

黄土丘陵区主要树种土壤水分动态变化特征及影响因子

任婧宇¹, 乔雨宁¹, 闫璐瑶², 陈云明^{3,4}

(1.黄河流域水土保持生态环境监测中心, 西安 710021;

2.黄河水土保持西峰治理监督局, 甘肃 庆阳 745000; 3.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; 4.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为揭示黄土丘陵区土壤贮水状况与植被生长的关系,得到该区最优适生树种,以 4 类树种作为研究对象,基于 ECH₂O-5TM 监测系统和 U30-NRC 气象站 2019—2020 年每 30 min 数据,采用 Excel 和 SPSS 对土壤体积含水量、降雨、空气温度、空气相对湿度进行月、季节尺度处理,运用多重差异性比较和曲线估算阐释了该区土壤水分时间变化特征及其与影响因子的关系。结果表明:(1) 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)土壤水分分为耗损期(5—10 月)、衰退期(10 月—次年 1 月)、提升期(2—4 月)及低位期(3—5 月),油松(*Pinus tabulaeformis*)和撂荒地对照(CK)在 1—5 月则表现为稳升期,各树种土壤水分和降雨存在约 30 d 的滞后时差。(2) 50—80 cm 土壤剖面处于水分高峰,随着深度的增加,不同树种土壤水分存在正负变化趋势;油松土壤水分在表层(20 cm)变异程度最弱。(3) 全年与非生长季时期辽东栎土壤水分状况最佳,生长季时期辽东栎、撂荒地对照和油松土壤水分显著大于其余树种,同树种不同时期土壤水分未表现出显著差异。(4) 不同树种土壤水分与温度呈负相关性,与降雨和湿度表现为正相关关系,土壤水分与降雨量之间存在阈值(约 70 mm)。综上,黄土丘陵区主要树种土壤水分在生长季时期变化最为显著,辽东栎和油松土壤水分在不同时间阶段均较为充沛,可作为当地贮水保水树种选择。

关键词:土壤水分;时空动态变化;气象因子;拟合模型;黄土丘陵区

中图分类号:S154.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0073-08

Dynamic Changes and Influencing Factors of Soil Moisture of Main Tree Species in Loess Hilly Region

REN Jingyu¹, QIAO Yuning¹, YAN Luyao², CHEN Yunming^{3,4}

(1.Monitoring Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment of Yellow River Basin,

Xi'an, Shaanxi 710021, China; 2.Yellow River Soil and Water Conservation West Peak Management and

Supervision Bureau, Qingyang, Gansu 745000, China; 3.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; 4.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:In order to reveal the relationship between the soil-water storage status and vegetation growth in the Loess Hilly Area, and obtain optimal suitable tree species in the area, four types of tree species were taken as research objects. Based on the ECH₂O-5TM monitoring system and the U30-NRC weather station's data every 30 min from 2019 to 2020, the temporal variation characteristics of soil-water in this area and its relationship with the influencing factors were explained by using Excel and SPSS in order to process the soil volume water content, rainfall, air temperature, air relative humidity on monthly and seasonal scales, and multiple difference comparisons and curve estimation. The results showed that: (1) Soil moisture of *Robinia pseudoacacia*, *Quercus wutaishanica* and *Platycladus orientalis* was divided into a loss period (May—October), a recession period (October—January of the following year), an ascending period (February—April) and low-level period (March—May), *Pinus tabulaeformis* and abandoned land control (CK) showed a steady ascending period from January to May, and there was a 30-day lag time difference between soil moisture and rainfall for each tree species. (2) The 50—80 cm soil section was at the peak of water content. With the

收稿日期:2021-08-11

修回日期:2021-09-28

资助项目:国家自然科学基金(4177012305);国家重点研发计划课题(2016YFC0501703)

第一作者:任婧宇(1992—),女,陕西渭南人,硕士研究生,工程师,主要从事水土保持监测研究。E-mail:405264565@qq.com

通信作者:陈云明(1967—),男,陕西渭南人,博士,研究员,主要从事植被生态与水土保持研究。E-mail:ymchen@ms.iswc.ac.cn

increase of depth, the soil water content of different tree species had a positive and negative trend. The soil water content of *Pinus tabuliformis* had the weakest variation in the surface layer (20 cm). (3) The soil moisture status of *Quercus wutaishanica* was the best in whole year and non-growing season. During the growing season, the soil moisture of *Quercus wutaishanica*, CK and *Pinus tabuliformis* was significantly higher than that of other tree species. There was no significant difference in soil moisture of the same tree species in different periods. (4) The soil moisture of different tree species was negatively correlated with temperature, and positively correlated with rainfall and humidity. There was a threshold (about 70 mm) between soil moisture and rainfall. In conclusion, the soil moisture of the main tree species in the Loess Hilly Area changed most significantly during the growing season, and the soil moisture of *Quercus wutaishanica* and *Pinus tabuliformis* were abundant in different time periods, which can be selected as local water-storage and water-retention tree species.

Keywords: soil moisture; temporal and spatial dynamics; meteorological factors; fitting model; Loess Hilly region

土壤水分主导着陆地生态系统-水文循环的相互反馈机制,同时也参与地表径流、深层渗漏、蒸散发、植物蒸腾、溶质传递、土壤理化性质转化等进程,是联系土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 能量置换的枢纽变量^[1]。受降水补给与高温散失等综合环境因素影响,土壤水分在时间尺度上存在一定程度的异质性,二者关系较为复杂。早在 20 世纪 70 年代,我国学者徐化成和易宗文对中国不同区域范围的土壤水分季节尺度动态进行研究,指出容重、孔隙度等物理性质不同的 9 种林地土壤含水量有所差异^[2]。经过后续学者的深入探究,有关土壤水分动态变化特征的研究日益增多,主要体现在尺度和研究对象的扩充上。土壤水理论体系主要集中在样地尺度、坡度尺度和区域尺度上,并在乔木群落、灌木群落日趋完善^[3-4]。在森林生态系统中,乔木群落具有最强的水源涵养功能,由于其较高的蒸散率、树冠截留量、树干茎流量以及根系输水量致使该群落水文效益高于灌木群落,同时也是阐释水分合理分配与植物生长受限的关键环节^[5]。特定树种土壤水分特征的差异决定了植物气孔开合程度、光合作用强弱及群落初级净生产力大小^[6]。因此,研究不同树种土壤水分动态变化特征旨在协同乔木层生态水文过程、稳定群落产能与服务功能、维持区域植被可持续恢复与水分收支平衡。

国内外学者对各类树种土壤水分动态研究已涉及众多层面和维度。Pan 等^[7]基于 1979—2016 年 ESA 和 CCI 全球尺度 4 个土壤剖面深度 (7, 28, 100, 225 cm) 水分数据集,得出年尺度下全球 1/3 土壤的水分变化率达到 48.13%,较季节性尺度变化率低 5 倍。另有学者分析了全球 13 个研究区根区土壤水分动态变化,指出气候条件会影响土壤水分变异动态且在丰水年和枯水年有着相反方向的滞后模式^[8]。祁栋灵等^[9]研究了我国亚热带地区橡胶林土壤水分季节变化,得出土壤水分峰、谷值出现在 9 月和 3 月,且二者间相差 2.3 倍。

有研究表明我国水势风蚀交错区及石漠化地区林地土壤水分垂直变化均呈“W”型变化曲线,60—100 cm 土层水分较高,含水量变化范围为 6%~41%^[10-11]。常译方等^[12]将晋西黄土区土壤水分年内变化分为 4 个时期:平稳期、波动期、积累期、消退期。有学者研究了黄土丘陵区不同林地土壤水分的差异性,得出生长季总贮水量规律为:油松 (988.02 mm) > 刺槐 (844.66 mm)^[13]。另有学者比较了半干旱流域影响森林、草地和农地土壤水分的主导因素,结果表明森林土壤水分对降水、LAI 和相对湿度高度敏感^[14]。综上所述,不同区域下,单一小型森林群落中土壤水分动态变化特征已有较多研究成果,但针对黄土丘陵区乡土建群乔木树种土壤水分变异性、贮水耗水协调性、水分利用合理性的研究还略有不足。

自“退耕还林”以来,黄土丘陵区林地覆盖率逐年递增,但生态环境仍较脆弱。该区土壤水分来源仅为天然降雨,降雨转化水资源程度低下导致植被衰败、分布不合理、树种单一等问题,探明该区主要乔木树种土壤水分动态变化特征能提升植被恢复时水分利用的有效性。刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabuliformis*)、辽东栎 (*Quercus wutaishansea*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 是水土保持效益极高的乔木种,能维持较高地力,调控并优化限制性水分与树种生长的关系。然而,目前缺乏在较长时间周期联合阐述 4 个树种土壤水分动态变化特征及限制性因子的研究,故提出以下论题: (1) 不同树种土壤水分季节变化周期性规律与降雨量存在的密切联系; (2) 各树种土壤水分垂直变化趋势、不同深层土壤水分的变异程度; (3) 不同时期各树种土壤水分的差异性; (4) 各树种土壤水分与主要气象因子关联程度的强弱。因此,本文基于黄土丘陵区 4 个乔木树种、1 个对照撂荒地,分析不同土层水分时间动态变化特征及其对非生物因子的响应,以期为黄土丘陵区植被经营管理及水资源可持续利用提供理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况及样地布设

试验区位于陕西省安塞区纸坊沟流域内(109°15.17'E,36°44.90'N),是丘陵沟壑黄土景观中的分水岭,气候类型为暖温带半干旱气候,海拔 1 010~1 431 m,年均气温 8.8℃(最低-23.6℃,最高 36.8℃),无霜期 157 d。年均蒸发量 1 463 mm,年均降雨量 549.1 mm,其中 6—9 月占全年降雨的 70%,年际降雨分布不均。土壤类型主要由壤土(0.002~0.05 mm)构成的黄绵土为主,土质深厚疏松,地下水埋

藏平均深度达 13 m。植被类型属森林草原带,植物供水主要来自天然降雨,优势树种以刺槐、油松、侧柏、山杏(*Armeniaca sibirica*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)为主。

1.2 试验设计

选取坡向(东南 106°)及坡度(15°)一致的 5 个标准径流小区(20 m×5 m),小区依次为 5 a 生刺槐、油松、辽东栎、侧柏(株行距 2 m×3 m)乔木纯林以及对照撂荒地,对各木本植物小区进行每木检尺,并在对照撂荒地以坡上、坡中、坡下设置 3 个小样方(1 m×1 m)调查草本植物生长数据,试验样地概况详见表 1。

表 1 试验样地概况

小区序号	树种(优势种)	密度株数(株/100 m ²)	胸径/基径/cm	株高/m	冠幅/m	盖度/%
4	刺槐	17	4.63	4.06	2.51×2.39	
5	油松	17	3.33	2.07	0.78×0.79	
6	辽东栎	17	2.34	0.89	0.41×0.43	
10	侧柏	17	1.87	1.82	0.62×0.69	
11	蕤核/铁杆蒿/甘草	46/120/38		0.38/0.87/0.51		76.3

注:相邻小区之间设置中间带以消除水化光热差异导致的林地边缘效应。

1.3 测定项目及方法

每个树种小区均采用 3 组 ECH₂O-5TM 土壤水分监测系统(METER Group, Inc., USA),分上、中、下坡位定点定位监测土壤体积含水量动态变化,5 个固定监测深度分别为 20,50,80,120,150 cm,数据收集方式为每 30 min 自动读取并保存,土壤水分测定起止时间为 2019 年 5 月初—2020 年 10 月底,将 3 组土壤水分重复数据平均后进行后续剖析。

降雨(*P*)、空气温度(*T*)和空气湿度(*H*)动态变化数据由 U30-NRC 自动小型气象站(Onset, Inc., USA)进行同步测定,测定周期、测定频率与土壤水分监测系统保持一致。

1.4 数据分析与处理

应用 Microsoft Excel 2019 进行试验数据整合处理,采用 SPSS 26.0 对试验数据进行统计分析,所有图表均由 Origin 2017 绘制。通过单因素方差(One-Way ANOVA)比较不同时期各树种土壤水分的差异性,LSD 法和 Tamhane's T2 法对齐性、非齐性方差进行多重比较,显著性水平为 *p* = 0.05。通过“曲线估算”中的逐步回归选取最优模型种类并构建模型方程明晰土壤水分和环境因子的相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同树种土壤水分动态变化

通过 5 月—次年 10 月土壤水分等值线分析可知,各树种土壤水分峰值均出现在两年生长季的旺盛时期,其中,8—11 月对照、刺槐和侧柏浅层(20—40 cm)水

分维持在较高水平,同时期油松和辽东栎吸收层(40—80 cm)水分较为充沛,而更深层土壤(80—150 cm)由于存在着剧烈蒸散发与缓慢入渗的双重因素,土壤含水量逐步降低;冬春两季(12—5 月)由于当地降水偏低,加上温度骤降至谷底,出现冻融现象,土壤表层形成冻土层,导致不同树种各个深层土壤剖面水分处于低位且相对稳定;自 6 月开始,土壤水分由于雨水补给作用逐步回升,刺槐、侧柏浅层(20—50 cm)水分增长速率较大,其中 8 月份刺槐、侧柏分别在 20 cm 和 50 cm 处出现极大值(0.232,0.238 m³/m³);油松、辽东栎吸收层(40—80 cm)水分增速极快,深层(150 cm)水分也有所回升,其中 8 月份辽东栎在 50 cm 处出现土壤水分峰值(0.253 m³/m³);该时期对照土壤水分在各深层均维持较高水平,其中 8 月份 50 cm 土壤水分高于 150 cm 土壤水分 34.5%(图 1)。

春季(3—5 月)降雨稀缺(48.80 mm),仅为全年降雨的 6.25%,该时期植物展叶与发育的耗水量较大,温度逐渐回暖,土壤蒸发逐步增大,导致土壤水分处于 1 个降水年份内的最低水平,因此该时期为土壤水分低位期;黄土丘陵区独特的气候类型致使年内降水主要集中于夏秋两季(6—10 月),降雨量多达 690.01 mm,占全年降雨量的 88.33%,高温状态导致植物和土壤蒸散发剧烈,各树种土壤水分差值较小,说明耗损程度大,该时期为土壤水分耗损期。各树种在 11 月—次年 1 月不再生长,处于凋萎状态,植物蒸腾与土壤蒸发作用极弱,虽然该时期的降雨量仅为全年的 3.66%,但此时大气温度急剧下降至 0℃ 以下,

土壤出现冻融现象,冻结后的固态水分不计入土壤水分内,因此土壤含水量衰退至较低位,为土壤水分衰退期。冬末春初,随着土壤开始解冻,降雨次数略有增多,不同树种土壤含水量也逐步回升,该时期为土壤水分稳升期。

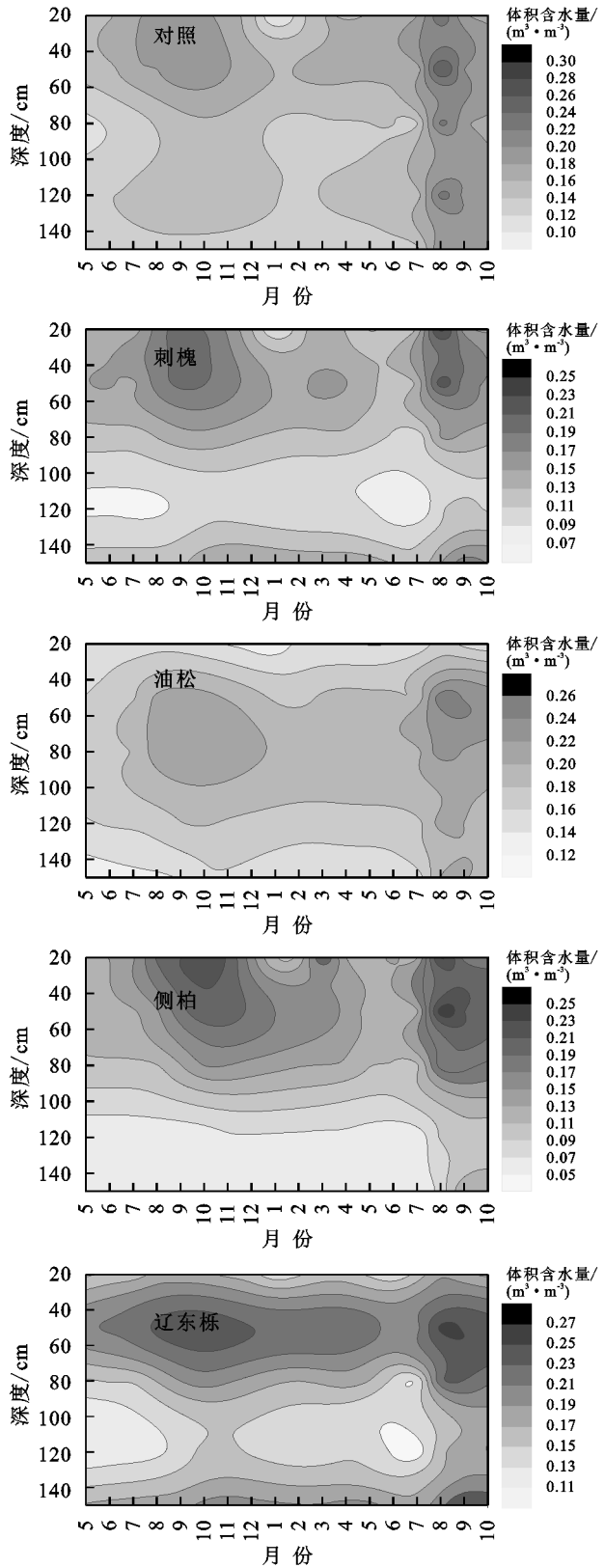


图 1 不同树种土壤水分等值线

在水分输入(降水)与输出(地表径流、深层入渗、地面蒸发与植物蒸腾)的多重机制下,不难发现不同树种土壤水分随降水时间的推移呈现出阶段性的规律:刺槐、辽东栎、侧柏分为 4 个时期,5 月中旬—10 月上旬为土壤水分耗损期,10 月下旬—次年 1 月下旬为土壤水分衰退期,2—3 月为土壤水分提升期(辽东栎为 2—4 月),3—5 月上旬为土壤水分低位期(辽东栎为 4—5 月上旬);而油松和对照则分为 3 个时期,5—10 月为土壤水分耗损期,10 月—次年 1 月为土壤水分衰退期,1—5 月为土壤水分稳升期。此外,明显可以看出各树种土壤水分与降雨存在时间异质性,当降雨在 2019 年 9 月达到高峰时,入渗迟滞效应导致不同树种均滞后 1 个月出现土壤水分高峰(图 2)。

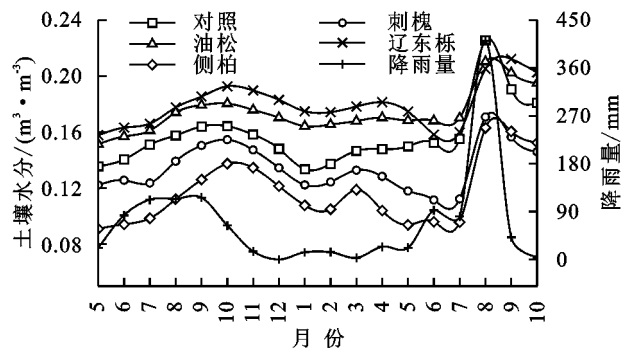


图 2 降雨量和不同树种土壤水分动态特征

2.2 不同树种土壤水分垂直变化

辽东栎、刺槐土壤水分在表层相对较低,20—50 cm 的体积含水量处于高位,随着深度增加,在主根的耗水与入渗特性的影响下,土壤水分持续下降至最低点后(120 cm),在 120—150 cm 逐步回升;油松、侧柏土壤水分随深度增加呈现出“先增后降”的规律,其中,油松在 80 cm 处达到水分极大值($0.20 \text{ m}^3/\text{m}^3$),侧柏在 50 cm 处达到水分极大值($0.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$),表明油松根系分布较侧柏更浅;对照土壤水分在 20—150 cm 呈“M”型变化趋势(图 3)。

变异系数能反映出土壤贮水和失水对外界环境的抗干扰能力,侧柏和刺槐在土壤表层(20 cm)和深层(150 cm)变异系数较大;油松土壤水分在表层(20 cm)受干扰程度最低,50 cm 和 150 cm 深度处于变异系数峰值;辽东栎、对照土壤水分在可利用层(40—60 cm)、深层土壤(150 cm)变幅较小,变异系数随土层深度的增加呈“降—升—降”的趋势。

2.3 不同时期各树种土壤水分差异性

从图 4 中可以看出,全年与非生长季(本年 11 月—次年 4 月)时期各树种土壤水分大小差异具有一致性,均呈现出辽东栎>油松>对照>刺槐>侧柏的次序,对照、刺槐和侧柏两两树种土壤水分差异

显著($p<0.05$)且均显著低于辽东栎和油松,其中全年辽东栎与侧柏土壤含水量相差 53.31%,油松土壤体积含水量仅比辽东栎低 $0.0059\text{ m}^3/\text{m}^3$,非生长季辽东栎土壤水分较对照、刺槐和侧柏分别显著高出

0.24,0.36,0.53 倍($p<0.05$),生长季刺槐和侧柏土壤水分较辽东栎分别显著低于其 24.75%,34.77% ($p<0.05$);同树种不同时期土壤水分均未表现出显著的差异性。

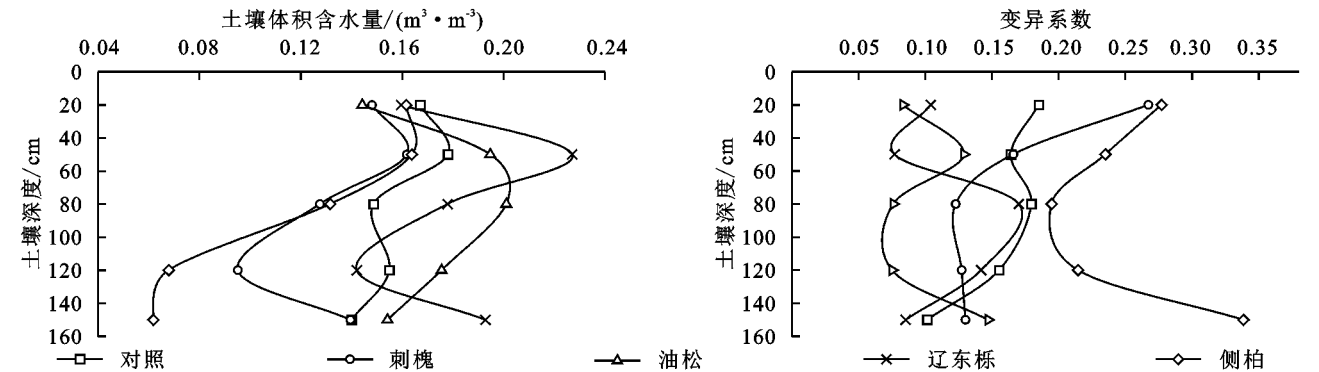
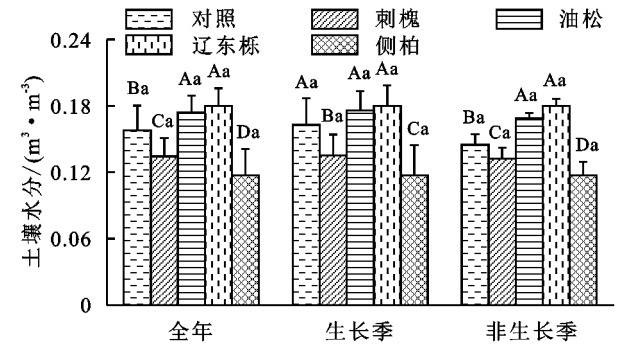


图3 不同树种土壤水分垂直变化特征



注:大写字母表示同一时期不同树种间差异显著($p<0.05$),小写字母表示同一树种不同时期差异显著($p<0.05$)。

图4 不同时期各树种土壤水分差异性

2.4 不同树种土壤水分与环境因子关系

采用“曲线估计”功能构建不同树种生长季(5—10月)土壤水分与环境因子的最优模型,模型种类基本为二、三次方程, R^2 均高于0.780,这说明了气象因子仅在

固定区间内决定土壤水的变化,其对过高或过低的气象指标响应程度弱(表2),同时选取最优拟合模型种类绘制二者关系曲线(图5)。不同树种土壤水分随着降雨的增多上涨速率较快,当月均降雨量达到 70 mm 时,土壤水分骤降,随后再次迅速提升,表明土壤水分与降雨量之间存在阈值,二者存在显著正相关性;当温度较低时,不同树种土壤水含量较高,二者呈现出反比关系;不同树种土壤水分与空气湿度间存在极显著的正相关关系($p<0.01$),当湿度在 57%~80%时,土壤水分增速较缓,当湿度高于 80%后,土壤水分增幅变大。对照、油松和侧柏土壤水分受 3 种环境因子影响程度大小依次为:湿度>温度>降水;刺槐土壤水分受 3 种环境因子影响程度大小依次为:湿度>降水>温度;辽东栎土壤水分受 3 种环境因子影响程度大小依次为:温度>湿度>降雨。

表2 不同树种土壤水分与环境因子的拟合结果

树种	环境因子	函数表达式	模型种类	R^2
对照	P	$VWC=0.001P^3-285.35P^2+87.64P-6.61$	三次	0.797
	T	$VWC=-189.79T^3+42.43T^2+0.001T-0.29$	二次	0.830
	H	$VWC=0.001H^3-19.26H^2+6.57H-0.48$	二次	0.953
刺槐	P	$VWC=0.001P^3-240.6P^2+67.16P-4.54$	三次	0.825
	T	$SW=1/(0.72+0.279e^{-T})$	S 型	0.780
	H	$VWC=0.001H^3-31.66H^2+9.31H-0.6$	三次	0.826
油松	P	$VWC=0.001P^3-386.97P^2+124.48P-10.04$	三次	0.854
	T	$VWC=-192.16T^3+47.59T^2+0.001T-0.41$	三次	0.916
	H	$VWC=-374.88H^2+132.49H-10.88$	二次	0.986
辽东栎	P	$VWC=0.001P^3-270.6P^2+95.79P-8.35$	三次	0.942
	T	$VWC=-538.12T^3+0.001T^2+47.59T-5.23$	三次	0.998
	H	$VWC=0.001H^3-33.68H^2+12.45H-1.07$	三次	0.996
侧柏	P	$VWC=0.001P^3-144.94P^2+33.43P-1.8$	三次	0.849
	T	$VWC=-38.36T^3+0.001T^2+1.33T-0.74$	三次	0.951
	H	$VWC=0.001H^3-20.55H^2+5.11H-0.23$	三次	0.965

注:VWC 为土壤体积含水量; P 为降雨量; T 为环境温度; H 为空气湿度。

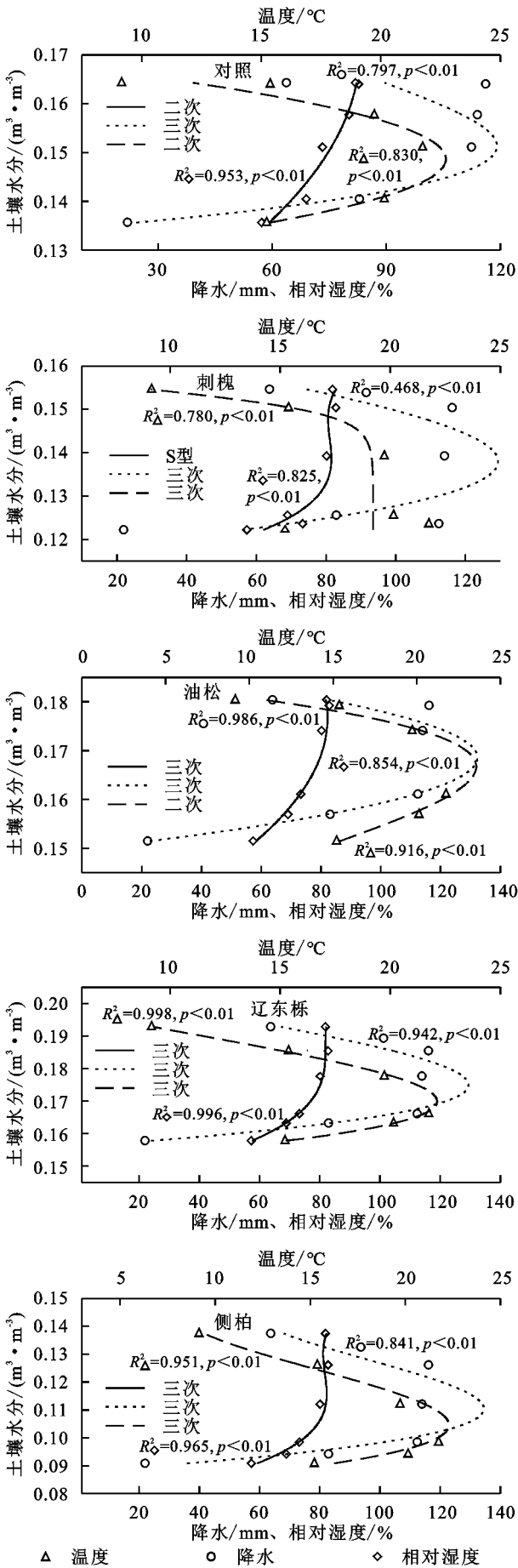


图 5 土壤水分与环境因子之间的拟合关系

3 讨论

3.1 土壤水分的时间变化特征

土壤水分对植物水资源利用程度的短时浮动起着决定性作用,同时受降雨、蒸散发、入渗流失等直接效能的作用,随着时间的推移不同树种土壤水分呈现出差异化规律。本研究指出,8—11 月对照撂荒地、刺槐、侧柏土壤体积含水量在 20—40 cm 维持较高水平,而油松、辽东栎土壤水分则在 40—80 cm 充沛,与 Wei 等^[15]的研究结果一致,养分充足、短水分传输途径、较小水势差的浅层土壤是根系吸水的首要区域,油松根系分布主要集中在 10—40 cm,辽东栎根系生物量在土层深度 > 30 cm 后显著提升,刺槐、侧柏有效根系主要分布在 0—30 cm^[16-18],而撂荒地草本植物根系大多集中在地表。冬春两季各树种土壤水分长时间处于较低水平,这与戴军杰等^[19]对樟树土壤水分时间变化规律保持一致,11 月一次年 2 月,低热低湿低蒸发使得土壤水分补给和消耗活动弱,各树种停止生长,季节性降温效应削弱水分在凋萎过程中的作用,另外固态冻土使得液态水分得以贮存,之后土壤解冻供水与热量储备能保障植物的再次萌发。生长最旺期(8 月)各树种浅层(20, 50 cm)土壤水分均达到年内极大值,变化较为剧烈,这与王志杰^[20]的研究结果一致,造成此现象原因是多场集中且强度较大的降雨能够对各个深层剖面产生影响,雨水的补给作用高于根系吸水及土面蒸发作用。

本研究将刺槐、辽东栎及侧柏土壤水分年际变化划分为 4 个时期:土壤水分耗损期(5—10 月)、衰退期(10 月一次年 1 月)、提升期(2—3 月)以及低位期(3—5 月);油松和对照划分为 3 个时期:土壤水分耗损期(5—10 月)、衰退期(10—次年 1 月)及稳升期(1—5 月),这与众多学者关于非生长季林地土壤水分变化阶段划分保持一致,而生长季具体月份划分则有所出入^[21-22],表明了大量降雨和强烈蒸发导致不同林地及植被类型土壤含水量在生长季浮动范围广且波动剧烈。油松和对照在 1—5 月土壤体积含水量始终保持稳增状态,与田璐^[23]对裸地 1—5 月土壤含水率的研究结果一致,这是由于该时段降雨稀少,两树种耗水量更低且土壤水分入渗深度基本保持不变造成的。

3.2 土壤水分的垂直变化特征

土壤水分垂直变化在一定程度上反映了林地水分消耗能力及土壤的稳定性特征,而变异系数则是土壤稳定程度的直接指标。在本研究中,辽东栎、刺槐土壤水分随深度增加呈现“增—减—增”的趋势,土壤水分在 50 cm 和 150 cm 处出现峰值,与孔凌霄等^[24]结果相同,当

雨水补充量>土壤蒸发量,水分在0—50 cm得到累积,随着主根系耗水作用增强,水分在120 cm骤降至低谷,深层水分得不到补给,因此150 cm低于50 cm土壤水分;油松、侧柏土壤水分随深度增加呈现出“先增后降”的规律,与黄琳琳^[25]得出的低密度(1 875株/hm²)油松土壤水分垂直变化规律基本一致;CK在120 cm第二次出现土壤水分高峰的原因可能与撂荒地地50—120 cm 毛管孔隙发育慢,持水效力低下,易出现干层有关。Yang等^[26]指出龙潭流域(属黄土高原)乔灌林地土壤水分由浅至深(0—2 m)表现为先降后升的规律,土壤水分谷值出现在60—80 cm,与本研究结果均不一致,造成此现象的原因是近地表土壤层中存在对水分大量的植物拦截和更高的植物吸收,从而减少了深层土壤水分补给。

通常土壤表层易受到外界环境因子影响,水分变异性高,水分受影响程度与土层深度呈负相关关系^[27]。而本研究土壤水分变异系数比较特殊,辽东栎、刺槐和对照土壤水分在50—80 cm出现变异性低谷,并在80 cm浮动率再次达到峰值,可能是由于该层剖面含有不透水层并形成一定程度的壤中流。随着深度的继续增加,变异系数持续降低或在0.01区间内维持稳定,这说明了80 cm以下土层水分变化率较低,土层多为风化基岩母质层,土壤体积含水量基本不变。油松、侧柏土壤水分变异系数在土层深度大于120 cm急速增至高位,与邱德勋等^[28]的研究结果一致,造成此现象原因可能是不同的土地利用方式、结构及其空间格局增加了深层土壤水分的变异程度。

3.3 土壤水分的差异性特征

我们认为各树种在全年、生长季和非生长季3个时期土壤水分差异性均不显著。有研究指出当植物密度达到一定程度(0.098株/m²)时,不同时期土壤含水量差异不再显著^[29],本文中各树种密度均达到(0.17株/m²),不在上述差异显著度范围内,故各时期下同树种未表现出显著性差异。已有学者得出在降雨偏少区域,不同树种在生长过程中土壤水分差异明显^[30],这与本研究结果较为一致,全年与非生长季时期,辽东栎和油松土壤水分显著大于刺槐和侧柏,这说明了辽东栎、油松耗水强度和根系保水能力较刺槐、侧柏更强;生长季时期,刺槐、侧柏土壤水分显著低于对照,这可能与该时期雨水充沛,草本根系分布较浅且冠层较小,水分利用程度低,枯草凋落物层较厚导致的蒸散发弱、土壤水库存储丰富有关;此外,辽东栎和油松土壤水分较对照更大,与Singh等^[31]对多个层级剖面深度土壤水分结果类似,这是由于乔木树种大量根系穿插改善土壤微环境,改善水土流失,

增强外来水分入渗速率,补充了土壤水的缘故。

3.4 土壤水分对气象因子的响应

不同树种土壤体积含水量对空气温度、降雨量、相对湿度响应程度均较高(0.780以上),其中土壤水分和降雨表现为显著正相关,之间存在突变阈值(约为70 mm),降雨对各树种土壤水分影响较深,这与Hawley等^[32]在不同降雨分布地区的研究结果相似。黄土丘陵地带林地降雨最大入渗深度为2.7 m,在较短周期内,降雨导致土壤浅层水分频繁发生脉动改变且本研究5 a生树种根系分布较浅,因此降雨和土壤水之间存在增减不同步的现象;Mall等^[33]通过彭曼公式计算出温度每升高1℃土壤蒸散损耗提升2%~3%,各树种土壤水分和大气温度表现出负相关关系,与陈媛媛^[34]对杉木人工林土壤水分特征的研究结果具有一致性,究其原因,是空气处于低温状态能有效防止土壤蒸散损耗,增强土壤蓄水保水作用,同时林木蒸腾趋于缓慢,使得植物蒸腾耗水降低的缘故;不同树种土壤水分与湿度之间存在极显著的正相关性,这与韩湘云等^[35]的研究结果一致,说明土壤能够通过吸湿吸附交替作用充分吸收空气中水分子,二者具有共线性。徐勇峰等^[36]指出湿度及温度对土壤水的贡献率分别达到了25.12%,10.73%,与本研究对照、油松和侧柏相关性结果基本一致,表明温湿度对土壤水的直接作用较强。有研究指出,不同林地受气象因素影响程度差异性较大^[37],与本研究结果不尽一致,这既与研究植被区的不同有关,也与研究时间尺度存在密切联系。辽东栎土壤水分与温度相关性最大,与降雨相关性最小,表明辽东栎土壤水分对外界温度改变响应较为敏感,而降雨入渗再分布显著影响土壤水运动与转化机制,不同林地水分活跃层有所差异且入渗深度有限,而本研究仅分析了0—150 cm平均土壤水分与降雨量的关系,可能会造成二者相关性较弱的现象。

4 结论

(1) 不同树种土壤水分极大值均出现在生长季旺期(8月),8—11月较深层(80—150 cm)土壤水分随时间逐步降低,冬春两季(12—5月)整个土壤剖面水分处于低稳状态;随年际降水时间推移,刺槐、辽东栎、侧柏土壤水分分为4个时期:耗损期(5—10月)、衰退期(10月—次年1月)、提升期(2—4月)及低位期(3—5月),油松和撂荒地对照(CK)在1—5月则表现为稳升期;夏秋两季(6—10月)雨量占全年的88.33%,该时期各树种土壤水分均维持较高水平,降雨和土壤水分存在约30 d的滞后时差。

(2) 辽东栎和刺槐在50 cm和150 cm土层深度

出现土壤水分峰值,油松、侧柏土壤水分随深度呈“增—降”趋势,对照土壤水分呈“M”型变化规律;刺槐和侧柏土壤水分在20 cm和150 cm变异性强,油松土壤水分在表层受干扰程度最小,辽东栎和对照土壤水分变异系数在80 cm达到峰值。

(3) 全年与非生长季时期各树种土壤水分呈辽东栎>油松>对照>刺槐>侧柏的次序,生长季时期刺槐和侧柏土壤水分显著低于其余树种;同树种不同时期土壤水分均未表现出显著的差异性。

(4) 各树种土壤水分与空气温度呈反比,与空气湿度和降雨量呈正比,土壤水分与月降雨量之间存在阈值(约70 mm),湿度对各树种土壤水分作用较强,而辽东栎表现出对温度响应更为显著。

本文仅通过两年连续监测简单分析了不同树种土壤水分变化特征与环境因子的关系,未来应继续深入探究连续干旱、连续降雨条件下不同混交树种土壤水分动态变化规律,建立未来几十年土壤水分动态变化模型;同时开展地类地形、土壤理化性质、根系分布等宏、微观因子对土壤水分的影响,揭示该区土壤水可持续贮存利用的最佳植被恢复模式。

参考文献:






- [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[J].生态学报,2021,41(7):2676-2686.
- [2] 张晓梅.陇东黄土高原中沟小流域刺槐人工林土壤水分特征研究[D].兰州:甘肃农业大学,2019.
- [3] Wei X, Zhou Q, Cai M, et al. Effects of vegetation restoration on regional soil moisture content in the humid Karst Areas: A case study of Southwest China[J]. Water, 2021, 321(13):1-16.
- [4] 赵丹阳,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2021,35(1):181-187.
- [5] Jost G, Schume H, Hager H, et al. A hillslope scale comparison of tree species influence on soil moisture dynamics and runoff processes during intense rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2012,420:112-124.
- [6] Rodríguez-Iturbe I, Porporato A. Ecohydrology of Water-controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics [M].London: Cambridge University Press, 2007.
- [7] Pan N, Wang S, Liu Y, et al. Global surface soil moisture dynamics in 1979—2016 observed from ESA CCI SM dataset[J]. Water, 2019,11(5):1-16.
- [8] Western A W, Grayson R B, Blöschl G, et al. Scaling Methods in Soil Physics [M]. Los Angeles: Crc-Press, 2003.
- [9] 祁栋灵,孙瑞,谢贵水,等.海南西部低割龄橡胶林土壤水分季节变化特征及其对气象因子响应研究初报[J].

生态科学,2017,36(6):44-48.

- [10] 艾宁,张智勇,宗巧鱼,等.水蚀风蚀交错区典型人工林土壤水分亏缺特征[J].森林与环境学报,2021,41(3):272-280.
- [11] 刘博,穆彪,谷晓平.贵州喀斯特地区不同降水状况下土壤水分垂直变化特征[J].广东农业科学,2013,40(2):46-49.
- [12] 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.
- [13] 胡波,陈丽华.黄土高原不同林地土壤水分特征及影响因子通径分析[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):79-86.
- [14] Huang T, Yu D, Cao Q, et al. Impacts of meteorological factors and land use pattern on hydrological elements in a semi-arid basin[J]. Science of the Total Environment, 2019,690:932-943.
- [15] Wei X, Liang W. Regulation of stand density alters forest structure and soil moisture during afforestation with *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabulaeformis* Carr. On the Loess Plateau[J]. Forest Ecology and Management, 2021,491:1-14.
- [16] 王进鑫,王迪海,刘广全.刺槐和侧柏人工林有效根系密度分布规律研究[J].西北植物学报,2004,24(12):2208-2214.
- [17] 韦兰英,上官周平.黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性[J].生态学报,2006,26(12):4164-4170.
- [18] 王勋曜,孙宏彦,于辉,等.天坛公园油松、侧柏大树根系分布特征[J].北京农学院学报,2018,33(1):89-98.
- [19] 戴军杰,章新平,吕殿青,等.南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2019,26(4):123-131.
- [20] 王志杰.北京山区坡面土壤水分时空变化及影响因素[D].北京:北京林业大学,2017.
- [21] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2001,240(3):243-263.
- [22] 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.
- [23] 田璐.不同覆盖措施对干化土壤水分的影响研究[D].陕西杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2019.
- [24] 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.
- [25] 黄琳琳.黄土丘陵区人工油松林土壤水分动态研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.



欢迎登录三才科技采编系统

 返回首页 我想投稿 草稿箱(1) 已投稿件 已发表文章 已发送信息

已发送信息

收信人: 关键词:

	序号	收信人 ▲ ▼	主题
<input type="checkbox"/>	1	编辑	请修改
<input type="checkbox"/>	2	编辑	三才科技
<input type="checkbox"/>	3	编辑	专家外审
<input type="checkbox"/>	4	编辑	《测试稿
<input type="checkbox"/>	5	编辑	《测试稿
<input type="checkbox"/>	6	编辑	《测试稿
<input type="checkbox"/>	7	编辑	收稿通知