

四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析

杨 帅¹, 尹 忠², 郑子成¹, 李廷轩¹

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 四川省林业调查规划院, 成都 610081)

摘要: 为明确玉米全生育期自然降雨特征以及坡耕地产流产沙规律, 以研究区自然降雨为基础, 采用野外径流小区和室内分析相结合的方法, 分别对横坡垄作、平作和顺坡垄作坡面玉米全生育期(苗期、拔节期、抽雄期和成熟期)的自然降雨、径流及侵蚀产沙量进行了测定。结果表明: 研究区 2015 年玉米全生育期内雨量为 676.71 mm, 其中成熟期侵蚀性雨量达 411.71 mm, 占累计侵蚀性雨量的 69.85%。玉米全生育期内, 产流受雨量、玉米生育期显著影响, 横坡垄作产沙受雨量、雨强的影响显著, 而平作和顺坡垄作则受雨量、株高的影响显著; 产流产沙均随玉米生育期的推进逐渐增加, 且产沙受产流影响显著, 横坡垄作和平作含沙量先减小后增加再减小, 而顺坡垄作则先减小后增加; 抽雄期横坡垄作产流显著小于顺坡垄作而产沙显著小于平作和顺坡垄作, 成熟期横坡垄作产流产沙显著小于平作和顺坡垄作。研究区自然降雨条件下, 雨量是影响黄壤坡耕地产流产沙的最主要因子, 产沙滞后于产流; 玉米成熟期土壤侵蚀最为严重, 横坡垄作是防治研究区水土流失的有效途径, 研究成果为山地黄壤水土流失有效防控与农业的可持续发展提供理论参考。

关键词: 自然降雨; 玉米; 黄壤; 径流量; 产沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)04-0007-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.04.002

Characteristics of Natural Rainfall and Sediment Yield of Sloping Cropland of the Yellow Soil Area in Sichuan During Corn Growth Season

YANG Shuai¹, YIN Zhong², ZHENG Zicheng¹, LI Tingxuan¹

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130;

2. Sichuan Forestry Inventory and Planning Institute, Chengdu 610081)

Abstract: The objective of this study was to investigate the characteristics of the natural rainfall, runoff and sediment yield of sloping cropland during the whole growth period of corn. Field runoff plots and laboratory analysis were used to measure rainfall, runoff and sediment yield at different stages of the corn growth period (seeding stage, jointing stage, tasseling stage, and maturing stage) under 3 tillage practices (cross ridge planting, flat planting, and downslope ridge planting) based on natural rainfall of the study area. The results showed that the rainfall of the study area was 676.71 mm from May to August in 2015. The amount of erosive rainfall was 411.71 mm and accounted for 69.85% of the cumulative erosive rainfall at maturing stage. During the whole growth period of corn, the runoff was significantly influenced by rainfall and corn growth stages. Sediment yield under the cross ridge planting was significantly influenced by rainfall amount and intensity. However, sediment yield under flat planting and downslope ridge planting was significantly influenced by rainfall amount and corn height. The runoff and sediment yield increased with the growing of corn, and sediment yield was significantly influenced by the runoff. The sediment yield under cross ridge and flat planting decreased at first, then increased and finally decreased, while it decreased at first and then increased under downslope ridge planting. At tasseling stage, the runoff amount under cross ridge planting was significant lower than that under downslope ridge planting, while the sediment yield under cross ridge planting was significant lower than those under flat planting and downslope ridge planting. At maturing stage, the runoff and sediment yield under cross ridge planting was significantly lower than those under flat planting and downslope ridge planting. Rainfall was the main factor that influenced runoff and sediment yield of the sloping cropland under the condition of natural rainfall. The sediment yielding time was longer than that of runoff. Soil erosion at

收稿日期: 2016-02-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(40901138, 41271307)

第一作者: 杨帅(1991—), 男, 四川阆中人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: yangshuailz@163.com

通信作者: 郑子成(1976—), 男, 内蒙古盟人, 教授, 博导, 主要从事水土保持与土壤生态研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

the maturing stage was the most serious among all growth stages of corn. The results indicated that cross ridge planting was an effective practice to prevent soil erosion. Therefore, this study would provide the theoretical basis for the soil erosion prevention, and sustainable development of agriculture in the yellow soil area.

Key words: natural rainfall; corn; yellow soil; runoff yield; sediment yield

水土流失不仅造成土壤退化,同时也增加了水体的环境负荷和风险,严重阻碍了区域农业的持续发展和土壤资源的持续利用^[1]。黄壤区坡耕地是水土流失的重要策源地,且主栽作物玉米生育期与雨季同期,而以往缺乏自然降雨条件下坡耕地侵蚀产沙特征的研究,因此系统探讨玉米全生育期自然降雨特征及坡耕地产流产沙规律,对区域坡耕地水土流失有效防控具有重要现实意义。Yan 等^[2]在黄土区开展了自然降雨条件下流域管理对降雨产沙影响的研究,结果表明植被虽然降低了径流中泥沙含量,但并没有改变径流与泥沙输移的关系;郑子成等^[3]在川中紫色土区进行了人工模拟降雨下玉米对径流及侵蚀产沙影响的研究,指出玉米具有一定的截流拦沙能力;谢颂华等^[4]在南方红壤区自然降雨条件下进行了坡面径流垂向分层输出规律的试验,结果表明地表径流与地面有无植被覆盖直接相关;代数等^[5]在黄壤旱坡地人工模拟降雨下对产流产沙过程进行试验研究,结果表明径流量和产沙量与雨强表现出幂函数关系。国内外学者虽进行了类似的研究,但多采用人工模拟降雨,研究条件多为不同作物覆盖及耕作措施,且多集中在黄土区、紫色土区、红壤区,同时考虑自然降雨、作物覆盖和耕作措施的研究缺乏。本研究以四川旱坡耕地第二大土壤类型黄壤为对象,采用野外径流小区定位监测方法,开展玉米全生育期自然降雨及坡耕地产流产沙特征,并就各生育期玉米对地表径流、壤中流及侵蚀产沙变化特征的响应进行分析,以期服务于山地黄壤水土流失的有效防控及区域的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于东经 103°36′52″,北纬 31°00′34″,海拔高度 773.5 m,隶属于四川省都江堰市灌口镇。该区属亚热带湿润气候区,年均温度为 15.1℃,年均降雨量为 1 218.4 mm,夏季降雨量占年均降雨量的 55%,秋季降雨量占年均降雨量的 25%。区内为山地地貌,土壤类型为黄壤,质地为砂质中壤土,砂粒、粉粒和粘粒含量分别为 36.30%,22.50%,41.20%,土壤 pH 5.95,有机质含量 17.18 g/kg,全氮和碱解氮含量分别为 0.62 g/kg,52.14 mg/kg,有效磷含量 5.09 mg/kg,速效钾含量 50.64 mg/kg,土壤肥力较低。

1.2 试验处理

基于研究区实地调查,设置径流小区投影面积为

8 m² (4 m×2 m),根据研究区坡耕地坡度分布特点,设置小区坡度为 15°。依据当地农耕习惯,布设横坡垄作、平作和顺坡垄作 3 种常规耕作措施,每一耕作措施重复 3 次。

供试玉米品种为当地主栽的资玉 22,于 2015 年 5 月初播种。夏玉米栽培参照当地实际情况,采用穴播方式,单行双株种植,行距 90 cm,株距 45 cm。播种前基施有机肥 30 000 kg/hm²,氮肥(N)270 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)90 kg/hm²,钾肥(K₂O)75 kg/hm²,其中氮肥兑清水灌窝,磷肥干施于植株窝内,管理措施均按当地农耕习惯进行。

1.3 研究方法

径流与泥沙:采用比重瓶法^[6]测定含沙量 C(g/L);采用称重法测定径流与泥沙质量 $M_{\text{水样}}$ (kg)、壤中流质量 $M_{\text{壤中流}}$ (kg);采用体积法测定径流与泥沙体积 $V_{\text{水样}}$ (L)。

玉米株高及叶面积指数:玉米各生育期测定玉米株高及叶面积指数,其中玉米株高采用卷尺测量;单株玉米叶面积(A)的计算公式^[7]为:

$$A = \sum_{i=1}^n (k \times L_i \times W_i)$$

式中: k 为修正系数(取 0.75); L_i 为第 i 片叶片长度(cm); W_i 为第 i 片叶片最宽处宽度(cm); n 为单株玉米的叶片数。

玉米群体叶面积指数=群体密度×单株玉米叶面积

供试土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和颗粒组成均采用常规分析方法测定^[8]。

1.4 数据处理

试验数据统计分析采用 DPS(11.0)软件,其中方差分析采用 2 因素完全随机设计,选择 LSD 法进行多重比较,图表制作采用 Excel(2016)和 Origin(9.0)。

2 结果与分析

2.1 自然降雨特征

玉米全生育期内,共监测到 29 场降雨(表 1)。最大雨量为 93.08 mm,累计雨量为 676.71 mm,较历年同期平均雨量偏少。在玉米全生育期内,雨量表现出明显的单峰分布,其峰值出现在玉米成熟期,呈现出雨热同期的现象,且具有明显的季风性降雨特点。

玉米全生育期内,仅 17 场降雨引起侵蚀产沙,占全部降雨的 58.62%,其中苗期 5 场、拔节期 3 场、抽雄期 1 场和成熟期 8 场。玉米全生育期引起侵蚀产沙累

计雨量为 589.41 mm,占累计雨量的 87.10%。玉米抽雄期和成熟期引起侵蚀产沙累计雨量分别为 55.15 mm 和 411.71 mm,分别占玉米全生育期引起侵蚀产沙累计雨量的 9.36%和 69.85%。

表 1 玉米不同生育期降雨特征

生育期	降雨时间	历时/ h	雨量/ mm	雨强/ (mm·h ⁻¹)	是否 产沙
苗期 (5-06 至 6-15)	5-17	15.17	30.94	2.04	是
	5-21	6.00	7.09	1.18	
	5-22	7.67	9.50	1.24	是
	5-25	3.50	1.12	0.32	
	5-27	1.50	0.72	0.48	
	5-28	8.50	6.65	0.78	是
	6-01	4.00	5.68	1.42	
	6-02	3.00	10.15	3.38	是
	6-04	5.00	7.16	1.43	
	6-08	5.83	14.78	2.53	是
拔节期 (6-16 至 7-01)	6-12	6.00	11.13	1.86	
	6-14	5.00	6.36	1.27	
	6-16	11.67	16.40	1.18	是
	6-22	9.00	18.45	2.05	是
	6-23	25.00	15.68	0.63	是
抽雄期 (7-02 至 7-21)	7-03	5.00	55.15	11.03	是
	7-08	3.50	3.60	1.03	
	7-13	5.00	8.34	1.67	
	7-14	7.00	7.05	1.01	
成熟期 (7-22 至 9-05)	7-29	5.67	93.08	16.42	是
	7-30	2.50	16.35	6.54	是
	8-01	5.00	73.99	14.80	是
	8-03	27.83	70.74	2.53	是
	8-07	6.50	16.30	2.51	
	8-14	10.50	12.75	1.22	
	8-16	14.67	86.14	5.87	是
	8-24	9.50	34.20	3.60	是
	8-27	9.00	21.13	2.35	是
	9-02	52.5	16.08	0.31	是

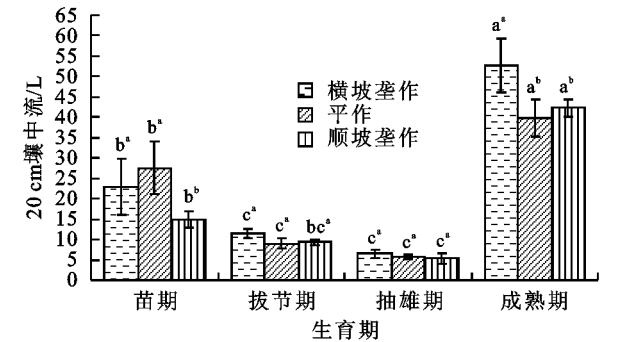
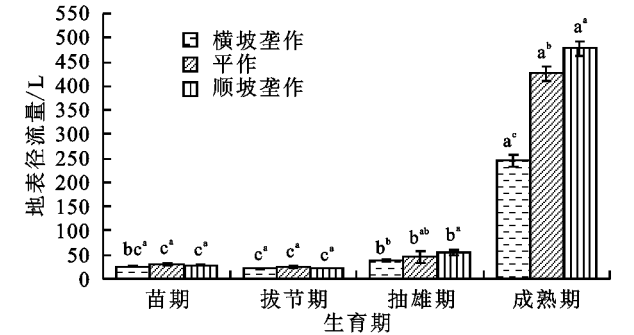


图 2 玉米不同生育期壤中流变化特征

2.2.3 径流量与玉米植株、雨量和雨强的关系 由表 2 可知,坡面产流逐步回归方程均达极显著水平 ($P<0.01$),决定系数均达到 0.99,表明横坡垄作和顺坡垄作下坡面产流量与雨量、株高表现为线性相关关系,而平作下坡面产流量与雨量、叶面积指数表现为线性相关关系。

2.2 玉米不同生育期产流特征

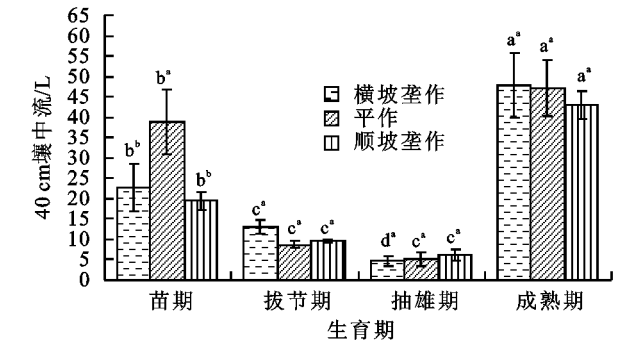
2.2.1 地表径流量 由图 1 可知,不同耕作措施地表径流量变化范围介于 20.60~478.10 L。随玉米生育期推进,地表径流量逐渐增加,玉米抽雄期和成熟期地表径流量分别占地表径流总量的 9.65%和 79.82%。玉米苗期和拔节期,各措施间坡面地表径流量无显著差异;抽雄期,横坡垄作坡面地表径流量显著小于顺坡垄作;而成熟期横坡垄作地表径流量显著小于平作和顺坡垄作。玉米全生育期内,横坡垄作的地表径流量为平作的 62.58%,顺坡垄作的 56.48%。



注:图柱上不同小写字母表示同一措施不同生育期间在 $P<0.05$ 水平上差异显著;上标不同小写字母表示同一生育期不同措施间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

图 1 玉米不同生育期地表径流量变化特征

2.2.2 壤中流 从图 2 可知,20 cm 和 40 cm 壤中流的变化范围分别介于 5.43~52.66 L 和 4.67~47.73 L,均随玉米生育期推进先降低后增加,且在拔节期和抽雄期各措施间无显著差异。玉米苗期,顺坡垄作 20 cm 壤中流显著小于横坡垄作和平作,平作 40 cm 壤中流却显著大于横坡垄作和顺坡垄作。成熟期,横坡垄作 20 cm 壤中流显著大于平作和顺坡垄作。玉米全生育期内,横坡垄作 20 cm 和 40 cm 壤中流分别为平作的 1.14,0.89 倍,顺坡垄作的 1.30,1.15 倍。



20 cm 和 40 cm 壤中流逐步回归方程均达极显著水平 ($P<0.01$),结果表明横坡垄作和平作下 20 cm 壤中流与雨量、叶面积指数表现为线性相关关系,而顺坡垄作下 20 cm 壤中流与雨量、株高表现为线性相关关系;横坡垄作下 40 cm 壤中流与雨量、株高表现为线性相关关系,而平作和顺坡垄作下 40 cm 壤中

流与雨量、叶面积指数表现为线性相关关系。

表 2 坡面产流逐步回归分析

耕作措施	逐步回归方程	R^2	显著性水平
横坡	$R=0.5781P+0.0880H-19.5355$	0.9971	0.0001
垄作	$R_{20}=0.1182P-3.8149LAI+15.4297$ $R_{40}=0.1246P-0.0641H+15.7394$	0.9470 0.9201	0.0001 0.0001
平作	$R=1.0990P+8.4818LAI-52.0122$ $R_{20}=0.0863P-5.8708LAI+22.0722$ $R_{40}=0.1060P-9.4053LAI+31.9745$	0.9985 0.9079 0.8779	0.0001 0.0002 0.0006
顺坡	$R=1.1782P+0.1843H-62.2286$ $R_{20}=0.1056P-0.0314H+8.3142$ $R_{40}=0.0942P-3.0502LAI+13.2041$	0.9989 0.9916 0.9809	0.0001 0.0001 0.0001

注： $n=10$ ； R^2 为决定系数； R 为地表径流量(L)； R_{20} 为 20 cm 壤中流(L)； R_{40} 为 40 cm 壤中流(L)； P 为雨量(mm)； I 为雨强(mm/h)； LAI 为叶面积指数； H 为株高(m)。

2.3 玉米不同生育期产沙特征

2.3.1 产沙量 从图 3 可知,产沙量变化范围介于 37.36~6 306.24 g,不同生育期产沙量差异较大。随玉米生育期推进,产沙量逐渐增加,抽雄期和成熟期分别占全生育期产沙总量的 10.56%和 85.19%。苗期和拔节期各措施间无显著差异,抽雄期和成熟期横坡垄作显著小于平作和顺坡垄作。玉米全生育期内,横坡垄作的产沙量分别为平作的 30.51%,顺坡垄作的 22.77%。

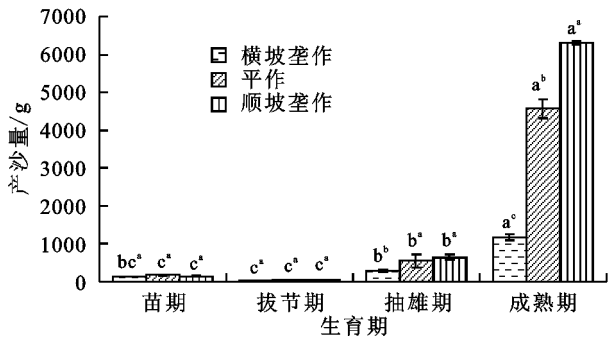


图 3 玉米不同生育期产沙量变化特征

2.3.2 含沙量 含沙量是分析坡面土壤侵蚀产沙过程规律的重要指标,在一定程度上反映了地表径流的携沙能力。由图 4 可知,玉米季含沙量变化范围介于 1.82~13.20 g/L。随玉米生育期推进,横坡垄作和平作含沙量先减小后增加再减小,顺坡垄作则先减小后增加,其中拔节期含沙量最小。苗期和拔节期各措施间无显著差异,抽雄期和成熟期横坡垄作显著小于平作和顺坡垄作。

2.3.3 产沙量与玉米植株、雨量和雨强的关系 由表 3 可知,坡面产沙逐步回归方程均达极显著水平($P<0.01$),决定系数均达到 0.99,表明横坡垄作下坡面产沙与雨量、雨强表现为线性相关关系,平作和顺坡垄作下坡面产沙与雨量、株高表现为线性相关关系。

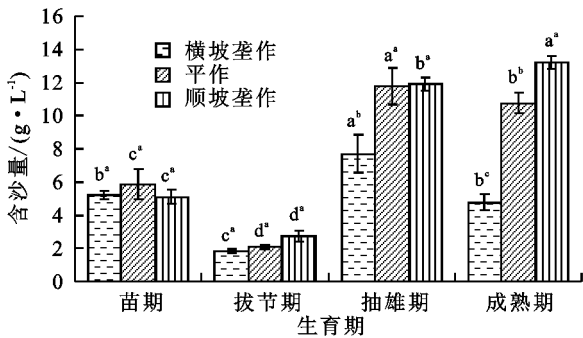


图 4 玉米不同生育期含沙量变化特征

表 3 坡面产沙逐步回归分析

耕作措施	逐步回归方程	R^2	显著性水平
横坡垄作	$S=2.9677P+23.8270I-131.6866$	0.9942	0.0001
平作	$S=11.3553P+2.1642H-753.0013$	0.9966	0.0001
顺坡垄作	$S=15.8146P+3.0365H-1114.0739$	0.9999	0.0001

注： $n=10$ ； R^2 为决定系数； S 为坡面产沙量(g)； P 为降雨量(mm)； I 为雨强(mm/h)； H 为株高(m)。

3 讨论

3.1 玉米全生育期降雨

能够导致土壤侵蚀的降雨称为侵蚀性降雨^[9],玉米全生育期累计侵蚀性雨量为 589.41 mm,占累计降雨量的 87.10%。张文源等^[10]的研究表明贵州中部和西部喀斯特山区黄壤的侵蚀性雨量占年降雨总量的 1/3 以上,较本研究偏少,且主要分布在 5—8 月。产生侵蚀性降雨的最小雨量、雨强称为临界雨量和雨强^[9],本研究玉米苗期、拔节期和成熟期的临界雨量分别为 6.65,15.65,16.08 mm,临界雨强分别为 0.78,0.63,0.31 mm/h(表 1),表明研究区随玉米生育期推进,临界雨量呈逐渐增加、临界雨强逐渐降低的趋势。王改玲等^[11]研究结果表明晋北黄土区的侵蚀性降雨临界次降雨量为 8.47 mm,雨强为 14.24 mm/h;秦伟等^[12]研究显示赣北红壤区侵蚀性次降雨临界降雨量为 10.00 mm,雨强 1.30 mm/h;谢云等^[13]对陕西团山沟小流域的研究得出侵蚀性降雨量为 10.00 mm,雨强为 1.80 mm/h。与上述研究结果相比,研究区的侵蚀性降雨临界雨强偏小,说明山地黄壤区玉米季坡耕地更易发生土壤侵蚀。

3.2 玉米全生育期径流及侵蚀产沙

玉米全生育期内,地表径流、20 cm 和 40 cm 壤中流主要受降雨量及玉米生育期的影响,这与韩雪等^[14]、Yan 等^[2]研究结果相似,主要因为自然降雨随机性较强,以及玉米冠层对降雨的拦截再分配等作用^[15]所致。由于叶面积指数与穿透雨、茎秆流和冠层截留密切相关^[16-17],进而影响坡面产流量,故平作下坡面产流量与雨量、叶面积指数均表现为线性相关关系。就横坡垄作和顺坡垄作坡面而言,产流量却与雨量、株高表现为线性相关关系,这可能是由于沟垄

自身的几何结构,存在玉米植株相对高度(玉米植株高度与垄高的总和),统计分析结果表明垄作下玉米相对高度均显著大于平作,故对玉米冠层穿透雨、茎秆流均有不同程度的影响。有研究表明,玉米全生育期茎秆流量和穿透雨量分别占降雨量比例约为35%和64%,且随玉米生育期推进,冠下穿透雨具有向植株行中集中的趋势^[15]。与平作相比,横坡垄作和顺坡垄作坡面由于存在的玉米植株相对高度,易于接纳玉米茎秆流量和穿透雨量,落地雨滴的数量存在差异,且下落地表的茎秆流和穿透雨从垄面加速向垄沟间的流动。可见,玉米植株与耕作措施相互叠加使得坡耕地产流变化较为复杂。

横坡垄作侵蚀产沙受雨量、雨强显著影响,而平作和顺坡垄作则受雨量、株高显著影响,不同耕作措施地表微地形和沟垄几何结构均存在差异,横坡垄作的侵蚀主要发生在垄上^[18],随着雨强的增加,地表径流量呈增加趋势,径流对沟垄的冲刷作用较强^[19],垄上地表微地形起伏不断降低,故侵蚀产沙量有所增加。平作和顺坡垄作在水流方向上地表微地形起伏均较横坡垄作小,随玉米生育期推进株高在不断变化,导致玉米全生育期冠下穿透雨和茎秆流降落高度不同,使得落地雨滴的侵蚀能力存在差异^[20],故对侵蚀产沙影响较大^[21]。该结论与林超文等^[22]研究有所不同,这可能是由于降雨条件差异所致。一方面,本研究自然降雨条件下雨强最大值仅为16.42 mm/h,而林超文等研究中模拟降雨最小雨强为58.32 mm/h^[22],且自然降雨雨量也较模拟降雨偏小;另一方面,自然降雨往往是间歇性降雨,降雨过程随机性较强,而人工模拟降雨多为设计的恒定雨强。

就产流与产沙量而言,成熟期达最大,抽雄期次之,拔节期最小,主要是由于玉米成熟期侵蚀性雨量占累计侵蚀性雨量的69.85%(表1),有研究表明,黄壤的分离速率随地表径流量的增大而增大^[23],故成熟期地表径流及产沙量均最大。抽雄期叶面积指数和雨强均最大,冠层截留量和茎秆流量最大而穿透雨量最小^[16],且黄壤旱坡地地表径流量和产沙量与雨强均表现为幂函数关系^[5],故抽雄期地表径流及产沙量仅次于成熟期。拔节期土壤容重较低而孔隙度较大,玉米株高和叶面积指数均较小,同时该生育期的雨量和雨强最小,使得玉米冠层截留量、茎秆流量和穿透雨量最小^[16],导致地表径流量最少,故拔节期地表径流及产沙量均最小。经统计分析可知,本研究条件侵蚀产沙与地表径流呈极显著线性关系($P < 0.01$),但坡面产沙滞后于产流。

诸多学者研究^[3,24-25]表明,下垫面也是造成坡面产流产沙的主要因素。在自然降雨条件下,各生育期

横坡垄作对减少地表径流和侵蚀产沙的贡献大于平作和顺坡垄作,而郑子成等^[3]对紫色土区的研究结果表明,玉米成熟期横坡垄作地表径流小于顺坡垄作而大于平作,而侵蚀产沙则与本研究结果一致,一方面可能由于玉米品种不同,对降雨的再分配存在差异^[26],另一方面也可能与土壤性质不同有关^[27]。

4 结论

(1)玉米全生育期内雨量为676.71 mm,侵蚀性降雨集中于玉米抽雄期和成熟期,且成熟期最大,占累计侵蚀性雨量的69.85%,表明研究区玉米季坡耕地易发生土壤侵蚀。

(2)玉米全生育期内,各耕作措施坡面产流、20 cm和40 cm壤中流均受雨量、玉米生育期显著影响,横坡垄作产沙受雨量、雨强显著影响,而平作和顺坡垄作则受雨量、株高显著影响;坡面产沙规律与产流一致,均随玉米生育期推进逐渐增加,且产沙受产流影响显著;含沙量的变化特征与产流产沙不同,随生育期推进横坡垄作和平作先减小后增加再减小,顺坡垄作则先减小后增加;应加强玉米成熟期水土流失的防控。

(3)玉米苗期和拔节期各耕作措施产流产沙均无显著差异,抽雄期横坡垄作产流显著小于顺坡垄作而产沙显著小于平作和顺坡垄作,成熟期横坡垄作产流产沙显著小于平作和顺坡垄作,横坡垄作能有效防治该地区土壤侵蚀。

参考文献:

- [1] Liu Q J, An J, Wang L Z, et al. Influence of ridge height, row grade, and field slope on soil erosion in contour ridging systems under seepage conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 147(4): 50-59.
- [2] Yan Q H, Lei T W, Yuan C P, et al. Effects of watershed management practices on the relationships among rainfall, runoff, and sediment delivery in the hilly-gully region of the Loess Plateau in China[J]. Geomorphology, 2015, 228(1): 735-745.
- [3] 郑子成, 林代杰, 李廷轩, 等. 不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 24-28.
- [4] 谢颂华, 莫明浩, 涂安国, 等. 自然降雨条件下红壤坡面径流垂向分层输出特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 132-138.
- [5] 代数, 蒋光毅, 夏清, 等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产流产沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 1-5.
- [6] 崔俊华, 孟文芳, 华玉芝, 等. 比重瓶法快速测定高浊水中含砂量[J]. 中国给水排水, 2003, 19(13): 159-160.
- [7] 蔡一林, 何晓阳. 玉米叶面积分布及估测[J]. 西南农业大学学报, 1994, 16(1): 63-65.

- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [9] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究Ⅲ: 关于侵蚀性降雨的标准问题[J]. 水土保持通报, 1984, 4(2): 58-63.
- [10] 张文源, 王百田, 杨光熹, 等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1776-1782.
- [11] 王改玲, 王青杵, 石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 1-5.
- [12] 秦伟, 左长清, 郑海金, 等. 赣北红壤坡地土壤流失方程关键因子的确定[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 115-125.
- [13] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [14] 韩雪, 王力, 王艳萍. 自然降雨条件下夏玉米冠层截留特征及影响因素[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1541-1549.
- [15] 马波, 李占斌, 马璠, 等. 模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 497-507.
- [16] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 玉米植株对降雨再分配过程的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(12): 2608-2615.
- [17] 马璠, 吴发启, 马波, 等. 叶面积和降雨强度对玉米茎秆流量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 25-28.
- [18] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row side slopes within contour ridging systems[J]. Catena, 2014, 115(4): 11-18.
- [19] 罗键, 郑子成, 秦凤, 等. 玉米生长期坡耕地地表径流及侵蚀产沙特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 11-15.
- [20] 马波, 马璠, 吴秋菊, 等. 玉米冠下溅蚀效应及其空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 135-142.
- [21] 马波, 吴发启, 陈宇, 等. 玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 118-123.
- [22] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2241-2249.
- [23] 郭继成, 张科利, 董建志, 等. 西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1102-1108.
- [24] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 983-992.
- [25] Liu D D, She D L, Yu S E, et al. Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation[J]. Catena, 2015, 128(5): 54-62.
- [26] 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.
- [27] 刘家明, 查轩, 黄少燕. 天然降雨下紫色土和第四纪红黏土坡面侵蚀过程研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 16-19.

(上接第 6 页)

- [4] 白春礼. 纳米科技及其发展前景[J]. 化工学报, 2001, 52(4): 37.
- [5] 张志明, 刘键, 韩振, 等. 纳米增效肥对杂交稻的增产效果研究[J]. 腐植酸, 2012(2): 15-19.
- [6] 肖强, 孙焱鑫, 王甲辰, 等. 纳米材料在土壤与植物营养领域的应用进展[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 10-15.
- [7] Li X M, Shen Q R, Zhang D Q, et al. Functional groups determine biochar properties (pH and EC) as studied by two-dimensional ^{13}C NMR correlation spectroscopy[J]. Plos One, 2013, 8(6): e65949.
- [8] 刘艳丽, 周蓓蓓, 王全九, 等. 纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 21-25.
- [9] 傅子洵, 王云强, 安芷生. 黄土区小流域土壤容重和饱和导水率的时空动态特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 128-134.
- [10] 刘春利, 邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2400-2407.
- [11] 张平仓, 唐克丽. 六道沟流域有效水蚀风蚀能量及其特征研究[J]. 水土保持学报, 1997(2): 32-40.
- [12] 穆晓慧, 李世清, 党蕊娟. 黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1341-1347.
- [13] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 13(6): 1020-1027.
- [14] 张长保. 降雨条件下黄土坡面土壤养分迁移特征试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [15] 吕金榜, 周蓓蓓, 王全九, 等. 纳米 TiO_2 对土壤水分运动及离子迁移过程影响的试验研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 58-61.
- [16] 王全九, 王力, 李世清. 坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 35(12): 109-114.
- [17] 王辉, 王全九, 邵明安. PAM 对黄土坡地水分养分迁移特性影响的室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 85-88.