

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220511.001.

陈峰峰, 赵江平, 陈云明. 黄土丘陵区典型人工幼林土壤水分特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 190-196.

CHEN Fengfeng, ZHAO Jiangping, CHEN Yunming. Characteristics of Soil Moisture in Typical Young Plantations in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 190-196.

黄土丘陵区典型人工幼林土壤水分特征

陈峰峰^{1,3}, 赵江平¹, 陈云明^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.水利部 黄河水利委员会 黄河水土保持西峰治理监督局, 甘肃 西峰 745000)

摘 要:为明确黄土丘陵区典型人工幼林土壤水分时空变化特征,采用 ECH₂O 土壤水分监测系统,基于标准径流小区坡面土壤水分观测方法,收集土壤水分及气象数据,分析了撂荒地与不同类型人工幼林土壤水分状况及时间稳定性。结果表明:(1)与撂荒地相比,人工幼林土壤含水量整体较低,且具有明显的季节性变化特征,变化趋势基本一致,均随降水量的增加(减少)而升高(降低);(2)不同类型人工林土壤水分垂直分布差异较大,相较于撂荒地,刺槐和油松在 50 cm 深度土层土壤含水量较低,在 80—120 cm 深度土层土壤含水量较高,丁香幼林土壤水分整体偏低;(3)油松和撂荒地土壤水分代表深度分别为 120 cm 和 80 cm,决定系数($R^2 \geq 0.9$)和纳什系数($NSE \geq -0.1$)对该结果的评价显示土壤水分代表深度的选择均是可接受的,刺槐和丁香不同深度土层土壤水分差异较大。研究认为,在黄土丘陵区,人工幼林显著影响土壤水分垂直分布规律,土壤含水量整体呈低态势,相较于撂荒地,刺槐和丁香土壤水分变异性较大,油松较为稳定。

关键词:油松; 刺槐; 丁香; 土壤水分; 时空变化; 时间稳定性; 黄土丘陵区

中图分类号:S152.7⁺5 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2023)01-0190-07

Characteristics of Soil Moisture in Typical Young Plantations in Loess Hilly Region

CHEN Fengfeng^{1,3}, ZHAO Jiangping¹, CHEN Yunming^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Xifeng management supervision of soil and water conservation in the Yellow River, YRCC, MWR, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract: In order to clarify the temporal and spatial changes of soil moisture in typical young plantations in loess hilly areas, soil moisture and meteorological data were collected through using the ECH₂O soil moisture monitoring system and the standard runoff plot slope surface soil moisture observation method, and the soil moisture status and time stability of abandoned land and different types of young plantations were analyzed. The results show that: (1) compared with abandoned land, the soil moisture content of young plantation is generally lower, and has obvious seasonal change characteristics, and the change trend is basically the same, all of which increase or decrease with the increase or decrease of precipitation; (2) the vertical distribution of soil moisture in different types of plantations is quite different; compared with abandoned land, *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* forests have lower soil moisture at a depth of 50 cm, and high soil moisture at a depth of 80—120 cm; the soil moisture of young lilac forest is relatively low as a whole; (3) the representative depths of soil moisture of *Pinus tabulaeformis* and abandoned land are 120 cm and 80 cm, respectively; the evaluation of the results based on the coefficient of determination ($R^2 \geq 0.9$) and the Nash coefficient ($NSE \geq -0.1$) show that the selection of the representative depth of soil moisture is acceptable, and the soil moisture of different depths of *Robinia pseudoacacia* and *Syzygium aromaticum* is quite

different. These research results suggest that in loess hilly areas, young plantations significantly affect the vertical distribution of soil moisture, and the overall soil moisture content is low. Compared with abandoned land, the soil moisture variability of *Robinia pseudoacacia* and *Syzygium aromaticum* is greater, whereas the soil moisture variability of *Pinus tabulaeformis* is more stable.

Keywords: *Pinus tabulaeformis*; *Robinia pseudoacacia*; *Syzygium aromaticum*; soil moisture; temporal and spatial changes; temporal stability; loess hilly area

土壤水分作为土壤系统能量流动和物质循环的载体,对土壤特性、植物生长及流域生态系统有着重要的影响^[1]。黄土丘陵区属于干旱半干旱区,降水量少,土壤水分成为限制该地区植物生长的关键因素,在生态修复过程中发挥着重要作用^[2],而植物在根系吸水、增加入渗、拦截径流等方面影响着土壤水分的时空变化^[3]。近年来,随着黄土丘陵区植被恢复工程的不断推进,以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等为主的人工林成为该区主要植被类型^[4],植被覆盖率明显增加^[5]。然而,土地干燥化及大面积“小老头树”等情况的出现^[6],说明人工林在生态恢复进程中依然存在一些问题。众多学者研究指出人工植被的恢复是导致土壤水分急剧减少的关键因素^[7]。因此,了解黄土丘陵区人工林土壤水分状况,对该区土壤水资源的合理利用及生态环境的改善具有重要意义。

有学者研究发现不同植被类型土壤水分差异显著,且主要受降水量及其分配的影响^[8]。李菲^[9]通过对喀斯特地区不同植被类型土壤水分特征进行研究,得出地表植被类型及其生长状况是小流域土壤水分状况产生差异的关键因子。丁聪等^[10]在植被生长旺季,通过对典型人工林坡面 0—200 cm 深度土壤水分进行测定,发现植被因素对不同土层深度土壤水分的影响存在较大差异。王舒等^[11]研究认为,刺槐林对坡面土壤水分空间分配具有明显的调节作用,15 年以上的刺槐林对深层土壤水分的影响已趋于稳定。Vachaud 等^[12]发现土壤水分空间分布随时间的变化很小,即空间格局表现出随时间不变或变化微弱的现象,并且某一土壤监测点的土壤水分可代表研究区的平均土壤水分状况,将这一现象称为土壤水分的时间稳定性,在区域土壤墒情的预测及水资源量的评估等方面得到世界范围内的研究和应用^[13-14]。韩晓阳等^[15]在黄土塬区的研究中发现,不同土地利用方式的平均土壤含水量及土壤水分时间稳定性均不同。因此,探究黄土丘陵区不同类型人工林土壤水分时空变化特征,对该林分在生态系统内的生长状况及环境适应性具有重要意义。

关于黄土丘陵区不同类型人工林土壤水分时空变化已有较多报道^[16-19],但相关研究多集中于中龄林

或成熟林。在人工造林初期,人工幼林土壤水分状况及时间稳定性如何,相关研究还报道较少^[19]。本研究以黄土丘陵区典型小流域(纸坊沟流域)标准径流小区内刺槐、油松和丁香(*Syzygium aromaticum*)人工幼林为研究对象,以撂荒地作为对照,于 2019 年 4 月—2021 年 4 月连续两年实时观测各小区 20 cm,50 cm,80 cm,120 cm,150 cm 深度土层土壤含水量,分析不同类型人工幼林土壤水分特征,明确不同土层深度土壤水分及其时间稳定性状况,通过相对偏差法及时间稳定性指数特征,确定不同林地土壤水分的代表深度,采用线性回归与纳什系数对土壤水分代表深度进行评估。本研究有助于决策者充分了解干旱半干旱黄土丘陵区典型人工幼林土壤水分状况,并为人工林土壤水分监测样点的布设提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区纸坊沟流域(109°13'46"—109°16'03"E, 36°46'42"—36°46'28"N)。该区属于典型的黄土丘陵沟壑区,海拔 1 010~1 400 m,暖温带半干旱季风气候;年均气温 8.8℃,干燥度 1.5,无霜期 157~194 d。年均降水量 504 mm,7—9 月降雨量占年降雨量的 61.1%,且多为暴雨,年均蒸发量为 1 463 mm。为暖温带落叶阔叶林向温带草原过渡的森林草原带,土壤类型为黄绵土,植被类型主要以人工乔灌木、天然草地以及沟谷农作物为主。经过多年退耕还林等生态修复工程的实施,逐步形成了以人工植被和天然次生植被为主的植被分布格局。乔木植被包括刺槐、油松、侧柏(*Platycladus orientalis*)等,灌木植被包括丁香、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)为主,其中刺槐、油松、丁香约占该流域植被总面积的 50%以上。

1.2 样地设置与数据采集

根据纸坊沟流域沟间地坡面状况,选取较为平整的坡面(坡度约为 25°,坡长 37~62 m,坡向 E94°,半阳坡),在中坡位修建 4 个标准径流小区(20 m×5 m),四周采用浆砌石砖块围护,每 2 个小区之间布设一条过渡带(20 m×1 m)。在单个小区上、中、下 3 个位置随机

选取 3 个样点,利用环刀分 4 层(20,50,80,120 cm)采集原状土壤样品。将原状土壤样品带回实验室,采取烘干法测定其容重,并计算孔隙度(表 1)。在小区中部布设 ECH₂O 土壤水分监测系统(EM50 数据采集器和 5 TM 土壤水分传感器)(METER,USA),监测土壤体积含水量,监测深度为 20 cm,50 cm,80 cm,120 cm,150 cm。同时,在径流小区东侧 15 m 处布设 U30-NRC 小型气象站,同步监测降水量(表 2),于 2018 年 4 月布设完毕。

2019 年 3 月,选取试验地 3 个小区进行人工造林,分别栽植刺槐、油松和丁香,其中,刺槐、油松均为 2 a 幼苗,丁香为 1 a 幼苗,于 2019 年 3 月 27 日完成造林工作,在植物生长季(4—10 月),林地小区内仅长有低矮(不超过 20 cm)草本植物,主要为:小菊(*Matricaria-arecutita*)、风毛菊(*Saussurea japonica*)、青蒿(*Artemisia-carvifolia*)等,覆盖度不足 20%。第 4 个小区始终撂

荒,已形成明显的草本群落,高度约 50 cm,覆盖度约 84%,植物类型主要有:小菊、赖草(*Leymussecalinus*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等。在植物生长季内每月测定 1 次植物生长状况(植物高度、胸/地径、冠幅等)(表 3)。

表 1 不同林地土壤孔隙度

土地利用方式	土层深度			
	20 cm	50 cm	80 cm	120 cm
撂荒地	42.69±3.10	46.54±1.27	49.62±0.49	51.15±0.96
刺槐	44.23±0.28	42.31±1.43	49.62±0.89	41.15±1.21
油松	44.23±0.34	46.15±1.25	46.15±0.27	48.08±1.75
丁香	41.92±3.41	35.77±0.56	38.08±0.56	38.85±0.67

表 2 不同月份降水量 mm

年份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11—3 月
2019	42	22	83	112.4	114	116.2	63.8	45.4
2020	24	21.8	92.6	80.8	411.21	41.6	4.8	69.6

表 3 植物生长状况

幼林类型	树高/m	胸径/ 地径/cm	冠幅 (东西×南北)/(m×m)	行距/m	株距/m	密度/ (株·hm ⁻²)
刺槐	4.82±0.67	3.8±0.5	(2.09±0.29)×(2.08±0.42)	2	2	2500
油松	1.83±0.09	2.9±0.4	(0.76±0.08)×(0.74±0.04)	3	2	1700
丁香	0.69±0.11	1.6±0.4	(0.39±0.10)×(0.35±0.07)	2	1	5000

1.3 研究方法

1.3.1 土壤孔隙度计算 将土壤容重换算为土壤孔隙度,公式为:

$$n = (1 - \frac{\rho_b}{\rho}) \times 100\% \tag{1}$$

式中: n 为土壤孔隙度; ρ_b 为土壤容重; ρ 为土壤密度,本研究中 ρ 采用定值, $\rho=2.6\text{ g/cm}^3$ 。

1.3.2 经典统计 随机变量的离散程度,即变异性的 大小,可用变异系数(CV)的大小来反映,具体计算公式为:

$$CV = \frac{s}{m} \tag{2}$$

式中: s 为标准差; m 为样本平均值。

张川等^[20]认为变异程度可划分为 3 个等级,CV ≤10%为弱变异性;10% ≤CV ≤100%为中等变异性;CV ≥100%为强变异性。

1.3.3 相对偏差法及时间稳定性指数 根据 Vachaud 等^[12]的研究,各观测点的平均相对偏差、标准偏差及时间稳定性指数能够描述土壤水分的时间稳定性特征,计算公式为:

$$\bar{\theta}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \theta_{ij} \tag{3}$$

$$\delta_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j} \tag{4}$$

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \tag{5}$$

$$\sigma(\delta_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2} \tag{6}$$

$$ITS_i = \sqrt{\bar{\delta}_i^2 + \sigma(\delta_i)^2} \tag{7}$$

式中: j 为测定时间; i 为测点位置; θ_{ij} , δ_{ij} 分别为时间 j 时测点 i 处的土壤体积含水量(m^3/m^3 ,%)和平均相对偏差; n 为土壤水分观测次数; m 为观测点的总数; $\bar{\theta}_j$ 为研究区时间 j 的所有测量值的均值; $\bar{\delta}_i$, $\sigma(\delta_i)$ 分别为所有测定时间 j 内各测点的土壤含水量的平均相对差分及其对应的标准偏差; ITS_i 为时间稳定性指数。

基于相对偏差的平均值接近于 0(在 ±5%之内视为接近于 0),相对偏差的标准差 <10%,且时间稳定性指数 <5%的原则,认为土壤水分具有时间稳定性,可代表研究区平均土壤水分状况。

1.3.4 决定系数和纳什系数 将某测点 i 的土壤含水量与不同深度土层的平均土壤含水量进行线性回归,决定系数(R^2)表明二者间的差异, R^2 越大说明测点 i 的土壤含水量与该研究区的平均土壤含水量关系越密切,差异性越小;同时,本研究也采用纳什系数 NSE 对土壤水分代表深度进行评价^[19]。公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (\theta_{ij} - \theta_r)^2}{\sum_{i=1}^T (\theta_{ij} - \bar{\theta}_i)^2} \quad (9)$$

式中: θ_{ij} 与上述含义一致; θ_r 为表示土层深度的土壤体积含水量; $\bar{\theta}_i$ 表示观测值的总平均。NSE 的取值为 $-\infty \sim 1$, NSE 月接近 1, 代表性越好; NSE 接近 0, 表示点位的结果接近观测值的平均值水平, 总体结果可信, 但误差大; NSE 远远小于 0, 则结果不可信^[21]。

1.4 数据处理

本研究使用 Excel 2019 (Microsoft Office, USA) 对土壤水分数据进行数据筛选与变异系数计算, 使用 SPSS 23.0 (IBM SPSS Statistics, USA) 进行单因素方差分析及线性回归等分析, 使用 Origin 2018 (Origin Lab, USA) 进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同类型人工林土壤水分随时间变化规律

2019 年年降水量为 598.80 mm, 高于该地区多年平均降水量 (504 mm); 18.8%, 6—9 月降水量达 425.6 mm, 占全年降水量的 71.1%。2020 年降水量分别为 746.41 mm, 高于该地区多年平均降水量 (504 mm) 48.1%, 6—9 月降水量高达 626.21 mm, 占全年降水量的 79.9% (表 1)。

监测期内, 10 月—次年 1 月, 4 种植被条件下土壤含水量呈减小趋势。随着春季到来, 1—4 月, 4 种植被条件下土壤含水量整体呈增加趋势。2020 年 4—6 月丁香与撂荒地土壤含水量明显减小, 而油松与刺槐土壤水分变化稳定。4 种植被类型土壤含水量在夏季 (或秋季) 均达到年内峰值 (图 1), 2019 年为: 撂荒地 (19.28%) > 刺槐 (19.16%) > 油松 (18.04%) > 丁香 (17.61%); 2020 年为: 撂荒地 (21.23%) > 油松 (21.03%) > 刺槐 (20.72%) > 丁香 (18.35%)。4 种植被条件下土壤水分变化趋势基本一致, 且均随降水量的增加 (或减少) 而升高 (或降低)。

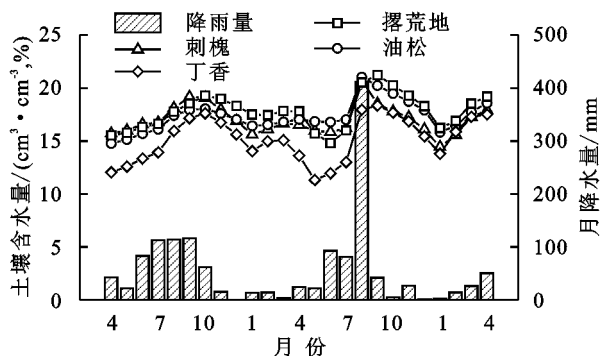


图 1 人工林土壤含水量随降水量的变化

2.2 不同类型人工林土壤水分空间分布特征

由图 2 可知, 在 20 cm 处, 土壤含水量大小顺序为:

丁香 (18.2%) > 刺槐 (16.6%) > 撂荒地 (15.2%) > 油松 (14.0%), 油松林土壤含水量显著低于丁香林 ($p < 0.05$), 而其他各人工林土壤含水量之间无显著差异; 在 50 cm 处, 土壤含水量大小顺序为: 撂荒地 (22.5%) > 油松 (19.6%) > 刺槐 (15.3%) > 丁香 (13.4%), 且各人工林土壤含水量两两之间具有显著差异 ($p < 0.05$); 80 cm 为: 刺槐 (22.4%) > 油松 (20.0%) > 撂荒地 (18.1%) > 丁香 (15.9%), 且各人工林土壤含水量两两之间具有显著差异 ($p < 0.05$); 120 cm 为: 油松 (17.1%) > 刺槐 (15.6%) > 撂荒地 (14.5%) > 丁香 (12.1%), 且各人工林土壤含水量两两之间具有显著差异 ($p < 0.05$); 150 cm 时, 刺槐和油松土壤含水量无显著差异 ($p < 0.05$), 但均显著低于撂荒地 (19.7%) ($p < 0.05$), 丁香土壤含水量 (17.8%) 显著低于撂荒地 ($p < 0.05$)。通过比较单一植被类型条件下, 不同深度土层土壤含水量的分布情况, 得出撂荒地在 50 cm 和 150 cm 深度土层土壤含水量较高, 且在 50—120 cm 处, 随着土层深度的增加, 土壤含水量逐渐降低。刺槐和油松土壤水分在 80 cm 处较高, 而丁香在 20 cm 和 150 cm 深度土层土壤含水量较高。

从变异系数来看 (图 3), 所有测点 CV 值均小于 100%, 未出现强变异性, 撂荒地在 20 cm, 80 cm 和 120 cm 处 $CV > 10\%$, 属于中等变异; 在 50 cm 和 150 cm 处 $CV < 10\%$, 属于弱变异性, 土壤含水量较为稳定; 刺槐地在 20 cm 和 50 cm 处 $CV > 10\%$, 在 80 cm, 120 cm 和 150 cm 处 $CV < 10\%$, 变异性较弱; 油松在 20 cm, 50 cm 和 150 cm 处, 土壤水分变异性属中等变异, 80 cm 和 120 cm 处变异性较弱, 丁香地各土层深度土壤水分 CV 值均高于 10%, 属于中等变异。不同类型人工林土壤水分变异系数随土层深度的增加整体呈逐渐减小的趋势。

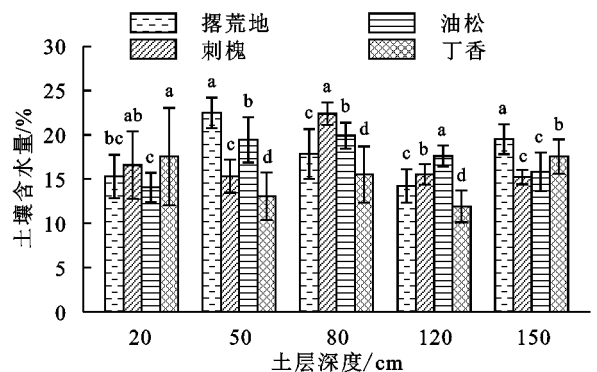


图 2 不同人工幼林在特定土层深度土壤含水量差异

2.3 不同类型人工林土壤水分时间稳定性

将不同土层深度土壤含水量的相对偏差平均值按秩序数由小到大的顺序排列, 并标注出时间稳定性指数 (图 4), 其中, 误差棒为各测点相对应偏差的标准差。可以看出撂荒地、刺槐、油松、丁香平均相对偏

差的变化范围分别为：-21%~26%，-10%~32%，-19%~15%，-20%~17%，土壤水分相对偏差变化幅度的大小次序为：撂荒地>刺槐>丁香>油松。撂荒地和油松可选取的代表性土壤水分观测深度分别为：80 cm,120 cm；刺槐和丁香在本研究中的 5 个不同深度土层均不适宜作为代表土壤水分观测层。通过土壤水分时间稳定性分析，确定了撂荒地和油松土壤含水量代表土层深度，使用代表深度土壤含水量与平均土壤含水量进行回归分析，采用决定系数 R^2 对该结果进行评估，结果显示 R^2 (0.90~0.94) 均较高。

用代表性土层深度土壤含水量与该林分平均土壤含水量月均值进行计算纳什系数(图 5)，结果表明，

撂荒地和油松 NSE 的分别为：-0.1，-0.05，均接近于 0，但未接近于 1，表明该结果总体可信，但仍具有一定误差。

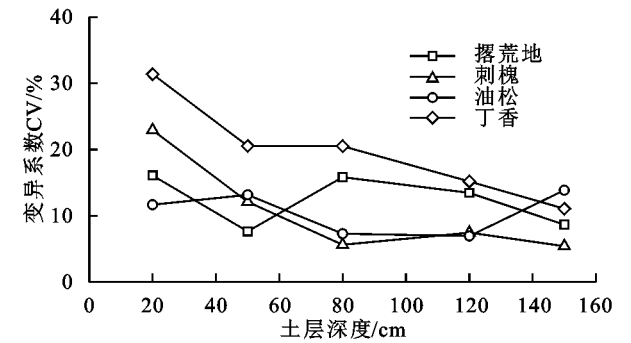


图 3 土壤水分变异系数

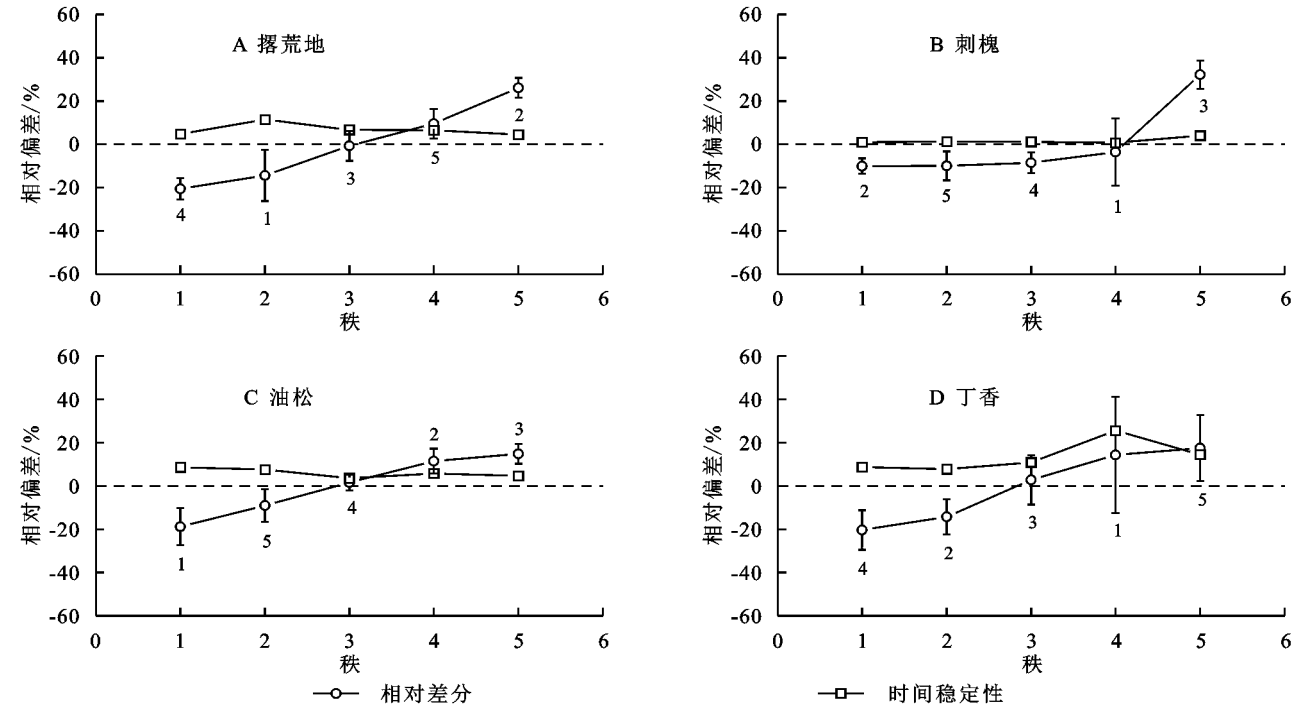


图 4 不同人工幼林土壤水分时间稳定性

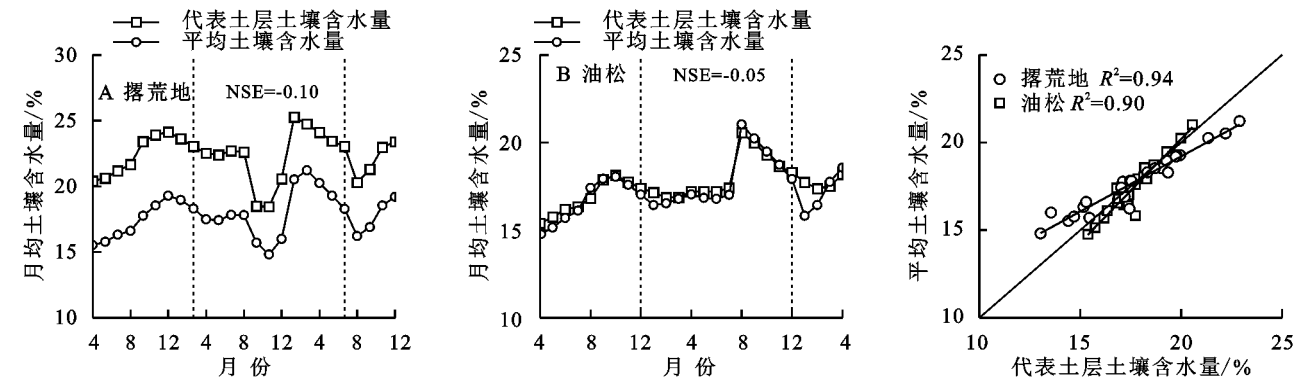


图 5 代表土层深度土壤含水量与平均土壤含水量决定系数及纳什系数

3 讨论

黄土丘陵区土壤水分循环是单纯的降水入渗、径流、地表蒸发和植物蒸腾的过程^[22]。本研究中,不同类型人工林土壤水分与降水量的变化趋势基本保持一致，

表现为夏季升高,秋、冬季降低的趋势。这是由于 4—6 月,土壤温度升高,植物生长迅速,土壤蒸发和植物蒸腾耗水加快,土壤水分消耗剧烈,不同植被覆盖条件下土壤含水量均较低。研究区降水主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 78.2%,此时植物处于生长旺季,叶片已全

部展开,需水量最大,此时恰好与降水同步,降水对土壤水分形成了有效的补给,在满足植物高耗水的同时,多余降水可以蓄积在土壤中。10月至次年1月,降水量较少,此时土壤水分损耗主要为土壤蒸散发及向深层土壤蓄积。土壤水分的季节变化特点与同期降水密切相关^[23],表明降水是土壤水分消涨的基础^[24],这与马文对黄土丘陵区典型人工林土壤水分季节变化规律的研究一致^[25]。本研究中人工林恢复两年内,年内土壤水分峰值均为撂荒地最高。这是因为本研究中幼林植株较小,树冠尚未完全郁闭,未对降雨形成有效截流,且造林对地表土层的破坏,除草使得地表裸露,加之造林初期地表凋落物较少,未能有效延长地表径流汇流时间,造成水分大量流失^[11]。而撂荒地在植物生长季内草本植物居多,植被覆盖度大,雨季集中的降雨被有效拦截,增加了土壤水分入渗,且无乔、灌木植物对土壤水分吸收,土壤含水量相对较大。张晶晶等^[26]研究表明地表植被覆盖度的增加会显著提升土壤含水量,与本研究结果一致。

黄土丘陵区土壤水分空间分布是植物特性、生态气候、土壤质地等综合作用的结果。本研究中丁香地在50—120 cm深度土层土壤含水量显著低于撂荒地。通过比较各小区土壤孔隙度大小,发现丁香地在50—120 cm土层土壤孔隙度均相对较低,毛管数量不足导致同体积下毛管含水量降低,使得水分在土壤中难以贮存、下渗和上移,相同的降水条件下,土壤水分集中于土壤表层,且深层土壤含水量受降水影响较小,这也就进一步解释了相较于撂荒地与其他林地,丁香地在50 cm,80 cm和120 cm土层土壤含水量均为最低的现象。在50 cm深度土层,相较于撂荒地,刺槐和油松地土壤含水量较低,这是由于刺槐和油松根系主要集中在40—60 cm土层,植株优先吸收利用该层土壤水分^[27],使得该层土壤含水量降低。孔凌霄等^[22]研究表明刺槐由于根系大量吸水用于蒸腾,导致40—80 cm土层土壤含水量不断降低,与本研究结果一致。当撂荒地土层深度从50 cm增加到120 cm土层时,土壤含水量持续减少,表明撂荒地土壤水分主要蓄积在50 cm土层,越往深层,得到降水的补给越少。与撂荒地相比,刺槐和油松土壤水分的垂直分布更加均衡。这是由于植物对土壤水分的吸收和利用能缓冲降水在土壤中的集中分布,使不同深度土层土壤水分相对均衡^[28]。

本研究中不同类型人工林土壤水分垂直方向变异系数不同,且随着土层深度的增加,CV值整体呈减小的趋势。这是由于研究区绝对海拔高(1 140~1 160 m),太阳辐射强烈,表层土壤水分受气象胁迫、土壤水分再分配和植物根系吸收的影响较大^[29]。降

雨时,水分首先渗入表层,使得表层水分急剧增加;天晴后,土壤蒸发强烈,表层水分又急剧减少。深层土壤与外界之间有浅层土壤作为过渡,受到浅层土壤的保护作用,且随着土层深度的增加,降水对土壤水分的影响逐渐减小^[22]。这与丁聪等^[30]对不同深度土层土壤水分变异系数的研究结果一致。

土壤水分时间稳定性具有深度依赖性和空间尺度依赖性^[31]。有研究表明深层土壤水分的时间稳定性较浅层土壤水分更强^[32],由于研究区植被与观测季节的不同,也存在浅层土壤水分较深层更稳定的现象^[33]。本研究中撂荒地相对偏差的变化范围最大,表明土壤含水量在垂直方向上差异较大。这主要是由于撂荒地中仅有一年生草本植物生长,而草本植物根系主要埋藏于0—20 cm土层^[34],深层土壤中无根系活动,降水由地表开始入渗,集中贮存在50 cm深度土层中,使上下层土壤水分差异较大。有研究表明植被树冠截流、叶片蒸腾、根系吸水的不同均会影响土壤水分时间稳定性的分布规律^[35]。Hu等^[36]研究指出平均相对差分接近于0,平均相对差分的标准差或时间稳定性指数较小(<5%)的测点具有较高的时间稳定性,可以代表研究区平均土壤含水量。本研究中撂荒地在80 cm,油松在120 cm深度平均相对差分接近于0,且平均相对差分的标准差及时间稳定指数均较小,故该测点土壤含水量可代表研究区平均土壤含水量。油松代表深度较撂荒地更深,达到120 cm,植物可显著地改变包括土壤微生物、养分等土壤性质,进而影响土壤水分的时空变化^[37]。Cassel等^[38]认为,植物根系活动可以削弱土壤水分的时间稳定性,与本研究结果一致。

4 结论

(1) 不同类型人工幼林土壤水分随时间的变化趋势基本一致,主要受降水量的影响。

(2) 不同类型人工幼林土壤水分垂直分布差异较大,相较于撂荒地,各人工林在80—120 cm土层深度处,土壤含水量较高,而在50 cm土层深度处,土壤含水量较低。

(3) 撂荒地和油松土壤含水量代表深度分别为:80 cm,120 cm,决定系数和纳什系数对该结果的评价均是可接受的;刺槐和丁香无较好的土壤水分代表深度。

参考文献:

- [1] 马婧怡,贾宁凤和程曼.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J].生态学报,2018,38(10):3471-3481.
- [2] Berndtsson R, Nodomi K, Yasuda H, et al. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand[J]. Journal of Hydrology, 1996,185(1/4):221-240.
- [3] 常译方,毕华兴,高路博,等.晋西黄土区刺槐和油松林

- 地土壤水分动态变化[J].中国水土保持科学,2014,12(4):21-27.
- [4] 张建军,李慧敏和徐佳佳.黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J].生态学报,2011,31(23):72-82.
- [5] Liu S L, Dong Y H, Li D, et al. Effects of different terrace protection measures in a sloping land consolidation project targeting soil erosion at the slope scale[J]. Ecological Engineering, 2013,53:46-53.
- [6] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- [7] 刘庚,牛俊杰,朱炜敬,等.晋西北黄土丘陵区人工林地土壤水分亏缺评价[J].水土保持通报,2015,35(5):309-314.
- [8] 高思远.晋西黄土区典型人工林地土壤水分动态及对降雨的响应[D].北京:北京林业大学,2019.
- [9] 李菲.典型喀斯特山区不同植被类型土壤水分动态变化及其对植物光合作用的响应[D].贵州:贵州师范大学,2016.
- [10] 丁聪,王冬梅,贺康宁,等.黄土高寒区坡面土壤水分的时间稳定性[J].生态学报,2020,40(1):155-164.
- [11] 王舒,马岚,张栋,等.晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征[J].北京师范大学学报:自然科学版,2016,52(3):253-258.
- [12] Vachaud G A, Silans A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985,49(4):822-828.
- [13] Zhao D Y, Peth S, Wang X Y, et al. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe[J]. Hydrological Processes, 2010,24(18):2507-2519.
- [14] Dari J, Morbidelli R, Saltalippi C, et al. Spatial-temporal variability of soil moisture:Addressing the monitoring at the catchment scale[J]. Journal of Hydrology, 2019,570:436-444.
- [15] 马文,韩晓阳,刘文兆,等.黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J].应用生态学报,2017,28(2):430-438.
- [16] 尚爱军,卜耀军,艾海舰,等.榆林沙区土壤水分时空格局及动态变化规律研究[J].水土保持学报,2008,22(4):86-89.
- [17] 王俊,刘文兆和胡梦珩.黄土丘陵区小流域土壤水分时空变异[J].应用生态学报,2008,19(6):71-77.
- [18] 殷地迟,王立,蔡国军,等.半干旱黄土丘陵区不同植被类型的土壤水分特征及其稳定性[J].水土保持通报,2020,40(1):65-71.
- [19] 陈维梁,王树学,齐统祥,等.黄土丘陵区不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时空动态及其时间稳定性[J].生态学报,2021,41(14):5643-5657.
- [20] 张川,张伟,陈洪松,等.喀斯特典型坡地旱季表层土壤水分时空变异性[J].生态学报,2015,35(19):6326-6334.
- [21] 杜波. WEPP 模型在岩溶石漠化地区适用性评价:以关岭享乐小流域为例[D].贵州:贵州大学,2017.
- [22] 孔凌霄,毕华兴,周巧稚,等.晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征[J].水土保持学报,2018,32(5):163-169.
- [23] 王艳莉,刘立超,高艳红,等.人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J].中国沙漠,2015,35(4):942-950.
- [24] 杨启红,陈丽华,张富,等.土壤水分变异对降雨和植被的响应[J].北京林业大学学报,2008,30(S2):88-94.
- [25] 马文.黄土丘陵区典型人工林土壤水分补给与消耗特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [26] 张晶晶和王力.黄土高原高塬沟壑区坡面表层土壤水分研究[J].水土保持通报,2011,31(1):93-97.
- [27] 赵刚,樊廷录,李尚中,等.黄土旱塬区苹果园土壤水分动态[J].应用生态学报,2015,26(4):1199-1204.
- [28] 席本野,张瑞娜,邸楠,等.树木吸收利用深层土壤水的特征与机制:对人工林培育的启示[J].植物生态学报,2018,42(9):885-905.
- [29] 赵亚楠,周玉蓉和王红梅.宁夏东部荒漠草原灌丛引入下土壤水分空间异质性[J].应用生态学报,2018,29(11):3577-3586.
- [30] 丁聪,王冬梅,贺康宁,等.黄土高寒区坡面土壤水分的时间稳定性[J].生态学报,2020,40(1):155-164.
- [31] Percy M S, Riveros-Iregui D A, Mirus B B, et al. Temporal and spatial variability of shallow soil moisture across four planar hillslopes on a tropical ocean island, San Cristóbal, Galápagos[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020,30:100692.
- [32] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E C, et al. SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture [J]. Remote Sensing of Environment, 2004,92(4):436-446.
- [33] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2001,49(4):723-750.
- [34] 宋坤,潘晓星和穆立蓄.6种草本植物根系土壤抗冲性[J].国土与自然资源研究,2013,28(3):84-85.
- [35] 陈晓莹,陈林,宋乃平,等.荒漠草原两种类型土壤的水分动态对比[J].应用生态学报,2020,31(5):1560-1570.
- [36] Hu W, Shao M, Reichardt K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation[J]. Soil Ence Society of America Journal, 2010,74(3):762-773.
- [37] Zhang B, Cadotte M W, Chen S, et al. Plants alter their vertical root distribution rather than biomass allocation in response to changing precipitation[J]. Ecology, 2019,100(11):1-10.
- [38] Cassel D K, Wendroth O, Nielsen D R. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: Opportunities arising from spatial dependence[J]. Agronomy Journal, 2000,92(4):706-714.