

黄土区坡耕地耕作对浅沟径流产沙及其形态发育特征的影响

郭明明¹, 王文龙^{1,2*}, 李建明^{1,3}, 朱宝才^{1,4}, 史倩华¹,
康宏亮¹, 李艳富⁵, 李珪林⁶

(1. 西北农林科技大学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, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 长江科学院水土保持研究所, 武汉 430010; 4. 山西农业大学林学院, 太谷 030801; 5. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 6. 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站, 庆阳 745000)

摘要: 为研究耕作对浅沟径流产沙及形态发育特征的影响, 在野外调查的基础上, 设计坡度(15°、20°、25°)、雨强(1.0、1.5、2.0 mm/min)及放水流量(7.53~23.45 L/min) 3个处理, 采用室内模拟降雨和放水冲刷的方法, 测定了不同处理下浅沟径流量、产沙量。结果表明: 1) 2种浅沟水流均为紊流, 耕作使浅沟水流雷诺数和弗劳德数分别减小0.95%~30.77%、3.41%~35.66%, 阻力系数和糙率系数分别增加4.01%~58.82%、0.88%~32.79%; 2) 试验条件下, 耕作使浅沟土壤剥蚀率增大9.48%~37.87%, 未耕作与耕作浅沟土壤剥蚀率分别与坡度—流量交互作用、雨强—坡度交互作用呈极显著线性关系, 土壤剥蚀率与径流剪切力、径流功率及单位径流功率均呈显著的线性关系, 未耕作浅沟发生剥蚀的临界剪切力、临界功率及临界单位径流功率分别为17.576 N/m²、5.036 W/(m²·s)、0.0381 m/s, 耕作浅沟为10.585 N/m²、3.544 W/(m²·s)、0.0277 m/s; 3) 耕作使浅沟宽度增加1.98%~31.79%, 浅沟面积增大0.87%~31.69%, 下切深度降低2.84%~26.66%; 4) 耕作使浅沟土壤侵蚀量增加0.91%~22.80%, 未耕作和耕作浅沟土壤侵蚀量分别占坡面土壤侵蚀总量的44.09%~74.16%和42.44%~56.44%, 与雨强—流量交互作用均呈极显著的线性函数关系。结果可为该区浅沟侵蚀预测模型的建立及农业生态环境安全与保护提供科学依据。

关键词: 耕作; 径流; 产沙; 黄土区; 坡耕地; 浅沟; 形态特征

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.016

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0114-10

郭明明, 王文龙, 李建明, 朱宝才, 史倩华, 康宏亮, 李艳富, 李珪林. 黄土区坡耕地耕作对浅沟径流产沙及其形态发育特征的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 114—123. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.016
<http://www.tcsae.org>

Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, Zhu Baocai, Shi Qianhua, Kang Hongliang, Li Yanfu, Li Yaolin. Effect of tillage on runoff and sediment yields and morphology development characteristic of ephemeral gully in loessial region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 114—123. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.016 <http://www.tcsae.org>

0 引言

浅沟是由暴雨径流冲刷在坡耕地槽形部位形成的侵蚀沟, 横断面因再侵蚀和再耕作呈弧形扩展, 无明显沟缘、多呈瓦背状排列, 在地貌形态上并不突出^[1]。浅沟侵蚀是细沟侵蚀向切沟侵蚀演化的一种过渡侵蚀类型^[2], 也被称之为临时性切沟, 但其侵蚀量却在坡面或流域土壤总侵蚀量中占较大比例^[3-4], 在黄土区坡耕地上广泛分布浅沟, 虽不影响耕作但不能消除其痕迹, 随着耕作与侵蚀反复进行浅沟逐渐形成切沟, 切割地形, 对坡耕地构成极大威胁^[5], 因此, 研究坡耕地浅沟发育

变化特征及产沙规律对有效保护坡耕地有着重要科学意义。

目前, 关于浅沟的研究方法主要有野外调查^[6-8]、基于地理信息系统的影像分析^[4,9]和室内模拟降雨冲刷试验^[3,10-11]。Capra等^[6]对意大利西西里地区某流域进行了12a野外观测, 年均浅沟侵蚀模数为0.6 kg/(m²·a), 最大3d降雨量是描述浅沟侵蚀的最好参数, 浅沟形成的最大3d降雨量临界值为51 mm。Nachtergaele等^[12]使用经验模型和浅沟侵蚀模型EGEM(Ephemeral Gully Erosion Model)对浅沟侵蚀进行预测发现, EGEM模型的预测效果极差, 经验模型预测结果有较高的可信度^[13]。另有研究认为浅沟沟长是浅沟侵蚀量预测的最优因子^[12,14-15]。秦伟等^[4]认为坡面坡度、长度、坡向、上坡长度及汇水面积是影响坡面浅沟数量和特征的主要要素; 发生浅沟侵蚀的上限与下限临界坡度分别介于26°~27°和15°~20°, 临界坡长介于50~80 m。室内模拟浅沟试验表明, 耕作对浅沟侵蚀的发生具有决定作用, 耕作通过改变表层土壤结构, 改变了雨强、坡度和汇水面积与浅沟侵蚀速率的响应关系, 且在较大坡度和雨强条件下, 耕作对雨强引起的侵蚀变

收稿日期: 2015-04-16 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(40471080、41301299); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZZD-EW-04-03)

作者简介: 郭明明, 男, 主要从事土壤侵蚀研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: st_gmm@163.com。

*通信作者: 王文龙, 男, 博士生导师, 研究员, 主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。杨凌 中科院水利部水土保持研究所, 712100。

Email: wllwang@nwsuaf.edu.cn。

化有加强作用^[16]。黄土高原坡耕地由于不合理的耕作导致浅沟大面积发育，浅沟分布的面积占沟间地总面积达 78%^[17-18]，且侵蚀量占总侵蚀量比例也较大，浅沟侵蚀所占比例约 26.6%~70%^[3,19]。在活跃侵蚀区，浅沟侵蚀量占总侵蚀量的比例最大可接近 100%^[20]。目前关于坡耕地浅沟侵蚀研究多集中在降雨、地形及植被等因素与侵蚀量的关系上^[10,21-22]，关于耕作对坡耕地浅沟径流特性、形态发育及土壤侵蚀量影响的研究还较为少见。本研究在野外调查的基础上，在室内建立浅沟模型，研究不同雨强、坡度和汇水流量条件下耕作对浅沟径流产沙及形态发育特征的影响。为黄土区坡耕地浅沟侵蚀模型建立及农业生态环境安全与保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验土壤为黄绵土，取自位于黄土高原丘陵沟壑区的安塞县（109°19'23"E、36°51'30"N），土壤粒径<0.001、≥0.001~0.005、≥0.005~0.01、≥0.01~0.05、≥0.05~0.25、≥0.25~1 mm 的颗粒质量分数分别为 3.56%、10.47%、7.93%、48.63%、28.34%、1.07%，中值粒径为 0.034 mm。安塞县地处陕北黄土高原丘陵沟壑区腹地，属于中温带大陆性半干旱季风气候，年平均气温为 8.8℃，年均降水量为 505.3 mm，降水年际变化较大，降雨年内分配不均，降雨量的 63%发生在 7—9 月份。而且北部较干旱，年均降雨量 425 mm，南部年均降雨量为 587.7 mm。植被从南到北逐渐由落叶阔叶林过渡到落叶灌木和草地。土地资源丰富，坡耕地面积大，>15°坡耕地占 71.93%，

但土地质量不高，浅沟等侵蚀地貌非常发育。大面积耕作进一步加剧了水土流失。长期以来，安塞县不仅属于西北典型生态环境脆弱区，也是全国典型的贫困地区之一。

1.2 试验设计与观测

1.2.1 试验条件和浅沟模型设计

试验前首先对野外坡耕地浅沟进行调查，调查内容主要包括浅沟坡度、沟间距、上方汇水面积、耕作方式及耕作前后土壤物理性质的变化，收集当地降雨资料。浅沟坡度主要集中在 13°~25°，结合姜永清等^[23]调查结果即 13°~32°浅沟占 95%，将浅沟模拟坡度 S 确定为 3 个级别即 15°、20°和 25°。雨强 R 根据中国科学院安塞县野外生态试验站降雨资料分析确定为 1.0、1.5 和 2.0 mm/min。浅沟上方汇水面积与张科利等^[2]对浅沟特征调查结果相近，在 317~1152 m² 之间，其中 400~800 m² 比例最大，试验选择 500 m² 为代表，3 个坡度对应的沟间距分别为 15.46、19.94 和 25.66 m，浅沟上方汇水区域产流系数为 0.4^[24]，因此上方汇水流量 Q 共 9 个等级，范围为 7.53~23.45 L/min。当地对坡耕地浅沟的耕作主要以犁耕为主，耕后使用耙具处理，但不能消除浅沟瓦背状的形态，犁耕主要是对耕作层（0~20 cm）土壤的翻松，改变了土壤容重和孔隙度状况，因此，室内模拟试验严格控制每一层土壤容重和孔隙度，野外调查及室内各次模拟试验浅沟耕作层（0~20 cm）和犁底层（≥20~50 cm）土壤容重和孔隙度对比如表 1 所示。各次试验组合采用 R_iS_j -NT（ T ）表示， R_i 、 S_j 为雨强、坡度表达， i 和 j 分别取 1.0、1.5、2.0 和 15、20、25，NT（Non-tillage）表示未耕作处理， T （Tillage）表示耕作处理。

表 1 土壤物理性质统计
Table 1 Statistics of soil physical properties

土层 Soil layer	容重 Bulk density			孔隙度 Porosity		
	调查值 Survey value/(g·cm ⁻³)	试验值 Experimental value/(g·cm ⁻³)	平均相对误差 Mean relative error/%	调查值 Survey value/%	试验值 Experimental value/%	平均相对误差 Mean relative error/%
耕作层 Plough horizon	1.16±0.018	1.15±0.033	-1.70	55.9±0.28	56.5±0.67	1.10
犁底层 Plough pan	1.31±0.01	1.30±0.012	-0.76	50.5±0.37	50.8±0.49	0.59

2014 年 7 月 8 日—9 月 12 日试验在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅下喷区进行，降雨高度为 16 m，均匀度在 85%以上，可满足天然降雨雨滴直径分布及雨滴终速的要求。小区采用室内液压变坡钢槽，尺寸为 8 m×1 m×0.6 m，试验前土壤先过 1 cm 筛去除杂物，然后在试验槽内每 10 cm 为 1 层，分 5 层填土，依据野外调查结果，耕作模拟采用自制犁头沿等高线翻松，自制耙具对起伏处耙平处理，控制浅沟 0~20 cm 土层土壤容重在 1.15 g/cm³，≥20~50 cm 土层土壤容重控制 1.30 g/cm³。浅沟模型制作时，将浅沟沟槽位于小区中间，浅沟沟底与两侧沟坡高差 10 cm，模型横断面为瓦背状。沿小区方向距顶端 0.5 m 处依次向下设置 3 个测流断面，各断面之间间距 0.5 m。另外，在钢槽两侧边壁架设一套测针系统，用于试验过程中浅沟径流宽度和深度以及每次试验后浅沟形态的测量。为了保证试验前土壤含水量一致，在填完土后采用 15 mm/h 雨强降雨至坡面产

流，然后放置 2 d 后进行设计条件下的降雨试验，每次试验后均重新布置小区，严格控制土壤容重、孔隙度及前期含水量，以尽可能使得土壤容重和结构与原型土壤相似^[25]。浅沟模型测流断面划分及测针布设如图 1 所示。

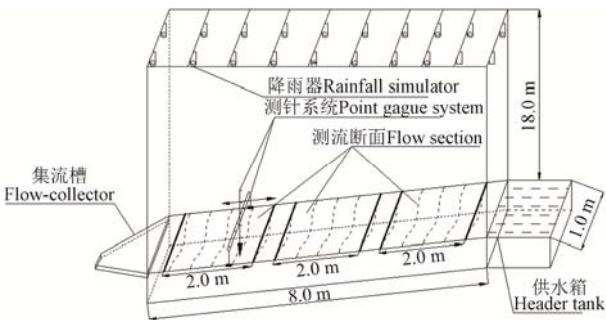


图 1 浅沟试验模型示意图

Fig.1 Sketch of experiment on ephemeral gully

1.2.2 模拟降雨侵蚀动力相似及差异性分析

模拟试验已被众多研究者采用并作为土壤侵蚀研究的重要手段。但室内降雨是人工模拟的降雨,土壤是被扰动了的土体,为了再现原型土壤侵蚀的过程,将试验结果应用和指导生产实践,室内外试验相似性问题的解决显得非常必要。本研究采用 1:1 比例尺条件下模拟试验,在 1:1 比例尺下,土壤侵蚀模拟试验最基本的相似条件有 2 个,即作为侵蚀动力源泉的降雨相似和作为被侵蚀对象的土壤相似^[25]。土壤相似性已作说明,在此只对降雨相似性进行分析。

忽略风对雨滴的影响,假设雨滴为球形,单个雨滴受到相对空气的惯性力、重力、空气浮力及空气黏滞力。将浮力与重力合并一起考虑。由此,降雨现象的物理条件由惯性力(F_I , N)、重力(F_g , N)及黏滞力(F_v , N)构成,计算如下:

$$F_I = m \cdot a = m \cdot \frac{v}{t} = \rho \cdot l^3 \cdot v_1^2 \quad (1)$$

$$F_g = m \cdot g = \frac{1}{6} \pi \cdot \rho \cdot l^3 \cdot g \quad (2)$$

$$F_v = 3\pi \cdot \mu \cdot l \cdot v_1 \quad (3)$$

式中: m 为质量, kg; a 为加速度, m/s^2 ; v_1 为速度, m/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; l 为雨滴直径, m; t 为时间, s; g 为重力加速度, m/s^2 ; μ 为空气动力黏滞系数, Pa/s 。

由式 (1) ~ (3) 可得以下 2 个无量纲 π 项:

$$\text{对于天然降雨: } \pi_1 = \frac{F_I}{F_v} = \frac{\rho \cdot v_1 \cdot l}{3\pi \mu},$$

$$\pi_2 = \frac{F_I}{F_g} = \frac{6v_1^2}{\pi g l} \quad (4)$$

$$\text{对于模拟降雨: } \pi_1' = \frac{F_I'}{F_v'} = \frac{\rho' \cdot v_1' \cdot l'}{3\pi \mu'},$$

$$\pi_2' = \frac{F_I'}{F_g'} = \frac{6v_1'^2}{\pi g' l'} \quad (5)$$

当模拟降雨与天然降雨有相同的流体($\rho = \rho', \mu = \mu'$)和重力场($g = g'$)时,即 $\pi_1 = \pi_1', \pi_2 = \pi_2'$,进而推导出:

$$\frac{\rho \cdot v_1 \cdot l}{\mu} = \frac{\rho' \cdot v_1' \cdot l'}{\mu'} \Rightarrow \frac{v_1}{v_1'} = \frac{l'}{l} \quad (6)$$

$$\frac{v_1^2}{g \cdot l} = \frac{v_1'^2}{g' \cdot l'} \Rightarrow \frac{v_1}{v_1'} = \left(\frac{l'}{l} \right)^{1/2} \quad (7)$$

很显然,同时满足以上 2 个条件,对于缩小降雨比例尺的模拟试验是不可能的,若要模拟最优效果只能对降雨进行近似的复制,即取比例尺为 1:1。也即降雨相似条件为 $v_1/v_1' = l'/l = 1$,即要求模拟降雨的雨滴直径和雨滴终点速度保持同一尺度。

根据雷阿林和唐克丽研究^[26],通过提高降雨高度和设定初始压力可保证雨滴终点速的相似,通过改进喷头保证雨滴径的相似,通过喷头成组布设保证降雨分布的相似。研究使用的降雨设备为中科院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅降雨装置,该装置模拟降雨雨强

为 1.0、1.5 及 2.0 mm/min 的雨滴直径分布、均匀度及雨滴终速均要求最大程度地与天然降雨相似。

放水流量冲刷的相似性:由于室内试验土槽尺寸的限制,因此模拟的浅沟为原型浅沟沟槽的一部分,因此需要考虑上方汇水因素才能保证模拟浅沟试验侵蚀动力 1:1 比例尺,放水流量由沟间距、上方汇水面积、径流系数及浅沟坡度确定,完全按照原型浅沟要素设计的,因此,符合原型与模拟试验的 1:1 比例尺。

另外,模拟降雨与天然降雨侵蚀动力差异性在于,一次天然降雨过程中雨强是不断变化的,而模拟试验降雨强度是保持不变的,通过模拟试验可获得浅沟径流、产沙及形态特征随雨强的变化关系,因此通过此关系可外推天然降雨各雨强下的结果,只要模拟降雨与天然降雨相似程度能达到最高,研究结果就有实际生产意义。

1.2.3 数据采集

每次试验时间设计为 39 min,在小区出口有泥沙出流时开始计时,前 3min 每 1 min 接 1 次泥沙样,3 min 后每 3 min 采集 1 次,用秒表记录采样时间,同时用高锰酸钾溶液示踪法测量浅沟径流流速,测针系统测量径流宽度。试验结束后每隔 30 cm 取 1 个断面,采用测针系统测量浅沟发育的宽度和深度,测量精度为 0.1 mm,泥沙质量采用烘干法,普通温度计测量水温。

1.3 数据分析

1) 径流深 h

由于浅沟沟槽发育不均匀,测针测量时误差较大,实测难以精确测定。因此假定水流沿浅沟沟槽均匀分布,径流深计算如下^[27]:

$$h = \frac{q}{v \cdot B \cdot t} \quad (8)$$

式中: h 为径流深, m; q 为 t 时间内 (s) 径流量, m^3 ,通过所接径流泥沙样确定; v 为过水断面径流流速, m/s ,通过颜色示踪确定; B 为过水断面宽度, m,通过测针系统测量。

2) 雷诺数 Re 是水流流态的重要判断依据,是水流惯性力与黏滞力的比值。 $Re < 500$,水流为层流, $Re \geq 500$,水流为紊流。其计算如下^[27]:

$$Re = \frac{v \cdot h}{\nu}, \quad \nu = \frac{1.775 \times 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (9)$$

式中: ν 为水流黏滞性系数, m^2/s ; T 为水温, $^\circ\text{C}$ 。

3) 弗劳德数 Fr

弗劳德数也是表征水流流态的重要参数,反映水流惯性力和重力的比值。 $Fr < 1$,水流为缓流, $Fr \geq 1$,水流为急流。其计算公式如下^[27]:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (10)$$

4) Darcy-weisbach 阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n 均可用来描述径流流过浅沟对水流的阻力作用,其计算公式如下^[27]:

$$f = \frac{8g h J}{v^2} \quad (11)$$

$$n = \frac{h^{2/3} \cdot J^{1/2}}{v} \quad (12)$$

式中: J 为水力能坡, 近似为坡度正切值, 即 $J=\tan S$ 。

5) 径流剪切力 τ

径流剪切力是反映径流在流动时对坡面土壤剥蚀力大小的参数, 其计算公式如下^[28]:

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot J \quad (13)$$

式中: τ 为径流剪切力, N/m^2 ; ρ_w 为水密度, kg/m^3 。

6) 径流功率 ω

径流功率表征作用于单位面积的水流所消耗的功率, 反映剥蚀一定量土壤所需功率, 其计算公式如下^[28]:

$$\omega = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot J \cdot v = \tau \cdot v \quad (14)$$

式中: ω 为径流功率, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

7) 单位径流功率 U_p

Yang^[29]对单位水流功率的定义为坡面流流速与坡降的乘积, 也即单位质量水体势能随时间的变化率, 计算式为:

$$U_p = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \cdot J \quad (15)$$

式中: U_p 为单位水流功率, m/s ; y 为单位水体势能, m ; x 为坡面纵向距离, m ;

8) 各次试验土壤总侵蚀量由浅沟侵蚀量和浅沟间侵蚀量组成。浅沟侵蚀量是指各次试验后形成的沟槽所流失的土壤质量, 浅沟间侵蚀量是指沟槽两侧土壤侵蚀量。浅沟体积 V 和侵蚀量 M_{EG} 采用郑粉莉等^[3]和 Capra 等^[6]提出的容积法计算, 浅沟横断面假设为“V”形, 计算式为:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{(d_i + d_{i+1})}{2} \cdot \frac{(h_i + h_{i+1})}{2} \cdot L_i \right] \quad (16)$$

$$M_{EG} = \rho_u \cdot V \quad h_i \leq 0.2 \text{ m} \quad (17)$$

或

$$M_{EG} = \frac{1}{2} \times 0.2 \times 0.3 \left(1 + \frac{\bar{h}_i - 0.2}{\bar{h}_i} \right) \cdot \bar{d}_i \cdot \rho_u + \frac{1}{2} \times 0.3 \left(\frac{\bar{h}_i - 0.2}{\bar{h}_i} \right) \cdot \bar{d}_i \cdot (h_i - 0.2) \cdot \rho_d \quad (18)$$

$h_i > 0.2 \text{ m}$

式中: V 为浅沟体积, m^3 ; M_{EG} 为浅沟土壤侵蚀量, kg ;

\bar{d}_i , \bar{h}_i 为相邻断面浅沟平均宽度和深度, m ; ρ_u 和 ρ_d 为上 20 cm 和下 30 cm 填土容重, kg/m^3 ; L_i 为断面长度, 0.3 m。

9) 土壤剥蚀率 D_r

土壤剥蚀率即单位时间单位面积径流所能剥蚀土壤的质量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 其计算公式如下:

$$D_r = \frac{M_s}{A \cdot t} \quad (19)$$

式中: M_s 为时间 t (s) 内坡面侵蚀量, g , 由径流泥沙样确定; A 为试验槽面积, m^2 。

采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 进行数据处理和相关及回归分析, 采用 Origin 8.5 进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 耕作对浅沟径流水动力特征的影响

表 2 为各次试验未耕作和耕作浅沟水动力学参数统计, 表 3 为水动力学参数与雨强、坡度、流量及其交互作用间的相关系数统计。由表 2 可知, 未耕作与耕作浅沟 Re 均 > 500 , 为紊流, 均随坡度和雨强增大而增大, 对于同一雨强或坡度, 流量越大, Re 越大, 即径流紊动性越强。未耕作浅沟 Re 为 3163~8622, 相同条件下耕作浅沟水流紊动性有所减弱, 减幅为 0.95%~30.77%。相关分析表明, 未耕作浅沟 Re 与雨强、流量显著相关 ($P < 0.05$), 与坡度关系不显著 ($P > 0.05$); 耕作后浅沟 Re 与坡度和放水流量相关性均显著 ($P < 0.05$), 说明坡度对耕作后浅沟径流紊动性影响增强, 雨强对其影响减弱。另外, Re 并非简单地随流量的增大而增大, 与雨强和坡度的变化密切相关, 为了分析雨强、坡度和流量综合作用对其影响, 分别对 Re 与雨强—坡度交互作用 (RS)、雨强—流量交互作用 (RQ)、坡度—流量交互作用 (SQ) 及雨强—坡度—流量交互作用 (RSQ) 进行相关分析 (表 3)。结果表明未耕作与耕作浅沟 Re 与各交互项均极显著相关 ($P < 0.01$), 逐步回归分析表明, 未耕作与耕作浅沟 Re 与放水流量 ($R^2=0.904$, $P < 0.01$) 及雨强—流量交互作用 (RQ) ($R^2=0.961$, $P < 0.01$) 均呈线性函数关系。

表 2 各次试验径流水动力参数统计

Table 2 Statistics of runoff hydrodynamic parameters for experiments

试验组合 Combined experiment	流量 Flow discharge/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	弗劳 德数 Froude number	雷诺数 Reynolds number	阻力系数 Resistance coefficient	曼宁糙率 系数 Manning roughness coefficient	试验组合 Combined experiment	流量 Flow discharge/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	弗劳 德数 Froude number	雷诺数 Reynolds number	阻力系数 Resistance coefficient	曼宁糙率 系数 Manning roughness coefficient
R _{1.0} S ₁₅ -NT	7.53	0.551	3163	2.261	0.075	R _{1.0} S ₁₅ -T	7.53	0.516	3133	2.459	0.081
R _{1.0} S ₂₀ -NT	9.43	0.614	4073	3.492	0.103	R _{1.0} S ₂₀ -T	9.43	0.564	3448	3.919	0.103
R _{1.0} S ₂₅ -NT	11.72	0.667	4992	4.092	0.108	R _{1.0} S ₂₅ -T	11.72	0.581	4218	4.984	0.138
R _{1.5} S ₁₅ -NT	11.29	0.614	5396	3.617	0.107	R _{1.5} S ₁₅ -T	11.29	0.532	3736	3.773	0.111
R _{1.5} S ₂₀ -NT	14.14	0.645	5595	4.039	0.108	R _{1.5} S ₂₀ -T	14.14	0.623	4678	4.201	0.112
R _{1.5} S ₂₅ -NT	17.59	0.726	6409	5.150	0.124	R _{1.5} S ₂₅ -T	17.59	0.664	5443	6.607	0.144
R _{2.0} S ₁₅ -NT	15.06	0.713	5497	4.202	0.116	R _{2.0} S ₁₅ -T	15.06	0.592	3964	4.434	0.119
R _{2.0} S ₂₀ -NT	18.85	0.798	5976	4.290	0.119	R _{2.0} S ₂₀ -T	18.85	0.628	4838	4.490	0.122
R _{2.0} S ₂₅ -NT	23.45	1.091	8622	5.187	0.122	R _{2.0} S ₂₅ -T	23.45	0.702	6127	8.238	0.162

注: R_{1.0}S₁₅-NT 和 R_{1.0}S₁₅-T 各代表降雨强度为 1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、坡度为 15° 时未耕作与耕作浅沟处理, 其余以此类推; 下同。

Note: R_{1.0}S₁₅-NT and R_{1.0}S₁₅-T represent non-tillage and tillage treatments conducted under conditions of 1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ rainfall intensity and 15° slope, respectively, and so on; Same as below.

表3 径流产沙参数与雨强、坡度、流量及其交互作用的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between runoff and sediment parameters and coupling effects of rainfall intensity, slope and flow discharge

参数 Parameter	未耕作 Non-tillage						耕作 Tillage					
	弗劳德数 Froude number	雷诺数 Reynolds number	阻力系数 Resistance coefficient	曼宁糙率系数 Manning roughness coefficient	剥蚀率 Detachment rate	浅沟侵蚀量 Ephemeral gully sediment yield	弗劳德数 Froude number	雷诺数 Reynolds number	阻力系数 Resistance coefficient	曼宁糙率系数 Manning roughness coefficient	剥蚀率 Detachment rate	浅沟侵蚀量 Ephemeral gully sediment yield
<i>R</i>	0.698*	0.745*	0.624	0.695*	0.617	0.917**	0.623	0.615	0.494	0.487	0.750*	0.892**
<i>S</i>	0.549	0.565	0.708*	0.548	0.718*	0.298	0.733*	0.738*	0.780*	0.800**	0.630	0.391
<i>Q</i>	0.923**	0.951**	0.879**	0.823**	0.940**	0.931**	0.932**	0.940**	0.861**	0.831**	0.985**	0.966**
<i>RS</i>	0.923**	0.947**	0.885**	0.821**	0.951**	0.910**	0.948**	0.954**	0.873**	0.842**	0.991**	0.951**
<i>RQ</i>	0.902**	0.895**	0.767*	0.752*	0.861**	0.979**	0.830**	0.829**	0.739*	0.791*	0.930**	0.983**
<i>SQ</i>	0.908**	0.919**	0.889**	0.761*	0.981**	0.782**	0.961**	0.980**	0.949**	0.909**	0.960**	0.848**
<i>RSQ</i>	0.963**	0.942**	0.824**	0.738*	0.966**	0.914**	0.921**	0.935**	0.876**	0.815**	0.978**	0.947**

注: *表示显著性 0.05 水平; **表示显著性 0.01 水平; *R*、*S*、*Q*、*RS*、*RQ*、*SQ* 及 *RSQ* 分别代表雨强、坡度、流量、雨强—坡度、雨强—流量、坡度—流量及雨强—坡度—流量的交互作用; 下同。

Note: *. Correlation is significant at 0.05 level; **. Correlation is significant at 0.01 level; *R*, *S*, *Q*, *RS*, *RQ*, *SQ* and *RSQ* represents rainfall intensity, slope, flow discharge, interaction of rainfall intensity and slope, rainfall intensity and flow discharge, slope and flow discharge, and rainfall intensity, slope and flow discharge, respectively; Same as below.

试验组合为 $R_{2.0}S_{25}$ -NT 时, 浅沟径流为急流 ($Fr=1.091$), 其余试验条件下 $Fr<1$, 为缓流, 未耕作 Fr 为 0.551~1.091, 耕作后浅沟径流流态变缓, 较未耕作浅沟 Fr 减小 3.41%~35.66%, 2 种浅沟 Fr 随雨强、坡度及流量的变化与 Re 相似, 相关分析及逐步回归分析表明, 除坡度外, 未耕作浅沟 Fr 与其余因素相关程度均在显著水平 ($P<0.05$), Fr 可用雨强—坡度—流量 (RSQ) 交互作用的线性函数表示 ($R^2=0.926$, $P<0.01$), 耕作浅沟 Fr 可用坡度—流量交互作用线性方程描述 ($R^2=0.924$, $P<0.01$)。 Re 越大表明水流紊动性越强, Fr 越大表明水流越急, 耕作后浅沟水流紊动性减弱、流态变缓。

阻力系数 f 和曼宁糙率系数 n 是浅沟径流在流动过程中受到阻力的大小, 阻力越大, 说明径流克服浅沟沟槽阻力所消耗的能量也越大, 分配于侵蚀和搬运中的能量就越小, 浅沟侵蚀产沙就越少。未耕作浅沟阻力系数和糙率系数分别为 2.261~5.187、0.075~0.124, 相同条件下, 耕作浅沟阻力系数和糙率系数分别增加 4.01%~58.82%、0.88%~32.79%。未耕作与耕作浅沟 f 均随雨强和坡度增大而增大, 随流量变化与 Re 和 Fr 相似。相同雨强条件下, 未耕作浅沟 n 随坡度增大而增大, S 为 15° 和 20° 时, n 随雨强增大而增大, 25° 时变化不明显。由表 3 可知, 未耕作与耕作浅沟 f 与雨强相关性均未达到显著水平 ($P>0.05$), 但均与坡度—流量交互作用 (SQ) 呈极显著线性关系 ($R^2=0.791$ 和 0.901, $P<0.01$); 未耕作与耕作浅沟 n 分别与坡度、雨强相关性不显著 ($P>0.05$), 分别与流量 Q 、坡度—流量交互作用 (SQ) 呈极显著线性关系 ($R^2=0.678$ 和 0.827, $P<0.01$)。

2.2 耕作对浅沟侵蚀水动力特征的影响

由图 2 可知, 对于未耕作浅沟, 1.0 mm/min 雨强时, 随着坡度增大, 剥蚀率分别增加 16.52%、31.37%, 1.5 和 2.0 mm/min 雨强时则分别为 9.45%、37.16% 和 35.38%、37.20%; 对于耕作浅沟, 1.0 mm/min 雨强时, 剥蚀率随着坡度增大分别增加 25.0%、22.37%, 1.5 和 2.0 mm/min

雨强时则分别为 20.13%、33.36% 和 40.77%、15.11%。试验条件下, 未耕作与耕作浅沟土壤剥蚀率分别为 12.889~32.222 g/(m²·s)、14.120~37.272 g/(m²·s), 相同条件下, 耕作浅沟土壤剥蚀率较未耕作浅沟增大 9.48%~37.87%。表 3 相关分析结果表明, 除雨强外, 未耕作浅沟土壤剥蚀率与其余因素关系均显著 ($P<0.05$), 逐步回归分析结果表明, 剥蚀率与坡度—流量交互作用呈极显著线性关系 ($R^2=0.962$, $P<0.01$)。耕作浅沟土壤剥蚀率与坡度相关性最差 ($P>0.05$), 逐步回归分析结果表明, 耕作浅沟剥蚀率与雨强—坡度交互作用呈极显著线性函数关系 ($R^2=0.983$, $P<0.01$)。由此可以看出, 雨强对耕作后浅沟侵蚀影响增强, 这是由于耕作后的浅沟耕层土壤疏松, 可蚀性增强, 雨滴对浅沟两侧沟间土壤的侵蚀作用强于未耕作浅沟。

土壤侵蚀是由土壤抗蚀性与径流冲刷力的相互作用决定, 径流水动力大小直接影响侵蚀的强弱。国内外对侵蚀动力学过程的研究多基于径流剪切力 τ 、径流功率 ω 及单位水流功率 U_p 3 个水动力学参数, 径流剪切力是力学参数, 径流功率和单位径流功率则属能量的范畴。图 3 为各次试验 2 种浅沟土壤剥蚀率与径流剪切力、径流功率及单位径流功率的关系。对于径流剪切力, 未耕作浅沟径流 τ 变化为 38.948~83.149 N/m², 相同条件下耕作使浅沟径流剪切力增大 0.18%~25.04%, 剥蚀率随剪切力增大而增大, 2 种浅沟剥蚀率均与之呈极显著线性关系, 如图 3a 所示, 图中拟合方程的斜率为土壤可蚀性参数, 括号中常数为临界剪切力, N/m², 未耕作与耕作浅沟土壤可蚀性参数、临界剪切力分别为 4.38×10^{-4} s/m、17.576 N/m² 与 4.05×10^{-4} s/m、10.585 N/m², 耕作后土壤剥蚀临界剪切力降低了 39.78%。对于径流功率, 未耕作浅沟 ω 变化为 11.701~25.778 W/(m²·s), 同条件下耕作浅沟径流功率是其 1.05~1.36 倍, 2 种浅沟剥蚀率与径流功率呈极显著线性关系, 如图 3b 所示, 图中拟合方程的斜率为土壤可蚀性参数, 分别为 1.397、1.199 g/W, 括号中

常数为临界径流功率，分别为 5.036、3.544 W/(m²·s)，临界径流功率减小幅度为 29.63%。对于单位径流功率，未耕作浅沟 U_p 为 0.081~0.144 m/s，耕作使其提高 1.17%~31.61%，回归分析表明，两种浅沟剥蚀率均与之呈极显

著的线性关系，如图 3c 所示，图中拟合方程斜率为土壤可蚀性参数，分别为 280.46、255.01 g/m³，括号中常数为临界单位径流功率，分别为 0.0381、0.0277 m/s，临界单位径流功率减小幅度为 27.26%。

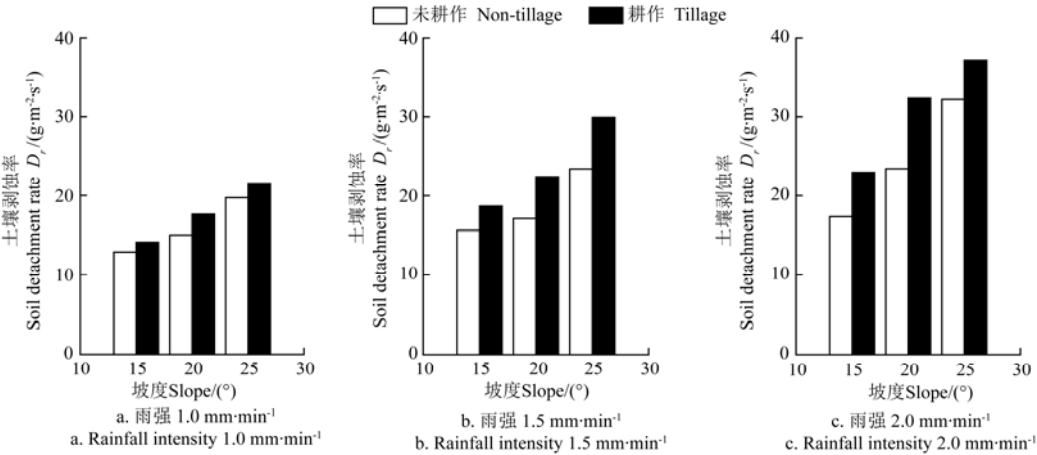


图 2 不同雨强条件下耕作与未耕作浅沟土壤剥蚀率变化
Fig.2 Variation of soil detachment rate of non-tillage and tillage ephemeral gully under different rain intensity

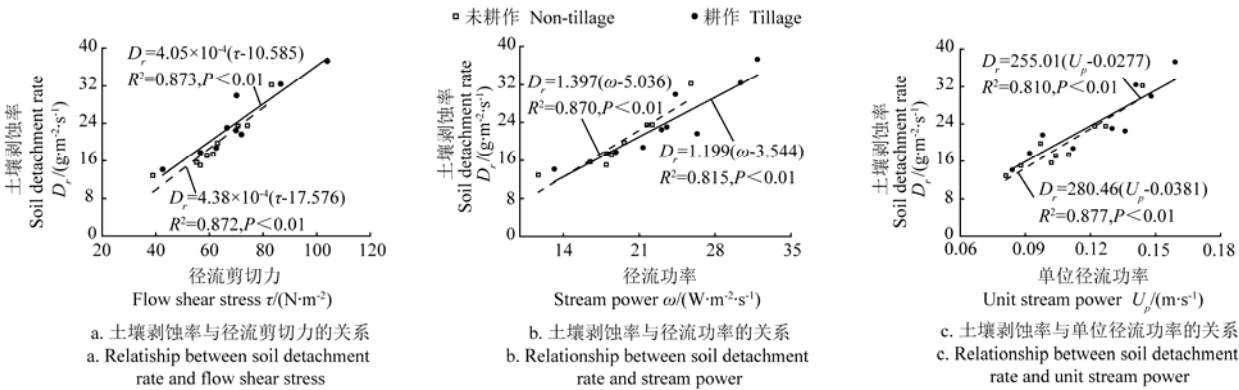


图 3 两种浅沟土壤剥蚀率与水动力参数的关系
Fig.3 Relationship between soil detachment rate and hydrodynamic parameters for two kinds of ephemeral gullies

2.3 耕作对浅沟形态发育的影响

浅沟形态用浅沟发育宽度、深度和面积来表征，各次降雨浅沟形态参数如表 4 所示，各参数与雨强、坡度、流量及其交互作用相关系数如表 5 所示。在宽度发育方面，未耕作浅沟各次降雨的浅沟宽度变化为 19.30~33.48 cm，除 R_{2.0}S₂₅ 试验组合外，其余试验条件下耕作浅沟宽度均大于未耕作，主要是由于在最大坡度、雨强及放水流量条件下，试验后期未耕作浅沟沟壁崩塌较为活跃造成的，耕作浅沟较未耕作浅沟宽度增加 1.98%~31.79%。表 5 可见，未耕作浅沟宽度与 RQ、SQ 及 RSQ 显著相关 ($P<0.05$)。耕作后浅沟由于沟壁土壤抗蚀性差，坍塌的频率高、随机性强，使得宽度与各因素之间相关性变差。

在深度发育方面，各次降雨未耕作浅沟发育深度为 15.93~22.88 cm，对于同一坡度，浅沟下切速率均随雨强的增大先增大后减小，即 1.5 mm/min 雨强时，未耕作浅沟下切最深，而耕作浅沟下切深度则随雨强增大而增大。除 R_{2.0}S₂₅ 组合试验外，其余耕作浅沟下切深度均小

于未耕作浅沟，耕作浅沟下切深度降低 2.84%~26.66%，1.5 和 2.0 mm/min 雨强条件下，未耕作浅沟下切深度接近或超过耕作层深度（20 cm）。

表 4 不同处理下浅沟形态统计
Table 4 Statistics of ephemeral gullies morphology under different treatments

试验组合 Combined experiment	流量 Flow Discharge/ (L·min ⁻¹)	未耕作 Non-tillage			耕作 Tillage		
		宽度 Width/ cm	深度 Depth/ cm	面积 Area/m ²	宽度 Width/ cm	深度 Depth/ cm	面积 Area/m ²
R _{1.0} S ₁₅	7.53	23.98	15.93	1.90	24.55	15.08	1.93
R _{1.0} S ₂₀	9.43	25.13	16.56	1.99	27.13	15.63	2.14
R _{1.0} S ₂₅	11.72	23.09	16.29	1.83	30.43	15.81	2.41
R _{1.5} S ₁₅	11.29	19.30	21.54	1.54	25.39	17.97	2.01
R _{1.5} S ₂₀	14.14	20.31	22.88	1.63	26.37	16.78	2.11
R _{1.5} S ₂₅	17.59	23.85	22.63	1.89	28.14	20.62	2.26
R _{2.0} S ₁₅	15.06	25.95	19.03	2.03	26.46	18.49	2.10
R _{2.0} S ₂₀	18.85	25.50	19.33	2.31	28.21	18.50	2.33
R _{2.0} S ₂₅	23.45	33.48	21.32	2.69	25.31	23.28	2.52

表5 浅沟形态参数与雨强、坡度、流量及其交互作用的相关系数

Table 5 Correlations between morphological parameters of ephemeral gully and coupling effects of rainfall intensity, slope and flow discharge

变量 Variable	未耕作 Non-tillage			耕作 Tillage		
	宽度 Width	深度 Depth	面积 Area	宽度 Width	深度 Depth	面积 Area
R	0.453	0.585	0.453	-0.169	0.735*	0.352
S	0.399	0.228	0.390	0.592	0.417	0.860**
Q	0.653	0.616	0.717*	0.075	0.896**	0.750*
RS	0.653	0.607	0.720*	0.108	0.883**	0.778*
RQ	0.671*	0.560	0.749*	-0.072	0.872**	0.627
SQ	0.670*	0.529	0.701*	0.206	0.853**	0.868**
RSQ	0.738*	0.543	0.792*	0	0.912**	0.767*

浅沟发育面积大小表示坡面被切割的程度, 未耕作浅沟发育面积为 $1.54 \sim 2.69 \text{ m}^2$, 在 25° 坡度、 2.0 mm/min 雨强条件下浅沟发育面积最大, 即 2.69 m^2 , 其余次降雨耕作浅沟发育面积较未耕作浅沟增大 $0.87\% \sim 31.69\%$, 未耕作浅沟面积占坡面面积 $19.25\% \sim 33.63\%$, 而耕作浅沟面积占坡面面积的 $24.13\% \sim 31.50\%$ 。耕作后坡耕地浅沟虽然下切深度

有所降低, 但浅沟更易被拓宽, 坡面更易被切割, 回归分析表明, 未耕作与耕作浅沟面积分别与 RSQ ($R^2=0.627$, $P<0.05$) 和 SQ ($R^2=0.753$, $P<0.01$) 线性相关。

2.4 耕作对浅沟土壤侵蚀量的影响

浅沟土壤侵蚀量与总侵蚀量关系如图 4 所示。各次试验未耕作浅沟土壤侵蚀量为 $133.481 \sim 296.242 \text{ kg}$, 相同条件下, 耕作较未耕作浅沟侵蚀量增加 $0.91\% \sim 22.80\%$ 。两种浅沟侵蚀量均随雨强、坡度及放水流量增大而增大, 雨强相同时, 坡度越大侵蚀增量越大, 如未耕作浅沟, 1.0 mm/min 雨强时, 坡度由 15° 增至 20° , 浅沟侵蚀量增加 3.159 kg , 坡度增至 25° 时, 侵蚀增量为 33.643 kg ; 1.5 和 2.0 mm/min 雨强时则分别为 7.397 、 14.214 和 13.12 、 42.303 kg ; 坡度相同时, 雨强越大侵蚀增量亦越大。由表 3 可知, 未耕作和耕作浅沟侵蚀量与坡度均不相关 ($P>0.05$), 与雨强—流量交互作用 (RQ) 相关性均最显著, 逐步回归分析结果表明, 未耕作和耕作浅沟侵蚀量与雨强—流量交互作用均呈极显著线性关系 ($R^2=0.958$ 和 0.966 , $P<0.01$)。

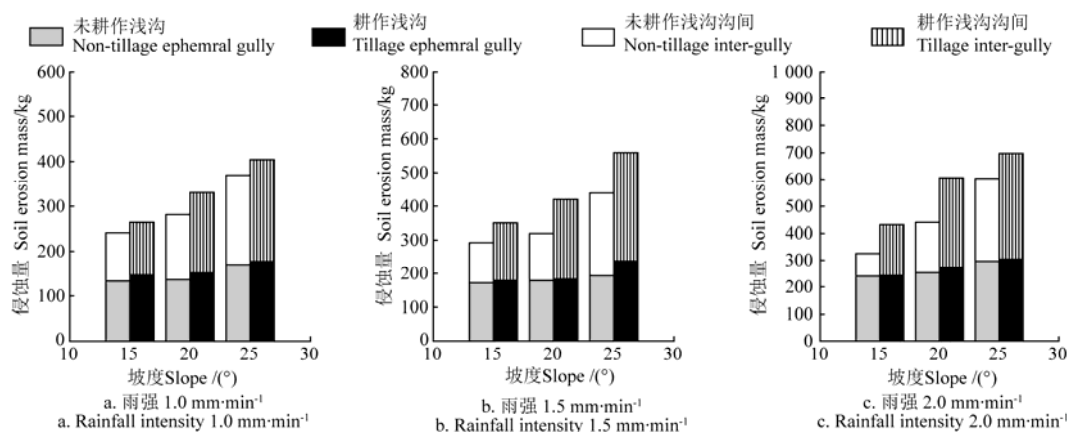


图4 耕作与未耕作浅沟土壤侵蚀量对比

Fig.4 Comparison of soil erosion mass of non-tillage and tillage ephemeral gully

未耕作和耕作浅沟土壤侵蚀量分别占总侵蚀量的 $44.09\% \sim 74.16\%$ 、 $42.44\% \sim 56.44\%$ 。整体上, 耕作浅沟侵蚀量大于未耕作, 但耕作浅沟土壤侵蚀量所占比例低于未耕作浅沟。这是由于: 虽然整体上浅沟侵蚀量和总侵蚀量均随雨强、坡度及放水流量增大而增大, 但是耕作浅沟 $0 \sim 20 \text{ cm}$ (耕作层) 土壤抗蚀性低, 随着雨强和坡度的增大, 耕作浅沟沟间土壤较未耕作浅沟更易被侵蚀, 使得浅沟土壤侵蚀量相对于总侵蚀量的比例减小。

3 讨论

黄土高原浅沟发育坡度一般较大^[4], 在强降雨发生时, 上方汇水流量较大, 尤其在耕作后的坡耕地上, 土壤疏松, 可蚀性强, 浅沟内汇集径流冲刷尤为剧烈, 使得耕作条件越来越苛刻, 土地逐渐失去耕种价值。在降雨和放水试验条件下, 未耕作和耕作浅沟水流 Re 和 Fr 均随坡度和雨强的增大而增大, 且坡度对耕作后浅沟水流的紊动性影响增强。耕作后土壤疏松易蚀, 入渗率增大, 径流阻力增强, 因此使耕作后浅沟水流紊动性减弱,

流态变缓, 沟槽阻力和糙度均增加^[30], Re 、 Fr 分别减小 $0.95\% \sim 30.77\%$ 、 $3.41\% \sim 35.66\%$, f 、 n 分别增加 $4.01\% \sim 58.82\%$ 、 $0.88\% \sim 32.79\%$ 。

土壤剥蚀率是一定条件下水流分离土壤能力的体现^[31], 剥蚀率大小在一定程度上反映径流剥离坡耕地土壤的能力。降雨是引起浅沟产沙的原始动力, 在浅沟上方汇水区域, 雨强越大汇水流量就越大, 因此入沟流量也会增大, 径流剥蚀土壤能力亦随之增强。相同条件下翻耕后的坡耕地更易引起浅沟侵蚀, 剥蚀率也会较未翻耕坡耕地高^[32], 土壤抗蚀性降低, 浅沟边界及侵蚀过程复杂多变, 且坡度越大坡面越易形成跌坎, 径流消耗在跌坎上的能耗增多, 侵蚀波动性增强^[11,33]。由于耕作后的浅沟 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤疏松, 可蚀性增强, 降雨对浅沟沟间坡面土壤的侵蚀作用强于未耕作浅沟, 因此, 相同条件下耕作浅沟土壤剥蚀率较未耕作浅沟增大 $9.48\% \sim 37.87\%$ 。相关分析也表明, 雨强对耕作后浅沟土壤剥蚀影响增强。耕作浅沟土壤剥蚀率虽然与坡度相关性不显著 ($P>0.05$), 但与雨强—坡度交互作用最相关, 说明坡度对其

影响被雨强和流量掩盖。未耕作和耕作浅沟土壤剥蚀率分别与 SQ 、 RS 线性关系最显著 ($P < 0.01$)。

浅沟的宽度、深度及面积反映了浅沟发育的形态特征。对耕作浅沟而言,一方面,土壤孔隙度大,入渗率高于未耕作浅沟,相同条件下,浅沟中径流量必然小于未耕作浅沟,这就使得耕作浅沟内径流纵向切割地形的能力低于未耕作浅沟。另一方面,0~20 cm 土层土壤抗蚀性低于未耕作浅沟,浅沟两侧坡面上因降雨产生的径流向沟道汇集时挟带泥沙量也较大,并且松散的土壤使得耕作浅沟沟壁崩塌量及拓宽能力也大于未耕作浅沟,更多泥沙进入耕作浅沟中,由于剥蚀能力有限导致泥沙沉积量也大于未耕作浅沟,暂时性沉积使耕作浅沟下切深度低于未耕作浅沟,尤其在大雨强条件下浅沟宽而浅^[33]。郑粉莉等^[3]采用连续 4 次降雨方式研究浅沟形态的发育过程,本研究浅沟发育宽度与其第 3 次降雨后的结果相似,浅沟深度则与 4 次降雨后浅沟深度相近,说明上方汇水对浅沟形态发育的重要性。在相同降雨、坡度及汇流条件下,耕作后浅沟平均拓宽速率提高 1.98%~31.79%,浅沟面积增大 0.87%~31.69%,耕作改变侵蚀下垫面对水文和侵蚀的响应模式,重塑地表形态,从而促进浅沟的不断发育,浅沟更易被拓宽,坡面更易被破坏^[22,34]。

未耕作与耕作浅沟土壤侵蚀量分别占总土壤侵蚀量的 44.09%~74.16%和 42.44%~56.44%,结果低于郑粉莉等^[3]模拟降雨条件下浅沟土壤侵蚀量所占比例,高于唐克丽等^[17]对 25°田间径流小区中浅沟侵蚀量所占比例的观测结果,这是由于田间径流小区植被的存在降低了浅沟侵蚀量^[33-34]。Casali 等^[20]对欧洲中部和美国东南部研究表明,农耕地浅沟土壤侵蚀量所占比例也低于本研究未耕作浅沟侵蚀所占比例,可能是由于土壤类型的差异引起^[22]。实际上整个坡沟系统总土壤侵蚀量来自于浅沟沟槽和沟间坡面土壤,由于耕作浅沟 0~20 cm 土层土壤抗蚀性低,在浅沟发育过程中极易发生沟壁坍塌,沟间坡面土壤侵蚀量也大于未耕作浅沟坡面,导致更多的泥沙入沟,出现暂时性沉积的频率增高,阻碍了径流下切,因此,耕作浅沟侵蚀量相对于总侵蚀量所占比例减小。浅沟的发育不仅改变了黄土高原坡耕地的地貌景观,给农耕带来不便,还使土壤侵蚀量大大增加。此外,耕作后形成宽浅的浅沟危害更大,因为侵蚀掉的是表层 20 cm 左右的耕层土壤,而这层土壤肥力高,有机质含量最高,农药残留也最大,一方面,这部分土壤的流失使得坡耕地肥力下降,逐渐失去耕种价值^[15],另一方面,在大尺度坡耕地上浅沟是径流和泥沙从农耕地输送到永久性沟道的有效环节,也会引起异地沉积和水质问题^[33,35]。

由于野外模拟降雨和放水冲刷条件的限制及室内土槽尺寸的约束,本研究无法真正的使原型以 1:1 比例尺再现,只能尽可能使土壤和降雨特性与原型相似,然而要使得室内浅沟研究结果能真正的服务于生产,日后的研究需要将室内研究结果与自然降雨条件下浅沟径流产沙及其形态发育特征进行对比和修正。

4 结 论

本文通过在室内模拟建立 (15°、20°、25°) 浅沟模型,模拟在不同降雨强度 (1.0、1.5、2.0 mm/min) 和放水流量 (7.53~23.45 L/min) 的试验条件下研究耕作处理对浅沟径流、侵蚀水动力及形态发育特征的影响,主要结论如下:

1) 试验条件下 2 种浅沟水流均为紊流,耕作使浅沟水流紊动性有所减弱,流态变缓,雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 分别减少 0.95%~30.77%、3.41%~35.66%,阻力系数 f 和糙率系数 n 则分别增加 4.01%~58.82%、0.88%~32.79%。

2) 相同条件下耕作浅沟土壤剥蚀率较未耕作浅沟增大 9.48%~37.87%。未耕作与耕作浅沟土壤剥蚀率分别与坡度—放水流量、雨强—坡度交互作用呈显著线性关系。2 种浅沟土壤剥蚀率均可用径流剪切力、径流功率及单位径流功率的线性函数描述,未耕作与耕作浅沟发生剥蚀的临界剪切力、临界功率及临界单位径流功率分别为 17.576 N/m²、5.036 W/(m²·s)、0.0381 m/s 与 10.585 N/m²、3.544 W/(m²·s)、0.0277 m/s。

3) 在相同降雨、坡度及放水流量试验条件下,除降雨强度 2.0 mm/min 和坡度 25° 试验组合外,耕作后浅沟宽度增加 1.98%~31.79%,浅沟面积增大 0.87%~31.69%,下切深度降低 2.84%~26.66%。耕作后坡耕地浅沟虽然下切深度有所降低,但浅沟更易被拓宽,坡面更易被切割。

4) 试验条件下未耕作和耕作浅沟土壤侵蚀量分别占坡面土壤总侵蚀量的 44.09%~74.16%、42.44%~56.44%。相同条件下耕作浅沟土壤侵蚀量较未耕作浅沟增加 0.91%~22.80%。未耕作与耕作浅沟侵蚀量均与雨强—流量交互作用呈显著的线性关系。

[参 考 文 献]

- [1] Cheng Hong, Wu Yongqiu, Zou Xueyong, et al. Study of ephemeral gully erosion in a small upland catchment on the Inner-Mongolian Plateau[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 90(1): 184—193.
- [2] 张科利, 唐克丽, 王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 8—13.
Zhang Keli, Tang Keli, Wang Binke. A study on characteristic value of shallow gully erosion genesis on slope farmland in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(2): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郑粉莉, 武敏, 张玉斌, 等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 438—442.
Zheng Fenli, Wu Min, Zhang Yubin, et al. Ephemeral gully development process at loess steep hillslope[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 438—442. (in Chinese with English abstract)
- [4] 秦伟, 朱清科, 赵磊磊, 等. 基于 RS 和 GIS 的黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀地形特征研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 58—64.
Qin Wei, Zhu Qingke, Zhao Leilei, et al. Topographic characteristics of ephemeral gully erosion in loess hilly and gully region based on RS and GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 58—64. (in Chinese with English abstract)

- [5] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion[J]. *Catena*, 1999, 37(2): 393—399.
- [6] Capra P P, Scicolone B. Relationships between rainfall characteristics and ephemeral gully erosion in a cultivated catchment in Sicily (Italy)[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105(1): 77—87.
- [7] Casali J, Bennett S J, Robinson K M. Processes of ephemeral gully erosion[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2000, 15(1): 31—41.
- [8] Foster G R. Modeling ephemeral gully erosion for conservation planning[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2005, 20(3): 157—175.
- [9] 李安怡, 吴秀芹, 朱清科. 陕北黄土区浅沟分布特征及其与立地类型的关系[J]. *西北农林科技大学学报*, 2010, 38(4): 79—85.
Li Anyi, Wu Xiuqin, Zhu Qinke. Distribution characteristics and relation with site type of ephemeral gully in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2010, 38(4): 79—85. (in Chinese with English abstract)
- [10] Gong Jiaguo, Jia Yangwen, Zhou Zuhao, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 203—213.
- [11] 董月群, 雷廷武, 张晴雯, 等. 集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 96—100.
Dong Yuequn, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Ephemeral gully flow velocity under concentrated water flow[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 96—100. (in Chinese with English abstract)
- [12] Nachtergaele J, Poesen J, Steegen A, et al. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils[J]. *Geomorphology*, 2001, 40(3): 237—252.
- [13] Capra L M, Scicolone M B. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy[J]. *Catena*, 2005, 59(2): 133—146.
- [14] Nachtergaele J, Poesen J, Vandekerckove L, et al. Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two Mediterranean environments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(1): 17—30.
- [15] Capra A, Scicolone B. Ephemeral gully erosion in a wheat-cultivated area in Sicily (Italy)[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 83(1): 119—126.
- [16] 龚家国, 庞金城, 贾仰文, 等. 黄土区浅沟侵蚀影响因素对其侵蚀速率影响的模拟试验研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 7—11.
Gong Jiaguo, Pang Jincheng, Jia Yangwen, et al. Experimental study on influencing factors of ephemeral gully erosion on loess slope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(1): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [17] 唐克丽, 郑世清, 席道勤, 等. 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治[J]. *水土保持通报*, 1983, 3(5): 43—48.
Tang Keli, Zheng Shiqing, Xi Daoqin, et al. Soil and water loss and control of slope farmland in Xingzihe watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1983, 3(5): 43—48. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型[J]. *地理科学*, 1984, 4(4): 321—327.
Chen Yongzong. The classification of gully in hilly loess region in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1984, 4(4): 321—327. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. *泥沙研究*, 1991(4): 39—45.
Zhang Keli. A study on the distribution of erosion and sediment yield on loess slope and the relationship between the distribution and rain characteristics[J]. *Journal of Sediment Research*, 1991(4): 39—45. (in Chinese with English abstract)
- [20] Casali J, Bennett S J, Robinson K M. Processes of ephemeral gully erosion[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2000, 15(1): 31—41.
- [21] 武敏, 郑粉莉. 浅沟侵蚀过程及预报模型研究进展[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 113—116.
Wu Min, Zheng Fenli. Research progress on ephemeral gully erosion process and its prediction model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 113—116. (in Chinese with English abstract)
- [22] 崔明, 蔡强国, 张永光, 等. 漫岗黑土区坡耕地中雨季浅沟发育机制[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 59—65.
Cui Ming, Cai Qiangguo, Zhang Yongguang, et al. Development of ephemeral gully during rainy season in the slope land in rolling-hill black-soil region of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(8): 59—65. (in Chinese with English abstract)
- [23] 姜永清, 王占礼, 胡光荣, 等. 瓦背状浅沟分布特征分析[J]. *水土保持研究*, 1999, 6(2): 181—184.
Jiang Yongqing, Wang Zhanli, Hu Guangrong, et al. Distribution features of shallow gully[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(2): 181—184. (in Chinese with English abstract)
- [24] 夏军, 乔云峰, 宋献方, 等. 岔巴沟流域不同下垫面对降雨径流关系影响规律分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(1): 70—76.
Xia Jun, Qiao Yunfeng, Song Xianfang, et al. Analysis about effect rules of underlying surface change to the relationship between rainfall and runoff in the Chabagou Catchment[J]. *Resource Science*, 2007, 29(1): 70—76. (in Chinese with English abstract)
- [25] 雷阿林, 王文龙, 唐克丽. 土壤侵蚀模拟实验的若干问题[J]. *水土保持研究*, 1998, 5(2): 127—130, 167.
Lei Alin, Wang Wenlong, Tang Keli. Several questions about simulated experiment of soil erosion[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, 5(2): 127—130, 167. (in Chinese with English abstract)
- [26] 雷阿林, 唐克丽. 土壤侵蚀模型试验中的降雨相似及其实现[J]. *科学通报*, 1995, 40(21): 2004—2006.
Lei Alin, Tang Keli. Rainfall similarity and its achievement in soil erosion model experiment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(21): 2004—2006. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 25—29.
Tian Fengxia, Liu Gang, Zheng Shiqing, et al. Influence of herbaceous plants on runoff hydraulic characteristics and sediment generation on terrene roads[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(10): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘俊娥, 王占礼, 高素娟, 等. 黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 144—149.
Liu Jun'e, Wang Zhanli, Gao Sujuan, et al. Experimental study on hydro-dynamic mechanism of sheet erosion processes on loess hillslope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(7): 144—149. (in Chinese with English abstract)
- [29] Yang C T, Song C C S. Theory of minimum rate of energy dissipation[J]. *Hydraul Div Am Soc Civ Eng*, 1979, 105(7): 769—784.
- [30] Giménez R, Govers G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 791—799.
- [31] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 145—153.
Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions[J]. *Transactions of the*

- Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 145—153. (in Chinese with English abstract)
- [32] 张永光, 伍永秋, 汪言在, 等. 典型黑土区小流域浅沟侵蚀季节差异分析[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 145—154. Zhang Yongguang, Wu Yongqiu, Wang Yanzai, et al. Seasonal discrepancy of ephemeral gully erosion in Northeast China with black soil[J]. Geographical Research, 2008, 27(1): 145—154. (in Chinese with English abstract)
- [33] 夏卫生, 雷廷武, 刘春平, 等. 降雨条件下坡面薄层水流速度特征[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 119—123. Xia Weisheng, Lei Tingwu, Liu Chunping, et al. Flow characteristics of sheet flow on slope under the condition of raining[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 119—123. (in Chinese with English abstract)
- [34] 徐建民. 黄土高原浅沟发育主要影响因素及其防治措施研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 39—41. Xu Jianmin. Influencing factors and prevention measures of ephemeral gully development in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 39—41. (in Chinese with English abstract)
- [35] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50(2/3/4): 91—133.

Effect of tillage on runoff and sediment yields and morphology development characteristic of ephemeral gully in loessial region

Guo Mingming¹, Wang Wenlong^{1,2*}, Li Jianming^{1,3}, Zhu Baocai^{1,4}, Shi Qianhua¹, Kang Hongliang¹, Li Yanfu⁵, Li Yaolin⁶

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Department of Soil and Water Conservation, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 4. Forestry College, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 5. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029; 6. Xifeng Soil and Water Conservation Experimental Station, Yellow River Conservancy Commission, Qingyang 745000, China)

Abstract: In the hill-gully area of the Loess Plateau, serious man-made soil and water loss occurs in disturbed soils of sloping farmlands formed in the process of tillage operation. Frequent farming activities cause ephemeral gullies to develop continuously on sloping farmlands. Although an ephemeral gully may be refilled and rehabilitated, new ephemeral gully may develop in the original position in next rainy season. An indoor flow scouring experiment under artificially simulated rainfall was carried out in the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, China in July 2014. The effects of tillage treatments on runoff and sediment yielding in ephemeral gully and its morphology were investigated at different rainfall intensities and slope degrees under the condition of upslope concentrated flow. Based on preliminary field investigations, 3 slope degrees of 15°, 20° and 25° were selected. Rainfall intensity was designed at 1.0, 1.5, and 2.0 mm/min. Flow discharges were 7.53 to 23.45 L/min. Plots of 8 m×1m were laid out for experiments and 3 flow sections were set up for runoff and sediment measurements. Before each test, rainfall intensity was calibrated repeatedly until the rainfall uniformity coefficient reached 85% or above. During each test, flow velocity was measured with dye tracing method and flow width and depth were measured with point gauge system. Runoff sample was taken once a minute within 3 minutes before runoff generation, and once 3 minutes after runoff generation. The results showed that: 1) Flow regimes for non-tilled and tilled ephemeral gullies were characterized by turbulent flow; Tillage could decrease Reynolds number and Froude number by 0.95%-30.77% and 3.41%-35.66%, and increase Darcy-Weisbach coefficient and Manning roughness coefficient by 4.01%-58.82% and 0.88%-32.79%, respectively; and 2) Compared to non-tilled ephemeral gully, the soil detachment rate for tilled ephemeral gully increased by 9.48%-37.87% under the experimental condition; The soil detachment rates for non-tillage and tillage ephemeral gullies were in a very significantly linear relationship with the interaction of slope and flow discharge, and the interaction of rainfall intensity and slope; It was also significantly linearly correlated with flow shear stress, stream power and unit stream power; Critical shear stress, stream power and unit stream power was 17.576 N/m², 5.036 W/(m²·s) and 0.0381 m/s, respectively for non-tillage ephemeral gully, and 10.585 N/m², 3.544 W/(m²·s) and 0.0277 m/s, respectively for tillage ephemeral gully; 3) Compared to non-tillage ephemeral gully, the eroded width and area of tilled ephemeral gully increased by 1.98%-31.79% and 0.87%-31.69%, respectively, but the incised depth was reduced by 2.84%-26.66%; 4) The soil erosion mass for ephemeral gully increased from 0.91% to 22.80% due to tillage treatment; The ratios of soil erosion mass for tillage and non-tillage ephemeral gullies to the total soil erosion mass were 44.09%-74.16% and 42.44%-56.44%, respectively. The erosion masses for non-tillage and tillage ephemeral gullies were a significantly linear function of the interaction of rainfall intensity and flow discharge. This study may provide valuable information for the construction of an ephemeral gully erosion model and the security and protection of agricultural eco-environment.

Key words: cultivation; runoff; sediments; Loessial region; sloping farmland; ephemeral gully; morphological characteristic