



中国水土保持科学(中英文)
Science of Soil and Water Conservation
ISSN 2096-2673,CN 10-1449/S

《中国水土保持科学(中英文)》网络首发论文

题目: 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
作者: 马玩玩, 王恩姮, 王苗苗, 张扬, 陈灿灿, 陈静
收稿日期: 2024-10-21
网络首发日期: 2025-05-18
引用格式: 马玩玩, 王恩姮, 王苗苗, 张扬, 陈灿灿, 陈静. 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/OL]. 中国水土保持科学(中英文).
<https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20250516.1748.004>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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

马玩玩, 王恩姮[†], 王苗苗, 张扬, 陈灿灿, 陈静
(东北林业大学林学院, 150040, 哈尔滨)

摘要: 东北黑土区长期传统耕作与水土流失导致坡耕地土壤结构退化、土壤质量下降, 开展主栽作物与覆盖作物间作对土壤抗侵蚀综合能力的影响研究, 旨在筛选出适宜黑土区的覆盖作物品种与模式, 有利于黑土坡耕地抵御雨季集中降水带来的侵蚀风险。以裸地、玉米单作、玉米与白三叶间作、玉米与黑麦草间作、玉米与白三叶&黑麦草间作大田黑土为研究对象, 从土壤理化性质、土壤团聚体稳定性、土壤抗冲性、土壤抗剪性 4 方面, 分析并综合评价玉米与不同覆盖作物间作对土壤抗侵蚀能力的影响。研究发现: 1) 与裸地和玉米单作相比, 玉米-覆盖作物间作可以不同程度改善土壤密度, 调节土壤孔隙度, 提高土壤的保水能力, 以玉米与白三叶&黑麦草间作效果最为显著; 土壤有机质质量分数不仅没有增加反而呈现降低趋势, 玉米与白三叶间作在防止土壤有机质质量分数方面表现出明显优势; 不同处理下土壤团聚体稳定性有较大差异, 0~10 和 10~20 cm 土壤团聚体稳定性均以玉米+白三叶间作最高。2) 玉米-覆盖作物间作对土壤抗侵蚀作用主要体现在表层 0~10 cm, 玉米与黑麦草间作、玉米与白三叶&黑麦草间作土壤抗冲系数分别为 61.93 和 50.86 L/g, 显著高于裸地 96.5%和 95.7%; 各处理土壤抗剪切性能表现最好的是玉米与白三叶&黑麦草间作的 0~10 cm 土层, 其内摩擦角和土壤黏聚力分别为 5.4°和 15.4 kPa, 显著高于裸地 25.5%和 13.5%。3) 通过主成分贡献率加权平均的方法综合评价玉米与不同覆盖作物间作的土壤抗侵蚀能力, 表现为玉米+白三叶&黑麦草>玉米+黑麦草>玉米单作>裸地>玉米+白三叶; 研究结果可为黑土地覆盖作物选择与配置提供科学依据, 为黑土资源可持续利用提供参考。

关键词: 间作; 覆盖作物; 土壤团聚体; 土壤抗冲性; 土壤抗剪强度

中图分类号: S157.2 文献标识码:A

Effect of corn-cover crop intercropping on soil erosion resistance in the rolling-hill black soil region

MA Wanwan, WANG Enheng, WANG Miaomiao, ZHANG Yang, CHEN Cancan, CHEN Jing

(College of Forestry, Northeast Forestry University, 150040, Harbin, China)

Abstract: [Background] In Northeast China's black soil region, prolonged traditional farming coupled with multiple erosive forces, hydraulic, wind, and freeze-thaw, has intensified sloping farmland erosion, resulting in

收稿日期: 2024-10-21 修回日期: 2025-05-15

项目名称: 国家重点研发计划项目“黑土农田浅沟向切沟发展的阻控技术及原理”(2021YFD1500600)

第一作者简介: 马玩玩(2000-)女, 在读硕士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: mww04149686@163.com

[†]通讯作者简介: 王恩姮(1982-)女, 博士, 教授。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: erxin222@163.com

thinning and degradation of the fertile black soil layer. To address this challenge, establishing a conservation system focused on “prevention first and integrated utilization” is essential. Cover cropping has emerged as a promising strategy to improve soil structure and erosion resistance. This study explores how intercropping maize (*Zea mays*) with cover crops affects soil erosion resistance, aiming to identify optimal crop combinations and planting patterns for sustainable black soil management. **[Methods]** A field experiment was conducted on a typical black soil slope cropland in northeastern China with five treatments: 1) bare control; 2) maize monoculture; 3) maize–white clover (*Z. mays*–*Trifolium repens*); 4) maize–ryegrass (*Z. mays*–*Lolium perenne*); and 5) maize–white clover–ryegrass (*Z. mays*–*T. repens*–*L. perenne*). The erosion resistance of the soils was systematically assessed by three complementary methods: the wet sieve method for analyzing aggregate stability, the flume test for measuring scour resistance and the direct shear test for quantifying shear strength. In addition, a comprehensive assessment framework was developed using principal component analysis (PCA), integrating 12 key soil quality indicators was used for comprehensive evaluation and pattern selection. **[Results]** 1) Intercropping maize with cover crops significantly improved the physical properties of the soil. Maize + white clover + ryegrass treatment was the most effective, increasing total soil porosity by 14.39% and water-holding capacity by 6.4% compared to bare ground (CK). 2) Corn + white clover intercropping achieved the highest aggregate stability in both 0 - 10 cm and 10 - 20 cm soil layers, with aggregate crushing rates of 22.26% and 17.18% respectively, significantly lower than those in other treatments. 3) Surface soil (0 - 10 cm) erosion resistance improved markedly, with scouring resistance coefficients reaching 61.93 L/g (maize + ryegrass) and 50.86 L/g (maize + white clover & ryegrass), representing 96.5% and 95.7% increases over bare soil. 4) The maize + white clover & ryegrass system also demonstrated superior shear strength, with a 5.4° internal friction angle and 15.4 kPa cohesion, 25.5% and 13.5% higher than bare soil (CK). 5) Overall erosion resistance ranked as: Maize + white clover + ryegrass > maize + ryegrass > maize monoculture > bare soil > maize + white clover. **[Conclusions]** Intercropping maize with cover crops, especially the combination of white clover and ryegrass, substantially enhances soil erosion resistance on sloping black soil. These findings provide a scientific basis for cover crop selection and configuration, offering valuable guidance for the sustainable utilization and conservation of black soil resources.

Keywords: intercropping; cover crops; soil aggregate; soil anti-scourability; soil shear strength

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地^[1]，在长期传统农业的背景下形成了耕作、水力、风力和冻融等多营力交互的土壤侵蚀特征，水土流失面积高达 20.89 万 km²，黑土层厚度年均下降 0.3~2 mm，加速了黑土质量退化^[2-3]，导致黑土地变薄、变瘦、变硬。在全球气候变化的影响下，黑土区极端降雨频率也呈现增加趋势，尤其是农田侵蚀沟数量的快速增长对黑土区农业可持续发展造成了极大威胁，亟需从预防优先、用养结合的角度保护黑土耕地，落实包括少耕、免耕和种植覆盖作物等保护性耕作技术^[4]。

覆盖作物是提高保护性耕作系统效益的重要组成部分，是指主栽作物生长期和或收获后，在时间和空间上填充土壤裸露间隙的作物^[5]，在改善农业土壤环境，实现可持续农业发展发挥重要作用。大量的研究表明覆盖作物具有改善土壤结构^[6]、减少土壤侵蚀^[7]、提高土壤肥力^[8]、改善土壤微生物群落的功能^[9]等优点，能够有效防治水土流失^[10]。一方面，覆盖作物地上部分叶片和枯落物等能够拦截降雨，增加入渗，减少径流，减缓土壤侵蚀^[11-12]；另一方面，地下根系通过机械加固、分泌物以及土壤微生物活动来提高土壤团聚体稳定性，改善土壤抗侵蚀能力^[13]。覆盖作物在美国^[14]、加拿大^[15]、日本^[16]等国的农业生产中得到了广泛应用，我国覆盖作物种植多限于南方地区^[7]，在华北和中部区域也有小面积种植^[17]，东北黑土区由于主栽作物收获至霜冻期短、越冬生物量低，冬季覆盖作物与主栽作物轮作种植难度较大^[18]，覆盖作物与主栽作物间作相关研究也相对缺乏。事实上，覆盖作物播种方式（混播和单播）对土壤抗侵蚀能力的影响也会有所差异^[19]，与单播相比，混播能够充分发挥不同植物的优势，最大限度地利用生长空间、光照、水分和营养物质，从而增强土壤的抗侵蚀能力^[10-20]；也有研究发现豆科（*Leguminosae*）与非豆科覆盖作物混播存在互惠互利的作用，非豆科可为豆科作物提供物理性支持^[21]，有利于大团聚体形成^[22]。然而，由于不同覆盖作物的生长发育周期以及不同地区的气候和土壤条件的差异，覆盖作物混播的效果在不同地点可能会有所不同^[23-24]。

目前，黑土区几乎没有覆盖作物品种与模式选择的直接生产经验可借鉴，结合美国黑土区以及文献中的建议，本研究选择禾本科（*Poaceae*）黑麦草（*Lolium perenne*）和豆科白三叶（*Trifolium repens*）作为覆盖作物与主栽作物玉米分别进行单播和混播间作，理论上可以提高土壤质量、降低土壤侵蚀的风险^[25-26]。为验证这一假设，本研究以裸地（CK）、玉米（*Zea mays*）单作（Y）、玉米与白三叶间作（Y+B）、玉米与黑麦草间作（Y+H）、玉米与白三叶&黑麦草间作（Y+B+H）5 个处理为研究对象，通过土壤结构、团聚体稳定性、抗冲性、抗剪性等特比较，综合分析不同品种及播种方式覆盖作物与玉米间作对土壤抗侵蚀能力影响，以期为东北黑土区覆盖作物相关研究提供科学依据，为黑土资源可持续利用提供参考。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省齐齐哈尔市克山农场（E 125° 07' 40" ~125° 37' 30"，N 48° 11' 15" ~48° 24' 07"），地处小兴安岭与松嫩平原的过渡地带，位于讷河市与克山县交界处。属温带大陆性季风气候，年平均气温 2.4℃，年降水量 500 mm，夏季降雨集中在 6—8 月份，约占全年降雨量的 70%，全年约 120

d 无霜期，霜期较长，约为 9 月中旬—翌年 5 月中旬。土壤冻结期从 11 月初持续—翌年 6 月，最大冻结深度可达 2.5 m。克山农场的地貌特征为漫川漫岗，漫川和漫岗的比例约为 70%和 30%，平均海拔 315 m，坡长而缓，坡长多为 200~1000 m，坡度平均 3~5°。克山农场以黑土为主，属中厚层黑土区，土壤有机质质量分数丰富，但土壤剖面 40~60 cm 处多有黏化层分布，在夏季集中降雨及春季融雪期易滞水产生地表径流和超渗产流，造成水土流失。克山农场土地集中连片，适宜耕种；耕地面积约占全厂土地面积 80%，主栽作物为玉米、大豆（*Glycine max*）、马铃薯（*Solanum tuberosum*），经营模式以现代化机械作业为主，但种植模式依然以主栽粮食作物的传统单作为主、轮作为辅，逐年推广秸秆还田，但目前实际生产过程中尚未涉及包含覆盖作物的保护性耕作模式。

2 材料与方法

2.1 试验设计

试验在克山农场一处撂荒多年的实验苗圃完成，2022 年 9 月初布设小区之前对样地进行全面除草和整地工作，确保试验前样地的一致性。按照南北长东西宽布设 10 m × 5 m 的小区，各小区中间设有 0.5 m 宽过道，确保在实验管理过程中不会扰动试验小区。本试验选用玉米作为主栽粮食作物，设置玉米单作和玉米-覆盖作物间作 2 种植模式，同时设置裸地作为空白对照。间作的覆盖作物选取禾本科黑麦草及豆科白三叶。试验共设置 5 个处理，每个小区（10 m × 5 m）对应 1 个处理：裸地（CK）、玉米单作（Y）、玉米+白三叶（Y_{+B}）、玉米+黑麦草（Y_{+H}）和玉米+白三叶+黑麦草（Y_{+B+H}）。2023 年 5 月 12 日采用平作方式穴播玉米，株行距为 30 cm × 30 cm，每穴播 2 株，出苗后间苗确保每穴 1 株。2023 年 6 月 4 日，玉米种植后 20 d，采用条播的方式将覆盖作物种植在玉米行间，其中白三叶播种量为 12 g/m²，黑麦草播种量 15 g/m²，混播小区的种子混播比例为白三叶（50%）+黑麦草（50%）。生长期间不施肥，不喷洒农药，定期浇水和人工除草，各处理的管理措施保持一致。综上所述，各处理小区间无论是前期植被覆盖情况、土壤条件、管理条件等均保持一致，我们假设小区间无差异，所以仅在小区内取了 3 个样点代表处理小区的情况。

2.2 样品采集与测定方法

本研究于 2023 年 9 月 25 日玉米收获后取样，从南至北沿着小区长的方向在每个处理小区内随机选取 3 个取样点，每个取样点分 2 层（0~10 cm 和 10~20 cm）采集耕层土壤。取样前用剪刀剪除植物地上部分，去除表层碎石、枯落物等，分别用 100 cm³ 环刀（土壤密度环刀）、6.18 cm × 2 cm 环刀（土壤抗剪强度环刀），以及直径 10 cm × 高 5 cm 的自制原状土取样器（土壤抗冲取样器）采集原状土样，分别用于土壤密度相关指标、抗剪强度、抗冲性等测定；同时采集 1.5 kg 非原状土，用于土壤质量含水量、土壤团聚体含量、稳定性以及土壤有机质质量分数等的测定，每个指标重复 3 次。

土壤质量含水量、土壤密度、土壤饱和持水量和土壤总孔隙度采用烘干法和环刀法测定^[27]，土壤有机

质质量分数采用元素分析仪（斯泰克元素燃烧系统 4024，意大利）测定。土壤有机质质量分数 S_{OM} 计算式为：

$$S_{OM} = S_{OC} \times 10 \times 1.724 \quad (1)$$

式中： S_{OM} 为土壤有机质质量分数，g/kg； S_{OC} 为土壤有机碳质量分数，g/kg。

团聚体含量及稳定性采用干湿筛相结合的方法完成：首先，将风干土干筛获得<0.25、[0.25，0.5)、[0.5，1)、[1，2)、[2，5)、[5，10) mm 共 6 个级别的土壤团聚体；其次，根据干筛获得的各粒径团聚体比例，称取 50 g 机稳性团聚体，利用土壤团粒分析仪 (WS1020，点将科技股份有限公司，上海) 测定土壤水稳性团聚体。通过计算获取各粒级湿筛土壤团聚体质量百分比^[28]。

平均质量直径 M_w 和几何平均直径 G_w 的计算式为

$$M_w = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (2)$$

$$G_w = \exp \sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i \quad (3)$$

式中： w_i 为第 i 粒级团聚体质量分数，%； x_i 指相邻两级团聚体的平均粒径，mm； $\bar{x}_i$ 为第 i 级团聚体的平均直径，mm。

团聚体破碎率 P_w 和 >0.25 mm 团聚体含量 $R_{0.25}$ 计算式为

$$P_w = \frac{M_{0.25} - m_{0.25}}{M_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

$$R_{0.25} = \frac{m_{0.25}}{m} \quad (5)$$

式中： $M_{0.25}$ 为粒径 >0.25 mm 的干筛团聚体总质量，g； $m_{0.25}$ 为粒径 >0.25 mm 的湿筛团聚体总质量，g； m 为湿筛团聚体总质量，g。

土壤抗冲性能^[29]采用原状土冲刷水槽法测定。使用直径 10 cm×高 5 cm 取样器采集原状土样，测定土壤抗冲性，每个处理 3 个重复。试验前将采集了原状土样的取样器置于盆中浸泡 12 h 至饱和状态，保持盆内水面不高于取样器上缘，然后将其取出静置 12 h 去除土壤重力水，小心放入冲刷槽进行冲刷试验，冲刷水槽长宽高分别为 2.5 m×0.2 m×0.1 m。根据漫川漫岗黑土区坡耕地实际情况（坡度多为 1°~8°），借鉴文献^[28]将冲刷槽坡度设置为 5°；由于覆盖作物处理根系丰富，根据东北黑土区的平均降雨量计算得出的冲刷流量难以达到实验效果，为了对比不同覆盖作物对土壤抗冲性的影响，按照最大降雨量设置土壤冲刷流量为 8 L/min；冲刷时间设计为 9 min，是根据裸土预试验时当土样冲刷深度达到 2 cm 的时间而确定，这是因为当土壤样品平均冲刷深度>2 cm 时，取样器对土壤分离便会产生显著影响，应立即试验^[30]。冲刷槽出口产流开始计时，前 3 min 每 1 min 接 1 次水土混合样，3 min 后，每 3 min 收集 1 次，冲刷结束后，将接样桶的泥水混合样沉淀，倒掉上清液，并转移至铝盒中，置于烘箱 105 °C 烘干、称量。土壤抗冲系数计算式为

$$K = Qt/m_s \quad (6)$$

式中： K 为土壤抗冲刷系数，L/g； Q 为冲刷流量，L/min； t 为冲刷时间，min； m_s 为泥沙干质量，g。

抗剪强度试验^[31]采用手动应变控制式直剪仪（南京土壤仪器厂生产）。试验时，以 100 、 200 、 300 和 400 kPa 4 个法向压力为一组，每组试样做 3 个平行试验，剪切速率为 0.8 mm/min 对土壤样品进行剪切，直到土样被剪切变形，发生破坏即停止剪切。抗剪强度 τ 按下式计算：

$$\tau = \frac{RC \times 10}{A} ; \quad (7)$$

式中： τ 为土壤抗剪强度，kPa； R 为各级垂直应力剪损时量力环量表读数，0.01 mm； C 为量力环校正系数，kPa/0.01mm； A 为试验样品受力面积，cm²； 10 为单位换算系数。

依据库伦定律公式计算抗剪强度指标土壤黏聚力 C_i 和内摩擦角 φ 。

$$\tau = C_i + \sigma \tan \varphi 。 \quad (8)$$

式中： τ 为土壤的抗剪强度，kPa； C_i 为土壤的黏聚力，kPa； σ 为垂直荷载，kPa； φ 为土壤内摩擦角，（°）。

2.3 土壤抗侵蚀能力综合评价

由于土壤抗侵蚀性受多重因子控制影响，故本研究选取多个土壤指标进行综合分析，进而评价东北黑土区不同玉米与覆盖作物间作下土壤的抗侵蚀能力，选取土壤质量含水量、土壤密度、土壤饱和持水量、土壤总孔隙度、平均质量直径、几何平均直径、 $R_{0.25}$ 含量、团聚体破碎率、土壤有机质质量分数、土壤抗冲系数、内摩擦角和土壤黏聚力共 12 个指标进行主成分分析，并通过主成分贡献率加权平均的方法综合评价不同处理下土壤的抗侵蚀能力的差异^[32]。

2.4 数据分析

采用 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析，运用单因素方差分析法（One-way ANOVA）对不同处理土壤的基本理化性质、土壤抗冲性能、土壤抗剪切性能进行差异显著性分析， $P < 0.05$ ；通过主成分分析与贡献率加权方法综合评价玉米与不同覆盖作物间作对土壤抗侵蚀能力的影响；运用 Origin 2024 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 土壤理化性质

玉米与不同覆盖作物间作处理的土壤理化性质如表 1 所示，与裸地相比，0~10 cm 土层各处理土壤质量含水量增幅为 1.98%~6.40%，但各处理间差异不显著；10~20 cm 土层依然为裸地土壤质量含水量最高（34.84%），但处理间差异不显著；0~10 和 10~20 cm 2 个土层直接的土壤质量含水量亦无显著差异。表层 0~10 cm 土壤密度表现为 $CK > Y_{+B} > Y_{+H} > Y_{+B+H} > Y$ ，与裸地相比，各处理降幅为 4.10%~8.20%，但均未达到显著水平；在 10~20 cm 土层，土壤密度变化范围为 1.18 ~1.23 g/cm³， Y_{+B+H} 处理土壤密度最低，各处理差异不显著。0~10 cm 土层土壤总孔隙度表现为 $Y_{+B+H} > Y > Y_{+H} > Y_{+B} > CK$ ，与裸地相比， Y 、 Y_{+B} 、 Y_{+H} 和 Y_{+B+H} 的土壤总孔隙度依次增加 12.91%、7.5%、11.65%和 14.39%，其中 Y_{+B+H} 增幅达到显著水平

($P<0.05$)；在 10~20 cm 土层，土壤总孔隙度各处理间差异不显著。0~10 cm 土层土壤饱和持水量表现为 $Y > Y_{+B+H} > Y_{+H} > Y_{+B} > CK$ ，与裸地相比，Y 和 Y_{+B+H} 显著增大了土壤饱和持水量 23.60%和 21.38%($P<0.05$)；10~20 cm 土层土壤饱和持水量表现为 $Y_{+H} > CK > Y > Y_{+B+H} > Y_{+B}$ ，但差异不显著。各处理间以及各土层间土壤有机质质量分数的变化较为显著，0~10 cm 土层 Y 处理土壤有机质质量分数最高，显著高于其他处理，与裸地相比， Y_{+H} 和 Y_{+B+H} 土壤有机质质量分数显著降低了 15.42%和 15.80% ($P<0.05$)；10~20 cm 土层 CK 处理土壤有机质质量分数显著高于其他处理 ($P<0.05$)，随着土层深度的增加，CK、Y 和 Y_{+B} 中土壤有机质质量分数增大， Y_{+H} 和 Y_{+B+H} 中土壤有机质质量分数显著降低 ($P<0.05$)，总体而言，与裸地和玉米单作相比，玉米与覆盖作物间作降低土壤有机质质量分数，禾本科黑麦草作为覆盖作物时，土壤有机质质量分数降低确实更为显著。

表 1 不同耕作模式下土壤理化性质

Tab. 1 Physicochemical properties of the soil under different treatments with different cover crops

土层深 Soil depth/cm	处理 Treatment	土壤质量含水量 Soil moisture/%	土壤密度 Soil bulk density/ (g cm ⁻³)	土壤总孔隙度 Soil total porosity/%	土壤饱和持水量 Saturation moisture capacity/%	土壤有机质质量分数 Soil organic matter content/(g·kg ⁻¹)
0~10	CK	31.88±0.64Aa	1.22±0.07Aa	44.54±2.37Ab	36.49±1.29Ab	38.79±0.34Ab
	Y	33.42±0.58Aa	1.12±0.01Aa	50.29±4.84Aab	45.10±4.70Aa	39.32±0.25Aa
	Y_{+B}	32.51±1.75Aa	1.17±0.08Aa	47.88±3.23Aab	41.20±5.15Ab	38.33±0.45Ab
	Y_{+H}	33.92±1.90Aa	1.16±0.07Aa	49.73±1.94Aab	43.17±3.45Ab	32.81±0.23Ac
	Y_{+B+H}	33.04±0.18Aa	1.15±0.09Aa	50.95±2.03Aa	44.29±2.20Aa	32.66±0.20Ac
10~20	CK	34.84±0.93Aa	1.22±0.06Aa	47.11±5.58Aa	38.83±5.09Aa	40.44±0.44Ba
	Y	33.63±1.02Aa	1.22±0.05Ba	46.85±2.65Aa	38.56±3.57Aa	39.78±0.43Bb
	Y_{+B}	31.60±0.20Aa	1.23±0.05Aa	40.10±4.44Aa	32.91±2.01Aa	39.32±0.17Bb
	Y_{+H}	33.82±1.56Aa	1.22±0.01Aa	48.23±4.92Aa	39.70±4.37Aa	32.21±0.23Ac
	Y_{+B+H}	32.41±0.49Aa	1.18±0.04Aa	40.51±4.35Aa	36.62±5.09Aa	31.24±0.42Bd

注：不同小写字母代表相同土层不同植被配置类型间差异显著 ($P<0.05$)；不同大写字母代表相同植被配置类型不同土层间差异显著 ($P<0.05$)；下同。Notes: Different lowercase letters indicate significant differences between different vegetation configuration types in the same soil layer ($P<0.05$); different uppercase letters indicate significant differences between the same vegetation type ($P<0.05$). CK: Control, bare land; Y: Maize (*Zea mays*) monoculture); Y_{+B} : Maize intercropped with white clover (*Trifolium repens*), Y_{+H} : Maize intercropped with ryegrass (*Lolium perenne*); and Y_{+B+H} (Maize intercropped with white clover and ryegrass polyculture), the same below.

3.2 土壤团聚体稳定性

玉米与不同覆盖作物间作模式下土壤团聚体特征如表 2 所示，土层之间平均质量直径 (M_w) 的变化要比覆盖作物处理间的变化明显，整体表现为随着土层的加深 M_w 增加，且与裸地相比，Y 和 Y_{+B} 处理增加了 M_w 而 Y_{+H} 和 Y_{+B+H} 处理降低 M_w ($P<0.05$)。几何平均直径 (G_w) 的变化不如 M_w 敏感，0~10 cm 土层各处理间差异不显著，10~20 cm 土层 Y_{+H} 和 Y_{+B+H} 的 G_w 依然最小 ($P<0.05$)。各处理间 $R_{0.25}$ 和团聚体破碎率 (P_w) 在 0~10 cm 土层均无显著变化，随着土层加深， $R_{0.25}$ 和 P_w 分别呈现增加和降低的趋势，总体而言， Y_{+B} 处理的土壤团聚体稳定性最强。

表 2 玉米与不同覆盖作物间作模式下土壤团聚体稳定性

Tab. 2 Soil aggregate stability under corn and different cover crop intercropping modes

土层深 Soil depth/cm	处理 Treatment	平均质量直径 Mean weight diameter (M_w)/mm	几何平均直径 Mean geometric diameter (G_w)/mm	$R_{0.25}$ 含量 $R_{0.25}$ content/%	团聚体破碎率 Percentage of aggregate Destruction (P_w)/%
0~10	CK	1.01±0.05Aab	0.77±0.00Aa	72.45±0.79Aa	26.00±1.08Aa
	Y	1.11±0.06Aa	0.79±0.05Aa	71.74±5.54Aa	26.44±4.98Aa
	Y+B	1.14±0.07Aa	0.82±0.04Aa	76.50±4.05Aa	22.26±3.93Aa
	Y+H	0.91±0.04Ab	0.75±0.02Aa	73.97±1.22Aa	24.66±0.18Aa
	Y+B+H	1.09±0.15Aa	0.79±0.04Aa	75.99±4.57Aa	23.15±4.37Aa
10~20	CK	1.32±0.05Bb	0.90±0.03Ba	81.98±2.07Ba	17.47±2.15Bb
	Y	1.50±0.05Ba	0.90±0.04Ba	78.75±2.40Ab	20.49±2.7Aab
	Y+B	1.43±0.03Ba	0.94±0.03Ba	82.38±1.56Aa	17.18±1.47Ab
	Y+H	1.17±0.01Bc	0.84±0.01Bb	78.41±1.40Bb	21.04±1.55Bab
	Y+B+H	1.05±0.06Ad	0.80±0.03Ab	76.59±2.90Ab	22.65±3.04Aa

3.3 土壤抗冲性能

玉米与不同覆盖作物间作模式下土壤抗冲性能如图 1 所示, 表层 0~10 cm 土壤抗冲系数变化特别明显, 含有黑麦草的处理显著高于其他处理, Y+H 和 Y+B+H 土壤抗冲系数分别高达 61.93 和 50.86 L/g, 与裸地相比, 显著高出 96.5%和 95.7% ($P<0.05$)。10~20 cm 土层不同覆盖作物处理的土壤抗冲系数差异不明显, 但均显著高于裸地, 与裸地相比, Y、Y+B、Y+H 和 Y+B+H 的土壤抗冲系数依次增加 58.8%、53.6%、56.6% 和 65.6%, 增幅均达到显著水平 ($P<0.05$)。总体而言, 覆盖作物可显著提高土壤抗冲性, 以 Y+H 和 Y+B+H 处理效果最为显著。

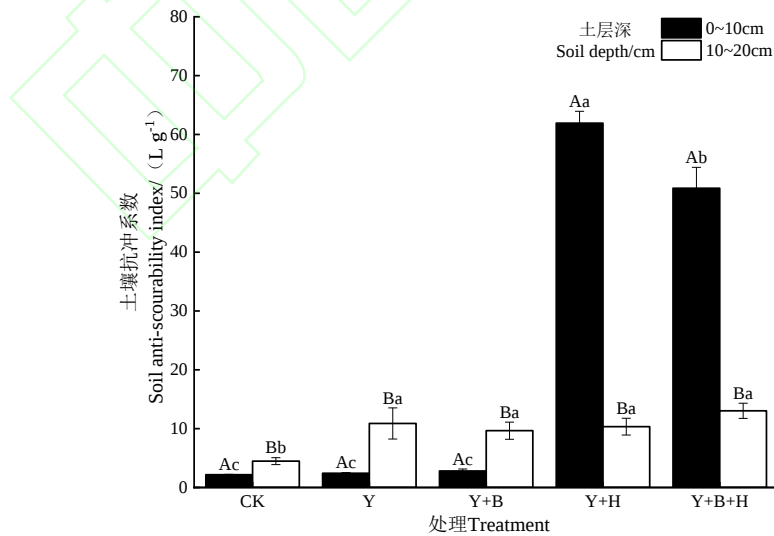


图 1 玉米与不同覆盖作物间作模式下土壤抗冲系数

Fig. 1 Soil anti-scourability index under corn and different cover crop intercropping modes

3.4 土壤抗剪切性能

玉米与不同覆盖作物间作模式下土壤抗剪切性能如图 2 所示, 0~10 cm 土层土壤内摩擦角的表现为 Y+B+H > Y+B > CK > Y > Y+H, 其中 Y+B+H 和 Y 土壤内摩擦角分别为 5.4°和 5.0°, 显著高于 CK (4.3°) 25.5%

和 17.3% ($P<0.05$)；10~20 cm 土层各处理土壤内摩擦角的总体趋势为 $Y > CK > Y_{+B+H} > Y_{+H} > Y_{+B}$ ，且 0~10 cm 土层各处理的内摩擦角显著高于 10~20 cm 土层 ($P<0.05$)。土层间各处理土壤黏聚力的总体趋势较为相似，0~10 cm 土层表现为 $Y_{+B+H} > CK > Y_{+H} > Y > Y_{+B}$ ， Y_{+B+H} (15.4 kPa) 显著高于 CK (13.6 kPa) 13.2% ($P<0.05$)。10~20 cm 土层表现为 $CK > Y_{+B+H} > Y > Y_{+H} > Y_{+B}$ ， Y_{+B} 和 Y_{+H} 的土壤黏聚力显著低于裸地 ($P<0.05$)。

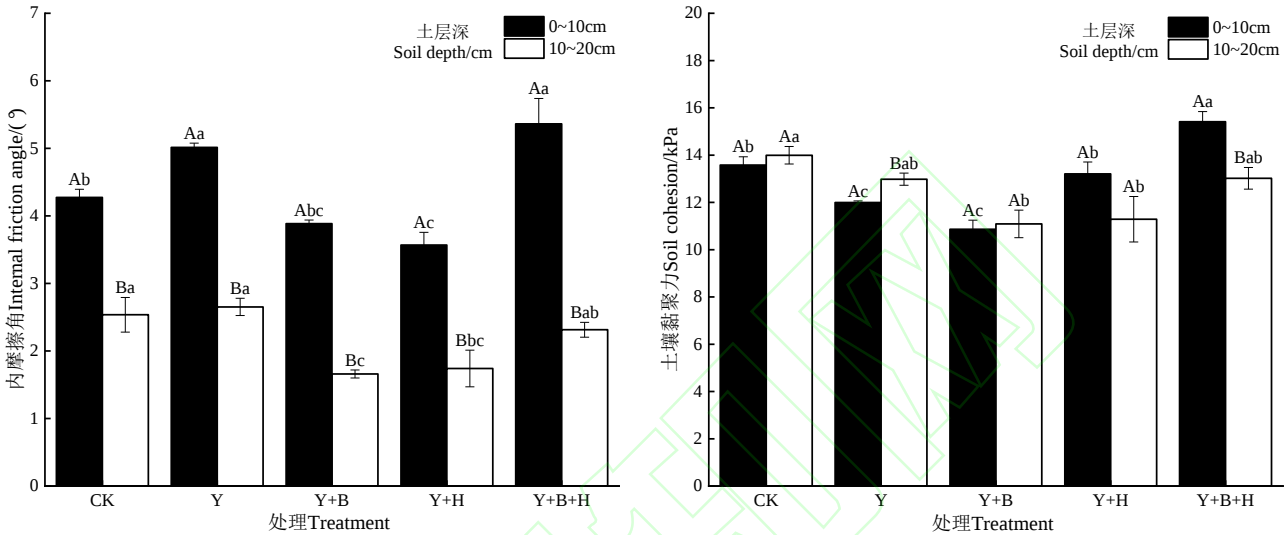


图 2 玉米与不同覆盖作物间作模式下内摩擦角（左）和土壤黏聚力（右）

Fig. 2 Internal friction angle (left) and cohesion (right) under corn and different cover crop intercropping modes

3.5 不同覆盖作物下土壤抗侵蚀能力综合评价

主成分分析中 KMO 检验值为 0.614，Bartlett 的显著性水平 $P<0.01$ ，符合因子分析的条件。12 项土壤指标（土壤质量含水量、土壤密度、土壤饱和持水量、土壤总孔隙度、平均质量直径、几何平均直径、 R_0 、 25 含量、团聚体破碎率、土壤有机质质量分数、土壤抗冲系数、内摩擦角和土壤黏聚力）通过主成分分析得到 4 个主成分因子，其对土壤抗侵蚀能力的贡献率分别为 44.667%、13.971%、12.614%和 10.027%，累积贡献率可达到 81.28%，可解释土壤抗侵蚀能力情况（表 3）。

表 3 主成分结果

Tab. 3 Principal component results

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution%	累积贡献率 Cumulative contribution/%
1	5.360	44.667	44.667
2	1.677	13.971	58.638
3	1.514	12.614	71.252
4	1.203	10.027	81.279

根据成分因子得分系数矩阵，利用标准化后的指标计算出 4 个主成分因子得分（表 4），各主成分的因子得分计算公式如下所示：

$$Y_1 = 0.014X_1 - 0.076X_2 + 0.113X_3 + 0.104X_4 - 0.125X_5 - 0.137X_6 - 0.127X_7 + 0.126X_8 - 0.072X_9 + 0.075X_{10} + 0.099X_{11} + 0.061X_{12}; \quad (9)$$

$$Y_2=0.163X_1-0.021X_2+0.104X_3+0.126X_4+0.062X_5+0.079X_6+0.113X_7-0.108X_8-0.055X_9+0.119X_{10}-0.022X_{11}+0.119X_{12};$$
 (10)

$$Y_3=0.027X_1-0.107X_2+0.120X_3+0.093X_4+0.095X_5+0.053X_6-0.032X_7+0.023X_8-0.202X_9-0.147X_{10}+0.086X_{11}-0.038X_{12};$$
 (11)

$$Y_4=0.201X_1+0.207X_2-0.057X_3+0.046X_4-0.023X_5-0.039X_6-0.075X_7+0.080X_8+0.063X_9-0.090X_{10}-0.050X_{11}+0.052X_{12}。$$
 (12)

式中：X₁~X₁₂ 分别表示土壤质量含水量、土壤密度、土壤饱和持水量、土壤总孔隙度、平均质量直径、几何平均直径、R_{0.25} 质量分数、团聚体破碎率、土壤有机质质量分数、土壤抗冲系数、内摩擦角和土壤黏聚力标准化后的指标；Y₁、Y₂、Y₃ 和 Y₄ 分别为主成分 1、2、3 和 4 的得分，根据主成分方差贡献率占 4 个主成分总方差贡献率的比率为权重计算综合得分^[32]，构建 5 个处理的土壤抗侵蚀能力得分计算式。

$$Y=0.5495Y_1+0.1719Y_2+0.1552Y_3+0.1234Y_4。$$
 (13)

表 4 成分矩阵
Tab. 4 Component matrix

指标 Index	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
X ₁	0.094	0.611	0.097	0.635
X ₂	-0.507	-0.079	-0.380	0.654
X ₃	0.752	0.388	0.425	-0.181
X ₄	0.692	0.470	0.329	0.147
X ₅	-0.837	0.232	0.339	-0.072
X ₆	-0.916	0.295	0.190	-0.125
X ₇	-0.846	0.423	-0.112	-0.238
X ₈	0.844	-0.403	0.083	0.253
X ₉	-0.478	-0.204	0.719	0.198
X ₁₀	0.499	0.443	-0.521	-0.285
X ₁₁	0.662	-0.081	0.307	-0.170
X ₁₂	0.410	0.446	-0.136	0.164

Y 为 5 个处理 12 个指标土壤抗侵蚀能力综合得分，根据综合得分函数得出不同处理主成分的得分和最后的综合得分及其排名（表 5）。

表 5 土壤抗侵蚀能力综合得分及排名

Tab. 5 Comprehensive scores and ranking of soil erosion resistance

处理 Treatment	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y	排名 Ranking
CK	-0.21	-0.09	0.11	0.27	-0.08	4
Y	0.01	-0.03	0.51	0.07	0.09	3
Y+B	-0.68	-0.24	0.11	-0.17	-0.42	5
Y+H	0.38	0.17	-0.39	0.00	0.18	2

Y_{+B+H}	0.51	0.19	-0.34	-0.17	0.24	1
------------	------	------	-------	-------	------	---

注： Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 分别为主成分 1、2、3 和 4 的得分， Y 为 5 个处理 12 个指标土壤抗侵蚀能力综合得分。Note: Y_1 , Y_2 , Y_3 and Y_4 are the scores of main components 1, 2, 3 and 4, respectively. Y is the comprehensive score of soil erosion resistance of 12 indicators in 5 treatments.

根据综合得分函数得出不同处理主成分的得分和最后的综合得分及其排名如表 5 所示，各处理土壤抗侵蚀能力综合得分由大到小顺序为 $Y_{+B+H} > Y_{+H} > Y > CK > Y_{+B}$ ，变化幅度在 -0.42~0.24 之间，其中 Y_{+B+H} 样地土壤抗侵蚀能力综合得分最高。

4 讨论

玉米与不同种类以及不同播种方式覆盖作物间作对土壤抗侵蚀能力的影响存在差异。相比裸地和玉米单作，包含黑麦草的 Y_{+H} 和 Y_{+B+H} 处理的土壤抗侵蚀能力显著提高，特别是在土壤抗冲性方面，这与郑江坤等^[33]的研究结果相似。杜嘉伟等^[34]研究表明，覆盖作物根系通过相互交织和盘绕的土壤物理固结作用，可显著提高土壤稳定性和土壤抗径流冲刷能力。此外，土壤的根系密度及地下生物量与土壤抗冲性呈显著正相关^[35]，以上研究结果证明了覆盖作物根系在固土方面的重要作用。相比须根发达的黑麦草而言，白三叶较低的根系密度和直根系构型^[36]使 Y_{+B} 处理与裸地及玉米单作相比，土壤抗侵蚀能力并未显著增加。除了根系的直接影响外，还可能与土体和根系共同决定的土壤抗剪性有关系，在本研究中，0~10 cm 土层下， Y_{+B+H} 显著提高了土壤黏聚力和内摩擦角，Meng 等^[37]发现土壤颗粒与根系的相互作用产生内聚力，同时根系的抗拉强度及根土滑动摩擦力共同提高了土壤抗剪强度。也有研究表明^[35]，植物根系分泌物与土壤胶体形成土壤胶结物，进而增强土壤的黏聚力和内摩擦角。而在 10~20 cm 土层，各处理对土壤抗剪性均无显著提高，这可能与覆盖作物根系尚未伸入深层土壤有关。

覆盖作物的播种方式（混播和单播）也会对土壤抗侵蚀能力产生影响，其中混播（ Y_{+B+H} ）效果优于单播（ Y_{+B} 或 Y_{+H} ）。这与任嘉欣等^[38]的研究结果大致相同，与单播相比，覆盖作物混播通过增加物种多样性促进土壤有益微生物群落发展，进而提升土壤稳定性及抗侵蚀能力^[39]。本研究中覆盖作物不同播种方式的优势不同，对土壤抗侵蚀能力的贡献不同。 Y_{+B} 单播因豆科白三叶的固氮作用显著提高土壤速效氮含量及有机质质量分数^[40]。 Y_{+H} 单播则由于禾本科黑麦草须根系则通过穿透土壤孔隙、缠绕颗粒，在增强抗冲性方面表现突出。 Y_{+B+H} 混播通过功能互补性实现协同增效，其地上生物量增加可有效拦截降雨，地下根系网络则同步改善土壤物理性质（如土壤黏聚力和内摩擦角），并增强水分入渗与结构稳定性，从而综合提升土壤抗侵蚀能力^[10]。

本研究基于 12 个土壤指标所表现出来的土壤抗侵蚀能力发现，玉米与覆盖作物间作的土壤抗侵蚀能力优于玉米单作和裸地，且覆盖作物混播效果要优于单种。但存在区域适应性差异，例如南方红壤区植物白三叶单播提高土壤抗侵蚀能力的效果强于黑麦草和混播^[41]。因此，本研究结果仅为东北黑土区覆盖作物

的选择与配置提供参考。此外,有研究结果表明,随着覆盖作物种植年限的延长,土壤有机质质量分数会逐渐呈现上升的趋势^[42]。受限于一年种植周期且本研究均未施肥,覆盖作物未显著提升土壤有机质质量分数及团聚体稳定性,可能与生物量归还不足及未施肥导致的养分消耗有关。伴随覆盖作物种植年限延长枯落物与根系分解强化土壤抗侵蚀的效果理论上会越加明显。当前评价基于 12 个土壤物理化学指标,还有其他影响因素如土壤入渗^[18]、土壤抗蚀性^[13]及根系生物量^[42]等均未考虑,未来需要将影响土壤抗侵蚀能力的直接指标以及间接指标分开研究,可为适地适草过程中针对性选择覆盖作物提供参考。

5 结论

1) 是否种植覆盖作物、覆盖作物的种类及播种方式对农田黑土抗侵蚀能力具有显著影响。基于 12 个土壤结构、稳定性、抗冲性、抗剪性相关指标所综合评价的土壤抗侵蚀能力表现为玉米与白三叶&黑麦草间作 (Y_{+B+H}) 在提高土壤抗侵蚀能力方面效果最好,其次是玉米与黑麦草 (Y_{+H}) 间作、玉米单作 (Y) 和裸地 (CK), 而玉米与白三叶间作 (Y_{+B}) 的效果最差。

2) 玉米与白三叶&黑麦草混播模式与裸地对照相比,显著提高表层 0~10 cm 土壤抗冲系数 95.7%、内摩擦角 25.5%、黏聚力 1.13 倍,而玉米与黑麦草单播间作模式仅能有效提升土壤抗冲性能。尽管白三叶草在提高土壤抗侵蚀能力方面的效果不如黑麦草,但其在防止土壤有机质含量下降方面却表现出了明显的优势。

3) 与传统主栽作物单作相比,不同覆盖作物及其组合与主栽作物间作在提升土壤抗侵蚀能力方面具有不同的作用,这为东北黑土区农田覆盖作物的合理选择与配置提供了科学依据,也为该区水土流失综合防治提供了新的思路和途径。

6 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[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184.
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 Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1184.
- [2] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报 (2023 年)[R]. 北京, 2024.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China bulletin on soil and water conservation (2023)[R]. Beijing, 2024.
- [3] 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.
GENG Huajie, ZHENG Fanli, 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.
- [4] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1203.
AO Man, ZHANG Xudong, GUAN Yixin. Research and practice of conservation tillage technology on northeastern black soil[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1203.
- [5] 秦猛, 董全中, 薛红, 等. 我国保护性耕作的研究进展[J]. 河南农业科学, 2023, 52(7): 1.
QIN Meng, DONG Quanzhong, XUE Hong, et al. Research progress of conservation tillage in China[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(7): 1.
- [6] DE BAETS S, POESEN J, MEERSMANS J, et al. Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow

erosion[J]. Catena, 2011, 85(3): 237.

- [7] 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[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 140.
YAN Lei, ZHANG Yongbin, DING Yingzhi, et al. Response of cover crop roots to soil compaction in a vertisol shajiang black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 140.
- [8] CHEN L, REJESUS R M, AGLASAN S, et al. The impact of cover crops on soil erosion in the US Midwest[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 324: 116168.
- [9] XU Shengtao, ZHANG Wenlong, GOODWIN H P, et al. Effect of cover crop on soil fertility and bacterial diversity in a banana plantation in southwestern China[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 240: 106092.
- [10] 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.
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.
- [11] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34.
LIU Dinghui, LI Yong. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 34.
- [12] DING Kai, ZHANG Yuting, GE Siyu, et al. Long-term cover crop monocultures and mixtures improve soil multifunctionality and shift microbial communities and functions[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 157: 127188.
- [13] 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.
LI Yan, GU Huiyan, CHEN Yueming. Effects of vegetation fine roots on soil anti-erodibility of typical black soil[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(7): 81.
- [14] WAWAN, DINI IR, HAPSOH. The effect of legume cover crop *Mucuna bracteata* on soil physical properties, runoff and erosion in three slopes of immature oil palm plantation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 250: 12.
- [15] KAYE J, FINNEY D, WHITE C, et al. Managing nitrogen through cover crop species selection in the U.S. mid-Atlantic[J]. PLoS One, 2019, 14: e0215448.
- [16] WERLE R, BURR C, BLANCO-CANQUI H. Cereal rye cover crop suppresses winter annual weeds[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2018, 98: 498.
- [17] 韩上, 耿明建, 宋莉, 等. 三峡库区橘园不同豆科绿肥的生长及养分积累比较[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(1): 62.
HAN Shang, GENG Mingjian, SONG Li, et al. Comparison of growth and nutrient accumulation of different leguminous green fertilizers in orange orchards in three gorges reservoir area[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(1): 62.
- [18] 刘爽, 朱沁, 王晓婷, 等. 冬季覆盖作物对表层黑土渗透性能的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(5): 1248.
LIU Shuang, ZHU Qin, WANG Xiaoting, et al. Effect of winter cover crops on the infiltration properties of top layer of black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5): 1248.
- [19] 杨庆楠, 徐金忠, 李志飞, 等. 典型黑土区陡坡植草水土流失防治效果研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 117.
YANG Qingnan, XU Jinzhong, LI Zhifei, et al. Effects of artificial grass on soil erosion control on steep slope in typical mollisols areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 117.
- [20] 李芳. 特色植被在水土保持生态中的作用分析[J]. 水利规划与设计, 2024 (9): 40.
LI Fang. Analysis of the role of characteristic vegetation in soil and water conservation ecology[J]. Water Resources Planning and Design, 2024 (9): 40.
- [21] 李学文. 紫云英和油菜还田对土壤团聚体和有机碳固存的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 2.
LI Xuewen. Effects of milk vetch and rapeseed returned to the field on soil aggregates and organic carbon sequestration[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022:2.
- [22] 包兴国, 杨文玉, 曹卫东, 等. 豆科与禾本科绿肥饲草作物混播增肥及改土效果研究[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1): 43.
BAO Xingguo, YANG Wenyu, CAO Weidong, et al. Study on the effect of mixed sowing and soil modification in legume and grasses[J]. Chinese Journal of Grassland, 2012, 34(1): 43.
- [23] HAYDEN Z D, NGOUAJIO M, BRAINARD D C. Planting date and staggered seeding of rye-vetch mixtures: biomass, nitrogen, and legume winter survival[J]. Agron J, 2015, 107: 33.
- [24] KEENE C L, CURRAN W S, WALLACE J M, et al. Cover crop termination timing is critical in organic rotational no-till

systems[J]. *Agron J*, 2017, 109: 272.

- [25] 张斐斐, 白龙, 王晓红, 等. 施氮对黑麦草草坪生长及土壤硝态氮的影响[J]. *草业科学*, 2013, 30(8): 1143.
ZHANG Feifei, BAI Long, WANG Xiaohong, et al. Effects of nitrogen application on the growth of ryegrass lawn and soil nitrate nitrogen[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(8): 1143.
- [26] WERLE R, BURR C, BLANCO-CANQUI H. Cereal rye cover crop suppresses winter annual weeds[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2017, 98(2): 498.
- [27] 江胜国. 国内土壤密度测定方法综述[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(S2): 82.
JIANG Shengguo. Review on soil bulk density determination method[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(S2): 82.
- [28] 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.
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.
- [29] 程金花, 沈子雅. 重庆四面山不同林分土壤抗蚀抗冲特征[J]. *中国水土保持科学*, 2024, 22(1): 52.
CHEN Jinhua, SHEN Ziya. Anti-erodibility and anti-scourability of different plantations in Simian Mountains of Chongqing[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(1): 52.
- [30] JM A, ZL A, BS B, et al. Mechanism and modeling of different plant root effects on soil detachment rate[J]. *Catana*, 2022, 212, 106.
- [31] 范昊明, 迟静怡, 周丽丽, 等. 冻融条件下东北地区 3 种土壤抗剪强度差异性分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(5): 606.
FAN Haoming, CHI Jingyi, ZHOU Lili, et al. Difference analysis of shear strength of three soils in Northeast China under freeze-thaw condition[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2020, 51(5): 606.
- [32] 王云琦, 王玉杰, 刘楠. 三峡库区典型林分土壤抗侵蚀性能及评价[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(6): 54.
WANG Yunqi, WANG Yujie, LIU Nan. Capability of soil erosion resistance and evaluation on it for typical forests in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32 (6): 54.
- [33] 郑江坤, 张鸽, 曾倩婷, 等. 弃渣场边坡草本植物根系力学及土壤抗冲性特征[J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(6): 59.
ZHENG Jiangkun, ZHANG Ge, ZENG Qianting, et al. Mechanical characteristics of herbaceous roots and soil anti-scourability on the slope of dump yards[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(6): 59.
- [34] 杜伟嘉, 王芙臣, 李斐, 等. 覆盖作物对坡耕地的减流减沙效应及玉米产量的影响[J]. *玉米科学*, 2023, 31(6): 100.
DU Weijia, WANG Fuchen, LI Fei, et al. Effects of cover crops on sand reduction effects and corn yield on slope arable land[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(6): 100.
- [35] 郑茂, 吴立潮, 徐杰, 等. 攸县 3 种不同水土保持林土壤抗侵蚀性能[J]. *湖南林业科技*, 2016, 43(03): 37.
ZHENG Mao, WU Lichao, XU Jie, et al. Comparison of soil anti-erodibility of 3 types soil and water conservation forest in Youxian County[J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2016, 43(03): 37.
- [36] 陈红. 4 种地被植物根系对土壤渗透、抗剪和抗冲蚀性能的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024: 2.
CHEN Hong. Effects of Four Species Ground Cover Plant Roots on Soil Permeability, Shear Resistance and Erosion Resistance[D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2024: 2.
- [37] MENG S, ZHAO G, YANG Y. Impact of plant root morphology on rooted-soil shear resistance using triaxial testing[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1.
- [38] 任嘉欣, 黎昊, 兰翔伟, 等. 覆盖作物多样性对橘园土壤理化性质的影响及综合评价[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(9): 98.
REN Jiaxin, LI Hao, LAN Xiangwei, et al. Effects of cover crop diversity on soil physicochemical properties of orange orchards and comprehensive evaluation[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(9): 98.
- [39] PARR M, GROSSMAN M J, REBERG HORTON C S, et al. Nitrogen delivery from legume cover crops in no-till organic corn production[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(06): 1578.
- [40] 周春衡, 王文林, 郑树芳, 等. 基于隶属函数法的不同生草栽培模式下澳洲坚果果园土壤理化性质综合评价[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(11): 2362.

ZHOU Chunheng, WANG Wenlin, ZHENG Shufang, et al. Comprehensive evaluation of soil physico-chemical properties in the macadamia orchard under different sod-cultural practices based on membership function method[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(11): 2362.

[41] 秦嘉惠, 程谅, 曹丹妮, 等. 两种草本植物根系对土壤可蚀性的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 55.

QIN Jiahui, CHENG Liang, CAO Danni, et al. Effects of root system of two herbs on soil erodibility[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 55.

[42] 姜莉莉, 孙瑞红, 张甘雨, 等. 连续 3a 生草对苹果园土壤理化性质及微生物群落的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(09): 1456.

JIANG Lili, SUN Ruihong, ZHANG Ganyu, et al. The effect of continuous 3 years of grass growth on soil physicochemical properties and microbial communities in apple orchards[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(09): 1456.

