

# 东北黑土区可耕作地埂技术的应用效果

吴旭<sup>1</sup>, 陈强<sup>1</sup>, 郭明明<sup>2</sup>, 李召<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨师范大学 地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150025;

2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081)

**摘要:** [目的] 研究可耕作地埂 (TEB) 技术对东北黑土区坡耕地土壤结构、作物产量及水土保持效果的影响, 为该地区水土保持措施的优化提供科学依据。[方法] 试验田块 (EF) 位于平均坡度为 5° 的坡耕地, 其中研究区域修筑了可耕作地埂 (TEB), 并选取采用传统耕作、坡度和面积相似但未修筑地埂的邻近田块作为对照田块 (CTF)。在 EF 区域内, 分别采集了修筑地埂的 TEB 区域和未修筑地埂的传统耕作区域 (CTF-E) 的土壤样品, 比较雨季前后土壤容重、团聚体特性及水分变化, 同时监测径流深度、侵蚀量及作物产量。[结果] 雨季后, 各区域土壤容重增加, 而  $>0.25$  mm 水稳性团聚体 ( $WSA_{>0.25}$ ) 和平均重量直径 (MWD) 降低。EF 区域土壤容重显著低于 CTF 区域 ( $p < 0.05$ ), 且 TEB 区域最低 ( $1.18$  g/cm<sup>3</sup>)。EF 区域  $>2$  mm 团聚体含量显著高于 CTF 区域 ( $p < 0.05$ ), TEB 区域  $>2$  mm 团聚体含量降幅最小, TEB 的  $WSA_{>0.25}$  和 MWD 分别比 CTF 高 10.58% 和 0.36 mm ( $p < 0.05$ )。作物生育期内, EF 区域土壤水分显著高于 CTF 区域, 径流深度和侵蚀量分别降低 35.10% 和 51.60%, TEB 区域出苗率和玉米产量最高。[结论] 可耕作地埂技术能有效改善土壤结构和储水能力, 提升水土保持效果及作物产量, 适宜在东北黑土区坡耕地推广。

**关键词:** 可耕作地埂; 黑土; 水土流失; 土壤结构; 玉米产量

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)02-0181-09

中图分类号: S157.3<sup>+</sup>2, S151.9<sup>+</sup>2

**文献参数:** 吴旭, 陈强, 郭明明, 等. 东北黑土区可耕作地埂技术的应用效果[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 181-189. Wu Xu, Chen Qiang, Guo Mingming, et al. Application effects of tillable earth bund technology in black soil region of Northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 181-189. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.019; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.019.

## Application effects of tillable earth bund technology in black soil region of Northeast China

Wu Xu<sup>1</sup>, Chen Qiang<sup>1</sup>, Guo Mingming<sup>2</sup>, Li Zhao<sup>1</sup>

(1. College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of tillable earth bund (TEB) technology on soil structure, crop yield, and soil and water conservation in sloping cultivated land within the black soil region of Northeast China were examined, in order to provide a scientific basis for optimizing soil and water conservation strategies in this area. [Methods] The experimental field (EF) was located on sloping cultivated land with an average gradient of 5°. The study area included a region constructed with TEBs and a nearby field with conventional tillage practices that were similar in slope and area but without constructed bunds; it was selected as the control field for conventional tillage (CTF). Within the EF, soil samples were collected from the TEB-constructed area and the traditional tillage area without bunds. Changes in soil bulk density, aggregate characteristics, and soil moisture were compared before and after the rainy season. Runoff depth, soil erosion, and crop yield were also monitored. [Results] After the rainy season, soil bulk density increased across all regions, while the proportion of  $>0.25$  mm water-stable aggregates ( $WSA_{>0.25}$ ) and mean weight diameter (MWD) decreased. Soil bulk density in the EF was significantly lower than in the CTF ( $p < 0.05$ ), with the lowest

收稿日期: 2024-10-31

修回日期: 2024-12-03

采用日期: 2024-12-03

资助项目: 国家重点研发计划项目“黑土地侵蚀退化功能重建机制与阻控技术”(2021YFD1500800); 国家自然科学基金青年项目“东北冷凉区黑土农田条耕水热效应研究”(42101281)

第一作者: 吴旭(1994—), 男(苗族), 贵州省铜仁市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: wuxu@stu.hrbnu.edu.cn.

通信作者: 陈强(1987—), 男(汉族), 黑龙江省伊春市人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email: chenqiang2016@hrbnu.edu.cn.

value observed in the TEB area ( $1.18 \text{ g/cm}^3$ ). The content of  $>2 \text{ mm}$  aggregates in the EF was significantly higher than that in the CTF ( $p < 0.05$ ), with the smallest reduction occurring in the TEB. The  $\text{WSA} > 0.25$  and MWD in the TEB area were  $10.58\%$  and  $0.36 \text{ mm}$  higher than those in the CTF, respectively ( $p < 0.05$ ). Throughout the growing season, soil moisture in the EF was significantly higher than that in the CTF, whereas runoff depth and soil erosion declined by  $35.10\%$  and  $51.60\%$ , respectively. The TEB area exhibited the highest seedling emergence and maize yield. [Conclusion] TEB technology effectively enhances soil structure, water retention, and water-soil conservation while boosting crop yield. This technology is well suited for large-scale implementation on sloping cultivated land across the black soil region of Northeast China.

**Keywords:** tillable earth bund; black soil; soil and water erosion; soil structure; maize yield

东北黑土区位于松辽流域,主要分布在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古(呼伦贝尔、兴安盟、通辽市和赤峰市)4省(自治区),面积  $1.09 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,是中国重要的商品粮生产基地,耕地面积和年粮食总产量分别占全国的  $1/4$ ,被誉为粮食生产与供给的“稳压器”和“压舱石”<sup>[1-3]</sup>。然而受高强度开发和种植结构的变化等因素的影响,东北黑土区的坡耕地遭受严重侵蚀和水土流失,黑土层变薄、肥力下降,危害耕地质量<sup>[4-5]</sup>。黑土层厚度和黑土有机质含量的下降是导致土壤退化的重要原因<sup>[6]</sup>。根据中国水土保持公报(2023年)数据显示,东北黑土区水土流失面积为  $2.09 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占黑土地总面积的  $19.20\%$ 。其中,水力侵蚀面积为  $1.33 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,按侵蚀强度划分,轻度、中度、强烈及以上面积分别为  $1.67 \times 10^5$ ,  $2.28 \times 10^4$ ,  $1.62 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,水土流失主要来源于  $3^\circ \sim 5^\circ$  坡耕地,坡耕地年均黑土层变薄速率为  $2 \sim 3 \text{ mm}$ ,黑土层厚度仅剩  $30 \text{ cm}$  左右,水土流失导致土地退化,对土地生产力和粮食生产,乃至国家粮食安全会造成严重威胁<sup>[7]</sup>。近年来,关于东北黑土区坡耕地水土保持已开展了大量的研究,研究内容主要集中于生物措施、工程措施和耕作措施三大类。生物措施通过植被(如森林和草地)覆盖减少径流和土壤流失,工程措施通过修建梯田,地埂等改变坡地地貌以减少地表径流和水土流失,耕作措施则是在农田中采用的管理技术,其特点是不改变地形,仅依靠农业机械进行操作<sup>[8]</sup>。国内外研究表明,修筑地埂或者地埂植物带是一项能有效遏制坡耕地水土流失的重要措施<sup>[9-11]</sup>。在东北黑土区,坡耕地水土保持措施依据坡度不同,主要有等高改垄(坡度  $< 3^\circ$ )、地埂植物带(坡度  $3^\circ \sim 5^\circ$ )、梯田(坡度  $> 5^\circ$ )坡面水土保持措施,坡耕地实施水土保持措施后土壤侵蚀可减少  $80\%$  以上,等高改垄,地埂植物带和梯田分别提高了  $10\%$ ,  $15\%$  和  $20\%$  的粮食产量。地埂植物带能够显著减少地表径流和土壤流失, Yan Yue 等<sup>[12]</sup> 的研究表明,地埂植物带分别减少了  $15.30\% \sim 62.50\%$  的径流和  $79.40\% \sim 93.80\%$  的土壤流失。朱悦等<sup>[13]</sup> 发现,地埂与排水渠结合的措施有效减少了土壤侵蚀和地表径

流,分别降低了  $75.90\%$  和  $88.80\%$ 。K. Wolka 等<sup>[14]</sup> 的研究指出,在玉米生长季节,与裸地相比,地埂显著减少了  $80\% \sim 92\%$  的地表径流。回莉君等<sup>[15]</sup> 的研究表明,地埂植物带不仅减少了土壤侵蚀和地表径流,还增加了土壤养分含量。此外,地埂植物带和生物篱等措施有助于增强土壤团聚体结构,改善土壤结构,增加土壤含水量,并提高土壤肥力和生产力。与传统的顺坡垄作相比,这些措施能够使玉米产量提高  $20\%$ <sup>[16-17]</sup>。

东北黑土区水土流失问题严重,水土保持已成为黑土地保护的核心任务,并逐渐形成了一套独具特色、行之有效的技术体系。自 2003 年起,国家启动了四期农发工程,重点围绕坡耕地水土保持展开,特别是通过等高改垄和修建地埂植物带等措施,取得了显著的防治效果。然而,由于修建地埂植物带需要占用约  $10\%$  的耕地面积,农民不同意,进而难以推广实施。致使实施黑土地坡耕地水保工程被迫停止,这成为黑土地坡耕地水土保持的瓶颈问题<sup>[18-19]</sup>。

为了突破这一瓶颈,本研究通过技术创新破解这一难题,目前初步建立一种可耕作地埂技术,旨在减少坡耕地水土流失的同时,保障农用机械作业的顺利进行,从而解决地埂植物带等水土保持措施占地问题,尽管这一技术初步建立并得到了应用,但其具体效果尚不明朗。为此,本研究通过野外监测和室内分析等方法,探究该技术对土壤结构、水保效益和作物产量等因素的影响,评估可耕作地埂技术的实施效果,为该技术的推广应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省海伦市光荣村 ( $47^\circ 20' \sim 47^\circ 23' \text{ N}$ ,  $126^\circ 49' \sim 126^\circ 51' \text{ E}$ ),地处东北典型黑土区中部,该地区属于中温带大陆性季风气候,年均气温为  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年均降水量约  $530 \text{ mm}$ 。其中 6 月至 8 月的降雨量占总降雨量的  $65\%$ ,年均有效积温为  $2450 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年日照时数约为  $2600 \text{ h}$  至  $2800 \text{ h}$ ,无霜期约  $120 \text{ d}$ 。土壤类型为典型的黑土,具有粉质黏壤

土质地,高黏粒和有机质含量,以及良好的持水能力,但排水不良<sup>[20]</sup>。

## 1.2 试验设计

地埂的设计主要考虑能够抵抗基于 10 a 一遇的 24 h 最大雨强(见图 1)。降雨强度具体计算公式为:

$$I = 60 \times \frac{1\ 503(1 + 0.85 \lg P)}{10\ 000(t + 6)^{0.78}} \quad (1)$$

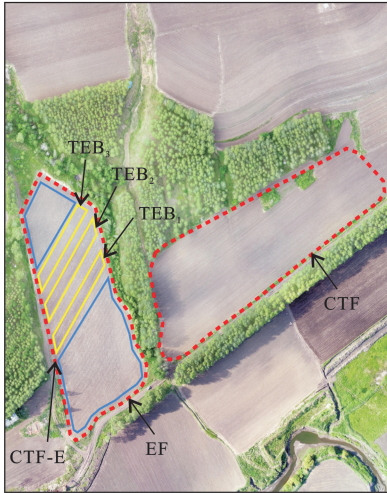
式中: $I$  为雨强(mm/min); $P$  为重现期(a); $t$  为降雨历时(min)。坡耕地修筑可耕作地埂的间距主要

考虑上方来水量与地埂拦截能力,具体计算方法为:

$$\mu \cdot L \cdot I \cdot t \leq \frac{(h_1 \cos \alpha)^2}{\tan \alpha} + \frac{L}{0.65} \times \frac{0.65d}{4} + \frac{0.65(d + h_2)}{4} \quad (2)$$

式中: $\mu$  是径流系数,根据研究区裸地径流小区多年观测数据,取 0.2(%); $L$  为埂带上方拦截坡面坡长或埂带间距(m); $h_1$  为埂高(m); $\alpha$  为田块坡度(%); $h_2$  为导水渠深度(m); $d$  为垄沟深度(m)。

a 试验地块布设



b 监测设备

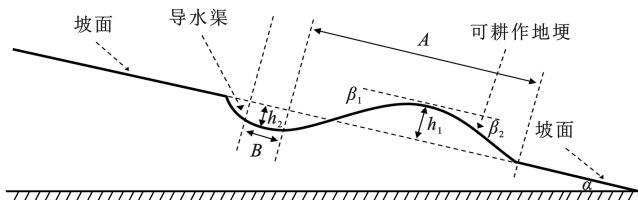


注:EF 为试验田块;TEB 为可耕作地埂区域;CTF-E 为未修筑地埂传统耕作区域;CTF 为对照田块;坡向为阳坡。下同。

图 1 试验地块布设(a)以及水土流失监测设备(b)

Fig.1 Layout of experimental fields (a), and soil and water losses monitoring device (b)

基于以上因素,可耕作地埂实施工艺主要包括:首先剥离表层土壤,然后在可耕作地埂的上坡处剥离底层土,修筑一个弧形地埂及导水渠,整形地埂区域至所需规格后,用表层土覆盖,修筑完成后旋耕起垄。由图 2 可见,研究区的可耕作地埂坡脚 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 需不超过 $15^\circ$ ,埂带宽度( $A$ )一般设置为 $5.2 \sim 6.5$  m,利用公式(1)与(2)可以明确两条可耕作地埂埂带的间距( $L$ )与埂带高度( $h_1$ )的关系,再结合 $A$ 与 $h_1, \beta_1, \beta_2$ 的换算关系,继而可以确定 $L, h_1, \beta_1, \beta_2$ 。为减少导水渠的占地面积和不影响机械作业,一般取 $0.65$  m(即,一个垄台和垄沟的宽度)作为导水渠宽度,深度( $h_2$ )一般取 $0.2$  m。



注: $A$  为可耕作地埂宽度; $h_1$  为可耕作地埂高度; $\beta_1$  为上坡角; $\beta_2$  为下坡角; $B$  为导水渠宽度; $h_2$  为导水渠高度; $\alpha$  为坡面坡度。下同。

图 2 可耕作地埂设计的相关参数

Fig.2 Parameters of tillable earth bund

基于以上可耕作地埂设计原则,研究选取黑龙江省海伦市光荣村一坡耕地(平均坡度 $5^\circ$ )作为试验地块(EF),修筑了 3 条可耕作地埂,相关的参数见表 1。选取采用传统耕作,坡度和面积相似但未修筑地埂的邻近田块作为对照田块(CTF)。可耕作地埂在 2022 年秋季设计并实施,于 2023 年进行播种,除草,追肥等管理措施,相关标准均按照当地种植制度执行,2 个地块均种植作物均为玉米。

## 1.3 样品采集与测定

试验于 2023 年 7 月 8 日和 10 月 13 日进行野外采样,EF 区域共采集了 43 个土壤样本,其中 TEB 区域和 CTF-E 区域分别设有 18 个和 25 个采样点,CTF 区域则设有 33 个采样点。

EF 区域的土壤容重、水稳性团聚体的分布与稳定性及土壤水分均取整个区域的平均值,采样点分布如图 3 所示。

1.3.1 土壤含水量 含水量使用时域反射仪(TDR, 美国)测定。每 15 d 左右进行一次测量,若遇降雨则需等待土壤水分趋于稳定(通常为降雨后 $2 \sim 5$  d)后再进行测量,每个采样点垂直插入 TDR 探针至 20 cm 深度,并进行 3 次重复测量。

表 1 可耕作地埂设计规格及其试验田块地形参数

Table 1 Design specifications of tillable earth bunds and experimental field topography parameters

区域	$\alpha/(\circ)$	$A/m$	埂长/m	$h_1/m$	$B/m$	$h_2/cm$	$J/\%$	$\beta_1/(\circ)$	$\beta_2/(\circ)$	拦截坡长/m
TEB <sub>1</sub>	5.4	5.8	75	0.28	0.6	20	2.1	12	7.0	21
TEB <sub>2</sub>	6.6	5.2	93	0.25	0.6	20	0.7	12	6.5	15
TEB <sub>3</sub>	5.7	5.2	98	0.28	0.6	20	0.7	12	6.5	25

注:  $J$  为导水渠比降。

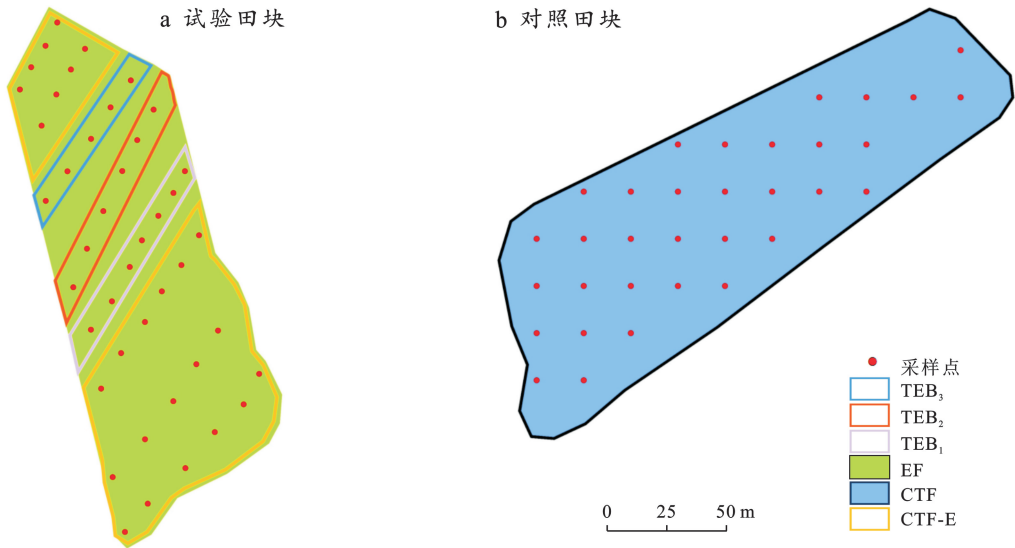


图 3 研究区采样点分布

Fig.3 Distribution of sampling points in study area

1.3.2 土壤容重 采用环刀法( $100\text{ cm}^{-3}$ )测定土壤容重(bulk density)。分别于 2023 年雨季前后(7 月 8 日和 10 月 13 日)测定 0—10 cm 深度的土壤容重, TEB 区域的容重为 TEB<sub>1</sub>, TEB<sub>2</sub> 和 TEB<sub>3</sub> 的土壤容重的平均值。

1.3.3 团聚体粒级分布及稳定性 使用真空慢速浸润法测定土壤水稳性团聚体粒级分布<sup>[21]</sup>。于 2023 年雨季前后(7 月 8 日和 10 月 13 日)采集两次原状土壤样品。自然风干后, 去除土壤中的根系, 石头等杂物。取 50 g 风干土壤样品过 10 mm 孔径筛网, 在真空条件下慢速浸润 2~4 min, 然后移至团聚体分析仪(套筛孔径自上而下为 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm 和 0.053 mm), 浸泡 8 min, 震荡 2 min, 每分钟循环 30 次, 振动幅度 3 cm, 最后将各级套筛中土壤样品在 60° 条件下烘干, 最后计算各粒级水稳性团聚体含量。 $>0.25\text{ mm}$  水稳性团聚体含量和平均重量直径:

$>0.25\text{ mm}$  土壤水稳性团聚体含量( $>0.25\text{ mm}$  water-stable aggregate content,  $WSA_{>0.25}$ )公式为:

$$WSA_{>0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (3)$$

式中:  $M_{r>0.25}$  表示  $>0.25\text{ mm}$  的水稳性团聚体质量(g);  $M_T$  表示团聚体的总质量(g)。

平均重量直径(mean weight diameter, MWD)计算公式为:

$$MWD = \left( \frac{W_i X_i}{W_s} \right) \quad (4)$$

式中:  $W_i$  为各粒径级别中团聚体的平均直径(mm);  $X_i$  为各粒径级别中团聚体的平均质量(g);  $W_s$  为分析样本的总质量(g)。

1.3.4 作物出苗率及产量 在玉米播种后的第 10 天和第 20 天分别对两个样地进行出苗调查, 每个区域随机选取 3 个  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  的样本区域, 记录每个样本区域内实际出苗的植株数量。通过实际出苗数量与播种时种子的总数量比值, 计算出苗率。

作物产量测定于 2023 年 10 月玉米成熟后测定各区域的玉米产量。选择与出苗率测定相同的样本区域, 在每个样本区域内, 收获所有玉米植株, 并测量每个植株的玉米穗数、穗重、穗粒数及百粒重, 然后计算样本区域内的平均产量。

株高测量在出苗率调查的相同样方区域进行。每个区域内随机选择 10~20 株具有代表性的植株进行测量, 使用卷尺或测量杆从地面测量至植株最高点, 不包括花序或果穗。对于倒伏的植株, 在将其扶正后进行测量。为确保数据准确性, 测量在晴朗无风的日子进行, 以尽量减少风的干扰。

1.3.5 水土保持效果监测 降雨量使用 FDY 系列翻斗式雨量传感器获取, 径流泥沙数据使用中国科学院东北地理所与农业生态研究所自主研发的水土流失监测设备(XYZ-III)获取<sup>[22]</sup>。

1.3.6 数据处理 利用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据整理, 使用 SPSS 26.0 软件中的单因素方差(one-way ANOVA)和 LSD 显著性检验( $p < 0.05$ )进行分析可耕作地埂与对照田块土壤容重、团聚体稳定性、土壤水分及产量的差异性, 所有图的绘制采用 Origin 2024 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 可耕作地埂的水土保持效果

可耕作地埂技术通过有效拦蓄雨水, 显著降低径流深和土壤侵蚀量(表 2)。CTF 区域的径流深和侵蚀量分别比 EF 区域高 9.50 mm 和 75.37%。EF 区域土壤侵蚀量为 70.65 t/km<sup>2</sup>, 而 CTF 区域侵蚀量则达到了 146.02 t/km<sup>2</sup>, 这表明可耕作地埂的实施可以显著减少坡耕地土壤流失量达 51.6% 以上。在雨季期间, 可耕作地埂田块仅有 5.9%~20.2% 的降雨从田块流失, 即降雨 80% 以上的降雨可被拦蓄在农田。

表 2 不同区域对径流系数、径流深度和侵蚀量的影响

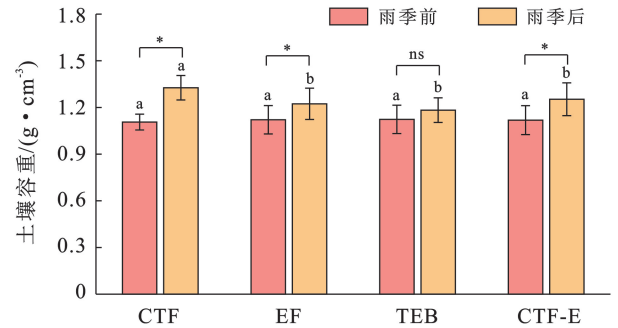
Table 2 Effects of different areas on runoff coefficient, runoff depth and sediment yield

区域	次降雨量/ mm	径流系数/ %	径流深/ mm	侵蚀量/ (t · km <sup>-2</sup> )
EF	233.20	7.50	17.60	70.65
CTF	233.20	11.60	27.10	146.02

### 2.2 可耕作地埂对土壤结构的影响

2.2.1 土壤容重 不同区域土壤容重在雨季前后的变化情况如图 4 所示。雨季前, 各区域土壤容重范围为 1.11~1.13 g/cm<sup>3</sup>, 差异不显著( $p > 0.05$ ), 雨季后, 各区域土壤容重范围为 1.18~1.33 g/cm<sup>3</sup>, 土壤容

重均表现为增加趋势。其中, CTF 区域雨季后土壤容重变化最大, 其土壤容重比雨季前高 0.22 g/cm<sup>3</sup>, 差异达到显著性水平( $p < 0.05$ )。对于 EF 区域, TEB 区域的土壤容重变化则不显著( $p > 0.05$ ), CTF-E 区域的土壤容重增加了 0.13 g/cm<sup>3</sup>。雨季后, EF 的土壤容重比 CTF 区域低 0.11 g/cm<sup>3</sup>, 差异达到显著性水平( $p < 0.05$ )。



注: \* 表示雨季后土壤容重差异性显著( $p < 0.05$ ); ns 表示差异不显著( $p > 0.05$ ); 不同字母表示雨季后不同区域土壤容重差异性显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 4 雨季后不同区域土壤容重

Fig. 4 Soil bulk density in different areas before and after rainy season

2.2.2 土壤水稳定团聚体粒径分布 由图 5 可见, EF 和 CTF 区域雨季前的  $>2, 1 \sim 2, 0.5 \sim 1$  mm 粒级水稳定团聚体含量均低于雨季后, 而  $0.25 \sim 0.5, 0.053 \sim 0.25$  和  $<0.053$  mm 粒径团聚体含量则呈相反的趋势。EF 和 CTF 区域  $>2$  mm 粒级水稳定团聚体含量减幅分别为 27.24% 和 41.04%, TEB 区域减幅最小(23.96%)。而 CTF 区域  $<0.053$  mm 粒径水稳定团聚体增幅为 53.96%, EF 区域增幅为 44.67%, 其中, EF 和 CTF-E 区域的增幅分别为 36.53% 和 49.89%。各区域之间对比发现, EF 区域不同时期  $>2, 1 \sim 2, 0.5 \sim 1$  mm 粒级团聚体含量均高于 CTF 区域, 但差异均未达到显著性水平。而  $0.25 \sim 0.5, 0.053 \sim 0.25$  和  $<0.053$  mm 粒径团聚体含量则表现出相反的结果。

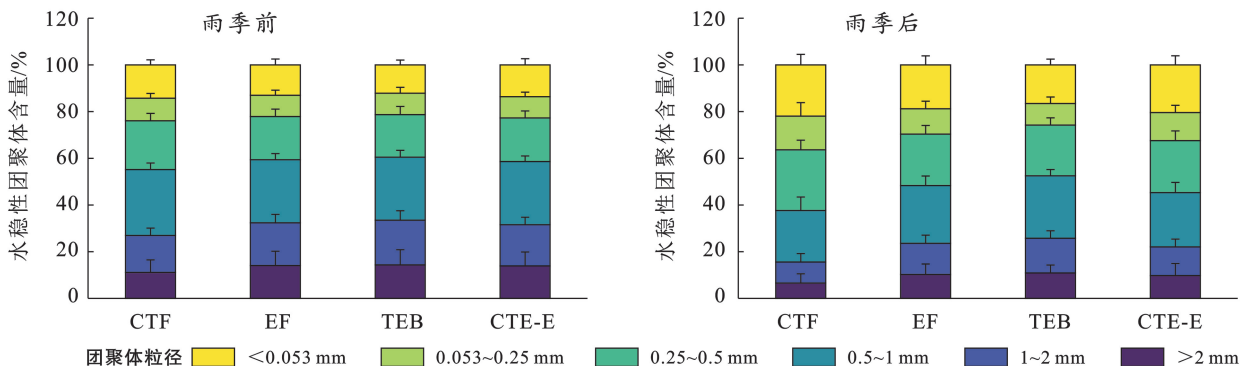


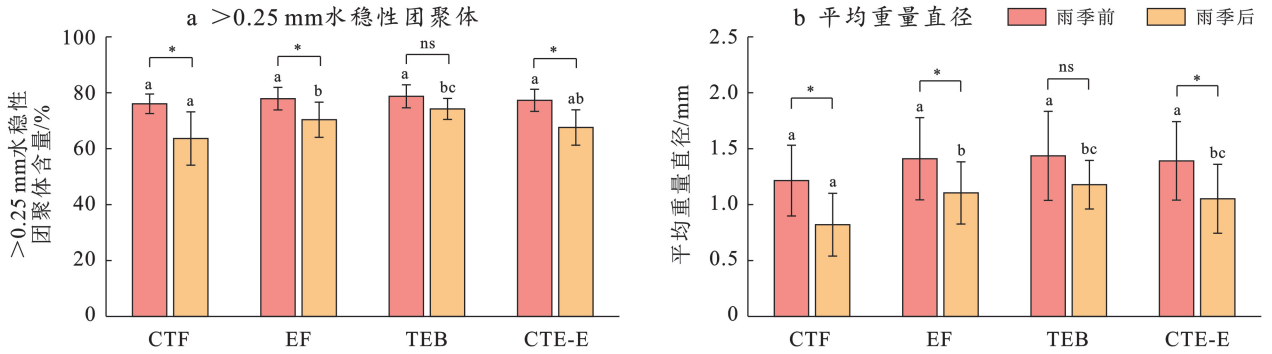
图 5 雨季后不同区域水稳性团聚体粒径分布

Fig. 5 Size distribution of water-stable aggregates in different areas before and after rainy season

2.2.3 土壤团聚体稳定性 由图 6 可见,雨季后 EF 和 CTF 区域的  $WSA_{>0.25}$  和 MWD 值均显著低于雨季前。EF 和 CTF 区域的  $WSA_{>0.25}$  分别较雨季前降低了 9.67% 和 16.37%,MWD 则分别减少了 0.31 和 0.39 mm。在 EF 区域内,CTF-E 区域的  $WSA_{>0.25}$  和 MWD 在雨季期间显著下降 ( $p < 0.05$ ),而 TEB 区域

未出现显著变化。

雨季前,EF 区域的  $WSA_{>0.25}$  和 MWD 略高于 CTF 区域;而在雨季后,EF 区域的  $WSA_{>0.25}$  和 MWD 显著高于 CTF 区域 ( $p < 0.05$ )。TEB 区域的  $WSA_{>0.25}$  和 MWD 较 CTF-E 区域分别高出 10.58% 和 0.36 mm。



注: \* 表示雨季前后 >0.25 mm 水稳性团聚体含量;平均重量直径差异性显著 ( $p < 0.05$ ); ns 表示差异不显著 ( $p > 0.05$ );不同字母表示雨季前或者雨季后不同区域 >0.25 mm 水稳性团聚体含量;平均重量直径差异性显著 ( $p < 0.05$ )。

图 6 不同区域雨季前后 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和平均重量直径差异

Fig.6 Differences in content of >0.25 mm water-stable aggregates ( $WSA_{>0.25}$ ) and mean weight diameter (MWD) in different regions before and after rainy season

### 2.3 可耕作地埂对土壤水分的影响

整个生育期内,不同区域土壤水分的动态变化如图 7 所示。研究发现,土壤水分随降雨量的变化显著波动,并在 8 月达到最高值。EF 区域土壤水分的增幅高于 CTF 区域,如从 7 月中下旬至 8 月初期间,EF

区域的土壤水分增加了 49.14%,CTF 区域增加 26.18%,TEB 区域减少了 13.20%,CTF-E 区域减少了 14.59%。EF 区域的土壤水分比 CTF 区域高出 4.89%。9 月 3 日的土壤水分差异最大,TEB 区域的土壤水分比 CTF 区域高出 2.67%。

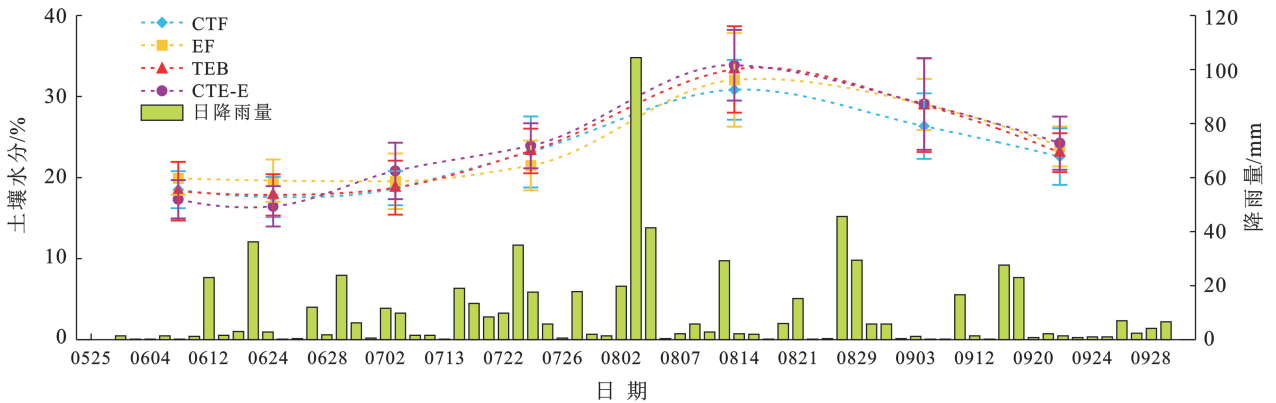


图 7 不同研究区域生育期土壤水分的变化

Fig.7 Changes in soil moisture during growing season in different plots

### 2.4 可耕作地埂对作物产量的影响

如表 3 所示,EF 和 CTF 区域的玉米出苗率差异性不显著 ( $p > 0.05$ ),TEB 区域的出苗率最高 (96.5%),这表明可耕作地埂对作物出苗无明显影响。此外,TEB 区域玉米株高分别比 CTF 和 CTF-E 区域高出 25 和 49 cm,而 EF 区域的玉米产量达到 14 890  $kg/hm^2$ ,比 CTF 区域高出 2 574  $kg/hm^2$ ,显

著高于 CTF 区域的 12 309  $kg/hm^2$  ( $p < 0.05$ )。

## 3 讨论

可耕作地埂是一种高效的水土保持措施,通过在坡耕地上修建可耕作的地埂,不仅有效减少水土流失,提升土地利用效率,还为农业生产和生态环境保护提供了重要保障。土壤容重是衡量土壤紧实度的

指标,也是影响土壤持水能力,渗透性,通气性以及作物发芽和根系生长的重要因素<sup>[23]</sup>。研究发现,TEB 和 CTF 区域雨季后土壤容重均显著高于雨季前( $p < 0.05$ )。其原因可能是土壤重力回实,降雨提高了土壤含水量,导致土壤颗粒更紧密地堆积,从而增加了土壤容重。CTF 与 EF 区域之间的土壤容重雨季后未存在显著性差异,主要是苗期播种和雨季前深松土壤等农艺措施相同导致研究区域之间的土壤表层扰动强度差异小。但雨季后,CTF 区域土壤容重显著高于 EF 区域,特别是 TEB 区域,其土壤容重比 CTF 区域低  $0.14 \text{ g/cm}^3$ 。这主要归结于修筑可耕作地埂时,对土壤扰动程度较大,且土壤尚未处于完全自然回实,整个地埂区域的土壤大孔隙较多<sup>[24]</sup>。与传统耕作措施相比,可耕作地埂显著降低了土壤紧实度,为水分入渗和根系生长提供了有利条件。在土壤结构稳定性方面,可耕作地埂通过改善土壤团聚体的组成和稳定性,提高了土壤抗侵蚀能力。土壤团聚体粒级组成及其稳定性是评价土壤结构稳定性的重要指标,其稳定性与水土流失紧密相关,是表征土壤抗侵蚀能力的重要指标之一<sup>[16,20,25]</sup>,相关研究发现土壤侵蚀通过影响水稳性团聚体之间有机胶结物的分解,从而导致水稳性团聚体稳定性降低。本研究结果发现,雨季前的  $> 2 \text{ mm}$  粒径团聚体、 $\text{WSA}_{>0.25}$  和 MWD 数值均高于雨季后,这些结果与许多研究的结果一致<sup>[26]</sup>。相关研究证实雨滴击打直接导致大粒级团聚体( $> 2 \text{ mm}$ )的破碎,土壤逐渐湿润的过程也会导致团聚体碎裂,同时,地表径流产生也导致土壤大粒级团聚体在暴雨中破裂成更小的颗粒<sup>[27]</sup>。我们的研究结果显示,CTF 区域的  $\text{WSA}_{>0.25}$  和 MWD 的减幅大于 EF 区域。雨季后,TEB 区域的  $\text{WSA}_{>0.25}$  和 MWD 显著高于 CTF 和 CTF-E 区域。其原因主要是在修建可耕作地埂时,犁底层被破坏,增加土壤水分入渗,降低土壤侵蚀的发生概率,改善土壤团聚体的稳定性。总体而言,与传统耕作措施相比,可耕作地埂能够改善土壤结构。

表 3 不同区域玉米出苗率、株高及产量  
Table 3 Emergence rate, plant height and yield of maize in different plots

指标	CTF	EF	TEB	CTF-E
出苗率/%	94.8 <sup>a</sup>	95.3 <sup>a</sup>	96.5 <sup>a</sup>	93.1 <sup>a</sup>
株高/cm	289 <sup>b</sup>	312 <sup>a</sup>	314 <sup>a</sup>	265 <sup>c</sup>
产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	12 309 <sup>c</sup>	14 890 <sup>a</sup>	14 883 <sup>a</sup>	14 181 <sup>b</sup>

注:不同小写字母表示区域间存在显著差异( $p < 0.05$ )。

研究表明,可耕作地埂通过改善土壤孔隙结构和引入径流导水渠,显著提升了土壤蓄水能力和保

水能力。土壤水分作为水土保持的重要指标,与植物生长密切相关。充足的土壤水分能够促进土壤中的微生物活动,增强养分循环和供应,从而提高土壤的肥力<sup>[28]</sup>。本研究发现,由于 TEB 区域修建了径流导水渠,该措施可以提高地埂区域的蓄水能力,TEB 区域的平均土壤含水量比 CTF 区域高出 3.69%。降雨发生时,由于 TEB 区域具有较高的土壤孔隙度和土壤入渗能力,因此,TEB 区域土壤水分的增幅高于 CTF 和 CTF-E 区域。此外,良好的土壤结构,提高了 TEB 区域保水能力,在缺少降雨的情况下,TEB 区域土壤含水量的下降幅度低于 CTF 和 CTF-E 区域。这些结果表明,TEB 区域的土壤保水性和储水能力优于其他区域。

由于播种阶段的农艺措施相似,EF 和 CTF 区域的出苗率并无差异,但 TEB 区域的株高和作物产量均显著高于 CTF 和 CTF-E 区域。这主要是由于 TEB 区域土壤透气性和透水性得到改善,为作物的生长和发育提供了更好的环境条件。此外,CTF-E 区域的作物产量显著高于 CTF 区域,可见,地埂修筑影响了土壤水分的空间分布,CTF-E 区域较低区域并未出现长期滞水现象,而 CTF 区域西侧区域则出现了滞水现象(40 d),最终导致该区域作物产量降低。

综合来看,可耕作地埂技术在水土保持方面具有显著的综合效益。可耕作地埂在雨季期间减少了超过 51.6% 的土壤流失,并拦截了 80% 以上的地表径流,表明可耕作地埂和导水渠的组合能够有效减少径流和土壤流失。这主要归结于土壤微地形和地表粗糙度的变化,改善了土壤结构,增加了土壤水分入渗能力。此外,在极端降雨情况下,导水渠具有一定排水能力,起到缓冲效果,保护地埂不被径流冲毁。这些发现与其他研究结果高度一致<sup>[29-31]</sup>。如陈英智等<sup>[32]</sup>发现地埂和地埂植物带显著减少了 95% 的土壤流失。朱悦等<sup>[13]</sup>也发现,双埂植物带可以使地表径流和泥沙产量分别减少 75.9% 和 88.8%。可耕作地埂减少土壤侵蚀的效果可以归因于土壤孔隙度的增加和土壤储水能力的改善,相较于传统耕作措施,这些因素显著增强了水土保持效果。

## 4 结论

本研究通过对东北黑土区坡耕地可耕作地埂技术的实施效果进行分析,探讨了其对土壤结构、土壤水分、土壤侵蚀以及作物产量的影响。研究结果表明,与传统耕作方式相比,可耕作地埂提高了土壤蓄水保水能力,减少 51.6% 以上的土壤流失,拦截了

超过 80% 的地表径流, 具有良好水土保持效果, 同时, 可耕作地埂降低土壤容重, 增加团聚体稳定性, 改善了土壤结构。此外, 可耕作地埂并未影响作物出苗和生长, 其作物产量显著高于传统耕作措施。综上所述, 可耕作地埂是一项有利于实现东北黑土地保护和农业可持续发展的水保措施, 具有广泛的应用前景。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. 科学通报, 2021, 66(1): 96-106.  
Liu Baoyuan, Zhang Ganlin, Xie Yun, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of Northeastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(1): 96-106.
- [2] 于博威, 张晴雯, 郝卓, 等. 东北黑土区长缓坡耕地横坡垄作与地形对土壤可蚀性的交互作用[J]. 中国农业科学, 2023, 56(23): 4706-4716.  
Yu Bowei, Zhang Qingwen, Hao Zhuo, et al. Interaction between transverse ridge tillage and topography on soil erodibility along the long gentle slope in a typical black soil region of Northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(23): 4706-4716.
- [3] 季晓琪, 范昊明. 东北黑土区土壤侵蚀自然驱动因子时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 130-138.  
Ji Xiaoqi, Fan Haoming. Spatiotemporal distribution of natural driving factors of soil erosion in northeast mollisol region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 130-138.
- [4] 张兴义, 胡伟, 李建业, 等. 水土流失防控是黑土地保护的重点[J]. 科学通报, 2024, 69(11): 1401-1405.  
Zhang Xingyi, Hu Wei, Li Jianye, et al. Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(11): 1401-1405.
- [5] 温磊磊, 许海超, 秦伟, 等. 东北黑土区水土保持重点工程措施保存现状及其问题[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 417-423.  
Wen Leilei, Xu Haichao, Qin Wei, et al. Preservation status and problems of key soil and water conservation projects in black soil region of Northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 417-423.
- [6] 杨文博, 刘娜, 蔡强国, 等. 水力侵蚀对土壤碳循环及土壤微生物多样性影响的研究进展[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 14-21.  
Yang Wenbo, Liu Na, Cai Qianguo, et al. Research progress on the effects of hydraulic erosion on soil carbon cycle and soil microbial diversity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 14-21.
- [7] 张兴义, 李健宇, 郭孟洁, 等. 连续 14 年黑土坡耕地秸秆覆盖免耕水土保持效应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 44-50.  
Zhang Xingyi, Li Jianyu, Guo Mengjie, et al. Effects of straw mulching and no tillage for continuous 14 years on soil and water conservation in mollisols sloping farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 44-50.
- [8] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xue Yun. An empirical soil loss equation [C] // Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China. 2002.
- [9] 苑佰飞, 崔海峰, 李猛, 等. 不同水土保持措施对东北黑土区坡耕地产流产沙的影响[J]. 中国水土保持, 2024(2): 61-65.  
Yuan Baifei, Cui Haifeng, Li Meng, et al. The impact of different soil and water conservation measures on runoff and sediment in sloping farmland in the black soil areas of Northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(2): 61-65.
- [10] Wei Wei, Chen Die, Wang Lixin, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 388-403.
- [11] Dagne H, Assefa E, Teferi E. Sustainable use of soil and water conservation technologies and its determinants: The case of the Handosha watershed, Omo-gibe river basin, Ethiopia [J]. Earth, 2023, 4(2): 315-330.
- [12] Yan Yue, Zhen Huaicai, Zhai Xingyu, et al. The role of vegetation on earth bunds in mitigating soil erosion in Mollisols region of Northeast China [J]. Catena, 2021, 196: 104927.
- [13] 朱悦. 东北黑土区水土保持复式地埂技术研究[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(12): 29-31.  
Zhu Yue. Research of compound ridge technology used in soil and water conservation of northeastern black soil area [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2018, 46(12): 29-31.
- [14] Wolka K, Biazin B, Martinsen V, et al. Soil and water conservation management on hill slopes in Southwest Ethiopia: I. Effects of soil bunds on surface runoff, erosion and loss of nutrients [J]. Science of the Total Environment, 2021, 757: 142877.
- [15] 回莉君, 沈波. 东北地区植物带保护坡耕地水土资源效果研究[J]. 资源科学, 2004, 26(增刊 1): 119-124.  
Hui Lijun, Shen Bo. Effect of botanic belt protection on water and soil resources of plantation in the slope reserve [J]. Resources Science, 2004, 26(Suppl.1): 119-124.

- [16] Clark R, Durón G, Quispe G, et al. Boundary bunds or piles of stones? Using farmers' practices in Bolivia to aid soil conservation [J]. *Mountain Research and Development*, 1999, 235-240.
- [17] Adimassu Z, Mekonnen K, Yirga C, et al. Effect of soil bunds on runoff, soil and nutrient losses, and crop yield in the Central Highlands of Ethiopia [J]. *Land Degradation & Development*, 2014, 25:554-564.
- [18] 魏思雨,张延玲,刘滨辉,等.东北黑土区地埂坡耕地土壤物理性质的空间分布特征[J].*水土保持研究*, 2024, 31(4):135-144.
- Wei Siyu, Zhang Yanling, Liu Binhui, et al. Spatial distribution characteristics of soil physical properties of sloping cultivated land with ridges in the black soil region of Northeast China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4):135-144.
- [19] 王禹宸.黑土区埂带植物筛选及其效益评价[D].黑龙江哈尔滨:东北农业大学, 2015.
- Wang Yuchen. The selections of earth bund plants and their benefit evaluations in the black soil region of Northeast China [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2015.
- [20] Chen Shuai, Burras C L, Lili E, et al. Interrelationship among slope steepness, tillage practice and rainfall properties with surface runoff and soil loss on Mollisols in Northeast China [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(13):1860-1872.
- [21] Sun T, Chen Q, Chen Y, et al. A novel soil wetting technique for measuring wet stable aggregates [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 141:19-24.
- [22] Sun Tao, Cruse R M, Chen Qiang, et al. Design and initial evaluation of a portable in situ runoff and sediment monitoring device [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519:1141-1148.
- [23] Kaufmann M, Tobias S, Schulin R. Comparison of critical limits for crop plant growth based on different indicators for the state of soil compaction [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(4):573-583.
- [24] Goba W B, Muluneh A, Wolka K. Soil bunds effect on soil properties under different topographies of Southwest Ethiopia [J]. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 2022, 4(1):54-63.
- [25] 刘益辰,范雪松,杨晨曦,等.典型耕作土壤团聚体力稳性的区域分异特点及其影响因素[J].*农业工程学报*, 2023, 39(21):47-53.
- Liu Yichen, Fan Xuesong, Yang Chenxi, et al. Regional variation and its influencing factors for the aggregate mechanical stability of typical cultivated soils [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(21):47-53.
- [26] Obalum S E, Nwite J C, Oppong J, et al. Comparative topsoil characterization of sawah rice fields in selected inland valleys around Bida, North-Central Nigeria: Textural, structural and hydrophysical properties [J]. *Paddy and Water Environment*, 2011, 9(3):291-299.
- [27] Almajmaie A, Hardie M, Acuna T, et al. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167:39-45.
- [28] Garcia-Franco N, Martínez-Mena M, Goberna M, et al. Changes in soil aggregation and microbial community structure control carbon sequestration after afforestation of semiarid shrublands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 87:110-121.
- [29] Li Weitao, Wu Meng, Liu Ming, et al. Responses of soil enzyme activities and microbial community composition to moisture regimes in paddy soils under long-term fertilization practices [J]. *Pedosphere*, 2018, 28(2):323-331.
- [30] 吴海霞.东北黑土区不同埂带植物的水土保持效益初探[J].*内蒙古水利*, 2023(10):41-42.
- Wu Haixia. Preliminary study on soil and water conservation benefits of plants in different ridges in black soil region of Northeast China [J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2023(10):41-42.
- [31] 李鑫.太行山区坡地植物篱水土保持功能研究[D].河北石家庄:河北师范大学, 2023.
- Li Xin. Study on soil and water conservation function of hedgerow on slope land in Taihang Mountains of China [D]. Shijiazhuang, Hebei: Hebei Normal University, 2023.
- [32] 陈英智.黑土区埂带植物水土保持效益研究[J].*水土保持应用技术*, 2012(1):7-9.
- Chen Yingzhi. Study on soil and water conservation benefits of plants in ridge zone of black soil region [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2012(1):7-9.