

耕作微地形单元对溅蚀的影响

王子轩¹, 吴发启², 陈科兵¹

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 探究不同微地形特征对溅蚀的影响,为黄土高原水土保持耕作方式提供科学布设依据。选取杨凌塬土为研究对象,通过室内人工模拟降雨试验,降雨强度分别为 20,40,60,80,100,120 mm/h,降雨历时 10 min,研究不同耕作措施(平整地、点种、条播)下造成的微地形单元对溅蚀的影响特征。结果表明:(1)不同坡度条件下(0°,6°,10°,13°,20°,26°)耕作微地形单元内的溅蚀总量随着降雨强度的增加呈线性增加($R^2 \geq 0.95$)。(2)微地形单元内的向下坡溅蚀量随着坡度和降雨强度的变化呈二元一次函数关系($R^2 \geq 0.90$)。(3)耕作微地形单元内微坡向影响溅蚀发生的方向和分布情况。研究结果为揭示溅蚀发生的原因和完善溅蚀机理提供了参考。

关键词: 条播;点种;溅蚀总分散量

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)02-0161-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.021

Effects of Microtopographic Unit Caused by Tillage on Soil Splash Erosion

WANG Zixuan¹, WU Faqi², CHEN Kebing¹

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100; 2.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to explore the effects of different microtopographic characteristics on splash erosion, so as to provide scientific basis for soil and water conservation tillage in the Loess Plateau, the Yangling Lou soil was taken as the research object. Through indoor artificial simulation rainfall experiment (rainfall intensity was 20 mm/h, 40 mm/h, 60 mm/h, 80 mm/h, 100 mm/h, 120 mm/h, respectively, lasting for 10 min), the influence of microtopographic units caused by different tillage measures (land leveling, dibble sowing, drill sowing) on splash erosion were studied. The results showed that: (1) Under different slope conditions (0°, 6°, 10°, 13°, 20°, 26°), the total amount of splash erosion in cultivated microtopographic unit increased linearly with the increases of rainfall intensities ($R^2 \geq 0.95$). (2) The amount of splash erosion on the downward slope in the microtopographic unit was a bivariate linear function with the changes of slope and rainfall intensities ($R^2 \geq 0.90$). (3) The micro slope direction in the cultivated micro terrain unit would affect the direction and distribution of splash erosion. The research results could provide a reference for revealing the causes of splash corrosion and perfecting the splash corrosion mechanism.

Keywords: drill sowing; dibble sowing; total dispersion of splash erosion

溅蚀作为降雨前期的主要侵蚀类型因导致土壤颗粒发生跃迁,压实地表形成结皮,造成土壤入渗能力下降、土壤生产力退化等现象^[1-4]而受到人们的广泛关注。Ellison 首次采用溅蚀杯法研究了雨滴溅蚀的特征,后来的研究者^[5-8]发现,土壤溅蚀量大小受到溅蚀杯半径大小的影响,为此先后出现了采用溅蚀板和溅蚀盘来研究溅蚀,其结果证实,溅蚀量随着降雨强度和坡度的增大而增大。可见,地形的形态特征是影响溅蚀量大小的主要因素之一。在长期的生产实践中,人们创造性地构建了农业耕作技术体系,特别是耕作措施形成高低起伏的微地形,实现蓄水、保墒和增产的目标。与此同时,对溅蚀也产生了影响。降雨过程中微地形总是处于一个动态的变化过程,且不同降雨条件下不同管理措施坡面地表微地形表现出

收稿日期:2021-08-16
资助项目:国家自然科学基金项目(41977065)
第一作者:王子轩(1997—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:709728063@qq.com
通信作者:吴发启(1957—),男,博士,教授,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:wufaqi@263.net

一定程度的不规则性^[9-10]。关于微地形对土壤溅蚀影响的研究成果存在较大的差异。郑子成等^[11]经过降雨模拟试验后得出,在降雨作用后地表的随机糙度变化呈增加趋势,在降雨强度增加的情况下,随机糙度的变化量也呈增加趋势,并在 2 m×1 m 的冲刷槽上,采用人工模拟降雨的方法得出顺坡垄作和横坡垄作在大雨强条件下向下坡、上坡及溅蚀总分散量增加^[12];赵龙山等^[13]在 1 m×0.5 m×0.5 m 的土槽中通过对锄耕、掏挖、等高耕作等微地形特征的模拟得出,增大地表的糙度可以减弱溅蚀的作用。这些研究成果均是在冲刷槽中布设相同措施、不同数量的条件下得出的,是多个微地形的综合作用。现有微地形对土壤溅蚀量的研究均从大面积尺度上进行试验分析,对空间上不连续的微地形单元溅蚀量研究仍是一项空白。因此,本文以杨凌塬土为研究对象,通过模拟降雨试验,在 25 cm×20 cm×15 cm 尺寸装土槽上布设条播和点种耕作措施收集不同方向溅蚀量的方法,深入探究溅蚀的潜在机理,为黄土高原溅蚀发生的机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

选择陕西省杨凌示范区的坡耕地表层(0—20 cm)土壤为供试土样。土壤为塬土,其理化性质为有机质含量 7.4%,黏粒含量 30.3%,粉粒含量 50.8%,砂粒含量 21.5%。

1.2 试验装置

该试验于 2019 年 6—8 月在西北农林科技大学水土保持工程实验室进行。采用针头式模拟降雨机(图 1)。降雨机由恒压水箱、雨滴发生装置及钢筋框架三部分构成。通过调节水箱中玻璃管内水头高度改变水箱的压强使降雨强度恒定。雨滴发生装置为下喷式,由长方形凹槽和底部的 80 个针头组成。为解决雨滴始终打击在同一点的问题,在查阅了针头式模拟降雨机相关文献后,在雨滴发生装置的侧方安装了线性震动马达,改变雨滴下落的轨迹。

采用长 25 cm×宽 20 cm×高 15 cm 尺寸铁盒作为装土槽。收集装置为 2 块 122 cm×244 cm 的木工板拼接在一起,在木工板上按照方向的不同标定出北—西北、西北—西、西—西南、西南—南、南—东南、东南—东、东—东北、东北—北 8 个区域,并将每个区域按照<10,10~30,30~50 cm 的距离分为三部分(图 2)。进行预试验时发现,在任意雨强和坡度的条件下均未发生超过 50 cm 的土粒飞溅,故收集装置的距离范围上限为 50 cm。在每个网格中放置事先称好的滤纸,降雨结束后将每个区域的滤纸放入事先称好的铝

盒中,一并放入烘箱烘干并称重,烘干后将铝盒与滤纸的总重与降雨前铝盒与滤纸的总重作差视为每个区域的溅蚀量。称重时使用万分之一天平。

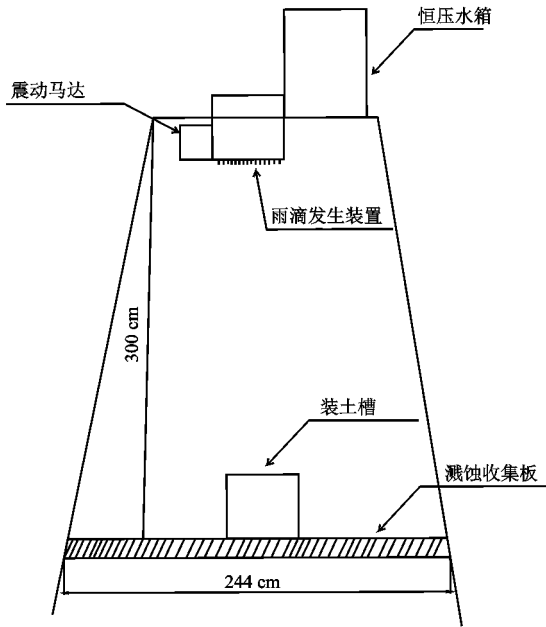


图 1 针头式模拟机降雨机示意

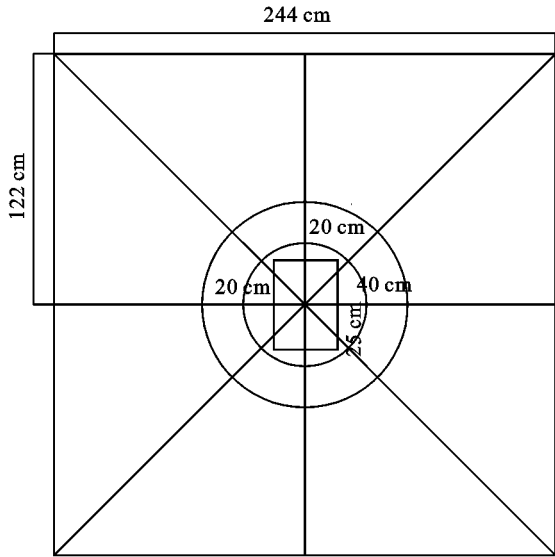


图 2 溅蚀收集盘示意

1.3 试验处理

该试验主要模拟平地上点种与条播(分为横向条播和纵向条播)对溅蚀的影响。以无耕作措施的平整地为对照,3 种措施分别通过掏挖和填土来实现。处理前将采集的土壤过 1 cm 筛,装槽填土时使容重保持在 1.20 g/cm³ 左右。降雨强度设定为 20,40,60,80,100,120 mm/h 6 个处理,降雨历时为 10 min。具体处理为:(1)对照,将土体压实装入土盒内,并将表面刮平,压碎大颗粒土块;(2)点种,在槽子的后方用撅头挖 1 个直径为 20 cm、深度为 10 cm 的小坑,挖出来的土就地堆放于槽子表面的正前方;(3)条播,在装土的同时沿槽子长边起土堆成三角形的土垄,垄

的底宽 20 cm,长 25 cm,垄高分别为 1.0,1.7,2.3,3.6,4.9 cm。试验时,首先将条播槽子放成东西向(定义为横向条播),下一轮将试验又将其放成南北向(定义为纵向条播),以模拟微地形倾向对溅蚀的影响(图 3)。采用 Origin 2017 软件进行不同雨强条件下耕作微地形特征与溅蚀量关系图的绘制,SPSS 20 软件进行数据的相关性检验。

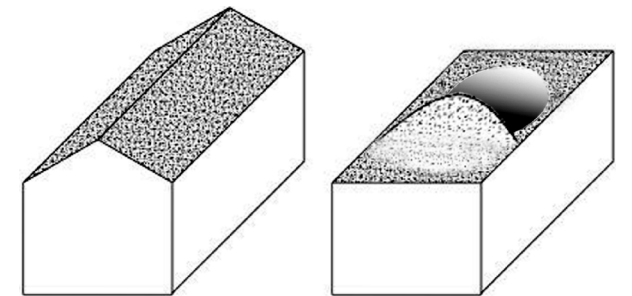


图 3 不同耕作微地形单元示意

2 结果与分析

2.1 不同耕作微地形溅蚀数量特征

表 1 为 3 种耕作措施的溅蚀总分散量特征。平地与点种的最大值是降雨强度为 120 mm/h 时造成的溅蚀总分散量,最小值是降雨强度为 20 mm/h 时造成的溅蚀总分散量。横向条播和纵向条播的最大值是降雨强度为 120 mm/h 且垄高为 4.9 cm 时造成的溅蚀总分散量,最小值是降雨强度为 20 mm/h 且垄高为 1 cm 时造成的溅蚀总分散量。由表 2 可知,相较于平整地,点种微地形单元的溅蚀总分散量的最大值和最小值分别减少 12%和 19.1%,平均值减少 4.6%。横向条播微地形单元的溅蚀总分散量的最大值和最小值分别增加 47.7%和 1.6%,平均值增加 14.9%。纵向条播的溅蚀总分散量的最大值和最小值分别增加 44.8%和 2.3%,平均值增加 14.1%。说明不同降雨强度、不同微地形特征条件下的溅蚀总量差异明显。

表 1 不同耕作微地形溅蚀总分散量特征

	单位:g			
溅蚀总分散量	平整地	点种	横向条播	纵向条播
最大值	20.369	17.918	30.040	29.491
最小值	6.867	5.549	6.974	7.031
平均值	13.308	12.684	15.287	15.183

2.2 坡度和降雨强度对溅蚀量的影响

不同坡度和降雨强度对溅蚀总分散量的影响存在显著差异。为研究坡度对溅蚀量的影响,将水平条播的隆起坡度设置为 0,6°,10°,13°,20°,26°,将向方溅蚀量定义为向下坡溅蚀量。从图 4 可以看出,向下坡溅蚀量随着坡度的增大显著增加。20,40 mm/h 降雨条件下向下坡溅蚀量随着坡度的增大分别增加

53.6%~176.5%和 56.6%~190.1%;60,80 mm/h 降雨条件下向下坡溅蚀量随着坡度的增大分别增加 55.1%~242.9%和 65.1%~260.5%;100,120 mm/h 降雨条件下向下坡溅蚀量随着坡度的增大分别增加 69.3%~282.3%和 69.1%~310.4%。

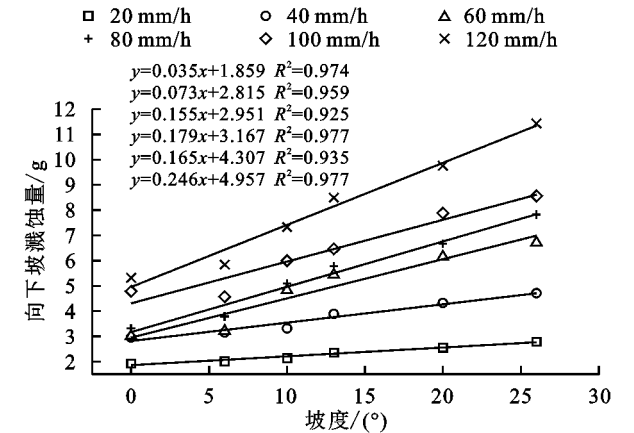


图 4 微坡度与向下坡溅蚀量的关系

从图 5 可以看出,溅蚀总分散量随着降雨强度的增加呈增加趋势。平整地(坡度为 0)和 6°坡面溅蚀总分散量随着降雨强度的增大分别增加 4.7%~44.9%和 6.8%~59.6%。10°和 13°坡面的溅蚀总分散量随着降雨强度的增大分别增加 6.6%~122.8%和 14.5%~136.2%。20°和 26°坡面的溅蚀总分散量随着降雨强度的增大分别增加 4.7%~87.3%和 9.9%~115.1%。

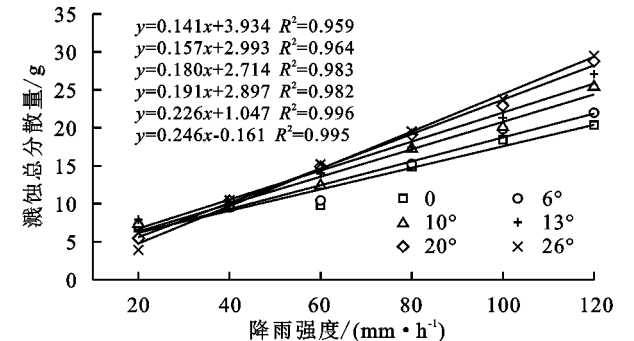


图 5 降雨强度与溅蚀总量的关系

通过对溅蚀向下坡溅蚀量和降雨强度及坡度进行多元回归分析,得到方程为:

$$Y=0.142I+0.053S-0.0373,R^2=0.905,n=36$$
(1)

式中:Y 为向下坡溅蚀量(g);I 为降雨强度(mm·h);S 为坡度(°);n 为样本数。

由回归方程可知,向下坡溅蚀量与降雨强度和坡度呈二元一次函数关系。向下坡溅蚀量与二者均呈现正相关关系。因为降雨强度和坡度的幂指数均为 1,说明在该试验条件下,降雨强度对向下坡溅蚀量的影响程度与坡度对向下坡溅蚀量的影响程度相近。

2.3 微坡向对溅蚀量的影响

从图 6 可以看出,微坡向对各方向溅蚀量的影响

明显。相较于平整地,点种微地形单元的向北方向溅蚀量增加 68.8%~227.0%,向南方向溅蚀量减少 57.5%~90.8%。向东方向溅蚀量和向西方向溅蚀量分别减少 24.1%~58.8%和 30.2%~57.7%。相较于平整地,纵向条播微地形单元的向东方向溅蚀量和向西方向溅蚀量分别增加 8.6%~197.1%和 18.9%~124.0%,向北方向溅蚀量和向南方向溅蚀量分别减少 40.1%~87.0%和 13.0%~58.9%。相较于平整地,水平条播微地形单元的向东方向溅蚀量和向西方向溅蚀量分别减少 27.2%~76.9%和 32.0%~73.0%。当降雨强度为 20 mm/h 时,水平条播微地形单元的向北方向溅蚀量和向南方向溅蚀量分别减少 26.4%和 10.8%。当降雨强度>20 mm/h 时,向北方溅蚀量和向南方向溅蚀量分别增加 59.6%~183.0%和 97.9%~217.1%。相较于平整地,点种微地形单元的向北方

向溅蚀量占溅蚀总分散量的百分比增加 82.9%~189.6%,向南方向溅蚀量占溅蚀总分散量的百分比减少 55.2%~87.6%。向东方向溅蚀量和向西方向溅蚀量占溅蚀总分散量的百分比分别减少 27.2%~47.9%和 26.4%~51.9%。相较于平整地,水平条播微地形单元的向北方向溅蚀量和向南方向溅蚀量占溅蚀总分散量的百分比分别增加 35.9%~81.6%和 55.5%~95.0%,向东方向溅蚀量和向西方向溅蚀量占溅蚀总分散量的百分比减少 49%~70.5%。相较于平整坡,纵向条播微地形单元的向北方向溅蚀量和向南方向溅蚀量占溅蚀总分散量的百分比分别减少 62.1%~86.1%和 41.1%~54.2%,向东方向溅蚀量和向西方向溅蚀量占溅蚀总分散量的百分比分别增加 41.2%~79.4%和 28.9%~96.6%。说明微坡向在微地形单元内改变溅蚀的方向和分布情况。

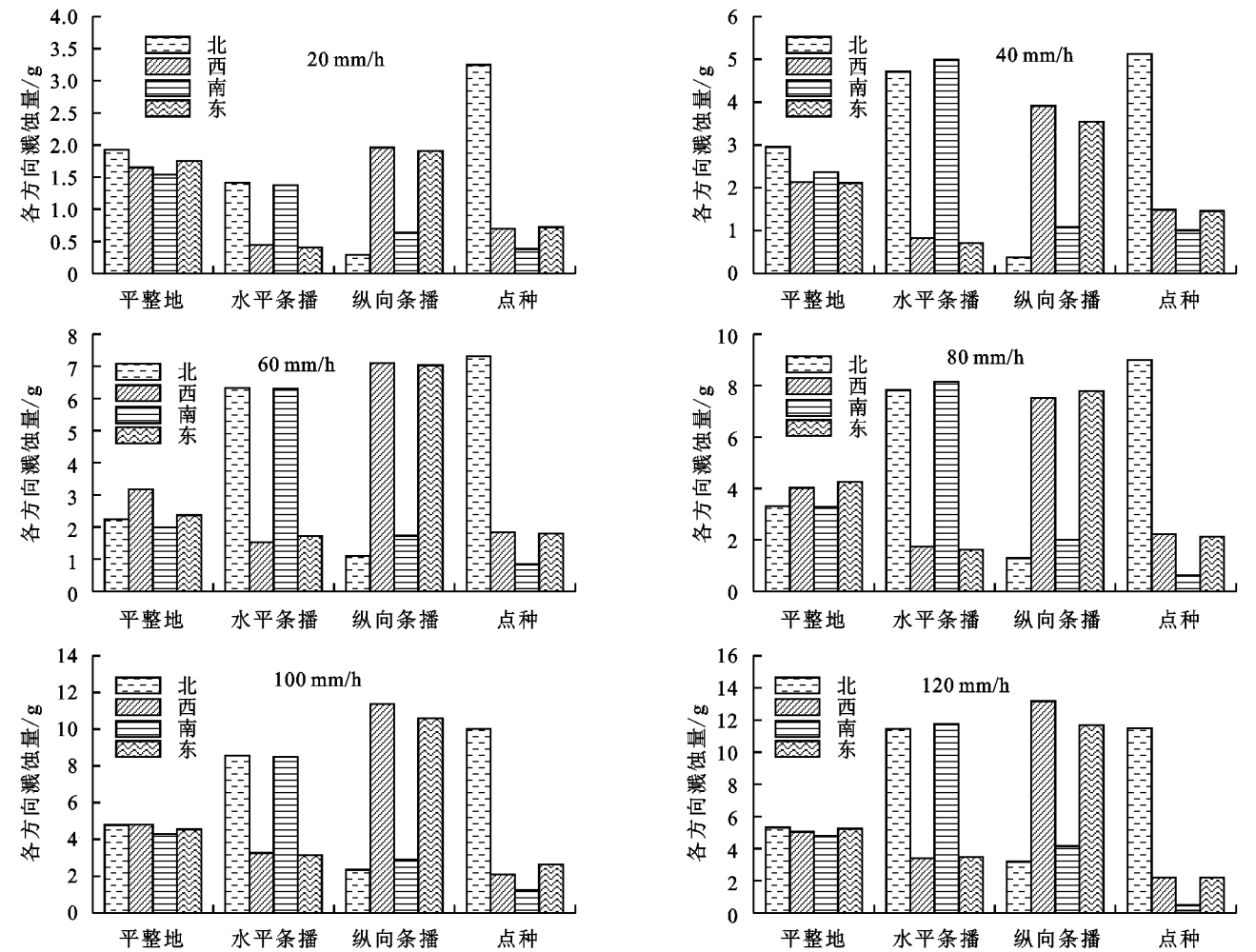


图 6 微坡向与溅蚀量关系

相关分析(表 2)表明,点种耕作微地形单元的降雨强度与北方向溅蚀量存在 0.1 水平上的显著相关,与东西方向溅蚀量存在 0.05 水平上显著相关。条播耕作微地形单元的降雨强度与每个方向的溅蚀量均存在 0.1 水平上的显著相关。

3 讨论

由结果分析可知,向下坡溅蚀量随着坡度和降雨强度的增加呈二元一次线性关系($R^2>0.9$),溅蚀总分散量随着降雨强度的增加呈线性增加($R^2>0.93$)。这与郑子成等^[11]对地表糙度对溅蚀量影响试验研究

的结果相似。坡度的增加导致土体表面产生沿着土体表面向下方向的剪切力,促使土粒更易向前方发生跃迁,雨滴与土粒撞击时垂直于斜面的分力变小使其对地面的压实效果变弱,且沿斜面向下的分力增大,因此导致向下坡溅蚀量的增加。坡度的增加使土壤含水量和土粒自身的黏结力下降,导致土粒本身更容易向下坡发生溅蚀^[14-15]。降雨强度的增大使雨滴动能增大,导致雨滴与土粒发生撞击后作为土粒发生跃迁的直接动能增大。同时降雨强度的增大后雨滴击打的频率更加密集,导致发生跃迁土粒数量的增加^[16-18]。坡度的增加导致土壤黏结力减弱,坡面稳定性下降,同时雨滴侧向剪切力的增大,使关系式(1)中回归系数 a 的值增大。宏观表现为随着坡度的增加,降雨强度对向下坡溅蚀量的影响更加明显^[19-22]。微坡向在微地形单元内改变溅蚀的方向和分布情况。由于微坡度的存在将平行于坡面的剪切力分为向上坡方向、向下坡方向和侧坡方向,相较于平整地,微坡度使剪切力沿向下坡方向的分力增加,向上坡的分力减小,造成土粒更易向下坡的方向发生跃迁。宏观表现为溅蚀朝着微坡向的方发生的百分比增加。点种措施的后半部分存在土坑,使部分土粒无法跃迁出土坑,同时前半部分的土堆微坡度存在差异,导致降雨强度与东西方向溅蚀量显著性降低,南方向相关性不显著。

表 2 降雨强度与不同坡向相关性

耕作措施	项目	北	南	东	西
点种	Pearson 相关性	0.993 **	0.151	0.896 *	0.880 *
	显著性(双侧)	0	0.775	0.016	0.021
	N	6	6	6	6
平整地	Pearson 相关性	0.921 **	0.956 **	0.966 *	0.989 **
	显著性(双侧)	0.009	0.003	0.002	0
	N	6	6	6	6
水平条播	Pearson 相关性	0.981 **	0.974 **	0.967 *	0.971 **
	显著性(双侧)	0.001	0.001	0.002	0.001
	N	6	6	6	6
纵向条播	Pearson 相关性	0.967 **	0.974 **	0.988 *	0.989 **
	显著性(双侧)	0.002	0.001	0	0
	N	6	6	6	6

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

前人的结论多基于野外径流观测和小区试验,本研究结论基于单位面积室内试验。由于耕作微地形单元影响溅蚀量的主要因素——土粒的重力和雨滴剪切力的大小均未发生变化,因此得出的结论可以进行对比。大面积尺度的溅蚀试验中,存在土槽内部土粒发生跃迁无法收集且向下坡溅蚀和向上坡溅蚀相互抵消的现象。因此与郑子成等^[12] 2 m×1 m 的冲刷槽试验和赵龙山等^[13] 1 m×0.5 m 的土槽模拟降

雨试验相比,本试验的单位面积溅蚀量同面积比例放大后显著高于前两者。因此,进行耕作微地形单元溅蚀量的研究十分必要。

4 结论

- (1)在雨滴剪切力和土粒重力的共同作用下,单位面积微地形单元的向下方溅蚀量在不同降雨强度条件下随着坡度的增大而增加 53.6%~310.4%。
- (2)不同坡度条件下单位面积微地形单元的溅蚀量随着雨强的增大而增加 4.7%~136.2%,随着坡度的增大,溅蚀总量随着雨强的增大趋势更明显。
- (3)微坡向在微地形单元内影响溅蚀方向和分布情况,沿微坡面方向的溅蚀量显著增加。

参考文献:

[1] Meyer L D, Harmon W C. How row-side slope length and steepness affect side slope erosion[J].Transactions of the ASAE,1989,32(2):639-644.

[2] Cook H L. The nature and controlling variables of the water erosion process[J].Soil Science Society of America Proceedings,1936,1:487-494.

[3] Prats S A, Malvar M C, Coelho C O A, et al. Hydrologic and erosion responses to compaction and added surface cover in post-fire logged areas: Isolating splash, interrill and rill erosion[J].Journal of Hydrology,2019,575:408-419.

[4] 吴普特,周佩华.地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J].水土保持通报,1991,11(3):8-13,28.

[5] 李叶鑫,吕刚,傅昕阳,等.降雨特性和坡度对辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):37-43.

[6] 秦越,程金花,张洪江,等.北京市褐土区降雨参数对土壤溅蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):16-20.

[7] 胡伟,郑粉莉,边锋.降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J].生态学报,2016,36(15):4708-4717.

[8] 江忠善,刘志.降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究[J].水土保持学报,1989(2):29-35.

[9] 郑子成,吴发启,何淑勤,等.片蚀与细沟间侵蚀过程中地表微地形的变化[J].土壤学报,2011,48(5):931-937.

[10] Le Bissonnais Y, Cerdan O, Lecomte V, et al. Martin variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion[J].Catena,2005,62(2/3):111-124.

[11] 郑子成,何淑勤,吴发启.降雨对地表糙度影响的研究[J].水土保持研究,2003,10(2):151-154.

[12] 秦凤,郑子成,李廷轩.玉米季坡耕地地表糙度的变化特征及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):18-22.

- [6] 马瑞琦,陶志强,王德梅,等.追氮量对强筋和中筋小麦产量与品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1799-1807.
- [7] 杨明晓,吴伟,张钧浩,等.不同追氮时期对强筋小麦产量、品质及氮素吸收利用的影响[J].河北农业大学学报,2020,43(2):11-18.
- [8] 巨晓棠.氮肥有效率的概念及意义:兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J].土壤学报,2014,51(5):921-933.
- [9] 刘瑞,戴相林,周建斌,等.不同氮肥用量下冬小麦土壤剖面累积硝态氮及其与氮素表观盈亏的关系[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1335-1341.
- [10] 袁浩,王继唯,李赟虹,等.氮肥基追比对小麦产量、土壤水分分布及利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):299-307.
- [11] 曹宏磊,朱宁远,颜廷梅,等.生物炭/DCD 对于淮河流域主要类型土壤 NO_3^- —N 淋失的影响[J].南京大学学报(自然科学版),2016,52(1):56-64.
- [12] 周伟,吕腾飞,杨志平,等.氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J].应用生态学报,2016,27(9):3051-3058.
- [13] 黄寅玲,雷忠顺,郑涛,等.不同施氮量对冬小麦产量、效益及土壤理化性状的影响[J].作物杂志,2020(1):130-135.
- [14] Leng L J, Huang H J, Li H, et al. Biochar stability assessment methods: A review[J].Science of the Total Environment,2018,647:210-222.
- [15] 史登林,王小利,段建军,等.氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4117-4124.
- [16] 陈心想,何绪生,耿增超,等.生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J].生态学报,2013,33(20):6534-6542.
- [17] 张迎春,颀建明,李静,等.生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):196-205.
- [18] 王俊红,王星琳,王康,等.生物有机肥替代化肥对小麦根际土壤环境的影响[J].华北农学报,2021,36(4):155-162.
- [19] 赵俊晔,于振文,李延奇,等.施氮量对土壤无机氮分布和微生物量氮含量及小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):466-472.
- [20] 翁玲云,杨晓卡,吕敏娟,等.长期不同施氮量下冬小麦—夏玉米复种系统土壤硝态氮累积和淋洗特征[J].应用生态学报,2018,29(8):2551-2558.
- [21] Chen J H, Liu X Y, Zheng J W, et al. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China[J].Applied Soil Ecology,2013,71:33-44.
- [22] 夏雪,谷洁,车升国,等.施氮水平对壤土微生物群落和酶活性的影响[J].中国农业科学,2011,44(8):1618-1627.
- [23] 黄媛媛,马慧媛,黄亚丽,等.生物有机肥和化肥配施对冬小麦产量及土壤生物指标的影响[J].华北农学报,2019,34(6):160-169.
- [24] 彭正萍,刘亚男,李迎春,等.持续氮素调控对小麦/玉米轮作系统氮素利用和表观损失的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):74-79.
- [25] 裴雪霞,党建友,张定一,等.化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质 and 水分利用率的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):250-258.

(上接第 165 页)

- [13] 赵龙山,梁心蓝,张青峰,等.裸地雨滴溅蚀对坡面微地形的影响与变化特征[J].农业工程学报,2012,28(19):71-77.
- [14] 尹武君,王健,刘旦旦.地表水层厚度对雨滴击溅侵蚀的影响[J].灌溉排水学报,2011,30(4):115-117.
- [15] 王子轩,吴发启.模拟降雨条件下坡度对关中地区壤土溅蚀的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1416-1422.
- [16] 郭维敏,李晓丽,王文,等.坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):1-9.
- [17] Michał B, Magdalena R, Agata S, et al. The mass ratio of splashed particles during raindrop splash phenomenon on soil surface[J].Geoderma,2019,347:40-48.
- [18] 程金花,秦越,张洪江,等.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J].农业机械学报,2015,46(2):153-161.
- [19] 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.
- [20] 沈海鸥,肖培青,李洪丽,等.黑土坡面不同粒级泥沙流失特征分析[J].农业工程学报,2019,35(20):111-117.
- [21] 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.
- [22] 郭维敏,李晓丽,王文,等.坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):1-9.