

砒砂岩区不同林分土壤水分动态变化 及其对降雨的响应

王逸凡^{1,2}, 李龙^{1,2}, 弥宏卓³, 王志强³,
张尚轩^{1,2}, 张宇^{1,2}, 任亚楠^{1,2}, 周星辰^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学旱区水利工程生态环境全国重点实验室, 内蒙古呼和浩特010018; 2. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 内蒙古呼和浩特010018; 3. 内蒙古自治区林业和草原监测规划院, 内蒙古呼和浩特010018)

摘要: [目的] 研究砒砂岩区雨季降雨特征、不同林分土壤水分动态及其对降雨的响应, 阐明不同降雨等级下土壤水分变化规律, 为砒砂岩区造林树种选择提供科学依据。[方法] 基于2024年7—9月定点监测, 分析砒砂岩区3种人工林(柠条纯林、油松纯林、柠条×油松混交林)0—100 cm土层水分时空变化及其对降雨的响应。[结果] ① 柠条×油松混交林的土壤含水率最高(26.15%), 油松纯林次之(24.15%), 柠条纯林最低(16.43%), 3种林分土壤含水率随着土层深度的增加呈现先增加后减少再增加的波动趋势。② 随着降雨等级从小到大, 土壤水分补充深度分别为10, 60 cm, 在降雨等级为大雨与暴雨时, 0—100 cm深度的土壤水分均得到补充。在不同降雨等级下, 柠条纯林土壤水分增量最高, 油松次之, 柠条×油松混交林的土壤水分增量最低。③ 在降雨等级为暴雨时, 3种林分在0—50 cm土层中, 均在雨后对降雨作出响应, 且在第2天土壤含水率缓慢下降, 50—100 cm土层出现水分运移的滞后性。[结论] 混交林整体保水能力优于纯林, 但对降雨的水分增量响应较弱, 柠条纯林虽含水率低, 但对降雨的水分吸收能力较强, 深层土壤对降雨的响应存在明显滞后性。在砒砂岩地区进行生态恢复过程中, 可以优先选取柠条×油松混交林, 来减少水分流失。

关键词: 砒砂岩; 土壤水分运移; 降雨响应; 造林模式

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0187-12

中图分类号: S157.1

文献参数: 王逸凡, 李龙, 弥宏卓, 等. 砒砂岩区不同林分土壤水分动态变化及其对降雨的响应[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 187-198. Wang Yifan, Li Long, Mi Hongzhuo, et al. Soil moisture dynamics in different forest species and their responses to rainfall in Pisha sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 187-198. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.016; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.016.

Soil moisture dynamics in different forest species and their responses to rainfall in Pisha sandstone area

Wang Yifan^{1,2}, Li Long^{1,2*}, Mi Hongzhuo, Wang Zhiqiang,
Zhang Shangxuan^{1,2}, Zhang Yu^{1,2}, Ren Yanan^{1,2}, Zhou Xingchen^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Areas, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Forestry and Grassland Monitoring and Planning Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The rainfall characteristics in the Pisha sandstone area during the rainy season, soil moisture dynamics in different forest stands, and their responses to rainfall were analyzed, and the soil moisture variation patterns under different rainfall levels clarified, in order to provide a scientific basis for the selection of

收稿日期: 2025-04-23

修回日期: 2025-06-12

采用日期: 2025-06-12

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目(内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室)“砒砂岩沟坡侵蚀过程与防治机制研究”(2025KYPT0043); 内蒙古自治区科技计划项目“砒砂岩沟坡崩塌机制与沟-坡-岸综合防治关键技术研究”(2025YFSH0001); 内蒙古黄河流域多沙粗沙区林草植被恢复技术体系研究采购项目(ZB2023021185)

第一作者: 王逸凡(2002—), 男(汉族), 内蒙古自治区锡林郭勒盟人, 硕士研究生, 研究方向为林业。Email: 1355981067@qq.com。

通信作者: 李龙(1989—), 男(汉族), 吉林省桦甸市人, 博士研究生, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: lilongdhr@126.com。

afforestation tree species in the Pisha sandstone area. [Methods] Based on fixed-point monitoring from July to September 2024, temporal and spatial soil moisture variations in soil depth from 0 to 100 cm in three plantations (pure *Caragana korshinskii*, pure *Pinus tabulaeformis*, and mixed *C. korshinskii* × *P. tabulaeformis* forests) in the Pisha sandstone area during the rainy season were analyzed. [Results] ① The soil moisture content of the mixed *C. korshinskii* × *P. tabulaeformis* forest was the highest (26.15%), followed by that of the pure *P. tabulaeformis* forest (24.15%), and the lowest in the pure *C. korshinskii* forest (16.43%). The soil moisture content of the three forest stand types showed a fluctuating trend, first increasing, then decreasing, and then increasing again with increasing soil depth. ② With rainfall amounts from low to high, the soil moisture replenishment depths were 10 and 60 cm, respectively, and the soil moisture at a depth of 0—100 cm was replenished during heavy rainfall and rainstorm events. Under different rainfall amounts, the soil moisture increment of the pure *C. korshinskii* forest was the highest, followed by *P. tabulaeformis*; the soil moisture increment of *C. korshinskii* × *P. tabulaeformis* mixed forest was the lowest. ③ When rainstorm events occurred, all three stands showed responses in the 0—50 cm soil layer, the soil moisture content decreased slowly on the second day, and a water transportation lag appeared in the 50—100 cm soil layer. [Conclusion] The overall water holding capacity of mixed forests was better than those of the pure forests, however, the response to increased rainfall was weak. Although the water content of the pure *C. korshinskii* forest was low, the rainfall absorption capacity was stronger, and the deep soil rainfall response obviously lagged behind. For ecological restoration of the Pisha sandstone area, mixed *C. korshinskii* × *P. tabulaeformis* forests should be preferentially selected to reduce water loss.

Keywords: Pisha sandstone area; soil moisture transportation; rainfall response; afforestation patterns

土壤水分是连接大气、土壤、植物和水体的关键纽带,在维持生态平衡方面具有重要作用^[1]。它也作为植被水分的主要供给源,影响植被生长、发育^[2]。因此土壤水分在物质循环与能量传递中占据着重要地位^[3]。土壤水分动态变化受到植被类型、温度、湿度、地形、土壤质地等影响^[4]。目前,国内外学者^[5-6]研究大多聚集在不同坡位、不同林分密度等单一影响因素对水分动态变化的影响。

降雨是影响土壤水分变化的一个重要因子,也是土壤水分重要来源,土壤含水量与降雨量、降雨强度关系密切^[7]。在植被生长季节,降雨量会显著影响土壤水分变化以及土壤水分分布^[8]。研究^[9]表明降雨量与降雨强度是影响土壤水分的主要因素。降雨强度越大,影响土层深度越深,进而影响土壤水分的蓄积。在半干旱地区,降雨可以直接影响到5—60 cm土层土壤水分,但是是在80 cm以下的土层受到降雨补给较为有限^[10-11],石建周等^[12]发现只有降雨量 ≥ 7 mm时,才可以有效补充土壤水分。成龙等^[13]研究发现,在毛乌素沙地降雨格局是影响土壤水分的重要因素,随着降雨量的增加,土壤水分入渗量也会随之增加。砒砂岩区处于半干旱区域,该地区土壤干层随着降雨量的增加出现消长状态^[14]。陈慧等^[15]研究发现,降雨强度越大,土壤下渗越快。

砒砂岩地处中国北方半干旱区,由于其独特的成岩过程,土壤-基岩水分运移规律复杂,董晓宇^[16]

研究发现覆土砒砂岩入渗能力较差。目前,砒砂岩区关于土壤水分研究相对较少,主要集中在土壤水分影响因素以及土壤水分入渗特征等方面^[17-18]。砒砂岩地表土壤贫瘠,植被覆盖率低,生态环境脆弱,降雨量多集中在6—9月,降雨是补充土壤水分的重要来源。以往针对砒砂岩土壤水分的研究多集中在单独样地的水分状态研究层面^[19],难以揭示降雨输入-水分运移的链式机制,针对土壤水分的动态变化及其对多降雨的降雨关系尚未见报道。因此,本研究对砒砂岩区的雨季降雨特征、不同林分土壤水分动态变化以及土壤水分对降雨的响应展开分析,明确不同林分降雨规模下土壤水分变化规律,以期为砒砂岩区选择造林树种提供积极借鉴思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡,地理坐标为39°46′51″N,110°36′23″E,其平均海拔1 195.57 m。该地区属于温带大陆性气候,表现为冬季漫长且气候干燥,而夏季则相对短暂并带有温暖气息。多年平均下来,气温维持在7.2℃左右。年降水量为400 mm,其中降雨活动主要集中于夏季时段。具体而言,夏季的平均降雨量为256.4 mm,占该区全年降雨总量的64.1%,显示出显著的季节性分布特点。土壤基岩为砒砂岩,土壤

类型主要以黄绵土为主,并伴随着以栗钙土和风沙土为主的砒砂岩。研究区内植被多以人工植被为主,主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等;灌木主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。

1.2 样地设置

于2024年7—9月在砒砂岩区选择柠条纯林、油松纯林和柠条油松混交林作为试验样地,这3种林分的植被均为2013年人工种植,土壤类型以黄绵土为主,选取坡面,海拔,坡向等特征相近的样地,以减少影响,样地基本情况详见表1。

表1 试验样地基本情况

Tab.1 Basic information of sample plots

林分类型	林龄/a	海拔/m	土壤类型	土层厚度/cm	坡度/(°)	坡向	株行距/m
柠条	12	1 194.57	黄绵土	21	10	阳坡	1.8×2.2
油松	12	1 198.97	黄绵土	23	10	阳坡	3.5×4.15
柠条×油松混交林	12	1 193.13	黄绵土	27	15	阳坡	1.1×4.4 2.8×4.4

1.3 数据获取

1.3.1 土壤含水率的动态监测

2024年7—9月在所选的3种林分样地安装土壤水分设备,3种林分均使用HOBO数据采集器(传感器为S-SMD-M005)对土壤进行连续的土壤水分检测,土壤水分探头通过监测土壤介电常数来测量土壤体积含水量。将土壤水分探头通过挖土壤剖面埋置坑中,分为10个梯度(0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60,60—70,70—80,80—90,90—100 cm)埋于样地内。将水分探头水平插入每个梯度土壤中,并设置监测频率为30 min记录1次,获取土壤水分数据。为验证土壤水分自动监测设备数据的准确性,同时采用铝盒烘干法计算每层的土壤含水率,所得数据与水分自动监测设备比较,以降低设备误差。样地内设置翻转式雨量筒进行监测降雨情况。

(1) 降雨强度。根据中国气象局对24 h内降雨量划分为标准,按照降雨量划分为小雨(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)。

$$I = \frac{P}{T} \quad (1)$$

式中: I 为降雨强度(mm/h); P 为降雨量(mm); T 为降雨历时(h)。

(2) 变异系数(C_v)。采用垂直变异系数来分析不同植物群落样地土壤水分的垂直变化特征。计算公式为

$$C_v = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ 为标准差; μ 为均值。

(3) 土壤水分对降雨的响应。土壤水分的增加

量表示降雨对土壤的补给量,补给速率可以用土壤水分增量、与土壤水分达到峰值的时间之比表示。计算公式为

$$\Delta SW_r = SW_{\max} - SW_0 \quad (3)$$

式中: SW_{\max} 为降雨后的土壤水分峰值(%); SW_0 为雨前土壤水分; ΔSW_r 为降雨后的土壤水分增量(%)。

(4) 土壤储水量。土壤储水量是指在一定深度范围内土壤体积含水量。计算公式为

$$W = \theta_i \cdot d_i \quad (4)$$

式中: W 为各层土壤储水量(mm); θ_i 为第*i*层土壤体积含水量(m^3/m^3); d_i 为土层厚度(mm)。

1.3.2 土壤理化性质的计算

测定土壤的容重、含水率、田间持水量、总孔隙度、有机质含量。

(1) 土壤容重采用环刀法测定。将带土环刀放入烘箱中在105℃下烘至恒重,待冷却后称烘干土重。计算公式为

$$\rho_r = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (5)$$

式中: ρ_r 为土壤容重(g/cm^3); V 为环刀容积(cm^3); m_1 为环刀质量(g); m_2 为环刀及烘干土总质量(g)。

(2) 土壤含水率采用烘干法测定。将带土的铝盒开盖放入烘箱中在105℃下烘至恒重,待冷却后称烘干土重。计算公式为

$$\theta_g = \frac{(w_1 - w_2)}{w_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中: θ_g 为土壤含水率(%); w_1 为原土重(g); w_2 为烘干土重(g)。

(3) 田间持水量采用环刀法测定。将取回的土壤样品放在1个大托盘中,将清水缓缓倒入托盘中,

当水面低于环刀口 1~2 mm 时注水停止,在水中浸泡 24 h,称取饱和土质量,将饱和土样置于沙盘静置 12 h 使重力水完全排除,放入烘箱中在 105 °C 下烘至恒重,待冷却后称取烘干土质量。计算公式为

$$F = \frac{a_1 - a_2}{a_2} \times 100\% \quad (7)$$

式中: F 为土壤田间持水量(%); a_1 为饱和土质量(g); a_2 为烘干土质量(g)。

(4) 总孔隙度根据土壤容重进行计算。计算公式为

$$Z = 1 - \frac{\rho_r}{\rho} \times 100\% \quad (8)$$

式中: Z 为土壤总孔隙度(%); ρ_r 为土壤容重(g/cm^3); ρ 为土壤密度,取值 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

(5) 土壤粒径通过马尔文 3000 激光粒度分析仪测定粒径质量分数。

(6) 土壤有机质测定采用重铬酸钾外加热法测定。

1.4 数据分析

利用 Excel 2020 进行数据整理,利用 Origin 2024 对整理后的数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 观测期降雨量变化特征

由表 2 可知,研究区观测期内共计降雨 26 场,总降雨量为 254.8 mm。降雨等级为小雨共发生 17 场,共计降雨量为 26.4 mm;中雨发生 3 场,总降雨量为 37.8 mm;大雨发生 4 场,总降雨量为 107.4 mm;暴雨发生 1 场,总降雨量为 78.2 mm。其中降雨等级为小雨发生频率最高,占总降雨场次的 65.38%。降雨等

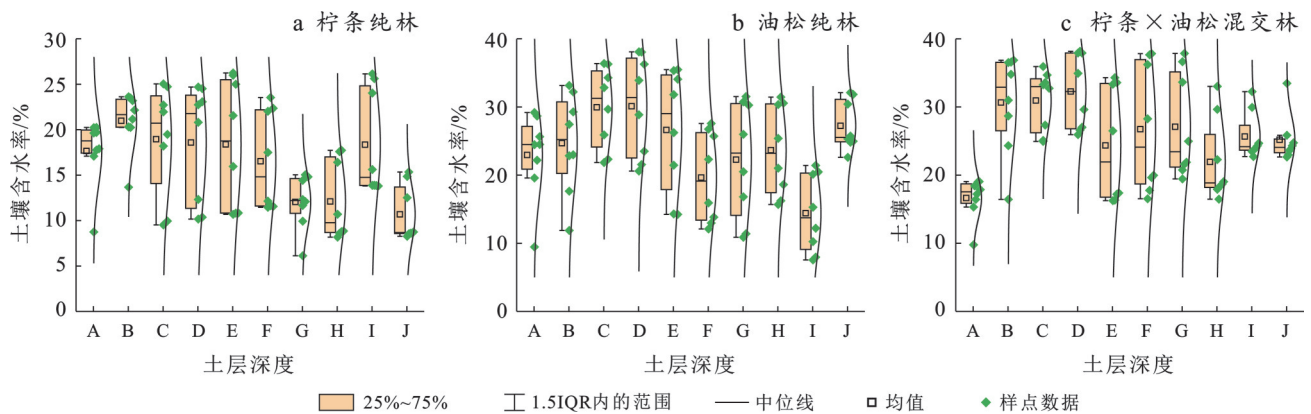
级为大雨的降雨量最多,占总降雨量的 42.1%。研究区内 7—9 月最高气温为 39.8 °C,最低气温为 3.86 °C,平均温度为 20.76 °C。

表 2 研究区降雨频率统计

雨型	降雨量/mm	降雨频次	平均降雨量/mm
小雨	<10	17	1.6
中雨	10~25	3	12.6
大雨	25~50	4	26.9
暴雨	50~100	1	78.2

2.2 不同林分土壤含水率时空变化

图 1 为 7—9 月柠条纯林、油松纯林、柠条×油松混交林 3 种不同林分在 0—100 cm 土层的水分特征描述箱线图。由图 1 可知,柠条×油松混交林平均土壤含水率最高(26.15%)、油松纯林次之(24.15%)、柠条纯林平均土壤含水率最低(16.43%),3 种林分在 0—10 cm 土层处,土壤含水率均呈现:油松纯林>柠条纯林>柠条×油松混交林,表明油松土壤表层保水效果优于其他 2 种林分。变异系数的大小可以描述土壤水分动态变化剧烈程度,变异系数分为 3 个等级,弱变异(变异系数<10%)、中等变异(10%>变异系数<100%)和强变异(变异系数>100%)。3 种林分均属于中等变异,柠条纯林变异系数最大(33%),油松纯林变异系数次之(32.8%),柠条×油松混交林变异系数最低(28.2%)。表明柠条×油松混交林土壤水分较其他两种林分更稳定。3 种林分在不同土层深度中,土壤含水率差异较大,大致呈现出随着土层深度增加,土壤含水率表现为先增加后降低再增加的波动趋势。



注:土层深度 A 为 0—10 cm; B 为 10—20 cm; C 为 20—30 cm; D 为 30—40 cm; E 为 40—50 cm; F 为 50—60 cm; G 为 60—70 cm; H 为 70—80 cm。下同。

图 1 研究区不同林分在 0—100 cm 土层的水分特征箱线图

Fig.1 Box plot of water characteristics of different stands in 0—100 cm soil layer in study area

如图2所示,7月3种林分土壤含水率最低,随着降雨事件的发生,3种林分在8月土壤含水率发生大幅度提升,9月土壤含水率达到峰值,在10月开始衰退,12月底,3种林分土壤含水率下降到最低。

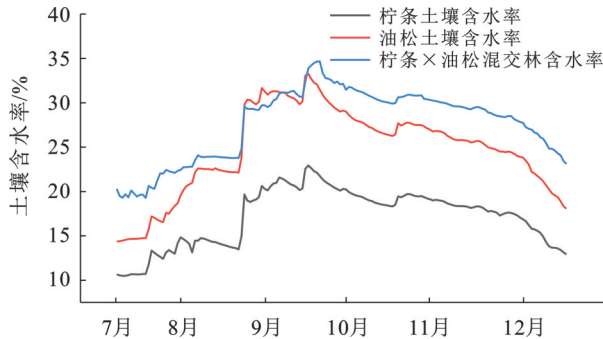


图2 研究区7—12月3种林分水分动态变化曲线
Fig.2 Dynamic water curves of three stands from July to December in study area

2.3 不同林分对降雨量的响应

由图3可知,不同林分土壤含水率对降雨等级响应程度表现为:暴雨>大雨>中雨>小雨。其中降雨等级为小雨(2.4 mm)时,只有在0—10 cm的土层深度作出响应,土壤水分增量表现为:柠条纯林(1.4%)>油松纯林(1%)>柠条×油松混交林(0.6%)。降雨等级为中雨(13.4 mm)时,在0—60 cm的土层深度作出响应,柠条纯林0—60 cm土壤水分增量分别为4.8%,1.8%,1.8%,0.9%,0.6%,1.2%。油松纯林在0—60 cm土壤水分增量分别为2.7%,3.3%,0.6%,0.8%,0.2%,0.6%。柠条×油松混交林在0—60 cm土壤水分增量分别1.9%,0.7%,0.6%,0.3%,1.4%,0.7%。降雨等级为大雨(30.6 mm)与暴雨(78.2 mm)时,3种林分均对0—100 cm的土层深度作出响应。混交林在降雨等级为暴雨时,80—100 cm的土层响应程度较低。随着降雨量的增加,土壤水分增量越大。在降雨等级为小雨和中雨时,随着土层深度的增加,降雨对土壤水分的影响大致呈现减少的趋势。

本研究以0—20 cm土层为土壤浅层,20—100 cm岩石层为深层。由图4可知,3种林分岩石层土壤储水量高于0—20 cm土层的储水量,不同林分土壤储水量大致表现为:柠条×油松混交林>油松纯林>柠条纯林。在降雨等级为小雨时,3种林分只有土壤浅层的储水量增加。在降雨等级为中雨时,油松样地浅层储水量增加了最多(9.3 mm),柠条样地岩石层储水量增加了最多(24.6 mm)。在降雨等级为大雨时,混交林样地平均储水量增加最多(115.8 mm)。在降雨等级为暴雨时,柠条纯林、油松

纯林和柠条×油松混交林浅层储水量分别增加了32.1,45.0和28.6 mm,岩石层储水量分别增加了408.9,421.4,397.4 mm。

2.4 不同林分水分动态变化特征

如图5所示,降雨等级为暴雨(降雨量为78.2 mm)时,3种林分在0—50 cm土层中,均在雨后立刻对降雨作出响应,土壤含水率大幅度升高,在雨后第2天呈现出平稳下降趋势。在50—70 cm土层中,柠条纯林与油松纯林均在雨后第1天出现响应,但柠条×油松混交林只有在50—60 cm的土层中,对降雨做出响应。在60—70 cm土层中,柠条×油松混交林土壤水分的增加出现滞后性,在雨后第3天才出现响应。相比其他2种林分,柠条×油松混交林在70—100 cm的土层中,土壤含水率出现极小幅度的增加。在70—100 cm的土层中,油松纯林的响应时间比其他两种林分快,其中油松纯林70—90 cm的土层中,含水率在雨后第2天作出响应,90—100 cm处土壤含水率在雨后第4天作出响应。柠条纯林70—100 cm的土壤含水率依次在雨后第3,4,5 d作出响应,出现明显的滞后效应。

如图6所示,在8月25日降雨等级为暴雨条件下,油松对降雨的响应程度优于柠条纯林,柠条×油松混交林对降雨响应程度最差。在柠条纯林样地10—60 cm土层深度响应最强烈,70—100 cm土层深度随着时间的推移,土壤水分出现滞后性。油松纯林0—80 cm土层深度在雨后土壤含水率出现大幅度升高,80—100 cm土层深度的土壤含水率只有小幅度提升。在混交林样地,0—10 cm,70—100 cm土层深度在雨后变化不明显,只有小幅度提升,20—60 cm土层深度变化强烈。

2.5 降雨量与土壤水分增量关系

在降雨发生后,土壤水分含量会相应增加,在不同降雨量下,土壤水分增量也会不同。由图7可知,3种样地降雨量与土壤水分增量之间呈现出高度拟合,土壤水分增量与降雨量大小呈现显著正相关关系,随着降雨量的增加,土壤水分增量也相应增加。由线性回归拟合方程可知,降雨量每增加1 mm,柠条纯林土壤水分增量增加0.873%,油松纯林土壤水分增量增加0.607%,柠条×油松混交林土壤水分增量增加0.539%。

2.6 水分运移的影响因素

由图8—10与表3—5可知,3种林分的土壤体积含水率均与土壤有机质呈现出显著正相关关系($p < 0.05$)。柠条纯林、油松纯林、柠条×油松混交林的土壤有机质含量范围分别为5.75~8.74 g/kg,3.69~10.24 g/kg和3.62~10.52 g/kg,其中10—40 cm的土

层中,有机质含量相较于其他土层偏高,导致砒砂岩区的3种林分在20—40 cm土层处,含水率较高。相比于其他2种林分,柠条纯林的土壤含水率与土壤黏

粒也呈现显著正相关关系($p < 0.05$)。其中柠条纯林在20—30 cm的土层中,土壤含水率随着土壤黏粒含量的增加而增加。

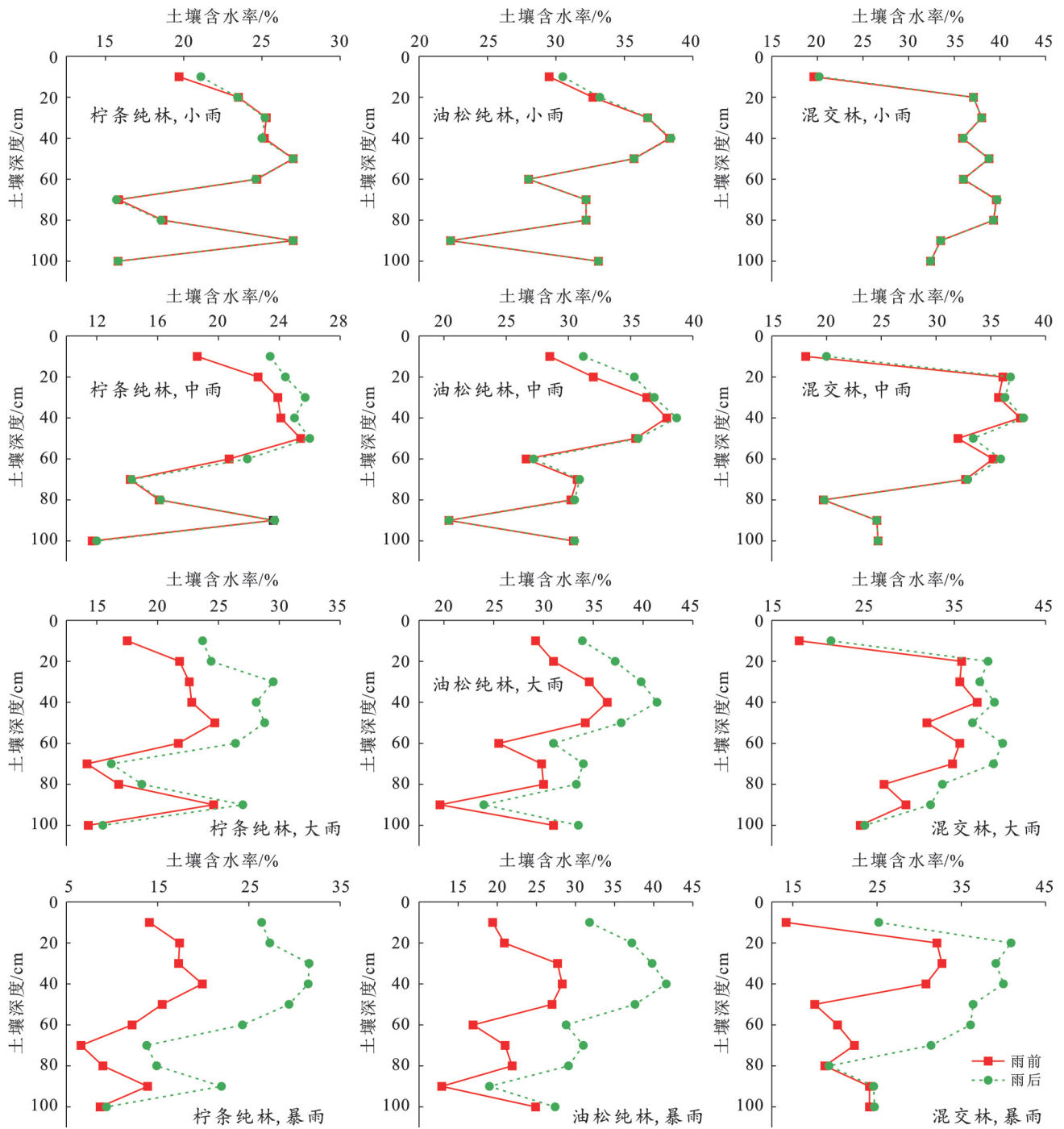


图3 3种林分在不同降雨等级条件下的土壤水分变化

Fig.3 Changes in soil moisture of three forest stands under different rainfall levels

3 讨论

3.1 降雨等级对水分动态变化的影响

不同的降雨量、降雨强度对土壤含水率具有显著影响。

Heisler-White J L 等人^[20]对半干旱地区长时序土壤水分动态研究结果表明,该地区由于蒸发强烈,土壤渗透性差,较小强度降雨事件通常仅对表层土壤产生影响。只有降雨强度较大时,才可以对深层土壤水分进行补给。

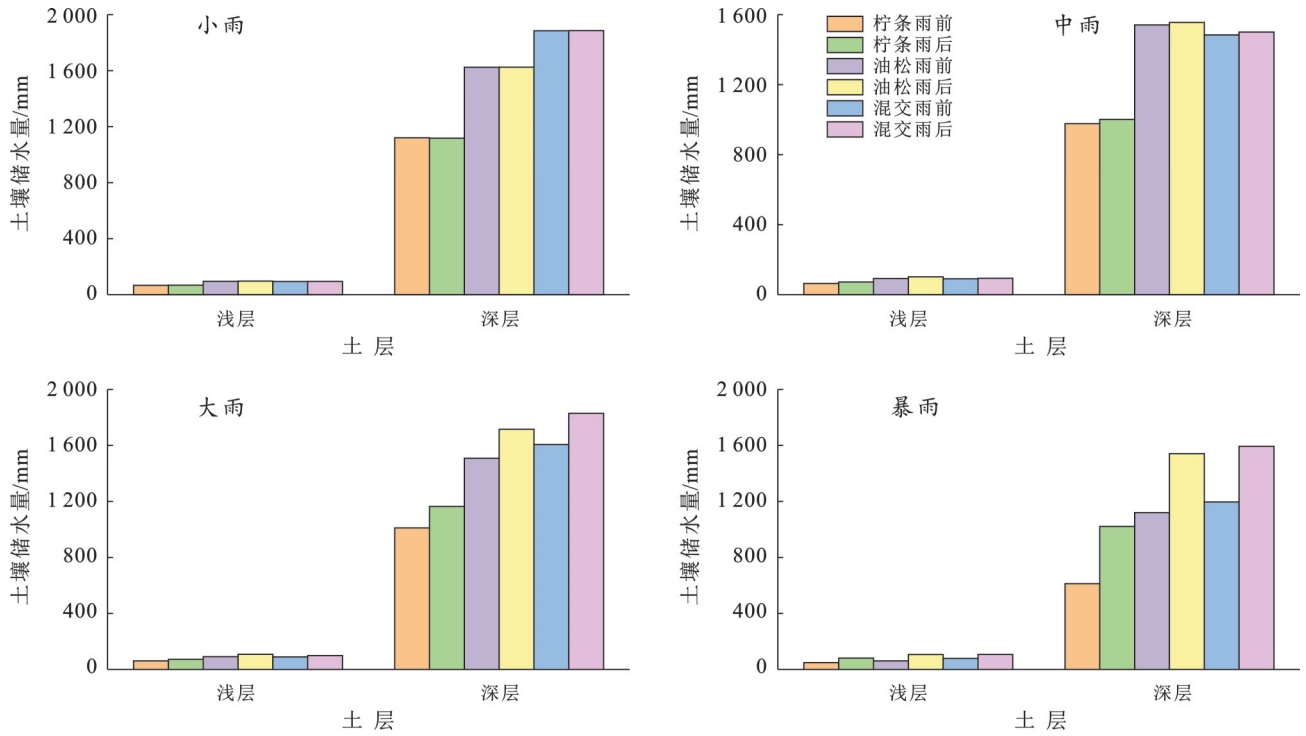
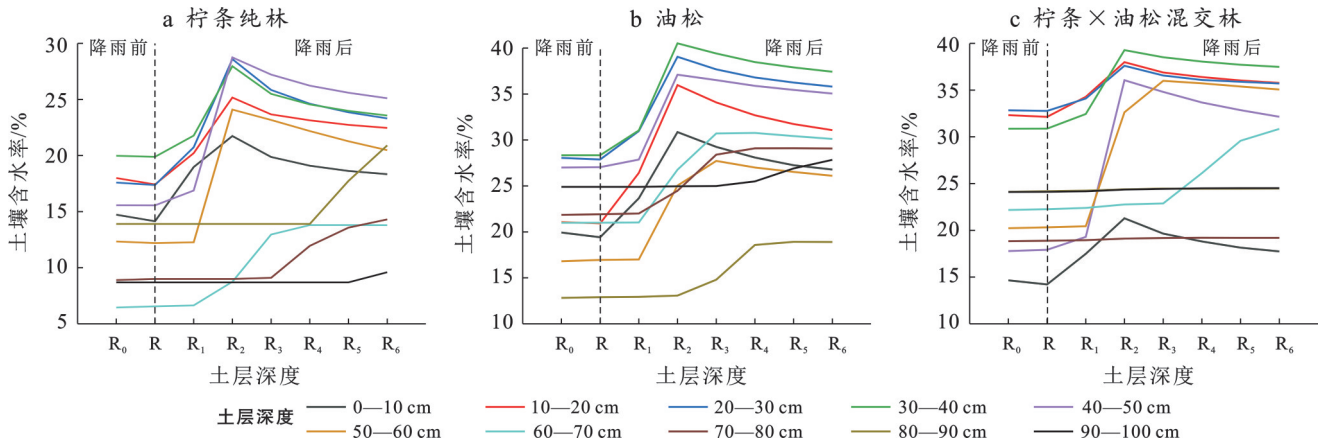


图 4 3种林分不同降雨等级下土壤储水量变化

Fig.4 Changes in soil water storage under different rainfall levels in three forest stands



注: R₀为雨前1天; R为降雨当天; R₁为雨后1天; R₂为雨后2天; R₃为雨后3天; R₄雨后4天; R₅为雨后5天; R₆为雨后6天。

图 5 3种林分在降雨等级为暴雨时的水分运移过程

Fig.5 Water transport process of three stands under heavy rainfall

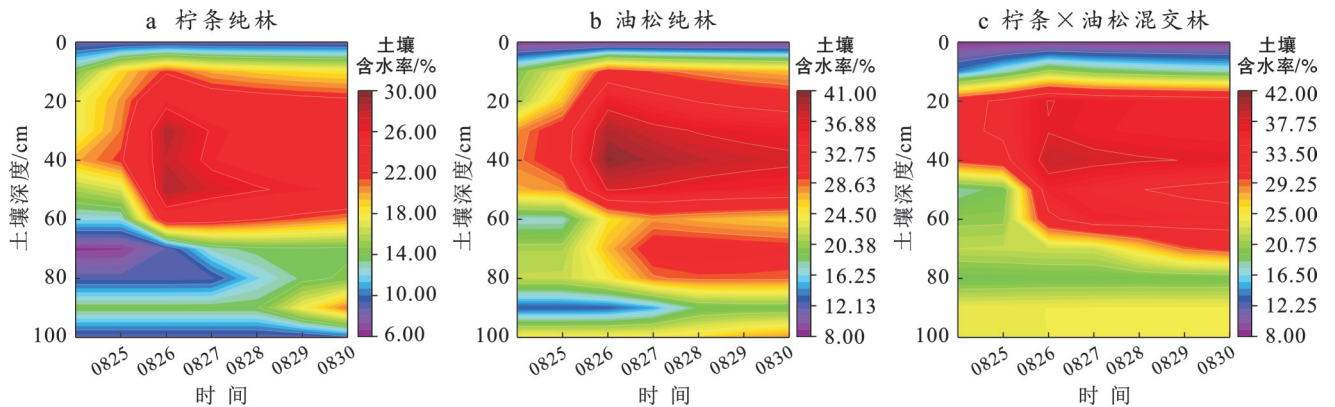


图 6 3种林分次降雨后水分运移过程

Fig.6 Water transport process after rainfall in three stands

表 3 研究区柠条纯林土壤理化性质

Tab.3 Soil physical and chemical properties of *Caragana korshinskii* pure forest in study area

土层深度/ cm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	体积含 水率/%	田间持 水量/%	总孔隙 度/%	有机质含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
0—10	1.23	8.06	14.0	50.07	6.55	2.16	42.60	55.24
10—20	1.36	13.54	18.7	48.76	7.70	2.54	43.04	54.42
20—30	1.36	13.81	17.0	47.83	8.62	2.46	46.96	50.58
30—40	1.54	6.18	17.0	45.64	7.36	1.54	31.62	66.84
40—50	1.63	5.62	19.0	42.10	7.15	2.22	44.66	53.12
50—60	1.53	7.00	14.4	45.49	7.47	2.30	54.16	43.54
60—70	1.62	7.03	17.1	42.67	6.67	2.36	39.70	57.94
70—80	1.50	5.55	13.4	46.22	6.44	1.66	33.96	64.38
80—90	1.40	8.89	20.6	44.69	8.74	2.20	31.26	66.54
90—100	1.52	4.95	12.6	44.97	5.75	1.42	30.16	68.42

表 4 研究区油松纯林土壤理化性质

Tab.4 Physicochemical properties of pure *Pinus tabulaeformis* forest in study area

土层深度/ cm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	体积含 水率/%	田间持 水量/%	总孔隙 度/%	有机质含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
0—10	1.27	14.95	18.58	49.23	9.43	2.26	61.72	36.02
10—20	1.40	12.86	17.91	47.33	9.12	2.66	45.48	51.86
20—30	1.29	11.72	16.00	47.32	10.24	3.92	53.44	42.64
30—40	1.44	9.10	15.60	46.77	8.62	3.20	55.72	41.08
40—50	1.57	9.85	17.47	45.23	5.52	3.10	54.84	42.06
50—60	1.57	6.44	15.81	44.11	4.60	3.30	57.04	39.66
60—70	1.49	6.43	15.31	44.34	8.24	2.56	49.60	47.84
70—80	1.57	10.25	16.30	45.93	7.59	1.64	40.40	57.96
80—90	1.58	4.74	14.00	42.36	3.69	1.28	36.74	61.98
90—100	1.63	15.65	13.30	43.96	9.20	2.64	39.88	57.48

表 5 研究区柠条×油松混交林土壤理化性质

Tab.5 Soil physical and chemical properties of *Caragana korshinskii* × *Pinus tabulaeformis* mixed forest in study area

土层深度/ cm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	体积含 水率/%	田间持 水量/%	总孔隙 度/%	有机质含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
0—10	1.37	17.12	30.35	48.26	10.52	2.32	47.42	50.26
10—20	1.40	13.48	24.23	46.49	8.91	1.46	32.96	65.58
20—30	1.43	13.04	25.03	46.15	9.32	1.88	38.26	59.86
30—40	1.56	13.09	22.52	42.88	8.64	1.36	32.28	66.36
40—50	1.61	10.60	17.37	44.36	4.89	1.00	33.06	65.94
50—60	1.63	6.19	19.32	42.62	4.83	1.16	33.20	65.64
60—70	1.73	10.78	18.89	38.70	4.14	1.80	35.44	62.76
70—80	1.77	10.49	18.25	41.69	3.91	1.86	55.86	42.28
80—90	1.84	12.86	16.75	39.65	3.62	1.12	55.04	43.84
90—100	1.77	16.80	18.17	40.23	7.93	1.44	44.00	54.56

本研究发现土壤含水率随着降雨量的增加也相应呈现出上升趋势,不同林分土壤含水率对降雨等级响应程度表现为:暴雨>大雨>中雨>小雨,然而,余

榕等^[21]在石漠化地区发现不同林分土壤含水率对降雨等级响应程度为:中雨>小雨>大雨>暴雨。造成这一问题原因可能是,砢砂岩是松散岩层结构,暴雨

的高强度水流快速渗入深层。当降雨等级较低时,雨水仅能湿润砒砂岩地区的表层土壤,3种林分样地的

降雨等级为小雨时,只有0—10 cm的土层受到湿润,这与于晓燕等^[22]在黄土丘陵区研究结果一致。

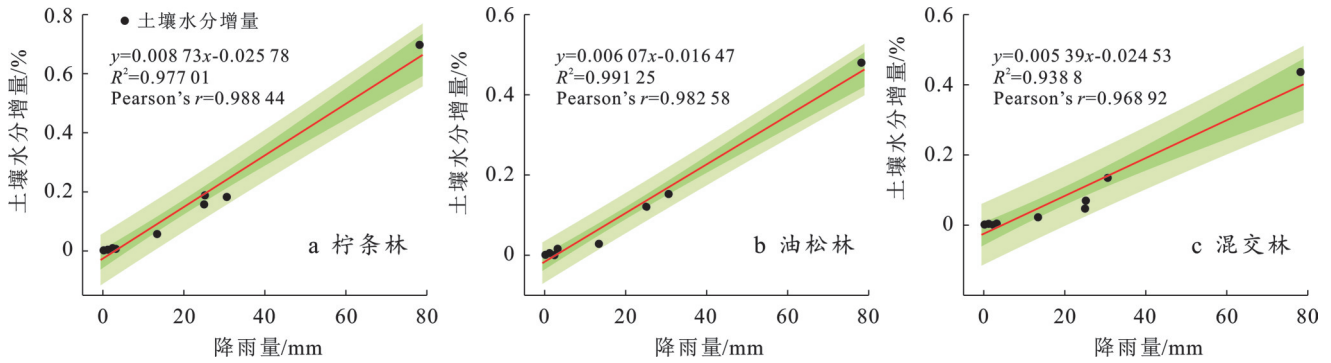


图 7 研究区 3 种林分样地降雨量与土壤水分增量关系

Fig.7 Relationship between rainfall and soil moisture increase in three stands plots in study area

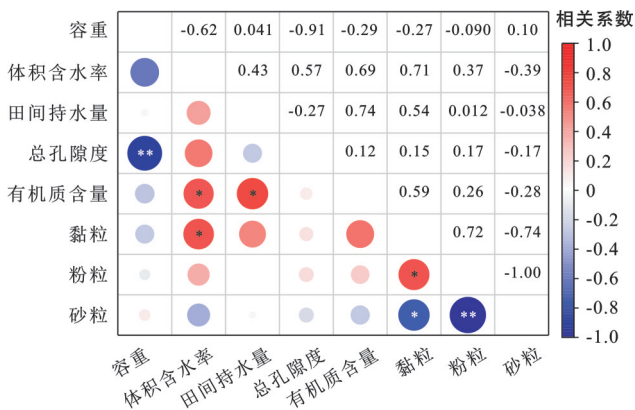


图 8 柠条纯林土壤含水率与其他理化性质的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis between soil moisture content and other physical and chemical properties of *C. korshinskii* pure forest

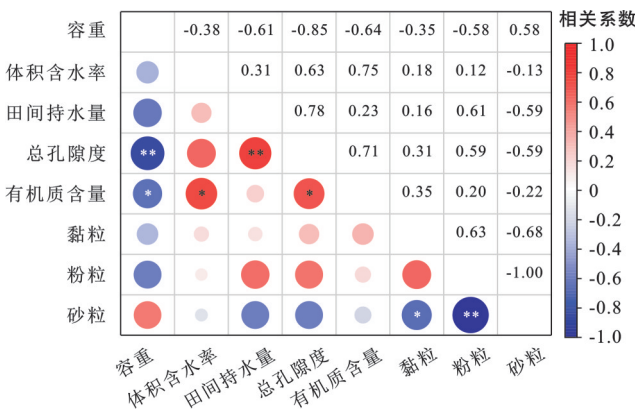


图 9 油松纯林土壤含水率与其他理化性质的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis of soil moisture content and other physical and chemical properties in pure *P. tabuliformis* forest

由于砒砂岩区土壤基质不同,砒砂岩的土壤保水能力较弱^[23],雨水会很快的在太阳辐射和风力等作用下蒸发,使得土壤水分不能有效地补充。随着降雨量的增大,雨水开始下渗到较深层的土壤。在

降雨等级为中雨时,3种林分在0—60 cm的土层深度受到影响。杨凯悦等^[24]发现 18 mm 以上降雨量能影响高寒沙地人工林 0—60 cm 土壤。本研究发现 3 种林分随着土层深度的加深,土壤含水率的变化率逐渐减少。由于砒砂岩的特殊地质条件,下渗的水分也会因为重力作用和土壤特性等因素,一定时间内继续在土壤孔隙中重新分布,深层的含水量也会逐渐升高,为植被根系吸收水分提供更好的条件。在降雨等级为大雨和暴雨时,3种林分 0—100 cm 土层深度均受到影响,土壤水分均受到有效补充。在毛乌素沙地,降雨量 ≥ 50 mm 时,湿润深度可以达到 110 cm,即较高的降水会使土壤补充更多的水分^[25]。

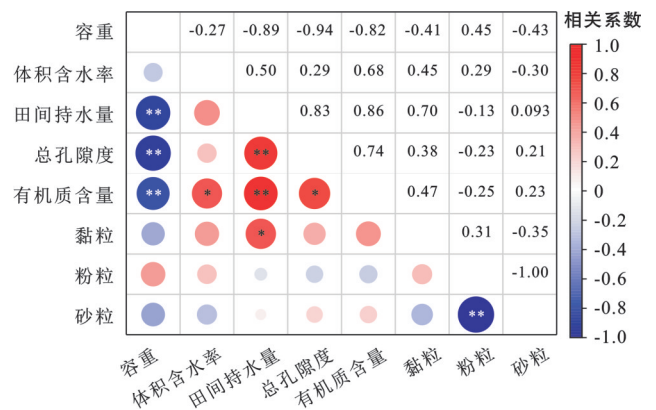


图 10 混交林土壤含水率与其他理化性质的相关性

Fig.10 Correlation analysis of soil moisture content and other physical and chemical properties in mixed forest

3.2 水分运移的影响因素

水分运移与其他土壤理化性质具有密切的联系。本研究发现,在 3 种林分样地中,水分运移与土壤理化性质具有相关性。3 种林分的土壤含水率均与土壤有机质呈现显著性正相关关系($p < 0.05$),土

壤有机质的增加可以使土壤水分增加^[26]。研究区柠条×油松混交林、油松纯林和柠条纯林在土层深度为20—40 cm平均土壤有机质分别为8.98, 9.43和7.99 g/kg, 相比于其他土层较高, 因此3种林分土壤含水率在20—40 cm处高于其他土层土壤含水率。有机质含量和黏粒还关系到土壤入渗情况, 有机质含量越高, 土壤入渗越好^[27]。在降雨等级为暴雨时, 3种林分在0—100 cm土层中, 水分运移响应情况呈现出油松纯林最好, 柠条纯林次之, 柠条×油松混交林稍差。尤其是在70—100 cm处, 混交土壤含水率增加极少, 是由于油松纯林0—100 cm土层平均土壤有机质为(7.6 g/kg) > 柠条纯林平均土壤有机质(7.2 g/kg) > 柠条×油松混交林平均土壤有机质(6.7 g/kg)。油松纯林在0—100 cm的土层中, 平均土壤黏粒含量最高(2.66%), 柠条纯林平均土壤黏粒次之(2.09%), 柠条×油松混交林平均土壤黏粒含量(1.54%)最少。良好的黏粒与有机质结合形成的团聚体结构, 增加了土保水能力, 土壤黏粒与有机质含量越高, 土壤持水能力越强, 透水能力越弱, 进而土壤含水率越高。

本研究结果表明, 砒砂岩区雨季在0—100 cm的土层中, 柠条×油松混交林(26.15%)的土壤含水率最高, 油松纯林(24.15%)次之, 柠条纯林(16.43%)最低, 出现这一现象的原因可能是受到土层厚度的影响。在雨季, 土层厚度越厚, 土壤含水率呈现出越高的趋势^[28]。研究表明^[29], 厚土层更有利于植被生长发育, 提高了土壤保水蓄水能力。柠条×油松混交林、油松纯林和柠条纯林土层厚度分别为27 cm, 23 cm, 21 cm, 越厚的土层, 土壤水分状况越好, 与冯喆等^[30]研究一致。3种林分在不同土层深度中, 土壤含水率差异较大, 大致呈现出随着土层深度增加, 土壤含水率先增加后降低再增加的波动趋势。这与李龙等^[31]在太行低山区探究荆条土壤变化含水率时得出结论相一致。植被覆盖度也是影响土壤水分的关键因子。Guo Jiahuan等^[32]发现混交林土壤肥力和酶活性均高于纯林, 从而导致混交林土壤保水性要高于纯林。由于地表凋落物以及植物根系可以影响土壤水分含量^[33-34]。研究表明^[35]混交林凋落物种类数量更加丰富, 有利于水分储存和渗透, 从而混交林土壤含水率要高于纯林土壤含水率。油松凋落物多于柠条凋落物, 且油松根系较柠条发达, 保水能力更强。因此油松纯林土壤含水率高于柠条土壤含水率。

4 结论

(1) 不同林分对土壤含水率具有影响, 本研究表

砒砂岩区雨季土层深度0—100 cm的土壤含水率柠条×油松混交林最高(26.15%), 油松纯林次之(24.15%)、柠条纯林最低(16.43%)。3种林分土壤含水率随着土层深度的增加呈现出先增加后减少再增加的波动趋势。

(2) 降雨规模为小雨和中雨时, 土壤水分补充深度分别为10 cm, 60 cm, 降雨规模为大雨和暴雨时, 0—100 cm土壤水分均补充。3种林分土壤含水率对降雨等级响应程度表现为: 暴雨 > 大雨 > 中雨 > 小雨。在不同降雨规模下, 柠条纯林土壤水分增量最高, 油松次之, 柠条×油松混交林的土壤水分增量最低。

(3) 在暴雨降雨规模下, 油松纯林与柠条×油松混交林0—50 cm土壤水分当天响应, 而柠条纯林0—60 cm土壤水分当天响应, 在雨后第2天呈现出小幅度平稳下降趋势, 柠条纯林80—100 cm土壤水分在雨后6 d依旧呈现上升趋势。

(4) 在降雨等级为暴雨时, 3种林分在0—100 cm土层中, 水分运移响应情况呈现出油松纯林最快, 柠条纯林次之, 柠条×油松混交林稍慢。这是由于相比于其他2种林分, 油松纯林平均有机质含量与黏粒含量最高(7.6 g/kg, 2.66%), 导致土壤持水能力最强, 透水能力最弱, 土壤运移状况最好。

参考文献 (References)

- [1] 万佳怡, 矢佳显, 张华敏, 等. 三江源区不同覆被类型高寒草甸土壤水分变化特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(8): 1343-1353.
Wan Jiayi, Shi Jiayun, Zhang Huamin, et al. Soil moisture variation characteristics of alpine meadow with different cover types in the three-river source region [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(8): 1343-1353.
- [2] 王俊. 黄土高原子午岭林区自然植被恢复过程中土壤水分和温度变异机制研究[D]. 陕西延安: 延安大学, 2023.
Wang Jun. Study of mechanism of soil water change during natural vegetation restoration in Ziwuling forest area on the Loess Plateau [D]. Yan'an, Shaanxi: Yan'an University, 2023.
- [3] Bogena H R, Huisman J A, Baatz R, et al. Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario [J]. Water Resources Research, 2013, 49(9): 5778-5791.
- [4] 单燕, 索立柱, 王洁, 等. 黄土高原样带典型地貌类型坡面土壤水分分布特征及其差异[J]. 土壤, 2024, 56(3): 593-600.
Shan Yan, Suo Lizhu, Wang Jie, et al. Distribution characteristics of soil water on slopes in typical landform types on Loess Plateau [J]. Soils, 2024, 56(3): 593-600.

- [5] 王宁,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林地土壤水分补偿特征[J].水土保持学报,2019,33(4):255-262.
Wang Ning, Bi Huaxing, Kong Lingxiao, et al. Soil water compensation characteristics of *Robinia pseudoacacia* forestlands with different densities in the loess region of western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4):255-262.
- [6] Yang Jing, Chen Hongsong, Nie Yunpeng, et al. Dynamic variations in profile soil water on karst hillslopes in Southwest China [J]. Catena, 2019, 172:655-663.
- [7] 王悦,王金满,时文婷,等.降雨强度与微地形塑造对露天煤矿排土场边坡土壤水分的影响[J].水土保持学报,2022,36(6):241-249.
Wang Yue, Wang Jinman, Shi Wenting, et al. The influence of rainfall intensity and micro-topography shaping on soil moisture of dump slope in opencast coalmine [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6):241-249.
- [8] 唐武,卢山,王一,等.华北土石山区坡面土壤水分动态变化及其对降雨的响应[J].水土保持通报,2024,44(6):77-87.
Tang Wu, Lu Shan, Wang Yi, et al. Dynamic changes in soil moisture on slopes and its response to rainfall in earth-rocky mountain area of north China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6):77-87.
- [9] 叶鑫,马英,高光耀,等.白洋淀上游不同树龄侧柏人工林土壤水分运移过程对次降雨的响应[J].生态学报,2024,44(24):11265-11275.
Ye Xin, Ma Ying, Gao Guangyao, et al. Responses of soil water transport processes to rainfall events in *Platycladus orientalis* forests with two stand ages in the upper reaches of Baiyangdian [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24):11265-11275.
- [10] 高露,张圣微,朱仲元,等.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[J].水土保持学报,2020,34(1):195-201.
Gao Lu, Zhang Shengwei, Zhu Zhongyuan, et al. Soil moisture changes in degraded grassland and its response to rainfall temporal pattern in arid and semi-arid areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1):195-201.
- [11] 闫德仁,黄海广,胡小龙,等.降雨对流动沙丘水分动态变化特征的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2016,37(1):47-53.
Yan Deren, Huang Haiguang, Hu Xiaolong, et al. Influence of rainfall on soil water dynamic in moving sanddune [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 37(1):47-53.
- [12] 石建周,刘贤德,田青,等.六盘山半干旱区华北落叶松林坡面土壤含水量的降雨响应[J].干旱区研究,2023,40(4):594-604.
Shi Jianzhou, Liu Xiande, Tian Qing, et al. Rainfall response of soil water content on a slope of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the semi-arid Liupan Mountains [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4):594-604.
- [13] 成龙,吴波,贾晓红,等.基于连续观测数据的毛乌素沙地生长季土壤水分动态及其对降雨的响应[J].干旱区地理,2024,47(4):648-661.
Cheng Long, Wu Bo, Jia Xiaohong, et al. Dynamic change of soil moisture and its response to rainfall during the growing season in Mu Us sandy land based on continuous observation data [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(4):648-661.
- [14] 赵利清,杨劼,张璞进,等.砒砂岩-黄土沟谷土壤含水量的时空变化[J].水土保持通报,2009,29(1):56-61.
Zhao Liqing, Yang Jie, Zhang Pujin, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture content in the soft-rock loess gully [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(1):56-61.
- [15] 陈慧,蔡甲冰,陈敏建.覆膜和降雨强度对玉米耗水过程及土壤水分入渗的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(增刊2):11-19.
Chen Hui, Cai Jiabing, Chen Minjian. Effects of mulching and rainfall intensity on soil water infiltration and water consumption for maize [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(Suppl. 2):11-19.
- [16] 董晓宇.裸露砒砂岩区土壤-基岩复合坡面水分运移过程及侵蚀特征研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
Dong Xiaoyu. Study on water transfer process and erosion characteristics of soil-bedrock composite slope in bare Pisha sandstone area [D]. Inner Mongolia, Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [17] 李学峰,饶良懿,徐也钦.砒砂岩不同类型区土壤氮磷养分特征[J].农业工程学报,2022,38(5):139-147.
Li Xuefeng, Rao Liangyi, Xu Yeqin. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus nutrients in different Pisha sandstone areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(5):139-147.
- [18] 王婧,李龙,张鹏,等.植被格局对砒砂岩坡地降雨侵蚀的影响[J].生态学报,2024,44(9):3934-3947.
Wang Jing, Li Long, Zhang Peng, et al. Effects of vegetation pattern on rainfall erosion on Pisha sandstone slope land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9):3934-3947.
- [19] 李洪杰,郭月峰,姚云峰,等.砒砂岩区沙棘液流及细根变化对土壤水分变化的响应[J].水土保持通报,2021,

- 41(5):38-43.
- Li Hongjie, Guo Yuefeng, Yao Yunfeng, et al. Response of water flow and fine roots of sea-buckthorn to soil moisture in a feldspathic sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 38-43.
- [20] Heisler-White J L, Knapp A K, Kelly E F. Increasing precipitation event size increases aboveground net primary productivity in a semi-arid grassland [J]. Oecologia, 2008, 158(1):129-140.
- [21] 余榕, 刘子琦, 李渊, 等. 典型石漠化区不同植被土壤水分对降雨的响应[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(5): 478-486.
- She Rong, Liu Ziqi, Li Yuan, et al. Response of soil moisture to rainfall in different vegetation types in typical rocky desertification area [J]. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(5):478-486.
- [22] 于晓燕. 黄土丘陵区深层土壤干化背景下降雨对初植苜蓿地土壤水分的影响[D]. 宁夏 银川: 宁夏大学, 2023.
- Yu Xiaoyan. Effect of rainfall on soil moisture in alfalfa field under the background of deep soil drying in Loess Hilly Region [D]. Yinchuan, Ningxia: Ningxia University, 2023.
- [23] 张鹤, 费洪岩, 韩凤朋, 等. 植被恢复和覆土厚度对砒砂岩区土壤水分及养分的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2):98-106.
- Zhang He, Fei Hongyan, Han Fengpeng, et al. Effects of vegetation restoration and soil thickness on soil moisture and nutrient in feldspathic sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 98-106.
- [24] 杨凯悦, 贾志清, 李清雪, 等. 高寒沙地典型人工林土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9):1757-1766.
- Yang Kaiyue, Jia Zhiqing, Li Qingxue, et al. Soil water dynamics and its response to rainfall in typical plantation of alpine sandy land [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(9):1757-1766.
- [25] 贺帅, 王晓江, 洪光宇, 等. 降雨对柠条锦鸡儿固沙林土壤水分动态变化特征的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5):106-112.
- He Shuai, Wang Xiaojang, Hong Guangyu, et al. Effect of rainfall on characteristics of soil water dynamic in *Caragana microphylla* sand fixation forest [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 106-112.
- [26] 王兴, 祁剑英, 井震寰, 等. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24):121-128.
- Wang Xing, Qi Jianying, Jing Zhenhuan, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil aggregate stability and carbon and nitrogen in paddy field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24):121-128.
- [27] 刘卓昕, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土区植被恢复对土壤水文物理性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 206-213.
- Liu Zhuoxin, Gao Peng, Mu Xingmin, et al. Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in loess region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6):206-213.
- [28] 王林, 冯锦霞, 万贤崇. 土层厚度对刺槐旱季水分状况和生长的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(3): 248-255.
- Wang Lin, Feng Jinxia, Wan Xianchong. Effects of soil thickness on dry-season water relations and growth in *Robinia pseudoacacia* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(3):248-255.
- [29] 张轩, 张强, 郜春花, 等. 覆土厚度对煤矸石山复垦土壤水分及大豆生长的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(8):968-971.
- Zhang Xuan, Zhang Qiang, Gao Chunhua, et al. Effect of soil replacement depth on soil moisture content and soybean growth in reclaimed coal waste piles [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43(8): 968-971.
- [30] 冯喆, 马理辉, 王志昊. 山地枣树在不同土层厚度下的土壤水分状况变化[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(1): 140-146.
- Feng Zhe, Ma Lihui, Wang Zhihao. Variation of soil moisture of jujube trees under different soil thickness in hilly region of Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(1):140-146.
- [31] 李龙, 张志华, 桑玉强, 等. 太行低山区荆条土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14):5752-5758.
- Li Long, Zhang Zhihua, Sang Yuqiang, et al. Soil moisture dynamics of vitex negundo and its response to different rainfall events in hilly region of Taihang Mountains [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14):5752-5758.
- [32] Guo Jiahuan, Feng Huili, McNie P, et al. Species mixing improves soil properties and enzymatic activities in Chinese fir plantations: A meta-analysis [J]. Catena, 2023, 220:106723.
- [33] Zhang Wanjun, Zhu Xiai, Xiong Xin, et al. Changes in soil infiltration and water flow paths: Insights from subtropical forest succession sequence [J]. Catena, 2023, 221:106748.