

巴晓博, 隋鑫, 刘鸣达, 等. 东北黑土区覆盖作物-玉米间作保护性耕作的生态系统服务价值. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1883-1891

Ba XB, Sui X, Liu MD, et al. Ecosystem service value of conservation tillage with cover crop-maize intercropping in the black soil region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7): 1883-1891

东北黑土区覆盖作物-玉米间作保护性耕作的生态系统服务价值

巴晓博^{1,3} 隋鑫^{1,4} 刘鸣达² 解宏图^{1,3} 梁超^{1,3} 鲍雪莲^{1,3*}

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²沈阳农业大学, 沈阳 110866; ³辽宁省现代保护性耕作与生态农业重点实验室, 沈阳 110016; ⁴中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 科学评估覆盖作物种植体系的生态系统服务价值可以为东北地区保护性耕作模式构建提供重要参考。本研究基于实证分析,以生态系统服务价值为理论基础,选取禾本科作物黑麦草、豆科作物紫花苜蓿和毛苕子作为覆盖作物分别与玉米间作,以玉米单作模式为对照,从产品供给、气体调节、养分循环和水土保持四大生态系统服务方面进行生态系统服务价值的核算。结果表明:覆盖作物-玉米间作模式的生态系统服务价值均高于玉米单作,其中养分循环价值最高,其次是产品供给价值,占比分别为67.3%和29.3%。覆盖作物-玉米间作模式的养分循环价值均高于玉米单作模式;紫花苜蓿-玉米、毛苕子-玉米的产品供给价值显著高于黑麦草-玉米,分别增加了18.7%和21.0%;种植覆盖作物具有增加气体调节价值的潜力,但对水土保持价值的影响较小。综合生态系统服务价值,选择豆科覆盖作物-玉米间作可以获得最大效益。

关键词 覆盖作物; 生态系统服务价值; 保护性耕作; 间作模式; 豆科作物

Ecosystem service value of conservation tillage with cover crop-maize intercropping in the black soil region of Northeast China. BA Xiaobo^{1,3}, SUI Xin^{1,4}, LIU Mingda², XIE Hongtu^{1,3}, LIANG Chao^{1,3}, BAO Xuelian^{1,3*} (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China*; ³*Key Lab of Conservation Tillage and Ecological Agriculture, Liaoning Province, Shenyang 110016, China*; ⁴*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*).

Abstract: Scientific evaluating ecosystem service value (ESV) of cover crop cultivation system can provide important guidance for the construction of conservation tillage pattern in Northeast China. Based on empirical analysis and the theory of ecosystem service value, we calculated the ESVs of intercropping maize with gramineous cover crop ryegrass and with leguminous cover crops, alfalfa and hairy vetch, with maize monoculture as the control. The ESVs included product supply, gas regulation, nutrient cycling, and soil and water conservation. Results showed that ESVs of cover crop-maize intercropping were higher than those of maize monoculture. Nutrient cycling value was the highest, followed by product supply value, accounting for 67.3% and 29.3% of total ESV, respectively. The nutrient cycling value of cover crop-maize intercropping was higher than that of maize monoculture. The product supply value of alfalfa-maize and hairy vetch-maize were 18.7% and 21.0% higher than that of ryegrass-maize, respectively. Cover crops had the potential to increase the value of gas regulation services, but had little impact on the value of soil and water conservation. Considering the ESVs, intercropping maize with leguminous cover crops would have the greatest benefits.

Key words: cover crop; ecosystem service value; conservation tillage; intercropping pattern; leguminous crop.

东北黑土区是我国粮食安全的压舱石,其长期高投入高产出的耕作方式导致土壤有机质含量下降、黑土层变薄、土壤板结和多样性降低等一系列问

题^[1]。保护性耕作技术作为一种农田可持续发展的耕作模式,在利用多元化覆盖技术及较少土壤扰动的基础上,可达到退化土壤恢复重建和提高农田生态系统功能的目的,在东北黑土区得到广泛应用^[2-3]。种植覆盖作物是保护性耕作的一种重要方式,具有提高土壤有机质含量、增加养分库容、增强保水能力、减少土壤侵蚀及改善微生物群落结构、提

本文由黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28090100)、辽宁省揭榜挂帅项目(2021JH1/10400039-2)和沈阳市科学技术计划项目(21-116-3-03,21-109-3-03)资助。

2023-01-18 收稿, 2023-05-13 接受。

* 通信作者 E-mail: baoxl@iae.ac.cn

高微生物量和活性等优点^[4-8],同时还能促进主栽作物产量的提高^[9]。目前,大多数学者从土壤性质、养分转化、土壤微生物群落结构和功能等方面对覆盖作物种植模式进行了深入研究,但仍缺乏对其综合效益的评价。

生态系统服务价值作为一种媒介可以核算生态系统为人类生存发展所提供的产品、资源和环境服务的效益。国际科学联合环境委员会在 1991 年引入了生态系统服务及价值的概念^[10]。Costanza 等^[11]以货币形式对生态系统服务价值创新了核算方法。随后,国内外学者对不同尺度不同类型的生态系统进行了服务价值的评估^[12]。我国覆盖作物的种植多见中南部,例如,水稻(*Oryza sativa*)或玉米(*Zea mays*)等粮食作物与覆盖作物的嵌套种植^[13-15],当前对不同保护性耕作模式下农田生态系统服务价值的研究也与覆盖作物种植区域重叠。与传统耕作模式相比,保护性耕作模式下生态系统的服务价值更高^[16]。牧草轮作可显著提高稻田生态系统服务价值^[17],同时牧草作为绿肥可以提供额外的气体调节价值^[18]。在玉米-绿肥轮作模式下,种植冬绿肥可以增加气体调节、水分涵养、土壤养分积累和土壤保持价值^[19]。在西北地区,春玉米-绿肥轮作模式的生态系统服务价值中,农产品供给和气体调节价值对总价值的贡献率较大^[20]。因此,大多数的研究表明,种植覆盖作物可以带来净效益^[21]。在东北地区种植覆盖作物因受光热条件等气候因素影响,其应用具有局限性,因此,对其服务价值进行评估就显得尤为重要。研究表明,在东北黑土区间作模式中,玉米与苜蓿(*Medicago sativa*)间作可以增加主栽作物的根系生物量,并提高土壤碳氮储量^[22];与草木樨(*Melilotus officinalis*)间作可增加土壤有机质含量^[23],与花生(*Arachis hypogaea*)间作可增加土地当量比^[24]。豆禾间作种植可提高作物多样性,增强生态系统服务价值^[25]。在已有研究中,生态系统服务价值核算数据多源于统计年鉴,缺少田间试验验证及不同覆盖作物种类之间的评价^[26]。尽管保护性耕作模式的生态系统服务价值和东北黑土区玉米间作模式的研究颇多,但黑土区覆盖作物与玉米间作保护性耕作模式的农田生态系统服务价值尚未明确。

本研究以东北地区覆盖作物与玉米间作的农田生态系统为对象,评价禾本科作物黑麦草(*Lolium multiflorum*)、豆科作物紫花苜蓿和毛苕子(*Vicia villosa*)与玉米间作模式的生态系统服务价值,以常规

玉米单作种植模式为对照,从环境经济学角度客观地评价覆盖作物作为保护性耕作模式引入农田的生态价值,以期为东北黑土区覆盖作物-玉米间作保护性耕作模式的实施与评价提供新的思路。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究依托位于辽宁省沈阳市苏家屯区十里河镇(41°31' N, 123°24' E)的辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站进行。该站位于辽河平原南部,平均海拔 41 m,年均降雨量 650~700 mm,年均温 7~8 °C,无霜期 147~164 d。该地区属温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。土壤类型为潮棕壤。供试土壤的基本理化性质为:有机碳 12.21 g·kg⁻¹,全氮 1.22 g·kg⁻¹,全磷 0.45 g·kg⁻¹,全钾 19.98 g·kg⁻¹,pH 值 6.43。

1.2 试验设计

本试验选取玉米作为主栽作物,供试覆盖作物选取禾本科作物黑麦草及豆科作物紫花苜蓿和毛苕子。田间试验于 2020 年 5 月开始,采用随机区组设计。试验共设置 4 个处理:玉米单作、黑麦草-玉米间作、紫花苜蓿-玉米间作、毛苕子-玉米间作。每个处理 3 次重复,每个小区面积为 40 m²,小区间设有保护行。

于 2020 年 5 月使用机械化免耕方式播种玉米,播种量为 63000 粒·hm⁻²,垄距 60 cm,种肥同播。施用复合肥(含 N 26%、P₂O₅ 12%、K₂O 17%) 750 kg·hm⁻²,相当于施 N 195 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 127.5 kg·hm⁻²。覆盖作物种植采用人工条播,不进行施肥。黑麦草、紫花苜蓿和毛苕子播种量分别为 450、540、900 kg·hm⁻²。玉米与覆盖作物间作种植面积比例为 3:1。

1.3 样品采集与测定方法

玉米植株样品于成熟期采集,划定测样小区和固定面积后,测定单位面积穗数和总秆数,称取玉米籽粒平均鲜重、籽粒含水量和各部分干重,计算玉米籽粒产量及轴穗、秸秆的干物质量。覆盖作物植株样品均于覆盖作物的初花期采集,试验年内于 7 月、9 月刈割 2 次,每次刈割留茬 10 cm 并测定全部地上生物量。

土壤样品于玉米成熟期采集,用五点法采集 0~20 cm 耕层土壤,四分法混合并去除石块和植物残茬等杂质后,过 2 mm 筛风干,用于测定土壤有机

碳、碱解氮、有效磷和速效钾含量。土壤有机碳采用元素分析仪测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵提取法测定^[27]。用环刀法测定土壤田间最大持水量和土壤容重^[27]。用静态暗箱-气相色谱法测定 CO₂、CH₄和 N₂O 浓度^[28]。

1.4 生态系统服务价值核算

覆盖作物的种植可以维系土壤健康、增加土壤有机质、保持土壤水分和提高经济作物产量,还可以增加收入、降低成本,提供额外的经济价值。覆盖作物与玉米间作种植通过改变农田生态系统作物结构进而调节土壤养分循环和温室气体排放等生态系统服务。因此,本研究从覆盖作物与玉米间作的社会与生态效益入手,选取产品供给、养分循环、气体调节和水土保持四项农田生态系统服务价值作为衡量指标,采用直接市场法、机会成本法、影子价格法和市场替代法等环境经济学方法,建立覆盖作物-玉米生态系统服务价值评估体系。具体方法如下:

1) 产品供给价值。产品供给价值是人类从农田生态系统获取的最重要的直接经济价值^[29]。覆盖作物-玉米间作模式的产品供给价值主要是投入与产出两个方面,投入方面主要包括玉米和覆盖作物的种子、肥料、人工及田间管理费用,产出方面则是玉米和覆盖作物的实际市场经济价值(表 1)。

产品供给价值选取直接市场法进行计算^[10],覆盖作物-玉米间作模式单位面积的产品供给价值如下:

$$V_p = Y_i \times P_i - P_c \quad (1)$$

表 1 产品供给价值各组成部分单价

Table 1 Unit price of each component in the product supply value

项目 Item	类别 Sort	价格 Price
投入 Input	玉米种植成本 Cost of growing maize	种子、化肥、农药及人工成本 7200 元·hm ⁻² (辽宁合作社平均价格)
	覆盖作物种子价格 Seed prices of cover crop	黑麦草 2700 元·hm ⁻² (按照实际购买价格折算,下同)
		紫花苜蓿 5400 元·hm ⁻²
		毛苕子 3600 元·hm ⁻²
产出 Output	玉米 Maize	籽粒 2560 元·t ⁻¹ (辽宁粮油贸易商收购价格)
		穗轴 300 元·籽粒万斤 ⁻¹ (辽宁粮油贸易商收购价格)
		秸秆 2700 元·hm ⁻² (秸秆作为饲料的收购价格)
	覆盖作物 Cover crop	黑麦草 1.20 元·kg ⁻¹ ^[30]
		紫花苜蓿 2.50 元·kg ⁻¹ ^[30]
		毛苕子 1.20 元·kg ⁻¹ ^[31]

式中: V_p 表示产品供给价值(元·hm⁻²); Y_i 表示第 i 种作物生物量(kg·hm⁻²); P_i 表示作物的产品市场单价(元·kg⁻¹); P_c 表示生产过程中所消耗的各项成本(元·hm⁻²)。

2) 气体调节价值。农田气体调节价值主要来源于农作物的固碳释氧和温室气体排放(N₂O 和 CH₄)。本研究主要采用影子价格法计算农田生态系统的固碳释氧价值^[32],其中,释氧价值采用造林成本法和工业制氧法,固碳价值和温室气体排放价值采用碳税法和造林成本法。

根据光合作用方程式: $6nCO_2 + 6nH_2O = nC_6H_{12}O_6 + 6nO_2$, 每积累 1.00 kg 干物质可以产生 1.19 kg O₂ 和 1.63 kg CO₂, 从而计算农田生态系统释放 O₂ 和固定 CO₂ 的量。通过玉米和覆盖作物的净初级生产力计算干物质累积量^[32]。

$$NPP_i = M \times (1 - R) / f \quad (2)$$

式中: NPP_i 表示第 i 种作物的净初级生产力(kg·hm⁻²); M 表示经济作物产量(kg·hm⁻²); R 表示玉米籽粒含水率(%); f 表示玉米经济系数, 范围为 0.25~0.40, 本研究取平均值 0.35。覆盖作物的净初级生产力由地上干物质量直接计算。

$$V_{O_2} = NPP_i \times 1.19 \times 1/2 (C_{IO} + C_{RO}) \quad (3)$$

式中: V_{O_2} 表示释氧价值(元·hm⁻²); C_{IO} 表示工业制氧法价格(0.44 元·kg⁻¹); C_{RO} 表示造林成本法价格(0.35 元·kg⁻¹)^[33]。

运用碳税法和造林成本法计算固定 CO₂ 价值和温室气体排放产生的负价值,取两种方法计算结果的均值作为固定 CO₂ 和排放温室气体的气体调节价值。

$$V_{CO_2} = NPP_i \times e \times 1.63 \times 1/2 (C_{CT} + C_{RCO_2}) \quad (4)$$

式中: V_{CO_2} 表示碳价值(元·hm⁻²); e 表示 CO₂ 中 C 含量为 27.27%; C_{CT} 表示碳税法成本(1.05 元·kg⁻¹); C_{RCO_2} 表示造林成本法计算的碳单价(0.26 元·kg⁻¹)^[34]。

运用 IPCC 的温室气体增温潜势(GWP)原理,将 N₂O 和 CH₄ 的排放量转化为 CO₂ 的排放量。在 100 年尺度下, N₂O 和 CH₄ 的 GWP 值分别是 1 kg CO₂ 的 298 和 25 倍^[35],最终用 CO₂ 的排放价值代表温室气体排放所带来的负价值。

$$GWP-CO_2 = C_{N_2O} \times 298 + C_{CH_4} \times 25 + C_{CO_2} \quad (5)$$

式中: $GWP-CO_2$ 为 N₂O、CH₄ 和 CO₂ 综合增温潜势(kg·hm⁻²); C_{N_2O} 、 C_{CH_4} 、 C_{CO_2} 分别表示 N₂O、CH₄ 和 CO₂ 的累积排放量。将所得 $GWP-CO_2$ 值代入公式(6)计算,可以得出温室气体排放价值。

$$V_{GWP-CO_2} = GWP-CO_2 \times e \times 1.63 \times 1/2 (C_{CT} + C_{RCO_2}) \quad (6)$$

式中: V_{GWP-CO_2} 为温室气体排放价值。

3) 养分循环价值。养分循环价值是对土壤中的养分进行价值估算^[36]。本研究中农田生态系统的养分循环价值以各处理土壤有机碳、碱解氮、有效磷和速效钾含量通过影子价格法进行核算。

$$W = d \times \rho \times 10^8 \quad (7)$$

式中: W 表示土壤总重量 ($kg \cdot hm^{-2}$); d 表示土壤厚度 (0.20 m); ρ 表示土壤容重 ($kg \cdot m^{-3}$)。

$$V_s = \sum W \times c_j \times P_j \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中: V_s 表示耕层土壤养分积累与循环价值 ($元 \cdot hm^{-2}$); c_j 表示耕层土壤有机碳 (或碱解氮、有效磷和速效钾含量) ($g \cdot kg^{-1}$); P_j 表示第 j 种土壤养分单价 ($元 \cdot kg^{-1}$)。

4) 水土保持价值。水土保持价值在本研究中只包括水分涵养价值:

$$V_{water} = d \times 10^8 \times MFC \times C_{water} \quad (9)$$

式中: V_{water} 表示水土保持价值中的水分涵养价值 ($元 \cdot hm^{-2}$); MFC 表示田间最大持水量 (%); C_{water} 表示水的价值 ($0.67 元 \cdot cm^{-3}$)。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 和 IBM SPSS 25.0 软件对数据进行检验和统计分析,用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法对不同处理间差异进行方差分析和多重比较 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 覆盖作物-玉米间作模式下生态系统产品供给价值

种植玉米产生的价值由玉米单位面积籽粒产量

计算得到。由表 2 可知,不同模式的玉米单位面积产量差异显著,紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米的产量显著高于黑麦草-玉米和玉米单作。单位面积玉米价值和玉米穗轴价值根据产量计算,趋势与单位面积产量一致。由于种植结构为覆盖作物与玉米 1:3 间作种植,玉米产品供给价值出现显著差异,紫花苜蓿-玉米、毛苕子-玉米和玉米单作模式的玉米产品供给价值显著高于黑麦草-玉米模式。单位面积覆盖作物价值由覆盖作物两次刈割的实际产量和单价决定。从单位面积覆盖作物产量来看,黑麦草地上生物量显著高于毛苕子和紫花苜蓿。单位面积覆盖作物价值和覆盖作物产品供给价值受到生物量的影响,表现为黑麦草-玉米模式显著高于紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米模式。综合农产品供给价值和成本,产品供给价值受到玉米产品供给价值的影响较大,表现为毛苕子-玉米和紫花苜蓿-玉米模式显著高于黑麦草-玉米模式,但与玉米单作差异不显著。

2.2 覆盖作物-玉米间作模式下生态系统气体调节价值

覆盖作物-玉米间作农田生态系统中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的含量均为田间实测值,测量时期与玉米和覆盖作物生长期同步,对玉米和覆盖作物收获后生态系统中产生的温室气体不予考虑。将玉米和覆盖作物的干物质量折算成净初级生产力来计算生态系统的固碳释氧价值,覆盖作物的净初级生产力包括两次刈割干物质量和成熟期地上干物重,不考虑杂草等不确定因素。

对不同种植模式的农田生态系统气体调节价值的计算结果表明 (表 3、表 4、表 5),覆盖作物-玉米间作模式的气体调节价值受覆盖作物种类的影响,紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米模式的玉米地上生物

表 2 不同覆盖作物-玉米间作模式的产品供给价值

Table 2 Product supply values of different cover crop-maize intercropping patterns

种植模式 Planting pattern	单位面积 玉米产量 Yield of maize per unit area ($kg \cdot$ hm^{-2})	单位面积 玉米价值 Value of maize per unit area ($元 \cdot$ hm^{-2})	单位面积玉 米穗轴价值 Value of corn cob per unit area ($元 \cdot$ hm^{-2})	单位面积玉 米秸秆价值 Value of corn stalk per unit area ($元 \cdot$ hm^{-2})	单位面积 玉米总价值 Total value of maize per unit area ($元 \cdot$ hm^{-2})	玉米产品 供给价值 Product supply value of maize ($元 \cdot$ hm^{-2})	单位面积 覆盖作物产量 Yield of cover crop per unit area ($kg \cdot$ hm^{-2})	单位面积覆盖 作物价值 Value of cover crop per unit area ($元 \cdot$ hm^{-2})	覆盖作物产 品供给价值 Product supply value of cover crop ($元 \cdot$ hm^{-2})	田间管理 费用 Field management cost ($元 \cdot$ hm^{-2})	产品供给 价值 Product supply value ($元 \cdot$ hm^{-2})
CK	11805B	31284B	708B	2700	34692B	34692A	-	-	-	7200	27492A
RM	12409B	32884B	745B	2700	36328B	27246B	7441a	8929a	2232a	6075	23403B
AM	15093A	39998A	906A	2700	43603A	32702A	2914c	7285b	1821b	6750	27774A
HM	15237A	40379A	914A	2700	43993A	32995A	5436b	6523b	1631b	6300	28326A

CK: 玉米单作 Maize monoculture; RM: 黑麦草-玉米 Ryegrass-maize; AM: 紫花苜蓿-玉米 Alfalfa-maize; HM: 毛苕子-玉米 Hairy vetch-maize. 不同大写字母表示不同模式间差异显著,不同小写字母表示不同覆盖作物间差异显著 ($P < 0.05$) Different capital letters indicated significant difference among different patterns and different lowercase letters indicated significant difference among different cover crops at 0.05 level. 玉米秸秆价值与田间管理价值为统一核算数据,未进行统计分析 Cornstalk and field management values were accounting data and not statistically analyzed. 下同 The same below.

表 3 不同覆盖作物-玉米间作模式的生物量和固碳释氧价值

Table 3 Biomass, carbon sequestration and oxygen release values of different cover crop-maize intercropping patterns

种植模式 Planting pattern	玉米地上 生物量 Aboveground biomass of maize (kg · hm ⁻²)	覆盖作物 地上生物量 Aboveground biomass of cover crop (kg · hm ⁻²)	地上生物总量 Total aboveground biomass (kg · hm ⁻²)	固碳量 Carbon sequestration (kg · hm ⁻²)	释氧量 Oxygen release (kg · hm ⁻²)	固碳价值 Carbon sequestration value (yuan · hm ⁻²)	释氧价值 Oxygen release value (yuan · hm ⁻²)
CK	29007B	—	29007A	47281A	34518A	8452A	13685A
RM	30491B	11161a	25658B	41823B	30533B	7476B	12105B
AM	37414A	4438c	29170A	47547A	34713A	8682A	13762A
HM	37440A	8154b	30119A	49094A	35841A	8776A	14210A

量显著高于黑麦草-玉米和玉米单作模式。不同覆盖作物生物量间差异显著,黑麦草生物量最高,显著高于毛苕子和紫花苜蓿。按玉米:覆盖作物=3:1种植结构计算后,紫花苜蓿-玉米、毛苕子-玉米和玉米单作模式的生物总量显著高于黑麦草-玉米模式。本研究通过不同种植模式的生物量来计算农田固碳释氧量,因此,各模式固碳量、释氧量、固碳价值和释氧价值的趋势均与生物总量一致。

温室气体排放量中,玉米单作模式的 CH₄ 排放量显著高于覆盖作物-玉米间作模式,因此,覆盖作物的种植可以减少玉米农田的 CH₄ 排放通量。玉米

表 4 不同覆盖作物-玉米间作模式的温室气体排放量与价值

Table 4 Greenhouse gas emissions and values of different cover crop-maize intercropping patterns

种植模式 Planting pattern	CH ₄ 排放量 CH ₄ emission (kg · hm ⁻²)	CO ₂ 排放量 CO ₂ emission (kg · hm ⁻²)	N ₂ O 排放量 N ₂ O emission (kg · hm ⁻²)	CO ₂ 综合 增温潜势 CO ₂ global warming potential (kg · hm ⁻²)	温室气体 排放价值 Greenhouse gas emission value (yuan · hm ⁻²)
CK	2.3A	125083A	-7.8AB	125581A	22449A
RM	1.6B	87496B	-6.8A	87801B	15695B
AM	1.5B	116590A	-9.3B	116812A	20850A
HM	1.7B	118489A	-6.3A	118849A	21245A

表 5 不同覆盖作物-玉米间作模式的气体调节价值

Table 5 Gas regulation values of different cover crop-maize intercropping patterns

种植模式 Planting pattern	固碳价值 Carbon sequestration value (yuan · hm ⁻²)	释氧价值 Oxygen release value (yuan · hm ⁻²)	温室气体 排放价值 Greenhouse gas emission value (yuan · hm ⁻²)	气体调节价值 Gas regulation value (yuan · hm ⁻²)
CK	8452A	13685A	22449A	-312A
RM	7476B	12105B	15695B	3886A
AM	8682A	13762A	20850A	1889A
HM	8776A	14210A	21245A	1740A

气体调节价值=固碳价值+释氧价值-温室气体排放价值 Gas regulation value=Carbon sequestration value + oxygen release value - greenhouse gas emissions value.

单作、紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米模式的 CO₂ 排放量显著高于黑麦草-玉米模式,可见,黑麦草间作种植可以减少农田 CO₂ 排放。N₂O 排放量在本研究中均为负值,表明玉米农田可能是 N₂O 的汇。通过增温潜势将 CH₄ 和 N₂O 排放量转化为 CO₂ 排放量,则玉米单作、紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米模式的温室气体排放价值显著高于黑麦草-玉米模式。玉米单作模式的温室气体排放价值大于其固碳释氧价值,因此,玉米单作模式的气体调节价值为负值。覆盖作物与玉米间作模式的气体调节价值高于玉米单作模式,但无显著差异。

2.3 覆盖作物-玉米间作模式下生态系统养分循环价值

根据覆盖作物-玉米间作农田生态系统土壤养分含量可以计算得到农田生态系统养分循环价值。由表 6 可知,在土壤有机碳固持方面,覆盖作物与玉米间作模式有增加土壤碳固持的潜力,覆盖作物-玉米间作模式的土壤有机碳价值均高于玉米单作模式,其中黑麦草-玉米模式的土壤有机碳价值最高,但模式间无显著差异。在土壤氮和磷养分价值方面,间作种植豆科覆盖作物具有提高氮、磷养分价值的潜力,紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米模式的氮、磷

表 6 不同覆盖作物-玉米间作模式的养分循环价值

Table 6 Nutrient cycling values of different cover crop-maize intercropping patterns

种植模式 Planting pattern	土壤有机碳 价值 Soil organic carbon value (yuan · hm ⁻²)	土壤碱解 氮价值 Soil alkaline nitrogen value (yuan · hm ⁻²)	土壤有效磷 价值 Soil available phosphorus value (yuan · hm ⁻²)	土壤速效钾 价值 Soil available potassium value (yuan · hm ⁻²)	养分循环 价值 Nutrient cycling value (yuan · hm ⁻²)
CK	56629A	1068A	97A	802A	58596A
RM	59461A	1034A	92A	757A	61344A
AM	58890A	1128A	111A	793A	60921A
HM	58456A	1095A	109A	835A	60494A

价值高于玉米单作模式。在土壤钾养分价值方面,仅毛苕子-玉米模式大于玉米单作模式,黑麦草-玉米和紫花苜蓿-玉米模式的钾养分价值与玉米单作相比均有所降低。综上,不同覆盖作物-玉米间作模式对农田养分循环价值的影响不同,覆盖作物-玉米模式的农田生态系统养分循环价值高于玉米单作模式,其中黑麦草-玉米间作模式的养分循环价值最高,但不同模式间差异不显著。

2.4 覆盖作物-玉米间作模式下生态系统水土保持价值

本研究水土保持价值只计算了水分涵养服务的生态效益。由表7可知,不同覆盖作物-玉米间作模式的水分涵养价值高于玉米单作模式,这是由于覆盖作物发达的根系改善了土壤的孔隙结构,更有利于土壤蓄水保墒^[37]。与玉米单作相比,毛苕子-玉米和黑麦草-玉米模式的水土保持价值分别提高了2.3%和1.5%,而紫花苜蓿-玉米模式降低了4.1%,但不同模式间差异均不显著。

2.5 覆盖作物-玉米间作模式下生态系统服务总价值

综合四方面的生态系统服务价值,养分循环价值在农田生态系统服务价值中占比最高,为67.3%(表8)。覆盖作物-玉米间作模式的养分循环价值

均高于玉米单作模式,但不同模式间无显著差异。其次是产品供给价值,平均占比29.3%。毛苕子-玉米间作模式的产品供给价值最高,比黑麦草-玉米模式提高了4922元·hm⁻²。覆盖作物-玉米间作模式的气体调节价值均为正值,玉米单作模式的气体调节价值为负值,即其效益为负(表5)。不同覆盖作物间作对气体调节价值的影响不同,黑麦草-玉米模式的气体调节价值高于紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米模式。黑麦草-玉米和毛苕子-玉米模式的水土保持价值高于玉米单作模式,但模式间无显著差异。覆盖作物间作对农田生态系统服务总价值有提高的趋势,黑麦草-玉米、紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米模式分别比玉米单作模式提高了3.3%、5.5%和5.6%。豆科覆盖作物-玉米间作的生态系统服务价值高于黑麦草-玉米间作,主要受产品供给价值的影响。当覆盖作物选择豆科作物时,对农田生态系统价值的增幅最大;当覆盖作物选择禾本科黑麦草时,生态系统服务价值与豆科相比有所下降,但可以提高气体调节价值。

3 讨论

东北地区黑土保护与粮食稳产并重,覆盖作物作为保护性耕作模式为用好养好黑土地提供了新的思路。本研究表明,紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米间作模式的单位面积玉米价值高于玉米单作,这与Sun等^[38]覆盖作物间作可以增加农田生态系统作物产量的研究结果相符。豆科覆盖作物间作得益于边际效应可提高主栽作物产量,伴随着产量的提高,单位面积玉米干物质量增加,种植玉米产生的产品供给价值增加。同时,覆盖作物作为牧草刈割,间作系统可以获得额外的经济价值。当覆盖作物为黑麦草时,其地上生物量较高,产生的经济价值高于紫花苜蓿和毛苕子。但在覆盖作物-玉米间作模式中,玉米实际种植面积减少,因此,覆盖作物-玉米间作的玉米部分价值均小于玉米单作。种植覆盖作物增加了牧草价值并减少了化肥和农药成本,使玉米间作模式的田间管理费用低于单作模式。综合来看,覆盖作物为紫花苜蓿和毛苕子时,玉米产量显著提高,玉米产生的部分产品供给价值较高,显著高于黑麦草-玉米间作,这主导了不同种植模式下产品供给价值的差异。

农田生态系统的气体调节价值主要分为净初级生产力提供的固碳释氧价值和土壤呼吸导致的温室气体排放价值两部分。覆盖作物作为现代农业生态

表7 不同覆盖作物-玉米间作模式的水土保持价值
Table 7 Soil and water conservation values of different cover crop-maize intercropping patterns

种植模式 Planting pattern	土壤田间最大持水量 Soil maximum field capacity (%)	水土保持价值 Soil and water conservation value (yuan · hm ⁻²)
CK	43.4A	582A
RM	44.0A	590A
AM	41.6A	558A
HM	44.4A	595A

表8 不同覆盖作物-玉米间作模式的生态系统服务价值
Table 8 Ecosystem service values of different cover crop-maize intercropping patterns

种植模式 Planting pattern	产品供给价值 Product supply value (yuan · hm ⁻²)	气体调节价值 Gas regulation value (yuan · hm ⁻²)	养分循环价值 Nutrient cycling value (yuan · hm ⁻²)	水土保持价值 Soil and water conservation value (yuan · hm ⁻²)	生态系统服务总价值 Total ecosystem service value (yuan · hm ⁻²)
CK	27492A	-312A	58596A	582A	86358A
RM	24528B	3887A	61344A	590A	89224A
AM	29544A	1889A	60921A	558A	91142A
HM	29576A	1740A	60494A	595A	91155A

系统的组成部分影响着温室气体的排放^[20]。本研究结果表明,旱田仍然是 CO₂ 和 N₂O 的源,玉米与覆盖作物的种植固定了部分碳,但温室气体负价值是影响气体调节价值的主要原因。黑麦草-玉米间作减少了甲烷和二氧化碳气体的累积排放量,这是因为黑麦草的地上生物量大。唐艺玲等^[39] 研究表明,豆科作物与玉米间作可以减少温室气体的产生并增加相应的环境效益。在本研究中,与玉米单作相比,豆科覆盖作物间作种植的温室气体综合增温潜势和排放价值呈降低趋势,而黑麦草-玉米间作与豆科作物-玉米间作相比减少了二氧化碳的累积排放量。因此,在温室气体减排方面,禾本科覆盖作物优于豆科。在气体调节价值方面,种植覆盖作物有增加气体调节价值的趋势,覆盖作物为禾本科作物产生的气体调节价值高于豆科作物。

种植覆盖作物可以提高土壤碳截获能力,改善碳输入与输出平衡^[40]。覆盖作物间作可以显著提高土壤有机碳含量^[41]。本研究发现,种植覆盖作物可以增加土壤有机碳养分循环价值。覆盖作物种类不同,其固碳能力不同,对碳循环的影响程度不同。豆科覆盖作物因具有固氮能力,可以提高土壤氮含量^[42]。本研究中,紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米的氮循环价值高于玉米单作,可能是因为豆科作物的种间竞争增强了豆科作物固氮能力,同时可为禾本科植物供氮^[43]。Maltais-Landry 等^[44] 研究表明,覆盖作物耕作体系下在短期内豆科作物对土壤磷含量无显著影响,这与本研究结果一致。毛苕子-玉米间作提供了更高的钾循环价值,但紫花苜蓿-玉米间作钾循环价值减少,这与包耀贤等^[45] 的研究结果不同,地理环境和土壤性质不同是导致研究结果差异的主要原因。任静等^[20] 研究表明,毛苕子与玉米间作较玉米单作可以提供更高的土壤养分循环价值,这与本研究中相比玉米单作覆盖作物-玉米间作模式的养分循环价值增加的结果一致,表明种植禾本科和豆科覆盖作物有利于提高农田养分循环价值。

种植覆盖作物可改善土壤团聚体结构,提高土壤水分和孔隙度^[46],从而提高土壤水的截获能力,减少水土流失^[47]。紫花苜蓿与玉米间作可增加土壤孔隙,提高降水入渗率和保水效益^[48]。毛苕子与萝卜混播种植模式下根系穿透压实土壤的能力比紫花苜蓿更强^[49]。毛苕子与玉米间作模式的水分涵养价值高于玉米单作^[20]。在本研究中,不同覆盖作物-玉米间作模式的水土保持价值与玉米单作相比无显著差异,这可能是因为覆盖作物的种植时间较

短。Blanco-Canqui 等^[47] 研究表明,毛苕子为覆盖作物时种植 3 年的饱和导水率无显著差异,而种植 17 年导水性显著增加。本研究覆盖作物有增加水土保持价值的趋势,随着试验年限的增加,这种趋势可能更明显。

综上所述,与玉米单作相比,覆盖作物-玉米间作模式的生态系统服务价值更高。不同种类的覆盖作物对生态系统服务价值的影响不同。养分循环价值在生态系统服务价值中占比最大,与玉米单作相比,覆盖作物-玉米间作模式养分循环价值均有所增加,说明覆盖作物种植促进了生态系统养分循环。紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米模式的产品服务价值大于玉米单作,表明豆科覆盖作物与玉米间作增加了主栽作物玉米的产量。在气体调节价值方面,覆盖作物-玉米间作模式均高于玉米单作,其中黑麦草-玉米间作模式气体调节价值的增幅最大。与玉米单作相比,种植覆盖作物黑麦草和毛苕子与玉米间作具有提高水土保持价值的潜力。本研究的覆盖作物-玉米间作农田生态系统服务价值多以实测值为基础,可以定量评价东北黑土区保护性耕作模式的环境经济效益。但本研究也存在局限性,对覆盖作物与玉米间作的保护性耕作农田生态系统服务价值的评估尚不全面,例如,农田生态系统附加的社会价值以及覆盖作物间作产生的生物多样性服务价值未予考虑,在水土保持价值等方面仍有评估空间。

4 结 论

本研究运用生态系统服务价值理论,基于覆盖作物保护性耕作技术模式,初步评价了东北黑土区覆盖作物-玉米间作农田生态系统服务价值。将覆盖作物-玉米间作的生态系统服务价值分为产品供给、气体调节、养分循环和水土保持价值 4 个方面,以环境经济学方法对覆盖作物保护性耕作技术模式进行效益分析。产品供给价值作为直接经济价值占生态系统服务价值的 29.3%。气体调节价值、养分循环价值和水土保持价值作为间接经济价值在系统中占比更高。紫花苜蓿-玉米和毛苕子-玉米间作模式的产品服务价值显著高于黑麦草-玉米模式。在覆盖作物-玉米间作系统中,种植覆盖作物的生态系统服务价值均高于玉米单作,其中毛苕子-玉米间作的农田生态系统服务价值最高。本研究为东北黑土区覆盖作物保护性耕作模式的生态效益评估提供了数据支撑,有利于进一步完善覆盖作物保护性耕作技术体系,为东北黑土区保护性耕作模式的研发与

应用提供参考依据。

参考文献

- [1] 李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全. 中国科学院院刊, 2021, **36**(10): 1184-1193
- [2] 蔡红光, 刘剑钊, 梁尧, 等. 玉米秸秆全量条带覆盖还田耕作技术模式生产实证. 玉米科学, 2022, **30**(1): 115-122
- [3] 杨雅丽, 马雪松, 解宏图, 等. 保护性耕作对土壤微生物群落及其介导的碳循环功能的影响. 应用生态学报, 2021, **32**(8): 2675-2684
- [4] 隋鑫, 霍海南, 鲍雪莲, 等. 覆盖作物的种植现状及其对下茬作物生长和土壤环境影响的研究进展. 应用生态学报, 2021, **32**(8): 2666-2674
- [5] Singh J, Ale S, DeLaune PB, *et al.* Modeling the impacts of cover crops and no-tillage on soil health and cotton yield in an irrigated cropping system of the Texas Rolling Plains. *Field Crops Research*, 2022, **87**: 108661
- [6] Mendis SS, Udawatta RP, Anderson SH, *et al.* Effects of cover crops on soil moisture dynamics of a corn cropping system. *Soil Security*, 2022, **8**: 100072
- [7] Rodriguez-Ramos JC, Scott N, Marty J, *et al.* Cover crops enhance resource availability for soil microorganisms in a pecan orchard. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022, **337**: 108049
- [8] Van Eerd LL, Chahal I, Peng YJ, *et al.* Influence of cover crops at the four spheres: A review of ecosystem services, potential barriers, and future directions for North America. *Science of the Total Environment*, 2023, **858**: 159990
- [9] Li P, Zhang HJ, Deng JJ, *et al.* Cover crop by irrigation and fertilization improves soil health and maize yield: Establishing a soil health index. *Applied Soil Ecology*, 2023, **182**: 104727
- [10] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展. 资源科学, 2001, **23**(6): 5-9
- [11] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253-260
- [12] Dardonville M, Legrand B, Clivot H, *et al.* Assessment of ecosystem services and natural capital dynamics in agroecosystems. *Ecosystem Services*, 2022, **54**: 101415
- [13] 李青梅, 王华玲, 张玲玲, 等. 白三叶草和鼠茅草对果园土壤微生物和线虫群落的影响差异. 植物营养与肥料学报, 2021, **27**(6): 1055-1067
- [14] 唐海明, 肖小平, 李超, 等. 冬季覆盖作物秸秆还田对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响. 生态学报, 2018, **38**(18): 6559-6569
- [15] 董红芬, 李洪, 霍成斌, 等. 覆盖作物在玉米/大豆间作模式中的效应分析. 玉米科学, 2019, **27**(3): 95-101
- [16] 李向东, 陈尚洪, 陈源泉, 等. 四川盆地稻田多熟高效保护性耕作模式的生态系统服务价值评估. 生态学报, 2006, **26**(11): 3782-3788
- [17] 李福夺, 尹昌斌. 南方稻区绿肥生态服务功能及生态价值评估研究. 中国生态农业学报, 2019, **27**(2): 327-336
- [18] 普燕爽, 陈建军, 祖艳群, 等. 洱海流域不同种植模式稻田生态系统服务价值评估. 农业资源与环境学报, 2022, **39**(5): 958-966
- [19] 周志明, 张立平, 曹卫东, 等. 冬绿肥-春玉米农田生态系统服务功能价值评估. 生态环境学报, 2016, **25**(4): 597-604
- [20] 任静, 李福夺, 尹昌斌, 等. 西北河西灌溉区春玉米-绿肥农田生态系统服务功能价值评估. 新疆大学学报: 自然科学版, 2022, **39**(1): 59-66
- [21] Daryanto S, Fu BJ, Wang LX, *et al.* Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Reviews*, 2018, **185**: 357-373
- [22] 李艳君. 施磷和玉米/苜蓿间作对东北农牧交错带土壤有机碳和全氮储量的影响. 硕士论文. 长春: 东北师范大学, 2021
- [23] 赵伟, 郝帅, 孙泰朋, 等. 粮草间作培肥处理对黑土土壤有机碳含量的影响. 江苏农业科学, 2017, **45**(7): 277-280
- [24] 袁洋, 董奇琦, 贾佩岩, 等. 间作下不同肥料对玉米花生生长发育、氮代谢及产量的影响. 沈阳农业大学学报, 2022, **53**(2): 129-139
- [25] Li HJ, Stomph TJ, Makowski D, *et al.* The productive performance of intercropping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, **120**: e2201886120
- [26] 张东, 李晓赛, 陈亚恒. 怀来县农田生态系统服务价值分类评估. 水土保持研究, 2016, **23**(1): 234-239
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [28] 杨弘, 何红波, 张威, 等. 秸秆还田对农田棕壤氧化亚氮排放动态的影响. 土壤通报, 2016, **47**(3): 660-665
- [29] 谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展. 中国生态农业学报, 2013, **21**(6): 645-651
- [30] 张林, 陈燕萍, 王婧泽, 等. 饲料油菜与牧草的优势比较研究. 耕作与栽培, 2021, **41**(5): 27-31
- [31] 卢秉林, 包兴国, 张久东, 等. 河西绿洲灌区玉米与绿肥间作模式对作物产量和经济效益的影响. 中国土壤与肥料, 2014(2): 67-71
- [32] 欧阳志云, 赵同谦, 赵景柱, 等. 海南岛生态系统生态调节功能及其生态经济价值研究. 应用生态学报, 2004, **15**(8): 1395-1402
- [33] 盛婧, 陈留根, 朱普平. 稻麦轮作农田生态系统服务功能价值评估. 中国生态农业学报, 2008, **16**(6): 1541-1545
- [34] 薛达元, 包浩生, 李文华. 长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估. 中国环境科学, 1999, **19**(3): 247-252
- [35] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 151
- [36] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, **33**(21): 6747-6761

- [37] 王明亮, 刘惠芬, 王丽丽, 等. 不同覆盖作物模式对茶园土壤微生物群落功能多样性的影响. 农业资源与环境学报, 2020, **37**(3): 332-339
- [38] Sun BR, Peng Y, Yang HY, *et al.* Alfalfa (*Medicago sativa* L.)/maize (*Zea mays* L.) intercropping provides a feasible way to improve yield and economic incomes in farming and pastoral areas of northeast China. *PLoS One*, 2017, **9**(10): e110556
- [39] 唐艺玲, 王建武, 杨文亨. 间作对旱地 CO₂ 和 N₂O 排放影响的研究进展. 应用生态学报, 2016, **27**(4): 1323-1330
- [40] Ghimire R, Ghimire B, Mesbah AO, *et al.* Soil health response of cover crops in winter wheat-fallow system. *Agronomy Journal*, 2019, **111**: 2108-2115
- [41] Boselli R, Fiorini A, Santelli S, *et al.* Cover crops during transition to no-till maintain yield and enhance soil fertility in intensive agro-ecosystems. *Field Crops Research*, 2020, **255**: 107871
- [42] Ofosu-Budu KG, Fujita K, Gamo T, *et al.* Dinitrogen fixation and nitrogen release from roots of soybean cultivar bragg and its mutants Nts1116 and Nts1007. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1993, **39**: 497-506
- [43] Zhao YJ, Liu XJ, Tong CC, *et al.* Effect of root interaction on nodulation and nitrogen fixation ability of alfalfa in the simulated alfalfa/triticale intercropping in pots. *Scientific Reports*, 2020, **10**: 4269
- [44] Maltais-Landry G, Scow K, Brennan E. Soil phosphorus mobilization in the rhizosphere of cover crops has little effect on phosphorus cycling in California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **78**: 255-262
- [45] 包耀贤, 徐明岗, 赵志强, 等. 乌兰布和沙区绿洲农田土壤钾素特征及其对土壤性质的响应. 西北农业学报, 2011, **20**(8): 168-174
- [46] Blanco-Canqui H, Shapiro CA, Wortmann CS, *et al.* Soil organic carbon: The value to soil properties. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **68**: 129-134
- [47] Blanco-Canqui H, Shaver TM, Lindquist JL, *et al.* Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 2015, **107**: 2449-2474
- [48] 成婧, 吴发启, 路培, 等. 玉米苜蓿间作的蓄水保土效益试验研究. 水土保持研究, 2012, **19**(3): 54-57
- [49] 严磊, 张中彬, 丁英志, 等. 覆盖作物根系对砂姜黑土压实的响应. 土壤学报, 2021, **58**(1): 140-150

作者简介 巴晓博, 女, 1996 年生, 硕士。主要从事覆盖作物及土壤微生物学研究。E-mail: Baxbbb@126.com

责任编辑 张凤丽