

裸露砒砂岩区坡面侵蚀过程中地表粗糙度与 水力侵蚀特征参数的关系

董晓宇, 秦富仓, 李 龙, 孙 成, 李 艳, 索凤珍

(内蒙古农业大学沙漠治理学院, 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要: 坡面地形起伏状况是影响土壤侵蚀状况的重要因素, 深入了解地表粗糙度和产流产沙以及水动力参数之间的关系是研究坡面土壤侵蚀过程的基础。采用野外原位模拟冲刷试验, 使用三维激光扫描仪结合 ArcGIS 提取地形因子参数, 研究了裸露砒砂岩区坡面侵蚀过程中地表粗糙度与侵蚀特征参数的关系。结果表明: (1) 冲刷强度的增大使得阻力特征参数逐渐降低, 且随着冲刷时间的增加, 弗劳德数也呈现降低趋势, 其他水力学参数呈增大趋势。冲刷强度 $< 200 \text{ L/h}$ 时, 坡面径流处于层流状态, 随着冲刷强度增大, 流态呈现出缓流向急流转化的趋势。(2) 地表粗糙度随着冲刷流量的增大变化规律不明显。当冲刷强度较小时 ($< 100 \text{ L/h}$), 地表粗糙度与产流产沙特征参数的关系较为密切。(3) 流速与地表粗糙度呈显著的幂函数关系 ($R^2 > 0.561$), 是反映地表粗糙度变化的最优参数。(4) 通过 Mantel 相关分析发现, 随着冲刷强度的增大, 地表粗糙度的变化规律由产流产沙特征向水动力参数特征转变。研究结果旨在揭示地表粗糙度与土壤侵蚀过程特征参数的关系, 为裸露砒砂岩区坡面土壤侵蚀模型的构建提供理论依据。

关键词: 水动力学特征; 地表粗糙度; 裸露砒砂岩区; 模拟冲刷

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0033-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.004

Relationship Between Surface Roughness and Hydraulic Erosion Characteristic Parameters During Slope Erosion in Exposed Pisha Sandstone Area

DONG Xiaoyu, QIN Fucang, LI Long, SUN Cheng, LI Yan, SUO Fengzhen

(Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, State Forestry and Grassland Administration,
College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018)

Abstract: Slope topographic relief is an important factor affecting soil erosion. The relationship between surface roughness, sediment yield and hydrodynamic parameters is the basis for studying slope soil erosion process. The relationship between surface roughness and erosion characteristic parameters in slope erosion process in exposed Pisha sandstone area is studied by field in-situ simulated scour test and terrain factor parameters extracted by ArcGIS. The results showed that: (1) With the increase of scour intensity, the characteristic parameters of resistance decrease gradually, and the characteristic parameters of sediment yield and flow and other hydraulic parameters increase as a whole. With the increase of scouring time, Froude number showed a decreasing trend and other hydraulic parameters showed an increasing trend. The values of Reynolds numbers were all less than 500 under the three scour flow conditions, and the runoff was in laminar flow state. However, when the scour intensity increased, the Froude number showed the law of flow state from slow flow to rapid flow. (2) The change law of surface roughness was not obvious with the increase of scour flow. When the scour intensity was small ($< 100 \text{ L/h}$), the relationship between surface roughness and sediment yield characteristics was close. (3) Velocity had a significant power function relationship with surface roughness ($R^2 > 0.561$), which is the optimal parameter reflecting the change of surface roughness. (4) Through Mantel correlation analysis, it was found that with the increase of scour intensity, the change of surface roughness will change from sediment yield characteristics to hydrodynamic parameters characteristics.

收稿日期: 2021-08-27

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41967008, 41807079); 内蒙古自治区自然科学基金重大项目 (2021ZD07)

第一作者: 董晓宇 (1994—), 男, 博士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 630833821@qq.com

通信作者: 秦富仓 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: Qinfc@126.com

The results are aimed to reveal the relationship between surface roughness and characteristic parameters of soil erosion process, and provide theoretical basis for the construction of slope soil erosion model in the exposed Pisha sandstone area.

Keywords: hydrodynamic characteristics; surface roughness; exposed Pisha sandstone area; simulated scour

裸露砒砂岩区的水土流失情况较为严重^[1-3]。砒砂岩极差的抗侵蚀能力使得裸露砒砂岩区成为黄土高原砒砂岩区侵蚀最剧烈、治理难度最大的地区。研究坡面尺度的土壤侵蚀过程是治理流域水土流失的重要前提。伴随着各种侵蚀营力的作用,坡面侵蚀过程会发生不断演变,地表形态也会发生连续的变化,而地表粗糙度则表征地表在比降梯度最大方向上凹凸不平的形态或起伏状况^[4],是坡面土壤侵蚀过程研究中重要的影响因素之一^[5-7],也是反映地表变化与土壤侵蚀程度的重要指标。许多学者^[8-10]研究表明,地表粗糙度的改变影响坡面径流的水动力学特性的变化规律,从而影响土壤侵蚀的进程和结果。梁心蓝等^[11]在室内模拟降雨条件下,采用 4 种不同地表粗糙度,测量并计算降雨前后不同粗糙度边坡的地表粗糙度变化、径流特征和水力参数发现,坡面初始粗糙度较大时容易形成层流径流,初始坡面地表粗糙度越小,地表径流往往朝着紊流方向发展,而且地表粗糙度和径流阻力系数也呈现正相关的关系;刘洋等^[12]通过模拟冲刷试验对 4 种不同地表粗糙度坡面的水动力特征进行研究,揭示了地表粗糙度的增加使得坡面流的做功能量增加;施明新等^[13]则采用了薄层水流定床试验,通过对不同糙度床面水动力学特征参数变化规律进行研究认为,地表粗糙度可以起到减缓径流流速、扩大径流深的作用;张建文等^[14]和庞延杰等^[15]在研究坡面地形变化的侵蚀特征时均发现,地表粗糙度对径流功率和侵蚀量有着明显的影响;孙佳乾^[16]通过人工模拟试验揭示,地表粗糙度的增大降低弗劳德数,增大径流的阻力系数。多数专家学者均认为,地表粗糙度对坡面径流的流态、流速和径流深度均产生影响,但以上研究多是采用填土的方式塑造坡面,并通过侵蚀试验前的人为干预控制不同地表粗糙度来进行水动力特征和产流产沙量的研究,但是对于自然坡面土壤侵蚀发生过程中的水动力参数和地表粗糙度动态变化及其相互关系方面的研究较为少见。而对于特定地区,尤其是对于裸露砒砂岩地区的此类研究仍属空白。

因此,本文通过野外原位冲刷试验,以期揭示裸露砒砂岩区天然坡面侵蚀过程中水动力特征与侵蚀产沙特征和地表粗糙度直接的内在关系,旨在为裸露砒砂岩区坡面土壤侵蚀模型建立提供理论基础,并为黄河中游粗砂来源区的水土流失治理提供理论依据。

1 试验设计与方法

1.1 试验区概况

研究区位于内蒙古自治区西南部鄂尔多斯市东部准格尔旗暖水乡的圪秋沟小流域(110°05′—110°27′E, 39°16′—40°20′N),属裸露砒砂岩区的剧烈侵蚀区,为温带半干旱大陆性季风气候,雨水集中在每年 6—9 月。年蒸发量达 2 100~3 700 mm,降水量年际变化大,且多以暴雨形式出现,主要集中在 7—8 月,暖水乡年均降水量仅为 287 mm,年均风速仅为 12.7 m/s,属于典型的砒砂岩地貌,裸露砒砂岩主要由灰白、紫红等颜色的砂粒构成,纵断面呈现层状结构,组织松散。地表交错零星分布较薄的黄土层,厚度为 0—50 cm,研究区小流域黄土平均厚度为 20 cm。

1.2 试验装置

采用冲刷装置对典型坡面的径流小区(250 cm×100 cm×30 cm)进行冲刷试验。径流小区用 2.5 mm 厚的钢板密封,钢板插入地面 15 cm 深,地表出露 15 cm。供水设备设置在径流区上方 2 m 处,设有蓄水池(直径 100 cm×高 150 cm)、流量计和静水溢流箱(宽 30 cm×高 20 cm×长 100 cm),蓄水池通过外接的加压水泵进行连续补水。径流小区下方设置径流收集桶(图 1)。冲刷之前事先要对冲刷强度进行率定,要求上方出水均匀系数达到 80% 以上,并配备稳压器,保证冲刷过程中水流的稳定性。

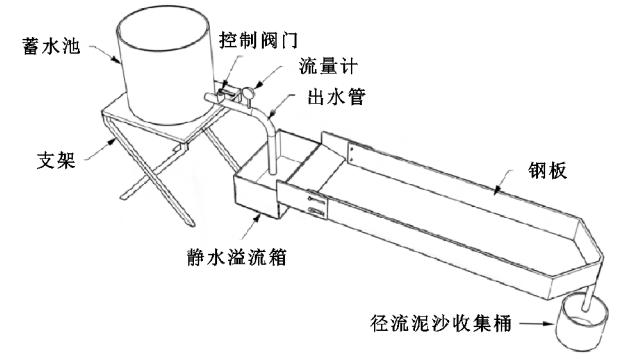


图 1 模拟冲刷试验装置

1.3 试验设计

经过实地调查,研究区坡面较为破碎,且水力侵蚀发生坡度多在 30°~35°,故根据实地状况选取坡向、坡位一致并且坡度在 30°~31°的天然坡面建立径流小区,径流小区的土壤黏粒(<0.002 mm)含量为 0.01%~0.07%,粉粒(0.05~0.002 mm)含量为 0.68%~6.44%,砂粒(2~0.05 mm)含量为 94.58%~

98.22%,容重为 $1.43 \sim 1.69 \text{ g/cm}^3$ 。试验前首先使用枝剪贴地面将小区内坡面的稀疏植被进行处理,然后使用砂纸打磨坡面表层的结皮物质使得坡面平整,并使用毛刷仔细清理干净,控制坡面初始地表粗糙度在同一水平。在安装径流小区时钢板对坡面产生扰动的部分使用工具进行夯实处理,使扰动部分的土壤密度与原始坡面接近。为避免土壤表层初始含水率对试验过程的影响,在冲刷试验前使用美国的 Ho-Bo-U30 数据收集器搭配土壤水分探头对各类型坡面的表层 0—15 cm 深度的土壤(基岩)含水率进行动态监测,试验开始前通过人为喷水的方式控制径流小区内坡面表面的初始含水率,使其保持在同一水平范围内(4.7%~4.8%)。此外关注天气状况,选在无风或者微风的天气进行。

根据研究区 6—9 月的降雨在试验小区产生的单宽流量确定冲刷流量,设置 60,100,200 L/h 的 3 水平冲刷流量试验;由于研究区域降雨类型多为短历时降雨^[17],故而冲刷时间设定为 30 min,用 KMnO_4 染色法测量流速,沿坡面每隔 20 cm 布设观测断面 1 个,产流后每隔 3 min 测量 1 次坡面流速和过水断面宽度;利用三维激光扫描仪进行扫描(扫描仪距离地面 95 cm 定点扫描),获取微地形点云数据,生成坡面 DEM 影像,之后使用 ArcGIS 计算不同时段的地表粗糙度。每个时段冲刷结束后,称重收集在每个塑料容器中的径流和沉积物,并在 24 h 内沉淀。随后通过沉淀回收沉积物,并通过虹吸从水中去除上清液。称量沉淀的沉淀物,称重、烘干以计算沉积物含水量。然后可以确定每个采样间隔的径流量和产沙量。所有试验数据均为 3 次试验测量结果的平均值。

1.4 指标计算

(1)流速表示坡面水流速度,采用 KMnO_4 染色示踪法测量。实测的流速可能受到坡面水分入渗和人为观测误差的影响,因此需要校正得到平均流速,公式为:

$$v = k \cdot v_m$$

式中: v 为径流平均流速(m/s); v_m 为实测流速(m/s); k 为校正系数,当水流流态为层流时取 0.67,过渡流取 0.7,紊流取 0.8^[18]。

(2)径流深(H)表示过水断面水流深度,由于坡面流水深较浅不便于直接测量,计算公式为:

$$H = Q/d \cdot v$$

式中: H 为水深(mm); Q 为径流量(m^3/s); d 为水面宽度(m)。

(3)雷诺数(Re)可以判别坡面水流的流态,当 $Re > 500$ 时判别为紊流,当 $Re < 500$ 时判别为层流, Re 在 500 左右时则为过渡流^[19],计算公式为:

$$Re = v \cdot R / \gamma$$

式中: Re 为雷诺数; v 为水流流速(m/s); R 为水力半径,近似为水深 $H(\text{m})$; γ 为水运动黏滞系数(m^2/s)。

水运动黏滞系数为:

$$\gamma = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2}$$

式中: t 为水流温度($^\circ\text{C}$)。

(4)弗劳德数(Fr)可以用来判断坡面流是否为急流或缓流,当 $Fr > 1$ 时,惯性力大于重力的作用,水流流行为急流;当 $Fr = 1$ 时,则表示惯性力等于重力作用,此时水流为临界流;当 $Fr < 1$ 时,惯性力 < 重力作用,水流为缓流。计算公式为:

$$Fr = v / \sqrt{g \cdot R}$$

式中: Fr 为弗劳德数; g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

(5)Darcy-Weisbach 阻力系数(f)可以表征坡面流在运动时所承受阻力的大小。计算公式为:

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot R \cdot J}{v^2}$$

式中: f 为阻力系数; J 为水力能坡,取坡度的正弦值。

(6)曼宁糙率系数(n)是用来描述边界形态特征、土壤性质及表层覆盖度等因素对水流运动边界表面影响的综合系数。计算公式为:

$$n = \frac{R^{2/3} \cdot J^{1/2}}{v}$$

(7)水流的剪切力(τ)用来衡量水流对土壤颗粒的分离能力^[20]。计算公式为:

$$\tau = P \cdot R \cdot J$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa); P 为水流容重,一般为 $10\,000 \text{ N/m}^3$ 。

(8)水流功率是单位面积水势能的变化率,可以用来描述坡面径流的做功过程。计算公式为:

$$\omega = \tau \cdot v$$

式中: ω 为水流功率($\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$)。

(9)地表粗糙度的计算。地表粗糙度为地表单元曲面面积与投影面积的比值,是反映地表起伏状况的一个虚拟指标^[21],利用 ArcGIS 中的 Spatial Analysis 输入: $1/\text{Cos}((\text{Slope of DEM} \cdot 3.14159/180))$,即可得到地表粗糙度均值。

使用 R 和 EXCEL 软件进行数据处理与分析,采用 Origin 8.5 软件进行绘图与拟合,采用 ArcGIS 10.7 软件进行地表粗糙度的计算。

2 结果与分析

2.1 坡面产流特征分析

径流量是影响土壤侵蚀程度的最重要的因素之一。从图 2 分析可知,在 30 min 内,60,100 L/h 冲刷强度下的径流率随冲刷时间的增长逐步增大。60

L/h 时径流率范围为 0.1~0.61 L/min;100 L/h 冲刷强度时,径流率范围为 0.23~1.20 L/min;200 L/h 的径流率范围为 2.1~3.00 L/min,呈现增大—平稳的趋势。

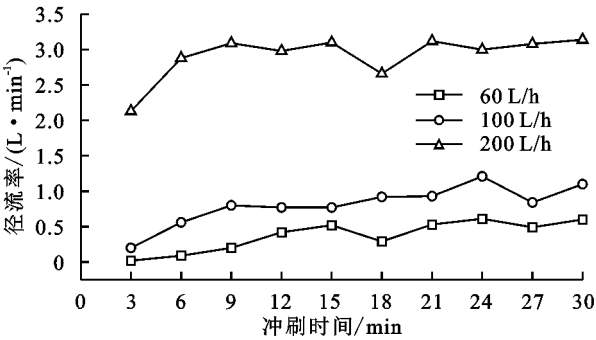


图 2 不同冲刷强度下坡面产流率和累计产流量随时间的变化

2.2 坡面产沙特征分析

产沙强度反映径流冲刷能力的强弱。由图 3 可知,在 30 min 内,60 L/h 冲刷强度的产沙强度为 0.40~1.21 kg/min;100 L/h 冲刷强度下的产沙强度位 0.88~1.45 kg/min;200 L/h 冲刷强度下的产沙强度为 0.48~1.40 kg/min。整体来看,在前 19 min 时段,产沙强度在 100 L/h 冲刷强度下最大,其次是

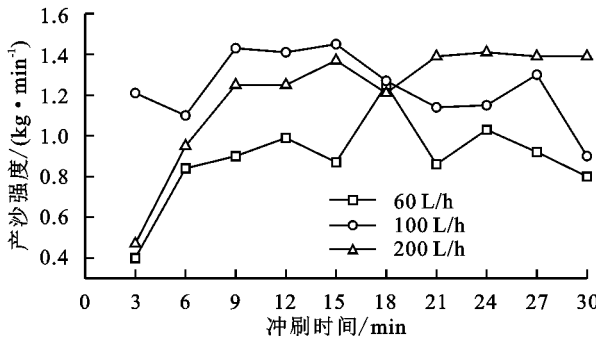


图 3 不同冲刷强度下坡面产沙强度和累计产沙量随时间的变化

2.3 坡面水动力特征分析

2.3.1 坡面径流水深和流速特征 由图 4 可知,径流水深和流速随着冲刷流量的增加而逐渐增大,且随

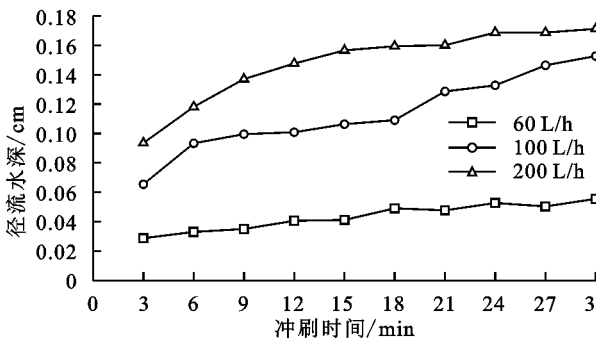
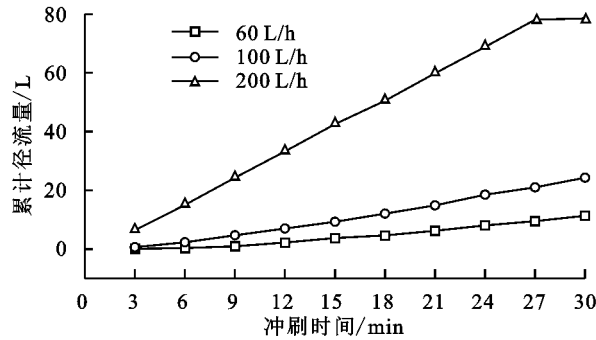


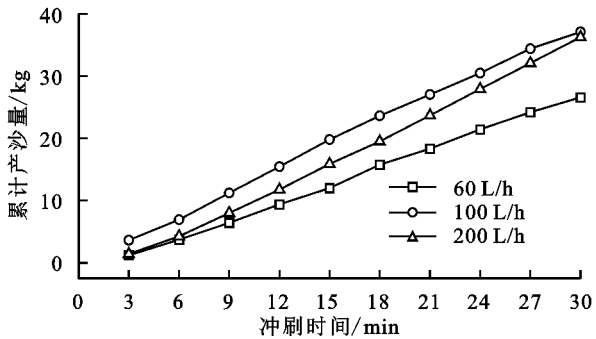
图 4 不同冲刷强度下坡面径流水深和流速随时间的变化

2.3.2 坡面流流态特征 雷诺数和弗劳德数是描述坡面径流流态的指标。由图 5 可知,裸露砒砂岩坡面径流雷诺数呈现随着冲刷流量的增加而增大的趋势。60 L/h 冲刷强度下坡面雷诺数为 11.89~15.11;100 L/h 冲刷强度下坡面雷诺数为 89.54~124.17;200

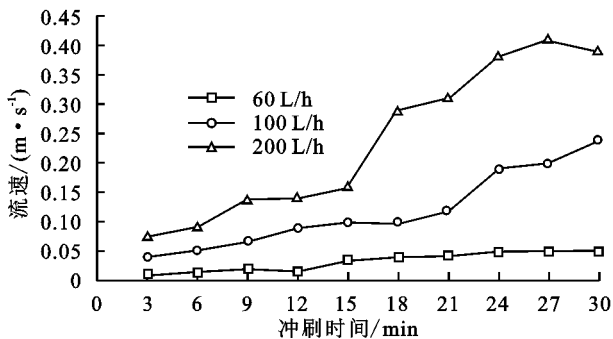
60,100,200 L/h 冲刷强度下的累计产流量分别达到 11.31,24.30,78.54 L。整体来看,随着冲刷强度的增大,径流率和累计径流量均呈现增大的规律。



200,60 L/h 时的产沙强度较小;19 min 以后的时段则呈现冲刷强度越大产沙强度越大的规律。累计产沙量 100 L/h 时最高,其次是 200,60 L/h。试验中观察到坡面冲刷过程中产生的细沟在径流的冲刷后贯通也会导致产沙量突然增大,这可能是冲刷过程中导致产沙强度和累计产沙量分时段波动变化规律的原因。



冲刷时间的增加,径流水深和流速的变化总体呈增长趋势,在 200,100 L/h 流量条件下的变化速率较高,60 L/h 流量条件下的变化速率较为平缓。



L/h 冲刷强度下坡面雷诺数为 142.92~196.11。3 种冲刷流量条件下,雷诺数的值均<500,表明在试验流量范围内,径流处于层流状态。弗劳德数随着冲刷流量的增加而增大。当冲刷流量为 60,100 L/h 时,弗劳德数均<1,径流流态为

缓流;当冲刷流量为 200 L/h 时,弗劳德数 >1 ,径流态为急流。在任一冲刷流量条件下,弗劳德数均随着冲刷时间的增加而整体呈波动减小的趋势,在 200

L/h 流量条件下,弗劳德数的变化速率由较高逐渐减缓,而在 60,100 L/h 流量条件下,弗劳德数的变化速率较为平缓。

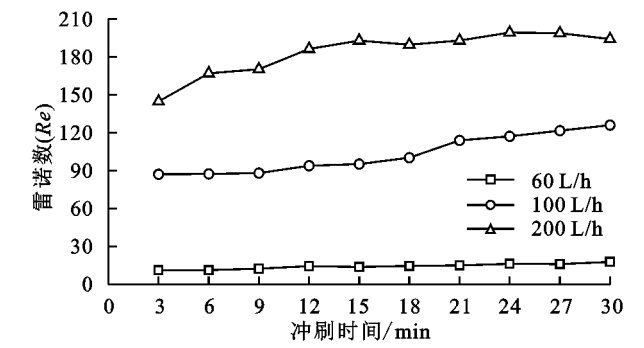


图5 不同冲刷强度下坡面流态特征随时间的变化

2.3.3 坡面流阻力特征 选择 Darcy-Weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数描述坡面流的阻力特征。由图 6 可知,砒砂岩裸露坡面的阻力系数随冲刷流量的增大而减小,这表示冲刷流量的增加导致水流受到的阻滞作用逐渐减弱。随着冲刷时间的增加,在 60 L/h 流量条件下,阻力系数的整体趋势表现为先以高速率增加后出现波动,而在 200,100 L/h 流量条件下,阻

力系数的变化趋势较为平缓,总体呈缓慢增长趋势。曼宁糙率系数随之下降。随着冲刷时间的增长,曼宁糙率系数呈波动性增加趋势,从冲刷开始到结束,在 60, 100,200 L/h 的冲刷流量条件下,曼宁糙率系数分别增长 1.91,1.27,2.08 倍。说明随着冲刷时间的增加,坡面形态不再平整,水流的冲刷使得坡面形成起伏的微地形地貌,这对于径流起到一定的阻滞作用。

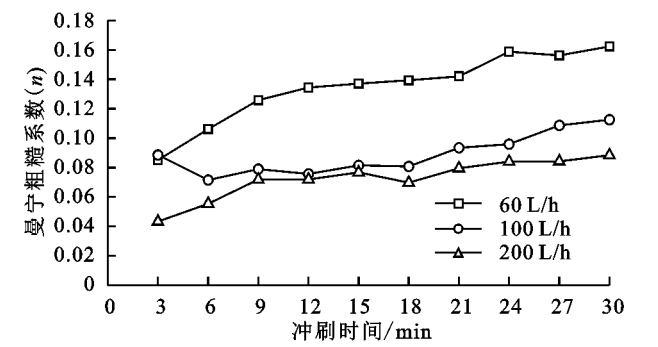
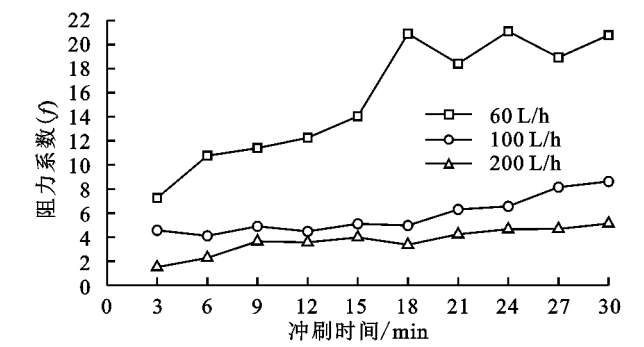


图6 不同冲刷强度下坡面流阻力特征随时间的变化

2.3.4 坡面流侵蚀动力特征 选用水流剪切力和水流功率分析坡面流的侵蚀动力特征。由图 7 可知,水流剪切力和水流功率均随着冲刷流量的增大而增大,且随冲刷时间的增加,水流剪切力的变化总体呈增长趋势,水流功率变化速率较为缓和,总体呈波动上升趋势。这一规律与阻力特征变化相似,可能是由于在

水量增大时,坡面的径流水深和水力半径的增大导致^[22]。在 200 L/h 流量条件下,侵蚀动力参数的变化速率较大,水流剪切力为 4.6~8.4 Pa,水流功率为 0.72~1.10 N/(m·s);60 L/h 冲刷强度下的侵蚀动力参数变化速率最低,水流剪切力为 1.4~2.6 Pa,水流功率为 0.056~0.088 N/(m·s)。

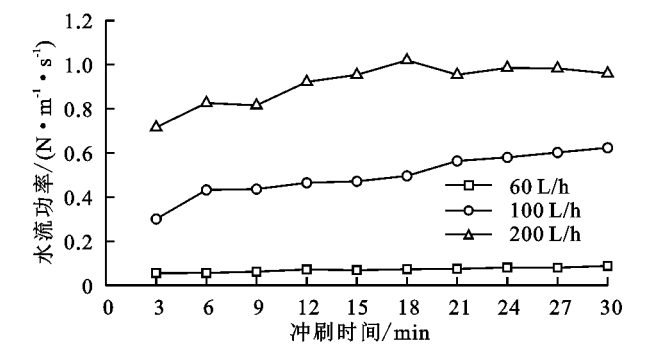
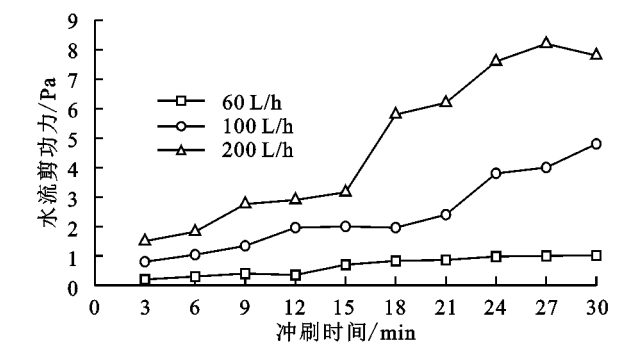


图7 不同冲刷强度下坡面流侵蚀动力特征随时间的变化

2.4 坡面地表粗糙度变化特征

由图 8 可知,在本试验条件下,天然裸露砒砂岩

坡面上的地表粗糙度随着冲刷流量的增大,并不呈现明显的变化规律,在 60,100,200 L/h 冲刷条件下,地

表粗糙度的平均值分别为 1.84, 1.51, 1.61 mm。随着冲刷时间的延长, 3 组流量条件下的地表粗糙度的变化较为复杂, 均呈现较大的波动性。这可能是由于砒砂岩特殊的岩性特征以及天然坡面表层以下的岩隙等大孔隙对砒砂岩的抗蚀性能产生了影响^[23]。

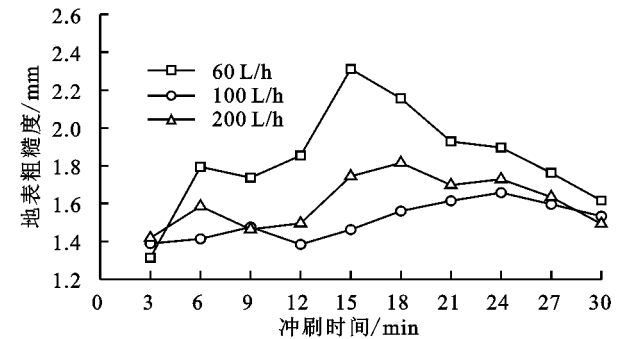


图 8 不同冲刷强度下地表粗糙度随时间的变化

2.5 地表粗糙度与产流产沙特征的关系

坡面侵蚀水动力学特性的本质是径流的动态变

化, 而径流也是泥沙颗粒运动的载体和驱动力, 携沙水流的冲击使得坡面地表形态不断发生变化。因此, 在侵蚀过程中的径流和泥沙与地表粗糙度之间有着密切的联系。由表 1 可知, 冲刷过程中地表粗糙度和产流产沙特征参数的关系呈多项式回归关系。当冲刷流量较低时(60 L/h), 地表粗糙度和径流率与产沙强度具有较好的拟合程度, R^2 分别为 0.795, 0.763; 100 L/h 时, 地表粗糙度和径流率与产沙强度的拟合程度有所降低, 与累计产流量和累计产沙量的拟合程度较高, R^2 分别达到 0.685, 0.726; 当冲刷流量较大时, 各地表粗糙度和各产流产沙特征参数的拟合程度较差。说明当冲刷流量较小时(<100 L/h), 地表粗糙度和径流率与产沙强度之间有着密切的联系, 且与累计产流量和累计产沙量的关系也逐渐变得密切; 但当流量较大时, 这种密切联系将被打破。

表 1 冲刷过程中地表粗糙度和产流产沙的关系

冲刷强度/ (L · h ⁻¹)	产流产沙 参数	拟合方程	R^2
60	径流率(Q)	$Q=7.8d^3-42.6d^2+75.6d-43.4$	0.795
	累计产流量(Q_t)	$Q_t=46.8d^3-266.3d^2+495.7d-297.2$	0.171
	产沙强度(S)	$S=37.8d^3-166.5d^2+203.4d-43.9$	0.763
	累计产沙量(S_t)	$S_t=79.1d^3-460.8d^2+882.6d-540.9$	0.222
100	径流率(Q)	$Q=-1403.1d^3+5884.7d^2-8218.8d+3823.2$	0.553
	累计产流量(Q_t)	$Q_t=-2749.1d^3+12338.0d^2-18353.0d+9057.5$	0.685
	产沙强度(S)	$S=-71.5d^3+295.7d^2-407.3d+1869.0$	0.528
	累计产沙量(S_t)	$S_t=-4009.4d^3+17969.0d^2-26687.0d+13154.0$	0.726
200	径流率(Q)	$Q=56.8d^3-252.4d^2+371.0d-177.4$	0.363
	累计产流量(Q_t)	$Q_t=1630.9d^3-8560.4d^2+14925.0d-8588.7$	0.330
	产沙强度(S)	$S=1101.0d^3-5018.3d^2+7568.9d-3769.6$	0.489
	累计产沙量(S_t)	$S_t=844.2d^3-4380.8d^2+7552.9d-4304.3$	0.265

2.6 地表粗糙度与水动力特征的关系

2.6.1 地表粗糙度与径流深和流速的关系 由表 2 可知, 地表粗糙度与流速有着密切的幂函数关系, $R^2>0.561$, 且随着冲刷强度的增强这种联系越为紧密。地表粗糙度与径流深度 h 仅在 100 L/h 的情况下拟合程度良好, R^2 为 0.607, 在其他冲刷强度下拟合程度较差。结果表明流速的变化过程可以反映地表粗糙度的变化趋势。

表 2 冲刷过程中地表粗糙度与径流深和流速的关系

冲刷强度/ (L · h ⁻¹)	径流参数	拟合方程	R^2
60	径流深(h)	$h=0.0294d^{0.6205}$	0.190
	流速(v)	$v=0.0088d^{1.9974}$	0.561
100	径流深(h)	$h=0.0325d^{2.9924}$	0.607
	流速(v)	$v=0.0061d^{6.8950}$	0.570
200	径流深(h)	$h=0.0837d^{1.1605}$	0.269
	流速(v)	$v=0.0324d^{3.8829}$	0.583

2.6.2 地表粗糙度与坡面流流态的关系 由表 3 可知, 地表粗糙度与流态呈幂函数关系, 且当冲刷流量增大时, 地表粗糙度与雷诺数和弗劳德数拟合程度越高, 其紧密关系越明显, 其中当冲刷流量为 100, 200 L/h 时, 拟和方程的 R^2 高于 0.560, 说明冲刷强度越大, 地表粗糙度和坡面流流态的关系越紧密。流态的变化规律可以反映地表粗糙度的变化趋势, 即当坡面流态为层流时, 地表粗糙度随着坡面流缓流—急流的转变过程不断变化; 当冲刷强度较小时, 这种关系则不能体现出来。

2.6.3 地表粗糙度与坡面流阻力的关系 由表 4 可知, 地表粗糙度与阻力系数和曼宁粗糙系数拟合程度较差, 说明在天然坡面的冲刷过程中, 坡面阻流特征和地表粗糙度之间无明显联系。分析其原因是坡面流动阻力系数表征水流与水槽侧壁摩擦的阻流作用, 曼宁糙率系数表征坡面径流在运动过程中除受动能和重力势能作用下的地表阻滞作用。地表粗糙度受水流水槽侧

壁摩擦作用及动能和重力势能的影响较小^[13]。

表 3 冲刷过程中地表粗糙度和流态的关系

冲刷强度/ (L·h ⁻¹)	流态参数	拟合方程	R ²
60	雷诺数(Re)	$Re=11.9490d^{0.2938}$	0.088
	弗劳德数(Fr)	$Fr=0.7649d^{-0.6370}$	0.283
100	雷诺数(Re)	$Re=48.6850d^{1.8109}$	0.660
	弗劳德数(Fr)	$Fr=1.5935d^{-1.5370}$	0.560
200	雷诺数(Re)	$Re=26.7300d^{0.7772}$	0.724
	弗劳德数(Fr)	$Fr=1.7359d^{-1.0430}$	0.624

表 4 冲刷过程中地表粗糙度与坡面流阻力的关系

冲刷强度/ (L·h ⁻¹)	阻力、 粗糙系数	拟合方程	R ²
60	阻力系数(f)	$f=2.4151d^{1.2576}$	0.287
	曼宁粗糙系数(n)	$n=0.0156d^{0.6912}$	0.287
100	阻力系数(f)	$f=0.6015d^{2.8647}$	0.426
	曼宁粗糙系数(n)	$n=0.0284d^{1.4623}$	0.394
200	阻力系数(f)	$f=0.5112d^{1.8387}$	0.174
	曼宁粗糙系数(n)	$n=0.0248d^{1.1128}$	0.187

2.6.4 地表粗糙度与侵蚀动力特征的关系 坡面流在对坡面进行冲刷时对坡面的破坏能力与流体做功特征和地表粗糙程度具有一定的联系。由表 5 可知,当冲刷强度高于 100 L/h 时,地表粗糙度与水流剪切力符合幂函数的拟合关系, $R^2>0.634$;地表粗糙度与水流功率符合幂函数的拟合关系, $R^2>0.547$ 。当冲刷强度较大时,地表粗糙度的变化可以通过水流剪切力和水流功率数值波动来反映,而冲刷强度较小时,这种关系则并未体现。

表 5 冲刷过程中地表粗糙度与侵蚀动力特征的关系

冲刷强度/ (L·h ⁻¹)	侵蚀动力 参数	拟合方程	R ²
60	水流剪切力(τ)	$\tau=0.50d^{0.6205}$	0.190
	水流功率(ω)	$\omega=0.02d^{0.2938}$	0.088
100	水流剪切力(τ)	$\tau=0.62d^{2.7367}$	0.634
	水流功率(ω)	$\omega=0.08d^{1.8109}$	0.660
200	水流剪切力(τ)	$\tau=1.33d^{1.3198}$	0.640
	水流功率(ω)	$\omega=0.21d^{0.8214}$	0.547

2.7 地表粗糙度与侵蚀特征参数的相关性分析

在坡面土壤侵蚀过程中,径流状态和地表形态随着时间不断变化,表征坡面形态参数和径流泥沙以及水动力等特征的参数也在各个时段同时变化,研究在冲刷过程中地表粗糙度和径流泥沙以及水动力参数之间的相关关系可以揭示冲刷过程中各类型因子之间的互馈机制。本文采用 R 语言中“ggplot”软件包的 Mantel 分析研究地表粗糙度 and 各侵蚀特征参数的相关性。图 9 中的“Mantel’s p”的不同灰度表示不同统计显著性,值域范围越小,显著性越高;“Mantel’s r”表示线宽,线段越宽,相关性越高;两两相关则用

不同灰度梯度表示皮尔森相关系数^[24]。

由图 9 可知,在 Mantel’s $p<0.05$ 水平下,60 L/h 冲刷强度时,地表粗糙度和产沙强度具有极显著相关性;100 L/h 冲刷强度下,地表粗糙度和径流率具有极显著相关性,与累计径流量、累计产沙量、径流深、雷诺数、弗劳德数和径流功率具有显著相关性;200 L/h 冲刷强度下,地表粗糙度与雷诺数以及径流功率具有极显著相关关系,与径流率、产沙强度以及径流深有显著相关性。随着冲刷强度的增大,地表粗糙度的变化规律由产流产沙特征向水动力参数特征转变。

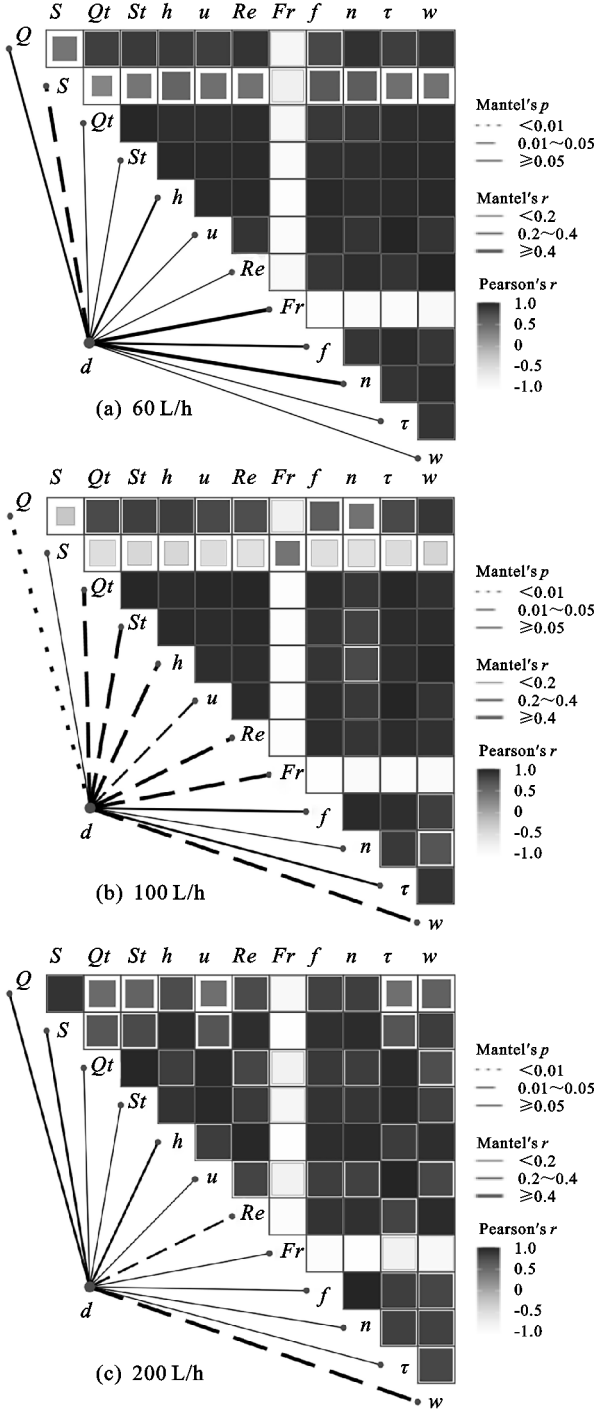


图 9 不同冲刷强度下地表粗糙度与侵蚀特征参数 Mantel 相关分析

3 讨论

冲刷强度对坡面径流产沙、水力学特征以及地表粗糙度具有明显的影响,本研究中,雷诺数与弗劳德数随着冲刷流量的增加而增大,流量增加后,地表径流的侵蚀力逐渐增强,地表结构开始被破坏,出现坑洼、细沟等微地形地貌,这些因素都导致水流紊动程度加大,径流侵蚀力和输移能力随之加强,该结果与肖丛宇等^[25]、张科利等^[26]的研究结果一致。随冲刷流量增大,径流深逐渐增加,阻力系数、曼宁糙率系数逐渐下降,表明坡面对径流的阻滞作用随冲刷流量的增加而减弱,水流剪切力与水流功率随冲刷流量的增大均呈增加趋势,表明径流剥蚀搬运土壤颗粒的能力加强。水流功率增加,径流对土壤做功的速率逐渐加大,这与田野^[27]的研究结论一致。本试验地表粗糙度的变化趋势具有较大的波动性和复杂性,地表粗糙度值的大小变化范围仅为 1.31~2.31 mm,这与人工填土试验的条件相差较大,可能导致对试验结果有一定的影响。在天然裸露砒砂岩坡面上进行冲刷试验,较小冲刷强度下的地表粗糙度变化较小,而在较大的冲刷强度下地表粗糙度的变化较明显,导致试验结果出现波动性。苏涛等^[28]在研究中指出,径流在坡面形成后受到各种类型的阻力作用,阻力作用的大小不仅影响径流流速,并且与土壤的抗侵蚀能力有关,径流阻力主要来自沙粒本身对坡面径流的阻碍作用、沟槽的形态对径流的阻碍作用和水流所挟带泥沙的影响,可能是导致地表粗糙度变化不规律的重要因素。

从地表粗糙度和产流产沙的关系来说,在较小的冲刷强度(60 L/h)下,地表粗糙度与径流率、土壤流失率的拟合结果较好,但在 100,200 L/h 下,拟合程度较差, $R^2 < 0.5$ 。坡面产流产沙特征受砒砂岩岩性、土壤性质、地表状况、含泥沙量和植被状况等因素的影响。伍艳^[29]研究指出,砒砂岩中的总体养分含量低,长石含量在 23%~56%,在当地恶劣的气候因素影响下,长石风化可能性高,容易破坏岩石结构而影响其抵抗侵蚀的性能。由于试验在野外进行,岩石结构或风化程度均不相同,较强的冲刷强度使得地表粗糙度和产沙率的变化具有较强的波动性。赵龙山^[30]研究表明,在砒砂岩坡面,垂直于坡面方向上的入渗规律表现出从非均匀到均匀的过渡变化。但随着入渗锋面深度的增加,影响则会减小,这种土壤入渗性能的变化也会影响地表粗糙度的变化。

从地表粗糙度和水动力特征的关系来说,在 60,200 L/h 流量条件下,地表粗糙度与各水动力学参数的拟合结果并不理想, R^2 均 < 0.5 ;在 100 L/h 流量条

件下,地表粗糙度与各水动力学参数的拟合结果相对良好。本试验地表粗糙度与径流弗劳德数呈负相关,表明砒砂岩坡面径流的动能与势能随地表粗糙度的增大有一定下降,水流的惯性力逐渐小于重力,径流呈现由急流向缓流变化的趋势;阻力系数随着地表粗糙度的增大而增大,粗糙度的增加使表层阻力增大,水流能量减小,径流侵蚀土壤的能力下降;径流深也随着地表粗糙度的增大呈增长趋势,这与施明新等^[13]的研究结果一致。但在本研究中,地表粗糙度与雷诺数在本试验条件下呈正相关关系,即砒砂岩坡面雷诺数随地表粗糙度的增大而增大,这与施明新等^[13]研究结果相反,其原因可能为本试验在天然裸露砒砂岩坡面进行,而该试验条件下的坡面水流多为动床非恒定沿程变量流,雷诺数的变化除受地表粗糙影响外,还受下垫面水分含量、土壤性质及砒砂岩特殊岩性影响较大。此外,本试验设计的冲刷时间仅为 30 min,可能导致试验所得规律与实际降雨情况下更长冲刷时间所反映的规律有所出入。并且在冲刷过程中水流的惯性力、黏滞力以及薄层水流的厚度沿坡面如何变化,水流流线交叉引起的力学变化有何规律,现有的常用于明渠水流流态的判定标准在坡面的适用性等问题仍需进一步进行深入讨论研究。因此,本试验仅在已有条件下,作为相关研究领域的补充,在研究地表粗糙度对砒砂岩各水动力学特征参数的影响方面,还需要结合砒砂岩岩性进行更多定性定量的试验进行验证。

4 结论

(1)随着冲刷强度的增大,径流率、累计径流量以及 19 min 以后的产沙强度和累计产沙量呈现增大趋势。冲刷强度增大,坡面流的流速、径流深度、流态特征参数以及侵蚀动力特征参数增大,而阻力特征参数降低。随着冲刷时间的增加,弗劳德数呈现降低趋势,其他水力学参数呈增大趋势。3 种冲刷流量条件下,雷诺数的值均 < 500 ,径流处于层流状态,但当冲刷强度增大时,弗劳德数则呈现流态缓流向急流转化的规律。

(2)地表粗糙度随着冲刷流量的增大未呈现明显的变化规律。当冲刷流量较小时(低于 100L/h),地表粗糙度与产流产沙特征参数的关系较为密切,但当流量较大时,这种密切联系将会被打破。

(3)流速与地表粗糙度有显著的幂函数关系($R^2 > 0.561$)是反映地表粗糙度变化的最优参数。冲刷强度较大时流态、侵蚀动力特征参数的变化规律可以反映地表粗糙度的变化趋势;当坡面流态为层流时,地

表粗糙度会随着坡面流缓流—急流的转变过程而不断变化;当冲刷强度较小时,这种关系则并不能体现出来。

(4)通过 Mantel 相关分析发现,随着冲刷强度的增大,裸露砒砂岩区坡面土壤侵蚀过程中地表粗糙度的变化规律由产流产沙特征反映向水动力参数特征反映转变。

参考文献:

[1] Yang F S, Bi C F, Cao M M, et al. Simulation of sediment retention effects of the doubleseabuckthorn plant fledible dams in the Pisha Sandstone area of China[J]. Ecological Engineering,2014,71:21-31.

[2] Liang Z S, Liu H W, Zhao Y B, et al. Effects of rainfall intensity, slope angle, and vegetation coverage on the erosion characteristics of Pisha sandstone slopes under simulated rainfall conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research,2020,27(15):17458-17467.

[3] Wang Y C, Wu Y H, Kou, Q, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification[J].Science of Soil and Water Conservation,2007,5:14-18.

[4] Zheng Z C, He S Q, Wu F Q.Changes of soil surface roughness under water erosion process[J].Hydrological Processes,2014,28(12):3919-3929.

[5] 张建文,李鹏,高海东,等.覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的响应关系[J].干旱区研究,2020,37(3):757-764.

[6] 何淑勤,秦凤,宫渊波,等.横垄坡面地表糙度的变化特征及其对片蚀的响应[J].水土保持学报,2018,32(1):54-58.

[7] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(10):3050-3056.

[8] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.

[9] Chu X F, Yang J, Chi Y P. Quantification of soil random roughness and surface depression storage: Methods, applicability, and limitations[J]. Transactions of the ASABE,2012,55(5):1699-1710.

[10] 张娜娜,王兵,张宝琦,等.地表糙度测定方法研究[J].水土保持学报,2020,34(1):135-140,148.

[11] 梁心蓝,赵龙山,吴佳,等.地表糙度与径流水动力学特征参数响应规律模拟[J].农业工程学报,2014,30(19):123-131.

[12] 刘洋,孙保平,杨坪坪,等.模拟植被地表覆盖率与地表粗糙度对坡面流速的影响[J].浙江农业学报,2017,29(3):498-505.

[13] 施明新,李陶陶,吴秉校,等.地表粗糙度对坡面流水水动力学特征参数的影响[J].泥沙研究,2015(4):59-65.

[14] 张建文,李鹏,高海东,等.覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的响应关系[J].干旱区研究,2020,37(3):757-764.

[15] 庞延杰,丁文峰,李清溪,等.粗糙度对坡面侵蚀及泥沙分选性影响试验研究[J].人民长江,2017,48(17):28-33.

[16] 孙佳乾.黄土坡耕地地表粗糙度与作物根茎对坡面流侵蚀影响的水动力学研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.

[17] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砒砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律[J].水土保持学报,2021,35(3):111-118.

[18] An J, Zheng F L, Lu J, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions[J].Soil Science,2012,177(8):517-526.

[19] 汤珊珊,李占斌,鲁克新,等.覆沙坡面水动力学参数与径流产沙的关系[J].农业工程学报,2017,33(20):136-143.

[20] 闫帅旗,朱冰冰,边焜.不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征[J].农业工程学报,2021,37(3):116-123.

[21] 钱秋颖,秦富仓,李龙,等.自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J].水土保持学报,2021,35(3):46-52.

[22] 张永东,吴淑芳,冯浩,等.黄土陡坡细沟侵蚀动态发育过程及其发生临界动力条件试验研究[J].泥沙研究,2013(2):25-32.

[23] 文慧,倪世民,冯舒悦,等.赣南崩岗的发育阶段及部位对土壤水力性质的影响[J].农业工程学报,2019,35(24):136-143.

[24] Yuan M M, Guo X, Wu L W, et al. Climate warming enhances microbial network complexity and stability[J].Nature Climate Change,2021,11:343-348.

[25] 肖丛宇,程金花,姜群鸥,等.台田措施下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J].水土保持学报,2019,33(4):10-15.

[26] 张科利,钟德钰.黄土坡面沟蚀发生机理的水动力学试验研究[J].泥沙研究,1998(3):76-82.

[27] 田野.不同宽度条件下坡面流水动力学特性研究[D].福州:福建农林大学,2019.

[28] 苏涛,张兴昌.砒砂岩陡坡面径流水动力学特征[J].水土保持学报,2012,26(1):17-21.

[29] 伍艳.黄河中游砒砂岩物化特性与侵蚀机理研究及小流域二元治理模式集成与示范[D].北京:中国地质大学,2020.

[30] 赵龙山.黄土地地表糙度特征及其对入渗、产流产沙的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.