

苏南丘陵区毛竹林坡面土壤水分对降雨的响应

王鹰翔, 张金池, 刘鑫, 薛雪, 赵文瑞, 王金平, 吴胡强

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 研究苏南丘陵区毛竹林涵养水源机制, 降低由于毛竹集约经营而导致水土流失的影响。[方法] 选取南京市铜山林场的毛竹林, 采用 ECH₂O 土壤含水率检测系统于 2012 年 6 月 5 日至 2013 年 8 月 28 日以每 0.5 h 监测 1 次的频率在坡面土壤深度为 10, 15, 40, 60 cm 的 4 个深度层次进行土壤水分定位监测, 分析了不同降雨强度条件下苏南丘陵区毛竹林地各土壤层次水分变异过程, 得到各土壤层次体积含水率变化过程对降雨强度的响应曲线, 并提出侧向流以及分析其对不同雨强的响应特征。[结果] 10, 15 cm 层次土壤含水率变化趋势与降雨量变化趋势具有一致性, 40, 60 cm 层次土壤含水率的峰值相对延迟 0.5~1.5 h; 小雨条件下, 土壤含水率的变化幅度自表层到 40 cm 土层呈现逐渐减小的趋势, 中雨和大雨条件下, 15—60 cm 层次土壤含水率的变化幅度表现出随深度增加而增大的趋势, 大雨条件下此趋势更加明显; 小雨、中雨和大雨条件下最大侧向流分别为 10.17, 60.26 和 95.92 mm。[结论] 随着深度的增加, 土壤含水率与降雨量的同步性呈现下降趋势; 不同雨强条件下各层土壤含水率的变化幅度存在明显差异; 降雨入渗表现为非饱和入渗, 每场降雨垂直面上都有不同程度的侧向流存在, 主要集中在 40—60 cm 层次, 其主要受土壤结构和降雨强度的影响。

关键词: 毛竹林; 土壤体积含水率; 侧向流; 降雨强度; 非饱和入渗

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0022-05

中图分类号: S715.3

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.005

Response of Soil Moisture Content to Rainfall in *Phyllostachy Pubescens* Forest in Hilly Areas of Southern Jiangsu Province

WANG Yingxiang, ZHANG Jinchi, LIU Xin, XUE Xue, ZHAO Wenrui, WANG Jinping, WU Huqiang

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration in Jiangsu Province, Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to analyze the mechanism of water conservation in *Phyllostachy pubescens* forest in the hilly areas of Southern Jiangsu Province, and reduce the influences of intensive bamboo management on soil and water loss. [Methods] ECH₂O soil moisture content detection system was used to measure the volumetric soil water content (VSWC) at four soil depths (10, 15, 40, 60 cm) in *P. pubescens* forest in Nanjing Tongshan forest farm. The observed VSWC data (from June 2012 to August 2013) was used to analyze the variability of VSWC under different precipitation intensity. The VSWC curve at different soil depths under different precipitation intensity was made, and lateral flow was proposed to analyze its response to different rainfall conditions (light, moderate and heavy rain). [Results] The VSWC at the depth of 10 and 15 cm changed consistently with the variation of rainfall. The peak value of soil moisture content in the soil depth of 40 and 60 cm was delayed by 0.5 to 1.5 h. The variation amplitude of VSWC decreased from the surface to 40 cm of soil depth under light rainfall condition. The variation amplitude of VSWC increased from the 15 to 60 cm of soil depth under moderate rain and heavy rain conditions, and this

收稿日期: 2014-12-19

修回日期: 2014-12-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特极度侵蚀区菌根真菌提高树木耐旱性机理研究”(31470709); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏省研究生科研创新工程项目“喷播基质中土壤菌不同配置对植物根系的影响”(KYLX15_0914)

第一作者: 王鹰翔(1992—), 男(汉族), 江苏省镇江市人, 硕士研究生, 主要研究方向为林业生态工程。E-mail: 1573024103@qq.com。

通讯作者: 张金池(1962—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为林业生态工程, 水土保持与荒漠化防治。E-mail: zhang8811@njfu.edu.cn。

trend was more obvious under the heavy rainfall condition. The maximum lateral flow under light, moderate and heavy rainfall condition was 10.17, 60.26 and 95.92 mm, respectively. [Conclusion] As the increase of soil depth, the synchronicity between the VSWC and rainfall declined. Obvious differences in the amplitude of VSWC were existed among different soil layer with different rainfall intensity. Rainfall infiltration was unsaturated infiltration. Lateral flow existed in vertical plane under each rainfall, and they mainly concentrated at 40—60 cm soil depths, and influenced by soil structure and precipitation intensity.

Keywords: *Phyllostachy pubescens* forest; VSWC; rainfall intensity; lateral flow; unsaturated infiltration

土壤的水分运动是连接降水、地表水和地下水的重要环节,对水资源的形成、转化与消耗起着重要的作用^[1],对作物生长、粮食生产以及维持自然植被生长和决定植被的类型与分布具有重要的意义^[2]。同时,土壤水分对降雨的响应过程也是水文循环系统的重要组成部分^[3],因而针对土壤水分对降雨的响应特征的研究显得尤为重要。

国内外众多学者围绕土壤水分对降雨的响应进行了大量的研究,取得了许多重要的成果。张秋英等^[4]探讨在无覆盖、秸秆覆盖和石子覆盖条件下太行山区土壤水对降水的响应。结果表明当 30 cm 土层土壤含水量低于 20% 时,单次降水很难入渗至 30 cm 以下。傅斌等^[5]进行了人工降雨试验研究,认为雨强对降雨过程有重要影响;刘宏伟等^[6]在太湖西侧通过野外坡面试验来研究地下剖面土壤水分和地表水对降雨过程的响应特征,认为坡面上土壤含水率受地形和局部微地形的影响较显著,浅层对降雨响应明显,不同深度层次对降雨的响应有所平移和延长;He 等^[7]定量分析了祁连山脉草地和草甸各层土壤水分对不同强度降雨事件的响应特征,结果发现虽然总降水量、降雨事件的频率和植被类型是不同的,但是草地和草甸各层土壤水分对降雨的响应特征相似;Wang 等^[8]以一个黄土高原植被修复的流域为例,研究了土壤水分对降雨的响应特征,并分析了不同植被覆盖对于降雨下渗的影响,结果发现不同的土地覆盖类型显著影响了降水的渗透。另外,在每场降雨中,有部分降水沿着土壤空隙入渗到土壤内部形成土壤水,后形成壤中流^[9]。壤中流是坡地径流的重要组成部分之一,对流域径流的产生和水土流失等有重要影响^[10]。国内外学者对壤中流的产生机制^[11]和壤中流的影响因子^[12-17]进行了广泛的研究。

总之,目前国内关于土壤水对降雨响应方面的研究表现为室内试验多,野外观测少;平原地形多,丘陵地区少;人工模拟条件下试验较多,自然状态下降雨对土壤水的试验少。苏南丘陵区毛竹林为速生丰产用材林,树龄 1~5 a,频繁砍伐对土壤的结构破坏很大,从而影响土壤水的分布,降低林地水源涵养的生态功能。本研究拟以苏南丘陵区毛竹林地为研究对

象,着重研究自然状态下土壤含水率和侧向流对不同雨强的响应特征。这对于探究苏南丘陵区毛竹林水源涵养机制,降低由于毛竹集约经营而导致水土流失的影响,从而保证苏南丘陵区毛竹林生产能力与经济效益持续增长,有实际的指导意义。

1 研究地概况

研究地位于江苏省南京市东善桥林场铜山分场(118°50'—118°52'E,31°35'—31°39'N),属北亚热带季风气候区,区内气候温和湿润,四季分明,年平均气温 15.1℃,无霜期 229 d,年日照时间 2 199 h,水热资源比较丰富,年平均降水量 1 100 mm,土壤类型为黄棕壤,地形为丘陵,海拔在 38~388 m,林分类型以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、毛竹(*Phyllostachys edulis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)和茶(*Camellia sinensis*)为主。试验地选择 1~5 a 生长的毛竹林,郁闭度 0.89,密度 2 025 株/hm²,平均树高 10.8 m,平均胸径 8.3 cm,平均冠幅 2.7 m。

2 研究方法

2.1 土壤体积含水量监测

ECH₂O 传感器通过测量土壤的介电常数计算土壤体积含水量。本研究在毛竹林布设 ECH₂O 土壤含水率检测系统进行 24 h 自动实时监测,观测土层深度为 0—60 cm,分为 4 个观测层,分别为 0—10, 10—15, 15—40, 40—60 cm。于 2012 年 6 月 5 号至 2013 年 8 月 28 号以每 0.5 h 监测 1 次的频率监测样地的土壤水分。监测点地形为苏南丘陵,坡向东北,坡度 17°。

2.2 降雨量的测定

试验地的毛竹林地使用雨量筒计测定降雨量。采用 HOBO 计数器实时监测降雨量和降雨历时,通过降雨时间和降雨量的统计可推算出降雨量的强度大小。也可反映降雨量大小变化过程以及小雨、中雨、大雨在时间上和雨量上的转变量。

2.3 侧向流的计算

侧向流是侧向流动的壤中流,由于不产生地表径

流,侧向流近似等于单位时间、单位体积下土壤含水量的变化量与实际降雨量的差值,即:

$$I_m = \Delta W - P \quad (1)$$

式中: I_m ——侧向流(mm); ΔW ——土壤体积含水率变化量所需降雨量(mm); P ——实测林内降雨量(mm)。

2.4 土壤最大体积含水率测定

在毛竹林选取靠近土壤含水率监测点位的典型地点,采用环刀法(环刀规格直径 5 cm)取各层次土样后,用水浸泡使其达到饱和,称重结果记为 M_1 ,放入烘干箱烘干至恒重计为 M_2 ,即可得出各层次的最大体积含水率。

$$\text{土壤饱和含水率} = \frac{M_1 - M_2}{V_{\text{环刀}} \times \rho} \times 100\% \quad (2)$$

式中: M_1 ——饱和土重(g); M_2 ——烘干土重(g); $V_{\text{环刀}}$ ——环刀体积(cm^3); ρ ——水的密度(1 g/cm^3)。

3 结果与分析

3.1 不同降雨条件下各层次土壤含水率对降雨的响应

3.1.1 在小雨条件下各土壤层次土壤含水率对降雨的响应 图 1 为小雨条件下(24 h 内降雨量不超过 10 mm)各层土壤含水率的变化特征,在降雨之前,初始含水率最大和最小的层次分别是 15 cm (17.89%),10 cm (5.48%);小雨开始后,10 cm 层次土壤水分变化与降雨量变化具有良好的同步性,随着土壤层次的加深,两者变化之间的同步性呈现下降的趋势,累计降雨量 2.4 mm 时,10 cm 层次的土壤含水率曲线发生了明显的变化,15,40,60 cm 层次的土壤含水率无响应,当降雨强度达到最大值 3.2 mm/h 时,10 cm 土壤含水率曲线同时达到峰值,而 15 和 60 cm 土壤含水率曲线达到峰值的时间分别滞后 0.5 和 1 h;降雨结束,10 cm 层次土壤含水率曲线呈现明显的下降过程,15 和 60 cm 的下降过程不明显,40 cm 层次土壤含水率缓慢上升。

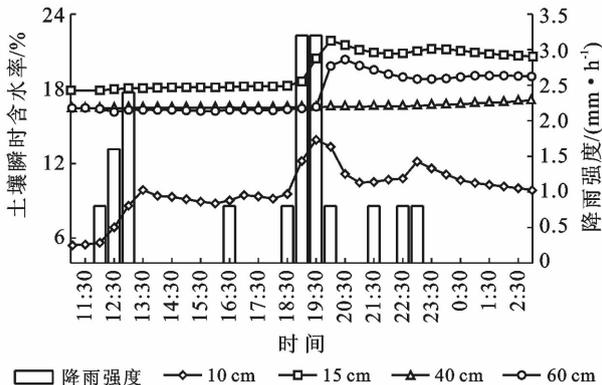


图 1 2013 年 3 月 16 日小雨条件下各层次土壤含水率对降雨的响应

0—40 cm 层次土壤含水率的变化幅度表现出随深度增加而减小的趋势,10,15 和 40 cm 层次土壤体积含水率变化量分别为 8.28%,3.99% 和 0.63%。土壤含水率变化量最大和最小的层次分别是 10 cm (8.28%),40 cm (0.63%)。

3.1.2 在中雨条件下各土壤层次土壤含水率对降雨的响应 图 2 为中雨条件下(24 h 内降雨量为 10—25 mm)各层土壤含水率的变化特征,降雨之前,初始含水率最大和最小的层次分别是 15 cm (27.2%),60 cm (18.87%);中雨开始时,10 和 15 cm 层次土壤水分变化与降雨量变化具有良好的同步性,在累计降雨量在 6 mm 时,各层次土壤含水率都表现明显的变化特征,当降雨强度达到最大值 15.2 mm/h 时,10 和 15 cm 层次土壤含水率同时达到峰值,40 和 60 cm 层次土壤达到峰值分别滞后 0.5 和 1 h;在达到峰值之后 10,15 和 40 cm 层次土壤含水率呈现显著的下降趋势,60 cm 层次土壤含水率则趋于稳定,之后显著下降。

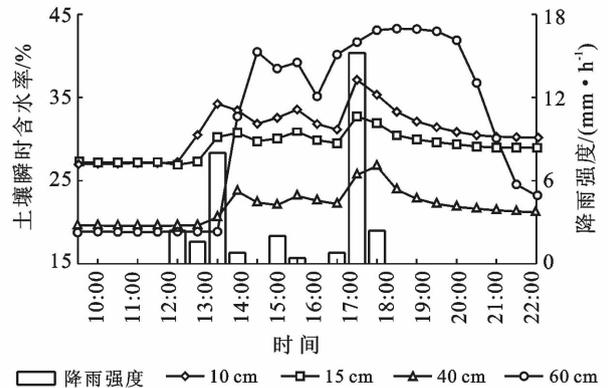


图 2 2013 年 6 月 25 日中雨条件下各层次土壤含水率对降雨的响应

15—60 cm 层次土壤含水率的变化幅度表现出随深度增加而增大的趋势,15,40 和 60 cm 层次土壤体积含水率变化量分别为 5.53%,7.19% 和 24.45%。土壤含水率变化量最大和最小的层次分别是 60 cm (24.45%),15 cm (5.53%)。

3.1.3 在大雨条件下各土壤层次土壤含水率对降雨的响应 图 3 为大雨条件下(24 h 内降雨量为 25~60 mm)各层土壤含水率的变化特征,降雨之前,初始含水率最大和最小的分别是 10 cm (24.58%) 和 40 cm (19.79%)。大雨开始,10 和 15 cm 层次土壤水分变化与降雨量变化具有良好的同步性,累计降雨量为 13.2 mm 时,降雨强度达到最高峰,各层次土壤含水率曲线均出现明显上升,15 和 40 cm 层次土壤含水率达到最大值,60 cm 层次土壤含水率曲线达到峰

值相对滞后 1.5 h; 第 1 次降雨结束, 10, 15, 40 cm 层次土壤含水率曲线呈现显著的下陷过程, 60 cm 层次土壤含水率趋于稳定, 之后显著下降; 当累计雨量达到 26 mm 时, 10 和 15 cm 层次土壤含水率曲线同时达到最高峰, 40, 60 cm 层次土壤含水率曲线达到最高峰相对滞后 0.5 和 5 h; 第 2 次降雨结束后 10 和 15 cm 曲线呈下降趋势, 而 40 和 60 cm 层次土壤含水率曲线趋于稳定, 后显著下降。

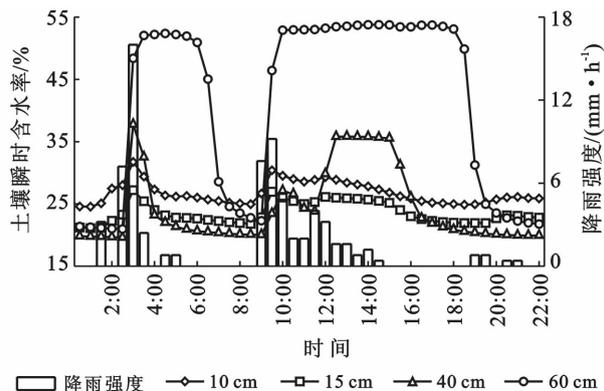


图 3 2012 年 9 月 9 日大雨条件下各层次土壤含水率对降雨的响应

整个降雨过程土壤含水率上升速率最大和最小分别是 60 cm (54.86%) 和 15 cm (7.86%); 退水速率最大和最小的分别是 60 cm (8.41%/h), 10 cm (0.58%/h)。15—60 cm 层次土壤含水率的变化幅度表现出随深度增加而增大的趋势, 15 cm, 40 cm 和 60 cm 层次土壤体积含水率变化量分别为 6.11%, 18.18% 和 32.82%, 土壤含水率变化量最大和最小的分别是 60 cm (32.82%) 和 15 cm (6.11%)。

3.1.4 各降雨条件下垂直剖面土壤含水率的入渗特征 表 1 为各个层次理论最大体积含水率和各降雨条件下实际最大含水率的比较。可明显看出, 在各表层远未达到最大体积含水率时, 较深层次土壤含水率表现出显著的变化特征, 表明毛竹林土壤水分入渗呈现非饱和和下渗的特征。图 1—3 也显示了各降雨条件下垂直表面非饱和入渗主要集中于 40—60 cm 层次垂直面上。

表 1 毛竹林各层次土壤最大体积含水率 %

土壤层次 深度/cm	理论最大 体积含水量	实际最大体积含水率		
		小雨过程	中雨过程	大雨过程
0—10	63.42	13.90	37.12	30.39
10—15	58.10	21.88	32.73	26.95
15—40	45.68	17.08	26.76	30.40
40—60	43.97	20.36	43.28	53.78

3.2 侧向流对降雨的响应

以时间(h)为横坐标, 雨量(mm)和土壤含水变化量(mm)为纵坐标, 得到不同降雨强度下实际观测点降雨量、侧向流流量和各层次土壤含水率变化的理论所需雨量随时间的变化曲线(图 4)。

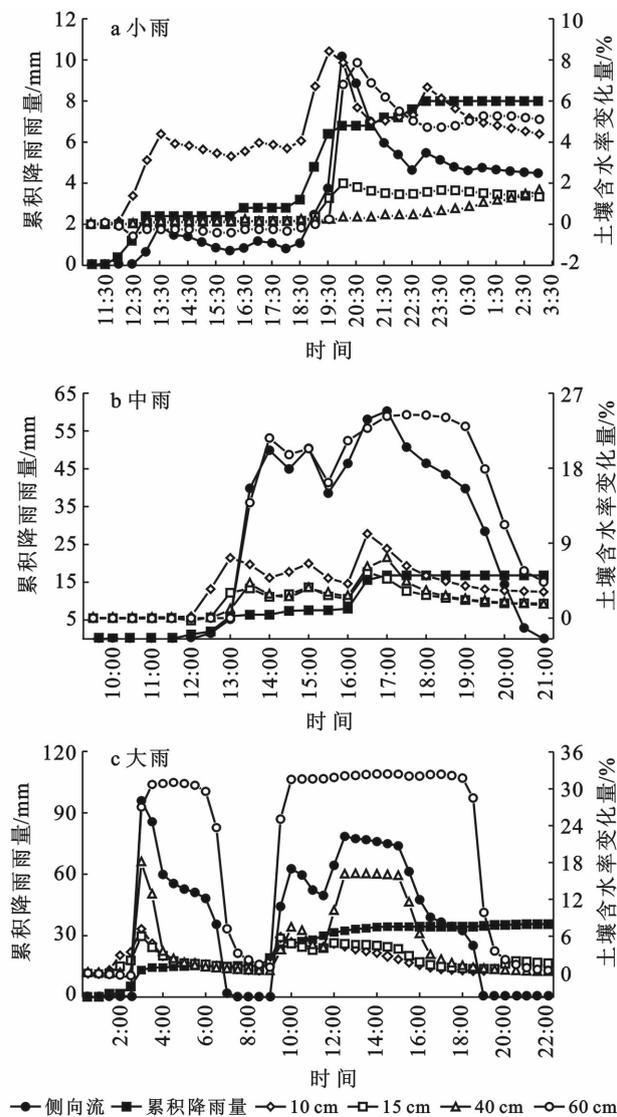


图 4 不同降雨条件下侧向流和各层次土壤含水率变化量随时间的变化

雨强的大小对土壤入渗有一定影响^[6]。如图 4 所示, 降雨量极小时, 10 cm 层次直接受降雨的影响, 对降雨变化的响应最为迅速, 15—40 cm 层次的土壤含水率变化微小, 无明显的曲线特征, 而 60 cm 层次土壤含水率变化表现出显著的变化特征, 此层次出现了侧向流; 10 和 15 cm 的土壤含水率变化与降雨量变化具有良好的同步性, 但变化量不明显, 40 和 60 cm 层次的土壤含水率变化与侧向流变化过程存在明显的响应曲线特征, 变化量十分显著, 表明侧向流主要集中于 40—60 cm。图 4 反映了土壤垂直方向上侧

向流的侵入加剧了土壤含水率的变化,小雨过程中产生最大侧向流 10.17 mm,中雨过程中产生最大侧向流 60.26 mm,大雨过程中产生最大侧向流 95.92 mm。

如图 4 所示,每场降雨开始时,侧向流流量均随着降雨量的增大呈现明显的增大趋势;当累积降雨量趋于稳定,降雨结束时,侧向流流量均会有显著的下降。表明在每场降雨过程中,侧向流对降雨的响应显著。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究中,当降雨发生时,土壤剖面上不同深度土层的土壤含水率对降雨的响应时间存在不同,40 和 60 cm 层次的土壤含水率上升和下降过程均滞后于 10 和 15 cm 土壤层次,且涨落时间均延长,表现出土壤水分的入渗先后过程。10 和 15 cm 层次土壤含水率随降雨的结束即开始下降,而 40 和 60 cm 层次土壤含水率会先趋于稳定后下降,这说明在此过程中其仍受土壤水的补给作用。由于浅层次(0—40 cm)土壤含水率主要受降雨的直接影响,中层次(40—60 cm)土壤含水率受降雨和地下水变动的双重影响^[6],因此对于毛竹林,10 和 15 cm 层次土壤含水率变化趋势与降雨量变化趋势具有一致性,随着深度的加深,土壤含水率的变化与降雨量同步性呈现下降趋势。

本研究中,降雨入渗在上一层次未达到饱和含水率的情况下就开始下渗到更深层次,表明降雨过程中土壤层次不是达到最大含水率而开始下渗,土壤水是非饱和下渗。3 次降雨过程呈现降雨历时长而强度不大的特点,最大降雨强度为 16 mm/h,毛竹林地由于其冠层与地表的枯枝落叶对于降雨的截留和水分的吸持作用,有效地削弱了降雨强度;另外,毛竹稠密的根系增强了毛竹林地土壤的渗透能力,各层次平均稳渗速率为 5.89 mm/min,表层土壤入渗能力远大于实际降雨强度,因此无地表径流产生。

在 3 场降雨中,0—60 cm 层次土壤含水率的增加量显著高于降雨量,表明每场降雨垂直面上都有不同程度的侧向流存在。但本次研究结果与吴胡强等^[13]在南京麻栎林地的研究略有不同,由于毛竹林根系比麻栎林根系稠密发达,并且毛竹林根系会向下和向四周延伸,根系范围大,根系在生长过程中以及死亡后在土壤中均会形成孔道,能够较好改善土壤结构,增强其透水透气性能,能够极大提高深层次土壤的渗透能力。因此毛竹林的侧向流和非饱和入渗更加明显,毛竹林地的侧向流流量较大,多集中于 40—

60 cm 土壤层次;小雨条件下,土壤含水率的变化幅度自表层到 40 cm 呈现逐渐减小的趋势,40 cm 无明显响应特征,而 60 cm 层次土壤含水率随降雨量的变化有明显的上升过程;中雨和大雨条件下,15—60 cm 层次土壤含水率的变化幅度表现出随深度增加而增大的趋势,大雨条件下此趋势更加明显,侧向流的侵入和非饱和入渗加剧了垂直剖面土壤含水率的变化。

4.2 结论

(1) 10 和 15 cm 层次土壤含水率变化趋势与降雨量变化趋势具有一致性,随着深度的加深,土壤含水率与降雨量的同步性呈现下降的趋势。

(2) 各土壤层次土壤含水率对降雨的响应表现出随降雨量不同而差异显著,小雨条件下,土壤含水率的变化幅度自表层到 40 cm 呈现逐渐减小的趋势;中雨和大雨条件下,15—60 cm 层次土壤含水率的变化幅度表现出随深度增加而增大的趋势,大雨条件下此趋势更加明显。

(3) 降雨入渗均表现为非饱和入渗,每场降雨垂直面上都有不同程度的侧向流存在,小雨、中雨和大雨条件下最大侧向流分别为 10.17、60.26 和 95.92 mm。侧向流主要集中在 40—60 cm 层次,其对降雨的响应显著。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 柴雯,王根绪,李元寿,等. 长江源区不同植被覆盖下土壤水分对降水的响应[J]. 冰川冻土,2008,30(2):329-337.
- [3] 鲍彪,毕华兴,云雷,等. 晋西黄土区刺槐林地土壤水分对降雨的响应[J]. 北京林业大学学报,2012,34(2):84-89.
- [4] 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.
- [5] 傅斌,王玉宽,朱波,等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(7):39-43.
- [6] 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.
- [7] He Zhibin, Zhao Wenzhi, Liu Hu, et al. The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: A case study in northwestern China's Qilian Mountain[J]. Journal of Hydrology, 2011, 420(2):183-190.
- [8] Wang Shuai, Fu Bojie, Gao Guangyao, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the loess Plateau, China[J]. Catena, 2013,101(2):122-128.

- 泊模拟研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 385-388.
- [13] 刘淑娟, 袁宏波, 刘世增, 等. 石羊河尾间水面形成区土壤颗粒的分形特征[J]. 水土保持通报, 2013, 30(20): 235-240.
- [14] 董志玲, 徐先英, 金红喜, 等. 生态输水对石羊河尾间湖区植被的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 101-106.
- [15] 刘世增. 石羊河流域中下游河岸植被变化及其驱动因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [16] 李昌龙, 王继和, 孙坤, 等. 民勤连古城自然保护区群落结构和物种多样性特征分析[J]. 西北植物学报, 2006, 26(11): 2338-2344.
- [17] 张有佳. 民勤连古城国家级自然保护区植物多样性及其保护对策与技术[J]. 甘肃林业科技, 2008, 3(3): 46-70.
- [18] 刘虎俊, 王继和, 常兆丰, 等. 石羊河下游荒漠植物区系及其植被特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2): 113-118.
- [19] 何芳兰, 李治元, 赵明, 等. 民勤绿洲盐碱化退耕地植被自然演替及土壤水分垂直变化研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 278-282.
- [20] 常兆丰, 刘虎俊, 赵明, 等. 民勤荒漠植被的形成与演替过程及其发展趋势[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(7): 116-124.
- [21] 常兆丰, 仲生年, 韩福贵, 等. 民勤沙区主要植物群落退化特征及其演替趋势分析[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 382-388.
- [22] 杨自辉. 民勤沙井子地区 40 a 来的植被变化研究[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 395-397.
- [23] 杨自辉, 俄有浩, 方峨天, 等. 民勤绿洲边缘物种多样性对水资源变化的响应[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 278-282.
- [24] 江洪, 张艳丽, James R S. 干扰与生态系统演替的空间分析[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1861-1876.
- [25] 杜泉滢, 李智, 刘书润, 等. 干旱、半干旱区湖泊周围盐生植物群落的多样性格局及特点[J]. 生物多样性, 2007, 15(3): 271-281.
- [26] 张彬, 朱建军, 刘华民, 等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018.
- [27] 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 等. 普通生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 52-181.
- [28] 马克平. 生物群落多样性的测度方法[M]// 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141-165.

(上接第 26 页)

- [9] 裴铁, 王番, 李金中. 壤中流模型研究的现状及存在问题[J]. 应用生态学报, 1998, 9(5): 543-548.
- [10] Anderson M G, McDonnell J J. Encyclopedia of Hydrological Sciences [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [11] Chang Mingteh. Forest Hydrology: An Introduction to Water and Forests[M]. 3th ed. Boca Raton, Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2012.
- [12] Kienzler P M, Naef F. Temporal variability of subsurface stormflow formation[J]. Hydrological Earth System Science, 2008, 12(1): 257-265.
- [13] 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]. 浙江农林学报, 2014, 31(5): 683-689.
- [14] 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.
- [15] Xie Hongxia, Yang Qinke, Li Ri. Influence on ecosystem service caused by soil and water conservation in Yanhe River Basin of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013, 11(1): 993-998.
- [16] 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, 28(1): 6-11.
- [17] 冯伟, 杨文斌, 李卫, 等. 毛乌素沙地沙柳固定沙丘土壤水分对降雨的响应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 95-99.