黑土坡耕地玉米-覆盖作物间作模式的水土保持与生态经济效益

谢昱昀[1,2,3], 牛 彪[4], 刘帅康[4], 王仕稳[1,4], 殷俐娜[1,4]

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]探究适宜东北黑土区坡耕地的保护性耕作措施,系统评价玉米单作及玉米-紫云英、玉米-菘蓝间作模式的水土保持效益、养分流失阻控能力和经济效益,为黑土区坡耕地农业的可持续发展提供理论依据和技术支撑。[方法]在黑龙江省克山县典型黑土区坡耕地设置定位试验,设立玉米单作(CT)、玉米-紫云英间作(G_1)和玉米-菘蓝间作(G_2)3种处理,通过为期2 a(2023—2024年)的径流小区观测,测定地表径流、土壤侵蚀及养分流失动态,并结合成本-收益分析评估其经济效益。[结果]①与CT相比,G_1和G_2处理可显著降低径流量57.74%~59.92%,减少土壤侵蚀模数80.49%~80.84%。②两种间作模式显著降低了径流中总氮与总磷的流失总量,并改变了氮、磷流失的形态途径,从以泥沙结合态为主转向以径流溶解态为主。③紫云英间作(G_1)在显著提高玉米籽粒产量(9.9%~12.7%)的同时,保持了全面且均衡的生态效益;菘蓝间作(G_2)虽对产量无显著影响,但在土壤结构改良与侵蚀控制方面具有更好的稳定性。[结论]玉米-紫云英间作(G_1)模式更适合以增产兼顾水土保持为目标的区域,玉米-菘蓝间作(G_2)模式则适用于以防治水土流失为主要导向的区域。在东北黑土区推广玉米-覆盖作物间作系统,是同步提升水土保持能力,有效防治养分流失以及提高农业经济效益的可行技术途径。

关键词: 覆盖作物间作; 水土保持; 经济效益; 土壤侵蚀; 东北黑土区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0032-12 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 谢昱昀, 牛彪, 刘帅康, 等.黑土坡耕地玉米-覆盖作物间作模式的水土保持与生态经济效益[J].水土保持通报,2026,46(5):32-43. Xie Yuyun, Niu Biao, Liu Shuaikang, et al. Soil and water conservation and ecological and economic benefits of maize-cover crop intercropping systems in sloping Mollisol farmland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):32-43.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.022 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.022**

Soil and water conservation and ecological and economic benefits of maize-cover crop intercropping systems in sloping Mollisol farmland

Xie Yuyun[1,2,3], Niu Biao[4], Liu Shuaikang[4], Wang Shiwen[1,4], Yin Lina[1,4]

(1.*State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 4.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] The soil and water conservation benefits, nutrient-loss mitigation capacity, and economic performance of maize monocropping and maize intercropping with different cover crops (*Astragalus sinicus* and *Isatis indigotica*) were systematically evaluated in order to identify suitable conservation practice systems for sloping farmland in the Mollisol region of northeast China, thereby providing a theoretical basis and technical

收稿日期:2026-02-01 **修回日期:**2026-03-17 **采用日期:**2026-03-21

资助项目:国家重点研发计划项目"黑土地农用土壤质量退化对作物产量降低的作用机制"(2022YFD1500102); 中国科学院战略性先导科技专项"黑土地土壤复合侵蚀过程与阻控关键技术"(XDA28010201)

第一作者:谢昱昀(2001—),男(汉族),福建省泉州市人,硕士研究生,研究方向为农业生态。Email:xieyuyun23@mails.ucas.ac.cn。

通信作者:殷俐娜(1980—),女(汉族),黑龙江省佳木斯市人,副研究员,博士生导师,主要从事植物生理与栽培方面的研究。Email:linayin@nwsuaf.edu.cn。

support for the sustainable development of agriculture on sloping farmland in this region. [Methods] A fixed-site field experiment was established at a representative sloping farmland site in Keshan County, Heilongjiang Province, within the Mollisol region, including three cropping systems: maize monocropping (CT), maize-*A. sinicus* intercropping (G_1), and maize-*I. indigotica* intercropping (G_2). During the 2023—2024 experimental period, surface runoff, soil erosion, and nutrient-loss dynamics were monitored via runoff plots. Moreover, a cost-benefit analysis was carried out to evaluate the economic benefits of each system. [Results] ① Compared with maize monocropping, both maize-*A. sinicus* intercropping and maize-*I. indigotica* intercropping led to a significant decrease in surface runoff by 57.74%—59.92%. They also significantly reduced the soil erosion rate by 80.49%—80.84%. ② Both intercropping systems significantly reduced total nitrogen and total phosphorus losses in surface runoff and altered nutrient-loss pathways, shifting from predominantly sediment-associated forms to dissolved forms in runoff water. ③ Maize-*A. sinicus* intercropping significantly increased maize grain yield by 9.9%—12.7% while maintaining comprehensive and balanced ecological benefits, whereas maize-*I. indigotica* intercropping showed no significant effect on grain yield but exhibited greater stability in improving soil structure and controlling soil erosion. [Conclusion] Maize-*A. sinicus* intercropping is suitable for regions that prioritize yield improvement and, at the same time, maintain soil and water conservation, whereas maize-*I. indigotica* intercropping is more appropriate for regions primarily focused on soil erosion control. Overall, the promotion of maize – cover crop intercropping systems in the Mollisol region of northeast China represents a feasible technical approach for simultaneously enhancing soil and water conservation, mitigating nutrient losses, and improving agricultural economic benefits.

Keywords: cover crop intercropping; soil and water conservation; economic benefits; soil erosion; Mollisol region of northeast China

东北黑土区是中国重要的商品粮生产基地,在国家粮食安全战略中具有重要地位[1-2]。然而,高强度的农业活动和不合理的耕作方式造成了严重的水土流失问题[3-4]。研究表明,黑土区土层厚度年均下降 0.3～2 mm[5],其中坡耕地黑土厚度年均下降可达 1.7 mm[6-7]。水土流失不仅影响土壤结构和土壤肥力,还直接影响了该地区农业和生态环境的可持续性。据统计,黑土区因水土流失减少的作物产量约占区域总产量的10.3%[8]。

东北黑土区坡耕地多采取翻耕、顺坡垄作为主要耕种方式,这也进一步导致土壤侵蚀加剧。针对这一现状,已有的研究[9]以横坡垄作、秸秆还田为代表的耕作措施进行侵蚀防治。横坡垄作能够缓解坡耕地水土流失、保持产量,但长期而言,无法改变坡耕地缺乏植被覆盖,土壤结构退化所导致的侵蚀风险[10]。而秸秆还田能够增加地表覆盖,改良土壤,但由于秸秆覆盖降低土壤温度影响作物出苗,在东北地区易造成作物产量减少[11]。要实现黑土区坡耕地可持续发展,需要引入能够提高土壤抗侵蚀力,提升土壤养分的生物措施,而覆盖作物间作则是其中的典型代表。覆盖作物间作是一种保护性耕作措施,指在主要作物生长期间,于行间或裸地同步种植特定植物。覆盖作物间作能够形成连续的植被覆盖,从而在时间和空间上减少土壤裸露,有效解决坡耕地水土流失问题[12]。同时,覆盖作物间作能够有效提高土壤有机质含量、改善土壤结构,进而有效解决耕作措施影响导致的减产问题[13-15]。理论上,覆盖作物间作在黑土区坡耕地水土保持中也具有较好的应用前景。

试验在前期通过大量植物筛选,初步选定紫云英和菘蓝作为适于黑土坡耕地玉米顺坡垄作的间作植物,并初步研究表明这些覆盖作物间作能够在维持玉米产量的同时,一定程度上减缓水土流失[16-17]。但是黑土坡耕地顺坡垄作玉米-覆盖作物(紫云英和菘蓝)间作耕作模式减少水土流失,减少养分流失及提升地力等实际效果尚需要进一步充分验证。而结合覆盖作物成本,探究覆盖作物间作模式能否提高经济效益,则需进一步研究。

综上所述,本研究旨在通过定位试验,探究玉米与两种适宜的覆盖作物间作对水土保持的影响,从玉米产量、降雨侵蚀、土壤养分、土壤结构等角度阐释玉米-覆盖作物间作系统对东北黑土区坡耕地水土保持和作物生产的影响,并评估不同间作模式相较于传统玉米单作模式的经济效益,以期为黑土区坡耕地农业的可持续生产提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究于黑龙江省齐齐哈尔市克山县(47°50′51″—

48°33′47″N,125°10′57″—126°08′18″E)开展为期2 a(2023—2024年)的定位试验。该地区属于典型黑土区域,样地平均坡度为5°,黑土土层平均厚度大于60 cm,土壤质地以粉壤土为主。气候类型为温带大陆性季风气候,年平均气温为3.0 ℃,年降水量为514.9 mm,降雨主要集中在6—8月。

1.2 试验设计

为筛选适宜黑土坡耕地玉米间作的覆盖作物,研究前期已开展大量植物适应性筛选工作,初步证实紫云英和菘蓝在该区域具有一定的生态适应性,在与玉米间作模式下能够维持产量,并一定程度上减少水土流失[17]。基于此,本研究共设3个处理:传统耕作(CT)、玉米-紫云英间作(G_1)、玉米-菘蓝间作(G_2)。试验采用随机区组设计,每个处理重复3次,共划分9个标准试验小区,每个小区宽3.9 m,长20 m。小区四周围设0.25 m宽的镀锌铁板,铁板深埋10 cm,且小区间设1 m宽走道。覆盖植物在玉米收获后次年春季翻压还田。为收集侵蚀性降雨期间的径流泥沙,各小区坡底出口处布设收集装置,将径流泥沙导入集流桶中用于后续分析。小区内采用当地常用的顺坡垄作模式,垄距65 cm,垄丘顶宽20 cm,垄高15 cm。玉米品种选用"郑单958",垄上种植株距10 cm,种植密度为7.00×10^4 株/hm^2。紫云英和菘蓝作为覆盖作物,播量分别为30 kg/hm^2,20 kg/hm^2,垄间播种,播宽10 cm[17]。试验中所有处理的施肥方式与时期均保持一致。翻耕时,将复合肥(500 kg/hm^2)作为基肥一次性施入,折合N 75 kg/hm^2,P_2O_5 75 kg/hm^2,K_2O 75 kg/hm^2。玉米拔节期追施尿素300 kg/hm^2,折合氮含量为138 kg/hm^2。田间管理方面,于玉米三叶期进行人工除草1次。其他生长阶段不进行施肥及人工除草。

1.3 玉米产量、产量构成要素及利润测定

于玉米收获期,在各试验小区内避开边行以减少边际效应的影响,沿着小区长方向从距离小区一端1 m处开始,通过随机数表法选择3行3 m长的样段,合计9个样段,用于调查单位面积穗数。每个处理不同样段随机选取10个玉米穗,合计90个样本,测定穗行数、穗粒数和千粒重等产量构成要素。同时,在各处理内随机选取3个面积为1 m^2的样区,采收全部果穗,待籽粒含水量降至14%后统一脱粒、称重,折算为单位面积实际产量。通过在小区内多点随机布设样区并重复测定,可有效降低局部空间差异对产量估计的影响,提高样地统计结果的代表性。最后根据测得的实际产量,结合当地发展改革委公布的收购价格计算得到总产值,并综合生产过程中产生的肥料、除草剂、机械、人工等投入成本,计算得到实际利润。

1.4 侵蚀指标测定

降雨数据由试验区小型气象站(ONSETHOBO U30-NRC, Onset Computer Corporation, Bourne, MA)记录。气象站每1 min记录1次降雨量,精度为0.2 mm。根据降雨数据计算降雨持续时间、总降水量、平均降雨强度及最大降雨强度等指标,并以最大30 min降雨强度(I_{30})和降雨侵蚀力(EI_{30})作为侵蚀性降雨的衡量指标。

试验径流量和土壤侵蚀量通过集流桶法测定。降雨结束后,径流样品通过收集装置导入水箱进行分析。样品经过澄清处理后,取上层径流液进行养分含量测定。土壤侵蚀量(SLR)和径流量(RD)计算公式为

$$\mathrm{RD}=10^{-3}\times\frac{W-D}{\rho\cdot L\cdot W} \tag{1}$$

$$\mathrm{SLR}=\frac{D}{L\cdot W} \tag{2}$$

式中:W,D分别为径流样品和泥沙样品的重量;ρ为水密度;L,W分别为小区的长度和宽度。

径流液中的总氮浓度采用凯氏定氮法测定,总磷浓度采用分光光度计法测定。收集的泥沙样品则经过风干、研磨过筛处理后,采用相同仪器与方法测定全氮和全磷含量。

1.5 土壤指标测定

于玉米收获期通过五点取样法确定试验区土壤采样点,用土钻采集各点0—10 cm,10—20 cm和20—40 cm土层土样,每个处理设置3次重复,共采集45份不同深度的土壤样品,通过多点取样与重复设置减小试验区内空间异质性对土壤特征的影响,提高样品对处理条件的代表性。采集后的土样分别过1和0.149 mm筛后测定全氮、全磷含量。其中,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗分光光度法测定。同一时期,于各小区内挖掘土壤剖面,使用环刀法采集垄沟表层原状土样,用于测定土壤物理性质。土壤容重、田间持水量、饱和持水量、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均采用环刀法测定[13,18]。在收获期采集0—20 cm土层的原状土样,风干后沿土块自然孔隙掰开并过10 mm筛,作为土壤团聚体特征测定样品。土壤机械稳定性团聚体通过干筛法测定,通过电动振筛仪将样品分级。土壤水稳定性团聚体通过湿筛法测定,样品用土壤团粒分析仪进行湿筛,分成多个粒级并称重记录。为评价不同处理对土壤团聚体稳定性的影响,试验结合已有研究选取

大团聚体比例($R_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、土壤团聚体破坏率(PAD)等指标进行综合分析[19]。其中大团聚体比例($R>0.25$)为干筛和湿筛中大于0.25 mm的团聚体比例,能够直接体现土壤结构稳定性;而MWD和GMD是反映土壤团聚体粒径分布状况的代表性指标,计算公式[20]为

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}x_i w_i \tag{3}$$

$$\mathrm{GMD}=\exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i}\right) \tag{4}$$

式中:x_i为第i粒级团聚体的平均直径(mm);w_i为第i粒级团聚体质量百分数(%)。

土壤团聚体破坏率(PAD,%)能够表征团聚体在水作用下的稳定性,其计算公式如下:

$$\mathrm{PAD}=\frac{\mathrm{WSA_{dry}}-\mathrm{WSA_{wet}}}{\mathrm{WSA_{dry}}} \tag{5}$$

式中:$\mathrm{WSA_{dry}}$, $\mathrm{WSA_{wet}}$分别为干筛和湿筛中土壤大团聚体比例。

土壤分形维数(D)的计算根据分形维数公式:

$$(3-D)\lg\left(\frac{x_i}{x_{\max}}\right)=\lg\left[\frac{W_{d<x_i}}{W}\right] \tag{6}$$

式中:$\lg\left[W_{d<x_i}/W\right]$, $\lg(x_i/x_{\max})$为纵、横坐标,$(3-D)$为曲线的斜率,D可用回归分析方法得到。x_i为第i粒级团聚体的平均直径(mm);$x_{\max}$为最大粒级团聚体平均直径;$W_{d<x_i}$, W分别为平均直径大于x_i的土粒质量和各级土粒质量之和。

土壤可蚀性因子(K)反映土壤抵抗外部侵蚀的抗破坏能力

$$K=7.954\times\left\{0.001\,7+0.049\,4\times\exp\left[-0.5\times\left(\frac{\lg\mathrm{GMD}+1.67}{0.698\,6}\right)^2\right]\right\} \tag{7}$$

1.6　数据分析方法

所有试验数据的整理和分析均使用R(4.3)和SPSS 22.0软件(IBM Company, Chicago, IL, USA)进行。数据的正态性检验采用Shapiro-Wilk检验,方差齐性检验则采用Levene检验。如果数据符合正态分布和方差齐性要求,采用单因素方差分析(ANOVA)进行处理间差异的检验。为了进一步分析不同处理间的显著性差异,采用Tukey HSD法进行多重比较分析,显著性水平设定为$p<0.05$,判定各处理之间是否存在显著差异。

在所有统计分析中,数据的处理与绘制均在R语言中进行。具体而言,通过R包(ggplot2和dplyr)对数据进行整理、转换和可视化分析,以生成相关统计图表。此外,通过R语言与GraphPad Prism软件进行图形绘制。

2　结果与分析

2.1　玉米-覆盖作物间作对玉米产量因素的影响

表1为2023与2024年度玉米-覆盖作物间作对玉米产量及其构成因素的影响。2 a试验结果表明,与单作对照(CT)相比,间作紫云英(G_1)处理的玉米籽粒产量提高了9.9%~12.7%;而间作菘蓝(G_2)处理的产量与CT无显著差异。在产量构成因素方面,各处理间的穗数均未呈现显著差异。千粒重方面,G_1处理较CT显著提高了4.5%~10.2%,而G_2处理对千粒重及穗粒数均无显著影响。

表1　覆盖作物间作对玉米产量及构成因素的影响

Table 1　Effects of cover crop intercropping on maize yield and yield components

年份	处理	产量构成因素			籽粒产量/(kg·hm^{-2})
		穗数/(穗·hm^{-2})	穗粒数(粒/穗)	千粒重/g	
2023	CT	66 730.16^{a}	398.71^{ab}	249.41^{b}	8 488.32^{b}
	G_1	67 546.22^{a}	396.89^{b}	274.95^{a}	9 567.79^{a}
	G_2	65 775.77^{a}	410.15^{a}	236.57^{c}	8 567.44^{b}
2024	CT	69 345.77^{a}	484.29^{b}	301.57^{b}	9 572.39^{b}
	G_1	69 371.54^{a}	519.92^{a}	315.13^{a}	10 524.75^{a}
	G_2	69 213.57^{a}	482.97^{b}	313.06^{a}	9 714.67^{b}
Mean	CT	68 037.96^{a}	441.50^{a}	275.49^{a}	9 030.35^{b}
	G_1	68 458.88^{a}	458.40^{a}	295.04^{a}	10 046.27^{a}
	G_2	67 494.67^{a}	446.56^{a}	274.82^{a}	9 141.06^{ab}

注:数据为平均值;同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$),相同字母表示差异不显著。CT, G_1, G_2分别表示玉米单作、玉米-紫云英间作和玉米-菘蓝间作3种处理。下同。

2.2　玉米-覆盖作物间作的侵蚀阻控

表2为2023—2024年度试验期间的侵蚀性降雨事件及其特征。2 a共监测到26次侵蚀性降雨,其中2023年14次,2024年12次。2023年总降雨量382.3 mm,累计降雨历时286.7 h,平均雨强0.7~21.6 mm/h,单次降雨能量2.85~28.69 kJ,最大30分钟雨强(I_{30})为4.78~21.6 mm/h,降雨主要集中于8—9月(占总量71.4%)。2024年总降雨量降至333.4 mm,降雨历时70 h,而雨强范围(1.69~30.69 mm/h)、降雨能量(5.72~129.51 kJ)及I_{30}(2.2~22.8 mm/h)均高于2023年,降雨主要出现在6—8月(占总量>90%)。

综上所述，2024年虽然总降雨量减少，但短时强降雨增多，降雨强度与能量显著提高，表明年际间降雨侵蚀力呈增强趋势。

表2 研究区2023—2024年侵蚀性降雨及降雨特征
Table 2 Erosive rainfall events and their characteristics in study area from 2023 to 2024

日期	次降雨量/mm	时长/h	降雨强度/(mm·h^{-1})	降雨能量/kJ	最大30 min强度(I_{30})/(mm·h^{-1})
20230525	13.04	18.67	0.70	2.85	4.78
20230624	15.44	19.50	0.79	3.67	6.46
20230723	49.40	30.50	1.61	18.97	10.80
20230803	32.00	45.17	0.71	7.06	5.20
20230811	34.80	22.00	1.58	13.15	11.20
20230815	10.80	0.50	21.60	23.53	21.60
20230816	13.40	9.66	1.39	4.63	13.20
20230818	12.00	8.67	1.38	4.15	8.80
20230821	12.80	13.33	0.96	3.46	4.80
20230829	45.80	44.83	1.02	12.92	8.40
20230915	18.80	14.00	1.34	6.37	9.60
20230918	55.00	21.50	2.56	28.69	19.20
20230924	16.00	14.50	1.10	4.75	8.80
20231003	33.40	20.33	1.64	12.95	7.60
20240606	9.60	2.25	4.27	7.05	5.60
20240611	8.20	1.58	5.18	6.86	3.60
20240613	38.00	16.91	2.25	18.17	6.20
20240629	13.80	1.75	7.89	15.30	5.20
20240707	35.80	1.16	30.69	98.67	22.80
20240804	115.80	14.50	7.99	129.51	15.80
20240807	46.20	3.58	12.89	71.22	21.80
20240811	9.40	2.91	3.22	5.72	4.60
20240821	18.60	8.33	2.23	8.85	3.00
20240824	13.80	4.92	2.80	7.66	2.80
20240830	14.00	6.08	2.30	6.80	2.20
20240919	10.20	6.03	1.69	9.45	3.20

试验表明，2023—2024年玉米覆盖作物间作系统对地表径流与土壤侵蚀具有显著抑制作用（表3）。与CT相比，G_1和G_2处理的径流总量分别降低53.07%～69.20%和54.56%～73.10%，径流系数降幅约8%～17%。同时，间作处理显著降低了土壤侵蚀模数，G_1和G_2较CT降幅分别为76.36%～83.42%和77.13%～88.74%。年际间变化显示，2024年径流系数降幅高于2023年，进一步说明覆盖作物在强降雨年份仍具备较好的径流调控能力。

表4—5为2023—2024年玉米-覆盖作物间作对总氮、总磷流失量及流失途径的影响。与CT相比，间作处理（G_1，G_2）显著降低总氮与总磷流失量，降幅分别为70.4%～84.9%和62.5%～82.7%。从流失途径看，CT处理下总氮与总磷均以泥沙携带为主（比例为51.9%～55.5%）；而间作处理后，二者转为以径流流失为主（总氮比例56.2%～65.7%，总磷比例69.7%～86.2%）。年际对比显示，2024年总氮流失量高于2023年，且间作处理中径流流失比例平均增加约10%；总磷流失总量年际变化较小，但间作处理中泥沙流失的总磷比例同样呈现上升趋势。

表3 覆盖作物间作的水土保持效应
Table 3 Effects of cover crop intercropping systems on soil and water conservation

年份	处理	径流量/mm	径流系数/%	减流率/%	侵蚀模数/(t·km^{-2}·a^{-1})	减蚀率/%
2023	CT	42.39^{a}	12.71^{a}	0	262.70^{a}	0
	G_1	13.06^{b}	3.92^{b}	69.20	62.10^{b}	76.36
	G_2	11.40^{c}	3.42^{c}	73.10	29.58^{c}	88.74
2024	CT	104.07^{a}	31.21^{a}	0	559.09^{a}	0
	G_1	48.84^{b}	14.65^{b}	53.07	98.27^{c}	82.42
	G_2	47.29^{b}	14.18^{b}	54.56	127.85^{b}	77.13
平均	CT	73.23^{a}	21.96^{a}	0	410.89^{a}	0
	G_1	30.95^{a}	9.28^{a}	57.73	80.18^{b}	80.49
	G_2	29.35^{a}	8.80^{a}	59.92	78.71^{b}	80.84

表4 覆盖作物间作对总氮流失途径的影响
Table 4 Effects of cover crop intercropping systems on total nitrogen loss pathways

年份	处理	总氮流失总量/(kg·hm^{-2})	降低率/%	径流比例/%	泥沙比例/%
2023	CT	1.74±0.02^{a}	0	44.67	55.33
	G_1	0.34±0.02^{b}	80.23	58.12	41.88
	G_2	0.26±0.00^{c}	84.88	58.17	41.83
2024	CT	3.94±0.38^{a}	0	48.08	51.92
	G_1	1.15±0.14^{b}	70.43	65.72	34.28
	G_2	1.12±0.05^{b}	71.43	56.16	43.84
平均	CT	2.84±1.23^{a}	0	46.37	53.63
	G_1	0.75±0.45^{b}	73.59	61.92	38.08
	G_2	0.69±0.47^{b}	75.70	57.16	42.84

注：表中数据为平均值±标准误。下同。

2.3 玉米-覆盖作物间作对土壤氮磷养分的影响

表6为2023年和2024年度收获期玉米—覆盖作物间作对不同土层土壤全氮含量的影响。在2023年，各土层的土壤全氮含量均有显著差异。在0—10 cm土层中，与CT相比，间作紫云英（G_1）处理的土壤全氮含量显著提高24.4%，间作菘蓝（G_2）处理提高7%但差异不显著；在10—20 cm土层中，与CT相比，覆盖作物间作处理对土壤全氮含量影响具有差异，间作紫云英（G_1）处理显著提高26.9%，菘蓝间作则差异

不显著;在 20—40 cm 土层中,与 CT 相比,间作紫云英(G_1)处理显著提高 31.07%,间作菘蓝(G_2)处理影响不显著。2024 年试验结果和趋势与 2023 年基本一致,在各个土层中,间作紫云英处理与 CT 处理相比具有显著提高。在年际间与 2023 年相比,间作紫云英处理的土壤全氮含量也有提高。综上所述,覆盖作物间作处理提高土壤全氮含量,在年际间紫云英处理也有提高。

表 5　覆盖作物间作对总磷流失途径的影响

Table 5　Effects of cover crop intercropping systems on total phosphorus loss pathways

年份	处理	总磷流失总量/(kg·hm^{-2})	降低率/%	径流比例/%	泥沙比例/%
2023	CT	1.59±0.04^{a}	0	55.32	44.68
	G_1	0.38±0.01^{b}	76.09	86.17	13.83
	G_2	0.27±0.00^{c}	82.67	83.85	16.15
2024	CT	1.91±0.11^{a}	0	45.86	54.14
	G_1	0.64±0.07^{c}	66.39	69.72	30.28
	G_2	0.72±0.04^{b}	62.54	75.75	24.25
平均	CT	1.75±0.19^{a}	0	50.59	49.40
	G_1	0.51±0.15^{b}	70.85	77.94	22.05
	G_2	0.50±0.24^{b}	71.42	79.80	20.20

表 6　覆盖作物间作对土壤全氮含量的影响

Table 6　Effects of cover crop intercropping on soil total nitrogen content

年份	处理	各土层土壤全氮含量/(g·kg^{-1})		
		0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
2023	CT	1.42±0.07^{b}	1.25±0.02^{b}	1.03±0.11^{b}
	G_1	1.77±0.03^{a}	1.57±0.10^{a}	1.35±0.16^{a}
	G_2	1.52±0.21^{ab}	1.37±0.05^{b}	1.26±0.09^{ab}
2024	CT	1.42±0.08^{b}	1.21±0.12^{a}	1.03±0.11^{b}
	G_1	1.84±0.08^{a}	1.54±0.01^{a}	1.35±0.16^{a}
	G_2	1.45±0.03^{b}	1.36±0.31^{a}	1.08±0.09^{ab}
平均	CT	1.42±0.07^{b}	1.23±0.08^{b}	1.03±0.09^{b}
	G_1	1.80±0.07^{a}	1.55±0.06^{a}	1.35±0.14^{a}
	G_2	1.49±0.14^{b}	1.36±0.22^{b}	1.17±0.13^{ab}

表 7 为 2023 和 2024 年度收获期内玉米-覆盖作物间作对不同土层土壤全磷含量的影响。在 2023 年度试验中,土壤全磷含量在整体上呈现出随着土层深度加深而递减的趋势。在不同土层中,各个处理的土壤全磷含量差异均不显著。在 2024 年度试验中,土壤全磷含量在整体上也呈现出随土层深度加深而递减的趋势。在不同土层中,各处理间无显著差异,在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层中间作紫云英(G_1)处理较 CT 分别提高了 12.5% 和 12.1%。综上所述,覆盖作物间作对土壤全磷含量影响不显著。

表 7　覆盖作物间作对土壤全磷含量的影响

Table 7　Effects of cover crop intercropping on soil total phosphorus content

年份	处理	各土层土壤全磷含量 TP/(g·kg^{-1})		
		0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
2023	CT	1.02±0.05^{a}	0.69±0.03^{a}	0.58±0.11^{a}
	G_1	1.01±0.02^{a}	0.67±0.10^{a}	0.61±0.05^{a}
	G_2	0.99±0.17^{a}	0.76±0.07^{a}	0.68±0.04^{a}
2024	CT	0.96±0.14^{ab}	0.70±0.04^{a}	0.69±0.01^{a}
	G_1	1.08±0.09^{a}	0.79±0.09^{a}	0.68±0.00^{a}
	G_2	0.96±0.02^{b}	0.72±0.10^{a}	0.73±0.10^{a}
Mean	CT	0.99±0.11^{a}	0.70±0.03^{a}	0.64±0.09^{a}
	G_1	1.05±0.07^{a}	0.72±0.11^{a}	0.64±0.05^{a}
	G_2	0.97±0.11^{a}	0.74±0.08^{a}	0.70±0.08^{a}

2.4　玉米–覆盖作物间作对土壤物理性质的影响

不同覆盖作物间作下的土壤容重、田间持水量、饱和持水量及饱和导水率的情况如表 8 所示。其中 2023 年玉米单作(CT)与绿肥作物间作处理组之间的土壤容重、田间持水量及饱和持水量均无显著差异;而 2024 年 G_1 和 G_2 土壤容重相比 CT 分别降低 22.0% 和 14.9%;G_1 和 G_2 田间持水量相较 CT 分别提高 60.92% 和 56.72%;G_1 和 G_2 饱和持水量相较 CT 分别提高 27.9% 和 19.8%。在 2023 年度试验中,覆盖作物间作处理 G_1 和 G_2 的饱和导水率分别为 1.11 和 1.25 cm/h,较 CT 处理显著提高。在 2024 年度试验中,G_1 和 G_2 的饱和导水率同样较 CT 处理显著提高。

表 8　覆盖作物间作对土壤容重和孔隙分布的影响

Table 8　Effects of cover crop intercropping on soil bulk density and pore distribution

年份	处理	容重/(g·cm^{-3})	田间持水量/%	饱和持水量/%	饱和导水率/(cm·h^{-1})
2023	CT	1.10^{a}	49.29^{a}	54.77^{a}	0.50^{b}
	G_1	1.03^{a}	51.67^{a}	60.70^{a}	1.11^{ab}
	G_2	1.05^{a}	53.43^{a}	60.14^{a}	1.25^{a}
2024	CT	1.21^{a}	48.02^{b}	52.90^{b}	0.54^{b}
	G_1	0.94^{b}	60.92^{a}	67.65^{a}	1.15^{a}
	G_2	1.03^{b}	56.72^{ab}	63.39^{ab}	1.20^{a}
平均	CT	1.16^{a}	46.84^{b}	52.55^{b}	0.51^{b}
	G_1	0.97^{b}	56.95^{a}	64.67^{a}	1.12^{a}
	G_2	0.96^{ab}	56.27^{a}	61.41^{ab}	1.22^{a}

图1为2023—2024年玉米-覆盖作物间作对土壤团聚体粒级分布的影响。干筛结果表明,各处理机械稳定性团聚体均集中分布于1～5 mm粒级(约占70%),处理间无显著差异。水稳性团聚体分布则呈现显著差异。

与单作对照(CT)相比,间作处理(G_1,G_2)在较大粒级(>0.5 mm)中比例显著提高,其中>5 mm,2～5 mm,1～2 mm和0.5～1 mm粒级在2 a中增幅分别为0.61%～0.9%,1.65%～2.41%,5.05%～9.3%和5.23%～8.3%;相反,在较小粒级(0.25～0.5 mm,<0.25 mm)中,间作处理比例显著低于CT,降幅分别为2.6%～4.49%与10.9%～15.2%。该结果说明覆盖作物间作促进了土壤中大粒径水稳性团聚体的形成,有效提升团聚体稳定性。

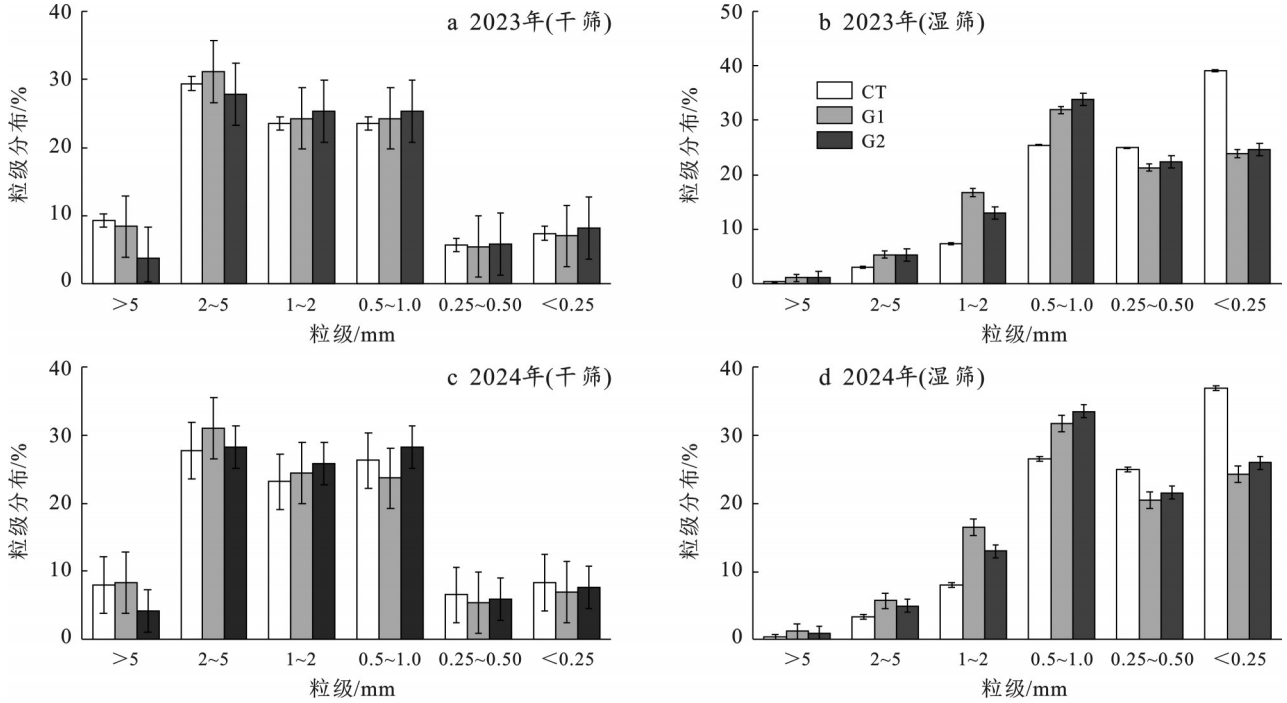


图1 研究区2023—2024年覆盖作物间作对土壤团聚体粒级分布的影响

Fig.1 Effects of cover crop intercropping on soil aggregate size-class distribution in study area from 2023 to 2024

表9为2023和2024年度试验期间玉米-覆盖作物间作对机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的大团聚体比例($R_{0.25}$)、团聚体分形维数(D)、团聚体破碎率(PAD)及土壤可蚀性(K)的影响。在2023年度试验中,覆盖作物间作对干筛条件下的大团聚体比例影响不显著,但在湿筛条件下表现出显著差异。与CT相比,G_1和G_2处理的大团聚体比例分别提高19.9%和17.3%。2024年度试验结果与2023年一致,覆盖作物间作对湿筛条件下的大团聚体比例具有显著促进作用,G_1和G_2处理分别较CT提高24.3%和21.6%。在团聚体分形维数(D)方面,2023年度试验中覆盖作物间作处理显著降低D值。与CT相比,G_1和G_2处理的分形维数分别减少7.1%和6.0%。2024年度试验结果与2023年趋势一致,G_1和G_2处理的分形维数分别较CT降低11.5%和4.9%。玉米-覆盖作物间作在2 a试验中均显著降低了团聚体破碎率(PAD)。2023年度试验中,G_1和G_2处理的PAD分别较CT减少47.8%和40.1%;2024年度中,分别减少51.5(G_1)和47.0%(G_2)。同时,覆盖作物间作对土壤可蚀性(K)也表现出显著影响。2023年度试验中,G_1和G_2处理的K值分别较CT降低了13.0%和8.9%;2024年度试验中,分别降低12.9%和8.7%。综上所述,玉米-覆盖作物间作显著提高了土壤大团聚体比例,降低了分形维数、团聚体破碎率及土壤可蚀性,表明该耕作模式能有效改善土壤结构稳定性,增强土壤抗侵蚀能力。

2.5 综合效益分析

由表10可知,2023—2024年各处理经济效益差异主要体现在产量差异及利润水平上。覆盖作物间作在增加部分人工播种投入的同时,可减少人工除草作业,因此各处理之间的生产成本总体差异较小,主要体现在不同覆盖作物种子投入差异上。两年试验结果表明,G_1处理产量收益和利润最高,其2023年产量收益为18 934.66元/hm^2,利润为14 958.96元/hm^2;2024年分别达到20 828.48元/hm^{2}和16 852.78元/hm^2。G_2处理次之,而CT处理的产量收益和利润均相对较

低。综上所述,两种覆盖作物间作处理(G_1,G_2)的经济效益均高于玉米单作(CT)。

表 9　覆盖作物间作对土壤团聚体稳定性特征的影响
Table 9　Effects of cover crop intercropping on soil aggregate stability characteristics

年份	处理	≥0.25 mm团聚体比例/%		分形维数 D	团聚体破碎率PAD	土壤可蚀性 K
		干筛	湿筛			
2023	CT	0.92^a	0.63^b	2.57^a	32.4^a	0.050 0^a
	G_1	0.93^a	0.76^a	2.39^b	16.9^b	0.043 5^b
	G_2	0.92^a	0.74^a	2.41^b	19.4^b	0.045 6^b
2024	CT	0.92^a	0.62^b	2.13^a	33.6^a	0.049 9^a
	G_1	0.92^a	0.77^a	1.88^a	16.3^b	0.043 5^b
	G_2	0.92^a	0.75^a	2.02^a	17.8^b	0.045 5^b
平均	CT	0.92^a	0.63^b	2.35^a	32.0^a	0.050^a
	G_1	0.93^a	0.76^a	2.13^a	16.6^b	0.043^b
	G_2	0.92^a	0.75^a	2.22^a	18.6^b	0.046^b

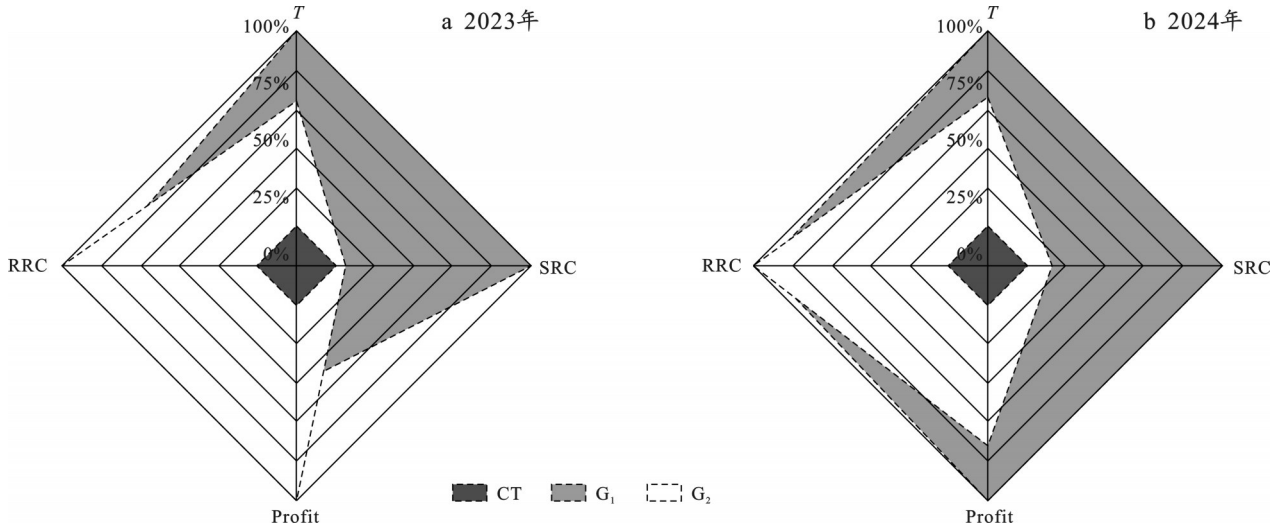
从实物产出与价值量变化来看,覆盖作物间作模式在提高玉米产量的同时,也带来了更高的产量收益和利润水平。其中2024年各处理的产量收益和利润均高于2023年,表明不同模式在不同年份均保持相似的经济效益变化趋势。

为综合评估不同覆盖作物间作模式的生态与经济效益,本研究选取土壤可蚀性指标、水土保持功能指标(减流能力、减沙能力)及经济效益指标(利润)绘制雷达图(图2)。其中土壤可蚀性倒数(T)、降雨产流减少能力(RRC)和泥沙流失减少能力(SRC)为正向指标,其值越高代表该模式下土壤抗蚀性、减流与减沙能力越强。结果表明,与玉米单作(CT)相比,两种覆盖作物间作处理(G_1, G_2)在雷达图上所围成的面积更大,CT处理在各生态指标上的表现普遍偏低。2023—2024年,G_1处理在土壤抗蚀性因子(T)及利润上的表现最为突出。而G_2处理在减流能力方面相对较高。两年各处理雷达图的整体形态及相对位置基本一致,表明不同模式在生态与经济效益方面具有较为稳定的表现。

表 10　不同处理下玉米生产成本与收益分析
Table 10　Analysis of maize production costs and profits under different treatments　　单位:元/hm^2

年份	处理	产量收益	肥料成本	种子成本	其他成本	利润
2023	CT	16 798.39	2 845.696	825	230	12 897.69
	G_1	18 934.66	2 845.696	900	230	14 958.96
	G_2	16 954.96	2 845.696	875	230	13 004.27
2024	CT	18 943.76	2 845.696	825	230	15 043.06
	G_1	20 828.48	2 845.696	900	230	16 852.78
	G_2	19 225.33	2 845.696	875	230	15 274.64

注:①产量收益由单位面积玉米产量与当地玉米收购价格折算得出;肥料成本包括尿素和复合肥的施用成本;种子成本包括玉米种子及各处理覆盖作物种子费用;其他成本包括机械作业、人工管理和除草剂等投入。②所有成本数据均来源于田间试验管理过程中的实际投入。



注:①指标包括土壤可蚀性倒数(T)、降雨产流减少能力(RRC)、泥沙流失减少能力(SRC)和单位面积利润(Profit)。②所有指标均经过0～1标准化处理。

图 2　不同覆盖作物间作模式的水土保持效益及经济效益的对比

Fig.2　Comparison of soil and water conservation and economic benefits among different cover crop intercropping systems

3　讨　论

3.1　玉米-覆盖作物间作对玉米产量的影响

覆盖作物间作在一定程度上提高了土壤养分。在本研究中,覆盖作物间作处理的全氮含量有一定的增加趋势,这一现象与豆科作物的生物固氮能力和绿肥作物还田的氧化分解密切相关:豆科植物紫云英与根瘤菌共生体系能够将大气氮转化为铵态

氮,并通过硝化作用进一步转化为硝态氮,一定程度上提高了全氮含量[21]。而研究中的全磷含量未发生显著变化,这可能由于磷素在土壤中的迁移与转化过程更为复杂。磷素主要来源于成土矿物风化及外源输入,其有效性高度依赖于土壤pH值、固定吸附及微生物活化等过程。覆盖作物虽然通过根系活动与残体归还可释放部分有效磷,但在本研究的观测期内其生物量积累与归还量尚不足以驱动全磷含量的整体变化。Zhao Xin等人[22]于2025年的研究发现,玉米-绿肥间作促进了玉米对磷的吸收,这也启示我们覆盖作物间作在磷素循环上的作用具有进一步研究的价值。同时,在Lu Yang等人[23]2025年的研究中发现,玉米-豆科绿肥间作后表层土壤有机碳含量显著提升,这可能由于豆科绿肥调节微生物群落产生了更多稳定的微生物残体碳,推广覆盖作物间作模式,分析其改良土壤的效果及影响作物的机理仍需要更深入的研究。覆盖作物间作模式下的玉米产量增加是养分吸收及分配等因素影响的综合结果。覆盖作物调整土壤微生物群落结构与土壤酶活性(如磷酸酶),加速有机养分向无机态的转化,补充了作物可吸收养分含量[24]。同时,间作改善了根际微环境,促进玉米根系的生长[25],扩大了玉米养分吸收空间。这种土壤供应能力增强与作物获取养分能力提升的耦合在一定程度上反映了覆盖作物间作模式的增产潜力。

3.2 玉米–覆盖作物间作模式减蚀效果及其机制

在已有的研究[13,19]中,覆盖作物间作对土壤结构具有显著的改良作用。覆盖作物根系穿透土壤,有助于减少土壤压实[26],分隔土壤颗粒,创造新的孔隙。这与研究中发现的紫云英、萘蓝间作显著降低了土壤容重相符。土壤毛管孔隙能够一定程度上提高土壤的保水能力,促进降雨入渗,降低地表径流深度,从而有效降低土壤侵蚀的风险[27]。同时,凋落物和根系残体亦在分解后形成胶体物质,增强土壤颗粒之间的结合力,优化土壤孔隙分布[28]。覆盖作物通过改善土壤结构、优化孔隙分布进而显著提高土壤饱和导水率[29]。在本研究中相较于CT,覆盖作物间作处理显著提高了土壤饱和导水率,较高土壤导水率能够加速水分垂直下渗,减少地表径流冲刷,进而降低径流侵蚀。覆盖作物通过翻压和根系腐解作用,间接促进微生物活性,进而优化土壤团聚体分布格局与土壤团聚体稳定性,最终增加土壤的抗侵蚀能力[30]。这一结论在本研究中体现为覆盖作物间作减少了<0.25 mm的土壤团聚体含量,降低了土壤团聚体破碎率(PAD),提高了土壤抗蚀能力。

在本研究中,玉米-覆盖作物间作模式能够显著降低地表径流与土壤侵蚀量,这一发现与Yan Yue,Liu Shuaikang和Beniaich等人[14-15,17]的研究结论相一致。其内在机制主要体现在以下几个方面。首先是地表覆盖与水文效应上,覆盖作物在玉米生长拔节期能快速形成地表冠层,有效截留降雨,降低雨滴对表土的侵蚀,这是增加水分下渗,减少地表产流,从而显著降低径流系数和径流总量的直接原因[31]。其次是根系固结与土壤结构改良,覆盖作物密集的根系网络能够穿插土壤结构,有效固结土体,提升土壤的团聚体稳定性和抗侵蚀能力[13]。这不仅直接导致了土壤可蚀性因子的降低,同时也反映在土壤侵蚀模数的降低上。本研究中覆盖作物间作处理对侵蚀模数的削减幅度尤为显著,推测可能与紫云英及萘蓝的根系特征有关,加强了对土壤的固结作用[17]。2023年萘蓝(G_2)减流减蚀效果优于紫云英,可能归因于其出苗早、前期形成地表覆盖的能力强;而2024年作物生长前期未发生强侵蚀性降雨,二者差异不显著,萘蓝早期覆盖的优势未能体现。最后是土壤物理性质的协同改善,间作处理提升饱和导水率并降低土壤容重(BD)。这表明覆盖作物通过根系活动和有机质输入,改善了土壤孔隙结构,增强了土壤入渗性能和通透性。这种物理性质的改良是水土保持效益能够持续发挥的基础[32]。

研究结果也揭示了覆盖作物间作模式对氮磷流失的主要途径的改变。养分流失是水土保持效益的直接体现,径流和泥沙是养分迁移的主要载体,当载体本身被削减后,其伴随的养分流失也随之下降,这与彭程亮等人[33]于2025年的研究所观察到的规律一致。养分流失的减少也放大了传统耕作模式与覆盖作物间作模式下的土壤养分差异,是提高作物产量的重要原因。同时,本研究发现单作(CT)的氮磷流失以泥沙结合态为主要途径,覆盖作物间作处理后,泥沙结合态的氮磷流失量下降,而径流溶解态的氮磷含量有一定的增加趋势,这一转变说明覆盖作物的固土能力极大减少了泥沙产生与迁移,通过泥沙携带的颗粒态养分流失通路受到一定程度的阻断。虽然流失总量有所下降,但流失途径向径流溶解态的转变,意味着后续面源污染防治需要重点关注水体溶解的氮磷养分。因此,在推广优化这一种植模式时,可以通过建立生态过滤带或植物篱等协同技术进一步强化对水中溶解养分的拦截吸收[34]。

3.3 水土保持效益与经济效益的协同与权衡

实现生态效益与经济效益的协同提升是农业绿色发展的重要目标。本研究通过对不同覆盖作物间

作模式水土保持效益及经济效益的综合分析,评估其在黑土区坡耕地农业生产中的应用潜力。已有研究表明,种植覆盖作物不仅具有增产潜力,其产生的额外成本在施肥、抑制杂草等方面具有一定的补偿效应。在双季稻种植模式中,用绿肥替代20%的化学氮肥不仅能提高产量,还可显著降低单位产量的碳、氮足迹,并提升净生态系统经济效益[30]。在玉米-覆盖作物间作模式中,覆盖作物通过生物固氮作用可为玉米提供一定比例的氮素来源,最高可满足玉米吸氮量的37.0%[35]。

从经济效益角度出发,农业生产系统的经济效益不仅体现在收益和利润水平的提高,还与产出水平提升和投入结构变化密切相关。本研究中紫云英间作模式在显著提高千粒重及玉米籽粒产量(9.9%～12.7%)的同时,也展现了全面而均衡的生态效益。其增产机制可能源于紫云英作为豆科植物的生物固氮作用,通过根系分泌物影响土壤微生物,丰富土壤氮素养分,从而促进玉米生长[26]。这使玉米-紫云英间作模式综合效益呈现出较为全面的优势,尤其在单位面积利润上表现较好,是一种可行的协同增效模式。绿肥替代化肥不仅能改善土壤,更是实现生产减排增收的关键农艺措施。同时本研究发现,将紫云英这一南方草种作为绿肥引入东北农业生产中,可以利用作物生长前期温度较低的特点,有效延迟紫云英种子的发芽时间,避免紫云英在作物生长前期竞争土壤养分及水分,同时在作物生长中期抑制坡耕地杂草生长[17]。

从水土保持效益角度分析,玉米-菘蓝间作模式虽然对玉米产量影响不显著,但在饱和导水率及减少泥沙流失方面表现较为突出,表明该模式在改善土壤结构和增强土壤抗蚀性方面具有一定优势。这可能与菘蓝具有较深的根系结构有关,有利于增强土壤孔隙连通性并提高水分入渗能力。尽管其短期经济收益略低于紫云英间作模式,但通过减少土壤侵蚀和养分流失,该模式在维持耕地质量和稳定农业生产方面具有潜在的长期价值。

比较两种覆盖作物间作模式的综合效益,紫云英间作处理具有较好的水土保持效益的同时,能够一定程度上提高玉米的产量组成因子,增加经济效益,而菘蓝间作处理相比紫云英间作处理则具有更稳定的水土保持效益,在生态脆弱区具有一定的应用潜力。未来研究可在这一落脚点上更进一步,探讨覆盖作物间作模式在较长时间尺度上生态效益与经济效益的平衡与最大化。

4　结　论

(1) 与玉米单作(CT)相比,G_1和G_2处理平均减少径流量57.74%～59.92%,降低土壤侵蚀模数80.49%～80.84%。这一效益主要源于覆盖作物对降雨的截留作用,根系对土壤的固结作用以及土壤物理性质的改善。

(2) 覆盖作物间作系统能有效减少养分流失,改变养分流失途径。两种间作模式显著削减径流中总氮、总磷的流失总量,其平均总氮减少幅度为73.59%～75.70%,总磷减少幅度为70.85%～71.42%。

(3) 覆盖作物间作模式实现了生态与经济效益的协同,其中紫云英间作模式在显著提高玉米籽粒产量(9.9%～12.7%)的同时,保持全面且均衡的生态效益,是研究中最具优势的间作模式。而菘蓝间作模式对玉米产量无显著影响,但在土壤结构改良和水土保持上具有更稳定的表现,可以作为不同地区坡耕地水土流失防治的有效措施。

总而言之,在东北黑土区推广玉米-覆盖作物间作系统是应对土壤侵蚀,防治养分流失及促进农业可持续发展的有效技术途径。建议根据生产地区的实际环境及目标选择间作模式,以实现最大的水土保持效益和经济效益。

参考文献(References)

[1] 杨兆鹏,马秋梅,邬磊,等.东北黑土区玉米产量时空演变规律及其驱动因素[J].农业工程学报,2025,41(18):72-80.
Yang Zhaopeng, Ma Qiumei, Wu Lei, et al. Spatiotemporal dynamics of maize yield and associated driving factors in the black soil region of northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025,41(18):72-80.

[2] 李保国,刘忠,黄峰,等.巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全[J].中国科学院院刊,2021,36(10): 1184-1193.
Li Baoguo, Liu Zhong, Huang Feng, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in northeast China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences,2021,36(10): 1184-1193.

[3] 梁瑞,郑粉莉,王雪松,等.东北典型厚层黑土区坡耕地侵蚀对土壤质量的影响[J].水土保持学报,2025(5):147-157.
Liang Rui, Zheng Fenli, Wang Xuesong, et al. Effects of soil erosion on soil quality of slope croplands in typical thick-layer black soil region of northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025(5):147-157.

[4] 谢云,高燕,顾治家,等.东北黑土区坡耕地水土流失危

险程度评价[J].中国水土保持科学(中英文),2020,18(6):105-114.
Xie Yun, Gao Yan, Gu Zhijia, et al. Potential hazard assessment of slope farmland soil erosion in black soil region of northeastern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(6):105-114.

[5] 耿华杰,郑粉莉,莫帅豪,等.典型黑土区农业流域土壤侵蚀-沉积对土壤养分和酶活性的影响[J].水土保持学报,2023,37(4):47-53.
Geng Huajie, Zheng Fenli, Mo Shuaihao, et al. Effects of soil erosion-deposition on soil nutrients and enzyme activities in an agricultural watershed of Chinese Mollisol region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):47-53.

[6] 田芷源,卢慧中,马瑞,等.东北黑土区耕地侵蚀退化空间分异特征[J].土壤学报,2025,62(4):931-945.
Tian Zhiyuan, Lu Huizhong, Ma Rui, et al. Spatial differentiation characteristics of soil erosion and degradation in black soil cropland of northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,62(4):931-945.

[7] Liu Chang, Liu Gang, Dan Chenxi, et al. Thickness variation of black soil on sloping farmland in northeast China from 1963 to 2023 [J]. Soil and Tillage Research, 2026,258:107005.

[8] 赵婷.黑龙江省坡耕地土壤侵蚀对作物产量的影响评估研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2024.
Zhao Ting. Assessment of soil erosion impacts on crop yields in slope cropland in Heilongjiang Province [D]. Yangling Shaanxi: Northwest A & F University, 2024.

[9] 王磊,师宏强,刘刚,等.黑土区宽垄和窄垄耕作的顺坡坡面土壤侵蚀对比[J].农业工程学报,2019,35(19):176-182.
Wang Lei, Shi Hongqiang, Liu Gang, et al. Comparison of soil erosion between wide and narrow longitudinal ridge tillage in black soil region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(19):176-182.

[10] 沈海鸥,温磊磊,武佳龙,等.垄作与垄向区田技术对黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的研究进展[J].农业工程学报,2022,38(22):52-62.
Shen Haiou, Wen Leilei, Wu Jialong, et al. Review on the effects of ridge pattern and ridge-furrow intervals on soil erosion of sloping farmland in the black soil region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(22):52-62.

[11] 樊叶,莫姣娇,张丽丽,等.辽东地区秸秆还田首年对玉米产量及生长特性的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2024,45(1):12-20.
Fan Ye, Mo Jiaojiao, Zhang Lili, et al. Effects of straw returning on yield and growth characteristics of maize in the first year in eastern Liaoning Province [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2024,45(1):12-20.

[12] 蹇述莲,李书鑫,刘胜群,等.覆盖作物及其作用的研究进展[J].作物学报,2022,48(1):1-14.
Jian Shulian, Li Shuxin, Liu Shengqun, et al. Research advances of cover crops and their important roles [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022,48(1):1-14.

[13] 马玩玩,王恩姮,王苗苗,等.漫川漫岗黑土区玉米-覆盖作物间作对土壤抗侵蚀能力的影响[J].中国水土保持科学,2025,23(6):54-64.
Ma Wanwan, Wang Enheng, Wang Miaomiao, et al. Effect of corn-cover crop intercropping on soil erosion resistance in the rolling-hill black soil region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(6):54-64.

[14] Yan Yue, Jiang Yanyan, Guo Mingming, et al. Effects of grain-forage crop type and natural rainfall regime on sloped runoff and soil erosion in the Mollisols region of northeast China [J]. Catena, 2023,222:106888.

[15] Beniaich A, Guimarães D V, Avanzi J C, et al. Spontaneous vegetation as an alternative to cover crops in olive orchards reduces water erosion and improves soil physical properties under tropical conditions [J]. Agricultural Water Management, 2023,279:108186.

[16] Li Hanting, Fan Zhilong, Hu Falong, et al. Intercropping maize with leguminous green manure can compensate for the losses in grain yield and N uptake caused by a reduced N supply [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2025,24(7):2826-2840.

[17] Liu Shuaikang, Dong Aihua, Niu Biao, et al. Maize/cover crop intercropping mitigates soil erosion and enhances yield of ridge cultivation in Chinese Mollisol region [J]. Catena, 2025,255:109012.

[18] Suleiman A A, Ritchie J T. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity [J]. Transactions of the ASAE, 2001,44(2):235-239.

[19] 周桐,潘鹤,张扬,等.不同配置的多功能水土保持植被对黑土抗侵蚀特征的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(5):100-104.
Zhou Tong, Pan He, Zhang Yang, et al. Effects of multifunctional soil and water conservation vegetation with different configurations on erosion-resistance characteristics of black soil [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022,50(5):100-104.

[20] 陈静,张扬,王苗苗,等.种植多年生草本植物对黑土抗侵蚀能力的综合影响[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(3):194-202.
Chen Jing, Zhang Yang, Wang Miaomiao, et al. The comprehensive effect of planting perennial grass on the

erosion resistance of black soil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(3):194-202.

[21] 董勇杰,张刁亮,李越,等.不同施氮量下玉米生长及产量对间作豆科绿肥的响应[J].中国农业科学,2024,57(10):1900-1914.
Dong Yongjie, Zhang Diaoliang, Li Yue, et al. Response of maize growth and yield with different nitrogen application rates to intercropped leguminous green manure [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024,57(10):1900-1914.

[22] Zhao Xin, Liang Hai, Chang Danna, et al. Maize-green manure intercropping improves maize yield and P uptake by shaping the responses of roots and soil [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2026,25(1):313-325.

[23] Lu Yang, Luo Jiaqiao, Gu Chiming, et al. Preceding intercropped leguminous green manure shifts microbial life strategies to regulate soil organic carbon in low-nitrogen input maize-rapeseed rotations [J]. Soil and Tillage Research, 2026,256:106841.

[24] Duan Yu, Wang Ting, Lei Xiaogang, et al. Leguminous green manure intercropping changes the soil microbial community and increases soil nutrients and key quality components of tea leaves [J]. Horticulture Research, 2024,11(3):uhae018.

[25] 刘泽琴,刘宁,李淑娟,等.紫云英与油菜间作模式下根系分泌物对土壤微生物的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(4):177-184.
Liu Zeqin, Liu Ning, Li Shujuan, et al. Effects of root exudates on soil microorganisms under intercropping pattern of Chinese milkvetch and rapeseed [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023,42(4):177-184.

[26] Lamichhane J R, Alletto L. Ecosystem services of cover crops: A research roadmap [J]. Trends in Plant Science, 2022,27(8):758-768.

[27] Wardak D L R, Padia F N, de Heer M I, et al. Zero-tillage induces significant changes to the soil pore network and hydraulic function after 7 years [J]. Geoderma, 2024,447:116934.

[28] 邢赟,李祖然,李元.中国喀斯特地区植物群落对土壤有机碳及组分的影响研究进展[J].农业环境科学学报,2026,45(6):1341-1352.
Xing Yun, Li Zuran, Li Yuan. Recent advances in studies of the effects of plant communities on soil organic carbon and its fractions in Karst areas of China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2026,45(6):1341-1352.

[29] Blanco-Canqui H, Shapiro C A, Wortmann C S, et al. Soil organic carbon: The value to soil properties [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,68(5):129A-134A.

[30] Daba N A, Huang Jing, Alam M A, et al.Green manure substitution reduces carbon and nitrogen footprints and improves net ecosystem economic benefits in double rice systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2025,521:146266.

[31] 李建明,丁文峰,冉文建,等.自然降雨特征和作物覆盖对三峡库区紫色土坡耕地产流产沙影响[J].农业工程学报,2025,41(8):137-146.
Li Jianming, Ding Wenfeng, Ran Wenjian, et al. Effects of natural rainfall characteristics and crop coverage on runoff and sediment yield in purple soil slope cultivated land in the Three Gorges Reservoir areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025,41(8):137-146.

[32] 李彦,谷会岩,陈月明.植被细根对典型黑土土壤抗蚀性的影响[J].东北林业大学学报,2020,48(7): 81-85.
Li Yan, Gu Huiyan, Chen Yueming. Effect of vegetation fine root on soil anti-erodibility in typical black soil region of China [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020,48(7):81-85.

[33] 彭程亮,黄敏,陆文龙,等.长江中下游不同水旱轮作模式农田氮磷流失规律[J].[2026-08-26].农业资源与环境学报,1-15. https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0808.
Peng Chengliang, Huang Min, Lu Wenlong, et al. Patterns of nitrogen and phosphorus loss from farmland under different paddy-upland rotation systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. [2026-08-26]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 1-15. https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0808.

[34] 王磊,索琳娜,魏丹,等.密云水库库区不同植物篱模式下的氮磷阻控效应[J].水生态学杂志,2023,44(3):35-41.
Wang Lei, Suo Linna, Wei Dan, et al. Nitrogen and phosphorus interception and the control effected by different hedgerow patterns in the Miyun reservoir area [J]. Journal of Hydroecology, 2023,44(3):35-41.

[35] Liu Rui, Zhou Guopeng, Chang Danna, et al. Transfer characteristics of nitrogen fixed by leguminous green manure crops when intercropped with maize in northwestern China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022,21(4):1177-1187.