

东部湿润区典型小流域土地利用的土壤水效应

周才钰, 许有鹏, 刘鹏飞, 王强, 王杰

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

摘要:不同土地利用类型下土壤水变化机制对流域水文过程与生态环境有较大影响。基于我国东部湿润区野外综合观测土壤墒情数据,探讨了不同土地利用类型下土壤水的动态变化特征。结果表明:(1)总体上,杨梅林土壤含水量在32%~37%之间波动;农田土壤含水量在20%~30%波动。坡耕地土壤含水量稳定在27%~35%之间;竹林土层土壤含水量大致稳定在25%~32%之间。垂直剖面上,表层(10 cm、20 cm)土壤水分变化大,深层(60~80 cm)土壤水分变化较小。表层土壤水分时间变化特征的波动幅度较深层土壤大。(2)不同降雨强度下,竹林土壤水分对降雨的响应程度大于杨梅林、农田和坡耕地。降雨强度越大,土壤水分响应程度越大;降雨停止后,土壤水分消退起伏下降,深层土壤水分变化较表层稳定。(3)通过增墒系数和减墒系数对土壤水分变化进行量化,发现竹林的消退最明显,其余三种土地利用类型变化幅度相当。杨梅林、农田和竹林均是表层变化较深层大,坡耕地变化更为复杂。研究结果将为我国东部湿润地区产汇流机理及防洪减灾研究提供一定参考。

关键词:土壤水分;降雨;土地利用类型;湿润区小流域

土壤水分是水文、生态和地理学研究的重要内容^[1],是作物生长、地—气水热交换及全球水循环过程中的关键变量,影响着下渗、径流以及土壤侵蚀等过程^[2]。土壤水分决定着植物光合作用和蒸腾作用,植被也影响着土壤表层的蒸散发^[3]。近年来,随着人类活动的加剧,区域下垫面发生了显著变化,并通过各种景观变化的耦合作用影响了入渗、径流和蒸散发等水文过程特征^[4]。因此,开展土壤墒情观测,探讨不同土地利用类型下土壤水分的动态变化成为地理、水文等领域学者关注的热点问题之一,对探讨区域水循环过程具有重要意义。

目前,国内外学者针对不同植被特征下土壤水分对降雨的响应关系开展了研究。在国内,众多学者细致地研究了土壤水分的分布特征^[5,7]、土壤含水量变化的影响因素^[8,9]、土壤水分入渗的规律^[10,11]、气温和降水对土壤水分的影响^[12,13]、不同土壤类型下土壤水分的动态变化及持水能力^[14,15]等多个方面,涉及的地区包括黄土高原^[16,17]、荒漠区^[18]以及太湖流域^[19]等多个区域。在国外,Korres等^[20]在德国东部Rur流域分析不同土地利用类型下的土壤水分模式变化,发现植被会导致土壤水分模式的空间变异性的增加或减少;Venkatesh等^[21]在印度Uttara Kannada区建立试验流域监测不同土地利用类型土壤水分的变化,结果显示不同土地覆被下土壤水分变化具有显著差异,森林覆盖的地区,表层土壤水分比深层变化明显;此外,其他学者研究不同土壤质地对地表水文过程影响^[22]以及对

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-11-20

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2018YFC1508201); 国家自然科学基金项目(41771032)

作者简介: 周才钰(1996-),女,陕西汉中,人,硕士,研究方向为水文水资源学。E-mail: caiyu615@163.com

通讯作者: 许有鹏(1956-),男,江苏南京,人,博士,教授,研究方向为流域水文水资源评价与防洪减灾。

E-mail: xuy305@163.com

气候变化的敏感性^[23], 发现不同质地土壤水分差别很大。这些学者的研究均表明, 不同土地利用类型土壤水分差异显著。因此, 有必要开展长期的水文实验监测土壤水分长时间序列变化特征。

然而, 目前国内有关土壤水分对降雨的响应与消退的研究中, 研究区域多集中在我国的干旱、半干旱区域^[24], 研究方法多采用实验室人工试验^[25,26], 缺乏长期野外综合对比试验观测。我国东部湿润地区属于典型的亚热带季风带, 植被的生长状况与干旱、半干旱区相差极大。到目前为止, 针对东部湿润地区短时间土壤水分对降雨的响应规律研究较少^[19,27], 缺乏对土壤水分动态变化的长时间观测研究。同时, 由于观测仪器的限制, 以前研究时间步长多为一天或者一小时, 时间尺度较为粗糙, 而近年来, 针对变化环境下东部地区日趋严重的水灾害问题对土壤水分动态观测也有了更高的要求。

因此, 本文以我国东部奉化江下游画龙溪小流域为例, 选取该区域具有特色的林地(杨梅林、竹林)和耕地(农田、坡耕地)几种土地利用类型, 通过对自然状况下不同土地类型不同土层深度的土壤含水量进行长期连续动态观测, 获取短时间间隔土壤水分数据, 重点研究汛期(8-10月)土壤水分的响应与消退, 以揭示不同土地利用类型及降雨强度下土壤含水量变化规律, 以期为我国东部季风区降水、地表水、土壤水三水转化分析、农业生产以及水资源配置方面提供理论依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省宁波市鄞州区西部的画龙溪小流域, 属亚热带季风性湿润气候, 年降水量约1600 mm, 面积约9.38 km² (图1)。该区域为山区小流域, 地下水埋藏较深。植被以天然林居多, 山间平原以种植水稻、苗木为主。受地形、降水和土地覆盖特征三者共同影响, 梅汛、台汛期常有山洪暴发。该地区土壤为酸紫砾土, 土体厚度40~50 cm, 以粘壤土为主。

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 数据来源

本文分别在4种不同土地利用类型上安装土壤水分(体积含水量)自动监测装置, 探头安装深度分别为10 cm、20 cm、40 cm、60 cm和80 cm。4种土地利用类型的站点代码分别为T1、T3、T4和T7。其中, T1站所处的土地利用类型是杨梅林, T3站是农田, T4站是坡耕地, T7站是竹林, 具体位置详见图1。本文所使用的土壤水分数据主要来自于2015年12月1日至2018年8月31日, 时间尺度为5分钟(2017年5月10日至2017年8月31日数据

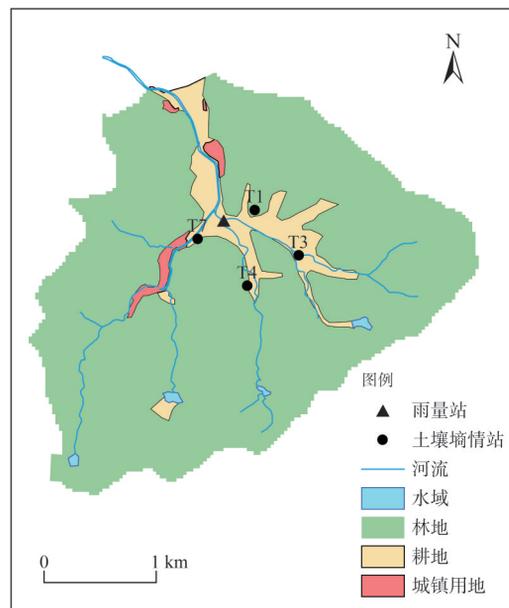


图1 研究区监测站点分布

Fig. 1 Location of monitoring sites in the study area

缺失),不同深度土壤机械组成利用马尔文激光粒度仪测定,结果如表1所示。在数据处理时,将实际监测的每5分钟的土壤数据整理为逐时数据。降雨数据来自于画龙溪流流域的国家站,时间尺度为1小时。

表1 研究区土壤基本特征

Table 1 Basic characteristics of soil in the study area

土地利用类型/cm	土壤粒径 $d/\%$				
	$d \leq 2 \mu\text{m}$	$2 \mu\text{m} < d \leq 20 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m} < d \leq 200 \mu\text{m}$	$d > 200 \mu\text{m}$	
杨梅林	剖面0~20	18.61	37.82	19.21	24.36
	剖面20~40	23.80	48.43	21.29	6.48
	剖面40以下	8.48	16.96	15.52	59.05
农田	剖面0~20	13.01	46.34	27.33	13.33
	剖面20~40	15.31	41.88	25.51	17.30
	剖面40以下	13.06	48.23	22.40	16.31
坡耕地	剖面0~20	12.74	44.03	28.81	14.42
	剖面20~40	12.03	47.64	31.16	9.17
	剖面40以下	11.94	35.07	25.97	27.02
竹林	剖面0~20	13.78	49.83	29.14	7.25
	剖面20~40	14.24	52.57	27.06	6.12
	剖面40以下	14.20	50.48	25.81	9.51

1.2.2 研究方法

土壤水的变化一般分为增长过程和消退过程两个阶段^[28]。增长过程主要受降雨、土壤性质的影响,消退过程主要受土壤蒸发、植物蒸腾等影响。为探究在一次独立降雨事件中土壤含水量的增长与消退情况,可将一次完整的降雨过程分为增墒和减墒阶段。将增墒阶段定义为从降雨开始至土壤含水量达到最大值的阶段,减墒阶段定义为土壤含水量最大值到下一次降雨开始的这一阶段。增墒系数 K_1 和减墒系数 K_2 分别通过式(1)和式(2)计算^[28]:

$$K_1 = \sqrt[m]{\theta_t / \theta_0} \quad (1)$$

$$K_2 = \sqrt[n]{\theta_e / \theta_t} \quad (2)$$

式中: m 表示从降雨开始至土壤含水量达到最大值所用的时间(h); n 表示土壤含水量最大值到下一次降雨开始所经历的时间(h); θ_0 为降雨开始时土壤含水量(%); θ_t 为土壤含水量最大值(%); θ_e 为下一次降雨开始前的土壤含水量(%)。 K_1 、 K_2 的值越接近于1,表示土壤的增(减)墒越慢。

2 结果分析

2.1 长时间序列土壤水分与降雨的关系

不同土地利用类型不同深度土壤含水量变化不同。图2、表2分别显示了研究区4种土地利用类型在研究时段内垂直剖面土壤含水量的分布特征和离差系数(Cv)。总体来看,不同土地利用类型的土壤含水量基本保持稳定,但个别月份存在差别。垂直剖面上随深度增加,土壤含水量变化越小,主要表现在土层深度增加,土壤含水量的离差系数减小。杨梅林土壤含水量在32%~37%之间波动,离差系数值分布在0.049~0.088之间,

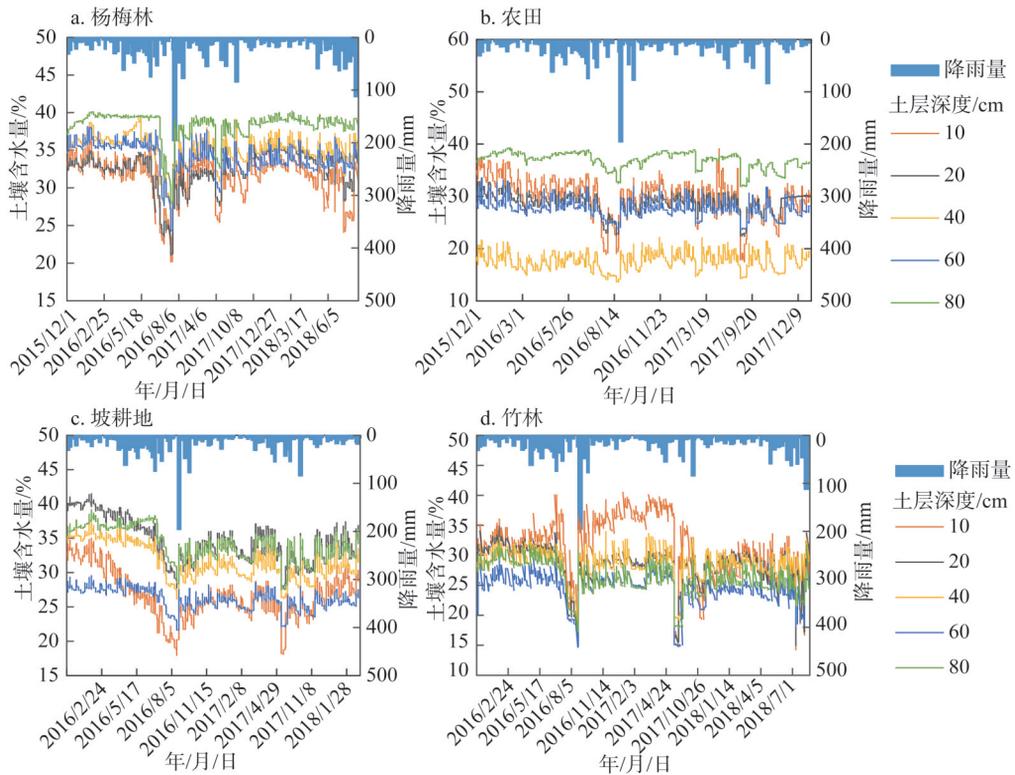


图2 杨梅林、农田、坡耕地和竹林土壤水分与降雨关系

Fig. 2 The relationship between soil moisture and rainfall in waxberry forests, bamboo forests, farmland and slope cropland

表2 不同土地利用类型土壤含水量变化的剖面分布

Table 2 Profile distribution of soil moisture content under different land use types

土层深度/cm	平均含水量/%					离差系数 C_v				
	10	20	40	60	80	10	20	40	60	80
杨梅林	31.5	32.5	35.2	34.0	38.3	0.088	0.082	0.058	0.059	0.049
农田	30.0	28.9	17.7	27.6	36.9	0.121	0.068	0.095	0.060	0.041
坡耕地	26.7	34.6	31.7	26.1	34.1	0.130	0.090	0.081	0.057	0.071
竹林	31.4	28.5	28.5	24.6	26.1	0.157	0.114	0.083	0.105	0.104

其垂直剖面土壤含水量变化较为稳定。农田 40 cm 深度的土壤含水量稳定在 20% 左右, 其余土层含水量稳定在 30% 左右, 离差系数在 10 cm 变化最大, 80 cm 变化最小。坡耕地土壤含水量稳定在 27%~35% 之间; 竹林除 10 cm 土壤含水量随降雨波动较大外, 其余土层土壤含水量稳定在 28%~32% 之间。杨梅林的稳定土壤含水量高于其他土地利用类型, 这是因为杨梅林属于小乔木或灌木植物, 根系发达, 具有良好的蓄水保墒作用。总体上, 不同土地利用类型下土壤深度为 10 cm 和 20 cm 的 C_v 值偏大, 60 cm、80 cm 土壤深度 C_v 值偏小, 说明表层土壤水分时间变化特征的波动幅度较深层土壤大。

夏秋季节 (6-9 月) 不同土地利用类型不同深度土壤含水量均存在一个明显的下降过程 (图 2), 这与植物的生长过程和温度变化有关。在不考虑地下水补给的情况下, 土壤

水分变化主要是向下渗透和向上蒸散^[29],即土壤水分变化是两个相反过程共同制约的结果。研究区6-9月气温达到全年高值,蒸散发速率加快。同时,植物处于生长旺盛时期,根系活动加强,受植物的蒸散发作用影响,土壤水分被大量消耗。因此,尽管降雨较为集中,在一定程度上能对土壤水分进行补充,但土壤有效含水量仍处于一个较低的水平。

2.2 不同降雨强度下土壤含水量垂直变化特征

降雨是土壤水分的直接补给源,不同降雨强度对土壤含水量的影响不同。为探究不同降雨强度对土壤含水量的影响,在选取降雨场次时,要求满足三个条件:(1)降雨事件前后无明显降雨;(2)土壤水分变化明显;(3)在一次降雨中降雨分布较为均匀。本文所使用的三场不同强度的降雨均符合上述三种条件。

选取的大暴雨事件发生在2016.9.13至2016.9.25期间,总降雨量达248.5 mm;暴雨事件发生在2016年10月6日至2016年10月14日期间,降雨量为92.5 mm;大雨事件发生在2017年9月14日至2017年9月19日期间,降雨量为46 mm。分析不同降雨强度下不同土地利用类型土壤含水量对降雨的响应情况(图3)可知:在不同降雨强度下,杨梅林80 cm土壤水分始终维持一个较高水平;农田80 cm土壤水分最高,40 cm最低;坡耕地80 cm和20 cm土壤水分较高,10 cm和60 cm较低;竹林10 cm土壤水分高,60 cm、80 cm土壤水分最低。

发生大暴雨时,农田、坡耕地和竹林80 cm处稳定的土壤含水量约为35%;杨梅林的稳定土壤含水量可达40%。杨梅林、坡耕地和竹林土壤水分存在陡涨现象,杨梅林和坡耕地土壤水分在降雨减小后先出现一个平台期再逐渐减少(图3a1、图3c1);竹林80 cm土壤水分在经历高强度降雨时会出现猛涨,在降雨减少后会迅速回落,土壤含水量最大值可达40%(图3d1)。在暴雨强度下,各土地利用类型不同深度土壤水分的Cv值均小于大暴雨强度下土壤水分的Cv值(表3),表明降雨强度是影响土壤水分变化的一个主要因素。此时,杨梅林、农田和坡耕地均是80 cm土壤水分最高,竹林则为10 cm土壤水分最高(图3a2、图3b2、图3c2、图3d2)。竹林80 cm存在明显的陡涨陡落现象(图3d2);坡耕地40 cm、60 cm和80 cm以及农田40 cm和60 cm存在陡涨现象,且下降时存在一个平台期。在大雨强度下,不同土地利用类型土壤水分的响应幅度是竹林>杨梅林>耕地(农田、坡耕地)(表3),响应时间总体表现为从表层到深层逐渐增加(图3a3、图3b3、图3c3、图3d3);坡耕地60 cm和80 cm出现陡涨现象,变化幅度甚至高于表层的10 cm和20 cm,这是因为在高强度短历时降雨中,坡地易产生超渗产流,使得10 cm和20 cm土壤水分变化不大,而深层土壤水分快速响应可能是优势流导致的结果。

土壤水分的变化特征受土壤类型、降水、气温、前期含水量等多种因素共同影响。通常,土壤孔隙度越高,降雨强度越大,气温越高,前期含水量越低,土壤水分变化越强烈。从上述分析可知:降雨强度越大,土壤水分的响应幅度越大。在不同降雨强度下,竹林对降雨的响应幅度大于杨梅林、农田和坡耕地,这主要是竹林表层根系发达,根量较多,孔隙度高,结构性强,质地疏松,利于雨水迅速下渗^[30],因此当外界有降雨或降雨停止时,竹林土壤水分会迅速上升或回落。同时,杨梅林存在20 cm处土壤水分响应幅度大于10 cm处的现象,这是由于秋季杨梅林表层聚集的枯枝落叶层腐烂分解导致。此外,本文发现,在短时间尺度监测下,当降雨停止后,无外界补给时,土壤含水量会随时间起伏下降。

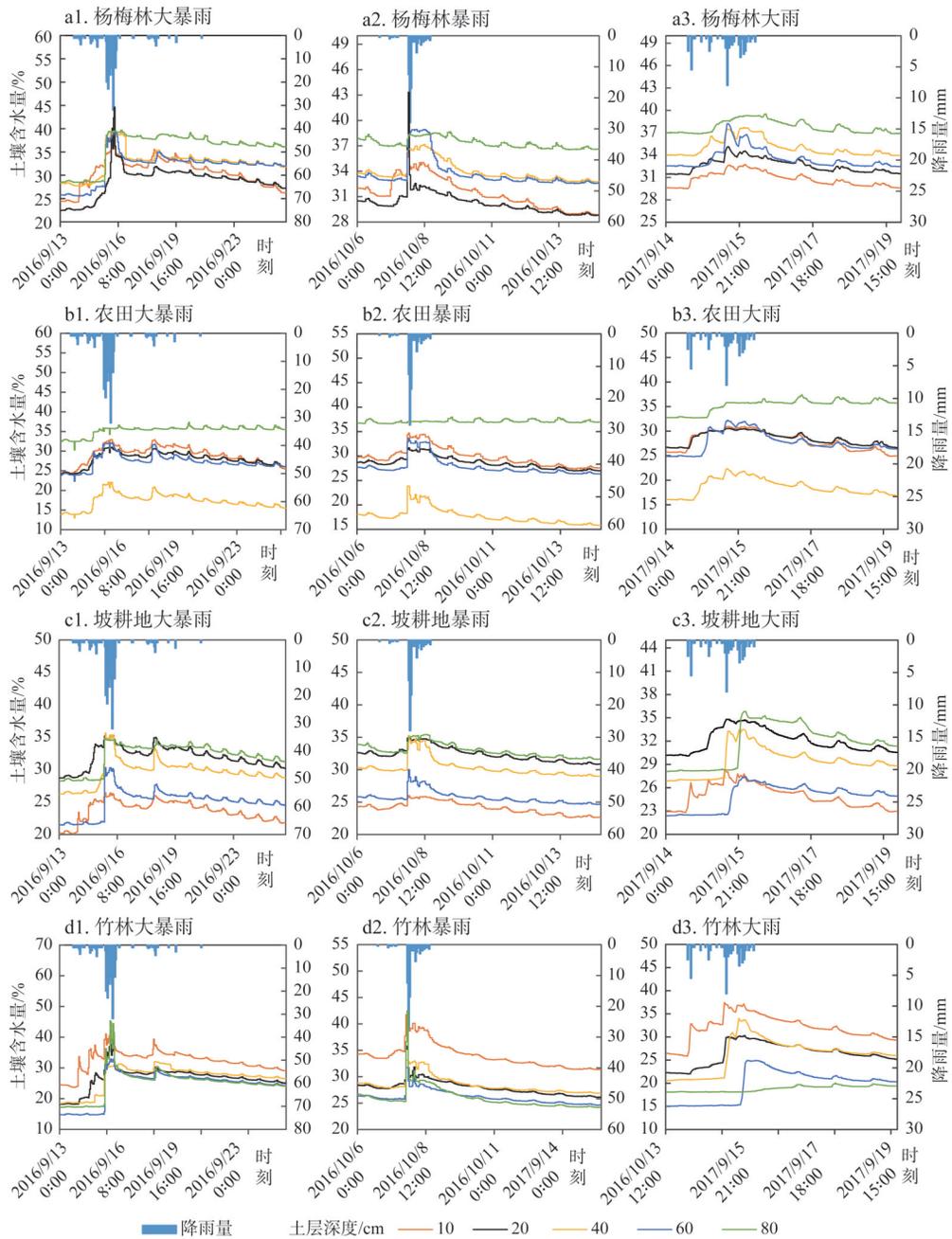


图3 不同土地利用类型对不同强度降雨的响应变化
 Fig. 3 Response of different land use types to rainfall intensity

2.3 土壤增墒和减墒系数变化

地表植物会影响径流的形成和下渗，不同地表植被覆盖类型下土壤含水量对同一强度降雨响应不同。在无水分补给情况下，土壤中的水分会不断降低至凋萎含水量。研究区属于季风控制的区域，判断不同强度降雨下土壤水分的响应与消退规律对区域产流模式及干旱研究具有重要意义。

表3 不同土地利用类型土壤水分在不同降雨强度下的 C_v 变化值Table 3 The C_v values of soil moisture in different land use types under different rainfall intensity

土地利用类型	降雨强度	土层深度/cm				
		10	20	40	60	80
杨梅林	大暴雨	0.0974	0.1145	0.0840	0.0983	0.1037
	暴雨	0.0575	0.0465	0.0356	0.0516	0.0161
	大雨	0.0301	0.0289	0.0328	0.0397	0.0221
农田	大暴雨	0.0789	0.0641	0.1099	0.0717	0.0342
	暴雨	0.0630	0.0420	0.0896	0.0631	0.0077
	大雨	0.0681	0.0459	0.0925	0.0759	0.0367
坡耕地	大暴雨	0.0649	0.0513	0.0656	0.0794	0.0629
	暴雨	0.0392	0.0337	0.0448	0.0370	0.0312
	大雨	0.0583	0.0457	0.0623	0.0639	0.0828
竹林	大暴雨	0.1076	0.1385	0.1515	0.2061	0.1886
	暴雨	0.0657	0.0429	0.0552	0.0454	0.0789
	大雨	0.0874	0.0909	0.1388	0.1712	0.0327

利用 K_1 和 K_2 量化土壤水分增加与消退情况, 结果如表4所示。研究表明: 发生大暴雨时, 杨梅林、农田、坡耕地和竹林分别是20 cm、40 cm、60 cm和80 cm土壤水分增加(消退)量最大, 历时最短, 表明不同土地利用类型对土壤结构的改变不同。发生暴雨时, 杨梅林与竹林土壤水分增幅相当, 农田和坡耕地的土壤水分增幅至少比竹林低8%; 减墒系数竹林、农田、杨梅林变化幅度相当, 坡耕地变幅比竹林低12.8%。大雨过程中, 竹林10 cm土壤水分变化程度最大, 其增墒系数比杨梅林高52.8%, 比农田高41.5%, 比坡耕地高13.2%; 减墒系数比杨梅林高90.1%, 比农田高50.8%, 比坡耕地高40.1%。由上述分析可知, 降雨强度越大, 土壤水分响应越明显; 不同土地利用类型下, 竹林的响应与消退最明显, 其余三种土地利用类型变化幅度相当。竹林质地疏松, 孔隙

表4 不同降雨强度下土壤水分的响应与消退变化情况

Table 4 The responses and regressions of soil moisture under different rainfall intensities

土地利用类型	降雨强度	K_1 变化最小值	K_1 变化最大值	K_2 变化最小值	K_2 变化最大值
杨梅林	大暴雨	1.113 (80)	1.246 (20)	0.990 (80)	0.951 (20)
	暴雨	1.006 (80)	1.206 (20)	0.990 (80)	0.944 (20)
	大雨	1.027 (80)	1.109 (60)	0.980 (80)	0.964 (60)
农田	大暴雨	1.019 (80)	1.172 (40)	0.990 (80)	0.965 (40)
	暴雨	1.009 (80)	1.159 (40)	0.995 (80)	0.944 (40)
	大雨	1.039 (80)	1.231 (40)	0.981 (80)	0.937 (40)
坡耕地	大暴雨	1.080 (80)	1.135 (60)	0.990 (80)	0.979 (60)
	暴雨	1.019 (80)	1.083 (40)	0.983 (80)	0.972 (60)
	大雨	1.097 (20)	1.151 (10)	0.975 (60)	0.954 (10)
竹林	大暴雨	1.197 (10)	1.387 (80)	0.980 (40)	0.939 (80)
	暴雨	1.072 (40)	1.265 (80)	0.971 (40)	0.924 (80)
	大雨	1.024 (80)	1.308 (40)	0.979 (80)	0.936 (40)

注 括号内数字表示土壤深度(cm)。

度高,其蓄水保墒能力弱。相比杨梅林、农田和竹林的变化,坡耕地土壤含水量变化更为复杂。降雨停止后,上部土壤水分开始消退,下部土壤水分在消退的同时受到上部土壤水分下渗的补给,因此坡耕地深层退水减慢^[31]。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以我国东部湿润区典型小流域为例,开展了不同土地利用类型(杨梅林、农田、坡耕地和竹林)下土壤墒情野外综合试验对比观测,揭示了不同土地利用类型和降雨强度下土壤含水量响应规律。研究结果表明:

(1) 不同土地利用类型土壤水分变化情况不同。杨梅林的土壤含水量略高于农田、坡耕地和竹林。在6-9月,土壤水分蒸发量大于降雨补给量,导致土壤水分在此阶段呈下降趋势。在垂直方向上,通常表层土壤水分(10 cm、20 cm)变化大,而60 cm和80 cm变化较小。表层土壤水分时间变化特征的波动幅度较深层土壤大。

(2) 不同降雨强度下,竹林土壤水分对降雨的响应略大于杨梅林、农田和坡耕地。通常降雨强度越大,土壤水分响应程度越大;降雨停止后,土壤水分消退并非呈连续的直线下降,而是呈波浪式起伏下降。

(3) 增墒系数和减墒系数变化结果表示,竹林根系对土壤结构的影响大于其他三种土地利用类型对土壤结构的影响;坡耕地在消退过程中深层土壤水分会受到表层土壤水下渗的影响,但其变化复杂,有待于进一步研究。

3.2 讨论

通过对湿润地区不同土地利用类型下降雨—土壤含水量关系研究可知:当降雨发生时,不同土地利用类型土壤含水量对降雨的响应幅度存在明显的不同,随着深度的增加,土壤含水量离差系数变小,这表现出土壤水分入渗过程中水分的消耗情况。在6-9月,雨热同期的季风气候使研究区降雨多,温度高,蒸发作用增强,导致该时段内不同土地利用类型土壤含水量总体上呈下降的趋势。发生高强度短历时降雨时,农田、杨梅林和竹林三种土地利用类型土壤含水量会呈显著增加趋势。但在坡耕地上,降雨很快形成径流,截流作用减弱,导致坡耕地土壤水分入渗深度浅^[32],表现在深层土壤含水量变化幅度小。

在一次完整的降雨过程中,土壤水分对降雨的响应与消退情况不完全一致。杨梅林、坡耕地在大暴雨强度下土壤含水量存在陡涨过程,消退过程中却下降缓慢;竹林土壤含水量在大暴雨强度下会出现猛涨和迅速回落现象。坡耕地在土壤水分增长过程中,降雨强度较大时,在坡面形成无效径流,导致土壤水分下渗深度浅;在消退过程中,下层土壤水分在消退的同时受到上层土壤水分的入渗补给,消退情况复杂。农田受人类活动的影响,如除草、施肥、灌溉、收割等行为都将影响植被的根系生长和植被盖度,导致农田土壤水分的增长和消退无明显变化规律。

同时,植被对浅层土壤水分的影响较深层更为强烈,0~20 cm土壤水分更易受到降雨的影响,这主要是10 cm、20 cm土壤含水量变化与植被根系、植被盖度和腐殖层等关系密切,60 cm、80 cm土壤含水量受毛管水上升作用的影响明显^[33]。此外,有时会出现20 cm土壤水分处先于10 cm处响应的情况,这是由于植被根系对不同深度处的土壤水分影响不同,这也与部分学者的研究结果基本一致^[34,35]。与刘宏伟等^[27]在湿润地区的研究结果相比,杨梅林、农田和坡耕地的土壤水分消退情况与其研究规律基本一致,竹林的消

退过程略有差异,这主要是不同土地利用改变了土壤结构和性质^[36],使得在降雨条件基本相同的情况下,土壤水分变化规律差异较大。这些现象表明,土壤含水量对降雨的响应不仅与土地利用类型、降雨强度、降雨历时等有关,还受土壤结构的一致性、地形、温度以及人为干扰等多种因素影响。

本文在我国东部地区开展长时间序列高精度土壤水分动态观测,探讨不同土地利用类型不同降雨强度下的土壤水响应规律,而土壤水分的变化特征受土壤类型、降水、气温等多种因素共同影响,后续将进一步丰富数据并开展土壤水分对土地利用和植被生长影响阈值等相关研究,以期为我国东部季风区产汇流机理及防洪减灾提供一定参考。

参考文献(References):

- [1] VENKATESH B, LAKSHMAN N, PURANDARA B K, et al. Analysis of observed soil moisture patterns under different land covers in Western Ghats, India. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(3-4): 281-294.
- [2] ZUCCO G, BROCCA L, MORAMARCO T, et al. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring. *Journal of Hydrology*, 2014, 516(6): 193-199.
- [3] 尹秋龙, 焦菊英, 寇萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征. *自然资源学报*, 2015, 30(3): 459-469. [YIN Q L, JIAO J Y, KOU M. The soil moisture characteristics under different vegetation types after extremely heavy rainfall on the hilly-gullied Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(3): 459-469.]
- [4] 王强, 许有鹏, 高斌, 等. 西苕溪流域径流对土地利用变化的空间响应分析. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 632-641. [WANG Q, XU Y P, GAO B, et al. Runoff spatial responses to land use change in Xitiaoxi River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 632-641.]
- [5] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 203-207. [CHENG L P, LIU W Z. Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on Loess Tableland. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 203-207.]
- [6] HUANG Y L, CHEN L D, FU B J, et al. Effect of land use and topography on spatial variability of soil moisture in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Ecohydrology*, 2012, 5(6): 826-833.
- [7] LI X Z, SHAO M A, JIA X X, et al. Profile distribution of soil-water content and its temporal stability along a 1340-m long transect on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2016, 137: 77-86.
- [8] 索立柱, 黄明斌, 段良霞, 等. 黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素. *生态学报*, 2017, 37(6): 2045-2053. [SUO L Z, HUANG M B, DUAN L X, et al. Zonal pattern of soil moisture and its influencing factors under different land use types on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 2045-2053.]
- [9] ZHAO C L, JIA X X, ZHU Y J, et al. Long-term temporal variations of soil water content under different vegetation types in the Loess Plateau, China. *Catena*, 2017, 158: 55-62.
- [10] WANG S, FU B J, GAO G Y, 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. *Catena*, 2013, 101(3): 122-128.
- [11] 高鹏, 穆兴民. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分入渗的对比试验. *中国水土保持科学*, 2005, 3(4): 27-31. [GAO P, MU X M. Comparative experiment of soil infiltration of different land use patterns in loess hilly region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(4): 27-31.]
- [12] FENG H H, LIU Y B. Combined effects of precipitation and air temperature on soil moisture in different land covers in a humid basin. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 1129-1140.
- [13] 王学春, 李军, 王红妮, 等. 黄土高原冬小麦田土壤水分与小麦产量对降水和气温变化响应的模拟研究. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1398-1410. [WANG X C, LI J, WANG H N, et al. Simulation of the response of soil water in winter wheat field and winter wheat yield to rainfall and temperature change on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1398-1410.]
- [14] 苏莹, 陈林, 李月飞, 等. 荒漠草原不同类型土壤水分时空变化特征. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1308-1316. [SU Y, CHEN L, LI Y F, et al. Spatiotemporal variation of moisture content of different soil types in desert steppe. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6): 1308-1316.]
- [15] CHEN Y P, XIA J B, ZHAO X M, et al. Soil moisture ecological characteristics of typical shrub and grass vegetation on

- Shell Island in the Yellow River Delta, China. *Geoderma*, 2019, 348: 45-53.
- [16] 唐敏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 765-774. [TANG M, ZHAO X N, GAO X D, et al. Characteristics of soil moisture variation in different land use types in the hilly region of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 765-774.]
- [17] LI Z, LIU W Z, ZHANG X C, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1): 35-42.
- [18] 刘冰, 赵文智, 常学向, 等. 黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 716-722. [LIU B, ZHAO W Z, CHANG X X, et al. Response of soil moisture to rainfall pulse in desert region of the Heihe River Basin. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(3): 716-722.]
- [19] 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. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 6-11. [LI Q, ZHENG J S, ZHU Q, et al. Response of soil moisture to rainfall in typical land use types in Taihu Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 6-11.]
- [20] KORRES W, REICHENAU T G, FIENER P, et al. Spatio-temporal soil moisture patterns: A meta-analysis using plot to catchment scale data. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 326-341.
- [21] VARIKODEN H, REVADEKAR J V. Relation between the rainfall and soil moisture during different phases of Indian Monsoon. *Pure & Applied Geophysics*, 2018, 175(2): 1-10.
- [22] BORMANN H. Assessing the soil texture-specific sensitivity of simulated soil moisture to projected climate change by SVAT modelling. *Geoderma*, 2012, 185: 73-83.
- [23] LIN T S, CHENG F Y. Impact of soil moisture initialization and soil texture on simulated land-atmosphere interaction in Taiwan. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(5): 1337-1355.
- [24] 徐飞, 赖晓明, 朱青, 等. 太湖流域丘陵区两种土地利用类型土壤水分分布控制因素. *生态学报*, 2016, 36(3): 592-599. [XU F, LAI X M, ZHU Q, et al. The controlling factors of soil moisture distribution under two typical land-use hillslopes in a hilly region of Taihu Lake Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 592-599.]
- [25] 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. *水利学报*, 2011, 42(8): 899-907. [FU Z Y, LI Z X, CAI C F, et al. Impact of boundary conditions on soil water and subsurface flow in shallow purple soil slope. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(8): 899-907.]
- [26] 刘战东, 高阳, 刘祖贵, 等. 降雨特性和覆盖方式对麦田土壤水分的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 113-120. [LIU Z D, GAO Y, LIU Z G, et al. Effects of rainfall characteristics and covering methods on soil moisture of winter wheat. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(13): 113-120.]
- [27] 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. *水利学报*, 2009, 40(7): 822-829. [LIU H W, YU Z B, CUI G B. Pattern of soil moisture responding to precipitation in humid area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(7): 822-829.]
- [28] 顾李华. 退墒曲线在墒情数据过滤及预报方面的应用. *水文*, 2016, 36(1): 80-83. [GU L H. Application of soil moisture recession curve in automatic monitored data filtering and soil moisture forecasting. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(1): 80-83.]
- [29] 季志恒, 樊福来. 土壤水消退的时空变化规律分析. *水文*, 2003, 23(1): 23-27. [JI Z H, FAN F L. Analysis on the law of temporal and spatial variation for soil moisture subsiding. *Journal of China Hydrology*, 2003, 23(1): 23-27.]
- [30] 廖凯华, 吕立刚. 东南湿润区坡面土壤水文过程研究进展与展望. *地理科学进展*, 2018, 37(4): 476-484. [LIAO K H, LYU L G. Advances in research of hillslope soil hydrological processes in the humid region of Southeast China. *Progress in Geography*, 2018, 37(4): 476-484.]
- [31] 刘相超, 宋献方, 夏军, 等. 华北山区坡地土壤水分动态实验研究. *水文地质工程地质*, 2006, 33(4): 76-80, 89. [LIU X C, SONG X F, XIA J, et al. An experimental study of the dynamic regime of soil water in mountainous slopes in northern China. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(4): 76-80, 89.]
- [32] 马婧怡, 贾宁凤, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征. *生态学报*, 2018, 38(10): 3471-3481. [MA J Y, JIA N F, CHENG M. Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3471-3481.]
- [33] 罗俐雅, 冯德程, 许明家. 近三年徐州市土壤墒情时空变化分析. *水文*, 2012, 32(2): 84-87. [LUO L Y, FENG D C, XU M J. Temporal and spatial variation of soil moisture in Xuzhou city in last three years. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(2): 84-87.]

- [34] 王军德, 王根绪, 陈玲. 高寒草甸土壤水分的影响因子及其空间变异研究. 冰川冻土, 2006, 28(3): 428-433. [WANG J D, WANG G X, CHEN L. Impact factors to soil moisture of alpine meadow and their spatial heterogeneity. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 428-433.]
- [35] YANG L, WEI W, CHEN L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2012, 475(6): 111-122.
- [36] 赵锦梅, 张德罡, 刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响. 自然资源学报, 2012, 27(3): 422-429. [ZHAO J M, ZHANG D G, LIU C Z. The effect of land use patterns on soil moisture retention capacity and soil infiltration property in Eastern Qilian Mountains. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3): 422-429.]

Effect of land use types on soil moisture in typical small watershed of humid region of Eastern China

ZHOU Cai-yu, XU You-peng, LIU Peng-fei, WANG Qiang, WANG Jie
(School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The urbanization process in Eastern China has been accelerating in recent years, leading to underlying surface changes affecting soil moisture in the region. Knowledge of soil moisture is critical to understanding many of the hydrological processes that are of interest in soil hydrology, meteorology, and ecology research. Long-term time series of in situ soil moisture measurements themselves can reveal trends in the water cycle related to climate or land cover change. In this study, we used rainfall and soil moisture data collected at waxberry forests, bamboo forests, farmland, and slope cropland sites in the Hualong River region of Eastern China in 2015 to 2018 to analyse the response of soil moisture to rainfall event size at different soil depths. The results showed the following: (1) In general, the soil moisture content of waxberry forests was slightly higher than that of farmland, slope cropland, and bamboo forests. In the vertical section, the soil moisture in the surface layer (10-20 cm) changed greatly while the soil moisture in the deep layer (60-80 cm) changed little. Meanwhile, the temporal variation of surface soil moisture was larger than that of deep soil moisture. (2) Under different rainfall intensities, the soil moisture of bamboo forests responded more substantially to rainfall than did waxberry forests, farmland, and slope cropland. The greater the rainfall intensity, the greater the response degree of soil moisture. The soil moisture was in a fluctuant downward trend after the rainfall stopped. (3) Quantification of soil moisture by increasing coefficient and reducing coefficient demonstrated that the bamboo forest had the most obvious regression. The other three types of land use varied equally. The soil moisture of waxberry forests, farmland, and bamboo forests changed more dramatically at the surface layer than at the deeper depths. In addition, the soil moisture in the deep layer of slope cropland was affected by the infiltration of surface soil water in the process of regression; this change was complicated, which needs further studies. These research results provide a theoretical basis for the quantitative description of the soil hydrological conversion process, the mechanism of runoff and stream flow, agricultural production, and water resources allocation in the monsoonal Eastern China.

Keywords: soil moisture; rainfall; land use types; humid watershed