

# 不同人为管理措施坡面地表微地形变化特征及其对渗流的响应

杨斐雄, 郑子成, 李廷轩, 王永东

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 探究不同人为管理措施坡耕地地表微地形变化特征, 阐明地表微地形变化对渗流响应, 以为紫色土坡耕地水土流失的有效防治与人为管理措施的合理布设提供科学依据。以平整坡面、穴播坡面和垄作坡面为研究对象, 基于室内人工模拟渗流试验, 开展 5° 和 15° 紫色土坡面微地形变化特征研究。结果表明: (1) 渗流试验前后平整坡面、垄作坡面和穴播坡面微地形半方差函数在 0~135° 和 180°~315° 方向上呈中心对称分布, 随地表坡度的增加分布范围逐渐缩小, 且具有明显的方向性。渗流条件下, 平整坡面和穴播坡面微地形各向异性的变化趋势较为一致, 而垄作坡面微地形空间变异性较强。(2) 渗流条件下, 3 种人为管理措施坡面高程均集中于 -20~0 mm 的变化区域, 穴播坡面和垄作坡面高程值的分布较平整坡面离散。(3) 与 5° 坡面相比, 15° 平整坡面地表糙度的变化对渗流的响应更为明显, 且糙度变化率呈平整坡面 > 穴播坡面 > 垄作坡面; 渗流作用下, 各坡面中、下坡位地表糙度变幅较大。坡面初始起伏程度越剧烈, 微地形对渗流侵蚀作用的骤变响应越明显。地表糙度可作为刻画坡面微地形响应渗流变化的指标, 可较好地实现中、下坡位土壤侵蚀—沉积空间分布的表征, 以为阐明紫色土坡面微地形变化与渗流侵蚀的耦合关系提供理论依据。

**关键词:** 渗流; 人为管理措施; 空间变异; 地表糙度; 紫色土

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2023)03-0073-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.010

## Variation Characteristics of Slope Surface Microtopography and Its Response to Seepage Under Different Artificial Management Measures

YANG Feixiong, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan, WANG Yongdong

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

**Abstract:** In order to explore the characteristics of slope surface microtopography (SSM) change of slope farmland under different artificial management measures, and clarify the response of SSM change to seepage, so as to provide a scientific basis for the effective prevention and control of soil erosion and the reasonable layout of artificial management measures, this study took the flat slope (CK), artificial digging slope (AD) and ridge tillage slope (RT) as the research object. Based on simulated seepage experiment, the variation characteristics of SSM on 5° and 15° purple soil slopes were studied. The results showed that (1) The semivariogram of SSM on the three slopes showed a central symmetric distribution in the directions of 0~135° and 180°~315° before and after the seepage test, and the distribution range gradually decreased with the increasing of slope gradients and exhibited obvious directivity. Under seepage condition, the variation trend of SSM anisotropy on CK and AD was relatively consistent, while the spatial variability of SSM on RT was strong. (2) Under seepage condition, the range of elevation variation on the three kinds of slopes was mainly concentrated in -20 mm to 0 mm, and the distribution of slope elevation of relative rough slopes (AD and RT) was more dispersal compared with CK. (3) Compared with 5° slope, the response of soil surface roughness (SSR) change to seepage was more obvious on 15° flat slope. The change rate of SSR followed the order of CK > AD > RT. Under seepage condition, the SSR varied greatly at the midslope and downslope. The more intense the initial fluctuation of slope surface was, the more obvious the abrupt change response of SSM

**收稿日期:** 2022-09-19

**资助项目:** 国家自然科学基金项目 (42177316)

**第一作者:** 杨斐雄 (1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事紫色土土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: feixiongyang8048@163.com

**通信作者:** 郑子成 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

to seepage erosion. In this study, soil surface roughness could be used as an indicator for describing the response of SSM changes to seepage condition, which could efficiently characterize the spatial distribution of soil erosion-deposition at the middle and downslope, so as to provide a theoretical basis for clarifying the coupling relationship between the variation of SSM and seepage erosion on purple soil slope.

**Keywords:** seepage; artificial management measures; spatial variation; soil surfer roughness; purple soil

西南紫色土区隶属于全国水土保持区划一级分区,是我国西部重点开发区和农产品生产区。紫色土作为该区第一大土壤类型,集中分布于长江中上游,以四川盆地最为集中。因其具有独特的“岩土二元结构”,坡面蓄水能力有限,降雨过程中壤中流随下伏母质层顺坡流动,极易在坡面中下部形成渗流<sup>[1-2]</sup>。因而,紫色土坡面产流模式具有地表径流和渗流的双重水文特征。与单一降雨作用相比,渗流侵蚀力易使土层内部形成“空洞”,土壤团聚体稳定性降低,其土壤可蚀性增加 5.64 倍<sup>[3]</sup>,改变坡面土壤侵蚀—沉积的空间分布,致使土壤侵蚀机制由剥离受限向搬运受限转变,紫色土区水土流失面积仅比 2020 年同期减少 1.32%<sup>[4]</sup>,加剧坡面微地形变化的复杂程度<sup>[5]</sup>。

在雨滴击溅、径流冲刷以及细沟发育过程中,坡面微地形不同区域起伏响应变化各异<sup>[6-7]</sup>,致使径流的形成、演化及其侵蚀产沙量具有差异特征<sup>[8-9]</sup>,是揭示土壤侵蚀特征和水流动力学互反馈过程的关键。郑良勇等<sup>[10]</sup>基于 REE—INAA 研究坡面侵蚀泥沙来源,下坡位微地形变化对侵蚀泥沙贡献率高达 80%。唐辉等<sup>[11]</sup>研究得出,坡面微地形因子与产流产沙过程存在极显著正相关。基于降雨条件下坡面微地形的空间差异特性,地表糙度可作为较好的粗糙坡面侵蚀预测因子<sup>[12-13]</sup>。因此,厘清渗流条件下坡面微地形变化特征,对于揭示紫色土坡面渗流侵蚀机理具有重要作用。

紫色土二元结构坡面土壤水分入渗特性具有明显空间差异性<sup>[3,14]</sup>,渗流的侵蚀作用有异于单一降雨作用,但渗流存在于土体内部难以观测。目前,主要探讨降雨—渗流耦合作用的土壤侵蚀机理,且仅在坡面水蚀动力特征或泥沙颗粒级配特征<sup>[1,15]</sup>方面研究较多。同时,虽有学者<sup>[16-17]</sup>涉及坡面微地形对渗流的响应,但由于各微地形参数能否适用于渗流侵蚀过程并未明确,多定性描述坡面微地形变化特征,缺乏量化研究渗流对坡面微地形影响及其与土壤侵蚀相互作用机制。针对渗流作用如何影响地表微地形变化,通过平整坡面、穴播坡面和垄作坡面 3 种人为管理措施分别模拟不同地表微地形起伏状况,探讨渗流作用对地表微地形空间分布特征的影响,弄清坡面微地形对渗流作用的响应变化,以期揭示渗流发育坡面土壤侵蚀机制提供理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

供试土壤采集于沱江流域响水滩小流域耕层(0—20 cm)土壤,土壤类型为石灰性紫色土,pH 为 8.0,土壤容重 1.20 g/cm<sup>3</sup>,土壤砂粒含量 49%,粉粒含量 29%,黏粒含量 22%,土壤质地为黏壤土。

### 1.2 测定项目与方法

采用室内渗流模拟试验,并于 2021 年 9—12 月在四川农业大学土壤侵蚀实验室内完成。设计坡度为 5°和 15°;根据研究区多年水文资料记录的降雨频率和坡面产流特点,设计渗流流量为 4 L/min。

1.2.1 土槽布设 采用钢制冲刷土槽规格为 4 m×0.8 m×0.5 m。土槽前端设置柱状集流槽,用于收集径流和泥沙,坡度通过液压装置调整。试验前将供试土壤自然风干并过 1 cm 筛,除去杂草和石块。装填试验土壤前,先在试验土槽底部填入 10 cm 的碎石与砂土,覆盖透水细纱布,确保试验土层的透水状况接近于天然坡面。采用分层填土法,依次向上铺设厚度为 15 cm 的砂土和 20 cm 的供试土壤,边填土边压实,尽可能减少边际效应的影响。基于研究区实地调查情况,试验土槽土壤平均容重保持在 1.20 g/cm<sup>3</sup>,含水量控制在 8%。

在试验土槽内,采用人为管理措施,模拟不同微地形起伏状况。(1)平整坡面(CK):通过人工整地,整平坡面;(2)穴播坡面(AD):由坡底至坡顶用锄头锄挖成穴,深度 7 cm,间距 15 cm;(3)垄作坡面(RT):沿水平方向上开沟起垄,垄高 15 cm,垄距 80 cm,垄宽 40 cm。

1.2.2 渗流试验 依据坡长将 4 根长 0.75 m、管壁均匀布设 5 个孔径为 2 mm 的渗流管,用纱布包裹后放置于距土槽底 5 cm 处,向土槽内平缓供水,保证土壤水分变化一致。试验装置示意图 1。

通过渗流水位控制槽内水位高于土槽内坡面水流水位,即  $\Delta H > 0$ ,在此水头差作用下,水流自下而上对试验土槽供水,直至发生渗流。

### 1.2.3 地表微地形空间变异与地表糙度

(1)空间变异性分析。采用三维激光扫描仪测定渗流前后坡面微地形起伏状况,每个坡面至少获取 60 000 个高程点云数据,水平和垂直分辨率均为 1 mm,利用 ArcGIS 10.5 和 Surfer 20.0 软件构建坡面数字高程模型(DEM)。通过对渗流前后 DEM 叠

加进行减法运算,获取各坡面地表高程变化量,将侵蚀过程中坡面地表高程变化量<0 mm 的区域占比定义为侵蚀分布比。

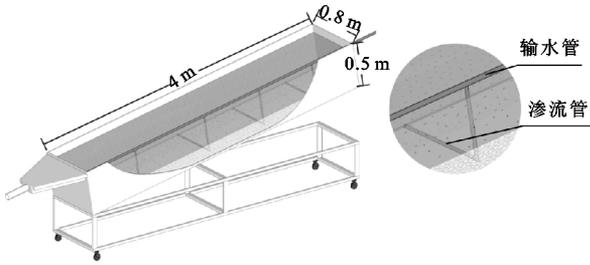


图 1 试验装置示意

基于各向异性表征坡面微地形的空间变异。选择在 0,45°,90°,135°,180°,225°,270°,315° 8 个方向上构造半方差函数  $r(h)$ ,其中 90°为正北方向;通过 K-S 值进行正态分布检验,判别系数( $R^2$ )越大,残差平方和(RSS)越小,则可较为真实地模拟渗流前后坡面的空间分布变化特征。计算公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

用各向异性比  $K(h, \theta)$  来描述微地形的各向异性特征。计算公式为:

$$K(h, \theta) = r(h, \theta_1) / r(h, \theta_2) \quad (2)$$

式中: $h$  为采样高程点间的滞后距离(mm); $Z(x_i)$  为空间位置  $x_i$  处的高程(mm); $N(h)$  为坐标对的个数; $r(h, \theta_1)$ 、 $r(h, \theta_2)$  分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  方向上的半方差函数值。如果  $K(h, \theta)$  等于或接近于 1,为各向同性,否则为各向异性。

表 1 不同坡面高程半方差函数拟合模型特征值

坡度/(°)	扫描顺序	人为管理措施	K-S 值	拟合模型	RSS	$R^2$
5	渗流前	平整坡面	0.05	Gaussian	1.83E-04	0.997
	渗流后		0.08	Gaussian	1.75E-04	0.996
	渗流前	穴播坡面	0.05	Gaussian	6.68E-05	0.994
	渗流后		0.06	Gaussian	8.25E-05	0.993
	渗流前	垄作坡面	0.06	Gaussian	4.78E-04	0.960
	渗流后		0.07	Gaussian	1.39E-04	0.985
15	渗流前	平整坡面	0.06	Gaussian	2.14E-04	0.997
	渗流后		0.06	Gaussian	1.67E-04	0.997
	渗流前	穴播坡面	0.06	Gaussian	1.70E-04	0.997
	渗流后		0.05	Gaussian	1.64E-04	0.997
	渗流前	垄作坡面	0.12	Gaussian	1.85E-04	0.996
	渗流后		0.09	Gaussian	1.36E-04	0.997

由图 2 可知,各坡面微地形的半方差函数在 0~135°和 180°~315°方向上呈中心对称分布,具有明显的方向性,其中,垄作坡面空间变异性对渗流作用的响应较其他坡面明显,改变半方差函数在各方向的分布特征。

随坡面微地形起伏程度增大,5°坡面各向异性比分布范围逐渐减小,平整坡面和穴播坡面的各向异性均在

(2)地表糙度。地表糙度提取采用地表栅格单元曲面面积与投影面积之比<sup>[18]</sup>。基于 ArcGIS 10.5 中 Surface Analysis Slope 工具,获得坡度栅格图层,然后在 Spatial Analyst 下使用 Raster Calculator 计算地表糙度( $R$ ),即

$$R = \frac{1}{\cos(S \times \pi / 180)} \quad (3)$$

式中: $S$  为分析窗口的坡度(°)。

基于高程条带法<sup>[19]</sup>,将坡面划分为上、中、下 3 个坡位,提取坡面高程变化曲线和地表糙度,表征渗流对各坡面不同坡位微地形的影响。

### 1.3 数据处理

采用 ArcGIS 10.5 软件构建不同坡面数字高程模型及高差、地表糙度的计算;采用 SPSS 27.0 软件对地表高程进行 Kolmogorov-Smirnov 检验;采用 GS+ 9.0 软件进行空间变异特征和各向异性分析;采用图表制作采用 Origin 2022、Surfer 20.0 和 Excel 2016 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 渗流条件下坡面微地形空间变异特征

经单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验,渗流前后不同人为管理措施坡面相对高程点云数据均服从正态分布,满足地统计学分析。由表 1 可知,渗流条件下,各坡面微地形空间分布最佳拟合模型均为 Gaussian 模型,其  $R^2$  均>0.95,且 RSS 数值较小(<5E-04),可较为真实地模拟渗流前后坡面空间变异特征。

90°和 270°方向最强;垄作坡面各向异性比均接近于 1,地表微地形的空间异质性变化特征较为一致,表现为明显的各向同性。相较于 5°坡面,15°坡面半方差函数值降低,其空间变异程度增强,各坡面各向异性比在 90°和 270°方向上的分布呈现趋同效应。因此,坡面空间变异性对渗流侵蚀变化具有敏感性,能在一定程度上反映渗流对坡面微地形垂直方向上的影响。

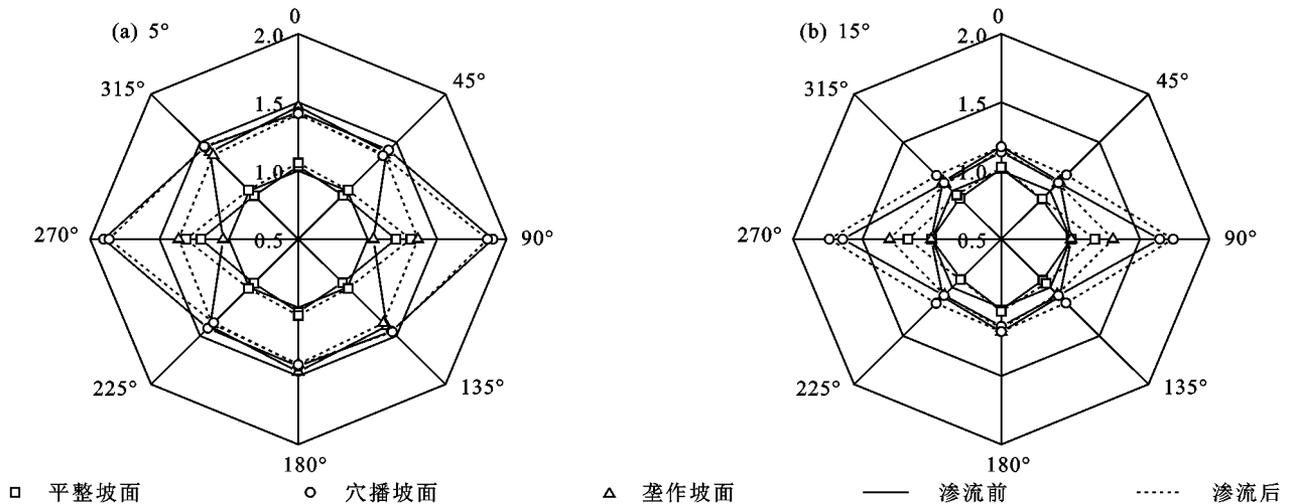
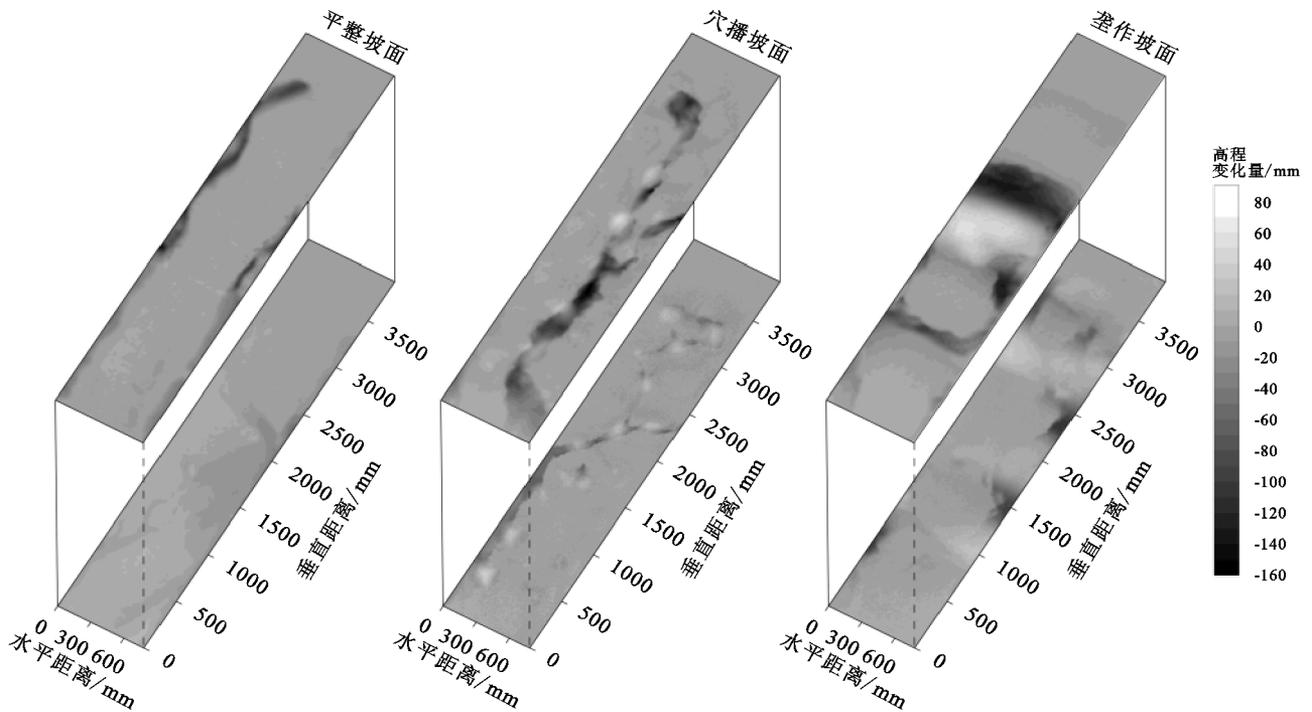


图 2 渗流前后不同坡面的各向异性特征

## 2.2 渗流条件下坡面高程的空间变化特征

由图 3 可知,坡面高程变化范围随微地形起伏程度增加而增加,波动变幅剧烈区域呈集中分布趋势,而其余区域以整体下沉 $-20\sim 0$  mm 的高程变化为主。 $5^\circ$ 条件下,平整坡面微地形以中下坡位土壤薄层剥蚀变化为主;垄作坡面和穴播坡面以溯源下切侵蚀占主导,微地形极易向上坡位迁移变化。穴播坡面各

洼地连通,坡面高程增幅区域呈斑块状分布于细沟沟道;横垄垮塌导致其在坡面(1.5~2.0,3.0~3.5 m)区域形成零星洼地。当坡度达到 $15^\circ$ 时,各坡面微地形高差变化范围有所扩大,细沟发育形态更加单一。平整坡面高程变化峰值区域向上坡位方向移动且分布集中;而垄作坡面和穴播坡面微地形在 1.5~2.5 m 区域发生明显坍塌,坡面侵蚀区与沉积区交替变化。



注:下图层为 $5^\circ$ 坡面;上图为 $15^\circ$ 坡面。

图 3 不同坡面高程变化分布特征

由图 4 可知,渗流所引起不同坡位横剖面相对高程的起伏变化具有局域性,随着坡度的增大,水平距离上由土壤颗粒引起相对高程的高频波动呈“夷平”趋势。 $5^\circ$ 坡面,各坡位相对高程均呈现出 $5\sim 20$  mm 微小波动变化,随坡面起伏程度增大,高程变幅加剧; $15^\circ$ 坡面,各坡位细沟发育受微地形起伏程度的影响较小,高程波动剧烈区域仅集中于固定水平距离,以

下切侵蚀占主导,相较于平整坡面和穴播坡面各坡位细沟形态,垄作坡面相对高程沿上坡位至下坡位整体呈现侵蚀—沉积—侵蚀的波动变化特征。

由表 2 可知,在整个渗流过程中,地表高程变化量主要集中在 $-20\sim 0$  mm,其中垄作坡面和穴播坡面高程变化较平整坡面剧烈,且分布范围较广。当坡度达到 $15^\circ$ 时,平整坡面、穴播坡面和垄作坡面侵蚀

分布比( $<0\text{ mm}$ )占比提高,分别由 66.23%,89.43% 和 73.93%增加至 96.60%,90.87%和 80.99%;各坡面高程变化范围呈现出扩张趋势,穴播坡面和垄作坡

面高程变化量 $<-100\text{ mm}$ 的占比是平整坡面的 5.16~23.20 倍。可见,渗流对粗糙坡面高程变化影响尤为明显,且坡度的增加使坡面渗流侵蚀剧烈。

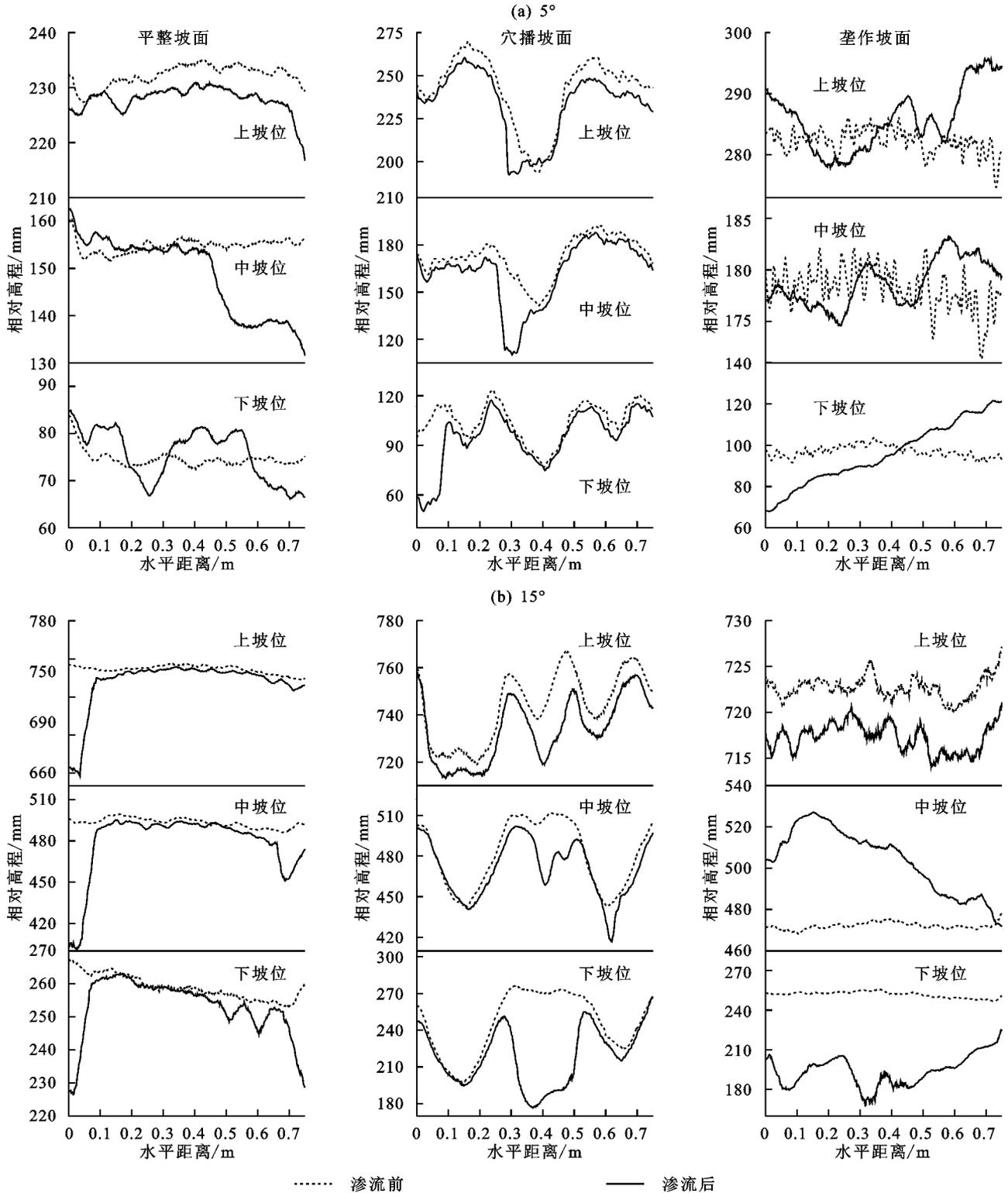


图 4 渗流前后不同坡位横剖面相对高程变化

### 2.3 地表微地形变化对渗流的响应

由图 5 可知,各坡面(除垄作坡面外)地表糙度较渗流前有所增长,且坡度越大糙度变幅响应越剧烈。相比平整坡面,5°条件下,垄作坡面和穴播坡面地表糙度变化幅度剧烈,其糙度变化率分别为-3.75%和

1.58%。当坡度增加至 15°时,平整坡面地表糙度变化率分别是穴播坡面和垄作坡面的 1.13,2.71 倍,各坡面地表糙度表现为由穴播坡面>垄作坡面>平整坡面向穴播坡面>平整坡面>垄作坡面的趋势转变,说明渗流和坡度共同作用不仅能改变地表糙度的大

小,还能对人为管理措施引起的糙度分布规律造成本 质性影响。

表 2 不同人为管理措施坡面高程变化量分布比例

单位: %

坡度/(°)	人为管理措施	<-100 mm	-100~-80 mm	-80~-60 mm	-60~-40 mm	-40~-20 mm	-20~0 mm	0~20 mm	>20 mm
5	平整坡面	0	0	0	0.14	2.70	63.39	33.77	0
	穴播坡面	0	0	0.36	2.34	3.94	82.80	10.19	0.37
	垄作坡面	0.28	0.87	1.49	2.47	6.50	62.33	24.13	1.93
15	平整坡面	0.25	1.60	2.52	2.89	7.89	81.45	3.40	0
	穴播坡面	1.29	2.50	3.24	4.13	7.06	72.66	8.67	0.45
	垄作坡面	5.80	2.84	3.77	4.56	7.53	56.49	12.51	6.50

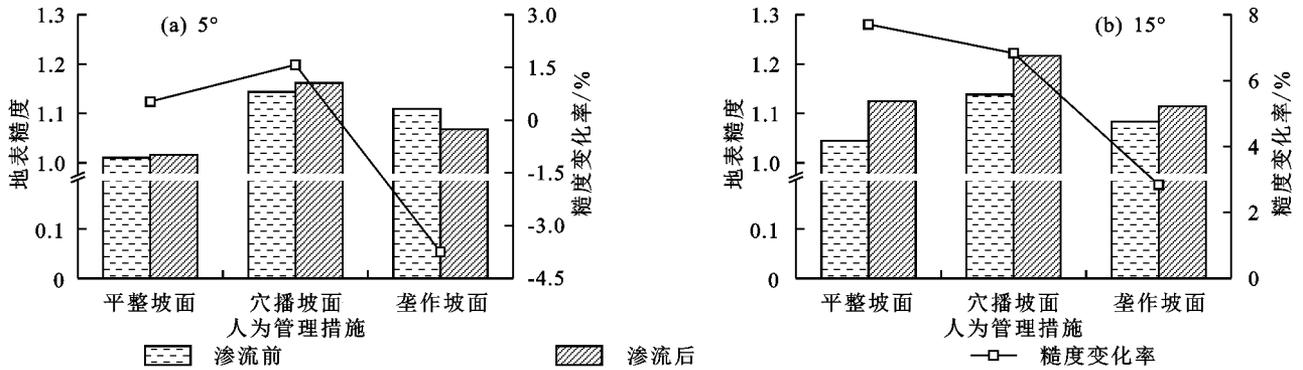


图 5 不同人为管理措施全坡面地表糙度变化对渗流的响应

渗流条件下,各人为管理措施坡面不同坡位的地表糙度变化趋势较为一致,具有明显空间差异特征,其变幅最剧烈的区域集中于中、下坡位(图 6)。平整坡面和穴播坡面地表糙度变化率沿上坡位到下坡位

均表现出先增后减的趋势,且在 15°条件下,中坡位的糙度变化率远高于垄作坡面;相较于平整坡面和穴播坡面,垄作坡面上、中坡位糙度变化率随坡度的增加而降低,下坡位地表糙度则呈增幅变化。

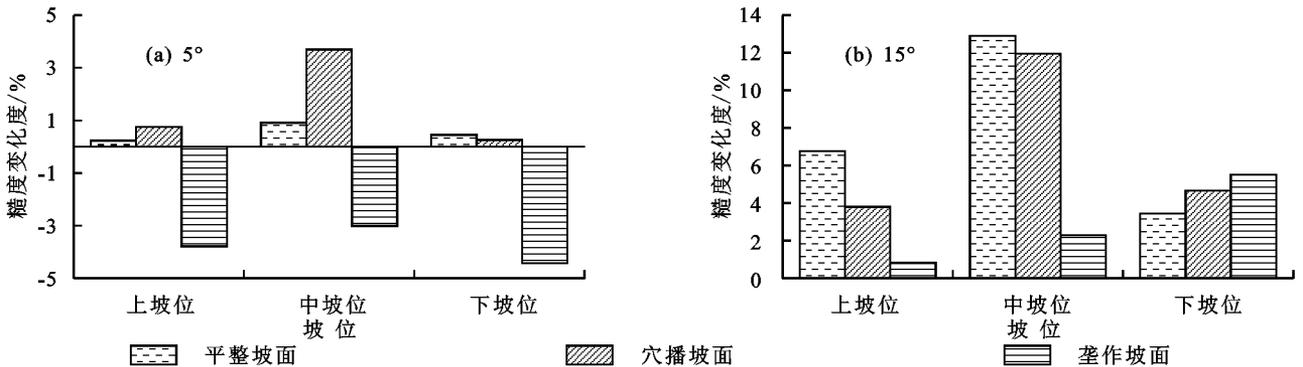


图 6 渗流条件下不同坡位地表糙度变化率

由图 7 可知,渗流条件下各坡面地表糙度与侵蚀分布比具有良好的线性关系,拟合系数  $R^2$  为 0.69 ( $p < 0.05$ ),呈显著正相关,说明渗流条件下,地表糙度能较为敏感地表征坡面渗流侵蚀分布特征。

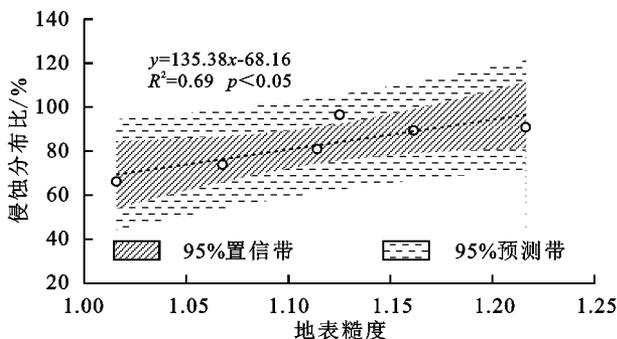


图 7 渗流条件下坡面侵蚀分布比与地表糙度的关系

## 3 讨论

### 3.1 渗流对坡面微地形空间分异特征的影响

本研究发现,相较于降雨单一作用,垂直坡面向上的渗流对土壤表层产生以点到面的侵蚀作用,在坡面中下部形成易于侵蚀区域<sup>[20]</sup>,坡面微地形对渗流的响应变化表现出跌坎—断续细沟—连续细沟的发展过程,与降雨过程中坡面所遵循溅蚀—片蚀—细沟侵蚀的演变规律有所差异。

在降雨作用下,坡面细沟分支逐级增多,形成复杂的细沟网络<sup>[21-22]</sup>。受紫色土孔隙几何结构与空间分布差异影响<sup>[23-24]</sup>,地表径流仅以股流的形式在坡面中呈不均匀分布,其所产生的渗流侵蚀力仅作用于相接触的土壤表层,坡面垂直方向上的细沟连通性增

强,加快跌坎—断续细沟—连续细沟的微地形变化速率<sup>[25]</sup>,导致各坡面 $90^\circ$ 和 $270^\circ$ 方向的空间变异特征对渗流侵蚀敏感程度提高,其中,垄作坡面由于自身沟垄相间的几何特征使其自相关性引起的空间变异性较强<sup>[26]</sup>,横垄垮塌致使由人为管理措施和坡度所形成的坡面空间结构特征发生骤变,其坡面各向异性特征逐渐与平整坡面和穴播坡面趋于一致,即渗流主要作用于坡面垂直方向上,导致微地形的变化具有局域性(图3)。因此,基于各向异性表征坡面微地形变化,能够较好地反映渗流侵蚀力对不同人为管理措施坡面空间分布格局的影响。根据微地形各向异性在坡面不同方向上的差异响应,为西南紫色土区坡面水土保持管理措施的改良提供参考。

随着渗流的持续进行,细小颗粒被优先携带出土壤表面,对粗颗粒间的洼地进行微量充填,坡面呈“流沙”状态,一方面,使具有高频波动的横剖面相对高程表现出“夷平”变化(图4);另一方面,土壤基质的流失导致土层内出现“空洞”,局部土壤表面塌陷,横剖面形态多为“窄深式”细沟,与Liu等<sup>[27]</sup>研究渗流作用下坡面细沟宽深比均 $>1$ ,其形态具有“宽浅式”特征不同。本研究中,3种人为管理措施坡面土壤均以搬作用大于沉积作用的微地形变化为主,平整坡面微地形凹凸分布差异小,导致地表高程在 $-20\sim 0$  mm的减小变化区域占比较大,且其分布的变化范围较小,随着坡度变化,泥沙沉积作用被削减程度剧烈,与Luo等<sup>[28]</sup>坡面高程对降雨作用响应变化的研究结果一致。相对于平整坡面,垄作坡面和穴播坡面的横垄和土丘易受渗流削高填低作用的影响,地表局部高程值降低,侵蚀泥沙以“滑坡”形式沉积于垄沟和坑洼导致部分区域地表高程增加,地表高程变化分布范围扩大,且侵蚀作用随坡度的增加而有所增强,地表高程骤变程度剧烈,横垄和土丘成为坡面侵蚀泥沙的“源”,加剧土壤侵蚀的发生。

### 3.2 地表微地形变化对渗流的响应

地表糙度主要是由土壤颗粒自身性状和人为管理措施引起的,坡面各高程点空间分布格局的随机性和复杂性使地表糙度在渗流的影响下呈此消彼长变化趋势。梁心蓝等<sup>[29]</sup>研究发现,降雨能减小相对粗糙坡面的地表糙度,而增加光滑坡面的地表糙度。顾小杰等<sup>[30]</sup>研究发现,近地表水流作用下,紫色土细沟剥蚀率随细沟长度的增大呈指数下降趋势,因而,坡面细沟发育程度的差异致使不同坡位地表糙度具有明显的空间变异性,加剧地表糙度对渗流作用响应变化的复杂程度。就平整坡面和穴播坡面而言,地表糙度呈增幅变化,且坡度越大增幅作用越强,主要是由于垂直向上的冲击力导致土层内部细颗粒沿粗颗粒

间的孔隙流失,加剧下切侵蚀速率,导致局部土壤表面塌陷成侵蚀穴或跌坎<sup>[31]</sup>,显著降低沟底区域的高程值,各点间的高程变化分布范围扩大。郑子成等<sup>[32]</sup>、赵龙山等<sup>[33]</sup>研究发现,模拟降雨试验中,垄作坡面地表糙度随坡度的增加均呈减小变化。本研究发现,垄作坡面地表糙度对渗流的响应表现出增加和减小作用相互拮抗且变化复杂的特征, $5^\circ$ 条件下,横垄垮塌产生的侵蚀泥沙集中在垄沟处沉积,微地形起伏程度被削弱,坡面地表糙度以减幅变化为主;由于渗流侵蚀力随坡度的增加而提高,坡面径流挟沙能力增强导致渗流对地表糙度的减幅作用被削减,地表糙度呈现增幅变化。

张建文等<sup>[34]</sup>研究发现,地表高程变化量可用来估算坡面土壤侵蚀量( $R^2=0.999$ ),因此,可基于侵蚀分布比进一步验证地表糙度在渗流条件中应用的可行性。通过分析得出,渗流条件下地表糙度在一定程度上能够量化表征坡面微地形对渗流侵蚀的响应。由于本文中未能涉及具体坡面产流产沙量的变化。因此,对于渗流侵蚀响应机制的研究,还需加强与实际侵蚀特征的关联性,进一步评估地表糙度对坡面土壤侵蚀的影响。

## 4 结论

(1)相对于平整坡面和穴播坡面微地形各向异性极为相似的变化趋势而言,渗流对垄作坡面空间变异性的影响较为剧烈,改变其半方差函数在不同方向的分布规律,各坡面间各向异性比呈现趋同效应,空间变异性均在 $90^\circ$ 和 $270^\circ$ 方向最强。

(2)渗流条件下,坡面微地形变化具有局域性。各人为管理措施坡面高程以减小变化为主,且相对粗糙坡面变化范围较广,其剧烈变化程度表现出垄作坡面 $>$ 穴播坡面 $>$ 平整坡面,降低坡面的蓄水保土能力。

(3)渗流主要通过影响坡面中下坡位糙度变化率使全坡面地表糙度表现出增大和减小作用并存的状态,能明显提高平整坡面和穴播坡面的地表糙度,而降低垄作坡面地表糙度的增幅程度,使其在 $5^\circ$ 条件下呈现出减幅变化。

### 参考文献:

- [1] Huang Y H, Li F H, Wang W, et al. Rill erosion processes on a constantly saturated slope[J]. Hydrological Processes, 2020,34(20):3955-3965.
- [2] 李彦海,陈晓燕,韩珍,等.紫色土细沟水流输沙能力对近地表水流作用的响应[J].土壤学报,2021,58(3):657-664.
- [3] Nouwakpo S K, Huang C H, Bowling L C, et al. Impact of vertical hydraulic gradient on rill erodibility and critical shear stress[J]. Soil Science Society of America

- Journal, 2010, 74(6):1914-1921.
- [4] 中华人民共和国水利部. 2021 年中国水土保持公报[R/OL]. (2022-07-13)[2022-09-19]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202207/t20220713\\_1585301.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202207/t20220713_1585301.html)
- [5] 安娟, 殷小琳, 李国会, 等. 雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1):50-55.
- [6] 赵龙山, 梁心蓝, 张青峰, 等. 裸地雨滴溅蚀对坡面微地形的影响与变化特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19):71-77.
- [7] Zhao L S, Fang Q, Hou R, et al. Effect of rainfall intensity and duration on soil erosion on slopes with different microrelief patterns [J]. *Geoderma*, 2021, 396: e115085.
- [8] Han Z, Wang X Y, Song D D, et al. Response of soil erosion and sediment sorting to the transport mechanism on a steep rocky slope[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(12):2467-2478.
- [9] Li L, Nearing M A, Polyakov V O, et al. Evolution of rock cover, surface roughness, and flow velocity on stony soil under simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 75(5):651-668.
- [10] 郑良勇, 李占斌, 李鹏, 等. 坡面侵蚀泥沙来源立体分布研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3):58-61.
- [11] 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.
- [12] 王莹, 郑子成, 李廷轩, 等. 水蚀过程中玉米生长季横垄坡面地表糙度变化及其与侵蚀量的关系[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6):31-37.
- [13] Wang F C, Xu G C, Li L, et al. Response relationship between microtopographic variation and slope erosion under sand-cover[J]. *Water*, 2019, 11(12):e2488.
- [14] Li D D, Chen X Y, Han Z, et al. Determination of rill erodibility and critical shear stress of saturated purple soil slopes[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(1):38-45.
- [15] 安娟, 陈新军, 宋红丽. 近地表水文条件对横坡垄作坡面褐土团聚体流失的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6):1411-1421.
- [16] Fox G A, Chu-Agor M L M, Wilson G V. Erosion of noncohesive sediment by ground water seepage: Lysimeter experiments and stability modeling[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(6):1822-1830.
- [17] Nouwakpo S K, Huang C H. The role of subsurface hydrology in soil erosion and channel network development on a laboratory hillslope[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4):1197-1211.
- [18] 汤国安, 李发源, 刘学军. 数字高程模型教程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] Fielding E J. Tibet uplift and erosion[J]. *Tectonophysics*, 1996, 260(1/3):55-84.
- [20] Chu-Agor M L, Fox G A, Cancienne R M, et al. Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 359(3/4):247-259.
- [21] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology[J]. *Geomorphology*, 2015, 231:193-201.
- [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] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22):167-174.
- [24] 冯小杰, 郑子成, 李廷轩, 等. 暴雨条件下紫色土区玉米季坡耕地氮素流失特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(4):738-749.
- [25] 王晨洋, 马超, 王玉杰, 等. 水力梯度影响下 WEPP 模型估计细沟侵蚀参数的可行性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):126-133.
- [26] 罗键, 尹忠, 郑子成, 等. 不同降雨条件下紫色土横垄坡面地表微地形变化特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16):3162-3173.
- [27] Liu L, Liu Q J, An J, et al. Rill morphology and deposition characteristics on row sideslopes under seepage conditions[J]. *Soil Use and Management*, 2015, 31(4):515-524.
- [28] Luo J, Wang N N, Zheng Z C, et al. Tillage-induced microtopography alters time-dependent intrinsic correlation of runoff and sediment yield[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 221:e105423.
- [29] 梁心蓝, 赵龙山, 吴佳, 等. 模拟条件下不同耕作措施和雨强对地表糙度的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(24):4840-4849.
- [30] 顾小杰, 陈晓燕, 韩珍, 等. 紫色土细沟剥蚀率对近地表水流作用的响应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):16-22.
- [31] Römken M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. *Catena*, 2002, 46(2/3):103-123.
- [32] 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.
- [33] 赵龙山, 侯瑞, 吴发启, 等. 不同农业耕作措施下坡耕地填洼量特征与变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12):249-254.
- [34] 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.