

紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应

李馨欣¹, 王小燕¹, 蔡崇法², 李鸿¹

(1. 西南大学资源环境学院, 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 华中农业大学资源环境学院, 武汉 430070)

摘要: 为研究降雨强度对紫色土坡耕地不同深度土壤水分含量和壤中流的影响, 初步揭示紫色土水分和壤中流之间的相互耦合关系, 通过原位人工模拟降雨试验, 在 60, 90, 120 mm/h 3 种降雨强度条件下, 采用 Minitrase TDR 可埋式探头对紫色土坡耕地土壤剖面浅层(0—20 cm)、中层(20—40 cm)、深层(40—60 cm)的土壤水分含量进行了实时连续测定, 并在降雨过程中分层收集测量壤中流, 开展了降雨—产流过程的观测试验。结果表明: (1) 当雨强较小时, 浅层土壤含水率变化曲线呈现上升期和稳定期, 随着雨强和深度的增加则呈上升期、稳定期或始终处于稳定期; (2) 随深度和降雨强度的增加, 土壤含水率稳定时间增加, 含水率变化越小, 响应越不明显; (3) 在不同降雨强度条件下, 各土层均有壤中流产生, 低雨强条件下壤中流都是单峰产流过程, 中雨强和高雨强下为双峰产流过程; (4) 壤中流产流时间随雨强增大而显著减小, 随深度增加而显著增加; (5) 降雨强度与土壤水分含量和壤中流参数三者间相互有显著相关性。

关键词: 模拟降雨; 紫色土; 土壤水分含量; 壤中流; 降雨强度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0025-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.05.005

Response of Soil Water Content and Subsurface Flow to Rainfall Intensity in Purple Soil

LI Xinxin¹, WANG Xiaoyan¹, CAI Chongfa², LI Hong¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Region (Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400715;

2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: Subsurface flow is an important form of water flow in slope cropland of purple soil area, while rainfall intensity is the key factor to control subsurface flow and soil water content. In order to understand the impact of rainfall intensity on soil water and subsurface flow at different layers of purple soil depth and to discover the correlation between water content and interflow in purple soil area, Minitrase TDR probes were buried into purple soil profile, which included superficial layer (0—20 cm), middle layer (20—40 cm) and deep layer (40—60 cm), to continuously measure soil moisture content in situ under the conditions of three simulated rainfall intensities (60 mm/h, 90 mm/h and 120 mm/h). During the simulated rainfall process, the precipitation-runoff-producing was observed by collecting different layers' interflow. The results indicated that: (1) When the simulated rainfall intensity was small, the changes of soil water content in superficial layer showed a trend of from rising to stability. Then along with the increasing rainfall intensity and soil depth, it presented rising, stable or always stable state. (2) As the soil depth and rainfall intensity increased, the response of soil water content to rainfall intensity was not obvious, with an increasing stabilization time and little change in soil water content. (3) The presence of various levels of interflow was observed in all layers under different rainfall intensities. Subsurface flow producing presented an unimodal process under low rainfall intensity conditions, otherwise, it had double peaks. (4) The producing time of interflow declined significantly with higher rainfall intensity, and increased with deeper layers. (5) It could be concluded that rainfall intensity had obvious correlations with soil water content and subsurface flow.

Keywords: simulated rainfall; purple soil; soil water content; subsurface flow; rainfall intensity

收稿日期: 2017-04-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“碎石分布对紫色土坡面侵蚀的影响及其作用机制”(40120514); 中央高校基本科研业务费专项“紫色土丘陵区不同土层土壤水运移规律研究”(XDJK2013C152)

第一作者: 李馨欣(1993—), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀、水文学方面研究。E-mail: 13452040245@163.com

通信作者: 王小燕(1983—), 女, 四川岳池人, 博士研究生, 主要从事土壤水分、土壤侵蚀机制与水土保持方面研究。E-mail: youblue@swu.edu.cn

壤中流是指水分在土壤内的运动,包括水分在土壤内的垂直下渗和水平侧渗^[1-2],它受降雨强度、坡度、不同土地利用方式、土层厚度等因子影响^[3-6],是坡地径流的重要组成部分,对流域径流产生、养分流失和土壤侵蚀等都有重要影响^[7-8]。紫色土是长江上游最重要的耕地资源之一,具有物理风化速度快且养分丰富的特征,高强度的土地耕种加之该地区降雨集中多暴雨,共同导致了严重的水土流失问题^[9]。我国紫色土地地区的侵蚀面积和侵蚀强度仅次于黄土地区。由于紫色土土壤浅薄且入渗能力较强,地表径流和壤中流是紫色土坡面暴雨过程中的 2 个主要水文组分,两者在水土流失和污染物质输移过程中有着同等重要的作用。壤中流发育是紫色土坡耕地水文过程最显著的特征之一^[10-11]。Wilson 等^[12]研究表明,在降雨和大孔隙流共同作用条件下,土壤侵蚀量是仅有面蚀存在条件下的 20 倍,强调在壤中流普遍存在的地区,只考虑地表侵蚀过程而设计的水土保持措施可能达不到预期治理效果。崔艳平等^[13]采用人工模拟降雨试验研究表明水文条件对紫色土坡面土壤侵蚀过程及氮磷养分流失产生不同的影响,进而影响坡面农业污染物的迁移转化过程。土壤水与多个学科、多个应用领域有着密不可分的关系^[14]。水是养分流失的重要载体,是土壤侵蚀的主要动力因子^[15]。土壤水分的变化很大程度上受降雨的影响,其对降雨的响应过程是土壤水文循环的核心组成部分之一^[16-17],同时土壤水分又是降雨径流响应的主要控制因素^[18]。陈洪松等^[19]、张秋英等^[20]、李谦等^[21]、刘宏伟等^[22]从不同的前期土壤含水量、地表与地下剖面、土地利用类型等方面比较了土壤水分对降雨的响应特征。

近年来,有关土壤水分变化过程和壤中流产流规律的问题一直是研究热点,并逐步由静止走向动态、定性描述走向定量描述。Lin 等^[23]运用水文土壤学方法,通过对美国宾州野外试验的观测,展开了土壤含水率随降雨过程的变化规律及其优势流现象的讨论。刘刚才等^[24]研究认为对紫色土区土壤产流和水分变化特征的研究,是认识该区土壤侵蚀、非点源污染等机理和规律的基础,也是解决该区水患问题、实施径流调节而加强水土保持等的基本科学依据。付智勇等^[7]通过紫色土坡地野外模拟降雨试验发现,降雨强度和表土结皮程度的变化对水分运移和壤中流产流过程产生了明显影响。以上说明,壤中流和土壤水分之间的相互耦合效应能对紫色土区土壤侵蚀和污染物的迁移产生重要影响。较多涉及壤中流的水文研究表明,壤中流等水文过程主要与土壤厚度和土壤结构等性质有关,因而一般在典型厚度的微型小区分层次测定壤中流。谢颂华等^[5]在红壤坡地壤中流输出特征研究中对不同深度(30 cm

和 60 cm)壤中流输出开展了观测试验,结果表明坡地壤中流各层产流过程均随着土层的加深出现明显的滞后和拖尾,付智勇等^[25]在三峡库区不同厚度紫色土坡面水文过程的研究中也采用了微型小区(2 m×1 m)分层测定壤中流的方法,试验表明微型小区下对紫色土坡面水文过程的研究具有可行性,土层厚度是影响土壤剖面保存和重新分配降雨水分的关键因子。Ohrstrom 等^[26]、Badoux 等^[27]在人工模拟降雨试验结果中表明,无论是微型小区尺度(1 m²),还是较大小区(50~110 m²)尺度条件下,试验的主要水文过程都是一致的,均具有可行性和代表性。

试验小区土壤剖面中,随土层深度的增加土壤孔隙数量减少,而土壤黏粒含量呈增加趋势。众多研究者在具有这种构型的森林土壤或其他类型土壤中均观测到了明显的壤中流现象,发现此种土壤剖面构型有利于壤中流的发生^[9,28-29]。鉴于此,本研究通过原位小区进行模拟降雨试验,运用土壤剖面水分动态监测等方法,对不同雨强条件下紫色土壤中流发生、发展过程及其与土壤水分动态过程间的关系进行深入探索,通过对土壤体积含水率曲线和壤中流产流过程线的描述,以及对降雨强度与各壤中流参数、水分参数进行定量分析,初步揭示紫色土水分和壤中流之间的相互耦合关系以及紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应表现,以期对紫色土土壤侵蚀和面源污染防治方面提供有用的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及小区布设

研究区位于重庆市北碚区西南大学水土保持教学试验基地,试验于 2015 年 8 月 1 日—9 月 3 日进行。基地位于北纬 30°26′,东经 106°26′,年平均气温 18.3℃,年日照 1 276.7 h,无霜期约 334 d,年降水量 1 105.4 mm,5—9 月份的降雨量占全年降雨量的 70%。土壤为中生代侏罗纪沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的紫色土(粉壤土),物理分化是其主要的成土过程。各小区土壤基本情况见表 1。

在一个完整的坡面上选择了一块花生种植地进行模拟降雨试验,建立小区前,在小区所需面积范围内,连根清除耕地上的花生和杂草,以及表土所有的碎石和枯枝落叶等。在顺坡方向建立了 2 个 4 m×1 m 的平行试验小区(A 和 B)作为重复,小区的坡度为 20°(图 1)。在各小区的上边、左右边 3 侧使用厚 0.5 cm,高 50 cm 的钢板打入地下 30 cm 作为隔水墙,并将钢板两侧土壤夯实,敷以细黏土减少边界效应,分隔小区内外径流(小区的上边和左右边均有一定的缓冲区,以保证只收集小区内壤中流)。在小区坡脚部位垂直开挖长为 1 m,宽为 0.5 m,深度至母质层的

沟渠,分别在地表及土壤层和岩石风化层界面处(即土壤剖面 5,20,40,60 cm 深度处)插入与坡面平行的“V”形集水槽,通过塑料管将集水槽与径流收集桶相连接,以收集地表径流和各层次壤中流。收集壤中流的“V”形集水槽略窄于小区宽度,以保证只收集小区

内壤中流,并防止出口边界处地表径流进入到壤中流集水槽。其中土壤含水量的变化通过水平埋设于小区中的 16 组 Minitrase TDR 20 cm 长可埋型探头进行实时动态监测(分别在表土上距离小区顶部 1/3 和 2/3 处,以及土壤剖面深度 10,30,50 cm 处)。

表 1 各小区土壤基本物理性质

小区编号	土层深度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	碎石含量/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	有机质含量/(g·kg ⁻¹)
A	0—20	41.26	38.68	20.06	3.89	1.09	4.21
	20—40	40.20	36.51	23.28	5.56	1.10	8.42
	40—60	38.82	36.38	24.80	2.22	1.15	6.36
B	0—20	37.45	39.06	23.49	22.22	1.13	4.12
	20—40	32.99	44.24	23.77	16.67	1.33	9.32
	40—60	32.76	40.02	27.22	13.89	1.76	4.54

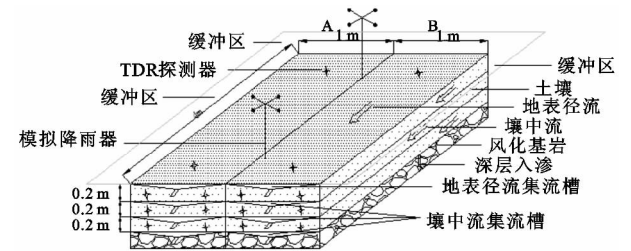


图 1 模拟降雨试验小区示意

1.2 人工模拟降雨试验

本研究采用的模拟降雨器为顶喷式降雨器。降雨器的核心是 SPRACO 锥形喷头,降雨的空间均匀度和降雨动能接近自然降雨。试验前进行降雨率定,降雨器降雨的覆盖直径可达 3 m,雨滴中数 2.40 mm,均匀度约 89.7%。降雨强度由降雨器喷头个数来控制。利用水泵从蓄水池抽水保证水量供应。根据当地多年降水特征,试验采用 60 mm/h(低雨强)、90 mm/h(中雨强)、120 mm/h(高雨强)3 种雨强,实际降雨强度分别为 50.3 mm/h(低雨强)、100.5 mm/h(中雨强)、119.3 mm/h(高雨强),降雨历时分别为 120,90,90 min。试验前进行雨强率定,降雨过程中在 2 个小区中间位置放置 WatchDog 3554WD 自动雨量计,以实时监控降雨强度,同时分别在小区的四角放置人工雨量筒以校核降雨均匀度。降雨时间间隔约 24 h,尽量消除前期含水量差异对试验结果的影响,降雨前小区表现为田间持水量,平均含水率分布在 25%左右。

每次降雨前,对小区表土 5 cm 进行浅耕翻松和平整,保证各试验前期小区地表状况一致。从降雨开始起计时,记录地表径流产流时间和壤中流产流时间,每隔 3 min 采集地表径流和壤中流,并记录径流体积,读取土体含水率数据。

1.3 测定方法

TDR 型号为 Minitrase-SEC,数据采集时间间隔约 120 s,测定精度为±0.005 cm³/cm³。

由于土壤在剖面上没有明显的层次性,所以本研究以 20 cm 为间隔取样,从 0—20 cm 土层(浅层)、

20—40 cm 土层(中层)、40—60 cm 土层(深层)3 个土层分别取样,取样规格为 30 cm×30 cm×20 cm,即长宽为 30 cm,深 20 cm,此土样用于测定土壤容重、土壤质地(吸管法)、土壤有机质(重铬酸钾法)、土壤碎石含量,其中碎石通过水洗法获得,再采用排水法得到碎石的体积。由于左右 2 个对比小区的土壤异质性,2 个小区内各层壤中流产流量和产流时间均存在异同,但是均具有相同规律。本文试验数据采用 IBM SPSS 21 进行统计分析。

2 结果与分析

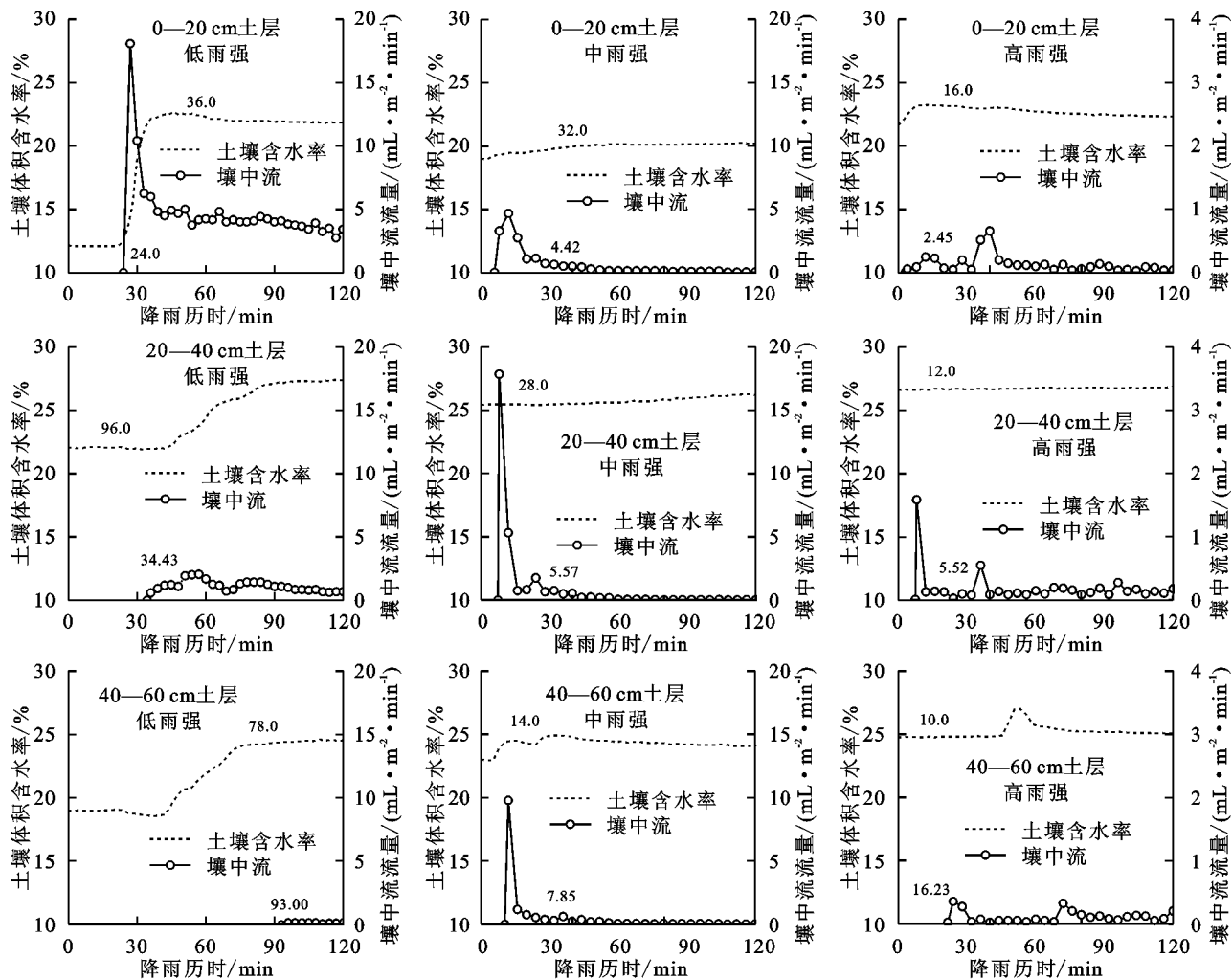
2.1 不同雨强条件下浅层土壤水分含量和壤中流特征

从土壤体积含水率曲线和壤中流产流过程线可看出,在不同雨强条件下,不同深度土层水分含量和壤中流对降雨的响应表现存在差异(图 2),且各土层水分含量对降雨的响应方式受土壤前期含水量影响(图 3)。土壤初始含水率高会导致较快的产流,降雨发生时,各土层土壤含水率随降雨过程涨落,初始含水率越大,变化幅度越小,土壤含水率稳定时间越短。陈洪松等^[19]在室内试验研究的基础上也得出此类结论,认为在相同降雨条件下随着初始含水率的增加,产流减慢,平均入渗率降低,达到稳定入渗率的时间也随之延缓。由图 2、图 3 可推测各土层壤中流在未达到饱和含水率状态下发生极有可能是存在优先流现象。前人研究表明含水率上涨更早、更快并先达到一个近饱和状态,这种降雨进入土壤后发生土壤含水率下层先涨,上层后涨的现象是自然条件下优先流发生的标志^[23,28]。

当土壤含水率不再随降雨过程急剧变化,趋于稳定状态时,认为其趋于土壤稳定含水率及其发生时间。0—20 cm 土层在低雨强、中雨强、高雨强条件下土壤含水率稳定时间分别为 36.0,32.0,16.0 min。在低雨强条件下,0—20 cm 土层水分含量对降雨的响响应最为直接迅速,土壤含水率变化曲线呈现为上升期、稳定期,上升阶段土壤迅速吸收水分,含水率较

快升高。中雨强条件下 0—20 cm 土层水分含量的响应没有低雨强条件下的响应明显,土壤含水率变化曲线基本呈现为上升期和稳定期两个阶段,上升期历时较长。高雨强条件下 0—20 cm 土层含水率变化曲线也呈现上升期和稳定期,上升期历时较短,土壤水分含量响应特征不明显。刘宏伟等^[22]在湿润地区土壤水分

对降雨的响应模式研究中提出,地下不同深度的土壤含水率过程曲线有不同程度的滞后和涨落时间的延长,表现了土壤水分的入渗先后过程。本试验在人工降雨控制雨强条件的基础上,表明各土层土壤含水率过程曲线的不同趋势不仅表现了土壤水分入渗的先后过程,也体现出土壤水分对雨强大小的反映(图 3)。



注:图中标注的数字分别为初始产流时间(min)和土壤水分稳定时间(min)。

图 2 不同雨强条件下小区产流过程和土壤含水率变化过程

0—20 cm 土层壤中流在低雨强、中雨强、高雨强条件下初始产流时间分别为 24.0, 4.42, 2.45 min, 均在土壤体积含水率稳定之前开始产流,且所有降雨场次中壤中流均已达到稳定产流速率,因此说明壤中流过程已达到峰值流量,壤中流峰值流量分别为 18.08, 4.67, 0.24 mL/(m²·min),低雨强下产流过程为单峰,产流开始后不久流量便迅速增长,降雨停止后壤中流流量迅速减小,产流过程对降雨的响应剧烈。中雨强条件下,壤中流产流过程线呈现双峰,产流开始后不久流量便急剧增长,降雨停止后流量从减小到消失时间较短,产流过程对降雨的响应明显。在高雨强时壤中流产流过程为双峰,产流开始后一直维持较低流量,随降雨的持续流量几乎没有波动,产流过程对降雨的响应迟缓。

2.2 不同雨强条件下中层、深层土壤水分含量和壤中流特征

20—40 cm 土层在低、中、高雨强条件下土壤含水率稳定时间分别为 96.0, 28.0, 12.0 min, 40—60 cm 土层在低雨强、中雨强、高雨强条件下土壤含水率稳定时间分别为 78.0, 14.0, 10.0 min。不同雨强条件下 40—60 cm 土层水分含量对降雨的响应和 20—40 cm 土层水分含量对降雨的响应表现几乎一致。在低雨强条件下,土壤水分含量对降雨的响应明显,土壤含水率变化曲线呈上升期和稳定期,降雨停止后无明显下降。中、高雨强条件下土壤水分含量响应没有低雨强条件下响应明显,土壤含水率变化曲线呈现为上升和稳定两个阶段或平稳状态,土壤水分含量响应特征不明显。

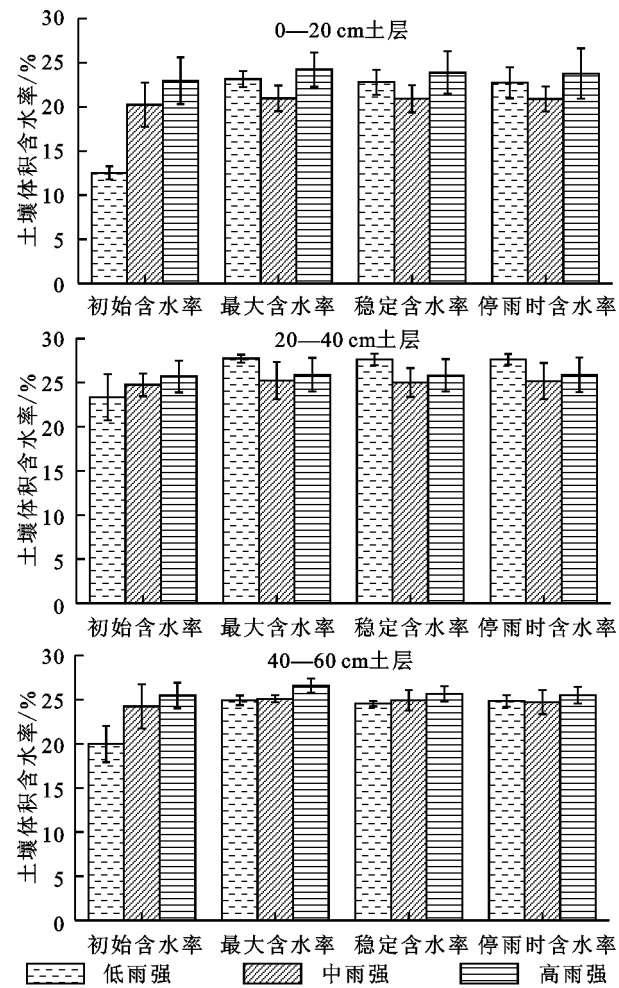


图3 不同土层的初始含水率、最大含水率、停雨时含水率和稳定含水率

20—40 cm 土层壤中流在低雨强、中雨强、高雨强条件下初始产流时间分别为 34.43,5.57,5.52 min,均在土壤体积含水率稳定之前产流,壤中流峰值流量分别为 2.04,17.84,1.58 mL/(m²·min)。40—60 cm 土层壤中流在低雨强条件下初始产流时间为 93 min,在土壤体积含水率稳定之后才开始产流,在中雨强和高雨强下初始产流时间分别为 7.85,16.23 min,在土壤体积含水率稳定之前开始产流,40—60 cm 土层壤中流在低雨强、中雨强、高雨强条件下峰值流量分别为 0.46,9.78,0.36 mL/(m²·min)。由此可见,相比较低雨强条件,中雨强和高雨强下 20—40 cm 土层壤中流峰值流量都比 0—20 cm 土层大幅度增加,说明在较大雨强

打击下,浅层土壤的土壤结构遭到破坏,易造成土壤水分运移路径发生改变,加之 20—40 cm 土层的碎石含量较高,从而土壤水分较快较多到达 20—40 cm 土层。在低雨强条件下,20—40 cm 土层壤中流产流过程为单峰过程,产流开始后不久流量便迅速增长,降雨停止流量缓慢减少,即壤中流消退速率较慢,产流过程对降雨的响应明显。中雨强条件下,20—40 cm 土层和 40—60 cm 土层壤中流产流过程线均呈现双峰,产流开始后不久流量便急剧增长,降雨停止后流量从减小到消失时间较短,壤中流消退速率较快,产流过程对降雨的响应明显。在高雨强时产流过程也均为双峰过程,产流开始后一直维持较低流量,随降雨的持续流量几乎没有波动,产流过程对降雨的响应迟缓。

2.3 降雨强度与土壤水分含量和壤中流参数的关系

为了定量评价降雨强度对土壤水分含量和壤中流参数的影响,对试验数据进行了回归分析(表 2),回归结果显示,各土层水分含量稳定时间(T_w)与降雨强度呈显著对数负相关关系,而壤中流产流时间(T_{ss})、壤中流速率(R_{ss})与降雨强度均呈显著的指数负相关关系。除 C_{ss} 外,其他参数和降雨强度回归效果都达到了显著水平($p<0.05$)。付智勇等^[7]在起始条件对坡面薄层紫色土水分和壤中流影响的研究中亦得出这一结论。

表 2 降雨强度与水分过程参数和壤中流过程参数的回归分析

回归结果	<i>F</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>
$T_w=259.678-51.350\ln I$	9.982	0.588	0.016
$T_{ss}=193.025\exp(-0.036 I)$	14.099	0.668	0.007
$R_{ss}=0.490\exp(-0.035 I)$	12.477	0.641	0.010
$C_{ss}=0.219\exp(-0.024 I)$	2.778	0.284	0.140

注: I 为降雨强度(mm/h); T_w 为土壤水分含量稳定时间(min);
 T_{ss} 为壤中流产流时间(min); R_{ss} 为壤中流速率(mL/(cm²·min));
 C_{ss} 为壤中流系数。

由表 3 可知,土壤深度层次对水分过程参数和壤中流参数的相关性均不显著;而降雨强度除对 C_{ss} 、 θ_p 相关性不显著外,对其他水分过程参数和壤中流参数的相关性显著;水分过程参数和壤中流过程参数之间也存在显著相关性,其中 T_{ss} 与 T_w 相关性显著, R_{ss} 、 C_{ss} 与 θ_i 、 θ_p 呈极显著的负相关关系,与 θ_{mi} 呈显著的负相关关系。

表 3 降雨强度、土壤深度层次、初始含水率与土壤水分含量和壤中流过程参数的相关系数

指标	T_w	θ_i	θ_p	θ_{mi}	I	ST
T_{ss}	0.742*	-0.151	0.010	-0.333	-0.719*	0.431
R_{ss}	0.117	-0.845**	-0.881**	-0.801*	-0.614#	0.436
C_{ss}	0.032	-0.849**	-0.891**	-0.796*	-0.548	-0.447
I	-0.766*	0.590#	0.526	—	—	—
ST	0.431	0.555	0.577	0.451	—	—

注: T_w 为土壤水分含量稳定时间(min); θ_i 为壤中流初始产流时对应含水率; θ_p 为壤中流产流峰值时对应含水率; θ_{mi} 为初始含水率; T_{ss} 为壤中流产流时间(min); R_{ss} 为壤中流速率(mL/(m²·min)); C_{ss} 为壤中流系数; I 为降雨强度(mm/h); ST 为土壤深度层次;#表示在 0.1(双侧)水平上显著相关;*表示在 0.05(双侧)水平上显著相关;**表示在 0.01(双侧)水平上显著相关。

3 讨论

众多研究证明了降雨强度对土壤水分和壤中流的重要影响^[7,15,22-23],本研究在小区尺度上进一步证实了降雨强度亦是影响紫色土坡耕地不同土层土壤水分含量变化和壤中流产流过程的重要因子。不同土层所表现出的水文过程差异不仅仅受土壤剖面间土体构造(包括土壤结构、剖面层次等)的影响,更是降雨条件与土体构造对土壤水文过程综合作用的结果。试验中所有降雨强度条件下均观察到各土层壤中流的存在,这与 Jia 等^[30]和 Liu 等^[31]的研究结果一致,他们均发现,紫色土由于土层浅薄,孔隙含量高,入渗能力高,容易形成壤中流。

降雨强度是土壤水分和壤中流的重要影响因素^[11,20,22]。由图 2 可知,不同雨强条件下随土层深度层次的增加壤中流起始产流时间均逐渐滞后,且越深土层的壤中流起始产流时间较上一土层的壤中流起始产流时间滞后过程越长。中雨强和高雨强条件下越深土层的壤中流产流时间较上一土层的壤中流产流时间滞后不多,中、高雨强条件下各土层壤中流均为双峰过程,产流不久后壤中流量均迅速增长达到第一个产流峰值,说明动能较大的降雨对土表的打击不但破坏地表土壤结构,由于紫色土碎石含量高、水分运移优先路径丰富的特点,在较大雨强的打击下较深层土壤结构也遭到破坏,影响土体内部孔隙的连通状况,使水流状况和孔隙状况发生变化,孔隙中沉积的泥沙又会重新启动,所以呈现出双峰过程。但是,低雨强条件下越深土层的壤中流产流时间较上一土层的壤中流产流时间滞后很多,各土层的壤中流均呈单峰过程,从浅层到深层壤中流流量逐渐减少,产流过程线愈加平缓,可说明,较小雨强条件下雨滴溅蚀对表土的打击并不剧烈,随着降雨的持续有利于地表容易形成较稳定的结皮,促进地表径流的产生,阻止降雨入渗,不利于壤中流产流。越深层的土壤在整个降雨过程中孔隙状况越没有急剧变化,也进一步说明了孔隙状况在壤中流产流过程中的主导作用,证明在浅层紫色土中壤中流以优先流为主。因而出现在较为平缓的土壤水分含量变化过程和缓慢发展的单峰壤中流过程。

本研究分别从土壤剖面的土壤含水率变化过程线和壤中流产流过程线以及土壤水分过程和产流过程的耦合关系等方面,采用定性到半定量的方法初步探讨了典型厚度紫色土坡耕地土壤水分和壤中流对降雨强度的响应。由图 4 可知,不同方法间结论相互印证,从不同的侧面初步确定了降雨强度、土壤水分和壤中流三者间的关系。土壤含水率变化过程线和

壤中流产流过程线的发展趋势具有一定的一致性,壤中流产流过程与土壤水分变化过程相互呼应、相互影响,降雨强度的增加有利于壤中流的发生和发展。但本研究只探讨了在小区尺度设定 60,90,120 mm/h 雨强条件下,地表裸露的坡耕地剖面不同深度土层所表现的壤中流产流特征,以及壤中流与土壤水分的耦合关系,为紫色土坡耕地产流规律的研究做了一些尝试。为了更系统地研究紫色土坡面产流过程,今后还需加强不同尺度和不同地表条件下产流过程的研究。

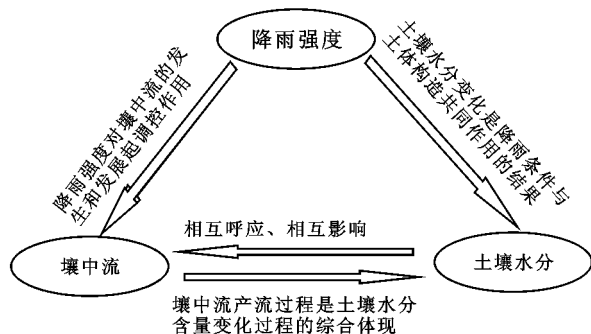


图 4 降雨强度、土壤水分、壤中流关系路径

4 结论

研究表明,各土层水分含量变化和壤中流产流过程对降雨强度的响应表现不一。(1)土壤体积含水率曲线变化过程受降雨强度影响,低雨强和中雨强条件下呈上升期和稳定期,而高雨强下基本处于稳定状态。(2)在相同降雨强度条件下,随着土层深度的增加,土壤含水率稳定时间增加,土壤含水率变化越小,响应表现越不明显;相同土层深度时,随着降雨强度的增加,土壤含水率稳定时间减少,土壤含水率变化越小,响应表现越不明显。(3)低雨强条件下壤中流都是单峰产流过程,中雨强和高雨强下是双峰产流过程,浅层和中层壤中流产流时间随着降雨强度的增加而减少,而相同降雨强度条件下壤中流产流时间均随着土层深度的增加而滞后。(4)不同雨强条件下各土层体积含水率曲线上升期的历时长短与降雨前期土壤含水率有关,稳定期是降雨过程中壤中流的主要产流阶段。(5)降雨强度与水分过程参数、壤中流过程参数都有较好的相关性,水分过程参数和壤中流过程参数相关性显著,坡面壤中流产流过程是土壤水分变化过程的综合体现。

参考文献:

- [1] 张洪江,何凡,史玉虎,等. 长江三峡花岗岩坡面管流在壤中流中的作用[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 38-42.
- [2] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff[J]. Journal of Environmental

- Quality, 2004, 33(6): 2174-2182.
- [3] 尹忠东, 左长清, 高国雄, 等. 江西红壤缓坡地壤中流影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 1-6.
- [4] 徐勤学, 王天巍, 李朝霞, 等. 紫色土坡地壤中流特征[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 229-234.
- [5] 谢颂华, 涂安国, 莫明浩, 等. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 526-534.
- [6] 王小燕, 李朝霞, 蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 38-45.
- [7] 付智勇, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 不同起始条件下坡面薄层紫色土水分和壤中流响应[J]. 水利学报, 2011, 42(8): 899-907.
- [8] 丁文峰, 张平仓. 紫色土坡面壤中流养分输出特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 15-19.
- [9] 王小燕. 紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [10] 张奇, 杨文元, 林超文, 等. 川中丘陵小流域水土流失特征与调控研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(3): 39-46.
- [11] 徐佩, 王玉宽, 傅斌, 等. 紫色土坡耕地壤中产流特征及分析[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6): 14-18.
- [12] Wilson G V, Cullum R F, Römkens M J M. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe[J]. Catena, 2008, 73(1): 98-106.
- [13] 崔艳平, 郑粉莉, 刘雨. 水文条件对紫色土坡面土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 1-7.
- [14] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318.
- [15] 付智勇, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 三峡库区不同厚度紫色土坡耕地产流机制分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 680-688.
- [16] Philip J R. Hillslope infiltration: planar slopes[J]. Water Resources Research, 1991, 27(1): 109-117.
- [17] Yu Z B, Carlson T N, Barron E J, et al. On evaluating the spatial-temporal variation of soil moisture in the Susquehanna River Basin[J]. Water Resources Research, 2001, 37(5): 1313-1326.
- [18] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 358-389.
- [19] 陈洪松, 邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 413-420.
- [20] 张秋英, 李发东, 欧国强, 等. 土壤水对降水和地表覆盖的响应[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(5): 37-41.
- [21] 李谦, 郑锦森, 朱青, 等. 太湖流域典型土地利用类型土壤水分对降雨的响应[J]. 水土保持学报, 2014, 26(6): 14-18.
- [22] 刘宏伟, 余钟波, 崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 822-829.
- [23] Lin H, Zhou X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hill catchment[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(1): 34-49.
- [24] 刘刚才. 紫色土坡耕地的降雨产流机制及产流后土壤水分的变化特征[D]. 成都: 四川大学, 2002.
- [25] 付智勇. 三峡库区不同厚度紫色土坡面水文过程及侵蚀响应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [26] Ohrstrom P, Persson M, Albergel J, et al. Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage[J]. Journal of Hydrology, 2002, 257(1/4): 164-173.
- [27] Badoux A, Witzig J, Germann P F, et al. Investigations on the runoff generation at the profile and plot scales, Swiss Emmental[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(2): 377-394.
- [28] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44-47.
- [29] 张洪江, 程金花, 史玉虎, 等. 三峡库区花岗岩林地坡面优先流对降雨的响应[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(5): 6-9.
- [30] Jia H, Lei A, Lei J, et al. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(2): 89-97.
- [31] Liu G, Tian G, Shu D, et al. Characteristics of surface runoff and throughflow in a purple soil of Southwestern China under various rainfall events[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(9): 1883-1891.