

黑土区垄作方式对坡耕地土壤侵蚀的调控效果

牟廷森¹, 沈海鸥^{1,2}, 贺云锋¹, 李春丽^{1,2}, 郭聃^{1,2}, 刘殿民¹

(1.吉林农业大学 资源与环境学院, 吉林 长春 130118; 2.吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 吉林 长春 130118)

摘要: [目的] 分析黑土区不同垄作方式对坡耕地土壤侵蚀的调控效果, 为该区土壤侵蚀防治提供科学指导。[方法] 在 5° 和 10° 坡耕地开展人工模拟降雨试验, 降雨强度为 50、100 mm/h, 垄作方式包括: 横坡垄作、垄向区田、顺垄+底部横垄和横垄+排水沟, 对照处理为传统顺坡垄作。[结果] 试验条件下, 与顺坡垄作处理相比, 横坡垄作、垄向区田、顺垄+底部横垄和横垄+排水沟处理均可有效调节径流、降低土壤侵蚀量, 但不同垄作方式对径流和侵蚀的调控效果随着降雨强度和坡度的增加而减小。在 5° 坡耕地, 横坡垄作方式对径流和侵蚀的调控效果最佳, 产流率和土壤侵蚀速率分别稳定在 15.0 mm/h 和 0.2 kg/(m²·h) 以下。在 50、100 mm/h 降雨强度下, 与顺坡垄作处理相比, 其径流量分别降低 92.3% 和 83.9%, 土壤侵蚀量分别降低 96.8% 和 94.6%; 而垄向区田方式对径流和侵蚀的调控效果略大于顺垄+底部横垄处理。在 10° 坡耕地, 横坡垄作方式在降雨前期具有较好的蓄水保土作用, 但在降雨后期垄体易损坏, 造成土壤侵蚀量剧增; 横垄+排水沟方式在降雨前期能够蓄水保土, 在降雨后期能够较好地排水。[结论] 在坡度平缓的坡耕地, 应该优选横坡垄作和垄向区田方式; 在坡度较大的坡耕地, 应该优选横垄+排水沟方式。因此, 建议根据地形坡度和降雨特征筛选适宜的垄作方式。

关键词: 垄作方式; 径流调控效果; 侵蚀调控效果; 坡耕地; 黑土区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0022-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.004; 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.

Effects of Ridge Tillage Patterns on Soil Erosion of Sloping Croplands in Black Soil Region of Northeastern China

Mou Tingsen¹, Shen Haiou^{1,2}, He Yunfeng¹, Li Chunli^{1,2}, Guo Dan^{1,2}, Liu Dianmin¹

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University,

Changchun, Jilin 130118, China; 2. Jilin Provincial Key Laboratory of Soil Resource

Sustainable Utilization for Commodity Grain Bases, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: [Objective] The effects of ridge tillage patterns on soil erosion at sloping croplands in the black soil region of Northeastern China were analyzed in order to provide scientific guidance for soil erosion control in this region. [Methods] The simulated rainfall experiments were conducted at the sloping croplands with the 5° and 10° slope gradients. The simulated rainfall intensities were 50 and 100 mm/h. This study took the traditional up-and downslope ridge tillage as the control treatment. The ridge tillage patterns included contour ridge tillage, ridge-furrow intervals tillage, up and down slope ridge + bottom contour ridge tillage, and contour ridge + drainage ditch tillage. [Results] Under the experimental conditions, the contour ridge tillage, ridge-furrow intervals tillage, up and down slope ridge + bottom contour ridge tillage, and contour ridge + drainage ditch tillage effectively regulated runoff and decreased soil erosion, compared with control treatment. However, the regulation effect of different ridge tillage patterns on runoff and erosion decreased with the increase of rainfall intensity and slope gradient. For the 5° sloping cropland, the regulation effect of

收稿日期: 2021-09-23

修回日期: 2021-11-01

资助项目: 国家重点研发计划项目“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(2016YFE0202900); 国家自然科学基金项目(41801328; 41601281)

第一作者: 牟廷森(1997—), 男(汉族), 四川省绵阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀过程与机理。Email: moutingsen@163.com.

通讯作者: 沈海鸥(1986—), 女(汉族), 吉林省大安市人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀过程与机理方面的研究。Email: shensusan@163.com.

contour ridge tillage treatment on runoff and erosion was the best. The runoff rates and soil erosion rates were stable below 15.0 mm/h and 0.2 kg/(m² · h). Under the rainfall intensity of the 50 and 100 mm/h, the runoff was reduced 92.3% and 83.9% respectively, and the soil erosion reduced 96.8% and 94.6% respectively, compared with the control treatments. The runoff reduction and soil erosion reduction benefits of ridge-furrow intervals tillage treatment was slightly greater than those of up and down slope ridge + bottom contour ridge tillage treatment at the 5° sloping cropland. For the 10° sloping cropland, the contour ridge tillage treatment showed better soil water storage and soil conservation capacity in the early stage of rainfall events compared with that of the other ridge tillage patterns. However, the ridges were easy to be damaged in the later stage of rainfall events, caused a rapid increase in soil erosion. In contrast, the contour ridge + drainage ditch tillage treatment could store soil and water in the early stage of rainfall events, and better drained away water in the later stage of rainfall events. [Conclusion] As to gentle sloping croplands, the contour ridge tillage and ridge-furrow intervals tillage patterns should be optimized, in the sloping farmland with steep slope, the contour ridge + drainage ditch tillage pattern should be preferred. Therefore, it is suggested to select suitable ridge tillage patterns according to slope gradients and rainfall characteristics.

Keywords: ridge pattern; runoff reduction benefits; soil erosion reduction benefits; sloping cropland; black soil region

东北黑土区是中国重要的粮食产区及商品粮基地,然而由于气候、地形及人为等因素的影响,导致黑土资源流失严重,黑土层变薄、变瘦、变硬,严重影响中国粮食安全与农业可持续发展^[1]。东北黑土区年平均气温较低,为提高坡耕地土温和增加作物产量,普遍采用垄作耕作方式^[2-3],不同垄作方式及垄体形状通过改变坡耕地地表微地形,进而影响其径流及土壤侵蚀特征^[4]。由于东北黑土区地形多为漫川漫岗,坡耕地地块长度较长,顺坡垄作及斜坡垄作促进径流形成,导致土壤侵蚀加剧。王磊等^[5]通过野外观测得出,东北黑土区顺坡大垄比常规垄的防治坡面土壤侵蚀效果好。桑琦明等^[6]通过对比斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀特征发现,斜坡垄作在断垄前土壤侵蚀速率均低于顺坡垄作,但其在断垄后的一定时间内,土壤侵蚀速率高于顺坡垄作。此外,牛晓乐等^[7]研究发现,相同降雨强度下,横坡垄作、顺坡垄作+垄向区田、横坡垄作+垄向区田与顺坡垄作相比,均有一定程度的径流和侵蚀调控作用,横坡垄作+垄向区田的调控效果最为明显。由此可见,现有研究主要集中在两种或相似几种垄作措施之间的对比,而不同垄作方式对坡耕地径流和侵蚀的调控效果缺少系统研究,且对于垄作+排水沟方面研究也缺少报道。因此,本研究通过野外原位模拟降雨试验,分析横坡垄作、垄向区田、顺垄+底部横垄、横垄+排水沟等不同垄作方式对坡耕地土壤侵蚀的调控效果,以期黑土区土壤侵蚀防治提供科学指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况与试验小区

试验于 2018 年在吉林省商品粮基地土壤资源可

持续利用重点实验室的水土保持科研基地(东经 125°21', 北纬 43°52')开展。研究区属于温带大陆性季风气候,地势平坦开阔,年均降水量 617 mm,年均气温 4.8 °C^[8]。主要种植作物为玉米和大豆,供试土壤为黑土,其颗粒组成为:砂粒(>50 μm)质量分数 30.4%,粉粒(2~50 μm)质量分数 48.3%,黏粒(<2 μm)质量分数 21.3%,有机质含量为 25.9 g/kg。

野外模拟降雨试验采用的径流小区修筑在原位坡耕地上,耕作层平均土壤容重为 1.20 g/cm³。径流小区规格为 5 m(水平投影长度)×2 m(宽度)。径流小区边壁材料选用聚丙烯板,将其埋入地下 30 cm,用于防止水分入渗的影响;地表留出 20 cm,用于防止雨滴击溅以及地表径流溢出,从而保证形成相对完整独立的径流小区。小区底部设有圆柱状集流桶,用于收集试验过程中的径流泥沙样品。降雨设备采用侧喷式单喷头降雨装置^[9],降雨高度为 6 m^[10],降雨均匀度大于 85%,降雨强度主要通过调节压力阀和喷头孔径(5~12 mm)来控制,降雨强度可调节范围为 30~165 mm/h^[11]。

1.2 试验设计

径流小区坡面处理包括 7 组,其中,5°坡面 4 组(顺坡垄作,横坡垄作,垄向区田,顺垄+底部横垄),10°坡面 3 组(顺坡垄作,横坡垄作,横垄+排水沟)。具体处理为:①顺坡垄作和横坡垄作。按照野外坡耕地垄规格实测资料和相关研究成果^[12-13],将常规垄规格设计为垄间距 65 cm,垄丘顶宽 20 cm,垄高 15 cm;顺垄长度为 5 m,横垄长度为 2 m。②垄向区田。在垄沟中隔一定距离修筑小土垅,以研究区 10 a 一遇极端降雨强度为依据,将土档间距设计为

65 cm,高度略低于垄高,设计为 10 cm,土档底宽度为 20 cm。③顺垄+底部横垄。小区顶部修筑常规顺垄,顺垄长度为 3.7 m;底部修筑两条常规横垄。④横垄+排水沟。自径流小区顶部至出水口,紧贴径流小区一侧边壁,修一条长 5 m,宽 15~20 cm 的排水沟,并用耕作工具将其压实,使排水沟与横垄垄沟底保持水平。垄向区田、顺垄+底部横垄、横垄+排水沟处理的垄规格与顺坡垄作和横坡垄作处理的垄规格相同。

根据文献[14]中关于东北地区暴雨的研究,将降雨强度设计为 50 和 100 mm/h^[14],为保证降雨总量(50 mm)相同,降雨历时分别设计为 60,30 min(表 1)。由于典型黑土区严重侵蚀坡耕地坡度为 3°~8°^[15],据此将试验径流小区坡度设计为 5°和 10°,每个试验处理重复 2 次,第 1 次试验与起垄时间间隔 1 周,第 2 次试验与第 1 次试验间隔 2 周。具体试验设计详见表 1。

表 1 野外模拟降雨试验和径流小区设计

垄作方式	坡度/(°)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨历时/ min
顺坡垄作	5	50	60
	10	100	30
横坡垄作	5	50	60
	10	100	30
垄向区田	5	50	60
		100	30
顺垄+底部横垄	5	50	60
		100	30
横垄+排水沟	10	50	60
		100	30

1.3 试验方法

采用 30 mm/h 降雨强度进行预降雨,至径流小区坡面刚开始积水即停止,主要目的是保证试验前期径流小区土壤水分条件的一致性^[16]。各试验处理前期土壤质量含水率为(21.7±1.0)%。预降雨结束后,为防止径流小区土壤水分蒸发和减缓结皮的形成,采用塑料布对径流小区表面进行覆盖,静置 24 h 待开展正式模拟降雨试验。模拟降雨试验开始前,为确保试验的准确性,对降雨强度进行率定,当实测降雨强度与目标降雨强度的差值小于 5%,降雨均匀度大于 85%时方可揭开塑料布进行正式模拟降雨。径流小区开始产流后,接取径流泥沙样品并记录初始产流时间,取样间隔为 1~4 min,具体取样时间视径流

泥沙样品量而定。模拟降雨试验结束后,称取各径流泥沙样品的总质量,并将其静置 6~8 h,倒掉其上清液后转移到已知质量的铝盒中,将其放入设置恒温为 105 °C 的烘箱中烘干至恒重后称量,用以计算产流率、土壤侵蚀速率、径流量和土壤侵蚀量等^[17]。

1.4 数据处理分析

使用 Excel 2010 和 SPSS 19.1 进行数据处理与分析;采用 Excel 2010 计算径流量、土壤侵蚀量,绘制产流率和土壤侵蚀速率随降雨历时的变化过程图;采用 SPSS 19.1 中方差分析、多重比较(LSD)和独立样本 *t* 检验,进行不同垄作方式,50 及 100 mm/h 降雨强度下径流量和土壤侵蚀量显著性水平检验($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同垄作方式对坡耕地径流和侵蚀的调控效果分析

2.1.1 径流调控效果 试验条件下,顺坡垄作(对照)处理的径流量显著高于其他垄作方式(表 2)。对于 5°坡耕地,在 50 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作处理的径流量是横坡垄作、垄向区田和顺垄+底部横垄处理的 13.0,2.0 和 2.3 倍;在 100 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作处理的径流量是横坡垄作、垄向区田和顺垄+底部横垄处理的 6.2,1.7 和 1.7 倍。横坡垄作处理的径流调控效果最好,在 50,100 mm/h 降雨强度下,与顺坡垄作处理相比,横坡垄作处理分别减少径流 92.3%和 83.9%;而垄向区田和顺垄+底部横垄处理的径流调控效果比较相近,其分别减少径流 49.6%~55.5%和 40.8%~41.3%。对于 10°坡耕地,顺坡垄作和横坡垄作处理的径流量与 5°坡耕地相比均有不同程度的增加,其中顺坡垄作处理的增幅相对较小,增幅为 17.0~24.6 L,横坡垄作处理的增幅较大,增幅为 76.2~187.2 L。但是,随着坡度的增加,横坡垄作处理的径流调控效果有所降低,在 50,100 mm/h 降雨强度下,与顺坡垄作处理相比,横坡垄作处理分别减少径流 75.7%和 38.1%。10°坡耕地条件下,50 mm/h 降雨强度时顺坡垄作、横坡垄作和横垄+排水沟 3 者间径流量均有显著性差异,而 100 mm/h 降雨强度时横坡垄作和横垄+排水沟处理的径流量无显著性差异。此外,50,100 mm/h 降雨强度下,横垄+排水沟处理的径流调控效果相差不大,与顺坡垄作处理相比,分别减少径流 47.8%和 40.6%。随着降雨强度和坡度的增大,不同垄作方式的径流量有不同程度的增加,其径流调控效果相应减小(表 2)。分析其原因可能是由于顺坡垄作处理能够有效导水排水,从产流开始即形成较大的径流,而横坡垄作、垄向区

田、顺垄+底部横垄和横垄+排水沟处理具有横挡措施,在降雨前期能够不同程度地拦蓄降水,增加雨水在垄沟的滞留时间,从而增加土壤水分入渗量,减少径流量;但是,部分垄作处理的垄丘在坡度增大或降雨强度增强后易发生细沟侵蚀,甚至垮塌,不但没有起到较好的蓄水效果,反而易造成较大的径流冲刷作用^[18]。有研究表明坡度增加后,径流流速相对增大,

从而减少了径流在坡面滞留的时间和入渗量,导致坡面径流量迅速增加^[19]。综上所述,当坡度较缓(5°),降雨强度较小(50 mm/h)时,横坡垄作方式具有很好的径流调控效果,而坡度较大(10°),降雨强度较大(100 mm/h)时,横坡垄作方式的径流调控效果降低;垄向区田、顺垄+底部横垄和横垄+排水沟方式的径流调控效果较低且较为稳定。

表 2 不同垄作方式下坡耕地径流量及其径流调控效果对比

坡度	垄作方式	降雨强度 50/(mm·h ⁻¹)		降雨强度 100/(mm·h ⁻¹)	
		径流量/L	减少比例/%	径流量/L	减少比例/%
5°	顺坡垄作	421.6 ^{Aa}	0	444.6 ^{Aa}	0
	横坡垄作	32.4 ^{Ac}	92.3	71.6 ^{Ac}	83.9
	垄向区田	212.3 ^{Ab}	49.6	260.8 ^{Ab}	41.3
	顺垄+底部横垄	187.6 ^{Bb}	55.5	263.0 ^{Ab}	40.8
10°	顺坡垄作	446.2 ^{Aa}	0	461.6 ^{Aa}	0
	横坡垄作	108.6 ^{Bc}	75.7	285.8 ^{Ab}	38.1
	横垄+排水沟	232.8 ^{Ab}	47.8	274.2 ^{Ab}	40.6

注:同行不同大写字母表示相同坡度下不同降雨强度处理的总径流量在 $p < 0.05$ 水平上差异显著;同列不同小写字母表示相同坡度及降雨强度下不同垄作方式的总径流量在 $p < 0.05$ 水平上差异显著

2.1.2 土壤侵蚀调控效果 试验条件下,顺坡垄作(对照)处理的土壤侵蚀量显著高于其他垄作方式(表 3)。对于 5°坡耕地,在 50 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作处理的土壤侵蚀量分别是横坡垄作、垄向区田和顺垄+底部横垄处理的 31.6, 10.5 和 8.6 倍;在 100 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作处理的土壤侵蚀量分别是横坡垄作、垄向区田和顺垄+底部横垄处理的 18.5, 5.0 和 4.8 倍。横坡垄作处理的侵蚀调控效果较高,垄向区田和顺垄+底部横垄处理的侵蚀调控效果相近,在 50, 100 mm/h 降雨强度下,与顺坡垄作处理相比,横坡垄作处理的土壤侵蚀量分别降低 96.8% 和 94.6%;垄向区田和顺垄+底部横垄处理的土壤侵蚀量分别降低 88.4%~90.5% 和 79.2%~79.8%,且随着降雨强度的增加,垄向区田和顺垄+底部横垄 2 种垄作方式的侵蚀调控效果降低 10% 左右。对于 10°坡耕地,在 50 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作处理的土壤侵蚀量分别是横坡垄作和横垄+排水沟处理的 20.2 和 9.1 倍,在 100 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作处理的土壤侵蚀量分别是横坡垄作和横垄+排水沟处理的 2.9 和 7.7 倍。随着降雨强度的增加,横坡垄作处理降低的土壤侵蚀量由 95.0% 减小到 65.2%,横垄+排水沟处理降低的土壤侵蚀量由 89.0% 减小到 87.0%。造成上述结果的原因是由于试验坡耕地为翻耕裸露

处理,顺坡垄作处理从开始产流便持续地搬运泥沙,直至降雨结束,导致其土壤侵蚀量最大^[6];横坡垄作处理在坡度较缓和降雨强度较低时具有较强的保水拦沙能力,而在坡度较大和降雨强度较大时易发生漫垄现象,其垄体也易发生损坏,短时间内即形成较大径流,产生较多易被搬运的泥沙^[18],因此,横坡垄作处理具有较好的侵蚀调控效果,但是这种效果随着坡度和降雨强度的增加而减小;垄向区田、顺垄+底部横垄和横垄+排水沟处理具有横挡措施,在降雨前期横挡能够有效拦截径流泥沙^[20],因此,与顺坡垄作处理相比,其减少侵蚀比例均可达到或超过 80.0%(表 3)。综上所述,横坡垄作、垄向区田、顺垄+底部横垄和横垄+排水沟均能利用措施中的横挡在一定程度上蓄水保土,减少土壤侵蚀;不同坡度和降雨强度下其侵蚀调控效果不同,在 5°坡耕地,侵蚀调控效果基本表现为:横坡垄作 > 垄向区田 > 顺垄+底部横垄 > 顺坡垄作;在 10°坡耕地,降雨强度较小(50 mm/h)时,横坡垄作处理的侵蚀调控效果高于横垄+排水沟处理,而降雨强度较大(100 mm/h)时,横坡垄作处理的侵蚀调控效果低于横垄+排水沟处理。因此,建议根据具体的地形坡度和降雨特征,在东北黑土区坡耕地筛选适宜的垄作方式,从而有效调节径流和防治土壤侵蚀。

表 3 不同垄作方式下坡耕地的土壤侵蚀量及其侵蚀调控效果对比

坡度	垄作方式	降雨强度 50/(mm·h ⁻¹)		降雨强度 100/(mm·h ⁻¹)	
		土壤侵蚀量/kg	减少比例/%	土壤侵蚀量/kg	减少比例/%
5°	顺坡垄作	8.84 ^{Ba}	0	9.25 ^{Aa}	0
	横坡垄作	0.28 ^{Ab}	96.8	0.50 ^{Ac}	94.6
	垄向区田	0.84 ^{Bb}	90.5	1.87 ^{Ab}	79.8
	顺垄+底部横垄	1.03 ^{Bb}	88.4	1.92 ^{Ab}	79.2
10°	顺坡垄作	9.21 ^{Ba}	0	11.43 ^{Aa}	0
	横坡垄作	0.46 ^{Bb}	95.0	3.98 ^{Ab}	65.2
	横垄+排水沟	1.01 ^{Bb}	89.0	1.49 ^{Ac}	87.0

注:同行不同大写字母表示相同坡度下不同降雨强度处理的总侵蚀量在 $p < 0.05$ 水平上差异显著;同列不同小写字母表示相同坡度及降雨强度下不同垄作方式的总侵蚀量在 $p < 0.05$ 水平上差异显著

2.2 不同垄作方式对坡耕地径流和侵蚀过程的影响分析

2.2.1 不同垄作方式产流率随降雨历时的变化 对于 5°坡耕地,在 50 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作(对照)处理的产流率随降雨历时的变化呈现逐渐增加并趋于稳定的趋势,其值稳定在 50.0 mm/h 上下;而横坡垄作处理的产流率随降雨历时的变化值和波动幅度最低,其值稳定在 8.0 mm/h 上下;垄向区田处理的产流率,在降雨历时 42 min,降雨量达到 36 mm 之前,其值明显低于顺坡垄作处理,但是当降雨 42 min 后,垄向区田处理蓄水能力达到最大值,雨水漫出横挡措施,其产流率开始增加,并呈现小幅波动,最大值为 88.5 mm/h,其后产流率开始逐渐减小;顺垄+底部横垄处理的前期产流率变化与横坡垄作处理相近,但是当降雨历时达到 48 min 时,顺垄+底部横垄处理的底部横垄出现漫垄现象并局部损坏,产流率迅速增加,最大值为 317.4 mm/h(图 1)。

在 100 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作处理的产流率随降雨历时表现为先逐渐增加后趋于稳定的变化,在 17 min 时发生转折,此时降雨量约为 26 mm,产流率稳定在 130.0 mm/h 左右;横坡垄作处理的产流率随降雨历时的变化值和波动幅度依然最低,其值稳定在 12.0~21.0 mm/h;垄向区田处理的产流率,在降雨 11 min,降雨量达到 15 mm 之前,其值较低,与横坡垄作处理相近,但是当降雨 11 min 后,垄向区田处理横挡发生漫流,产流率开始增长,并在降雨 14 min,降雨量达到 22 mm 后趋于稳定,其值稳定在 80.0 mm/h;顺垄+底部横垄处理的前期产流率亦较低,但是在降雨 12 min,降雨量达到 18 mm 左右时,横垄部分蓄水达到极限,出现漫垄现象,并且横垄局部损坏,产流率迅速增大,从 35.0 mm/h 左右增长至 338.3 mm/h,随后又迅速减小并稳定在 40.0 mm/h 左右。

由此可知,坡度较缓(5°)时,在降雨前期或降雨量较小时,顺坡垄作处理的产流率最大,横坡垄作处理的产流率最小,垄向区田处理的产流率也明显低于顺坡垄作处理;当降雨时间延长或降雨量较大时,垄向区田和顺垄+底部横垄处理在 50 mm/h 降雨强度下,降雨历时分别为 42,48 min 时,在 100 mm/h 降雨强度下,降雨历时分别为 11,12 min 时,保水蓄水能力开始减弱,产流率会在短时间内迅速增加,甚至高于顺坡垄作处理,而且随着降雨强度的增加,不同垄作方式之间的产流率随降雨历时变化的差异越大,这种表现越明显(图 1)。

分析原因是,顺坡垄作处理的垄沟有利于雨水汇集形成径流;而横坡垄作处理可将雨水存蓄于垄沟中,延长雨水在垄沟内的滞留时间,导致降雨入渗增强^[21],从而显著减小径流;垄向区田处理的垄沟有较多横向土挡,能够拦截贮存雨水,提高土壤水分入渗率,较好地平衡了径流和土壤水分入渗的矛盾^[22],但随着降雨的持续,土壤水分入渗率降低,雨水蓄积,土挡易损坏并发生细沟侵蚀,土挡防治能力减弱,导致产生较大径流;顺垄+底部横垄处理因底部设有横垄,可有效拦截顶部顺垄垄沟汇集形成的径流,雨水在横垄垄沟处滞留^[23],导致其前期产流率与横坡垄作处理的产流率相近,然而随着降雨历时的不断增大,加之顶部顺垄垄沟内蓄积的雨水不断增多,导致底部横垄逐渐损坏,演变为细沟侵蚀,进而形成大量径流,且降雨强度或降雨量越大,顺垄+底部横垄处理的断垄现象越显著^[24]。

因此,对于 5°坡耕地,顺坡垄作处理的垄沟能够较好地排水导水,横坡垄作处理能够很好地保水,垄向区田和顺垄+底部横垄处理在短时间和降雨前期也能较好地保水,但降雨时间过长或降雨量较大时则易发生损坏,短时间内形成较大径流。

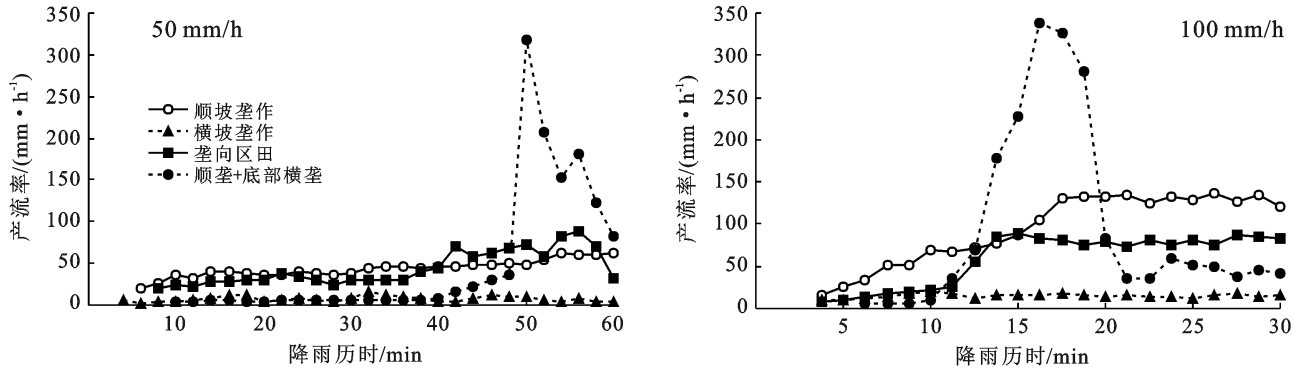


图 1 5°坡耕地 50,100 mm/h 降雨强度下不同垄作方式产流率随降雨历时的变化

对于 10°坡耕地,在 50 mm/h 降雨强度下,顺坡垄作(对照)处理的产流率随降雨历时的变化呈现逐渐增加并趋于稳定的趋势,其值亦稳定在 50.0 mm/h 上下;而横坡垄作处理的产流率,在降雨 32 min,降雨量达到 26 mm 之前,其值明显低于顺坡垄作与横垄+排水沟处理,在降雨 32 min 后,出现漫垄现象,产流率显著增加并趋于相对稳定,其产流率甚至高于顺坡垄作与横垄+排水沟处理;横垄+排水沟处理的产流率随降雨历时的变化也呈现逐渐增加并趋于稳定的趋势,在降雨前期,其值明显低于顺坡垄作处理,而高于横坡垄作处理,但是随着降雨历时的增加,其值与顺坡垄作和横坡垄作处理的稳定产流率相近(图 2)。在 100 mm/h 降雨强度下,不用垄作方式的产流率均呈先快速增长后趋于稳定或减小的趋势,其中顺坡垄作处理的产流率增长最为迅速,从产流开始到降雨 14 min 时达到相对稳定,稳定值为 130.0 mm/h 左右;横坡垄作处理在降雨 15 min 时,出现漫垄现象,产流率增长速度加快,到降雨 24 min 时垄体出现局部损坏,产流率短时间瞬间增大,其值高达 200.2 mm/h,是 50 mm/h 降雨强度下横坡垄作处理最大产流率的 3.0 倍,其后产流率又逐渐减小,在降雨结束时产流率降至 95.6 mm/h;横垄+排水沟处理的产流率低于顺坡垄作处理,而高于横

坡垄作处理,从产流开始直到降雨 24 min 左右,横坡垄作处理的产流率一直呈现增长趋势,其后稳定在 105.0 mm/h 左右。

坡度较大(10°)时,在 50,100 mm/h 降雨强度下,不同垄作方式的产流率均随降雨历时的增加而逐渐增大,在降雨后期,不同垄作方式的稳定产流率相近(图 2)。分析原因主要是,顺坡垄作处理在坡度较大时,其汇流作用更加显著,形成较大的产流率;横坡垄作处理的产流率在漫垄和断垄现象发生前较小,在漫垄和断垄后土壤侵蚀方式演变为细沟侵蚀^[25],且随着降雨强度的增加,雨滴动能增强,导致横垄垄丘多处出现细沟,最终发生垄丘垮塌,导致产流率迅速达到极值;横垄+排水沟处理在降雨前期大部分雨水滞留于垄沟,导致降雨前期坡面产流率低于顺坡垄作处理^[26],随着降雨历时或降雨量的增大,土壤含水量趋于饱和状态,横垄垄沟蓄水作用减弱,土壤水分入渗率也逐渐减小,垄沟内雨水逐渐涌向排水沟流出,导致坡面产流率逐渐增大,最后趋于相对稳定^[27]。可见,顺坡垄作方式的排水疏水能力最强,产流率较大;横坡垄作方式在降雨前期具有较好的保水蓄水作用,但在降雨后期垄体易损坏,造成短时间内形成强径流;横垄+排水沟方式在降雨前期能够蓄水保水,在降雨后期能够较好地排水。

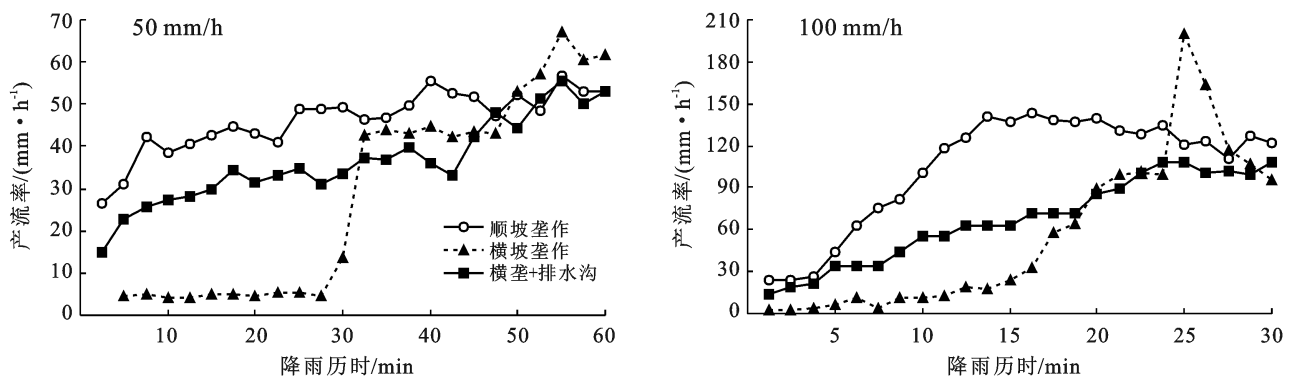


图 2 10°坡耕地 50,100 mm/h 降雨强度下不同垄作方式产流率随降雨历时的变化

2.2.2 不同垄作方式土壤侵蚀速率随降雨历时的变化 对于5°坡耕地,顺坡垄作(对照)处理土壤侵蚀速率随降雨历时的变化呈现先快速增加后减小并逐渐趋于相对稳定的趋势,在50,100 mm/h降雨强度下,顺坡垄作处理的平均土壤侵蚀速率分别为0.88,1.85 kg/(m²·h)(图3)。而另外3种垄作处理的土壤侵蚀速率均明显低于顺坡垄作处理,其大小整体表现为:顺坡垄作>顺垄+底部横垄>垄向区田>横坡垄作。随着降雨强度的增加,相同垄作方式的土壤侵蚀速率逐渐增大,且不同垄作方式的土壤侵蚀速率差异也逐渐增大。在2个降雨强度下,顺垄+底部横垄处理在降雨过程中土壤侵蚀速率有短时间内的迅速波动,其中,50 mm/h降雨强度下的波动发生在降雨50~57 min,降雨量为40~47 mm间,降雨50 min时雨水漫过底部横垄,垄体局部损坏时,土壤侵蚀速率开始迅速增长,到降雨52 min时达到最大值2.1 kg/(m²·h),降雨57 min时恢复相对稳定;100 mm/h降雨强度下的波动发生在降雨12~21 min,降雨量为18~33 mm间,波动时间提前,且波动幅度

增大,最大土壤侵蚀速率为5.6 kg/(m²·h)。分析原因是,试验坡耕地均为翻耕裸露处理,降雨初期其坡面含有大量松散碎屑物质,顺坡垄作处理的径流汇流较快,搬运能力较强,导致土壤侵蚀速率迅速增加并达到峰值^[28],其后,随着降雨的持续进行,坡耕地可供搬运的物质逐渐减少,导致其土壤侵蚀速率逐渐减小并趋向于相对稳定^[29];而横坡垄作处理对降雨和径流有最好的消减和调节作用,导致土壤侵蚀速率最低;垄向区田处理因蓄水能力弱于横坡垄作,且降雨量过大时垄沟间土垡易被损坏,致径流携沙流出,土壤侵蚀速率有一定变化;顺垄+底部横垄处理上部顺垄垄沟汇流较快,底部横垄在出现漫垄时易发生细沟侵蚀而损坏,在短时间内大量径流从损坏处流出,所以其挟沙能力相对较强^[30]。

此外,随着降雨强度的增大,雨滴打击和径流搬运能力增强,导致了土壤侵蚀速率的增加^[31]。因此,横坡垄作、垄向区田和顺垄+底部横垄处理在调节坡面径流过程的同时,也能有效调控坡面土壤侵蚀过程、降低土壤侵蚀速率。

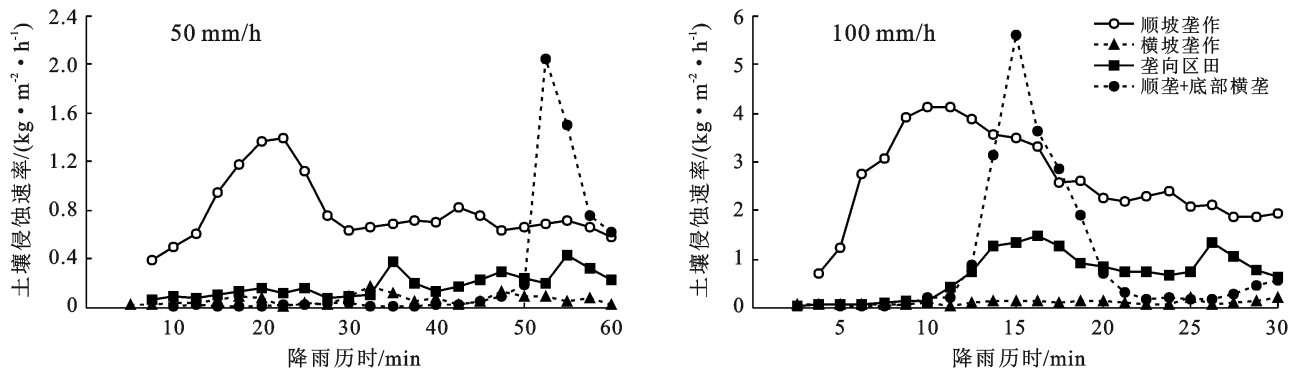


图3 5°坡耕地50,100 mm/h降雨强度下不同垄作方式土壤侵蚀速率随降雨历时的变化

对于10°坡耕地,在50 mm/h降雨强度下,不同垄作方式土壤侵蚀速率随降雨历时的变化与5°坡耕地相近,其中,顺坡垄作处理的土壤侵蚀速率随降雨历时的变化呈先增大再减小最后趋于稳定的趋势;横坡垄作和横垄+排水沟处理下土壤侵蚀速率均小于顺坡垄作处理,一直稳定在0.4 kg/(m²·h)以下,其平均土壤侵蚀速率大小表现为:顺坡垄作>横垄+排水沟>横坡垄作(图4)。

在100 mm/h降雨强度下,顺坡垄作处理的土壤侵蚀速率增长迅速,且增幅较大,在降雨11 min,降雨量为18 mm时达到最大值4.4 kg/(m²·h),随后逐渐降低,在降雨20 min左右趋于相对稳定;横坡垄作处理的土壤侵蚀速率在降雨19 min,降雨量为30 mm时开始快速增长,在降雨25 min,降雨量达到42 mm

时到达最大值5.4 kg/(m²·h),随后迅速下降;横垄+排水沟处理的土壤侵蚀速率在降雨16 min之前一直缓慢增长,降雨16 min、降雨量达到25 mm之后达到相对稳定状态。3种垄作方式平均土壤侵蚀速率大小主要表现为:顺坡垄作>横坡垄作>横垄+排水沟。造成上述结果的主要原因是,降雨初期坡耕地表面存在大量可供溅蚀和径流搬运的松散物质,随着降雨时间的推移,雨滴分散作用产生的微团聚体被径流优先搬运,此时坡面团聚体粒径较大,搬运难度增大,造成降雨后期雨滴打击作用和径流的搬运能力达到一个相对稳定状态^[32]。横坡垄作处理的垄丘在损坏前能很好地拦蓄径流泥沙,在降雨强度相对较小(50 mm/h)时,垄丘不易损坏;但是在降雨强度相对较大(100 mm/h)时,土壤水分入渗受到限制,加快了

对垄体的侵蚀,垄丘更易损坏,损坏后侵蚀方式以细沟侵蚀为主,前期蓄积的雨水顺势流出,土壤侵蚀强度在短时间内迅速增大^[6],因此,在 100 mm/h 降雨强度下,横坡垄作处理平均土壤侵蚀速率高于横垄+排水沟处理(图 4)。可见,横坡垄作和横垄+排水沟

能够降低土壤侵蚀速率,较好地拦截径流泥沙,但横坡垄作在降雨强度和坡度较大时,不能及时排出蓄水,容易损坏垄体,短时间内形成较高的土壤侵蚀速率,而横垄+排水沟既有一定的蓄水保土能力,又有较好的排水能力。

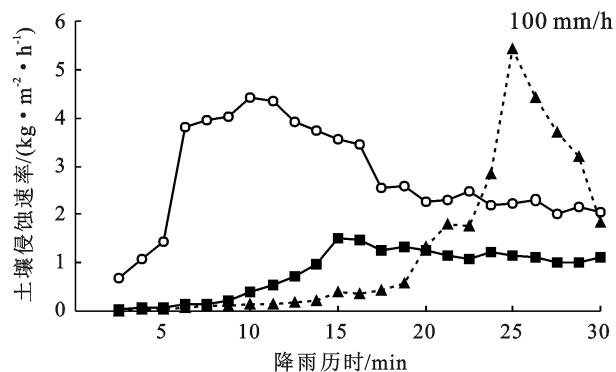
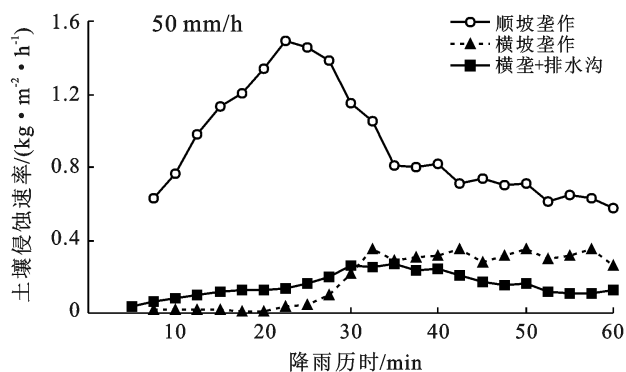


图 4 10°坡耕地 50,100 mm/h 降雨强度下不同垄作方式土壤侵蚀速率随降雨历时的变化

3 结论

(1) 试验条件下,对于 5°坡耕地,与顺坡垄作处理相比,横坡垄作处理径流和侵蚀调控效果较好,垄向区田和顺垄+底部横垄处理的径流和侵蚀调控效果相近。横坡垄作处理径流量和土壤侵蚀量分别减少 83.9%~92.3%和 94.6%~96.8%,垄向区田和顺垄+底部横垄处理径流量减少 40.8%~55.5%,土壤侵蚀量减少 79.2%~90.5%。对于 10°坡耕地,与顺坡垄作处理相比,在 50 mm/h 降雨强度下,横坡垄作处理的径流和侵蚀调控效果较好,其径流量和土壤侵蚀量分别减少 75.7%和 95.0%,在 100 mm/h 降雨强度下,横坡垄作处理的径流和侵蚀调控效果显著降低,其径流量和土壤侵蚀量分别减少 38.1%和 65.2%;横垄+排水沟处理的径流调控效果较低,而侵蚀调控效果较好,径流量和土壤侵蚀量分别减少 40.6%~47.8%和 87.0%~89.0%。

(2) 对于 5°坡耕地,在 50,100 mm/h 降雨强度下,横坡垄作处理均不会发生漫垄和断垄现象;垄向区田和顺垄+底部横垄处理在 50 mm/h 降雨强度下,分别在降雨 42,48 min 时发生漫垄;在 100 mm/h 降雨强度下,分别在降雨 11,12 min 时发生漫垄。对于 10°坡耕地,在 50 mm/h 降雨强度下,至降雨 32 min 左右发生漫垄,在 100 mm/h 降雨强度下,至降雨 15 min 发生漫垄。在发生漫垄现象后,不同垄作方式的径流和侵蚀调控效果减弱。

综上所述,横坡垄作、垄向区田、顺垄+底部横垄和横垄+排水沟均能够在一定程度上蓄水保土,减少

土壤侵蚀;不同坡度和降雨强度下其径流调控效果和侵蚀调控效果均不同。因此,建议根据具体地形坡度和降雨特征,在东北黑土区坡耕地筛选适宜的垄作方式,从而有效调节径流、防治土壤侵蚀。

[参 考 文 献]

- [1] 刘卉芳,单志杰,秦伟,等.东北黑土区水土流失治理技术与模式研究评述[J].泥沙研究,2020,45(4):74-80.
- [2] Shi X H, Yang X M, Drury C F, et al. Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in Southwestern Ontario [J]. Soil & Tillage Research, 2012,120:1-7.
- [3] 刘继龙,刘璐,付强,等.黑土区玉米地土壤温度的时空变异性研究[J].灌溉排水学报,2019,38(1):31-35.
- [4] 罗键,尹忠,郑子成,等.不同降雨条件下紫色土横垄坡面地表微地形变化特征[J].中国农业科学,2016,49(16):3162-3173.
- [5] 王磊,师宏强,刘刚,等.黑土区宽垄和窄垄耕作的顺坡坡面土壤侵蚀对比[J].农业工程学报,2019,35(19):176-182.
- [6] 桑琦明,王磊,郑粉莉,等.东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析[J].水土保持学报,2020,34(3):73-78.
- [7] 牛晓乐,秦富仓,杨振奇,等.黑土区坡耕地几种耕作措施水土保持效益研究[J].灌溉排水学报,2019,38(5):67-72.
- [8] 朱姝,窦森,陈丽珍.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响[J].土壤学报,2015,52(4):747-758.
- [9] 胡伟,郑粉莉,边锋.降雨能量对东北典型黑土区土壤侵蚀的影响[J].生态学报,2016,36(15):4708-4717.
- [10] 陈科兵,吴发启,姚冲.黄土高原南部地区人工模拟暴雨

- 条件下不同坡度谷子坡耕地产流产沙过程[J].水土保持学报,2021,35(3):90-95,103.
- [11] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- [12] Wang Lei, Zheng Fenli, Zhang Xunchang, et al. Discrimination of soil losses between ridge and furrow in longitudinal ridge-tillage under simulated upslope inflow and rainfall [J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 198(C):104541.
- [13] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.
- [14] 罗亚丽,孙继松,李英,等.中国暴雨的科学和预报:改革开放 40 年研究成果[J].气象学报,2020,78(3):419-450.
- [15] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.
- [16] Polyakov V O, Nearing M A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions [J]. *Catena*, 2003,51(1):33-43.
- [17] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J].农业机械学报,2015,46(8):104-112,89.
- [18] 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.
- [19] 徐相忠,刘前进,张含玉.降雨类型与坡度对棕壤垄沟系统产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):56-62,71.
- [20] 何晓玲,郑子成,李廷轩.不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J].中国农业科学,2013,46(12):2492-2500.
- [21] 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.
- [22] 刘慧,魏永霞,刘超,等.黑土区坡耕地水土保持技术模式对降雨径流过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):50-55.
- [23] 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.
- [24] 林艺,秦凤,郑子成,等.不同降雨条件下垄作坡面地表微地形及土壤侵蚀变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(3):32-38.
- [25] 安娟,殷小琳,李国会,等.雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):50-55,64.
- [26] Laura C, Paolo T, Alessandra C, et al. Evaluation of runoff and soil erosion under conventional tillage and no-till management: A case study in Northeast Italy [J]. *Catena*, 2021,197:104972.
- [27] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):18-23.
- [28] Parsons A J, Stone P M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion [J]. *Catena*, 2006,67(1):68-78.
- [29] 张晶玲,周丽丽,马仁明,等.天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程[J].水土保持学报,2017,31(5):114-119.
- [30] 安娟,高开通,丁柳,等.横坡垄作下雨型对褐土坡面细沟侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):32-38.
- [31] Yan Youjin, Dai Quanhou, Yuan Yingfei, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China [J]. *Geoderma*, 2018,330:30-40.
- [32] 张兴义,乔宝玲,李健宇,等.降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):110-117.