

自然降雨雨型变化对坡面细沟间侵蚀的影响

伍林^{1,2,3}, 张风宝^{1,2,4}, 申楠^{1,4}, 李玄添^{1,4}, 刘颖^{1,4}, 何琪琳^{1,2,3}, 杨明义^{1,2,4}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过野外微小区原位观测试验, 基于降雨过程中降雨的集中时段对 2017—2021 年 34 次侵蚀性降雨雨型进行划分, 系统分析雨型变化对黄土坡面细沟间侵蚀的影响及坡度效应。结果表明: 研究区以前期型降雨为主, 占总场次的 52%, 中期型和后期型降雨各占 24%。中期型降雨对总产流量的贡献 ($25.56\% \pm 3.83\%$) 显著低于前期型 ($36.70\% \pm 2.07\%$) 和后期型 ($37.74\% \pm 4.01\%$) ($p < 0.05$)。不同雨型场均径流量依次为后期型 > 中期型 > 前期型, 后期型和中期型降雨显著高于前期型。而降雨的场均产沙量则表现为后期型 > 前期型 > 中期型, 且后期型降雨显著高于中期型 ($p < 0.05$)。雨型对细沟间侵蚀影响的坡度效应变化不明显, 但随着坡度增大, 后期型降雨的场均径流量和产沙量均大于前期型和中期型, 说明后期型降雨的产流产沙对坡度变化相对较为敏感。次降雨径流量、坡度和降雨参数组合与次降雨产沙非线性拟合中, 方程决定系数后期型 ($0.939 \sim 0.942$) > 中期型 ($0.776 \sim 0.845$) > 前期型 ($0.220 \sim 0.537$), 说明区分雨型模拟可提高模拟精度。

关键词: 微小区; 雨型; 细沟间侵蚀; 黄土坡面; 坡度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0031-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.005

Influence of Natural Rainfall Pattern Variation on Interrill Erosion

WU Lin^{1,2,3}, ZHANG Fengbao^{1,2,4}, SHEN Nan^{1,4}, LI Xuantian^{1,4},

LIU Ying^{1,4}, HE Qilin^{1,2,3}, YANG Mingyi^{1,2,4}

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Through in situ observation experiment in the field micro-plots, the 34 erosive rainfall patterns from 2017—2021 were classified based on the concentrated periods of rainfall during the rainfall process, and the effects of rainfall pattern variation on the interrill erosion on loess slopes and slope effects were systematically analyzed. The results showed that the advanced rainfall pattern was dominant, accounting for 52% of the total rainfall, while the intermediate rainfall pattern and delayed rainfall pattern each accounted for 24%. The contribution of intermediate rainfall pattern to total runoff yield ($25.56\% \pm 3.83\%$) was significantly lower than that of the advanced rainfall pattern ($36.70\% \pm 2.07\%$) and delayed rainfall pattern ($37.74\% \pm 4.01\%$) ($p < 0.05$). The average runoff yield of different rainfall patterns was in the order of delayed rainfall pattern > intermediate rainfall pattern > the advanced rainfall pattern, and the delayed rainfall pattern and intermediate rainfall pattern was significantly higher than that of advanced rainfall pattern. The average sediment yield of different rainfall patterns was in the order of delayed rainfall pattern > advanced rainfall pattern > intermediate rainfall pattern. The rainfall of the delayed rainfall pattern was significantly higher than that of the intermediate rainfall pattern ($p < 0.05$). The variation of slope effect of rainfall pattern on the effect of interrill erosion is not obvious, but with the increase of slope, the average runoff and sediment yield of delayed rainfall pattern were larger than that of advanced and intermediate rainfall pattern, indicating

收稿日期: 2022-11-11

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42177338, 41877080, 41830758); 陕西省林科院黄土高原生态修复创新团队项目 (SXLK2020-03-02)

第一作者: 伍林 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事坡面土壤侵蚀过程研究。E-mail: wulin20@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 张风宝 (1980—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事坡面土壤侵蚀过程及其环境效应研究。E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

that the sediment yield of delayed rainfall pattern was relatively sensitive to the variation of slope. In the nonlinear fitting models of runoff, slope and rainfall parameter combination and sediment yield, the equation decision coefficients were delayed rainfall pattern ($0.939 \sim 0.942$) > the intermediate rainfall pattern ($0.776 \sim 0.845$) > the advanced rainfall pattern ($0.220 \sim 0.537$), indicating that the classification of rainfall pattern could improve model simulation accuracy.

Keywords: micro-plots; rainfall patterns; interrill erosion; loess slope; slope gradient

细沟间侵蚀是坡面土壤侵蚀的主要形式,雨滴击溅分离和雨滴扰动薄层水流输移是细沟间侵蚀的主要过程^[1-2]。雨滴击溅一方面分离土壤颗粒,另一方面显著增强坡面薄层水流的输移能力,而这种增强作用与降雨特性和坡度密切相关。因此,降雨特性和坡度决定裸露坡面细沟间侵蚀过程^[3]。然而,目前对细沟间侵蚀的研究,大多以室内微小区恒定雨强的模拟降雨试验为主,主要分析不同雨强下的细沟间侵蚀特征^[4-5],但在实际自然降雨过程中雨强变化模式多样,与模拟降雨差别很大,模拟降雨试验可能牺牲一些重要信息,曲解涉及的产流产沙机制,结果难以真实反映自然降雨条件下的细沟间侵蚀。因此,有必要开展野外自然降雨条件下坡面细沟间侵蚀特征及对坡度、植被等响应的相关研究,以深化对细沟间侵蚀的认识,提高坡面土壤侵蚀的预测预报能力。

自然降雨条件下,降雨侵蚀力(R)是反映降雨与土壤侵蚀关系的常用参数^[6]。但降雨侵蚀力没有考虑降雨过程中雨型(次降雨过程中雨强组合和时间分布)的作用,而相关研究^[7-8]显示,雨型对产流产沙及泥沙颗粒组成等有显著影响。为揭示雨型对产流产沙等的影响,研究者首先开始基于室内模拟雨型的试验,Alavinia 等^[2]研究发现,室内模拟不同雨型和降雨阶段的细沟间侵蚀量差异显著。野外小区监测的研究^[7]也表明,利用不同的雨型分类方法发现自然降雨条件下不同雨型之间小区产流产沙存在显著差异;Wang 等^[9]研究发现,后期型雨型单位降雨侵蚀力的产沙量高于前期型、中期型和均匀型。以上研究说明,即使降雨量相同或相似,由于雨型不同,土壤侵蚀特征也存在很大差异^[10]。通过在雨型中量化可变降雨强度的影响,可以提高对坡面产流和土壤流失的理解和预测^[11]。

目前,雨型对产流产沙影响的研究多以室内模拟为主,而野外原位观测小区试验主要考虑不同覆盖条件下(草本、灌木及林地)产流产沙对雨型的响应,研究过程中坡面尺度较大,坡面侵蚀类型既包括细沟间侵蚀,也包括细沟侵蚀,单独针对细沟间侵蚀对雨型响应的野外原位观测研究还鲜有报道。此外,坡度作为影响坡面细沟间侵蚀的主要地形因子,在不同雨型下的作用和贡献也可能存在差异。鉴于此,本研究对我国土壤侵蚀最为严重的黄土高原坡面的细沟间侵

蚀为研究对象,基于野外微小区原位观测自然降雨试验,通过对 2017—2021 年的 34 次侵蚀性降雨进行雨型划分,研究了不同雨型对裸露黄土坡面细沟间侵蚀的影响及其坡度效应,分析不同雨型下降雨特征参数与产流产沙的关系,进一步细化自然降雨条件下坡面细沟间侵蚀特征,以期深入揭示降雨对黄土坡面细沟间侵蚀的影响机制,为坡面细沟间侵蚀防治、模型优化、预测预报提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院水土保持研究所安塞水土保持综合试验站开展。试验站位于黄土高原中部,陕西省延安市安塞区境内,属于典型的黄土高原丘陵沟壑区($108^{\circ}51'44''$ — $109^{\circ}26'18''$ E, $36^{\circ}30'45''$ — $37^{\circ}19'31''$ N),土壤类型为黄绵土,土壤质地为粉砂壤土,土壤有机质含量低,结构疏松,土性绵软,可蚀性强。地形地貌复杂多样,地势由西北向东南倾斜,属温带大陆性半干旱季风气候,年均气温 8.8°C ,多年平均降水量 505.3 mm ,降雨年内分配不均,主要集中在 7—9 月,占全年降水的 61.10% ^[8,12-13]。土壤全碳含量 16.97 g/kg ,全氮含量 0.47 g/kg ,全磷含量 0.56 g/kg ,土壤颗粒组成黏粒含量 10.55% ,粉粒含量 69.83% ,砂粒含量 19.62% ,pH 为 8.46 。

本研究布设 1 m 长, 0.6 m 宽的微型小区(微小区尺寸是根据 WEPP 模型用微径流小区研究细沟间侵蚀的方法进行设计,结合多年野外观测试验,可确保无侵蚀沟发生)15 个,包括 5 个坡度(2° , 5° , 10° , 15° , 22°),每个坡度下设置 3 个重复。小区由铁皮围成,在径流出口处连接 1 根硬度较大的粗管,管的末端连接径流桶,其容积足够大以确保可收集最强次降雨的全部径流泥沙。本研究是野外自然降雨原位观测试验,于 2017—2021 年每年的 6—10 月连续进行 5 年的观测。

1.2 数据收集

微小区采用体积为 20 L (M_1, g)进行径流和泥沙的收集。每次降雨后,称取径流桶内径流和泥沙的总重(W_1, g),随后搅匀径流桶内的径流泥沙,用 2.5 L 白色塑料瓶(M_2, g)取搅匀的径流泥沙,然后对白色塑料瓶称重(W_2, g),静置 24 h 后倒去上层清

液,将剩余的径流泥沙转移到宽口不锈钢容器中,晾干后称重得到白色塑料瓶中的泥沙质量(W_3, g)。每次降雨的土壤流失量(D_w, g)及径流量(R_f, g)计算公式为:

$$D_w = \frac{W_3 * (W_1 - M_1)}{W_2 - M_2} \quad (1)$$

$$R_f = W_1 - M_1 - D_w \quad (2)$$

1.3 数据处理

1.3.1 降雨雨型划分 降雨资料由中国科学院水土保持研究所安塞水土保持综合试验站提供,包括每场降雨的降雨量(P, mm)、最大 30 min 降雨强度($I_{30}, mm/h$)、降雨历时(min)指标、降雨动能($E, MJ/hm^2$)、降雨侵蚀力 $[EI_{30}, (MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)]$ 等降雨参数。2017—2021 年降雨微小区收集到有 34

次侵蚀性降雨的径流泥沙。本研究对 34 场侵蚀性降雨的雨型划分方法采用的是 Wang 等^[9]提出的根据降雨过程中降雨的集中时段进行划分,具体划分步骤:(1)瞬时降雨量和持续时间分别除以总降雨量和总持续时间,使其无量纲化;(2)无量纲化降雨量和持续时间逐渐累积,直到达到值 1;(3)将无量纲持续时间划分为 3 个相等的时间段,计算每个时间段的累计降雨量;(4)根据最大积累降雨量($>40\%$)位置确定雨型, $>40\%$ 的降雨集中的前 1/3 时段为前期型雨型,集中在 1/3~2/3 时段为中期型雨型,集中在后 1/3 时段为后期型雨型,在整个降雨过程中基本均匀无明显峰值的为均匀型。根据上述方法进行划分,本研究的 34 场侵蚀性降雨雨型包括前期型雨型、中期型雨型和后期型雨型(图 1),没有均匀型雨型。

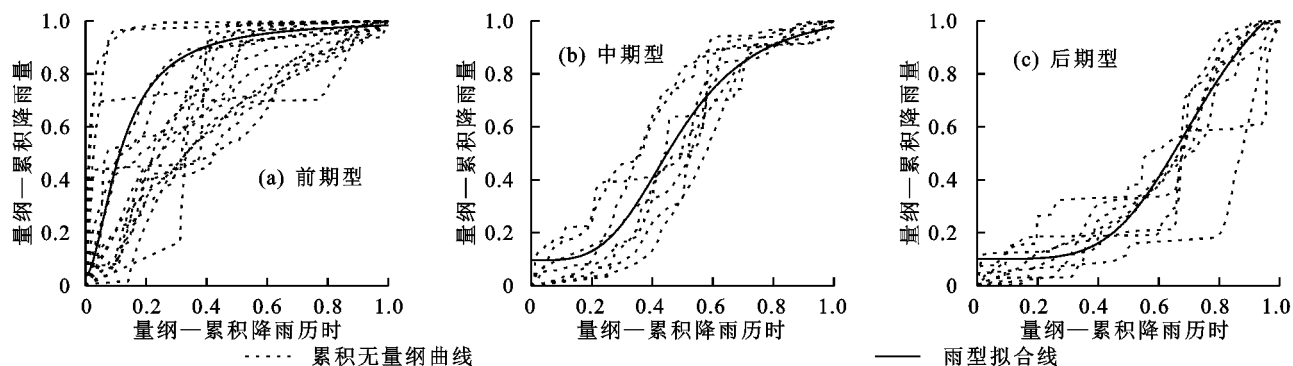


图 1 各雨型降雨的累积无量纲曲线和雨型拟合线

1.3.2 土壤样品测定方法 土壤中全碳(TC)、全氮(TN)使用元素分析仪(Vario EL III 型)测定^[14];全磷使用 $HClO_4-H_2SO_4$ 法^[15] 消煮后,分光光度计(UV-2450)测定;土壤 pH 用 pH 计测定^[16];土壤颗粒组成采用激光粒度分析仪(Microtrac S3500)测定^[17]。

1.3.3 数据处理 不同雨型数据的无量纲化借助 Excel 2019 软件进行计算。不同雨型和坡度下的径流量及侵蚀量分析在 IBM SPSS Statistics 19 软件中完成,使用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 降雨雨型基本特征

本研究中 2017—2021 年的 34 场侵蚀性降雨主要以前期型雨型为主,共计 18 场,占总场次的 52%,中期型和后期型雨型各为 8 场(表 1)。不同雨型降雨特征参数见表 1。中期型降雨的次降雨降雨历时、降雨量和降雨侵蚀力(EI_{30})显著高于前期型和后期型,次降雨平均雨强、 I_{30} 与后期型基本接近,但显著低于前期型($p < 0.05$)。前期型降雨历时和平均雨强的变异性高于后期型和中期型;中期型 EI_{30} 变异性最大,变异系数为 1.67,而次降雨平均雨强的变异性最低;后期型次降雨历时和降雨量的变异性均低于前

期型和中期型。前期型降雨中平均 $62\% \pm 14\%$ 的降雨集中在前 1/3 时段,中期型降雨中平均 $58\% \pm 12\%$ 的降雨集中在第 2 个 1/3 时段,后期型降雨中平均 $58\% \pm 11\%$ 的降雨集中在第 3 个 1/3 时段。

2.2 雨型对黄土坡面细沟间侵蚀的影响

2017—2021 年 34 场侵蚀降雨在坡面的总产流量为 292.8 mm,前期型和后期型对总产流量的贡献比较接近,分别为 $36.70\% \pm 2.07\%$, $37.74\% \pm 4.01\%$,显著高于中期型降雨($25.56\% \pm 3.83\%$) ($p < 0.05$);34 场降雨总侵蚀量为 $74.41 t/hm^2$,各雨型对总产沙量的贡献为前期型($50.71\% \pm 4.68\%$) $>$ 后期型($33.86\% \pm 4.32\%$) $>$ 中期型($15.42\% \pm 1.87\%$)。不同雨型场均产流产沙量也存在差异(图 2),前期型降雨场平均产流量 $[(5.17 \pm 4.57) mm]$ 显著小于中期型 $[(8.62 \pm 10.47) mm]$ 和后期型 $[(11.38 \pm 10.79) mm]$ ($p < 0.05$),中期型低于后期型,但差异不显著($p > 0.05$);与场均产流量不同,场均侵蚀量前期型 $[(1.19 \pm 1.41) t/hm^2]$ 高于中期型 $[(0.83 \pm 1.03) t/hm^2]$ 而低于后期型 $[(1.62 \pm 1.43) t/hm^2]$,但差异不显著($p > 0.05$),而后期型显著高于中期型。次降雨产流量与产沙量相关系数前期型较低(0.205),中期型(0.819)和后期型(0.874)较高,且呈显著相关($p < 0.05$)。

表 1 2017—2021 年 34 场侵蚀性降雨资料下各类雨型的统计特征

降雨类型	变量	最大值	最小值	平均值±标准差	变异系数	总和	场次
前期型	降雨历时/min	3736.00	48.00	897.04±1067.01	1.19	78042	18
	降雨量/mm	141.60	5.80	36.71±35.69	0.97	3193.80	
	平均雨强/(mm·h ⁻¹)	17.00	0.80	4.69±4.89	1.04	407.84	
	I_{30} /(mm·h ⁻¹)	50.80	4.60	19.72±12.45	0.63	1715.35	
	EI_{30} /(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	417.82	6.52	141.81±129.72	0.91	12337.80	
中期型	降雨历时/min	3454.00	179.00	1547.51±1042.20	0.67	57258	8
	降雨量/mm	190.40	9.40	59.08±56.32	0.95	2186	
	平均雨强/(mm·h ⁻¹)	5.40	1.10	2.44±1.21	0.50	90.28	
	I_{30} /(mm·h ⁻¹)	40.00	2.93	17.14±13.97	0.81	634.45	
	EI_{30} /(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	1627.78	4.02	327.81±547.62	1.67	12128.80	
后期型	降雨历时/min	1731.00	697.00	1067.63±362.74	0.34	42705	8
	降雨量/mm	88.20	8.80	39.00±25.84	0.66	1560	
	平均雨强/(mm·h ⁻¹)	6.00	0.40	2.36±1.68	0.71	94.52	
	I_{30} /(mm·h ⁻¹)	32.40	2.63	17.10±11.36	0.66	684.15	
	EI_{30} /(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	616.22	2.55	169.05±190.53	1.13	6761.97	

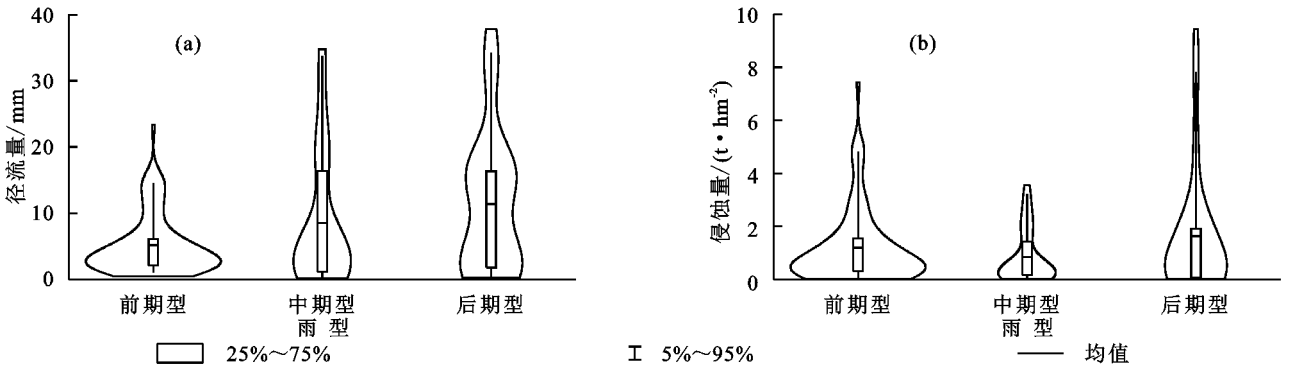


图 2 不同雨型下的细沟间侵蚀特征

在不同雨型下,微小区次降雨产流产沙之间与降雨参数之间的相关性存在明显差异(表 2)。前期降雨型产流产沙之间无显著相关性,而中期型降雨和后期型降雨产流产沙呈显著正相关,相关系数超过 0.80。前期型降雨参数与径流量的相关性比中期型和后期型降雨与产流量的相关性小;中期型降雨参数除平均雨强外与产流量均呈显著正相关($p<0.05$),相关系数较高(0.634~0.893),且高于后期型降雨(除平均雨强和降雨动能外)。不同雨型下降雨参数与产沙的关系比较复杂,前期型降

雨中产沙量与降雨量(-0.326)和降雨历时(-0.399)呈显著负相关($p<0.05$),与平均雨强相关系数最高(0.490, $p<0.05$),与 EI_{30} 相关性不显著($p>0.05$);除降雨历时与 I_{30} 外,后期型降雨参数与侵蚀量的相关系数为 0.627~0.753,高于中期型降雨,中期型降雨 I_{30} (0.708)与侵蚀量相关性高于前期型雨型(0.332)和后期型雨型(0.460)。对于全部降雨来说,次降雨 EI_{30} 与径流量相关系数最大(0.678), I_{30} 与侵蚀量相关系数最大(0.401),且均显著相关($p<0.05$)。

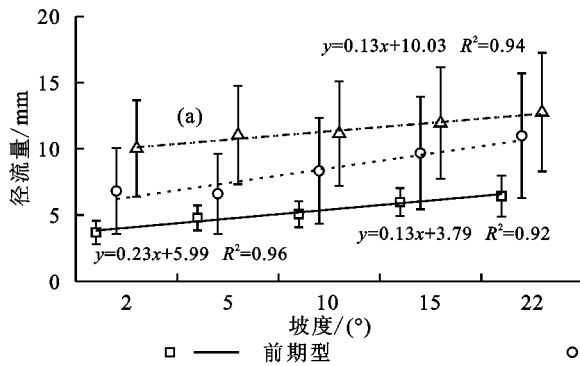
表 2 微小区次降雨产流产沙之间与降雨参数之间的相关性

变量	雨型	径流量	侵蚀量	降雨量	降雨历时	平均雨强	I_{30}	E	EI_{30}
径流量	全部	1.000	0.603 **	0.521 **	0.258 **	0.031	0.508 **	0.625 **	0.678 **
	前期型	1.000	0.205	0.082	-0.038	0.019	0.393 **	0.154	0.378 **
	中期型	1.000	0.819 **	0.819 **	0.634 **	0.290	0.893 **	0.840 **	0.870 **
	后期型	1.000	0.874 **	0.799 **	0.345 *	0.643 **	0.542 **	0.853 **	0.811 **
	全部	0.603 **	1.000	0.085	-0.151	0.377 **	0.401 **	0.195 *	0.274 **
侵蚀量	前期型	0.205	1.000	-0.326 **	-0.399 **	0.490 **	0.332 **	-0.250 *	0.041
	中期型	0.819 **	1.000	0.464 **	0.382 *	0.132	0.708 **	0.482 **	0.518 **
	后期型	0.874 **	1.000	0.699 **	0.142	0.627 **	0.460 **	0.753 **	0.740 **
	全部	0.603 **	0.205	0.085	-0.151	0.377 **	0.401 **	0.195 *	0.274 **

注: * 表示相关性水平为 $p<0.05$; ** 表示相关性水平为 $p<0.01$ 。

2.3 雨型对细沟间侵蚀影响的坡度效应

微小区次降雨径流量和侵蚀量整体随坡度的增大而增加,但不同雨型对产流产沙量的响应存在差异(图3和图4)。同一坡度下,前期型、中期型和后期型的场均径流量依次增大,侵蚀量却表现为后期型最大,中期型最小。不同雨型下产流产沙对坡度变化的敏感不同,中期型随坡度增加其产流增加速率快于前期型和后期型,而其产沙的增加速率小于前期型和后期型。



期型和后期型,前期型和后期型产流产沙随坡度增加的速率基本一致。随坡度增加,前期型对总产流量和中期型对总产沙量的贡献无明显趋势性变化,中期型对总产流量和前期型对总产沙量的贡献呈增加趋势,后期型对总产流量和前期型对总产沙量的贡献呈减少趋势,但整体上同一雨型不同坡度贡献率的变异性相对较小,变异系数为0.06~0.15,平均值为 0.11 ± 0.03 。

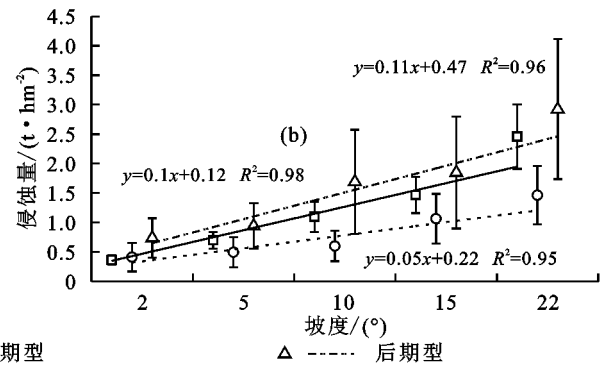


图3 不同雨型及坡度对细沟间侵蚀的综合影响

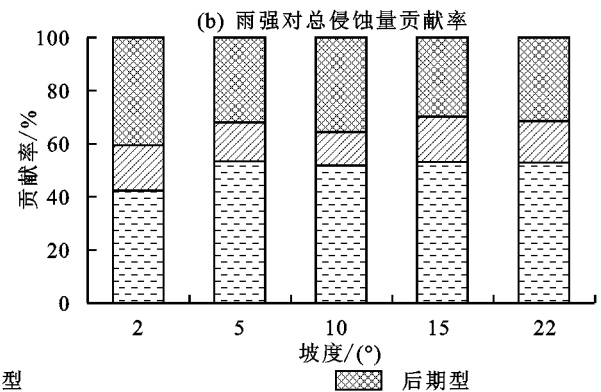
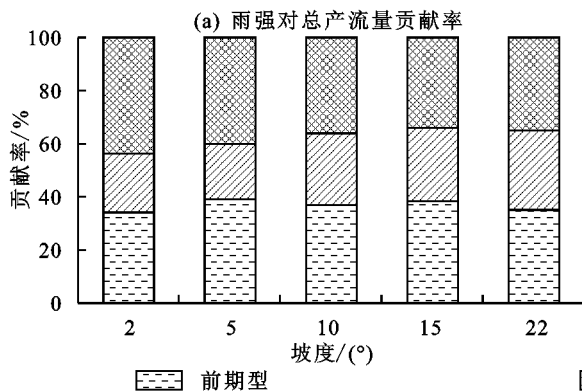


图4 同一雨强在不同坡度下对总产流量和总侵蚀量的贡献

2.4 自然降雨条件下细沟间侵蚀产沙的模拟

根据分析,基于WEPP模型中细沟间侵蚀产沙计算模型的构建思路,构建了自然降雨不同雨型细沟间侵蚀产沙的模拟模型(表3)。全部34场侵蚀降雨和前期型降雨中,次降雨产流量(R)和雨强(I)较好地刻画细沟间侵蚀产沙,拟合方程的决定系数分别为0.673,0.573,其余组合拟合方程的决定系数都小于0.5。中期型和后期型次降雨产流量与降雨量、雨强、 I_{10} 、 I_{30} 、 E_{60} 及降雨侵蚀力(EI_{30})都能较好地刻画次降雨产沙,其中后期型拟合方程决定系数(0.939~0.942)总体高于中期型(0.776~0.845),中期型降雨中产流量与降雨量组合的决定系数最高,而后期型降雨中产流量与降雨各参数组合的决定系数相差很小。将中期型和后期型数据作为一类进行拟合,产流量与各降雨因子组合拟合方程决定系数为0.761~0.844。以上结果说明,野外自然降雨下细沟间侵蚀模拟如果考虑对雨型进行分类,则能获得较好的模拟结果(图5),建议在自然降雨条件下细沟间侵蚀产沙利用产流

量与雨强组合的拟合方程。

3 讨论

野外自然降雨过程变化复杂,在美国通用土壤流失方程中没有考虑雨型,主要是由于通用土壤流失方程以计算多年平均侵蚀为主,雨型的影响不会引起大的偏差^[18-19],而对于次降雨侵蚀,雨型的影响不容忽视^[20]。本研究中野外自然降雨以前期型降雨的场次最多,占比为52%,这与殷水清等^[21]在全国范围(47.1%)和Wang等^[9]在北京地区(43%)的研究结果一致。前期型降雨因降雨次数多,其侵蚀量占总侵蚀量比例大。就单次降雨的侵蚀量而言,中期型降雨最小,后期型降雨最大,前期型降雨处于中间,该结果与以往大多数研究^[22]结果一致。尽管经历相似大小的降雨量,当降雨强度序列不同时,泥沙与径流状况也发生变化。一方面,随着降雨历时的延长,土壤变得越来越饱和,土壤团聚体稳定性逐渐减弱,土壤抗侵蚀能力降低^[23],且随着土壤逐渐饱和和开始产生径流后,土壤颗粒从受单一的雨滴打击作用转

化为雨滴打击与径流输移共同作用,导致更易从母体中分离;另一方面,前期降雨使坡面土壤趋近饱和,坡面入渗减少,产流量明显增大,径流搬运能力增强,导致后期型降雨更容易产生严重的土壤侵蚀,这与本研究中后期型降雨单次产流量最大一致。前期型降雨场均径流量小于中期型降雨,但其场均侵蚀量却高于中期型而低于后期型降雨。主要原因可能是前期型降雨属于突发性 $[(62\% \pm 14\%)]$ 的降雨集中在前 1/3 时段,由于含水量的不同使得相对干燥的地表在突发性降雨下土壤颗粒更易被分散,也难以快速形成结皮,导致入渗和侵蚀量都较大;而中期型降雨在较大雨强之前,已经有一定的累积降雨,地表可能形成了物理结皮,而结皮有利于增大径流量,减少侵蚀量^[24-25];后期型降雨与中期型雨型相比,在前 2/3 时段内已约有 40% 的降雨积累,尽管也已形成了物理结皮,但表层土壤含水趋于饱和,内聚力减小,在雨强突然增大时,易产生更多径流和发生较强的侵蚀,导致后期型降雨的产流量和侵蚀量均高于前期型和中期型^[26]。雨型变化可导致坡面结皮形成、降雨入渗、侵蚀界面层土壤水分含量、可蚀性等发生一系列复杂变化,而这些变化最终导致在不同雨型下不同降雨阶段产流产沙变化的影响因子存在差异,导致不同雨型下次降雨产流产沙的差异。本研究尽管针对的是细沟间侵蚀,但从结果来看,雨型对微小区土壤侵蚀的影响与在较大尺度上土壤侵蚀的影响基本一致。

本研究中微小区坡度对产流产沙的影响与以往研究^[27-30]基本一致,坡度增加,径流量和侵蚀量也随之增加。已有研究^[31]发现,中期型降雨对产流较为敏感,而对产沙的敏感性低于前期型和后期型降雨,主要原因可能与中期型降雨下坡面物理结皮的作用较强有关,物理结皮能够导致产流增加,侵蚀减少。在非线性拟合过程中发现,美国 WEPP 模型中细沟间侵蚀模型的坡度因子 $S_f[S_f=1.05-0.85\exp-4\sin\theta]$ 。式中: θ 为坡度($^\circ$)]在本研究中也能够较好地表达在不同雨型下坡度对

侵蚀量的影响^[32],同一雨型在不同坡度下对总产流产沙贡献的变异性相对较小,说明整体上雨型对产流产沙影响的坡度效应并不是很明显。

表 3 不同雨型条件下细沟间侵蚀产沙的经验公式

雨型	拟合方程	决定系数(R^2)
全部降雨	$D_i=0.791S_fR^{0.796}P^{-0.17}$	0.473
	$D_i=0.276S_fR^{0.642}I_{10}^{0.636}$	0.673
	$D_i=0.282S_fR^{0.572}I_{10}^{0.272}$	0.489
	$D_i=0.288S_fR^{0.531}I_{30}^{0.339}$	0.491
	$D_i=0.589S_fR^{0.541}E_{60}^{0.259}$	0.491
	$D_i=0.505S_fR^{0.628}EI_{30}^{0.048}$	0.459
	$D_i=4.163S_fR^{0.300}P^{-0.352}$	0.312
前期型	$D_i=0.483S_fR^{0.303}I_{10}^{0.680}$	0.573
	$D_i=0.429S_fR^{0.139}I_{10}^{0.399}$	0.314
	$D_i=0.365S_fR^{0.035}I_{30}^{0.592}$	0.336
	$D_i=1.345S_fR^{0.064}E_{60}^{0.429}$	0.291
	$D_i=1.570S_fR^{0.028}EI_{30}^{0.032}$	0.220
	$D_i=1.361S_fR^{1.091}P^{-0.562}$	0.845
	$D_i=0.354S_fR^{0.994}I^{-0.931}$	0.810
中期型	$D_i=0.067S_fR^{0.301}I_{10}^{0.734}$	0.822
	$D_i=0.261S_fR^{0.559}I_{30}^{0.199}$	0.776
	$D_i=0.370S_fR^{0.670}E_{60}^{0.060}$	0.772
	$D_i=0.412S_fR^{0.969}EI_{30}^{-0.160}$	0.789
	$D_i=0.053S_fR^{1.313}P^{0.140}$	0.940
	$D_i=0.108S_fR^{1.207}I_{10}^{0.163}$	0.942
	$D_i=0.079S_fR^{1.496}I_{10}^{-0.115}$	0.940
后期型	$D_i=0.053S_fR^{1.382}I_{30}^{0.091}$	0.939
	$D_i=0.087S_fR^{1.217}E_{60}^{0.285}$	0.942
	$D_i=0.063S_fR^{1.192}EI_{30}^{0.137}$	0.940
	$D_i=0.116S_fR^{2.338}P^{-0.877}$	0.844
	$D_i=0.180S_fR^{0.783}I_{10}^{0.653}$	0.804
	$D_i=0.260S_fR^{1.397}I_{10}^{-0.416}$	0.758
	$D_i=0.188S_fR^{1.557}I_{30}^{-0.524}$	0.761
后期型和中期型	$D_i=0.080S_fR^{1.459}E_{60}^{-0.368}$	0.772
	$D_i=0.046S_fR^{2.404}EI_{30}^{-0.505}$	0.829

注: D_i 为细沟间侵蚀率 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$; S_f 为坡度因子。

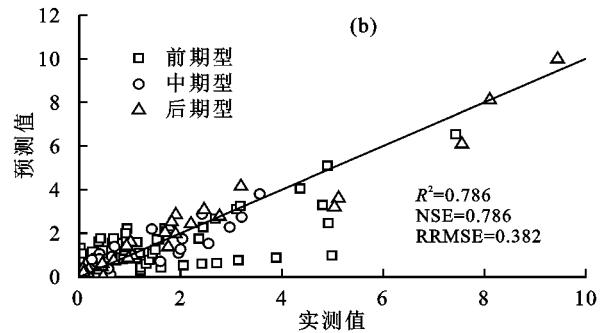
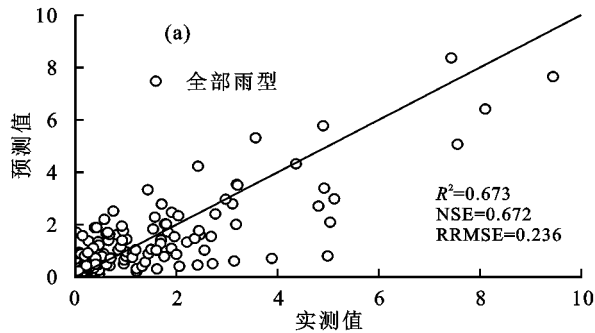


图 5 细沟间侵蚀产沙实测值与预测值比较

细沟间侵蚀作为坡面土壤侵蚀的主要形式,对其进行预测预报是坡面土壤侵蚀预测预报的主要组成部分,能深化对坡面侵蚀机理的认识。在美国通用流失方程(USLE)中,没有单独考虑细沟间侵蚀,但在

坡长因子的计算中,考虑了细沟侵蚀与细沟间侵蚀比这一参数,认为在较低坡度和较短坡长下只发生细沟间侵蚀,在预报过程中降雨因子是降雨侵蚀力(EI_{30})^[19]。在美国 WEPP 模型最新版中,同类土壤

坡面细沟间侵蚀模型考虑了坡度、径流和雨强,而 WEPP 模型中细沟间侵蚀计算模型是基于恒定雨强的模拟降雨数据构建的^[32]。本研究基于 WEPP 模型中细沟间侵蚀计算公式的形式发现,不同雨型下用于细沟间侵蚀估算公式的降雨特征参数存在差异,各降雨参数对后期型雨型的拟合效果最好,对前期型雨型的拟合效果最差。在中期型和后期型雨型中降雨特征参数对拟合效果的影响较小,坡度和径流量对细沟间侵蚀变化的解释度超过 75%。综合对比显示,次降雨平均雨强作为降雨特征参数(表 3)在拟合自然降雨条件下细沟间侵蚀时的效果较优,这与 WEPP 模型在实际应用中利用自然降雨的有效雨强作为降雨参数一致^[33],但有效雨强在实际中难以监测计算,只能利用水文过程的模拟来计算,因此建议自然降雨条件下细沟间侵蚀产沙模拟中降雨参数采用次降雨平均雨强。

4 结论

本研究基于野外微小区原位观测试验,分析了细沟间侵蚀对自然降雨雨型变化的响应。研究区降雨雨型以前期型降雨为主,前期型和后期型降雨对总产流量的贡献接近,且显著高于后期型;各雨型对总产沙量的贡献呈前期型>后期型>中期型,且前期型贡献超过 50%;中期型和后期型的次降雨产流量和产沙量显著相关,前期型的相关不显著。雨型对细沟间次降雨产流量和产沙量影响的坡度效应敏感程度不同,中期型降雨对产流较为敏感,而对产沙的敏感性低于前期型和后期型降雨,但整体上同一雨型在不同坡度下对总产流产沙贡献的变异性相对较小。基于 WEPP 模型构建的不同雨型下细沟间侵蚀产沙的模型表明,分雨型比不分雨型的拟合效果更好,且产流量(R)与雨强(I)组合的拟合效果比与其他降雨特征参数组合拟合效果更优。

参考文献:

- [1] Zhang X C. Determining and modeling dominant processes of interrill soil erosion[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(1): 4-20.
- [2] Alavinia M, Saleh F N, Asadi H. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2019, 34(3): 270-278.
- [3] Zhang Q W, Wang Z L, Guo Q, et al. Plot-based experimental study of raindrop detachment, interrill wash and erosion-limiting degree on a clayey loessal soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 1280-1287.
- [4] Zhang Q W, Wang Z L, Wu B, et al. Identifying sediment transport capacity of raindrop-impacted overland flow within transport-limited system of interrill erosion processes on steep loess hillslopes of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 109-117.
- [5] Vaezi A R, Eslami S F, Keesstra S. Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls[J]. *Catena*, 2018, 167: 385-398.
- [6] Nearing M A, Yin S Q, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity: An historical review[J]. *Catena*, 2017, 157: 357-362.
- [7] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. Combined effects of rainfall regime and plot length on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2019, 109(3/4): 397-406.
- [8] 郭凯,李玄添,张凤宝,等.雨型和坡长对侵蚀泥沙粒径特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 50-57, 66.
- [9] Wang W T, Yin S Q, Xie Y, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall[J]. *Catena*, 2016, 141: 56-65.
- [10] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等.雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(9): 1084-1091.
- [11] 陈晓鹏,周蓓蓓,陶汪海,等.变雨强对黄土坡地水土养分流失机制研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 33-37.
- [12] 任瑞雪,张凤宝,杨明义,等.坡面侵蚀过程中泥沙有机碳流失特征分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 15-19.
- [13] 李元元.生物炭添加对黄绵土坡面土壤侵蚀的影响及机制研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
- [14] Dhaliwal G S, Gupta N, Kukal S S, et al. Standardization of automated vario EL III CHNS analyzer for total carbon and nitrogen determination in soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(8): 971-979.
- [15] 卜晓燕,米文宝,许浩,等.宁夏平原不同类型湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征[J]. *浙江大学学报*, 2016, 42(1): 107-118.
- [16] 司海丽,纪立东,刘菊莲,等.有机肥施用量对玉米产量、土壤养分及生物活性的影响[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(4): 740-747.
- [17] 刘涛,高晓飞.激光粒度仪与沉降-吸管法测定褐土颗粒组成的比较[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 16-18, 22.
- [18] Nikolaos E, Evdokia L, Emmanouil P. Inherent relationship of the USLE, RUSLE topographic factor algorithms and its impact on soil erosion modelling[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2020, 65(11): 1879-1893.
- [19] Boglarka K, Csaba C, Alexandra S J, et al. Comparison of the applicability of different soil erosion models to predict soil erodibility factor and event soil losses on loess slopes in Hungary[J]. *Water*, 2021, 13(24): e3517.
- [20] Mohamadi M A, Kaviani A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 273-281.

- 36(10):2063-2070.
- [23] 周旋, 吴良欢, 董春华, 等. 氮肥配施生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素淋溶特征的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(5):1804-1814.
- [24] 李学红, 李东坡, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂在黑土和褐土中对尿素氮转化的调控效果[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4):1352-1360.
- [25] 宁建凤, 崔理华, 艾绍英, 等. 2 种硝化抑制剂对土壤氮转化的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):144-151.
- [26] 丁济娜, 李东坡, 武志杰, 等. 土壤理化性质与生物活性对持续施用缓/控释尿素肥料的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7):1769-1778.
- [27] Gupta R, Swaim S, Rai A P. Impact of integrated application of vermicompost, farmyard manure and chemical fertilizers on okra (*Abelmoschus esculentus* L.) performance and soil biochemical properties[J]. International Journal of Chemical Studies, 2019, 7(2):1714-1718.
- [28] 覃潇敏, 郑毅, 汤利, 等. 玉米与马铃薯间作对根际微生物群落结构和多样性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(6):919-928.
- [29] 刘颖慧, 郭明, 贾树利, 等. 影响青贮玉米品质因素研究进展[J]. 作物杂志, 2018(2):6-10.
- [30] 王晓维, 杨文亨, 缪建群, 等. 玉米一大豆间作和施氮对玉米产量及农艺性状的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18):5275-5282.
- [31] 王忠美, 赵敏, 朱玲玲, 等. 氮缓释复合肥对坝上地区青贮玉米产量及氮素利用率的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(5):888-893.
- [32] Afreh D, Zhang J, Guan D H, et al. Long-term fertilization on nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions in a double maize cropping system in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180:259-267.
- [33] 王佳, 李阳, 贾倩民, 等. 种植密度与施氮对河西灌区青贮玉米产量与品质及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(1):60-73.
- [34] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 等. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2077-2083.
- [35] 唐海洋, 冯涛, 同琳静, 等. 聚谷氨酸硫基复合肥在甜高粱和多花黑麦草上的肥效[J]. 草业科学, 2017, 34(10):2117-2123.
- [36] Wang L F, Du H C, Han Z Q, et al. Nitrous oxide emissions from black soils with different pH[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(6):1071-1076.
- [37] 刘诗璇, 陈松岭, 蒋一飞, 等. 控释氮肥与普通氮肥配施对东北春玉米氮素利用及土壤养分有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5):939-947.
- (上接第 37 页)
- [21] 殷水清, 王杨, 谢云, 等. 中国降雨过程时程分型特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(5):617-624.
- [22] De Lima J L M P, Carvalho S C P, De Lima M I P. Rainfall simulator experiments on the importance of when rainfall burst occurs during storm events on runoff and soil loss[J]. Zeitschrift fur Geomorphologie, 2013, 57(1):91-109.
- [23] 王月月, 吴元芝, 范雯华, 等. 不同降雨条件下沂蒙山区耕层土壤团聚体特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1):92-99.
- [24] Bu C F, Wu S F, Yang K B. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils[J]. International Journal of Sediment Research, 2014, 29(4):491-500.
- [25] Chamizo S, Canton Y, Rodriguez-Caballero E, et al. Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: A complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2012, 452:130-138.
- [26] Wu X L, Wei Y J, Wang J G, et al. Effects of erosion degree and rainfall intensity on erosion processes for Ultisols derived from quaternary red clay[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 249:226-236.
- [27] 冯志倩, 娄永才, 齐星圆, 等. 汇流强度、坡度及侵蚀泥沙颗粒分形对工程堆积体坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):127-134.
- [28] 谭贞学, 王占礼, 王莎, 等. 黄土坡面细沟侵蚀过程[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6):1-5.
- [29] 任柯蒙, 卫伟, 赵西宁, 等. 基于水蚀预报模型的黄土高原水平阶减流阻蚀效应模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(14):5067-5077.
- [30] Kateb H E, Zhang H F, Zhang P C, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China[J]. Catena, 2013, 105:1-10.
- [31] 马金龙, 许欢欢, 王兵, 等. 黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1):45-49.
- [32] Zhang F B, Wang Z L, Yang M Y. Validating and improving interrill erosion equations[J]. PLoS One, 2014, 9(2):e88275.
- [33] Kinnell P I A. A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas[J]. Science of the Total Environment, 2017, 596/597:32-34.