黑土区坡式条田对水土流失、土壤水热及呼吸的影响

张 瑜，徐子棋，杨献坤，崔 斌
（吉林省水土保持科学研究院，吉林 长春 130033）

摘 要：[目的] 探索坡式条田在黑土区坡耕地水土保持和改善土壤环境中的作用，以期为坡式条田在坡耕地上的利用提供理论支持。[方法] 基于野外试验，观测研究了坡式条田对径流产沙、土壤水热和土壤呼吸的影响。[结果] ①黑土坡面设置坡式条田具有良好的减流减沙效果，年均减少输沙率和减少地表径流率分别为 78.3%和 68.5%，土壤侵蚀模数为 87.53 t/(km^2 · a)，控制在允许范围内；②修筑坡式条田显著提高土壤质量含水量($p<0.05$)，并能显著增加植被覆盖度($p<0.01$)；③研究区土壤呼吸与土壤温度显著相关，修筑坡式条田能够显著降低土壤呼吸速率，降低土壤碳素损失。[结论] 黑土区坡式条田能够很好地防治水土流失，改善土壤水热和植被状况，且能降低土壤呼吸造成的 C 素流失，应在黑土坡耕地上推广应用。

关键词：黑土区；坡式条田；水土流失；土壤水热；土壤呼吸
文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2020)05-0160-06 **中图分类号**：S157.3

文献参数：张瑜，徐子棋，杨献坤，等. 黑土区坡式条田对水土流失、土壤水热及呼吸的影响[J]. 水土保持通报，2020，40(5)：160-165. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.024；Zhang Yu，Xu Ziqi，Yang Xiankun，et al. Effects of sloping contour earth bund on soil erosion，moisture，temperature，and respiration in black soil area of Northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(5)：160-165.

Effects of Sloping Contour Earth Bund on Soil Erosion，Moisture，Temperature，and Respiration in Black Soil Area of Northeast China

Zhang Yu，Xu Ziqi，Yang Xiankun，Cui Bin
（*Institute of Soil and Water Conservation of Jilin Province*，*Changchun*，*Jilin* 130033，*China*）

Abstract：[Objective] The function of sloping contour earth bunds with respect to soil and water conservation and environmental enhancement on sloping farmland in a black soil area was investigated in order to provide theoretical support for the use of sloping contour earth bunds on sloping farmland. [Methods] Field experiments were carried out to observe the effects of a sloping contour earth bund on soil erosion，the soil water content，soil temperature，and soil respiration. [Results] ① The sloping contour earth bund had a remarkable effect on reducing the amount of soil erosion in the black soil area；the amount of erosion was 87.53 t/(km^2 · a)，which was less than the allowable amount of erosion. ② Construction of the sloping contour earth bund significantly increased the soil water content ($p<0.05$) and the vegetation coverage ratio ($p<0.01$). ③ The soil respiration and soil temperature were significantly correlated in the research area，and the sloping contour earth bund clearly reduced the soil respiration rate and soil carbon loss. [Conclusion] The sloping contour earth bund exhibited remarkable effects for reducing soil erosion，improving the soil water content and temperature conditions，and reducing the soil respiration rate and soil carbon loss；hence，it is suitable for sloping farmland in the black soil area.

Keywords：**black soil area；sloping contour earth bund；soil erosion；soil water content and temperature；soil respiration**

水土流失是世界级的重要生态环境问题，它不仅影响自然环境，更影响人类的生存、发展[1]。东北黑土区是中国重要的粮食基地，也是中国一个主要的水土流失区[2]。东北黑土区坡耕地多处于坡度 0.5°～5°

收稿日期：2020-05-28 **修回日期**：2020-07-14
资助项目：国家重点研发计划“东北黑土区坡面水土流失综合治理技术”(2018YFC0507002-05)；国家重点研发计划“东北黑土区侵蚀沟生态修复关键技术研发与集成示范”(2017YFC0504200)；吉林省财政厅项目“吉林省中东部生态小流域关键技术”
第一作者：张瑜(1980—)，女(汉族)，山东省烟台市人，硕士，高级工程师，主要从事黑土区水土保持研究。Email：124058200@qq.com。
通讯作者：徐子棋(1990—)，女(汉族)，吉林省白山市人，硕士，工程师，主要从事水土保持生态修复研究。Email：235175758@qq.com。

的长缓坡,且坡耕地占该区域耕地总面积的59.38%,2010 年数据显示,东北黑土区水土流失面积约为 27.58万 km^2,坡耕地造成的水土流失面积高达当地水土流失总面积的 80.3%,即坡耕地为该区域主要水土流失区域[3]。黑土具有表层质地疏松、下层黏重、透水性较低、易被冲蚀的特点,加之该区域多年来重用轻养、不合理开发利用,导致水土流失程度不断加剧[4]。因此,黑土区如何选择合适的坡面水土保持措施,在减少径流、泥沙侵蚀的同时,做到改善土壤环境,已成为近年来研究的热点。

坡式条田是一种沿坡面等高线修筑地埂,在埂前修筑竹节状蓄水沟,减少径流汇集量与冲刷,埂上栽植固埂植物的水土保持坡面措施,具有占地小、土壤扰动小的特点[5]。由于坡式条田在结构和原理上与地埂植物带相似,故本文将前人有关地埂植物带的相关研究也纳入分析。于艳秋等[6]简述了坡式条田的技术参数和特征。隋媛媛等[5]研究了黑土区坡耕地建造坡式条田减流减沙、减少养分流失、增强土壤抗崩解性和提高经济效益的作用。李立新等[7],吕志学等[8],赵梅等[9]分析了东北低山丘陵区和黑土坡耕地地埂植物带的保水保土效果、成本和生态、经济、社会效益。陈英群等[10]研究了黑土区坡耕地复合地埂(双埂+植物带)对土壤含水状况的影响。任丽华等[11]研究了辽东山区坡耕地埂植物篱蓄水保沙和防治农业污染的效果。黄欢等[12]研究了三峡库区地埂植物篱对土壤粒径组成的影响。周萍等[13-15]研究了紫土区坡耕地植物根系固结地埂的土力学特征和地埂对不同坡位土壤粒径分布的影响。殷庆元等[16]研究了金沙江干热河谷坡地生物地埂对土壤水稳性颗粒组成的影响。蒋光毅等[17]研究了石漠化区桑树地埂对土壤容重、孔隙度、粒径组成、持水性和入渗性的改善作用。周萍等[18]西南山区不同高度地埂拦蓄水沙作用、对土壤可蚀性和粒径组成的影响和经济效益进行了对比。然而,有关黑土区修建坡式条田对径流泥沙及土壤环境影响的研究却鲜有报道。

本研究通过野外试验,分析坡式条田对水土流失、植被覆盖状况、土壤水热条件和土壤呼吸的影响,以期为坡式条田在坡耕地应用提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于吉林省东辽县杏木小流域,地理坐标为东经 125°22′40″—125°26′10″,北纬 42°58′05″—43°01′40″。东辽县地处吉林省中南部,气候类型为半湿润中温带大陆性气候,四季差别鲜明。该区域年日照时数为 2 504.2 h,年日照率为 57%。年平均温度 5.2 ℃,年均降水量为 658 mm,夏季雨热同季。土壤类型主要为棕壤和暗棕壤。

1.2　措施布设

措施布设和观测时间为 2018 年 9 月至 2019 年 9 月末。坡式条田坡面坡度为 8°,坡形为直线型,为阴坡,坡长为 228 m。按照防洪标准 10 a 一遇 3～6 h 暴雨标准设计尺寸,田面宽 25 m,长 70 m,就地取土修筑土埂,沟在上、埂在下,从埂上方开沟取土,并在沟中横向间隔修筑挡土挡。地埂顶宽 0.4 m,底宽 1.2 m,平均高 0.4 m,沟底宽 1 m,埂、沟边坡比 1∶1。埂上栽植 2 a 生紫穗槐,株行距为 0.5 m×0.5 m。选择该坡措施旁同为 8°的横垄耕作玉米田作为对照,坡长 228 m,田长 10 m。按照公式(1)计算试验田面积:

$$试验田面积=坡长\times田长 \tag{1}$$

计算可得,措施田面积 15 690 m^2,无措施玉米田面积2 280 m^2。措施田和无措施玉米田坡底各设置 1 个沉沙池,尺寸 4 m×4 m×1 m,用于收集径流泥沙。

1.3　测定指标

2019 年全年观测降雨、径流、产沙状况。采用 DL16 WMO 寒旱极地气象站进行降水指标的测定。径流结束后,测定沉沙池中水深,计算径流量公式为:

$$径流量=水深\times沉沙池面积 \tag{2}$$

将径流搅匀,用收集桶收集,测定体积,静置 1 d 后倒掉上清液并用烘箱 105 ℃烘至恒重,称量泥沙重。侵蚀量计算公式:

$$侵蚀量=径流量\times收集桶中泥沙重量/收集桶中径流体积 \tag{3}$$

由于黑土区土壤侵蚀最严重的的坡位为坡中[19],故在坡中测定土壤水热和土壤呼吸,并选择晴朗天气进行测定。使用 TDR 环境水分监测仪进行测定,测 3 点取均值。利用 LI-8 100 测定 5 cm 深处土壤呼吸速率,水平条田和无措施玉米田坡中各放置 3 个 PVC 基座(内径 18.5 cm,高 10 cm),为避免基座对土壤呼吸扰动,放置第 2 年后开始测定。

1.4　数据处理及分析

数据整理及绘图、制表所用软件为 Excel,方差分析(ANNOVA 单因素方差分析 Duncan 法)、相关分析和回归分析所用软件为 SPSS 20.0 进行。

2　结果与分析

2.1　坡式条田对黑土坡面产流、产沙的影响

2019 年研究区共发生 7 次产流降雨,集中于 6—

9 月,其中,6 月、7 月各 1 次,8 月 2 次,9 月 3 次(见表 1)。坡式条田显著减少坡面产流产沙,各次降水坡式条田和无措施玉米田侵蚀量和径流量均差异显著($p<0.05$)。

按照单位面积产流产沙量计算,坡式条田次降雨减少侵蚀率范围为 65.0%～84.0%,减少径流率范围为 53.9%～77.4%,年平均减沙减流率分别为 78.3%和 68.5%(见表 2)。将侵蚀量按面积换算,无措施玉米田年侵蚀模数为 401.75 t/(km^2 · a),而坡式条田年侵蚀模数为 87.53 t/(km^2 · a),低于黑土区允许侵蚀速率 200 t/(km^2 · a)。这说明:黑土坡面设置坡式条田具有良好的减流减沙效果,且能将侵蚀速率控制在允许范围内。对无措施玉米田、坡式条田产流产沙与降水因子进行回归分析(结果见表 3),其显著性均小于 0.05,R^2 值均超过 0.65,拟合效果较为良好。

表 1 研究区 2019 年所有侵蚀性降雨

降雨次号	日 期	降水量/mm	平均雨强/(mm · h^{-1})
1	0630	29.9	8.2
2	0713	46.6	13.84
3	0807	18.2	4.2
4	0831	13.3	7.3
5	0911	28.4	10.37
6	0916	8.2	8.6
7	0916	10.6	8.1

2.2 坡式条田对黑土坡面植被和土壤环境的影响

2.2.1 坡式条田对黑土坡面植被和土壤水热条件的影响 研究区不同时间坡式条田土壤质量含水量均显著高于无措施玉米田($p<0.05$)。7 月 15 日无措施田和坡式条田的土壤质量含水量分别为 9.9%和 17.2%。5—9 月研究区无措施玉米田和坡式条田植被覆盖度均逐渐增加,且坡式条田栽植紫穗槐植被覆盖度显著高于无措施玉米田($p<0.01$)。7 月 15 日无措施田和坡式条田的植被覆盖度分别为 64.7%和 100.0%(见表 4)。试验田土壤温度日变化均为“单峰”规律,温度从 5—9 月先升高后降低。同时刻坡式条田温度显著低于无措施玉米田温度($p<0.05$),且坡式条田土壤温度较无措施玉米田更为平缓(即标准差更小),例如,7 月 15 日坡式条田、无措施玉米田土壤温度标准差分别为 4.69,5.34(见图 1)。这说明坡式条田可提高土壤含水量,稳定并降低土壤温度。

表 2 试验田产流产沙状况

降雨次号	无措施玉米田土壤侵蚀量/kg	无措施玉米田径流量/m^3	坡式条田土壤侵蚀量/kg	坡式条田径流量/m^3
1	273.6	6.064	306.43	11.759
2	24.6	0.068	60.32	0.220
3	132.2	3.465	212.91	9.339
4	98.0	1.801	192.15	4.236
5	136.8	0.706	210.67	1.588
6	114.0	0.615	239.4	1.671
7	136.8	1.162	172.36	1.839
合计	916.0	13.881	1394.24	30.652

表 3 试验田降雨与产流、产沙回归方程

方程名称	R^2	sig.	回归方程
无措施玉米田侵蚀方程	0.684	0.04	$y_1=1.551x_1-16.037x_2+235.325$
无措施玉米田径流方程	0.758	0.02	$y_2=0.118x_1-0.769x_2+6.017$
坡式条田侵蚀方程	0.695	0.03	$y_3=0.267x_1-14.270x_2+328.660$
坡式条田径流方程	0.869	0.01	$y_4=0.271x_1-1.850x_2+14.394$

表 4 2019 年试验田土壤水分及植被覆盖状况

项 目	20190515		20190715		20190905	
	土壤质量含水量/%	植被覆盖度/%	土壤质量含水量/%	植被覆盖度/%	土壤质量含水量/%	植被覆盖度/%
无措施玉米田	14.6±1.2^a	21.6±1.1^A	9.9±0.5^a	64.7±1.6^A	13.4±0.5^a	70.4±4.3^A
坡式条田	17.1±0.6^b	39.6±3.3^B	17.2±0.4^b	100.0±0.0^B	18.0±1.6^b	100.0±0.0^B

注:表中数值为“均值±标准差”,不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($p<0.01$)。

2.2.2 坡式条田对黑土坡面土壤呼吸的影响 研究区无措施玉米田和坡式条田土壤呼吸速率日变化均先升后降,在 13:00—15:00 达到最大值,呈现“单峰”规律。随着季节变化,土壤呼吸速率 5—7 月提升,7—9 月降低。时间相同时,无措施玉米田的土壤呼吸速率显著高于坡式条田($p<0.05$)。例如,5 月 15 日 13:00 无措施玉米田和坡式条田的土壤呼吸速率分别为 2.08 μmol/m^2 · s 和 1.51 μmol/m^2 · s(见图 2)。这说明:修筑坡式条田能够显著降低土壤呼吸速率,降低土壤碳素损失。

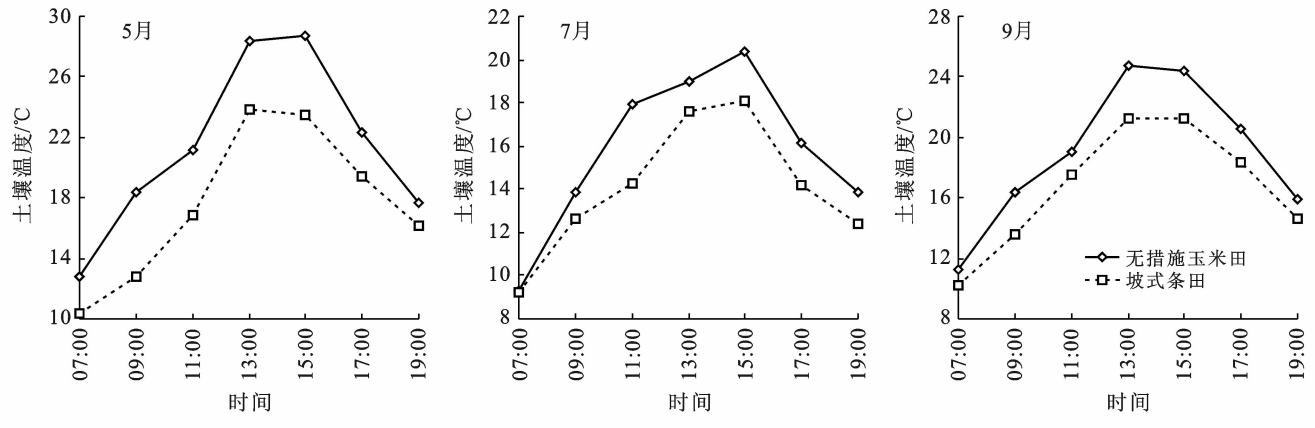


图 1　试验田不同季节土壤温度日变化

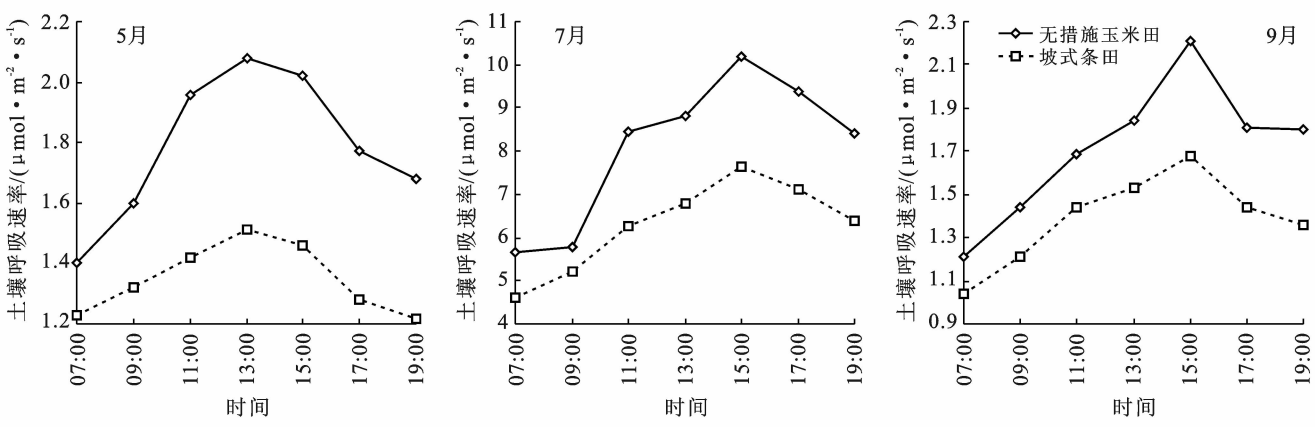


图 2　试验田不同季节土壤呼吸速率

由表 5 可知,研究区无措施玉米田和坡式条田不同季节土壤呼吸速率均与土壤温度具有较大的相关性,相关系数均不小于 0.799,这说明土壤温度是影响土壤呼吸的重要因子。此外,结合前文坡式条田对黑土坡面产流、产沙的影响分析可知,坡式条田的水土流失状况显著轻于无措施玉米田,这说明坡式条田减少径流冲刷土壤的扰动,减少了土壤 CO_2 排放量。

表 5　试验田土壤呼吸速率与土壤温度的相关分析

土地类型	20190515		20190715		20190905	
	相关系数	显著性	相关系数	显著性	相关系数	显著性
无措施玉米田	0.973**	0.000	0.799*	0.031	0.855*	0.014
坡式条田	0.870*	0.011	0.924**	0.003	0.922*	0.011

注:表中“*”代表差异显著($p<0.05$),“**”代表差异极显著($p<0.01$)。

3　讨　论

坡式条田是一种适用于长缓坡的新兴水土保持坡面措施[5]。本研究结果表明,黑土区 8°玉米田修建水平条田能够有效地蓄水拦沙($p<0.05$),年平均较少泥沙率和年平均较少径流率分别为 78.3%和 68.5%。坡式条田年侵蚀模数为 87.53 t/(km² · a),低于黑土区允许侵蚀速率 200 t/(km² · a)。隋媛媛等[5]的研究结果表明。黑土区坡耕地修筑坡式条田+地埂栽植草本植物(黄花菜、红小豆)能够减少径流62.5%～69.2%,减少泥沙量 70.9%～74.2%,提高作物产量 8%～12%,减少养分流失约 10%。

本研究坡式条田水土保持效益更好的原因有可能是紫穗槐作为灌木比草本植株更大,覆盖度更高,防止降水击溅和拦蓄径流效果更好,且根系更加发达,盘绕、加固作用更好。众多研究结果表明,地埂植物带能够有效减少坡面径流量和侵蚀量。朱悦等[20]的研究结果表明,黑土区 10°坡耕地地埂植物带建成3 a 后可减少地表水流失 75.9%,减少表土流失 88.8%,且随着年数增加,土壤和植被的状况改善,有更好的效

果[20]。周萍等[18]的研究显示，西南山区采用植物固结地埂能够减少径流 55.56%，减少侵蚀量 79.26%，且比单独种植等高植物篱拦蓄效果更好、植物产量更高。周萍等[14]对紫色土的研究结果表明，粒径范围 0.002～0.02 mm 的土粒极易随径流冲走，而有地埂坡耕地该范围土粒含量较无地埂处高2.41%，即地埂具有一定拦截泥沙的作用。黄欢等[12]、任丽华等[21]和刘明义等[22]的研究结果表明，地埂植物带通过枯枝落叶返还土壤、增加根系分泌物来优化土壤通透性，且根系具有盘结、固土作用，增加土壤抗蚀性和抗崩解性。唐茜等[23]认为，土埂和植物带复合体的粘聚力和内摩擦角明显大于裸地，通过提高土壤的抗剪切强度来减少土壤流失。地埂植物带通过机械拦挡作用和改善土壤团聚结构作用来提高土壤抗蚀性[16]。周萍等[14]认为，地埂通过逐年拦蓄泥沙，改变微地形，减小地面坡度，有效减少水、土、和养分流失。

本研究结果表明，黑土区坡式条田可提高土壤含水量，稳定并降低土壤温度，改善植物作物生长环境，并提高植被覆盖度。刘明义等[21]和任丽华等[22]认为，地埂植物带通过枯枝落叶返还土壤、增加根系分泌物和根系腐殖质来降低土壤容重、提高土壤孔隙度，从而提高土壤保水保肥能力。周萍等[14]认为，地埂能够改善土壤粒径组成，从而改善土壤入渗。肖列等[24]称，坡面水土保持工程措施能够拦蓄径流，坡面植被能够截获、缓冲径流、减少蒸发，达到增加入渗，蓄积降水的目的。王帅兵等[25]对红壤区的研究表明，坡面水土保持措施能够增加土壤含水量(干旱期尤为明显)，延长土壤湿润期时间，并能够提高耕地降水利用率。马涛等[26]的研究结果表明，采用坡面水保措施的样地植物生长更好，植被覆盖度更大，更好地起到遮盖太阳辐射的作用，因此土壤温度变化更加平缓。李招弟等[27]的研究表明，相同环境下，植被较好处比裸地具有更低的地温。高希旺等[28]和叶功富等[29]的研究也都表明，坡耕地使用水土保持工程措施能够降低土壤温度，增加土壤水分含量，促进植物生长。

本研究结果显示，研究区土壤呼吸速率与土壤温度呈较高的相关性，土壤呼吸速率日变化随土壤温度变化呈“单峰”规律。修筑坡式条田能够显著降低土壤呼吸速率($p<0.05$)，降低土壤碳素损失。例如，5 月 15 日 13:00 无措施玉米田和坡式条田的土壤呼吸速率分别为 2.08 μmol/(m^2 · s)和 1.51 μmol/(m^2 · s)。这说明坡式条田减少径流冲刷土壤的扰动，降低土壤温度，从而减少了土壤 CO_2 排放量，更有利于土壤碳素有效利用，并能减少温室气体。马涛等[26]对黄土丘陵区的研究也认为，土壤呼吸规律呈季节性变化，夏季速率最高，其次为春季和秋季，原因是夏季水热条件较好，且植物处于迅速生长期。土壤水分和土壤温度是影响土壤呼吸速率的重要因子，坡地水土保持措施能够提高土壤含水量，减少植物干旱胁迫，降低土壤温度，从而减缓土壤呼吸速率，减少土壤 C 素流失。高希旺等[28]和叶功富等[29]的研究也表明，坡面水土保持措施能够减轻侵蚀，减少土壤扰动，因此土壤呼吸中非生物作用减弱，土壤 CO_2 释放受到抑制，而且水保措施能够降低坡面土壤温度，减弱微生物新陈代谢，因此导致土壤呼吸速率降低。

今后，还应研究水平条田不同施用年限水土保持效果和防治养分流失效果；有关水平条田土壤温度、土壤水分(阈值效应下)共同影响土壤呼吸的模型建立也需进一步研究[30]。

4 结 论

开展野外试验，在研究了坡式条田在黑土区坡耕地水土保持作用和土壤环境改善作用，结论如下：

(1) 黑土坡面设置坡式条田具有良好的减流减沙效果，年均减少输沙率和减少地表径流率分别为 78.3%和 68.5%，土壤侵蚀模数为 87.53 t/(km^2 · a)，控制在允许范围内；

(2) 坡式条田土壤质量含水率显著高于无措施玉米田($p<0.05$)，7 月 15 日无措施田和坡式条田的土壤质量含水量分别为 9.9%和 17.2%，5—9 月研究区无措施玉米田和坡式条田植被覆盖度均逐渐增加，且坡式条田栽植紫穗槐植被覆盖度显著高于无措施玉米田($p<0.01$)，7 月 15 日无措施田和坡式条田的植被覆盖度分别为 64.7%和 100.0%坡式条田植被覆盖度显著高于无措施玉米田($p<0.01$)；

(3) 试验田土壤温度日变化均为“单峰”规律，温度从 5—9 月先升高后降低，同时刻坡式条田温度显著低于无措施玉米田温度($p<0.05$)，且坡式条田稳定并降低土壤温度；

(4) 研究区无措施玉米田和坡式条田土壤呼吸速率日变化均先升后降，在 13:00—15:00 达到最大值，呈现“单峰”规律。随着季节变化，土壤呼吸速率 5—7 月提升，7—9 月降低，研究区土壤呼吸与土壤温度有显著的相关性，且修筑坡式条田能够显著降低土壤呼吸速率，降低土壤碳素损失。

综上所述，坡式条田在黑土区坡耕地具有较好的水土保持作用和土壤环境改善作用，应在坡耕地中逐渐推广应用。

[参 考 文 献]

[1] 林思乡,徐涵秋,林中立.长汀水土流失区地表裸土动态变化及生态分析[J].福建林业科技,2015,42(3):7-12,39.

[2] 杨凤海,宋佳佳,赵烨荣,等.东北黑土水土流失区生态环境遥感动态监测[J].环境科学研究,2018,31(9):1580-1587.

[3] 陈帅.黑土区坡耕地玉米秸秆还田水土保持功效研究[D].吉林 长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2019.

[4] 沈昌蒲,龚振平,温锦涛.横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研究[J].水土保持通报,2005,25(4):48-49.

[5] 隋媛媛,刘明义,许晓鸿,等.坡式条田在黑土区坡耕地水土流失治理中的应用及效益分析[J].水土保持学报,2014,28(6):52-55,76.

[6] 于艳秋,李秋梅.坡式条田技术与应用研究[J].吉林水利,2003(2):36-37.

[7] 李立新,陈英智,董景海.东北低山丘陵区小流域水土流失防治措施的布设及效益评估:以黑龙江省宁安市和盛小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):253-258.

[8] 吕志学,陈英智,屈远强.复合地埂在黑土侵蚀山区坡耕地治理中的应用研究[J].安徽农业科学,2015,43(18):370-371,374.

[9] 赵梅,孟令钦,王秀颖.地埂植物带在坡耕地治理中的作用与综合效益分析:以东北黑土区为例[J].南方农业学报,2014,45(6):1015-1020.

[10] 陈英群,李立新.复合式地埂对坡耕地土壤含水率影响研究[J].水土保持应用技术,2017(1):1-3.

[11] 任丽华,贾天会,李欣峰,等.辽东山区坡耕地地埂植物篱水土保持及面源污染物阻控效果研究[J].水土保持应用技术,2018(1):1-3.

[12] 黄欢,何丙辉,鲍玉海,等.不同模式地埂植物篱对土壤颗粒组成特征参数的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):256-261.

[13] 周萍,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡耕地草本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J].水土保持通报,2017,37(3):1-6,14.

[14] 周萍,文安邦,严冬春,等.紫色土坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤颗粒组成及分形特征[J].水土保持研究,2017,24(2):84-88,93.

[15] 周萍,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡耕地草本植物根系固结地埂的土力学机制[J].水土保持学报,2017,31(1):85-90.

[16] 殷庆元,王章文,谭琼,等.金沙江干热河谷坡改梯及生物地埂对土壤可蚀性的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):41-47.

[17] 蒋光毅,黄先智,史东梅,等.石漠化区桑树地埂的土壤水分特征研究[J].水土保持学报,2015,29(6):215-221.

[18] 周萍,文安邦,严冬春,等.西南山区等高植物篱和植物固结地埂的水土保持功能的理解[J].中国水土保持科学,2017,15(2):25-34.

[19] 杨维鸽,郑粉莉,王占礼,等.地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J].土壤学报,2016,53(3):572-581.

[20] 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.

[21] 任丽华,贾天会,李欣峰,等.辽东山区坡耕地地埂植物篱对土壤物理性状的影响[J].水土保持应用技术,2018(2):6-8.

[22] 刘明义,许晓鸿,刘艳军,等.不同植物带地埂土壤抗侵蚀效果研究[J].中国水土保持,2012(7):43-45,75.

[23] 唐菡,谌芸,刘枭宏,等.喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根—土复合体力学特性[J].生态学报,2019,39(16):6114-6125.

[24] 肖列,刘国彬,薛萚,等.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤水分及地上生物量的影响[J].水土保持通报,2016,36(4):204-209,215.

[25] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.不同时间尺度反坡台阶红壤坡耕地土壤水分动态变化规律[J].农业工程学报,2019,35(8):195-205.

[26] 马涛,贾志清,周波,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤呼吸及其与温度和水分的关系[J].水土保持通报,2018,38(1):82-88,95.

[27] 李招弟,刘中华,冯慧敏,等.不同植被覆盖条件下黄土土壤温度的变化规律[J].山西农业科学,2019,47(11):2015-2019.

[28] 高希旺,张玉珍,马涛,等.黄土丘陵沟壑区机修梯田与坡地土壤呼吸特征研究[J].西南农业学报,2016,29(3):641-646.

[29] 叶功富,黄石德,杨智杰,等.水土保持措施对板栗林土壤呼吸的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(1):59-64.

[30] 熊平生.陆地生态系统土壤呼吸的影响因素研究综述[J].中国土壤与肥料,2017(4):1-7.