

不同耕作措施对花生结荚期产流产沙过程的影响

张杰豪, 梁心蓝, 黄洪粮, 唐恺, 王清震, 周苍宁, 毛熹

(四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安 625014)

摘要: 为了研究不同耕作措施在花生结荚期时对紫色土区产流产沙过程的影响, 通过对顺坡垄作、横坡垄作、穴播、平作这 4 种耕作措施种植花生以及对对照组平坡裸地进行野外模拟降雨试验, 得到其径流泥沙特征。利用滑动秩和检验法找出产流产沙过程变异时刻点, 对变异时刻点后用 Mann-Kendall 趋势检验法分析产流产沙过程趋势。结果表明: 产流产沙过程变异时刻点后均处于一个较为稳定状态, 平坡裸地的稳定径流率、侵蚀率均最大, 顺坡垄作次之, 然后是平作, 再是穴播, 横坡垄作最小; 而各耕作措施初始产流时间则与稳定径流率和侵蚀率相反。在减流减沙效益方面, 相对于平坡裸地, 不同耕作措施均表现出减流减沙效果, 具体表现为横坡垄作 > 穴播 > 平作 > 顺坡垄作。

关键词: 耕作措施; 花生; 紫色土; 模拟降雨; 径流; 泥沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0071-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.010

Effects of Different Tillage Practices on the Yield of Runoff and Sediment in Peanut Podding Stage

ZHANG Jiehao, LIANG Xinlan, HUANG Hongliang, TANG Kai,

WANG Qingzhen, ZHOU Cangning, MAO Xi

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sicuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014)

Abstract: In order to study the effects of different tillage practices on the yield of runoff and sediment in purple soil area in peanut podding stage. Field rainfall simulation experiments were carried out to study the yield of runoff and sediment in four tillage practices and one control group (longitudinal ridge, cross ridge, bunch planting, flat planting and bare land on flat slope). The sliding-rank-sum-test was used to find out the catastrophe point of runoff and sediment production process. The Mann-Kendall trend test method was used to analyze the trend of runoff and sediment yield process after the catastrophe point. The results showed that the runoff and sediment yield process was in a relatively stable state after the catastrophe point. The stable rate of runoff and sediment yield in bare land was the largest, followed by longitudinal ridge, then flat planting, bunch planting, and cross ridge was the smallest. However, the initial runoff yield time of each tillage practice was opposite to the stable rate of runoff and sediment yield. Compared to bare land on flat slope, all tillage practices showed the effects of runoff and sediment reduction. The specific performance was cross ridge > bunch planting > flat planting > longitudinal ridge.

Keywords: tillage practice; peanut; purple soil; rainfall simulation; runoff; sediment

坡耕地水土流失导致土层变薄, 养分降低, 终使土壤退化, 从而影响坡耕地的持续利用和生产力的提高^[1-2]。坡耕地的水土流失是一个较复杂的过程, 其坡面多达 85% 的土壤侵蚀量是由径流冲刷造成的^[3]。耕作措施和植被的种植情况是影响坡面产沙的重要因素。张翼夫等^[4]研究表明, 种植玉米相对于

对裸地能有效提升水土保持能力; Yao 等^[5]研究表明, 草和灌木对径流和泥沙有削减趋势; 王健等^[6]研究玉米坡面和苜蓿坡面表明, 植物对于土壤的保护作用强于径流的保护作用; 任雨之等^[7]对四川遂宁坡耕地产流产沙规律研究表明, 顺坡垄作的产沙量为横坡垄作的 10~20 倍, 产流量为 1~3 倍; 边锋等^[8]对东

收稿日期: 2020-07-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601292); 四川省教育厅项目(15ZB0007); 四川农业大学社科研究专项重点项目(2018ZD01)

第一作者: 张杰豪(1996-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 1210501312@qq.com

通信作者: 毛熹(1987-), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事水土保持和水利水电工程研究。E-mail: maowhiteknight@qq.com

北黑土区坡耕地土壤进行顺坡垄作和平作的坡面侵蚀研究表明,顺坡垄作更具有水土保持效果;王磊等^[9]在室内进行土槽试验,对比裸地的横坡垄作和无垄作研究表明,小雨强情况下横坡垄作具有很好的水土保持能力,在大雨强情况下,横坡垄作会发生断垄,会加剧水土侵蚀;还有研究^[10-12]表明,与顺坡垄作和平作相比,横坡垄作通过改变地表微地形,增加地表糙率以减少径流,垄丘可以有效降低径流流速,进而减少泥沙剥离和搬运。因此,采取有效的水土保持措施对农业的可持续发展十分重要。为此本文基于野外人工模拟降雨试验,以平坡裸地作为对照组,研究不同降雨强度下顺坡垄作、横坡垄作、穴播以及平作坡面的土壤侵蚀过程,分析不同耕作措施的水土保持能力以及种植花生对土壤水土保持的效果,以期为四川紫土区的土壤侵蚀防治提供科学依据。

1 材料与方法

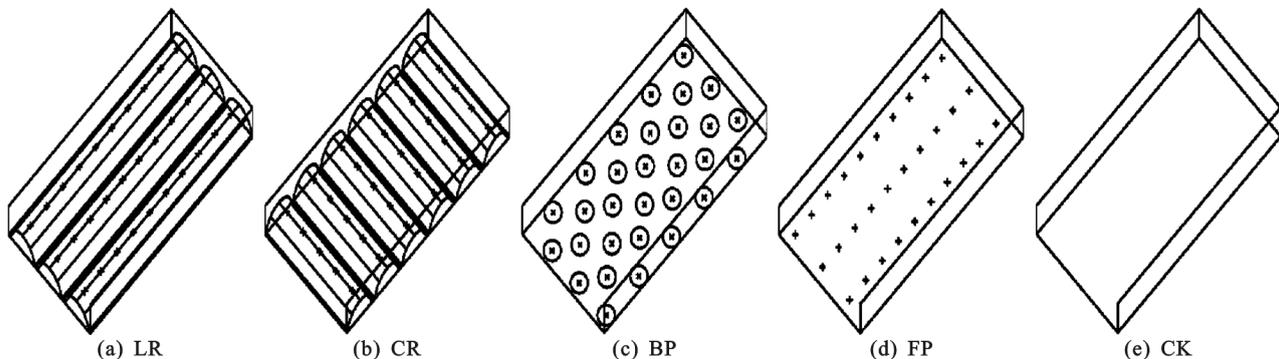
1.1 试验区概况

本试验在四川省雅安市雨城区四川农业大学科研训练中心(东经 102.99°,北纬 29.98°)试验地上进行。径流泥沙样品的采集及分析工作同步进行,试验仪器为小型侧喷式野外模拟降雨器。试验区域土壤为四川常见的紫色土,紫色土是由紫色页岩发育而成的土壤,其孔隙度大、入渗能力强、土层浅、下伏透水性较弱的泥页岩^[13]。供试土壤基本理化性质为:容重为 1.39 g/cm³;

砂粒(2~0.02 mm)含量 38.43%,粉粒(0.02~0.002 mm)含量 46.38%,黏粒(<0.002 mm)含量 15.19%;液限为 32.9%,塑限为 19.4%;pH 为 7.0~7.5。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,设 60, 90, 120 mm/h 3 种降雨强度,5 种耕作措施,共 15 个处理,每个处理重复 3 次,共 45 个试验小区。小区规格为 2 m×1 m(长度×宽度),坡度为 5°。5 种耕作措施分别为:(a)顺坡垄作 LR(longitudinal ridge),垄向沿坡度方向,1 个小区共 3 个垄,每个垄上种植 10 处花生,每处种植 2 株;(b)横坡垄作 CR(cross ridge),垄向垂直于坡度方向,1 个小区共 6 个垄,每个垄上种植 5 处花生,每处种植 2 株;(c)穴播 BP(bunch planting),从上坡到下坡共布置 10 排穴,每排布置 3 穴,其中奇数排和偶数排交错布置,穴的直径为 15 cm,深度为 3 cm,每穴种植 2 株花生;(d)平作 FP(flat planting),整个小区按照 10 排 3 列的布置种植花生,每处种植 2 株;(e)平坡裸地 CK,作为对照组(图 1)。试验径流小区边界用铁皮密封,并高出地面 20 cm,埋入土深度 20 cm,以削减侧向入渗的影响。小区下端安放集流槽,以保证在降雨期间各时段的所有地面径流流入集流桶内。其中 LR 和 CR 按照垄宽 30 cm,垄高 11 cm,垄沟宽 3.3 cm 布置。此次试验为花生的结荚期,降雨试验在 2019 年 7 月 5—25 日完成。



注:图中×表示花生的种植位置。

图 1 耕作措施示意

每次正式降雨前采用 30 mm/h 的降雨对各试验小区进行预降雨,至产流时结束。为避免蒸发和自然降雨对试验小区初始含水率产生影响,预降雨结束后用防水布遮盖小区,以确保各小区雨前含水量的一致性。降雨过程中,从降雨开始计时,当出现成股、持续流束时记录产流时间,每个处理从产流开始每 2 min 用集流桶收集 1 次径流,连续采集至降雨结束。称量径流与泥沙混合重量,记录数据。将装有径流与泥沙集流桶静置 24 h 以上,直到泥沙完全与径流分开,倒掉上层清液,收集泥沙,烘干,获得泥沙干重,径流量则为总重减去泥沙干重。

1.3 试验研究方法

滑动秩和检验法^[14]和 Mann-Kendall 趋势检验法^[15]是水文序列中用来判定长时间跨度下的序列数据变异时间点以及序列数据的趋势分析的方法。本次试验将每 2 min 的径流与泥沙数据当做序列数据中的 1 个值,拟结合以上 2 种方法来探寻产流产沙过程中最有可能出现的变异点,以及对变异点前后的序列数据变化趋势进行分析。

(1)滑动秩和检验法:对整个径流和产沙过程序列设置分割点 f_0 ,分割点前后 2 个过程总体的分布函数设为 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 。分别从 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$

中取出 2 个样本,容量为 n_1 和 n_2 的,要求检验原假设 $F_1(x) = F_2(x)$ 。分别将 2 个样本数据按从小到大排列并编号,规定每个数据在排列中所对应的序数称为该数的秩,当数据相同时,则用它们序数的平均值当做秩。把小容量样本秩的和记为 W ,秩和检验就是根据统计量 W 作检验的。滑动秩和检验法利用秩和检验法对序列逐点进行检验,找出满足 $|U| > U_{\alpha/2}$ 所有可能的点 f ,选择最大 U 统计量对应的点,为最可能变异点 f 。

(2) Mann-Kendall 趋势检验法: M-K 检验法是一种常用的非参数趋势检验方法,通过计算统计量 τ ,方差 $\text{Var}(\tau)$ 和标准化变量 U 来实现,其公式为:

$$\tau = \frac{4P}{n(n-1)}, \text{var}(\tau) = \frac{2n(n+5)}{9n(n-1)}, U = \frac{\tau}{\sqrt{\text{var}(\tau)}}$$

式中: P 为径流或者泥沙变量系列所有对于观测值 $(x_i, x_j, i < j)$ 中 $x_i < x_j$ 出现的次数; n 为系列长度。 U 为标准正态分布,当 $|U| > U_{\alpha/2}$ 时,则说明序列的趋势变化显著,若为正,则显著增加,若为负值,则显著减少;当 $|U| \leq U_{\alpha/2}$ 时,则序列趋势变化不显著。

减流效益和减沙效益计算公式^[16]为:

$$L = \frac{S_c - S_t}{S_c} \times 100, N = \frac{R_c - R_t}{R_c} \times 100$$

式中: L 为减流效益(%); S_t 为各种耕作措施的产流量 (cm^3); S_c 为 CK 的产流量 (cm^3); N 为减沙效益(%); R_t 为各种耕作措施的产沙量 (g); R_c 为 CK 的产沙量 (g)。

数据采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析并作图。

2 结果与分析

2.1 不同措施对坡面产流时间的影响

产流时间是坡面综合效果的反映,不同的耕作措施的影响导致产流时间的差异性,相同耕作措施下不同降雨强度也极大地影响了产流时间的差异性^[17-18]。由图 2 可知,5 种耕作措施的产流时间均表现为 $60 \text{ mm/h} > 90 \text{ mm/h} > 120 \text{ mm/h}$,雨强越大,产流时间越短。其主要原因是雨滴是产生径流动力的条件,降雨强度越大,土壤表层就越更容易更快被压实,从而使土壤下渗能力更快减弱,其土壤的饱和也会很快变大,因此导致了产流时间随降雨强度增大而减小^[19-20]。

在 3 种降雨强度下均为 CK 产流时间最短,CR 产流时间最长,不同耕作措施的产流时间规律为 $\text{CK} < \text{LR} < \text{FP} < \text{BP} < \text{CR}$ 。CK 作为对照组,地表既无耕作措施改变微地形的起伏,不能阻碍径流的产生;又无植被覆盖,不能截留降水和填洼,因此其产流

时间最短。FP 种植了花生,但无地形起伏措施,相较于对照组 CK 仅增加了植被。由于植被对于降雨的截留作用,根系的生长改变了土壤结构,增大了入渗^[21],因此其产流时间大于 CK。

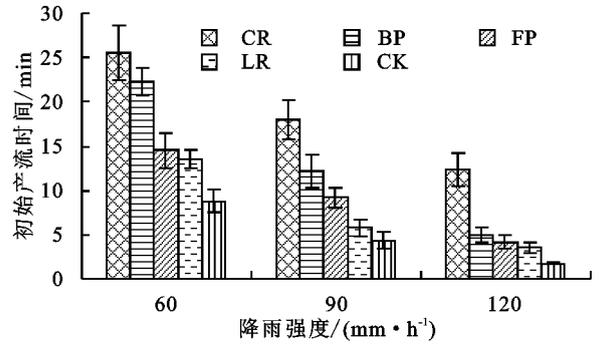


图 2 不同耕作措施初始产流时间

与 FP 相比,LR 增加了地形起伏措施,垄沟的走向与坡向相同,降雨初损后,降落在垄上的雨滴由于垄的分水岭作用很快汇集到两侧的沟中,沟对降水的汇集作用会加快径流的产生,因此其产流时间小于 FP。但由于植被对雨水的截留作用,LR 的产流时间大于 CK。BP 的圆形种植穴有较深的洼地,在植被截留作用之外,其凹陷的蓄水作用一方面拦截坡面流,另一方面增加入渗,降水的初损量显著大于 CK 和 FP。因此其产流时间大于 FP 小区。

CR 由于垄沟蓄水作用强对水流的阻碍作用增加了入渗^[22],且垄沟深度、容积均较大,降雨需待垄沟蓄满之后才能产流,因此相同降雨强度下 CR 的平均产流时间最长。BP 的种植穴虽也形成了洼地,其凹陷也有一定蓄水和增加入渗的作用,但由于整个小区坡面种植穴的凹陷总容积小于 CR 小区坡面的垄沟总容积,因此 BP 小区的产流时间较 CR 小区要短,但长于 CK 和 FP 小区。

从图 1 中还可以看出,随着降雨强度的增大,各措施之间产流时间的差异变小。60, 90, 120 mm/h 雨强下,各措施相较于对照组产流时间的平均延长时分别为 10.2, 7.0, 4.5 min,各地形起伏措施间产流时间的极差分别为 16.68, 13.71, 10.58 min。这与张会茹等^[23]所研究的不同降雨强度下对红土壤的侵蚀影响结论一致,降雨强度越大,不同耕作措施的初始产流时间差异越小。

2.2 不同耕作措施的产流产沙过程

2.2.1 不同耕作措施的产流产沙过程变异时刻点及 U 值的计算 在降雨过程中,径流量与泥沙量随降雨历时的增加而不断变化。对径流而言,由于雨前初始土壤含水量较低,土壤入渗率较大,降雨初损比较大,此时坡面不产流。随着降雨历时的增加,土壤含水量

逐渐增大,入渗速率逐渐降低,当入渗率小于降雨强度时,地表开始产流。随着降雨过程持续进行,入渗率会随着土壤含水量的增加持续降低,当土壤含水量达到饱和时,坡面入渗速率也会趋于稳定,因此,整个坡面产流过程呈现出刚开始产流量随降雨历时的增加而增加,一段时间后达到峰值,此后则随降雨历时的增加在一定幅度范围内稳定波动,这一稳定波动状态出现的时间点即为产流量的变异时刻点。

对产沙过程,在降雨初期,雨滴对地表的击溅作用使土壤颗粒分散,地表湿润后土壤颗粒逐渐崩解,被剥离。松散的土壤颗粒被坡面流挟带,随径流向下坡方向转移。随着产流量的增加,挟沙能力也会增加,因此前期产沙量随降雨历时增加而增大。随着降雨过程的持续,疏松的土壤颗粒基本被挟带离开地表,导致泥沙源减少;同时随着地表结皮的形成,径流剥蚀土壤颗粒的能力减弱;此外产流量逐渐趋于稳定,径流的挟沙能力随之趋于稳定。在这 3 个方面因素的作用下,最终产沙量在一定范围内波动,呈现出一个相对稳定的状态。这一相对稳定的产沙过程出现的时间点,即为产沙过程的变异时刻点。

为了更准确找出产流产沙过程的变异时刻点,利用滑动秩和检验法,根据降雨过程中每 2 min 的径流量以及泥沙量得到了不同耕作措施下的径流以及产沙过程的变异时刻点及对应的 U 值。由表 1 可知,随着雨强的增加,变异时刻点大致呈现出减少的趋势。这是因为雨强的增大,使土壤更快达到饱和含水率,使其更快稳定入渗;并且雨强越大,雨滴对土壤表层的击打作用越大,更容易将土壤表层拍实,导致结皮的形成,从而更快进入到另外一个阶段。比较 U 值与临界 U 值的大小可以判断出变异是否显著,临界 U 值置信区间 a 的取值根据所需精度不同有所差异, $a=0.05$ 为常用值。找出对应 $U_{\alpha/2}=1.96$,此次试验的滑动秩和检验法的 U 值均满足 $|U|>U_{\alpha/2}$,因此在每个时刻的变异均为显著变异。得到显著变异时刻点后,接下来将径流以及产沙整个过程从变异时刻点分开,拟采用 M-K 趋势检验法来分析前后序列的数据过程变化趋势。

2.2.2 不同耕作措施的产流过程 由图 3 和表 1 可知,不同耕作措施产流过程的变异时刻点多发生在径流率前期的显著增加和中后期的径流率处于波动之间,这也就说明变异时刻点前后是 2 个序列数据趋势变化的一个转折点。由于降雨前期径流速率的变化趋势十分明显,因此主要使用 M-K 检验对变异时刻点后的序列数据进行趋势分析。从而得到不同耕作措施产流过程 M-K 检验统计量 U 值(图 4)。

表 1 不同耕作措施下滑动秩和检验法变异时刻点及 U 值

措施	雨强/ (mm·h ⁻¹)	产流过程变异时		产沙过程变异时	
		刻点/min	U 值	刻点/min	U 值
CK	60	32	4.01	36	4.38
	90	16	2.50	14	1.99
	120	10	4.50	10	2.66
LR	60	38	4.65	24	2.98
	90	24	4.22	18	3.44
	120	16	3.75	12	2.50
FP	60	40	4.41	30	3.41
	90	30	4.10	28	2.05
	120	18	3.49	26	2.46
BP	60	32	1.98	34	2.02
	90	28	3.88	22	2.84
	120	26	3.82	32	2.50
CR	60	38	3.66	34	2.83
	90	36	4.06	36	4.01
	120	26	3.71	34	3.15

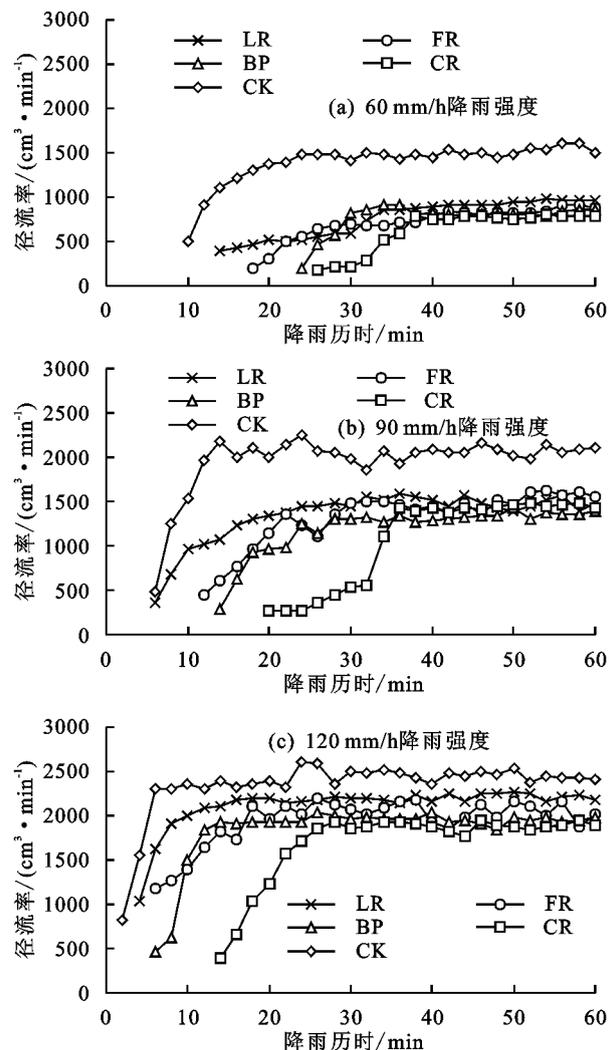


图 3 不同耕作措施的产流过程

从图 4 可以看出,5 种耕作措施的 M-K 检验统计量 U 值从变异时刻点开始后,统计量 U 值在 0 附近波动,并且降雨结束时刻所有值都在 $-1.96 \sim 1.96$,说明从变异时刻点后到降雨结束的径流率不

存在显著的变化趋势,可以认为径流在此阶段处于一个稳定径流率。再结合图 3 可以看出,在每种雨强下均为 5 种耕作措施的坡面径流率随产流时间的增加均呈现出先增加,后缓慢趋于稳定的变化趋势。这与张佳琪等^[24]对于片麻岩坡地研究所提出的结论一致,坡面径流并不总是随着降雨时间的增加而增加的。并且在 3 种雨强下均为对照组 CK 最先达到稳定径流率,且其径流率明显大于其余 4 种耕作措施。另 4 种耕作措施的稳定径流率比较接近,大致表现为 LR>FP>BP>CR。

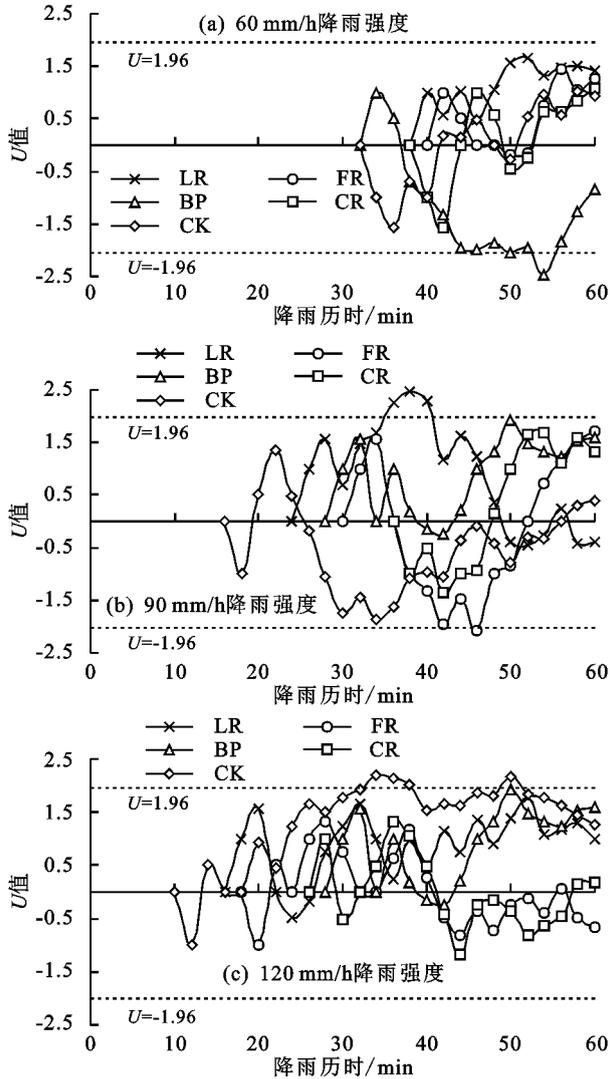


图 4 不同耕作措施产流过程 M-K 检验统计量 U 值序列

在 60 mm/h 的降雨强度下,在径流稳定阶段,CK、LR、FP、BP 和 CR 的坡面径流率分别为 1 479.15, 920.02, 850.67, 815.90, 755.23 cm^3/min ,与对照组 CK 相比,LR、FP、BP 和 CR 的稳定径流率分别占其 62.2%, 57.5%, 55.2%, 51.1%。

在 90 mm/h 的降雨强度下,在径流稳定阶段,CK、LR、FP、BP、CR 的坡面径流率分别为 2 063.73, 1 476.75, 1 449.38, 1 328.88, 1 436.33 cm^3/min ,与对照组 CK 相比,LR、FP、BP、CR 的稳定径流率分别占

其 71.6%, 70.2%, 64.4%, 69.6%。

在 120 mm/h 的降雨强度下,在径流稳定阶段,CK、LR、FP、BP 和 CR 的坡面径流率分别为 2 425.27, 2 200.10, 2 056.29, 1 952.20, 1 883.57 cm^3/min ,与对照组 CK 相比,LR、FP、BP、CR 的稳定径流率分别占其 90.7%, 84.8%, 80.5%, 77.7%。

通过分析 CK 和 FP 这 2 种耕作措施下径流率的变化,在 3 种雨强下植被均能有效地抑制坡面产流。发现这与 Seeger^[25]和朱冰冰等^[26]研究中提到的植被可以使雨滴降落能量有效降低,并使降雨再分配,增加土壤入渗并减少地面径流一致。但随着雨强的增加,花生冠层对产流的抑制作用不断被削弱,FP 组稳定径流率占对照组的百分比从 60 mm/h 雨强下的 57.5% 增大到了 120 mm/h 雨强下的 84.8%,这说明在小雨强下植被覆盖的保水效果优于大雨强下的保水效果。

对比分析 CR、LR、FP 和 BP 这 4 种耕作措施下的径流率变化后发现,CR 和 BP 相对于 FP 具有更优的保水效果。而 LR 则加剧了径流的流失。由于 CR 和 BP 相对于 FP 土壤表面有起伏,整个坡面的表面积大于 FP,增加了受雨面积,且凹陷处会被蓄满水,增加其蓄积率的也大大增加了入渗时间,从而增大了坡面的整体入渗能力。CR 的地表起伏度最大,受雨面积最大,蓄积率也最大。BP 虽然也有较大的地表起伏,但由于 BP 的凹陷分布并不连续,不能集中拦截径流,因此其径流率大于 CR。

LR 虽然也增加了受雨面积,但由于沟垄与坡面方向一致,坡面流汇集到沟中以后迅速向下坡流动,反而增加了其产流能力,所以 LR 的稳定径流率大于 FP。可见 LR 会促进径流形成和水土流失,而 CR 则具有最优的蓄水保水能力。本研究与边锋等^[8]和王磊等^[9]的研究中 LR 促进径流流失以及 CR 在小降雨强度下有良好的蓄水能力一致,但是与其大降雨强度下 CR 发生断垄,加剧径流流失相矛盾,这可能是由于王磊等^[9]模拟降雨试验中的 CR 为裸土,而此次试验中的 CR 垄上种植了一定密度的花生,首先花生盛开的叶片能够有效地减少雨滴对垄面的打击作用,并且花生的根部在 CR 内部能够使 CR 土壤的固结作用加强,因此 CR 未发生断垄。所以在较大雨强 CR 也具有较好的保水效果。

2.2.3 不同耕作措施的产沙过程 由图 5 可知,不同耕作措施的侵蚀率先有一个显著的减少,然后显著增加,再接着是一个突然减少一点,最后是处于一个波动状态。结合表 1 发现,产沙过程变异时刻点多发

生在刚开始的波动时刻点附近,这也说明变异时刻点前后是 2 个序列数据趋势变化的一个转折点。由于变异时刻点前侵蚀率的变化趋势比较显著,因此主要使用 M-K 检验对变异时刻点后的序列数据进行趋势分析,从而得到不同耕作措施产沙过程 M-K 检验统计量 U 值序列图(图 6)。

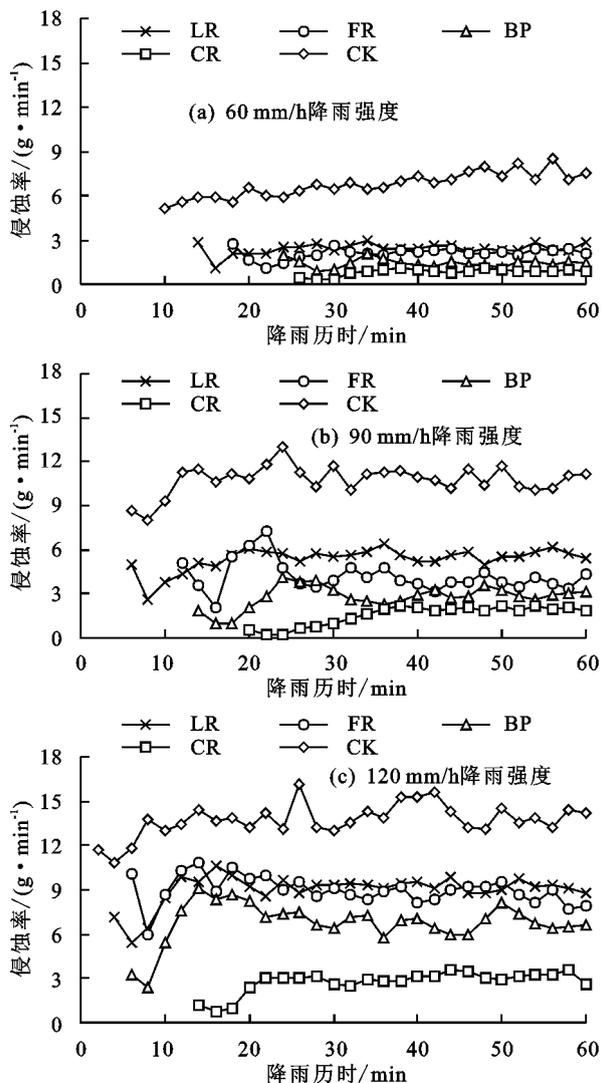


图 5 不同耕作措施的产沙过程

由图 6 可知,5 种耕作措施的 M-K 检验统计量 U 值从变异时刻点开始后,统计量 U 值在 0 附近波动,并且降雨结束时刻所有值都在 $-1.96 \sim 1.96$,说明从变异时刻点后到降雨结束的侵蚀率不存在显著的变化趋势,可以认为产沙在此阶段处于一个稳定侵蚀率。图 5 中侵蚀率过程与董元杰等^[28]在鲁中山区坡面土壤侵蚀得到产沙率过程相比较,此试验侵蚀率在最初 2 min 多了一个显著下降的过程。这是由于种植花生对土壤进行的人为管理叠加动物活动以后,对地表产生了扰动,这种扰动使地表积累很多松散的土壤颗粒,一开始随径流被带出小区。至产流后 6 min 左右,这部分松散的土壤颗粒基本被搬运完成,

产流率出现瞬时下降,随着降雨历时的增加逐渐上升到峰值后再次下降至稳定值。这是由于在降雨中后期,坡面地表结皮的产生以及径流的搬运能力也达到稳定状态^[27]。

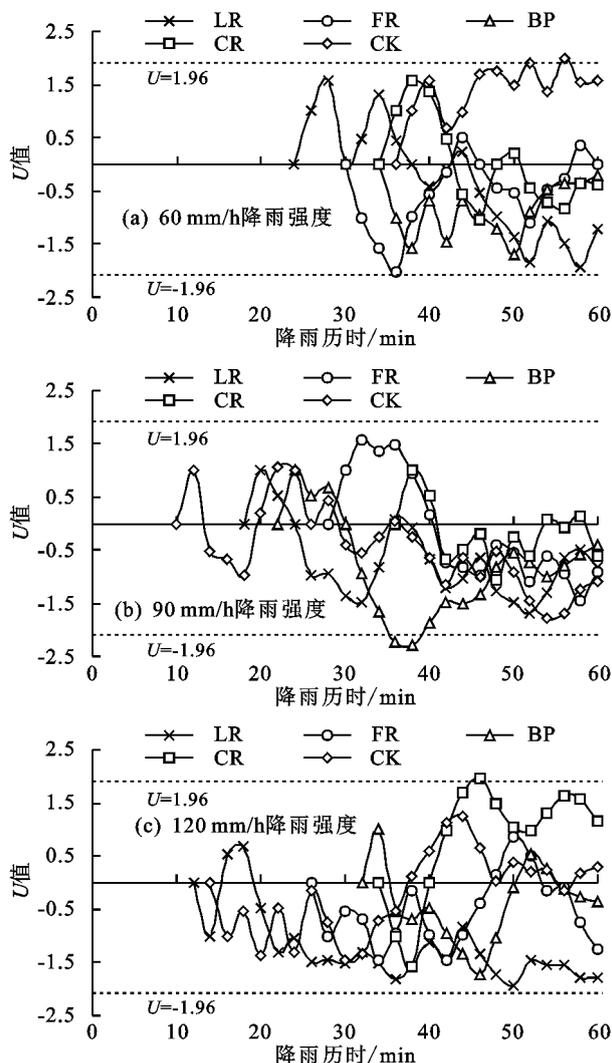


图 6 不同耕作措施产沙过程 M-K 检验统计量 U 值

此外,通过各措施间比较得出,在 3 种降雨强度下,均为对照组 CK 的侵蚀率最大,CR 的侵蚀率均最小,具体表现为 $CK > LR > FP > BP > CR$ 。可见各耕作措施的侵蚀率大小关系与产流率一致。同样地,既无地表起伏措施又无植被覆盖的 CK 侵蚀率最大,保土效果最差。

在 60 mm/h 雨强下,CK、LR、FP、BP、CR 的稳定侵蚀率分别为 7.02、2.50、2.19、1.38、0.92 g/min。与对照组 CK 比较,LR、FP、BP、CR 的稳定侵蚀率分别占其 35.6%、31.2%、19.7%、13.1%。

在 90 mm/h 雨强下,CK、LR、FP、BP、CR 的稳定侵蚀率分别为 11.02、5.66、3.93、2.89、1.98 g/min。与对照组 CK 比较,LR、FP、BP、CR 的稳定侵蚀率分别占其 51.4%、35.7%、26.2%、18.0%。

在 120 mm/h 雨强下,CK、LR、FP、BP、CR 的稳

定侵蚀率分别为 13.99, 9.35, 8.86, 6.89, 3.06 g/min。与对照组 CK 比较, LR、FP、BP 和 CR 的稳定侵蚀率分别占其 66.8%, 63.3%, 49.2%, 21.9%。

对比分析这 CK 和 FP 这 2 种耕作措施下侵蚀率的变化后发现, 在 3 种雨强下, 种植花生均能有效抑制坡面产沙, 这与马悦等^[29]研究结论一致。花生生长时期植被覆盖度大, 植物叶片拦截雨滴, 降低了雨滴对地表土壤的击打作用, 雨滴到达地面的动能降低, 导致径流携带泥沙的能力减弱。但随着雨强的增加, 植被对坡面产沙的抑制作用被削弱, 从 60 mm/h 雨强下 FP 侵蚀率占 CK 的 31.2% 增大到了 90 mm/h 雨强下的 35.7% 和 120 mm/h 雨强下的 63.3%, 说明种植花生在小雨强下的保土效果更加显著。

对比分析 CR、LR、FP、BP 这 4 种耕作措施下的侵蚀率变化后发现, CR 和 BP 相对于 FP 具有更佳的保土效果, 而 LR 的侵蚀率则高于 FP, 加剧土壤流失。这主要是由于 LR 的地形起伏导致坡面流汇集于垄沟中并顺坡面方向迅速流动, 坡面流的流速较大, 具有较大的动能, 容易携带泥沙, 从而造成了侵蚀

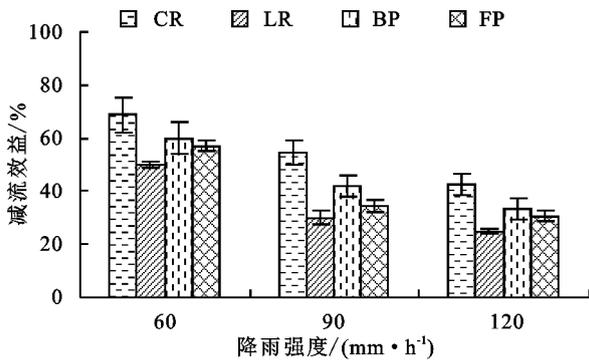


图 7 不同耕作措施的减流、减沙效益

从图 7 还能发现, 随着降雨强度的增大, 各耕作措施的总减流减沙效益均呈现出不同程度的减少, 其中 CR、LR、BP、FP 的总减流效益分别减少了 26.56%, 24.95%, 26.66%, 26.42%; 总减沙效益分别减少了 7.76%, 21.45%, 26.09%, 26.15%。从这一点也能够体现出, 小雨强下各耕作措施的水土保持效果更好。

3 结论

(1) 产流时间是坡面综合效果的反映, 不同耕作措施的影响导致产流时间的差异性, 在相同降雨强度下, 不同耕作措施的产流时间规律为 CK < LR < FP < BP < CR; 随着降雨强度的增大, 各种耕作措施的产流时间提前并且产流时间差异变小。

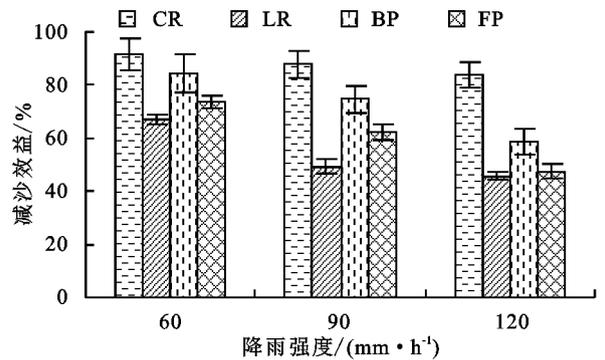
(2) 通过滑动秩和检验法对各个耕作措施的产流产沙过程找出的变异时刻点均为显著变异, 且在后期产流侵蚀率处于刚开始波动的时刻点附近。对后期波动产流侵蚀率用 Mann-Kendall 趋势检验法分析其趋势, 均没有显著增加或减少, 表现为稳定状态。

量的增加。BP 均与分布的地表凹陷能拦截径流, 使泥沙沉积, 减小了侵蚀率。而 CR 与坡向垂直的沟垄分布使得泥沙大量沉积于沟内, 并被垄切断了迁移路径, 因此侵蚀率最小, 且本试验中植被根系对土体的固结作用使得 3 种雨强下 CR 均未发生断垄的情况, 因此 CR 具有最佳的保土效果。

当单独分析各耕作措施在不同降雨强度下的侵蚀率时, 各耕作措施均满足稳定侵蚀率随降雨强度的增加而增加的规律, 即雨强与侵蚀率也呈现正相关关系。这与董元杰等^[28]研究中雨强增大能够导致土壤侵蚀速率的增加一致。

2.3 不同耕作措施的减流减沙效益

由图 7 可知, 对比 CK, 4 种耕作措施在 3 种雨强下的总减流减沙效益均为正值, 均能够体现出较好的减流减沙效益, 可见有植被的坡面能够充分减少水土流失。4 种耕作措施的总减流减沙效益具体大小关系表现为 CR > BP > FP > LR。通过总减流效益与总减沙效益之间的对比, 得出不同耕作措施减沙效益要优于减流效益。



其中稳定时间段的产流侵蚀率均表现为 CK > LR > FP > BP > CR; 并且随着降雨强度的增大, 各耕作措施的稳定径流率增加, 表现出降雨强度和径流率呈现出正相关关系。

(3) 3 个降雨强度下 4 种耕作措施(相对于 CK)的总减流减沙效益表现为 CR > BP > FP > LR, 说明种植花生比裸地水土保持能力更强, 在都种植了花生的几种措施中, CR 的水土保持能力最强, BP 次之, FP、LR 相对较弱一些。

参考文献:

- [1] 王健, 尹武君, 云峰, 等. 渭北旱塬坡耕地水土和养分流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 33-37.
- [2] 张平仓, 程冬兵. 南方坡耕地水土流失过程与调控研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 35-39, 49.
- [3] 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.
- [4] 张翼夫, 李洪文, 何进, 等. 玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 118-124.

- [5] Yao W Y, Xiao P Q, Shen Z Z, et al. Responses of runoff process and threshold of sediment generation for different vegetation-covered plot [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(12): 1438-1444.
- [6] 王健, 尹武君, 刘旦旦. 玉米苜蓿间作对黄土坡耕地降雨产流产沙的影响[J]. *节水灌溉*, 2011(8): 43-46, 54.
- [7] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 30-38.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Gebreegziabher T, Nyssen J, Govaerts B, et al. Contour furrows for in situ soil and water conservation, Tigray, Northern Ethiopia [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(2): 257-264.
- [11] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems [J]. *Catena*, 2014, 115: 11-18.
- [12] Arnhold S, Ruidisch M, Bartsch S, et al. Simulation of runoff patterns and soil erosion on mountainous farmland with and without plastic-covered ridge-furrow cultivation in South Korea [J]. *Transactions of the Asabe*, 2013, 56(2): 667-679.
- [13] 卢齐齐. 人工模拟降雨条件下紫色土氮磷流失规律试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [14] 雷红富, 谢平, 陈广才, 等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(4): 36-40.
- [15] 陈康, 苏佳林, 王延贵, 等. 黄河干流水沙关系变化及其成因分析[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(6): 19-26.
- [16] Wang L H, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 147-156.
- [17] 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.
- [18] Borselli L, Torri D, Poesen J, et al. Effects of water quality on infiltration, runoff and interrill erosion processes during simulated rainfall [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 26(3): 329-342.
- [19] 林庆明, 丁文峰, 张长伟, 等. 模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 16-21.
- [20] Vermang J, Norton L D, Huang C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 903-916.
- [21] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J]. *中国水土保持*, 2017(3): 27-30.
- [22] 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, 25.
- [23] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 40-43.
- [24] 张佳琪, 王红, 张瑞芳, 等. 雨强对片麻岩坡面径流养分流失规律的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 42-45, 51.
- [25] Seeger M. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations [J]. *Catena*, 2007, 71: 60-67.
- [26] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401-407.
- [27] 安娟, 卢嘉, 郑粉莉, 等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 100-104.
- [28] 董元杰, 付伟章, 陈为峰, 等. 鲁中山区小流域坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀方式变化过程的研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(1): 185-188.
- [29] 马悦, 郭年冬, 张瑞芳, 等. 片麻岩坡面花生不同生长时期水土及养分流失规律[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 304-309.

(上接第 70 页)

- [16] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [17] 杜懿, 麻荣永. 1961—2016 年南宁市年降雨量变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 136(6): 53-58.
- [18] 水利部水土保持监测中心. 径流小区和小流域水土保持监测手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [19] 马星, 郑江坤, 王文武, 等. 不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 17-21.
- [20] 高磊, 饶良懿, 崔飞波, 等. 太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 8-14.
- [21] 王小博, 朱永清, 吴宜进, 等. 不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 6-11.
- [22] 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.
- [23] 沈紫燕, 王辉, 平李娜, 等. 前期土壤含水量对粘性红壤产流产沙及溶质运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 58-62.
- [24] 邱学礼, 段宗颜, 胡万里, 等. 降水特征与农作处理对坡耕地水土流失的动态研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 85-88.