DOI: 10.5846/stxb202201240232
周怡雯,戴翠婷,杜映妮,李朝霞,王天巍,袁睿晗.三峡库区典型茶园土壤水分对不同降雨模式的响应.生态学报,2023,43(3):1267-1275.
Zhou Y W, Dai C T, Du Y N, Li Z X, Wang T W, Yuan R H.Response of soil moisture in typical tea gardens to different rainfall regimes in the Three Gorges Reservoir Area.Acta Ecologica Sinica,2023,43(3):1267-1275.

三峡库区典型茶园土壤水分对不同降雨模式的响应

周怡雯,戴翠婷,杜映妮,李朝霞*,王天巍,袁睿晗
华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要:土壤水分是坡面产流和生物地球化学过程的关键控制因素。降水事件可以通过引起土壤剖面不同深度的土壤水分响应,从而影响流域中的径流路径、产流机制和土壤侵蚀过程等。基于三峡库区典型分布的茶园为对象,通过长期定点、高频的气象和水分数据观测,研究不同降雨模式下茶园不同土层深度(0—10、10—20、20—30、30—40cm)土壤水分的时空变化特征,分析茶园不同深度土壤在雨季的水分动态变化规律和对不同降雨模式的响应特征。结果表明:(1)研究区内的降雨和土壤水分含量均表现出明显的季节性特征。降雨在 7 月达到最大值,土壤水分含量则在 8 月达到峰值。表明降雨是影响土壤水分含量变化的重要因子,土壤水分对降雨有着明显的响应过程。(2)在相同降雨条件下,土壤含水量具有明显的垂直梯度变化。随着土层深度的增加,土壤水分对降雨的响应逐渐呈现出滞后现象。表层土壤(0—20cm)对降雨的响应较为迅速且幅度更加明显,深层土壤(30—40cm)水分含量变化相对稳定,并且对降雨的响应时间更加滞缓。随着土层深度的增加,土壤水分含量的变化幅度逐渐趋于平稳。(3)土壤水分含量对不同的降雨模式表现出显著差异。在较大雨强条件下,土壤水分变化出现了上升期、平台期及退水期。在小雨强短历时的降雨中,降雨对土壤水分的影响主要表现在土壤表层(0—10cm)。在降雨初期,降雨强度越大,土壤水分入渗越快,土壤的响应深度越深。研究三峡库区典型分布的茶园在不同降雨模式下的土壤水分变化特征,为三峡库区坡地的降水资源优化配置和园地面源污染防控提供理论依据,对区域水土流失治理以及面源污染物防控具有重要意义。
关键词:土壤水分;茶园;降雨模式;三峡库区

Response of soil moisture in typical tea gardens to different rainfall regimes in the Three Gorges Reservoir Area

ZHOU Yiwen, DAI Cuiting, DU Yingni, LI Zhaoxia*, WANG Tianwei, YUAN Ruihan
College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, *China*

Abstract: Soil moisture is a key control factor for slope runoff generation and biogeochemical processes. Rainfall events can affect runoff paths, runoff mechanisms, and soil erosion processes in watersheds by causing soil moisture responses at different depths in the soil profile. Based on the typical tea gardens in the Three Gorges Reservoir Area, through long-term, fixed-point and high-frequency meteorological and moisture data observations, the temporal and spatial variation characteristics of soil moisture in different soil depths (0—10, 10—20, 20—30 and 30—40cm) of tea gardens under different rainfall regimes was studied, and the dynamic variation of soil moisture in the rainy season at different depths of tea gardens and the response characteristics to different rainfall regimes were analyzed. The results showed that: (1) The rainfall and soil moisture content in the study area showed obvious seasonal characteristics. Rainfall peaked in July and soil moisture levels peaked in August. It showed that rainfall was an important factor affecting the change of soil moisture content, and soil moisture had an obvious response process to rainfall. (2) Under the same rainfall conditions, soil water content had obvious vertical gradient changes. With the increase of soil depth, the response of soil moisture to rainfall gradually showed a hysteresis phenomenon. The topsoil (0—20cm) responds to rainfall more rapidly and the amplitude was

基金项目:国家自然科学基金项目(42077065);国家自然科学基金项目(U224022)
收稿日期:2022-01-24; **网络出版日期**:2022-10-10
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zxli@ mail.hzau.edu.cn

more obvious, the change of water content in the deep soil (30—40cm) was relatively stable, and the response time to rainfall was more sluggish. With the increase of soil depth, the variation range of soil moisture content gradually became stable. (3) The soil moisture content showed significant differences with different rainfall regimes. Under the condition of high rainfall intensity, soil moisture changes appeared in the rising period, the plateau period and the retreating period. In the rainfall with small rainfall intensity and short duration, the effect of rainfall on soil moisture was mainly manifested in the soil surface layer (0—10cm). The greater the rainfall intensity, the faster the soil moisture infiltration, and the deeper the soil response depth were exhibited in the early stage of rainfall. Studying the characteristics of soil moisture variation characteristics in typical tea gardens in the Three Gorges Reservoir area under different rainfall patterns will provide a theoretical basis for the optimal allocation of precipitation resources and the prevention and controlling of ground source pollution in the gardens, which is of great significance to regional soil erosion control and the prevention and control of non-point source pollution.

Key Words: soil moisture; tea garden; rainfall regime; the Three Gorges Reservoir Area

土壤水分参与地表径流、入渗、地下水补给、溶质运移等过程[1—2],是控制一系列水文和生态过程的关键因子[3]。同时,土壤水分也是限制植被生长的关键因素,在很大程度上决定了生态系统的组织和功能[1—4]。土壤层是分配降雨水分的关键因子[5],降雨作为土壤水分补给的重要来源,降雨入渗决定着土壤水分的分布特征[6]。而土壤水分又是降雨-径流响应的主要控制因素,因此研究土壤水分对降雨的响应关系有重要的意义[4—7]。

近年来,许多学者注意到降雨变化对土壤水分的影响。已有研究表明,降雨是土壤水分的重要补给源,在很大程度上控制着土壤水分的空间分布格局[8—9]。在陕北六道沟小流域不同植被下土壤水分对降雨的响应研究中发现,不同植被土壤含水量对降雨的响应深度有差异,且降雨量的多少对土壤补给深度明显不同[10];在祁连山脉亚高山带草地和草甸的研究,定量分析了不同深度土壤水分对不同强度降雨事件的响应方式[11],结果表明大降雨事件(>20mm)对土壤蓄水起着关键作用。张继光等用地统计学方法在桂西北典型喀斯特洼地研究了表层土壤水分的时空变异特征及其分布格局[12]。李谦等基于太湖流域平原地区典型的林地和菜地,进行了不同深度的土壤水分和降雨监测,发现中小降雨事件难以引起林地土壤水分的显著变化[13]。综上,不同土地利用和植被条件下,土壤水分随着降雨格局的变化情况存在一定差异。

茶树作为三峡库区退耕还林重要的经济作物之一[14],也是水土流失和农业面源污染问题所关注的重要研究对象。自 2000 年三峡库区退耕还林工程启动以来,茶树作为一种重要的经济作物,在几十年间不断的扩大规模,已经成为三峡库区内夷陵区、秭归县等区县重要的经济支柱产业之一,也是长江中上游地区经济发展的主要产业之一[15]。根据中国环境保护部发布的《长江三峡工程生态与环境监测公报》,截止到 2017 年,三峡库区茶园面积达到了 14334 公顷[14—15]。本研究区小流域相当于三峡库区退耕还林工程后库区生态产业发展的一个缩影,茶叶大面积的种植为居民带来了可观的经济收益。因此,本文通过高数据采集频率的土壤水分长期定位监测,分析了不同降雨类型茶园土壤水分的变化和对降雨的响应特征,为揭示三峡库区植被恢复后的土壤水文过程提供科学支撑,为三峡库区坡地的降水资源优化配置和园地面源污染防控提供理论依据。

1 研究区域和方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省宜昌市秭归县张家冲小流域内(110°57′20″,30°46′51″),距离三峡大坝 5km,属于三峡库区的库首地区。张家冲小流域的地貌属于三峡库区典型的山地丘陵,整体呈东西坡向。区域内中上部坡度较陡,下部较为平缓,海拔在 148—530m 之间。流域面积为 1.62km^2。流域内的岩石以花岗岩为主,由花岗岩母质风化而成的黄棕壤是该流域内的地带性土壤。区域内气候属亚热带大陆性季风气候, 温暖潮湿,雨量充沛,多年平均降水量 1200mm 左右,降雨连续且集中,主要集中在 6—9 月份,且多以大雨、暴雨的形式出现。

林地、园地和耕地为该研究区内主要的土地利用类型。流域内农业结构以经济类作物为主,主要的经济作物为茶叶、油菜和花生。其中,茶叶的种植面积占比最大,茶园的面积占整个流域面积的 29.26%。

1.2　研究方法

在流域内选取了典型的茶园坡面,在茶园样地中心挖掘土壤剖面(长约 1m,宽约 1m,深约 0.6m),描述并记录土壤剖面发生发育特征(表 1),并按照土壤深度(0—10、10—20、20—30、30—40cm)采集环刀和散土样品用于测定土壤基本性质。基于土壤厚度及其关键界面,分别在 0—10、10—20、20—30、30—40cm 四个深度,安装土壤水分传感器(EC-5,Decagon Devices,Pullman,WA,USA),实时和高频次地观测土壤体积含水量(Soil volumetric water content,SVWC,m^3/m^3)。每个土壤水分传感器使用美国 Hobo 公司生产的数据采集器(HOBO-21,Onset,Cape Cod,MA,USA)进行每隔 30s 测定,每 10min 间隔记录数据。在流域开阔处布设美国“Spectrum”公司生产的 2900ET 自动气象站对降雨量等气象因子进行观测。数据记录频率为 10min,与土壤水分观测的同时进行。

表 1　样点土壤的相关属性

Table1　Description of the selected sites

土层 Soil depth/cm	探头安装深度 Installation depth/cm	容重 Bulk density/(g/cm^3)	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/(mm/h)
0—10	5	1.36	32.51	16.17	48.68	17.24
10—20	15	1.36	32.6	16.08	48.68	12.71
20—30	25	1.44	28.62	17.04	45.66	9.36
30—40	35	1.54	28.82	13.07	41.89	8.64

结合研究区多年降雨监测数据,2019 年全年总降雨量、平均雨强等特征与该区域多年平均降雨量、平均雨强相符,可以认为 2019 年的降雨及水分观测具有代表性。选取研究区 2019 年度的茶园土壤水分观测数据和降雨数据为分析对象,利用聚类分析的方法,根据降雨量(P),降雨历时(D)和最大 30 分钟雨强(I_{30})三个指标将 95 场降雨分成不同的降雨类型。在对降雨数据进行聚类分析的基础上,选择了 3 场典型的降雨事件分析不同层次土壤水分含量的动态变化特征及其对不同降雨模式响应的差异。

1.3　降雨类型

研究统计 2019 年度研究区详细的降雨情况,最终得到 95 场有效降雨事件。利用聚类分析的方法,根据降雨量(P),降雨历时(D)和最大 30 分钟雨强(I_{30})这 3 个指标将 95 场降雨分成 3 个具有代表性的降雨类型。表 2 显示了 3 个降雨类型的主要统计特征。降雨类型 1 为长历时大雨强降雨类型,平均降雨量达到了 18.33mm,平均降雨历时达到了 19.31h。降雨类型 2 为短历时小雨强降雨类型,降雨历时和降雨量较小,但是该雨型的频数大,占整个研究区有效降雨的 56%。降雨类型 3 为中历时大雨强,平均历时为 9.04h,平均雨强和最大 30min 雨强均较大。从降雨类型特征来看,研究区流域的降雨类型主要为低强度降雨(见图 1)。

表 2　不同降雨类型特征

Table 2　Characteristics of different rainfall regimes

降雨类型 Rainfall regime	频数 Frequency	累计降雨量 Precipitation/mm	平均降雨量 Average precipitation/mm	累计降雨历时 Duration/h	平均降雨历时 Average duration/h	平均雨强 Average intensity/(mm/h)	最大 30 分钟雨强 30 min maximum intensity/(mm/h)
雨型 1 Rainfall regime 1	12	220.00	18.33	231.70	19.31	7.43	30.80
雨型 2 Rainfall regime 2	53	196.60	3.71	119.58	2.26	3.52	29.20
雨型 3 Rainfall regime 3	30	265.80	8.86	271.27	9.04	6.64	29.60

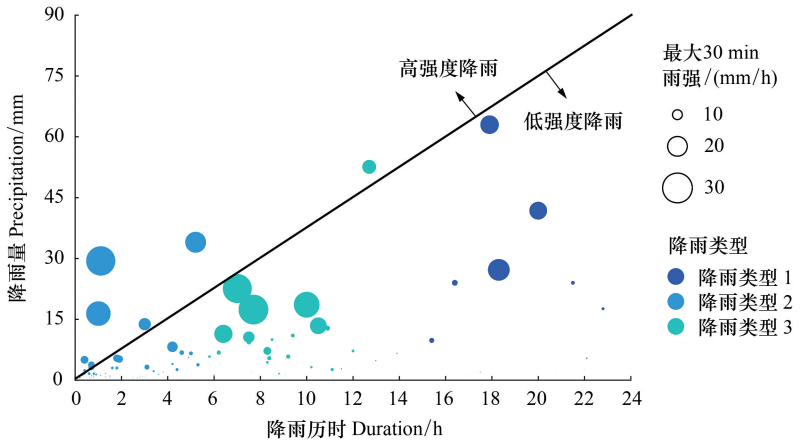

图 1 降雨类型分类

Fig.1 The classification of rainfall regimes.

1.4 数据处理

使用 SPSS 20.0 进行数据处理与统计分析,采用 Origin 2022 进行数据图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 降雨和土壤水分含量的季节动态变化特征

图 2 为研究期内茶园不同深度土壤水分随时间变化的规律和降雨的分布情况。研究区全年降水量丰富且具有明显的季节分配不均匀的特征,降雨较为集中,因此选择降雨量较多的 4—9 月作为研究期对该样点进行研究,进一步探讨不同土层深度土壤水分含量的动态变化特征及其对降雨响应过程的差异。

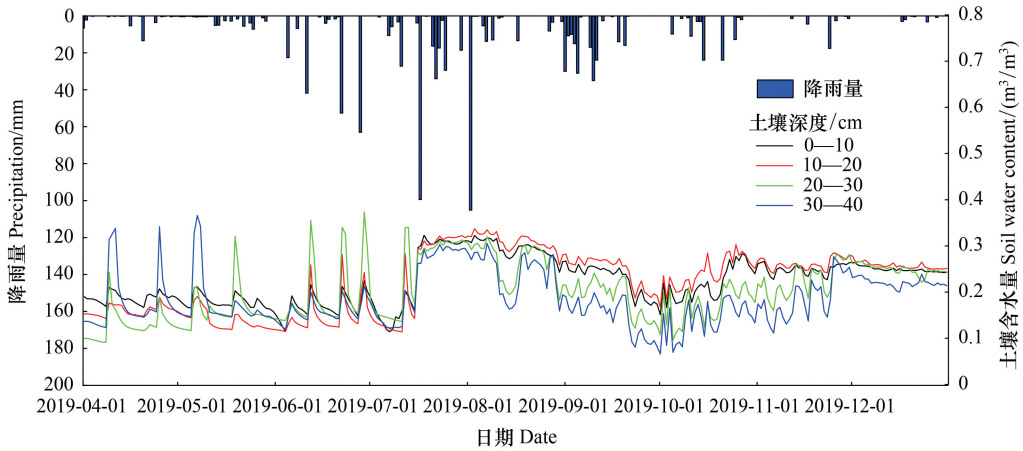

图 2 研究区雨季土壤含水量变化特征及其对降雨的响应

Fig.2 Variation characteristics of soil water content in rainy season and its response to rainfall in the study area

在生长季,茶园样地不同深度的土壤水分含量均对降雨有着较好的响应,但是在相同的降雨条件下,不同土层深度的土壤水分含量及其变化特征不同,对于降雨的响应模式也存在差异,响应幅度和响应速度也有所不同。在观测期间,受到不同类型降雨的影响,土壤水分在 0—40cm 土层的土壤中变化十分明显,随着降雨的发生和消退急速的增加或减少,波动频率和幅度较为强烈。从统计结果来看,0—40cm 土层深度的土壤水分对各场降雨几乎都有响应,每场降雨后土壤水分均有增加,随着降雨的停止和降雨产流的消退,土壤水分含量逐渐降低,直到下一场降雨发生时水分继续增加。4 月和 5 月两个月内降雨量较少,最大降雨量仅在 20mm

左右,其中 30—40cm 深度的土壤水分含量及其变化幅度较大,而表层土壤水分含量相对较低,研究区内 6—9 月降雨量较多,降雨类型多为中雨到暴雨,6 月初到 7 月中旬,20—30cm 深度土壤水分含量最高且变化幅度最大。7 月中旬以后不同深度土壤水分对降雨的响应出现一定的规律性,其中 0—20cm 深度的土壤水分含量对降雨的响应程度及幅度始终大于 20—40cm 深度的土壤。结合以上观测结果,为了进一步的探讨土壤水分对不同降雨类型的响应特征,对研究期的降雨类型进行分析。

2.2　典型降雨事件

为进一步了解和研究不同降雨强度下各层土壤水分含量的动态变化特征及其对降雨响应程度的差异,在对降雨数据进行聚类分析的基础上,在每个降雨类型中选择典型的降雨事件分析不同层次土壤水分含量的动态变化特征及其对不同降雨模式响应的差异。以发生在 2019 年 6 月 5 日的中雨(P=22.6mm,D=7.0h,I_{30}=3.6mm/h),2019 年 7 月 22 日的大雨(P=34.0mm,D=5.2h,I_{30}=20.8mm/h)和 2019 年 7 月 17 日的暴雨(P=99.4mm,D=39.6h,I_{30}=53.2mm/h)为典型降雨事件,结合高频次的降雨监测数据和土壤水分监测数据,研究分析土壤水分含量在不同类型降雨过程中的变化特征。

2.2.1　长历时大雨强的暴雨事件

图 3 为暴雨条件下不同深度的土壤水分对降雨的响应。以 2019 年 7 月 17 日发生的暴雨为例,该降雨事件累计降雨量为 99.4mm,历时 39.6h,最大 30min 雨强为 53.2mm/h。根据对降雨事件的统计,此前的 10 天内共有 5 场降雨强度不大的降雨,累计降雨量为 50.6mm,因此研究样地的土壤初始状态较为湿润。

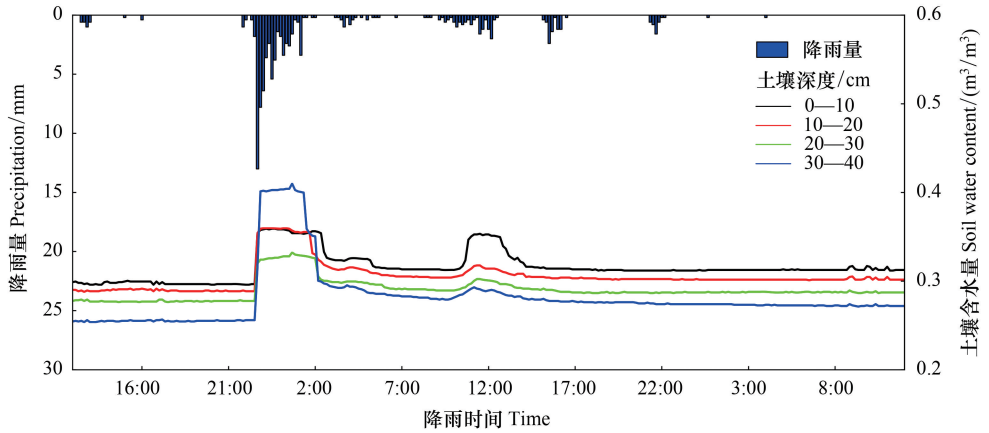

图 3　暴雨条件下各层次土壤水分对降雨的响应

Fig.3　Response of soil moisture to rainfall at different soil depths under rainstorm conditions

降雨开始前,土壤水分的初始含量随着深度的加深逐渐递减,0—10、10—20、20—30、30—40cm 四个土层的土壤初始含水量分别为:29.81%、28.94%、27.77%和 25.52%。从土壤水分-降雨曲线(图 3)中可以看出茶园的 4 个层次土壤含水量几乎于同一时间开始对降雨进行响应,其响应时间与降雨时间几乎同步,并且其变化过程相似,都出现了上升期、平台期和退水期,但在响应幅度上却存在一定差异。当累计降雨量达到 11.8mm 时,各土层土壤水分含量因对降雨做出响应而呈现出迅速增加的状态,其中 30—40cm 土层土壤水分变化与降雨量变化具有较好的同步性,响应幅度最大。而 0—30cm 深度的土层土壤响应幅度随着深度的加深逐渐减弱,当累计降雨量达到 63mm 时,各层次土壤含水量达到第一个峰值,随后开始逐渐减少并达到相对稳定的状态。当累计降雨量达到 74.8mm 时,各层次土壤再次快速上升并达到第二个峰值,之后随着降雨量的减少逐渐消退并达到稳定状态。第二次的响应过程各层次土壤水分含量对降雨的响应随着土层深度的加深呈现出一定的规律,土层越深含量越低,响应幅度也越小。

2.2.2　中历时大雨强的大雨事件

图 4 为大雨条件下不同深度的土壤水分对降雨的响应。以 2019 年 7 月 22 日发生的大雨为例,此次降雨

期间降雨总量为 34.00mm,历时 5.2h,最大 30min 雨强为 20.8mm/h。4 至 9 月,研究区处于雨季,降雨充沛,在本场降雨发生前,7 月 17 日、7 月 21 日的一场中雨分别发生了两场降雨,导致土壤水分初始含量较高,土壤尤其是表层土壤处于湿润状态,土壤水分的初始含量随着土层深度的加深而逐渐降低,0—40cm 各层次土壤水分初始含量分别为 31.12%、30.30%、28.86%和 27.27%。

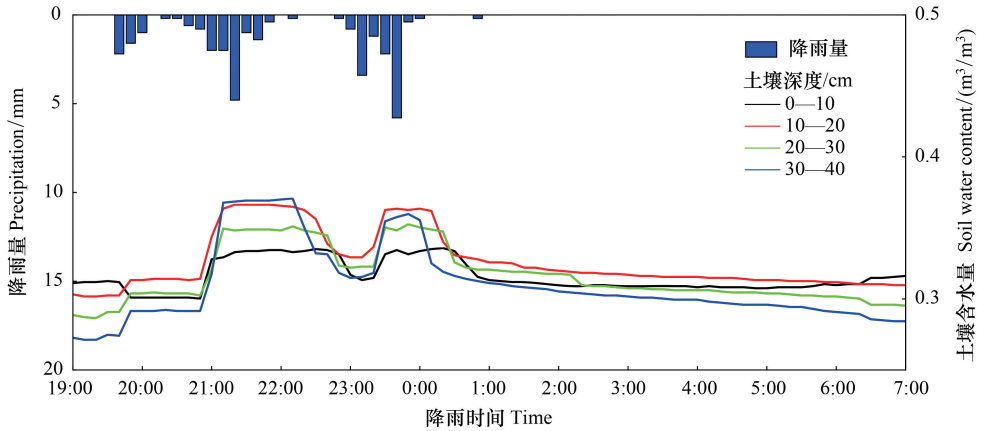

图 4 大雨条件下各层次土壤水分对降雨的响应

Fig.4 Response of soil moisture to rainfall at different soil depths under heavy rain conditions

在此次降雨事件中,土壤水分含量的变化仍然包括上升期、平台期和退水期,并且出现了两个峰值,这与降水量的变化特征相一致。土壤水分含量的 2 次极大值均出现在有较大降雨量之后,降雨事件对各个深度的土壤水分的补给作用明显。各层次土壤在降雨开始后的 1h 左右产生响应,之后迅速增加并在累积降雨量为 18.4mm 达到第一次峰值,接着在维持一段时间的高含量土壤水分后随着降雨量的减少,土壤水分含量急速下降直到 7 月 22 日 23:10 达到谷值。当继续出现降雨后,土壤水分含量再次对其做出响应并于 0:20 达到第二次峰值,随后随着降雨的消退,土壤水分含量逐渐减少。

此外,不同深度土壤水分变化显示,在大雨条件下表层土壤(0—10cm)的水分含量并非 4 个土层深度土壤水分含量的最大值,相反在降雨过程中,表层土壤含水量逐渐下降成为最低值。从对降雨的响应程度来看,4 个土层深度的土壤含水量几乎同时对降雨产生了响应,其中响应程度最明显的是 10—20cm 和 30—40cm 的土壤层次,其次为 20—30cm,0—10cm 表层的土壤水分对降雨的响应程度最小。

2.2.3 短历时小雨强的中雨事件

图 5 为中雨条件下不同深度的土壤水分对降雨的响应。此次降雨事件发生于 2019 年 6 月 5 日,降雨总量为 22.6mm,降雨历时约 7h,历时较短,平均雨强为 3.2mm/h。在此之前研究区内降雨总量少,多数为小雨,次降雨量均不超过 10mm,因此茶园土壤初始状态较为干旱,土壤水分的初始含量较低,各层次土壤初始含水量依次为 10.85%、11.29%、13.76%和 11.50%。

不同于其他两种降雨模式,此次降雨过程中 20—30cm 土层土壤的水分初始含量要明显高于 30—40cm 土层的土壤水分初始含量。在此次降雨过程中,4 个土层深度的土壤水分几乎同时从降雨开始后的 1.5h 后开始增加。0—10cm 的土壤水分初始含量最低但是伴随着降雨的发生其含水量迅速增加并且明显高于其它土层的土壤含水量,表明该层土壤水分含量对降雨的响应最为明显,同时响应速度也最快。在累积降雨量为 12mm 时表层土壤水含量达到最大值 24.22%,20—30cm 深度的土壤水分含量仅次于 0—10cm 深度的土壤。当降雨强度较小时,土壤含水量对降雨的响应时间相比于大雨和暴雨稍有所滞缓,0—10cm 的表层土壤水分含量受到降雨的影响最大。

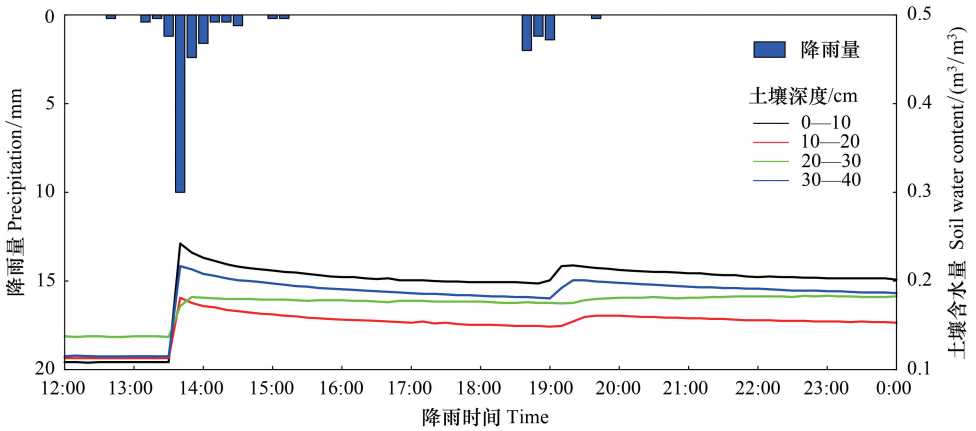

图 5　中雨条件下土壤水分对降雨的响应

Fig.5　Response of soil moisture to rainfall at different soil depths under moderate rain conditions

3　讨论

3.1　土壤水分含量对降雨季节变化的响应

该研究样点在研究期内土壤水分含量在夏秋季较高,春季较低,其中最高值出现在 8 月,最低值出现在 5、6 月,此结果与白雨诗等人[16]在大佬岭地区的研究有差异。研究区内春季降水较少,对土壤水分的补给不够及时,直到 6 月份才有大量的降雨,因此在春季土壤的水分含量较低。在夏季(6—9 月)降雨充沛,降水对于土壤水分的补充较多,因此土壤水分含量显著增加并达到最大值,降雨量的大小对于土壤水分含量的变化特征和趋势有着明显的影响作用。

土壤水分含量在降雨量较少的 11、12 月份并未达到最低值,可能是因为冬季气温较低,蒸发量减少。同时研究样地内的部分落叶阔叶林和草本植物在此季节凋零死亡,其叶片凋落至地面形成枯枝落叶层对地表起到了覆盖保护的作用[17],进而使得表层土壤的蒸发蒸散作用得到减弱。同时茶树枯落物在分解后形成腐殖质,这种腐殖质与土壤颗粒结合后可以形成更加稳固的团粒结构[18],使得土壤的透水能力和持水性得以提高,进而使得土壤含水量在降雨较少的冬季也能保持较高的水平。

3.2　不同深度土壤水分含量的变化特征及其对降雨的响应

在一定的降雨条件下,茶园不同土层深度的土壤水分含量不同,其变化特征也明显不同,随着土层深度的增加,土壤水分含量的变化幅度逐渐趋于平稳。导致这种差异的主要原因是降雨的外部作用及土壤的内部理化性质差异[19]。大气降水作为影响土壤水分含量的主要因子,对表层土壤的影响最为剧烈,表层土壤是生物-气候的水分交换层,在自然界的水分循环中起着重要的作用,同时在土壤表层往往存在蒸发、径流等水分循环的过程,所以受到降雨的影响,表层土壤的含水量动态变化相对剧烈并且水分交换也更为剧烈[20]。同时,土壤持水力是影响土壤水分入渗的重要因素[21—22],能够直接改变土壤水源涵养量和降雨的下渗速率。研究发现茶园样地不同深度的土壤容重和饱和导水率随着土层深度的增加均逐渐减小,深层土壤容重较大(1.54g/cm^3),孔隙度较小(41.89%),土壤自身的调蓄作用较表层土壤更强,水分变化起伏小,趋势相对稳定。

3.3　降雨格局对土壤水分含量变化特征的影响

降雨后土壤水分的响应时间和水分补给量等,受雨量、降雨历时、降雨强度和降雨事件间隔的主导调控[23—24]。同时植被冠层截流、植物根系分布和土壤质地等因素也能够改变水分的分布情况[25—26]。结合 3 次典型降雨事件中降雨格局和土壤水分变化的特征,降雨量的大小、降雨强度以及土壤初始水分含量对土壤水分的动态变化均有着显著的影响。随着降雨量的增加,降雨对土壤水分的贡献率增大,土壤含水量对暴雨的响应最为迅速且响应幅度也最大;当降雨强度为大雨时,土壤水分含量对降雨的响应出现延迟,但滞缓时间较

短;土壤水分含量对中雨的响应最不明显,响应延迟时间较长且降雨对表层土壤的影响较大,深层土壤水分含量变化相对不明显。降雨历时和降雨强度的差异也会改变土壤水分的入渗和补给[27]。土壤水分对不同强度降雨的响应不同,降雨对表层土壤含水量的作用较大,但是随着土层的加深,土壤水分含量对降雨响应所需的雨强也越大[28]。即小降雨事件能够有效的补给表层土壤水分,而大降雨事件能够有效补给深层土壤水分[29]。其原因可能是在高强度的降雨初期,地表土壤水分很快达到饱和状态,继续增加的降雨可能会转换成地表径流或壤中流,降低了对深层土壤水分的补给[30—32]。此外,土壤前期含水量与降雨是坡面产流的主要影响因素。当坡面饱和含水量高,且土壤前期含水量小时,产流所需降雨量要高;当坡面土壤容重较大,坡面产流所需的降雨量也大;当坡面土壤入渗深度较大时,产流所需降雨量也大[33]。

4 结论

本文对三峡库区典型茶园样地进行降雨过程和土壤水分含量的连续动态监测,探究不同降雨类型下水分变化规律,以及不同深度土壤的水分变化特征、对降雨的响应时间、响应程度,揭示了不同降雨类型下茶园土壤水分入渗特征。得到的主要结论如下:

(1)研究区内的降雨和土壤水分含量均表现出明显的季节性特征。降雨在 7 月达到最大值,土壤水分含量则在 8 月达到峰值。降雨是影响土壤水分含量变化的重要因子,土壤水分对降雨有着明显的响应过程。

(2)在相同降雨条件下,土壤含水量具有明显的垂直梯度变化。随着土层深度的增加,土壤水分对降雨的响应逐渐呈现出滞后现象。表层土壤(0—20cm)对降雨的响应较为迅速且幅度更加明显,深层土壤(30—40cm)水分含量变化相对稳定,并且对降雨的响应时间更加滞缓。随着土层深度的增加,土壤水分含量的变化幅度逐渐趋于平稳。

(3)土壤水分含量对不同的降雨模式表现出显著差异。在较大雨强条件下,土壤水分变化出现了上升期、平台期及退水期。在小雨强短历时的降雨中,降雨对土壤水分的影响主要表现在土壤表层(0—10cm)。在降雨初期,降雨强度越大,土壤水分入渗越快,土壤的响应深度越深。

参考文献(References):

[1] 沈晗悦, 信忠保, 王志杰. 北京山区侧柏林坡面土壤水分时空动态及其影响因素. 生态学报, 2021, 41(7): 2676-2686.

[2] 杨大文, 丛振涛, 尚松浩, 倪广恒. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望. 水利学报, 2016, 47(3): 390-397.

[3] 王根绪, 夏军, 李小雁, 杨达, 胡兆永, 孙守琴, 孙向阳. 陆地植被生态水文过程前沿进展: 从植物叶片到流域. 科学通报, 2021, 66(S2): 3667-3683.

[4] 彭新华, 王云强, 贾小旭, 高伟达, 张中彬, 姚荣江, 赵英, 沈重阳, 陈丁江, 朱青, 高磊. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望. 土壤学报, 2020, 57(5): 1071-1087.

[5] 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. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44-47.

[6] 陈伟, 李亚新, 王红阳, 王佳, 孙从建. 黄土丘陵区坡耕地与撂荒地土壤水分对降雨的响应特征. 生态学报, 2022, 42(1): 332-339.

[7] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 李晓晶, 刘源, 刘宗奇. 油蒿灌丛群落浅层土壤水分对不同降雨格局的响应. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1571-1578.

[8] 田杰. 黑河上游不同植被类型剖面土壤水文特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.

[9] 宋婧. 红壤坡地不同植被类型的干湿季土壤水分动态规律研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.

[10] 冯博. 黄土高原北部两种典型草地土壤水分时空分异及对降雨的响应[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.

[11] He Z B, Zhao W Z, Liu H, Chang X X. 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 Mountains. Journal of Hydrology, 2012, 420/421: 183-190.

[12] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 张伟, 孔祥丽. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异. 生态学报, 2008, 28(12): 6334-6343.

[13] 李谦, 郑锦森, 朱青, 廖凯华, 杨桂山. 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.

[14] 中华人民共和国生态环境部. 2017 年长江三峡工程生态与环境监测公报. 北京: 2017.

[15] 邵蕾. 后三峡时期三峡库区可持续发展研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.

[16] 白雨诗, 刘目兴, 易军, 张海林, 娄淑兰, 黄建武, 万金红. 三峡山地沟谷不同坡位土壤水分特征及对降雨过程的响应. 长江流域资源与

环境, 2020, 29(10): 2261-2273.
[17] 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征. 环境科学, 2019, 40(12): 5330-5339.
[18] 刘鸿涛. 薄层覆土砒砂岩区土壤水分养分特征及新型调控技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
[19] 解璐萌, 张英虎, 张明祥, 张振明. 黄河三角洲刺槐群落土壤优先流及养分分布特征. 生态学报, 2021, 41(19): 7713-7724.
[20] 白晓, 贾小旭, 邵明安, 赵春雷. 黄土高原北部土地利用变化对长期土壤水分平衡影响模拟. 水科学进展, 2021, 32(1): 109-119.
[21] 赵阳, 余新晓, 吴海龙, 宋思铭, 黄枝英. 华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应. 水土保持学报, 2011, 25(6): 148-152.
[22] 陈广磊, 田昆, 王行, 张赟, 孙梅, 刘振亚, 张晓宁, 肖德荣. 高原湿地纳帕海土壤持水力对不同放牧的响应. 水土保持学报, 2016, 30(4): 123-129, 141.
[23] Li X Y, Yang Z P, Li Y T, Lin H. Connecting ecohydrology and hydropedology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(7): 1133-1144.
[24] 王宇祥, 刘廷玺, 段利民, 童新, 王冠丽, 李东方. 半干旱地区半流动沙丘水分深层渗漏量及其对降雨格局的响应. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2710-2720.
[25] Wang X H, Wang B T, Xu X Y, Liu T, Duan Y J, Zhao Y. Spatial and temporal variations in surface soil moisture and vegetation cover in the Loess Plateau from 2000 to 2015. Ecological Indicators, 2018, 95: 320-330.
[26] Guzha A C, Rufino M C, Okoth S, Jacobs S, Nóbrega R L B. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: evidence from East Africa. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2018, 15: 49-67.
[27] 吕斯丹, 宋贤威, 温学发. 降水与土壤水混合过程的生态水文分离现象及其研究进展. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1797-1806.
[28] 侯贵荣, 余新晓, 刘自强, 贾国栋, 李瀚之, 刘文娜, 李勇. 不同降雨强度下北京山区典型林地土壤水分时空变化特征. 水土保持学报, 2017, 31(3): 209-215.
[29] 李馨欣, 王小燕, 蔡崇法, 李鸿. 紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应. 水土保持学报, 2017, 31(5): 25-31.
[30] 付智勇, 李朝霞, 蔡崇法, 郭忠录. 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.
[31] 唐敏, 赵西宁, 高晓东, 张超, 吴普特. 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.
[32] 黄志刚, 欧阳志云, 李锋瑞, 郑华, 王效科, 王中建. 南方丘陵区不同坡地利用方式土壤水分动态. 生态学报, 2009, 29(6): 3136-3146.
[33] 艾宁, 刘广亮, 朱清科, 刘广全, 强方方. 基于土壤前期含水量-降雨耦合关系的陕北黄土坡面产流临界降雨值. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 23-29.