

紫色土坡耕地不同微地形地表汇流网络特征

周苍宁，王清震，唐 恺，叶志鑫，冯家伟，梁心蓝

(四川农业大学水利水电学院,四川 雅安 625014)

**摘要：**为了揭示不同微地形汇流网络的特征,通过野外人工降雨模拟试验,结合近景摄影测量技术,在相同降雨历时下,提取并分析了 60,90,120 mm/h 雨强下,连续凹陷、间隔凹陷、连续凸起、间隔凸起、凹凸相连、凹凸相间以及对照组 7 种微地形措施的汇流网络。结果表明:(1)7 种微地形的汇流密度随集水面积阈值的增大而逐渐减小,间隔凹陷和凹凸相连的最佳阈值为 450 m<sup>2</sup>,对照组、连续凹陷和间隔凸起的最佳阈值为 550 m<sup>2</sup>,连续凸起和凹凸相间的最佳阈值为 650 m<sup>2</sup>;(2)对照组、连续凹陷和间隔凹陷的汇流形态为树枝状,间隔凸起和凹凸相间的汇流形态为既有树枝状也有平行状的混合状,连续凸起和凹凸相连的汇流形态为平行状;在微地形中凹陷起着汇集径流、减少低级径流数量的作用,而凸起则是起着改变径流流向、降低径流汇合几率的作用;(3)7 种微地形的汇流密度和径流频度表现为树枝状>混合状>平行状,随着降雨强度的增大各措施的汇流密度无显著变化,但径流频度则随着降雨强度的增大总体呈现增大的趋势。

**关键词：**凹陷；凸起；微地形；紫色土；汇流网络

**中图分类号：**S157      **文献标识码：**A      **文章编号：**1009-2242(2022)02-0146-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.019

Characteristics of Surface Confluence Network in Different  
Micro-topography Types of Purple Soil Slope Farmland

ZHOU Cangning, WANG Qingzhen, TANG Kai, YE Zhixin, FENG Jiawei, LIANG Xinlan

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014)

**Abstract:** In order to reveal the characteristics of confluence network of different micro-topography types, field artificial rainfall simulation experiments were conducted. The confluence networks of seven micro-topography types were abstracted and analyzed by close-range photogrammetry. The rainfall events with 60, 90 and 120 mm/h rainfall intensity lasted for 90 minutes. The seven micro-topography types were continuous depressions, alternate depressions, continuous mounds, alternate mounds, continuous mounds and depressions, alternate mounds and depressions, and smooth slope. The results showed that: (1) The drainage density gradually decreased with the increasing of drainage area threshold. The optimal thresholds for alternate depressions and continuous mounds and depressions were 450 m<sup>2</sup>, those for smooth slope, continuous depressions and alternate mounds were 550 m<sup>2</sup>, and those for continuous mounds and alternate mounds and depressions were 650 m<sup>2</sup>. (2) The morphology of confluence network of the control group, continuous depressions and alternate depressions was dendritic pattern. The confluence network of alternate mounds and alternate mounds and depressions was mixed pattern, which was a mixture of dendritic pattern and parallel pattern. The confluence network of continuous mounds and continuous mounds and depressions was parallel pattern. In the micro-topography, depression played a role in collecting runoff and reducing the amount of low-level runoff, while the mound played a role in changing runoff direction and reducing convergence possibility of runoff. (3) The drainage density and stream frequency of the seven micro-topography types followed the order of dendritic pattern>mixed pattern>parallel pattern. With the rainfall intensity increased, the stream frequency generally increased while the drainage density changed only a little.

**Keywords:** depression; mound; micro-topography; purple soil; confluence network

微地形的起伏主要由凸起、凹陷和平整坡面组合而成,由于凸起和凹陷在几何形态和物理特征方面存在差异,使得二者对地表产汇流过程和土壤侵蚀等方面的影响均有所不同。凸起对径流和侵蚀的影响表现在正负 2 个方面:首先,凸起自身的坡度加快坡面流流速,促进径流产生,在一定程度上增加侵蚀量<sup>[1-2]</sup>;其次,当径流流经凸起时,遭遇阻挡,被迫改变流向,径流路径长度增加,流速减缓,携沙能力被削弱,从而减少侵蚀<sup>[3-5]</sup>。而地表凹陷会拦截径流,切断径流的连续性,当凹陷蓄满以后水流溢出,重新寻找出口,从而形成新的径流路径,因此改变坡面汇流网络的整体形态<sup>[6-8]</sup>。

由此可见,凸起和凹陷对径流及侵蚀存在促进和抑制两方面相反的作用机制,但目前相关研究都是建立在凹凸同时存在的基础上,因此,其结论是凸起和凹陷对侵蚀正负两方面影响交互作用后所呈现的一个最终结果,而忽略了其各自对地表的作用过程。此外,凸起和凹陷之间是否存在间隔也对坡面汇流网络存在一定程度的影响,平整坡面对凸起或凹陷的分隔影响二者对径流及侵蚀作用的连续性,进而对坡面汇流特征产生影响。

鉴于此,为了研究地表凸起和凹陷在单独存在时对径流及侵蚀的影响机制,以及二者交互作用对单独作用的影响程度,同时考虑平坡间隔对二者的影响,本研究将土壤表面布设为单凸起(有间隔/无间隔)、单凹陷(有间隔/无间隔)和凹凸共存(有间隔/无间隔)3 种微地形模式,以平整坡面作为对照,最终形成 7 种不同的微地形措施,分别为连续凹陷、间隔凹陷、连续凸起、间隔凸起、凹凸相连、凹凸相间和平整坡面,以期揭示凸起和凹陷在连续分布和间隔分布 2 种情况下对径流的单独作用机理,以及二者共存时其交互作用对坡面汇流形态的影响,从而明确凸起和凹陷的不同分布形式对径流的不同作用,有利于进一步揭示坡面汇流形成机制及侵蚀机理。

对于汇流网络的研究,由于技术的限制,多数研究集中于流域尺度<sup>[9-11]</sup>,而小尺度的研究相对较少。但随着科学技术的发展,数字高程模型(digital elevation model, DEM)的出现以及非接触式测量方法<sup>[12-13]</sup>的成熟,学者们对坡面汇流网络的研究越来越多。王洪晓等<sup>[14]</sup>通过对不同下垫面条件的地表粗糙度进行测量,比较了三维激光扫描法、照相法和测针法的精度,发现非接触式测量方法的精度高于接触式测量。常用的非接触式测量方法主要包括超声波测量法<sup>[15]</sup>、激光扫描法<sup>[16-17]</sup>和摄影测量法<sup>[18]</sup>等。在非接触式测量技术的支持下,吴淑芳等<sup>[19]</sup>通过人工降

雨试验,采用摄影测量法对雨后坡面进行拍照,将照片导入 Photscan 软件建立坡面三维模型和 DEM 模型,分析了梁岢坡面侵蚀发育过程;张利超等<sup>[20]</sup>对南方红壤区坡耕地进行连续降雨,每次降雨结束后采用 PLS 型瞬时剖面激光扫描仪获取坡面 DEM 模型,对坡面汇流网络进行提取分析,结果表明,在降雨侵蚀过程中,汇流密度和径流频度整体呈增加趋势;宋向阳<sup>[21]</sup>借助非接触式激光扫描仪,对降雨前后坡面进行扫描,采用空间插值方法构建 DEM 模型研究了等高耕作、人工掏挖和人工锄耕 3 种耕作措施对坡面产汇流特征的影响。以往的研究表明,非接触式测量方法可以用于坡面研究,同时,流域的一些理论和方法同样适用于坡面汇流网络。

因此,本文以四川盆地紫色土壤为对象,利用近景摄影测量等技术手段,结合河流网络的一些理论和方法,研究在降雨条件下不同微地形的汇流网络特征,从而探索微地形与汇流网络之间的相互关系,以期为四川紫色土区的土壤侵蚀防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

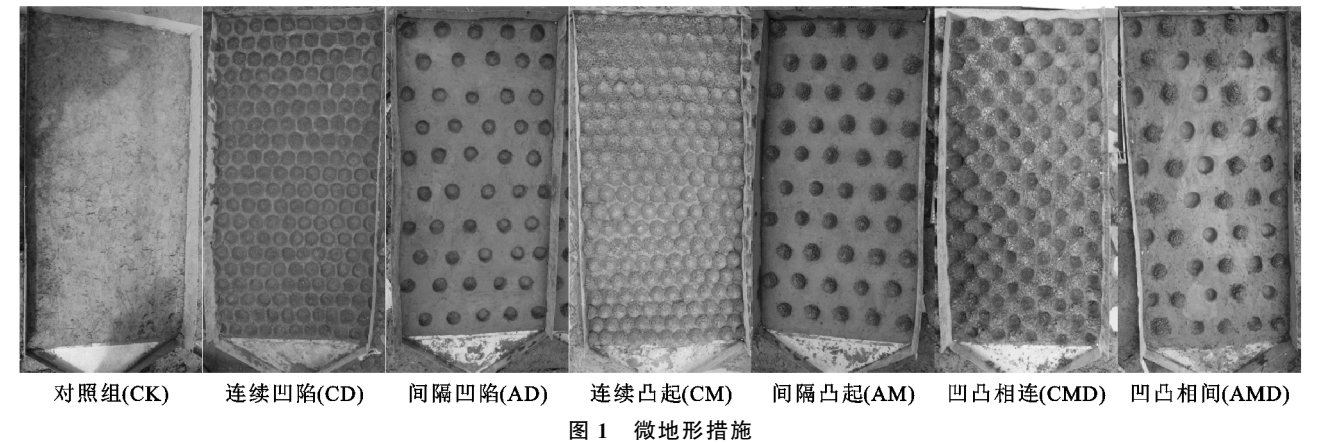
试验于 2019 年 7 月至翌年 4 月在四川省雅安市四川农业大学教学科研基地(29°98'N, 102°99'E)的耕地上进行。降雨设备为便携式侧喷野外模拟降雨器,降雨高度 6 m,两侧同时对喷(降雨均匀度 $\geq 85\%$ )。试验区内土壤为四川盆地常见的紫色土,紫色土是由紫色页岩发育而成的土壤,主要是孔隙度大、入渗能力强、土层浅、下伏透水性较弱的泥页岩,在自然界中极易被崩解破坏<sup>[22]</sup>。试验用地的土壤 pH 为 7.0~7.5,土壤容重为 1.39 g/cm<sup>3</sup>,质地为中壤,砂粒(2~0.02 mm)含量为 38.43%,粉粒(0.02~0.002 mm)含量为 46.38%,黏粒( $<0.002$  mm)含量为 15.19%,液限为 32.9%,塑限为 19.4%。

### 1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,设置 60, 90, 120 mm/h 3 种降雨强度,7 种微地形,共 21 个处理,每个处理重复 3 次,共 63 个试验小区。试验小区去除地表植被并翻耕 2 次,小区投影面积为 2 m<sup>2</sup>(长 2 m×宽 1 m),小区由 40 cm 宽的铁皮围成,坡度为 5°。为使坡面径流网络完全发育,降雨历时设为 90 min。降雨前后采用近景摄影测量法对小区进行拍照,摄影器材为 NIKON D3300(像素 2 478 万),拍摄时相机垂直于坡面,从小区开始,沿坡面方向每隔 10 cm 拍摄 1 次,至小区下坡处结束,每个小区共拍摄 28 张照片,照片重合度在 80%以上。7 种措施分别为:(1)对

照组 CK, 设置为平整坡面, 无微地形; (2) 连续凹陷 CD(continuous depressions), 倒圆锥形, 凹陷底部直径设置为 10 cm, 每 2 个凹陷之间无间距; (3) 间隔凹陷 AD(alternate depressions), 倒圆锥形, 凹陷底部直径设置为 10 cm, 每 2 个凹陷之间间隔 10 cm; (4) 连续凸起 CM(continuous mounds), 圆锥形, 凸起底部直径设置为 10 cm, 每 2 个凸起之间无间距; (5) 间

隔凸起 AM(alternate mounds), 圆锥形, 凸起底部直径设置为 10 cm, 每 2 个凸起之间间隔 10 cm; (6) 凹凸相连 CMD(continuous mounds and depressions), 凸起/凹陷圆锥底部直径设置为 10 cm, 凸起与凹陷之间无间距; (7) 凹凸相间 AMD(alternate mounds and depressions), 凸起/凹陷圆锥底部直径设置为 10 cm, 凸起与凹陷之间间隔 10 cm(图 1)。



1.3 数据处理与分析

试验数据采用 SPSS 26.0 软件和 Excel 2010 软件进行统计分析, 试验照片导入 Photoscan 1.3.3 中, 进行 3D 建模并输出 DEM 模型(3 mm×3 mm), 使用 ArcGIS 10.5 提取坡面汇流网络, 提取流程见图 2。

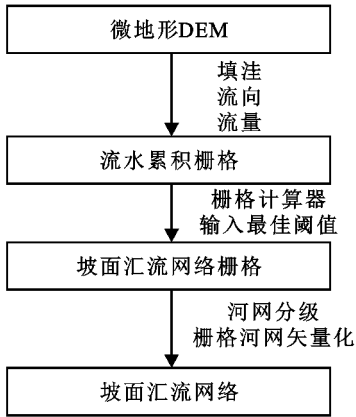


图 2 坡面汇流网络提取流程

汇流密度指研究区域内所有径流的总长度与汇流面积的比值, 是反映汇流网络中径流密集程度的重要指标, 计算公式为:

$$D_d = \frac{\sum_{j=1}^n L_{(j)}}{A}$$

式中:  $D_d$  为汇流密度( $\text{m}/\text{m}^2$ );  $A$  为总的汇流面积( $\text{m}^2$ );  $\sum_{j=1}^n L_{(j)}$  为一级径流经过的所有栅格内径流长度的总和;  $j$  为径流经过的栅格总数。

径流频度指研究区域内所有径流的总数目与汇流面积的比值, 是通过汇流区域内径流的分散密集程度反映汇流网络中径流排水有效性的特征, 计算公式为:

$$C_f = \frac{\sum_{w=1}^n N_w}{A}$$

式中:  $C_f$  为径流频度( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $A$  为总的汇流面积( $\text{m}^2$ );  $n$  为径流条数;  $w$  为汇流网络中最高级径流的级数。

2 结果与分析

2.1 最佳集水面积阈值的确定

在汇流网络提取过程中集水面积阈值的确定是个很重要的参数条件, 尽管该参数对径流路径空间位置的改变无影响, 但它却决定汇流起始点以及汇流网络的基本数字形态。坡面水蚀过程中, 地表形态高低起伏的变化与差异使得整个研究坡面的集水面积阈值通常不会是一个值。集水面积阈值越小, 提取的汇流网络越密集, 汇流密度越大, 但这不利于分析径流特征; 集水面积阈值越大, 则提取的汇流网络越稀疏, 汇流密度越小, 但这又不能完全体现径流特征。因此, 对于不同的地表形态, 需设置相应的合理的集水面积阈值, 从而提高坡面汇流网络特征提取的精度。

本研究使用河网密度法<sup>[23]</sup>确定集水面积阈值。贾腾斌<sup>[24]</sup>对不同耕作措施下的集水面积进行研究发现, 集水面积阈值与降雨历时、降雨强度无关, 只与地表糙度有关。因此本研究以 90 mm/h 降雨强度为例提取坡面汇流网络, 以确定最佳集水面积阈值。本研究共设置 9 个集水面积阈值提取坡面汇流网络, 分别为 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 950  $\text{m}^2$ 。以集水面积为横轴, 汇流密度为纵轴, 制作不同微地形汇流密度随集水面积的变化趋势图(图 3)。相同条件下, 不同微地形措施的坡面汇流密度随集水面积阈



值的增大而减小,微地形措施之间的差异不明显,汇流密度处于 7.24~25.46 m/m<sup>2</sup>。其中,CK 的平均汇流密度最大为 15.72 m/m<sup>2</sup>,CMD 的汇流密度最小为 9.12 m/m<sup>2</sup>。当集水面积阈值超过 450 m<sup>2</sup>后,坡面的汇流密度逐渐趋于稳定,因此,根据坡面汇流密度与集水面积阈值趋势线中趋于平缓的点的数值,确定最佳集水面积阈值。AD 和 CMD 阈值为 450 m<sup>2</sup>,CK、CD 和 AM 的阈值为 550 m<sup>2</sup>,CM 和 AMD 阈值为 650 m<sup>2</sup>。

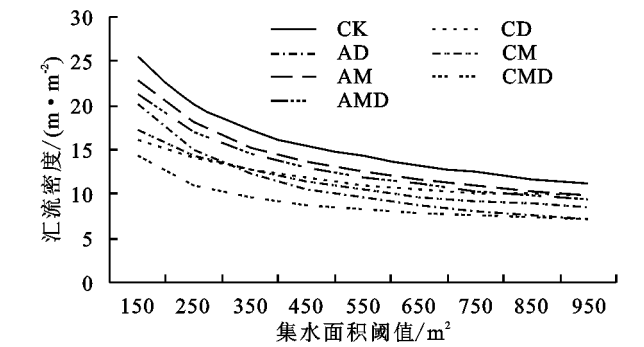


图 3 不同微地形汇流密度随集水面积的变化趋势

## 2.2 不同微地形的汇流形态特征

坡面汇流网络的形成是一个复杂、连续的过程,降雨初期坡面主要以溅蚀为主,随着降雨的进行,坡面的水流逐渐汇集形成股流,成股的水流对坡面进行冲刷,这时汇流网络开始形成。随着降雨历时的延长,水流的侧蚀和下切能力不断增强,坡面逐渐形成断续的小细沟,降雨中期坡面上的断续小细沟不断变长、变宽,出现分叉的现象,降雨后期坡面的细沟会逐渐合并,最终形成一个复杂的汇流网络。

通过 ArcGIS 10.5 软件对不同微地形进行汇流网络的提取,提取出的坡面汇流形态大致分为 2 种,即树枝状和平行状。树枝状是支流较多,主、支流以及支流与支流之间均呈锐角相交,排列如树枝状;平行状则是支流近似平行排列汇入干流。为便于分析径流特征,采用 Strahler 河流分级法<sup>[25]</sup>对汇流网络进行分级,并以不同线条粗细来表达径流的等级。

不同微地形汇流网络之间形态差异明显,7 种微地形措施中 CK、CD 和 AD 的汇流形态为树枝状,AM 和 AMD 的汇流形态为混合状(树枝状和平行状共存),CM 和 CMD 的汇流形态为平行状。

2.2.1 树枝状汇流形态分析 7 种微地形措施中 CK、CD 和 AD 的汇流形态为树枝状(图 4),CK 为平整坡面,坡面的每个地方都可能是径流的起点。在降雨初始阶段,坡面会很快产生一级径流,随着降雨的持续进行,在小区中、下部位置,可以观察到多个低级径流逐渐合并形成高级径流的现象。由于坡面没有任何阻挡物,形成的高级径流会径直向下坡流去,在

降雨结束后整个坡面发育为树枝状的汇流网络。随着降雨强度的增大,坡面的产流时间加快,径流的流量和流速增大,导致低级径流没有足够的发育时间,因此 120 mm/h 雨强下的汇流网络更稀疏。

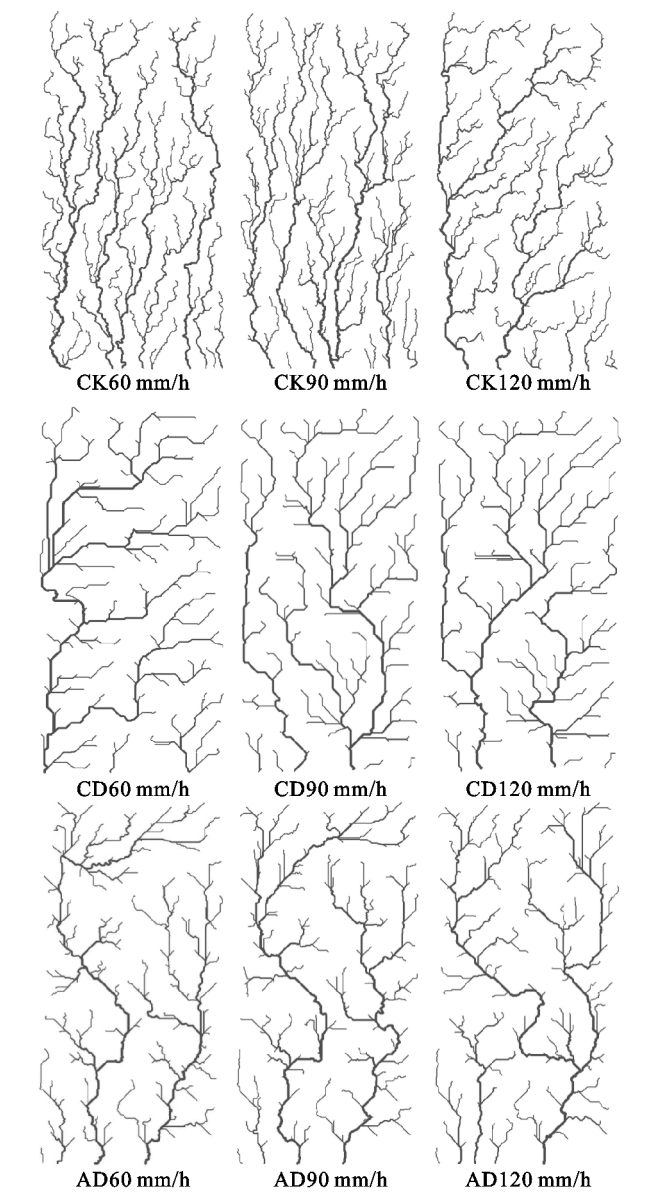


图 4 树枝状汇流形态

CD 和 AD 的汇流形态为树枝状,在降雨初期凹陷的存在蓄积大量的降雨,坡面几乎没有径流。当凹陷蓄满后,CD 和 AD 的坡面形态近似于 CK,因此,降雨结束后其汇流网络形态发育为树枝状。由于凹陷的存在,上坡产生的径流逐渐在中、下坡汇集,因此,相比 CK 密集的径流路径,CD 和 AD 所有等级径流的密集程度明显减少。CD 整个坡面布满凹陷,凹陷蓄满后其产生的径流会流向下方相邻的 2 个凹陷,因此其径流路径更加迂曲。而 AD 为间隔分布的凹陷,由于平整坡面的存在,径流的迂曲程度有一定程度的减小。相比于 CK,CD 的高级径流主要分布于小区的中下部,而 AD 的高级径流分布于整个小区。这表明间隔凹陷

对径流的汇集能力大于连续凹陷。降雨强度的增大几乎不会改变 CD 和 AD 的汇流形态,可能的原因是每个凹陷都可能是径流的起点,同时凹陷均匀地分布于整个坡面,各级径流以固定模式发育,因此降雨强度的增大并不会干扰汇流网络的形态。

2.2.2 混合状汇流形态分析 AM 和 AMD 的汇流形态为混合状(图 5)。AM 为间隔的凸起,间隔为平整的坡面,径流可以自由发育,因此低级径流之间呈现为树枝状的汇流形态。凸起拦截径流,改变径流的流速、流向和流量,径流在流经凸起时,选择易流动的一侧向下坡流动。径流流过凸起后,其流向由径直向下改变为倾斜向下,由于惯性的作用径流会保持这个流向向下坡流去。凸起存在于整个坡面,因此径流的流向会保持相当长的一段距离,从而使中级径流之间呈现出平行状的汇流形态。

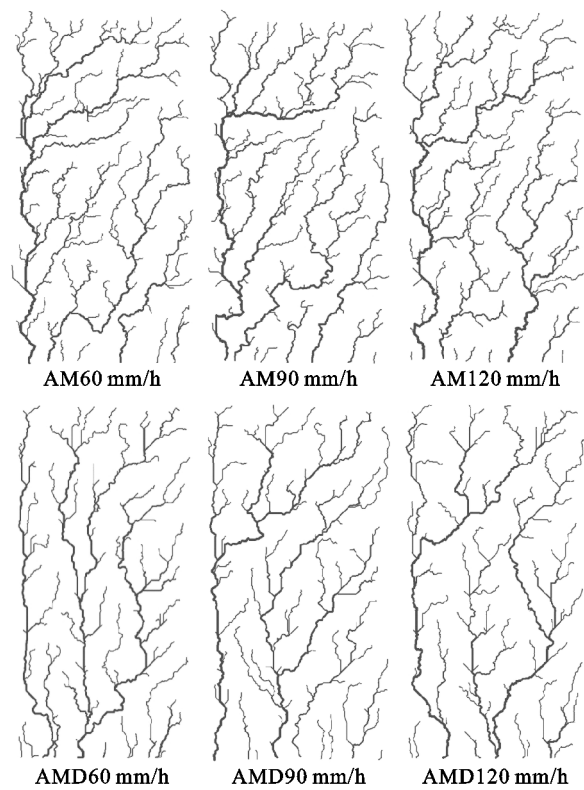


图 5 混合状汇流形态

AMD 为间隔的凹陷和凸起,凹陷蓄满后产生的径流向斜下方的凹陷,而平整坡面产生的径流遇到凸起后其流态与 AM 相似,只是其流向在遇到凹陷后会发生改变,因此,AMD 的低、中级径流呈现为混合状的汇流形态。对 AM 而言,降雨强度的改变不会明显改变其汇流形态,可能的原因是整个坡面的凸起阻挡了平整坡面,使低级径流较难汇集为高级径流。而对 AMD 而言,降雨强度的增大虽然没有改变其汇流形态,但减少了小区中、下部低级径流的数量,可能是因为降雨强度的增大使凹陷产生径流的时间

提前,坡面的汇流网络形成较快,小区中、下部的低级径流没有足够的时间发育并汇集成高级径流。

2.2.3 平行状汇流形态分析 CM 和 CMD 的汇流形态为平行状(图 6)。与其他微地形措施不同,CM 和 CMD 几乎没有可供径流自由发育的平整空间。CM 为连续的凸起,整个坡面布设紧密,降雨只能累积在凸起与凸起之间,这导致低级径流主要为横向发育。当降雨累积足够多后会破坏凸起与凸起相连处,并与下方的径流相汇合。随着径流流量的增加,坡面能够快速形成 1 条径流通路,从而导致中、高级的径流数量不多,因此,CM 的汇流形态为平行状。CMD 为连续的凸起和凹陷,当凹陷蓄满后才产生径流,此时其坡面形态与 AMD 类似,由于没有平整坡面,径流只能在凹陷之间流动,在凸起改变流向的作用下,径流平行且均匀地分布在整个坡面上。降雨强度的增大不会明显改变 CM 和 CMD 的汇流形态,是由于 CM 和 CMD 的径流路径相对固定,降雨强度的改变只会影响径流的数量。

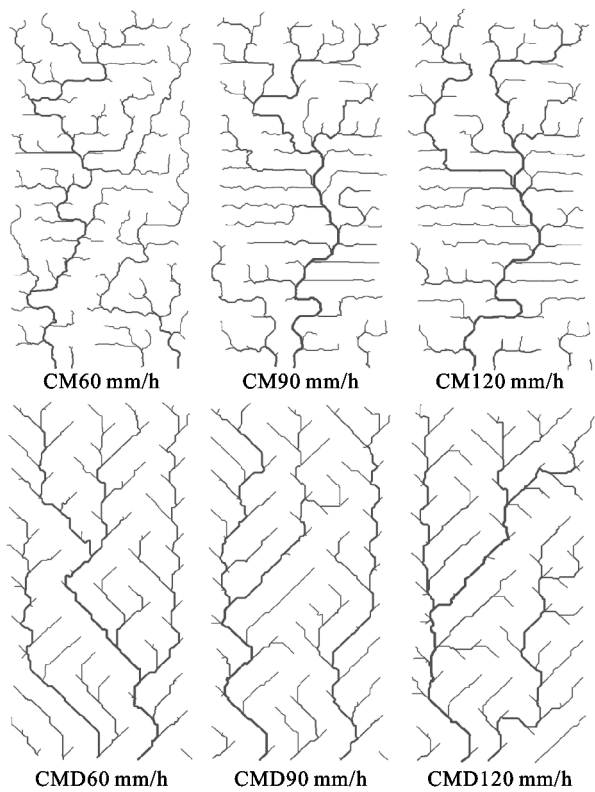


图 6 平行状汇流形态

综上,凹陷的存在能够汇集径流,减少低级径流的数量,且间隔的凹陷汇集径流的作用更明显。凸起的存在可改变径流的流向,且在一定程度上分割了坡面的地形,使中、高级径流汇合的几率降低。对于汇流形态而言,平整坡面的汇流形态为树枝状,凹陷使树枝状更明显,凸起则使汇流形态向平行状发展。当凸起与凹陷同时存在时,凹陷反而促进平行状的进一

步形成,凸起与凹陷的间隔面积越小,作用越明显。

2.3 不同微地形的汇流结构特征

汇流密度与径流频度都是表征汇流网络结构特征的指标,分别从不同角度反映坡面汇流网络中径流排水有效性以及径流的集中与分散程度。汇流密度

反映单位面积径流路径的总长度,径流频度反映单位面积径流路径的总数量。在其他条件相同的情况下,汇流密度、径流频度越大,表明坡面汇流网络越发达,径流越分散<sup>[26]</sup>。由表 1 可知,相同降雨强度下不同微地形之间的汇流密度和径流频度明显不同。

表 1 不同微地形措施的汇流结构特征

| 网络形态 | 微地形措施 | 汇流密度/( $\text{m} \cdot \text{m}^{-2}$ ) |            |            | 径流频度/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) |            |            |
|------|-------|-----------------------------------------|------------|------------|-----------------------------------------|------------|------------|
|      |       | 60 mm/h                                 | 90 mm/h    | 120 mm/h   | 60 mm/h                                 | 90 mm/h    | 120 mm/h   |
| 树枝状  | CK    | 13.06±1.94                              | 14.26±0.96 | 12.05±0.41 | 69.67±3.68                              | 71.83±5.72 | 75.00±7.44 |
|      | CD    | 10.25±0.94                              | 10.48±0.63 | 10.34±0.36 | 71.00±3.48                              | 67.00±4.06 | 72.00±4.82 |
|      | AD    | 10.77±1.16                              | 10.58±0.76 | 10.57±0.44 | 84.50±4.12                              | 91.00±4.94 | 88.50±4.72 |
| 混合状  | AM    | 12.10±0.48                              | 11.92±0.50 | 12.01±0.36 | 62.50±3.69                              | 71.50±4.04 | 67.00±3.10 |
|      | AMD   | 11.17±0.26                              | 10.96±0.45 | 10.75±0.20 | 62.50±2.52                              | 59.50±2.91 | 59.50±2.43 |
| 平行状  | CM    | 10.89±0.37                              | 9.47±0.49  | 9.42±0.31  | 57.00±3.22                              | 51.50±4.46 | 59.00±2.90 |
|      | CMD   | 8.39±0.04                               | 8.61±0.43  | 8.44±0.16  | 53.00±5.12                              | 56.67±2.62 | 60.00±2.86 |

注:表中数据为平均值±标准差。

树枝状网络的汇流密度和径流频度最大,汇流密度为 10.25~14.26  $\text{m}/\text{m}^2$ ,径流频度为 67.00~91.00  $\text{N}/\text{m}^2$ 。CK 的汇流密度最大,主要是因为 CK 为平整坡面,坡面的任何位置都可能是径流的起点,且径流可以自由发育,坡面的低级径流数量较多。随着降雨的进行,在小区中、下部的低级径流逐渐合并成中、高级径流,且中、下部的低级径流也在同步形成,导致 CK 的径流表现为数量多、长度长,因此,CK 的汇流密度最大。CD 和 AD 因为凹陷的存在其汇流密度小于 CK,凹陷的汇集作用使径流的数量明显减少,特别是在小区的中、下部。对 CD 而言,凹陷蓄满后,坡面才产生径流,但径流一旦形成,流量和流速均比较大,降雨会被快速排出小区,导致低级径流的发育时间较短,所以 CD 的径流频度在树枝状网络中最小。AD 的径流频度最大,间隔分布的凹陷分割整个坡面,使平整的坡面不再连续,导致径流汇合的几率降低,在凹陷的周围形成大量短小的一级径流,因此,AD 的径流频度最大。

混合状网络的汇流密度为 10.75~12.10  $\text{m}/\text{m}^2$ ,径流频度为 59.50~71.50  $\text{N}/\text{m}^2$ 。AM 凸起的存在占据一定面积的平整坡面,从而使径流可以自由发育的空间减少,在一定程度上减少低级径流的数量,但也延长了径流路径,略微增加径流的长度,因此,AM 的汇流密度和径流频度与 CK 差异不大。在 AM 的基础上把 1/2 数量的凸起替换为凹陷即形成 AMD,平整坡面的面积没有发生变化,但在凹陷的作用下,低级径流能够快速汇集向下坡流去,从而短时间内在坡面形成一个完整的径流通路。因此,AMD 的汇流密度和径流频度略均小于 AM。

平行状网络的汇流密度和径流频度最小,汇流密

度为 8.39~10.89  $\text{m}/\text{m}^2$ ,径流频度为 51.50~60.00  $\text{N}/\text{m}^2$ 。CM 为连续凸起,凸起几乎占据整个坡面,径流只能沿着相邻凸起的边界发育,虽然其延长了低级径流的长度,但由于没有平整坡面供水流自由发育,低级径流的数量相对较少;同时由于 CM 特殊的地形条件,从汇流形态中可以明显看出,其高级径流数量明显少于其他微地形措施。CM 的径流主要由数量少、长度长的一级径流构成,其径流频度最小。CMD 的汇流密度最小,因为其坡面起伏排列紧密,凹陷蓄积降雨,然后产生径流,极大地减少低级径流的数量;凸起阻挡径流,改变径流的流量、流速和流向,使径流快速汇集排出小区,CMD 的径流路径相对固定,其全等级径流的数量相对较少。

7 种微地形措施的汇流密度和径流频度表现为树枝状>混合状>平行状。随着降雨强度的增大,平整坡面的汇流密度变化剧烈,但具有微地形措施的坡面其汇流密度不会发生明显的变化,径流频度随降雨强度的增大总体呈现增大趋势。

### 3 结论

(1)使用河网密度法确定微地形的最佳集水面积阈值,7 种微地形的汇流密度均随集水面积阈值的增大而逐渐减小,AD 和 CMD 的最佳阈值为 450  $\text{m}^2$ ,CK、CD 和 AM 的最佳阈值为 550  $\text{m}^2$ ,CM 和 AMD 的最佳阈值为 650  $\text{m}^2$ 。

(2)3 种降雨强度下,7 种微地形措施中 CK、CD 和 AD 的汇流形态为树枝状,AM 和 AMD 的汇流形态为混合状(树枝状和平行状共存),CM 和 CMD 的汇流形态为平行状。降雨强度的增大不会明显改变微地形的汇流形态,但能影响各等级径流的发育。不



同地形对径流的影响不同,凹陷能够汇集径流,减少低级径流的数量,间隔凹陷比连续凹陷汇集径流的作用明显。凸起改变径流的流向,凸起越密集,对流向的影响越大,同时凸起起着分割地形降低中、高级径流汇合几率的作用。

(3)3 种降雨强度下,树枝状汇流网络全等级径流表现为数量多,长度长。混合状汇流网络径流数量略有减少,长度略有增加,与树枝状差异不大。平行状汇流网络主要由数量少、长度长的一级径流构成。三者的汇流密度和径流频度表现为树枝状>混合状>平行状。其中,CK 的汇流密度最大,CMD 最小;AD 的径流频度最大,CM 最小。随着降雨强度的增大,汇流密度不会发生明显的变化,但径流频度随着降雨强度的增大总体呈现增大趋势。

#### 参考文献:

- [1] Zhao L S, Huang C H, Wu F Q. Effect of microrelief on water erosion and their changes during rainfall[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(5): 579-586.
- [2] Vermang J, Norton L D, Huang C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 903-916.
- [3] 郑子成,何淑勤,吴发启.降雨条件下地表糙度对片蚀的影响及其变化[J].*农业工程学报*, 2010, 26(增刊 1): 139-145.
- [4] Fox D M, Bissonnais Y L, Quétin P. The implications of spatial variability in surface seal hydraulic resistance for infiltration in a mound and depression microtopography[J]. *Catena*, 1998, 32(2): 101-114.
- [5] Rai R K, Upadhyay A, Singh V P. Effect of variable roughness on runoff[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 382(1): 115-127.
- [6] Darboux F, Huang C H. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3): 748-756.
- [7] Fox D M, Bissonnais Y L, Bruand A. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression [J]. *Catena*, 1998, 32(2): 87-100.
- [8] Zhao L S, Hou R, Wu F Q, et al. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179: 47-53.
- [9] 曹玲玲,张秋文.基于 SRTM 的数字河网提取及其应用[J].*人民长江*, 2007(8): 150-152.
- [10] 颜明,许炯心,贺莉,等.黄河流域河网密度的空间特征及其影响因素[J].*水土保持研究*, 2018, 25(2): 288-292, 299.
- [11] 李忠武,黄金权,李裕元,等.基于 GIS 的南方红壤丘陵区小流域汇流网络提取研究[J].*水土保持研究*, 2009, 16(6): 84-87, 91.
- [12] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.近景摄影测量在土壤侵蚀监测中的应用[J].*测绘科学*, 2016, 41(6): 80-83, 96.
- [13] 陶浩然,陈权,李震,等.近景摄影测量提高裸露地表粗糙度测量精度[J].*农业工程学报*, 2017, 33(15): 162-167.
- [14] 王洪晓,张光辉,朱平宗,等.3 种地表随机糙率测量方法比较[J].*水土保持研究*, 2020, 27(4): 72-77.
- [15] 朱良君,张光辉,胡国芳,等.坡面流超声波水深测量系统研究[J].*水土保持学报*, 2013, 27(1): 235-239.
- [16] Jensen T, Karstoft H, Green O, et al. Assessing the effect of the seedbed cultivator leveling tines on soil surface properties using laser range scanners[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 54-60.
- [17] 吴红艳,郑粉莉,徐锡蒙,等.不同分辨率 DEM 提取切沟形态特征参数的转化研究[J].*水土保持学报*, 2016, 30(6): 147-152, 161.
- [18] 杨超,苏正安,熊东红,等.近景摄影测量技术在坡耕地土壤侵蚀速率研究中的应用[J].*水土保持学报*, 2018, 32(1): 121-127, 134.
- [19] 吴淑芳,刘勃洋,雷琪,等.基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J].*农业工程学报*, 2019, 35(9): 114-120.
- [20] 张利超,刘窑军,李朝霞,等.降雨侵蚀过程中红壤坡耕地地表汇流网络特征[J].*水土保持研究*, 2019, 26(1): 53-60.
- [21] 宋向阳.地表糙度对坡面产汇流特征的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [22] 蒋顺清,李青云.长江上游紫色岩土特性与水土流失的关系[J].*长江科学院院报*, 1995, 12(4): 51-57.
- [23] 孔凡哲,李莉莉.利用 DEM 提取河网时集水面积阈值的确定[J].*水电能源科学*, 2005, 23(4): 65-67.
- [24] 贾腾斌.坡耕地地表糙度量化特征及其对坡面汇流路径的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [25] Strahler A N. Hypsometric analysis of erosional topography[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [26] 刘昌明,李道峰,田英,等.基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J].*地理科学进展*, 2003, 22(5): 437-445.