

雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响^{*}

沈海鸥¹ 郑粉莉^{1,2} 温磊磊¹ 卢嘉¹ 姜义亮¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部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)

摘要: 基于模拟降雨试验和纱网覆盖消除雨滴打击作用的试验方法, 研究雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响。试验包括3种黄土高原代表性的侵蚀性降雨强度(50、75、100 mm/h)和3个细沟侵蚀发生最常见的坡度(10°、15°和20°)。结果表明, 与有雨滴打击试验处理相比, 纱网覆盖消除雨滴打击后, 坡面径流稳定产流率和含沙量均明显减小; 坡面侵蚀量和细沟侵蚀量分别减少28.1%~47.7%和20.2%~38.6%; 而细沟侵蚀对坡面侵蚀的贡献率增加。消除雨滴打击后, 坡度对细沟侵蚀的影响与有雨滴打击时相同, 而降雨强度对细沟侵蚀的影响增加。有、无雨滴打击试验处理的细沟密度和割裂度均随着降雨强度和坡度的增加而增大; 而细沟倾斜度的变化较为复杂, 所以细沟密度和割裂度可作为描述细沟形态的最佳指标。试验结果还表明, 雨滴打击对细沟沟槽形状也有间接影响, 即消除雨滴打击后, 细沟宽度和深度的变异程度减小, 沟槽形状更为规则。同时, 有雨滴打击试验处理的细沟宽深比随着坡度和降雨强度的增加而减小, 而无雨滴打击试验处理的细沟宽深比随着坡度的增加而减小, 随着降雨强度的增加呈微弱的增加趋势。

关键词: 细沟侵蚀 形态特征 雨滴打击 模拟降雨 黄土坡面

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0104-09

Effects of Raindrop Impact on Rill Erosion Characteristics on Loess Hillslope

Shen Haiou¹ Zheng Fenli^{1,2} Wen Leilei¹ Lu Jia¹ Jiang Yiliang¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A rainfall simulation study was conducted to examine the effects of raindrop impact on rill erosion characteristics on the loess hillslope. The experimental treatments included three rainfall intensities (50, 75 and 100 mm/h) of representative erosive rainfalls on the Loess Plateau and three common slope gradients (10°, 15° and 20°) of rill erosion occurrence. Each experimental treatment included two surface treatments: with and without raindrop impact through placing the nylon net over the soil pan. The results showed that eliminating raindrop impact caused decreases in stable runoff rates and sediment concentrations; soil loss was induced and rill erosion was decreased by 28.1%~47.7% and 20.2%~38.6%, respectively; the increase in the contribution of rill erosion to hillslope soil erosion was induced. After eliminating raindrop impact, the effect of slope gradient on rill erosion was the same as that in treatments with raindrop impact; but the effect of rainfall intensity on rill erosion was increased. With regard to treatments with and without raindrop impact, both rill density and degree of rill dissection were increased with increase in rainfall intensity or slope gradient; but the changes of rill inclination angle were complex. Thus, rill density and degree of rill dissection were the optimal indicators to describe rill

收稿日期: 2014-10-09 修回日期: 2014-11-24

^{*} 国家自然科学基金资助项目(41271299)和水利部公益性行业科研专项资助项目(201201083)

作者简介: 沈海鸥, 博士生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究, E-mail: shensusan@163.com

通讯作者: 郑粉莉, 研究员, 博士生导师, 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

morphological characteristics. The results also indicated that raindrop impact had indirect influence on rill channel shape. That is, the degree of variation in rill width and rill depth was decreased, and rill channel shape was more inerratic after eliminating raindrop impact. With regard to treatments with raindrop impact, rill width - depth ratio was decreased with rainfall intensity or slope gradient increase. For treatments without raindrop impact, rill width - depth ratio was also decreased with increase in slope gradient, but it was slightly increased as rainfall intensity increased.

Key words: Rill erosion Morphological characteristics Raindrop impact Rainfall simulation Loess hillslope

引言

细沟侵蚀是造成坡耕地严重土壤侵蚀的主要方式,也是坡耕地表土和养分流失的重要原因^[1]。正因如此,细沟侵蚀的研究成果较多,主要集中在细沟侵蚀过程^[2-3]和细沟发生的临界条件^[4-6]等方面。降雨强度和坡度是影响细沟侵蚀的重要因素,一般情况下,细沟侵蚀量随着降雨强度和坡度的增加而增加^[7-10]。雨滴打击对细沟侵蚀也有重要影响,这是因为雨滴打击不仅使土粒发生分散和移动,为坡面径流搬运提供物质来源,还通过增强坡面薄层水流的扰动进而增加径流挟沙能力^[11-13];同时,雨滴打击也能够影响径流阻力^[14],从而在一定程度上影响了细沟侵蚀过程。水蚀预报模型 WEPP (Water Erosion Prediction Project) 对细沟侵蚀的定量表达,仅考虑了径流的影响,尚未说明雨滴打击对细沟侵蚀的贡献与作用。而国内外的相关研究结果表明,消除雨滴打击可减少细沟侵蚀量,如 Meyer 等^[15]通过研究降雨能量对细沟侵蚀的影响,发现消除雨滴打击后细沟侵蚀量减少 50%;郑粉莉等^[16]以武功粘黄土为试验土壤,通过在径流小区上方覆盖纱网消除雨滴动能,结果表明纱网覆盖消除 99.6% 的雨滴打击后,可使坡面细沟侵蚀量减少 38% ~ 64%;安娟等^[17]研究结果同样表明,消除雨滴打击使黑土区坡面侵蚀量减少 59.4% ~ 71.6%。这些结果均表明,雨滴打击对细沟侵蚀有重要影响,而目前关于雨滴打击对细沟侵蚀特征影响的系统研究还较少。本文通过在试验土槽上方架设纱网(消除雨滴打击)与不架设纱网的模拟降雨试验,研究雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响,以期深化细沟侵蚀过程的机理研究,并为坡面侵蚀预报过程模型的构建提供理论依据。

1 材料与方方法

1.1 试验材料

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行,降雨设备为下喷式

人工模拟降雨装置,降雨覆盖面积为 27 m × 18 m,降雨高度 18 m,能够满足所有雨滴达到终点速度^[18]。试验所用土槽为 10 m(长) × 1.5 m(宽) × 0.5 m(深)的液压式可调坡度钢槽,坡度调节范围为 0° ~ 30°,试验土槽底部每 1 m 长排列 4 个孔径为 2 cm 的排水孔,用以保证降雨试验过程中排水良好。供试土壤为黄土高原丘陵沟壑区安塞县的耕层黄绵土,砂粒(> 50 μm)质量分数为 28.3%,粉粒(2 ~ 50 μm)为 58.1%,黏粒(< 2 μm)为 13.6%,有机质(重铬酸钾氧化-外加热法)质量比 5.9 g/kg。

1.2 试验设计

短历时、高强度暴雨是造成黄土区水土流失的主要降雨特征^[19],依据黄土高原侵蚀性降雨的瞬时雨强标准^[20](即 $I_{15} \geq 0.852$ mm/min、 $I_{10} \geq 1.055$ mm/min 和 $I_5 \geq 1.520$ mm/min),在坡度为 15° 的条件下,设计试验降雨强度为 50、75、100 mm/h,为保证降雨总量(50 mm)相同,降雨历时依次为 60、40、30 min。由于细沟侵蚀在 10° ~ 30° 的裸露坡耕地上表现最明显^[21],而 25° 是坡耕地研究的上限,据此,在降雨强度为 75 mm/h 条件下,设计试验坡度为 10°、15° 和 20°。试验处理包括有雨滴打击(无纱网覆盖)和无雨滴打击(纱网覆盖),纱网覆盖即在试验土槽上方架设尼龙纱网(网孔尺寸为 1 mm × 1 mm),纱网距土槽表面 10 cm,色斑法测定 2 种试验处理的雨滴直径发现,纱网覆盖能够消除雨滴动能 99.6%^[16]。各试验处理重复 2 次,试验设计见表 1。

表 1 试验设计

Tab. 1 Design of experimental treatments

试验处理	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨历时/min	坡度/(°)
有雨滴打击	50	60	15
	75	40	10
			15
			20
100	30	15	
无雨滴打击	50	60	15
	75	40	10
			15
			20
100	30	15	

1.3 试验方法

装填土槽时,用纱布填充试验土槽底部的排水孔,并在土槽底部填5 cm厚天然细沙作为透水层,以保障试验过程中土槽排水良好;细沙层之上覆盖纱布,再装填试验土壤。填土时将土层分为犁底层和耕作层,犁底层深度为15 cm,土壤容重控制在 1.35 g/cm^3 ;耕作层深度为20 cm,土壤容重控制在 1.10 g/cm^3 。为保证装土的均匀性,采用分层填土,每层土厚度为5 cm,填土时边填土边压实;每填完一层土后,将土层表面用齿耙耙松,再填装下一层土壤,以保证两个土层能够接触良好;同时,将试验土槽四周边壁尽量压实,以尽可能减小边界效应的影响。

将试验土槽翻耕20 cm,并用齿耙耙平,模拟黄土区坡耕地耕层状况。翻耕完毕后,自沉降48 h。为保证试验前期土壤条件的一致性,采用30 mm/h降雨强度进行预降雨至坡面产流为止,前期土壤质量含水率为 $(23.40 \pm 0.53)\%$ 。预降雨结束后,为防止试验土槽土壤水分蒸发和减缓结皮的形成,用塑料布将试验土槽覆盖,静置24 h再进行正式模拟降雨试验。

为确保模拟降雨的均匀性和准确性,试验开始前对降雨强度进行率定,当降雨均匀度达90%以上,实测降雨强度与目标降雨强度的差值小于5%时方可进行正式降雨。坡面产流后,记录初始产流时间,接取径流泥沙样,取样间隔为1 min或2 min。降雨过程中,用染色剂示踪法测定径流流速,由于该流速为坡面最大流速,故将实测流速乘以修正系数0.75,作为径流平均流速^[22]。降雨结束后,径流泥沙样品的后期处理、细沟基本形态的测量以及细沟侵蚀量的计算方法等详见沈海鸥等^[23]的研究方法。

1.4 水动力学参数计算

坡面侵蚀产生的根本原因在于坡面径流具有能量^[24],研究侵蚀动床条件下细沟内股流的水动力学特征的变化对于准确认识坡面侵蚀发生发展的本质具有一定的理论意义。目前,多借鉴河流动力学的原理和方法,用其相应的公式计算坡面侵蚀的水动力学特征^[25]。径流流速(V)、雷诺数(Re)、弗劳德数(Fr)和阻力系数(f)等是反映径流水动力学特征的主要指标。其计算方法为:

雷诺数^[26]

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (1)$$

式中 V ——径流流速, cm/s

R ——水力半径, cm

ν ——运动黏滞性系数, cm^2/s

弗劳德数^[26]

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gR}} \quad (2)$$

式中 g ——重力加速度,取 980 cm/s^2

阻力系数^[27]

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (3)$$

式中 f ——Darcy-Weisbach 阻力系数

J ——水力坡度,近似为坡度的正切值

1.5 数据处理

应用 Excel 2003、SigmaPlot 10.0 和 Matlab 7.9.0 进行数据处理与分析;采用 SigmaPlot 10.0 绘制有、无雨滴打击试验处理下细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度关系的三维图;采用 Matlab 7.9.0 对细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度的关系进行拟合。

2 结果与分析

2.1 雨滴打击对坡面径流和侵蚀的影响

2.1.1 径流量和侵蚀量

坡面径流量的变化较为复杂,其大小主要由土壤入渗性能和坡面承雨量决定。纱网覆盖消除雨滴打击后,各试验处理的坡面径流量同有雨滴打击试验处理相比减小 $1.6\% \sim 15.5\%$ (表2)。原因是消除雨滴打击后能够减缓结皮层的形成,有利于降雨的入渗,因此,其坡面径流量较小。而消除雨滴打击后坡面径流减少较小的原因,主要是试验前进行了前期预降雨,使前期土壤质量含水率较高,平均值为 $(23.40 \pm 0.53)\%$,导致土壤入渗作用较小。与径流减少作用相比,消除雨滴打击试验处理的减少侵蚀作用更加明显,坡面侵蚀量减少 $28.1\% \sim 47.7\%$,细沟侵蚀量减少 $20.2\% \sim 38.6\%$,表明黄土坡面侵蚀过程中,雨滴打击对土壤颗粒的分散和搬运均有重要贡献。该结果与郑粉莉等^[16]的研究结果相比略小,郑粉莉等以武功粘黄土为试验用土,在未进行前期预降雨的情况下(前期土壤质量含水率为 $10.2\% \sim 11.4\%$),利用人工模拟降雨试验研究降雨动能对细沟侵蚀的影响,得出用纱网覆盖消除雨滴打击后,坡面侵蚀量减少 $31\% \sim 55\%$,细沟侵蚀量减少 $38\% \sim 64\%$,说明雨滴打击对坡面侵蚀的影响受土壤前期含水率的影响。

细沟侵蚀对坡面土壤侵蚀产沙有重要贡献,就侵蚀量而言,在细沟侵蚀区细沟侵蚀量可占70%左右,甚至达90%以上^[28]。本研究中,不同降雨强度和坡度下,有雨滴打击试验处理的细沟侵蚀贡献率为 $61.8\% \sim 84.6\%$,平均为 70.2% ;无雨滴打击试验处理的细沟侵蚀贡献率为 $77.7\% \sim 86.8\%$,平均

表 2 有、无雨滴打击试验处理的坡面径流量、侵蚀量及细沟侵蚀量对比

Tab. 2 Comparison of runoff, soil loss and rill erosion for treatments with and without raindrop impact

降雨强度/(mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	试验处理	径流量/mm	侵蚀量/(kg·m ⁻²)	细沟侵蚀量/(kg·m ⁻²)	细沟侵蚀贡献率/%
50	15	RI	43.8 ± 1.9 ^a	13.2 ± 0.4 ^a	8.4 ± 0.1 ^a	63.5 ± 1.1 ^a
		NRI	37.0 ± 1.2 ^b	6.9 ± 0.8 ^b	6.0 ± 0.9 ^a	86.8 ± 3.5 ^b
75	10	RI	43.2 ± 2.1 ^a	7.7 ± 1.2 ^a	5.7 ± 0.9 ^a	75.0 ± 0.3 ^a
		NRI	41.8 ± 1.6 ^a	4.5 ± 0.8 ^a	3.5 ± 0.7 ^a	77.7 ± 1.1 ^a
	15	RI	45.0 ± 0.5 ^a	14.5 ± 1.1 ^a	9.0 ± 1.2 ^a	61.8 ± 3.7 ^a
		NRI	38.1 ± 1.0 ^b	8.9 ± 0.6 ^b	7.1 ± 0.4 ^a	79.8 ± 0.3 ^b
20	RI	43.3 ± 0.3 ^a	14.6 ± 1.5 ^a	12.4 ± 1.9 ^a	84.6 ± 4.1 ^a	
	NRI	42.6 ± 0.5 ^a	10.5 ± 1.2 ^a	9.0 ± 1.0 ^a	85.7 ± 0.4 ^a	
100	15	RI	44.6 ± 1.9 ^a	15.8 ± 1.5 ^a	10.4 ± 1.8 ^a	65.9 ± 5.4 ^a
		NRI	40.5 ± 1.7 ^a	10.1 ± 1.0 ^b	8.3 ± 1.3 ^a	82.0 ± 4.6 ^a

注:RI 为有雨滴打击试验处理,NRI 为无雨滴打击试验处理;43.8 ± 1.9 表示平均值 ± 标准差,其他数据同,相同降雨强度和坡度下不同字母表示有、无雨滴打击试验处理间经 F 检验差异显著($P < 0.05$)。下同。

为 82.4% (表 2)。可见,无雨滴打击试验处理的细沟侵蚀贡献率均高于对应的有雨滴打击试验处理。WEPP (Water Erosion Prediction Project) 模型的基本理论之一为,细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主,而细沟侵蚀以径流侵蚀为主。细沟间侵蚀是由雨滴打击和坡面薄层水流引起的土粒分离过程,侵蚀泥沙被坡面薄层水流输送到细沟内;细沟侵蚀是由径流冲刷引起的剥离现象,由细沟内股流沿坡面向下搬运输送^[29]。而本研究结果与早期的研究结果均表明,雨滴打击对细沟侵蚀有重要作用;因此,需要根据已有的研究结果修正 WEPP 模型的基础理论。纱网覆盖消除雨滴打击后,径流水动力的增加受到限制(表 3),导致细沟侵蚀的发生发展受到限制;雨滴动能被纱网消除后,细沟间侵蚀仅受坡面薄层水流的剥离冲刷作用,故消除雨滴打击对细沟间侵蚀减少作用更加显著。因此,消除雨滴打击一方面减少了坡面细沟侵蚀量,但另一方面增加了细沟侵蚀对坡面侵蚀的贡献率。

消除雨滴打击使细沟侵蚀量减少的原因是由于径流侵蚀力发生变化,径流水动力学参数的大小对坡面径流侵蚀能力和挟沙能力的大小有重要影响。当降雨强度为 50、75 mm/h,坡度为 10° 和 15° 时,有、无雨滴打击试验处理的细沟内股流平均流速 (V) 和弗劳德数 (Fr) 差异显著(表 3),消除雨滴打击后, V 和 Fr 分别减小 39.4% ~ 47.6% 和 34.7% ~ 51.3%;当降雨强度为 100 mm/h,或坡度为 20° 时,有、无雨滴打击试验处理的 V 和 Fr 值无显著性差异。对于雷诺数 (Re),除降雨强度为 50 mm/h,坡度为 15° 试验处理外,有、无雨滴打击试验处理的 Re 无显著性差异。而阻力系数 (f) 在各试验降雨强度和坡度下,有、无雨滴打击试验处理均具有显著性差异,后者较前者增加了 97.1% ~ 301.8%。综上所述,消除雨滴打击能够导致细沟内股流的水动力学特征发生变化,进而影响坡面侵蚀,尤其对降雨强度 (50、75 mm/h) 和坡度 (10° 和 15°) 较小的试验处理的影响更为显著。

表 3 有、无雨滴打击试验处理的细沟内股流水动力学参数对比

Tab. 3 Comparison of hydrodynamic parameters of plume in rill for treatments with and without raindrop impact

降雨强度/(mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	试验处理	平均流速 V /(cm·s ⁻¹)	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	阻力系数 f
50	15	RI	21.9 ± 1.6 ^a	1 930.1 ± 97.6 ^a	0.69 ± 0.02 ^a	5.36 ± 0.17 ^a
		NRI	12.5 ± 2.1 ^b	940.4 ± 225.5 ^b	0.45 ± 0.05 ^b	10.56 ± 0.49 ^b
75	10	RI	22.0 ± 2.0 ^a	2 311.3 ± 226.5 ^a	0.67 ± 0.05 ^a	3.30 ± 0.48 ^a
		NRI	11.5 ± 1.9 ^b	1 623.8 ± 189.8 ^a	0.33 ± 0.04 ^b	13.26 ± 0.42 ^b
	15	RI	23.1 ± 2.3 ^a	2 322.1 ± 257.3 ^a	0.71 ± 0.06 ^a	5.13 ± 0.64 ^a
		NRI	14.0 ± 1.7 ^b	1 787.0 ± 150.0 ^a	0.40 ± 0.04 ^b	13.35 ± 0.36 ^b
20	RI	24.0 ± 2.7 ^a	2 726.6 ± 385.6 ^a	0.73 ± 0.08 ^a	6.10 ± 0.86 ^a	
	NRI	16.0 ± 2.2 ^a	2 059.5 ± 226.9 ^a	0.46 ± 0.05 ^a	13.69 ± 0.52 ^b	
100	15	RI	24.3 ± 2.7 ^a	2 971.4 ± 325.5 ^a	0.71 ± 0.09 ^a	4.85 ± 0.61 ^a
		NRI	15.1 ± 2.3 ^a	1 981.5 ± 290.0 ^a	0.42 ± 0.06 ^a	12.43 ± 0.60 ^b

表 2 中各试验处理的细沟侵蚀量是在降雨总量相同的条件下获取的数值,而细沟侵蚀速率能够更

加客观地反映细沟侵蚀与各影响因素之间的关系,鉴于此,绘制了有、无雨滴打击试验处理下的细沟侵

蚀速率与降雨强度和坡度关系的三维图(图1),可以看出细沟侵蚀速率随着降雨强度和坡度的增加而增大,而2种试验处理的增加幅度略有差异。为了进

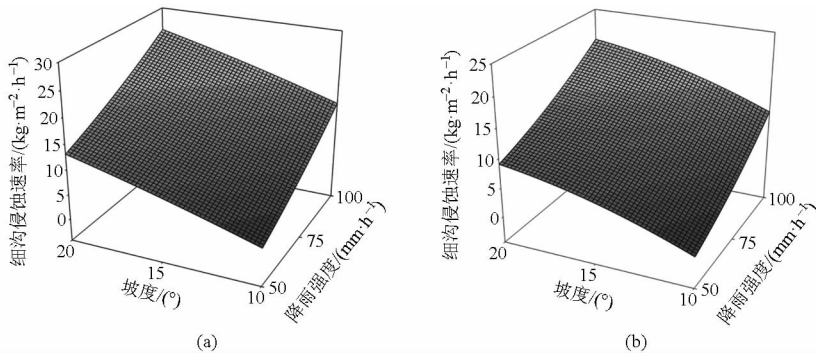


图1 细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度的关系

Fig. 1 Relationships of rill erosion rate with rainfall intensity and slope gradient

(a) 有雨滴打击试验处理 (b) 无雨滴打击试验处理

采用 Matlab 7.9.0 中 Surface Fitting Tool 对有、无雨滴打击试验处理的细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度的关系进行拟合,拟合过程中采用信赖域方法,同时考虑方程的物理意义,据此获取最优经验回归方程。

有雨滴打击试验处理

$$S_r = 0.0020I^{1.396}S^{1.074} \quad (R^2 = 0.968, n = 10) \quad (4)$$

无雨滴打击试验处理

$$S_r = 0.0003I^{1.647}S^{1.170} \quad (R^2 = 0.969, n = 10) \quad (5)$$

式中 S_r ——细沟侵蚀速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

I ——降雨强度, mm/h

S ——坡度, $(^\circ)$

由经验回归方程可知,有、无雨滴打击试验处理下,细沟侵蚀速率均与降雨强度和坡度呈幂函数关系。对比回归方程式(4)、(5)发现,消除雨滴打击后,降雨强度对细沟侵蚀的影响增加,而坡度对细沟侵蚀的影响与有雨滴打击时相同。

2.1.2 坡面产流产沙变化过程

通过绘制产流率随降雨历时的变化过程曲线,探究雨滴打击对坡面产流过程的影响。由于不同降雨强度和坡度下的产流率变化过程相似,因此,仅以 $75 \text{ mm}/\text{h}$ 降雨强度下3个不同坡度有、无雨滴打击试验处理为例(图2)进行分析。

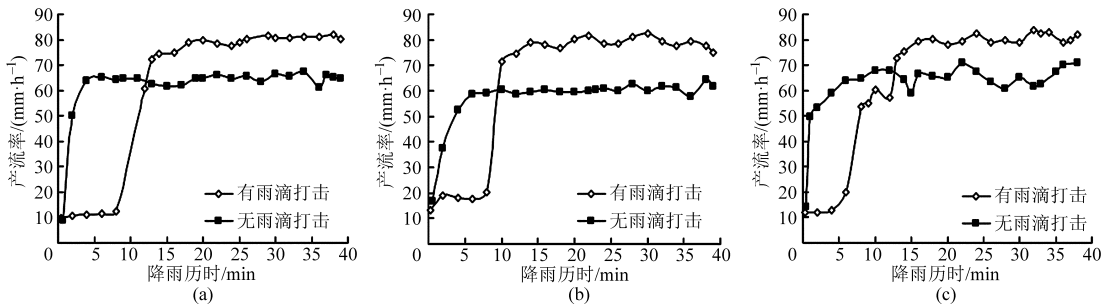


图2 $75 \text{ mm}/\text{h}$ 降雨强度下有、无雨滴打击试验处理产流率随降雨历时的变化

Fig. 2 Runoff rate vs rainfall duration for treatments with and without raindrop impact under $75 \text{ mm}/\text{h}$ rainfall intensity

(a) 坡度 10° (b) 坡度 15° (c) 坡度 20°

由图2可知,有雨滴打击试验处理的产流率随降雨历时的变化可明显划分为3个阶段:初始产流阶段、迅速增长阶段和稳定阶段。其中初始产流阶段一般持续 $6 \sim 8 \text{ min}$,迅速增长阶段至 13 min 左右结束, 13 min 后至降雨结束为稳定阶段。初始产流阶段产流率较低,原因是降雨初期,土壤尚未达到饱和含水量,且土壤表面还未形成结皮,土壤入渗率较大,因而造成产流率较小。随着土壤结皮以及坡面径流的形成,坡面侵蚀方式以细沟间侵蚀为主,入渗

率减小,产流率增加。细沟间侵蚀区薄层水流的汇聚为细沟侵蚀的发生发展准备了动力条件,随着细沟侵蚀发生演变为坡面的主要侵蚀方式,坡面产流率迅速增加并达到稳定。

无雨滴打击试验处理的产流率随降雨历时的变化只有2个阶段:迅速增长阶段和稳定阶段。即坡面开始产流后,产流率急剧增加,一般在 $4 \sim 6 \text{ min}$ 内达到稳定产流率,并持续到降雨结束。产流率急剧增加的原因:①试验土槽进行了前期预降雨,无雨

滴打击试验处理下降雨对坡面的击溅非常微弱,造成入渗率恒定,产流率迅速增加到稳定值。②消除雨滴打击后,其对径流的扰动作用亦被消除,使产流率迅速增加并达到稳定。③在无雨滴打击试验处理下,降雨直接全部转化为径流,而细沟侵蚀以径流侵蚀为主。因此,降雨初期即迅速形成小细沟,进入微弱细沟侵蚀为主阶段,产流率达到稳定。

通过对比稳定产流率发现,无雨滴打击试验处理的稳定产流率均小于有雨滴打击试验处理,可见,尽管消除雨滴打击对坡面总径流量的影响较小,但是在产流达到稳定阶段后的削减径流作用是显著的。分析原因是,虽然无雨滴打击试验处理在坡面开始产流后,产流率迅速增加到稳定值,然而由于其结皮层的形成受到抑制,有利于降水入渗,因此,整个降雨时段均有稳定的入渗率;而有雨滴打击试验处理,由于雨滴对径流表面的打击,增加了径流水动力(表3),加剧了细沟侵蚀,同时,雨滴击溅作用能够加剧细沟间薄层水流溢入细沟内。因此,有雨滴打击试验处理的稳定产流率较高。

含沙量是分析坡面土壤侵蚀产沙过程规律的重要指标。图3为75 mm/h降雨强度下3个坡度

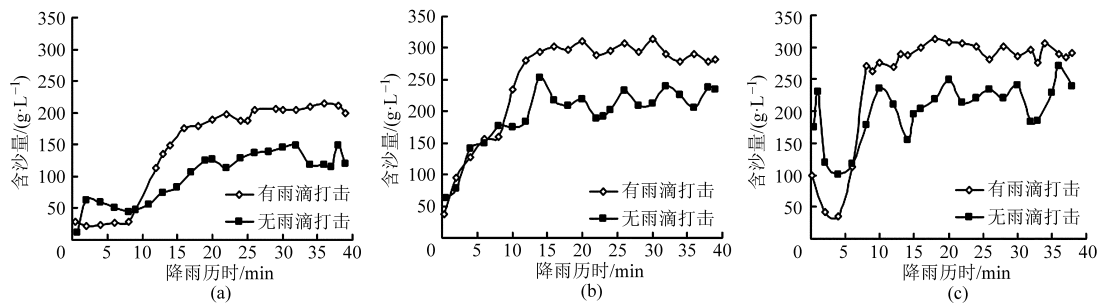


图3 75 mm/h降雨强度下有、无雨滴打击试验处理含沙量随降雨历时的变化

Fig.3 Sediment concentration vs rainfall duration for treatments with and without raindrop impact under 75 mm/h rainfall intensity

(a) 坡度10° (b) 坡度15° (c) 坡度20°

通过对比有、无雨滴打击试验处理的含沙量变化过程曲线,发现其变化趋势较为相近。降雨初期,无雨滴打击试验处理含沙量均大于有雨滴打击试验处理,随着降雨的持续,有雨滴打击试验处理的含沙量明显高于无雨滴打击试验处理。这主要是因为降雨初期形成的径流带走了易被搬移的疏松分散的土壤颗粒^[22],从而引起含沙量的迅速增加。消除雨滴打击后,降雨初期即迅速形成小细沟,侵蚀方式以微弱细沟侵蚀为主,因此,降雨初期无雨滴打击试验处理下的含沙量较高。随着降雨历时延长,细沟侵蚀成为有雨滴打击试验处理的主要侵蚀方式;而无雨滴打击试验处理由于径流水动力的增加受到限制(表3),细沟发育受阻,而且也使径流挟沙能力受到限制,含沙量降低;同时,微弱的溅蚀作用使片流搬运泥沙及片流向细沟输送的泥沙减少,因此,无雨滴打击试

坡面有、无雨滴打击试验处理的含沙量变化过程曲线。郑粉莉^[30]将黄土坡面土壤侵蚀过程划分为溅蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀和雨后径流侵蚀4个阶段,本研究仅选取降雨历内含沙量数据进行分析,因此,不包括雨后径流侵蚀阶段。由图3可知,有雨滴打击试验处理降雨初期为溅蚀阶段,此时坡面含沙量较低;随着降雨的持续,坡面进入细沟间侵蚀阶段,由于雨滴对土壤表面的打击作用,土壤表面形成相对致密的临时结皮层,土壤孔隙被封闭,土壤入渗能力降低,形成薄层水流,径流含沙量增加。临时结皮层的形成使坡面降雨入渗减少,径流量增大,同时,雨滴打击对径流有一定的扰动作用,使径流冲刷能力增强,在坡面形成若干细沟下切沟头,导致细沟侵蚀的发生发展^[28],进入细沟侵蚀阶段,径流含沙量迅速增加并达到稳定。无雨滴打击试验处理含沙量达到稳定的时间较有雨滴打击试验处理滞后3 min左右。已有的研究结果^[8,31]表明细沟的出现将导致坡面侵蚀产沙量急剧增加,本研究中,有雨滴打击试验处理稳定含沙量是初始含沙量的5~8倍;无雨滴打击试验处理稳定含沙量是初始含沙量的2~3倍。

验处理径流含沙量低于有雨滴打击试验处理。

2.2 有、无雨滴打击试验处理的细沟形态特征

细沟的基本形态指标为细沟长度、宽度和深度,由于单条细沟形态不规则,直接测量细沟长度误差较大,故根据相邻测点的间距和位置坐标换算相应细沟长度,将这些细沟长度进行累加即可得到单条细沟的总长度。不同试验处理间细沟长度的变化由细沟密度指标体现。

图4为有、无雨滴打击试验处理次降雨后实际测量的细沟宽度的变化。由图可知,细沟平均宽度介于8~11 cm间。通过对比发现,无雨滴打击试验处理细沟宽度最大值与最小值的差值、第75百分位数与第25百分位数之间的间距均小于有雨滴打击试验处理,说明消除雨滴打击后,细沟宽度的变异程

度减小。

图5为有、无雨滴打击试验处理次降雨后实际测量的细沟深度的变化。由图可知,细沟平均深度介于5~7 cm之间。通过对比发现,无雨滴打击试

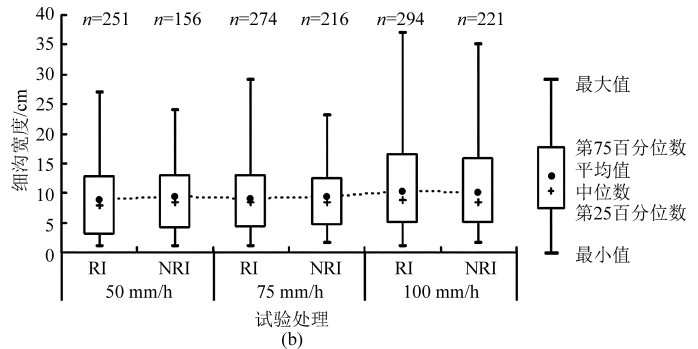
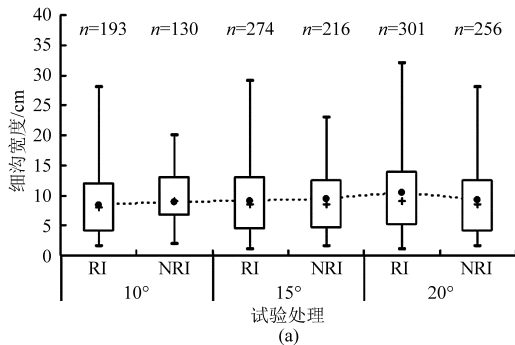


图4 有、无雨滴打击试验处理细沟宽度的变化(n 为样本数)

Fig. 4 Ranges of rill widths for treatments with and without raindrop impact

(a) 降雨强度为 75 mm/h (b) 坡度为 15°

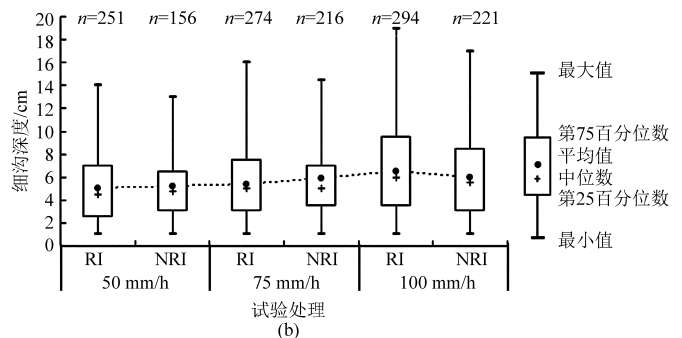
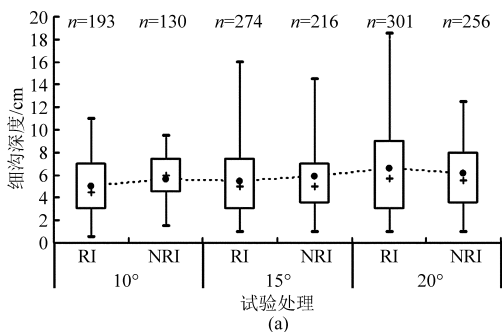


图5 有、无雨滴打击试验处理细沟深度的变化(n 为样本数)

Fig. 5 Ranges of rill depths for treatments with and without raindrop impact

(a) 降雨强度为 75 mm/h (b) 坡度为 15°

通过分析次降雨后的细沟平均宽度和平均深度(图4和图5),发现在降雨强度为50、75 mm/h,坡度为10°和15°时,无雨滴打击试验处理的细沟平均宽度和平均深度均大于对应的有雨滴打击试验处理。造成这种现象的原因是消除雨滴打击能够使径流水动力的增加受到限制(表3),减缓细沟宽度和深度变化的随机性和偶然性,进而使坡面细沟沟槽形态更为规则,单条细沟各个坡段断面形态差异较小;而有雨滴打击试验处理由于雨滴击溅作用的存在,径流紊动性较大,细沟断面形态更为不规则,单条细沟各个坡段断面形态差异较大,尤其是细沟沟头、沟尾与细沟中部横断面差异显著,这种现象通过试验过程中的观测可以证明。因此,有雨滴打击试验处理的细沟平均宽度和平均深度被客观减小,甚至小于无雨滴打击试验处理。当降雨强度为100 mm/h或坡度为20°时,细沟宽度和深度的随机变化主要受径流量的影响,对雨滴打击的响应较弱,因此,无雨滴打击试验处理的细沟平均宽度和平均深度与有雨滴打

击试验处理的细沟深度最大值与最小值间距、第75百分位数与第25百分位数之间的间距均小于有雨滴打击试验处理,表明消除雨滴打击后,细沟深度的变异程度也减小。

击试验处理相差较小。

综上所述,消除雨滴打击能够使细沟宽度和深度的变异程度减小,使细沟沟槽形状更为规则,径流紊动性降低,对细沟沟壁和沟底的侵蚀冲刷减弱,从而使细沟侵蚀量明显减少。

根据细沟基本形态指标可以衍生多个指标^[23]用于描述坡面细沟形态,本文选取细沟密度、细沟割裂度、细沟倾斜度和细沟宽深比,用于对比有、无雨滴打击试验处理的坡面细沟形态差异(表4)。由表可知,有、无雨滴打击试验处理的细沟密度分别为1.11~1.92 m/m²和0.81~1.45 m/m²,细沟割裂度分别为0.08~0.17和0.08~0.13,细沟倾斜度分别为16.78°~19.09°和14.58°~16.90°,细沟宽深比分别为1.94~2.27和1.74~1.86。通过显著性分析发现,对于细沟密度和割裂度,当坡度较缓为10°时,有、无雨滴打击试验处理间具有显著性差异;而细沟倾斜度在所有试验降雨强度和坡度下,有、无雨滴打击试验处理间均未呈现显著性差异;细沟宽深比仅在降雨强度(50 mm/h)和坡度(10°)较小时,

表 4 有、无雨滴打击试验处理的坡面细沟形态指标对比

Tab. 4 Comparison of rill morphological indicators for treatments with and without raindrop impact

降雨强度/(mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	试验处理	细沟密度/(m·m ⁻²)	细沟割裂度	细沟倾斜度/(°)	细沟宽深比
50	15	RI	1.11 ± 0.14 ^a	0.08 ± 0.02 ^a	16.78 ± 0.85 ^a	2.18 ± 0.12 ^a
		NRI	0.85 ± 0.11 ^a	0.08 ± 0.01 ^a	14.58 ± 1.12 ^a	1.74 ± 0.08 ^b
	10	RI	1.19 ± 0.09 ^a	0.11 ± 0.01 ^a	19.09 ± 1.10 ^a	2.27 ± 0.09 ^a
		NRI	0.81 ± 0.07 ^b	0.08 ± 0.01 ^b	16.90 ± 1.13 ^a	1.86 ± 0.04 ^b
75	15	RI	1.34 ± 0.19 ^a	0.12 ± 0.01 ^a	17.31 ± 1.29 ^a	2.11 ± 0.13 ^a
		NRI	1.19 ± 0.06 ^a	0.11 ± 0.01 ^a	15.37 ± 0.89 ^a	1.78 ± 0.08 ^a
	20	RI	1.91 ± 0.19 ^a	0.15 ± 0.02 ^a	16.89 ± 0.22 ^a	1.94 ± 0.07 ^a
		NRI	1.45 ± 0.11 ^a	0.12 ± 0.01 ^a	14.61 ± 0.98 ^a	1.75 ± 0.07 ^a
100	15	RI	1.92 ± 0.19 ^a	0.17 ± 0.01 ^a	18.63 ± 1.21 ^a	1.94 ± 0.12 ^a
		NRI	1.26 ± 0.17 ^a	0.13 ± 0.01 ^a	16.38 ± 0.74 ^a	1.86 ± 0.06 ^a

有、无雨滴打击试验处理间具有显著性差异。说明消除雨滴打击不仅能够影响坡面侵蚀产沙量,对细沟形态也有一定的间接影响。

有、无雨滴打击试验处理,细沟密度和细沟割裂度均随着降雨强度和坡度的增加而增大;细沟倾斜度随着降雨强度的增加而增大,随着坡度的增加呈减小趋势。有雨滴打击试验处理的细沟宽深比随着降雨强度和坡度的增加而减小,无雨滴打击试验处理的细沟宽深比随着坡度的增加而减小,但随着降雨强度的增加呈微弱的增加趋势。对于有雨滴打击试验处理,随着降雨强度和坡度的增加,在细沟溯源侵蚀和沟壁崩塌侵蚀均增强的同时,细沟下切侵蚀增强的幅度更加明显^[32],造成细沟宽深比逐渐减小。无雨滴打击试验处理随着坡度的增加,坡面径流流速增大,径流侵蚀力增强,造成细沟下切侵蚀增强明显,细沟宽深比减小;但对于 15° 坡面,通过纱网覆盖消除雨滴打击后,沟壁崩塌侵蚀作用较强,而下切侵蚀相对较弱,细沟宽深比增大。可见,同细沟密度和细沟割裂度相比,细沟倾斜度和细沟宽深比的变化较为复杂。因此,建议用细沟密度和细沟割裂度作为描述细沟形态的最佳指标,分析降雨特征参数(降雨强度和能量)和坡度对细沟形态特征的影响。

3 结论

(1) 纱网覆盖消除雨滴打击后,降低了坡面径

流的紊动性,使径流对沟壁和沟底的侵蚀冲刷减弱,从而使细沟侵蚀量明显减少。与有雨滴打击试验处理相比,消除雨滴打击后,坡面径流稳定产流率和含沙量均明显减小;坡面侵蚀量减少 28.1% ~ 47.7%,细沟侵蚀量减少 20.2% ~ 38.6%;而细沟侵蚀对坡面侵蚀的贡献率增加。同时,消除雨滴打击后,降雨强度对细沟侵蚀的影响增加,而坡度对细沟侵蚀的影响与有雨滴打击时相同。

(2) 有、无雨滴打击试验处理的细沟密度和割裂度均随着降雨强度和坡度的增加而增大,细沟倾斜度随着降雨强度的增加而增大,随着坡度的增加呈减小趋势;有雨滴打击试验处理的细沟宽深比随着降雨强度和坡度的增加而减小,无雨滴打击试验处理的细沟宽深比随着坡度的增加而减小,但随着降雨强度的增加呈微弱的增加趋势。且消除雨滴打击后,细沟宽度和深度的变异程度减小,细沟沟槽形状更为规则。

(3) 试验结果证实了覆盖措施防治坡面侵蚀的积极效果。建议用细沟密度和细沟割裂度作为描述细沟形态的最佳指标,分析降雨特征参数(降雨强度和能量)和坡度对细沟形态特征的影响。同时,建议基于已有的研究结果对 WEPP 模型的基础理论进行修正。

参 考 文 献

- 1 郑粉莉,唐克利,周佩华. 耕耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. 土壤学报, 1989, 26(2): 109-116.
Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land [J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(2): 109-116. (in Chinese)
- 2 Bryan R B, Rockwell D L. Water table control on rill initiation and implications for erosional response [J]. Geomorphology, 1998, 23(2-4): 151-169.
- 3 Wirtz S, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes [J]. CATENA, 2012, 91: 21-34.
- 4 Zheng Fenli, Tang Keli. Rill erosion process on steep slope land of the Loess Plateau [J]. International Journal of Sediment

- Research, 1997, 12(1): 52–59.
- 5 Léonard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength [J]. CATENA, 2004, 57: 233–249.
- 6 杨具瑞, 史正涛, 曹叔尤, 等. 细沟侵蚀临界坡度研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 64–67.
Yang Jurui, Shi Zhengtao, Cao Shuyou, et al. Study on the critical erosion gradient by the hydrodynamics [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(5): 64–67. (in Chinese)
- 7 王治国, 魏忠义, 段喜明, 等. 黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀的研究(I)——影响细沟侵蚀因素的综合分析[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 51–57.
Wang Zhiguo, Wei Zhongyi, Duan Ximing, et al. Study on sloping field erosion under simulated rainfall on Loess Broken Plateau—the comprehensive analysis of factors effected on rill erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 51–57. (in Chinese)
- 8 王贵平. 细沟侵蚀研究综述[J]. 中国水土保持, 1998(8): 23–26.
Wang Guiping. Summary of rill erosion study[J]. Soil and Water Conservation in China, 1998(8): 23–26. (in Chinese)
- 9 Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456–1467.
- 10 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1319–1325.
Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion [J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1319–1325. (in Chinese)
- 11 Ellison W D. Soil erosion study—Part II: soil detachment hazard by raindrop splash [J]. Agricultural Engineering, 1947, 28(5): 197–201.
- 12 Ellison W D. Soil erosion study—Part V: soil transport in the splash process [J]. Agricultural Engineering, 1947, 28(8): 349–351, 353.
- 13 Dunne T, Zhang W H, Aubry B F. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff [J]. Water Resource Research, 1991, 27(9): 2271–2285.
- 14 Yoon Y N, Brater E F. Spatially varied flow from controlled rainfall [J]. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 1962, 97(9): 1367–1386.
- 15 Meyer L D, Wischmeier H W. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water [J]. Transactions of the ASAE, 1969, 12(6): 7754–7758.
- 16 郑粉莉, 唐克丽, 张成娥. 降雨动能对坡耕地细沟侵蚀影响的研究[J]. 人民黄河, 1995(7): 22–24, 46.
Zheng Fenli, Tang Keli, Zhang Cheng'e. Study of rainfall kinetic energy impact on rill erosion of sloping fields [J]. Yellow River, 1995(7): 22–24, 46. (in Chinese)
- 17 安娟, 郑粉莉, 李桂芳, 等. 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7579–7590.
An Juan, Zheng Fenli, Li Guifang, et al. Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near-surface soil hydraulic conditions on black soil slope [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7579–7590. (in Chinese)
- 18 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177–178.
- 19 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169–175.
Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 169–175. (in Chinese)
- 20 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准[J]. 水土保持通报, 1987, 7(1): 38–44.
Zhou Peihua, Wang Zhanli. Soil erosion storm rainfall standard in the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1987, 7(1): 38–44. (in Chinese)
- 21 白清俊, 马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 62–65.
Bai Qingjun, Ma Shusheng. Mechanism of flow drop pit forming during process of rill erosion over slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(6): 62–65. (in Chinese)
- 22 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232–237.
Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 232–237. (in Chinese)
- 23 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 162–170.
Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 162–170. (in Chinese)

- Li Xinyu, Chen Yujuan. The study of low-dense-early planting pattern in cotton filed of Xinjiang[J]. China Cotton, 2000, 27(3): 12-13. (in Chinese)
- 16 Ibragimov N, Evett S R, Esanbekov Y, et al. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1-2):112-120.
- 17 Dağdelen N, Yılmaz E, Sezgin F, et al. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1-2): 63-85.
- 18 Dağdelen N, Başal H, Yılmaz E, et al. Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1): 111-120.
- 19 Oweisa T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1239-1248.
- 20 杨艳敏,欧阳竹,王淑芬. 基于 COTTON2K 的华北平原和新疆 2 个棉区棉花耗水特征比较[J]. 华北农学报,2012,27(增刊): 229-233.
Yang Yanmin, Ouyang Zhu, Wang Shufeng. Comparison of cotton growth and water use in North China Plain and Xinjiang based on cotton simulation model COTTON2K[J]. Acta Agricultural Boreall-Sinica, 2012, 27(Supp.): 229-233. (in Chinese)
- 21 Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize [J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(2): 115-133.
- 22 陈四龙,裴冬,王振华,等. 华北平原膜下滴灌棉花水分利用效率及产量对供水方式响应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005,23(6):26-31.
Chen Silong, Pei Dong, Wang Zhenhua, et al. Influence of irrigation modes on water consumption and yield of cotton with drip irrigation under plastic mulch in North China Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(6): 26-31. (in Chinese)
- 23 苏培玺,张小军,关志强. 河西走廊棉花耗水规律及双株双层高产栽培技术研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(3):124-127.
Su Peixi, Zhang Xiaojun, Guan Zhiqiang. Study on water consumption and high-yield cultivation techniques of cotton in the Hexi Corridor Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 124-127. (in Chinese)
- 24 杜太生,康绍忠,王振昌,等. 隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应[J]. 作物学报,2007,33(12): 1982-1990.
Du Taisheng, Kang Shaozhong, Wang Zhenchang, et al. Responses of cotton growth, yield, and water use efficiency to alternate furrow irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(12): 1982-1990. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 112 页)

- 24 李鹏,李占斌,郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 444-449.  
Li Peng, Li Zhanbin, Zheng Liangyong. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on Loess Slope [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 444-449. (in Chinese)
- 25 雷阿林,唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 39-43, 72.  
Lei Alin, Tang Keli. Kinetic condition of rill erosion on loess sloping face [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(3): 39-43, 72. (in Chinese)
- 26 吕宏兴,裴国霞,杨玲霞. 水力学[M]. 北京:中国农业出版社, 2002: 90-194.
- 27 潘成忠,上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 490-495.  
Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 490-495. (in Chinese)
- 28 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1987, 1(1): 36-48.  
Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Approach to the genesis and development of rill erosion on slope land and the way to control[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1987, 1(1): 36-48. (in Chinese)
- 29 肖培青,姚文艺. WEPP 模型的侵蚀模块理论基础[J]. 人民黄河, 2005, 27(6): 38-39, 50.  
Xiao Peiqing, Yao Wenyi. The theoretical basis of erosion module in WEPP model [J]. Yellow River, 2005, 27(6): 38-39, 50. (in Chinese)
- 30 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 95-103.  
Zheng Fenli. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of Loess Area [J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 95-103. (in Chinese)
- 31 Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy [J]. CATENA, 2013, 101: 226-234.
- 32 和继军,吕焯,宫辉力,等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 398-405.  
He Jijun, Lü Ye, Gong Huili, et al. Experimental study on rill erosion characteristics and its runoff and sediment yield process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 398-405. (in Chinese)