

黑土区坡耕地水土保持耕作措施对土壤理化性状的影响

张忠学^{1,2} 尹致皓^{1,2} 余佩哲^{1,2} 齐智娟^{1,2} 魏永霞^{1,2} 李 鳌^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探寻黑土区坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤理化性状的影响机理,开展了田间小区试验。设置横坡耕作(TP)、垄向区田(RF)、深松(SF)、横坡耕作+垄向区田(TP-R)、横坡耕作+深松(TP-S)、垄向区田+深松(RF-S)3种水土保持耕作措施及3种组合耕作措施,并以常规顺坡耕作(CK)为对照,分析了土壤孔隙度、土壤机械组成、水稳性土壤团聚体稳定性、土壤养分含量等指标,并采用TOPSIS模型对不同水土保持耕作措施进行了综合评价,筛选了土壤稳定性强且蓄水保肥效果良好的水土保持耕作措施。结果表明:在玉米的全生育期内,深松、垄向区田、横坡耕作均能提高土壤体积含水率。TP-S处理体积含水率最大,0~40 cm 土层平均体积含水率较CK处理增加29.47%;RF-S处理平均孔隙度最大,TP-S处理次之,平均孔隙度较CK处理分别增大10.68%、9.25%;TP-S处理能够显著提高土壤稳定性,其中平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和大团聚体含量($R_{0.25}$)较CK处理分别增加12.30%、19.57%、13.97%;TP-S处理能够改善土壤机械组成,TP-S处理粗砂粒、粉粒、黏粒含量较CK处理增加15.40%、26.89%、1.90%,细砂粒含量较CK处理降低31.56%;TP-S处理IN(无机态氮)、AP(有效磷)、AK(速效钾)含量最高,较CK处理IN、AP、AK含量分别增加42.81%~55.32%、39.69%~40.68%、20.41%~25.45%。由TOPSIS模型综合评价结果可知,TP-S处理贴合度最高,土壤结构更稳定,且蓄水保肥效果更好,为适宜该地区的水土保持耕作措施。

关键词: 黑土区;坡耕地;耕作措施;土壤结构;蓄水保肥;TOPSIS模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0282-12

OSID:



Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Physical and Chemical Properties in Slope Farmland in Black Soil Region

ZHANG Zhongxue^{1,2} YIN Zhihao^{1,2} YU Peizhe^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} WEI Yongxia^{1,2} LI Ao^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory for Efficient Utilization of Agriculture Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the effects of different soil and water conservation tillage measures on soil physical and chemical properties in sloping farmland, a field experiment was carried out. Setting transverse tillage (TP), ridge field (RF), deep loosening (SF), transverse tillage + ridge field (TP-R), transverse tillage + deep loosening (TP-S), and ridge field + deep loosening (RF-S) three soil and water conservation tillage measures and three combined tillage measures, and conventional down-slope tillage (CK) as a control. The soil porosity, soil mechanical composition, water stability, soil aggregate stability, soil nutrients and other indicators were analyzed, and the TOPSIS model was used to comprehensively evaluate different soil and water conservation farming measures, and the soil stability and water storage and fertilizer conservation were selected. The effective soil and water conservation practices in farming were investigated. The results showed that during the whole growth period of maize, deep loosening tillage, ridge field and transverse tillage could all increase the soil volume moisture content. The TP-S treatment had the highest volumetric moisture content, and the average volumetric moisture

收稿日期: 2023-05-08 修回日期: 2023-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500802)和东农学者计划学术骨干项目(21XG18)

作者简介: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

通信作者: 齐智娟(1987—),女,副教授,博士生导师,主要从事土壤水热运移和节水灌溉技术研究,E-mail: zhijuan.qi@neau.edu.cn

content of the 0 ~ 40 cm soil layer was increased by 29.47% compared with that of the CK treatment. RF - S treatment had the largest average porosity, followed by TP - S treatment, and the average porosity was increased by 10.68% and 9.25% in turn compared with that of CK treatment. TP - S treatment could significantly improve soil stability, among which the mean mass diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and macroaggregate content ($R_{0.25}$) were increased by 12.30%, 19.57% and 13.97% respectively compared with that of CK treatment. TP - S treatment could improve soil mechanical composition, the content of coarse sand, powder, and clay particles in TP - S treatment was 15.40%, 26.89% and 1.90% higher than that of CK treatment, the content of fine sand was 31.56% lower than that of CK treatment; the content of IN (inorganic nitrogen), AP (available phosphorus) and AK (available potassium) in TP - S treatment was the highest, compared with that of CK treatment, the content of IN, AP and AK was increased by 42.81% ~ 55.32%, 39.69% ~ 40.68% and 20.41% ~ 25.45%, respectively. According to the comprehensive evaluation results of the TOPSIS model, the TP - S treatment had the highest degree of fit, more stable soil structure, and better water storage and fertilizer conservation effects, which was a suitable soil and water conservation farming measure in this area.

Key words: black soil region; slope farmland; cultivation measures; soil structure; water storage and fertilizer conservation; TOPSIS model

0 引言

我国东北黑土区是世界四大黑土区之一^[1],黑土区粮食产量占全国粮食产量的 22%,但近年来由于农业的过度开发,导致东北黑土区水土流失严重^[2-3]。水土流失会造成土壤黑土层变薄、养分流失、有机质含量下降、土壤结构破坏和土壤生态环境恶化等问题^[4],进而阻碍农业经济的发展^[5-6]。

合理的耕作是提高农田作物产量、减少水土流失最有效的方法,对土壤结构性及养分含量具有最直接的影响^[7-9]。已有研究表明,适宜东北地区的坡耕地水土保持耕作措施为深松、垄向区田和横坡耕作 3 种措施^[10]。深松可以降低土壤容重,增大土壤孔隙度,改善土壤透气性,促进土壤有机氮矿化分解成速效氮。同时可创造良好的水分条件,促进土壤缓效钾释放,进而提高土壤有效钾含量^[11],亦可以使土壤中无效磷有效化^[12]。有研究表明,深松增加土壤的含水量,减少土壤的蒸散量,并保持较高的作物蒸腾速率^[13]。垄向区田措施能有效拦蓄降雨径流,从而提高作物水分利用效率,能够提高作物的生长速率、叶面积指数和产量^[14]。现阶段研究表明,垄向区田与常规处理相比,团聚体稳定性较好,有机质含量更高^[15],且不同耕作措施下蓄水保水能力从强到弱依次为:垄向区田 + 深松、垄向区田、深松^[16]。横坡垄作能有效控制地表径流,减少土壤养分流失^[17],横坡垄作使垄沟方向与坡面方向垂直,对地表径流有良好的阻挡作用,使降雨在垄沟内聚集,促进了坡面径流下渗,减少了地表径流^[18-19]。现阶段研究多集中于深松、垄向区田和横坡耕作对土壤理化性质的影响,但其组合模式对土壤结构性和土壤肥力的影响鲜有报道。

因此,本文基于田间小区试验,探究不同水土保持耕作措施及其组合模式对土壤结构稳定性以及土壤养分的影响。在不同水土保持耕作措施条件下,对黑土区坡耕地的农田土壤体积含水率、孔隙度、机械组成、团聚体稳定性和土壤速效养分含量等指标进行测定及分析,并通过 TOPSIS 模型对不同水土保持耕作措施进行综合评价,提出以阻控黑土坡耕地侵蚀为核心的水土保持耕作措施模式,以期在黑土地保护利用和农业可持续发展提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

本试验地点为黑龙江省海伦市前进乡光荣小流域(47°37'N, 126°84'E),该小流域位于东北黑土区北部,漫川漫岗水土流失区,商品粮核心产区,坡长在 200 ~ 1 000 m 之间,坡度为 0.5° ~ 7°,平均海拔为 210 m,沟壑密度为 2.27 km/km²,土壤侵蚀模数大于 1 000 t/(km²·a),坡耕地占比 90% 以上,垦殖率 80%,黑土层厚度约为 30 cm。该地区主要作物为玉米和大豆。该试验区多年平均气温 -4 ~ 5℃,全年无霜期 135 d 左右,年降雨量 400 ~ 650 mm,其中 7—9 月降雨居多,占全年降水量的 70%。

1.2 试验设计与模型评价方法

于 2022 年 4 月布置试验,设置 3 种水土保持耕作方式及其组合模式:横坡耕作(TP)、深松(SF)、垄向区田(RF)、横坡耕作 + 垄向区田(TP - R)、横坡耕作 + 深松(TP - S)、垄向区田 + 深松(RF - S),以常规顺坡耕作(CK)作为对照,且每个处理重复 3 组,每个试验小区规格为 5 m × 20 m,

且每个试验小区之间采用钢板隔开,钢板埋深 1 m,露出地表高度为 50 cm。该试验小区选取玉米为研究对象,玉米品种为迪卡 1563,施肥量:氮肥 250 kg/hm²、磷肥 90 kg/hm²、钾肥 120 kg/hm²。

于玉米各生育期取样测定土壤体积含水率,在成熟期(9月末)取土测定土壤团聚体、机械组成、速效养分含量。不同水土保持耕作措施处理如表 1 所示。

表 1 各小区处理方式

Tab. 1 Processing situation of each community

| 小区编号 | 处理 | 处理方式 |
|------|-----------------|---|
| 1 | 横坡耕作(TP) | 横坡耕作,垄方向与坡向方向垂直,种植前进行旋耕 |
| 2 | 深松(SF) | 顺坡耕作,种植前进行土壤振动深松 |
| 3 | 垄向区田(RF) | 顺坡耕作,7月初于垄间修筑土垡 |
| 4 | 横坡耕作+垄向区田(TP-R) | 横坡耕作,种植前进行旋耕,7月初于垄间修筑土垡;垡距 75 cm,垄距 60 cm,垡高 16~20 cm |
| 5 | 横坡耕作+深松(TP-S) | 横坡耕作,种植前进行土壤振动深松 |
| 6 | 垄向区田+深松(RF-S) | 顺坡耕作,种植前进行土壤振动深松 |
| 7 | 常规顺坡耕作(CK) | 顺坡耕作,种植前进行旋耕 |

1.3 观测指标与方法

1.3.1 土壤体积含水率测定

采用 TDR 300 型便携式土壤水分速测仪测定土壤体积含水率,共分为 4 个生育期:5 月 21 日—6 月 18 日(苗期)、6 月 19 日—8 月 10 日(拔节抽穗期)、8 月 11 日—9 月 3 日(灌浆期)、9 月 3—27 日(成熟期),每 7 d 对各处理的体积含水率进行测定,最后取平均值,为该生育期平均土壤体积含水率,测定深度为 40 cm,共分为 3 层:0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm。

1.3.2 土壤孔隙度计算

土壤质量含水率采用传统干燥法测定,在成熟期进行五点取样;测定深度为 40 cm,共分为 3 层:0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm,土壤孔隙率计算公式为

$$e = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_b} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \rho_0 = \frac{m_1}{V} \quad (2)$$

式中 m_1 ——干燥后土壤总质量,g

ρ_0 ——土壤容重,g/cm³

V ——土壤体积,cm³

e ——土壤孔隙率,%

ρ_b ——土壤比重,取 2.65 g/cm³

1.3.3 土壤机械组成测定

将成熟期土壤风干,并用直径 2 mm 的金属筛过滤,将滤好的土壤使用激光粒度仪(麦奇克 Microtrac S3500 型)测定土壤机械组成,土壤粒径分级为:黏粒(0~0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、细砂粒(0.05~0.25 mm)、粗砂粒(0.25~2 mm),测定深度为 40 cm,共分为 3 层:0~10 cm、10~

20 cm、20~40 cm。

1.3.4 土壤水稳性团聚体含量及稳定性测定

先取成熟期 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 各土层风干土 100 g 直接过筛(筛直径分别为大于 2 mm、0.25~2 mm、0.053~0.25 mm、0~0.053 mm),然后各筛土取 50 g 采用湿筛法进一步置于 2、0.25、0.053 mm 套筛上,将套筛放入水桶中浸泡 5 min 后,手动上下振荡 2 min(振幅 3 cm,频率 30 次/min)按次序收集各级孔筛及桶中土样,依次分别为大团聚体(LM,粒径大于 2 mm)、较大团聚体(SM,粒径 0.25~2 mm)、微团聚体(MA,粒径 0.053~0.25 mm)、黏粉粒(S+C,粒径 0~0.053 mm),然后 60℃干燥称其质量。分别计算大于 0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)^[20]、平均质量直径(MWD)^[21]、几何平均直径(GMD)^[22],公式为

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (3)$$

$$P_{MWD} = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (4)$$

$$P_{GMD} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \lg X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad (5)$$

式中 $M_{r>0.25}$ ——粒径大于 0.25 mm 团聚体质量,g

M_T ——所有粒径团聚体质量和,g

P_{MWD} ——团聚体平均质量直径,mm

X_i ——各粒级团聚体平均直径,mm

W_i ——对应于 X_i 级团聚体占比,%

P_{GMD} ——几何平均直径,mm

1.3.5 土壤养分含量指标测定

使用土钻取成熟期土壤(五点取样)测定土壤

养分含量指标,测定深度为 40 cm,共分为 3 层:0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm,土壤无机态氮(IN)含量采用氯化钾浸提-分光光度法测定,土壤有效磷(AP)含量采用碳酸氢钠浸提-分光光度法测定,土壤速效钾(AK)含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法^[23]测定。

1.3.6 TOPSIS 模型综合评价

确定数据矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1j} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{i1} & A_{i2} & \cdots & A_{ij} \end{bmatrix} \quad (6)$$

原始数据同趋势化,对于极大型指标

$$A'_{ij} = A_{ij} \quad (7)$$

式中 A_{ij} ——第 i 个处理中第 j 个指标

A'_{ij} ——正向化后第 i 个处理中第 j 个指标

构建标准化矩阵,标准化后指标为

$$Z_{ij} = \frac{A'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A'_{ij})^2}} \quad (8)$$

式中 Z_{ij} ——标准化后第 i 个处理中第 j 个指标

计算各评价指标与最优及最劣向量之间的距离,定义第 i 个评价对象与最大值的距离为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j (Z_j^+ - Z_{ij})^2} \quad (9)$$

式中 W_j ——算术平均法求得的权重

Z_j^+ ——标准化后第 j 列指标中最大值

定义第 i 个评价对象与最小值的距离为

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j (Z_j^- - Z_{ij})^2} \quad (10)$$

式中 Z_j^- ——标准化后第 j 列指标中最小值

评价对象与最优方案的接近程度,即贴合度,计算式为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

不同水土保持耕作措施综合评价指标类型如表 2 所示。

为了消除各指标量纲不同对决策方案的影响,通过式(8)将决策矩阵进行标准化;通过式(9)、(10)计算各评价指标与最优及最劣向量量距得到 D_i^+ 、 D_i^- ;最后通过式(11)计算各处理贴合度 C_i 。

1.4 数据统计分析

采用 Origin 2021 进行绘图;使用 SPSS 26.0 进

表 2 不同水土保持耕作措施综合评价指标类型

Tab.2 Comprehensive evaluation index types of different soil and water conservation tillage technologies

| 指标类别 | 评价指标 | 指标类型 |
|------|--------|------|
| 结构指标 | 孔隙度 | 极大型 |
| | 平均质量直径 | 极大型 |
| | 几何平均直径 | 极大型 |
| | 大团聚体含量 | 极大型 |
| 养分指标 | 速效氮含量 | 极大型 |
| | 有效磷含量 | 极大型 |
| | 速效钾含量 | 极大型 |
| 水分指标 | 体积含水率 | 极大型 |

行方差分析及显著性分析;不同指标间差异采用单因素方差分析,运用最小显著差异法(LSD)进行多重比较($\alpha = 0.05$),运用 TOPSIS 模型对各指标进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤物理性状的影响

2.1.1 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤体积含水率的影响

不同水土保持耕作措施下各土层土壤体积含水率如表 3 所示。随着玉米生育期的推进,各处理土壤体积含水率呈现下降趋势,CK、RF、RF-S、SF、TP-S、TP-R、TP 处理成熟期 0 ~ 40 cm 土层平均体积含水率相比苗期分别降低 15.35%、11.99%、13.50%、8.09%、7.39%、6.83%、7.61%。全生育期 0 ~ 40 cm 土层平均体积含水率从大到小依次为:TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理、TP 处理、RF 处理、SF 处理、CK 处理。3 种组合模式 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理 0 ~ 40 cm 土层全生育期平均土壤体积含水率较常规处理分别提高 29.47%、21.43%、16.32%。体积含水率随着土层加深逐渐增加。TP-S 处理成熟期体积含水率在 10 ~ 20 cm 土层较 0 ~ 10 cm 土层增加 9.01%、20 ~ 40 cm 土层较 10 ~ 20 cm 土层增加 37.28%。

2.1.2 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤孔隙度的影响

不同水土保持耕作措施下各土层土壤孔隙度如图 1(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.5$),下同)所示,随着土层的加深各处理土壤孔隙度逐渐减小,0 ~ 10 cm 土层 TP-S 处理孔隙度最大,10 ~ 40 cm 土层 RF-S 处理孔隙度最大。10 ~ 40 cm 土层中进行深松处理(RF-S、SF 和 TP-S)的孔隙度均显著高于未进行深松处理(CK、RF、TP-R、TP)($P < 0.05$)。10 ~ 20 cm 土层中,3 种组合模

表3 不同水土保持耕作措施下土壤体积含水率

Tab.3 Soil volume moisture content under different soil and water conservation tillage measures

| 处理 | CK | RF | RF-S | SF | TP-S | TP-R | TP | |
|---------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 苗期 | 0~10 cm | 17.65 ^c | 20.38 ^{ab} | 19.73 ^{ab} | 19.17 ^{abc} | 21.81 ^a | 19.41 ^{abc} | 19.15 ^{bc} |
| | 10~20 cm | 21.75 ^{ab} | 20.95 ^b | 21.69 ^{ab} | 20.85 ^b | 24.96 ^a | 24.43 ^a | 22.36 ^{ab} |
| | 20~40 cm | 23.53 ^b | 27.30 ^{ab} | 26.83 ^{ab} | 24.60 ^{ab} | 30.52 ^a | 29.66 ^a | 28.80 ^{ab} |
| | 平均值 | 20.98 ^e | 22.84 ^{cd} | 22.75 ^{cd} | 21.54 ^d | 25.43 ^a | 24.50 ^{ab} | 23.44 ^{bc} |
| 拔节抽穗期 | 0~10 cm | 17.09 ^a | 18.71 ^a | 18.60 ^a | 17.39 ^a | 18.93 ^a | 18.89 ^a | 18.31 ^a |
| | 10~20 cm | 15.15 ^b | 22.82 ^a | 22.16 ^a | 19.86 ^{ab} | 24.20 ^a | 20.60 ^a | 21.85 ^a |
| | 20~40 cm | 25.07 ^c | 25.49 ^c | 29.42 ^{ab} | 27.62 ^{abc} | 30.91 ^a | 27.58 ^{abc} | 26.12 ^{bc} |
| | 平均值 | 19.10 ^c | 22.34 ^{ab} | 23.39 ^{ab} | 21.62 ^b | 24.68 ^a | 22.36 ^{ab} | 22.09 ^b |
| 灌浆期 | 0~10 cm | 16.19 ^b | 16.36 ^b | 20.54 ^{ab} | 17.24 ^{ab} | 21.03 ^a | 19.76 ^{ab} | 17.86 ^{ab} |
| | 10~20 cm | 17.02 ^d | 20.94 ^{bcd} | 21.00 ^{bc} | 18.37 ^{cd} | 23.45 ^a | 20.67 ^b | 20.24 ^d |
| | 20~40 cm | 22.91 ^b | 26.46 ^b | 28.12 ^{ab} | 24.75 ^{ab} | 31.86 ^a | 29.37 ^{ab} | 24.14 ^b |
| | 平均值 | 18.71 ^a | 21.25 ^a | 23.22 ^a | 20.12 ^a | 25.45 ^a | 23.27 ^a | 20.75 ^a |
| 成熟期 | 0~10 cm | 13.84 ^c | 16.00 ^b | 14.88 ^c | 15.66 ^{bc} | 19.98 ^a | 18.78 ^a | 17.43 ^a |
| | 10~20 cm | 17.48 ^b | 19.97 ^{ab} | 18.73 ^b | 20.56 ^{ab} | 21.78 ^a | 21.32 ^a | 21.98 ^a |
| | 20~40 cm | 21.96 ^e | 24.34 ^{cd} | 25.42 ^{bc} | 23.18 ^{de} | 29.90 ^a | 29.37 ^a | 26.26 ^b |
| | 平均值 | 17.76 ^c | 20.10 ^b | 19.68 ^{bc} | 19.80 ^{bc} | 23.55 ^a | 22.83 ^a | 21.65 ^{ab} |
| 全生育期平均值 | 19.14 ^c | 21.64 ^{bc} | 22.26 ^{ab} | 20.77 ^{bc} | 24.78 ^a | 23.24 ^{ab} | 21.98 ^{ab} | |

注:同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

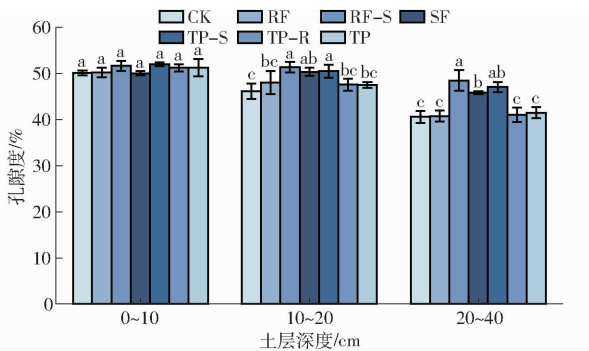


图1 不同水土保持耕作措施下土壤孔隙度

Fig.1 Soil porosity under different soil and water conservation tillage measures

式(TP-S处理、TP-R处理、RF-S处理)相比CK处理孔隙度增加9.37%、3.01%、11.19%,RF-S处理显著高于CK、RF、TP-R、TP处理($P < 0.05$)。20~40 cm土层中,3种组合模式(TP-S处理、TP-R处理、RF-S处理)相比CK处理孔隙度增加15.95%、1.06%、19.51%,RF-S处理与TP-S处理孔隙度显著高于其他处理($P < 0.05$)。TP-S处理在10~20 cm土层孔隙度较0~10 cm土层减少2.82%;20~40 cm土层孔隙度较10~20 cm土层减少6.85%。

2.1.3 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤机械组成的影响

不同水土保持耕作措施下土壤机械组成如图2所示。0~10 cm土层中,TP-S处理粉粒、粗砂粒含量最大,细砂粒含量最小,RF-S处理黏粒含量最大,TP-S处理、TP-R处理、RF-S处理与CK处理

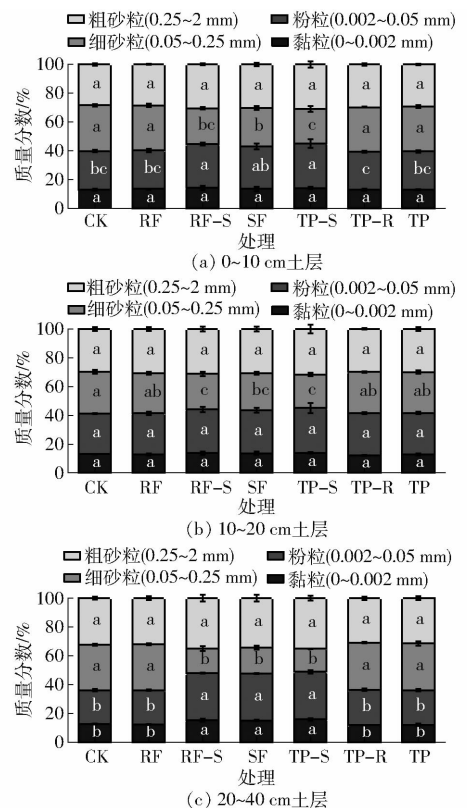


图2 不同水土保持耕作措施下土壤机械组成

Fig.2 Soil texture under different soil and water conservation tillage measures

相比黏粒含量增加8.78%、0.23%、9.40%,粉粒含量增加15.23%、-1.94%、13.15%,粗砂粒含量增加9.22%、5.12%、7.98%,细砂粒含量减少24.62%、3.01%、22.01%。RF-S、SF、TP-S处理与CK、RF、RF-S、TP处理的细砂粒含量存在显著

差异 ($P < 0.05$), RF-S 与 TP-R 处理粉粒含量均显著高于 CK、RF、TP-R、TP 处理 ($P < 0.05$)。

10~20 cm 土层中, TP-S 处理黏粒、粉粒、粗砂粒含量最大, 细砂粒含量最小, TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理与 CK 处理相比黏粒含量增加 6.86%、-7.09%、4.88%, 粉粒含量增加 10.68%、4.77%、8.12%, 粗砂粒含量增加 5.95%、0.10%、4.08%, 细砂粒含量减少 19.65%、1.52%、14.33%。RF-S 与 TP-S 处理细砂粒含量显著高于 CK、RF、TP-R、TP 处理 ($P < 0.05$)。

20~40 cm 土层中, TP-S 处理黏粒、粉粒、粗砂粒含量最大, 细砂粒含量最小, TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理与 CK 处理相比黏粒含量增加 25.74%、-6.14%、21.27%, 粉粒含量增加 40.88%、4.48%、40.03%, 粗砂粒含量增加 8.94%、-4.35%、8.75%, 细砂粒含量减少 49.42%、-3.53%、46.84%。RF-S、SF、TP-S 处理与 CK、RF、RF-S、TP 处理的黏粒、粉粒、细砂粒含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.1.4 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤水稳性团聚体含量及稳定性的影响

不同水土保持耕作措施下土壤各粒级团聚体占比如图 3 所示, 0~10 cm 土层中, TP-S 处理 LM、SM 含量最大, MA、SC 含量最小, 相比其他处理 LM、SM 含量增加 3.53%~13.69%、1.29%~7.29%, MA、SC 含量减少 4.88%~23.34%、0.82%~5.19%。RF-S、TP-S 处理与 CK、RF、TP 处理 LM 含量存在显著差异 ($P < 0.05$), RF-S、TP-S 处理与 CK 处理 MA 含量存在显著差异 ($P < 0.05$), TP-S 处理与 CK、RF、RF-S、TP 处理 SC 含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。

10~20 cm 土层中, TP-S 处理 LM、SM 含量最大, MA、SC 含量最小, 相比其他处理 LM、SM 含量增加 3.1%~14.01%、2.15%~8.29%, MA、SC 含量减少 5.97%~31.48%、2.09%~5.94%。TP-S 处理与 CK、TP 处理 LM 含量存在显著差异 ($P < 0.05$), TP-S、SF、RF-S 处理与 CK、RF、TP-R、TP 处理 MA 含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。

20~40 cm 土层中, TP-S 处理 LM、SM 含量最大, MA、SC 含量最小, 相比其他处理 LM、SM 含量增加 1.56%~28.64%、1.33%~17.49%, MA、SC 含量减少 6.21%~46.53%、1.27%~14.13%。TP-S、SF、RF-S 处理与 CK、RF、TP-R、TP 处理 LM、SM、MA、SC 含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。

不同水土保持耕作措施下土壤团聚体平均质量直径如图 4 所示。0~40 cm 土层 TP-S 处理 MWD

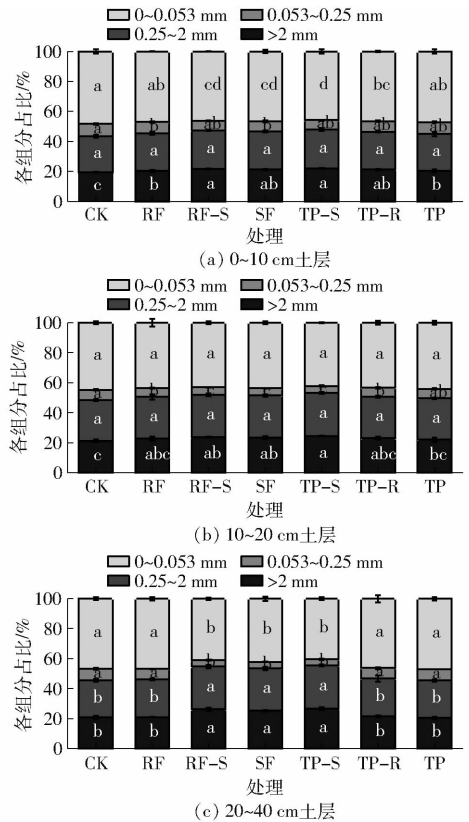


图 3 不同水土保持耕作措施下土壤团聚体组分占比

Fig. 3 Composition of soil aggregates under different soil and water conservation tillage measures

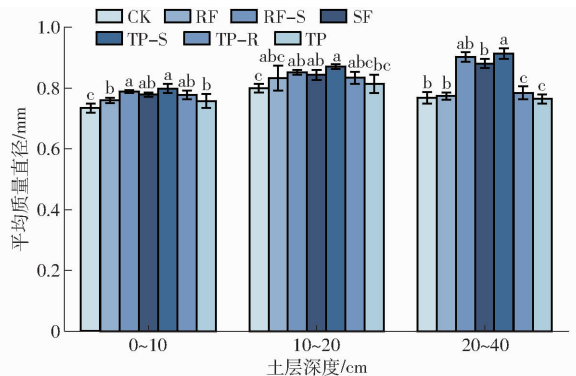


图 4 不同水土保持耕作措施下土壤团聚体平均质量直径

Fig. 4 Average mass diameter of soil aggregates under different soil and water conservation tillage measures

最大。0~10 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 MWD 增加 8.86%、6.02%、7.52%, TP-S 处理与 CK、RF 处理 MWD 存在显著差异 ($P < 0.05$); 10~20 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 MWD 增加 8.90%、4.27%、6.48%, TP-S 处理与 CK、TP 处理 MWD 存在显著差异 ($P < 0.05$); 20~40 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 MWD 增加 19.12%、2.22%、17.66%。TP-S 处理在 10~20 cm 土层平均质量直径较 0~10 cm 增加 9.02%; 20~40 cm 土层平均质量直径较 10~20 cm 土层增

加4.94%。

不同水土保持耕作措施下土壤几何平均直径如图5所示。0~40 cm 土层 TP-S 处理 GMD 最大。0~10 cm 土层中,TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 GMD 增加 12.59%、8.56%、10.56%,TP-S 处理与 CK、RF、TP 处理 GMD 存在显著差异($P < 0.05$);10~20 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 GMD 增加 13.65%、6.40%、9.43%,TP-S 处理与 CK 处理 GMD 存在显著差异($P < 0.05$);20~40 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 GMD 增加 32.50%、3.02%、29.62%。TP-S 处理在 10~20 cm 土层几何平均直径较 0~10 cm 土层增加 16.32%;20~40 cm 土层几何平均直径较 10~20 cm 土层增加 8.06%。

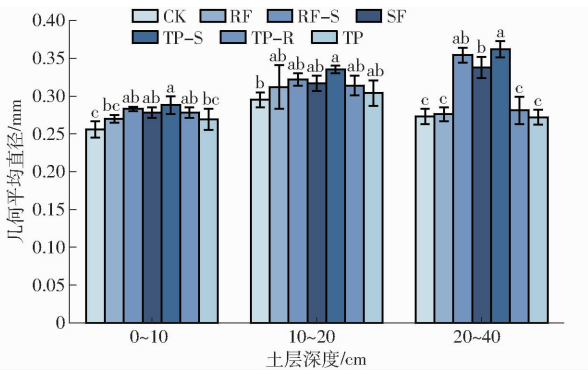


图5 不同水土保持耕作措施下土壤团聚体几何平均直径
Fig.5 Geometric mean diameter of soil aggregates under different soil and water conservation tillage measures

不同水土保持耕作措施下土壤大团聚体(>0.25 mm)含量如图6所示。0~40 cm 土层 TP-S 处理 $R_{0.25}$ 最大。0~10 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 $R_{0.25}$ 增加 10.14%、6.58%、8.53%,TP-S 处理与 CK、RF、TP 处理 $R_{0.25}$ 存在显著差异($P < 0.05$);10~20 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 $R_{0.25}$ 增加 9.81%、4.39%、7.05%,TP-S 处理与 CK、TP 处理 $R_{0.25}$ 存在显著差异($P < 0.05$);20~40 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 $R_{0.25}$ 增加 22.05%、2.59%、20.32%,TP-S 处理在 10~20 cm 土层几何平均直径较 0~10 cm 增加 11.21%;20~40 cm 土层几何平均直径较 10~20 cm 土层增加 3.61%。

2.2 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤养分的影响

2.2.1 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤无机态氮的影响

不同水土保持耕作措施下土壤无机态氮含量

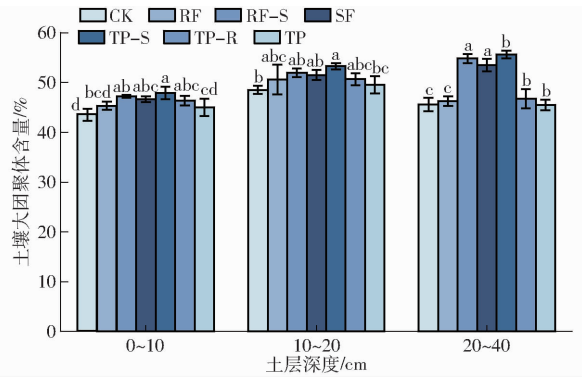


图6 不同水土保持耕作措施下土壤大团聚体含量
Fig.6 Soil macroaggregate content under different soil and water conservation tillage measures

(质量比)如图7所示。0~40 cm 土层 TP-S 处理 IN 含量最大,随着土层的加深,各处理 IN 含量呈先增大后减小的趋势。0~10 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 IN 含量增加 51.06%、38.98%、45.16%,TP-S 处理与其余处理 IN 含量均存在显著差异($P < 0.05$);10~20 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 IN 含量增加 55.32%、33.15%、44.03%,TP-S 处理与其余处理 IN 含量均存在显著差异($P < 0.05$);20~40 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 IN 含量增加 42.81%、35.94%、40.08%,TP-S 处理与 RF-S 处理 IN 含量不存在显著差异($P > 0.05$),且显著高于其余处理($P < 0.05$)。TP-S 处理在 10~20 cm 土层无机态氮含量较 0~10 cm 增加 11.36%;20~40 cm 土层无机态氮含量较 10~20 cm 土层减少 12.73%。

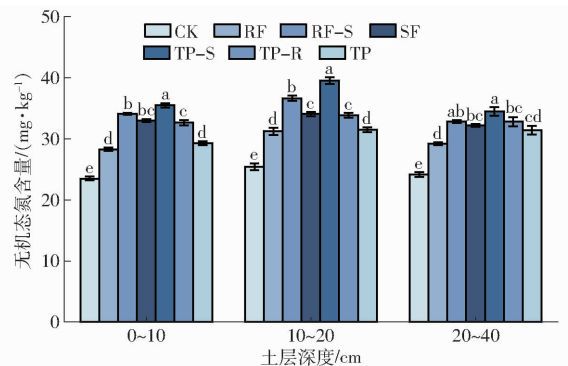


图7 不同水土保持耕作措施下土壤无机态氮含量
Fig.7 Inorganic nitrogen content in soil under different soil and water conservation tillage measures

2.2.2 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤有效磷的影响

不同水土保持耕作措施下土壤有效磷含量如图8所示。0~40 cm 土层 TP-S 处理 AP 含量最大,随着土层的加深,各处理 AP 含量呈先增大后减小的趋势。0~10 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处

理、RF-S 处理相比 CK 处理 AP 含量增加 40.68%、19.19%、31.75%，TP-S 处理 AP 含量显著高于其余处理 ($P < 0.05$)；10~20 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 AP 含量增加 40.03%、25.58%、40.03%，TP-S 处理 AP 含量显著高于其余处理 ($P < 0.05$)；20~40 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 AP 含量增加 39.69%、18.85%、36.56%，TP-S 处理与 RF-S 处理 AP 含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。TP-S 处理在 10~20 cm 土层有效磷含量较 0~10 cm 增加 14.32%；20~40 cm 土层有效磷含量较 10~20 cm 土层减少 10.12%。

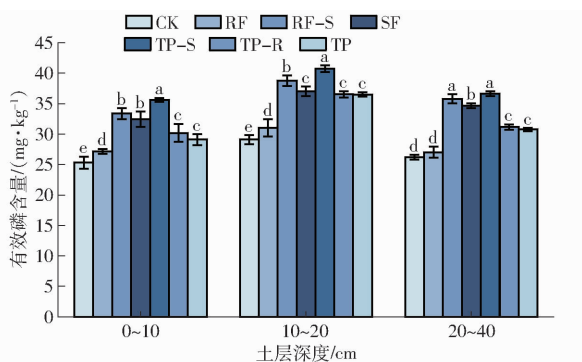


图 8 不同水土保持耕作措施下土壤有效磷含量

Fig. 8 Effective phosphorus content in soil under different soil and water conservation tillage measures

2.2.3 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施对土壤速效钾的影响

不同水土保持耕作措施下土壤速效钾含量如图 9 所示，0~40 cm 土层 TP-S 处理 AK 含量最大，随着土层的加深，各处理 AK 含量呈先增大后减小的趋势。0~10 cm TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 AK 含量增加 25.45%、15.75%、23.01%，TP-S 处理与 RF-S 处理 AK 含量显著高于其余处理 ($P < 0.05$)；10~20 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 AK 含量增加 20.41%、12.24%、19.23%，TP-S 处理与 SF、RF-S 处理不存在显著差异，TP-S 处理 AK 含量显著高于 CK、RF 处理 ($P < 0.05$)；20~40 cm 土层 TP-S 处理、TP-R 处理、RF-S 处理相比 CK 处理 AK 含量增加 24.70%、13.44%、21.62%，TP-S 处理与 RF-S 处理 AK 含量显著高于 CK、RF、TP-R、TP 处理 ($P < 0.05$)。TP-S 处理在 10~20 cm 土层速效钾含量较 0~10 cm 增加 5.63%；20~40 cm 土层速效钾含量较 10~20 cm 土层减少 2.34%。

2.3 黑土坡耕地不同水土保持耕作措施综合评价

通过 TOPSIS 模型计算各处理的结构指标和养分指标，计算综合评分，如表 4 所示。计算指标采用

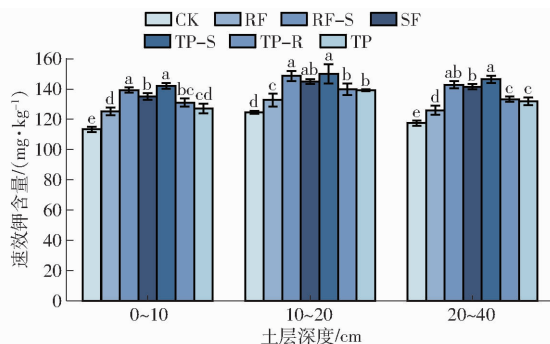


图 9 不同水土保持耕作措施下土壤速效钾含量

Fig. 9 Soil available potassium content under different soil and water conservation tillage measures

表 4 不同水土保持耕作措施贴合度

Tab. 4 Fit of different soil and water conservation tillage techniques

| 处理 | 贴合度 | 排序 |
|------|-------|----|
| CK | 0.004 | 7 |
| RF | 0.303 | 6 |
| RF-S | 0.863 | 2 |
| SF | 0.724 | 3 |
| TP-S | 0.979 | 1 |
| TP-R | 0.552 | 4 |
| TP | 0.434 | 5 |

0~40 cm 土层均值。由表 4 可知，贴合度最高为 TP-S 处理，为 0.979，贴合度由大到小依次为 TP-S、RF-S、SF、TP-R、TP、RF、CK。TP-S 为阻控黑土坡耕地侵蚀的最优处理。

3 讨论

本研究中，玉米各生育期 0~40 cm 土层中 TP-S 处理体积含水率最高。这是因为深松能够促进根系向下生长，为作物提供更好的水分条件，减小根系下穿阻力，促进根系向下生长，增大根系延伸范围有利于植株吸收更深层的水分^[24-25]，这与翟振等^[26]、李晓丽等^[27]研究结论一致，且横坡耕作能够减少地表径流，降雨较多时垄沟可以蓄水，沟间形成水势差，有利于调节土壤水分入渗、保蓄土壤水分^[28]。

采用深松作业各处理 (SF、RF-S、TP-S) 0~40 cm 土壤孔隙度均大于其余处理，该结论与鄢慧芳^[29]研究结果相同。深松对土壤进行横向切割，活化土壤结构，使土壤中的中小孔隙增多，大孔隙不变，从而增加土壤孔隙度^[30]。0~10 cm 土层 TP-S 处理孔隙度高于 RF-S 处理，10~40 cm 土层 RF-S 处理孔隙度高于 TP-S 处理，这是由于黏粒在水分的作用下发生黏粒迁移现象，促进黏粒向下迁移^[31]，同时横坡耕作相比顺坡耕作会大大提高土壤体积含水率，使得 TP-S 处理受水分作用影响较大，

所造成的黏粒迁移现象更严重,导致 0 ~ 10 cm 土层黏粒含量减少、孔隙度增大,10 ~ 40 cm 土层黏粒含量增加、孔隙度变小。土壤机械组成中 TP - S 处理 0 ~ 40 cm 土层的黏粒和粉粒含量最大,是因为 TP - S 处理形成的地表或地下径流较少,而黏粒、粉粒与砂粒相比更容易被径流带走^[32],顾鑫等^[33]研究表明,深松有利于疏松土壤,改变土壤的机械组成,增加粗砂粒、粉粒、黏粒含量,而相对减少细砂粒含量,与本文研究结果一致,且横坡耕作阻控了地表径流,使带走的黏粒、粉粒变少。综上所述,TP - S 处理能有效改善土壤结构,增大土壤孔隙度,增加黏粒、粉粒、粗砂粒占比,相对减小细砂粒占比。

团聚体是重要的土壤物理因子,反映土壤持水性、通气性和结构状况等能力^[34]。TP - S 处理 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 最大,团聚体稳定性更好,这与文献^[35 - 37]研究结果类似。原因为深松使土壤孔隙度增大,氧气含量更高,物种多样性更丰富,使根系分泌物种类增加,而形成不一样的微生物环境,微生物产生的胶结物质对大团聚体形成具有促进作用^[38 - 39],从而提高土壤稳定性^[40],且横坡耕作能够阻控地表径流带走土壤有机质,有机质具有吸附性,能使矿物颗粒聚集在一起,有利于土壤大团聚体的形成^[41],而传统耕作对土壤扰动较大,直接或间接导致土壤大团聚体被破坏^[42 - 45]。所以 0 ~ 40 cm 土层中 TP - S 处理团聚体稳定性更好。

氮、磷和钾是植物必须且受环境限制(水分等)的营养元素^[46]。本研究中,采用深松作业各处理无机态氮、有效磷、速效钾含量显著高于其余处理,其中 TP - S 处理无机态氮、有效磷、速效钾含量最大,一方面是因为深松能够促进作物根系生长使根系分泌物增加,而根系分泌物中具有强黏结力多糖,可以通过改善土壤团聚体稳定性和粒径分布来影响土壤氮矿化^[47 - 49],土壤黏粒含量越多,比表面积越大,对

有机碳和有效养分的吸附能力越强,在这种固持作用下有机无机胶体紧密结合,使速效养分含量增加^[50]。另一方面有效磷含量显著增加是因为磷酸酶是根系分泌物中普遍存在的酶^[47],而深松能够有效提高土层中磷酸酶活性^[51],进而提高有效磷含量;速效钾含量提高是因为根系分泌物中的低分子量有机酸(如苹果酸等)能活化土壤中的矿物钾与非交换钾,使之成为植物可利用的钾^[47,52],且横坡种植能够有效地阻控地表径流带走养分。传统的深松耕作虽然能够提高土壤结构稳定性,增强土壤的入渗蓄水能力,但当降雨强度过大,降雨量大于土壤入渗速率时,依然会产生一定的水土流失,但在传统深松耕作增加横坡耕作时,横坡耕作所形成的土垡具有一定的蓄水能力,使过量的降雨拥有更加充足的时间入渗,能够进一步减少水土流失,因此横坡耕作 + 深松组合技术模式更有利于减少黑土坡耕地水土流失。

4 结论

(1)横坡耕作 + 深松组合模式(TP - S)能够有效提高土壤保水能力,加强植株根系对深层水的吸收利用。

(2)TP - S 处理能够有效改善土壤结构,增大土壤孔隙度,增加黏粒、粉粒、粗砂粒占比,相对减少细砂粒占比。

(3)TP - S 处理有利于增加土壤大团聚体占比,增大平均质量直径及几何平均直径,从而提高土壤团聚体稳定性。

(4)TP - S 处理相比其他处理更有利于促进速效养分的形成,能够减少地表径流进而减少养分流失。

(5)采用 TOPSIS 模型对各指标进行综合评价,结果表明,横坡耕作 + 深松组合模式土壤稳定性更强且蓄水保肥效果更好。

参 考 文 献

- [1] 赵玉明,程立平,梁亚红,等. 东北黑土区演化历程及范围界定研究[J]. 土壤通报,2019,50(4):765 - 775.
ZHAO Yuming, CHENG Liping, LIANG Yahong, et al. Developing history and defining boundary of the black soil regions in Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(4): 765 - 775. (in Chinese)
- [2] 杨学明,张晓平,方华军,等. 北美保护性耕作对中国的意义[J]. 应用生态学报,2004,15(2):335 - 340.
YANG Xueming, ZHANG Xiaoping, FANG Huajun, et al. Conservation tillage system in North America and their significance for China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 335 - 340. (in Chinese)
- [3] 温磊磊,王教河,任明,等. 东北黑土区水土流失综合治理成效[J]. 中国水土保持,2021(6):4 - 7.
WEN Leilei, WANG Jiaohu, REN Ming, et al. Effect of comprehensive control of soil and water loss in black soil area of Northeast China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(6): 4 - 7. (in Chinese)
- [4] 刘利春. 坡耕地水土流失的危害及防控技术[J]. 吉林农业,2019(21):40 - 41.
LIU Lichun. Hazards and prevention and control techniques of soil and water loss on slope farmland[J]. Jilin Agriculture, 2019(21): 40 - 41. (in Chinese)
- [5] 刘龙峰. 探讨水土流失的危害及做好水土保持工作的主要措施[J]. 城市建设理论研究,2022(32):140 - 142.
LIU Longfeng. Exploring the hazards of soil and water loss and the main measures for doing well in soil and water conservation

- [J]. *Urban Construction Theory Research*,2022(32):140-142. (in Chinese)
- [6] 杨亚娟. 齐齐哈尔水土流失发展趋势及防治对策[J]. *水土保持应用技术*,2006(6):40-41.
YANG Yajuan. Development trends and prevention measures of soil and water loss in Qiqihar[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*,2006(6):40-41. (in Chinese)
- [7] 张海香,李天阳,何丙辉,等. 不同施肥与耕作方式下土壤-径流氮磷变化特征[J]. *水土保持学报*,2023,37(3):281-287.
ZHANG Haixiang,LI Tianyang,HE Binghui, et al. Change characteristics of nitrogen and phosphorus in soil-runoff under different condition of fertilization and tillage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2023,37(3):281-287. (in Chinese)
- [8] 徐强,李周晶,胡克林,等. 基于密切值法和水氮管理模型的华北平原农田水氮优化管理[J]. *农业工程学报*,2017,33(14):152-158.
XU Qiang,LI Zhoujing,HU Kelin, et al. Optimal management of water and nitrogen in the North China Plain based on osculating value method and WHCNS model[J]. *Transactions of the CSAE*,2017,33(14):152-158. (in Chinese)
- [9] ZHAO Z G,QIN X,WANG E L, et al. Modelling to increase the eco-efficiency of a wheat-maize double cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,2015,210:36-46.
- [10] 李纯乾,李凤鸣,柳金库,等. 适宜东北地区的坡耕地保护性耕作技术[J]. *水土保持应用技术*,2021(5):17-18.
LI Chunqian,LI Fengming,LIU Jinku, et al. Protective tillage techniques suitable for slope farmland in Northeast China[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*,2021(5):17-18. (in Chinese)
- [11] 原程. 不同中耕措施对土壤理化性质及大豆生长的影响[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2022.
YUAN Cheng. Effect of different intertillage measures on soil physical and chemical properties and soybean growth[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2022. (in Chinese)
- [12] 霍星辰,杨诗韵,赵鹏飞,等. 深松技术及其对土壤理化性质的影响[J]. *农业科技与装备*,2016(3):62-64.
HUO Xingchen, YANG Shiyun, ZHAO Pengfei, et al. Subsoiling technology and its effect on soil chemical and physical properties[J]. *Agricultural Science and Technology and Equipment*, 2016(3):62-64. (in Chinese)
- [13] KUANG Naikun,MA Yuzhao,HONG Shengzhe, et al, Simulation of soil moisture dynamics, evapotranspiration, and water drainage of summer maize in response to different depths of subsoiling with RZWQM2[J]. *Agricultural Water Management*, 2021,249:106794.
- [14] 王超,魏永霞,王立敏,等. 垄向区田蓄水保土技术对大豆生长状况及产量的影响[J]. *东北农业大学学报*,2006,37(6):725-728.
WANG Chao,WEI Yongxia,WANG Limin, et al. Effect of ridge tillage's technology on growing condition and yield of soybean [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2006,37(6):725-728. (in Chinese)
- [15] 王翠翠,魏永霞,王存国,等. 不同水土保持措施及其组合对土壤团聚体及有机质的影响[J]. *中国农村水利水电*,2014(5):11-14.
WANG Cuicui,WEI Yongxia,WANG Cunguo, et al. The effect of different water conservation measures and their combinations on aggregate and organic matter of soil[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(5):11-14. (in Chinese)
- [16] 魏永霞. 黑龙江西部坡耕地不同耕作措施水分转化与土壤侵蚀特征[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2009.
WEI Yongxia. Characteristics of water transformation and soil erosion under different tillage measures in sloping farmland of western Heilongjiang Province[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2009. (in Chinese)
- [17] 安娟,刘前进,吴希媛. 横坡垄作下土壤湿润速率对褐土坡面侵蚀特征的影响[J]. *农业机械学报*,2016,47(10):101-107.
AN Juan,LIU Qianjin,WU Xiyuan. Effect of soil wetting rate on hillslope erosion characteristics of cinnamon soil under contour ridge cultivation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(10):101-107. (in Chinese)
- [18] 何超,王磊,郑粉莉,等. 垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*,2018,32(5):24-28.
HE Chao,WANG Lei,ZHENG Fenli, et al. Effects of ridge tillage on hillslope soil erosion in thin layerblack soil region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2018,32(5):24-28. (in Chinese)
- [19] 安龙龙,郑子成,王永东,等. 耕作措施对玉米生长期黄壤坡耕地径流及可溶性有机碳流失的影响[J]. *水土保持学报*,2022,36(5):75-81,89.
AN Longlong,ZHENG Zicheng,WANG Yongdong, et al. Effects of tillage practices on runoff and dissolved organic carbon loss from yellow soil sloping farmland during maize growth periods[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2022,36(5):75-81,89. (in Chinese)
- [20] 朱秋丽,曾冬萍,王纯,等. 废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J]. *环境科学学报*,2016,36(8):3000-3008.
ZHU Qiuli,ZENG Dongping,WANG Chun, et al. Effect of waste applications on the distribution and stability of soil aggregates in the paddy fields of Fuzhou Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2016,36(8):3000-3008. (in Chinese)
- [21] 魏永霞,石国新,冯超,等. 黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J]. *农业机械学报*,2019,50(8):309-320.
WEI Yongxia,SHI Guoxin,FENG Chao, et al. Effects of applying biochar on soil structure and soybean yield on slope farmland in blacksoil region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2019,50(8):309-320. (in Chinese)
- [22] 袁晶晶,同延安,卢绍辉,等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. *农业工程学报*,2018,34(3):159-165.
YUAN Jingjing,TONG Yan'an,LU Shaohui, et al. Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and

- jujube yields[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):159-165. (in Chinese)
- [23] 曾赛星. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [24] 侯金星,高军. 小麦深松旋耕耙压播种镇压高产栽培集成技术[J]. 农业科技通讯,2022(4):233-236.
HOU Jinxing, GAO Jun. Integrated technology for high yield cultivation of wheat deep loosening, rotary tillage, raking, seeding, and pressing[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology,2022(4):233-236. (in Chinese)
- [25] 郑培峰,张晓龙,司雨,等. 深松对三江平原春玉米田土壤水分和产量的影响[J]. 水土保持研究,2023,30(1):297-303.
ZHENG Peifeng, ZHANG Xiaolong, SI Yu, et al. Effects of subsoiling on soil moisture and yield of spring maize fields in Sanjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation,2023,30(1):297-303. (in Chinese)
- [26] 翟振,李玉义,郭建军,等. 耕深对土壤物理性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(11):115-123.
ZHAI Zhen, LI Yuyi, GUO Jianjun, et al. Effect of tillage depth on soil physical properties and yield of winter wheat - summer maize[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(11):115-123. (in Chinese)
- [27] 李晓丽,王成宝,杨思存,等. 深松深度对灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(3):9-17.
LI Xiaoli, WANG Chengbao, YANG Sicun, et al. The effect of deep loosening depth on the distribution and stability of aggregates in irrigated calcareous soil[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China,2021(3):9-17. (in Chinese)
- [28] 齐智娟,宋芳,张忠学,等. 保护性耕作对寒地黑土土壤水热效应与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(12):380-389.
QI Zhijuan, SONG Fang, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of different conservation tillage on soil hydrothermal condition as well as maize yield in cold black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):380-389. (in Chinese)
- [29] 鄢慧芳. 耕作深度对旱作耕层土壤理化特征及玉米生长的影响[D]. 银川:宁夏大学,2022.
YAN Huifang. Effects of tillage depth on topsoil physicochemical characteristics and maize growth dryland[D]. Yinchuan: Ningxia University,2022. (in Chinese)
- [30] 杨建君,盖浩,张梦璇,等. 深松结合秸秆还田对黑土孔隙结构的影响[J]. 中国农业科学,2023,56(5):892-906.
YANG Jianjun, GAI Hao, ZHANG Mengxuan, et al. Effect of subsoiling combined with straw returning measure on pore structure of black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica,2023,56(5):892-906. (in Chinese)
- [31] 汪超俊. 上海土壤应用心/表土粘粒率的辩解[J]. 上海农业科技,1986(4):38-39.
WANG Chaojun. Shanghai soil should be careful/justification of surface clay particle ratio[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 1986(4): 38-39. (in Chinese)
- [32] 徐莉. 东芦河流域人工灌丛生态系统土壤侵蚀研究[D]. 徐州:江苏师范大学,2020.
XU Li. Soil erosion of artificial shrub ecosystem in Dongluhe River Basin[D]. Xuzhou: Jiangsu Normal University,2020. (in Chinese)
- [33] 顾鑫,任翠梅,王丽娜,等. 机械深松对土壤容重和机械组成的影响[J]. 黑龙江农业科学,2018(11):38-41.
GU Xin, REN Cuimei, WANG Li'na, et al. Effects of mechanical deep loosening on soil bulk density and mechanical composition[J]. Heilongjiang Agricultural Science,2018(11):38-41. (in Chinese)
- [34] ZHANG P, WEI T, JIA Z K, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China[J]. Geoderma,2014,230-231:41-49.
- [35] DALAL R C, CHAN K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt[J]. Australian Journal of Soil Research,2001,39:435-464.
- [36] YANG X, REN W, SUN B, et al. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. Geoderma,2012,177-178:49-56.
- [37] 宫阿都,何毓蓉. 金沙江干热河谷典型区(云南)退化土壤的结构性与形成机制[J]. 山地学报,2001,19(3):213-219.
GONG Adu, HE Yurong. The structure feature and formation mechanism of the degraded soil in dry-hot valley region of the Jinsha River, Yunnan Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2001,19(3): 213-219. (in Chinese)
- [38] 王英俊,李同川,张道勇,等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. 草地学报,2013,21(3):485-493.
WANG Yingjun, LI Tongchuan, ZHANG Daoyong, et al. Effects of intercropping white clover on soil aggregates and soil organic carbon of aggregates in apple-white clover intercropping system[J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(3): 485-493. (in Chinese)
- [39] 夏梓泰,程伟威,李永梅,等. 轮作休耕模式对土壤团聚体及有机碳含量的影响[J]. 水土保持研究,2022,29(3):31-37.
XIA Zitai, CHENG Weiwei, LI Yongmei, et al. Effects of crop rotation and fallow pattern on soil aggregates and organic carbon content[J]. Soil and Water Conservation Research,2022,29(3):31-37. (in Chinese)
- [40] 余星兴,肖波,曹允淞,等. 黄土高原表层土壤孔隙性状与穿透阻力对藓结皮发育的响应[J]. 水土保持学报,2023,37(3):52-59.
YU Xingxing, XIAO Bo, CAO Yousong, et al. Effects of moss crusts on topsoil pore characteristics and penetration resistance in Loess Plateau, China[J]. Research of Soil and Water Conservation,2023,37(3):52-59. (in Chinese)
- [41] 孙建波,李成阳,赖焯敏,等. 高寒草甸土壤团聚体碳氮磷对退化的响应及其影响因素[J]. 草地学报,2023,31(4):1106-1114.
SUN Jianbo, LI Chengyang, LAI Zhimin, et al. Response and its influencing factors of soil aggregate carbon, nitrogen, and

- phosphorus to degradation in alpine meadows[J]. *Acta Agrestia Sinica*,2023,31(4):1106 – 1114. (in Chinese)
- [42] 李培培,汪强,文倩,等. 不同还田方式对砂质潮土理化性质及微生物的影响[J]. *生态学报*,2017,37(11):3665 – 3672.
LI Peipei, WANG Qiang, WEN Qian, et al. Effects of the return of organic materials on soil physical and chemical properties and bacterial number in sandy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2017,37(11):3665 – 3672. (in Chinese)
- [43] 王勇,姬强,刘帅,等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *农业环境科学学报*,2012,31(7):1365 – 1373.
WANG Yong, JI Qiang, LIU Shuai, et al. Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2012,31(7):1365 – 1373. (in Chinese)
- [44] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*,2007,40(9):1973 – 1979.
ZHOU Hu, LÜ Yizhong, YANG Zhichen, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2007,40(9):1973 – 1979. (in Chinese)
- [45] 张赛,王龙昌. 保护性耕作对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*,2013,27(4):263 – 267,272.
ZHANG Sai, WANG Longchang. The effect of conservation tillage on soil aggregates and their organic carbon content[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2013,27(4):263 – 267,272. (in Chinese)
- [46] 房娜娜,杨泽,刘国栋,等. 建三江地区土壤氮磷生态化学计量空间异质性特征及其影响因素分析[J]. *物探与化探*,2022,46(5):1121 – 1131.
FANG Na'na, YANG Ze, LIU Guodong, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of the ecological stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in the Jiansanjiang area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*,2022,46(5):1121 – 1131. (in Chinese)
- [47] 杜思焱,方娅婷,鲁剑巍. 根系分泌物对作物养分吸收利用的影响研究进展[J]. *华中农业大学学报*,2023,42(2):147 – 157.
DU Siyao, FANG Yating, LU Jianwei. Progress on effect of root exudates on nutrient uptake and utilization of crops[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2023,42(2):147 – 157. (in Chinese)
- [48] CHEN J, SHAFI M, WANF Y, et al. Organic acid compounds in root exudation of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its bioactivity as affected by heavy metals[J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2016,23(20):20977 – 20984.
- [49] LIU Y, EVANS S E, FRIESEN M L, et al. Root exudates shifhow N mineralization and N fixation contribute to the plant-available N supply in low fertility soils[J]. *Soil Biology and Bio-chemistry*,2022,165:108541.
- [50] 徐艳丽,段焰,刘芮,等. 西南典型烟区水稳性团聚体组成对土壤理化特征的影响[J]. *中国烟草科学*,2020,41(6):51 – 57.
XU Yanli, DUAN Yan, LIU Rui, et al. Effects of water stable aggregate composition on soil physicochemical characteristics in typical tobacco-planting soil of Southwest China[J]. *Chinese Tobacco Science*,2020,41(6):51 – 57. (in Chinese)
- [51] 张博文,杨彦明,李金龙,等. 连续深松对黑土水热酶特性及细菌群落的影响[J]. *生态学杂志*,2018,37(11):3323 – 3332.
ZHANG Bowen, YANG Yanming, LI Jinlong, et al. Effects of continuous subsoiling on temperature, water content, enzyme activity and bacterial community in black soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2018,37(11):3323 – 3332. (in Chinese)
- [52] BARGAZ A, NOYCE G L, FULTHORPE R, et al. Species interactions enhance root allocation, microbial diversity and P acquisition in intercropped wheat and soybean under P deficiency[J]. *Applied Soil Ecology*,2017(8):179 – 188.

~~~~~

(上接第 222 页)

- [25] 李晓艳,符惠桐,牛文涛,等. 基于深度学习的多模态行人检测算法[J]. *西安交通大学学报*,2022,56(10):61 – 70.  
LI Xiaoyan, FU Huitong, NIU Wentao, et al. Multi-modal pedestrian detection algorithm based on deep learning[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*,2022,56(10):61 – 70. (in Chinese)
- [26] LIU Y, SHAO Z, TENG Y, et al. NAM: normalization-based attention module[J]. *arXiv:2111.12419*,2021.
- [27] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[C] // *International Conference on Machine Learning*, 2015: 448 – 456.
- [28] 马宾,王一利,徐健,等. 基于双向生成对抗网络的图像感知哈希算法[J]. *电子学报*,2023,51(5):1405 – 1412.  
MA Bin, WANG Yili, XU Jian, et al. An image perceptual hash algorithm based on bidirectional generative adversarial network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023,51(5):1405 – 1412. (in Chinese)
- [29] HUSSAIN M, CHEN T, HILL R. Moving toward smart manufacturing with an autonomous pallet racking inspection system based on MobileNetV2[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, 6(4): 75.
- [30] YING B, XU Y, ZHANG S, et al. Weed detection in images of carrot fields based on improved YOLOv4[J]. *Traitement Du Signal*, 2021, 38(2):341 – 348.