

不同水土保持耕作措施对黑土坡耕地 产流产沙的影响机制

梁欣平¹, 肖洋¹, 王倡宪¹, 王艳¹, 何美芳¹, 王贝瑶¹, 徐金忠²

(1. 黑龙江大学 现代农业与生态环境学院, 黑龙江
哈尔滨 150080; 2. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: [目的] 探究在天然降雨条件下不同水土保持耕作措施对黑土区坡耕地产流产沙的影响机制, 为东北黑土区水土流失的防控和治理提供科学依据和技术支撑。[方法] 选取黑龙江省典型黑土区坡耕地为研究对象, 布设径流小区, 以传统顺坡垄作为对照, 分析横坡垄作、横坡垄作+植物篱、秸秆还田和垄作区田 4 种水土保持耕作措施下的产流和产沙特征, 探究不同水土保持耕作措施的减流减沙规律。[结果] ①横坡垄作+植物篱、横坡垄作、秸秆还田和垄作区田 4 种水土保持耕作措施均能减少坡耕地产流量和产沙量, 与顺坡垄作相比, 产流量分别减少 74%, 67%, 29% 和 64%, 产沙量分别减少 88%, 87%, 67% 和 66%。②横坡垄作+植物篱措施减流率和减沙率最为显著($p < 0.05$)。③横坡垄作+植物篱措施下坡耕地产生径流和泥沙持续时间最短。④坡耕地产生径流量与泥沙量呈显著正相关($p < 0.01$)。[结论] 横坡垄作+植物篱措施能显著增大减流率和减沙率, 建议在该地区推广应用。

关键词: 耕作措施; 东北黑土区; 坡耕地; 水土保持

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0033-08

中图分类号: S157.1, S157.2

文献参数: 梁欣平, 肖洋, 王倡宪, 等. 不同水土保持耕作措施对黑土坡耕地产流产沙的影响机制[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 33-40. Liang Xinping, Xiao Yang, Wang Changxian, et al. Influencing mechanisms of different soil and water conservation tillage measures on runoff and sediment yield of slope cropland in black soil region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 33-40.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.016

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.016

Influencing mechanisms of different soil and water conservation tillage measures on runoff and sediment yield of slope cropland in black soil region

Liang Xinping¹, Xiao Yang¹, Wang Changxian¹, Wang Yan¹, He Meifang¹, Wang Beiyao¹, Xu Jinzhong²

(1. College of Advanced Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract: [Objective] The influencing mechanisms of different soil and water conservation tillage measures on runoff and sediment yield of slope cropland in the black soil region under natural rainfall conditions were analyzed, in order to provide a scientific basis and technical support for the prevention, control, and management of soil erosion in the black soil region in northeast China. [Methods] Typical slope cropland in the black soil region of Heilongjiang Province was selected as the research object. Runoff plots were established, with traditional downslope ridging as the control. The characteristics of runoff and sediment yield under four soil and water conservation tillage measures-cross-slope ridging, cross-slope ridging + plant hedges, straw return to the field, and ridge field-were analyzed to investigate the patterns of runoff and sediment reduction under different soil and water conservation tillage measures. [Results] ① All four soil and water conservation tillage measures-cross-slope ridging + plant hedges, cross-slope ridging, straw return to the field, and ridge field-could reduce the runoff and sediment yield of slope cropland. Compared with downslope ridging, runoff decreased by 74%, 67%,

收稿日期: 2025-06-12

修回日期: 2025-08-01

采用日期: 2025-08-01

资助项目: 国家重点研发计划项目子课题“黑土区农田水土流失防治保护性利用模式与应用”(2021YFD150080503); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2020D026)

第一作者: 梁欣平(2000—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与农业资源。Email: 2500715239@qq.com。

通信作者: 肖洋(1978—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事水土保持与农业资源方面的研究。Email: xiaoyang@hlju.edu.cn。

29%, and 64%, respectively, and sediment yield decreased by 88%, 87%, 67%, and 66%, respectively. ② The measures of cross-slope ridging + plant hedges showed the most significant rates of runoff and sediment reduction ($p < 0.05$). ③ The duration of runoff and sediment yield from the slope cropland under the cross-slope ridging + plant hedge measure was the shortest. ④ The runoff volume and sediment yield from the slope cropland showed a significant positive correlation ($p < 0.01$). [Conclusion] The cross-slope ridging plant hedge measure demonstrates significant runoff and sediment reduction rates, and it is recommended for wider application in this region.

Keywords: tillage measures; black soil region in northeast China; slope cropland; soil and water conservation

黑土作为地表稀缺性土壤类型,在全球呈区域性集聚特征,主要分布于中国东北平原、南美潘帕斯草原、北美密西西比流域及东欧乌克兰平原等4大板块^[1]。统计数据显示,这类特殊土壤仅占全球陆地面积的6.8%,具有显著的地域局限性^[2]。中国东北地区现存典型黑土耕地面积约 $1.85 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全球黑土总量的12%,其中黑龙江省以 $1.04 \times 10^{11} \text{ m}^2$ 占比达56%,是中国重要商品粮基地的核心土壤资源^[3]。该土壤类型的形成过程极为缓慢^[4-5],平均1 cm土层需历经200~400 a生物化学作用才能形成。其高腐殖质含量(有机质平均3%~6%)赋予卓越的农业生产潜力^[6-8]。黑土地开发和利用比较早,黑土区农垦现象普遍,长期的粗放式开垦耕作,以及人类的不合理生产活动在加重土壤侵蚀危害的同时,造成黑土区水土流失和退化严重^[9-10]。

东北黑土区因其特殊的地形地貌特征及坡耕地缓坡长坡的特征,以及东北地区春季至夏季植被覆盖较差,降水较多,雨量较大的特点,使得黑土区坡耕地土壤侵蚀严重^[11-12]。降雨径流冲刷坡面表土,导致其物理、化学性质变化和生产力降低^[13]。根据有关资料,在黑土区坡耕地上,因土壤侵蚀而造成的粮食产量减少约 $1.08 \times 10^{10} \text{ kg}$ ^[14-15],对东北地区的发展和国家安全都产生了不利影响。

水土保持耕作措施既是保护水土资源的根本措施^[16-18],又是生态环境建设的必要需求。水土保持耕作措施可以通过改变微地形,增加地面覆盖和土壤抗蚀力等方式有效减轻降雨引起的土壤侵蚀和地质灾害^[19-20]。对防治水土流失、促进农业增产具有十分重要的作用^[7,21-22]。

近年来,东北黑土区加大对生态环境的治理力度,水土保持综合治理取得显著成效^[23],但不同的水土保持耕作措施在减轻降雨引起的水土流失方面存在差异,从而导致该地区不同水土保持措施的减流减沙机理尚不明确。同时,虽然目前国内外学者对不同水土保持耕作措施影响坡耕地水土流失的相关研究较为丰富,但多集中在西北黄土区和南方红壤区,且多采用人工模拟降雨的方法,从坡耕地土壤侵蚀理论、产流产沙规律等方面已取得较多成果,而针

对自然降雨条件下东北黑土区3°缓坡耕地的研究相对较少。因此,本试验以黑龙江省齐齐哈尔市克山县典型黑土区坡耕地为研究对象,设置传统顺坡垄作为对照,比较横坡垄作、横坡垄作+植物篱、秸秆还田、垄作区田4种不同水土保持耕作措施在自然降雨条件下径流小区产流量、产沙量的差异,探究不同水土保持耕作措施对坡耕地产流产沙的影响机制,筛选出高效的坡耕地水土流失防治模式,为黑土区坡耕地土壤侵蚀治理提供理论基础与数据支持。

1 研究区概况

研究区布设在黑龙江省齐齐哈尔市克山县定位试验观测站内($47^{\circ}43'—48^{\circ}18'N, 126^{\circ}01'—126^{\circ}41'E$),地处小兴安岭伸向松嫩平原的过渡区。该地属于寒温带大陆性季风气候,夏季温和多雨,雨热同季。年平均降水量479.4 mm,主要集中在6—8月,年均径流深50 mm,年平均气温 $2.4^{\circ}C$,年平均日照时数2 703 h,无霜期122~135 d。地形为典型丘陵漫岗,坡度 $3^{\circ}—8^{\circ}$,土壤类型为黏底黑土,土层平均厚度20~30 cm。主要农作物为玉米和大豆,主要耕作方式为顺坡垄作。该区水土流失严重,是水土流失防治重点治理区域。

2 材料与方法

2.1 径流小区设置

在试验观测站内,设置传统顺坡垄作为对照,不同水土保持耕作措施分别为横坡垄作、横坡垄作+植物篱、秸秆还田、垄作区田(表1),各措施重复3次,随机排列。径流小区坡度为 3° ,宽5 m,水平坡长20 m,投影面积 100 m^2 ,径流小区间距0.65 m,四周设有地埂,埋深45 cm,高出地面20 cm。

2.2 数据获取

本试验中径流量数据通过XYZ-IIT型无动力水土流失装置翻转次数计算得出。径流量计算公式为

$$Q = V \times n \quad (1)$$

式中:Q表示径流量(L);V表示翻斗体积(L);n表示记录装置的翻转次数。

表1 径流小区布设

Table 1 Layout of runoff plots

耕作措施	坡度	垄作方式	处理
顺坡垄作(对照)	3°	顺垄	无
横坡垄作	3°	横垄	无
横坡垄作+植物篱	3°	横垄	栽植胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)
秸秆还田	3°	顺垄	秸秆抛洒还田
垄作区田	3°	顺垄	沟垄中修筑土档

将收集的泥沙样品进行过滤、干燥、称量,计算含沙率。

泥沙量计算公式为

$$S = Q \times S_a \quad (2)$$

式中: S 表示泥沙量(kg); Q 为总径流量(L); S_a 表示该阶段含沙率(kg/L)。

减流率计算公式为

$$f_r = \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} \times 100\% \quad (3)$$

式中: f_r 表示减流率(%); Q_a 为对照小区产流量(m^3); Q_b 为不同耕作措施径流小区产流量(m^3)。

减沙率计算公式为

$$f_s = \frac{S_a - S_b}{S_a} \times 100\% \quad (4)$$

式中: f_s 表示减沙率(%); S_a 为对照小区含沙量(kg/ m^3); S_b 为不同耕作措施径流小区含沙量(kg/ m^3)。

2.3 数据处理

运用 Excel 2019 对数据进行计算整合;利用 SPSS 27.0 中的方差分析和多重比较(LSD)进行显著性水平检验;利用 Origin 2024 进行图片绘制。

3 结果与分析

3.1 径流小区产流降雨特征

降雨作为诱发土壤水力侵蚀过程的主要驱动力,其累积降雨量、降雨强度、降雨历时与降雨类型对坡耕地水土流失特征具有显著影响,降雨量越大,降雨强度越大,降雨历时越长,对地表的冲刷能力就越强,产生径流与泥沙量越多。根据国家对降雨量等级标准规定,按照日累积降雨量将降雨划分为小雨(降雨量小于 9.9 mm)、中雨(降雨量 10.0~24.9 mm)、大雨(降雨量 25.0~49.9 mm)、暴雨(降雨量 50.0~99.9 mm)。由表 2 可知,在观测的 44 场侵蚀性降雨事件中,小雨、中雨、大雨和暴雨发生次数分别为 13, 18, 8, 5 次,对应累积降雨量分别为 79.95, 308.46, 259.87, 278.48 mm,分别占总降雨量的 8.63%, 33.28%, 28.04% 和 30.05%。

表2 2019—2022年44场产流次降雨特征统计

Table 2 Statistics of 44 runoff-yielding rainfall events (2019—2022)

日期	降雨类型	降雨量/mm	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨历时/h
20190724	大雨	43.79	1.25	35
20190730	中雨	20.73	0.55	38
20190801	大雨	38.10	1.52	25
20190810	大雨	29.65	1.06	28
20190818	中雨	12.80	0.41	31
20190823	暴雨	51.55	2.15	24
20200622	中雨	18.70	0.62	30
20200623	中雨	11.81	0.66	18
20200627	小雨	2.80	0.18	16
20200628	中雨	21.81	1.82	12
20200630	小雨	2.78	0.56	5
20200705	中雨	16.33	0.74	22
20200706	小雨	7.39	0.43	17
20200720	中雨	20.31	0.63	32
20200729	小雨	4.41	0.25	18
20200803	大雨	32.08	2.67	12
20200804	小雨	9.30	0.40	23
20200805	小雨	8.13	0.41	20
20200809	中雨	21.93	0.34	65
20200811	大雨	290.00	1.04	28
20200824	小雨	5.25	0.38	14
20200829	大雨	25.37	1.06	24
20200831	中雨	15.59	1.04	15
20200901	小雨	3.54	0.24	15
20200903	暴雨	58.76	3.46	17
20200904	大雨	25.24	1.05	24
20200908	小雨	6.44	0.20	32
20200911	小雨	5.42	0.18	30
20210611	暴雨	51.40	2.86	18
20210624	暴雨	54.40	5.44	10
20210705	中雨	16.85	0.36	47
20210714	小雨	8.57	0.18	48
20210717	中雨	23.40	0.38	62
20210718	中雨	14.62	0.61	24
20210719	大雨	36.64	1.53	24
20210731	暴雨	62.37	2.31	27
20210801	小雨	9.54	0.73	13
20210803	中雨	10.38	0.26	40
20220613	中雨	14.29	0.65	22
20220615	小雨	6.38	0.53	12
20220620	中雨	23.42	1.80	13
20220706	中雨	10.28	0.73	14
20220713	中雨	11.90	1.19	10
20220805	中雨	23.31	1.55	15

根据研究区 2019—2022 年降雨特征(表 3), 2019 年共观测到 6 次降雨产生径流泥沙,总降雨量为 196.62 mm,最大雨强为 2.15 mm/h,其中 8 月占

67.2%。2020年产生径流泥沙降雨频次增至22次,总降雨量352.39 mm,其中8月降雨量最大,为146.65 mm,9月出现最大降雨强度(3.46 mm/h)。2021年观测到10次降雨产生径流,其中4次降雨产生泥沙,总降雨量288.17 mm,产沙降雨强度为5.44 mm/h,呈现6月>7月>8月递减趋势。2022年产生径流泥沙降雨频次最少,仅有6次产流降雨,其

中有4次降雨产生泥沙,总降雨量为89.58 mm,降雨强度峰值为1.80 mm/h,产流产沙降雨频次为2020年的18.2%。以上分析表明,2019—2022年降雨量及强度呈逐年下降趋势,2020年降雨最丰富,2022年各项指标显著降低;试验区7—8月为降雨集中期;雨强峰值多出现在夏季月份,其中2021年6月出现观测期最高值(5.44 mm/h)。

表3 研究区2019—2022年降雨特性

Table 3 Characterization of rainfall at study area (2019—2022)

年份	年降雨量/mm	占研究时段总降雨量/%	降雨历时/h	降雨强度范围/(mm·h ⁻¹)	降雨次数/次
2019	196.62	21.22	181	0.41~2.15	6
2020	352.39	38.02	489	0.18~3.46	22
2021	288.17	31.09	313	0.18~5.44	10
2022	89.58	9.67	86	0.53~1.80	6

3.2 不同水土保持耕作措施下坡耕地产流产沙特征

3.2.1 产流特征

由图1可知,相较于传统顺坡垄作耕作措施,4种水土保持耕作措施均能有效降低地表径流量。减流率表现为:横坡垄作+植物篱>横坡垄作>垄作区田>秸秆还田。4种水土保持耕作措施中,横坡垄作+植物篱措施减流率与顺坡垄作差异最显著($p < 0.05$),横坡垄作、横坡垄作+植物篱及垄作区田3种措施间的减流率差异不显著($p > 0.05$),其中横坡垄作措施的减流率为67%,垄作区田措施的减流率为64%,横坡垄作+植物篱措施的减流率为74%。通过对各措施减流率的分析可知,横坡垄作+植物篱措施表现出显著的减流效果,其次是横坡垄作措施和垄作区田措施。

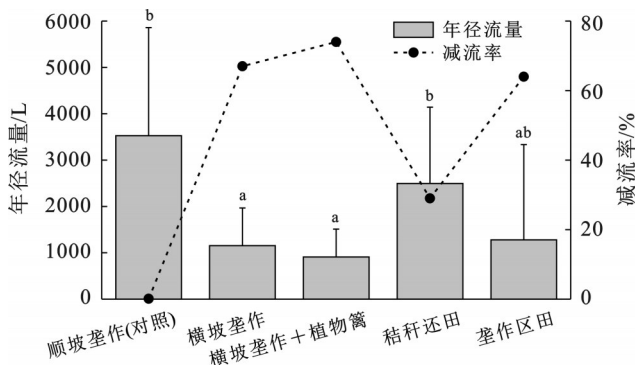


图1 2019—2022年坡耕地平均减流率

Fig.1 Average runoff reduction rate on slope cropland (2019—2022)

图2表明,2021年6月11日典型侵蚀性降雨事件中,传统顺坡耕作措施产生径流持续时间达60 min,累计径流量3242.2 L;采用垄作区田和秸秆还田措施径流持续时间缩短至50 min,其累计径

流量分别降至961.4 L和652.8 L;而横坡垄作和横坡垄作+植物篱措施表现出更好的减流效果,两者径流持续时间均为35 min,累计径流量分别减少至496.8 L和368.0 L。在整场降雨过程中,06:00前后分别出现一次产流峰值,顺坡垄作、横坡垄作、横坡垄作+植物篱、秸秆还田和垄作区田措施首次产流量峰值均出现在05:45—05:50,顺坡垄作措施峰值流量达439.4 L/5 min,明显高于4种水土保持耕作措施。第二次产流峰值出现时段呈现措施差异性,06:15—06:20时段内,顺坡垄作措施仍维持最高峰值(585 L/5 min),横坡垄作、秸秆还田及垄作区田措施产流量分别为205,204,255 L。与其他3种水土保持耕作措施相比,横坡垄作+植物篱措施的峰值出现时间延后至06:20—06:25,且径流量降低至115 L/5 min,表现出其对径流产生的延滞效果。

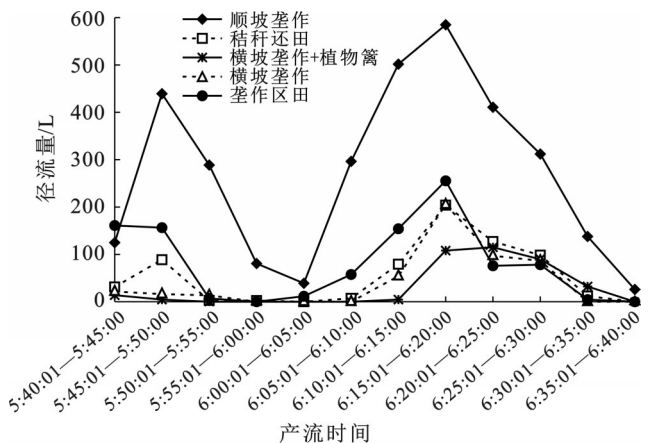


图2 2021年6月11日不同耕作措施下坡耕地的产流过程

Fig.2 Runoff yield process under different tillage measures of slope cropland on June 11, 2021

2022年6月20日,出现了典型侵蚀性降雨过程。由图3可知,传统顺坡垄作措施径流持续时间最长,其累计径流量达642.2 L,垄作区田、秸秆还田以及横坡垄作+植物篱3种措施的径流历时均缩短至25 min,对应的径流总量分别为433.7,374.9,209.5 L;而横坡垄作措施的产流时间进一步缩减至20 min,累计径流量为306.0 L。所有耕作措施均在19:30—19:35出现产流量峰值。具体而言,顺坡垄作措施在该时段达到280.8 L的最高峰值,秸秆还田、垄作区田、横坡垄作及横坡垄作+植物篱措施的峰值流量依次为272.0,255.3,192.0,111.3 L。其中横坡垄作+植物篱措施表现出最优的径流抑制效果,其峰值流量仅为顺坡垄作措施的39.6%。

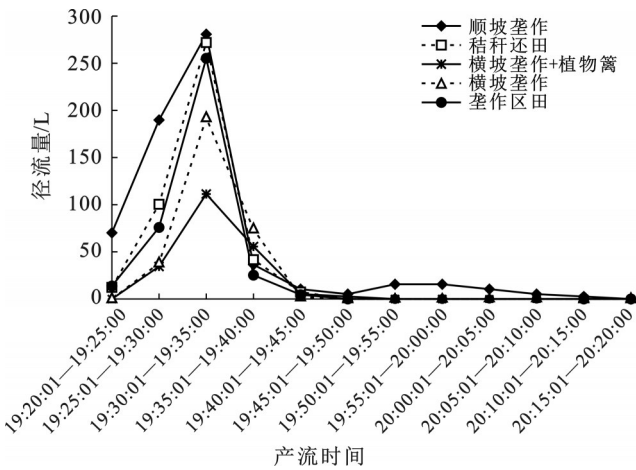


图3 2022年6月20日不同耕作措施下坡耕地的产流过程
Fig.3 Runoff yield process under different tillage measures of slope cropland on June 20, 2022

3.2.2 产沙特征

研究结果(图4)表明,相较于传统顺坡垄作措施,4种水土保持耕作措施均表现出显著的减沙效果。减沙率表现为:横坡垄作+植物篱>横坡垄作>秸秆还田>垄作区田。其中,横坡垄作及横坡垄作+植物篱措施的减沙率与顺坡垄作措施存在显著差异($p<0.05$),减沙率分别达到88%和87%。4种不同水土保持耕作措施间的减沙率差异不显著($p>0.05$)。具体来看,秸秆还田与垄作区田措施的减沙率分别为67%和66%,垄作区田措施的减沙效果略低于秸秆还田措施,两者差异不显著($p>0.05$)。数据分析表明,横坡垄作+植物篱措施的减沙率最高,横坡垄作措施次之,秸秆还田措施减沙率略高于垄作区田。

在2021年6月11日典型侵蚀性降雨过程中,传统顺坡垄作措施其含沙浓度始终高于其他水土保持耕作措施(图5)。在降雨初期阶段(0—10 min),顺坡

垄作、秸秆还田和垄作区田的含沙浓度分别达到3.9,1.76和3.53 g/L,而横坡垄作及横坡垄作+植物篱措施在此时段均未产生泥沙。随着降雨持续,横坡耕垄作措施在10—20 min时段开始产生泥沙,含沙浓度为2.2 g/L,横坡垄作+植物篱措施则在20—30 min时段开始产生泥沙,含沙浓度为4.69 g/L。06:10—06:20是所有措施含沙浓度的高峰期,顺坡垄作、横坡垄作、横坡垄作+植物篱、秸秆还田和垄作区田措施的含沙浓度依次为12.03,7.42,5.66,6.99和8.58 g/L。

图5表明,相较于顺坡垄作措施,各水土保持耕作措施平均含沙浓度呈现下降趋势,垄作区田、秸秆还田、横坡垄作及横坡垄作+植物篱措施分别降低29%,43%,62%和73%。横坡垄作+植物篱措施表现出最优的拦截泥沙效果,其含沙浓度较传统顺坡垄作降低约1/3。横坡垄作措施的拦截泥沙效果仅次于横坡垄作+植物篱措施。

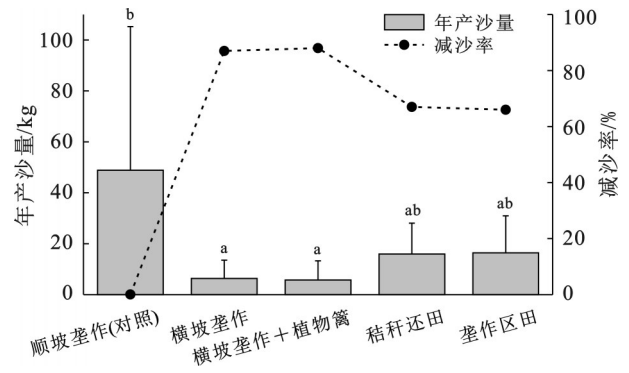


图4 2019—2022年坡耕地平均减沙率
Fig.4 Average sediment reduction rate on slope cropland (2019—2022)

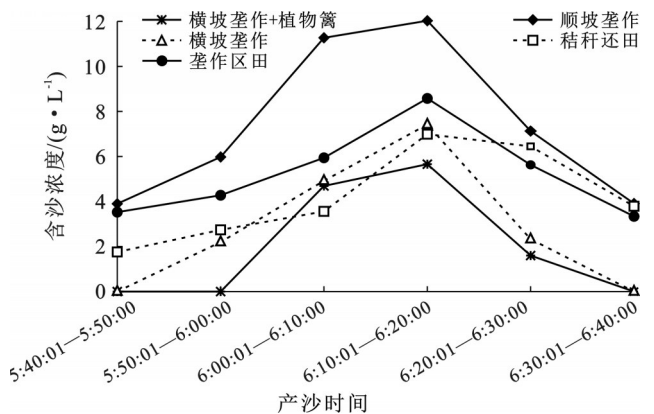


图5 2021年6月11日不同耕作措施下坡耕地的产沙过程
Fig.5 Sediment yield process under different tillage measures of slope cropland on June 11, 2021

3.3 坡耕地径流与泥沙的相关性

线性拟合结果(表4)表明,不同耕作措施下坡耕地径流量与泥沙量呈显著正相关关系($p<0.01$)。各耕作措施径流量与泥沙量相关性表现为:垄作区田>

顺坡垄作>秸秆还田>横坡垄作>横坡垄作+植物篱,相关系数分别为0.772 8,0.564 1,0.554 2,0.533 0,0.506 7。这表明在各耕作措施下坡耕地径流的产生是泥沙产生的主要影响因素。

表4 不同水土保持耕作措施下径流量与泥沙量的相关性
Table 4 Relationship analysis between runoff volume and sediment yield under different soil and water conservation tillage measures

水土保持耕作措施	拟合方程	决定系数	p 值
顺坡垄作(对照)	$y=1.483\ 81x-0.314\ 73$	$R^2=0.564\ 1$	$p<0.01$
横坡垄作	$y=0.497\ 46x-0.000\ 99$	$R^2=0.533\ 0$	$p<0.01$
横坡垄作+植物篱	$y=1.308\ 01x-0.263\ 09$	$R^2=0.506\ 7$	$p<0.01$
秸秆还田	$y=0.569\ 12x+0.159\ 81$	$R^2=0.554\ 2$	$p<0.01$
垄作区田	$y=0.671\ 84x+0.070\ 63$	$R^2=0.772\ 8$	$p<0.01$

4 讨论

黑土区坡耕地作为中国重要的粮食生产基地^[24-25],在农业生产体系中具有不可替代的战略地位,但同时也是东北地区水土流失的主要策源地。对于黑土地区的坡耕地,因地制宜采用保护性耕作措施,能够有效降低坡耕地泥沙流失,从而减少水土流失,提高土地生产能力。本研究基于野外自然降雨过程,研究5种耕作措施下黑土区坡耕地产流产沙特征。结果表明,在相同降雨条件下,减流率表现为:横坡垄作+植物篱>横坡垄作>垄作区田>秸秆还田,减沙率表现为:横坡垄作+植物篱>横坡垄作>秸秆还田>垄作区田,其中横坡垄作+植物篱减流减沙效果最好。此结论与诸多学者研究结果一致。刘绪军等^[26-27]通过试验发现横坡垄作+植物篱措施可以改善土壤结构,使土壤容重减小,土壤孔隙度增加,显著提高土壤入渗性能,从而减少地表径流和土壤侵蚀的发生。陆淑宁等^[28]在长期野外降雨监测发现,横坡垄作可以通过沟垄蓄水延迟产流并减少水土流失。杜勇强等^[29]通过人工模拟降雨试验研究表明,秸秆还田能够有效提升土壤孔隙度,促进降雨入渗,推迟产流时间,并减少径流量;同时可以增加地表粗糙度,降低径流流速,削弱径流携带泥沙的能力,从而减少地表径流量和泥沙产量。牟延森等^[30]通过人工模拟降雨试验发现垄作区田可以通过分散降雨强度,延长径流路径,从而有效拦截地表径流。本研究中秸秆还田与垄作区田措施对径流泥沙的截留效果未达显著水平,主要是由于气候条件与地形地貌存在差异性。相较于传统的耕作措施,水土保持耕作措施在保水固土方面展现出明显优势,坡耕地产流产沙过程受土壤理化性质、耕作方式、降雨强度、降雨过程、覆盖度等多因素综合影响,因此,不同条件下产流产沙特征仍需深入研究。

5 结论

(1)自然降雨条件下,顺坡垄作耕作措施下坡耕地产流产沙量最大,横坡垄作+植物篱、横坡垄作、秸秆还田和垄作区田耕作措施均能在一定程度上减少坡耕地的产流产沙量,不同水土保持耕作措施减流率大小排序为:横坡垄作+植物篱>横坡垄作>垄作区田>秸秆还田,减沙率大小排序为:横坡垄作+植物篱>横坡垄作>秸秆还田>垄作区田。

(2)横坡垄作措施的减沙率显著,横坡垄作+植物篱措施的减流率和减沙率均显著,可作为主要耕作措施在东北黑土区推广应用。

(3)与顺坡垄作相比,4种水土保持耕作措施均可减少坡耕地产流产沙的持续时间,其中横坡垄作+植物篱措施的产流产沙持续时间最短。

(4)自然降雨条件下,坡耕地产生径流量与泥沙量均呈显著的正相关关系,泥沙量随径流量的增加而增加,表明坡面径流产生是影响泥沙产生的主要因素。

参考文献(References)

- [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.
- [2] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12.
Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2):1-12.
- [3] 温云浩,刘铁军,马林芊,等.东北黑土区横垄坡耕地的产流产沙过程[J].水土保持通报,2021,41(6):63-70.

- Wen Yunhao, Liu Tiejun, Ma Linqian, et al. Process of flow and sand production at cross-ridge slope land in black soil area of northeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6):63-70.
- [4] 耿煜函,肖洋,张美芝,等.东北黑土区坡耕地侵蚀沟研究现状及进展[J].*中国农学通报*,2021,37(21):80-85.
- Geng Yuhuan, Xiao Yang, Zhang Meizhi, et al. Research status and progress of erosion gully on slope farmland in black soil region of northeast China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(21):80-85.
- [5] 包昂,范昊明,许秀泉,等.东北半干旱区不同耕作方式下的侵蚀性降雨标准比较[J].*土壤通报*,2022,53(1):81-88.
- Bao Ang, Fan Haoming, Xu Xiuquan, et al. Comparison of erosive rainfall standards under different tillage methods in the semi-arid region of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1):81-88.
- [6] Li Hongdan, Shi Wenjiao, Wang Bing, et al. Comparison of the modeled potential yield versus the actual yield of maize in northeast China and the implications for national food security [J]. *Food Security*, 2017, 9(1):99-114.
- [7] 许文旭,杨献坤,崔斌,等.东北黑土区典型坡耕地土层厚度及退化程度分析[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(3):28-36.
- Xu Wenxu, Yang Xiankun, Cui Bin, et al. Analysis of the soil thickness and the degradation degree of the typical slope farmland in the black soil region of northeast China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(3):28-36.
- [8] 何琪琳,李斌斌,张凤宝,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀对影响因素响应的定量分析[J].*地理学报*,2021,76(5):1218-1230.
- He Qilin, Li Binbin, Zhang Fengbao, et al. Quantitative analysis of soil erosion factors in sloping farmland in black soil area of northeast China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5):1218-1230.
- [9] 汪景宽,徐香菇,裴久渤,等.东北黑土地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J].*土壤通报*,2021,52(3):695-701.
- Wang Jingkuan, Xu Xiangru, Pei Jiubo, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in northeast China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3):695-701.
- [10] 赵玉明,刘宝元,姜洪涛.东北黑土区垄向的分布及其对土壤侵蚀的影响[J].*水土保持研究*,2012,19(5):1-6.
- Zhao Yuming, Liu Baoyuan, Jiang Hongtao. Distribution of tillage-induced direction and its effect on soil erosion in black soil area of northeast China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(5):1-6.
- [11] 李茂娟,李天奇,朱连奇,等.50年来东北黑土区土地利用变化对沟蚀的影响:以克东地区为例[J].*地理研究*, 2019, 38(12):2913-2926.
- Li Maojuan, Li Tianqi, Zhu Lianqi, et al. Effect of land use change on gully erosion in black soil region of northeast China in the past 50 years: A case study in Kedong County [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(12):2913-2926.
- [12] 侯淑艳,刘绪军,刘建新,等.水土保持措施对黑土坡耕地产流产沙的影响[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(4):26-33.
- Hou Shuyan, Liu Xujun, Liu Jianxin, et al. Effects of soil and water conservation measures on the runoff and sediment yield in black sloping farmland [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(4):26-33.
- [13] 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.
- [14] 阎百兴,杨育红,刘兴土,等.东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J].*中国水土保持*,2008(12):26-30.
- Yan Baixing, Yang Yuhong, Liu Xingtu, et al. Present situation and evolution trend of soil erosion in black soil region of northeast China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12):26-30.
- [15] 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.
- [16] 刘芬.水土保持耕作措施及其对土壤影响的探究[J].*海河水利*,2021(2):29-30.
- Liu Fen. Exploration on the tillage measures of soil and water conservation and relevant impact on soil [J]. *Haihe Water Resources*, 2021(2):29-30.
- [17] 张伟东,徐湘田,赵宇琴,等.水力侵蚀主要防治措施及其效果评价[J].*内蒙古大学学报(自然科学版)*,2025,56(3):302-316.
- Zhang Weidong, Xu Xiangtian, Zhao Yuqin, et al. Main measures for preventing and controlling water erosion and evaluations on their benefits [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2025, 56(3):302-316.
- [18] 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. Interac-

- tion 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.
- [19] 王磊,何超,郑粉莉,等.黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J].*农业工程学报*,2018,34(15):141-148.
Wang Lei, He Chao, Zheng Fenli, et al. Soil-bin experiment on effects of contour ridge tillage for controlling hillslope soil erosion in black soil region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15):141-148.
- [20] 贾燕锋,王佳楠,范昊明,等.东北黑土区水土保持措施防治多营力侵蚀的作用与优化配置[J].*中国水土保持科学(中英文)*,2022,20(5):124-132.
Jia Yanfeng, Wang Jianan, Fan Haoming, et al. Effects and optimal allocation of soil and water conservation measures on the multi-agent combined soil erosion in the Mollisol region, northeast China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(5):124-132.
- [21] 李菲,李晓光.不同水土保持耕作措施对降雨径流、产沙及土壤水蚀特性的影响[J].*乡村科技*,2022,13(10):142-146.
Li Fei, Li Xiaoguang. Effects of different soil and water conservation tillage measures on rainfall runoff, sand production and soil water erosion characteristics [J]. *Rural Science and Technology*, 2022, (10):142-146.
- [22] 贾正雷.农业耕作措施对水土保持效果的影响研究[J].*现代农业研究*,2025,31(3):59-62.
Jia Zhenglei. Research on the impact of agricultural cultivation measures on soil and water conservation efficiency [J]. *Modern Agriculture Research*, 2025, 31(3):59-62.
- [23] 许晓鸿,隋媛媛,张瑜,等.黑土区不同耕作措施的水土保持效益[J].*中国水土保持科学*,2013,11(3):12-16.
Xu Xiaohong, Sui Yuanyuan, Zhang Yu, et al. Effects of different tillages on the soil and water conservation benefits in northeast black soil area of China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(3):12-16.
- [24] 温云浩,王立新,刘铁军.东北黑土区不同垄作坡面产流产沙过程[J].*水土保持研究*,2022,29(5):8-13.
Wen Yunhao, Wang Lixin, Liu Tiejun. Process of runoff and sediment generation on different slopes with ridged cropping in the black soil area of northeast China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5):8-13.
- [25] 沈海鸥,温磊磊,武佳龙,等.垄作与垄向区田技术对黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的研究进展[J].*农业工程学报*,2022,38(22):52-62.
Shen Haiou, Wen Leilei, Wu Jialong, et al. Review on the effects of ridge pattern and ridge-furrow intervals on soil erosion of sloping farmland in the black soil region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(22):52-62.
- [26] 刘绪军,延秀杰.黑土区植物篱带对土壤抗蚀性作用效果研究[J].*土壤通报*,2018,49(5):1214-1219.
Liu Xujun, Yan Xiujie. Effects of hedgerow strip on anti-erodibility in the black soil region of northeast China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5):1214-1219.
- [27] 刘绪军,任宪平,杨亚娟,等.东北黑土区植物篱空间结构配置的探讨[J].*水利科学与寒区工程*,2020,3(6):17-21.
Liu Xujun, Ren Xianping, Yang Yajuan, et al. Study on spatial structure configuration based on hedgerows in black soil region of northeast China [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2020, 3(6):17-21.
- [28] 陆淑宁,李荣融,姚冲,等.横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J].*土壤学报*,2024,61(5):1271-1283.
Lu Shuning, Li Rongrong, Yao Chong, et al. Study on the effects of counter tillage on runoff and sediment yield and process of nitrogen and phosphorus nutrient loss on sloping farmland [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(5):1271-1283.
- [29] 杜勇强,常婷婷,陈晓安,等.不同秸秆还田模式下红壤坡耕地产流产沙特征[J].*陕西师范大学学报(自然科学版)*,2024,52(4):120-129.
Du Yongqiang, Chang Tingting, Chen Xiaolan, et al. Runoff and soil erosion characteristics in red soil slope croplands under various straw return modes [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(4):120-129.
- [30] 牟廷森,沈海鸥,贺云锋,等.黑土区垄作方式对坡耕地土壤侵蚀的调控效果[J].*水土保持通报*,2022,42(2):22-30.
Mou Tingsen, Shen Haiou, He Yunfeng, et al. Effects of ridge tillage patterns on soil erosion of sloping croplands in black soil region of northeastern China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2):22-30.