

晋西黄土区坡耕地不同下垫面水土流失对 侵蚀性降雨的响应

周 晗^{1,2}, 严俊霞¹, 李洪建¹, 王小云²

(1. 山西大学 黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西省水土保持科学研究所, 太原 030045)

摘 要:为了揭示晋西黄土区不同类型坡耕地的产流、产沙及入渗规律,以 4 种下垫面(玉米、马铃薯、弃耕地、裸地)径流小区为研究对象,采用水量平衡的方法,分析了降雨因子对地表径流深、泥沙流失量和入渗率的影响。不同下垫面径流小区的径流深、泥沙流失量从小到大依次表现为玉米地<马铃薯地<弃耕地<裸地,入渗率则反之。与玉米地相比,马铃薯地、弃耕地和裸地的径流深增加了 58.95%,146.85%,261.48%;泥沙流失量增加了 50.45%,94.98%,240.06%;入渗率下降了 5.68%,14.25%,25.36%。玉米地、马铃薯地、裸地径流深与 I_{10} , I_{30} , $P \times I_{10}$, $P \times I_{30}$ 呈较好的幂函数关系,弃耕地径流深与之呈较好的一次函数关系,泥沙流失量也表现出相似趋势。入渗率随雨强增大呈减小趋势。与马铃薯地、弃耕地和裸地相比,玉米地在不同程度上有减流减沙、增加入渗的特性。

关键词:坡耕地;下垫面;产流产沙;入渗率

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0007-06

Response of Soil and Water Loss on Different Underlying Surfaces of Sloping Farmland to Erosive Rainfall in the Loess Area of Western Shanxi Province

ZHOU Han^{1,2}, YAN Junxia¹, LI Hongjian¹, WANG Xiaoyun²

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Institute of Soil and Water Conversation Science, Taiyuan 030045, China)

Abstract: In order to investigate characteristics of runoff, sediment and infiltration of sloping farmlands under different land uses in the loess area of western Shanxi, four underlying surfaces (maize, potato, abandoned farmland, bare land) were used as research objects in runoff plot experiment. Water balance methods were used to analyze the relationship between rainfall and runoff depth, sediment loss and infiltration rate. The runoff depth and sediment loss for the four underlying surface plots increased in the order: maize<potato<abandoned farmland<bare land, but the order for the infiltration rate was on the contrary. The runoff depths in potato, abandoned farmland, and bare land plots increased by 58.95%, 146.85%, and 261.48%, respectively, compared with that in the maize plot, and the losses of sediments increased by 50.45%, 94.98%, and 240.06%, respectively, and the infiltration rates decreased by 5.68%, 14.25% and 25.36%, respectively. A significant power function relationship between runoff depth and I_{10} , I_{30} , $P \times I_{10}$, $P \times I_{30}$ in maize, potato land and bare ground was found, but a linear function between runoff depth and these parameters in abandoned farmland existed. A similar trend as above was also found for amount of sediment loss. The infiltration rate decreased with the increase of rain intensity. Compared with potato, the characteristics of reducing runoff and sediment and increasing infiltration to a certain degree were observed in abandoned farmland and bare land, maize fields.

Keywords: sloping farmland; underlying surface; runoff and sediment production; infiltration rate

黄土高原是我国坡耕地的主要分布区之一,坡耕地造成的水土流失导致了黄土高原地区生态环境恶化,同时土壤水分不足也制约着该地区植被与生态恢复^[1-2]。如何有效拦蓄径流、促进降雨入渗,降低土壤侵蚀是坡耕地水土流失治理的核心。因此研究次降雨对坡耕地不同下垫面产流、产沙及入渗的影响,对于揭示黄土高原坡地径流过程、水量转化特点、坡面水土流失机理具有重要的意义。

关于降雨因子对坡面产流产沙的影响,学者们进行了大量的研究,主要通过对天然降雨或者模拟降雨条件下径流泥沙的监测,揭示坡面水土流失的机理。目前对不同下垫面产流产沙、入渗规律的研究多集中在人工林草植被、农作物方面,申震洲等^[3]认为相同降雨条件下,灌木地减流减沙、增加入渗的效果优于荒草地、裸地。赵鹏宇^[4]认为灌木地土壤水分入渗率随雨强增大呈增大趋势,翻耕草灌地则反之。以作物为对象的水土流失规律研究多在模拟降雨条件下进行,马波等^[5]通过人工模拟降雨对大豆产流产沙进行了研究,结果表明与裸地相比,大豆全生育期内可减少径流量 31.43%,减少土壤流失量 54.84%。刘志明^[6]对生育期马铃薯坡面进行研究表明,坡面产流产沙与降雨强度呈正相关,能有效削弱暴雨下坡面土壤侵蚀过程。吴佳等^[7]对秋作物(玉米、大豆、谷子)坡地、裸地在模拟降雨条件下的入渗特征参数研究表明,降雨强度与入渗性能存在显著正相关。关于弃耕地的研究多集中在水土流失特点、土壤抗蚀性方面。张旭昇等^[8]研究了天然降雨下人为扰动和自然恢复撂荒地产流产沙的特点,结果表明径流量与径流含沙量、产沙量与 15 min 雨强有相同的增减趋势,呈三次曲线关系。罗利芳等^[9]通过野外不同流量放水冲刷试验,认为土壤抗冲性、透水性随撂荒年限的延长而增强,撂荒 5 a 后,水土流失得到很大控制。李华林^[10]、李瑞等^[11]认为喀斯特地区撂荒地径流量、泥沙量均显著低于林地和坡耕地。

上述研究没有明确不同时段雨强对弃耕地及不同作物种类水土流失及入渗的影响程度。本研究在山西省静乐县娑婆小流域进行,通过小区实地监测,在兼顾作物种类、下垫面变化的基础上,研究降雨因子对坡面土壤侵蚀的影响,以期对坡耕地水土流失综合治理、土地利用规划提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该试验在汾河流域上游的静乐县娑婆乡娑婆村娑婆小流域径流观测场进行。该区属汾河支流东碾

河小流域,区内属温带季风气候,年均温 3.5~6.8℃,年降雨量 380~500 mm,降水多集中在 7—9 月。流域内沟壑相间、地形破碎,坡耕地分布广泛,土壤侵蚀主要为水力侵蚀,平均土壤侵蚀模数约为 5 800 t/(km²·a)。该区土壤为砂质黄壤土,有机质含量 0.15%~1%,土壤容重 1~1.3 g/cm³,土壤孔隙率 45%~60%,田间持水量 17%~25%。乔木主要为油松(*Pinus tabulaeformis*)、白杨(*Populus alba*)和垂柳(*Salix babylonica*),灌木主要以沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)为主,草本主要为狗尾草(*Setaria viridis*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)等,主要种植作物有玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)。

1.2 试验设计

径流场修建于 2013 年,位于娑婆小流域下游,场内共布设有 12 个径流小区,主要用于对坡耕地降雨、径流、泥沙进行定点监测。各小区投影面积为 30 m² (3 m×10 m),坡向南,位于坡面中上部,坡度为 12°。12 个小区之间由 1.0 m 管理道路分为东、中、西三组,每组的 4 个小区分别为玉米小区、马铃薯小区、裸地小区、弃耕地小区,每组均有 3 个重复小区。2016 年春季在对应小区分别穴状种植由山西省农科院选育的玉米(中地 88 号)、马铃薯(晋薯 17 号),根据当地种植制度进行浇水、除草及病虫害防治等农事活动。裸地应及时清除地表植被覆盖物,保持坡面无任何植被覆盖;弃耕地自 2013 年起没有进行种植,截至 2016 年春耕季为弃耕三年。各小区具体参数详见表 1。

表 1 径流小区参数

小区类型	植被	覆盖度/%	株距×行距
玉米	玉米	40.85±10.64	30 cm×30 cm
马铃薯	马铃薯	69.40±11.85	30 cm×30 cm
弃耕地	白草、狗尾草	17.08±0.95	—
裸地	无植被	0	—

注:地表植被覆盖度为观测期内 6 次测定值的平均值。

1.3 研究方法

1.3.1 数据测定 试验于 2016 年雨季 7—9 月进行。次降雨量采用翻斗式自记雨量计(JQR-1,潍坊金水华禹信息科技有限公司)测定。根据雨量计记录数据分别统计出每隔 10 min,30 min 等时间间隔的降雨量,换算成相应时间段的雨强,选择出单场降雨中最大的时段雨强。径流量通过集流桶收集后采用容积法测量。首先通过人力将泥沙和径流充分混匀,然后取 1 L 混合水样,经沉淀、烘干、称重(精确到 g)求得泥沙含量,根据泥沙量计算各小区的产沙量。人

渗率通过降雨量和径流量的差值计算得到^[12-13]。地表植被覆盖度参照《径流小区和小流域水土保持监测手册》采用目估法和照相法推算。

1.3.2 数据分析 参与统计分析的数据,如径流量、泥沙量等均为 3 个重复小区的平均值。用 Excel 2010 进行计算和作图,用 SPSS 13.0 的单因素方差分析对 4 种下垫面小区的产流、产沙、入渗率的均值差异进行统计检验;降雨因子与径流深、泥沙流失量、入渗率的相关性采用 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 试验期降雨特征

选取试验地 2016 年 7 月 15 日—2016 年 9 月 17 日具有代表性的 6 场侵蚀性降雨,降雨量(P)介于 28.63~41.82 mm 之间。根据气象学中降雨强度划分标准,6 场降雨均属于大雨范畴。依次统计出单场降雨的最大 10 min 雨强(I_{10})、最大 30 min 雨强(I_{30})和平均雨强($I_{\text{平}}$)(表 2)。分段雨强能反映出降雨过程集中程度的差异性,平均雨强能体现出单次降雨的总特征^[14]。由表 2,表 3 可知,降雨量大,时段雨强不一定大。时段雨强 $I_{\text{平}}$ 与 I_{10} 、 I_{30} 没有显著相关性,而 I_{10} 与 I_{30} 有显著的相关性。

表 2 场次降雨特征

降雨日期	P/mm	$I_{10}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	$I_{30}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	$I_{\text{平}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$
7 月 15 日	35.41	29.40	18.20	8.00
7 月 19 日	32.56	43.80	35.20	6.50
8 月 12 日	29.78	43.20	23.40	3.70
8 月 14 日	41.82	65.00	40.00	8.20
8 月 15 日	34.18	46.00	25.80	5.60
9 月 17 日	28.63	27.00	16.60	4.90

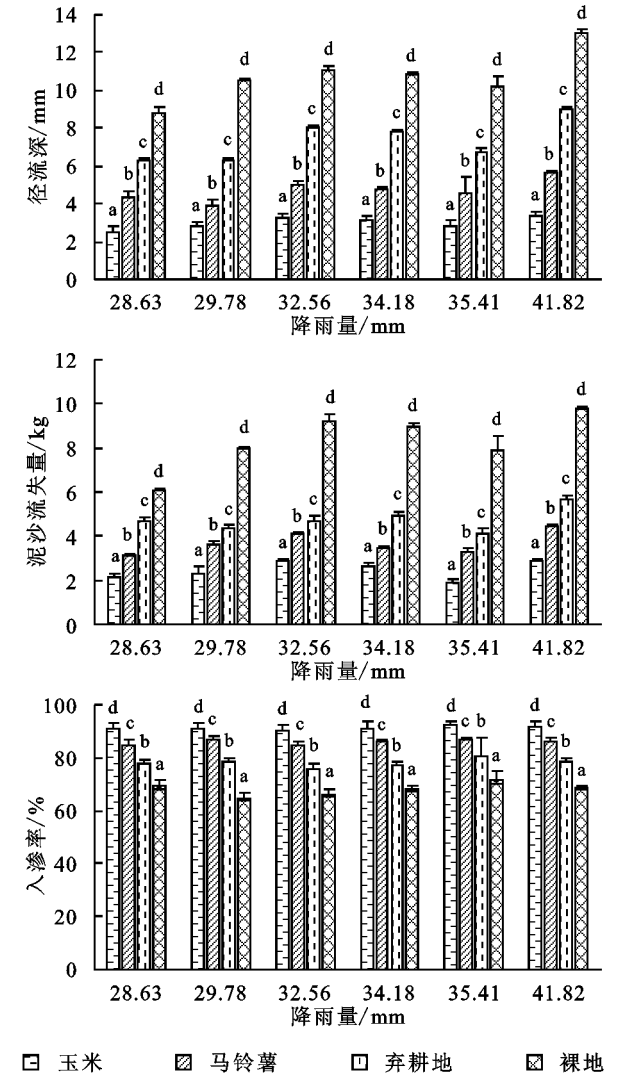
表 3 场次降雨特征相关性分析

相关性	P	$I_{\text{平}}$	I_{10}	I_{30}
P	1			
$I_{\text{平}}$	0.33	1		
I_{10}	0.73	0.68	1	
I_{30}	0.67	0.54	0.90*	1

2.2 不同下垫面径流小区产流、产沙及入渗特征

不同下垫面次降雨径流深、泥沙流失量、入渗率变化情况如图 1 所示。单场降雨不同下垫面径流深、泥沙流失量、入渗率差异显著($p<0.05$)。总体来看,在研究期间,不同下垫面径流深、泥沙流失量从小到大依次表现为玉米地<马铃薯地<弃耕地<裸地,而入渗率则反之。与玉米地相比,马铃薯地、弃耕地和裸地的径流深显著增加了 58.95%,146.85%,261.48%;泥沙流失量显著增加了 50.45%,94.98%,240.06%;入渗率显著下降

了 5.68%,14.25%,25.36%。



注:同组不同小写字母为 $p<0.05$ 水平下差异显著。

图 1 不同下垫面径流小区次降雨径流深、泥沙流失量、入渗率变化

2.3 次降雨对不同下垫面径流小区产流的影响

2.3.1 降雨量对径流深的影响 坡面产流是由降水、截留、填凹、蒸发、入渗等过程综合作用的结果,其中降水作为仅有的水分来源,是产生地表径流的必要条件。对观测期降雨量(P ,mm)和径流深(玉米地 R_y ;马铃薯地 R_m ;弃耕地 R_q ;裸地 R_l ,mm)建立线性和幂函数回归模型。线性回归模型(玉米地: $R_y=1.30+0.05P$, $R^2=0.55$, $p=0.09$;马铃薯地: $R_m=1.01+0.11P$, $R^2=0.76$, $p=0.02$;弃耕地: $R_q=0.99+0.19P$, $R^2=0.69$, $p=0.04$;裸地: $R_l=2.15+0.26P$, $R^2=0.76$, $p=0.03$)。幂函数回归模型(玉米地: $R_y=0.36P^{0.60}$, $R^2=0.56$, $p=0.09$;马铃薯地: $R_m=0.29P^{0.79}$, $R^2=0.73$, $p=0.03$;弃耕地: $R_q=0.34P^{0.88}$, $R^2=0.68$, $p=0.04$;裸地: $R_l=0.64P^{0.80}$, $R^2=0.73$, $p=0.03$)。两种模型中除玉米地之外,线性回

归模型具有较高的相关系数。

2.3.2 雨强对径流深的影响 雨强越大,单位时间到达地面的降水越多,地表产生的径流随之增多。运用 SPSS 软件对不同下垫面径流小区径流深与分段雨强分别进行相关分析,由表 4 可知,玉米地、弃耕地、裸地径流深与 $I_{10}, I_{30}, P \times I_{10}, P \times I_{30}$ 呈显著或极显著关系。除裸地以外,其他下垫面径流深与 I_{30} 相关性大于 I_{10} 。各小区径流深与降雨复合因子($P \times I_{10}, P \times I_{30}$)的相关程度大体上高于与单一降雨因子(P, I_{10}, I_{30})的相关程度,但与平均降雨强度相关性均不显著。由表 5 可见,玉米地、马铃薯地、裸地径流

深与 $I_{10}, I_{30}, P \times I_{10}, P \times I_{30}$ 呈较好的幂函数关系,弃耕地径流深与 $I_{10}, I_{30}, P \times I_{10}, P \times I_{30}$ 呈较好的一次函数关系。

表 4 径流深与降雨因子的相关性分析

小区类型	I_{10}	I_{30}	$I_{\text{平}}$	$P \times I_{10}$	$P \times I_{30}$	$P \times I_{\text{平}}$
玉米	0.84 *	0.92 **	0.39	0.82 *	0.90 *	0.64
马铃薯	0.72	0.81	0.11	0.83 *	0.89 *	0.55
弃耕地	0.85 *	0.91 **	0.26	0.89 *	0.95 **	0.62
裸地	0.95 **	0.91 **	0.64	0.97 **	0.96 **	0.90 *

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

表 5 径流深与降雨因子回归关系

小区类型		I_{10}	I_{30}	$P \times I_{10}$	$P \times I_{30}$
玉米	方程	$y=1.102x^{0.289}$	$y=1.160x^{0.290}$	$y=0.568x^{0.229}$	$y=0.620x^{0.232}$
	(R^2 , Sig.)	(0.733, 0.030)	(0.869, 0.007)	(0.794, 0.017)	(0.913, 0.003)
马铃薯	方程	$y=1.905x^{0.243}$	$y=1.999x^{0.264}$	$y=0.949x^{0.221}$	$y=0.972x^{0.234}$
	(R^2 , Sig.)	(0.391, 0.184)	(0.546, 0.094)	(0.561, 0.086)	(0.699, 0.038)
弃耕地	方程	$y=4.531+0.067x$	$y=4.561+0.105x$	$y=5.279+0.001x$	$y=5.198+0.002x$
	(R^2 , Sig.)	(0.714, 0.034)	(0.832, 0.011)	(0.783, 0.019)	(0.896, 0.004)
裸地	方程	$y=2.702x^{0.371}$	$y=3.674x^{0.331}$	$y=1.257x^{0.296}$	$y=1.672x^{0.275}$
	(R^2 , Sig.)	(0.872, 0.006)	(0.818, 0.013)	(0.965, 0.000)	(0.931, 0.002)

2.4 次降雨对不同下垫面径流小区产沙的影响

降雨是影响土壤侵蚀的主要因素之一。 $P, I_{\text{平}}$ 与泥沙流失量均没有显著相关性。不同下垫面泥沙流失量与 $I_{10}, I_{30}, P \times I_{10}, P \times I_{30}$ 呈显著或极显著正相关(玉米地与 $P \times I_{10}$, 弃耕地与 I_{30} 除外)。由表 6 可

见,玉米地、马铃薯地、裸地泥沙流失量分别与 $I_{10}, I_{30}, P \times I_{10}, P \times I_{30}$ 呈较好的幂函数关系,拟合程度从高到底依次是 $I_{30} > I_{10}, P \times I_{30} > P \times I_{10}$;弃耕地泥沙流失量分别与 $I_{10}, I_{30}, P \times I_{10}, P \times I_{30}$ 呈较好的一次函数关系。

表 6 泥沙流失量与降雨因子回归关系

小区类型		I_{10}	I_{30}	$P \times I_{10}$	$P \times I_{30}$
玉米	方程	$y=0.497x^{0.429}$	$y=0.605x^{0.431}$	$y=0.282x^{0.299}$	$y=0.304x^{0.309}$
	(R^2 , Sig.)	(0.712, 0.035)	(0.850, 0.009)	(0.599, 0.071)	(0.716, 0.034)
马铃薯	方程	$y=0.945x^{0.364}$	$y=1.113x^{0.368}$	$y=0.505x^{0.274}$	$y=0.548x^{0.281}$
	(R^2 , Sig.)	(0.779, 0.020)	(0.938, 0.001)	(0.764, 0.023)	(0.900, 0.004)
弃耕地	方程	$y=3.347+0.033x$	$y=3.566+0.044x$	$y=3.714+0.001x$	$y=3.779+0.001x$
	(R^2 , Sig.)	(0.685, 0.042)	(0.580, 0.078)	(0.756, 0.024)	(0.703, 0.037)
裸地	方程	$y=1.515x^{0.456}$	$y=2.072x^{0.427}$	$y=0.614x^{0.360}$	$y=0.796x^{0.346}$
	(R^2 , Sig.)	(0.746, 0.027)	(0.821, 0.013)	(0.802, 0.016)	(0.833, 0.011)

2.5 次降雨对不同下垫面径流小区入渗的影响

江忠善等^[15]按照 I_{30} 标准划分雨强类型: $I_{30} \leq 15$ mm/h 为低雨强;15 mm/h < $I_{30} < 30$ mm/h 为中雨强; $I_{30} \geq 30$ mm/h 为高雨强。试验期降雨强度属中高型,见图 2,不同下垫面入渗率随雨强增大而减小。这一结果与刘栋等^[16]研究一致。不同下垫面入渗率随降雨量的增加呈增加趋势。

3 讨论

本试验研究了次降雨下玉米地、马铃薯地、弃耕

地、裸地的径流深、泥沙流失量、入渗率的变化规律。对同一地区而言,在较小的时间尺度上,植被是影响土壤侵蚀的关键因子之一^[17]。相同降雨条件下,不同下垫面间在产流、产沙及入渗方面存在显著差异,这可能是由于不同植被的叶形、根形、茎形、株高等形态因子通过改变降雨特征、土壤物理化学特性和地表径流性质而影响产流产沙以及入渗规律^[18-19]。根据已有研究结论^[20]可知,植被覆盖能有效延缓产流、增加入渗、显著减少产沙量。本研究中马铃薯地植被覆盖度高于玉米地,而玉米地减流减沙、增加土壤入渗

效果却优于马铃薯地,这是由于玉米是作物中产生茎秆能力较强的物种,可以将多达40%~50%的降雨转化为茎干流^[21];马铃薯能将20%~46%的降雨量引流至其茎秆^[22]。不同植被类型对土壤的固结作用差异明显^[23]。于国强等^[24]认为植被根系对水沙的调控作用大小起着至关重要的作用。马铃薯属浅根性农作物,玉米气生支柱根发达,根系的缠绕和固结作用能增强土壤抗冲性。试验期玉米地径流系数小于0.1,低于卢龙彬等^[25]研究的黄土高原北部水蚀风蚀交错区径流系数,这表明大部分降雨被玉米截留进入到土壤中。

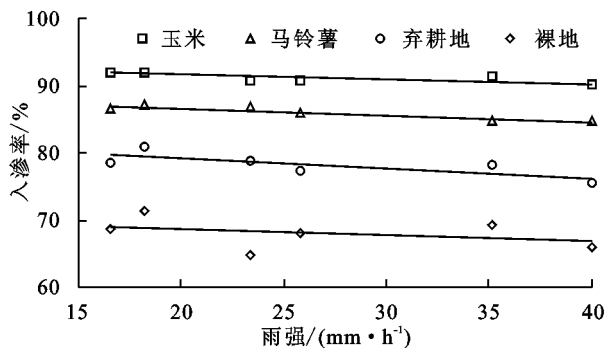


图2 不同下垫面径流小区入渗率随 I_{30} 变化

本试验中玉米地、马铃薯地泥沙流失量高于弃耕地,这与一些研究结果^[10-11]不一致。这是因为试验期为7—9月,玉米和马铃薯处于生殖生长阶段,依照当地的种植制度,在此期间不进行除草等农事活动,因此人为活动引起的水土流失较低。撂荒1~5 a土壤坚实度、植被生长状况有一定差异,波动性较大^[9]。试验地弃耕地恢复年限为3 a,地表植被分布不均匀,试验期降雨较集中,降雨初期溅蚀作用较大,降雨中后期极易发生细沟和浅沟侵蚀,因此泥沙流失量相对较高。而玉米地和马铃薯地由于上层植被对雨滴动能的缓冲作用和根系对土壤的固结作用,不易发生细沟和浅沟侵蚀。

马铃薯地、裸地、弃耕地径流深与次降雨量呈显著线性相关,这与寇馨月等^[13]研究结果一致。但玉米地径流深与次降雨量关系不显著,这是由于玉米特有的植株形态通过对降雨进行再分配进而影响地表径流的形成。降雨量与不同下垫面泥沙流失量正相关关系不显著,主要原因是坡面产沙不同于产流,产流量主要与土壤含水量有关,而土壤含水量与降雨量密切相关;产沙量则主要取决于地表径流侵蚀力的大小,因此与降雨强度的关系更密切^[26]。不同下垫面径流深、泥沙流失量与平均雨强均无显著相关性,这是由于平均雨强仅仅反映的是某次降雨的总体特征,不能反映出降雨集中程度的差异^[27]。不同时段雨强

分别与径流、泥沙流失量的回归关系一致,这是因为径流是泥沙输出的载体。

不同下垫面降雨因子与入渗率没有显著相关性。这是由于天然降雨过程中雨强变化不恒定,导致土壤入渗率随之改变,雨强降低时,入渗率有所增加;雨强增大时,入渗率小幅增加后,增加速率减慢^[28]。不同下垫面入渗率随降雨量增加而增加,随雨强增加而减小,这是由于降雨量大时雨强不一定大,当降雨量增加时,地表水深增加,地表水层静水压力相应增大,一定程度上增加了土壤入渗性能^[29]。在中高型雨强下,雨滴具有较强的动能,对地表的击溅作用会堵塞土壤毛细孔管,阻碍水分正常入渗。

本研究也存在一些问题,缺少不同农作物间作模式的径流小区,缺乏作物根系对产流产沙及入渗的研究,今后的研究中可加入此部分内容,进而全面揭示坡地作物对水土流失的影响机理。对于弃耕地随弃耕年限增加的水土流失变化特点仍需在结合植被演替、土壤理化性质规律的基础上深入研究。

4 结论

(1) 不同下垫面径流深、泥沙流失量、入渗率差异显著,相同降雨量条件下,各下垫面径流深、泥沙流失量大小关系为:玉米地<马铃薯地<弃耕地<裸地,入渗率则反之。

(2) 不同下垫面径流小区降雨量、平均雨强分别与泥沙流失量、入渗率没有显著相关性;径流深随降雨量的增加而显著增加, I_{30} 对不同下垫面径流深、泥沙流失量影响整体高于 I_{10} ,降雨复合因子对径流深的影响高于单因子。不同下垫面径流深、泥沙流失量与雨强因子呈幂函数或一次函数关系。

(3) 玉米具有较好的水土保持性能,可作为黄土丘陵区坡耕地农作物首选品种进行种植。

参考文献:

- [1] Chen H, Shao M, Li Y. Soil Desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008,143(1):91-100.
- [2] Chen L, Wei W, Fu B, et al. Soil and Water Conservation on the Loess Plateau in China: Review and Perspective[J]. Progress in Physical Geography, 2007,31(4): 3547-3554.
- [3] 申震洲,刘普灵,谢永生,等.不同下垫面径流小区土壤水蚀特征试验研究[J].水土保持通报,2006,26(3):6-9.
- [4] 赵鹏宇.黄土丘陵区草、灌地不同经营方式下的降雨—入渗—产流研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [5] 马波,刘雨鑫,吴发启.植大豆对坡耕地径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):32-36.
- [6] 刘志明.马铃薯对坡面土壤侵蚀的影响研究[D].山西晋

- 中:山西农业大学,2013.
- [7] 吴佳,王林华,李占斌,等.黄土高原主要秋作物坡地降雨入渗特征参数研究[J].水土保持学报,2014,28(6):115-119.
- [8] 张旭昇,薛天柱,马灿,等.雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(6):66-70.
- [9] 罗利芳,张科利,李双才.撂荒后黄土高原坡耕地土壤透水性 and 抗冲性的变化[J].地理科学,2003,23(6):728-733.
- [10] 李华林,高华端,杨涛,等.凯掌喀斯特小流域不同植被措施的减沙功能[J].浙江农林大学学报,2017,34(4):687-694.
- [11] 李瑞,李勇,熊康宁,等.黔中喀斯特区典型土地利用方式及耕作措施的水土流失调控效应[J].水土保持通报,2017,37(6):136-140.
- [12] 覃莉,刘凤仙,杨智.喀斯特地区不同坡度径流小区水土流失特征分析[J].中国水土保持,2015(8):63-65.
- [13] 李月,周运超,白晓永,等.径流小区法监测水土流失的百年历程(1915—2014年)[J].中国水土保持,2014(12):63-66.
- [14] 闫胜军,郭青霞,闫瑞,等.不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J].水土保持学报,2015,29(2):45-49.
- [15] 江忠善,刘志,贾志伟.地形因素与坡地水土流失关系的研究[J].水土保持研究,1990(2):1-8.
- [16] 刘栋,刘普灵,邓瑞芬,等.不同下垫面径流小区次降雨侵蚀特征相关分析[J].水土保持通报,2011,31(2):99-102.
- [17] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.
- [18] 孙家振.不同植被坡面土壤侵蚀特性研究[D].合肥:安徽农业大学,2011.
- [19] 傅伯杰.黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M].北京:商务印书馆,2002.
- [20] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等.野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J].水土保持学报,2005,19(2):5-8.
- [21] Steiner J L, Kanemasu E T, Clark R N. Spray losses and partitioning of water under center pivot sprinkler system[J]. Transactions of the Asae, 1982, 26(4):1128-1134.
- [22] Saffigna P G, Tanner C B, Keeney D R. Non-Uniform Infiltration Under Potato Canopies Caused by Interception, Stemflow, and Hilling1[J]. Agronomy Journal, 1976, 68(2):337-342.
- [23] 朱连奇,许叔明,陈沛云.山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J].地理研究,2003,22(4):432-438.
- [24] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
- [25] 卢龙彬,付强,黄金柏.黄土高原北部水蚀风蚀交错区产流条件及径流系数[J].水土保持研究,2013,20(4):17-23.
- [26] 李广,黄高宝.雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J].农业工程学报,2009,25(11):85-90.
- [27] 张思毅,梁志权,谢真越,等.植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理[J].水土保持学报,2016,30(3):1-5.
- [28] Busscher W J. Simulation of Infiltration from a Continuous and an Intermittent Subsurface Source[J]. Soil Science, 1979, 128(1):49-55.
- [29] 寇馨月,黄俊,姜学兵,等.不同下垫面径流小区次降雨对产流产沙的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):27-31.

(上接第 6 页)

参考文献:

- [1] 任美镠.黄河的输沙量:过去,现在和将来:距今 15 万年以来的黄河泥沙收支表[J].地球科学进展,2006,21(6):551-563.
- [2] 费祥俊,吴保生.黄河下游输沙平衡关系及应用[J].水力发电学报,2015,34(7):1-11.
- [3] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
- [4] 冉大川.黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J].资源科学,2006,28(1):93-100.
- [5] 李文文,傅旭东,吴文强,等.黄河下游水沙突变特征分析[J].人民黄河,2012,34(10):19-20.
- [6] 楚纯洁,李亚丽.近 60 年黄河干流水沙变化及其驱动因素[J].水土保持学报,2013,27(5):41-47,132.
- [7] 胡彩虹,王纪军,柴晓玲,等.气候变化对黄河流域径流变化及其可能影响研究进展[J].气象与环境科学,2013,36(2):57-65.
- [8] 姚文艺,苏运启,李勇.黄河下游排洪输沙基本功能的影响因素及判别指标[J].泥沙研究,2009(1):1-9.
- [9] 曲少军,申冠卿,魏向阳,等.黄河下游河道排洪能力分析[J].人民黄河,2000,22(11):3-4.
- [10] 韩其为.黄河下游输沙及冲淤的若干规律[J].泥沙研究,2004(3):1-13.
- [11] 许炯心.黄河下游河道输沙功能的时间变化及其原因[J].地理研究,2006,25(2):276-284.