

DOI: 10.20103/j.stxb.202302220313

徐莹, 关晋宏, 邓磊. 高寒半干旱区沙地植被土壤水分变化特征及其影响因素. 生态学报, 2024, 44(13): 5554-5566.

Xu Y, Guan J H, Deng L. Characteristics and influencing factors of Soil Moisture Changes in Sandy Vegetation in Alpine and Semiarid Areas. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5554-5566.

高寒半干旱区沙地植被土壤水分变化特征及其影响因素

徐 莹², 关晋宏³, 邓 磊^{1,4,*}

1 广东海洋大学滨海农业学院, 湛江 524088

2 新疆生产建设兵团第八师石河子市林业和草原局, 石河子 832000

3 青海师范大学生命科学学院, 西宁 810008

4 青海省林业和草原项目服务中心, 西宁 810000

摘要: 为揭示高寒半干旱区不同降雨强度对植被差异下沙化土地土壤含水量变化过程的影响。以青海共和盆地东缘黄沙头乔木、灌木和裸地为研究对象, 基于 2020、2021 和 2022 年 5 月—9 月植物生长季土壤含水量、降雨量和细根分布监测数据, 分析 2020 年、2021 年、2022 年各生境 0—200 cm 深度土壤水分对小雨、中雨、大雨的响应。连续动态监测结果表明, 大雨、中雨条件下, 随土层深度的增加土壤水分对降雨的响应时间延长。乔木林和灌木林土壤水分对中雨、大雨最大响应深度为 70 cm、100 cm, 裸地对中雨、大雨最大响应深度为 50 cm、100 cm。随土层深度的增加, 小雨对乔木、灌木、裸地土壤水分的补充作用逐渐降低; 中雨对灌木林土壤水分的补充作用逐渐降低, 乔木林与之相反; 大雨时乔木林、灌木林变异系数呈现 S 型变化, 因此大雨对其土壤水分的补充存在明显的分层利用现象。不同植被类型土壤水分空间变化差异以及对降雨的响应受植被冠层截留对降水再分配的影响, 土壤含水量与环境因子间的主成分分析表明, 郁闭度、叶面积指数、150—200 cm 土壤容重、细根生物量密度、根表面积密度、根长密度、比根长是反映研究区土壤水分的显著因子 ($P < 0.05$)。研究表明不同降雨强度植被土壤含水量存在明显差异, 高寒半干旱区沙化土地乔、灌木植被的建植可提升深层土壤储水能力; 结果可为沙化土地恢复和水土流失防控提供科学依据。

关键词: 高寒半干旱区; 沙化土地; 降雨量; 深层土壤水分; 植被类型

Characteristics and influencing factors of Soil Moisture Changes in Sandy Vegetation in Alpine and Semiarid Areas

XU Ying², GUAN Jinhong³, DENG Lei^{1,4,*}

1 College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2 Shihezi Forestry and Grassland Bureau, Eighth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, China

3 School of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

4 Qinghai Provincial Forestry and Grassland Project Service Center, Xining 810000, China

Abstract: To reveal the impact of different rainfall intensities on the changes in soil moisture content of sandy land under vegetation differences in high-cold and semi-arid regions. Based on the monitoring data of soil moisture, rainfall, and fine root distribution during the plant growth season from May to September 2020, 2021, and 2022, the response of soil moisture at a depth of 0—200 cm in each habitat to light, moderate, and heavy rain was analyzed using trees, shrubs, and bare land in the eastern edge of the Qinghai Gonghe Basin. The continuous dynamic monitoring results indicate that under heavy and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42267072); 青海省重点研发与转化计划 (2022-NK-168)

收稿日期: 2023-02-22; **网络出版日期:** 2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pebbledeng@sina.com

moderate rain conditions, the response time of soil moisture to rainfall increases with the increase of soil depth. The maximum response depths of soil moisture in tree and shrub forests to moderate rain and heavy rain are 70 cm and 100 cm, while the maximum response depths of bare land to moderate rain and heavy rain are 50 cm and 100 cm. As the depth of the soil layer increases, the supplementary effect of light rain on soil moisture of trees, shrubs, and bare land gradually decreases; The supplementary effect of moderate rain on soil moisture in shrublands gradually decreases, while in tree forests it is the opposite; During heavy rain, the coefficient of variation of tree and shrub forests shows an S-shaped change, indicating a significant layered utilization of soil moisture by heavy rain. The spatial variation of soil moisture and its response to rainfall in different vegetation types are influenced by the interception of vegetation canopy on precipitation redistribution. Principal component analysis between soil moisture and environmental factors shows that canopy closure, leaf area index, soil bulk density between 150—200 cm, fine root biomass density, root surface area density, root length density, and specific root length are significant factors reflecting soil moisture in the study area ($P < 0.05$). Research has shown that there are significant differences in soil moisture content of vegetation with different rainfall intensities. The establishment of tree and shrub vegetation on sandy land in alpine and semi-arid regions can enhance the water storage capacity of deep soil layers; The results can provide scientific basis for the restoration of sandy land and the prevention and control of soil erosion.

Key Words: alpine and semiarid areas; sandy land; rainfall; deep soil moisture; vegetation type

土壤水分受生境、气候、植被和土壤性质等因素影响,是限制高寒半干旱区植被生长发育的重要因子,也是维持群落可持续发育的关键^[1-2]。近年来随着人类活动及气候变化的影响,土壤对降水资源的利用逐渐复杂化^[3]。受水资源分布差异、年蒸发量大和地下水位低等环境限制,降雨成为青藏高原北部半干旱区土壤水分的主要补给来源^[4],尤其是降雨强度的差异对区域土壤含水量存在显著影响^[5-6]。系统分析高寒半干旱区降雨强度对不同生境土壤含水量的影响,了解土壤水分对降雨的响应特征与群落稳定性及生态服务状况,有助于沙化土地植被恢复的建设需要。

共和盆地地处青藏高原昆仑山和祁连山过渡带,其脆弱敏感的生态环境导致沙化土地分布广泛,是我国受荒漠化危害相对严重的区域。多年来,各级林草部门通过推广机械沙障、麦草方格和封禁等恢复措施营造人工植被,在防止沙化蔓延、水源涵养、防护农田社区、增储有机碳汇等方面发挥了积极作用^[7],有效遏制了青藏高原生态退化趋势,生态质量稳步提升。人工植被的营建能降低地表风蚀,改善土壤物理和化学性质,是减缓土地沙化的有效途径^[8]。高寒半干旱区独特的环境特性,直接影响植被的生长策略^[9]。目前关于土壤水分动态对降雨强度的响应已开展了大量区域性的研究,黄土丘陵干旱区不同植被类型 0—2 m 土壤含水量随降雨强度变化差异显著^[10];晋西黄土区低密度刺槐林对降水的储存能力显著高于高密度刺槐林^[11];西南喀斯特地区裸地相同坡度下地表与地下径流总量均随降雨强度的增大而增大^[12]。这些研究大多为第二、三阶梯范围内土壤水分变化特征,针对共和盆地群落类型不可替代性和生态系统的脆弱性,其植被土壤水分变化及影响因素的内容涉及较少。开展高寒半干旱区降水差异下的土壤水分空间利用特征研究,可为第一阶梯生态恢复和水土保持提供重要理论支持。

在高海拔、积温低、降水不均和蒸发量大的多重作用下,青海共和盆地东缘形成了 650 km²的沙化土地,水土流失、植被退化等生态环境问题日益严重。本文在共和盆地东缘荒漠生态系统中选取乔木林、灌木林和裸地为研究对象,基于 2020 年、2021 年和 2022 年 5—9 月生长季土壤含水量和降雨量的监测数据,分析不同植被类型 0—200 cm 土壤含水量对降雨强度的响应差异,以为当地不同植被类型对水资源的合理利用及群落经营管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省贵南县黄沙头国家林业和草原局贵南荒漠生态系统定位观测研究站综合实验区

(35°30'15"N, 101°06'08"E), 海拔 3366 m。该区属于高原温带半干旱气候, 多年平均气温 2.4℃、降水量 384 mm、蒸发量 1558.2 mm。土壤主要为风沙土。当地人工植被营造一般在封禁前提下, 进行 1.5 m×1.5 m 麦草沙障固定沙丘, 采取青杨、乌柳等不同植被造林模式。青杨和乌柳采用 2—3 年插杆造林。在造林后第二年对未成活幼苗进行补种, 从而减少造林成活率差异, 造林后禁止放牧、砍伐, 避免人为干扰。主要造林树种为青杨(*Populus cathayana*)、青海云杉(*Picea crassifolia*), 灌木为乌柳(*Salix cheilophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*), 草本植物有冰草(*Agropyron cristatum*)、固沙草(*Orinus thoroldii*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、阿尔泰紫菀(*Heteropappus altaicus*)等。经过二十多年的恢复形成斑块化的荒漠疏林、荒漠灌丛和荒漠景观(图 1)。



图 1 研究区区位图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 数据收集及方法

结合研究区植被类型设置了乔木、灌木、沙化裸地 3 类生境长期监测样地, 样地规格为 20 m×20 m, 各样地基本情况见表 1。每个样地分别设置一套 Geonor T200B 雨雪量计、Campbell CS655 土壤水分传感器, 分别对降雨量、10 cm、30 cm、50 cm、70 cm、100 cm、150 cm、200 cm 土壤含水量开展动态监测, 数据采集器记录频率为 1 次/小时。本研究中降雨强度根据国家气象局降雨量划分规则, 小雨降雨量小于 10 mm, 中雨降雨量 10—25 mm, 大雨为 25—50 mm。实际观测中, 为确保监测数据的准确性, 收集 2020、2021 和 2022 年 5—9 月生长季, 且降雨前后 2 天内均无降雨发生, 每场降雨在 24 小时内结束的独立降雨事件。利用 HemiView 半球影像分析系统测定了林内郁闭度及叶面积指数。采用根钻法(直径 9 cm, 高度 20 cm 的圆柱体)对每块样地都采集根系样品, 去除样地中地表的枯落物及杂物, 分别采集土层为 10 cm、30 cm、50 cm、70 cm、100 cm、150 cm、200 cm 的土柱各 1 个, 将样品用塑料袋分装, 过 0.2 mm 筛, 用流动水冲洗并浸泡, 除去根系表面的杂土、植物残渣, 并将死根分离挑选出来, 处理好的根系放入自封袋中, 在 4℃ 下进行保存, 然后在 80℃ 烘箱中烘干至恒重, 称干质量及统计细根生物量(g), 结合 WinRHIZO 根系扫描分析系统测定各植被类型中的形态特征综合分析^[13]。不同植被类型区植物细根形态特征表明, 青杨细根生物量密度、根长密度、根表面积密度、比根长以 0—20 cm 土层为最大(4.648 g/m³、591.259 m/m³、0.586 m²/m³、2.290 m/g), 各土层青杨细根形态指标差异显著($P < 0.05$)。乌柳细根生物量密度、根长密度、根表面积密度、比根长均以 40—60 cm 土层为最大(1.743 m/g³、154.908 m/m³、0.192 m²/m³、1.675 m/g), 各土层乌柳细根形态指标差异显著($P < 0.05$)。40—60 cm 土层乌柳各细根形态指标均高于青杨(表 1)。

1.3 数据处理

通过 Microsoft Office Excel 2019 对数据进行整理和分析, Origin 2018 软件进行数据的图形处理, 采用 SPSS 18.0 软件进行 one-way ANOVA(单因素方差分析), 并用结合 Duncan 检验比较各参数差异性($P < 0.05$ 水平)。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

2020 年、2021 年、2022 年分别发生 49、60、48 次降雨事件, 总降雨量分别为 322.55 mm、444.89 mm、283.70 mm; 三年间小雨发生次数最多, 分别为 40、27、41 次, 占总降雨次数的 81.63%、45.00%、85.42%, 小雨总降雨量为 168.94 mm、137.20 mm、174.14 mm, 占总降雨量的 52.38%、30.84%、61.38%; 2020 年、2021 年大雨发生次数最少, 共 1 次、3 次, 占总降雨次数的 2.04%、5.00%, 降雨量为 36.04 mm、106.21 mm, 占总降雨量的 11.17%、23.89%, 而 2022 年无大雨发生(表 2)。

表 1 样地概况

Table 1 Basic information of experimental sample plots

项目 Item	土层深度 Soil layer/cm	乔木林 Arbor forest	灌木林 Shrub forest	裸地 Sand land
郁闭度 Canopy density		0.302±0.01a	0.232±0.01a	0.016±0.01b
叶面积指数 Leaf area index		0.251±0.01a	0.177±0.01a	0.012±0.01b
主要物种 Major species		青杨 <i>P. cathayana</i>	乌柳 <i>S. cheilophila</i>	—
胸径 Diameter at breast height/cm		5.15±0.54a	0.9±0.01b	—
树高 Tree height/m		3.42±0.24a	0.76±0.01b	—
冠幅 Crown diameter/(m×m)		(2.8×2.4)±0.63a	(1.2×0.9)±0.02b	—
土壤容重	10	1.643±0.02a	1.659±0.05a	1.665±0.05a
Bulk density/(g/cm ³)	30	1.622±0.02a	1.661±0.05a	1.647±0.04a
	50	1.641±0.04a	1.659±0.05a	1.642±0.04a
	70	1.638±0.02a	1.657±0.04a	1.633±0.03a
	100	1.635±0.02a	1.658±0.04a	1.632±0.03a
	150	1.632±0.02a	1.655±0.05a	1.671±0.05a
	200	1.633±0.02a	1.659±0.05a	1.675±0.05a
细根生物量密度	10	4.648±0.645a	0.866±0.080a	—
Fine root biomass density/(g/m ³)	30	1.691±0.080b	0.843±0.080a	—
	50	1.664±0.120b	1.743±0.110b	—
	70	1.120±0.050c	0.164±0.020c	—
	100	0.807±0.100c	0.274±0.030c	—
	150	0.801±0.100c	0.255±0.030c	—
	200	0.792±0.100c	0.249±0.020c	—
细根根长密度	10	591.259±58.450a	46.120±5.080a	—
Root length density/(m/m ³)	30	124.308±12.280b	54.491±6.080a	—
	50	123.968±11.220b	154.908±10.110b	—
	70	103.181±10.350c	23.105±4.640c	—
	100	49.694±5.500c	35.306±5.060c	—
	150	47.038±5.200c	33.955±5.000c	—
	200	46.593±5.000c	32.034±4.930c	—
细根根表面积密度	10	0.586±0.050a	0.071±0.010a	—
Root surface area density/(m ² /m ³)	30	0.163±0.010b	0.078±0.010a	—
	50	0.164±0.010b	0.192±0.020b	—
	70	0.124±0.010c	0.023±0.010c	—
	100	0.073±0.010c	0.036±0.010c	—
	150	0.060±0.010c	0.033±0.010c	—
	200	0.053±0.010c	0.027±0.010c	—
细根比根长	10	2.290±0.45a	0.179±0.080a	—
Sepecific root length/(m/g)	30	1.323±0.280b	0.580±0.080b	—
	50	1.341±0.220b	1.675±0.110c	—
	70	1.658±0.350c	0.371±0.040b	—
	100	1.109±0.250b	0.788±0.060b	—
	150	1.073±0.140b	0.695±0.050b	—
	200	1.043±0.140b	0.603±0.050b	—

同行(郁闭度、叶面积指数、主要物种、胸径、树高、冠幅)不同小写字母表示显著性水平($P<0.05$),同列(土壤容重、细根生物量密度、细根根长密度、细根根表面积密度、细根比根长)不同小写字母表示显著性水平($P<0.05$)

2.2 雨后土壤含水量的动态变化

选择降雨前后 2 天内均无降雨发生,且每场降雨在 24 小时内结束的独立降雨事件,研究期间符合上述条件的降雨事件合计 8 次。上述不同年份各降雨事件土壤含水量对降雨响应的变化曲线表明(图 2、图 3、图 4)。三年间乔木林土壤含水量对小雨的响应不显著,灌木林、裸地土壤含水量对小雨的响应达 10 cm。

2020 年、2022 年乔木林、灌木林 50 cm、70 cm 土层含水量对中雨的响应存在滞后现象,分别在降雨后 1 天、2 天呈现增大趋势;2021 年乔木林不同土层含水量变化趋势与上述一致,灌木林 70 cm 土层含水量对中雨的响应存在滞后现象,在降雨后 1 天呈现增大趋势。三年间,裸地变化趋势一致,30 cm 土层含水量对中雨的响应存在滞后现象,降雨后 1 天呈现增大趋势。

表 2 不同降雨特征

Table 2 Different rainfall characteristics

降雨类型 Type	降雨次数 Rainfall frequency			占总降雨次数的比例 Percentage of total rainfall/%			总降雨量 Total rainfall/mm		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022
小雨 Light rain	40	27	41	81.63	62.79	85.42	168.94	137.20	174.14
中雨 Moderate rain	8	13	7	16.33	30.23	14.58	110.28	201.47	109.56
大雨 Heavy rain	1	3	—	2.04	6.98	—	36.04	106.21	—

降雨类型 Type	平均降雨量 Average rainfall/mm			占总降雨量的比例 Percentage of total rainfall/%		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
小雨 Light rain	4.22±0.52a	5.08±0.58a	4.25±0.50a	52.38±4.05a	30.84±1.94a	61.38±5.01a
中雨 Moderate rain	13.79±0.98b	15.50±1.04b	15.65±1.12b	34.19±2.01b	45.29±3.32b	38.62±2.23b
大雨 Heavy rain	36.04±2.05c	35.40±2.01c	—	11.17±0.88c	23.87±1.21a	—

同列不同小写字母表示显著性水平 ($P<0.05$)

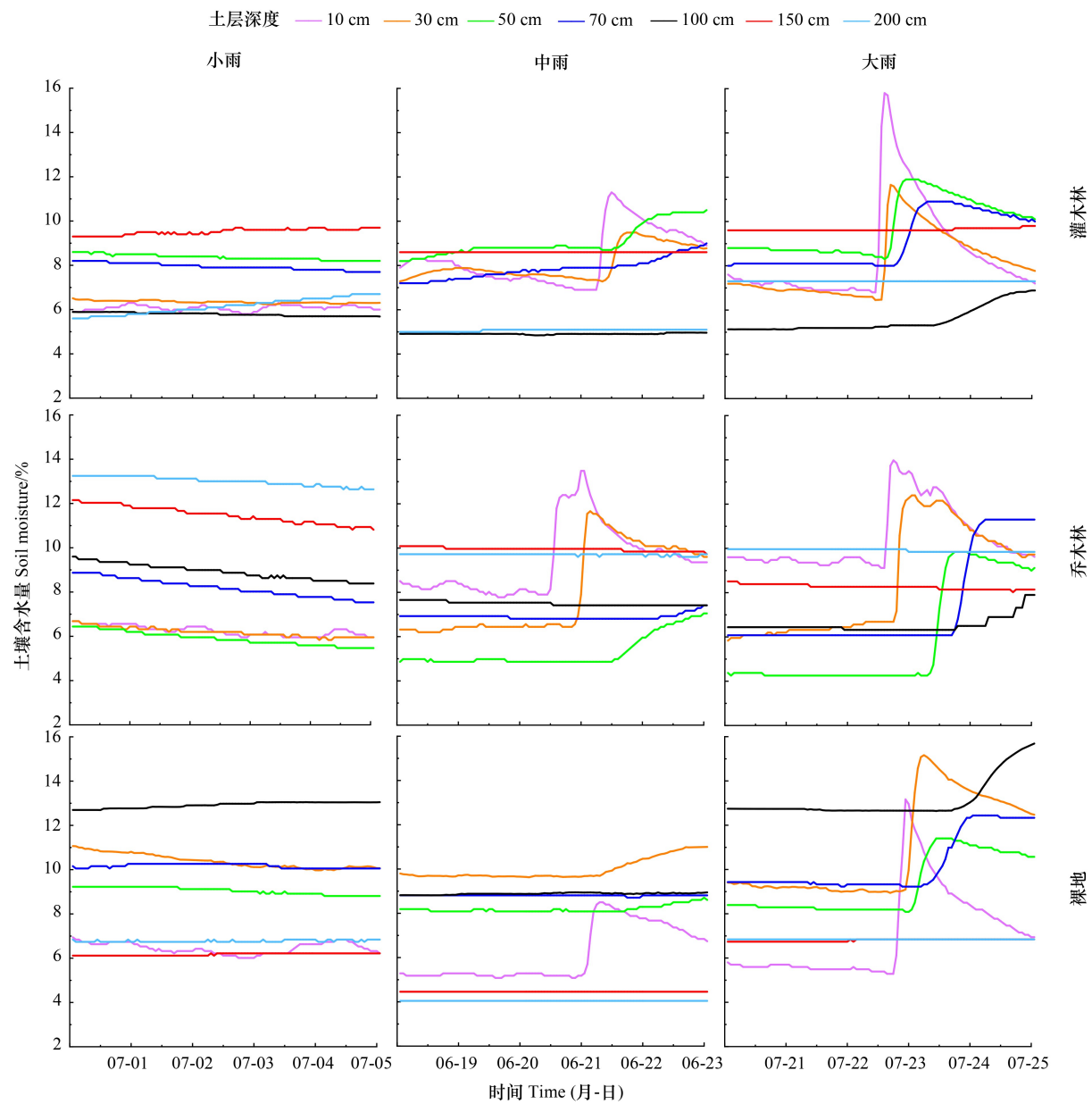


图 2 2020 年不同降雨强度土壤含水量动态曲线

Fig.2 Dynamic curve of soil water content under different rainfall intensity in 2020

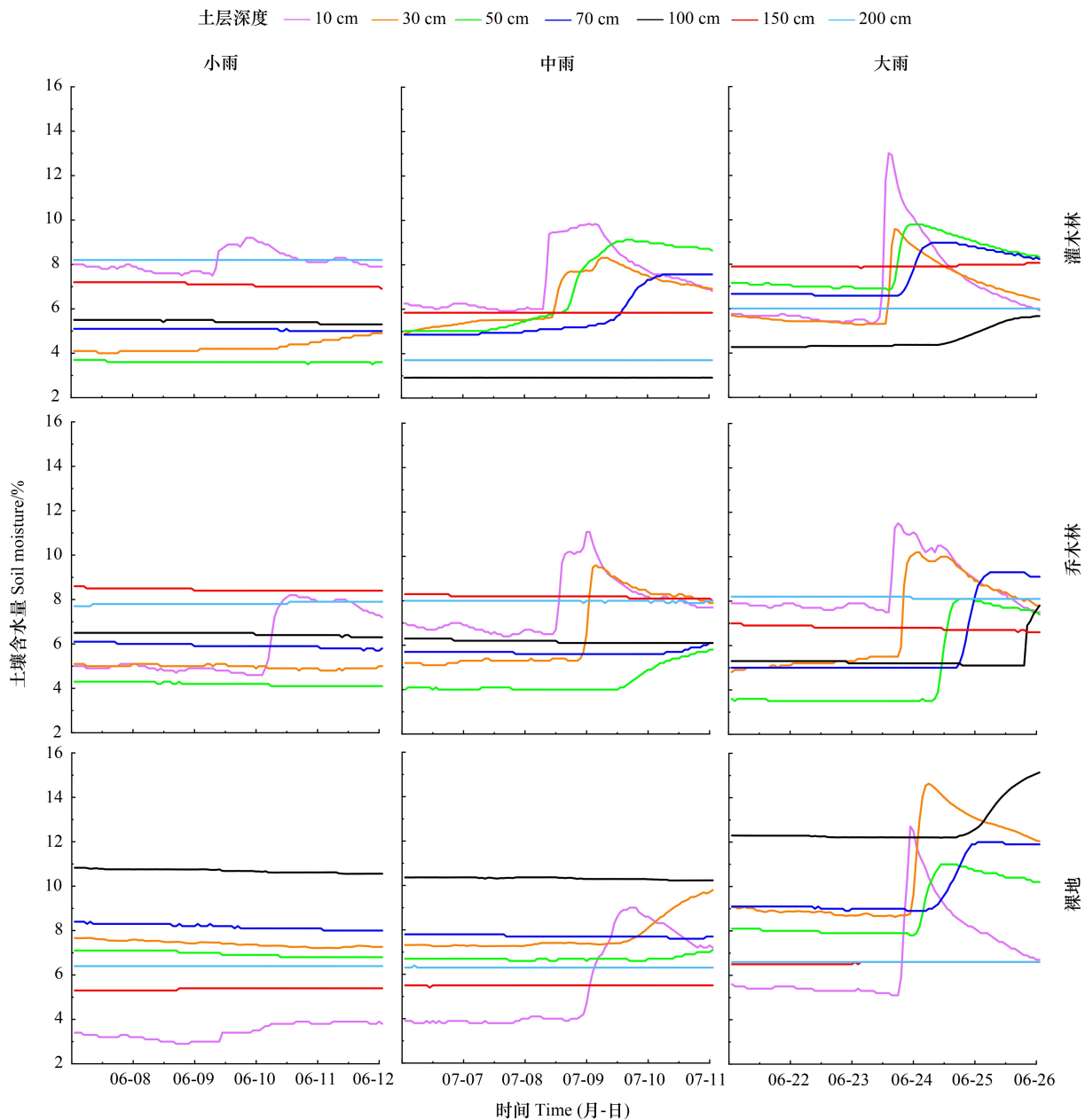


图3 2021年不同降雨强度土壤含水量动态曲线

Fig.3 Dynamic curve of soil water content under different rainfall intensity in 2021

2020年、2021年乔木林50 cm、70 cm土层含水量对大雨的响应存在滞后现象,在降雨后1天呈现先增大后降低趋势;灌木林林内100 cm土层含水量对大雨的响应存在滞后现象,在降雨后1天呈现增大趋势;裸地70 cm土层含水量对大雨的响应存在滞后现象,在降雨后1天呈现增大趋势。

2.3 植被区土壤含水量差异性

2020年灌木林、乔木林、裸地土壤水分对小雨的响应深度为10 cm,10 cm土层达最大入渗量所需时间以裸地最大;灌木林、乔木林、裸地土壤水分对中雨、大雨的响应深度为70 cm、50 cm、30 cm,10 cm、30 cm土层最大入渗量所需时间以裸地为最大,50 cm以乔木林为最大。不同植被类型同一土层土壤水分达最大入渗量所需时间差异显著($P<0.05$) (图5)。

2021年灌木林、乔木林、裸地各土层含水量对小雨无明显响应;乔木林、灌木林土壤水分对中雨的响应深

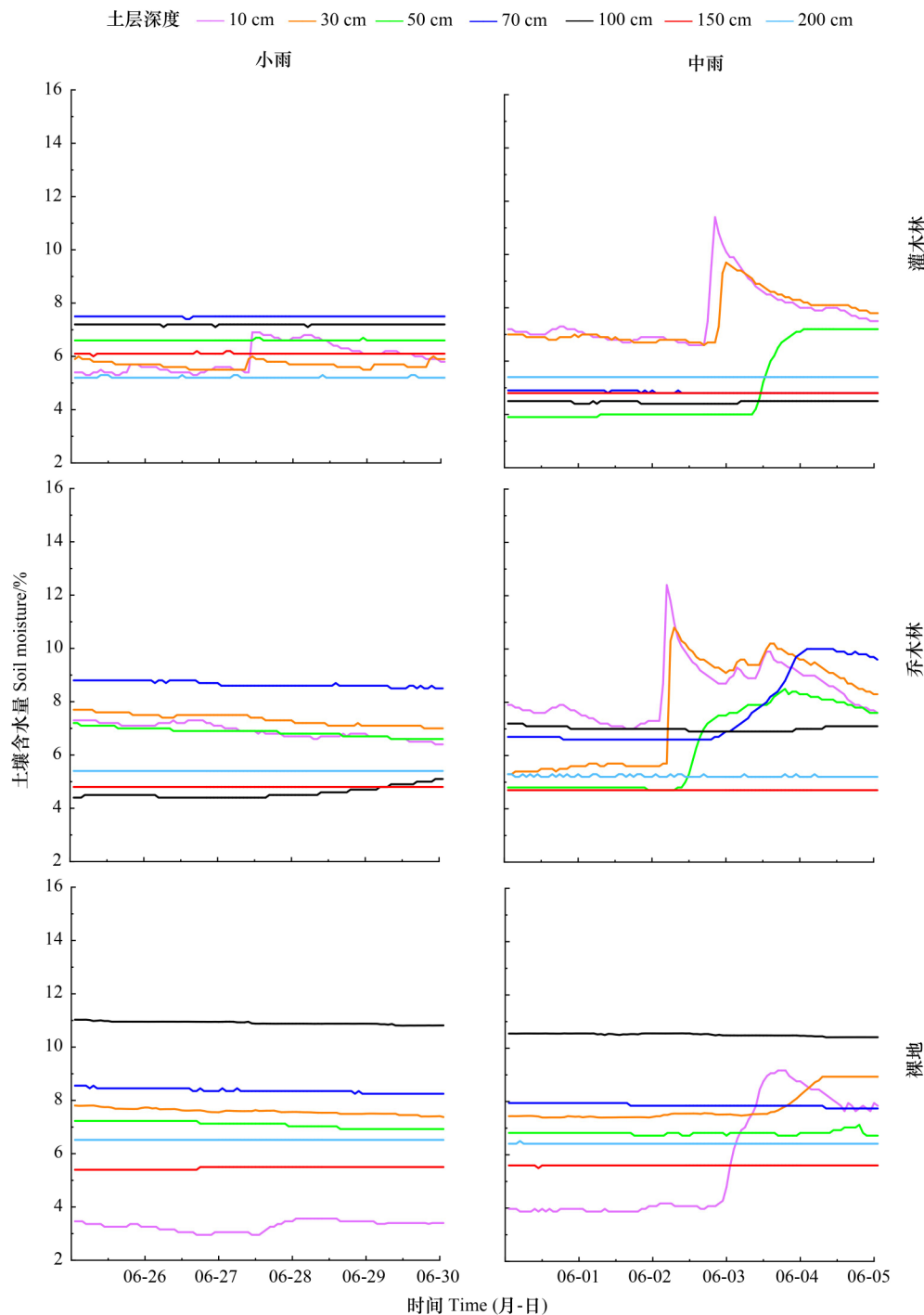


图4 2022年不同降雨强度土壤含水量动态曲线

Fig.4 Dynamic curve of soil water content under different rainfall intensity in 2022

度达 70 cm, 裸地达 50 cm, 10 cm 土层达最大入渗量所需时间表现为灌木林最大, 30—50 cm 土层表现为裸地最大, 70 cm 表现为乔木林最大; 乔木、灌木、裸地土壤水分对大雨的响应深度均达 100 cm, 10 cm、30 cm 土层达最大入渗量所需时间表现为裸地最大, 50 cm、70 cm 表现为乔木林最大, 100 cm 表现为裸地最大, 不同植被类型同一土层土壤水分达最大入渗量所需时间差异显著 ($P < 0.05$) (图 6)。

2022 年灌木林、裸地土壤水分对小雨的响应深度为 10 cm, 乔木林无明显响应, 10 cm 土层达最大入渗量所需时间以裸地最大; 灌木林土壤水分对中雨的响应深度为 70 cm、乔木林为 50 cm、裸地为 30 cm, 10 cm、

30 cm土层达最大入渗量所需时间表现为裸地最大,50 cm 土层表现为灌木林最大,70 cm 土层表现为乔木林最大,不同植被类型同一土层土壤水分达最大入渗量所需时间差异显著($P<0.05$)(图 7)。

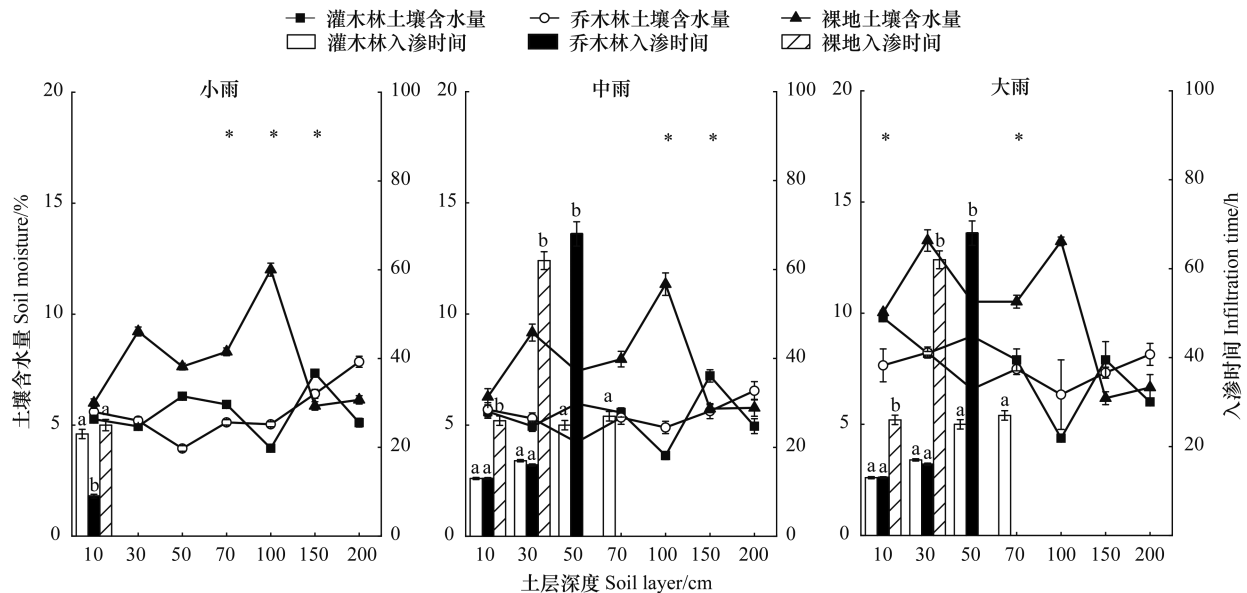


图 5 2020 年不同植被类型土壤水分差异

Fig.5 Soil moisture difference of different vegetation types in 2020

不同小写字母表示同一土层不同植被类型下土壤水分差异显著($P<0.05$)

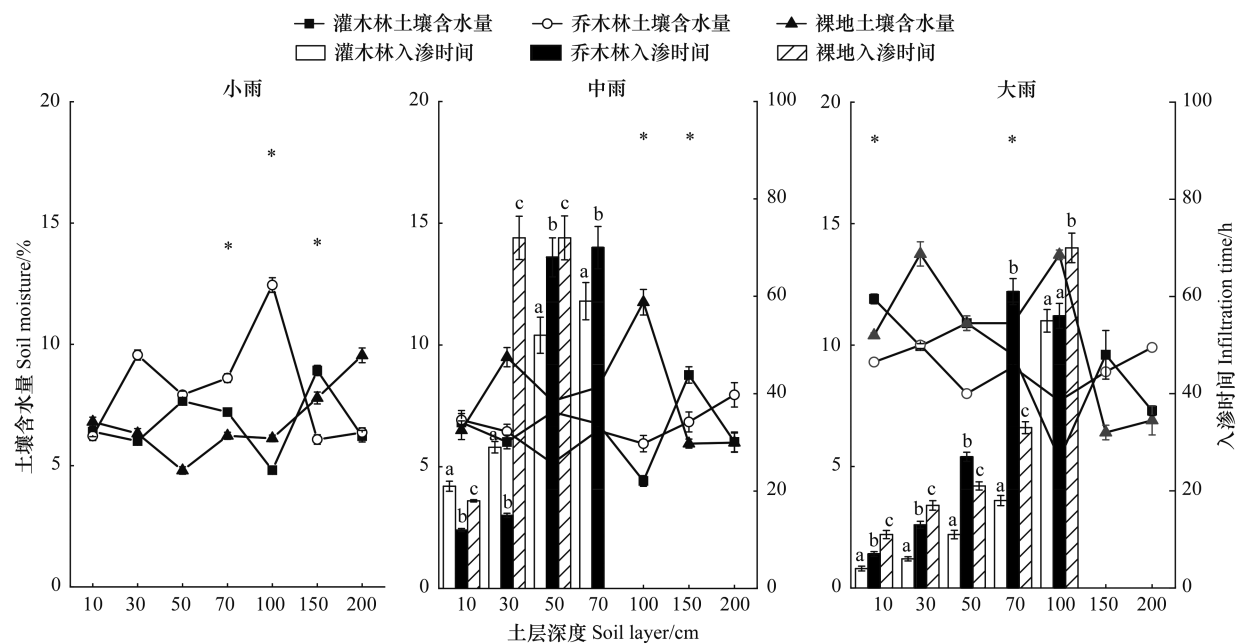


图 6 2021 年不同植被类型土壤水分差异

Fig.6 Soil moisture difference of different vegetation types in 2021

2.4 不同土层土壤体积含水量变化特征

小雨条件下,乔木林土壤含水量变化范围为 3.97%—13.60%,灌木林土壤含水量变化范围为 3.43%—11.10%,裸地变化范围 3.38%—15.81%,三种植被类型的变异系数变化规律一致,均随土层深度增加呈现 S 型

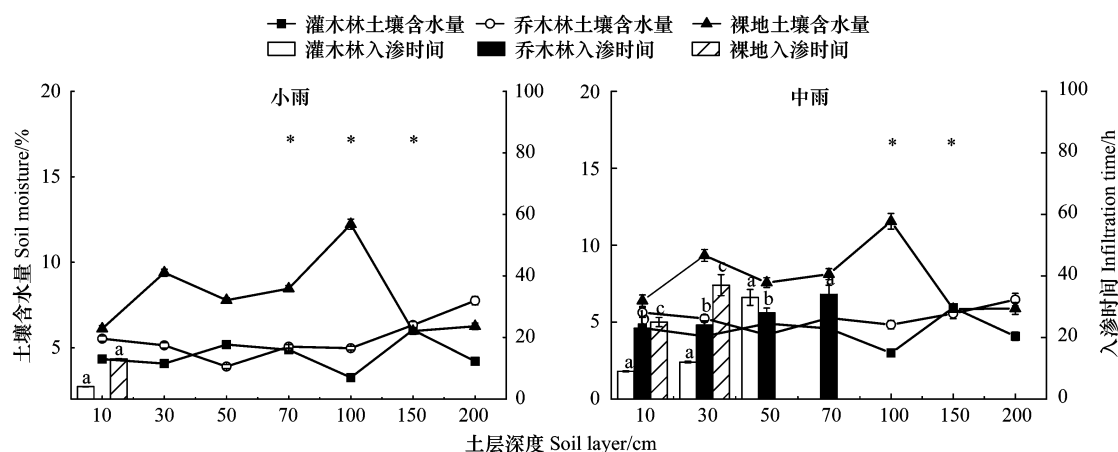


图7 2022年不同植被类型土壤水分差异

Fig.7 Soil moisture difference of different vegetation types in 2022

变化趋势。中雨条件下,乔木林土壤含水量变化范围为3.80%—9.70%,除30 cm土层外,变异系数随土层深度的增加而增大;灌木林变化范围为3.54%—9.80%,裸地变化范围3.80%—10.98%,除深层(150—200 cm)土壤外,变异系数随土层深度的增加而减小。大雨条件下,乔木林土壤含水量变化范围为4.40%—11.00%,灌木林变化范围为5.00%—12.30%,乔木林、灌木林变异系数变化规律趋于一致,呈现S型变化,裸地变化范围5.80%—14.60%,变异系数随土层深度的增加总体呈现增大趋势(表3)。

2.5 土壤含水量与环境因子的关系

土壤含水量与环境因子进行主成分分析,结果对变量的解释达到90.4%,前两轴分别解释74.5%和15.9%(图8)。其中对第1主成分贡献较高的环境因子包括郁闭度(0.986)、叶面积指数LAI(0.980)、0—200 cm细根生物量密度(0.938、0.999、0.846、0.924、0.982、0.977、0.976)、细根根表面积密度(0.914、0.998、0.792、0.937、0.999、0.998、0.999)等,对第二主成分贡献较高的环境因子为10 cm土壤含水量(0.985),通过PCA双序轴第一轴可知,10 cm土层含水量与30—150 cm土壤容重、叶面积指数、郁闭度的向量一致,呈正相关关系;30 cm土层含水量与10 cm土壤容重的向量一致,呈正相关关系;50—70 cm土层含水量与10—200 cm土壤容重方向一致,呈正相关关系;150 cm、200 cm土层含水量与叶面积指数、郁闭度、细根生物量密度、细根根表面积密度、细根根长密度、细根比根长的向量一致,呈正相关关系。30—70 cm土层含水量与叶面积指数、郁闭度、细根生物量密度、细根根表面积密度、细根根长密度、细根比根长的向量相反,呈负相关关系。

3 讨论

3.1 不同植被类型土壤含水量对降雨强度的响应

中雨时,乔木林、灌木林70 cm土壤水分响应时间高于50 cm,大雨时,乔木林70 cm土壤水分响应时间高于50 cm,灌木林100 cm土壤水分响应也存在滞后现象,这与刘小璐等^[14]研究不同降雨条件下,水分入渗过程中,深层土壤水分变化存在滞后效应的结论一致;与任瑞等^[15]研究深层土壤含水量受降雨强度的影响小的结论相似。相同降雨量下,随土层深度的增加,土壤含水量对降雨的响应越长。

3.2 不同植被类型下土壤含水量的差异

不同植被类型土壤水分的差异受植被地上蒸腾作用、根系分布及土壤物理性质的影响^[16-17]。大雨时,表层(10 cm)土壤水分含量以灌木林为最大,这与王宁等^[11]研究晋西黄土区降雨对土壤水分补给度表现为低郁闭度林优于高郁闭度林的结论相似,冠层截留对降雨的再分配使乔木林表层(10 cm)水分补给低于灌木林。由于裸地地表没有植物覆盖,极易产生地表径流,因此裸地10—30 cm土壤含水量均最大。乔木林和灌木林

表 3 不同土层土壤体积含水量变化特征
Table 3 Variation characteristics of soil water content in different soil layers

植被类型 Vegetation type	土层深度 Soil layer/cm	最大值 Max/%			最小值 Min/%			平均值 Average/%			标准差 Standard deviation/%			变异系数 Coefficient of variation/%		
		小雨 Light rain	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain	小雨 Light rain	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain	小雨 Light rain	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain	小雨 Light rain	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain	小雨 Light rain	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain
乔木林 Arbor forest	10	9.10	8.70	10.80	5.00	5.20	7.80	6.80	6.92	9.30	1.16	1.23	1.50	17.03	17.75	16.13
	30	9.03	7.80	10.50	4.70	4.80	9.50	6.32	6.45	10.00	1.21	0.95	0.50	19.18	14.78	5.00
	50	7.30	6.50	10.00	3.90	3.80	6.00	4.80	5.14	8.00	0.92	0.95	2.00	19.11	18.48	25.00
	70	8.80	8.40	9.70	4.60	4.70	8.50	6.23	6.49	9.10	0.88	1.16	0.60	14.14	17.93	6.59
	100	7.90	7.30	11.00	4.64	4.59	4.40	6.12	5.95	7.70	0.82	1.07	3.30	13.31	17.91	42.86
灌木林 Shrub forest	150	11.10	9.00	9.50	5.00	5.00	8.30	7.79	6.84	8.90	1.48	1.30	0.60	18.95	18.94	6.74
	200	13.60	9.70	11.00	5.40	5.40	8.80	9.55	7.95	9.90	1.83	1.58	1.10	19.13	19.86	11.11
	10	11.10	8.60	12.30	4.60	5.00	11.50	6.40	6.82	11.90	1.27	1.16	0.40	19.91	17.01	3.36
	30	9.45	7.63	10.22	4.66	4.46	12.30	6.01	6.02	9.96	0.87	0.89	0.26	14.47	14.81	2.60
	50	9.70	8.80	11.50	6.10	6.00	10.30	7.66	7.25	10.90	0.92	0.94	0.60	12.07	12.96	5.50
裸地 Sand land	70	9.00	8.00	10.60	5.60	5.60	8.60	7.21	6.77	9.60	0.82	0.80	1.00	11.37	11.76	10.42
	100	6.05	5.25	5.64	3.43	3.54	5.00	4.81	4.41	5.32	0.78	0.69	0.32	16.13	15.58	6.01
	150	10.70	9.80	11.40	7.10	7.10	7.80	8.92	8.77	9.60	1.25	1.06	1.80	14.06	12.14	18.75
	200	8.50	7.40	7.60	4.50	4.50	7.00	6.21	6.02	7.30	1.45	1.28	0.30	23.30	21.33	4.11
	10	9.40	8.60	10.60	4.80	4.70	10.20	6.22	6.50	10.40	1.12	1.21	0.20	18.07	18.63	1.92
	30	13.15	10.98	14.60	7.28	7.04	12.90	9.56	9.50	13.75	1.26	1.25	0.85	13.14	13.17	6.19
	50	9.20	9.20	11.40	6.20	6.10	10.40	7.92	7.70	10.90	0.93	1.04	0.50	11.73	13.47	4.59
	70	10.10	9.90	11.40	6.50	6.60	10.40	8.61	8.26	10.90	1.09	1.15	0.50	12.63	13.95	4.59
	100	15.81	13.62	14.03	9.09	9.53	13.40	12.44	11.76	13.71	1.82	1.66	0.31	14.59	14.09	2.30
	150	8.10	7.10	7.00	4.30	4.40	5.80	6.08	5.95	6.40	1.18	1.01	0.60	19.37	16.92	9.38
	200	7.80	7.00	7.90	3.80	3.80	5.90	6.36	5.99	6.90	1.16	1.25	1.00	18.25	20.83	14.49

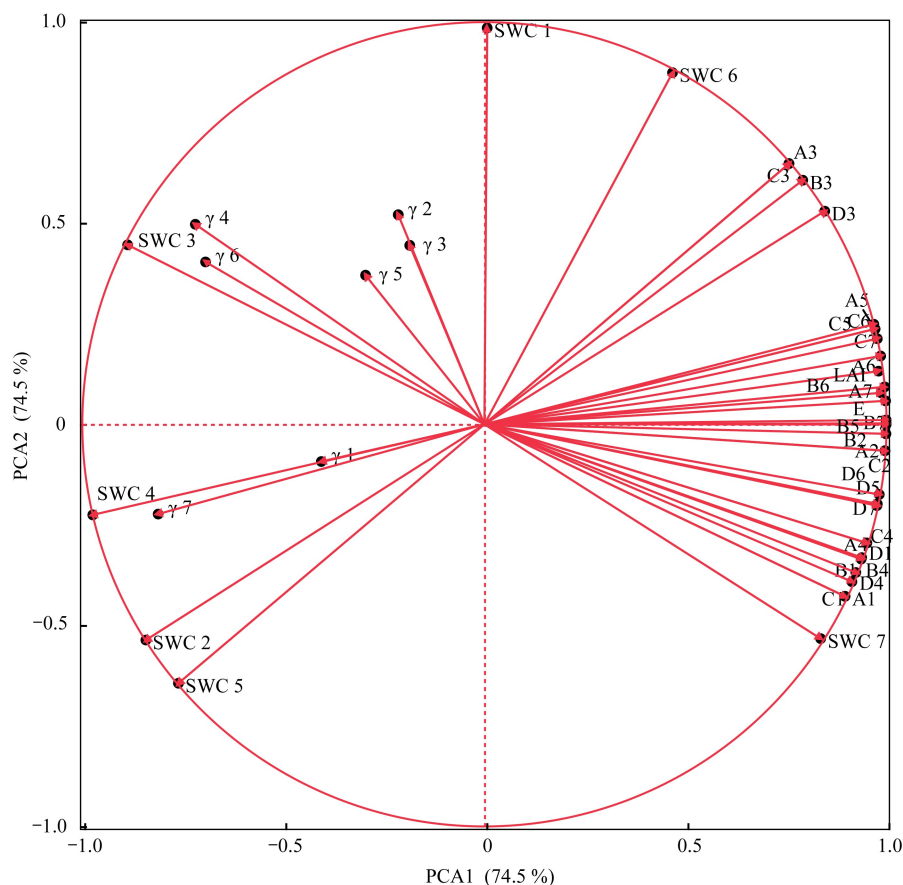


图8 土壤含水量与环境因子主成分分析双序图

Fig.8 Principal component analysis of soil moisture and environmental factors

SWC(1—6):土壤水分(1: 10 cm,2: 30 cm,3: 50 cm,4: 70 cm,5: 100 cm,6: 150 cm,7: 200 cm); γ (1—6):土壤容重(1: 10 cm,2: 30 cm,3: 50 cm,4: 70 cm,5: 100 cm,6: 150 cm,7: 200 cm); A(1—7):细根比根长(1: 10 cm,2: 30 cm,3: 50 cm,4: 70 cm,5: 100 cm,6: 150 cm,7: 200 cm); B(1—7):细根表面积密度(1: 10 cm,2: 30 cm,3: 50 cm,4: 70 cm,5: 100 cm,6: 150 cm,7: 200 cm); C(1—7):细根根长密度(1: 10 cm,2: 30 cm,3: 50 cm,4: 70 cm,5: 100 cm,6: 150 cm,7: 200 cm); D(1—7):细根生物量密度(1: 10 cm,2: 30 cm,3: 50 cm,4: 70 cm,5: 100 cm,6: 150 cm,7: 200 cm)

土壤水分对中雨、大雨的响应深度最大为 70 cm、100 cm,裸地对中雨、大雨的响应深度最大为 50 cm、100 cm,这与赵小婵^[18]研究华北土石区不同密度人工油松林地土壤水分入渗规律相似。由于乔木林、灌木林植物根系分布较多,土壤孔隙度较大,因此水分入渗深度更深。此外,本研究发现,2020 年、2022 年,中雨、大雨下灌木林土壤水分入渗深度高于乔木林,这可能是由于 40—60 cm 乌柳细根各形态指标均高于青杨细根。植被根系能改善土壤孔隙状况,增强其水源涵养能力^[17,19],因此在该土层内灌木林土壤含水量高于乔木林。深层(100 cm、200 cm)土壤含水量仍表现为乔木林最大,这是由于土壤孔隙度随植物根系生长而增大,有利于水分入渗。综上,高强度降雨时,裸地对水分的储层只能达到 1 m 以上,而乔灌木更深层土壤仍具有储存水分的能力。

3.3 各土层土壤含水量的变化特征

土层深度与土壤含水量变异系数具有显著相关性^[20],小雨对植被区深层土壤水分没有显著影响。中雨条件下,乔木林 30 cm 土层水分补给减弱可能是由于该土层容重较其他土层低,加快水分下渗速率。容重与土壤水分入渗能力显著相关^[21—22];灌木林各土层受水分补给的规律与乔木林相反,随土层深度增加灌木林各层受水分补给作用降低,这是由于灌木根系分布格局造成下层土壤孔隙度较上层小,水分下渗受阻,而裸地深

层容重较表层增大,导致水分补给作用降低。大雨条件下,乔木林、灌木林变异系数呈现 S 型变化,因此大雨对土壤水分的补充具有明显的分层利用现象,这是由于各土层细根分布差异导致,与陈嘉嘉等^[23]研究腾格里沙漠人工油蒿群落在降雨条件下不同土层对下渗水分利用不同的结论相同。裸地表层(10 cm)土壤受降水补给的作用最小。地表径流与降雨强度存在极显著正相关性^[12]。

3.4 土壤含水量与环境因子的关系分析

土壤容重增大会抑制植物根系生长,降低土壤透气、透水性,从而影响土壤水分运移^[24—27]。本研究发现,土壤容重是影响土壤水分的关键因子,土壤容重对水分入渗量的影响随土层深度的增加而增大。这与李涛等^[28]研究土壤容重与深层土壤水分入渗量存在显著相关性,入渗量随容重的增大而减小的结论相似。植被冠层截留能改变地表降雨空间分布格局,从而影响地表径流及水分入渗量^[29]。研究区具有水资源分布少、年蒸发量大、土壤含水量低等特点,降水是该区域水分的主要来源。植被冠层对降水的再分配影响土壤水分的补给,而叶面积指数和郁闭度是反映植被地上冠层的特征性指标,与冠层截留量呈显著相关性^[30—31]。叶面积指数、郁闭度与不同植被类型的土壤水分呈显著负相关;因冠层截留现象,随郁闭度和叶面积指数增大,土壤受降雨补给的作用减少。

4 结论

中雨、大雨条件下,土壤水分变化对降雨的响应存在滞后现象,且随土层深度的增加响应时间延长。乔木林和灌木林土壤水分对中雨、大雨的响应深度高于裸地;而裸地由于没有地表覆盖物,极易产生地表径流,因而裸地表层(10—30 cm)土壤含水量最大,随土层深度的增加,小雨对乔木林、灌木层、裸地土壤水分的补充作用逐渐降低;中雨对灌木林土壤水分的补充作用逐渐降低,乔木林与之相反,可能是由于灌木根系分布格局导致;由于各土层细根分布差异导致,大雨条件下,乔木林、灌木林变异系数呈现 S 型变化,因此大雨对其土壤水分的补充明显存在分层利用现象。不同植被类型土壤水分空间变化差异以及对降雨的响应受植被冠层截留对降水再分配影响,土壤含水量与环境因子主成分分析表明,植被郁闭度、叶面积指数、10 cm、30 cm、50 cm、70 cm 和 100 cm 土层含水量是反映研究区降雨量的显著响应因子($P<0.05$)。高强度降雨时,高寒半干旱区裸地对水分的储层只能达到地下 100 cm 深度,乔、灌植被的建植提升了深层土壤储水能力,不同降雨强度植被土壤含水量存在明显差异($P<0.05$)。研究结果能为沙化土地恢复和水土流失防控提供科学依据。此外,本研究存在动态监测土壤水分数量少、植被郁闭度梯度少等不足,今后研究中应增加土壤水分监测数量,丰度植被郁闭度梯度,运用最新生态水文研究方法,从而为高寒半干旱区沙化土地生态修复效果评价、人工植被营建提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 杨凯悦,贾志清,张立恒,李清雪,何凌仙子,戴捷,陈娟. 高寒沙区典型人工林土壤水分空间分布特征研究. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 88-94.
- [2] Xia Y Q, Shao M A. Evaluation of soil water-carrying capacity for vegetation: the concept and the model. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science, 2009, 59(4): 342-348.
- [3] Yu X N, Huang Y M, Li E G, Li X Y, Guo W H. Effects of rainfall and vegetation to soil water input and output processes in the Mu Us Sandy Land, Northwest China. CATENA, 2018, 161: 96-103.
- [4] 程一本. 干旱半干旱地区典型沙地深层土壤水分渗漏过程研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [5] Muldavin E H, Moore D I, Collins S L, Wetherill K R, Lightfoot D C. Aboveground net primary production dynamics in a northern Chihuahuan Desert ecosystem. Oecologia, 2008, 155(1): 123-132.
- [6] Lee K S, Kim J M, Lee D R, Kim Y, Lee D. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes. Journal of Hydrology, 2007, 345(3/4): 199-211.
- [7] 国家林业局. 第五次中国荒漠化和沙化状况公报. 中国绿色时报, 2015-01-05(A02).
- [8] 戴捷. 高寒沙地典型人工灌木林细根固碳作用及其对土壤碳库的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.

- [9] 张琦, 郭琛文, 姚蒙蒙, 董宽虎, 王常慧, 任国华. 放牧强度对半干旱草地优势植物赖草功能性状的影响. 草地学报, 2022, 30(8): 2108-2117.
- [10] 王志强, 刘宝元, 张岩. 不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响. 地理学报, 2008, 63(7): 703-713.
- [11] 王宁, 毕华兴, 孔凌霄, 侯贵荣, 崔艳红, 周巧稚, 常译方. 晋西黄土区不同密度刺槐林地土壤水分补偿特征. 水土保持学报, 2019, 33(4): 255-262.
- [12] 李焱秋, 戴全厚, 甘艺贤, 严友进, 高儒学. 喀斯特裸坡地径流对降雨强度与坡度的响应. 水土保持学报, 2019, 33(5): 28-33.
- [13] 邓磊, 朱春云, 于世川, 祁银燕, 张文辉, 杜盛, 关晋宏. 祁连山青海云杉中龄林混交度对细根形态特征的影响. 林业科学, 2020, 56(1): 191-200.
- [14] 刘小路, 鲁克新, 李鹏, 徐国策, 程圣东, 白璐璐, 魏芳. 不同降雨条件下坡面土壤水分入渗过程研究与模拟. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11): 114-118.
- [15] 任瑞, 于兴修, 徐苗苗, 张家鹏, 胡砚霞, 王伟, 汉强. 覆膜与降雨类型对土壤水分及 NO_3^- -N 淋失的影响. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4352-4359.
- [16] Li X R. Influence of variation of soil spatial heterogeneity on vegetation restoration. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 48(11): 2020-2031.
- [17] 李松阳, 刘康妮, 余杭, 林勇明, 王道杰. 云南省蒋家沟不同植被类型土壤物理性质对水分入渗特征的影响. 山地学报, 2021, 39(6): 867-878.
- [18] 赵小婵. 华北土石山区不同密度人工油松林地土壤水分入渗研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [19] 袁野梅, 柳隽瑶, 高秀丽, 薛璟, 王仁忠. 温带草原 7 种针茅植物根系特征及其对环境因子变化的适应. 生态学报, 2022, 42(21): 8784-8794.
- [20] 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.
- [21] 刘风华, 代智光, 费良军. 容重对红壤条件下涌泉根灌水分入渗能力影响. 水土保持学报, 2019, 33(1): 86-90, 97.
- [22] 王佩佩. 黄土高原典型草本植物根系对土壤入渗的影响及空间差异[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021.
- [23] 陈嘉嘉, 黄磊, 贾鸿飞, 杨利贞, 杨贵森, 姚军, 张艳艳. 腾格里沙漠人工植被区不同植被类型土壤水分垂直变异特征及其动态变化模型. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 126-133.
- [24] 何凌仙子. 青海共和盆地典型固沙植物根系特征及功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [25] Litt G F, Ogden F L, Mojica A, Hendrickx J M H, Kempema E W, Gardner C B, Bretfeld M, Regina J A, Harrison J B J, Cheng Y Y, Lyons W B. Land cover effects on soil infiltration capacity measured using plot scale rainfall simulation in steep tropical Lowlands of Central Panama. Hydrological Processes, 2020, 34(4): 878-897.
- [26] 张岩松, 雷泽勇, 于东伟, 于德良, 周晏平. 沙质草地营造樟子松林后土壤容重的变化及其影响因子. 生态学报, 2019, 39(19): 7144-7152.
- [27] Keller T, Håkansson I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. Geoderma, 2010, 154(3/4): 398-406.
- [28] 李涛, 张建丰, 杨艳芬, 程慧娟, 李剑. 土壤容重对深层坑灌入渗特性影响的试验研究. 中国农业大学学报, 2010, 15(6): 89-94.
- [29] 杨宪龙. 黄土高原北部典型灌丛降水再分配特征及其蒸散耗水规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [30] 赵文玥, 吉喜斌. 干旱区稀疏树木冠层降雨截留蒸发的研究进展与展望. 地球科学进展, 2021, 36(8): 862-879.
- [31] 赵文玥, 吉喜斌, 金博文, 焦丹丹, 张靖琳, 郭飞, 赵丽雯. 西北干旱区泡泡刺灌丛的降雨再分配特征及影响因素分析. 生态学报, 2022, 42(02): 804-817.