

# 模拟降雨条件下地表糙度动态变化特征研究

张 霞<sup>1</sup>, 贾莲莲<sup>2</sup>, 李占斌<sup>3,4</sup>, 于国强<sup>5</sup>, 武金慧<sup>6</sup>

(1. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061; 2. 水利部黄河水利委员会

黄河上中游管理局, 西安 710021; 3. 中国科学院 水利部 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, 陕西 杨凌 712100; 4. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安  
710048; 5. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054; 6. 中国水电顾问集团 西北勘测设计研究院, 西安 710065)

**摘 要:**地表糙度是影响土壤侵蚀的因素之一。为进一步明确地表糙度的侵蚀效应,通过野外模拟降雨试验,研究了地表糙度在降雨前后、不同坡度、不同植被覆盖度、不同空间坡段的动态变化特征,探讨了地表糙度变化规律及其影响因素。结果表明:在降雨过程中,土地利用类型、雨强、降雨顺序、坡度和植被覆盖度都会对糙度产生影响。随着降雨场次的增加,地表糙度逐渐增大;在试验范围内,坡度越大,地表糙度增加幅度越大,增加趋势越明显;植被覆盖度越大,地表糙度变化越小。坡面的各个坡段变化情况整体遵循上述规律,但在某些坡段内出现空间变异性,导致有些坡段可以拦蓄径流泥沙,消减侵蚀,而有些坡段可以增加潜在的冲刷,加剧侵蚀;多个因子以及因子间的交互效应成为影响糙度变化的主要因素。研究结果为揭示地表糙度的侵蚀特征提供了一定的理论依据,同时也为黄土高原水土流失治理奠定理论基础。

**关键词:**地表糙度; 降雨; 侵蚀; 动态变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)04-0016-05

## Study on Dynamical Variation Characteristics of Surface Roughness under Field Simulated Rainfall Condition

ZHANG Xia<sup>1</sup>, JIA Lian-lian<sup>2</sup>, LI Zhan-bin<sup>3,4</sup>, YU Guo-qiang<sup>5</sup>, WU Jin-hui<sup>6</sup>

(1. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, China;

2. Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of  
Water Resources, Xi'an 710021, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming  
on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of  
Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment  
Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 5. Xi'an Center of Geological Survey,  
China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 6. HydroChina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Soil surface roughness is one of the main factors affecting soil erosion. To further determine effects of soil surface roughness on the erosion, dynamical variation characteristics of surface roughness, variation regularity and affecting factors were obtained under following conditions, i. e. rainfall sequence, slope, vegetation coverage and spatial slope section through field simulated rainfall experiment. Results showed that surface roughness was always affected by the above factors during rainfall period. Soil surface roughness increased with rainfall events. The richer the vegetation coverage was, the less the surface roughness was. The steeper the slope was, the more increase extent of surface roughness was, and the more obvious of increase tendency was in experimental range. The variation rules of each slope section were overall following the above patterns, but there was spatial variability in some slope sections. Due to the spatial variability, some slope section's function was water storage and sediment reduction as well as erosion reduction. On the con-

收稿日期: 2011-11-29

修回日期: 2012-02-14

资助项目: 中国博士后基金(2011M501445); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2012JQ5001); 国家自然科学基金项目(40971161, 41071182); 国土资源部科研专项(201111020)

作者简介: 张霞(1982—), 女, 内蒙古包头人, 硕士, 工程师, 从事生态环境研究工作。E-mail: zhangxia20002000@163.com

通信作者: 李占斌(1962—), 男, 河南镇平人, 工学博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: zhanbinli@126.com

trary, the effect on sediment and runoff was potential flushing and erosion aggravation in other slope section. The factors and interaction effect were the main affecting factors on variation of surface roughness. The results provide theoretic basis for revealing the erosion characteristics through soil surface roughness, and at the same time, it can serve for controlling soil and water loss on the Loess Plateau.

**Key words:** surface roughness; rainfall; erosion; dynamical variation

地表糙度是影响土壤侵蚀的主要因子之一,也是当前土壤侵蚀过程研究的主要内容之一。地表糙度作为反映地表微地貌形态和物理性状的指标,不仅是影响地表水文学和水力学特性的一个重要特征值,而且影响着渗透速率<sup>[1]</sup>、地表径流<sup>[2]</sup>、地表凹陷处的蓄水量以及风蚀过程中土壤颗粒的跃迁和拦截<sup>[3]</sup>,同时它还与降雨、风、冻融、土壤类型、土壤团聚状况、耕作方式、耕作深度等关系十分密切<sup>[4]</sup>;另外一方面,地表糙度也受诸多因子影响,是多因素综合作用的结果,如降雨强度、地表径流、土壤性质、地面入渗率等,而至今这些方面的研究尚未形成统一的结论<sup>[5-7]</sup>。因此本研究通过野外自然条件模拟降雨试验,对降雨前后、不同坡度、不同植被覆盖度、不同坡段的地表糙度的动态变化特征及变化规律和影响因素进行研究,以期为揭示地表糙度侵蚀特征提供一定的理论依据。

1 实验材料与方法

1.1 研究区概况

野外降雨试验于 2009 年 6 月—2010 年 9 月在黄委会天水水保站进行。试验站位于黄土高原丘陵沟壑区第三副区罗玉沟流域,是我国西部的一个典型

地区<sup>[8-9]</sup>。该流域沟坡面积比为 0.153,沟壑密度达 3.54 km/km<sup>2</sup>。根据前人调查结果和实地勘测,大于 20°的坡面占流域面积 24.4%,小于 10°坡面占流域面积 20.3%,10°~20°坡面达到流域面积 43.9%,平均坡度为 18°。

流域内山地灰褐土为典型地带性土壤,占全流域土壤面积的 91.7%,植被覆盖度约占 30%,流域主要土地类型为农耕地、草地、林草地等。分别选取荒地、林草地、草地和坡耕地作为试验小区,小区具体情况如表 1 所示,所选试验小区可以基本反映流域内典型土地利用类型。

1.2 试验设计

试验采用下喷式降雨器,雨滴降落有效高度为 6 m。试验小区降雨面积皆为 2 m×10 m,四周用薄钢板隔离,土壤容重为 1.3 g/cm<sup>3</sup> 左右。每次降雨前率定雨强,控制雨量和均匀系数,使降雨达到要求。降雨均匀度达到 90%以上,每场降雨时间间隔 48 h,初次降雨前土壤含水率均在 13%左右,试验均是在无风条件下进行,降雨产流历时为 30 min。按照 1.5, 1.0,2.0 mm/min 雨强顺序分别在 4 个小区共进行了 12 场试验。

表 1 试验小区基本情况

编号	土地利用类型	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	土壤类型	平均坡度	初始覆盖度/%	初始含水率/%	植物
I	荒地	1.29	红油土	10°	8	12.8	冰草、车前
II	林地	1.22	黄绵土	20°~30°	78	19.3	刺槐、冰草、二裂菱菱菜
III	草地	1.25	黄绵土	20°	52	12.2	冰草、白蒿
IV	坡耕地	1.31	黄绵土	5°	21	14.5	紫花苜蓿、车前

1.3 地表糙度测量与分析

地表糙度的概念已受到人们的普遍重视,但到目前为止,它的野外测量和计算还没有一种较为理想的方法。现在常用的方法主要有测针法<sup>[10]</sup>、杆尺法<sup>[11]</sup>、链条法<sup>[12]</sup>、扫描法<sup>[13]</sup>。本文采用 Kuripers 提出的方法,即用字母 R 表示地表糙度,并用接触式测针法测定其高程值,然后经计算而得糙度值。通过式(1)计算糙度:

$$R=100\lg S \tag{1}$$

式中:R——地表糙度;S——各测点高程值的标准差。

Brough 等对接触式测针法的测针间距与地形起伏关系进行了试验研究,发现间距越小,测量结果越

精确<sup>[10]</sup>,但测量、收集和数据处理将需要大量的时间。因此,他建议在测量糙度时,可根据实际情况,将测针距离定在 25 mm 以下即可,且测定结果有极好的相关性,并能满足精度要求。

通过对各种测量方法进行比较分析以及试验条件限制,本研究选取测点法(测针法)作为糙度的测量方法。测量均选择在初始状态和放置 48 h 后,观测者在小区外部将水平测尺伸入小区内测量,不会对小区造成扰动,其中水平测尺共放置 80 个(200 cm/2.5 cm=80)测针,采用测点法测量地表到水平杆尺的相对高程。测量过程中,平行固定四周边框,水平测尺平行放置于边框之上;为避免植株影响,将测尺深入到地面表层,以减少测量误差。根据野外实际情况和

相关文献介绍,以每 2.5 cm 作为一个测点,共测量  $(1000 \times 200) \text{ cm} / (2.5 \times 2.5) \text{ cm} = 32000$  个点,按照式(1)计算地表糙度值。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表微地形变化特征

本研究采用测针法测得不同利用类型下,野外模

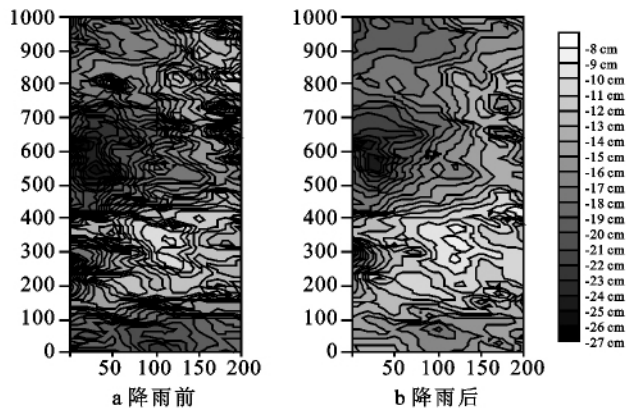


图 1 荒地降雨前后地表微地形变化

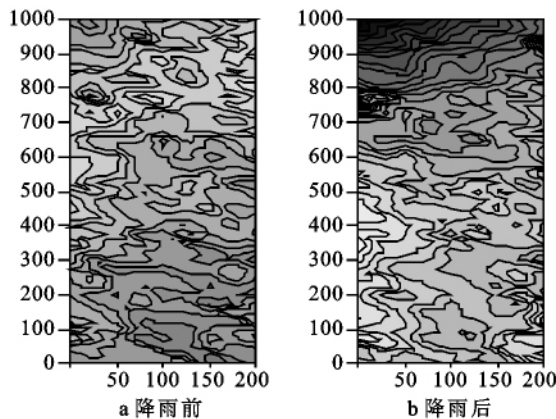


图 3 草地降雨前后地表微地形变化

表 2 降雨前后地表糙度值变化

土地利用 类型	初始地表 糙度	三场降雨后 地表糙度	增长 比率/%
荒地	46.16	59.00	27.82
林地	99.41	101.08	1.68
草地	37.17	67.28	81.01
坡耕地	58.43	64.48	10.35

3 场降雨过后各个土地利用类型坡面的地表糙度均有不同程度增大,在次降雨后也表现出类似的趋势。其中林地的糙度增幅最小,地表微地形变化程度最小;荒地和坡耕地的糙度增幅居中,其地表微地形变化程度居中;而草地糙度增幅最大,其地表微地形变化程度最为剧烈。总体来说,无论在何种土地利用类型下,随着降雨场次的增加,地表糙度均呈现增大的趋势。

随降雨次数的增加,地表糙度增大,表明地表糙度演化与降雨有关。雨滴击溅是降雨侵蚀早期阶段

拟降雨前后的地表高程(相对高程)数据,利用 Surfer 8.0 软件绘制各个坡面地表微地形图(图 1—4),图中横纵坐标单位均为 cm,黑色部分代表该处地形较低,白色部分代表该处地形较高。经过 3 场降雨之后,各个坡面中下部地表均有不同程度的抬升,而上部地表出现一定程度的下降,较降雨之前总体地面高程起伏程度加剧,但某些坡面局部地形较降雨前平坦(表 2)。

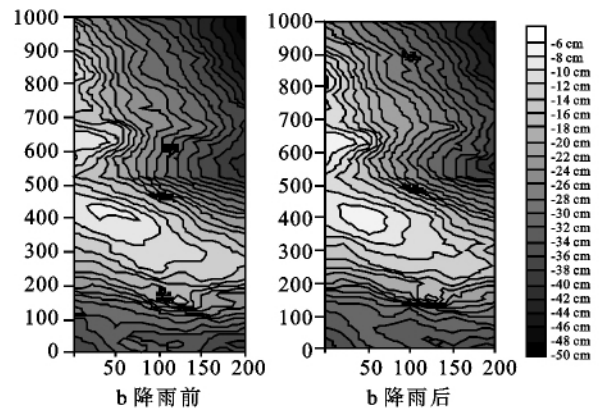


图 2 林地降雨前后地表微地形变化

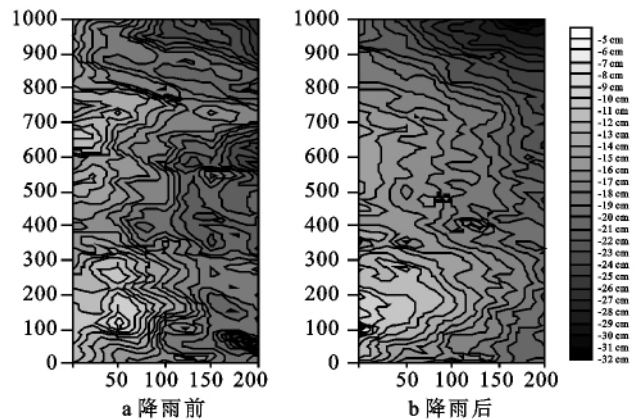


图 4 坡耕地降雨前后地表微地形变化

的作用形式,具有一定动能的雨滴,打击地表,不仅将地表土壤击实,还能使部分土粒分散,从而造成雨穴,开始产生径流。坡面最初被很薄的水层覆盖,很快发展出现坡面径流,使雨滴击打效果发生改变,坡面薄水层的存在,使雨滴击溅效果增强,随着径流深度不断增加,对地表作用增强,导致地表糙度增大。在后续降雨作用下,由于凹凸不平地表正负交错作用的频繁发生,使径流与产沙的变化比较复杂。由于林地的枯枝落叶层和腐殖质层是地表的一个重要覆盖面和保护层,具有增强土壤抗冲能力,减少地表径流平均流速、防止土壤溅蚀,可以提高土壤对径流侵蚀的抵抗力,因此地表糙度增幅最小;荒地由于植被覆盖度较低,不能有效减少径流的冲刷与降雨的击溅侵蚀,导致糙度值增幅较大;坡耕地经过人工锄耕后,地表延缓径流的作用好于荒地坡面的地表,糙度增幅较小;草地由于坡度最大,导致地表微地形变化最大。

## 2.2 坡度对地表糙度的影响

三场降雨后,不同坡度坡面地表糙度均呈增大趋势,但坡度不同,其增大幅度有所不同。 $5^{\circ}$ 坡面的地表糙度增幅最小, $10^{\circ}$ 坡面居中, $20^{\circ}$ 坡面最大。因此,在试验范围内,坡度越大,降雨前后坡面地表糙度的增加幅度越大,增加趋势越为明显,地表微地形变化越明显(图5)。

结果表明在降雨条件下,试验范围内,坡度越大,雨滴对地表的打击程度就越大;降雨动能越大,雨滴打击地面能力越强,对地表的影响越大。此过程中,雨滴打击地表使土壤中细小颗粒从土体表面剥离,并被溅散的雨滴带起而产生位移降落在坡面;同时雨滴打击破坏坡面土壤固有结构,降低土体黏结作用,易于造成侵蚀及颗粒悬浮等过程的发生;降雨入渗量越小而径流量越大,径流流速越快,径流对地表剪切力越大,径流冲刷地表使地表局部出现细沟的可能性相应增大,故地表糙度增大。对于缓坡,降雨在坡面形成的径流流速相对较小,易在坡面产生地表积水,对雨滴的打击起到了缓冲作用,从而减弱了对坡面地表土壤结构的破坏作用,同时,缓坡上的径流流速小,径流剪切力小,径流对地表的冲刷作用小,坡面细沟不易形成,导致地表糙度变化幅度较小。总的来说,在降雨条件下,地面坡度越大,地表糙度增加幅度越大,地表微地形变化越明显。

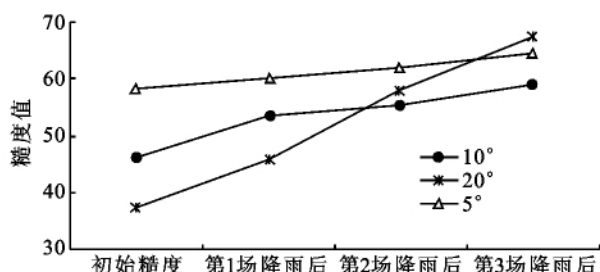


图5 降雨前后不同坡度坡面地表糙度变化

## 2.3 植被覆盖度对糙度的影响

每次降雨前后,各坡面糙度值变化规律相同,但变化幅度不一致。覆盖度为8%的荒地,糙度增加12.84,增幅达28%,变化最为剧烈;覆盖度为78%的林地,糙度增加1.67,增幅仅为1.68%,变化很小;覆盖度为21%的坡耕地,糙度增加6.05,增幅达10.35%,变化较荒地小,但较林地强烈(图6)。可见,随着覆盖度的增加,地表糙度变化逐渐减小。

综合分析可知,地表因覆盖度的增加,抵抗降雨侵蚀的能力增大。表明不同土地利用类型(盖度、质地、容重)对雨滴的击溅和径流的产生均有不同程度的影响,因此糙度变化幅度不同。当地表植被覆盖度较高时,由于植被对雨滴的拦截作用,雨滴降落后无法直接打击在地层表面,使土壤颗粒接受雨滴打击时

其一部分动能已被减弱。另外,由于植被及其根系对径流的拦截作用,能够吸收和阻延地表径流、减少地表径流平均流速、防止土壤溅蚀,可以提高土壤对径流侵蚀的抵抗力,糙度变化幅度较小。所以植被覆盖度越大,地表糙度变化越小,地表微地形变化越小。

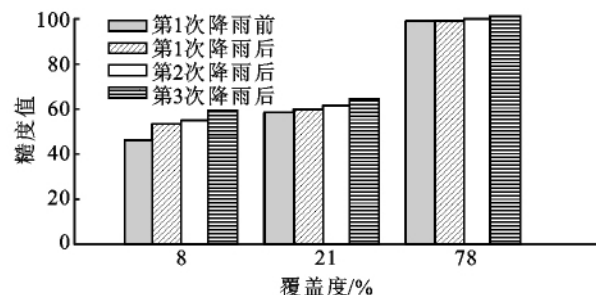


图6 不同植被覆盖度地表糙度变化

## 2.4 地表糙度的空间变化特征

将径流小区坡面从坡上至坡下每隔2 m划分为一个坡段,共计5个坡段,每个坡段面积为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ,坡段1—5依次为从坡面上部到坡面下部,以观测不同降雨强度对坡面各坡段地表糙度的影响。图7点绘了4种土地利用类型各坡段地表糙度在降雨前后的变化情况。从四种坡面的糙度值变化可以看出,经过相同的降雨场次之后,坡上至坡下每个坡段的糙度值均有不同程度的变化,随着雨强的增大,径流对糙度的作用增强。

荒地在降雨后糙度整体变化均较大,且变化主要在第2—5坡段。观察降雨前后糙度变化发现,初次降雨后地表糙度变化最大。这是由于荒地在降雨前地表起伏状态相对较大,在雨滴的打击作用下,坡面上部第一坡段土粒在凸起和凹陷处分散和迁移,使地表趋于平坦,糙度值变小;坡面其它坡段,地表起伏程度加剧,糙度值明显增大,从而地表糙度较降雨初期变化较大。之后随着降雨场次的增多,各场降雨后的糙度变化幅度有所减小,这是由于初次降雨对地表的侵蚀较剧烈,地表较松散的土粒被降雨击溅带走,土壤被雨滴击实,随着雨水渗入土壤中,土壤含水量不断增加,土壤黏粒等细小颗粒受雨滴击溅后堵塞土壤原有下渗孔道,甚至形成结皮,阻止了雨滴的进一步击溅作用。在这些因素共同作用下,导致地表土壤下渗能力随降雨延续很快降低,径流对地表的侵蚀影响作用也逐渐减小,地表糙度的变化则相对减小。

林地各场降雨后的糙度变化不大,糙度值的整个变化过程十分平稳,各个坡段的糙度值也无明显变化。这是由于植被的拦截作用,雨滴降落后无法直接打击在地层表面,使土壤颗粒接受雨滴打击时其一部分动能已经被减弱,另外由于植被的拦截作用,地表径流形成缓慢,故对地表糙度的影响较小,糙度变化较小。

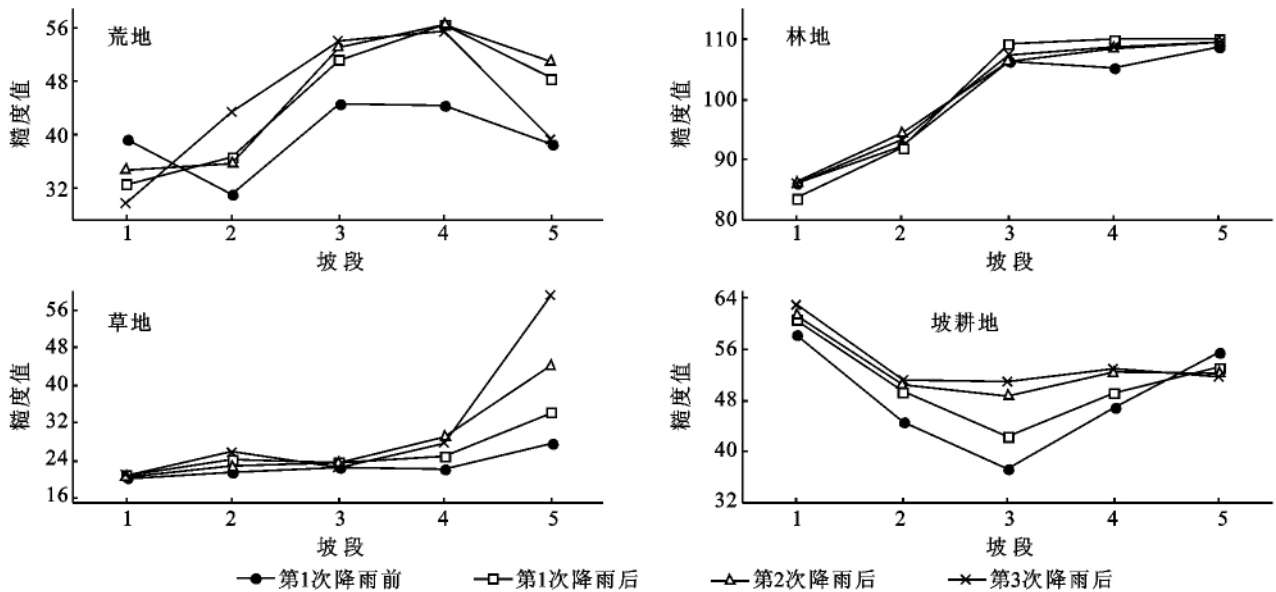


图 7 降雨前后不同土地利用类型坡段地表糙度变化

草地的糙度变化具有明显的空间差异特征。各场降雨后,前 3 个坡段糙度变化无明显差异,从第 4 个坡段开始,糙度值有一定程度的增加,而第 5 个坡段糙度明显增大,引起草地坡面的糙度增幅最大。这是由于坡面上半部分有植被的拦阻,在降雨过程中,径流对上部坡面的地形影响较小,在第 4 坡段,上部坡面植被所拦阻的蓄水开始溢出或破坏部分阻挡,使得下部分松散的土体向下游出口处迁移或在凹处沉积,加之该坡面坡度较大,在坡面出口第 5 坡段处对地表的冲刷加剧,故第 5 坡段地表糙度变化最大。

坡耕地的糙度变化具有明显的时间规律,随着不同场次降雨的进行,不同坡段糙度值逐渐增大,尤其在第 3 坡段变化幅度最大。由于坡耕地有耕槽的存在,且耕槽垂直于上下坡面,此时,上半坡面的耕槽对径流有一定的阻拦作用,而在第 3 坡段径流破坏了这种阻挡,使径流对这一坡段的侵蚀加剧,且随雨强的增大,糙度变化越大。

综上所述,各坡段的糙度变化情况总体依然遵循着随着降雨场次的增加,地表糙度呈现增大的趋势,但在某一坡面几个坡段内会出现一定的空间变异性,如荒地的第 1 坡段、坡耕地的第 3 坡段,这种空间差异性受土地利用类型、人工措施等多方面因素的影响。这些空间差异性一方面导致在坡面某个坡段的地表凹陷逐渐被水填满,致使径流流速增加,流路较为集中,对地表的切割和拓宽作用明显增强,使得土壤团聚体崩解、团粒分散溅起,引起地表径流紊动、冲刷和土粒迁移;另外一方面也会导致在坡面的某个坡段出现地表凹陷或障碍,进行蓄水,可减小径流流速,限制径流,进而减小土粒的分散和搬运能力,致使产

流产沙有一定的延迟。这便解释了地表糙度的变化有些坡段可以消减侵蚀作用,而有些坡段可以增加潜在的冲刷,加剧侵蚀。

### 3 结论

(1) 随着降雨场次的增加,坡面产生径流,雨滴击打效果发生改变,径流深逐渐增加,地表糙度逐渐增大;在试验范围内,坡度越大,径流流速越快,径流对地表的剪切力就大,径流冲刷地表使地表局部出现细沟的可能性相应增大,地表糙度增加幅度越大,增加趋势越明显。植被覆盖度较大,径流产生的时间晚于裸地,植被阻截了部分降雨的能量,土壤表面未受到雨滴的直接击溅,植被根系有效改善了土壤性状,土粒较裸地没有完全分散,地表糙度变化较小。

(2) 坡面中各个坡段变化情况总体遵循随降雨场次的增加,地表糙度呈现增大的趋势,但在某些坡段内会出现一定的空间变异性,导致有些坡段可以拦蓄径流泥沙,消减侵蚀,而有些坡段可以增加潜在冲刷,加剧侵蚀。

(3) 降雨、径流、坡度、植被覆盖度等因素共同影响地表糙度的动态变化;在某些情况下,单一因子成为主导因素,但在多数情况下,多因子及其的交互效应共同影响着地表糙度变化,因此在今后的研究中,需要进一步分析多因子的影响,才能理清各因素对糙度的作用。

#### 参考文献:

- [1] Larson W E. Tillage requirements for corn[J]. Soil Water Cons., 1962, 17(1): 3-7.

(下转第 29 页)

同一采煤塌陷年限呈现出:未塌陷和塌陷5 a区表层(0—30 cm)土壤排水能力大于底层(30—60 cm)土壤排水能力,塌陷10 a区底层土壤排水能力反而大于表层土壤排水能力;在不同采煤塌陷年限呈现出:矿区表层和底层土壤排水能力都随塌陷年限的延长呈现先下降后上升的趋势(图8)。

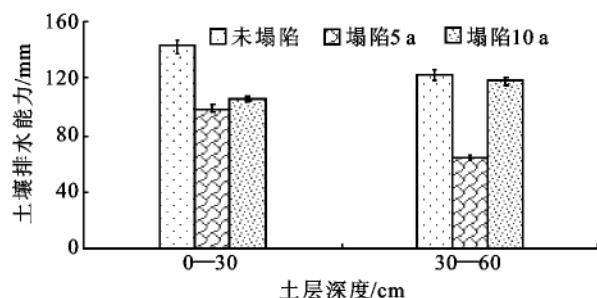


图8 不同塌陷年限土壤排水能力分层比较

## 4 结论

通过对百里杜鹃风景名胜区进行综合踏勘选取典型矿区,在典型矿区内选取相近塌陷程度不同塌陷年限的土壤进行物理性质对比研究,结果表明:采煤塌陷破坏了百里杜鹃煤矿矿区的土壤结构,促进了土壤淋溶侵蚀,随塌陷年限的延长土壤环境逐渐稳定,塌陷区土壤通气保水性虽在后期有所好转,但总体不如未塌陷区。特别是在百里杜鹃风景名胜区内,随着采煤塌陷范围的扩大和程度的加深,这必将是以后研究的重点,需要引起政府的高度重视和社会的广泛关注。

## 参考文献:

- [1] 贾增发,赵连伦.采煤塌陷区的综合治理[J].环境保护,1991(5):16-17.
- [2] 李新举,胡振琪,李晶,等.采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J].农业工程学报,2007,23(6):276-280.
- [3] Moffat A, McNeill D. Reclaiming disturbed land and forestry[M]. London: H. M. S. O., 1994.
- [4] 卞正富.国内外煤矿区土地复垦研究综述[J].中国土地科学,2000,14(1):6-11.
- [5] 杨明爽,刘明辉.采煤塌陷区环境整治与矿区可持续发展[J].山西建筑,2009,35(23):26-27.
- [6] 郑建军.浅析贵州二叠系上统龙潭组27号煤层的聚煤规律[J].中国煤田地质,2007,19(6):11-13.
- [7] 赵霞.贵州省大型煤矿建设的可行性与必要性分析[J].煤炭经济研究,2008(4):28-29.
- [8] 陈刚.浅谈贵州山区煤矿整体设计中“与环境协调”问题[J].煤炭工程,2008(10):20-21.
- [9] 王茂春,莫伟平.贵州省煤炭产业发展循环经济的对策研究[J].煤炭经济研究,2008(5):33-35.
- [10] 谢元贵,孙文博,潘高虎,等.采煤塌陷对贵州百里杜鹃林区土壤水分—物理性质的影响[J].中国水土保持,2012(4):42-44.
- [11] 李苇洁,聂忠兴,龙秀琴,等.百里杜鹃自然保护区雪凝灾情分析及重建思考[J].林业科学,2008,44(11):111-114.
- [12] 杨成华,李贵远,邓伦秀,等.贵州百里杜鹃保护区的杜鹃属植物种类及其观赏特性研究[J].西部林业科学,2006,35(4):14-18.
- [13] 张万儒,杨光滢,屠星南,等.LY/T1215—1999,森林土壤水分—物理性质的测定[S].北京:国家林业局批准,1999.

(上接第20页)

- [2] Allmaras R R, Burwell R E, Larson W E, et al. Total Porosity and Random Roughness of the Interrow Zone as Influenced by Tillage[M]. U. S. : Agricultural Research Service, 1966.
- [3] 吴普特,周佩华.地表侵蚀与薄层水流侵蚀关系研究[J].水土保持通报,1993,13(3):1-5.
- [4] Saleh A. Soil roughness measurement: chain method[J]. Journal of Soil and Water Cons., 1993, 48(6): 527-529.
- [5] 崔灵周,李占斌,朱永清,等.流域侵蚀强度空间分异及动态变化模拟研究[J].农业工程学报,2006,22(12):17-22.
- [6] 郑子成,吴发启,何淑琴.降雨条件下土壤物理性质对地表糙度变化的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,11(11):184-188.
- [7] 段喜明,吴普特,王春红,等.人工降雨条件下施加粉煤灰对耕作土壤结构和水土流失的影响研究[J].农业工程学报,2006,22(8):50-53.

- [8] Chen L D, Huang Z L, Jie G, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China[J]. Catena, 2007, 70(2): 200-208.
- [9] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):594-598.
- [10] Brough D L, Jarrett A R. Simple technique for approximating surface storage of silt—tilled fields[J]. Trans. American Society of Agricultural Engineers, 1992, 35(3): 885-890.
- [11] Kruipers H. A relief-meter for soil cultivation studies[J]. Agric. Sci., 1957, 5(4): 255-262.
- [12] Burwell R E, Larson W E. Infiltration as influenced by tillage—induced random roughness and pore space[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1969, 33(3): 449-452.
- [13] Hung C H, Noton L D, Parker S C. Laser scanner for erosion plot measurements[J]. Trans. ASAE, 1995, 38(3): 703-710.