

水土保持耕作对黑土坡耕地玉米田土壤碳平衡的影响

张作合^{1,2} 张忠学² 薛里² 周利军¹ 李浩宇¹ 吕项龙¹

(1. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 黑土坡耕地顺坡耕作土壤侵蚀严重, 土壤有机碳含量逐年下降。为探明不同水土保持耕作技术对黑土坡耕地玉米田土壤碳平衡的影响, 开展径流小区试验, 以常规耕作(CK)作为对照, 设置等高耕作(CT)、垄向区田(RT)、深松耕(ST)、等高耕作+垄向区田(CR)、等高耕作+深松耕(CS)、垄向区田+深松耕(RS)等6种坡耕地综合治理技术模式, 观测不同水土保持耕作技术下玉米收获后各器官干物质质量和碳含量, 同步监测玉米田土壤碳储量增量、CO₂排放碳量和土壤侵蚀损失碳量, 估算玉米净初级生产力(NPP)和玉米田净土壤碳收支值(NSCB)。结果表明: 玉米植株总固碳量为10 201.93~12 357.34 kg/hm², 各器官固碳量从大到小依次为籽粒、茎鞘、叶、穗轴、根; CT、RT、CR、CS、RS处理NPP显著高于CK处理($P<0.05$), 分别增加20.28%、11.55%、21.68%、16.55%、7.95%, 而ST处理NPP与CK处理之间无显著差异($P>0.05$); 垄向区田、深松耕及其组合模式增加玉米田CO₂排放总量, 等高耕作和等高耕作+垄向区田可以降低CO₂排放总量; CT处理NSCB最高, 为1 402.29 kg/hm², CT、RT、CR、CS处理NSCB显著高于CK处理($P<0.05$), 而ST处理NSCB显著低于CK处理($P<0.05$)。综合来看, 等高耕作治理技术模式最佳, 碳增“汇”潜力最强, 研究结果可为东北黑土区坡耕地保护与治理提供理论参考和技术支撑。

关键词: 玉米田; 碳平衡; 水土保持耕作技术; 黑土; 坡耕地

中图分类号: S511; S14-3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)02-0454-09 OSID: 

Effect of Soil and Water Conservation Tillage on Soil Carbon Balance in Black Soil Maize Fields

ZHANG Zuohe^{1,2} ZHANG Zhongxue² XUE Li² ZHOU Lijun¹ LI Haoyu¹ LÜ Xianglong¹

(1. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The soil erosion is severe in the cultivation of black soil slope farmland along the slope, and the soil organic carbon content is decreasing year by year. Aiming to investigate the effects of different soil and water conservation tillage techniques on soil carbon balance in maize fields on black soil slopes, a runoff plot experiment was conducted. Conventional tillage (CK) was used as a control, and six comprehensive management techniques for slope farmland were set up, including contour tillage (CT), ridge oriented field (RT), deep scarification tillage (ST), contour tillage + ridge oriented field (CR), contour tillage + deep scarification tillage (CS), and ridge oriented field + deep scarification tillage (RS). The dry matter mass and carbon content of various organs of maize harvested under different soil and water conservation tillage techniques were observed, the incremental of soil carbon storage, CO₂ emission carbon, and soil erosion loss carbon in maize fields were synchronously monitored, the net primary productivity (NPP) and net soil carbon income (NSCB) of maize fields were estimated. The results showed that the total carbon sequestration of maize plants was 10 201.93 kg/hm²~12 357.34 kg/hm², and the carbon sequestration of each organ in descending order was as follows: grain, stem sheath, leaf, ear axis, and root. The NPP of CT, RT, CR, CS, and RS treatments was significantly higher than that of CK treatment ($P<0.05$), which was increased by 20.28%, 11.55%, 21.68%,

收稿日期: 2023-12-23 修回日期: 2024-02-21

基金项目: 绥化学院科研启动基金项目(SQ242002)、黑龙江省自然科学基金项目(LH2024E099)和黑龙江省省属高等学校基本科研业务费一般项目(YWF10236230215)

作者简介: 张作合(1988—),男,副教授,东北农业大学博士后,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: zhangzuohe@126.com

通信作者: 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

16.55% , and 7.95% , respectively. However, there was no significant difference between the NPP of ST treatment and CK treatment ($P>0.05$). Ridge oriented field, deep scarification tillage, and their combination mode would increase the total CO₂ emissions of maize fields, while contour tillage and contour tillage + ridge oriented field can reduce the total CO₂ emissions. The CT treatment had the highest NSCB, at 1 402.29 kg/hm². The NSCB of CT, RT, CR, and CS treatments were significantly higher than those of CK treatment ($P<0.05$), while the NSCB of ST treatment were significantly lower than those of CK treatment ($P<0.05$). Overall, the contour tillage management technology model was the best, with the strongest carbon sequestration capacity. The research results can provide theoretical reference and technical support for the protection and management of sloping farmland in the black soil area of Northeast China.

Key words: maize fields; carbon balance; soil and water conservation tillage techniques; black soil; slope farmland

0 引言

东北黑土区是世界四大黑土区之一,总面积1.09 × 10⁶ km²,其中耕地面积约占33%,粮食产量占全国总产量的25%(玉米产量占全国的33%)^[1-2],确保黑土区粮食可持续生产对保障国家粮食安全至关重要。虽然开垦初期土壤比较肥沃,但由于长期秸秆离田、耕作方式不当以及土壤侵蚀等原因导致黑土发生退化,土壤肥力逐年下降^[3-4]。其中土壤侵蚀是造成黑土退化的主要原因之一^[5-8],耕层土壤有机质含量年平均下降速率为0.5%,在侵蚀严重的漫川漫岗黑土区下降速率甚至高达1.35%^[9-10]。因此,亟需开展黑土地保护,稳固东北黑土区在国家粮食安全中“压仓石”的作用。

近年来,水土保持耕作技术对坡耕地玉米田土壤侵蚀的影响已成为研究热点^[11-19]。前人提出了等高耕作、垄向区田、深松耕等水土流失治理技术^[12],并在黑土坡耕地玉米田开展了大量的试验研究。张少良等^[13]研究发现,与顺坡垄作相比,等高耕作可以使东北黑土区中部坡耕地的年径流损失量减少96.8%,泥沙损失量减少99.2%。另外,深松耕可以减小94%的水蚀^[14],垄向区田也可以缓解黑土坡耕地水土流失^[15]。另外,不同水土保持耕作技术对黑土坡耕地土壤有机碳的影响也有相关报道。盖浩等^[16]研究表明,与顺坡垄作相比,横坡垄作可分别减少土壤有机碳及可溶性有机碳损失量99.9%、99.3%。黑土坡耕地应用横坡垄作、垄向区田等水土保持耕作技术能提高土壤有机碳含量18.2%~38.8%^[17]。刘平奇等^[18]研究表明,与常规耕作相比,单独深松处理土壤有机碳平衡表现为碳亏损。张博文等^[19]研究也发现,深松耕技术降低了土壤有机碳含量,土壤碳平衡表现为负平衡。目前,关于不同水土保持耕作技术对黑土有机碳平衡的影响缺乏系统研究,尤其是坡耕地的研究更为复

杂。因此,为厘清不同水土保持耕作技术对黑土坡耕地玉米田土壤碳收支的影响,探寻适合的农田土壤碳平衡评价方法非常必要。

本文通过径流小区试验,观测不同水土保持耕作技术下玉米收获后各器官的干物质量和碳含量,分析玉米植株不同器官的固碳能力;同时考虑玉米生育期内产生的凋落物和根系分泌物碳含量,估算玉米的净初级生产力(NPP)。监测玉米田土壤碳储量增量,明确玉米田土壤呼吸产生CO₂排放的碳量、输入土壤碳量和侵蚀损失碳量,计算玉米田净土壤碳收支值(NSCB),分析不同水土保持耕作技术对黑土坡耕地玉米田(秸秆离田)土壤碳平衡的影响,为东北黑土区坡耕地保护与治理提供理论参考和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022年5—10月,在中国科学院海伦黑土水土保持监测研究站进行。研究站位于黑龙江省海伦市前进镇光荣村(47°37'N,126°84'E),属温带大陆性季风气候,年均气温1~2℃,年降雨量500~600 mm,无霜期130~140 d,大于10℃有效积温2 400~2 500℃,日照时数2 600~2 800 h。位于东北典型黑土区中部,是商品粮核心产区、漫川漫岗水土流失区,平均坡度为2.55°,土壤侵蚀模数大于1 000 t/(km²·a),沟壑密度2.27 km/km²。垦殖率80%,坡耕地占90%以上^[20]。土壤类型为黑土,0~20 cm土壤基础理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验基于等高耕作、垄向区田和深松耕以及组合模式,进行不同水土保持耕作技术的黑土坡耕地玉米田试验研究,以常规耕作(CK)作为对照,选择等高耕作(CT)、垄向区田(RT)、深松耕(ST)、等高耕作+垄向区田(CR)、等高耕作+深松耕(CS)、垄

表 1 0 ~ 20 cm 土壤基础理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of 0 ~ 20 cm soil foundation

参数	pH 值	有机质质量 分数/%	全氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	全磷质量比/ (g·kg ⁻¹)	全钾质量比/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)
数值	6.39	3.67	1.64	0.96	21.10	182.43	51.24	201.62

向区田 + 深松耕 (RS) 等 6 种坡耕地综合治理技术模式, 试验处理设计如表 2 所示, 共设置 7 个处理。图 1 为径流小区布置图, 小区面积 100 m² (20 m × 5 m), 坡度为 7°, 相邻径流小区之间以及边界用钢板隔开, 钢板地下埋深 1 m, 地上高度 0.5 m, 每个小区底部设置一个钢制梯形引水槽, 将降雨产生的径流和泥沙引入 LSB - SL1 型水土流失自动监测系统。当地为雨养农业, 整个生育期不灌水, 种植模式为玉米和大豆轮作。供试玉米品种为“迪卡 1563”,

种植密度为 5.67 × 10⁴ 株/hm², 2022 年 5 月 10 日施基肥, 5 月 14 日播种, 6 月 25 日追拔节肥, 10 月 1 日收获。玉米种植的田间管理及施肥水平与当地保持一致, 氮肥施用量为 250 kg/hm², 磷肥施用量为 90 kg/hm², 钾肥施用量为 120 kg/hm²。氮肥按基肥、拔节肥比例 1:2 分施, 磷肥和钾肥全部作为基肥一次性施入。试验选用尿素 (N 含量为 46.4%)、磷酸二铵 (N 含量为 18%, P₂O₅ 含量为 46%) 和硫酸钾 (K₂O 含量为 58%) 作为肥料。

表 2 田间小区试验处理设计

Tab. 2 Treatment design of field plot experiment

处理	处理名称	处理方式
CT	等高耕作	旋耕 + 等高线起垄, 旋耕深度 12 ~ 16 cm
RT	垄向区田	旋耕 + 顺坡起垄 + 筑挡, 旋耕深度 12 ~ 16 cm, 于 6 月末玉米追肥后进行筑挡, 挡距约 75 cm
ST	深松耕	深松 + 旋耕 + 顺坡起垄, 深松深度 35 ~ 45 cm, 旋耕深度 12 ~ 16 cm
CR	等高耕作 + 垄向区田	旋耕 + 等高线起垄 + 筑挡, 旋耕深度 12 ~ 16 cm, 于 6 月末玉米追肥后进行筑挡, 挡距约 75 cm
CS	等高耕作 + 深松耕	深松 + 旋耕 + 等高线起垄, 深松深度 35 ~ 45 cm, 旋耕深度 12 ~ 16 cm
RS	垄向区田 + 深松耕	深松 + 旋耕 + 顺坡起垄 + 筑挡, 深松深度 35 ~ 45 cm, 旋耕深度 12 ~ 16 cm, 于 6 月末玉米追肥后进行筑挡, 挡距约 75 cm
CK	常规耕作	旋耕 + 顺坡起垄, 旋耕深度 12 ~ 16 cm

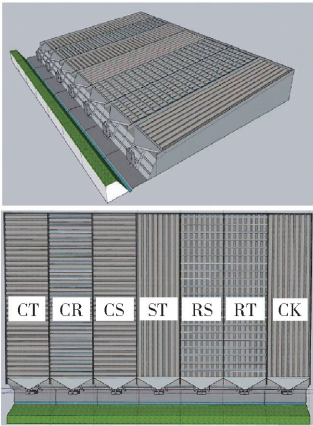


图 1 径流小区布置图

Fig. 1 Layout plan of runoff community

1.3 径流泥沙及侵蚀碳损失

LSB - SL1 型水土流失自动监测系统由泥沙量数据监测仪、泥沙量检测传感器组成。泥沙量检测传感器由地表流量传感器组件自动测量地表流量, 得到径流流量的实时变化过程, 根据径流变化特征, 在径流垂直分布泥沙测量口, 实时测量径流含沙量。整个生育期同步收集每次径流产生的泥沙样本和水样, 用于测定侵蚀碳损失 (有机碳含量)。

1.4 玉米净初级生产力计算

用干燥法测定玉米植株根、叶、茎鞘、穗轴、籽粒等部位的干物质量, 并用总有机碳分析仪测定玉米植株各部位碳含量。

玉米净初级生产力 (NPP) 按文献 [21] 方法计算, 计算式为

$$NPP = NPP_r + NPP_s + NPP_l + NPP_c + NPP_g + NPP_{lf} + NPP_{rd} \tag{1}$$

式中 NPP ——玉米净初级生产力, kg/hm²
 NPP_r ——玉米根净初级生产力, kg/hm²
 NPP_s ——玉米茎鞘净初级生产力, kg/hm²
 NPP_l ——玉米叶 (包括叶片和苞叶) 净初级生产力, kg/hm²
 NPP_c ——玉米穗轴净初级生产力, kg/hm²
 NPP_g ——玉米籽粒净初级生产力, kg/hm²
 NPP_{lf} ——玉米生育期内凋落物净初级生产力 (按玉米总固碳量的 5% 进行估算^[22]), kg/hm²
 NPP_{rd} ——玉米生育期内根系分泌物净初级生产力 (玉米的根系分泌物进入土壤的碳量相当于收获时期根系的总碳量^[23]), kg/hm²

1.5 CO₂和CH₄排放通量及总量

用静态暗箱-气象色谱法定位观测CO₂和CH₄排放通量。静态箱由箱体和不锈钢底座组成,箱体由透明有机玻璃(厚5 mm)制成,箱体规格(长×宽×高)60 cm×30 cm×40 cm。底座顶端设置宽20 mm、深50 mm的密封槽,采气时用水密封箱体。采气管从侧面插入箱内20 cm,末端与三通阀连接,三通阀连接注射器(60 mL)和采气袋。箱体外层用锡纸覆盖,以减少太阳辐射所导致的箱内CO₂、CH₄的温度变化。在径流小区坡顶部、中部和底部各随机布置1个采样点,每个采样点分别在第0、10、20、30分钟采集1次样品,前后连续抽取气体的2个气袋作为一个气体样品,采样同时记录田面水层深度、箱内温度、地温和气温。玉米生长期内采样时间间隔为7 d,每天09:00—11:00进行采样。注意CO₂和CH₄气体样品袋送回实验室过程中不要挤压,用气相色谱仪检测CO₂、CH₄浓度。

CO₂或CH₄排放通量计算式^[24]为

$$F=\rho h\frac{dc}{dt}\frac{273}{273+T}\frac{P}{P_0}\tag{2}$$

式中 F ——CO₂或CH₄排放通量,mg/(m²·h)
 ρ ——标准状态下CO₂密度(1.997 kg/m³)、CH₄密度(0.717 kg/m³)
 h ——箱体有效高度,m
 dc/dt ——箱内CO₂或CH₄浓度变化率,mL/(m³·h)
 T ——箱内平均温度,℃
 P_0 ——标准大气压
 P ——箱内气压,取 $P=P_0$

CO₂、CH₄排放总量计算式^[25]为

$$E_c=0.01\times24\times\left[\frac{F_1+F_n}{2}+\sum_{i=1}^n\frac{F_i+F_{i+1}}{2}(t_{i+1}-t_i)\right]\tag{3}$$

式中 E_c ——CO₂或CH₄排放总量,kg/hm²
 n ——生育期观测次数
 F_i 、 F_{i+1} ——第*i*、*i*+1次采样时CO₂或CH₄排放通量,mg/(m²·h)
 $t_{i+1}-t_i$ ——第*i*次到第*i*+1次采样时间间隔,d

1.6 玉米田土壤碳储量增量

玉米田土壤碳储量增量计算式^[26]为

$$\Delta SOC=100HB_D(SOC_h-SOC_0)\tag{4}$$

式中 ΔSOC ——玉米田土壤碳储量增量,kg/hm²
 H ——土层厚度,取20 cm
 B_D ——表层土壤容重,g/cm³

SOC_h ——玉米收获时SOC含量(质量比),g/kg
 SOC_0 ——玉米播种时SOC含量(质量比),g/kg

1.7 净土壤碳收支值计算

输入土壤碳量 NPP_i 为

$$NPP_i=NPP_r+NPP_{lf}+NPP_{rd}\tag{5}$$

为明确土壤-作物系统中有机碳的损益情况,引入净土壤碳收支值(NSCB),它是碳进出土壤边界差值,可以间接估算土壤固碳水平^[27],当秸秆全部离田时,黑土坡耕地NSCB计算公式为

$NSCB=NPP_i+\Delta SOC-C_{sr}-C_{CH_4}-C_{el}\tag{6}$

式中 $NSCB$ ——玉米田净土壤碳收支值,正值表示净碳吸收,负值表示碳损失,kg/hm²

C_{sr} ——玉米田土壤呼吸碳排放量(12/44乘CO₂排放总量),kg/hm²
 C_{CH_4} ——CH₄碳排放量(12/16乘CH₄排放总量),由于数值非常小,本研究中忽略不计,kg/hm²
 C_{el} ——侵蚀损失碳量,5°~7°坡耕地需要考虑,kg/hm²

1.8 气象数据

由自动气象站(DZZ2型)自动记录,生育期内气温及降雨量日变化如图2所示。

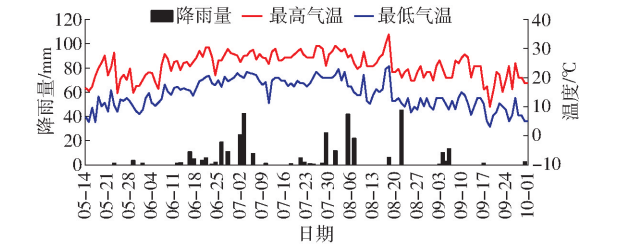


图2 玉米生长期气温和降雨量日变化
Fig. 2 Daily variation of temperature and rainfall during maize growth period

2 结果与分析

2.1 玉米植株各器官干物质质量及碳含量

不同水土保持耕作技术下玉米收获时各器官干物质质量及碳含量见图3(图中不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同)。玉米收获后植株各器官干物质质量从大到小依次为籽粒、茎鞘、叶、穗轴、根;CT、CR、CS处理植株根干物质质量显著高于CK处理($P<0.05$);CT、RT、CR、CS、RS处理植株茎鞘干物质质量显著高于CK处理($P<0.05$);CT、RT、CR、CS处理植株叶干物质质量显著高于CK处理($P<0.05$);CT、RT、CR、CS、RS处理植株穗轴干物质质量显著高于CK处理($P<0.05$);CT、RT、CR、CS、

RS 处理植株籽粒干物质量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。观察不同水土保持耕作技术下玉米收获时各器官碳含量变化规律,发现各器官中籽粒含碳量最高,其他器官含碳量在 45% 左右;CT、RT、CR、CS 处理植株根碳含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$);CT、RT、ST、CR、CS、RS 处理植株茎鞘和叶碳含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$);CT、RT、ST、CR、CS、RS 处理植株穗轴碳含量与 CK 处理之间无显著差异 ($P > 0.05$);CT、RT、ST、CR、CS、RS 处理植株籽粒碳含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。

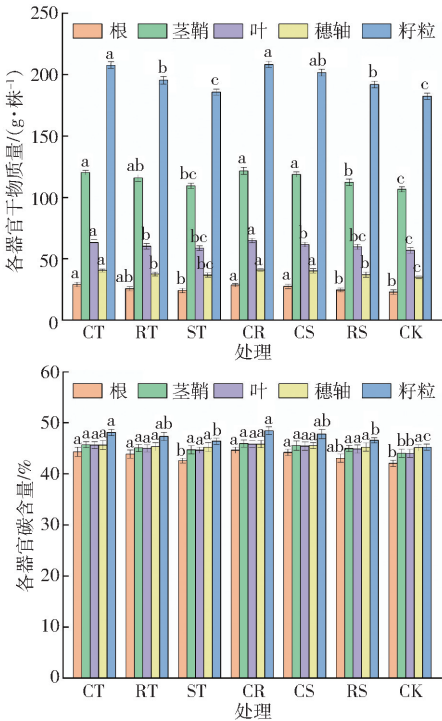


图3 玉米植株各器官的干物质量及碳含量

Fig.3 Dry matter mass and carbon content of different organs in maize plants

2.2 玉米植株固碳量和 NPP

图4 为不同水土保持耕作技术下玉米收获后植株固碳量,玉米植株总固碳量为 10 201.93 ~ 12 357.34 kg/hm²。单项水土保持耕作技术 CT、RT、ST 处理植株总固碳量较 CK 处理分别增加 19.57%、11.26%、4.62%,其中 CT 处理植株总固碳量最大,为 12 198.26 kg/hm²。组合水土保持耕作技术 CR、CS、RS 处理植株总固碳量较 CK 处理分别增加 21.13%、16.05%、7.85%,其中 CR 处理玉米植株总固碳量最大,为 12 357.34 kg/hm²。玉米收获后植株各器官固碳量从大到小依次为籽粒、茎鞘、叶、穗轴、根,分别约占玉米植株总固碳量的 46%、26%、14%、9% 和 5%。这说明等高耕作、垄向区田、深松耕及组合模式等水土保持耕作技术均可以提高玉米植株总固碳量,其中 CT、RT、CR、CS、RS 处

理植株总固碳量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。

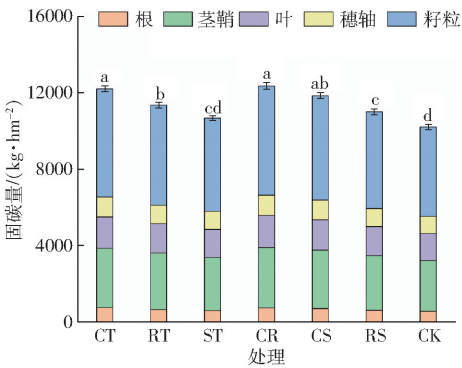


图4 玉米植株总固碳量及各器官固碳量

Fig.4 Total carbon sequestration of maize plants and carbon sequestration of various organs

表3 为不同水土保持耕作技术下玉米的 NPP , 包括植株固碳量和生育期内凋落物、根系分泌物所含碳量。水土保持耕作技术会影响玉米净初级生产力, NPP 在 11 257.09 ~ 13 697.49 kg/hm² 范围内变化,其中 NPP_g 在 NPP 中所占比例最高。CT、RT、CR、CS、RS 处理 NPP 显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 分别增加 20.28%、11.55%、21.68%、16.55%、7.95%, 而 ST 处理的 NPP 与 CK 处理之间无显著差异 ($P > 0.05$)。

表3 玉米净初级生产力

Tab.3 Net primary productivity of maize

处理	kg/hm ²		
	NPP_g	NPP_{rd}	NPP
CT	609.91 ^a	731.77 ^a	13 539.94 ^a
RT	567.51 ^{ab}	639.02 ^b	12 556.72 ^b
ST	533.66 ^b	583.67 ^b	11 790.60 ^{bc}
CR	617.87 ^a	722.28 ^a	13 697.49 ^a
CS	591.99 ^a	688.84 ^a	13 120.61 ^{ab}
RS	550.13 ^{ab}	599.63 ^b	12 152.40 ^b
CK	510.10 ^b	545.06 ^c	11 257.09 ^c

注:同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

2.3 玉米田 CO₂排放通量及排放总量

图5 为不同水土保持耕作技术下玉米田 CO₂排放通量。不同水土保持耕作技术的 CO₂排放均出现 2 次峰值,播种和收获时 CO₂排放通量较低。在玉米播种后第 50 天(7 月 2 日),玉米田 CO₂排放出现第 1 个峰值,其中 ST 处理 CO₂排放通量最大(403.15 mg/(m²·h));RT、ST、CR、CS、RS 处理 CO₂排放通量较 CK 处理分别增加 11.26%、93.69%、12.50%、13.43%、63.72%,CT 处理 CO₂排放通量较 CK 处理降低 16.26%。在玉米播种后第 71 天(7 月 23 日),玉米田 CO₂排放出现第 2 个峰值,其中 ST 处理 CO₂排放通量最大(654.26 mg/(m²·h));

RT、ST、CS、RS 处理 CO₂ 排放通量较 CK 处理分别增加 12.80%、164.17%、27.69%、94.85%，CT、CR 处理 CO₂ 排放通量较 CK 处理分别降低 26.16%、13.59%。可以发现，水土保持耕作技术中垄向区田、深松耕及其与垄向区田组合模式会增加玉米田土壤呼吸的 CO₂ 排放通量。

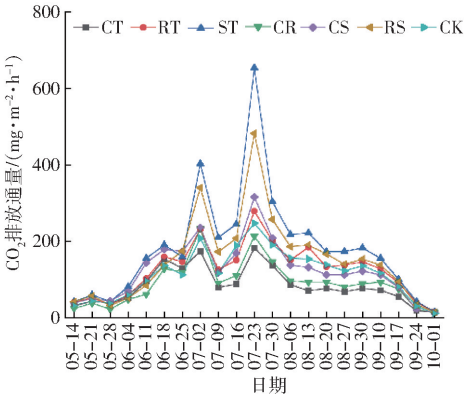


图5 玉米田 CO₂ 排放通量变化曲线

Fig. 5 CO₂ emission flux in maize fields

图 6 为不同水土保持耕作技术下玉米田 CO₂ 排放总量，从播种到 6 月底各处理 CO₂ 累积排放量无明显差异，从 7 月初开始出现明显差异。ST 处理 CO₂ 排放总量最大，为 6400.35 kg/hm²，CT 处理 CO₂ 排放总量最小，为 2907.26 kg/hm²；RT、ST、CS、RS 处理 CO₂ 排放总量较 CK 处理分别增加 20.22%、76.67%、19.32%、45.67%，CT、CR 处理 CO₂ 排放总量较 CK 处理分别降低 19.75%、12.52%。综合看来，水土保持耕作技术中垄向区田、深松耕及其组合模式会增加玉米田 CO₂ 排放总量，等高耕作和等高耕作 + 垄向区田均可以降低 CO₂ 排放总量，且作用效果最明显。

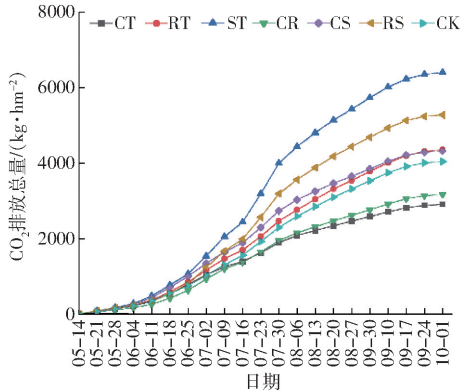


图6 玉米田 CO₂ 排放总量变化曲线

Fig. 6 Total CO₂ emissions from maize fields

2.4 玉米田净土壤碳收支值

表 4 为不同水土保持耕作技术下玉米田净土壤碳收支值，主要受土壤碳输入和碳损失的影响。土壤总碳损失包括土壤呼吸的碳排放量和侵蚀损失碳量，其中土壤呼吸产生 CO₂ 排放导致的碳损失占

75.29% ~ 94.77%，侵蚀损失碳量占 5.23% ~ 24.71%，这说明玉米收获时碳损失的主要途径是 CO₂ 排放。玉米田净土壤碳收支值中 CT、RT、CR、CS 处理为正值，其中 CT 处理 NSCB 最高，为 1402.29 kg/hm²；ST、RS、CK 处理为负值，其中 ST 处理 NSCB 最低，为 -682.96 kg/hm²。CT、RT、CR、CS 处理玉米田净土壤碳收支值显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)，而 ST 处理净土壤碳收支值显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$)。综合来看，应用适宜的水土保持耕作技术可以将坡耕地玉米田由碳“源”转变为碳“汇”。

表 4 玉米田净土壤碳收支值

Tab. 4 Net soil carbon budget of maize field ecosystem

kg/hm ²					
处理	<i>NPP_i</i>	ΔSOC	<i>C_{sr}</i>	<i>C_{el}</i>	NSCB
CT	2 073.45 ^a	165.48 ^a	792.89 ^c	43.75 ^c	1 402.29 ^a
RT	1 845.55 ^b	-127.45 ^b	1 187.77 ^b	213.14 ^b	317.19 ^b
ST	1 701.00 ^{bc}	-357.43 ^c	1 745.55 ^a	280.98 ^a	-682.96 ^d
CR	2 062.43 ^a	54.49 ^{ab}	864.37 ^c	62.35 ^c	1 190.20 ^a
CS	1 969.67 ^{ab}	-114.84 ^b	1 178.88 ^b	191.31 ^{bc}	484.64 ^b
RS	1 749.39 ^{bc}	-144.85 ^b	1 439.29 ^{ab}	234.51 ^b	-69.26 ^c
CK	1 600.22 ^c	-286.57 ^c	1 102.43 ^b	361.76 ^a	-150.54 ^c

3 讨论

土壤有机碳碳库对大气 CO₂ 变化及全球碳平衡起着至关重要的作用^[28]。土壤有机碳是土壤肥力的物质基础，作为土壤质量的重要评价指标，它不仅是植物养分的重要来源，且与 N、P 营养元素循环和转化密切相关，同时也会影响土壤结构和含水率^[29]。东北黑土区土壤有机碳储量 (1.26 × 10¹⁰ t) 占我国总碳储量的 13% 以上^[30]，但近些年，东北黑土区坡耕地土壤侵蚀加剧，导致土壤有机碳含量降低^[31]。据统计，水土流失使黑土区土壤有机碳每年以速度 0.1% 减少^[32]，土壤 N、P、K 等营养元素大量流失，造成土壤板结和作物减产^[33]，严重威胁了农业发展和粮食安全。因此，亟需探索不同水土保持耕作技术对黑土坡耕地玉米田土壤碳平衡的影响。

近年来，学者利用直接测量、土壤碳排放效率 (CEE) 和净生态系统生产力 (NEP) 等方法对农田土壤碳收支情况进行评价^[34-36]。直接测量法虽然可以直接测量土壤中有机碳含量，但也存在较大缺陷，无法准确地观测土壤碳交换的季节变化与年际变化^[34]；CEE 是评价不同种植模式固碳效应的指标，存在对土壤固碳效果估算不足的缺点^[35]；NEP 评价法在一定程度上弥补了 CEE 估算的不足，但计算时未考虑离田碳量、人工输入碳量

和土壤径流(侵蚀)损失碳量,造成了计算结果整体偏高^[36]。而 NSCB 是一种评价短时间内农田土壤碳收支的方法,可以直观看出土壤碳的季节或年际变化规律,与上述方法相比,NSCB 考虑更全面、评价结果更可靠。因此,本研究基于 NSCB 评价方法进行不同水土保持耕作技术对黑土坡耕地玉米田土壤碳收支的影响。

农田土壤碳平衡的影响因素较为复杂,受气候、土壤等自然因素和种植作物、灌溉施肥、耕作方式等农田管理措施的影响^[37]。一般来说,坡耕地玉米田的碳平衡是由碳输入和输出决定的。在秸秆离田情况下,碳输入仅有玉米生育期内的凋落物、根系及分泌物,而碳输出包括气体碳排放和侵蚀损失碳量。与等高耕作和等高耕作+垄向区田相比,常规顺坡垄作增加了地表径流,使泥沙侵蚀加剧,增加土壤有机碳流失量^[38];另外,土壤侵蚀导致的养分和水分流失抑制了玉米生长,使生育期内的凋落物、根系及分泌物等碳输入量减少。土壤侵蚀除了直接引起坡耕地土壤有机碳流失外,其引起的土壤结构破坏也会间接加快土壤有机碳分解、矿化,使土壤中的碳以 CO₂ 形式排放,导致土壤有机碳含量减少。与等高耕作相比,深松耕使土壤剧烈扰动,破坏了土壤团粒结构,改变了土壤通气性,促进有机质分解,增强土壤有机碳矿化速率,进而影响土壤呼吸速率,导致 CO₂ 排放激增^[39]。等高耕作可以减少地表径流量和

土壤流失量,提高稳定入渗率^[40],同时也可以减少团聚体结构破坏率,改善土壤结构,增强抵抗土壤侵蚀的能力,有利于有机碳的固持^[41]。而垄向区田用长期受土壤侵蚀的土壤(结块)进行筑挡导致水土流失治理效果较差。本研究中等高耕作和等高耕作+垄向区田技术可以通过减少碳排放和侵蚀损失碳量实现黑土坡耕地玉米田由碳“源”向碳“汇”转变。综合来看,水土保持耕作技术与有机肥(生物炭)施用、秸秆还田等固碳技术联合使用可能是未来研究发展的重要方向^[42-43],应进一步评估其土壤固碳效果和碳“汇”能力,从而挖掘农田土壤碳“汇”潜力。

4 结束语

水土保持耕作技术对黑土坡耕地玉米田土壤碳平衡的影响,除了改变土壤侵蚀直接引起的有机碳流失外,还可以通过改变植株固碳和气体排放碳损失影响碳收支。其中,CT、RT、CR、CS、RS 处理 NPP 显著高于 CK 处理($P < 0.05$),分别增加 20.28%、11.55%、21.68%、16.55%、7.95%,而 ST 处理 NPP 与 CK 处理之间无显著差异($P > 0.05$)。垄向区田、深松耕及其组合模式增加了玉米田 CO₂ 排放总量,等高耕作和等高耕作+垄向区田降低了 CO₂ 排放总量。综合来看,等高耕作治理技术模式最佳,技术简单,碳增“汇”潜力最强,研究结果可为东北黑土区坡耕地保护与治理提供理论参考和技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 韩晓增,邹文秀.东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J].土壤学报,2021,58(6):1341-1358.
HAN Xiaozeng,ZOU Wenxiu. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica,2021,58(6):1341-1358. (in Chinese)
- [2] 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):1203-1215.
AO Man,ZHANG Xudong,GUAN Yixin. Research and practice of conservation tillage in black soil region of Northeast China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2021,36(10):1203-1215. (in Chinese)
- [3] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.肥沃耕层构建对东北黑土区旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4134-4146.
ZOU Wenxiu,HAN Xiaozeng,LU Xinchun,et al. Effects of the construction of fertile and cultivated upland soil layer on soil fertility and maize yield in black soil region in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(12):4134-4146. (in Chinese)
- [4] 翟国庆,韩明钊,李永江,等.黑土坡耕地有机碳变化及固碳潜力分析[J].生态学报,2020,40(16):5751-5760.
ZHAI Guoqing,HAN Mingzhao,LI Yongjiang,et al. Organic carbon change and carbon sequestration potential of sloping farmland in the black soil area[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(16):5751-5760. (in Chinese)
- [5] 何彦星,张凤宝,杨明义.¹³⁷Cs 示踪分析东北黑土坡耕地土壤侵蚀对有机碳组分的影响[J].农业工程学报,2021,37(14):60-68.
HE Yanxing,ZHANG Fengbao,YANG Mingyi. Effects of soil erosion on organic carbon fractions in black soils in sloping farmland of Northeast China by using ¹³⁷Cs tracer measurements [J]. Transactions of the CSAE,2021,37(14):60-68. (in Chinese)
- [6] 张兴义,刘晓冰,赵军.黑土利用与保护[M].北京:科学出版社,2018.
- [7] 张兴义,刘晓冰.中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J].水土保持通报,2020,40(4):340-344.
ZHANG Xingyi,LIU Xiaobing. Key issues of Mollisols research and soil erosion in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(4):340-344. (in Chinese)
- [8] 朱勇,李建业,张程远,等.长期保护性耕作对坡耕地黑土有机碳组分的影响[J].农业工程学报,2023,39(10):103-111.
ZHU Yong,LI Jianye,ZHANG Chengyuan,et al. Effects of long-term conservation tillage on black soil organic carbon components in sloping farmland[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(10):103-111. (in Chinese)

- [9] 张兴义,隋跃宇,宋春雨. 农田黑土退化过程[J]. 土壤与作物,2013,2(1):1-6.
ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, SONG Chunyu. Degradation process of arable Mollisols[J]. Soil and Crop,2013,2(1):1-6. (in Chinese)
- [10] 张兴义,刘晓冰. 东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J]. 农业工程学报,2021,37(3):320-326.
ZHANG Xingyi, LIU Xiaobing. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of Northeast China [J]. Transactions of the CSAE,2021,37(3):320-326. (in Chinese)
- [11] 周永杰,谢军红,李玲玲,等. 长期少免耕与氮肥减量对全膜双垄沟播玉米产量及碳排放的调控作用[J]. 中国农业科学,2021,54(23):5054-5067.
ZHOU Yongjie, XIE Junhong, LI Lingling, et al. Effects of long-term reduce/zero tillage and nitrogen fertilizer reducing on maize yield and soil carbon emission under fully plastic mulched ridge-furrow planting system[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(23):5054-5067. (in Chinese)
- [12] 中国科学院林业土壤研究所. 中国东北土壤[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [13] 张少良,张兴义,刘晓冰,等. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J]. 水土保持学报,2009,23(3):11-15.
ZHANG Shaoliang, ZHANG Xingyi, LIU Xiaobing, et al. Tillage effect on soil erosion in typical black soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(3):11-15. (in Chinese)
- [14] 谢军. 黑龙江省中部地区土壤侵蚀状况及其治理[J]. 土壤,1990,22(3):128-132.
- [15] 赵雨森,魏永霞. 坡耕地保护性耕作措施的水土保持效应[J]. 中国水土保持科学,2009,7(3):86-90.
ZHAO Yusen, WEI Yongxia. Soil and water conservation effects of protective tillage measures on sloping farmland[J]. Science of Soil and Water Conservation,2009,7(3):86-90. (in Chinese)
- [16] 盖浩,刘平奇,张梦璇,等. 黑土坡耕地横坡垄作对减少径流及土壤有机碳流失的作用[J]. 水土保持学报,2022,36(2):300-304,311.
GAI Hao, LIU Pingqi, ZHANG Mengxuan, et al. Effects of ridge planting on reducing runoff and soil organic carbon loss in black soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(2):300-304,311. (in Chinese)
- [17] 赵赛东. 不同水土保持措施对黑土坡耕地土壤侵蚀及肥力的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
ZHAO Saidong. The effect of soil and water conservation measures on soil erosion and fertility under black soil sloping farmland [D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2015. (in Chinese)
- [18] 刘平奇,张梦璇,王立刚,等. 深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(5):1150-1160.
LIU Pingqi, ZHANG Mengxuan, WANG Ligang, et al. Effects of subsoiling and straw return on soil respiration and soil organic carbon balance in black soil of Northeast China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2020,39(5):1150-1160. (in Chinese)
- [19] 张博文,杨彦明,张兴隆,等. 连续深松对黑土结构特性和有机碳及碳库指数影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(2):12-19.
ZHANG Bowen, YANG Yanming, ZHANG Xinglong, et al. Effects of continuous deep loosening on soil physical characteristics, organic carbon content and carbon pool index in black soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2019(2):12-19. (in Chinese)
- [20] 张忠学,尹致皓,余佩哲,等. 黑土区坡耕地水土保持耕作措施对土壤理化性状的影响[J]. 农业机械学报,2024,55(1):282-293.
ZHANG Zhongxue, YIN Zhihao, YU Peizhe, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil physical and chemical properties in slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):282-293. (in Chinese)
- [21] 张忠学,薛里,李铁成,等. 水氮耦合下黑土区稻田生态系统碳源汇效应分析[J]. 农业机械学报,2023,54(8):330-338.
ZHANG Zhongxue, XUE Li, LI Tiecheng, et al. Effect of water and nitrogen coupling on carbon source and sink of paddy ecosystem in black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):330-338. (in Chinese)
- [22] 田少阳. 玉稻系统温室气体排放及土壤碳收支研究[D]. 武汉:华中农业大学,2015.
TIAN Shaoyang. Study on greenhouse gases emissions and soil carbon budget in maize and rice rotation field[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2015. (in Chinese)
- [23] BOLINDER M A, ANGERS D A, GIROUX M, et al. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.) [J]. Plant Soil,1999,215:85-91.
- [24] 张作合. 黑土稻田施加生物炭对水氮利用及温室气体排放的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.
ZHANG Zuohe. Effects of biochar application on water and nitrogen utilization and greenhouse gas emissions in black soil paddy fields[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [25] 张作合,李铁成,张忠学,等. 水炭运筹下稻田痕量温室气体排放与水氮利用关系研究[J]. 农业机械学报,2022,53(8):379-387.
ZHANG Zuohe, LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, et al. Relationship between trace greenhouse gas emission and water and nitrogen utilization under water biochar management in paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):379-387. (in Chinese)
- [26] 李娇,田冬,黄容,等. 秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响[J]. 环境科学,2018,39(9):4338-4347.
LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, et al. Effects of straw and biochar addition on soil carbon balance and ecological benefits in a rape-maize rotation planting system[J]. Environmental Science,2018,39(9):4338-4347. (in Chinese)
- [27] 张忠学,余佩哲,杜思澄,等. 不同水氮管理模式黑土稻田碳固定与碳减排效应分析[J]. 农业机械学报,2023,54(4):

366–375.

ZHANG Zhongxue, YU Peizhe, DU Sicheng, et al. Carbon fixation and carbon emission reduction effects of different water and nitrogen management modes in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 366–375. (in Chinese)

- [28] 胡岗, 秦松, 范成五, 等. 3 种不同管理措施黄壤坡耕地的有机碳与氮养分[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2630–2636.
HU Gang, QIN Song, FAN Chengwu, et al. Organic carbon and nitrogen nutrients in yellow soil of slope cropland under three different management measures[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(6): 2630–2636. (in Chinese)

- [29] 周成虎, 周启鸣, 王绍强, 等. 中国土壤有机碳库空间分布的分析与估算[J]. AMBIO—人类环境杂志, 2003, 32(1): 6–12, 82.

ZHOU Chenghu, ZHOU Qiming, WANG Shaoqiang, et al. Estimating and analyzing the spatial distribution of soil organic carbon in China[J]. AMBIO—A Journal of the Human Environment, 2003, 32(1): 6–12, 82. (in Chinese)

- [30] 刘平奇. 不同耕作措施下东北黑土平/坡耕地有机碳平衡及影响因素研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.

LIU Pingqi. Study on organic carbon balance and influencing factors of flat/sloping farmlands with different tillage measures in black soil region of Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)

- [31] 霍军力, 王永成, 董斌. 东北黑土区坡耕地地表径流的影响因素分析——兼谈水土流失对策[J]. 黑龙江水利科技, 2008(5): 93–94.

- [32] 杨亚娟. 谈谈东北黑土区坡耕地水土流失综合治理[J]. 山西水土保持科技, 2012(3): 1–3.

- [33] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 等. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 301–308.

ZHNG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 301–308. (in Chinese)

- [34] ZHENG Xunhua, XIE Baohua, LIU Chunyan, et al. Quantifying net ecosystem carbon dioxide exchange of a short-plant cropland with intermittent chamber measurements[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2008, 22(3): 1–13.

- [35] 于爱忠, 柴强, 殷文, 等. 玉米农田土壤碳排放及碳平衡对地膜覆盖方式及种植行距的响应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(19): 3726–3735.

YU Aizhong, CHAI Qiang, YIN Wen, et al. Responses of soil carbon emission and carbon balance of maize field to plastic film mulching pattern and row space[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(19): 3726–3735. (in Chinese)

- [36] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 18–24.

LI Yinkun, CHEN Minpeng, XIA Xu, et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(1): 18–24. (in Chinese)

- [37] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对黄壤有机碳平衡及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1275–1285.

ZHANG Yarong, LI Yu, LIU Yanling, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon balance and maize yield in yellow soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1275–1285. (in Chinese)

- [38] 赵鹏志, 陈祥伟, 王恩姮. 黑土坡耕地有机碳及其组分累积—损耗格局对耕作侵蚀与水蚀的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3634–3642.

ZHAO Pengzhi, CHEN Xiangwei, WANG Enheng. Responses of accumulation–loss patterns for soil organic carbon and its fractions to tillage and water erosion in black soil area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3634–3642. (in Chinese)

- [39] 张俊丽, SIKANDER Khan Tanveer, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 192–199.

ZHANG Junli, SIKANDER Khan Tanveer, WEN Xiaoxia, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18): 192–199. (in Chinese)

- [40] 齐智娟, 张忠学, 杨爱峥. 黑土坡耕地不同水土保持措施的土壤水蚀特征研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 89–92, 97.

QI Zhijuan, ZHANG Zhongxue, YANG Aizheng. Characteristics of soil erosion by water under different soil and water conservation measures on sloping farmland of black soils[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 89–92, 97. (in Chinese)

- [41] 张怡, 何丙辉, 王仁新, 等. 横坡和顺坡耕作对紫色土土壤团聚体稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 192–198.

ZHANG Yi, HE Binghui, WANG Renxin, et al. Effects of across- and along-slope ploughs on soil aggregate stability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(2): 192–198. (in Chinese)

- [42] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9405–9416.

ZHAO Mingyue, LIU Yuanxin, ZHANG Xueyan. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9405–9416. (in Chinese)

- [43] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 349–359.

HUO Lili, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 349–359. (in Chinese)