

引用格式：

郝长军, 李园园, 薛彩霞. 陕西省保护性耕作净碳汇的时空格局及驱动因素 [J]. 农业现代化研究, 2025, 46(2): 294-304.
XI C J, LI Y Y, XUE C X. Spatio-temporal pattern and driving factors of net carbon sink of conservation tillage in Shaanxi Province, China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(2): 294-304.
DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.1876
CSTR: 32240.14.1000.0275.2024.1876



陕西省保护性耕作净碳汇的时空格局及驱动因素

郝长军¹, 李园园², 薛彩霞^{1*}

(1. 西北农林科技大学经济管理学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西安财经大学管理学院, 陕西 西安 710100)

摘要: 保护性耕作是提升耕地固碳减排能力的重要措施, 分析其净碳汇的时空格局及驱动因素对实现国家“双碳”目标具有重要意义。本文以陕西省为研究对象, 采用 2000—2020 年数据, 结合 ArcGIS 10.7 平台的自然断点法、标准差椭圆和地理探测器分析保护性耕作净碳汇的时空分布及其驱动因素。研究结果表明: 1) 陕西省保护性耕作净碳汇从 2000 年的 57.76 万 t 增长至 2020 年的 129.30 万 t, 增幅达到 123.86%, 但增速在不同阶段存在差异, 且土壤固碳始终是主要构成部分。2) 净碳汇的空间分布呈现“关中 > 陕北 > 陕南”格局, 其中关中地区始终为核心区域, 净碳汇的中心呈现“西-南-东北”方向的迁移, 尤其是陕北地区的净碳汇增长趋势明显。3) 复种指数、农业机械化水平、财政支农水平等因素对陕西省保护性耕作净碳汇时空格局演变具有显著驱动作用, 且不同类型因子间的驱动力强于同类型因子之间的驱动作用。基于此, 建议加强保护性耕作农机具与作业补贴政策, 实施针对性技术指导, 鼓励科研机构研发适应性农机具, 从而进一步提升保护性耕作的固碳减排效益, 推动农业为“双碳”目标作出更大贡献。

关键词: 保护性耕作; 净碳汇; 时空格局; 驱动因素; 陕西

中图分类号: F323.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0275 (2025) 02-0294-11

Spatio-temporal pattern and driving factors of net carbon sink of conservation tillage in Shaanxi Province, China

XI Changjun¹, LI Yuanyuan², XUE Caixia¹

(1. College of Economics & Management, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Management, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: Conservation tillage is a crucial measure for enhancing the carbon sequestration and emission reduction capacity of farmland. Analyzing the spatio-temporal patterns and driving factors of its net carbon sink is of significant importance for achieving the national “dual carbon” goals. This study focuses on Shaanxi Province, utilizing data from 2000 to 2020, combined with the natural breakpoint method, standard deviation ellipse, and geographical detector on the ArcGIS 10.7 platform, to analyze the spatio-temporal distribution and driving factors of the net carbon sink from conservation tillage. The research results indicate the following: 1) The net carbon sink of conservation tillage in Shaanxi Province increased from 577.6 thousand tons in 2000 to 1 293.0 thousand tons in 2020, representing a growth of 123.86%. However, the growth rate varied across different stages, with soil carbon sequestration consistently being the major component. 2) The spatial distribution of the net carbon sink followed the pattern of “Guanzhong > Northern Shaanxi > Southern Shaanxi”, with the Guanzhong region consistently being the core area. The center of the net carbon sink exhibited a migration trend from “west-south-northeast”, with a particularly pronounced growth trend in Northern Shaanxi. 3) Factors such as the cropping index, agricultural mechanization level, and financial support for agriculture have a significant driving effect on the spatio-temporal evolution of the net carbon sink from conservation tillage in Shaanxi Province. Moreover, the driving force between different types of factors is stronger than that within the same type of factors. Based on these findings, it is recommended to strengthen policies related to subsidies for conservation tillage machinery and operations, implement targeted technical guidance, and encourage research institutions to develop adaptive agricultural machinery. These measures will further enhance the carbon sequestration and emission reduction benefits of conservation tillage, contributing more significantly to the agricultural sector's role in achieving the national “dual carbon” goals.

Keywords: conservation tillage; net carbon sink; spatial-temporal pattern; driving factors; Shaanxi

收稿日期 Received: 2024-11-04; 接受日期 Accepted: 2025-02-01

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目 (23YJA630111)。Supported by the Development of Humanities and Social Sciences Foundation of Ministry of Education of China (23YJA630111).

* 通信作者 Corresponding author (xiaoxueacc@126.com)

温室气体排放引起的全球增温现象日益显著，已对全球气候变化、农业生产和人类生活产生了深远影响。2020 年 9 月，我国明确提出要在 2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和。政府间气候变化专门委员会（IPCC）第四次评估报告指出，耕地可以吸收大气中 CO₂ 年增量的 1/4 至 1/3^[1]，而耕地利用方式对其吸收效果具有重要影响^[2]。保护性耕作是指通过免耕、秸秆还田等方法，改变地表微地形和覆盖状况等措施的总称。采用保护性耕作能够显著提高耕地的碳汇效果^[3]，而不同保护性耕作措施的净碳汇效应存在差异^[4]。免耕和秸秆还田是保护性耕作的主要措施，免耕减少了对耕地的干扰，增加了土壤固碳^[5]，同时降低了温室气体排放^[6]。秸秆还田则有助于提升耕地的生物固碳能力^[7-8]。截至 2020 年，我国保护性耕作的总推广面积已达 79.64 万 hm²，占总播种面积的 47.50%。因此，研究保护性耕作净碳汇的时空格局，对于我国应对全球气候变暖、保障粮食安全及实现“双碳”目标具有重要意义。

目前，国内外关于保护性耕作的研究大多依赖田间试验数据，主要集中在保护性耕作对土壤固碳、温室气体排放、作物产量的影响以及影响农户采用保护性耕作技术的因素等方面。学者们普遍认为，免耕和秸秆还田均能有效提高土壤碳储存^[9]。实施免耕和秸秆还田后，土壤的理化性质和微生物环境发生了变化，减少了温室气体排放^[10]。免耕通过减少对耕地的干扰，有助于土壤固碳^[11]；而秸秆还田虽然可能产生 CO₂、CH₄ 等温室气体，但其整体碳汇效果仍优于其他秸秆利用方式^[12]，通常免耕与秸秆还田联合实施的固碳效果最为显著^[13]。土壤碳储存的增加不仅减少了温室气体的排放^[14-15]，还能够有效提升作物单产^[16]，从而影响土壤的生物固碳^[17]。然而，保护性耕作的实施也存在一定的经济成本，经济水平较高的农户更有可能采用保护性耕作^[18]。此外，农户对碳汇交易的预期收入也会影响其采纳保护性耕作的意愿^[19]。农业保险能够提高农户抵御风险的能力，进而提高其采用保护性耕作的意愿^[20]，但在推广过程中需结合当地的种植和风俗习惯^[21]。尽管现有研究已取得丰硕成果，但从宏观角度研究保护性耕作碳汇的文献仍较少，且不同地区的农业生产、社会经济和生态环境等因素对保护性耕作碳汇效应的驱动作用尚未明确。现有研究大多独立测算免耕与秸秆还田的净碳汇效果。

陕西省的保护性耕作始于 20 世纪 80 年代初，研发了“少耕法”和“留茬法”等技术。自 1999 年起，

陕西省开始进行保护性耕作试点，到 2008 年已初具规模。随着国家和陕西省陆续出台相关政策，截至 2020 年，陕西省的保护性耕作面积已累计达到 1.94 万 hm²，占全省粮食播种面积的 46.61%。然而，陕西省南北跨度大，农业类型多样，作物熟制存在一年一熟和一年多熟制等差异，各地在社会经济、农业技术、自然生态等方面也存在较大差异，这导致陕西省各地保护性耕作的固碳减排效益差异显著。因此，分析陕西省保护性耕作净碳汇的驱动因素，对于改善陕西省及全国保护性耕作净碳汇空间分布不均衡的现状具有重要意义。基于此，本文以陕西省为研究区域，旨在：1）从土壤固碳、生物固碳和温室气体排放三个层面分析陕西省保护性耕作净碳汇时空演变特征；2）从自然生态环境、农业生产条件和社会经济环境三个维度，探讨影响陕西省保护性耕作净碳汇时空格局的驱动因素，以期明确陕西省保护性耕作净碳汇的时空演变规律及各驱动因素的影响程度，为陕西省及全国保护性耕作推广提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文以陕西省为研究区域，2000—2020 年为研究区间。相关数据来源于《中国农业机械工业年鉴》《陕西省统计年鉴》《中国农村统计年鉴》，缺失数据通过插值法进行推算。固碳减排系数取 Meta 分析结果和田间试验数据^[22-26]。

1.2 保护性耕作净碳汇的测算方法

保护性耕作净碳汇是指其碳汇和温室气体排放即碳排之差。本文借助薛彩霞等^[26]所构建的保护性耕作净碳汇测算方法，对陕西省保护性耕作净碳汇进行测算，计算公式如下：

$$C = C_1 + C_2 - C_3 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^n (S_{it} R_{it}) + \sum_{i=1}^n (S_{ir} R_{ir}) + \frac{R_{it} + R_{ir} - R_{ij}}{R_{it} + R_{ir}} \sum_{i=1}^n (S_{ij} (R_{it} + R_{ir})) \quad (2)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_k S_{it} Y_k \beta_i C_k}{H_k} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_k S_{ir} Y_k \beta_r C_k}{H_k} \right) + \left[\alpha \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_k S_{ij} Y_k \beta_i C_k}{H_k} \right) \right] \quad (3)$$

$$C_3 = \sum_{i=1}^n (S_{it} \gamma_{it}) + \sum_{i=1}^n (S_{ir} \gamma_{ir}) \quad (4)$$

式中： C 为保护性耕作净碳汇 / 万 t； C_1 为土壤固碳 / 万 t； C_2 为生物固碳 / 万 t； C_3 为温室气体排放 / 万 t；

i 为市域数量, $i=1, 2, 3, \dots, n$; S_{ii} 、 S_{ir} 、 S_{ij} 分别为市 i 的免耕面积 / 万 hm^2 、秸秆还田面积 / 万 hm^2 和两者联合措施的作业面积 / 万 hm^2 ; R_{ii} 、 R_{ir} 、 R_{ij} 分别为市 i 免耕的固碳速率 / %、秸秆还田的固碳速率 / % 和联合措施的固碳速率 / %; P_k 为作物 k 的播种面积比重 / %, Y_k 为作物 k 的单产 / t; β_i 为免耕产量 / t; β_r 为秸秆还田产量 / t; C_k 为农作物 k 的碳吸收率 / %; H_k 为农作物 k 的经济系数 / %; α 为秸秆还田对于免耕减产的减缓效应系数 / %; γ_{ii} 和 γ_{ir} 分别为市 i 免耕的温室气体排放系数 / % 和秸秆还田的温室气体排放系数 / %。

由于陕西各地级市统计年鉴及相关统计公报未公开其保护性耕作面积等数据, 本文通过以下方式进行估算: 以“省保护性耕作机械占配套农机的比例与各市配套农机数量的乘积”来推算各市免耕播种机和秸秆粉碎还田机的数量; 通过“省域保护性耕作面积与省域保护性耕作农机数量的比值”来测算“单位保护性耕作农机具的作业面积”, 进而构建市域保护性耕作面积的测算公式, 具体如下:

$$S_i = N_i S_u = \frac{N_i S_p}{N_p} \quad (5)$$

式中: S_i 为市 i 的保护性耕作面积 / 万 hm^2 , 包括免耕面积 (S_{ii}) / 万 hm^2 、秸秆还田面积 (S_{ir}) / 万 hm^2 和联合措施面积 (S_{ij}) / 万 hm^2 ; N_i 为市 i 保护性耕作的农机具数量 / 万台; S_u 为单位农机具的作业面积 / 万 hm^2 / 万台; S_p 为保护性耕作的使用面积 / 万 hm^2 ; N_p 为陕西省保护性耕作农机具的数量 / 万台。

1.3 标准差椭圆分析

标准差椭圆 (Standard Deviational Ellipse, SDE) 是一种用于分析数据空间动态演变的计量方法^[27]。椭圆的形状反映了主要的分布区域, 长半轴方向指示了主要的扩张方向, 椭圆的中心及其移动方向揭示了时空格局的演变过程, 而椭圆的旋转角度则反映了分布的主趋势方向。通过这些信息, 可以判断发展趋势是趋向集聚还是离散。标准差椭圆的计算方法详见薛彩霞等^[26]的研究。

1.4 地理探测器

本论文采用“地理探测器”方法分析影响陕西省保护性耕作净碳汇时空格局的驱动因素。该方法通过因子探测, 评估自变量对因变量空间分异的解释程度^[28]。其计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中: q 为自变量因子对因变量空间分异的解释力, 取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大, 解释力越强, q 值等于 1 或等于 0 时, 表示该因子对因变量有完全控制作用或两者完全无关; L 为变量层数; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的变量层数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的因变量方差。交互探测用于评估自变量 A 和 B 共同作用时, 是否会影响对因变量空间分异的解释力, 其判别标准见表 1。

1.5 变量选择

本文从农业生产条件、社会经济环境和自然生态环境三个维度, 选择了农业机械化水平、经济发展水平、降水等多个变量, 具体变量选择见表 2 所示。根据各因素的特点, 运用 ArcGIS 的自然断点法对各影响因素进行了分级。

2 结果与分析

2.1 陕西省保护性耕作净碳汇的总量与结构特征

2000—2020 年, 陕西省保护性耕作的总碳汇从 51.23 万 t 增加至 115.83 万 t, 累计增长 64.60 万 t (图 1), 其中土壤固碳由 42.05 万 t 增至 97.33 万 t, 增幅为 131.46%, 生物固碳由 9.18 万 t 增至 18.50 万 t, 增幅为 101.53% (图 2)。碳排放始终为负值, 并呈现平缓的下降趋势。净碳汇从 57.76 万 t 增至 129.30 万 t, 增幅为 123.86%。土壤固碳、总碳汇及净碳汇的变化趋势相似, 均呈倒“U”型变化, 整体上升, 但自 2011 年起增速整体放缓。这一变化趋势的原因在于, 保护性耕作不仅具备节本增收的经济效益, 还能实现固碳减排的生态效益, 有效防治土壤风蚀、土壤退化及沙尘暴等问题, 因此在西

表 1 两个自变量对因变量交互作用的类型

Table 1 The type of interaction between two independent variables and the dependent variable

| 类型 | 判别依据 |
|----------|---|
| 非线性减弱 | $q(A \cap B) < \min(q(A), q(B))$ |
| 单因子非线性减弱 | $\min(q(A), q(B)) < q(A \cap B) < \max(q(A), q(B))$ |
| 相互独立 | $q(A \cap B) = q(A) + q(B)$ |
| 双因子增强 | $q(A \cap B) > \max(q(A), q(B))$ |
| 非线性增强 | $q(A \cap B) > q(A) + q(B)$ |

注: $\min(q(A), q(B))$ 为 $q(A)$ 和 $q(B)$ 中的最小值。 $\max(q(A), q(B))$ 为 $q(A)$ 和 $q(B)$ 中的最大值。

北地区得到大力推广^[29]。陕西省位于我国西北地区，2000 年时，陕西省的保护性耕作净碳汇量在全国名列前茅。2002 年，我国开始在全国范围内推广保护性耕作，陕西省依靠自主研发推广保护性耕作技术及农机具，并发布《关于在全省大力推广保护性耕作技术的实施意见》等政策文件，给予农户相关补贴和技术指导^[30]。随着财政支农水平的提高，保护性耕作的实施面积不断扩大。尽管随着技术的发展及政策的完善，陕西省保护性耕作净碳汇的增速持续增长，但受地理环境、气候条件、技术进步等客观因素的制约，2010 年至 2020 年间，陕西省保护性耕作净碳汇的提升幅度有所减小。

从图 2 可以看出，2000 至 2010 年间，陕西

省保护性耕作中土壤固碳的占比从 82.08% 增加至 90.12%，但至 2020 年略微下降至 84.03%，呈现轻微的倒“U”型变化。尽管如此，土壤固碳仍占总碳汇的四分之三以上，表明土壤固碳是碳汇的主要组成部分。生物固碳的占比由 2000 年的 9.18 万 t 增至 2020 年的 18.50 万 t，生物固碳的平均占比为 13.96%。净碳汇增速波动较大，每年的增速存在差异，个别年份出现负增长。这与 2007 年中央一号文件提出“开展免耕栽培技术推广补贴试点”密切相关^[26]，免耕面积逐年增加，而秸秆还田面积相应减少。土壤固碳主要来自免耕措施及免耕与秸秆还田联合措施中的免耕部分，生物固碳则主要来自秸秆还田及联合措施中的秸秆还田部分。因此，2010

表 2 变量的描述性统计
Table 2 Variable Selection

| 维度 | 要素指标 | 代码 | 变量定义 |
|--------|-------------------------------------|-----|--------------------------------|
| 农业生产条件 | 农业机械化水平 / % | X1 | 参考李园园等 ^[29] 的研究设置变量 |
| | 耕地面积 / 万 hm ² | X2 | 各地区耕地面积 |
| | 复种指数 | X3 | 单位耕地面积的实际播种面积 |
| | 种植结构 | X4 | 小麦及玉米播种面积占总作物播种面积的比重 |
| | 单位面积化肥 / (万 t / 万 hm ²) | X5 | 单位面积耕地的化肥施用量 |
| 社会经济环境 | 财政支农水平 | X6 | 财政农林水事物支出占地区生产总值的比重 |
| | 受教育程度 / 年 | X7 | 参考李园园等 ^[29] 的研究设置变量 |
| | 经济发展水平 / 元 | X8 | 人均 GDP |
| | 乡村人均总产值 / (元 / 人) | X9 | 农业总产值与乡村总人口数之比 |
| | 保护性耕作推广强度 | X10 | 保护性耕作的实施面积占作物播种面积的比重 |
| 自然生态环境 | 降水 / mm | X11 | 基于遥感解译数据的年均降水量 |
| | 气温 / °C | X12 | 基于遥感解译数据的年均气温 |
| | 日照 / h | X13 | 基于遥感解译数据的年均日照时长 |
| | 相对湿度 / % | X14 | 空气中实际水汽含量与该温度下饱和水汽含量的比例 |

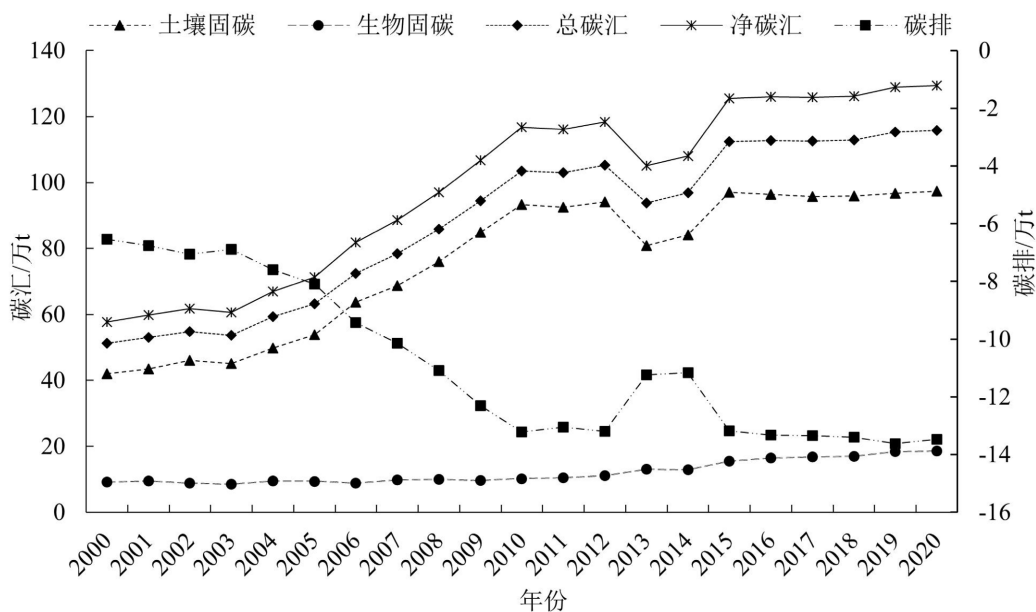


图 1 陕西省保护性耕作碳汇的构成

Fig. 1 Composition of carbon sequestration in conservation cultivation in Shaanxi Province

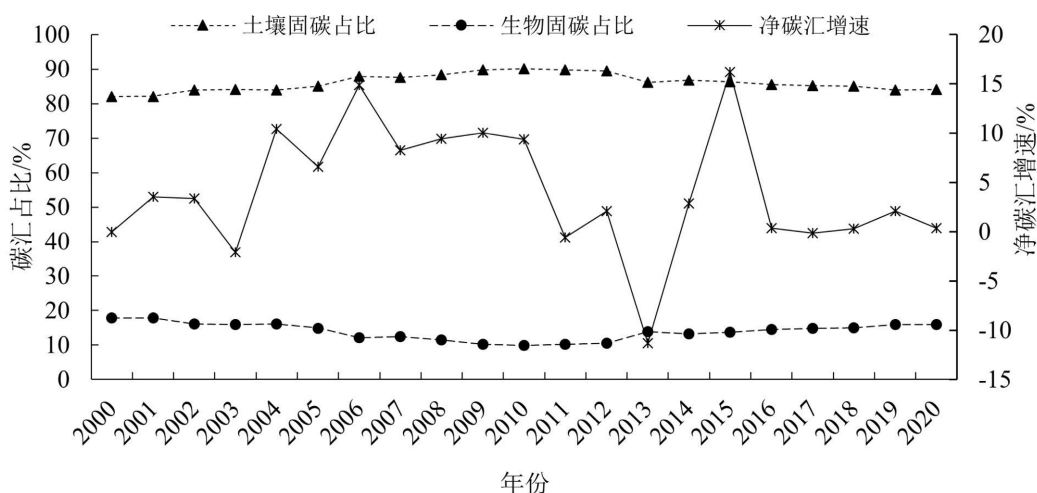


图 2 陕西省保护性耕作的固碳类型占比及净碳汇增速

Fig. 2 The proportion of carbon sequestration types and net carbon sink growth rate of conservation tillage in Shaanxi Province

年后生物固碳的占比大幅下降。然而，长期依赖免耕会导致土壤板结^[26]，因此政府逐步推广秸秆还田措施，以增加土壤有机质，提升耕地地力，从而使免耕面积相对减少。2013年和2014年，土壤固碳量出现明显下降，进而导致土壤固碳、总碳汇和净碳汇出现倒“U”型变化，净碳汇增速显著降低。

2.2 陕西省保护性耕作净碳汇的空间格局演变

2.2.1 各市净碳汇的空间分布特征 图 3a 显示，关中地区的宝鸡、咸阳、铜川、渭南及陕北地区延安的单位面积保护性耕作净碳汇增幅较大，介于 0.02 万~0.05 万 t，而陕南、榆林和西安则不足 0.02 万 t，增幅较小。这表明，2000—2020 年陕西省各市单位面积保护性耕作净碳汇的增长量分布呈现“关中>陕北>陕南”的空间格局。其中，2000 年、2010 年、2020 年陕西省单位面积保护性耕作净碳汇的空间分布虽存在一定差异，但与此分布格局相似，具体如图 3b、3c、3d 所示。

2000 年陕西省单位面积保护性耕作净碳汇量最高为 0.04 万 t，整体水平较低，关中地区（西安、咸阳、铜川、渭南、宝鸡）的单位面积净碳汇显著高于陕南（安康、渭南、汉中）和陕北地区（榆林、延安）（图 3b）。其空间分布呈现“关中>陕北>陕南”的格局。造成这种差异的原因主要在于，1992 年山西省率先采用保护性耕作技术，榆林市和延安市与山西接壤，且受西北地区推广保护性耕作的影响^[31]，这两地的净碳汇逐年增长。然而，由于榆林的畜牧业比重较高，播种面积较小，作物秸秆多用于饲料，未进行还田处理，且该地区的化工能源等工业较为发达，农业尤其是种植业较弱，因此其净碳汇低于

延安。关中和陕北地区以小麦和玉米种植为主，旱区的保护性耕作技术更为成熟，且关中地区为平原，陕北为高原，有利于农业机械化作业，机械化水平较高。西安凭借其经济、技术等优势，单位面积的净碳汇位居全省首位。渭南则凭借与农业大省山西和河南的地理接壤，推动与西安的产业融合及与郑州、洛阳的协同发展，形成了保护性耕作的突出优势。随着关中城市圈的发展，咸阳、宝鸡和铜川的制造业迅速发展，吸引了大量人才，为保护性耕作及其他先进农业技术的发展提供了科技支持。与之相比，陕南地区主要种植水稻，水稻的保护性耕作技术相对落后^[29]，且陕南多山地丘陵，林果、茶叶的种植面积较大，保护性耕作面积较小。其中，汉中作为秦巴区域的中心城市，具备一定的技术优势，且境内有较多的谷底平坝。商洛东与河南和湖北接壤，境内有河谷分布，其靠北县区种植小麦、玉米的面积较大。而安康位于秦岭和大巴山之间，地形崎岖，生态脆弱，不利于开展机械作业。因此，汉中和商洛的保护性耕作发展略强于安康。

2010 年陕西省保护性耕作净碳汇依旧呈现“关中>陕北>陕南”的空间分布格局，但单位面积的净碳汇最高值为 0.08 万 t，各地区的单位面积净碳汇普遍有所提升（图 3c）。关中地区仍为陕西省保护性耕作净碳汇的核心区域，宝鸡、西安、渭南的净碳汇保持较高水平，铜川次之，咸阳排在最后。渭南位列全省第一，延安的净碳汇也有明显提升，整体呈现显著增长。随着西安城市发展定位的转变以及西咸一体化的推进，传统种植业的面积有所减少，渭南和宝鸡凭借原有优势，扩大了种植面积，

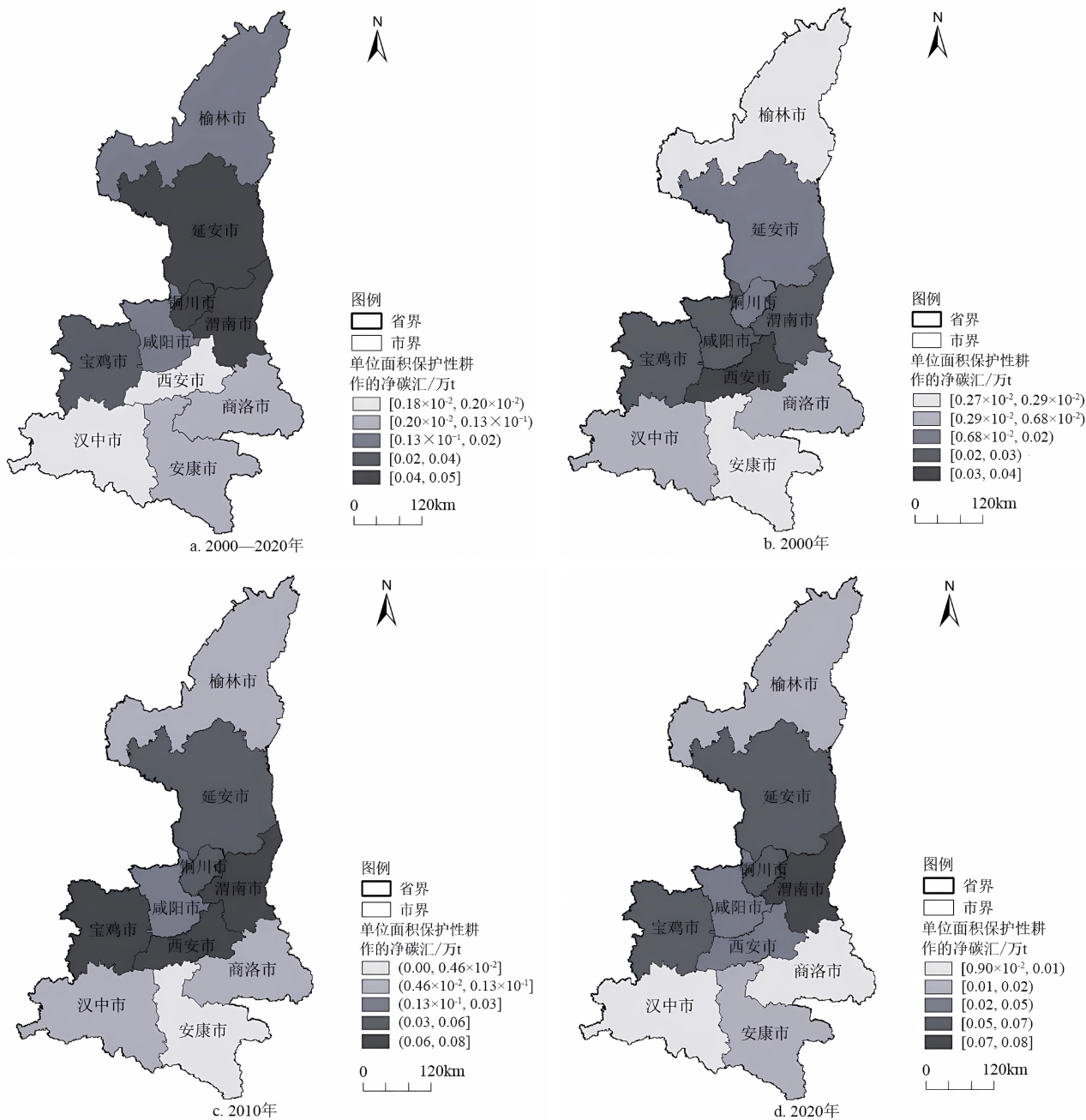


图 3 2000 年、2010 年和 2020 年陕西省单位面积保护性耕作净碳汇的空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of net carbon sink per unit area of conservation tillage in Shaanxi Province in 2000, 2010, and 2020

保护性耕作净碳汇持续增长。延安则受西北地区、山西及关中等地推广保护性耕作的影响，净碳汇也显著增长。尽管陕南地区受区位、种植结构、地形和技术水平等多重因素的制约，其保护性耕作净碳汇增幅不及关中和陕北，但 2000—2010 年间，我国及陕西省的保护性耕作技术发展较快，推广效果显著，使得全省净碳汇得到了大幅提升。

到 2020 年，陕西省保护性耕作净碳汇依然呈现“关中>陕北>陕南”的空间分布格局，单位面积的净碳汇范围为 0.01 万~0.08 万 t，整体提升幅

度有所减小（图 3d）。渭南和宝鸡继续领跑全省，而西安由于大力发展都市现代农业，其保护性耕作面积逐渐减少^[32]，单位面积净碳汇有所增加，但净碳汇增速逐渐放慢。陕南地区的保护性耕作净碳汇提升明显，尤其是安康更为显著，但整体提升幅度较小。这一现象可归因于“十一五”期间水稻保护性耕作技术的快速发展^[26]，使得陕南地区的保护性耕作技术得到迅速推广，固碳减排效果有所增强。然而，由于保护性耕作技术趋于成熟以及耕地面积的限制，旱区的保护性耕作发展未能实现突破，从

而导致 2010—2020 年陕西省净碳汇的增长趋缓。

2.2.2 空间分布特征演变的标准差椭圆分析 如图 4 所示, 研究期间, 陕西省保护性耕作净碳汇的标准差椭圆主要位于关中和陕北延安地区, 椭圆中心始终集中在铜川市境内, 范围为 $109.07^{\circ} \sim 109.17^{\circ} \text{ E}$ 、 $35.04^{\circ} \sim 35.31^{\circ} \text{ N}$ 。椭圆的长半轴始终沿逆时针方向旋转, 其内旋转角由 7.99° 缩小至 5.82° , 整体呈下降趋势。椭圆的长半轴长度是短半轴的 2 到 3 倍, 且其扁率呈上升趋势。这表明, 关中地区的保护性耕作净碳汇增速显著高于陕北和陕南, 与前述空间分布特征“关中>陕北>陕南”的结论相符。此外, 陕西省南北狭长的地理特征, 使得其保护性耕作净碳汇分布具有较强的向心性。

椭圆的面积从 2000 年的 6.83 万 km^2 扩展到 2020 年的 8.42 万 km^2 , 椭圆中心呈现“西-南-东北”方向的移动, 整体向陕西省的东北方向扩张, 略偏向东北方。这表明, 位于陕西偏东北方向的陕北地区对全省保护性耕作净碳汇的增长起到了强有力的推动作用。陕北地区的保护性耕作净碳汇增长态势明显, 原因可能在于陕北与西北地区接壤, 西北地区为防治土壤退化、沙尘暴等问题大力推广保护性

耕作技术, 由于跨区作业对陕北地区具有显著的带动作用, 且陕北多高原地区, 主要种植小麦。同时, 陕北地区的保护性耕作技术相对成熟, 且该地区经济发展迅速, 尤其是榆林市作为陕西省经济发展水平第二的地级市, 吸引了大量资本、技术和人才, 从而推动了农业, 特别是保护性耕作的发展, 进一步加强了其净碳汇效应。

2.3 陕西省保护性耕作净碳汇的驱动因素分析

2.3.1 因子探测结果分析 1) 根据表 3 的数据, 农业机械化水平的 q 值为 0.70, 维度内排第 2, 维度间排第 7; 复种指数的 q 值为 0.96, 维度内和维度间均排第 1; 种植结构的 q 值为 0.63, 维度内排第 4, 维度间排第 10; 单位面积化肥的 q 值为 0.65, 维度内排第 3, 维度间排第 9。这表明, 农业机械化水平、复种指数、种植结构和单位面积化肥对陕西省保护性耕作净碳汇的时空分布有显著影响。实施保护性耕作需要专用农机具, 农业机械化水平直接影响机械作业效率^[33]。复种增加了实际作业面积, 进而提高土壤碳储存, 且作物类型及化肥使用影响土壤碳储存和碳循环^[34-35]。而耕地面积的 q 值仅为 0.55, 维度内和维度间排序较低, 表明耕地面积对陕西省

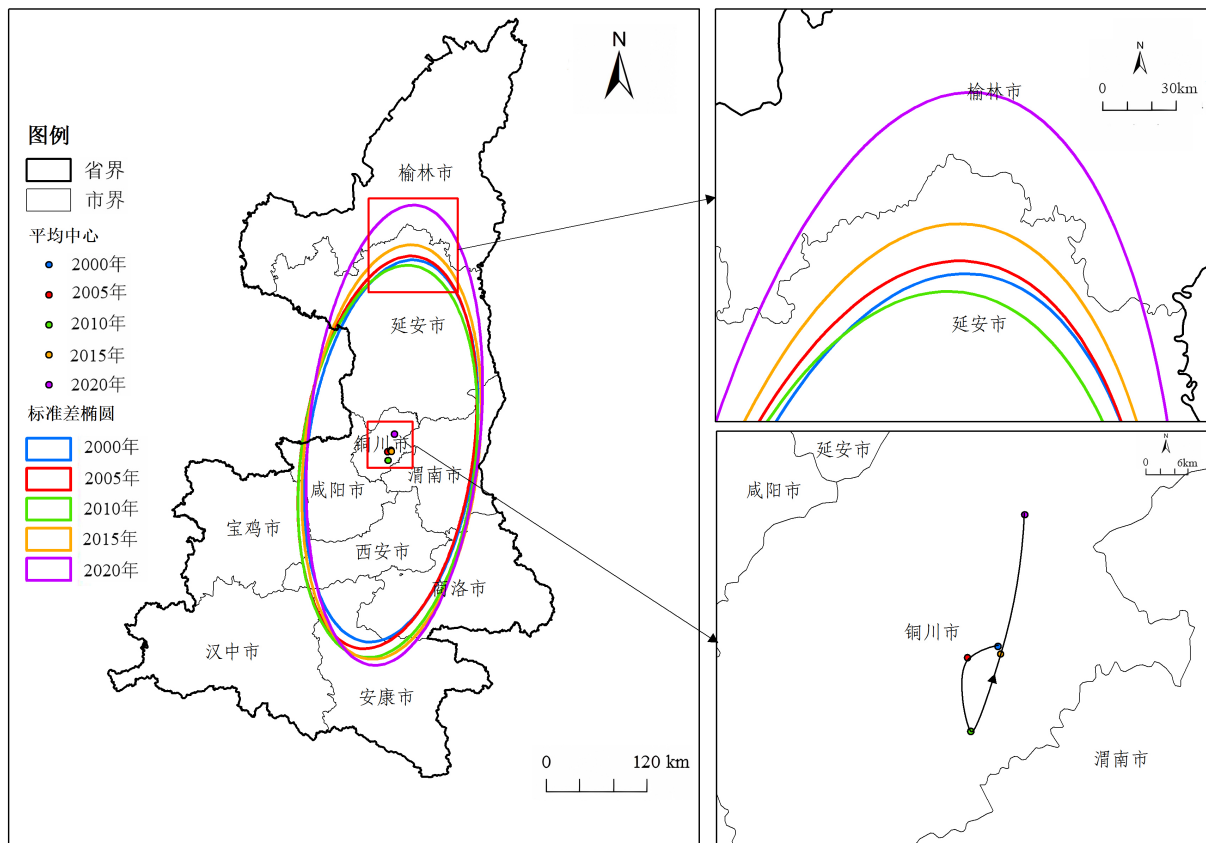


图 4 陕西省保护性耕作净碳汇的标准差椭圆及其重心分布

Fig. 4 Standard deviation ellipse and its center of gravity of conservation tillage on net carbon sink in Shaanxi Province

表3 因子探测结果
Table 3 Factor detection results

| 维度 | 探测因子 | 代码 | q 统计值 | 维度内排序 | 维度间排序 |
|--------|-----------|-----|---------|-------|-------|
| 农业生产条件 | 农业机械化水平 | X1 | 0.70 | 2 | 7 |
| | 耕地面积 | X2 | 0.55 | 5 | 12 |
| | 复种指数 | X3 | 0.96 | 1 | 1 |
| | 种植结构 | X4 | 0.63 | 4 | 10 |
| | 单位面积化肥 | X5 | 0.65 | 3 | 9 |
| 社会经济环境 | 财政支农水平 | X6 | 0.87 | 1 | 2 |
| | 受教育程度 | X7 | 0.73 | 3 | 5 |
| | 经济发展水平 | X8 | 0.38 | 5 | 14 |
| | 乡村人均总产值 | X9 | 0.71 | 4 | 6 |
| | 保护性耕作推广强度 | X10 | 0.86 | 2 | 3 |
| 自然生态环境 | 降水 | X11 | 0.54 | 4 | 13 |
| | 气温 | X12 | 0.74 | 1 | 4 |
| | 日照 | X13 | 0.66 | 2 | 8 |
| | 相对湿度 | X14 | 0.63 | 3 | 11 |

注：所有 q 值均通过 1% 的显著性检验。

保护性耕作净碳汇空间分布的影响较小。

2) 从表3可知, 财政支农水平的 q 值为 0.87, 维度内排第1, 维度间排第2; 受教育程度的 q 值为 0.73, 维度内排第3, 维度间排第5; 乡村人均总产值的 q 值为 0.71, 维度内排第4, 维度间排第6; 保护性耕作推广强度的 q 值为 0.86, 维度内排第2, 维度间排第3。这些因素显著影响陕西省保护性耕作净碳汇的空间分布。财政支持力度的加大能促进保护性耕作政策的落实, 且受教育程度高的农户更愿意采用新技术, 农户的经济产值也会影响其农业生产投入^[36]。随着保护性耕作推广力度的加大, 保护性耕作面积逐渐扩大。另一方面, 经济发展水平的 q 值仅为 0.38, 维度内和维度间排序较低, 表明经济发展水平对陕西省保护性耕作净碳汇空间分布的影响较小。陕西地处西北, 经济发展相对较慢, 各地区经济较为平衡, 因此其保护性耕作的开展更多受政策等因素影响。

3) 从表3可见, 除气温的 q 值为 0.74 外, 降水 (q 值为 0.54)、日照 (q 值为 0.66) 和相对湿度 (q 值为 0.63) 的 q 值均小于 0.67, 且在维度间的排序较后。这表明气温对陕西省保护性耕作净碳汇时空分异的作用更为显著, 气温适宜的地区实施保护性耕作的固碳减排效果较好^[15]。气温过高或过低会破坏土壤微生物活性及土壤含水量, 进而影响碳储存。农作物生长依赖适量的降水, 土壤含水量影响耕地微生物环境和碳循环。日照对耕地土壤表层的微生物活性和作物生长有影响, 大气湿度也会影响农作物生长及土壤水分含量, 进而影响土壤生物固碳能力。

2.3.2 交互探测结果分析 从表4可见, 因子交互作用分为双因子增强和非线性增强, 其中双因子交互作用的驱动力较单因子更强。不同因子间交互作用的解释力最高可达 1。尽管相对湿度与种植结构的交互作用解释力仅为 0.63, 但仍属于双因子增强。其他双因子交互作用的解释力均超过 0.75, 表明不同因子间的相互作用能够显著增强对陕西省保护性耕作净碳汇空间分布差异的解释力。由此可见, 陕西省保护性耕作净碳汇的空间分布不仅受单一因素的影响, 更受到各因素间相互作用的显著影响。

从各类因素间的交互作用来看, 各类因素交互作用后的解释力普遍较强, 最小平均解释力为 0.83。具体而言, 农业生产条件与社会经济环境、社会经济环境与自然生态环境、农业生产条件与自然生态环境的交互作用后的平均 q 值分别为 0.98、0.96、0.94。相比之下, 同维度内各因子间的交互作用的平均 q 值分别为: 社会经济环境为 0.89, 农业生产条件为 0.86, 自然生态环境为 0.83。结果表明, 不同类型因子间的共同作用比同类型因子间的共同作用解释力更强, 但两者的平均解释力均超过 0.80, 均强于单因子的解释力。不同类型因素间的共同作用对陕西省保护性耕作净碳汇空间分布差异的解释力更为突出。正是在各因素及其相互作用共同作用下, 陕西省保护性耕作净碳汇的时空分布格局得以形成。

3 结论与政策建议

3.1 结论

1) 2000—2020 年间, 陕西省保护性耕作净碳

表 4 交互探测结果
Table 4 Interaction detection results

| | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | X11 | X12 | X13 | X14 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| X1 | 0.70 | | | | | | | | | | | | | |
| X2 | 1.00** | 0.55 | | | | | | | | | | | | |
| X3 | 1.00** | 0.98** | 0.96 | | | | | | | | | | | |
| X4 | 0.88** | 0.98** | 0.98** | 0.63 | | | | | | | | | | |
| X5 | 0.75** | 1.00** | 1.00** | 0.88** | 0.65 | | | | | | | | | |
| X6 | 1.00** | 0.98** | 0.98** | 0.98** | 1.00** | 0.87 | | | | | | | | |
| X7 | 1.00** | 0.98** | 0.96** | 0.98** | 1.00** | 0.98** | 0.73 | | | | | | | |
| X8 | 1.00** | 0.97* | 0.98** | 0.98** | 1.00** | 0.98** | 0.98** | 0.38 | | | | | | |
| X9 | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 0.82** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 0.71 | | | | | |
| X10 | 1.00** | 0.98** | 0.98** | 0.98** | 1.00** | 0.98** | 0.98** | 0.98** | 1.00** | 0.86 | | | | |
| X11 | 0.87** | 1.00** | 1.00** | 0.82** | 0.87** | 1.00** | 1.00** | 1.00* | 0.82** | 0.97** | 0.54 | | | |
| X12 | 0.98** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 0.74 | | |
| X13 | 0.98** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 0.76** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 1.00** | 0.92** | 0.66 |
| X14 | 0.88** | 0.98** | 0.98** | 0.63** | 0.88** | 0.98** | 0.98** | 0.98** | 0.82** | 0.98** | 0.82** | 1.00** | 1.00** | 0.63 |

注: X1~X5 表示农业生产条件维度的探测因子, X6~X10 表示社会经济环境维度的探测因子, X11~X14 表示自然生态环境维度的探测因子。
* 表示非线性增强, ** 表示双因子增强。蓝色标注表示同类因素之间的交互作用, 即: 农业生产条件∩农业生产条件、社会经济环境∩社会经济环境、自然生态环境∩自然生态环境; 粉色标注表示农业生产条件∩社会经济环境; 绿色标注表示农业生产条件∩自然生态环境; 紫色标注表示社会经济环境∩自然生态环境。

汇从 57.76 万 t 增至 129.30 万 t, 虽然增幅在 2010—2020 年有所放缓, 但整体呈现上升趋势, 表明保护性耕作在固碳减排方面取得显著成效。

2) 2000—2020 年间, 陕西省保护性耕作净碳汇呈现出“关中>陕北>陕南”的分布格局。其中陕北地区增长尤为明显。虽然各地区的碳汇效应有所提升, 但整体格局未发生变化, 推广策略应根据不同地区特点量体裁衣。

3) 复种指数、农业机械化水平和财政支农水平等因素对碳汇空间分布的影响较强。不同类型因素间的交互作用解释力超过单一因素, 强调了多方协作对推广效果的重要性。

3.2 政策建议

基于研究结果, 本文提出以下政策建议:

1) 2000—2020 年陕西省保护性耕作净碳汇整体提升显著, 但后期增速放缓, 土壤固碳始终为主体部分。为此, 政府应进一步加强宣传和扶持力度, 尤其是在技术或发展相对落后的陕南和陕北地区。具体措施包括: 加强农机具补贴、作业补贴等扶持政策, 推动免耕措施的推广; 关中地区可以探索以政府为主导、市场为导向、农民为主体的保护性耕作推广模式; 在关中等高碳汇地区逐步开展耕地碳汇交易, 完善社会化服务和市场体系, 形成全省范围内的长效推广机制。

2) 陕西省保护性耕作净碳汇空间分布不均, 呈现“关中>陕北>陕南”的格局。为此, 推广工作应根据不同区域的特点进行精准施策, 具体包括:

发挥关中地区, 尤其是西安的经济、科技、人口等优势, 加大新型农具研发力度, 同时挖掘陕南资源优势, 扩大还田秸秆的作物范围; 根据陕北的小麦、玉米产区和陕南的水稻产区发展情况, 制定具有针对性的推广政策; 针对陕南和陕北等接触保护性耕作技术较晚或接受能力较差的农户, 开展“一对一”的指导服务, 推动全省保护性耕作净碳汇的显著提升。

3) 陕西省保护性耕作净碳汇的空间分布受到多重因素的影响, 因此需要建立跨部门的工作机制, 推动政府、企业、科研机构和社会组织的信息共享与资源整合。具体措施包括: 鼓励科研机构 and 高校根据各地气温、地形等特点, 研制适用于陕北和关中地区的大型保护性耕作农机具, 以及适宜陕南山区的轻型机械; 通过作业补贴、购机补贴、简化申请流程、完善培训体系等措施, 降低推广阻力, 提高农户的采用率; 综合施策, 推动陕西省保护性耕作的固碳减排效果全面提升。

参考文献:

- [1] HOUGHTON R A, HACKLER J L. Sources and sinks of carbon from land-use change in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1034.
- [2] 魏心雨, 王雁杰, 孙梦媛, 等. 基于土地利用结构变化的河南省碳排放时空格局及驱动力分析[J]. 农业现代化研究, 2023, 44(5): 881-891.
WEI X Y, WANG Y J, SUN M Y, et al. Spatial-temporal patterns and driving forces of carbon emissions in Henan Province based on land use structure changes[J]. Research of Agricultural Modernization, 2023, 44(5): 881-891.

- [3] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [4] 李晓龙, 袁帅强, 王伟. 基于净碳汇的农业生态效率测度、时空演进及收敛性研究: 以贵州 78 个县域为例 [J]. *农业现代化研究*, 2023, 44(4): 680-691.
LI X L, YUAN S Q, WANG W. Measurement, spatial-temporal evolution, and convergence of agricultural eco-efficiency based on net carbon sink: a case study of 78 counties in Guizhou[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(4): 680-691.
- [5] 蔡育蓉, 王立刚. 北方典型农业生态系统的固碳减排路径及模式 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2022, 30(4): 641-650.
CAI Y R, WANG L G. Carbon sequestration and greenhouse gas mitigation paths and modes in a typical agroecosystem in northern China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 641-650.
- [6] 高旺盛. 中国保护性耕作制 [M]// 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 199-200.
GAO W S. Conservation farming system in China[M]// Beijing: China Agricultural University Press, 2011: 199-200.
- [7] NANDAN R, SINGH V, SINGH S S, et al. Impact of conservation tillage in rice: based cropping systems on soil aggregation, carbon pools and nutrients[J]. *Geoderma*, 2019, 340: 104-114.
- [8] EMDE D, HANNAM K D, MOST I, et al. Soil organic carbon in irrigated agricultural systems: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(16): 3898-3910.
- [9] CAMAROTTO C, PICCOLI I, FERRO N D, et al. Have we reached the turning point? Looking for evidence of SOC increase under conservation agriculture and cover crop practices[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(6): 1050-1063.
- [10] HUANGY, REN W, WANG L, et al. Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 144-153.
- [11] JIN V L, SCHMER M R, STEWART C E, et al. Long-term no-till and stover retention each decrease the global warming potential of irrigated continuous corn[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2848-2862.
- [12] GUO L J, ZHANG L, LIU L, et al. Effects of long-term no tillage and straw return on greenhouse gas emissions and crop yields from a rice-wheat system in Central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 322: 107650.
- [13] 胡立峰, 李洪文, 高焕文. 保护性耕作对温室效应的影响 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 308-312.
HU L F, LI H W, GAO H W. Influence of conservation tillage on greenhouse effect[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5): 308-312.
- [14] 张雄智, 李帅帅, 刘冰洋, 等. 免耕与秸秆还田对中国农田固碳和作物产量的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(5): 1-12.
ZHANG X Z, LI S S, LIU B Y, et al. Effects of no-till and residue retention on carbon sequestration and yield in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(5): 1-12.
- [15] CHAUHAN B S. Effect of tillage systems, seeding rates, and herbicides on weed growth and grain yield in dry-seeded rice systems in the Philippines[J]. *Crop Protection*, 2013, 54: 244-250.
- [16] 唐利群, 周洁红, 于晓华. 采用保护性耕作对减少水稻产量损失的实证分析: 基于 4 省 1080 个稻农的调研数据 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 1016-1028.
TANG L Q, ZHOU J H, YU X H. The impact of conservation tillage on reduction in rice yield loss: evidence from 1080 Chinese rice farmers[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 1016-1028.
- [17] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环 [M]// 北京: 气象出版社, 2002: 260-261.
LI K R. Land use change, net greenhouse gas emission and carbon cycle of terrestrial ecosystem[M]// Beijing: China Meteorological Press, 2002: 260-261.
- [18] 邓远远, 朱俊峰. 保护性耕作技术采纳的增产与稳产效应 [J]. *资源科学*, 2023, 45(10): 2050-2063.
DENG Y Y, ZHU J F. Effect of conservation tillage technology adoption on yield increasing and stabilizing[J]. *Resources Science*, 2023, 45(10): 2050-2063.
- [19] 李凡略, 何可, 张俊飏. 价值认知对规模养猪户农业碳交易参与意愿及期望碳价的影响: 以户用沼气 CCER 项目为例 [J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(5): 889-899.
LI F L, HE K, ZHANG J B. The influence of value perception on the willingness to participate in agricultural carbon trading and expected carbon price of large-scale hog farms: a case study of the household biogas CCER project[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(5): 889-899.
- [20] 齐甜, 畅倩, 姚柳杨, 等. 农业保险促进保护性耕作了吗? 以三大粮食主产区为例 [J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(7): 75-83.
QI T, CHANG Q, YAO L Y, et al. Impact of crop insurance on adoption of protective tillage technology by farmers[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(7): 75-83.
- [21] 高佳, 朱耀辉, 赵荣荣. 中国黑土地保护: 政策演变、现实障碍与优化路径 [J]. *东北大学学报 (社会科学版)*, 2024, 26(1): 82-89.
GAO J, ZHU Y H, ZHAO R R. Black soil protection in China: policy evolution, realistic obstacles and optimization paths[J]. *Journal of Northeastern University (Social Science)*, 2024, 26(1): 82-89.
- [22] VAN KESSEL C, VENTEREA R, SIX J, et al. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 33-44.
- [23] ZHANG L, ZHENG J C, CHEN L G, et al. Integrative effects of soil tillage and straw management on crop yields and greenhouse gas emissions in a rice-wheat cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 63: 47-54.
- [24] 赵鑫. 基于 Meta-analysis 对我国保护性耕作农田土壤固碳减排效应及其潜力的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
ZHAO X. A meta-analysis study on the effect and potential of soil carbon fixation and emission reduction in conservation tillage farmland in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [25] PITTELKOW C M, LIANG X Q, LINQUIST B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture.Nature, 2015, 517(7534): 365-368.
- [26] 薛彩霞, 李园园, 胡超, 等. 中国保护性耕作净碳汇的时空格局 [J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1164-1182.

- XUE C X, LI Y Y, HU C, et al. Study on spatio-temporal pattern of conservation tillage on net carbon sink in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1164-1182.
- [27] 朱琳. 中国区域经济韧性的质量评价与影响因素分析[J]. *统计与决策*, 2024, 40(3): 123-127.
- ZHU L. Quality evaluation and influencing factors analysis of regional economic resilience in China[J]. *Statistics & Decision*, 2024, 40(3): 123-127.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [29] 李园园, 薛彩霞, 柴朝卿, 等. 中国保护性耕作净碳汇的时空分异特征及其驱动力[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(10): 15-23.
- LI Y Y, XUE C X, CHAI C Q, et al. Temporal and spatial differentiation characteristics and driving forces of net carbon sink of conservation tillage in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(10): 15-23.
- [30] 赵金龙, 董谦, 许月明. 中国低碳农业发展机制选择[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(3): 313-317.
- ZHAO J L, DONG Q, XU Y M. Development mechanism choice of low-carbon agriculture in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(3): 313-317.
- [31] 李园园, 薛彩霞, 柴朝卿, 等. 保护性耕作机械能否带动保护性耕作净碳汇的空间外溢? 基于农机跨区服务视角[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(2): 283-296.
- LI Y Y, XUE C X, CHAI Z Q, et al. Can conservation tillage machinery drive the spatial spillover of the net carbon sink of conservation tillage? Based on the perspective of cross-zone service of agricultural machinery[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(2): 283-296.
- [32] 邹月, 周忠学. 西安市景观格局演变对生态系统服务价值的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2629-2639.
- ZOU Y, ZHOU Z X. Impact of landscape pattern change on ecosystem service value of Xi'an City, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2629-2639.
- [33] 李卫, 薛彩霞, 姚顺波, 等. 农户保护性耕作技术采用行为及其影响因素: 基于黄土高原 476 户农户的分析[J]. *中国农村经济*, 2017(1): 44-57, 94-95.
- LI W, XUE C X, YAO S B, et al. The adoption behavior of households' conservation tillage technology: an empirical analysis based on data collected from 476 households on the Loess Plateau[J]. *Chinese Rural Economy*, 2017(1): 44-57, 94-95.
- [34] 祁兴芬. 低碳背景下德州市农田生态系统碳源汇变化及其影响因素分析[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(2): 253-256.
- QI X F. Analysis of variation and impact factor of carbon source and sink of farmland ecosystem in Dezhou based on low-carbon economy[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(2): 253-256.
- [35] 谭芬, 文高辉, 胡贤辉. 基于社会嵌入视角的农户减施化肥意愿影响因素分析[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(3): 168-175.
- TAN F, WEN G H, HU X H. Influence factors on farmers' willingness to reduce chemical fertilizer based on the perspective of social embeddedness[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2021, 13(3): 168-175.
- [36] 崔钊达, 余志刚, 宫熙. 保护性耕作技术的增收效应研究: 以少免耕技术为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(5): 59-69.
- CUI Z D, YU Z G, GONG X. Research on the income-increasing effect of conservation tillage technology: taking no and minimum-tillage technology as an example[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(5): 59-69.

(责任编辑: 孟岑)