

垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响

何超¹, 王磊¹, 郑粉莉^{1,2}, 何煦¹, 富涵¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 定量评价垄作方式对坡面土壤侵蚀的影响, 可为坡面土壤侵蚀防治提供理论参考。基于 2012—2015 年哈尔滨市野外径流小区监测资料, 探讨了顺坡垄、横坡垄、无垄作(裸地休闲对照)垄作方式对坡面土壤侵蚀的影响, 分析了不同垄作方式下坡面水沙关系。结果表明: 不同垄作方式下径流量和侵蚀量均具有显著差异, 坡面径流量和侵蚀量均表现为无垄作 > 顺坡垄 > 横坡垄; 与无垄作试验处理相比, 横坡垄作使坡面径流量和侵蚀量平均减少了 92.4% 和 98.3%, 顺坡垄作使坡面径流量和侵蚀量平均减少 66.4% 和 72.2%。当坡度由 3° 增加到 5° 时, 无垄作、顺坡垄作、横坡垄作坡面侵蚀量分别增加了 0.8、8.2、5.5 倍。3 种垄作方式下坡面水沙关系均呈现出良好的相关关系, 顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀量随径流量的增加幅度远大于横坡垄作坡面, 当坡面径流量 > 10.0 mm 时, 二者坡面侵蚀量急剧增加。

关键词: 垄作方式; 土壤侵蚀; 水沙关系; 东北黑土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0024-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.004

Effects of Ridge Tillage on Hillslope Soil Erosion in Thin Layer Black Soil Region

HE Chao¹, WANG Lei¹, ZHENG Fenli^{1,2}, HE Xu¹, FU Han¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Quantitatively assessing the effects of ridge cultivation methods on slope soil erosion can provide important theoretical guidance for prevention slope erosion. Based on the long-term field monitoring data of runoff plot in Harbin city from 2012 to 2015, the effect of longitudinal ridge, contour ridge and flat tillage on runoff and sediment were discussed. The relationships between runoff and sediment under different ridge tillage were analyzed. The results showed that there were significant differences in runoff and sediment yield between different ridge tillage methods, showed the orders of runoff and soil loss was of flat tillage > longitudinal ridge tillage > contour ridge tillage. Compared with flat tillage, contour ridge tillage reduced the runoff and sediment yield by 92.4% and 98.3%, and longitudinal ridge tillage reduced the runoff and sediment yield by 66.4% and 72.2%. When the slope gradient increased from 3° to 5°, the soil loss increased by 0.8, 8.2, and 5.5 times, respectively under flat tillage, longitudinal ridge tillage and contour ridge tillage. The result also showed the significant correlations between runoff and sediment under three tillage methods. The increasing range of soil loss under longitudinal ridge tillage and flat tillage treatment was much larger than that under the contour ridge tillage slope. When the slope runoff was greater than 10.0 mm, soil loss under both treatments of longitudinal ridge tillage and flat tillage increased sharply.

Keywords: ridge tillage; soil erosion; runoff-sediment relationship; black soil region

东北黑土区是我国粮食生产的重点区域, 其粮食产量占国家粮食总产量的 15%^[1]。但是, 由于长期不合理的耕作方式和特有的长缓坡地形, 导致区域土壤侵蚀严重^[2]。2010 年中国水土流失与生态安全

综合科学考察(东北组)报道^[3], 东北黑土区表层土壤流失速率为 3~10 mm/a, 平均土层厚度已由 20 世纪 50 年代的 60~80 cm 下降至目前的 20~30 cm, 部分地区甚至出现“破皮黄”现象^[4]。Liu 等^[5]指出

收稿日期: 2018-05-22

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0202900); 国家自然科学基金项目(41571263)

第一作者: 何超(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: hechao2426@163.com

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

土层厚度每下降 1 cm 将导致作物产量降低 2%, 水土流失使作物每年减产 10.8×10^8 kg, 严重制约了黑土区经济和农业发展, 直接威胁着国家的粮食安全。因此, 防治水土流失是东北黑土区可持续发展的关键^[6]。

顺坡垄作和横坡垄作是黑土区农地两种主要的垄作方式^[7], 顺坡垄作可导致地表径流汇集, 增加了坡面侵蚀强度^[8], 而横坡垄由于缩短了汇水坡长, 减少了坡面土壤侵蚀^[9]。边锋等^[10]研究表明, 横坡垄作可减少坡面径流量和侵蚀量 90% 以上; 但当降雨强度分别为 75, 100 mm/h 时, 一旦横坡垄丘被冲毁断垄, 则坡面侵蚀量分别增加 13.2~25.6 倍。宋玥等^[11]研究表明, 在 40, 60 mm/h 降雨强度下, 顺坡垄作坡面侵蚀量大于横坡垄作坡面, 但二者之间没有显著差异; 而当降雨强度为 80 mm/h 时, 顺坡垄作坡面侵蚀量明显大于横坡垄作坡面的侵蚀量。沈昌蒲等^[8]调查表明, 横坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀均较严重, 只是侵蚀方式不同, 在小雨强下横坡垄作可能具有较强的防治侵蚀效应, 但在降雨强度较大时一旦断垄后便会出现严重细沟侵蚀, 导致坡面侵蚀量加大。从以上分析可知, 现有垄作方式对坡面侵蚀的影响研究多是基于模拟降雨试验和野外调查而得到的研究结果, 尚缺乏基于野外坡面径流小区多年观测资料垄作方式对坡面侵蚀的影响的客观评价, 导致不同试验条件下出现不同的研究结果。为此, 本文基于 2012—2015 年黑龙江省哈尔滨市野外布设的不同垄作试验处理的坡面径流小区观测资料, 客观评价不同垄作方式对坡面土壤侵蚀的影响, 以为黑土区土壤侵蚀治理和黑土资源可持续利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市 ($127^{\circ}31'04''$ — $127^{\circ}34'02''$ E, $45^{\circ}43'13''$ — $45^{\circ}46'37''$ N), 属于典型的薄层黑土区^[3]。气候类型属于中温带大陆性季风气候, 多年平均气温 3.9°C , 无霜期 148 d, 多年平均降水量 548.5 mm, 其中 6—9 月的降水量约占全年降水量的 80%^[4]。该区海拔 160~220 m, 地形以丘陵漫岗为主, 坡度主要在 1° ~ 7° , 坡长达数百米, 甚至数千米。成土母质为第四纪中更新黄土状亚黏土, 土壤以黑土为主^[1]。由于土壤侵蚀等原因, 黑土层厚度明显不同: 在地势平缓的地方, 黑土层一般为 40~70 cm, 个别地方可达 100 cm 以上; 在坡度较大或耕作时间较长的地方, 黑土层厚度一般为 20~30 cm; 在坡度大、耕作时间较长, 土壤侵蚀严重地方, 黑土层厚度只有 10 cm 左右, 甚至出现“破皮黄”现象。该地区主要农作物为玉米和大豆, 垄作方式有横坡垄作和顺坡垄作。

1.2 试验设计

野外共设计了 6 个坡面径流小区, 其中垄作方式包括顺坡垄作、横坡垄作、无垄作 3 种处理, 地面坡度为 3° 和 5° , 小区面积为 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。顺坡垄作和横坡垄作种植作物为大豆, 无垄作地面处理为裸露休闲。无论是横坡垄还是顺坡垄, 垄高和垄间距均与当地农田类似, 其中垄高和垄间距分别为 15, 65 cm。每年在 4 月中旬对地表进行翻耕和起垄, 在顺坡垄作和横坡垄作径流小区播种大豆, 无垄作径流小区在观测期间保持裸露休闲。

1.3 观测方法

天然降雨过程观测采用南京气象仪器有限公司生产 SL-2 型自记雨量计。径流泥沙观测采取传统集流桶观测方法, 共设二级径流桶, 其中一级径流桶为分流桶, 其直径为 1.5 m, 在高度为 100 cm 处设置 11 个直径为 5 cm 分水孔, 将径流泥沙引入二级集流桶。每次坡面产流后采集各分流桶和集流桶的径流泥沙样。具体观测过程: 先清理掉径流桶内的枯枝落叶等漂浮物, 然后测量各径流桶的水位; 测量径流桶水位时, 在径流桶 4 个方向测量 4 次水位, 一是减少人为测量误差, 二是减少因径流桶变形引起的误差。采集径流泥沙时, 首先将分径流桶内的水沙搅拌均匀, 随后迅速用采样杯取 500 mL 水样装入对应采样瓶, 采集径流泥沙样品设计 3 个重复。待泥沙样品采集完成后, 打开径流桶底部的放水阀门, 放掉收集的径流泥样, 并用清水将集流桶冲洗干净。待清洗完成后, 关闭底部阀门, 盖好桶盖, 为下次径流泥沙收集做好准备。将采集的径流泥沙样带入室内, 量取每个径流泥沙样品的体积, 然后将采集的径流泥沙样放入 105°C 的烘箱烘干称重, 计算径流含沙量和侵蚀量。

1.4 数据处理

本试验所有数据均用 SPSS 19.0 进行统计分析, 采用 Excel 2013 绘制径流泥沙关系图, 用 LSD 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 2012—2015 年侵蚀性降雨特征

根据东北黑土区侵蚀性降雨标准^[12], 研究区 2012—2015 年间侵蚀性降雨主要集中在 6—9 月, 而以 6, 7 月更集中, 且各侵蚀性降雨特征在年际间和年内各月波动较大(表 1)。年发生侵蚀性降雨的次数为 9~17 次, 6—9 月各月发生侵蚀性降雨的次数为 1~8 次; 年侵蚀降雨量为 143.4~318.9 mm, 占年降水量的 32.5%~68.1%; 月侵蚀性降雨量为 12.0~141.7 mm, 最大值出现在 2013 年 8 月, 最小值出现在 2015 年 9 月; 月平均 I_{30} 为 4.1~31.1 mm/h, 最大

值出现在 2015 年 7 月,最小值出现在 2013 年 5 月; 年最大 I_{30} 为 31.9~42.7 mm/h。

表 1 2012—2015 年侵蚀性降雨特征

年份	月份	月侵蚀性 降雨量/mm	各月侵蚀性降雨 发生频次/次	月最大 I_{30} / (mm · h ⁻¹)	年最大 I_{30} / (mm · h ⁻¹)	年侵蚀性 降雨量/mm
2012	6	115.3	6	33.9	35.4	303.6
	7	42.5	5	20.5		
	8	62.8	2	35.4		
	9	83.0	2	20.7		
2013	5	22.4	2	7.0	31.9	318.9
	6	18.2	1	17.9		
	7	136.6	6	18.8		
2014	8	141.7	8	31.9	38.6	143.4
	6	54.7	3	33.6		
	7	88.7	6	38.6		
	5	41.0	2	14.1		
2015	6	20.9	2	10.2	42.7	152.2
	7	32.8	2	42.7		
	8	45.5	2	23.8		
	9	12.0	1	22.6		

2.2 垄作方式对坡面径流量和侵蚀量的影响

2.2.1 垄作方式对坡面径流量的影响 由表 2 可知,2012—2015 年间无垄作坡面在 2 个坡度下的年径流量为 4.1~99.7 mm,平均值为 53.2 mm;顺坡垄作坡面的年径流量为 0.1~76.7 mm,平均值为 17.6 mm;横坡垄作坡面年径流量为 0~12.6 mm,平均值为 4.0 mm。3 种耕作方式年间坡面径流量差异显著,其大小排序为无垄作 > 顺坡垄作 > 横坡垄作。与无垄作相比,顺坡垄作和横坡垄作均减少了坡面径流量;其中横坡垄作使坡面年径流量平均减少了 92.4%,顺坡垄作使坡面年径流量平均减少 66.4%。这主要是顺坡垄作在增加地表糙率和增加土壤入渗的同时又增加了坡面汇流,二者彼此作用的结果,使坡面径流量较无垄作减少;而横坡垄作一是增加了地表糙率增加了降水入渗,二是缩短了汇流坡长,从而使坡面径流量减少。边锋等^[10]研究表明,顺坡垄作坡面的径流量较无垄作坡面增加了 1.2~1.7 倍,这与本研究结果相反,其原因是野外田间地表糙率大于模拟试验土槽的地表糙率,使得室内模拟试验条件下土壤入渗量减少而增加地表径流,且室内模拟试验的降雨强度(75,100 mm/h)相对较大,也使得降雨入渗量减少,地表径流及顺坡垄作的坡面汇流增加;再者,田间顺坡垄作小区由于种植了大豆作物增加了地表覆盖,对地表径流有一定消减作用,而室内模拟地表处理为裸露休闲,也会加大顺坡垄作的坡面汇流。张少良等^[13]通过田间定位观测表明,横坡垄作措施下的坡面年径流量比顺坡垄作减少 96.8%,由于横坡垄作坡面具有较强的储水能力,降雨强度较小则以入渗为主,因此具有较强的水土保持功效,这与本研究结果类似。宋玥等^[11]基于野外原位模拟降雨试验表明,在大雨强下坡面径流量为顺坡垄作 > 横坡垄作坡面,这与本研究结果类似;其

主要原因是横坡垄作通过增加地表糙度从而有效减少径流量,而顺坡垄作为径流提供了天然流路,是其径流量较大的主要原因。

由于侵蚀性降雨特征值年际波动较大,因而 3 种垄作条件下坡面径流量年际变化波动较大,且年侵蚀性降雨量对坡面径流量有较大影响。与 2014 年相比,2013 年侵蚀性降雨量增加 2.22 倍,而在 2 种坡度条件下无垄作和顺坡垄作的坡面年径流量分别增加 0.35~17.1,0.29~1.24 倍。同时,3 种垄作方式下年平均坡面径流量也随坡度的增加有不同的变化趋势。与 3°坡面相比,5°坡面的顺坡垄作和横坡垄作处理的年平均径流量分别增加 141.7%和 54.8%;而对于无垄作坡面,2 个坡度下坡面年径流量基本相同。

表 2 2012—2015 年不同垄作方式下坡面年径流量

坡度/(°)	年份	径流量/mm		
		无垄作坡面	顺坡垄作坡面	横坡垄作坡面
3	2012	99.7a	0.1c	6.2b
	2013	74.2a	15.2b	3.6c
	2014	4.1a	6.8a	0b
	2015	34.9a	19.1b	2.4c
	平均值	53.2a	10.3b	3.1c
5	2012	88.3a	76.7a	12.6b
	2013	38.4a	5.4b	2.1b
	2014	28.4a	4.2b	1.7b
	2015	37.9a	13.2b	2.8c
	平均值	51.7a	24.9b	4.8c

注:同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2.2 垄作方式对坡面侵蚀量的影响 由表 3 可知,2012—2015 年间无垄作坡面的年侵蚀量为 37.0~3 206.9 t/(km² · a),平均值为 1 225.1 t/(km² · a),根据土壤侵蚀分类标准,属于轻度—中度侵蚀^[14];顺坡垄作坡面的年侵蚀量为 13.4~1 910.9 t/(km² · a),平均值为 340.2 t/(km² · a);横坡垄作坡面年侵蚀量为 0~119.5 t/(km² · a),平均值为 20.8 t/

($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。无垄作坡面与顺坡垄作和横坡垄作坡面年际间侵蚀量差异显著,坡面侵蚀量大小排序为无垄作>顺坡垄作>横坡垄作。与无垄作相比,顺坡垄作和横坡垄作均减少了坡面侵蚀量,其中横坡垄作使坡面年侵蚀量平均减少了98.3%,顺坡垄作使坡面侵蚀量平均减少72.2%,即与垄作方式对坡面径流的影响相比,垄作方式对坡面侵蚀的影响更加明显。边锋等^[10]基于室内模拟试验表明,顺坡垄作坡面的侵蚀量较无垄作坡面增加了1.3~2.1倍,这与本研究结果相反,其原因是在室内模拟降雨试验中,由于顺坡垄作使坡面径流量增加从而导致坡面土壤侵蚀增大,再者,田间顺坡垄作小区由于种植了大豆作物增加了地表覆盖,也相应地减少了土壤侵蚀量;而室内模拟地表处理为裸露休闲,这样也会加大顺坡垄作处理的坡面土壤侵蚀量。沈昌蒲等^[8]通过野外调查表明,横坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀均较严重,只是侵蚀方式不同,在小雨强下横坡垄作可能具有较强的防治侵蚀效应,但在降雨强度较大时一旦断垄后便会出现严重细沟侵蚀,导致坡面侵蚀量加大。在本研究中由于横坡垄作未发生断垄,故而坡面侵蚀量小于顺坡垄作坡面。张少良等^[13]通过对比不同耕作措施的水土保持功效,发现横坡垄作较顺坡垄作坡面侵蚀量减少99.2%,这与本研究结果类似。而宋玥等^[11]的野外模拟降雨试验表明,在40,60 mm/h降雨强度下,顺坡垄作坡面侵蚀量大于横坡垄作坡面,但二者之间没有显著差异;而当降雨强度为80 mm/h时,顺坡垄作坡面侵蚀量明显大于横坡垄作坡面的侵蚀量。

表3 2012—2015年不同垄作条件下坡面年侵蚀量

坡度/(°)	年份	侵蚀量/($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)		
		无垄作坡面	顺坡垄作坡面	横坡垄作坡面
3	2012	2113.3a	13.4b	0c
	2013	725.4a	34.6b	6.5c
	2014	37.0a	22.1a	0b
	2015	593.9a	197.2b	15.4c
	平均值	867.4a	66.8b	5.5c
5	2012	3206.9a	1910.9ab	119.5b
	2013	1413.1a	89.9b	3.1c
	2014	136.0a	36.7b	4.4c
	2015	1574.9a	417.1b	17.0c
	平均值	1582.7a	613.7b	36.0c

由表3可知,由于侵蚀性降雨特征值年际波动较大,因而3种垄作条件下坡面侵蚀量年际变化波动较大,且年侵蚀性降雨量对坡面侵蚀量有较大影响。与2014年相比,2013年侵蚀性降雨量增加2.2倍,而在2种坡度条件下无垄作和顺坡垄作的坡面侵蚀量分别增加9.4~18.6,0.7~1.5倍。同时,3种垄作方式下年平均坡面侵蚀量也随坡度的增加而增加;与

3°坡面相比,5°坡面的无垄作、顺坡垄作和横坡垄作处理的年平均坡面侵蚀量分别增加了0.8,8.2,5.5倍,说明在3种垄作方式下,坡度对坡面的侵蚀的影响大于坡度对坡面径流的影响。

2.2.3 垄作方式对坡面水沙关系的影响 郑明国等^[15]研究表明,次暴雨的产沙模数和径流深可用线性正比关系式来表示。本研究通过分析不同垄作方式下的坡面水沙关系表明,不同垄作方式下坡面水沙关系可以用多项式关系表示(图1),3种垄作方式下坡面侵蚀量与径流量均呈现出较好的相关关系($R^2 > 0.7$)。拟合方程系数 a 显示,顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀量随径流量的增加幅度远大于横坡垄作坡面(表4)。对于顺坡垄作和无垄作坡面,在次降雨坡面径流量小于10.0 mm时,坡面侵蚀量随径流量增加相对缓慢;但当次降雨坡面径流量超过10.0 mm时,坡面侵蚀量随径流量的增加急剧增大。对于横坡垄作坡面,坡面侵蚀量随径流量变化的趋势不明显,说明坡面在未发生断垄的情况下不足以产生较大侵蚀量,这与前人^[16]的研究结果类似。

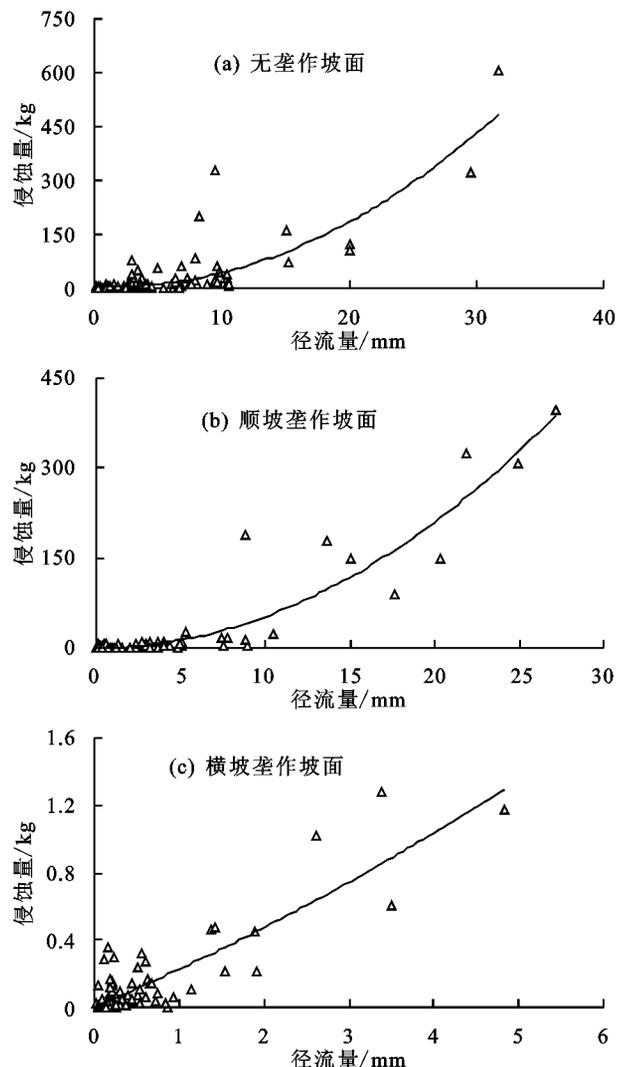


图1 不同垄作方式下的坡面水沙关系

表 4 不同垄作方式下的坡面水沙关系

垄作方式	拟合方程	相关系数
无垄作	$SL=0.5366R_f^2-2.0327R_f+8.8592$	$R^2=0.72$
顺坡垄作	$SL=0.5309R_f^2-0.1394R_f+0.2624$	$R^2=0.88$
横坡垄作	$SL=0.0112R_f^2+0.2137R_f+0.0007$	$R^2=0.77$

注:SL 表示侵蚀量(kg); R_f 表示径流量(mm)。

3 结论

(1)52 场次侵蚀性降雨观测资料表明,2012—2015 年间无垄作坡面在 2 个坡度下的年径流量为 4.1~99.7 mm,平均值为 53.2 mm;顺坡垄作坡面的年径流量为 0.1~76.7 mm,平均值为 17.6 mm;横坡垄作坡面年径流量为 0~12.6 mm,平均值为 4.0 mm。3 种垄作方式坡面径流量年间差异显著,其大小排序为无垄作坡面>顺坡垄作>横坡垄作。与无垄作相比,顺坡垄作和横坡垄作均减少了坡面径流量 76.0%和 92.6%。

(2)观测期间 3 种耕作方式坡面侵蚀量年间差异显著。无垄作坡面的年侵蚀量为 867.4~1 582.7 t/(km²·a),平均值为 1 225.1 t/(km²·a);顺坡垄作坡面的年侵蚀量为 66.8~613.7 t/(km²·a),平均值为 340.3 t/(km²·a);横坡垄作坡面年侵蚀量为 5.5~36.0 t/(km²·a),平均值为 20.8 t/(km²·a)。与无垄作相比,顺坡垄作和横坡垄作分别减少坡面侵蚀量 72.2%和 98.3%。

(3)3 种垄作方式径流量与侵蚀量均呈现出较好的相关关系,其中顺坡垄作和无垄作坡面拟合方程系数较为接近,分别为 0.53,0.54,而横坡垄作坡面方程系数则相对较小,仅为 0.01,表明顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀量随径流量的增加幅度远大于横坡垄作坡面。对于顺坡垄作和无垄作坡面,在次降雨坡面径流量小于 10.0 mm 时,坡面侵蚀量随径流量增加相对缓慢,但当次降雨坡面径流量超过 10.0 mm 时,坡面侵蚀量随径流量的增加急剧增大,而对于横坡垄作坡面,坡面侵蚀量随径流量变化的趋势不明显。

参考文献:

[1] 刘兴土,阎百兴.东北黑土区水土流失与粮食安全[J].中国水土保持,2009(1):17-19.

- [2] An J, Zheng F, Lu J, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions [J]. Soil Science, 2012, 177(8): 517-526.
- [3] 水利部.中国水土流失防治与生态安全:东北黑土区卷[M].北京:科学出版社,2010.
- [4] 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.
- [5] Liu H, Zhang T, Liu B, et al. Effects of gully erosion and gully filling on soil depth and crop production in the black soil region, northeast China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(6): 1723-1732.
- [6] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
- [7] Xu X, Zheng F L, Wilson G V, et al. Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China [J]. Soil & Tillage Research, 2018, 177: 1-11.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 边锋,郑粉莉,徐锡蒙,等.东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J].水土保持通报,2016,36(1):11-16.
- [11] 宋玥,张忠学.不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2011,18(2):14-16.
- [12] 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.
- [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.
- [14] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准(SL 190-2007)[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [15] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等.黄土丘陵沟壑区坡面水保措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J].水利学报,2007,38(1):47-53.
- [16] 安娟,于妍,吴元芝.降雨类型对褐土横坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):150-156.