重心迁移到

吴忠市红寺堡区,重心向西南方向移动 40.15 km。2003—2022 年,宁夏农田净碳汇重心迁移过程大致可分为 3 个阶段。第一阶段,2003—2007 年,农田净碳汇重心在银川市灵武市向东北方向小幅度地偏移,最终总体向东南方向迁移 7.49 km;第二阶段,2007—2019 年,净碳汇重心总体大幅度向西南方向偏移,2011 年重心停留在吴忠市利通区,2011 年后重心继续向西南方向偏移,最终重心总体位置由 2007 年的银川市灵武市迁移到吴忠市红寺堡区,迁移距离 46.10 km;第三阶段,2019—2022 年,净碳汇重心仍停留在吴忠市红寺堡区,但不断向东北回偏,2022 年重心位置停留在吴忠市红寺堡区与利通区交界处,该阶段共迁移 7.26 km。

由图 4 和表 3 可知,椭圆主要位于宁夏北部和中部地区,大致呈“东北—西南”的空间分布格局。长轴长度由 2003 年的 160.86 km 减至 2007 年的 144.48 km,之后又增至 155.56 km,呈先减小后增大的演变趋势。短轴长度从 2007 年的 29.34 km 波动增加至 2019 年的 42.53 km,表现为离散状态。除 2007 年外,椭圆方位角整体旋转幅度不大,空间分布变化不明显。2003—2007 年椭圆面积减小,表明宁夏农田净碳汇呈聚集趋势,2007—2022 年椭圆面积在不断扩大,表明宁夏农田净碳汇呈空间分散趋势。

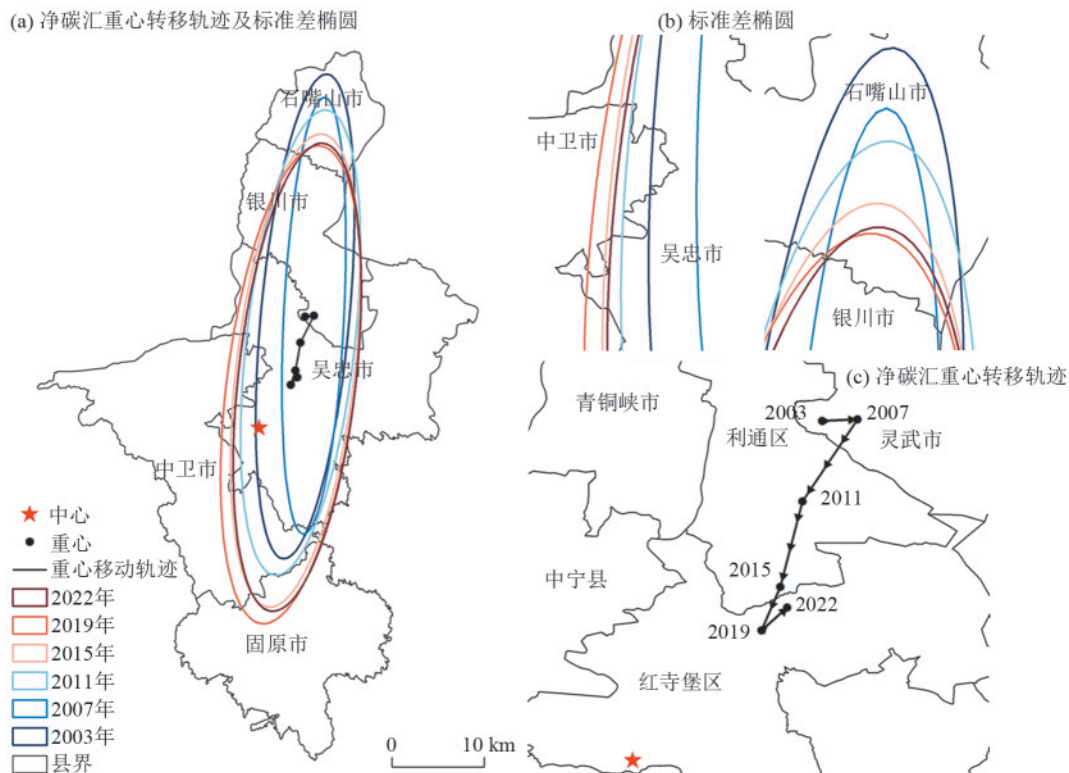


图 4 2003—2022 年宁夏农田净碳汇的重心转移轨迹

Fig. 4 Center of gravity shift trajectory of net carbon sink in Ningxia's farmland from 2003 to 2022

表 3 宁夏农田净碳汇重心迁移轨迹和标准差椭圆参数

Table 3 Parameters of center of gravity shift trajectory and standard deviation ellipse for net carbon sink in Ningxia's farmland

| 年份 | 重心坐标 | | 重心迁移 | | 长轴长度/km | 短轴长度/km | 方位角/(°) | 椭圆面积/km ² |
|------|---------|--------|------|-------|---------|---------|---------|----------------------|
| | 经度(E) | 纬度(N) | 方向 | 距离/km | | | | |
| 2003 | 106.33° | 37.83° | — | — | 160.86 | 29.34 | 5.25 | 14 816.04 |
| 2007 | 106.40° | 37.84° | 东北 | 7.49 | 144.48 | 19.97 | 2.81 | 9 054.99 |
| 2011 | 106.29° | 37.68° | 西南 | 20.90 | 154.65 | 35.94 | 6.41 | 17 453.51 |
| 2015 | 106.25° | 37.51° | 西南 | 18.66 | 157.28 | 39.21 | 6.58 | 19 369.73 |
| 2019 | 106.21° | 37.44° | 西南 | 10.03 | 159.11 | 42.53 | 7.10 | 21 251.35 |
| 2022 | 106.26° | 37.48° | 东北 | 7.26 | 155.56 | 39.01 | 6.37 | 19 055.95 |

2.3 宁夏农田净碳汇结构特征

由图 5 可知,2003—2022 年宁夏农田生态系统碳排放总体呈先升高后下降趋势。研究期内,2003 年碳排放总量最少,仅为 7.39×10^6 t(图 5a)。2013 年碳排放总量达到最大值,为 9.95×10^6 t,较 2003 年增长 2.56×10^6 t。2022 年碳排放总量为 8.73×10^6 t,较 2013 年减少 1.22×10^6 t。从农田碳排放来源(图 5c)来看,化肥施用造成的碳排放量最大,研究期内碳排放量为 6.46×10^7 t,在总排放量中占比 36.06%,研究期内呈先增长再下降趋势,由 2003 年的 2.63×10^6 t 增长到

2015 年的 3.58×10^6 t,上升幅度为 36.00%;2015—2022 年共减少 5.09×10^5 t,下降幅度为 14.23%。农膜的使用造成的碳排放增长幅度最大,由 2003 年的 1.13×10^5 t 增加到 2022 年的 3.99×10^5 t,增长幅度达到 253.10%。稻田甲烷排放量出现先增加后减少趋势,占比由 2003 年的 5.3% 增加到 2012 年的 6.2%,最后减少到 2022 年的 2.3%,变化幅度较大。其他碳排放源中由灌溉引起的碳排放和氧化亚氮排放量分别由 2003 年的 13.81×10^5 和 6.29×10^5 t 增加到 2022 年的 17.63×10^5 和 6.48×10^5 t,增长幅度分别为 27.66% 和 3.02%。

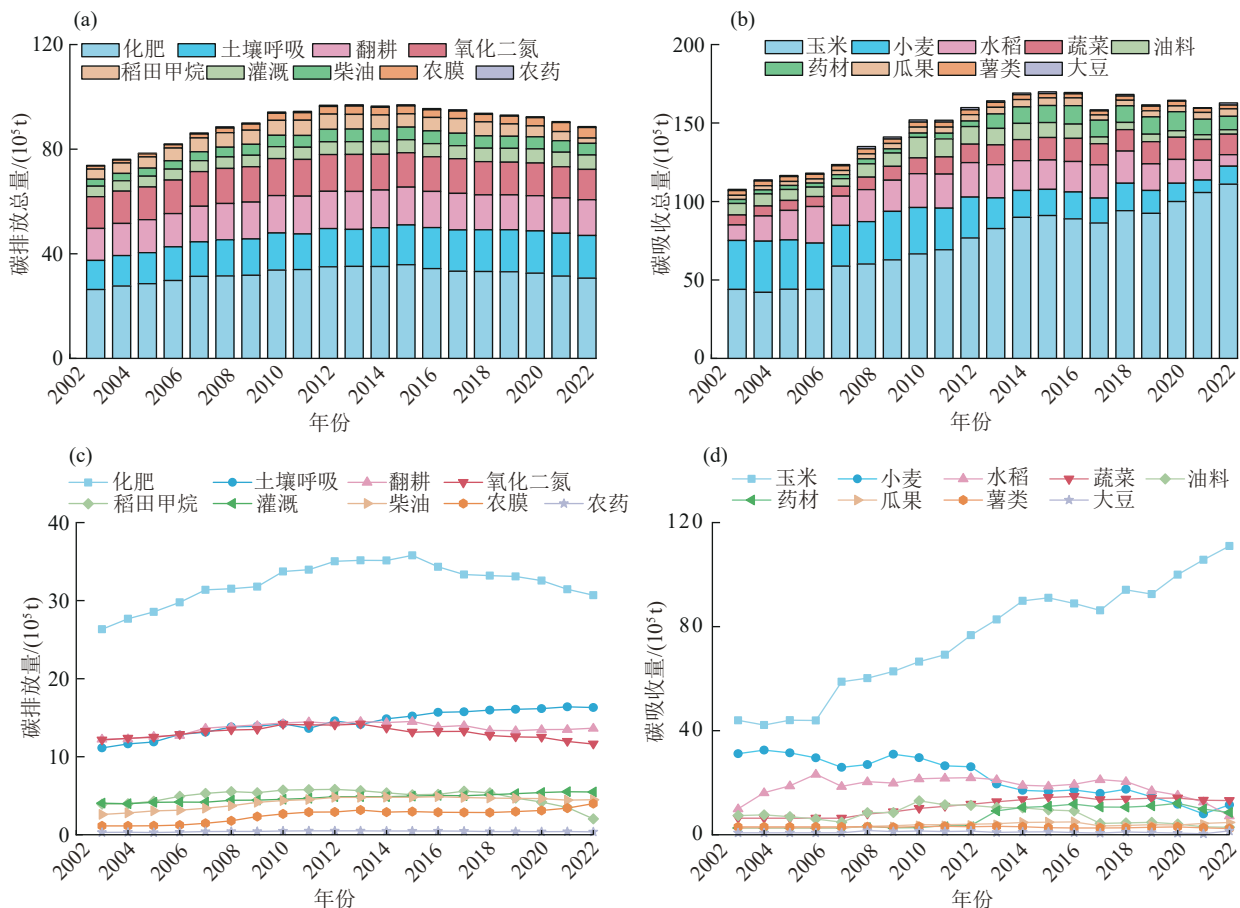


图 5 2003—2022 年宁夏农田净碳汇来源

Fig. 5 Sources of net carbon sink in Ningxia's farmland from 2003 to 2022

由图 5b 可知,2003—2022 年宁夏农田生态系统碳吸收总体上呈波动上升后趋于稳定的趋势。研究期内,碳吸收总量最大值 2015 年(1.70×10^7 t)较最低 2003 年(1.08×10^7 t)增长 6.22×10^6 t。在研究的 9 种农作物碳吸收数据中(图 5d),宁夏农田作物中玉米的碳吸收量最大,研究期内碳吸收总量为 1.51 亿 t,占碳吸收总量的 50.90%。小麦由 2003 年的 3.12×10^6 t 增长至 2022 年的 4.40×10^7 t,增长幅度为 131.00%。研究期内农田作物碳吸收量不增反降幅度最大的是水稻,碳吸收总量为 3.64×10^7 t,占农作物碳吸收总量的 12.23%,由 2003 年的 9.95×10^6 t 下降至 2020 年 7.28×10^6 t,下降幅度为 26.82%。

2.4 宁夏农田净碳汇驱动因素分解

运用 LMDI 模型将农田净碳汇的驱动因素分解为农田净碳汇效率因素、农业产业结构因素、农业经济发展水平因素、城镇化水平因素和农业劳动力因

素,基于公式(11)~(13)测算 2003—2022 年各年各因素对宁夏农田净碳汇的影响方向和贡献值(表 4)。

农业经济发展水平因素是促进宁夏农田净碳汇的主要驱动因素,2003—2022 年累计效应使得宁夏农田净碳汇增加 1.14×10^7 t。城镇化水平因素和农业产业结构因素也是促进宁夏农田净碳汇增加的驱动因素,2003—2022 年宁夏城镇化水平因素累计增强净碳汇量 3.18×10^6 t;农业产业结构因素促进效果较小,2003—2022 年农业产业结构累计效应促进净碳汇增长 3.51×10^5 t。农田净碳汇效率因素是抑制宁夏农田净碳汇的主要驱动因素,2003—2022 年农业净碳汇效率因素累计效应抑制农业净碳汇 7.59×10^6 t。农业劳动力因素是宁夏农田净碳汇的重要负向驱动因素,其抑制效果低于农田净碳汇效率因素,2003—2022 年累计效应抑制农田净碳汇 2.46×10^6 t。

表 4 2003—2022 年宁夏农田净碳汇驱动因素分解

| 年份 | 农田净碳汇效率因素 | 农业产业结构因素 | 农业经济发展水平因素 | 城镇化水平因素 | 农业劳动力因素 | 总效应 |
|------|-----------|----------|------------|---------|---------|--------|
| 2003 | — | — | — | — | — | — |
| 2004 | -2.86 | -1.94 | 7.67 | 4.06 | -1.71 | 5.22 |
| 2005 | -3.15 | -0.28 | 3.77 | 0.80 | -0.56 | 0.58 |
| 2006 | -4.15 | -2.57 | 5.14 | 0.18 | 0.03 | -1.38 |
| 2007 | -5.92 | 0.43 | 7.71 | 0.52 | -0.32 | 2.42 |
| 2008 | -1.00 | 2.54 | 7.03 | 0.46 | -0.23 | 8.80 |
| 2009 | 0.31 | -2.03 | 5.33 | 0.69 | -0.44 | 3.86 |
| 2010 | -6.75 | -3.00 | 15.54 | 1.55 | -1.28 | 6.06 |
| 2011 | -9.05 | 0.99 | 7.47 | 1.91 | -1.55 | -0.23 |
| 2012 | 1.22 | 0.90 | 3.82 | 0.79 | -0.33 | 6.40 |
| 2013 | -8.17 | 0.18 | 6.71 | 1.48 | -1.09 | -0.90 |
| 2014 | 4.10 | 1.56 | 0.46 | 1.99 | -1.54 | 6.57 |
| 2015 | -4.34 | -3.23 | 8.47 | 2.23 | -1.88 | 1.26 |
| 2016 | -2.58 | 1.81 | 0.55 | 1.43 | -0.96 | 0.25 |
| 2017 | -14.00 | 0.75 | 1.63 | 4.92 | -4.55 | -11.25 |
| 2018 | 5.41 | -0.16 | 7.01 | 1.91 | -1.66 | 12.51 |
| 2019 | -4.51 | 4.03 | 3.16 | 2.34 | -2.10 | 2.92 |
| 2020 | -9.71 | -0.05 | 13.05 | 2.35 | -2.25 | 3.40 |
| 2021 | -7.92 | 2.95 | 2.59 | 1.87 | -1.85 | -2.36 |
| 2022 | -2.79 | 0.62 | 7.26 | 0.31 | -0.36 | 5.05 |
| 累积效应 | -75.86 | 3.51 | 114.38 | 31.78 | -24.62 | 49.19 |

注:由于kaya恒等式用以比较各驱动因素报告期相对于基期的变化情况,采用2003年数据为初始基期,故表中2003年的数据为“—”。

3 讨论

3.1 宁夏农田碳汇的时空差异分析

2003—2022 年宁夏农田净碳汇总量总体呈波动上升趋势,表明宁夏农田作物具有较强的碳汇功能。主要是因为宁夏农作物播种面积和作物产量在不断提升,同时,农田化肥等农用物资投入减少。近年

来,随着宁夏盐碱地治理和高标准农田建设的不断推进,宁夏耕地质量不断提高,导致农田净碳汇提高的同时,农田净碳汇强度也随之升高。农田碳汇是由农作物生育期内碳吸收量与农田碳排放量差值决定,宁夏农田主要农作物总产量总体呈上升趋势,由 2003 年的 6.42×10^6 t 增加到 2022 年的 11.13×10^6 t。

但2017年农田作物总产量出现小幅度下降,由2016年的 119.95×10^6 t降低到2017年的 106.87×10^6 t。同时,2017年净碳汇总量出现明显下降,因为2015年开始的农业供给侧结构性改革推动宁夏农业种植结构的调整。2017年各地市农作物播种面积减少导致农作物总产量降低,其中玉米和油料作物的调整最显著,2016年宁夏油料作物价格指数(85.29)相较2015年(112.18)下降26.89%,导致2017年农民对玉米和油料作物种植意向较低,农民改种经济效益更高、更符合市场需求的酿酒葡萄、枸杞、黄花菜等特色经济作物,以优化农业产业结构,提高农业综合效益。

宁夏不同地区农田净碳汇能力存在显著差异,主要表现为北部地区碳汇能力强,而南部地区相对较弱。石嘴山是净碳汇强度最大的地市,也一直处于高碳汇区。一方面,石嘴山市气候条件和耕地资源相对较好,有着广泛的引黄灌区面积;另一方面,该地区持续投入种植科技研发,拥有相对高效的农业生产模式,推动农业生产模式实现从高投入、高消耗和高污染向低成本、低污染和高产出的绿色转型^[34]。相比之下,虽然宁夏地区农田净碳汇重心由北部向南部迁移,但由于固原市和中卫市南部等县区气候干旱少雨气候特征的限制,生态环境脆弱,农业产出较低,其碳汇能力较弱。区域差异表明,在制定碳减排政策时,需因地制宜,重点加强碳汇较弱地区的农田管理和优化灌溉技术,以提升整体的碳汇水平。

3.2 宁夏农田净碳汇结构差异分析

宁夏农田碳排放总量呈先增加后减小趋势,最大值出现在2013年,加快发展现代农业是此时期中国农业农村工作的重要任务之一^[35],农业生产中化肥和农用柴油使用量快速增加,导致该时间段农田碳排放量增长迅速。党的“十八大”召开后,宁夏提出沿黄经济区发展战略,实施节水农业和高标准农田建设等现代农业工程^[36],化肥农药农膜等农用物资的使用量也随之下落,宁夏农田碳排放总量逐渐呈下降趋势。从碳排放来源来看,化肥使用造成的碳排放量在2015年后逐渐减低,可能与2015年农业部发布的“一控二减三基本”政策有关^[37]。土壤呼吸造成的碳排放增长幅度较大,主要与宁夏地区耕地面积增长有关,近年来,宁夏构建耕地数量、质量、生态“三位一体”保护新格局,科学开发后备耕地资源,合理开发和利用盐碱耕地,发展高效节水农业。在一定程度上提高耕地的质量和灌溉保障能力,稳定耕地面积。玉米是宁夏农田作物碳吸收的主要贡献作物,主要与玉米的高碳吸收率和广泛的种植面积

有关。2007年玉米碳吸收量有一次较大幅度的升高,可能因为2007年黄河来水减少,宁夏对水稻种植面积进行强制性压减,导致玉米种植面积增加。2013年小麦的碳吸收量降低,药材的碳吸收量增加,原因可能是2013年前后宁夏小麦每公顷收益远低于药材,宁夏借助独特的地理气候优势大力发展中药材产业以满足市场需求,从而导致药材种植面积上升,小麦的种植面积受到压减。因此,应该科学合理地调整农作物种植结构,在满足经济效益的同时适当增加碳吸收能力强的农作物种植面积。

3.3 宁夏农田净碳汇驱动因素差异分析

经济发展水平对农田净碳汇具有较强的正向驱动作用,历年来农业经济发展水平对宁夏农田净碳汇均呈正向影响,表明宁夏在推动农业经济发展的同时,也在关注生态环境的可持续发展,以实现二者的和谐共进^[38]。随着宁夏城镇化水平的推进,土地利用发生变化,部分耕地或被集中流转,促进农田集中化经营,使农业管理更加规范与高效,促进现代化农业技术的应用,在提高作物产量的同时减少碳排放,增加农田的碳汇效应。农业产业结构历年对净碳汇的贡献值呈现正向效应和负向效应的波动变化,表明我国农林牧渔产业结构在不断调整优化以提高农业碳汇水平,如宁夏农业产值占农林牧渔总产值的比例由2003年的53.8%发展到2022年的24.5%。未来需要继续优化产业结构,不断加强种植业等具备碳汇功能的产业有助于提高碳汇水平。历年来农田净碳汇效率对农田净碳汇基本呈负向影响。可能是因为农田净碳汇的增长速度落后于农牧业经济增长的速度。因此,应注重农牧业经济增长与农业生产力的提升协调发展,进而提高宁夏农业净碳汇效率和农业生产效率。农业劳动力因素的影响主要是因为宁夏农村人口数量的变动导致农田净碳汇的变动,2003—2022年宁夏农村人口呈现逐年下降的变化趋势,从2003年的365.96万人下降到2022年的245万人,随着宁夏农村人口不断流失,预计未来农村人口规模对农田净碳汇仍起到抑制作用。

3.4 政策建议

针对宁夏农田碳汇“北高南低”的空间格局,构建差异化碳汇提升体系,实施“分区”管理策略,建立北部灌区示范区和南部生态修复区。北部引黄灌区可以依托玉米高碳汇特性,推广“玉米-绿肥轮作”模式,同时绿肥固氮又可减少化肥依赖,减少农田农用物资投入引起的碳排放,提升农田整体碳汇能力。在固原、西吉等生态脆弱南部山区,优先发展耐旱高碳汇作物(如马铃薯)或药材种植,提高农田碳汇的

同时,增加经济收益。

将碳汇增量纳入生态补偿机制,加快建设碳交易试点,实现生态与经济协同增效。政策层面,基于县域碳排放清单设定差异化化肥减量目标,对农田碳汇增长地区实行生态补贴,对生物有机肥等低碳排放产品实行价格补贴,降低农户使用成本。

推广精准化低碳技术,高效利用自然低碳资源。充分利用宁夏地区优质的地理条件,充分利用太阳能和风能,扩大清洁能源在农业领域的比重。推广棚顶发电等“光伏农业”,实现“光-碳”协同增效。全面展开高标准农田项目建设和现代高效节水农业示范区建设,减少因农用地破碎化和作物灌溉所造成的机械高碳排放问题。

4 结论

1)2003—2022年,宁夏农田净碳汇总量总体呈上升趋势,2022年宁夏农田净碳汇量达到 7.56×10^6 t,相较于2003年的 3.38×10^6 t增加123.67%,年平均增长率为4.10%。农田净碳汇强度总体呈上升趋势,由2003年的 2.55 t/hm^2 增长到2022年的 6.35 t/hm^2 ,年均增长率4.67%。宁夏各市农田净碳汇总量均为正值,吴忠市年平均增长率最大为7.32%。

2)2003—2022年,宁夏县域间农田净碳汇量空间差异明显,2003年表现为“西北部高,东南部低”空间分布格局,2022年变为“北部高,南部低”的空间分布格局。宁夏农田净碳汇重心位于宁夏几何中心的东北方向,向西南迁移40.15 km,净碳汇重心由银川市灵武市迁移到吴忠市红寺堡区。

3)净碳汇结构方面,宁夏农田生态系统碳排放来源主要是化肥施用造成的碳排放,研究期内碳排放量为 6.46×10^7 t,在总排放量中占比36.06%;宁夏农田作物中玉米的碳吸收量最大,研究期内碳吸收总量达到1.51亿t,占碳吸收总量的50.90%。

4)农田净碳汇效率因素和农业劳动力因素是宁夏农田净碳汇的负向驱动因素,经济发展水平因素、城镇化水平因素和农业产业结构因素是促进宁夏农田净碳汇的驱动因素。其中,农田净碳汇效率因素和经济发展水平因素影响程度较大。

参考文献:

- [1] PAUSTIAN K, COLE C V, SAUERBECK D, et al. CO₂ mitigation by agriculture: An overview[J]. *Climatic Change*, 1998, 40(1): 135-162.
- [2] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. *中国科学:生命科学*, 2022, 52(4): 534-574.
- YANG Y H, SHI Y, SUN W J, et al. Terrestrial

carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Science China-Life Sciences*, 2022, 52(4): 534-574.

- [3] 邹金浪,刘陶红,姚冠荣,等.中国化肥减量降碳效应评估[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(1): 438-448.
- ZOU J L, LIU T H, YAO G R, et al. Assessing the carbon emissions from fertilizer use reduction in China[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(1): 438-448.
- [4] LI C, JIA J W, WU F, et al. County-level intensity of carbon emissions from crop farming in China during 2000—2019[J]. *Scientific Data*, 2024, 11: e457.
- [5] 刘舒乐,严薇,高庆先,等.双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应[J]. *环境科学*, 2023, 44(12): 6692-6699.
- LIU S L, YAN W, GAO Q X, et al. Dual-perspective analysis of the warming effect of the methane emissions from animal husbandry in China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6692-6699.
- [6] 冯国平,田国行.基于土地利用的驻马店市碳源/汇时空分布及预测[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 219-227.
- FENG G P, TIAN G H. Spatio-temporal distribution and prediction of carbon source and sink based on land use in Zhumadian City[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 219-227.
- [7] QIN J X, DUAN W L, ZOU S, et al. Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: e3084.
- [8] MARASENI T N, QU J S. An international comparison of agricultural nitrous oxide emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 1256-1266.
- [9] HUAN H F, WANG L, ZHANG Y. Regional differences, convergence characteristics, and carbon peaking prediction of agricultural carbon emissions in China[J]. *Environmental Pollution*, 2025, 366: e125477.
- [10] ZHANG X D, LIAO K C, ZHOU X H. Analysis of regional differences and dynamic mechanisms of agricultural carbon emission efficiency in China's seven agricultural regions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(25): 38258-38284.
- [11] 孙小祥,张华兵,于英鹏.江苏沿海地区农田生态系统碳源/汇时空变化及公平性研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(10): 56-64.
- SUN X X, ZHANG H B, YU Y P. Spatial and temporal dynamics in carbon source/sink and equity of the farmland ecosystem in Jiangsu coastal area, China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(10): 56-64.
- [12] 闫丰,王洋,杜哲,等.基于IPCC排放因子法估算碳足迹的京津冀生态补偿量化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 15-20.
- YAN F, WANG Y, DU Z, et al. Quantification of eco-

- logical compensation in Beijing-Tianjin-Hebei based on carbon footprint calculated using emission factor method proposed by IPCC[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 15-20.
- [13] ZOU C, LI H, CHEN D H, et al. Spatial-temporal changes of carbon source/sink in terrestrial vegetation ecosystem and response to meteorological factors in Yangtze River Delta Region (China) [J]. Sustainability, 2022, 14(16): e10051.
- [14] 范振浩, 邢巍巍, 卜元卿, 等. 江苏省种植业碳排放的测算及达峰分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 78-85.
FAN Z H, XING W W, BU Y Q, et al. Calculation and peak analysis of carbon emissions from agricultural planting in Jiangsu Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 78-85.
- [15] 翁翎翥, 朱振宇, 韩许高, 等. 江苏省农田植被净碳汇时空格局分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 233-241.
WENG L Y, ZHU Z Y, HAN X G, et al. Spatial-temporal pattern of net carbon sink of farmland vegetation in Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 233-241.
- [16] 张江艳. 基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 1888-1897.
ZHANG J Y. Research on carbon emission decoupling factors based on STIRPAT model and LMDI decomposition[J]. Environmental Science, 2024, 45(4): 1888-1897.
- [17] 罗家祺, 金晓斌, 刘晶, 等. 2000—2020年苏北地区农业生态效率变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 239-248.
LUO J Q, JIN X B, LIU J, et al. Process and influencing factors of agricultural eco-efficiency in northern Jiangsu of China from 2000 to 2020[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(15): 239-248.
- [18] 戴小文, 何艳秋, 钟秋波. 中国农业能源消耗碳排放变化驱动因素及其贡献研究: 基于Kaya恒等扩展与LMDI指数分解方法[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1445-1454.
DAI X W, HE Y Q, ZHONG Q B. Driving factors and their contributions to agricultural CO₂ emission due to energy consumption in China: Based on an expended Kaya identity and LMDI decomposition method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1445-1454.
- [19] 丁也璐, 赵娜娜, 黎明, 等. 陕北农田作物生产碳源/汇及碳足迹空间特征[J]. 生态学报, 2024, 44(11): 4574-4583.
DING Y L, ZHAO N N, LI M, et al. Carbon source/sink and carbon footprint estimation for field crop production and spatial characterization in northern Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4574-4583.
- [20] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003—2023.
Ningxia Hui Autonomous Region Bureau of Statistics. Ningxia statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2003—2022.
- [21] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏调查年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014—2023.
Ningxia Hui Autonomous Region Bureau of Statistics. Ningxia survey yearbook[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2014—2022.
- [22] 国家统计局. 中国区域经济统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003—2014.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook for regional economy[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2003—2014.
- [23] 韩召迎, 孟亚利, 徐娇, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析: 以江苏省为案例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 1034-1041.
HAN Z Y, MENG Y L, XU J, et al. Temporal and spatial difference in carbon footprint of regional farmland ecosystem: Taking Jiangsu Province as a case[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(5): 1034-1041.
- [24] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行)[Z]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2011.
National Development and Reform Commission. Guidelines for the preparation of provincial greenhouse gas inventories (Trial) [Z]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2011.
- [25] 田云, 张俊飏. 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.
- [26] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [27] 李波, 张俊飏, 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 B, ZHANG J B, LI H P. 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.
- [28] 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 F L, LI L, ZHANG H L, et al. The impact of conservation tillage on net carbon release from agricultural ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [29] 江国福, 刘畅, 李金全, 等. 中国农田土壤呼吸速率及驱

- 动因子[J].中国科学:生命科学,2014,44(7):725-735.
- JIANG G F, LIU C, LI J Q, et al. Soil respiration and driving factors of farmland ecosystems in China [J]. *Science China-Life Sciences*, 2014, 44(7): 725-735.
- [30] 丁杰萍,罗永清,周欣,等.植物根系呼吸研究方法及其影响因素研究进展[J].草业学报,2015,24(5):206-216.
- DING J P, LUO Y Q, ZHOU X, et al. Review of methodology and factors influencing plant root respiration [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(5): 206-216.
- [31] 张强,巨晓棠,张福锁.应用修正的IPCC2006方法对中国农田N₂O排放量重新估算[J].中国生态农业学报,2010,18(1):7-13.
- ZHANG Q, JU X T, ZHANG F S. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 7-13.
- [32] 黄汉志,贾俊松,刘淑婷,等.2000—2020年长江经济带碳汇时空演变及影响因素分析[J].环境科学研究,2023,36(8):1564-1576.
- HUANG H Z, JIA J S, LIU S T, et al. Analysis of spatial-temporal evolution and influencing factors of carbon sinks in Yangtze River economic belt from 2000 to 2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(8): 1564-1576.
- [33] HUANG Q Y, ZHANG Y. Decoupling and decomposition analysis of agricultural carbon emissions: Evidence from Heilongjiang Province, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 19(1): e198.
- [34] 汤李琛,李洁,陈慧,等.西部大开发地区种植业净碳汇时空格局及驱动因素[J/OL].环境科学,1-19[2025-04-09].<https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202407194>.
- TANG L C, LI J, CHEN H, et al. Spatial-temporal patterns and driving factors of net carbon sink in planting industry in west China development area [J/OL]. *Environmental Science*, 1-19 [2025-04-09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202407194>.
- [35] 何艳秋,陈柔,吴昊玥,等.中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[J].中国生态农业学报,2018,26(9):1269-1282.
- HE Y Q, CHEN R, WU H Y, et al. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1269-1282.
- [36] 舒瑞,孙鸿睿,邹业斌,等.宁夏沿黄生态经济带耕地的时空演变及驱动力[J].水土保持通报,2021,41(3):267-274.
- SHU R, SUN H R, ZOU Y B, et al. Driving forces of spatio-temporal changes in cultivated land in Ningxia eco-economic belt along Yellow River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 267-274.
- [37] 徐雯丽,陈强强.黄河流域城市PM_{2.5}时空分异特征及污染物解析[J].环境科学研究,2023,36(4):637-648.
- XU W L, CHEN Q Q. Spatial-temporal variation characteristics and pollutants analysis of urban PM_{2.5} in the Yellow River basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(4): 637-648.
- [38] 董晓龙,郑兰钦,连海峰,等.中国农业净碳汇的时空动态及其驱动因素[J].水土保持学报,2024,38(4):198-208.
- DONG X L, ZHENG L Q, LIAN H F, et al. Temporal and spatial dynamics and drivers of China's agriculture net carbon sink [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 198-208.