

不同降雨等级下杉木林土壤含水率和侧向流变化特征

葛波, 杜妍, 常猛, 李嘉欣, 刘超, 庄家尧

(南京林业大学 水土保持与生态修复实验室, 南京 210037)

摘要:为了探究不同降雨等级对林下不同深度土壤含水率和侧向流变化的影响,探究南京城郊杉木林各层土壤含水率、侧向流变化对降雨事件的响应,分析土壤含水率变化量与累计降雨量和侧向流的关系,初步探讨杉木林的水源涵养机制。选取南京市铜山林场 46 年生杉木林,在大、中、小 3 种降雨等级下,采用 ECH₂O 土壤水分监测系统对土壤剖面 0—5,5—15,15—30,30—60 cm 的土壤水分含量进行了实时连续监测。结果表明:(1) 0—5,5—15 cm 土层土壤含水率变化曲线和降雨量变化曲线具有同步性,15—30,30—60 cm 土层含水率达到峰值时间滞后 1~1.5 h;(2) 小雨条件下,只有 0—5,5—15 cm 土层变化趋势较明显,侧向流主要发生在 5—15 cm 土层;(3) 中雨条件下,雨强在 8 mm/h 和 15.2 mm/h 时,土层含水率出现 2 次明显的响应,侧向流主要发生在 15—30 cm 土层;(4) 大雨条件下,累计降雨量 22.8 mm 时,5—15,15—30,30—60 cm 土层出现峰值,侧向流主要发生在 30—60 cm 土层;(5) 小雨、中雨、大雨过程中产生的最大侧向流分别为 1.55,13.88,94.77 mm,随着降雨量的增加,侧向流有增加的趋势。土壤水分入渗为非饱和和入渗,随着土层深度的增加,含水率峰值逐渐增大,侧向流增加较明显。土壤含水率变化和降雨量有较好的线性关系且相关性较强,随着降雨量的增加,土壤含水率和降雨量的相关性越来越差。土壤含水率变化量与累计降雨量和侧向流三者间互有显著相关性,最大侧向流与累计降雨量呈指数关系, $y=0.7614e^{0.2238x}$ 。

关键词:杉木林; 土壤含水率; 侧向流; 降雨强度

中图分类号:S715.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0161-06

Soil Water Content and Lateral Rheology of *Cunninghamia lanceolata* Forest Under Different Rainfall Levels

GE Bo, DU Yan, CHANG Meng, LI Jiaxin, LIU Chao, ZHUANG Jiayao

(Soil and Water Conservation and Ecological Restoration Laboratory, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: This study examined the impact of different rainfall levels on soil moisture content and Lateral flow in different soil depths of the forest to explore the response of the soil moisture content and the change of lateral flow in each soil layer in fir forest in Nanjing suburb, analyzed the relationship within the variation of soil moisture content, cumulative rainfall and the lateral flow, and preliminary discuss the water conservation mechanism of Chinese fir forest. The 46-year-old fir forest of Nanjing Tongshan Forestry Centre was selected as the study site. The soil moisture content of soil profiles 0—5 cm, 5—15 cm, 15—30 cm and 30—60 cm were monitored continuously by using the technology of system ECH₂O under the 3 types of rainfall levels (8 mm, 17.6 mm, 28.2 mm). The results indicated that: (1) the variation curves of soil water contents in 0—5 cm soil layer and 5—15 cm soil layer and the curves of rainfall variation were synchronous; the time when the water contents of 15—30 cm soil layer and 30—60 cm soil layer reached peak had lagged for 1.0~1.5 h; (2) under the condition of drizzle, the water contents only in 0—5 cm and 5—15 cm soil layer changed obviously, the lateral flow mainly occurred in 5—15 cm soil layer; (3) under the moderate rain condition, the soil moisture content occurred obvious responses twice when the rainfall intensities were 8.0 mm/h and 15.2 mm/h, the lateral flow mainly occurred in 15—30 cm soil layer; (4) under the heavy rain, the cumulative

收稿日期:2018-05-11

修回日期:2018-05-29

资助项目:“十三五”国家科技重点研发项目(2017YFC0505506);江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641)

第一作者:葛波(1992—),男,安徽萧县人,硕士研究生,研究方向为森林水文与水土保持。E-mail:303832772@qq.com

通信作者:庄家尧(1969—),男,安徽凤阳人,博士,副教授,主要从事森林水文与水土保持研究。E-mail:nlzjiayao@njfu.edu.cn

rainfall was 22.8 mm/h, and the peak occurred in 5—5 cm, 15—30 cm and 30—60 cm soil layers, the lateral flow mainly occurred in 30—60 cm soil layer; (5) the maximum lateral flow in the course of drizzle, moderate rain and heavy rain was 1.55 mm, 13.88 mm and 94.77 mm, respectively; the lateral flow trended to increase with the increase of rainfall. The water infiltration was the unsaturated infiltration, the peak value of water content increased gradually and the lateral flow increased significantly with the increase of soil depth. The relationship between the change of soil water content and rainfall and the correlation was strong. The correlation between soil moisture content and rainfall is getting worse with the increase of rainfall. There was a remarkable correlation between the change of soil water content and cumulative rainfall and lateral flow. The maximum lateral flow had the exponential relationship with the cumulative rainfall: $y=0.7614e^{0.2238x}$.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata* stand; soil moisture content; lateral flow; rainfall intensity

土壤水是指土壤表层到地下水潜水面以上壤中流动或积蓄的水分,自然降水或人为灌溉均要先通过入渗转化成土壤水分才能被植物根系吸收利用,在一次完整的降雨过程中,降雨经过林冠截留、入渗和降雨再分配,一部分或者全部水分沿着土壤间的孔隙渗漏到深层形成壤中流等^[1]。土壤水分是林下植被和林分生存的重要条件,所以研究降雨条件下土壤水再分布和侧向流变动有利于揭示土壤中水分运动转化的规律^[2],目前国内外众多学者围绕着土壤不同深度中含水率、侧向流的变化特点和对降雨的响应机制进行了大量的研究,取得了一系列重要的结论。李海防等^[3]研究荷木林不同层次土壤含水量对降雨的响应,认为降雨与各层次土壤含水量呈极显著正相关。王正安等^[4]使用土壤水势仪对华北落叶松林不同深度土壤水分进行定位观测,结果表明不同的降雨条件下,水分入渗为非饱和下渗,随着降雨强度的增加,大雨侧向流较明显。倪晨^[5]通过观测对比了降雨期和无雨期条件下集水坡面土壤水分的分布特征,认为降雨对集水坡面土壤水分的运移以及分布有着重要的影响作用。刘昊等^[6]在融雪期开展亮蓝示踪试验和土壤水分观测,结果表明,自然条件下降雨以垂直入渗为主,裸露沙丘坡面易形成地表径流和沿坡向的壤中流。人工强降雨条件下,降雨后期沙丘存在壤中侧向流,侧向流水量陡坡大于缓坡。

目前国内关于土壤水对降雨响应方面的研究表现为人工降雨条件下观测较多,自然降雨的响应观测较少^[7-9],苏南丘陵区典型植被研究较少,缺少对降雨过程、土壤含水率变化、侧向流间的关系的深入探究^[10-11],鉴于此,本研究使用土壤剖面水分动态监测等方法,分析土壤体积含水率和侧向流变化过程曲线,以期降低杉木林集约经营造成的水土流失和杉木林的经营发展提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

研究区位于南京市国营东善桥林场铜山分场(31°35′—31°39′N, 118°50′—118°52′E),属北亚热带季风气候区,区内气候温和湿润,四季分明,水热资源丰富,年平均气温 15.1℃,无霜期 229 d,年日照时间 2 199 h,地形为苏南丘陵,土壤类型为黄棕壤,坡向均为东北向(NE),土壤厚度为 60 cm 左右,60 cm 以下为砂岩风化母质层,海拔 26.0 m,林分类型以杉木(*Cunninghamia lanceolata*),麻栎(*Quercus acutissima*),毛竹(*Phyllostachy edulis*)林为主,林下灌木草本主要以山胡椒[*Lindera glauca* (sieb. et Zucc.) Bl]、盐肤木(*Rhus chinensis*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、苎草[*Arthraxon hispidus* (Thunb.) Makino]、草蓼(*Rubus tephrodes* Hance)为主。试验地选择 45 a 生杉木林,平均胸径 22 cm,平均冠幅 13.6 m,平均树高 2.3 m,林分密度 850 株/hm²,郁闭度 0.61,坡度 20°。

1.2 土壤含水率的测定

ECH₂O 是 Decagon 公司研制的土壤水分传感器,测量土壤含水率与土壤介电常数之间的单值多项式关系来计算土壤体积含水率。选择不受林缘和林窗影响的试验点(坡度 21°),在 0—5, 5—15, 15—30, 30—60 cm 这 4 个土层进行定点观测,每 5 min 收集一次数据,在相似的光照条件,在距离试验点 3 m 处设置一组重复观测点,以数据平均值作为该土层最终的土壤含水率数值,观测时间 2012 年 10 月—2013 年 10 月。

1.3 降雨量的测定

在土壤含水率试验点 4 m 处,选取林缘和林冠影响较小的点位,采用 HOBO 计数器、雨量筒实时监测降雨量和降雨历时,一次完整降雨事件后清理雨量筒上的残枝落叶,为消除连续降雨对数据的影响,选择前 3 d 无降

雨的晴朗天气,根据日降雨量确定小雨、中雨、大雨,24 h内降雨量小于10 mm为小雨,24 h内降雨量10~25 mm为中雨,24 h内降雨量25~60 mm为大雨。

1.4 侧向流的计算

土壤中侧向流动的径流称为侧向流,因为降雨过程中无地表径流产生,所以侧向流近似为单位时间、单位体积下土壤含水量变化量与实际林内降雨量的差值^[11]。

$$I_m = \Delta W - P$$

式中: I_m 为侧向流(mm); ΔW 为含水率变化量所需要的降雨量(mm); P 为实测降雨量(mm)。

1.5 土壤饱和含水率测定

在杉木林选取靠近监测点位的典型地点,使用规格直径5 cm、高度5 cm的环刀取各个土层原状土,浸水至饱和,称重记为 M_1 ,烘干至恒重,称重记为 M_2 。

$$\text{土壤饱和含水率} = \frac{M_1 - M_2}{V \times \rho}$$

式中: M_1 为饱和土重(g); M_2 为烘干土重(g); V 为环刀体积(cm^3); ρ 为水的密度(g/cm^3)。

2 结果与分析

2.1 不同降雨等级下各层次土壤含水率对降雨的响应

2.1.1 小雨条件下各层次土壤含水率对降雨的响应

以2013年3月16日为例,降雨量累计为8 mm,小雨条件下土壤含水率变化结果显示(图1),降雨前,15—30 cm土层初始含水率最大,0—5 cm土层初始含水率最小,降雨开始后,5—15,15—30,30—60 cm土层波动较小,0—5 cm土层含水率缓慢上升,累计降雨量6.8 mm时,0—5,5—15 cm土层的土壤含水率曲线对降雨出现了明显的响应,30,60 cm土层无明显响应,在降雨强度最高的19:00,5—15 cm土层滞后60 min后含水率才出现了明显响应,到达峰值后随着降雨量的减少各土层均出现退水现象。在小雨条件下响应的土层中,土壤含水率变化量最大和最小的层次分别是5—15,15—30 cm。总的来说,降雨开始后,随着降雨事件的进行,表层土壤含水率优先变化,随着深度的增加,含水率变化量有减少趋势,对降雨的响应有滞后效果。

2.1.2 中雨条件下各层次土壤含水率对降雨的响应

以2013年6月25日为例,降雨量累计为17.6 mm,中雨条件下土壤含水率变化结果显示(图2),降雨前,15—30 cm土层初始含水率最大,0—5 cm土层初始含水率最小,降雨开始后,5 cm土层土壤水分变化与降雨历程有良好的同步性,5—15,15—30,30—60 cm土层含水率波动较小,累计降雨量达到6.8 mm,降雨强度为8 mm/h时,0—5,5—15,15—30,

30—60 cm土层的土壤含水率曲线均对降雨出现了明显的响应,在降雨强度最高的16:30,0—5 cm土层土壤含水率达到峰值,5—15,15—30,30—60 cm土层分别滞后30,60,120 min。降雨结束后0—5,5—15,15—30,30—60 cm土层土壤含水率出现了明显的退水趋势,减少分别为4.15%,3.16%,3.76%,10.63%。有响应的土层中,土壤含水率最大和最小的层次分别是0—5,5—15 cm土层。总的来说,降雨降雨开始后,雨强在8 mm/h和15.2 mm/h时土层含水率出现2次明显的响应,随着土层深度的增加,峰值越来越高,含水率变化有明显的滞后效果。

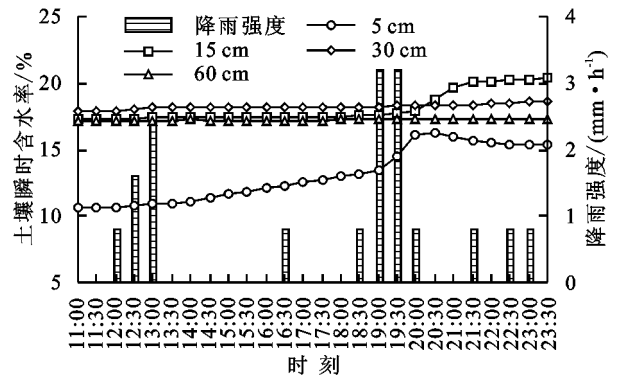


图1 2013年3月16日土壤含水率对降雨的响应曲线

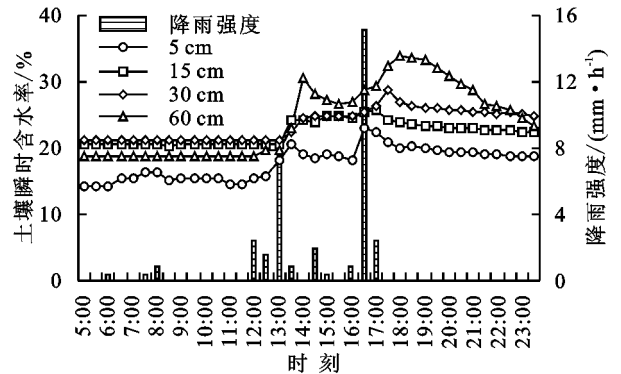


图2 2013年6月25日土壤含水率对降雨的响应曲线

2.1.3 大雨条件下各层次土壤含水率对降雨的响应

以2013年7月5日为例,降雨量累计为28.2 mm,大雨条件下土壤含水率变化结果显示(图3),降雨前,5—15 cm土层初始含水率最大,0—5 cm土层初始含水率最小,降雨开始后,15—30,30—60 cm土层波动较小,0—5,5—15 cm土层含水率缓慢上升,累计降雨量6.2 mm时,0—5,5—15 cm土层的土壤含水率曲线发生了明显的变化,第一次降雨事件后,15—30,30—60 cm土层滞后30 min后土壤含水率出现明显响应,在累计降雨量22.8 mm时,5—15,15—30,30—60 cm土层均出现峰值,随着降雨强度的减小,各土层土壤含水率出现明显的退水趋势。响应的土层中,峰值最大和最小的层次分别是30—60,5—15 cm土层,退水速率最大和最小的层次分别是

30—60 cm(6.9%/h),0—5 cm(0.9%/h)土层。

2.1.4 不同降雨条件下土壤饱和含水率特征 各土层实测和降雨条件下饱和含水率结果显示(表 1),小雨、中雨条件下各土层均未达到饱和含水率,大雨条件下 15—30,30—60 cm 土层含水率达到饱和含水率,随着土层深度的增加,土壤含水率表现出显著的变化,表明杉木林土壤水分垂直入渗呈现非饱和入渗的特征,在土壤含水率未达到最大体积含水率时存在土壤水下渗,土壤水分非饱和和下渗主要存在 30—60 cm 土层^[12]。

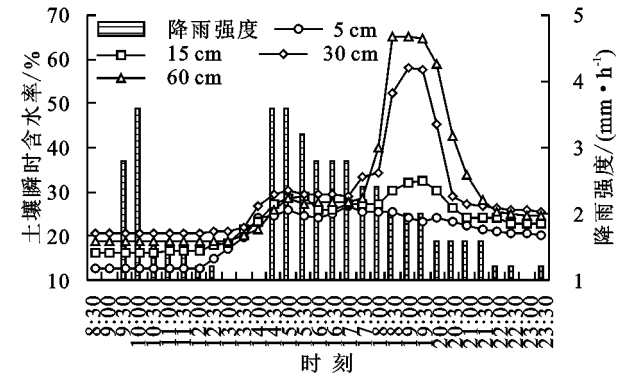


图 3 2013 年 7 月 5 日土壤含水率对降雨的响应曲线

表 1 杉木林各层次土壤的饱和含水率

土壤深度/cm	理论最大体积含水率/%	实际最大体积含水率		
		小雨	中雨	大雨
0—5	53.64	16.3	22.91	26.59
5—15	50.21	20.36	25.68	32.6
15—30	46.31	18.63	28.75	58.03
30—60	41.09	17.32	33.91	65.19

2.2 不同降雨等级下各层次侧向流对降雨的响应

在一场完整降雨入渗过程中,降雨强度的大小对入渗作用有一定的影响。不同降雨条件下各土层侧向流随累计降雨量变化特征显示(图 4),小雨条件下,0—5 cm 土层受降雨直接作用,对降雨变化的响应最快,5—15 cm 土层含水率变化曲线和累计降雨量有良好的同步性。中雨条件下,各土层土壤含水率变化显著,侧向流出现先上升后下降的趋势,30—60 cm 土层含水率的变化曲线和侧向流有良好的同步性。在大雨条件下,15—30,30—60 cm 土层含水率变化曲线和侧向流变化过程有较强的响应。小雨和中雨条件下侧向流小于降雨增量,大雨条件下侧向流急剧增加,表明了在大雨条件下,垂直面因为侧向流的入侵土壤含水率变化幅度变大,小雨过程中各土层产生的最大侧向流为 1.55 mm,中雨过程中各土层产生的最大侧向流为 13.88 mm,大雨过程中各土层产生的最大侧向流为 94.77 mm,随着累计降雨量的增加,侧向流有增加的趋势,当累计降雨量稳定后,侧向流开始出现显著下降,侧向流对降雨有较强的响应。

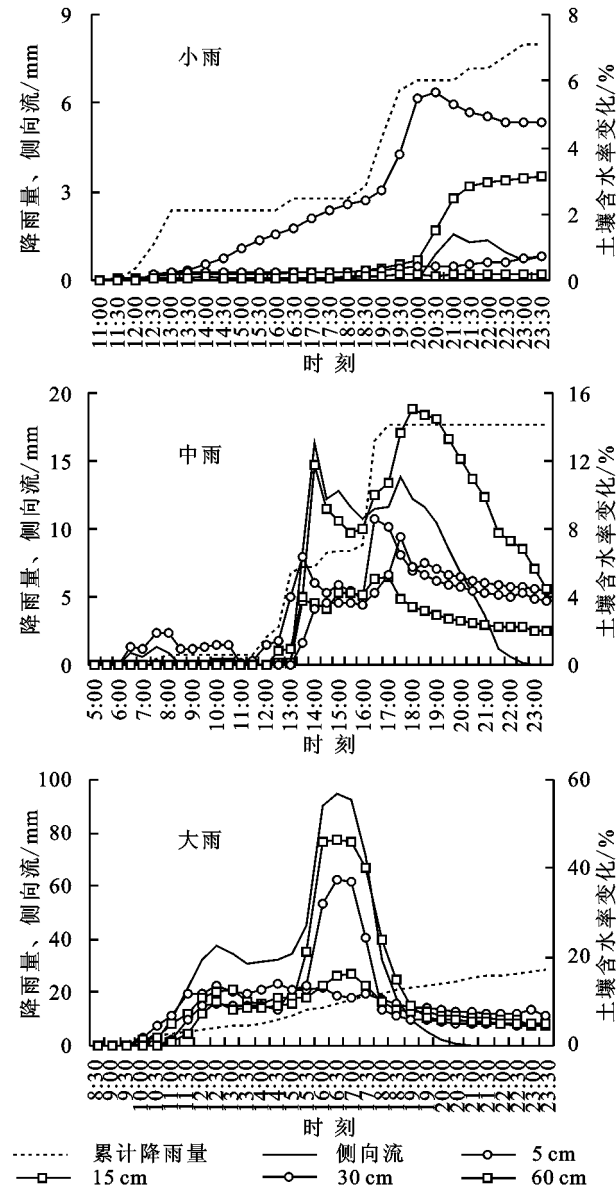


图 4 侧向流随时间的变化曲线

2.3 各土层含水率变化和侧向流相关性分析

表 2 为剔除了降雨强度为 0 时的数据,仅比较在降雨过程中土壤含水率变化、侧向流、累计降雨量的关系。由表可知,小雨条件下,各土壤层含水率的变化与累计降雨量和侧向流均显著相关,土壤含水率变化对累计降雨量的响应强于对侧向流的响应,0—5 cm 土层含水率变化与累计降雨量的相关性最强,5—15 cm 土层含水率变化与侧向流的相关性最强,说明了小雨条件下侧向流主要发生在 5—15 cm 土层。中雨条件下,各土壤层含水率的变化与累计降雨量和侧向流均显著相关,土壤含水率变化对累计降雨量的响应强于对侧向流的响应,其中 15—30 cm 土层含水率变化与累计降雨量的相关性最强,5—15 cm,15—30 cm 土层含水率变化与侧向流的相关性较强,说明了中雨条件下侧向流主要发生在 15—30 cm 土层。大雨条件下,各土壤层含水率的变化与侧向流相关性较

强,但与累计降雨量相关性相比于中小雨较差,15—30 cm,30—60 cm 土层含水率变化与侧向流的相关性较强,说明了大雨条件下侧向流主要发生在 30—60 cm 土层。总的来说侧向流与累计降雨量的相关性随着雨量的增大越来越小,各土层含水率变化随着深度的增大与降雨的响应越来越弱。

表 2 累计降雨量、侧向流和土壤含水率的相关性分析

项 目	5 cm	15 cm	30 cm	60 cm	累计降雨量	侧向流
小雨	5 cm	1				
	15 cm	0.905**	1			
	30 cm	0.862**	0.847**	1		
	60 cm	0.849**	0.844**	0.946**	1	
	累计降雨量	0.859**	0.726**	0.928**	0.855**	1
	侧向流	0.725**	0.871**	0.811**	0.703**	0.465**
中雨	5 cm	1				
	15 cm	0.796**	1			
	30 cm	0.835**	0.904**	1		
	60 cm	0.851**	0.827**	0.937**	1	
	累计降雨量	0.954**	0.870**	0.936**	0.931**	1
	侧向流	0.757**	0.907**	0.721**	0.679**	0.759**
大雨	5 cm	1				
	15 cm	0.858**	1			
	30 cm	0.537**	0.844**	1		
	60 cm	0.485**	0.796**	0.958**	1	
	累计降雨量	0.904**	0.856**	0.833**	0.519*	1
	侧向流	0.647**	0.886**	0.952**	0.924**	0.320**

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.4 累计降雨量和侧向流回归分析

一次降雨过程中侧向流的变化具有较明显的退水期,随着累计降雨量的增加,侧向流随之增加,在地下水和下渗水的双重作用下,侧向流对降雨的响应慢慢变弱,为讨论一次降雨过程中累计降雨量和最大侧向流的关系,选取每个月一场最典型的降雨,得出在退水前累计降雨量、最大降雨量和侧向流的定量关系。其中小雨 5 次、中雨 6 次、大雨 1 次。为进一步寻找最大侧向流与累计降雨量间关系,将 2012—2013 年 12 个月份中抽取的 12 次降雨事件最大侧向流以及累计降雨量数据,作出散点图(图 5)。从图 5 中可以发现,最大侧向流与累计降雨量呈指数关系, $y=0.7614e^{0.2238x}$ 。

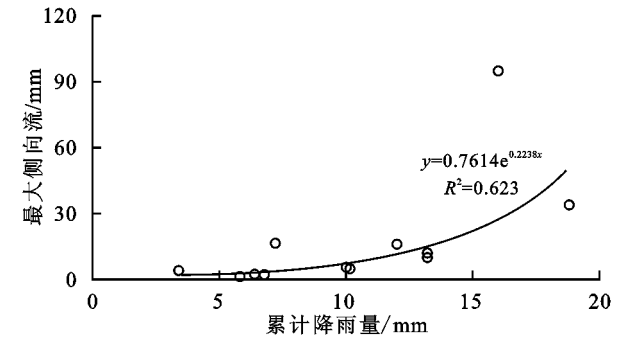


图 5 最大侧向流和累计降雨量的指数关系

3 讨论

本研究表明:在一次降雨过程中,随着土层深度的增加土壤含水率对降雨的响应具有一定的滞后性,土层越深滞后性越强,分析其原因是降雨初期雨水在地面毛管力和重力的双重作用下下渗,随着土层深度增加,下渗锋面向下不断扩展使毛管力减小,主要靠重力作用下渗,初始雨水到达地下需要一个入渗过程,所以下层土壤的入渗速率慢^[13],这也表明了杉木林林下土壤下渗的基本规律,在土壤表层,上层水势在降雨初期短期增至最大水势,末期水势逐渐减小,下渗强度随着土层深度增加变小。对于杉木林来说,0—5,5—15 cm 土层土壤含水率变化和降雨量变化的同步性较一致,随着土层深度的增加含水率对降雨的响应越来越差。本研究表明:在小雨、中雨条件下土壤含水率变化对降雨的响应较大雨条件下显著,本研究中大雨条件下,雨强大且降雨历时较长,中间分为了两段间隔 2 h 的降雨过程,李海防等^[3]在漓江上游猫儿山林区研究中表明随着降雨量的增大,土层含水率变化对降雨的响应变慢。随着雨强的增大,雨滴动能在不断增加,而雨滴动能是造成土壤表面结皮的

重要影响因素,雨强增加使土壤结皮发育更加成熟,导致下渗率减小。

本研究与刘宏伟等^[8]对湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究得出的土壤含水率过程呈现3个阶段(上升、平台和退水期)不同,本研究中只出现了上升、退水期,没有出现平台期。杉木林初始土壤含水率一般15—30 cm土层最高,而0—5 cm土层含水率最低的现象。随着降雨量的增加,土壤含水率呈现低—缓慢升高—最高点—逐渐降低的进程。

本研究表明,在降雨入渗过程中不是一个土壤层达到最大含水率后才开始下渗,土壤水是非饱和下渗,浅层土壤未饱和就开始下渗,在3场降雨中,5—60 cm土层土壤含水率变化量之和明显高于降雨量,说明每场降雨在土壤垂直面上都有侧向流的发生。吴胡强^[10]、王鹰翔^[11]等在对铜山地区麻栎林、毛竹林进行定位观测土壤水分下渗时也得出和本研究一致的结论,对于林下植被较少的地块,由于降雨时直接接触地表的雨量远超过林冠截留量,侵蚀方式以击溅侵蚀为主,造成土壤孔隙减少甚至堵塞,土粒分散溅起和增强地表薄层径流紊动,土壤水分下渗为饱和和下渗,但杉木林林下植被丰富,水源涵养功能较好,在降雨事件开始后,击溅侵蚀较少,实时降雨小于表层土壤的饱和含水率,无地表径流产生,下渗表现为非饱和和下渗^[14]。

4 结论

三场降雨稳渗率均小于降雨强度,无地表径流的发生^[15],水分入渗为非饱和入渗,土壤垂直面有侧向流的发生。小雨、中雨、大雨最大侧向流分别是1.55, 16.38, 94.77 mm。小雨侧向流集中在5—15 cm土层,中雨侧向流集中在15—30 cm土层,大雨侧向流集中在30—60 cm土层。

土壤含水率变化和降雨量有较好的线性关系且相关性较强。随着降雨量的增加,土壤含水率变化和降雨量变化的相关性越来越差。0—5 cm和5—15 cm土层土壤含水率变化趋势与降雨量变化趋势有着良好的同步性,浅层土层对降雨响应明显。

各土壤层含水率随降雨量不同对降雨响应的表现不同,小雨条件下,土壤含水率变化幅度随土层深度逐渐降低,大中雨条件下,30—60 cm土层含水率变化呈现

逐渐升高的趋势。大雨条件下趋势更为明显。

在一次降雨事件中,各土层含水率变化量、降雨量和侧向流量均明显显著,侧向流与累计降雨量的相关性随着雨量的增大越来越小,各土层含水率变化随着深度的增大与降雨的响应越来越弱。最大侧向流与累计降雨量呈指数关系, $y=0.7614e^{0.2238x}$ 。

参考文献:

- [1] 冯伟. 毛乌素沙地东北缘土壤水分动态及深层渗漏特征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [2] Yu Z, 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.
- [3] 李海防, 史梅容, 王金叶, 等. 广西猫儿山毛竹林不同层次土壤含水量的降雨响应[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 120-123.
- [4] 王正安, 邸利, 王彦辉, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分对降雨的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(4): 144-151.
- [5] 倪晨. 花岗岩崩岗集水坡面土壤水分状况研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [6] 刘昊, 周宏飞, 刘翔. 强降雨条件下沙丘土壤水分运移特征分析[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 157-162.
- [7] 高红贝, 邵明安. 干旱区降雨过程对土壤水分与温度变化影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 40-45.
- [8] 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(7): 822-829.
- [9] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(7): 494-499.
- [10] 吴胡强, 邵永昌, 庄义琳, 等. 南京城郊麻栎林坡面土壤体积含水率与侧向流对降雨响应[J]. *浙江农林大学学报*, 2014, 31(5): 683-689.
- [11] 王鹰翔, 张金池, 刘鑫, 等. 苏南丘陵区毛竹林坡面土壤水分对降雨的响应[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 22-26.
- [12] Colman E A, Bodman G B. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1944, 9(C): 3-11.
- [13] 杨帆, 刘志军, 马忠秋, 等. 太行山低山丘陵区坡地人工刺槐林降雨入渗及造林技术研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 172-174.
- [14] 黄志霖, 李建新. 太行山侧柏人工林林冠降雨截留及地表径流的研究[J]. *河南林业科技*, 2000, 20(2): 1-5.