



玉米季横垄坡面细沟侵蚀特征及其影响因素^{*}

王鹏飞¹ 郑子成¹ 张锡洲^{1†} 李廷轩¹ 林超文²

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

(2 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘 要 通过野外人工模拟降雨试验, 开展玉米不同生长期紫色土坡耕地细沟侵蚀特征研究, 并分析玉米叶面积、雨强对细沟侵蚀过程的影响。结果表明: 随玉米生长期推进, 坡面产流时间、跌坎及细沟出现时间总体呈先增加后减少的趋势。苗期、拔节期跌坎与细沟出现的平均间隔时间分别为 10'59" 和 15'30", 抽雄期、成熟期跌坎与细沟出现的平均间隔时间分别为 20'16" 和 18'58", 玉米苗期坡耕地更易产生细沟侵蚀。苗期细沟形态发育完整, 2.0 mm min⁻¹ 雨强条件下, 苗期最长细沟的长、宽、深分别为 77.62、6.25 和 4.04 cm。随玉米生长期推进, 细沟侵蚀阶段产流量表现为苗期 > 拔节期 > 成熟期 > 抽雄期, 苗期和抽雄期细沟侵蚀阶段产流量分别占玉米季径流总量的 30.97% 和 19.01%, 玉米各生长期细沟侵蚀阶段产流率均随降雨时间的推移呈波动上升。细沟侵蚀阶段产沙量表现为苗期 > 拔节期 > 成熟期 > 抽雄期, 苗期细沟侵蚀阶段产沙量显著高于其他生长期, 玉米各生长期细沟侵蚀产沙率均随降雨时间呈波动变化。玉米季坡耕地细沟侵蚀产流量与雨强呈极显著正相关, 产沙量与玉米叶面积指数呈显著负相关, 产流率、产沙率与叶面积指数和雨强的回归方程均达极显著水平。

关键词 坡耕地; 细沟侵蚀; 玉米生长期; 叶面积指数; 降雨强度

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

紫色土丘陵区水土流失面积广、强度大, 仅次于黄土高原, 其坡耕地水土流失尤为严重, 土壤侵蚀率高达 3 798 ~ 9 831 t km⁻² a⁻¹ [1-2]。细沟侵蚀常发生于坡耕地, 使得坡面侵蚀量增加几倍甚至几十倍, 径流的侵蚀力与搬运力均远大于雨滴击溅和片状水流的作用 [3]。因此开展坡耕地细沟侵蚀研究, 对区域水土流失的防治具有重要意义。已有研究集中于细沟侵蚀过程及形态演变、水沙关系及水动力学特性等, 并取得了一定成果。严冬春等 [4] 将紫色土细沟发育过程概括为小跌坎、溯源侵蚀、细沟发育及细沟成形四个阶段; Wirtz 等 [5] 发现细沟侵蚀过程具有较高的时空变异性, 单纯基于径流剪切力的土壤侵蚀方程不能完整描述其侵蚀过程。和继军等 [6]、陈俊杰等 [7] 和 Shen 等 [8]

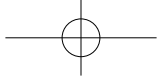
均指出不同土壤坡面、降雨条件和空间尺度的细沟发育有所差异, 但细沟产生均使得坡面径流、产沙量出现较快增加; 王龙生等 [9]、陆邵娟等 [10] 认为坡面跌坎和细沟的发生取决于临界流速, 径流剪切力 (τ) 与流态显著相关。这些研究多在裸地直线坡面上进行, 而众多学者认为耕作方式和作物因子 C 在土壤侵蚀中起着重要作用 [11-12]。横坡垄作是紫色土区坡耕地主推耕作措施之一, 能有效控制地表水土流失 [13]。但 Liu 等 [14] 发现横垄垮塌前, 细沟侵蚀阶段产沙量占总产沙量的 87.2%, 垄向坡度对产沙具有正向显著作用; 产生横垄垮塌后, 垄高、雨强及坡向坡度对产沙的影响比率分别为 67.8%、63.6% 和 40.4% [15]。可见, 横坡垄作细沟侵蚀较为严重, 并受多种因子影响。目前, 结合横

^{*} 国家自然科学基金项目 (40901138, 41271307) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 40901138 and 41271307)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangxzhou@163.com

作者简介: 王鹏飞 (1988—), 男, 四川宣汉人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: pfwang_scau@163.com

收稿日期: 2015-08-21; 收到修改稿日期: 2016-02-25; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-03-10



坡垄作与作物因子研究细沟侵蚀特征方面的报道较少,这在一定程度上影响了对作物覆盖坡面细沟侵蚀机理的理解和耕作方式的合理布设。

据国家统计局数据显示,2014年我国玉米种植面积达 $3.71 \times 10^7 \text{ hm}^2$,紫色土丘陵区玉米播种面积达四川玉米种植总面积的40%,玉米已成为紫色土丘陵区雨季旱坡地主栽作物。玉米生长期大致与暴雨侵蚀期相重,其植株形态和叶面积指数对降雨再分配、土壤侵蚀均有着重要影响^[16-17]。大量研究指出,叶面积指数(leaf area index, LAI)能较好地反映玉米的分布密度、冠层结构变化等^[18-20]。因此,开展紫色土丘陵区玉米季横垄坡面细沟侵蚀特征及影响因素方面的研究,可为紫色土丘陵区坡耕地水土流失的有效防控提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于长江上游沱江水系花椒沟支

流响水滩流域($104^{\circ}34'12'' \sim 104^{\circ}35'19'' \text{ E}$, $30^{\circ}05'12'' \sim 30^{\circ}06'44'' \text{ N}$),隶属于四川省资阳市雁江区松涛镇。该区属亚热带季风气候,年均气温为 16.8°C ,年日照时间为1 300 h,年均无霜期长达300 d,年均降水量为965.8 mm,主要集中于6—9月,约占全年降水总量的70%。研究区属于典型的川中丘陵地貌,区域内水土流失的主要发生地为农耕地,以种植玉米为主,种植辣椒、白菜和芋头等为辅。

1.2 供试材料

供试土壤为遂宁组母质发育而来的红棕紫泥(中国土壤系统分类为紫色湿润锥形土),其基本性质见表1。供试玉米品种为正红6号,于2014年4月垄上单行直播,行距90 cm,株距25 cm。播种前,基施氮肥(N) 250 kg hm^{-2} ,磷肥(P_2O_5) 125 kg hm^{-2} ,拔节前期追施氮肥(N) 150 kg hm^{-2} 。氮肥为尿素(含N 46.3%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)。其他管理措施与当地农耕习惯一致。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soils

土壤 Soil	颗粒组成			容重 Bulk density (g cm ⁻³)	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali- hydrolyzale N (mg kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
	Soil Particle size composition (%)									
	砂粒Sand (2 ~ 0.02 mm)	粉粒Silt (0.02 ~ 0.002 mm)	黏粒Clay (< 0.002 mm)							
紫色湿润 锥形土 Purpli-aquic cambosols	49	29	22	1.21	7.5	11.62	0.73	40.13	14.08	86.64

1.3 试验设计

采用微小区与人工模拟降雨相结合的研究方法,在农业部长江上游农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站进行。基于前期野外实地调查,研究区坡耕地面积小、分布零散及坡度较大等特点^[21],径流小区面积设定为 $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,坡度为 15° 。结合实地横垄调查数据,小区内垄高、垄宽及垄距分别设置为25、40和90 cm(图1)。降雨装置为SR型野外移动式人工模拟降雨器,喷头系统为美国V-80100,采用两台降雨器在试验小区两侧对喷向小区降雨,降雨高度6 m,有效降雨面

积 35 m^2 ,降雨均匀系数在85%以上。根据研究区多年水文资料记录的降雨频率及特点,设计雨强为1.0、1.5和 2.0 mm min^{-1} ;跌坎为细沟侵蚀开始的标志^[22],结合当地降雨特点,设计降雨时间为跌坎出现后持续45 min,并以跌坎出现后的小区产流产沙量视为本试验条件下细沟侵蚀产流产沙量。试验于2014年5月开始,分别于玉米苗期、拔节期、抽雄期和成熟期进行降雨。在每次降雨试验结束后,将小区跌坎、细沟及破垄处逐一修复,使各生长期垄面保持一致,消除前一期试验对后期试验结果的影响。所有试验重复3次,共计36场降雨。

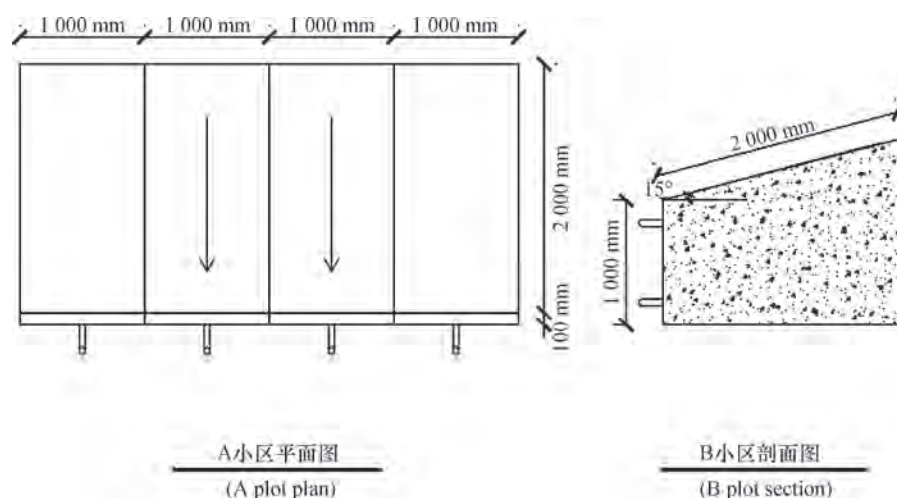


图1 径流小区设计图

Fig. 1 Designing of runoff plots

1.4 测定项目及方法

每次降雨前，测定玉米叶面积指数。具体公式如下^[17]：

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

$$LAI = \frac{\sum_{j=1}^m A_{Lj} \times \rho}{m} \quad (2)$$

式中， A_L 为玉米单株叶面积， m^2 ； L_i 为玉米第*i*片叶片长， m ； W_i 为玉米第*i*片叶片最宽处宽度， m ； k 为修正系数，取0.75^[17]； n 为单株玉米叶片的总数； LAI 为叶面积指数； A_{Lj} 为第*j*株玉米总叶面积， m^2 ； ρ 为玉米种植密度，株/ m^2 ， m 为测定株数。玉米覆盖度采用数码照相法^[23]测定。降雨过程中，准确记录起始产流、跌坎出现、细沟产生时间及降雨总时间；跌坎出现后，每间隔3 min，收集地表径流和泥沙样一次。

采用体积法测定径流量，烘干称重法测定泥沙量^[21]。同时，采用防水摄像机（索尼TX10）记录细沟发育状况，并辅以人工记录细沟条数，钢尺测量细沟长，每条细沟上、中、下三个部位分别测量沟宽和深。

1.5 数据处理

采用Excel 2013、DPS 11.0及Origin Pro 9.0 软件进行统计分析，其中方差分析采用两因素完全随机设计，多重比较采用最小显著差异法（least significant difference, LSD）。

2 结 果

2.1 细沟发育过程及形态变化

由表2可知，在不同雨强条件下，随着玉米生长期推进，坡面产流、跌坎出现及细沟出现时间均呈先增加后减少的趋势，抽雄期较晚，苗期较早。1.0 $mm \min^{-1}$ 雨强条件下，抽雄期和成熟期无明显细沟形成，1.5、2.0 $mm \min^{-1}$ 雨强条件下，玉米各生长期均有明显细沟产生。在1.5 $mm \min^{-1}$ 雨强下，与苗期相比，拔节期、抽雄期和成熟期细沟出现时间分别推迟了15'18"，39'21"和22'46"；在2.0 $mm \min^{-1}$ 雨强下，抽雄期较其他生长期的细沟出现时间延迟，这与1.5 $mm \min^{-1}$ 的变化规律一致，表明在玉米苗期坡面更易产生细沟侵蚀，抽雄期玉米对细沟侵蚀的抑制作用较为突出。随着雨强的增加，玉米各生长期产流、跌坎及细沟出现时间均呈减小趋势。玉米苗期，与1.0 $mm \min^{-1}$ 相比，1.5、2.0 $mm \min^{-1}$ 雨强的细沟出现时间分别提前了31'33"和36'12"。其他生长期均呈相似规律，这说明在其他条件一致时，雨强的增加对细沟侵蚀具有促进作用。

计算分析可知，在玉米各生长期，跌坎和细沟形成所需降雨量随雨强的增加呈减小趋势。以苗期为例，1.0、1.5、2.0 $mm \min^{-1}$ 雨强跌坎产生对应的降雨量分别为29.73、17.18、16.77 mm，细沟产生对应的降雨量分别为50.05、27.75、27.70 mm。而就不同生长期而言，小区产生跌坎、破垄（越垄）



和细沟所需降雨量随玉米生长期的推进呈先增加后减小的趋势。苗期、拔节期、抽雄期及成熟期产生跌坎对应的平均降雨量分别为21.22、27.17、49.11和36.37 mm，破垄（越垄）对应的平均降雨量分别为34.78、46.15、73.66和59.84 mm，细沟对应

的平均降雨量分别为35.17、48.91、81.63和65.82 mm。结合我国南方降雨等级划分，可知苗期、拔节期在大雨（25.1 ~ 50 mm）时且抽雄、成熟期在暴雨（50.1 ~ 100 mm）时应加强对研究区横垄坡面细沟侵蚀的防护。

表2 不同雨强下坡面细沟侵蚀发育过程中主要时刻

Table 2 Critical times of the environment of rill erosion on slope land relative to rainfall intensity (min' sec'')									
生长期 Growth period	1.0 mm min ⁻¹			1.5 mm min ⁻¹			2.0 mm min ⁻¹		
	产流时 间Runoff generation	跌坎产生时 间Drop-pit occurrence	细沟出现 时间Rill occurrence	产流时 间Runoff generation	跌坎产生时 间Drop-pit occurrence	细沟出现 时间Rill occurrence	产流时 间Runoff generation	跌坎产生时 间Drop-pit occurrence	细沟出现 时间Rill occurrence
	time	time	time	time	time	time	time	time	time
苗期 Seedling stage	4'49"	29'44"	50'03"	3'25"	11'27"	18'30"	2'50"	8'23"	13'51"
拔节期 Jointing stage	5'52"	35'44"	55'21"	4'31"	17'27"	33'48"	3'23"	9'48"	20'20"
抽雄期 Tasseling stage	12'40"	55'47"	-	8'15"	39'07"	57'51"	5'33"	16'26"	38'14"
成熟期 Maturing stage	6'18"	45'28"	-	4'52"	25'31"	41'16"	3'36"	12'41"	34'52"

注：表中“-”表示无细沟形成 Note: In the table “-” indicates no rill formed

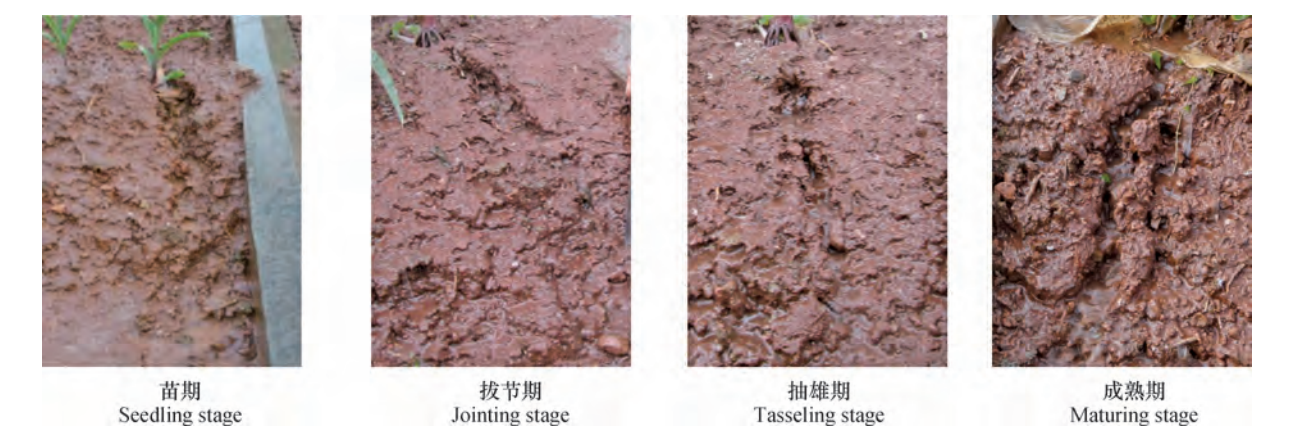


图2 2.0 mm min⁻¹雨强下玉米各生长期细沟侵蚀形态

Fig. 2 Morphology of rills erosion under the rainfall intensity of 2.0 mm min⁻¹ at different maize growing stages

以2.0 mm min⁻¹雨强为例，通过降雨过程中观测（表3），并结合试验中影像分析可知（图2），下垄的细沟发育更为迅速，玉米苗期下垄细沟数量达到3条，且细沟的长、宽、深均较大，抽雄期细沟长、沟宽及沟深均较小。玉米苗期和拔节期由于土壤受人为扰动较大，表土松散，细小颗粒逐渐剥蚀，在垄面局部形成跌坎，跌坎逐渐联通形成断续

细沟。断续细沟沟头溯源侵蚀，降雨后期垄沟内蓄水破垄泄出，由于具有较大的水势，细沟迅速发育、沟壁坍塌，沟长和沟宽逐渐增大，而后细沟形态逐渐趋于稳定。抽雄及成熟期，小区内表土逐渐压实，溅蚀和面蚀时间较长，由于玉米叶面汇流由叶尖处流出，在局部垄面形成溅蚀坑，随降雨时间的延长，溅蚀坑的深度和范围不断增大。同时，茎

表3 2.0 mm min⁻¹雨强下玉米各生长期细沟侵蚀参数

生长期 Growth period	细沟数量 Number of rills		最长沟 Longest rill		
	上垄	下垄	沟长 Length	平均沟宽 Mean width	平均沟深 Mean depth
	Upper ridge	Lower ridge	of rills (cm)	of rills (cm)	of rills (cm)
苗期 Seedling stage	2	3	77.62	6.25	4.04
拔节期 Jointing stage	2	2	65.24	5.13	3.55
抽雄期 Tasseling stage	0	1	59.80	4.03	3.23
成熟期 Maturing stage	1	2	62.55	4.36	3.48

秆流使玉米根部局部表土形成凹陷，垄高降低，垄沟内蓄水跃垄泄出，垄面跌水迅速形成并逐渐贯通为细沟。本试验条件下，横垄坡面的细沟侵蚀多发生在跃垄或破垄后。

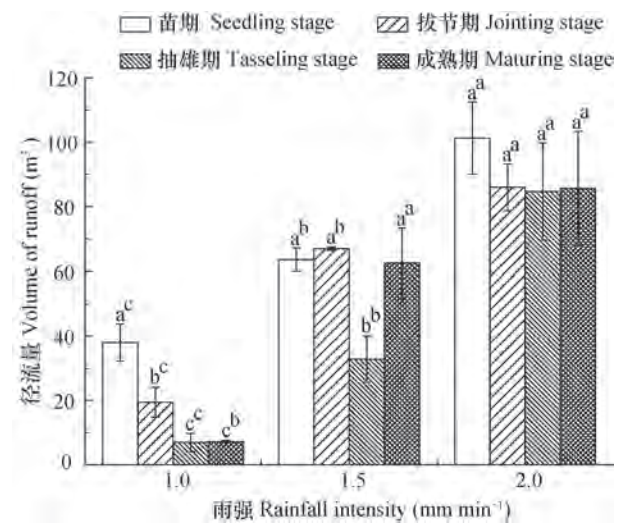
2.2 细沟侵蚀产流总量特征

如图3所示，除1.5 mm min⁻¹雨强外，细沟侵蚀阶段小区产流量随玉米生长期推进整体呈先减少后稳定的趋势，具体表现为苗期>拔节期>成熟期>抽雄期。1.0 mm min⁻¹雨强条件下，与苗期相比，拔节期、抽雄期和成熟期细沟侵蚀阶段小区产流量分别显著降低48.78%，81.65%和81.08%。1.5 mm min⁻¹雨强条件下，抽雄期细沟侵蚀阶段小区产流量显著低于其他生长期，其他生长期差异不显著。2.0 mm min⁻¹雨强条件下，细沟侵蚀阶段各生长期小区产流量表现为差异不显著，这表明较大雨强时，细沟侵蚀阶段玉米不同生长期小区的产流量差异较小。经计算分析可知，苗期细沟侵蚀阶段产流量占玉米季径流总量的30.97%，而抽雄期占玉米季径流总量的比例最小，仅为19.01%。1.0、1.5 mm min⁻¹雨强条件下，抽雄期拦截径流作用较突出。

随着雨强的增加，玉米各生长期细沟侵蚀阶段小区产流量均呈增大趋势。苗期、拔节期及抽雄期不同雨强间细沟产流量差异显著。玉米苗期，与1.0 mm min⁻¹相比，1.5、2.0 mm min⁻¹雨强细沟产流量分别增加了67.33%和166.75%，其他生长期均呈相似规律，这表明在玉米生长季，雨强对细沟产流量具有明显的正效应。

2.3 细沟产流动态变化

如图4所示，在不同雨强条件下，玉米各生长



注：柱状图上不同字母表示同一雨强下，不同生长期在p<0.05水平上差异显著；不同上标字母表示同一生长期下，不同雨强在p<0.05水平上差异显著。下同 Note: Different letters on the histograms indicate significant difference between different maize growing stages at p<0.05 level and different superscript letters mean significant difference between treatments of rainfall intensity at p<0.05 level. The same below

图3 不同雨强下玉米各生长期径流量特征
Fig. 3 Volume of runoff relative to maize growing stage and rainfall intensity

期细沟侵蚀阶段小区产流率均随降雨时间延长呈波动上升的变化趋势。在1.0 mm min⁻¹雨强条件下，苗期细沟侵蚀阶段小区产流率波动幅度较大，而抽雄期和成熟期波动幅度较小，拔节期在细沟发育过程中，细沟侵蚀阶段小区产流率呈持续增加趋势。在1.5 mm min⁻¹雨强条件下，产流率在9~24 min内持续增加，而后在波动中趋于平稳；在整个降雨

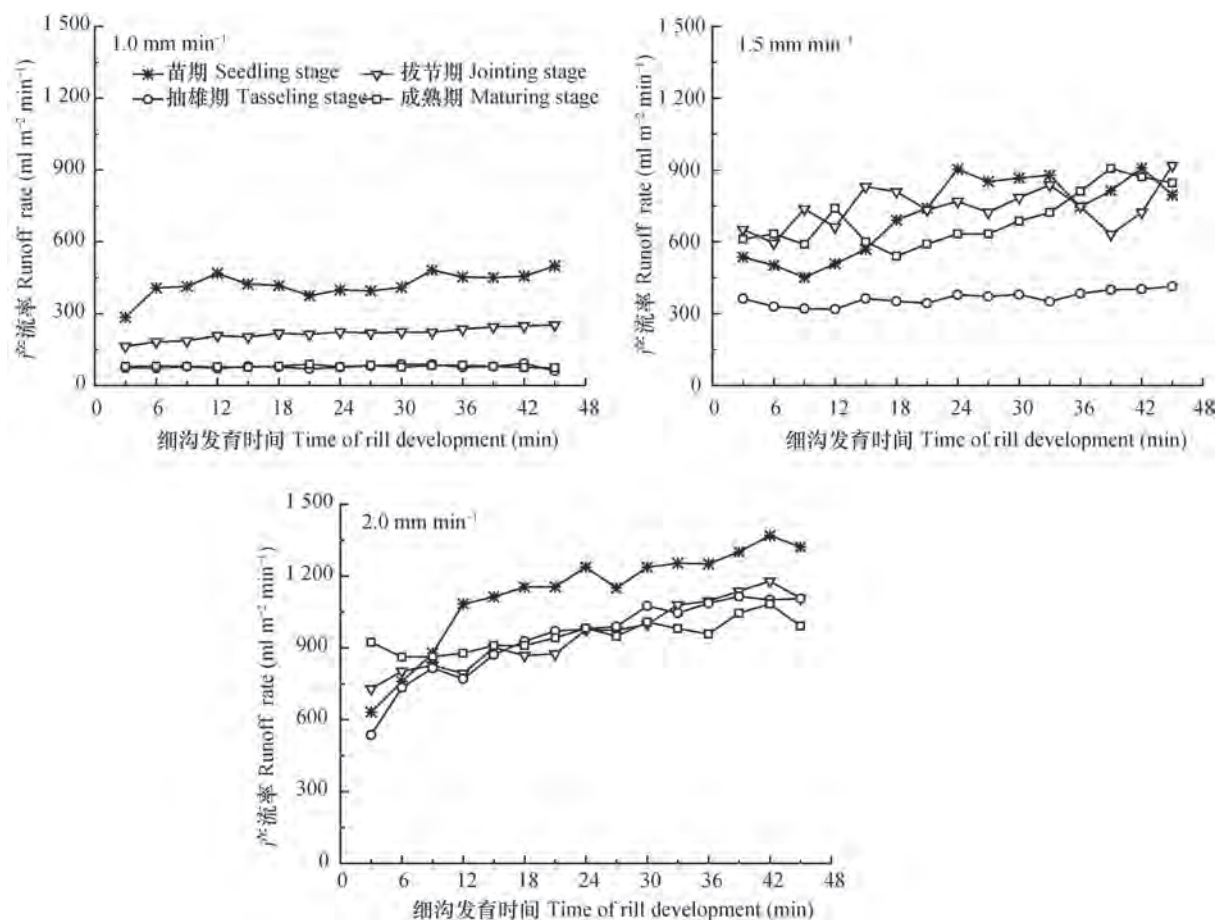


图4 玉米各生长期细沟产流动态变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of surface rill runoff relative to maize growing stage

过程中, 拔节期的产流率呈波动变化, 且波动幅度较大, 而抽雄期产流率较为平稳; 成熟期产流率在细沟发育初期, 呈波动变化趋势, 18 min后呈持续增长趋势, 而后在33 min时逐渐趋于稳定。在2.0 mm min⁻¹雨强条件下, 产流过程整体呈波动上升趋势, 且增长幅度大于1.0、1.5 mm min⁻¹雨强, 拔节期和抽雄期在细沟发育30 min后小区产流率逐渐趋于稳定, 拔节期、抽雄期及成熟期间产流过程差异较小。

2.4 细沟侵蚀产沙总量特征

如图5所示, 除1.0 mm min⁻¹雨强, 随玉米生长期推进, 细沟侵蚀阶段小区产沙量呈先减少后增加的趋势, 具体表现为苗期 > 拔节期 > 成熟期 > 抽雄期。在1.0 mm min⁻¹雨强条件下, 细沟侵蚀阶段小区产沙量随玉米生长期推进而降低, 且各生长期间差异不显著; 在1.5、2.0 mm min⁻¹雨强条件下, 苗期细沟侵蚀阶段小区产沙量显著高于其他生长期, 而拔节期、抽雄期和成熟期间差异不显著, 这表明

在雨强较大时, 玉米苗期横垄坡面细沟侵蚀尤为严重, 而其他生长期相对较弱, 且差异较小。

随雨强的增加, 在玉米各生长期内, 细沟产沙

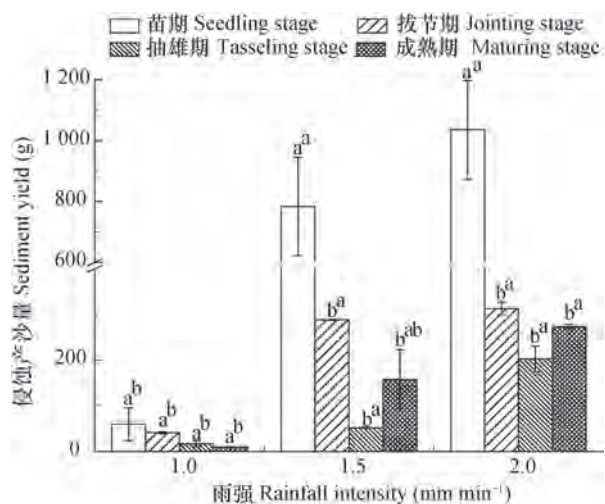


图5 不同雨强下玉米各生长期侵蚀产沙量特征

Fig. 5 Sediment yield relative to maize growing stage and rainfall intensity

量均呈增大趋势。苗期、拔节期及抽雄期, 1.5 、 2.0 mm min^{-1} 雨强侵蚀产沙量均显著高于 1.0 mm min^{-1} , 而 1.5 mm min^{-1} 与 2.0 mm min^{-1} 间差异不显著。

2.5 细沟产沙动态变化

如图6所示, 不同雨强条件下, 玉米各生长期细沟侵蚀阶段小区产沙率均随降雨时间延长呈波动变化。在 1.0 mm min^{-1} 雨强条件下, 各生长期内产沙率波动幅度相对较小, 随降雨时间延长, 产沙率逐渐趋于稳定; 在 1.5 mm min^{-1} 雨强条件下, 苗期

产沙率在 $12 \sim 27$ min内持续增加, 后波动下降, 拔节期和抽雄期产沙率随降雨时间延长较稳定; 成熟期产沙率在细沟发育前期较稳定, 后期有所增加, 但增加幅度较小; 在 2.0 mm min^{-1} 雨强条件下, 苗期产沙率在细沟前期出现陡增陡降的变化特征, 细沟发育时间为 12 min时出现峰值为 15.51 $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$, 而后波动下降, 其他生长期产沙率较为稳定, 这表明, 在细沟发育初期, 细沟侵蚀阶段小区产沙率波动较大, 降雨后期逐渐趋于稳定。

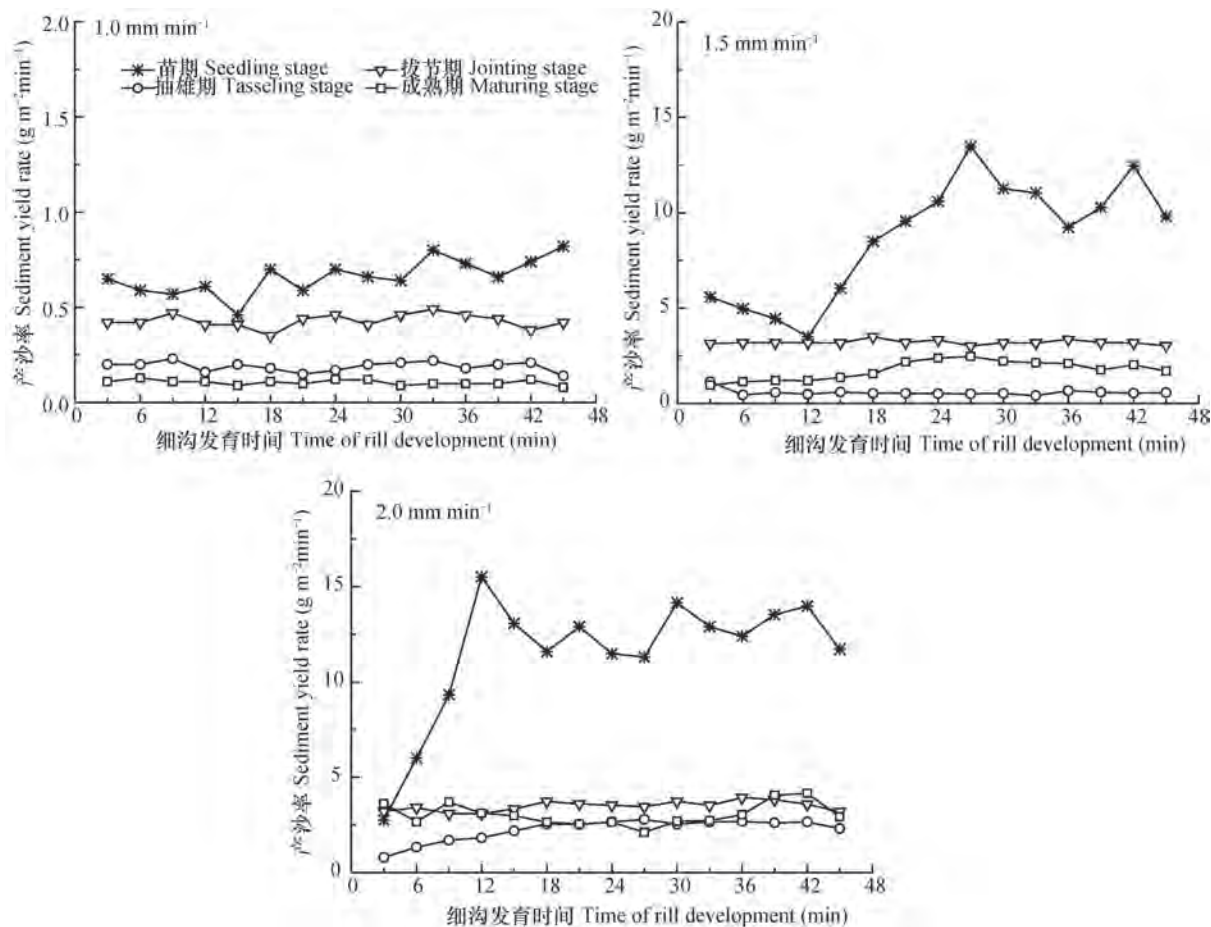


图6 玉米各生长期细沟产沙动态变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of rill sediment yield relative to maize growing stage

2.6 玉米生长期细沟侵蚀影响因素

由表4可知, 玉米株高、平均单株叶面积、叶面积指数和覆盖度均随玉米生长期推进呈先增加后下降的趋势, 且均于抽雄期达最大。株高在抽雄期、成熟期均显著高于苗期和拔节期, 抽雄期-成熟期变幅较小, 差异不显著。叶面积指数在整个生长期变幅较大, 介于 $0.15 \sim 2.34$, 且平均单株叶面积、叶面积指数在不同生长期间差异显著。植被覆盖度在抽雄期达到最大值, 且显著高于其他生长期。

由表5可知, 细沟侵蚀阶段, 产流时间与叶面积指数呈极显著正相关, 侵蚀产沙量与玉米叶面积指数呈显著负相关关系。可见, 叶面积指数的增加能够有效延迟坡面产流时间, 并在一定程度减少细沟侵蚀产沙量。坡面跌坎和细沟出现时间与雨强呈显著负相关, 表明雨强增加使得坡面跌坎、细沟出现时间提前, 促进细沟发育。细沟侵蚀阶段小区产流量与雨强呈极显著正相关。

若将玉米不同生长期叶面积指数和雨强对细沟

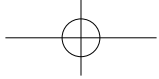


表4 不同生长期玉米株高、叶面积及覆盖度

Table 4 Plant height, leaf area and coverage relative to maize growing stage

生长期 Growth period	株高 Plant height (m)	平均单株叶面积 Mean leaf area per plant (m ² plant ⁻¹)	叶面积指数 Leaf area index	覆盖度 Coverage (%)
苗期 Seedling stage	0.44c	0.04d	0.15d	11.33c
拔节期 Jointing stage	0.87b	0.25c	1.01c	58.67b
抽雄期 Tasseling stage	2.15a	0.59a	2.34a	81.67a
成熟期 Maturing stage	2.12a	0.34b	1.36b	66.33ab

注：表中不同小写字母表示不同生长期在 $p < 0.05$ 水平上差异显著 Note: Different lowercase letters indicate differences at the significance level of $p < 0.05$ between different growth stages

表5 雨强、叶面积与细沟侵蚀相关系数

Table 5 Correlation coefficients of rainfall intensity and leaf area index with rill erosion

	产流时间 Runoff generation time	跌坎出现时间 Drop-pit occurrence time	细沟出现时间 Rill occurrence time	产流量 Volume of runoff	侵蚀产沙量 Sediment yield
叶面积指数 Leaf area index	0.77**	0.57	0.52	-0.38	-0.63*
雨强 Rainfall intensity	-0.56	-0.82**	-0.67*	0.93**	0.56

注：*和**表示显著和极显著相关，样本数 $n=12$ Note: * and ** indicates significant correlation and extremely significant correlation respectively, and $n=12$ means the number of samples is 12

产流产沙速率进行回归分析，结果如式（3）和式（4）所示：

$$Q = -263.4 \text{ LAI} + 1545 \text{ } I - 785.2, R^2 = 0.95^{**} \quad (3)$$

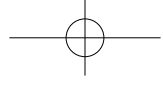
$$A = -227.6 \text{ LAI} + 386.2 \text{ } I - 33.98, R^2 = 0.65^{**} \quad (4)$$

式中， Q 为地表产流率， $\text{ml m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ； LAI 为叶面积指数； I 为雨强， mm min^{-1} ； A 为侵蚀产沙率， $\text{g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 。由式（3）可知，玉米季坡耕地细沟产流率与叶面积指数和雨强呈极显著线性关系，因此可利用式（3）推算紫色土横垄坡面玉米季不同雨强下的细沟侵蚀阶段小区产流率。式（4）所示，对于坡耕地细沟侵蚀阶段产沙率与叶面积指数和雨强具有较高的相关性，产沙率的回归方程达到了极显著水平（ $p < 0.01$ ）。

3 讨 论

3.1 玉米生长期细沟发育特征

植被覆盖是影响坡耕地土壤侵蚀的重要因素之一，植株地上部可拦截降雨、影响径流，根系可改变土壤结构，增加水分入渗及土壤的抗蚀性，有效的植被覆盖具有良好的水土保持效应^[24]。随着玉米生长期的推进，玉米叶面积指数、坡面产流时间均呈先增加后减少的趋势，这与秦凤等^[25]、黄成龙等^[26]研究结果一致。玉米苗期，地表产流较早，细沟发育完整，细沟数量及长、宽、深均较大，主要由于在作物冠层作用下，降雨被分为冠层截留、茎秆流及穿透雨^[16]，该生长期玉米植株低



矮 ($h=0.44\text{ m}$)、叶片面积指数小 ($LAI=0.15$)，玉米冠层的截留作用弱，雨滴直接到达地表，击打作用较强，产流迅速。玉米抽雄期，一方面，由于植株生长旺盛，叶面积指数较大 ($LAI=2.34$)，植株冠层对降雨的拦截和迟滞效应较强，到达地表的降雨量有所减少^[16]；另一方面，根系体积较大^[27]，土壤内部易于形成裂隙，渗透性增强，导致该时期坡面产流的时间滞后于其他生长期。

玉米苗期和拔节期跌坎与细沟出现时间间隔较短，抽雄期和成熟期其间隔时间较长。和继军等^[6]指出从跌坎出现到细沟产生的时间间隔可作为判断土壤发生细沟侵蚀难易程度的标准，表明本试验条件下，苗期和拔节期更易产生细沟侵蚀，这主要与耕作初期人为扰动、表土破碎及容重较小有关^[27]。和继军等^[22]得出塿土、黄绵土裸露坡面相应的间隔时间较短，小于本试验结果，这可能是由土壤性质不同及植被覆盖差异所致。

3.2 玉米生长期细沟产流产沙特征

在 1.5 、 2.0 mm min^{-1} 雨强条件下，苗期细沟侵蚀阶段小区产流、侵蚀产沙量均显著高于其他生长期。说明在玉米苗期，坡耕地细沟侵蚀尤为严重。马波等^[28]发现大豆幼苗期地表径流量显著高于其他生长期，这与本研究结果相似。同一雨强条件下，不同生长期小区细沟侵蚀产沙量的差异较大，而产流量差异较小，表明玉米植株对坡面细沟产流量的影响相对较小，主要通过增强土壤的抗剪和抗蚀性^[29-30]，降低径流挟沙量来实现其保土作用。除苗期外，其他生长期细沟产沙过程起伏较平缓，说明玉米叶面积指数的增加，能有效降低细沟侵蚀阶段坡面产沙的波动性。玉米冠层可拦截降雨，降低了降雨动能，雨滴对坡面的击打作用减弱，降低细沟流的挟沙量，使细沟产沙量大幅度减少。

3.3 叶面积指数与细沟侵蚀的关系

田风霞等^[31]发现草本植被覆盖度与坡面平均径流量、输沙率及含沙率均呈线性负相关，与本试验条件下得到的经验方程 $Q=-263.4\text{ LAI}+1545$ 、 $I-785.2$ 较为相似。玉米季坡耕地细沟侵蚀阶段产流率与叶面积指数和雨强的回归方程达到了极显著水平。马波等^[28]将坡度因素结合，探究叶面积指数与坡面产流产沙关系为 $M_w=1.188S-4.157LAI+36.86$ ， $M_s=20.83S-51.20LAI+139.7$ ， M_w 为产流量 (L m^{-2})， M_s 为产沙量 (g m^{-2})，这与本试验结果较为一致。可见叶面积指数对植被拦

水截沙作用影响较大，在其他条件一致时，可利用玉米叶面积指数估算本研究区域细沟产流、产沙率。

4 结 论

随玉米生长期推进，细沟出现时间呈先增加后减少的趋势。玉米苗期跌坎与细沟出现的平均间隔时间较短，该时期较其他生长期更易产生细沟侵蚀。玉米全生长期横垄坡面的细沟侵蚀多发生在跃垄或破垄后，苗期细沟发育完整。苗期、拔节期在大雨时且抽雄、成熟期在暴雨时应加强对研究区横垄坡面细沟侵蚀的防护。随玉米生长期推进，细沟侵蚀阶段小区产流率和产沙率均表现为苗期 > 拔节期 > 成熟期 > 抽雄期。 1.5 、 2.0 mm min^{-1} 雨强下，苗期细沟产沙量显著高于其他生长期，表明苗期坡耕地细沟侵蚀的防治尤为关键。细沟侵蚀阶段，侵蚀产沙量与叶面积指数呈显著负相关，径流量与雨强呈极显著正相关。在其他条件一定时，可通过叶面积指数和雨强对紫色土区横垄坡面细沟产流产沙状况进行估算。

参 考 文 献

- [1] 聂小军, 苏艳艳. 川中丘陵区紫色土坡耕地土壤侵蚀特征. 生态环境学报, 2012, 21 (4): 682—686
Nie X J, Su Y Y. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands in a purple hilly region of the Sichuan basin (In Chinese). Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21 (4): 682—686
- [2] Ge F L, Zhang J H, Su Z A, et al. Response of changes in soil nutrients to soil erosion on a purple soil of cultivated sloping land. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (2): 459—464
- [3] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rate of sheet and rill erosion in Germany-A meta-analysis. Geomorphology, 2009, 111 (3): 182—193
- [4] 严冬春, 王一峰, 文安邦, 等. 紫色土坡耕地细沟发育的形态演变. 山地学报, 2011, 29 (4): 469—473
Yan D C, Wang Y F, Wen A B, et al. Configuration evolvement of rill development on purple slope land (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2011, 29 (4): 469—473
- [5] Wirtz S, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. Catena, 2012, 91 (5): 21—34
- [6] 和继军, 吕焱, 宫辉力, 等. 细沟侵蚀特征及其产流产

- 沙过程试验研究. 水利学报, 2013, 44 (4): 398—405
- He J J, Lü Y, Gong H L, et al. Experimental study on rill erosion characteristics and its runoff and sediment yield process (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (4): 398—405
- [7] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素. 土壤学报, 2013, 50 (2): 281—288
- Chen J J, Sun L Y, Cai C F, et al. Rill erosion on different soil slopes and their affecting factors (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (2): 281—288
- [8] Shen H, Zheng F, Wen L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology. Geomorphology, 2015, 231: 193—201
- [9] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系. 农业工程学报, 2014, 30 (11): 110—117
- Wang L S, Cai Q G, Cai C F, et al. Morphological changes of rill on loess slope and its relationship with flow velocity (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (11): 110—117
- [10] 陆绍娟, 王占礼, 申楠, 等. 黄土坡面细沟水流佛汝德数试验研究. 土壤, 2015, 47 (1): 166—170
- Lu S J, Wang Z L, Shen N, et al. Experimental study of rill flow state on loess hillslope (In Chinese). Soils, 2015, 47 (1): 166—170
- [11] Su Z A, Zhang J H, Nie X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the Sichuan Basin, China. Pedosphere, 2010, 20 (6): 736—746
- [12] Govers G, Giménez R, van Oost K. Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. Earth-Science Reviews, 2007, 84 (3): 87—102
- [13] 林超文, 庞良玉, 陈一兵, 等. 四川盆地紫色土N, P损失载体及其影响因子. 水土保持学报, 2008, 22 (2): 20—23
- Lin C W, Pang L Y, Chen Y B, et al. Carrier of losing N, P of purple soil in Sichuan basin and its affecting factors (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22 (2): 20—23
- [14] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems. Catena, 2014, 115 (4): 11—18
- [15] Liu Q J, Shi Z H, Yu X X, et al. Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure. Soil and Tillage Research, 2014, 136: 1—8
- [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. 中国农业科学, 2011, 44 (12): 2608—2615
- Lin D J, Zheng Z C, Zhang X Z, et al. Study on the effect of maize plants on rainfall redistribution processes (In Chinese). Science Agricultural Sinica, 2011, 44 (12): 2608—2615
- [17] 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. 生态学报, 2015, 35 (2): 1—17
- Ma B, Li Z B, Ma F, et al. Effects of maize plants on the redistribution of water under simulated rainfall conditions (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (2): 1—17
- [18] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究. 土壤学报, 2010, 47 (6): 1060—1066
- Sun J J, Yu D S, Shi X Z, et al. Comparison of between LAI and VFC in relationship with soil erosion in the red soil hilly region of south China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (6): 1060—1066
- [19] 马波, 马璠, 吴秋菊, 等. 玉米冠下溅蚀效应及其空间分布特征. 农业工程学报, 2012, 28 (20): 135—142
- Ma B, Ma F, Wu Q J, et al. Splash detachment effects and its spatial distribution under corn canopies (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (20): 135—142
- [20] Kross A, Mcnairn H, Lapen D, et al. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2015, 34: 235—248
- [21] 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. 中国农业科学, 2013, 46 (12): 2492—2500
- He X L, Zheng Z C, Li T X. Effects of tillage practices on soil erosion and phosphorus loss in sloping cropland of purple soil (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46 (12): 2492—2500
- [22] 和继军, 宫辉力, 李小娟, 等. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响. 水科学进展, 2014, 25 (1): 90—97
- He J J, Gong H L, Li X J, et al. Effects of rill development on runoff and sediment yielding processes (In Chinese). Advances in Water Science, 2014, 25 (1): 90—97
- [23] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 四川间作地区作物高度、覆盖度和叶面积指数的动态变化. 生态学杂志, 2007, 26 (7): 989—994

- Lin C W, Chen Y B, Huang J J, et al. Temporal variation of plant height, plant cover and leaf area index in intercropped area of Sichuan, China (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26 (7): 989—994
- [24] Lin Y M, Cui P, Ge Y G, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 13—26
- [25] 秦凤, 郑子成, 李廷轩, 等. 玉米季坡耕地地表糙度的变化特征及其对土壤侵蚀的影响. *水土保持学报*, 2013, 27 (3): 18—27
- Qin F, Zheng Z C, Li T X, et al. Change of soil surface roughness and its effects on soil Erosion in sloping cropland during maize growing season (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (3): 18—27
- [26] 黄成龙, 何淑勤, 郑子成, 等. 紫色土区玉米季坡耕地片蚀过程研究. *水土保持学报*, 2015, 29 (1): 70—74
- Huang C L, He S Q, Zheng Z C, et al. Study on sheet erosion process of the purple soil area in sloping cropland during maize growing season (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (1): 70—74
- [27] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析. *农业工程学报*, 2014, 30 (4): 100—108
- Zheng Z C, Zhang X Z, Li T X, et al. Soil anti-erodibility and analysis of its influencing factors during growing stages of maize (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (4): 100—108
- [28] 马波, 刘雨鑫, 吴发启. 植大豆对坡耕地径流侵蚀产沙的影响. *水土保持学报*, 2012, 26 (4): 32—36
- Ma B, Liu Y X, Wu F Q, Effect soybean plants on runoff erosion sediment on slope land (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (4): 32—36
- [29] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素. *农业机械学报*, 2014, 45 (5): 125—130
- Zheng Z C, Zhang X Z, Li T X, et al. Change characteristics and influencing factors of soil shear strength during maize growing period (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45 (5): 125—130
- [30] 马波, 吴发启, 陈宇, 等. 玉米不同生长期茎秆流特征及其模型构建. *农业工程学报*, 2011, 27 (1): 118—123
- Ma B, Wu F Q, Chen Y, et al. Characteristic and model building of stem flow of corn plant in different growth stages (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (1): 118—123
- [31] 田风霞, 刘刚, 郑世清, 等. 草本植物对土质路面径流水动力学特征及水沙过程的影响. *农业工程学报*, 2009, 25 (10): 25—29
- Tian F X, Liu G, Zheng S Q, et al. Influence of herbaceous plants on runoff hydraulic characteristics and sediment generation on terrene roads (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (10): 25—29

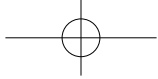
Characteristics and Influencing Factors of Rill Erosion in Slope Land with Contour Ridges during Maize Growing Season

WANG Pengfei¹ ZHENG Zicheng¹ ZHANG Xizhou^{1†} LI Tingxuan¹ LIN Chaowen²

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

(2 Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu 610066, China)

Abstract 【Objective】Rill erosion is particularly serious on slope croplands of purple soil, where maize is the main crop. Therefore, it is a great significance to study how rill erosion occurs on the slope land during the maize growing season to evaluation and effective control of soil rill erosion. 【Method】To that end, a field artificial rainfall experiment was carried out for determination of characteristics of rill erosion on such slope croplands during different maize growing stages, and for analysis of effects of leaf area index and rainfall intensity on rill erosion process. 【Result】Results show that with maize growing in the field, runoff generation, drop-pit occurrence and rill formation varied temporally showing a rising-and-falling trend. Rills



appeared earlier at the seedling stage (27'28") than at the tasseling stage (48'03"). The average interval between drop-pit occurrence and rill formation was 10'59", 15'30", 20'16" and 18'58", respectively, at the seedling, jointing, tasseling and maturing stage, which indicates that rills formed much more easily during the seedling. When the rainfall was 2.0 mm min^{-1} in intensity, the rills developed best in morphology during the seedling stage, with the longest rill reaching 77.62, 6.25 and 4.04 cm, respectively, in length, mean width and mean depth, and with the crop growing on, the volume of rill runoff at various growing stages displayed an order of seedling stage > jointing stage > maturing stage > tasseling stage. The volume of rill runoff during the tasseling stage and tasseling stage accounted for 30.97% and 19.01%, respectively, of the total of the entire maize season, and the runoff yield rate during the two stages was $751.48 \text{ ml m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ and $461.23 \text{ ml m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, respectively. However, the runoff yield rate, regardless of growing stage, displayed a generally rising trend, though fluctuating in the process with rainfall going on, and it fluctuated more obviously during the initial period of rainfall and gradually turned stable later on. Such fluctuation was higher in magnitude during the seedling stage than during the tasseling stage. The seedling stage was the highest among the four stages in rill sediment yield rate, reaching $6.96 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ and followed by jointing stage, mature stage and tasseling stage. Rill sediment yield rate fluctuated with rainfall going on in all the stages and the fluctuation at the seedling stage was the highest in magnitude. Under rainfalls 1.5 or 2.0 mm min^{-1} in intensity, rill sediment yield varied sharply between maize growth stages while surface runoff did not much in volume, which indicates that the effect of maize plants conserving soil was realized through reducing sediment carrying capacity of the runoff. A significantly positive relationship was observed between volume of runoff and rainfall intensity during the rill erosion stage ($r=0.93^{**}$) in slope maize fields, but negative ones were between rill sediment yield and maize leaf area index ($r=-0.63^{*}$). The regression equations of runoff rate and sediment yield rate with leaf area index and rainfall intensity were rated at an extremely significant level ($R^2=0.95$, $R^2=0.65$). **【Conclusion】** The findings in the study demonstrate that it is feasible to effectively control rill erosion on slope lands cultivated with maize at all its growing stages.

Key words Slope farmland; Rill erosion; Maize growing season; Leaf area index; Rainfall intensity

(责任编辑: 陈荣府)