

DOI: 10.20103/j.stxb.202210273058

王坤悦, 李旭红, 余新晓, 贾国栋, 张益, 党毅. 北京山区典型植被土壤水分对次降雨的响应. 生态学报, 2024, 44(6): 2561-2571.

Wang K Y, Li X H, Yu X X, Jia G D, Zhang Y, Dang Y. Response of soil moisture of typical vegetation to individual rainfall in Beijing mountain area. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2561-2571.

北京山区典型植被土壤水分对次降雨的响应

王坤悦, 李旭红, 余新晓*, 贾国栋, 张益, 党毅

北京林业大学国家林草局水土保持重点实验室, 北京 100083

摘要:为了揭示北京山区不同植被类型土壤水分对不同强度降雨的响应过程,选取北京山区内侧柏、荆条灌丛、荒草地为研究对象,基于 2022 年 6—10 月降雨和土壤水分的连续观测数据,分析土壤水分对不同降雨事件的响应特征。结果表明:(1)观测期内研究区降雨事件主要由小雨构成,小雨事件的总降雨量占总降雨量的 14.78%,小雨事件对土壤水分的响应深度可达到 40—60 cm 土层;中雨、大雨、暴雨事件的总降雨量占总降雨量的 85.52%,中雨、大雨、暴雨事件对土壤水分的响应深度均可达到 60—80 cm 土层;大雨事件对土壤水分的补给作用更明显,降雨量越大,降雨能补给的土层深度越深,土壤水分补给效果越好。(2)三种植被平均土壤水分补给速率大小依次为荒草地>侧柏>荆条灌丛,说明降雨对荒草地的补给效果最好;土层活跃程度对植被土壤水分有影响,土层越活跃,土壤水分波动越大,三种植被平均土壤水分变异系数大小依次为荒草地>荆条灌丛>侧柏,而三种植被平均土壤储水量大小则依次为侧柏>荒草地>荆条灌丛,说明侧柏的土壤水分最为稳定。(3)荒草地、荆条灌丛剖面上各层土壤水分逐渐减少,侧柏则增加,说明土壤水分剖面分布受植被类型影响;侧柏、荆条灌丛、荒草地平均最大补给速率均发生在 20—40 cm 土层,说明降雨对浅层土壤水分的补给最为明显,对 0—40 cm 土层土壤水分的补给效果要更好。研究成果进一步解释了北京山区生态系统水分运动规律,为易干旱生态脆弱地带生态环境建设提供依据。

关键词:北京山区;植被类型;土壤水分;降雨

Response of soil moisture of typical vegetation to individual rainfall in Beijing mountain area

WANG Kunyue, LI Xuhong, YU Xinxiao*, JIA Guodong, ZHANG Yi, DANG Yi

Key Laboratory of State Forestry Administration, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: In order to reveal the response process of soil moisture of different vegetation types to rainfall of different intensities in Beijing mountain areas, *Platycladus orientalis*, *Vitex negundo* var, *heterophylla* shrubland, and native grassland were selected as the research objects. Based on the continuous observation data of rainfall and soil moisture from June to October 2022, the response characteristics of soil moisture to different rainfall events were analyzed. The results showed that: (1) during the observation period, the rainfall events in the research area were mainly consisted of light rain, with the total rainfall of the light rain event accounted for 14.78% of the total rainfall. The response depth of light rain events to soil moisture could reach 40—60 cm soil layer. The total rainfall of moderate rain, heavy rain and rainstorm events accounted for 85.52% of the total rainfall, the response depth of moderate rain, heavy rain, and rainstorm events could reach 60—80 cm soil layer. The replenishment effect of heavy rainfall was more obvious. The greater the rainfall, the deeper the soil layer that could be replenishment by rainfall, and the better the soil water replenishment effect. (2) The average soil water replenishment rate of the three vegetation was in the order of native grassland > *Platycladus orientalis* > *Vitex negundo* var, *heterophylla* shrubland, it indicated that rainfall had the best replenishment effect on native grassland. The active degree of soil layer had influence on soil moisture of vegetation. The more active the soil layer, the greater the fluctuation of soil moisture. The average soil moisture variation coefficient of the three vegetation types was in the order of native grassland > *Vitex negundo* var, *heterophylla shrubland* > *Platycladus orientalis*, while the average soil water storage

基金项目:国家自然科学基金项目(42230714, 41977149, 42277062)

收稿日期:2022-10-27; 网络出版日期:2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxinxiao111@126.com

capacity of the three vegetation types was in the order of *Platycladus orientalis* > native grassland > *Vitex negundo* var, *heterophylla shrubland*, indicating that *Platycladus orientalis* had the most stable soil moisture. (3) The soil moisture in each layer of the native grassland and the *Vitex negundo* var, *heterophylla shrubland* profile decreased gradually, while that of *Platycladus orientalis* increased, indicating that the distribution of soil moisture profile was influenced by vegetation types. The average maximum replenishment rate of *Platycladus orientalis*, *Vitex negundo* var, *heterophylla shrubland*, and native grassland occurred in the soil layer of 20—40 cm, indicating that rainfall had the most obvious replenishment effect on shallow soil moisture, and the replenishment effect on 0—40 cm soil moisture was better. The results further explained the law of water movement in the mountain ecosystem of Beijing, and provided a basis for the ecological environment construction in the fragile ecological zone prone to drought.

Key Words: Beijing mountainous area; vegetation type; soil moisture; rainfall

土壤水分是控制陆地和大气之间能量和物质交换的关键状态变量,其通过影响渗透、径流等过程产生重要影响,最终影响水循环^[1]。土壤水分运动受气候和环境因素的影响处于不同变化状态^[2]。降雨是土壤水分补给的重要来源,降雨量决定着土壤水分的分布特征,进而影响植被的生长情况和稳定性^[3],同时土壤水分对降雨的动态响应反映了降水、入渗等水文过程的相互作用^[4-5]。分析不同降雨事件下土壤水分分布规律以及响应特征有助于定量研究土壤水分运动,对于合理高效利用土壤水分具有重要意义。

降雨及其再分配过程决定了土壤水分的补给效果^[6],不同降雨事件对土壤水分的补给效果不同。小降雨事件能有效补给表层土壤水分,而大降雨事件能促进水分入渗到更深的土层^[7],显著改善深层土壤水状况。王亚琳等^[8]发现喀斯特区小于 5.8 mm 的小降雨事件对土壤水分无法进行有效补给,大于 20 mm 的降雨事件能够有效补给土壤水分。李新乐等^[3]发现在巴彦淖尔地区小于 10 mm 的降雨无法补给 10 cm 以下水分,大于 10 mm 的降雨对土壤水分均有补给。受冠层截留影响,不同植被类型土壤水分对次降雨的响应也各不相同,杨磊等^[6]对黄土丘陵区下不同植被类型的土壤水分补给特征进行研究,发现土壤水分补给效率大小依次为天然荒地>小麦>沙棘>红豆草>油松。景建生等^[9]在研究石漠化地区不同植被类型土壤水分对降雨响应特征时发现次降雨对不同植被类型的土壤水分补给效率大小依次为火龙果地>荒地>花椒地>金银花地。不同土层深度的土壤水分受降雨的响应是复杂的,受降雨条件、初始土壤含水率、孔隙度、以及植被类型的影响^[10]。众多研究表明,降雨对土壤水分的补给深度随降雨量的增加而增加,而对土壤水分的补给效果则随降雨量的增加而减小^[11-13]。在半干旱区,降雨量大于 13.4 mm 时仅可在 60 cm 土层深度上补充土壤水分,降雨量大于 50 mm 时,补给深度可达 120 cm 土层以下^[11]。在干旱半干旱区,降雨显著影响 5—60 cm 土层土壤水分,5—60 cm 土层土壤水分增量对降雨量呈显著正相关^[14]。在半湿润半干旱区,土壤水分在不同土层土壤中的流动存在梯度性差异和非均匀性特征,降雨对土壤水分的影响在 0—30 cm 土层内最明显^[15]。北京山区是首都重要的生态屏障,同时也属易干旱生态脆弱带,水资源的短缺是制约易干旱地区植被分布和丰富度的关键因子^[16]。目前已有不少学者进行了土壤水分的研究,大多学者基于对不同土地利用方式下土壤水分和降雨的长期观测,揭示了土壤水分的季节或年际变化特征,但针对次降雨条件下土壤水分变化的研究较少,缺少对降雨过程中土壤水分响应特征的研究。不同降雨事件对土壤水分的补给效果不同,在土壤水分循环中重要程度不同。研究北京山区典型植被土壤水分对次降雨的响应特征与变化规律,对合理利用水资源,指导当地植被建设具有重要意义。

本研究选取北京山区鹫峰国家森林公园为研究区,以侧柏、荆条灌丛、荒草地样地为研究对象,系统分析了不同降雨事件下 0—80 cm 土壤水分动态变化规律,以期为北京山区水土资源利用和植被建设提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

实验地地处北京市海淀区,位于中国北京鹫峰国家实验站(东经 39°54',北纬 116°28'),属于华北暖温带

半湿润半干旱大陆性季风气候。年均气温 12.5℃。年均潜在蒸散量为 1900 mm,年平均降雨量在 600—700 mm。降水量多集中在 7—9 月份,占全年降水量的 70%以上^[17]。研究区森林植被覆盖率达 96.4%,目前草本主要有求米草(*Oplismenus undulatifolius*)、狗尾巴草(*Pennisetum alopecuroides*)、夏至草(*Lagopsis supina*),林下灌丛主要有山杏(*Armeniaca sibirica*)、荆条(*Vitex negundo* var, *heterophylla*)、孩儿拳头(*Grewia biloba*),乔木主要有侧柏林(*Platycladus orientalis*)、油松林(*Pinus tabulaeformis*)、栓皮栎林(*Quercus variabilis*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)等。土壤类型为淋溶褐土,土层瘠薄,深层土壤砾石含量较多。

1.2 研究方法

2021 年 5 月分别在侧柏样地、荆条灌丛样地、荒草地样地选取典型植被,将 Em50(Meter Decagon, USA; 精度:±3%)数据采集器和 5TE 水分参数探头固定布设在典型植株东侧 1 m 处,长期获得土壤水分数据。为确保在统一的土层深度监测土壤体积含水率变化,监测探头采取每隔 20 cm 一层的布设方式,监测探头的布设深度分别为(10 cm、30 cm、50 cm、70 cm)。2021 年 7 月 20 日至 8 月 10 日在鹫峰国家森林公园选取侧柏、荆条灌丛、荒草地 3 种不同覆被类型作为试验样地进行样地调查,样地概况见表 1,样地各土层土壤机械组成见表 2。本研究选取 2021 年 6 月 1 日—2021 年 10 月 15 日作为监测期,降雨量数据来源于定位站架设的 HOBO-U30 气象站(ONSET, USA)。

表 1 不同样地的基本特征

Table 1 The basic characteristics of different plots

样地 Sample plot	土壤类型 Soil type	土层厚度 Soil depth/cm	郁闭度 Canopy density	密度 Density/ (株/hm ²)	枯落物厚度 Litter layer thickness /cm	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect
荒草地 Native grassland	褐土	80	0.84	—	—	15	阴坡
荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> var, <i>heterophylla</i> shrubland	褐土	90	1	3900	4.32	15	阴坡
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	褐土	95	0.87	2050	2.09	15	阴坡

表 2 不同植被类型土壤机械组成

Table 2 Soil mechanical composition of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	土层厚度 Soil depth/cm	土壤机械组成							
		0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80
荒草地 Native grassland	粘粒	2.88%	5.26%	2.61%	4.36%	3.58%	3.23%	2.55%	2.36%
	粉粒	48.58%	49.37%	43.02%	52.14%	66.92%	74.39%	61.27%	43.57%
	砂粒	48.54%	45.37%	54.37%	43.50%	29.50%	22.38%	36.18%	54.07%
	土壤类型	a	a	b	a	a	a	a	b
荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> var, <i>heterophylla</i> shrubland	粘粒	0.56%	1.15%	0.82%	0.63%	0.65%	0.70%	0.62%	0.44%
	粉粒	25.40%	35.47%	31.30%	30.67%	34.03%	34.31%	35.92%	34.85%
	砂粒	74.04%	63.38%	67.88%	68.70%	65.32%	64.99%	63.46%	64.71%
	土壤类型	b	b	b	b	b	b	b	b
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	粘粒	2.26%	2.55%	2.05%	2.83%	2.83%	1.78%	3.12%	2.49%
	粉粒	49.06%	58.37%	63.77%	61.94%	59.69%	50.03%	62.21%	57.87%
	砂粒	48.68%	39.08%	34.18%	35.23%	37.48%	48.19%	34.67%	39.64%
	土壤类型	a	a	a	a	a	a	a	a

粘粒(<0.002 mm),粉粒(0.05—0.002 mm),砂粒(2—0.05 mm),a 代表粉砂质壤土,b 代表砂质壤土

1.3 数据处理与计算

将间隔大于 24 h 的降雨作为两次独立的降雨事件^[14],并按照国家气象局颁布的降水等级划分标准,将

24 h 降雨量分为 4 个等级:小雨(0.1—9.9 mm)、中雨(10.0—24.9 mm)、大雨(25.0—49.9 mm)、暴雨(50.0—99.9 mm)^[18]。基于气象数据与土壤水分连续动态监测,分析小雨、中雨、大雨、暴雨事件中各植被土壤水分补给量、响应时长、土壤水分补给速率及土壤储水量,定量分析不同降雨事件中各植被土壤水分对降雨的响应。各指标的计算公式如下^[18-19]:

$$\Delta SW_i = SW_{i,\max} - SW_{i,0} \quad (1)$$

$$\Delta t_s = t_i - t_0 \quad (2)$$

$$\Delta t_r = t_{i,\max} - t_0 \quad (3)$$

$$V = \frac{\Delta SW_i}{\Delta t_r} \quad (4)$$

$$W = \sum_{i=1}^4 \theta_i d_i \quad (5)$$

式中, ΔSW_i 为降雨对第 i 层的补给量(mm), $SW_{i,\max}$ 为降雨后第 i 土层土壤储水量最大值(mm), $SW_{i,0}$ 为降雨前第 i 土层土壤储水量初始值; Δt_s 为降雨后第 i 层土壤水分的响应时长, t_0 为降雨开始的时间, t_i 为降雨后第 i 层土壤水分开始变大的时间; Δt_r 为降雨后第 i 层土壤水分达到峰值的时长, $t_{i,\max}$ 为降雨后第 i 层土壤水分达到峰值的时间; V 为土壤水分补给速率; W 为 0—80 cm 土壤储水量(mm), θ_i 为土壤水分传感器测的各层土壤体积含水率(m^{-3}/m^{-3}); d_i 为对应的土层深度(mm), 本研究中各层深度均为 20 cm, 共计 80 cm。

利用 Excel、SPSS 20.0、Origin 2021 软件对数据进行分析及制图,使用单因素方差法分别对不同土层、不同植被土壤含水率进行差异性比较,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 降雨分布

在监测期间,研究区共有 34 场次降雨事件,总降雨量 811.8 mm。由图 1 可知,本研究中降雨事件主要以小雨为主,中雨次之,分别占总降雨事件次数的 58.82% 和 17.65%;暴雨和大雨对总降雨量的贡献最大,分别占总降雨量的 39.59% 和 28.75%。随着降雨事件类型的升高,降雨比例呈现减小趋势,而贡献率呈现增大趋势。

2.2 土壤水分动态变化特征

2.2.1 不同降雨事件土壤水分变化特征

为了研究土壤剖面水分对不同降雨事件的响应,选取降雨前 24 h 和降雨后 24 h 内无降雨的四场典型降雨进行分析,其中 9 月 26 日为小雨、9 月 14 日为中雨、7 月 21 日为大雨、9 月 4 日为暴雨。对这四场降雨雨前土壤含水率、雨后各层最大土壤含水率进行分析,由图 2 可知,四场降雨均对 0—80 cm 土层土壤水分产生影响,且暴雨条件下,侧柏、荆条灌丛、荒草地的雨前土壤含水率与雨后土壤含水率的整体差异最明显,小雨条件下最不明显。说明雨后土壤含水率随着降雨类型的增大呈现出增大趋势。小雨事件主要对 0—60 cm 土层土壤水分进行补给,各土层平均土壤水分增长率为 5.55%、2.66%、0.35%、-0.10%,大小依次为 60—80 cm < 40—60 cm < 20—40 cm < 0—20 cm; 中雨、大雨、暴雨事件均对 0—80 cm 土层土壤水分进行补给,在中雨事件中,各土层平均土壤水分增长率为 14.80%、7.39%、8.74%、6.03%,大小依次为 60—80 cm < 20—40 cm < 40—60 cm < 0—20 cm; 大雨事件中各土层平均土壤水分增长率为 34.46%、31.50%、16.80%、7.89%,大小依次为 60—80 cm < 40—60 cm < 20—40 cm < 0—20 cm; 暴雨事件中各土层平均土壤水分增长率为 65.23%、53.51%、29.29%、20.18%,大小依次为 60—80 cm < 40—60 cm < 20—

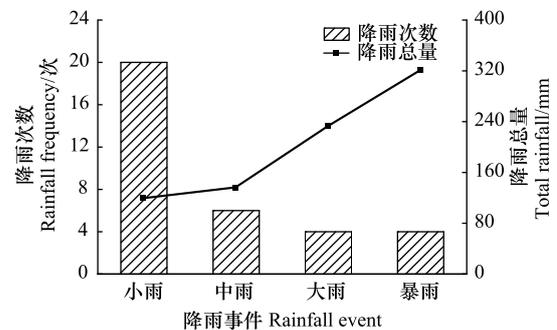


图 1 降雨级特征

Fig.1 Rainfall level characteristics

40 cm<0—20 cm;各降雨事件土壤水分平均增长率为 2.11%、9.24%、22.66%、42.05%,大小依次为小雨<中雨<大雨<暴雨。侧柏、荆条灌丛、荒草地在四场降雨事件中平均土壤水分增长率为 25.54%、17.84%、21.38%,大小依次为荆条灌丛<荒草地<侧柏。

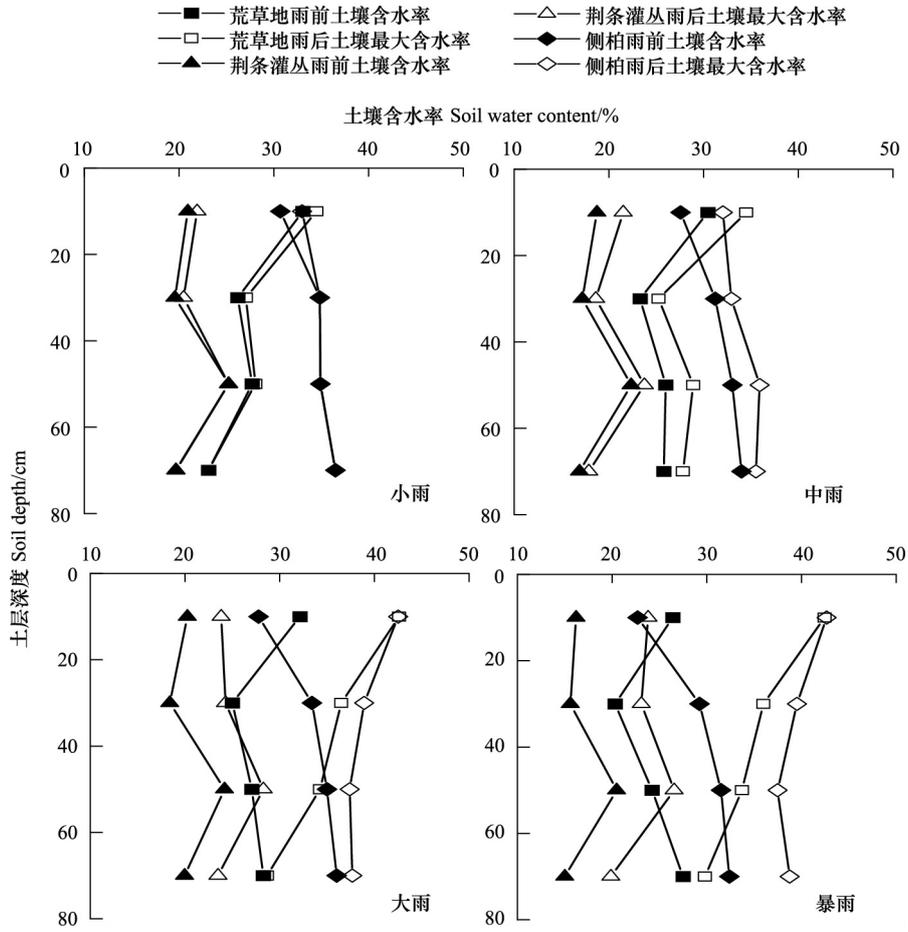


图2 不同降雨事件植被土壤含水率

Fig.2 Soil moisture content of vegetation in different rainfall events

2.2.2 不同土层土壤水分变化特征

由表 3 可知,三种植被类型在四场典型降雨中的土壤水分特征差异显著,侧柏、荆条灌丛、荒草地的平均土壤含水率为 18.13%—35.81%,土壤含水率变异系数为 4.50%—12.95%。荒草地土壤含水率均值为 28.48%,各土层土壤含水率大小依次为 60—80 cm<20—40 cm<40—60 cm<0—20 cm;荆条灌丛土壤含水率均值为 20.10%,各土层土壤含水率大小依次为 60—80 cm<20—40 cm<0—20 cm<40—60 cm;侧柏土壤含水率均值为 33.84%,各土层土壤含水率大小依次为 0—20 cm<20—40 cm<40—60 cm<60—80 cm;侧柏、荆条灌丛、荒草地土壤含水率最高的土层依次为 60—80 cm、40—60 cm、0—20 cm,平均土壤含水率的变异系数均值分别为 9.41%、8.09%、6.92%,变异系数均值大小依次为荒草地>荆条灌丛>侧柏,表明三种植被类型中荒草地的土壤含水率波动最为明显,各土层受到降雨的影响较为强烈。荆条灌丛各土层土壤含水率变异系数随土层深度整体呈现出增加趋势,而侧柏和荒草地呈现出减少趋势。本文根据变异系数大小划分了各层的活跃等级(变异系数 CV ≥ 30% 为速变层,30% > CV ≥ 20% 为活跃层,20% > CV ≥ 10% 为次活跃层, CV < 10% 为相对稳定层)^[20]。荒草地 20—40 cm 土层和侧柏 0—20 cm 土层为次活跃层,其余土层全部为相对稳定层。

表 3 不同植被类型下五场典型降雨土壤含水率特征

Table 3 Soil water content characteristics of four typical rainfalls under different vegetation types

植被类型 Vegetation type	土层深度 Depth/cm	土壤含水率 Soil water content/%				变异系数/% Coefficient of variation	层次 Layer
		最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average value			
荒草地 Native grassland	0—20	26.40	42.62	34.04±3.06Aa	8.99	相对稳定层	
	20—40	20.29	36.50	26.72±3.46Bc	12.95	次活跃层	
	40—60	24.18	34.25	27.83±2.03Bb	7.29	相对稳定层	
	60—80	22.00	28.67	25.33±2.13Bd	8.41	相对稳定层	
荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> var, <i>heterophylla shrubland</i>	0—20	16.20	23.80	19.88±1.43Cb	7.19	相对稳定层	
	20—40	15.56	23.10	18.92±1.55Cc	8.19	相对稳定层	
	40—60	20.10	26.01	23.46±1.65Ca	7.03	相对稳定层	
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	60—80	14.93	20.89	18.13±1.80Cd	9.93	相对稳定层	
	0—20	22.66	42.65	30.93±3.65Bd	11.80	次活跃层	
	20—40	29.20	39.53	33.93±2.31Ac	6.81	相对稳定层	
	40—60	31.51	37.48	34.69±1.59Ab	4.58	相对稳定层	
	60—80	32.36	38.64	35.81±1.61Aa	4.50	相对稳定层	

不同小写字母表示土壤含水率在不同土层间差异显著;不同大写字母表示土壤含水率在不同植被间差异显著($P<0.05$)

2.3 土壤水分补给特征

2.3.1 不同降雨事件土壤水分补给特征

由图 3、图 4、图 5 可知,土壤水分对不同降雨事件的响应程度不同。在小雨事件中,侧柏水分响应时长(7.00 h)>荆条灌丛(5.50 h)>荒草地(0.50 h),荒草地土壤水分补给速率(0.41%/h)>荆条灌丛(0.27%/h)>侧柏(0.19%/h)。在中雨事件中,荆条灌丛水分响应时长(20.00 h)>侧柏(19.00 h)>荒草地(8.50 h),荒草地补给速率(0.66%/h)>侧柏(0.63%/h)>荆条灌丛(0.36%/h)。在大雨事件中,荆条灌丛水分响应时长(8.00 h)>侧柏(7.00 h)>荒草地(0.50 h),荒草地土壤水分补给速率(3.99%/h)>侧柏(2.89%/h)>荆条灌丛(1.71%/h)。在暴雨事件中,侧柏水分响应时长(5.00 h)>荆条灌丛(1.00 h)>荒草地(0.50 h),荒草地土壤水分补给速率(7.47%/h)>侧柏(6.78%/h)>荆条灌丛(2.94%/h)。在不同降雨事件中,侧柏平均响应时长(9.50 h)>荆条灌丛(8.63 h)>荒草地(2.50 h),荒草地的平均土壤水分补给量(39.86 mm)和补给速率(3.13%/h)>侧柏(36.66 mm, 2.62%/h)>荆条灌丛(23.28 mm, 1.32%/h)。侧柏、荆条灌丛、荒草地的土壤水分响应时长由大到小依次均为中雨>大雨>小雨>暴雨,土壤水分补给量和补给效率由大到小依次为暴雨>大雨>中雨>小雨。

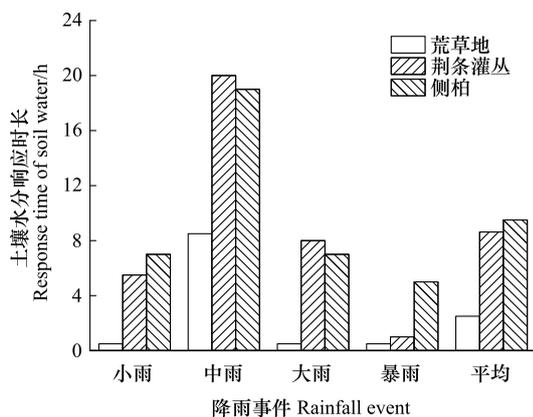


图 3 不同降雨事件土壤水分响应时长

Fig. 3 Response time of soil moisture under different rainfall events

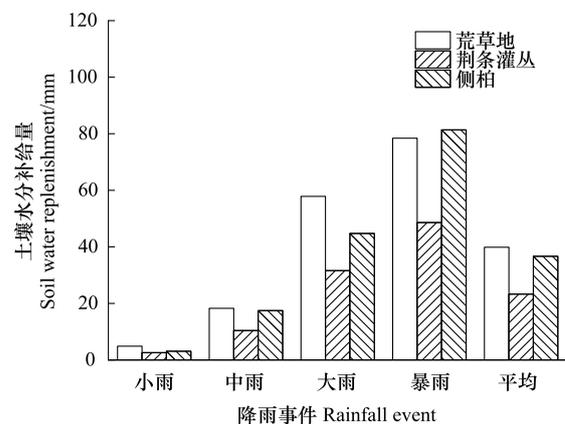


图 4 不同降雨事件土壤水分补给量

Fig. 4 Soil water replenishment under different rainfall events

2.3.2 不同土层土壤水分补给特征

由表 4 可知,小雨事件中荒草地 0—60 cm、荆条灌丛 0—40 cm、侧柏 0—20 cm 土层对降雨发生响应并产生补给作用。三种植被均表现为 0—20 cm 土层土壤水分响应最快,荒草地 40—60 cm、荆条灌丛 20—40 cm、侧柏 0—20 cm 土层土壤水分响应最慢。荒草地土壤水分补给速率大小依次为 0—20 cm>20—40 cm>40—60 cm、荆条灌丛土壤水分补给速率大小依次为 0—20 cm>20—40 cm;中雨、大雨、暴雨事件中三种植被 0—80 cm 土层均对降雨发生响应,三种植被均表现 0—20 cm 土层土壤水分响应最快,60—80 cm 土层响应最慢。荒草地土壤水分补给速率大小依次为 0—20 cm>40—60 cm>60—80 cm>20—40 cm、荆条灌丛各土层土壤水分补给速率大小依次为 0—20 cm>20—40 cm>40—60 cm>60—80 cm、侧柏土壤水分补给速率大小依次为 0—20 cm>40—60 cm>20—40 cm>60—80 cm;大雨事件中荒草地、荆条灌丛各土层土壤水分补给速率大小依次为 20—40 cm>0—20 cm>40—60 cm>60—80 cm,侧柏各土层土壤水分补给速率大小依次为 0—20 cm>20—40 cm>40—60 cm>60—80 cm;暴雨事件中荒草地各土层土壤水分补给速率大小依次为 20—40 cm>40—60 cm>0—20 cm>60—80 cm,荆条灌丛各土层土壤水分补给速率大小依次为 0—20 cm>20—40 cm>40—60 cm>60—80 cm、侧柏各土层土壤水分补给速率大小依次为 20—40 cm>0—20 cm>40—60 cm>60—80 cm。在垂直剖面上,荒草地各土层的土壤水分响应时长大小依次为 60—80 cm>40—60 cm>20—40 cm>0—20 cm,土壤水分补给量大小依次为 0—20 cm>20—40 cm>40—60 cm>60—80 cm,补给速率大小依次为 20—40 cm>0—20 cm>40—60 cm>60—80 cm;荆条灌丛各土层的土壤水分响应时长大小依次为 60—80 cm>40—60 cm>20—40 cm>0—20 cm,土壤水分补给量大小依次为 20—40 cm>

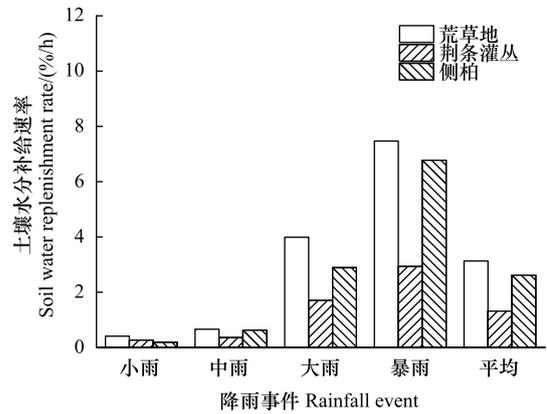


图 5 不同降雨事件土壤水分补给速率

Fig.5 Soil water replenishment rate under different rainfall events

表 4 不同土层土壤水分补给特征

Table 4 Characteristics of soil water replenishment in different soil layers

样地及土层深度/cm Sample plot and soil depth/cm	小雨 Light rain			中雨 Moderate rain			大雨 Heavy rain			暴雨 Rainstorm		
	响应 时长	补给 量	补给 速率	响应 时长	补给 量	补给 速率	响应 时长	补给 量	补给 速率	响应 时长	补给 量	补给 速率
荒草地 Native grassland												
0—20	0.50	2.86	0.32	5.50	8.12	0.34	1.00	20.98	1.45	0.50	32.10	3.21
20—40	5.50	1.72	0.11	8.00	3.92	0.14	1.00	23.02	1.59	0.50	31.34	5.70
40—60	7.00	0.68	0.04	12.50	5.82	0.23	1.00	14.40	0.99	1.50	19.00	3.45
60—80	-	-	-	12.50	4.06	0.16	1.00	0.80	0.13	15.50	20.23	2.25
荆条灌丛 Vitex negundo var. heterophylla shrubland												
0—20	2.00	1.98	0.21	16.50	5.56	0.20	7.50	7.14	0.46	1.00	15.20	1.32
20—40	6.50	1.83	0.17	20.00	3.24	0.14	7.50	11.76	0.71	3.00	15.00	1.20
40—60	-	-	-	20.00	2.82	0.09	9.50	8.18	0.44	7.00	12.16	0.74
60—80	-	-	-	21.00	1.94	0.08	10.00	7.06	0.37	9.50	9.72	0.49
侧柏 Platycladus orientalis												
0—20	9.50	4.62	0.28	16.50	8.98	0.35	7.00	29.48	1.97	2.00	39.92	3.33
20—40	-	-	-	23.00	3.46	0.13	7.00	11.02	1.47	2.00	20.62	4.12
40—60	-	-	-	25.50	5.76	0.20	7.50	4.78	0.64	2.00	11.94	2.39
60—80	-	-	-	29.00	3.06	0.11	7.50	3.28	0.20	2.00	12.74	0.43

40—60 cm>0—20 cm>60—80 cm, 补给速率大小依次为 20—40 cm>0—20 cm>40—60 cm>60—80 cm; 侧柏各土层的土壤水分响应时长大小依次为 60—80 cm>40—60 cm>20—40 cm>0—20 cm, 土壤水分补给量大小依次为 0—20 cm>20—40 cm>40—60 cm>60—80 cm、补给速率大小依次为 20—40 cm>0—20 cm>40—60 cm>60—80 cm。随土层深度增加, 侧柏、荆条灌丛、荒草地的响应时长整体呈现出增加趋势, 而土壤水分补给量、补给速率整体均呈现出减小趋势。

2.4 土壤储水量对降雨的动态响应

土壤储水量指的是一定土层内储存的土壤水分含量, 为探究三种植被土壤储水量对降雨的动态响应, 本文描述了荒草地、荆条灌丛、侧柏在小雨、中雨、大雨、暴雨降雨前、降雨中、以及降雨后的土壤储水量的变化。在四场降雨事件中, 各植被土壤储水量的变化趋势与降雨事件的变化趋势一致, 但时间上存在滞后性。由图 6 可知, 在小雨事件中, 各植被土壤储水量几乎无变化, 三种植被平均土壤储水量为 222.22 mm, 大小依次为侧柏>荒草地>荆条灌丛; 由图 7 可知, 在中雨事件中, 各植被土壤储水量对降雨均存在响应, 荒草地与侧柏对降雨响应较为强烈, 均随降雨量均呈现出升高的趋势, 而荆条灌丛对降雨的响应较弱, 但土壤储水量整体也呈现出升高趋势, 三种植被平均土壤储水量为 204.53 mm, 大小依次为侧柏>荒草地>荆条灌丛; 由图 8 可知, 在大雨事件中, 各植被的土壤储水量均对降雨存在明显响应, 整体呈现出先增高后降低的变化趋势, 三种植被平均土壤储水量为 229.33 mm, 大小依次为侧柏>荒草地>荆条灌丛; 由图 9 可知, 在暴雨事件中, 各植被的土壤储水量对降雨均存在明显响应, 荒草地与侧柏对降雨响应十分强烈, 均随降雨量均呈现出波动升高的趋势, 荆条灌丛对降雨的响应相对较弱, 但三种植被类型的土壤储水量整体均呈现出显著升高趋势。三种植被平均土壤储水量为 224.13 mm, 大小依次为侧柏>荒草地>荆条灌丛。四场降雨事件中三种植被类型的土壤储水量均值大小均为侧柏>荒草地>荆条灌丛, 三种植被类型平均土壤储水量的大小依次为大雨>暴雨>小雨>中雨。

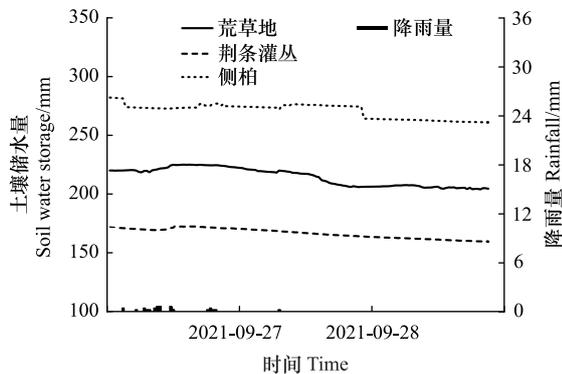


图 6 小雨事件中植被土壤储水量变化

Fig.6 Changes of soil water storage of vegetation during light rain events

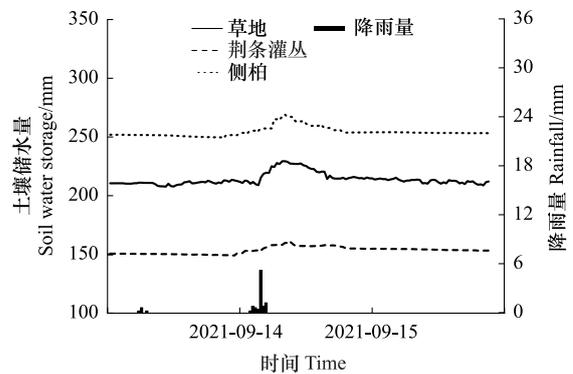


图 7 中雨事件中植被土壤储水量变化

Fig.7 Changes of soil water storage of vegetation during moderate rain events

3 讨论

3.1 不同降雨事件下土壤水分的响应

研究期间共发生 34 次降雨事件, 其中小雨事件占总降雨事件的 58.82%, 占总降雨量的 14.78%, 对降水总量的贡献小, 其余降雨事件占总降雨事件的 41.18%, 占总降雨量的 85.22%, 对降水总量的贡献大。小降雨事件对土壤水分的补给作用有限, 相比之下大降雨事件对土壤水分补给效率更高, 这与其他地区研究结论一致^[3-21]。本研究中随着降雨量的增加, 土壤水分的响应深度也随着增大。这是因为降雨量小时由于植被截留以及地表枯落物层的吸收作用, 导致降雨无法产生下渗, 而降雨量大时更多的水分能渗透到深层土壤^[21], 可使 20 cm 土层以下的土壤水分受到补给。四场降雨事件引起土壤水分平均增长率大小依次为暴雨>大雨>中雨>小雨, 说明暴雨对土壤水分的影响最大。有研究表明, 暴雨过程不能充分补给土壤水分, 水分的损失过

程也快^[22-23],而本研究中四场降雨事件对土壤水分补给作用大小依次为暴雨>大雨>中雨>小雨,这可能是因四场降雨事件对土壤水分的补给均未达到阈值。

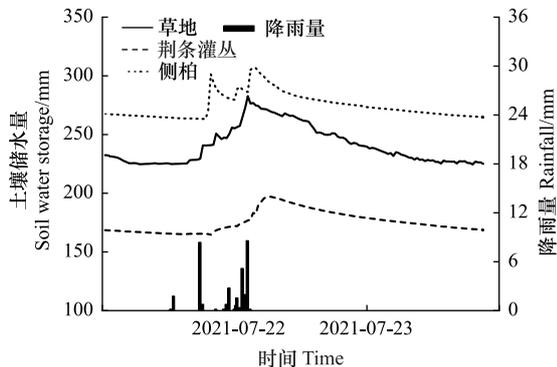


图8 大雨事件中植被土壤储水量变化

Fig.8 Changes of soil water storage of vegetation during heavy rain events

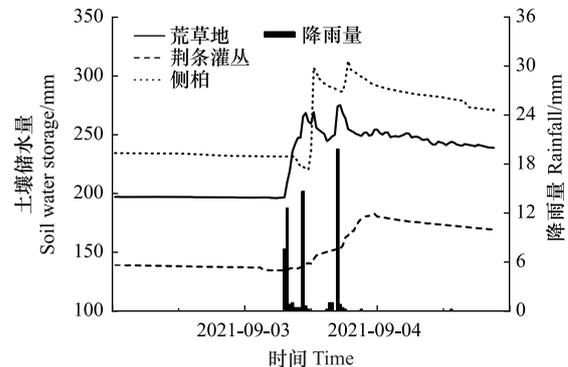


图9 暴雨事件中植被土壤储水量变化

Fig.9 Changes of soil water storage of vegetation during rainstorm events

3.2 不同植被类型土壤水分对降雨响应差异

土壤水分对降雨事件的响应比较复杂^[19],该过程受不仅受到降水事件大小的主导,还受到植被类型和土壤质地等的影响^[24-25]。荒草地的平均补给速率最大(3.13%/h),荆条灌丛的最小(1.32%/h),说明降雨对荒草地的补给效果最好,对荆条灌丛的补给效果最差。这可能是受到了植株形态的影响,导致荒草地土壤水分更容易得到有效补给。荆条灌丛的覆盖度显著高于荒草地和侧柏,在相同降雨条件下,较高的覆盖度容易对降雨产生截留作用^[9],其枯落物层厚度也显著高于荒草地与侧柏,枯落物具有极强的吸持降水能力,导致最终渗入土壤的降水变少^[26],荆条灌丛的补给效率最低。荒草地的平均土壤水分变异系数最高,侧柏最低,这说明荒草地土壤水分活跃程度最高,荆条灌丛次之,侧柏最低。侧柏的平均土壤储水量最高,荆条灌丛最低,这可说明侧柏的土壤水分条件最好,荒草地次之,而荆条灌丛最差。土壤水分状况与植被类型有关^[27],也受土壤粒径组成影响^[28],本研究中荆条灌丛样地土壤为砂质壤土,各土层砂粒含量均大于荒草地与荆条灌丛,砂粒与土壤水分呈负相关^[29-30],导致荆条灌丛储水量低于荒草地与侧柏。

3.3 不同土层深度土壤水分对降雨响应差异

荒草地、荆条灌丛的土壤含水率均随土层深度的增加整体呈现出减少趋势,而侧柏各土层含水率呈现增加趋势,这可能是由于不同植被类型的土壤持水能力导致土壤含水率呈现不同的分布状态^[31-32]。荒草地、侧柏的土壤含水率变异系数随土层深度的增加而减少,说明荒草地、侧柏深层土壤水分差异逐渐减小,而荆条灌丛土壤含水率变异系数随土层深度的增加而增加,说明荆条灌丛深层土壤水分差异逐渐增大。这可能是由于荆条灌丛土壤组成中砂粒含量远大于荒草地与侧柏,土壤水分在下渗过程中虽短时间内影响各层土壤水分状况,但不易被各土层吸收利用。三种植被的土壤水分响应时长、土壤水分补给速率随土层的增大而整体呈现出减小的趋势,这说明浅层土壤水分较深层土壤水分对降雨的响应更敏感^[33],易受降雨的影响,且补给速率更大。

本研究中只对2022年6月1日—10月15日土壤水分进行了观测,观测时间较短,未来需要收集大量降雨及土壤水分数据进行更深入的研究。通过上述分析可结合当地天气预报,预测未来土壤水分对不同降雨事件的响应情况,为北京山区水土保持综合治理和生态建设提供理论依据。

4 结论

通过分析北京山区不同植被类型土壤水分对不同强度降雨的响应特征,得出以下结论:

(1) 研究区观测期间内小雨事件的降雨量贡献率为 14.78%, 中雨、大雨、暴雨的降雨量贡献率为 85.22%。大降雨事件在补给土壤水分中占主导作用, 对侧柏、荆条灌丛、荒草地的响应深度均达到 60—80 cm 土层。三种植被的土壤水分补给效果均与降雨量成正比。

(2) 降雨对三种植被的补给速率大小依次为荒草地(3.13%/h) > 侧柏(2.62%/h) > 荆条灌丛(1.32%/h), 降雨对荒草地的补给效果最好, 对荆条灌丛的补给效果最差。三种植被的平均土壤水分变异系数大小依次为荒草地(9.41%) > 荆条灌丛(8.09%) > 侧柏(6.92%), 侧柏、荒草地深层土壤水分差异逐渐减小, 荆条灌丛则增大。植被类型和土壤条件影响土壤储水量, 三种植被的土壤储水量大小依次为侧柏 > 荒草地 > 荆条灌丛。

(3) 荒草地、荆条灌丛剖面上土壤水分呈现减少趋势, 侧柏则呈现出增加趋势, 植被类型影响剖面土壤水分分布; 三种植被剖面上平均最大补给速率均发生在 20—40 cm 土层, 大小依次为 1.88%/h、0.44%/h、1.43%/h, 说明降雨对浅层土壤的补给效果优于对深层土壤的补给效果。

参考文献 (References):

- [1] Zhang K, Wang Q Q, Chao L J, Ye J Y, Li Z J, Yu Z B, Yang T, Ju Q. Ground observation-based analysis of soil moisture spatiotemporal variability across a humid to semi-humid transitional zone in China. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 903-914.
- [2] Xu Q, Liu S R, Wan X C, Jiang C Q, Song X F, Wang J X. Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(25): 3800-3809.
- [3] 李新乐, 吴波, 张建平, 辛智鸣, 董雪, 段瑞兵. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应. *生态学报*, 2019, 39(15): 5701-5708.
- [4] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, Bonan G, Chan E, Cox P, Gordon C T, Kanae S, Kowalczyk E, Lawrence D, Liu P, Lu C H, Malyshev S, McAvaney B, Mitchell K, Mocko D, Oki T, Oleson K, Pitman A, Sud Y C, Taylor C M, Verseghy D, Vasic R, Xue Y K, Yamada T. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, 305(5687): 1138-1140.
- [5] Farrick K K, Branfireun B A. Soil water storage, rainfall and runoff relationships in a tropical dry forest catchment. *Water Resources Research*, 2014, 50(12): 9236-9250.
- [6] 杨磊, 张涵丹, 陈利顶. 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(4): 457-466.
- [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] 王亚琳, 周秋文, 谢雪梅, 严卫红, 彭大为, 韦小茶, 唐欣, 袁双双. 湿润喀斯特地区冬季灌丛土壤水分对降雨的响应. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(6): 229-235.
- [9] 景建生, 刘子琦, 李渊, 王进, 罗鼎, 蔡路路. 石漠化治理区不同植被类型浅层土壤水分对降雨的响应. *灌溉排水学报*, 2020, 39(3): 100-109.
- [10] Yinglan A, Wang G Q, Sun W C, Xue B L, Kiem A. Stratification response of soil water content during rainfall events under different rainfall patterns. *Hydrological Processes*, 2018, 32(20): 3128-3139.
- [11] Liu X P, He Y H, Zhang T H, Zhao X Y, Li Y Q, Zhang L M, Wei S L, Yun J Y, Yue X F. The response of infiltration depth, evaporation, and soil water replenishment to rainfall in mobile dunes in the Horqin Sandy Land, Northern China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12): 8699-8708.
- [12] 石明明, 王晓敏, 陈奇, 韩炳宏, 周秉荣, 肖建设, 肖宏斌. 高寒草地干湿生态系统土壤水分及入渗对降水的响应. *草业学报*, 2021, 30(12): 49-58.
- [13] 茹豪, 张建军, 张琦, 冯换成, 王丹丹, 王春香, 丁杨, 李玉婷. 晋西黄土区雨养果园土壤水分动态及对降雨的响应. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 36-42.
- [14] 高露, 张圣微, 朱仲元, 高文龙, 杜银龙. 干旱半干旱区退化草地土壤水分变化及其对降雨时间格局的响应. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 195-201.
- [15] 何子森, 肖培青, 郝仕龙, 杨春霞. 黄丘区野外坡面土壤水分变化对次降雨过程的响应. *中国水土保持科学*, 2018, 16(4): 16-24.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 石春茂, 罗娅, 杨胜天, 周秋文, 余军林, 刘洋. 干热河谷区不同坡位土壤水分对降雨的响应特征. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1352-1362.

- [19] 余榕, 刘子琦, 李渊, 蔡路路. 典型石漠化区不同植被土壤水分对降雨的响应. 森林与环境学报, 2021, 41(5): 478-486.
- [20] 张磊, 张晓煜, 卫建国, 韩颖娟, 曹宁. 宁南山区不同种植体系土壤水分变化规律. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 104-108.
- [21] 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.
- [22] 王思砚, 苏维词, 范新瑞, 李灿, 史雪廷. 喀斯特石漠化地区土壤含水量变化影响因素分析——以贵州省普定县为例. 水土保持研究, 2010, 17(3): 171-175, 180.
- [23] 张川, 陈洪松, 聂云鹏, 张伟, 冯腾, 王克林. 喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1225-1232.
- [24] 陈敏玲, 张兵伟, 任婷婷, 王姗姗, 陈世苹. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应. 植物生态学报, 2016, 40(7): 658-668.
- [25] 陈娟, 宋乃平, 陈林, 王兴, 王启学. 荒漠草原不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应. 水土保持学报, 2021, 35(6): 198—206.
- [26] 刘宇, 王彦辉, 郭建斌, 刘泽彬, 张桐, 邓秀秀, 徐丽宏, 左海军. 六盘山华北落叶松人工林土壤水分空间异质性的降雨前后变化及其影响因素. 水土保持学报, 2016, 30(5): 197—204.
- [27] 高阿娟, 刘子琦, 李渊, 李开萍. 喀斯特峡谷区不同经济林地土壤水分变化特征——以贵州花江示范区为例. 中国岩溶, 2020, 39(6): 863-872.
- [28] Bolotov A G, Shein E V, Makarychev S V. Water retention capacity of soils in the Altai region. Eurasian Soil Science, 2019, 52(2): 187-192.
- [29] 张志华, 郭加伟, 桑玉强, 王德彩, 杨柳, 张锦豪, 陈楠楠, 杨喜田. 太行山南麓鱼鳞坑工程对坡面土壤水分空间变异性的影响. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 85-92.
- [30] 李卓, 冯浩, 吴普特, 赵西宁, 郭珍. 砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究. 水土保持学报, 2009, 23(3): 204-208.
- [31] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 崔艳红, 王宁, 王珊珊, 马晓至, 冯星. 晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征. 水土保持学报, 2021, 35(1): 181-187.
- [32] 匡媛媛, 范毅. 滇东南喀斯特小生境土壤水分差异性及其影响因素. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 531-539.
- [33] 沈志强, 华敏, 卢杰, 张程渠, 方江平. 西藏拉萨河谷山地土壤水分对降雨的响应. 中国农村水利水电, 2016(10): 104-107, 115.