

长江三峡花岗岩地区优先流对渗流和地表径流的作用

程金花¹, 张洪江¹, 史玉虎², 程云¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 湖北省林业科学研究院, 湖北 武汉 430075)

摘要: 为研究长江三峡花岗岩地区优先流对渗流和地表径流的影响, 以长江三峡地区曲溪小流域作为试验用地, 选择适当的土壤剖面作为观测剖面。采用自记流量计测量了优先流、渗流和降雨过程。在小流域出口处设置 90° 薄壁三角堰和水位计记录了地表径流过程, 分析了优先流和渗流、地表径流之间的关系。结果表明, 在同等降雨条件下, 优先流晚于渗流出现, 早于渗流停止。优先流流量在剖面渗流总量中的比例可达 2.40%~48.72%。优先流水分通量最大可达剖面渗流水分通量的 17 200 倍, 会在很大程度上增加土壤水分运动通量。在同场降雨中, 优先流的介入使得渗流流量峰值出现时间提前。优先流的出现导致地表径流峰值出现时间延迟, 洪水历时过程延长。前期影响雨量及产流次雨量较小时, 优先流与地表径流之间相互影响较大。

关键词: 长江三峡; 优先流; 渗流; 地表径流

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)02-0018-06

中图分类号: S157.1, S152.7

Effects of Preferential Flow on Infiltrated Flow and Surface Runoff in the Granite Area of the Three Gorges

CHENG Jin-hua¹, ZHANG Hong-jiang¹, SHI Yu-hu², CHENG Yun¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forestry Science Institute of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430075, China)

Abstract: To study the effects of preferential flow on infiltrated flow and surface runoff in the granite area of the Three Gorges, Yangtze River, China, a soil profile that is not seriously disturbed by human activities was selected in the Quxi watershed of the area as a field experimental site. Preferential flow, infiltrated flow and rainfall were measured by an automatic flow meter. Surface runoff was measured by an automatic gauge and a thin triangle weir vertically installed at the outlet of the watershed. The relationships among preferential flow, infiltrated flow and surface runoff were analyzed. Results showed that during the same rainfall, preferential flow appeared later and stopped earlier than infiltrated flow. The percentage of preferential flow flux over the total infiltrated water can reach 2.40%~48.72%. The maximal preferential flow flux can reach 17 200 times of that of infiltrated flow, which could increase soil water flux to a great extent. In the same rainfall, the intervention of preferential flow advanced the appearance of peak infiltrated flow, postponed the appearance of peak surface runoff and prolonged the duration of surface runoff. When the amounts of current rainfall and antecedent influenced rainfall are smaller, preferential flow and surface runoff influenced each other more greatly.

Keywords: Three Gorges of Yangtze River; preferential flow; infiltrated flow; surface runoff

土壤水分运动受土壤质地、土壤孔隙连通性和土壤孔隙直径等影响。相互连接高度通畅的土壤孔隙可成为水分快速运动和水分长距离搬运土壤颗粒的通道。这些孔隙是因生物或地质作用而形成的, 如土壤侵蚀、土层断裂、土壤收缩膨胀等形成的裂隙, 土壤动物活动、林木根系腐烂等形成的孔洞^[1-2]。研究发现, 土壤水分在这些通道中的流速和流量远大于达

西定律描述下的运动特性^[3]。Brakensiek 等人在试验中取得的土样中大孔隙体积仅占 1% 和 4.5%, 但其饱和导水率是无大孔隙土样的 18 倍和 4.5 倍^[4-5]。这些在土壤孔隙中快速运动的水分统称为优先流 (preferential flow)。在长江三峡花岗岩地区, 优先流是一种普遍现象^[6-7]。优先流的研究主要集中在森林水文学和地学等领域。国外在这方面的研

收稿日期: 2006-07-20

修稿日期: 2006-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40171014); 国家重点研究发展计划 (973 计划) (2003CB415202-3); 瑞典国际科学基金 (IFS) (D/3492-1)

作者简介: 程金花 (1979-), 女 (汉族), 山东省东阿县人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀和流域水文方面的研究。电话 (010) 62338040,

E-mail: jinhua_cheng@126.com.

究已取得了显著成果, Anderson 等通过大量研究提出优先路径的成因主要为化学和物理 2 种^[8]。由于优先路径内的水分运动过程受到优先路径类型、糙率系数 n 值、路径形状和供水条件等多方面影响, 优先流速度和流量不遵从达西定律描述下的水流运动特性^[9-10]。

Peters 等人对加拿大 Shield 森林流域通过采用水文测验、同位素和地球化学元素示踪等方法, 较为全面地研究了坡面壤中流水文过程及其对源头流域暴雨径流的贡献, 结果表明, 在森林土壤中大部分水分通量是不遵从达西定律的优先流。

同位素示踪研究也表明, 降雨从垂直方向渗透到土壤-岩石界面后, 沿岩石表面产生的侧向流多是以优先流方式运动的, 优先流在水平和垂直方向交互作用引起降雨的快速入渗, 致使土壤水分达到饱和, 从而加大了水分沿坡面向下的运动通量^[11-13]。张洪江等通过研究得到, 长江三峡地区花岗岩坡面优先流路径, 大多数为地质作用或在岩石风化过程中, 由地下径流冲刷而成^[14-16]。

坡面渗流是发生于近地面土层中的一种有孔介质水流运动, 它的运动服从于达西定律。世界上关于坡面渗流的研究主要集中在土壤学和森林水文学等领域。

Marian W. (1994) 等的研究表明, 渗透率分布具有较大范围相关性的分形特征, 同时分析了土壤中渗透系数分布的分形特征与非饱和流统计参数的关系^[17-18]。薛强等在考虑多孔介质中流体流动与岩土介质耦合作用的前提下, 建立了土壤中非稳态渗流问题的流固耦合数学模型^[19]。但有关长江三峡地区花岗岩坡面优先流对地表径流和渗流作用的综合分析还未见正式报道。

1 试验地概况

1.1 试验地位置

选择距长江三峡大坝上游 8 km 处右岸的湖北省秭归县境内的曲溪小流域作为试验地, 其地理坐标为东经 $110^{\circ}55'15''$ — $110^{\circ}57'20''$, 北纬 $30^{\circ}55'4''$ — $31^{\circ}51'29''$, 该流域总面积 9.8 km^2 , 最高海拔 632.1 m, 最低海拔 133.2 m, 属长江一级支流。

1.2 试验地自然条件概况

曲溪小流域内除占面积比重很小的下游沟底地面较平坦外, 其余多为坡面。

曲溪小流域地处亚热带, 属大陆性季风气候, 多年平均降雨量为 1 150 mm, 降雨多集中在 5—10 月份。该流域基岩主要由花岗岩组成, 经长期风化形成

的花岗岩风化层厚度达 10 m 以上。土壤以黄壤为主, 沟底有少量水稻土。

当地自然植被以杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 和马尾松 (*Pinus massoniana*) 为主, 林龄为 24~26 a, 树高 10~14 m, 林冠郁闭度为 0.6。林下灌木以黄荆 (*Vitex negundo* sp.)、毛黄栌 (*Cotinus coggygria* var. *pubescens*)、胡枝子 (*Lespedeza* sp.) 和马桑 (*Coriaria nepalensis*) 等为主, 草本以兰草 (*Cymbidium faberi*)、白茅 (*Imperata cylindrica*)、蕨类 (*Pteridium* sp.)、苔草 (*Carex* sp.) 和飞蓬 (*Erigeron acer*) 等为主。地表有大量苔藓覆盖, 栽培树种主要有柑橘 (*Citrus reticulata*)、油桐 (*Aleurites fordii*)、乌桕 (*Sapium sebiferum*)、板栗 (*Castanea mollissima*) 和茶树 (*Camellia sinensis*) 等。

2 试验方法与材料

在流域内选择一人为活动干扰影响较小的凹型坡面作为试验场地, 该坡面海拔 300 m, 坡向 NW33°, 坡度 28°30'。在坡脚部位垂直开挖一长度为 2.5 m, 深度为 2 m 的土壤剖面。

在土壤剖面前方部位搭建一测量用简易房屋, 房屋内安置优先流测量仪器及剖面渗流测量仪器, 以观测优先流和剖面渗流。剖面左侧为一沟道, 坡面地表径流由此汇集, 在沟口处安置一 90°薄壁三角堰, 以测定坡面地表径流。优先流观测剖面及量水堰在坡面中的位置见图 2。

为了防止降雨对剖面的破坏和降雨直接进入集水槽影响流量观测准确性, 在剖面上方搭建遮雨棚, 拦截降雨并排出集水槽。试验从 1998 年一直持续到 2003 年。

2.1 优先流测定

在降雨中观察开挖的土壤剖面, 发现土管的分布主要集中在距地表 0.65~1.5 m 水平条状范围内, 这一范围属土壤 B 层(花岗岩风化程度较高的层次)向 C 层(花岗岩风化程度较差的层次)过渡的中间类型。明显观测到的直径为 4~8 mm 的 8 条土管, 大多集中在坡面下部坡脚部位垂直于坡长方向上。还有若干条土管未详细辨认, 估计未观测到的还有一半以上, 即在开挖的土壤剖面上至少发育有 16 条土管。观测剖面上土管分布见图 1。

因测定仪器数量限制, 选择了其中 4 条进行了优先流测定。采用密闭塑料软管将从土管中流出的水分直接引入 4 个优先流测量器分别进行连续量测。与此同时利用自计雨量器记录每一次的降雨过程。

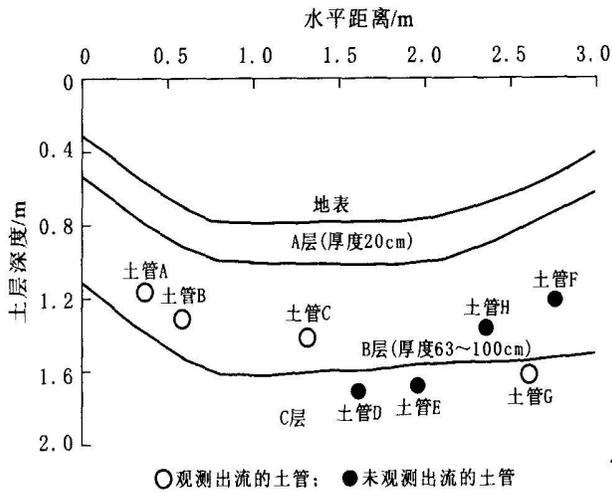


图 1 观测剖面上的土管分布

2.2 渗流测定

为把从剖面土层中渗出的水分集中后测量,在开挖的土壤剖面下部作一与剖面相当的水泥集水槽,承接从土壤剖面渗出的水流,即坡面渗流,通过集水器引入翻斗式流量计测定其过程。

表 1 所分析 5 场降雨的降雨总量及前期影响雨量

降雨场次	19980728	19980805	19980816	20020820	20020825
降雨总量/mm	33.60	28.79	108.16	128.00	29.00
前 15 d 降雨量/mm	75.80	80.77	86.49	105.10	181.50
前期影响雨量/mm	53.60	57.15	61.20	74.30	128.30

前期影响雨量采用下式逐日计算:

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t - R_t) \quad (2)$$

$$K = 1 - E_m/I_m \quad (3)$$

式中: K —— 土壤含水量消退系数; E_m —— 流域日蒸发能力; I_m —— 流域最大蓄水量(mm); $P_{a,t+1}$, $P_{a,t}$ —— 分别为第 $(t+1)$ 天和第 t 天的流域前期影

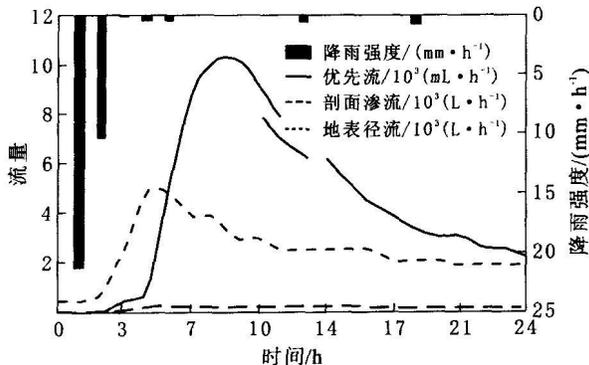


图 2 19980728 号降雨优先流、渗流和地表径流过程

2.3 地表径流测定

坡面地表径流由 90° 薄壁三角堰测得。堰基修至出口基岩以防止水分渗漏,三角堰出口顶宽 0.4 m,高 0.3 m。在堰池左部安装一台自记水位计,通过实测出口处水位与仪器测量值的比较与计算,得出仪器实测水位高度,得到该流域的地表径流过程和地表径流量。由三角堰测得的流域地表径流量如下:

$$Q = 1.343h^{2.47} \quad (1)$$

式中: Q —— 指地表径流量(m^3/s); h —— 指出口处水深(m)。

同时采用自记雨量计记录降雨量及降雨过程。

3 结果及分析

3.1 优先流、渗流和地表径流过程分析

选择 1998 年 7 月 28 日,1998 年 8 月 5 日,1998 年 8 月 16 日,2002 年 5 月 28 日和 2002 年 8 月 20 日 5 场降雨(分别称为 19980728 号,19980805 号,19980816 号,20020528 号和 20020820 号)对优先流、渗流和地表径流过程进行分析。所分析 5 场降雨的降雨总量及前期影响雨量见表 1。

响雨量(mm); P_t , R_t —— 分别为第 t 天的降雨量(mm)和径流量(mm); t —— 本次降雨前的天数,本文计算时段取 15 d。

分别以每场降雨的开始时间作为时间坐标的零点,则 5 场降雨中优先流、渗流和地表径流流量过程线分别见图 2—6。

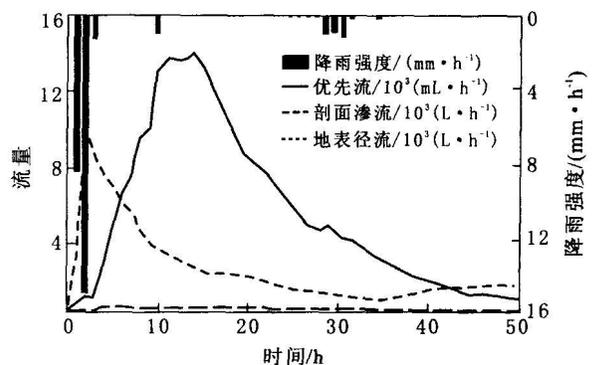


图 3 19980805 号降雨优先流、渗流和地表径流过程

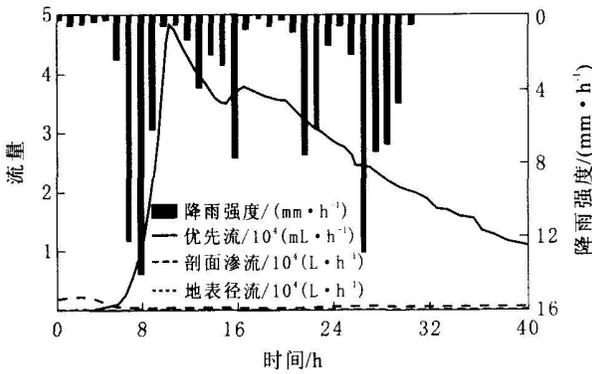


图4 19980816号降雨优先流、渗流和地表径流过程

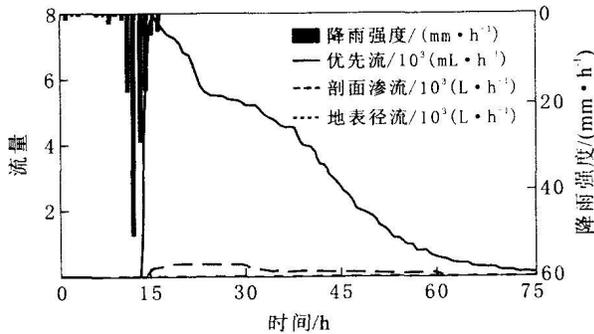


图5 20020820号降雨优先流、渗流和地表径流过程

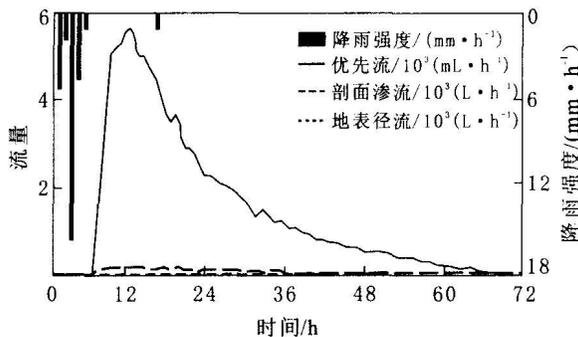


图6 20020825号降雨优先流、渗流和地表径流过程

分析各场次降雨过程中的优先流、剖面渗流和地表径流过程,发现在这3种径流形式中,总是地表径流最先出流,而优先流和剖面渗流的出流次序没有固定规律。剖面渗流流量和地表径流流量在降雨达到峰值后1~3h内达到峰值,剖面渗流峰值流量可达140~340 L/h,地表径流峰值流量可达2300~9000 L/h。而观测的优先流流量在降雨开始后8~12h才达到峰值,其峰值流量为8000~1400 mL/h。

在所分析的5场降雨中,优先流的径流特征具有一定的相似性,均是涨水历时较短,落水历时较长。

在所分析的5场降雨中,还发现3种形式径流对降雨强度反映比较敏感。当降雨强度出现波动时,3

种径流的流量也会随之出现波动。如19980805号降雨中,降雨在停止一段时间后又出现了一次较大值,而优先流、地表径流和剖面渗流的流量即随之发生了波动,也出现了一次较大值。

3.2 优先流对渗流的作用

3.2.1 优先流与渗流过程比较 在所分析的5场降雨中,优先流和剖面渗流的出流次序没有固定的规律,但是在大部分的情况下,优先流出流时间比剖面渗流晚,而优先流停止时间则比剖面渗流早。即在同等降雨条件下,优先流晚于剖面渗流出现,早于剖面渗流停止。

分析其原因,观测发现在包气带被下渗水分基本填满后,土壤开始产生侧向渗流。在降雨初期,渗流以非饱和流的形式流动,而在土壤非饱和的情况下,大孔隙易于被空气填充,阻碍水流运动,此时土壤的大孔隙通道内无法形成快速连续的水流,因此不能产生优先流。随降雨历时延长,土壤水分含量逐渐达到饱和状态,开始有优先流产生。因此,相对于坡面渗流,优先流总是于其后产生。

基于同样的原因,随着降雨的停止,下渗水分减小,土壤水分不断通过侧向渗流及地下径流流失。土壤含水量减小,坡面渗流从饱和流变成不饱和流,优先流便先于坡面渗流而停止。

3.2.2 优先流在渗透总量中所占比重 分析5场降雨,发现优先流流量在剖面总渗流流量中占有重要地位,不同场次降雨的优先流流量、剖面渗流及二者之比如表2所示。

由表2可以看出,在降雨过程中,即使按所观测到的优先流流量计算(实际上有一部分优先流汇入土壤剖面的渗流中),优先流流量占剖面渗流总量的比例可达2.40%~48.72%。表明优先流在土壤剖面渗流中占有较重要的位置。

3.2.3 优先流对渗流流速的影响 优先流是在土壤大孔隙中快速运动的水分,其运动规律不遵从达西定律,而剖面渗流在运动过程中遵从达西定律。所测定优先流及渗流流速见表3。

由表3可以看出,在所分析的5场降雨中,所有场次降雨产生的优先流水分通量均远远大于剖面渗流水分通量,最大可达 $10.32 \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,而剖面渗流水分通量最大只为 $6 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,优先流水分通量最大可达剖面渗流水分通量的17200倍。这充分说明优先流对降雨的快速入渗有较大作用,能够加速渗流流动速度,会在很大程度上增加土壤水分运动通量。

表 2 观测的优先流流量、剖面渗流流量及其对比

降雨场次	降雨量/mm	项目	总流量/ m^3	占剖面渗透总量百分比/%
19980728	33.60	优先流	0.10	2.66
		剖面渗流	3.49	97.34
		渗透总量	3.59	100.00
19980805	28.79	优先流	0.27	5.47
		剖面渗流	4.74	94.53
		渗透总量	5.01	100.00
19980816	108.16	优先流	0.89	48.72
		剖面渗流	0.94	51.28
		渗透总量	1.83	100.00
20020820	128.00	优先流	0.20	2.40
		剖面渗流	8.35	97.60
		渗透总量	8.55	100.00
20020825	28.95	优先流	0.10	3.31
		剖面渗流	3.03	96.69
		渗透总量	3.13	100.00

表 3 所观测优先流及渗流流速

降雨场次	项目	流量/L	断面面积/ cm^2	历时/h	水分通量/ ($cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)
19980728	优先流	0.10	0.665	21	1.90
	剖面渗流	3.49	72500	24	6.00×10^{-4}
19980805	优先流	0.27	0.665	51	2.24
	剖面渗流	4.74	72500	51	4.00×10^{-4}
19980816	优先流	0.89	0.665	36	10.32
	剖面渗流	0.94	72500	40	1.00×10^{-4}
20020820	优先流	0.20	0.665	64	1.31
	剖面渗流	8.35	72500	64	5.00×10^{-4}
20020825	优先流	0.10	0.665	65	0.66
	剖面渗流	3.03	72500	72	2.00×10^{-4}

3.2.4 优先流对渗流峰值的影响 通过对优先流和渗流峰值出现时间进行比较,发现优先流、渗流流量峰值出现时间并不一致,一般为渗流先出现流量峰值,优先流在其后 1~4 h 内出现流量峰值。

实际量测的渗流中可能包括着一部分未能量测的优先流成分,这部分优先流成分的快速运动会使渗流峰值出现时间有所提前,实际的渗流与优先流峰值出现的时间差异可能更大。因此,优先流的介入使得渗流流量峰值出现时间提前。

3.3 优先流对地表径流的影响

3.3.1 优先流与地表径流过程比较 在所分析的 5 场降雨之中,地表径流总是早于优先流出流,其达到峰值时间也比优先流早。原因在于地表径流直接在坡面流动,地表综合阻力(粗糙系数)远小于优先流运动过程中所遇到的阻力,因此地表径流出现峰值时间较早。

3.3.2 优先流对地表径流峰值的影响 通过对优先流和地表径流峰值出现时间进行比较,发现优先流、地表径流峰值出现的时间存在着明显的差异。在所分析的 5 场降雨试验中,总是地表径流最先出现流量峰值,优先流在地表径流出现峰值约 4~9 h 后达到流量峰值。

从水量平衡原理及优先流与地表径流出现时间的差异上看,优先流的出现表明部分降雨已通过土壤中孔隙快速运动,形成壤中流的一部分,从而使得水分在土壤中流动速度增加,入渗加快,导致地表径流峰值出现时间延迟,而洪水历时过程延长。

3.3.3 优先流与地表径流的关系 选取数场降雨过程中的优先流及地表径流观测结果,以地表径流流量为因变量,优先流流量为自变量,对二者进行拟和分析,分析在不同产流次雨量和前期影响雨量条件下,优先流与地表径流的关系。

本研究选取部分降雨场次的优先流和地表径流流量过程进行分析, 发现优先流与地表径流之间存在如式(4)所示的关系。

$$R = ke^{np} \quad (4)$$

表 4 优先流与地表径流之间关系式

降雨场次	方程式	相关系数	产流次雨量 P_t /mm	前期影响雨量 $P_{a,t}$ /mm	$P_t + P_{a,t}$ /mm
19980728	$R = 88.120e^{0.0002P}$	0.673	33.60	53.60	87.20
19980805	$R = 100.009e^{0.0006P}$	0.717	28.79	57.15	85.94
19980816	$R = 938.87e^{-0.0233P}$	0.842	108.16	61.20	169.36
20020820	$R = 82.402e^{0.0005P}$	0.857	128.00	74.30	202.30
20020825	$R = 73.607e^{0.0001P}$	0.806	28.95	128.30	157.25

从表 4 可以看出, 地表径流与优先流之间呈现出较为明显的指数关系; 前期影响雨量与产流次雨量之和较小时, 优先流与地表径流关系式 k 值系数较大, 即优先流与地表径流之间关系较为明显。说明前期影响雨量及产流次雨量较小时, 优先流与地表径流之间相互影响较大。

4 结论

在长江三峡花岗岩地区同场降雨中, 总是地表径流最先出流。同时发现 3 种形式径流对降雨强度反应比较敏感。在不同场次降雨中, 优先流的径流特征皆具有一定的相似性, 均是涨水的历时较短, 落水的历时较长。

在同等降雨条件下, 优先流晚于剖面渗流出现, 早于剖面渗流停止。优先流流量在剖面渗流总量中的比例可达 2.40%~48.72%。优先流水分通量最大可达剖面渗流水分通量的 17 200 倍, 会在很大程度上增加土壤水分运动通量。在同场降雨中, 优先流的介入使得渗流流量峰值出现时间提前。

优先流与地表径流相比较, 其流量峰值出现于地表径流峰值之后 4~9 200 h。优先流的出现导致地表径流峰值出现时间延迟, 洪水历时过程延长。优先流与地表径流存在关系式为: $R = ke^{np}$ 。前期影响雨量及产流次雨量较小时, 优先流与地表径流之间相互影响较大。

优先流是森林水文学研究的新领域之一, 由于研究方法、手段的局限性等影响, 目前对优先流的发生发展机理及其在森林水文过程中的作用仍处于探索阶段。本文仅对优先流与剖面渗流、地表径流之间的关系进行了探讨, 对优先流发生规律等方面的研究, 仍有待长期观测资料的积累与分析才能进行。

式中: R —— 地表径流流量(L/h); P —— 优先流流量(L/h); k, n —— 方程系数。由分析拟合得到地表径流流量(R)与优先流流量(P)之间的方程式(详见表 4)。

[参 考 文 献]

- [1] Helling C S, Gish T J. Physical and chemical processes affecting preferential flow[J]. American Society of Agricultural Engineering, 1991, 77: 50—63.
- [2] 秦耀东, 任理, 王济. 土壤中孔隙流研究进展与现状[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 203—207.
- [3] 北原曜, 流と大孔隙に関する研究史[J]. 水利科学, 1996, 39(2): 80—1149.
- [4] Brakensiek D L, Rawls W J, Logsdon S E, et al. Fractal description of macroporosity[J]. Soil Science Society of America Journal of Soil Science, 1992, 56: 1721—1723.
- [5] Kitahara Hikaru. The property of pipe flow in forest stand[J]. Journal of Japan Soc. Hydrol. & Water Res, 1992, 5(1): 15—25.
- [6] 张洪江, 王玉杰, 北原曜, 等. 长江三峡花岗岩坡面管流实验研究[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 53—57.
- [7] Sidle R C, Kitahara Hikaru, Terajima T, Nakai Y. Experimental studies on the effects of pipeflow on through-flow partitioning[J]. Journal of Hydrology, 1995, 165: 207—219.
- [8] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer G J. Evaluation of constructed and natural macropores using x-ray computed tomography[J]. Geoderma, 1990, 46: 13—29.
- [9] Yang Gautier, Benoit Noetinger. Preferential flow-paths detection for heterogeneous reservoirs using a new renormalization technique[J]. Transport in Porous Media, 1997, 26: 1—23.
- [10] Hu G X, Xu W, Liu Y Q. Heat transfer and gas flow through feed stream within horizontal pipe[J]. Transport in Porous Media, 2003, 52: 371—387.
- [11] Peters D L, Buttle J M, Tayler C H, et al. Runoff production in a forested shallow soil, Canadian Shield basin[J]. Water Resour. Res., 1995, 31: 1291—1304.

(下转第 42 页)

20 m 坡长累积产沙量—径流量曲线根据雨强大小反映出如下特征: 小雨强(图 3a)的累积产沙量、累积径流量随时间一直处于攀升状态, 未能趋于稳定, 这主要是由于在一定时间内小雨强发生产流较晚, 产流以后的降雨历时相对缩短, 降雨主要以侵蚀为主; 而在大雨强情况下的累积产沙量—径流量在产流后期有趋向平稳的趋势(图 3b)。对于 40, 60 m 坡长, 不管雨强大小, 累积产沙量—径流量在产流后期逐渐趋于平稳(图 3c, 3d): 累积产沙量、累积径流量开始增加很快, 在产流一段时间(大约 15~20 min)后, 曲线斜率将接近一常数, 曲线达到平稳。这不仅说明产流后期侵蚀速度较前边增加缓慢, 表现出达到或接近一个稳定值; 而且说明随着坡长延长, 单位面积侵蚀量在不断减少, 径流主要起了输移泥沙的作用^[7]。

在遏制坡耕地水土流失中, 天然降雨并不为人类所控制, 因此, 在分析不同坡长输沙率、含沙量和累积产沙量—径流量的基础上, 只能对坡面实施有效措施, 在实践中可适当采取垄作等形式, 增加坡面粗糙程度, 达到就地拦蓄雨水, 防止在 20 m 坡长范围内形成高含沙水流; 其次是如果在 20 m 坡长产生高含沙水流, 通过改变坡面糙度和坡面形态, 延缓水流在后续坡长的输移能力, 降低输沙率, 使它在未流到出口前发生沉积, 减少侵蚀, 从而增加坡耕地雨水利用效率, 恢复土地生产力, 减少泥沙坡面来源。

3 结论

(1) 在小雨强下, 最大输沙率出现在 40 m 坡长处; 当雨强超过 2.0 mm/min 时, 输沙率增加幅度急剧变大, 同时最大输沙率延长到 60 m 坡长。这说明

当雨强超过 2.0 mm/min 时, 降雨将会引起特别高的侵蚀强度和侵蚀速度。

(2) 试验条件下, 最高含沙量一致发生在 20 m 坡长处; 峰值多出现在初始阶段。

(3) 20 m 坡长累积产沙量—径流量随时间一直处于攀升状态; 40, 60 m 坡长在产流后期逐渐趋于平稳, 产流后期的侵蚀速度较前边增加缓慢, 随坡长延长, 单位面积侵蚀量不断减少, 径流主要起了输移泥沙的作用。

(4) 在遏制黄土高原坡耕地水土流失中, 应采取垄作等措施增加坡面糙度和改变坡面形态, 防止在 20 m 坡长形成高含沙水流和后续坡长的输沙率。

[参 考 文 献]

- [1] 吴发启, 鲁向平, 贾志宽, 等. 陕西山川秀美工程实施方案探讨[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 6—11.
- [2] 朱显谟. 黄土高原脱贫致富之道——三论黄土高原的国土整治[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998(3): 1—5.
- [3] 朱显谟. 黄土高原区的自然保护[A]. 中国自然保护文集[C]. 1990. 279—296.
- [4] Tang Keli, Zhen Fenli, Ca Xuan. Soil erosion on sloping farmland in the Loess Plateau of China. Proceeding of the Fourth International Symposium on River Sedimentation [M]. Beijing: China ocean press, 1989.
- [5] 蔡强国. 坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J]. 泥沙研究, 1989(4): 84—91.
- [6] 蔡强国. 坡长对坡耕地侵蚀产沙过程的影响[J]. 云南地理环境研究, 1998, 10(1): 34—43.
- [7] 孔亚萍, 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙沿程变化的模拟实验研究[J]. 泥沙研究, 2003(1): 33—38.
- (上接第 23 页)
- [12] Uchida T, Kosugi K, Mizuyama T. Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed[J]. Journal of Hydrology, 1999, 222: 18—36.
- [13] Farenhorst A, Topp E, Bowman B T, et al. Earthworm burrowing and feeding activity and the potential for atrazine transport by preferential flow[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 479—488.
- [14] 张洪江, 程云, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩坡面林地土管特性及其对管流的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 55—60.
- [15] 张洪江, 程云, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩坡面管流产流特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 5—8.
- [16] Zhang Hongjiang, Shi Yuhu, Cheng Yun et al. Movement properties of the pipe flow along granite slope of the Three Gorges Area on Yangtze River in China[J]. Forestry Studies in China, 2002, 4(1): 35—43.
- [17] Marian W. Kemblowski, Ching Min Chang. The shape distribution in the soil infiltration[J]. Ground Water, 1993, (2): 187—192.
- [18] Loret A, Ledesma A. Finite element analysis of detonations unsaturated soils[J]. Civil Engineering European Course, Barcelona, 1993(4): 15—17.
- [19] 薛强, 梁冰, 曹国强. 土壤中非稳定耦合渗流问题的拟解析解[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4): 21—24.