# 不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响

戴金梅<sup>1,2</sup>,查轩<sup>1,2</sup>,黄少燕<sup>1,2</sup>,陈世发<sup>1,2</sup>,翟少华<sup>1,2</sup>,王丽园<sup>1,2</sup>,刘川<sup>1,2</sup>

(1. 福建省亚热带资源与环境重点实验室,福州 350007;2. 福建师范大学地理研究所,福州 350007)

摘要:为研究植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响,探讨有效控制水土流失的坡面植被临界盖度问题,利用人工模拟降雨试验与室内分析相结合的方法对紫色土坡面侵蚀过程进行分析。结果表明:(1)总体上,紫色土坡面产流量随植被覆盖度的增大而减小,二者之间呈线性负相关,但是植被覆盖度在25%以下,径流量变化不明显,植被覆盖度达75%时,径流量处于较低的稳定值,明显低于植被覆盖度0%,25%,50%;(2)坡面侵蚀泥沙量随植被覆盖度的增加而减少,二者呈二次项相关( $R^2 = 0.99$ ),植被覆盖度 25%以下对坡面减沙起到重要作用,50%的植被覆盖度是紫色土坡面有效控制水土流失的临界盖度;(3)侵蚀泥沙中以微团聚体(<0.25 mm)为主,各级团聚体基本上随着植被覆盖度的增加而呈现减少趋势;(4)通过统计分析,植被覆盖度对产流、产沙量的影响均为极显著(p<0.01)。紫色土坡面植被覆盖度达到 50%对涵养水源、保持水土起到至关重要的作用。

关键词:紫色土;植被覆盖度;产流量;产沙量;人工模拟降雨

**中图分类号:**S157.2 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)03-0033-06

DOI:10.13870/j. cnki. stbcxb. 2017.03.006

# Effects of Slope Gradients on Erosion Under Different Vegetation Coverage on Purple Slopes

DAI Jinmei<sup>1,2</sup>, ZHA Xuan<sup>1,2</sup>, HUANG Shaoyan<sup>1,2</sup>, CHEN Shifa<sup>1,2</sup>,

ZHAI Shaohua<sup>1,2</sup>, WANG Liyuan<sup>1,2</sup>, LIU Chuan<sup>1,2</sup>

(1. Subtropical Fujian Province Key Laboratory of Resources and Environment, Fuzhou 350007;

2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: The paper analyzed the erosion processes of purple soil slopes using the method of artificially simulated rainfall experiment and lab analysis to study the effects of vegetation coverage on the erosion processes of purple soil slopes, and discussed the critical point problem of slope vegetation cover. The results showed that: (1) As a whole, with the increase of vegetation coverage, the runoff on purple soil slopes decreased. The was a significant negative relationship between the vegetation coverage and the runoff. However, when the vegetation coverage was less than 25%, the changes in runoff were not obvious. When the vegetation coverage reached 75%, the stable value of the runoff was low, being obviously lower than that when the vegetation coverage was 0%, 25%, and 50%. (2) Sediment yield decreased rapidly with the increase of vegetation coverage and the runoff. When the vegetation coverage was below the critical value of 25%, the vegetation played an important role in decreasing sediment load. A vegetation coverage 50% was the critical coverage for soil erosion control on purple soil slope. (3) Soil microaggregates (< 0.25mm) were the main parts in eroded sediment. Basically, all levels of soil aggregates decreased with the increase of vegetation coverage. (4) Through statistical analysis, the vegetation coverage caused an extremely significant effect on runoff and sediment yield (p < 0.01). Moreover, when the vegetation coverage reached 50%, vegetation played a vital role in soil and

water conservation, and reduced soil and water erosion on purple soil slopes.

Keywords: purple soil; vegetation coverage; runoff yield; sediment yield; artificially simulated rainfall

资助项目:国家科技支撑计划"福建红壤区生态修复和持续经营关键技术集成和示范"(2014BAD15B02)

第一作者:戴金梅(1992一),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:djm19921020@163.com

通信作者:查轩(1961—),男,博导,研究员,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:xzha@fjnu.edu.cn

紫色土因其特有的紫色而命名,广泛分布于我国南 方的15个省,是我国重要的土壤资源[1];具有物理风化 强烈,成土迅速,土层薄,水土流失严重等特点[2]。紫色 土地区的平均侵蚀模数约为 3 365 t/(km<sup>2</sup> • a),严重的 土壤侵蚀导致土层变薄,养分流失,制约了当地的农业 生产,同时泥沙淤积河道,加大洪涝灾害的风险[3]。 我国关于土壤侵蚀的研究主要集中在黄土高原地 区[4-6],对于紫色土区土壤侵蚀研究较少,仅有的研究 主要围绕土地利用方式、坡度、雨强对土壤侵蚀的影 响<sup>[7-9]</sup>。紫色土的研究主要集中在坡面侵蚀<sup>[10-12]</sup>的研 究,主要是因为坡面泥沙的流失是江河泥沙产生的主 要来源,也是造成坡耕地生产能力降低的主要因素之 一[13]。而坡面侵蚀的影响因素包括:降雨强度[14]、坡 度<sup>[15]</sup>、坡长<sup>[16]</sup>、土壤前期含水量<sup>[17]</sup>、植被覆盖度<sup>[18]</sup> 等。其中,植被恢复速率和程度是影响土壤侵蚀最敏 感的因子,植被覆盖度对控制水土流失起关键作 用<sup>[19]</sup>。植被主要通过隔绝降雨直接打击地面、消减 径流的冲刷力、增加下渗来减少径流和泥沙。而植被 覆盖度对坡面侵蚀的影响研究较少,已有研究主要集 中在黄土区、红壤区<sup>[20-21]</sup>,而对于紫色土区的研究相 对较少。侵蚀坡度临界问题已经解决[22],而植被覆 盖度对坡面侵蚀的临界问题研究较少。

本文在人工模拟降雨条件下,研究不同植被覆盖 度对紫色土坡面产流产沙过程的影响,初步提出有效 控制紫色土坡面水土流失的植被覆盖度临界值,为了 解紫色土土壤侵蚀的过程机理并揭示不同植被覆盖 度对土壤侵蚀的过程机制提供科学依据,为紫色土区 水土流失治理提供参考。

# 1 材料与方法

# 1.1 供试土样

供试土样于 2014 年 6 月采自福建省宁化县石壁 镇(116°32′—117°02′ E,26°03′—26°10′ N),该区域 是南方典型的紫色土侵蚀区,紫色土总面积 185.32 km<sup>2</sup>。土壤颗粒组成结构为:>3.0 mm 的颗粒占 41.86%,3.0~2.0 mm 的颗粒占 10.37%,2.0~1.0 mm 的颗粒占 5.6%,1.0~0.5 mm 的颗粒占 17.02%,0.5~0.25 mm 的颗粒占 8.1%,<0.25 mm 的颗粒占 17.06%。

## 1.2 试验小区设计

试验小区设计为可移动式钢槽(长1.5 m、宽0.5 m、深0.35 m),试验坡度为15°。装填土槽之前,在 土槽底部钻4个孔径为1 cm的排水孔,在土槽底部 填5 cm厚沙石,上铺设棉纱布,以保障试验过程中土 槽排水良好,同时使土壤的变异性最小<sup>[23]</sup>。供试土 样风干过1 cm筛,装土时采用分层填土,每层土厚度 为5—10 cm,填土时边填土边压实;同时,将土槽四 周边壁尽量压实,以尽可能减小边界效应的影响<sup>[24]</sup>。 土壤的容重控制在 1.35~1.42 g/cm<sup>3</sup>。植被覆盖度 共设 4 个处理: [(植被覆盖度 0%), ]](植被覆盖度 25%), [](植被覆盖度 50%), ]\(植被覆盖度 75%)。 采用 PhotoShop 软件计算植被覆盖度。

### 1.3 人工模拟降雨设备

人工模拟降雨设备是 BX-1 型侧喷式野外模拟 降雨器,降雨均匀度大于 80%,降雨强度的调控范围 为 20~200 mm/h,符合试验要求。试验设置的降雨 高度为 6 m,喷头直径从 5~12 mm 8 个梯度,通过率 定,最终确定 1.0,1.5 mm/min 降雨强度来进行模拟 降雨试验,最后各选定 3 场降雨。

### 1.4 样品采集与处理

坡面产流开始,每场降雨历时 30 min,每 3 min 取一次径流泥沙样。降雨结束后,静置 12 h,测量其 径流量,将底层的泥沙过筛,并冲入铝盒,放入 105 ℃ 的烘箱烘干,称重。

# 2 结果与分析

### 2.1 植被覆盖度对坡面产流的影响

由图1可知,总体上,随着植被覆盖度的增加,径 流量不断减小;二者呈现显著线性负相关关系。由表 1可知,从裸露坡面到植被覆盖度 75%的坡面,径流 量的斜率不断增大,径流量的减少幅度不断增大。从 裸露坡面到植被覆盖度 25%坡面,径流量减少的幅 度小,说明植被覆盖度小于25%,对减少径流,增加 入渗效果不明显;植被覆盖度 50%到 75% 对减少径 流效果显著。从 1.0 mm/min 雨强下的平均径流量 来看,裸露坡面平均径流量为 0.51 L/min,25% 植被 覆盖度坡面平均径流量为 0.48 L/min,50% 植被覆 盖度坡面平均径流量为 0.41 L/min,75% 植被覆盖 度坡面平均径流量为 0.28 L/min, 植被覆盖度由 50%到 75% 变化最为显著。1.0 mm/min 雨强下, 25%植被覆盖度时坡面径流量减少5%,在50%植被 覆盖度时坡面径流量减少15%;而在75%植被覆盖 度时坡面径流量减少了 31%;1.5 mm/min 雨强下, 25%植被覆盖度时坡面径流量没有变化,在50%植 被覆盖度时坡面径流量减少11%;而在75%植被覆 盖度时坡面径流量减少了 28%;刘纪根等[25]研究发 现,紫色土坡面植被覆盖度达到 60%时,径流量明显 低于裸露坡面和 20%、40% 植被覆盖度坡面;本文中 植被覆盖度达到 75%时,坡面的产流量明显低于其 他几个植被覆盖度。

随着植被覆盖度的增大,产流量逐渐减少,这是由 于植被对降雨的截留和分流作用而造成。随植被覆盖 度增加,坡面流阻力系数增加<sup>[26]</sup>,降低径流流速,增加水 流与地面接触的时间,下渗量增加,从而减少地表径流。 植物叶片对雨滴有分流作用,当雨滴打在叶片上,雨滴 会顺着叶片的方向滴落到坡面,叶片的形状不一,造成 水流分散,水流能与坡面充分接触,使水分充分入渗。



图 1 径流量随植被覆盖度的变化特征

由图 2 可知,坡面产流量分 3 个阶段:初期低产 流量,中期的波动上升和后期稍有下降至相对稳定状



态。初期大部分降雨被土壤吸收,转化成坡面径流量 较少;随后土壤的含水量不断增加,坡面入渗量不断 减少,降雨转化成径流的比率提高;最后坡面形成稳 定的入渗量,降雨转化成径流的比率基本一定。在2 种降雨强度下,50% 植被覆盖度坡面产流量波动较 大,产流量处于较高水平;植被覆盖度达到 75%时, 坡面的产流量处于较低水平,同时状态稳定,在降雨 过程中,植被对降雨的分配比较均匀。

表1 径流量倾斜程度

植被	1.0  mm/min	1.5 mm/min	
覆盖度/%	产流量斜率	产流量斜率	
0~25	-0.785	0.20	
$25 \sim 50$	-2.230	-2.08	
$50 \sim 75$	-3.780	-4.67	



图 2 不同植被覆盖度下坡面产量变化过程

## 2.2 植被覆盖度对坡面产沙的影响

由图 3 可知,随着植被覆盖度的增加,侵蚀泥沙量 逐渐减少。植被覆盖度高的坡面产沙量始终比覆盖度 低的坡面少;1.0 mm/min 雨强下,25%植被覆盖度坡面 产沙量是裸露坡面产沙量的 46%;50%植被覆盖度坡面 产沙量是裸露坡面产沙量的 28%;75%植被覆盖度坡面 产沙量是裸露坡面产沙量的 18%。说明植被对保土固 沙有很大的作用。在 1.5 mm/min 雨强下,25%植被覆



盖度坡面产沙量是裸露坡面产沙量的41%;50%植被覆 盖度坡面产沙量是裸露坡面产沙量的14%;75%植被覆 盖度坡面产沙量是裸露坡面产沙量的14%;75%植被覆 菌强度下,坡面植被覆盖度从0到25%对减沙效果影响 显著,当坡面植被覆盖度达到50%时,坡面的侵蚀泥沙 量进入相对稳定值,特别是在1.5 mm/min大雨强下。 据此推断在大雨强下,50%植被覆盖度可以视为有效的 控制坡面泥沙流失的临界值。



#### 图 3 不同植被覆盖度坡面累计侵蚀泥沙量

由图 4 可知,裸露坡面产沙量随时间的变化波动 大,产沙量最大,其他 3 种覆盖度的产沙量前期波动 上升。降雨强度为 1.0 mm/min 时,21 min 达到峰 值;降雨强度为 1.5 mm/min 时,12 min 达到峰值, 之后平稳下降,最后相对达到一种稳定状态。降雨初 始阶段,降雨大部分下渗,难以形成冲刷力强的径流, 在初期侵蚀泥沙量相对较少;降雨中期入渗稳定,坡 面汇集径流,泥沙量逐渐增多;后期径流汇集稳定,泥 沙量减少到一个相对稳定值。

随着植被覆盖度的增加,产沙量变化幅度减小。 裸露坡面与 25% 植被覆盖度坡面产沙量之间变化极 显著,说明植被覆盖度小于 25%时,植被对减少侵蚀量 有极显著的作用。50%和75%植被覆盖度坡面产沙量 一直处于较平稳的状态,变化很小,侵蚀量也很小, 50%植被覆盖度坡面侵蚀量与75%植被覆盖度坡面侵 蚀量差距小,在1.0 mm/min 雨强下 50%植被覆盖度 坡面与75%植被覆盖度坡面侵蚀泥沙差值变化呈变 大一变小一相近的趋势;在1.5 mm/min 雨强下二者 基本上相近,可能是因为小区的面积较小。当植被覆 盖度达到 50%时,坡面产沙量会达到一个相对较低的 稳定值,变化幅度较小,说明在紫色土坡面上植被覆盖 度达到 50%就能起到水土保持作用。

王升等[20] 对黄土坡面进行放水冲刷,认为当植



被覆盖度达到 43.2%就对减少泥沙量起到明显的作 用;丛月等<sup>[27]</sup>对华北土石山区不同植被覆盖度对溅 蚀量的影响进行研究,认为植被覆盖度 40%是一个 临界值;吴秀芹等<sup>[28]</sup>对喀斯特山区的研究认为,植被 覆盖度 20%~60%对土壤侵蚀的控制存在临界值; 刘斌等<sup>[29]</sup>提出从防治水土流失的角度出发,黄土高 原沟壑区,草地建设的有效植被覆盖度应不小于 50%;不同的区域植被覆盖度的临界值不同,但是临 界值普遍分布在 40%~80%之间,本文认为紫色土 区的临界值是植被覆盖度 50%,达到这个临界值就 能有效的控制泥沙的侵蚀。



图 4 不同植被覆盖度下坡面产沙变化过程

#### 2.3 植被覆盖度对侵蚀泥沙水稳性团聚体的影响

土壤颗粒组成参照美国制分级标准,侵蚀泥沙中 土壤颗粒粒径组成如图 5 所示。粒径<0.25 mm 的 泥沙重量最大,其次是粒径较大的颗粒;1~0.25 mm 的粒径重量最小,侵蚀泥沙颗粒呈现双峰分布,大颗 粒和小颗粒容易被搬运,中间粒径不易被搬运<sup>[30-31]</sup>。



此外,这与紫色土土壤质地相关。侵蚀泥沙量基本上 随着植被覆盖度的增加而减小。以<0.25 mm的微 团聚体为例,随着植被覆盖度增加,侵蚀泥沙量减小; 植被覆盖度从0到25%,泥沙量变化最为显著,植被 覆盖度50%和75%泥沙量差距不明显,说明50%植 被覆盖度是一个产沙量临界值。



图 5 侵蚀泥沙颗粒分布

为了探讨不同颗粒粒径随降雨历时的变化过程, 以微团聚体(<0.25 mm)为例,绘制侵蚀泥沙中微团 聚体随降雨历时的变化过程(图 6)。在 1.0 mm/min 降雨强度下,裸露坡面的侵蚀泥沙中微团聚体变化幅 度大,初始阶段微团聚体的重量还处在一个低值,但 是相对其他 3 种覆盖度还是较高的水平,之后一直在 波动上升。这是因为初期降雨大部分被土壤吸收,产 流量小,所以对土壤的冲刷力弱,细颗粒流失量少,后 期土壤下渗量减少,产流量增加,表层细颗粒随着产 流增加而发生迁移。植被覆盖度 25%的坡面,初期 微团聚体重量波动上升,中期稳定下降,后期处于一 个相对稳定的状态,这主要是因为前期产流量处于波 动上升,径流选择性搬运细颗粒,被径流搬运的细颗 粒土壤较多。中期随降雨历时的延长细颗粒土壤减 少,主要因为坡面表层细颗粒减少;后期处于相对稳 定状态,雨滴打击剥离分散土壤大团聚体,而在大团 聚体被剥离分散的瞬间会有相对较多的微团聚体随 径流流失<sup>[32]</sup>。植被覆盖度 50%和 75%的坡面微团 聚体的流失量处于平稳的波动状态,主要是因为植被 减缓径流的速度,使径流中携带细颗粒沉积下来。在 1.5 mm/min 降雨强度下,微团聚体的变化幅度比较 小,但裸露坡面一直处于高水平状态。随着植被覆盖 度的增加,坡面侵蚀微团聚体重量不断减小,植被覆 盖度 50%与 75%之间基本上没有差距,说明在大雨



强下对于减少微团聚体来说,50%的植被覆盖度是有效的控制泥沙侵蚀的临界盖度。



图 6 不同植被覆盖度下坡面侵蚀微团聚体(<0.25 mm)的变化过程

# 2.4 植被覆盖度对产流、产沙的统计分析

通过单因子方差分析,植被覆盖度对产流、产沙 量的影响均为极显著(p<0.01),说明随着植被覆盖 度的增加,坡面的产流、产沙量不断减小。对坡面植 被覆盖度与产流量、产沙量之间进行方程拟合(表 2),植被覆盖度与产流量线性拟合效果显著,在1.0 mm/min降雨强度下,拟合方程相关系数达到0.92; 植被覆盖度与产沙量利用多项式进行拟合,二者之间 的相关系数达到0.99;说明植被覆盖度与产流、产沙 之间相关性显著。

表 2 不同植被覆盖度与产流、产沙模型

相关因子	降雨强度/	圳人士把	相关系数
	$(mm \cdot min^-$	1以百刀性	
产流量 $(Y_1)$ 与	1.0	$Y_1 = -2.2615x + 18.205$	0.9194
植被覆盖度(x)	1.5	$Y_1 = -2.173x + 21.9$	0.7991
产沙量(Y <sub>2</sub> )与	1.0	$Y_2 = 1.1988x^2 - 8.9043x + 18.541$	0.9908
植被覆盖度(x)	1.5	$Y_2 = 1.77x^2 - 12.226x + 22.265$	0.9997

# 3 结论

(1)总体上,紫色土坡面产流量随植被覆盖度的 增大而减小,二者之间呈现线性负相关。但是存在植 被覆盖度从 0 到 25%,对减少径流没有显著影响;植 被覆盖度从 50%到 75%,径流显著减少;植被覆盖度 达 75%时径流量处于较低的稳定值,明显低于植被 覆盖度 0%,25%,50%。

(2)紫色土坡面侵蚀泥沙量随植被覆盖度的增加而 减少,二者之间呈现二次项相关,相关系数达 0.99。植 被覆盖度 25%的坡面产沙量是裸露坡面的 46%,说明 坡面稍有植被覆盖就对减沙起到重要的影响;植被覆 盖度 50%和 75%的坡面,二者之间随着降雨历时的 延长,侵蚀泥沙量变化逐渐平稳且相接近,特别是在 大雨强作用下,效果更加明显,说明 50%的植被覆盖 度是紫色土坡面有效控制水土流失的临界盖度。

(3)紫色土坡面侵蚀泥沙中以微团聚体(<0.25 mm)为主,随着植被覆盖度的增加,各级团聚体基本 上都是呈现减少趋势。通过统计分析,植被覆盖度对 产流、产沙量的影响均为极显著(p<0.01)。

#### 参考文献:

- [1] 刘力,郑粉莉.紫色土土壤侵蚀研究进展[J].安徽农业 科学,2006,34(12):2804-2805.
- [2] 朱波,况福虹,高美荣,等.土层厚度对紫色土坡地生产 力的影响[J].山地学报,2009,27(6):735-739.
- [3] 钟壬琳,张平仓.紫色土坡面径流与侵蚀特征模拟试验 研究[J].长江科学院院报,2011,28(11):22-27.
- [4] 张旭昇,薛天柱,马灿,等.雨强和植被覆盖度对典型坡 面产流产沙的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26 (6):66-70.
- [5] 盛贺伟,蔡强国,孙莉英.黄土质地对坡面侵蚀的影响 [J].水土保持学报,2016,30(1):31-35.
- [6] 陈晓鹏,周蓓蓓,陶汪海,等.变雨强对黄土坡地水土养 分流失机制研究[J].水土保持学报,2016,30(4):33-37.
- [7] 林超文,陈一兵,黄晶晶,等.不同耕作方式和雨强对紫 色土养分流失的影响[J].中国农业科学,2007,40(10): 2241-2249.
- [8] 罗春燕,涂仕华,庞良玉,等.降雨强度对紫色土坡耕地 养分流失的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):24-27.
- [9] 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.
- [10] 许海超,李子君,林锦阔,等.燕山土石山区降雨和下垫 面条件对坡面侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2016,34 (1):46-53.
- [11] 王志伟,陈志成,艾钊,等.不同雨强与坡度对沂蒙山区 典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报, 2012,26(6):17-20.
- [12] 马美景,王军光,郭忠录,等.放水冲刷对红壤坡面侵蚀 过程及溶质迁移特征的影响[J].土壤学报,2016,53 (2):365-374.
- [13] 陈晓燕,牛青霞,周继,等.人工模拟降雨条件下紫色土 陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J].水土保持学 报,2010,24(5):163-168.
- [14] 耿晓东,郑粉莉,刘力,等.降雨强度和坡度双因子对紫色 土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):50-55.
- [15] 王玉宽,王勇强,傅斌,等.紫色土坡面降雨侵蚀试验研

究[J].山地学报,2006,24(5):597-600.

- [16] 王秀颖,刘和平,刘宝元.变雨强人工降雨条件下坡长对径 流的影响研究[J].水土保持学报,2010,24(6):1-5.
- [17] 司登宇,张金池,闵俊杰,等.模拟降雨条件下苏南黄壤 产流起始时间及影响因素研究[J].干旱区资源与环 境,2013,27(5):184-189.
- [18] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径 流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报,2010,47(3): 401-407.
- [19] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究 进展[J]. 生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [20] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下 产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26 (4):23-27.
- [21] 张思毅,梁志权,谢真越,等. 植被调控红壤坡面土壤侵 蚀机理[J]. 水土保持学报,2016,30(3):1-5.
- [22] 代数,蒋光毅,夏清,等.坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡 地产流产沙特征的影响[J].水土保持学报,2011,25 (4):1-5.
- [23] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面 土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3): 40-43.
- [24] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. 农业机械学报,2015,46(7): 162-170.

- [25] 刘纪根,张昕川,李力,等.紫色土坡面植被覆盖度对水 土流失影响研究[J].水土保持研究,2015,22(3):16-20,27.
- [26] 戴矜君,程金花,张洪江,等. 植被覆盖下坡面流阻力变 化规律[J]. 水土保持学报,2016,30(2):44-49.
- [27] 丛月,张洪江,程金花,等.华北土石山区草本植被覆盖 度对降雨溅蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(5): 59-62.
- [28] 吴秀芹,蔡运龙,蒙吉军.喀斯特山区土壤侵蚀与土地 利用关系研究:以贵州省关岭县石板桥流域为例[J]. 水土保持研究,2005,12(4):46-48.
- [29] 刘斌,罗全华,常文哲,等.不同林草植被覆盖度的水土 保持效益及适宜植被覆盖度[J].中国水土保持科学, 2008,6(6):68-73.
- [30] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low streampowers[J]. Journal of Hydrology, 2007, 342(S1/ 2): 134-142.
- [31] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. Journal of Hydrology, 2012, 454/455(3): 123-130.
- [32] 刘纪根,张昕川,李力,等.紫色土坡面植被格局对水土 流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):1-6.

#### (上接第 32 页)

- [23] Sun J M, Yu X X, Li H Z, et al. Simulated erosion using soils from vegetated slopes in the Jiufeng Mountains, China [J]. Catena, 2016, 136(SI): 128-1134.
- [24] Seitz S, Goebes P, Zumstein P, et al. The influence of leaf litter diversity and soil fauna on initial soil erosion in subtropical forests[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 40(11): 1439-1447.
- [25] Mengistu B D, Assefa M M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment

concentration and sediment enrichment ratio[J]. Catena, 2012, 90(3): 47-52.

- [26] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面 土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3): 40-43.
- [27] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀 产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
- [28] 余长洪,李就好,陈凯,等.强降雨条件下砖红壤坡面产 流产沙过程研究[J].水土保持学报,2015,29(2):7-10.