doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.061

地膜覆盖下粮油间作农田生产力与碳足迹评估

李昌见[1]　李夏浩祺[2]　王宋浩[2]　邵茹欣[2]　成　志[3]　赵西宁[1]

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西杨凌 712100;
2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;
3.贵州省农业区域经济发展中心,贵阳 550003)

摘要: 粮油间作与地膜覆盖作为适应特定自然条件的有效农业实践措施,在北方旱作农业生产中占有重要地位。此类农业措施应用势必影响农田土壤碳循环过程的改变,然而粮油间作与地膜覆盖下农田生产力与碳足迹的变化过程及伴生的生态环境效应尚不清楚。本研究设置了玉米覆膜单作(FMM)、玉米不覆膜单作(NMM)、大豆单作(SS)、玉米-大豆间作+玉米覆膜(FMS)、玉米-大豆间作+玉米不覆膜(NMS)5 个处理,基于生命周期评价法对玉米-大豆间作与地膜覆盖下农田土壤温室气体排放特征、土壤有机碳含量、玉米产量等进行了评价,同时结合土地生产力和碳可持续性指数等指标综合评估了玉米-大豆间作与地膜覆盖对农田生产力与碳足迹的影响。两年试验结果表明,FMS 处理相对产量较单作处理增加 57% ~60%,土地当量比两年均值为 1.08,有效提高了农田土地生产力。同时,FMS 处理土壤有机碳损耗相比其他处理减少 7.8% ~46.57%,且单位面积碳足迹(CF_A)、单位玉米当量产量碳足迹(CF_{MEEY})和单位总收入碳足迹(CF_E)最小,有效保存土壤有机碳的同时减小温室气体排放,降低了环境负担和碳排放。与单作种植系统相比,FMS 处理虽然减少了部分作物产量和经济效益,但在生产过程中的土壤温室气体排放和有机碳损耗相对较低,与 NMS 处理相比也有更高的碳可持续性指数,实现了对土壤碳排放的有效管理。FMS 作为一种环境友好型种植模式,可实现低碳高产,为农业生产者选择适宜种植系统提供了指导。

关键词: 玉米-大豆间作;地膜覆盖;碳足迹;生产力;土壤有机碳

中图分类号: S181;S344.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2025)12-0666-11　　**OSID:**

Assessment of Productivity and Carbon Footprint of Grain – Oil Intercropping Farmland under Plastic Film Mulching

LI Changjian[1]　LI Xiahaoqi[2]　WANG Songhao[2]　SHAO Ruxin[2]　CHENG Zhi[3]　ZHAO Xining[1]

(1. *College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
3. *Guizhou Agricultural Regional Economic Development Center, Guiyang* 550003, *China*)

Abstract: Intercropping of grains and oils, along with plastic film coverage, serves as an effective agricultural practice adapted to specific natural conditions. This practice holds significant importance in dryland agricultural production in the northern regions. The application of these measures is bound to influence the changes in the carbon cycling processes of farmland soil. However, the variations in productivity and carbon footprint under intercropping and plastic film coverage, along with the associated ecological effects, remain unclear. Totally five treatments, including maize mulching (FMM), maize without mulching (NMM), soybean monoculture (SS), maize – soybean intercropping + maize mulching (FMS), maize – soybean intercropping + maize without mulching (NMS) were set up. Based on the life cycle assessment (LCA) method, the characteristics of greenhouse gas emissions, content of soil organic carbon, corn yield, and other factors from farmland soil under maize – soybean intercropping

收稿日期:2025-01-21　修回日期:2025-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209069)、陕西省重点研发计划项目(2024NC-ZDCYL-02-04、2023-ZDLNY-49)和陕西省自然科学基础研究计划项目(2023JC-XJ-24)

作者简介: 李昌见(1987—),男,副教授,博士,主要从事农田生态环境修复与土壤改良研究,E-mail:lichangjian@nwafu.edu.cn

通信作者: 赵西宁(1976—),男,研究员,主要从事农业水土资源调控与利用研究,E-mail:zxn@nwsuaf.edu.cn

and plastic film coverage were evaluated. It also comprehensively assessed the impact of these practices on farmland productivity and carbon footprint through indicators, such as land productivity and carbon sustainability index. The results indicated that the relative yield of FMS treatment was increased by 57% to 60% compared with that of monoculture treatment, with a land equivalent ratio of 1.08 over the past two years, effectively enhancing farmland productivity. Simultaneously, the soil organic carbon loss in the FMS treatment was reduced by 7.8% to 46.57% compared with that of other treatments. It exhibited the lowest carbon footprint per unit area (CF_A), carbon footprint per unit maize equivalent yield (CF_{MEEY}), and carbon footprint per unit total income (CF_E), effectively preserving soil organic carbon while reducing greenhouse gas emissions, thereby alleviating environmental burdens and carbon emissions. Although FMS treatment reduced some crop yield and economic benefits compared with monoculture systems, it demonstrated relatively lower soil greenhouse gas emissions and organic carbon loss during the production process. It also had a higher carbon sustainability index compared with NMS treatment, achieving effective management of soil carbon emissions. FMS as an environmentally friendly planting model, it can realize low carbon and high yield, thus providing guidance for agricultural producers in selecting suitable planting systems.

Key words: maize－soybean intercropping; plastic mulching; carbon footprint; productivity; soil organic carbon

0　引言

粮油间作作为一种农业种植模式，不仅能充分利用土地资源，还能通过作物间的相互作用提高系统生产力。研究表明，化肥施用、机械使用等多种与土壤过程有关的排放代表了粮食作物生产向大气排放的温室气体总量[1]。因此，在农业系统中采取对应措施缓解温室气体排放带来不利影响的同时最大限度提高农业生产力至关重要。相关研究表明玉米-大豆间作的 CO_2 排放量比玉米单作低 22% ~ 108%，同时在同一地块，玉米-大豆间作总产量超过相同面积下各自单独种植产量之和，显示出明显的间作效益[2-3]。因此，玉米大豆带状复合间植被认为是一种生态友好的可持续种植模式，可实现低碳高产。

塑料薄膜覆盖作为近几十年中国北方旱作雨养农业区应用最广泛的田间管理措施，对作物生产力的影响十分显著[4]。在干旱缺水的黄土高原地区，玉米-大豆间作的高效可持续生产离不开地膜覆盖这一调控土壤水分的最佳田间管理措施。但地膜应用也改变了土壤水热状况，进而影响碳氮在农业系统中的分配和转移[5-7]，导致直接温室气体排放增加。NAN 等[8]研究发现，覆膜明显促进了土壤 CO_2 和 N_2O 排放，阻碍 CH_4 排放。而在玉米-大豆间作体系中，豆科作物通过固氮作用使系统中的 N_2O 排放降低 31%[9]，使系统排放潜势相应降低[10]。以上研究仅为关于覆膜/间作对农田直接温室气体排放的影响，没有考虑间接温室气体排放，对农田温室效应的影响研究较少。

目前关于地膜覆盖下粮油间作的相关研究，仅从根系和氮素利用角度对地膜覆盖下粮油作物间的促进作用及产量提升进行评估，ZHANG 等[11]的研究表明覆膜玉米由于种间促进作用，改善玉米根系的同时并没有显著降低间作大豆产量，且提高了间作总产量(10.67%)；ZHANG 等[12]的研究表明大豆间作和覆膜可使玉米所需氮肥减少 20%，通过玉米的高氮素利用效率产生较大的增产效果。然而关于豆科间作和地膜覆盖对农田温室气体排放及其综合影响评价的研究很少，无法全面评估豆科作物间作和地膜覆盖在生产力和环境可持续性间的利弊。

碳足迹作为气候变化领域的研究热点，能综合考虑耕作、施肥和收获等农业生产活动过程中由人为因素引起的直接和间接碳排放总量，进而定量测算农业生产活动对温室效应的影响[13]。因此，本研究在黄土高原地区进行为期两年的田间试验，结合种植系统中产量、土壤温室气体排放通量(排放)和有机碳储量(固存)，应用碳足迹、碳可持续性指数等指标，评估玉米-大豆间作 + 玉米覆膜(FMS)种植模式的生产力和可持续效益，通过研究豆科作物间作和地膜覆盖对农田生产力和固碳减排效应的影响，探寻更适合黄土高原旱作农田的种植模式，为实现低碳高产农业提供指导。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

研究区位于陕西省咸阳市乾县枣树渠村西北农林科技大学乾县试验站(34°38′N，108°07′E)，属温带半湿润偏旱气候区，年均气温 10.9℃，年日照时数 2 179.4 h。年均降水量 584.2 mm，其中丰年为 876.7 mm，旱年为 281.9 mm，降水多集中于 7—9

月,占全年总降水量的 60% 左右。土壤类型为黄绵土,结构良好,保墒力强,但养分含量少,肥力较低。该区农业生产用水主要依靠自然降水,属于旱作雨养农业区。逐日气象资料由布设在试验地附近的自动气象站提供,试验期间日气温和降水量如图 1 所示。

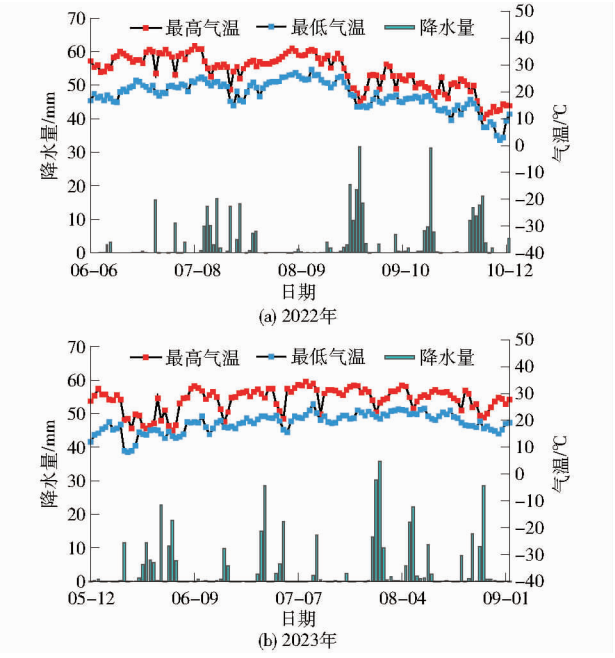

图 1 生育季日气温及降水量

Fig. 1 Daily temperature and precipitation during breeding season

1.2 试验设计

本试验于 2022 年 6 月—2023 年 9 月进行,采用随机区组设计(表 1),共设置 5 个试验处理,即玉米单作、大豆单作、玉米-大豆间作,对单作玉米及玉米-大豆间作玉米带又分别设置普通地膜覆盖(FM)和无地膜覆盖处理(NM),各处理重复 3 次,共 15 个小区,每个小区面积为 5.0 m×7.5 m。

表 1 试验设计

Tab. 1 Experimental design

种植系统	覆膜处理	处理名称
玉米-大豆间作(MS)	玉米覆膜	FMS
	玉米不覆膜	NMS
玉米单作(MM)	覆膜	FMM
	不覆膜	NMM
大豆单作(SS)	不覆膜	SS

单作玉米和单作大豆小区行距为 50 cm,种植密度为 66 000 株/hm^2,玉米-大豆间作小区种植 2 行玉米(行距 40 cm)和 3 行大豆(行距 30 cm),相邻玉米和大豆行间距为 50 cm,玉米种植密度为 37 000 株/hm^2,大豆种植密度与单作大豆保持一致。玉米供试品种为陕单 609,大豆供试品种为中黄 13,玉米采用先覆膜后人工穴播的种植方式,使用塑料薄膜(聚乙烯,膜厚 0.01 mm,膜宽 1 m)覆盖,试验地四周设置 1 m 作物保护带。播种前一次性施入底肥,施用量为氮肥 60 kg/hm^2(以 N 计),磷肥 42 kg/hm^2(以 P_2O_5 计),钾肥 18 kg/hm^2(以 K_2O 计),整个生育期内无追肥,作物分别于 2022 年 6 月 6 日、2023 年 5 月 12 日播种,2022 年 10 月 13 日、2023 年 9 月 28 日收获。生育期无灌溉,其他田间管理措施与当地一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 作物产量

各小区分别随机选取 15 株玉米和大豆,各取 5 株植株用于测定地上部生物量并折算为每公顷干物质累积量(kg/hm^2),其余植株在阳光下风干 14 d 后脱粒,然后 80℃ 干燥 48 h 至恒定质量,最终产量根据 14% 标准含水率进行校正,并统一折算为每公顷产量(kg/hm^2)。

间作处理土地当量比(Land equivalent ratio, LER)计算式为

$$L_{ER}=\frac{Y_{m,i}}{Y_{m,s}}+\frac{Y_{s,i}}{Y_{s,s}} \tag{1}$$

式中 L_{ER}——间作处理土地当量比

$Y_{m,i}$、$Y_{m,s}$——间作玉米、单作玉米产量,kg/hm^2

$Y_{s,i}$、$Y_{s,s}$——间作大豆、单作大豆产量,kg/hm^2

1.3.2 温室气体采集与测定

温室气体采用静态暗箱-气象色谱法进行采集和测定。采样箱由箱体和底座组成,箱体用 PVC 材料制成,表面覆有隔热材料,尺寸为 50 cm×50 cm×50 cm,箱内安装风扇和抽气接口,接口连接三通阀。底座由不锈钢制成,尺寸为 50 cm×50 cm×5 cm,底座内无作物。底座上面附有凹槽,采样前槽内注水密封以隔绝箱外环境。单作处理底座设置在株间,间作处理底座设置在玉米大豆间,气体采集时间为 08:30—11:30,扣箱后立即用 60 mL 注射器抽取气体,并立即转移到真空气袋中,气体采集时间间隔为 15 min,采集时长为 30 min。每 7 ~ 10 d 采集 1 次,采样结束后将样品带回实验室 48 h 内用气象色谱仪(Agilent 7890 A 型,美国安捷伦科技有限公司)完成测试分析。通过对 3 个连续样品浓度进行线性回归分析,拟合科率得出气体排放速率。排放通量计算式为

$$F=\frac{M}{V_0}H\frac{\Delta c}{\Delta t}\frac{273}{273+T}\times 60 \tag{2}$$

式中 F——气体排放通量,mg/(m^2·h)

M——标准状况下气体摩尔质量,g/mol

V_0——标准状况下气体摩尔体积,L/mol

H——箱体高度,取 0.5 m

$\Delta c/\Delta t$——气体排放速率，μL/(L·min)

T——采样时箱内平均气温，℃

用线性内插法估算整个玉米、大豆生育期温室气体排放总量，计算式为

$$C_{E_{N_2O/CH_4}} = \sum \frac{F_i + F_{i+1}}{2}(t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (3)$$

式中　$C_{E_{N_2O/CH_4}}$——生育期 N_2O/CH_4 排放总量，kg/hm²

F_i——第 i 次气体排放通量，mg/(m²·h)

t_i——第 i 次取样时间，d

直接温室气体排放碳足迹为 CF_d，参照 YANG 等[14]方法计算，计算式为

$$C_{F_d} = 273C_{E_{N_2O}} + 27C_{E_{CH_4}} \quad (4)$$

式中　C_{F_d}——直接温室气体排放碳足迹，kg/hm²

$C_{E_{N_2O}}$、$C_{E_{CH_4}}$——N_2O、CH_4 排放碳足迹，kg/hm²

1.3.3　土壤样品采集与测定

在试验开始前和收获时分别从 0～10 cm 和 10～20 cm 土层采集土样。试验前从 15 个点采集样本，覆盖所有地块。收获时每个地块采集 3 个土样。其中间作处理取自作物带和中间过渡带。土壤容重采用环刀法测定。在测定土壤有机碳含量(SOC)前，将土壤样品风干，磨细，过 0.25 mm 筛。SOC 含量采用重铬酸钾湿烧法测定并根据容重转换为土层有机碳储量(mg/hm²)。

1.4　数据计算与分析

1.4.1　作物能量产量与玉米当量经济产量

能量产量(Energy yield, EY)参照 SUN 等[15]的方法，计算式为

$$E_Y = \frac{Y_g E_g + Y_s E_s}{1\,000} \quad (5)$$

式中　E_Y——能量产量，GJ/hm²

Y_g、Y_s——作物籽粒产量、秸秆产量，kg/hm²

E_g、E_s——作物籽粒、秸秆相应热值，MJ/kg

将大豆产量转换为玉米当量经济产量(Maize equivalent economic yield, MEEY)，转换公式为

$$M_{EEY} = Y_{soybean}\frac{P_{soybean}}{P_{maize}} \quad (6)$$

式中　M_{EEY}——玉米当量经济产量，kg/hm²

$Y_{soybean}$——大豆产量，kg/hm²

$P_{soybean}$、P_{maize}——大豆、玉米市场价格[16]，元/kg

1.4.2　经济效益

计算不同种植系统在整个生命周期中的总投入，包括劳动力、种子、柴油、地膜、化肥、除草剂和杀虫剂等。总收入是籽粒经济价值总和。净收入为总收入与总投入差值。成本效益比为总收入与总投入比值。

1.4.3　碳足迹评价方法与计算

基于生命周期评价法框架对两年不同种植系统的碳足迹进行评价，考虑以下来源：①农业肥料、地膜等的制造、包装和运输过程产生的排放、农机作业(翻耕、播种等)燃料和其他人工活动(施肥、地膜回收等)能源消耗(CF_i)。②农田直接温室气体排放(CF_d)。③表层 SOC 储量变化(d_{SOC})[17]。两年农业投入完全相同。

分别以单位面积碳足迹(CF_A)、单位玉米当量经济产量碳足迹(CF_{MEEY})、单位总收入碳足迹(CF_E)对各种植系统的碳足迹进行评价[18]，计算式为

$$C_{F_A} = \sum (I_i C_i) + C_{F_d} + d_{SOC}\frac{44}{12} \quad (7)$$

$$C_{F_{MEEY}} = \frac{C_{F_A}}{M_{EEY}} \quad (8)$$

$$C_{F_E} = \frac{C_{F_A}}{E} \quad (9)$$

式中　C_{F_A}——单位面积碳足迹，kg/hm²

I_i、C_i——农业投入量和相应的当量 CO_2 排放系数

d_{SOC}——年间土层有机碳储量变化量，kg/hm²

$C_{F_{MEEY}}$——单位玉米当量产量碳足迹，kg/hm²

E——总收入，元/hm²

C_{F_E}——单位总收入碳足迹，kg/元

1.4.4　碳可持续性指数和净生态系统经济预算

从碳可持续性和经济效益角度对各处理进行评估，同时考虑作物碳产量、温室气体排放量和碳成本交易量。

碳可持续性指数(Carbon sustainability index, CSI)计算式为[19]

$$C_{SI} = \frac{C_{output} - C_{emission}}{C_{output}} \quad (10)$$

式中　C_{SI}——碳可持续性指数

C_{output}——生物量的碳产量均值[20]，kg/hm²

$C_{emission}$——温室气体的碳排放总量均值，kg/hm²

净生态系统经济预算(Net ecosystem economic budget, NEEB)考虑到温室气体排放的收益和成本，采用的碳交易价格为 103.7 元/t[21]，计算式为

$$N_{EEB} = Y_{ield_{gain}} - C_{arbon_{cost}} \quad (11)$$

式中　N_{EEB}——净生态系统经济预算，元/hm²

$Y_{ield_{gain}}$——作物产量与市场价格乘积，元/hm²

$C_{arbon_{cost}}$——温室气体排放总量与碳交易价格乘积，元/hm²

1.5　数据分析

试验数据均取 3 次重复平均值，应用 SPSS 软件

分析各处理对作物产量、LER、EY 等指标的影响，用 Fisher－LSD 法检验各处理间的差异显著性（$p<0.05$），应用 OriginPro 软件对数据进行可视化。

2 结果与分析

2.1 生产力评估

2.1.1 作物产量和土地当量比

不同处理间玉米和大豆产量差异显著（$p<0.05$）（图 2，图中不同小写字母表示处理间差异显著（$p<0.05$），下同）。两年试验中各处理玉米产量均表现为 MM 处理显著高于 MS 处理。2023 年各处理玉米产量相比 2022 年有所增加，其中 FMM、NMM、FMS 和 NMS 处理分别增加 13.28%、18.55%、32.87% 和 19.88%。各处理大豆产量也表现出相同规律，SS 处理产量显著高于 FMS 和 NMS 处理。2023 年各处理大豆产量也较 2022 年有不同程度增加。相同种植模式下，FM 处理玉米产量显著高于 NM 处理。与 NM 处理相比，FM 处理对单作和间作玉米产量的提升效应分别为 21.85% 和 12.73%。在 FM 处理中间作玉米相对产量为单作玉米的 57% ~60%，在 NM 处理中为 60% ~67%。两年试验中间作处理大豆产量表现不同，2022 年 FMS 处理大豆产量显著高于 NMS 处理，而 2023 年大豆产量差异不显著（$p>0.05$）。

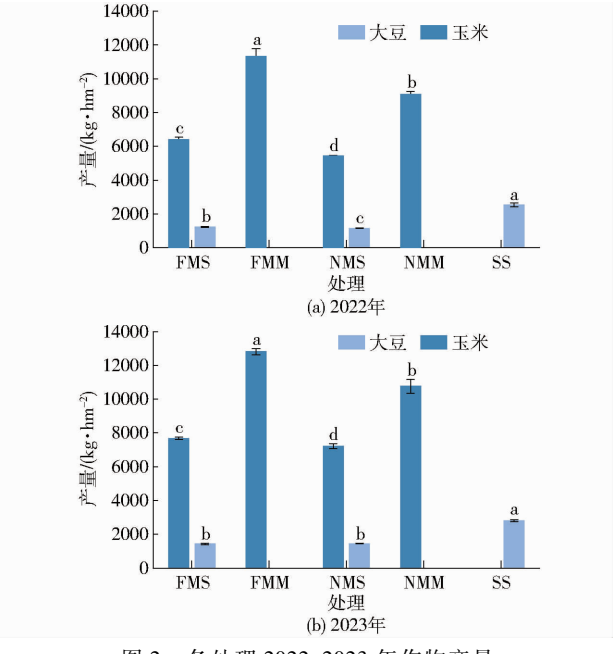

图 2 各处理 2022、2023 年作物产量

Fig. 2 Crop yields in 2022 and 2023 for each treatments

MS 处理土地当量比如图 3（图中 * 表示处理间差异显著（$p<0.05$），ns 表示差异不显著）所示，各处理土地当量比均大于 1.00。2022 年 FMS 和 NMS 处理 LER 无显著差异（$p>0.05$），均为 1.05；而

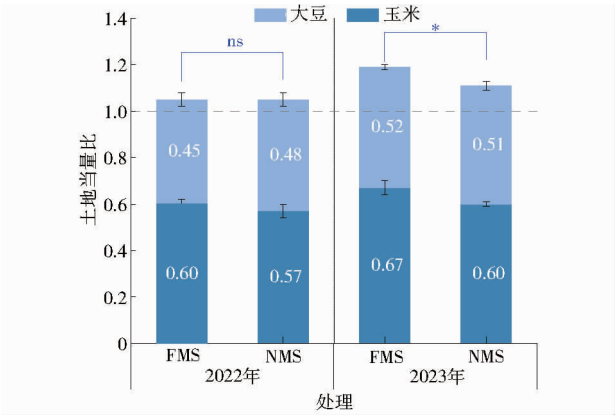

图 3 间作处理 2022、2023 年土地当量比

Fig. 3 Land equivalent ratio of intercropping treatments in 2022 and 2023

2023 年 FMS 处理 LER 显著高于 NMS 处理，两处理 LER 分别为 1.19 和 1.11。2023 年两处理 LER 相比 2022 年均有显著提高，分别提高 5.71% 和 13.33%。总体而言，FMS 和 NMS 处理 LER 两年均值为 1.08 和 1.12。

偏玉米土地当量比表现为 NMS 处理大于 FMS 处理；而偏大豆土地当量比在 2022 年表现为 FMS 处理大于 NMS 处理，2023 年则相反。

2.1.2 玉米当量经济产量和能量产量

各处理玉米当量经济产量如图 4a ~4c 所示。两年试验中 FMM 处理具有最大 MEEY，SS 处理具有最小 MEEY。相同种植模式下，FM 处理 MEEY 显著高于 NM（$p<0.05$）。不同种植模式下，单作处理 MEEY 均显著高于间作处理，与 FMS 处理相比，两年 FMM 处理 MEEY 显著提高 26.03% 和 23.64%，同样，两年 NMM 处理 MEEY 相比 NMS 处理显著提高 15.73% 和 8.35%。

各处理能量产量（图 4d ~4f）与 MEEY 规律相似，2 年试验中 FMM 处理 EY 最高，而 SS 最低。相同种植模式下，FM 处理 EY 均显著高于 NM 处理。不同种植模式下，单作处理 EY 均显著高于间作处理，两年 FMM 处理 EY 相比 FMS 处理分别提高 61.35% 和 38.09%，NMM 处理 EY 相比 NMS 处理分别提高 57.24% 和 46.56%。此外，2023 年各处理 EY 相比 2022 年有不同程度增加，FMS、FMM、NMS、NMM 和 SS 处理分别增加 38.63%、18.65%、44.36%、34.55% 和 39.70%。

2.1.3 经济效益

各处理收支情况及成本效益比如表 2 所示。FMM 处理总收入最高，而 SS 处理最低。2022 年除 FMS 和 NMM 处理之间，其余各处理总收入均具有显著差异（$p<0.05$）。无论 FM 处理还是 NM 处理，单作处理总收入均显著高于间作处理。除 SS 处理

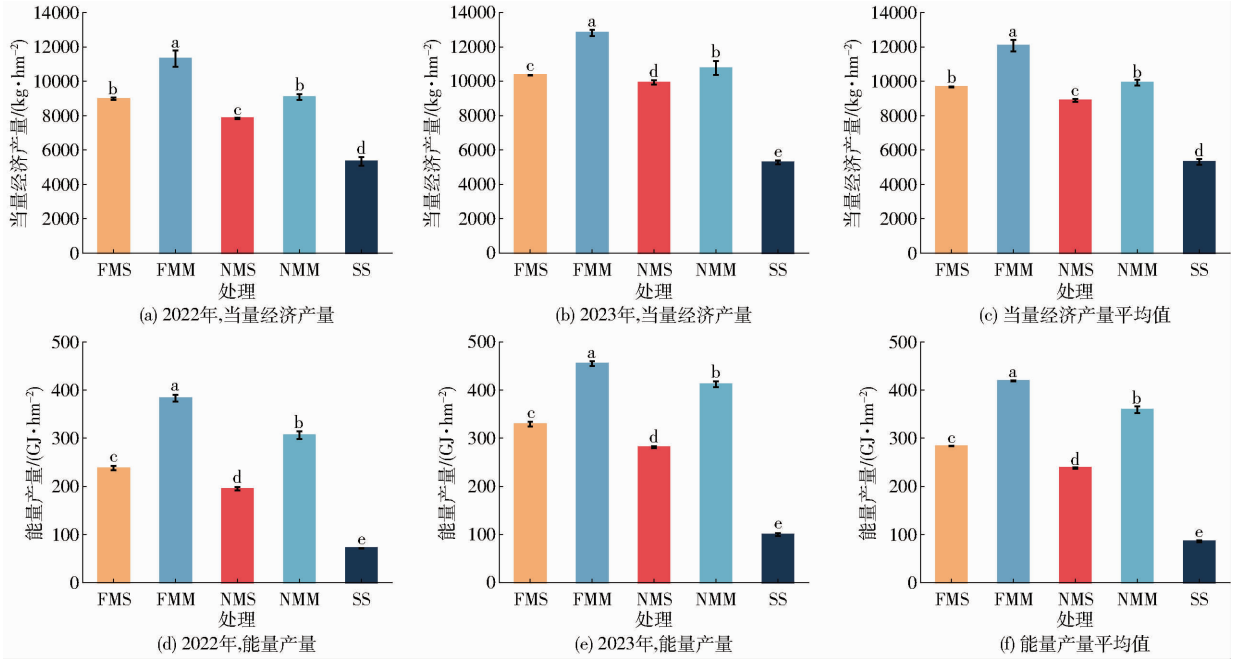

图 4　各处理玉米当量经济产量和能量产量

Fig. 4　Maize equivalent economic yield and energy yield for each treatments

表 2　2022 年和 2023 年各处理总投入、总收入、净收入和成本效益比

Tab. 2　Total input and income, net income and benefit-cost ratio for each treatments in 2022 and 2023

年份	处理	总投入/(元·hm^{-2})	总收入/(元·hm^{-2})	净收入/(元·hm^{-2})	成本效益比
2022	FMM	8 858.00	(31 454.77 ± 172.49)^{a}	(22 596.77 ± 172.49)^{a}	(3.55 ± 0.02)^{a}
	FMS	9 590.68	(24 959.14 ± 107.81)^{b}	(15 368.46 ± 107.81)^{c}	(2.60 ± 0.12)^{c}
	NMM	8 292.96	(25 240.29 ± 91.57)^{b}	(16 947.33 ± 91.57)^{b}	(3.04 ± 0.01)^{b}
	NMS	8 716.96	(21 808.85 ± 377.25)^{c}	(13 091.89 ± 377.24)^{d}	(2.50 ± 0.05)^{c}
	SS	8 420.96	(14 857.85 ± 566.09)^{d}	(6 436.89 ± 566.09)^{e}	(1.76 ± 0.07)^{d}
2023	FMM	8 858.00	(35 632.10 ± 30.40)^{a}	(26 774.10 ± 28.65)^{a}	(4.02 ± 0.01)^{a}
	FMS	9 590.68	(28 819.20 ± 415.05)^{c}	(19 228.52 ± 391.16)^{c}	(3.00 ± 0.05)^{d}
	NMM	8 292.96	(29 923.17 ± 298.81)^{b}	(21 630.21 ± 281.61)^{b}	(3.61 ± 0.03)^{b}
	NMS	8 716.96	(27 618.00 ± 927.75)^{d}	(18 901.04 ± 874.36)^{c}	(3.17 ± 0.10)^{c}
	SS	8 420.96	(14 676.08 ± 239.40)^{e}	(6 255.12 ± 225.62)^{d}	(1.74 ± 0.03)^{e}
p	年份		<0.001	<0.001	<0.001
	处理		<0.001	<0.001	<0.001
	年份 × 处理		<0.001	<0.001	<0.001

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著(p <0.05)，下同。

外，2023 年各处理总收入相比 2022 年有不同程度增加，其中 FMM、FMS、NMM 和 NMS 处理分别增加 6.64%、7.73%、9.28% 和 13.32%；而 SS 处理较 2022 年降低 0.6%。各处理间净收入存在显著差异，其中 FMM 处理净收入最高，而 SS 处理最低。值得注意的是，2023 年 FMS 和 NMS 处理间净收入并没有显著差异，这与 2022 年的表现不同。此外，2023 年 FMM、FMS、NMM 和 NMS 处理净收入较 2022 年分别提升 9.41%、14.32%、17.47% 和 32.23%，SS 处理则降低 15.95%。

成本效益比和净收入规律相似，FMM 处理成本效益比最高，而 SS 处理最低。2022 年除 FMS 和 NMS 处理外，其余各处理间均具有显著差异；2023 年所有处理间均具有显著差异。除 SS 处理外，2023 年各处理成本效益比相较 2022 年均得到不同程度提升，其中 FMM、FMS、NMM 和 NMS 处理分别提升 6.76%、8.85%、11.84% 和 19.60%，SS 处理则降低 3.53%。

2.2　温室气体排放通量

由图 5(图中↓表示试验地出现降雨，下同)可知，生育期 NO_2 排放峰与降雨量和根系活动较为频繁的拔节期、灌浆期较为一致，在播后 30、70 d 较为明显。整体上看，FMM 处理 NO_2 排放总量显著高于其他处理 38% ~83% (p <0.05)。2023 年由于生育期降雨量更高，导致各处理温室气体排放总量平均增加 7.8%。

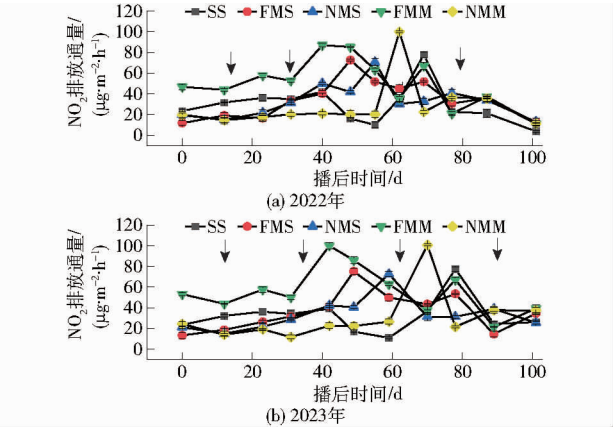

图 5 2022 年和 2023 年生育期各处理 NO_2 排放通量变化曲线

Fig. 5 NO_2 emission flux curves for each treatments during breeding periods of 2022 and 2023

由图 6 可知,生育期 CH_4 排放通量既有吸收特征又有排放特征,CH_4 日排放通量在 -0.44 ~ 0.21 mg/(m^2·h)间变化,各处理没有表现出明显的排放规律。但从排放总量看,各处理在生育期均表现为 CH_4 的吸收汇,其中 NMM 处理排放总量显著低于其他处理($p < 0.05$),SS 处理排放总量显著高于其他处理。

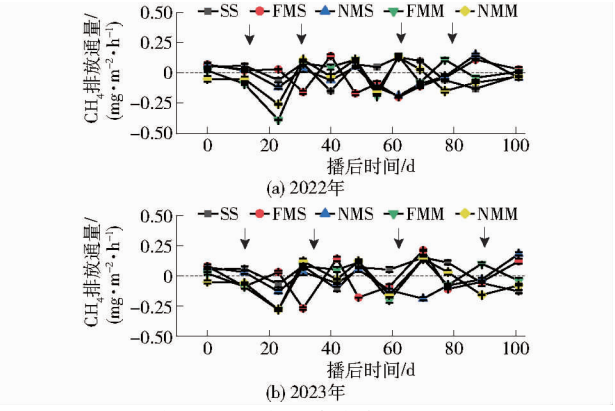

图 6 2022 年和 2023 年生育期各处理 CH_4 排放通量变化曲线

Fig. 6 CH_4 emission flux curves for each treatments during breeding periods of 2022 and 2023

2 年温室气体排放总量平均值如表 3 所示,SS 处理具有最低的 NO_2 排放总量及最高的 CH_4 排放总量。相同种植模式下,FM 处理各温室气体排放总量均显著高于 NM 处理($p < 0.05$),覆膜增加了两种温室气体排放量 5% ~72% 和 5.3% ~24.4%;相同耕作处理下,相比 FMM 处理,FMS 处理显著降低 NO_2 排放总量 31%,增加 CH_4 排放总量 9.5% 但不显著($p > 0.05$)。

2.3 碳足迹

各处理农业投入所产生的间接温室气体排放及其构成如图7所示,各处理间接温室气体排放量由

表 3 各处理 2022 年和 2023 年温室气体排放总量

Tab. 3 Total greenhouse gas emissions in 2022 and 2023 for each treatments kg/hm²

年份	处理	N_2O 排放总量	CH_4 排放总量
2022	FMM	1.18^{a}	-0.91^{b}
	FMS	0.85^{b}	-0.81^{ab}
	NMM	0.74^{cd}	-1.17^{c}
	NMS	0.81^{bc}	-0.74^{a}
	SS	0.68^{d}	-0.72^{a}
2023	FMM	1.34^{a}	-0.73^{b}
	FMS	0.88^{b}	-0.68^{a}
	NMM	0.73^{d}	-1.00^{d}
	NMS	0.82^{bc}	-0.83^{c}
	SS	0.79^{cd}	-0.66^{a}
平均值	FMM	1.26^{a}	-0.82^{bc}
	FMS	0.87^{b}	-0.74^{b}
	NMM	0.73^{c}	-1.08^{c}
	NMS	0.82^{b}	-0.78^{b}
	SS	0.74^{c}	-0.69^{a}

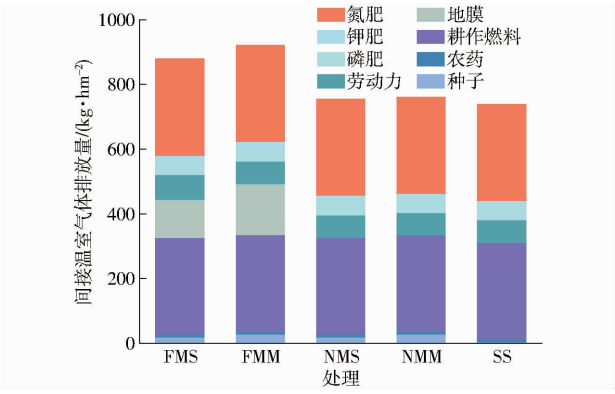

图 7 各处理农业投入导致间接温室气体排放组成

Fig. 7 Composition of indirect greenhouse gas emissions resulting from various agricultural inputs

大到小依次为 FMM、FMS、NMM、NMS、SS。主要间接温室气体排放由氮肥和耕作燃料产生。此外,FM 处理农业投入产生的间接温室气体排放量均高于 NM 处理,主要是由地膜投入产生的间接温室气体排放导致。

各处理单位面积碳足迹(CF_A)及其构成如表 4 所示。各处理对 CF_d、d_{SOC} 和 CF_A 均具有极显著影响($p < 0.01$),年份只对 CF_i 具有极显著影响,两者交互作用对 CF_d、d_{SOC} 和 CF_A 均具有显著影响。其中,相同耕作处理下,两年 FMS 处理 CF_d 较 FMM 处理显著降低 29.1% ~36.9%,平均降低 33%;两年 FMS 处理 d_{SOC} 在所有处理中处于最低水平,相比其他处理减少 7.8% ~46.57%。

2022 年 FMM 处理 CF_A 最高(3 711.98 kg/hm²),而 2023 年则为 NMM(3 313.23 kg/hm²)。

各处理单位玉米当量产量碳足迹(CF_{MEEY})和单

表 4　各处理 2022 年和 2023 年单位面积碳足迹及其构成

Tab. 4　Carbon footprint per unit area and their composition in 2022 and 2023 for each treatments　kg/hm^2

年份	处理	CF_i	CF_d	d_{SOC}	CF_A
2022	FMM	921.07	(297.57 ± 14.01)^a	(2 493.33 ± 186.96)^a	(3 711.98 ± 174.73)^a
	FMS	879.18	(211.09 ± 2.66)^b	(1 332.22 ± 45.73)^d	(2 422.49 ± 46.93)^c
	NMM	761.34	(171.43 ± 5.78)^c	(1 918.89 ± 322.91)^{bc}	(2 851.66 ± 328.63)^{bc}
	NMS	754.57	(202.06 ± 4.04)^b	(2 248.89 ± 182.93)^{ad}	(3 205.52 ± 186.91)^b
	SS	738.50	(166.2 ± 10.68)^c	(1 601.11 ± 228.66)^{cd}	(2 505.81 ± 236.00)^c
2023	FMM	921.07	(349.11 ± 16.66)^a	(1 405.55 ± 147.68)^b	(2 675.73 ± 152.51)^{ab}
	FMS	879.18	(220.15 ± 4.16)^b	(1 295.56 ± 212.40)^b	(2 394.88 ± 212.44)^b
	NMM	761.34	(168.56 ± 3.47)^d	(2 383.33 ± 611.36)^a	(3 313.23 ± 608.16)^a
	NMS	754.57	(203.44 ± 4.31)^{bc}	(2 236.67 ± 259.27)^a	(3 194.67 ± 255.08)^a
	SS	738.50	(197.03 ± 2.13)^c	(1 662.22 ± 134.00)^{ab}	(2 597.76 ± 134.77)^{ab}
p	年份		<0.001	0.331	0.406
	处理		<0.001	<0.001	<0.001
	年份 × 处理		<0.001	0.01	0.013

位总收入碳足迹(CF_E)如图 8 所示。SS 处理具有最高 CF_{MEEY}，且显著高于其余处理。CF_{MEEY} 在 2022 年和 2023 年间具有相似规律，不同表现在不同种植模式间，对于 FMS 和 FMM 处理，2022 年 FMM 处理 CF_{MEEY} 高于 FMS 处理，而 2023 年则相反，但两种处理 CF_{MEEY} 无显著差异。2022 年 NMS 处理 CF_{MEEY} 显著高于 NMM 处理，而 2023 年二者未表现出显著差异。FMS 处理两年 CF_{MEEY} 均值为 0.24 kg/hm^2。

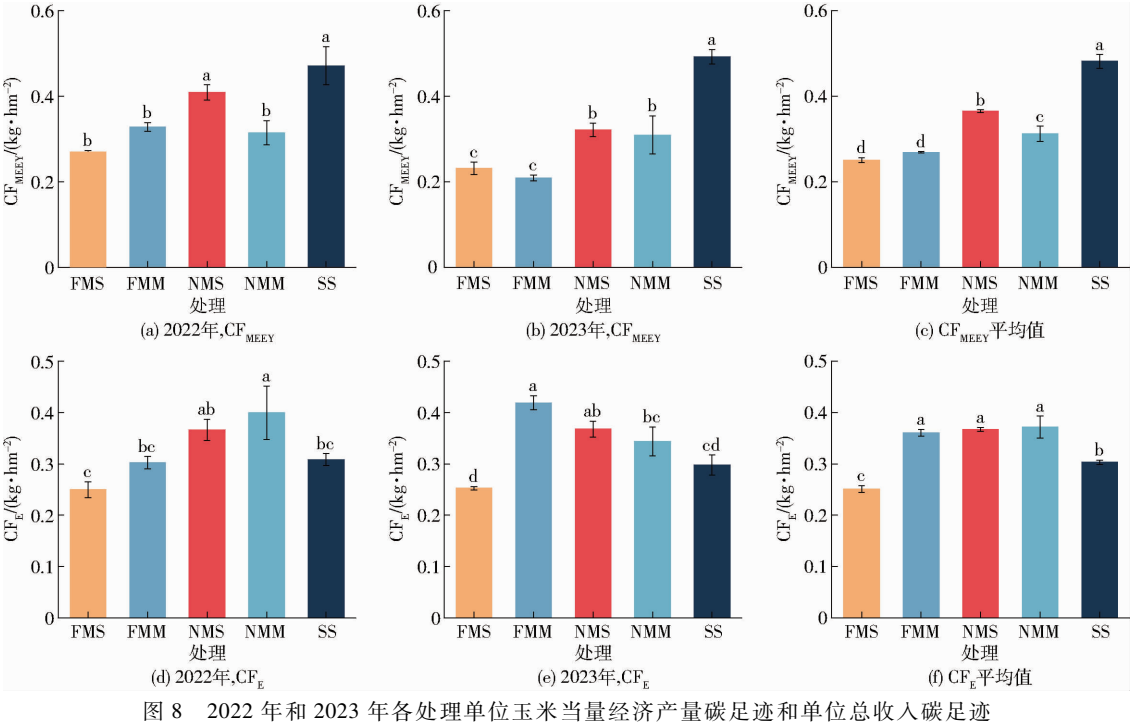

图 8　2022 年和 2023 年各处理单位玉米当量经济产量碳足迹和单位总收入碳足迹

Fig. 8　CF_{MEEY} and CF_E under different treatments in 2022 and 2023

各处理的 CF_E 与 CF_{MEEY} 表现规律不同。2022 年各处理间 CF_E 由大到小依次为 NMM、NMS、SS、FMM、FMS，而 2023 年则为 FMM、NMS、NMM、SS、FMS。综合来看，FMM、NMS、NMM 处理间没有显著差异，但三者的 CF_E 均显著高于 FMS 和 SS 处理。值得注意的是，FMS 处理具有最小 CF_E 且显著低于其它处理，两年均值为 0.25 kg/元。

2.4　碳可持续性指数和净生态系统经济预算

两年试验中各处理碳可持续性指数和净生态系统经济预算均值如图 9 所示。两类指标在各处理间均有显著差异($p < 0.05$)。各处理间 CSI 由大到小依次为 FMM、NMM、FMS、NMS、SS，NEEB 也有着同样的规律。除 SS 处理外，在相同种植模式下，无论 CSI 还是 NEEB 均表现为 FM 处理显著高于 NM 处

理;而在不同种植模式下,MM 处理的 CSI 和 NEEB 显著高于 MS 处理。

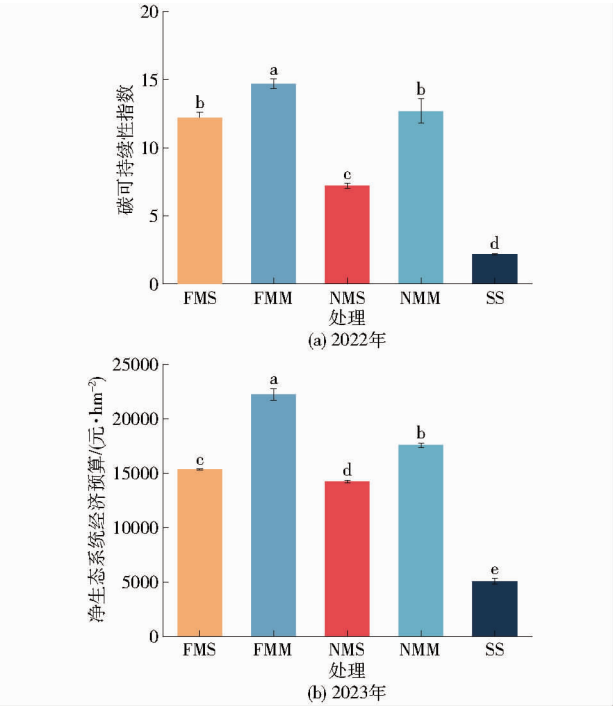

图 9 2022 年和 2023 年各处理碳可持续指数和净生态系统经济预算均值

Fig. 9 Average values of carbon sustainability index and net ecosystem economic budget in 2022 and 2023

3 讨论

3.1 地膜覆盖和豆科植物间作对种植系统作物生产力的影响

玉米-大豆间作通过种间优势互补提升对水资源和养分资源的利用效率[22],有助于实现旱作农业地区的可持续生产。而玉米覆膜可以进一步调节种间相互作用并影响间作优势[23-24]。本研究中,间作种植系统中玉米和大豆的相对密度分别为 0.5 和 1 且两年 LER 都大于 1(1.05 ~ 1.19)。在 FM 处理中间作玉米相对产量为单作玉米的 57% ~ 60%,而在 NM 处理中为 60% ~ 67%,上述结果表明间作系统中玉米较单作系统的相对产量均大于 50%(相对密度),体现了间作系统中的玉米产量优势;其次,地膜覆盖对单作玉米和间作玉米产量也有显著影响($p < 0.05$);上述结果表明覆膜和大豆间作对玉米产量有叠加效应。这一结果与之前玉米-豌豆间作系统中覆膜后玉米产量变化的研究结果一致[23];但两个研究对于豆科植物产量变化的结论并不一致,主要原因为两研究田间配置不同,本研究采取 2M3S(2 行玉米 3 行大豆型间作模式)田间配置,而 MAO 等[23]的研究采取 2M4S(2 行玉米 4 行大豆型间作模式)田间配置;导致间作系统中大豆的相对密度不同,本研究为 1 而 MAO 等[23]的研究中为 0.5。本研究结果表明,FMS 处理中大豆相对产量为 SS 处理的 48% ~ 51%;而在 NMS 处理中为 45% ~ 52%。间作系统中大豆发生了较大幅度减产,说明本研究中间作产量优势主要来自于玉米产量增加,而牺牲了大豆产量,这与 WANG 等[24]的研究结论一致。进一步分析间作系统中玉米覆膜对大豆产量的影响,发现在 2022 年 FMS 处理中大豆产量较 NMS 处理显著提升,但 2023 年两者间并无差异,2023 年的结果与 MAO 等[23]的结论一致。

在对各种植系统的玉米当量经济产量和能量产量进行评估后发现,无论有无地膜覆盖,MM 处理 EY 显著高于 MS 处理,而 SS 处理 EY 最低,这主要是因为 C4 植物(玉米)相较于 C3 植物(大豆)具有更高的光、水分和氮素利用效率和更低的蒸腾作用[25],MEEY 也和 EY 具有一样的规律,这主要是因为 MS 处理大豆产量较低,这与 WANG 等[24]的研究结论一致。

3.2 地膜覆盖和豆科植物间作对种植系统经济及生态效益的影响

农业投入和产出评估结果(表 2)显示,MM 处理净收入和成本效益比显著高于 MS 处理,造成上述结果主要原因为:①MS 处理中玉米相对密度为 MM 处理的 1/2。②MS 处理中大豆发生了较大幅度减产。③相同覆盖处理下,MS 处理农业投入也稍高于 MM 处理。这些最终导致 MM 处理经济效益显著高于 MS 处理。SS 处理经济效益最低是因为大豆产量本身较低。此外,间作系统中玉米覆膜并没有起到提升生产系统成本效益比的作用,2022 年 FMS 和 NMS 处理成本效益比并没有显著差异,前者为 2.60,后者为 2.50;而在 2023 年,NMS 处理成本效益比显著高于 FMS 处理,前者为 3.17,后者为 3.00。主要是因为两者的大豆产量并没有差异,虽然覆膜提高了 MS 处理中玉米产量,但与此同时地膜使用也增加了农业投入成本,当增加产量带来的收益不能抵消地膜投入成本时就会出现上述情况。

为了实现双碳目标,对农业生产系统的净生态系统经济预算的关注日益加强[15,21]。考虑到产量收益和碳成本的分析表明(图 9b),MM 处理 NEEB 均显著高于对应覆膜处理的 MS 处理,即 FMM 大于 FMS 大于,NMM 大于 NMS;主要原因是 MM 处理玉米产量显著高于 MS 处理,MS 处理中玉米覆膜又对大豆产量影响较小。相同种植系统中覆膜所带来的 NEEB 变化表明覆膜显著提升了系统的 NEEB,即 FMS 大于 NMS,FMM 大于 NMM,主要是覆膜对玉米根系发育有较大影响,地膜可以重塑根系形态特征

和垂直分布，进而提升种植系统中的玉米产量[23,26-27]，最终提升 FM 处理产量收益。

3.3 地膜覆盖和豆科植物间作对种植系统碳足迹及碳可持续性的影响

采用 3 种指标（CF_A、CF_{MEEY}、CF_E）全面评估各种植系统碳足迹：相同覆膜处理下，与 MM 处理相比，MS 处理 3 个指标并没有呈现一致趋势；但 FMS 处理同时有最小的 CF_A、CF_{MEEY} 和 CF_E，这一结果表明，FMS 处理在减少碳足迹方面有明显优势，即使 FMS 处理在农业生产过程中有较高的间接温室气体排放量（图 7，主要是由于地膜投入），但相比单作种植系统也能较好地维持土壤碳平衡[28-29]。同时也发现 FMS 处理碳可持续性指数显著高于 NMS 处理，更表明了 FMS 处理相比 NMS 处理在碳可持续性方面的优势。对于 MM 和 MS 处理，发现 MM 处理碳可持续性指数显著高于 MS 处理，这与 WANG 等[24]的研究并不相同，主要是田间配置不同导致，本研究中采用 2M3S，而 WANG 等[24]采用 3M4S，直接导致形成种植系统碳输出部分的作物籽粒产量和作物秸秆产量间的差异，也会导致碳排放的不同，最终导致碳可持续性指数不同。此外，各种植系统中 FMS 处理 d_{SOC} 最小，进一步说明 FMS 处理在保持土壤有机碳方面的优势。

4 结束语

通过在黄土高原地区进行的玉米覆膜和豆科植物间作试验发现，FMS 处理玉米相对产量为 FMM 处理的 57% ~60%，同时土地当量比两年均值为 1.08，表明了间作系统中玉米产量的优势以及土地生产力的提高；温室气体排放方面，FMS 处理较 FMM 处理显著降低了温室气体排放总量，导致直接温室气体排放所产生的碳足迹平均降低 33%，同时温室气体排放总量较 NMS 处理增加不显著；虽然与 FMM 处理相比在经济效益和作物产量上有所降低，但 FMS 处理较其它处理能更好地减少土壤有机碳损失 7.8% ~46.57%，且具有最低碳足迹，其中 CF_A、CF_{MEEY} 和 CF_E 分别为 2 408.68 kg/hm^2、0.24 kg/hm^{2}和 0.25 kg/元，与 NMS 处理相比也有更高的碳可持续性指数，对于旱作农业地区覆膜间作生产具有重要意义。

参 考 文 献

[1] GAN Y, LIANG C, CAMPBELL C A, et al. Carbon footprint of spring wheat in response to fallow frequency and soil carbon changes over 25 years on the semiarid Canadian prairie[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 175 - 184.

[2] 赵建华，孙建好，李伟绮. 玉米播期对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响[J]. 中国生态农业学报（中英文），2018, 26(11): 1634 - 1642.
ZHAO Jianhua, SUN Jianhao, LI Weiqi. Effect of maize sowing date on yield and interspecific competition in soybean/maize intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1634 - 1642. (in Chinese)

[3] 崔文芳，秦德志，陈静，等. 玉米大豆不同间作系统光合特性与产量边际效应[J]. 农业机械学报，2023，54(8)：309 - 319.
CUI Wenfang, QIN Dezhi, CHEN Jing, et al. Marginal effects of photosynthetic characteristics and yield in maize and soybean intercropping systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 309 - 319. (in Chinese)

[4] CHEN Y, LIU T, TIAN X, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[J]. Field Crops Research, 2015, 172: 53 - 58.

[5] MA Y C, KONG X W, YANG B, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice-wheat rotations with integrated soil-crop system management[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 164: 209 - 219.

[6] SAINJU U M, LENSASAEN A W, CAESAR-TONHAT T, et al. Dryland soil nitrogen cycling influenced by tillage, crop rotation, and cultural practice[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 93: 309 - 322.

[7] 冯浩，刘晶晶，张阿凤，等. 覆膜方式对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J]. 农业机械学报，2017，48(4)：180 - 189.
FENG Hao, LIU Jingjing, ZHANG Afeng, et al. Effect of film mulching patterns on carbon sequestration in wheat - maize rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 180 - 189. (in Chinese)

[8] NAN W G, YU S C, HUANG H Z, et al. Effects of plastic film mulching on soil greenhouse gases (CO_2, CH_4 and N_2O) concentration within soil profiles in maize fields on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(2): 451 - 464.

[9] SENBAYRAM M, WENTHE C, LINGNER A, et al. Legume-based mixed intercropping systems may lower agricultural born N_2O emissions[J]. Energy, Sustainability and Society, 2015, 6: 1 - 9.

[10] ASHWORTH A J, TAYLOR A M, REED D L, et al. Environmental impact assessment of regional switchgrass feedstock production comparing nitrogen input scenarios and legume-intercropping systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 227 - 234.

[11] ZHANG W, LI S, SHEN Y, et al. Film mulching affects root growth and function in dryland maize-soybean intercrop[J].

Field Crops Research, 2021, 271: 108240.
[12] ZHANG W, WEI Y X, KHAN A, et al. Intercropped soybean boosts nitrogen benefits and amends nitrogen use pattern under plastic film mulching in the semiarid maize field[J]. Field Crops Research, 2023, 295: 108881.
[13] HAUGGAARD-NIELSEN H, LACHOUANI P, KNUDSEN M T, et al. Productivity and carbon footprint of perennial grass-forage legume intercropping strategies with high or low nitrogen fertilizer input[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 1339 - 1347.
[14] YANG L, NIE J, ZHAO J, et al. Reduce carbon footprint without compromising system productivity: optimizing crop rotation in the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139124.
[15] SUN T, ZHAO C, FENG X, et al. Maize-based intercropping systems achieve higher productivity and profitability with lesser environmental footprint in a water-scarce region of Northwest China[J]. Food and Energy Security, 2021, 10(1): e260.
[16] 国家粮食和物资储备局. 全国主要粮食品种收购价格周报(10 月 25 日)[EB/OL]. (2023 - 11 - 07)[2024 - 07 - 05]. https://www.lswz.gov.cn/html/zmhd/lysj/2023 - 11/07/content_277253.shtml.
[17] SONG Z, FENG X, LAL R, et al. Optimized agronomic management as a double-win option for higher maize productivity and less global warming intensity: a case study of Northeastern China[J]. Advances in Agronomy, 2019, 157: 251 - 292.
[18] YANG X, GAO W, ZHANG M, et al. Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 76: 131 - 139.
[19] LAL R. Carbon emission from farm operations[J]. Environment International, 2004, 30(7): 981 - 990.
[20] BOLINDER M A, JANZEN H H, GREGORICH E G, et al. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007, 118(1 - 4): 29 - 42.
[21] LI B, FAN C H, ZHANG H, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China[J]. Atmospheric Environment, 2015, 100: 10 - 19.
[22] REN Y Y, WANG X L, ZHANG S Q, et al. Influence of spatial arrangement in maize-soybean intercropping on root growth and water use efficiency[J]. Plant and Soil, 2017, 415: 131 - 144.
[23] MAO L, ZHANG L, LI W, et al. Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J]. Field Crops Research, 2012, 138: 11 - 20.
[24] WANG L, GEILFUS C M, SUN T, et al. Double gains: boosting crop productivity and reducing carbon footprints through maize-legume intercropping in the Yellow River Delta, China[J]. Chemosphere, 2023, 344: 140328.
[25] ORT D R, MERCHANT S S, ALRIC J, et al. Redesigning photosynthesis to sustainably meet global food and bioenergy demand[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8529 - 8536.
[26] FANG S, XIE B, LIU D, et al. Effects of mulching materials on nitrogen mineralization, nitrogen availability and poplar growth on degraded agricultural soil[J]. New Forests, 2011, 41: 147 - 162.
[27] ZHOU L, FENG H. Plastic film mulching stimulates brace root emergence and soil nutrient absorption of maize in an arid environment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(2): 540 - 550.
[28] 齐智娟,徐敬文,张忠学,等. 秸秆还田配施氮肥对黑土玉米田土壤 CO_2 排放与碳平衡的影响[J]. 农业机械学报,2024, 55(6):284 - 293.
QI Zhijuan, XU Jingwen, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on soil CO_2 emission and carbon balance in black soil maize field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 284 - 293. (in Chinese)
[29] 张作合,张忠学,薛里,等. 水土保持耕作对黑土坡耕地玉米田土壤碳平衡的影响[J]. 农业机械学报,2025,56(2): 454 - 462.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, XUE Li, et al. Effect of soil and water conservation tillage on soil carbon balance in black soil maize fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 454 - 462. (in Chinese)