

裸露砒砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律

杨振奇¹, 郭建英¹, 秦富仓², 田秀民¹, 刘艳萍¹

(1.水利部牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020;2.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010019)

摘要: 裸露砒砂岩区是黄河粗泥沙集中来源区之一,研究裸露砒砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律,对于科学指导植被建设、减轻入黄泥沙有重要意义。以裸露砒砂岩区鲍家沟小流域为研究对象,运用系统聚类法和线性回归相结合的方法,划分裸露砒砂岩区降雨类型,研究降雨类型对裸露坡面产流产沙的影响,分析降雨条件下坡面微地形变化规律。结果表明:(1)裸露砒砂岩的自然降雨可以分为 4 种类型,第 1 类降雨为长历时暴雨,第 2 类降雨为长历时的中到大雨,第 3 类降雨为短历时暴雨,第 4 类降雨为短历时的小到中雨。(2)第 2 类降雨的 $\bar{P}$ 与土壤流失量间呈良好的抛物线函数关系, I_{30} 与径流深间存在多项式函数关系;第 3 类降雨的 P 与径流深和土壤流失量间存在多项式函数关系;第 4 类降雨的 I_{30} 与水流含沙量间有一定的函数关系。(3)在 1 个雨季内,裸露砒砂岩坡面微地形坡度的平均值由 22.76° 增长至 23.09° ,坡面细沟的细沟密度由 0 增加至 33.73 m/m^2 ,随着坡面微地形持续向利于侵蚀发生的方向发展,坡面产流产沙量随之增加。

关键词: 裸露砒砂岩区;降雨特征;土壤侵蚀;坡面微地形

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0111-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.03.016

Change Law of Slope Micro-topography Under Rainfall Condition in Exposed Feldspathic Sandstone Region

YANG Zhenqi¹, GUO Jianying¹, QIN Fucang², TIAN Xiumin¹, LIU Yanping¹

(1.Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources of China,

Hohhot 010020; 2.Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: The exposed feldspathic sandstone region is one of the main source regions of coarse sandiment in the middle reach of Yellow River. Studying the change law of slope micro-topography under rainfall condition had great significance to guide vegetation construction and reduce coarse sandiment into Yellow River. In this study, taking Baojiagou watershed in feldspathic sandstone region as the research object, through hierarchical clustering method and linear regression method, we divided the types of rainfall and studied their effects on runoff and sediment yield, we also analyzed the change law of slope micro-topography under rainfall condition. The results showed that: (1) The natural rainfall in the research area could be divided into four types, the type I was long-duration heavy rain, the type II was long-duration moderate to heavy rain, the type type III was short-duration heavy rain, and the type IV was short-duration light to moderate rain. (2) Parabolic function correlation were existed between the $\bar{P}$ of the type II rainfall and soil loss amount. There was a polynomial function relationship between I_{30} of the type II rainfall and runoff depth. Polynomial function correlation were existed between the P of the type III rainfall and runoff depth and soil loss amount. There was a certain functional relationship between the I_{30} of the type IV rainfall and the sand content in the water flux. (3) During one rainstorm season, the average value of micro-topography slope grandiant of exposed bed rock slope increased from 22.76° to 23.09° , the rill density on the slope surface increased from 0 to 33.73 m/m^2 . With the continuous development of microtopography of slope surface, which was beneficial to the occurrence of erosion, the runoff and sediment yield on the slope surface increased.

收稿日期:2020-11-02

资助项目:国家自然科学基金项目(41967008);内蒙古科技计划项目(20200GG0126)

第一作者:杨振奇(1993-),男,博士,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:843296578@qq.com

通信作者:郭建英(1979-),男,高级工程师,硕士生导师,主要从事水土保持、矿区生态修复研究。E-mail:Guojianying1980@126.com

Keywords: exposed feldspathic sandstone region; rainfall characteristics; soil erosion; slope micro-topography

降雨引发的土壤侵蚀过程及其调控机制,一直是国内外土壤侵蚀领域^[1-4]专家研究的重点,研究成果丰富,包括降雨侵蚀力的概念、侵蚀性降雨的划定标准、不同气候区的水力侵蚀规律等。坡面是土壤侵蚀作用的基本单元,坡面径流是地表在接纳了超过其入渗能力的降雨后产生的薄层水流,随着水流动能的持续积累和物质的持续汇入,坡面微地形也随之改变,从而影响着对土壤剥蚀和搬运的能力,研究坡面微地形变化规律是研究坡面水力侵蚀机制的基础^[5-6]。特别是在黄河流域的砭砂岩区,该区降雨时空分布不均,基岩成岩程度低,裸露基岩极易风化溃散,暴雨条件下,极易引发严重水土流失作用^[7],研究砭砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律,对于减少泥沙入黄、推动黄河流域生态保护和高质量发展有重要现实意义。

砭砂岩区按照基岩出露程度和覆土类型被分为盖土区、盖沙区和裸露区,以裸露砭砂岩区的基岩出露面积最大,土壤侵蚀作用也最为剧烈^[8],由于其独特的岩石结构和性质,目前在世界其他地区尚未见同等岩性岩石的研究报道,国外可参考的资料多以砂岩基岩区的研究^[9-11]为主,国内关于降雨引发土壤侵蚀机制研究成果多集中在黄土区、黑土区以及红壤土区等地带^[12-15],针对裸露砭砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律的研究相对较为单薄。而裸露砭砂岩区天然降雨呈何种特征?天然降雨对坡面产流产沙有何种影响?坡面微地形呈何种变化规律等问题尚不明确。为此,本研究选择内蒙古准格尔旗的裸露砭砂岩区为研究区,选取裸露砭砂岩区的自然坡面,通过天然降雨观测、三维激光扫描仪监测的方法,研究降雨条件下坡面微地形变化规律,以期为深入研究砭砂岩区水土流失治理工作以及区域生态修复的研究提供理论基础。

1 研究区概况

研究区鲍家沟流域位于鄂尔多斯市准格尔旗,地理坐标为 110°31′—110°35′E,39°46′—39°48′N,海拔 1 110~1 300 m(图 1);流域地形北高南低;气候属典型大陆性季风气候,冬季漫长干燥,夏季短暂温热,年均气温 7.2℃;土壤类型以黄绵土、风沙土为主;植被以人工植被为主,常见青杨(*Populus cathayana*)、旱柳(*Salix matsudana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山杏(*Prunus armeniaca*)等;草本植物主要有羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitaria*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

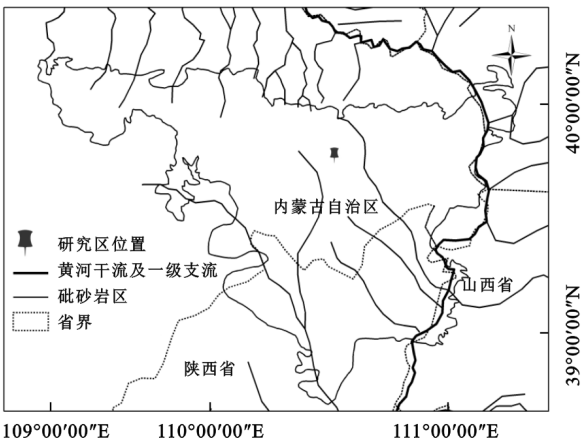


图 1 研究区位置

2 研究方法

2.1 采样方法

砭砂岩岩石结构特殊,颗粒胶结强度差,原状结构的基岩在取样和运输过程中极易产生裂隙,重塑土无法准确还原基岩的岩性,因此本研究中关于裸露砭砂岩坡面降雨侵蚀观测是建立在野外原位试验的基础上,保证了试验的可比性和结果的科学性。研究区设有径流小区设有天然裸露基岩小区,小区坡度为 20°,投影长 5 m,宽 2 m,受基岩坡面地形和施工难度限制,小区围墙材料采用厚铁皮,径流小区主要监测单次降雨的径流及产沙量,降雨指标采用美国 HOBO 公司生产的型号为 U30 的翻斗式自记雨量计及配套气象监测设备。

降雨前后用高清摄像机和三维激光扫描仪对坡面细沟特征进行拍摄扫描,根据图像和三维数据,在 ArcGIS 环境下建立坡面细沟形态数字高程模型,并运用空间分析功能计算水流长度、沟壑密度和坡面粗糙度等参数。

2.2 分析方法

研究区在 2014—2019 年间共观测到 84 场天然降雨过程资料,21 次产流产沙数据,参考了谢云等^[16]、王改玲等^[17]、孙正宝等^[18]专家关于黄土高原区侵蚀性降雨和降雨强度的划分标准(24 h),选取降雨量(P)、最大 30 min 降雨强度(I_{30})、降雨历时(t)以及平均降雨强度($\bar{P}$)指标,运用系统聚类方法对研究区内的降雨类型进行划分,运用线性回归方法分析降雨特征与产流产沙的关系,利用 ArcGIS 的空间分析功能对坡面的 DEM 数据进行分析,提取坡度、地表粗糙度(SR)、细沟密度($RD, m/m^2$)、地形湿度指数(TWI)、汇流动力指数(SPI)和沉积物运移指数(STI)等指标对坡面的微地形变化进行描述。地表

粗糙度可以反映地形的起伏变化和侵蚀程度,地形湿度指数反映了空间土壤水分的饱和缺水量的分布规律,汇流动力指数与水流功率呈正比,反映了径流对土壤的搬运能力,沉积物运移指数沉积物运移指数反映了地形对土壤侵蚀过程的影响。地表粗糙度、细沟密度、TWI、SPI 和 STI 的计算公式^[19]为:

$SR=1/\cos \alpha$ (1)

$RD=\sum L/S$ (2)

$TWI=\ln \frac{AC}{\tan a}$ (3)

$SPI=\ln (AC\times \tan \alpha \times 100)$ (4)

$STI=\left|\frac{AC}{22.13}\right|^{0.6}\times \left|\frac{\sin a}{0.0896}\right|^{1.3}$ (5)

式中: a 为坡度($^{\circ}$); L 为细沟长度(m); S 为坡面面积(m^2); AC 为汇水面积(m^2)。

表 1 2014 年降雨侵蚀力

编号	降雨量/ mm	历时/ min	平均雨强/ (mm·min ⁻¹)	E / (MJ·hm ⁻²)	I_{30} / (mm·h ⁻¹)	R / (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)
2014-04-16	17.4	375	2.78	2.75	7.6	20.87
月计						20.87
2014-05-09	14.6	430	2.04	2.13	4.8	10.23
月计						20.87
2014-06-03	21.2	385	3.30	3.48	9.6	33.44
2014-06-24	15.8	265	3.58	2.64	21.2	56.05
2014-06-29	12.0	730	0.99	1.42	5.2	7.39
2014-06-30	22.8	930	1.47	3.05	34.0	103.59
月计						200.47
2014-07-01	16.4	80	12.30	3.51	26.0	91.31
2014-07-22	18.2	1070	1.02	2.18	4.4	9.59
2014-07-29	23.2	125	11.14	4.88	15.6	76.14
月计						177.04
2014-08-01	17.0	150	6.80	3.26	15.6	50.83
2014-08-02	35.6	130	16.43	8.01	41.2	330.20
2014-08-03	16.0	740	1.30	2.06	13.2	27.22
2014-08-12	20.6	205	6.03	3.85	26.8	103.30
2014-08-22	34.4	970	2.13	5.08	20.0	101.57
2014-08-27	15.6	320	2.93	2.49	17.6	43.85
月计						658.96
2014-09-11	19.4	735	1.58	2.65	11.2	29.64
2014-09-22	43.6	1725	1.52	5.88	8.8	51.72
月计						81.36
2014-10-10	20.8	1035	1.21	2.62	3.6	9.44
月计						9.44
年计						1156.38

应用聚类分析法可以将研究区内观测的降雨划分为 4 类,分类后的降雨类型统计特征见表 2。研究区第 1 类降雨为长历时暴雨,共 2 次,次降雨量平均值为 97.4 mm 以上,降雨历时达 1 100 min 以上, I_{30}

3 结果与分析

3.1 降雨特征

研究区 2014—2019 年均降雨量为 375.97 mm,年际降雨差异较大,2014 年观测到 18 场降雨,降雨总量为 384.6 mm,2015 年有 8 场降雨,降雨总量为 142.2 mm,2016 年观测到 20 场降雨,降雨总量为 606 mm,2017 年观测到 11 场降雨,降雨总量为 285.6 mm,2018 年观测到 12 场降雨,降雨总量为 438 mm,2019 年观测到 15 场降雨,降雨总量为 399.4 mm。年内降雨分布不均匀,以 2014 年为例,表 1 为 2014 年的次降雨特征及降雨侵蚀力,可以看出,研究区年内的降雨主要集中在 6—9 月,且 8,9 月的降雨以暴雨形式为主,因而年内降雨侵蚀力以 8 月最高,为 658.96 (MJ·mm)/(hm²·h·a),占年降雨侵蚀力的 56.81%。

平均值为 57.4 mm/h;第 2 类为长历时的中到大雨,共 29 次,次降雨量的平均值为 22.14 mm,降雨历时的平均值 1 005.59 min, I_{30} 平均值为 11.03 mm/h;第 3 类为短历时暴雨,共 28 次,次降雨量的平均值为

39.09 mm,降雨历时的平均值为 491.75 min,此类降雨具有明显的暴雨性质, I_{30} 平均值为 20.65 mm/h;第 4 类为短历时的小到大雨,共 25 次,次降雨量平均值为 18.23 mm,降雨历时的平均值为 141.4 min, I_{30} 平均值为 20.65 mm/h。

表 2 不同降雨类型的统计特征

降雨类型	降雨量/mm		降雨历时/min		$I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$		频数
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
第 1 类降雨	97.40	1.20	1152.50	12.50	57.40	17.40	2
第 2 类降雨	22.14	8.79	1005.59	282.65	11.03	8.51	29
第 3 类降雨	39.09	23.10	491.75	107.23	20.65	12.91	28
第 4 类降雨	18.23	12.80	141.40	86.00	15.13	16.79	25

3.2 降雨与坡面侵蚀产沙的关系

降雨类型对坡面的产流产沙特征具有不可忽视的影响作用。为了进一步研究降雨与坡面侵蚀产沙的关系,选取了平均降雨强度($\bar{P}$)、降雨总量(P)和最大 30 min 雨强(I_{30})3 个指标,分别分析其与坡面径流深、土壤流失量和水流含沙量间的关系。由图 2 可知,第 2 类降雨的 $\bar{P}$ 与土壤流失量间呈良好的抛

物线函数关系, R^2 高达 0.83, I_{30} 与径流深间存在一定函数关系, R^2 为 0.68。由于第 2 类降雨具有降雨量大和降雨历时长的特点,随着降雨历时的延长和降雨强度的增加,土壤侵蚀作用加剧,坡面的产沙量取决于总体上的降雨强度,坡面的产流量则取决于瞬时降雨强度;第 3 类降雨的 P 与径流深和土壤流失量间存在函数关系, R^2 分别为 0.66 和 0.75, I_{30} 与径流深间存在一定函数关系, R^2 为 0.68。第 3 类降雨,虽然降雨历时较短,但其瞬时降雨强度大,裸露坡面径流形成更快,侵蚀过程也随之急剧变化,因而产流产沙量与降雨总量和 I_{30} 具有更为紧密的关系;而第 4 类降雨的各类指标与产流产沙特征的关系相对较差,仅有 I_{30} 与水流含沙量有一定的函数关系, R^2 为 0.66,这是因为第 4 类降雨,降雨总量和降雨历时较小,部分降雨不会发生明显的侵蚀现象,产流产沙量与降雨特征也就没有明确的函数关系,但是其中有部分降雨过程具有较高的瞬时降雨强度,在裸露基岩坡面会产生高含沙水流,因而此类降雨的 I_{30} 与水流含沙量的相关程度更高。

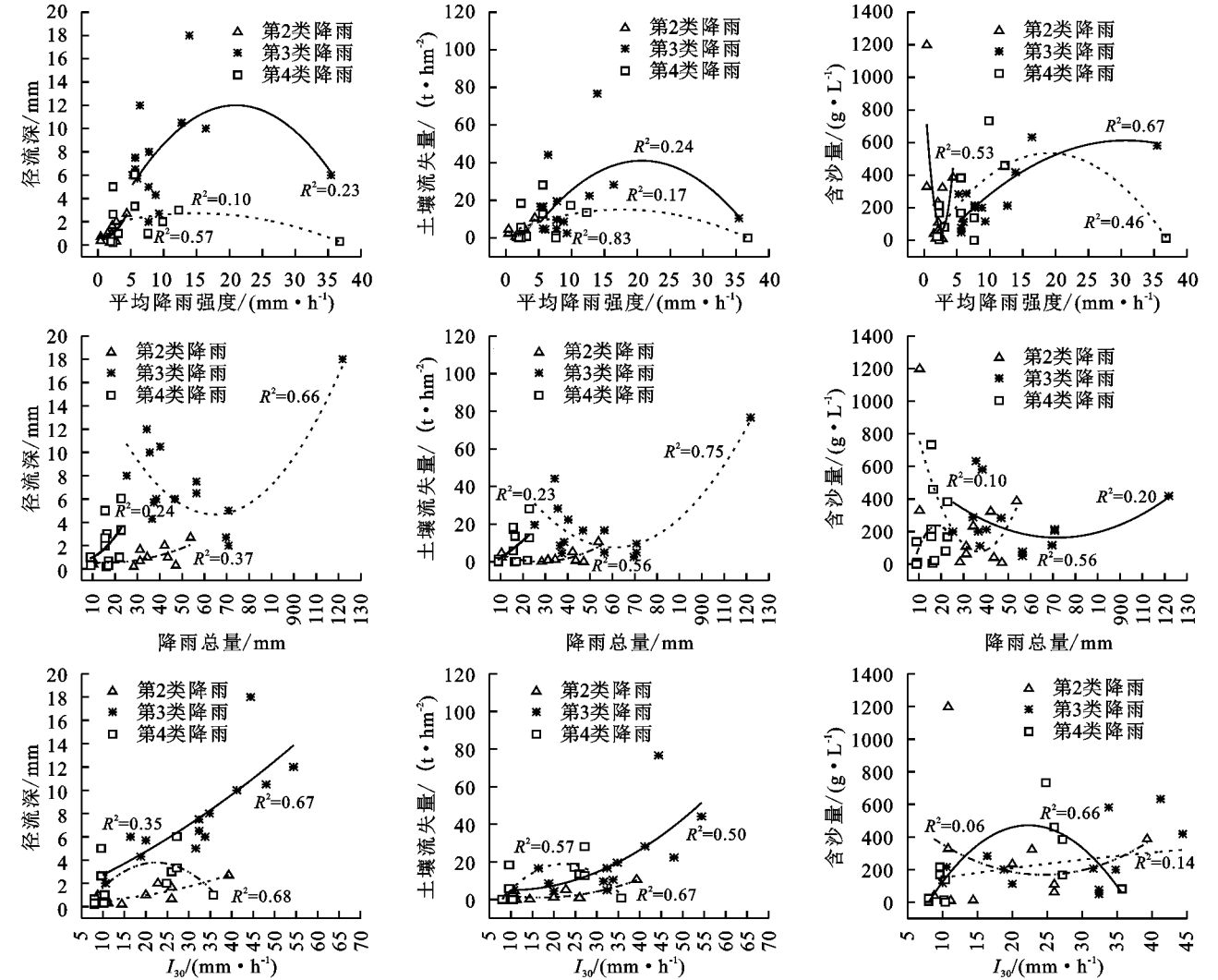


图 2 降雨类型对坡面产流产沙的影响

3.3 降雨条件下坡面微地形变化过程

本文在野外试验中发现,在坡度相同的条件下,1个雨季的降雨足以在裸露基岩坡面上形成细沟微地形,而植被覆盖坡面则没有细沟形成。随着降雨过程的持续,坡面的薄层水流不断汇聚,加快了裸露坡面细沟的发育过程,从而加剧了土壤流失量。为此本研究选取天然裸露基岩坡面,观测1个雨季内坡面的细沟微地形的变化过程。在观测过程中伴随着降雨次数的增加,坡面细沟形态有5次较为明显的改变,图3为坡面的细沟形态形成过程。第1次改变为7月16日,当日降雨为第3类降雨,降雨量31.2 mm, I_{30} 为26 mm/min,降雨后坡面首次产生8条细沟,细沟主要集中在坡脚和坡中上部,细沟总长7.29 m,细沟平均宽0.03 m,细沟平均深度0.01 m;第2次改变为7月28日,当日降雨为第4类降雨,降雨量10.4 mm, I_{30} 为10.8 mm/min,新增细沟条数7条,已有细

沟开始发育出分支,细沟总长13.73 m,细沟平均宽0.04 m,细沟平均深度0.02 m;第3次改变为8月4日,当日降雨为第3类降雨,降雨量56.4 mm, I_{30} 为11.2 mm/min,新增细沟6条,已有细沟开始出现联通现象,细沟网初具雏形,细沟总长19.65 m,细沟平均宽0.05 m,细沟平均深度0.04 m;第4次改变为8月9日,当日降雨为第4类降雨,降雨量9 mm,前1日有第2类降雨1次,降雨量15.6 mm, I_{30} 为9.6 mm/min,此次形态改变新增细沟4条,细沟联通现象加剧,细沟网络基本形成,细沟总长28.03 m,细沟平均宽0.07 m,细沟平均深度0.05 m。第4次改变为8月20日,当日降雨为第3类降雨,降雨量22.8 mm, I_{30} 为27.2 mm/min,前1日有第4类降雨1次,降雨量7.2 mm, I_{30} 为8 mm/min,新增细沟4条,细沟网络形成,细沟总长33.77 m,细沟平均宽0.09 m,细沟平均深度0.07 m。

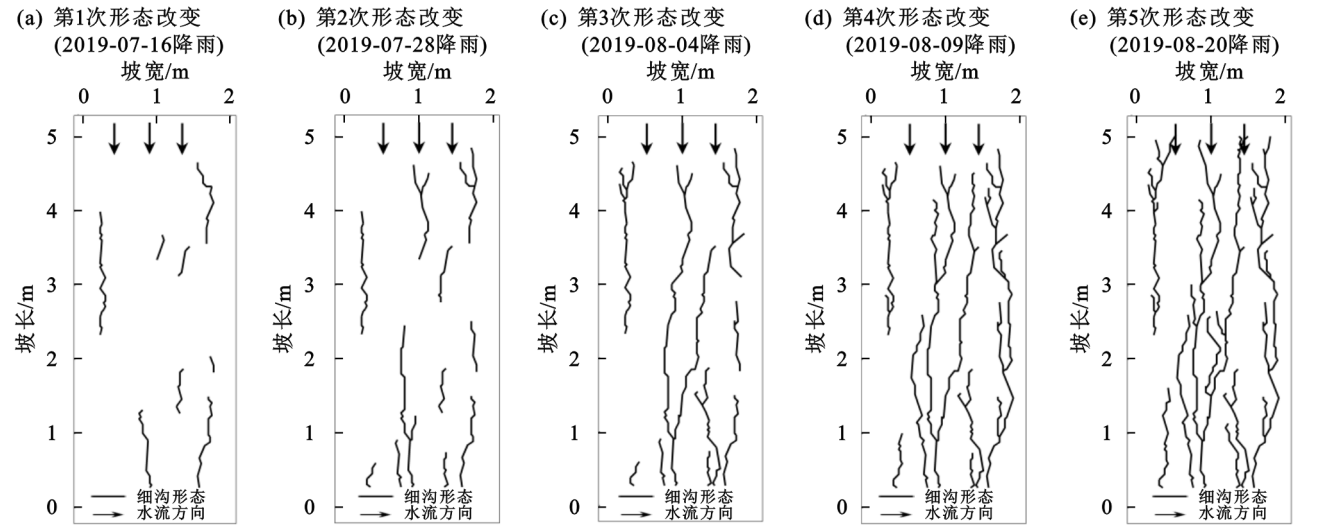


图3 坡面细沟形态发育过程

沟的发育过程伴随着坡面微地形的改变,图4为细沟形成过程中坡面的细沟密度的空间分布图,细沟形成初期,细沟分布密度较低,平均为0.74,随着细沟发育的不断完整,各细沟间逐渐扩展联通,坡面上细沟的分布密度随之提升,到8月20日降雨后,细沟分布密度为3.37,增长了近4.55倍。与此同时,细沟间不断的串联和新增,极大地缩小了细沟间的距离,细沟间的平均距离由细沟发育初期的平均值0.27 m减少到0.08 m,细沟间距离缩小了近3.37倍。DEM的变化反映了细沟发育过程中坡面微地形的改变,细沟形成前坡面的地形结构相对完整,存在着无数个细小的坡面形态,细沟发育形成后坡面结构被切割形成了大大小小的微流域,细小的坡面在水流的作用下或被削平或更为陡峭。

表3为原始坡面和5次坡面微地形改变后各指

标的变化情况,可以看出,原始坡面坡度的平均值为22.76°,5次形态改变后增长为23.09°。随着细沟形态的逐渐发育完善,坡面微地形的坡度的平均值整体呈增加趋势,表明随着降雨次数的增加,坡面地形经过径流的冲刷和切割,形成了细沟,使坡面的形态更为陡峭;坡度变率反映了坡度在微分空间的变化率,坡度变率的数值增长幅度并不稳定,表明了坡度因每次降雨的冲刷能力而造成地表切割程度不同,且此次降雨产生的微地形结构,在下次降雨的时候或被削平或继续下切并不规律,其数值受坡度极值的影响较大,从而呈波动性增加过程;地表粗糙度可以反映地形的起伏变化和侵蚀程度,原始坡面的地表粗糙度为1.08,1次降雨的冲刷并不能显著改变地表的粗糙度,第5次形态改变后坡面的粗糙度已变为1.10;原始坡面经人为整理后坡面平整,故其细沟密度为0,第5次形态改变后为33.73 m/m²;地形湿度

指数反映了空间土壤水分的饱和缺水量的分布规律,原始坡面的地形相对平缓,其地形湿度指数的平均值最高为 4.23,第 1 次形态改变后,坡面形成的跌坑和细沟仍较小,分布也较为集中,到 5 次形态改变后坡面细沟网络成形,地形湿度指数减小到 3.73;沉积物运移指数反映了地形对土壤侵蚀过程的影响,与通用流失方程中的坡长

坡度因子意义类似。坡面汇流动力指数与水流功率呈正比,反映了径流对土壤的搬运能力。原始坡面的沉积物运移指数为 7.28,河流动能指数为 49.80,5 次形态改变过程中,沉积物运移指数和河流动能指数均呈波动性增加趋势,表明随着细沟的发育,坡面地形向利于侵蚀的发生的方向发展。

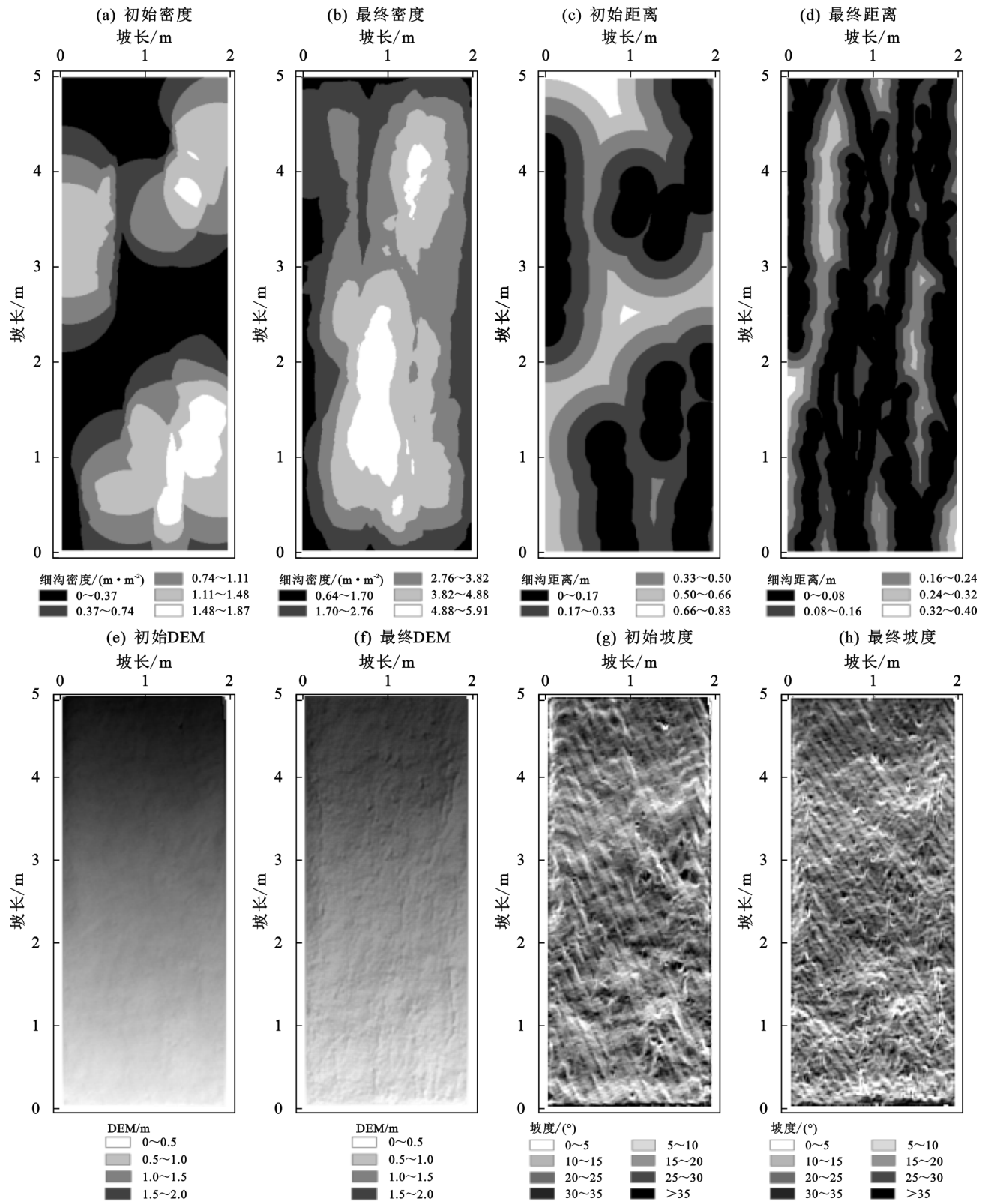


图 4 降雨前后细沟密度变化

表 3 降雨对坡面地表形态的影响

微地形指标	原始坡面	坡面形态改变次数				
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
坡度/(°)	22.76	22.40	22.84	22.81	23.43	23.09
坡度变率	89.32	89.19	89.51	89.26	89.48	89.48
地表粗糙度	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10
细沟密度/(m·m ⁻²)	0	7.59	13.13	19.65	28.03	33.77
地形湿度指数	4.23	4.21	3.33	4.09	3.80	3.73
沉积物运移指数	7.28	8.47	7.38	8.42	7.49	7.78
汇流动力指数	49.80	49.27	57.00	50.95	53.88	58.68

4 讨论

已有学者^[20-22]认为,黄土高原地区年内的几场侵蚀性降雨是导致该区剧烈侵蚀的主要动力。裸露砒砂岩区地处黄土高原第 1 副区地貌单元,区域气候基本一致,年内降雨基本集中在夏秋 2 季,对降雨特征及其产流产沙量的分析也证实,裸露砒砂岩区的土壤侵蚀作用同样也受年内的少数降雨过程决定。在降雨类型的划分上,本研究参考了已有研究^[16-18]关于黄土高原区侵蚀性降雨分类指标,划分结果与前人^[16-18]的研究结果基本相近。但有所不同的是,裸露砒砂岩区相比黄土高原的其他地区,基岩裸露程度更高,也更易于发生土壤侵蚀。本研究在实地调查中发现,研究区基岩大幅裸露,且基岩裸露地带的土壤性质和入渗过程都与黄土有明显差异,因而其产流产沙过程也有所区别^[23-24]。本研究认为,降雨类型的不同显著影响裸露砒砂岩区坡面土壤侵蚀过程,但是无论何种降雨的 I_{30} 都与坡面的产流产沙过程密切相关,即降雨是否带有暴雨性质是影响坡面土壤侵蚀过程的主要因素,但是裸露砒砂岩岩区坡面的水力侵蚀过程除降雨外仍受其他不确定因素影响,该区侵蚀性降雨的划分标准可以作为今后研究的重点方向之一。

坡面微地形改变显著影响侵蚀过程中土壤的搬运和沉积路径,部分研究^[25]发现,改变地表微地形,延长径流通过路径携沙径流的阻碍,降低径流流速,减少径流量和侵蚀量,因而一定程度微地形的改变能够降低侵蚀。而另有研究^[26]表明,坡面微地形演变与土壤侵蚀过程间存在动态的协同演变关系,微地形在降雨过程中对土壤侵蚀的增强和减弱作用同时存在,2 种作用在不同的降雨和侵蚀阶段互有消长,最终在数量化表现为增加或者降低。也有研究^[27]表明,随着降雨过程的持续,微地貌产生变化,相应区域的汇流速度和泥沙搬运能力、对地表的剪切、冲刷强度也在不断变化,微地貌的差异对侵蚀的增减效应始终处于一个动态的平衡。本研究证实,降雨条件下

裸露基岩坡面微地形存在的波动性变化过程,随着降雨次数的增加,坡面坡度由 22.76°增长至 23.09°,地表粗糙度为 1.08 增加至 1.10,坡面细沟的细沟密度由 0 增加至 33.73 m/m²,地形湿度指数由 4.23 减小到 3.73,沉积物运移指数和河流动能指数随降雨次数的增加均呈波动性增加趋势,总体上坡面地形是向利于侵蚀的发生方向发展。

5 结论

(1)裸露砒砂岩的自然降雨可以分为 4 种类型:第 1 类降雨为长历时暴雨,第 2 类降雨为长历时的中到大雨,第 3 类降雨为短历时暴雨,第 4 类降雨为短历时的小到中雨。

(2)降雨类型的不同显著影响裸露砒砂岩区坡面土壤侵蚀过程,第 3 类降雨是引起该区土壤剧烈侵蚀的主要降雨类型,其次为第 4 类降雨中帶有一定暴雨性质的降雨过程,第 2 类降雨引起的土壤侵蚀作用相对较弱。

(3)1 个暴雨季节的降雨即可明显改变裸露基岩坡面的微地形,随着降雨次数的增加,微地形平均坡度、地表粗糙度、细沟密度、沉积物运移指数和河流动能指数均呈增加趋势,标志着坡面微地形向着利于侵蚀发生方向发展。

参考文献:

[1] 章文波,谢云,刘宝元.用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J].地理研究,2002,21(6):384-390.

[2] Nearing M A, Yin S Q, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity: An historical review [J].Catena,2017,157:357-362.

[3] Mohamadi M A, Kavian 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.

[4] Nadal-Romero E, Regúés D, Latron J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands [J].Catena,2008,74:127-136.

[5] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J].农业工程学报,2015,31(24):127-133.

[6] 郑子成,秦凤,李廷轩.不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2015,31(8):168-175.

[7] 张喜旺,秦奋.砒砂岩地区降雨与植被耦合关系对侵蚀产沙的影响[J].地理研究,2016,35(3):513-524.

[8] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.

[9] Emeh C, Igwe O. Variations in soils derived from an erodible sandstone formation and factors controlling their susceptibility to erosion and landslide [J].Journal of the

Geological Society of India, 2017, 90(3): 362-370.

- [10] Elliott G L, Lang R D, Campbell B L. The association of tree species, landform, soils and erosion on Narabeen sandstone west of Putty, New South Wales [J]. Austral Ecology, 2010, 8(3): 321-331.
- [11] Slavik M, Bruthans J, Filippi M, et al. Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion [J]. Geomorphology, 2017, 278: 298-313.
- [12] 艾宁, 魏天兴, 朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 26-30.
- [13] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平. 黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 9-16.
- [14] 李洪丽, 韩兴, 张志丹, 等. 东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 49-52, 57.
- [15] 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 124-132.
- [16] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [17] 王改玲, 王青杵, 石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 1-5.
- [18] 孙正宝, 陈治谏, 廖晓勇, 等. 侵蚀性降雨识别的模糊隶属度模型建立及应用[J]. 水科学进展, 2011, 22(6):

801-806.

- [19] 史志华, 朱华德, 陈佳, 等. 小流域土壤水分空间异质性及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 889-895.
- [20] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [21] 张岩, 朱清科. 黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 99-103.
- [22] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 48-56.
- [23] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 733-739.
- [24] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 154-161.
- [25] 贾腾斌, 吴发启, 赵龙山, 等. 坡耕地上耕作形成的微地形复杂度特征与分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 152-156.
- [26] Pinski S L, Trohman R G. Analysis of surface roughness in relation to soil loss and runoff at high rainfall intensities [J]. Hydrological Processes, 2010, 16(12): 2339-2345.
- [27] Römken M, Helming K, Prasad S. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes [J]. Catena, 2002, 46: 103-123.

(上接第 110 页)

- [17] 孟杰, 李喜安, 赵兴考, 等. 基于高精度 μ CT 扫描的重塑黄土试样均匀性分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 125-130.
- [18] 周云艳. 植物根系固土机理与护坡技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- [19] Abdi E, Saleh H R, Majnonian B, et al. Soil fixation and erosion control by *Haloxylon persicum* roots in arid lands, Iran [J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(1): 86-96.
- [20] 田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 花棒根—土复合体直剪试验的有限元数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 152-158.

- [21] 胡宁, 刘静, 姚喜军, 等. 快剪条件下柠条根对 3 种土壤土工特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 106-111.
- [22] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 128-134.
- [23] 陈洁, 雷学文, 黄俊达, 等. 花岗岩残积土边坡草本植物根固效应试验[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 104-108.
- [24] Maffra C, Sousa R, Sutli F J, et al. The effect of roots on the shear strength of texturally distinct soils [J]. Floresta E Ambiente, 2019, 26(3): 1-11.
- [25] 宗全利, 冯博, 蔡杭兵, 等. 塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1290-1300.