

六盘山华北落叶松林坡面土壤储水 时空变化特征及其影响因素

刘 珊¹, 刘泽彬^{2,3}, 王梦飞^{2,4}, 王彦辉^{2,3}, 徐丽宏^{2,3}, 刘小粉¹, 于澎涛^{2,3}

(1. 河北工程大学园林与生态工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护
研究所国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 3. 宁夏六盘山森林生态系统
定位观测研究站, 宁夏 固原 756400; 4. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: [目的] 受气象条件、植被特征、土壤性质和地形因子等差异影响, 坡面土壤水分沿坡面分布的差异导致土壤储水量有明显空间变异, 但目前对森林坡面不同坡位土壤水分动态及其影响因素的解析还不系统。[方法] 以六盘山半湿润区华北落叶松林典型坡面为研究对象, 于 2023 年 5 至 10 月监测了坡上、坡中和坡下 3 个坡位 0~80 cm 土层土壤水分体积分数变化, 并同步观测气象条件、植被结构和土壤水文物理性质等。[结果] 1) 土壤储水量存在坡位差异, 其平均值表现为坡中>坡下>坡上, 但土壤储水量的波动在坡中最大。2) 在时间上, 各坡位单场降雨事件 0~80 cm 土层土壤储水量增量变化均属强变异, 0~10、10~20 cm 土层土壤储水量增量的变异较小; 影响土壤储水量增量时间变化的主要因素为降雨量和降雨时长; 各坡位单个无雨时段 0~80 cm 土层土壤储水量减少量变化均属强变异, 其中 10~20 cm 土层变异最小; 影响土壤储水量减少量时间变化的主要因素为潜在蒸散和无雨时长。3) 不同坡位间土壤储水量增量大小表现为坡中>坡下>坡上, 主要与土壤体积质量和饱和导水率有关; 土壤储水量减少量大小表现为坡中>坡上>坡下, 主要与林地蒸散、石砾体积分数和总孔隙度有关。[结论] 研究结果对于深入理解坡面水分再分配机制及科学指导半湿润区山地的林水管理有重要价值。

关键词: 华北落叶松林坡面; 土壤储水量增量; 土壤储水量减少量; 时空变化; 控制因子

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

Spatiotemporal Variation Characteristics of Soil Water Storage and Their Influencing Factors on a Larch Plantation Hillslope in Liupan Mountains

LIU Shan¹, LIU Zebin^{2,3}, WANG Mengfei^{2,4}, WANG Yanhui^{2,3}, XU Lihong^{2,3}, LIU Xiaofen¹, YU Pengtao^{2,3}

(1. School of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2. Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology
and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Forest Ecosystem
Positioning Observation and Research Station of Liupan Mountains, Guyuan, Ningxia 756400, China;
4. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Variations in meteorological conditions, vegetation characteristics, soil properties, and topographic features lead to differences in soil moisture distribution along hillslopes, which in turn cause significant spatial variability in soil water storage (SWS). However, the current understanding of soil moisture dynamics and their influencing factors at different slope positions on forested hillslopes remains insufficiently systematic. [Methods] A study was conducted on a typical larch forest hillslope in the semi-humid Liupan Mountains. From May to October 2023, the spatiotemporal variations in soil volumetric water content were monitored at three slope

收稿日期: 2025-01-02

修回日期: 2025-03-03

录用日期: 2025-03-18

资助项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFF1300404); 国家自然科学基金项目(42477090); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2020QB004)

第一作者: 刘珊(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事森林生态水文研究。E-mail: liushan0611@126.com

通信作者: 刘小粉(1985—), 女, 博士, 教授, 主要从事森林水文、土壤碳氮循环研究。E-mail: liuxiaofenok@126.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

positions (upper, middle, and lower) within the 0—80 cm soil layer. During the same period, meteorological conditions, vegetation structure, and soil physical properties were observed simultaneously. [Results] 1) Soil water storage (SWS) varied significantly across different slope positions, with the average values following the order: middle slope > lower slope > upper slope. However, the greatest fluctuations in SWS were recorded on the middle slope. 2) Temporally, the incremental changes in SWS within the 0—80 cm soil layer exhibited strong variability across all three slope positions during a single rainfall event. Among different layers, the SWS in the 0—10 and 10—20 cm soil layers demonstrated relatively lower variability. The primary factors influencing the temporal variation of SWS increments were rainfall amount and duration. The variation in SWS reduction in the 0—80 cm soil layer was also highly variable at all three slope positions during a single rain-free period, with the least variability observed in the 10—20 cm soil layers. The main factors affecting the temporal variation of SWS reduction were potential evapotranspiration and the duration of rain-free periods. 3) Spatially, SWS increment magnitude followed the order of middle slope > lower slope > upper slope, mainly related to soil bulk density and saturated hydraulic conductivity. The magnitude of SWS reduction followed the order of middle slope > upper slope > lower slope, mainly related to stand evapotranspiration, gravel volumetric content, and total porosity. [Conclusion] These findings provide valuable insights into the mechanisms of soil water redistribution on forested hillslopes and offer scientific guidance for sustainable forest-water management in semi-humid mountainous regions.

Keywords: North China larch plantation hillslope; soil water storage increment; soil water storage reduction; spatiotemporal variations; controlling factors

Received: 2025-01-02

Revised: 2025-03-03

Accepted: 2025-03-18

土壤水分是连接大气-植被-土壤-地下水系统的关键水文变量,其时空动态变化深刻影响山地生态系统的植被生长和土壤水分运移等生态水文功能的稳定性^[1-2]。在坡面尺度上,受气象条件、植被特征、土壤性质及地形因子的综合影响,土壤水分的分配呈显著的坡位变异特征,直接导致土壤水分体积分数的空间异质性^[3-4]。尽管已有研究在坡面土壤水分时空变异特征及其时间稳定性等方面取得重要进展,并初步揭示其影响机理,但对坡面土壤水分循环的2个关键过程水分补充和消耗的动态特征及其坡位差异仍缺乏系统研究。因此,深入探究坡面土壤水分的动态特征及其坡位差异,对于完善坡面土壤水分空间变异理论具有重要意义。

坡面土壤水分补充和消耗过程具有明显的时空异质性,李雪婷等^[5]通过野外监测发现,降雨对土壤水分的补充量总体表现为下坡位 > 中坡位 > 上坡位;唐武等^[6]的研究进一步发现,林地蒸散耗水存在坡位差异,暗示土壤水分消耗过程可能随坡位变化呈不同的变化特征。影响土壤水分补充和消耗时空动态的主要因子包括气象条件(如降雨特征和潜在蒸散)、植被结构和土壤水文物理性质等^[7-8],然而现有研究尚未在时空维度上对这些影响因子进行系统解析。特别是在森林坡面,由于植被结构、土壤性质和地形因子的空间异质性,土壤水分补充与消耗量

受植被截留、蒸腾和蒸发的多重影响,表现出更为复杂的空间异质性。王梦飞等^[9]的研究表明,不同坡位植被结构造成的林冠截留能力差异导致土壤水分补充量有明显的空间变异;石春茂等^[10]则研究发现,坡位间气象条件的差异使得土壤水分消耗量在土壤水分蒸发强烈的坡位显著增加,凸显森林坡面土壤水分循环过程的复杂性。总体上,尽管现有研究在特定林分坡面的土壤水分补充过程(如降雨入渗机制等^[11-12])方面已积累丰富成果,但对土壤水分消耗过程及其补充过程的时空动态机制仍缺乏深入探讨。考虑到土壤水分补充和消耗的时空动态及其差异共同决定土壤水分的时空变异,未来研究亟需加强对这2个过程的同步观测与系统分析,以全面揭示坡面土壤水分循环时空演变规律及其生态水文效应。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)作为六盘山区主要的造林树种,对当地的水源涵养、水土保持有重要作用^[13]。有研究^[14]表明,华北落叶松林坡面的植被结构和土壤物理性质具有明显的空间异质性,对土壤储水在坡面的空间分布格局具有重要影响。本研究试图通过对影响坡面土壤储水动态的2个关键过程水分补充与消耗的时空动态及其影响机制的系统探讨,深入理解坡面土壤储水格局的形成机制。为此,本研究选取六盘山香水河小流域的华北落叶松林典型坡面,系统观测坡上、坡中和坡下

3 个典型坡位的土壤水分体积分数动态变化,并计算 0~80 cm 土壤储水量;同时,结合植被结构特征、土壤水文物理性质和气象因子的综合观测,定量分析土壤储水量增量和减少量的时空变异,并运用多种统计分析方法识别其主导控制因子,旨在为林水精细化管理和可持续经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区六盘山自然保护区南侧的香水河小流域(35°27′~35°33′N, 106°12′~106°16′E),海拔 2 010~2 942 m,面积 43.7 km²,属暖温带半湿润气候,年平均气温 5.8 ℃,年平均降水量 618 mm,5~10 月降雨量占全年降雨量的 88%,无霜期 100~103 d。小流域内土壤以山地灰褐土为主。小流域内植被类型以天然次生林和人工林为主,天然次生林树种有华山松(*Pinus armandii*)、红桦(*Betula albosinensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)和辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等;人工林树种以华北落叶松为主,另有少量油松(*Pinus tabulaeformis*)。

1.2 坡面选择与样地设置

在小流域内选取 1 个东南坡向、生长有华北落叶松(42 a 生,1981 年种植)同龄林的典型坡面,其水平

坡长 425.1 m,平均坡度 27.8°,土层深度 0.8~1.0 m。林下灌木稀少,以蒙古荚蒾(*Viburnum mongolicum*)和秦岭小檗(*Berberis circumserrata*)为主,覆盖度 5%。草本多为东方草莓(*fragaria orientalis*)和 华北苔草(*Carex hancokiana*),覆盖度 40%。2023 年 5 月 16 日至 10 月 31 日在坡上、坡中和坡下各设置 1 个 30 m×30 m 的样地开展试验(图 1)。各坡位样地林分及土壤基本信息见表 1 和表 2。

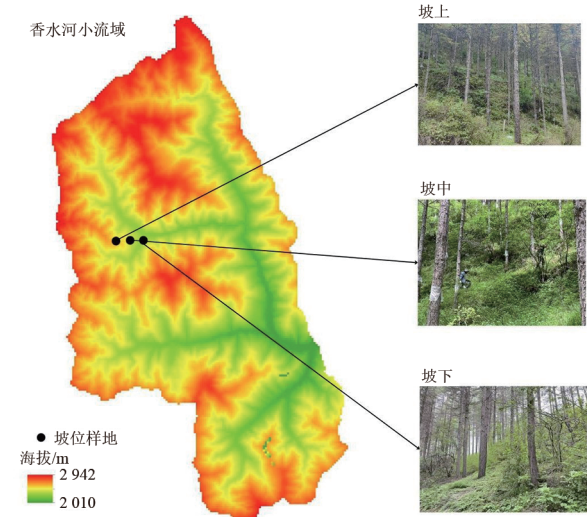


图 1 研究样地位置

Fig. 1 Location of the study plots

表 1 各坡位样地的林分信息

Table 1 Stand information of sample plots at each slope position

坡位	海拔/m	坡度/(°)	林分密度/(株·hm ⁻²)	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm	地上生物量/(t·hm ⁻²)
坡上	2 471	26.3	942	0.73	19.43	21.83	98.67
坡中	2 386	26.8	933	0.79	20.05	22.30	127.51
坡下	2 276	34.9	907	0.72	19.49	21.40	110.59

注:地上生物量(包括乔木、灌木、草本和枯落物生物量)为 2020 年调查数据。

表 2 各坡位样地的土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties of sample plots at each slope position

坡位	土层深度/cm	体积质量/(g·cm ⁻³)	田间持水量/(g·kg ⁻¹)	石砾体积分数/%	总孔隙度/%	饱和导水率/(mm·min ⁻¹)
坡上	0~10	0.79±0.05	342.48±11.32	4.75±1.62	65.00±3.61	0.48±0.03
	10~20	0.78±0.07	328.09±11.06	3.50±1.52	56.95±2.72	0.51±0.18
	20~40	1.38±0.15	312.02±7.81	27.00±0.87	48.80±2.99	0.23±0.90
	40~60	1.58±0.25	208.86±9.98	22.00±1.52	44.95±3.46	0.33±0.12
	60~80	1.41±0.14	163.17±11.90	39.00±0.86	46.30±3.52	0.32±0.23
坡中	0~10	0.97±0.07	405.63±15.5	4.25±1.01	67.70±2.81	0.67±0.13
	10~20	1.06±0.11	352.22±14.22	13.00±0.86	65.45±1.49	0.45±0.07
	20~40	1.07±0.22	231.84±8.62	27.00±2.18	60.80±2.46	0.70±0.61
	40~60	1.27±0.21	186.81±3.80	61.00±2.08	49.50±1.63	1.77±0.86
	60~80	1.34±0.08	159.70±4.19	59.50±3.61	39.05±2.68	2.04±0.55
坡下	0~10	0.92±0.04	399.31±12.08	3.25±0.87	59.38±1.04	0.17±0.14
	10~20	1.01±0.09	350.87±13.39	1.50±0.28	56.05±1.85	0.51±0.15
	20~40	1.02±0.19	357.92±7.40	2.00±1.04	54.25±0.90	1.77±0.10
	40~60	1.26±0.13	170.69±10.85	18.50±0.57	37.55±2.98	0.31±0.52
	60~80	1.63±0.18	149.25±4.29	21.00±0.76	42.30±0.63	0.53±0.27

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3 研究方法

1.3.1 坡面降雨量的测定 考虑到降雨量在所研究坡面分布基本一致,在距研究坡面约 100 m 的空旷处放置 1 台自动气象站(WeatherHawk232, USA)用于测量研究期间坡面的降雨量,每隔 10 min 记录 1 次数据。

1.3.2 坡面气象条件观测 受山体遮挡影响,气象条件在不同坡位存在差异,故在各坡位样地的林分上方安装 ATMOS41 气象传感器(Meter, USA),测定空气温度(℃)、空气相对湿度(%)、太阳辐射强度(W/m^2)、风速(m/s)等,传感器距林地地面约 22 m。利用 CR1000X 数据采集器(Campbell, USA)每隔 10 min 记录 1 次数据。利用彭曼公式^[15]和 EToCalculator 软件,基于观测的空气温度、空气相对湿度、太阳辐射强度和风速计算潜在蒸散。

1.3.3 坡面林地蒸散观测 在各坡位样地内选择不同胸径大小样树 6 棵,在每棵样树的胸高位置安装 SF-L 热扩散液流探针(Ecomatik, GER)测定树干液流速率,利用 CR1000X 数据采集器每隔 10 min 记录 1 次数据。基于 Granier 方程^[16]和 Baseline 3.0 软件将测定的温差数据转化为树干液流速率。林分日蒸腾(mm)通过测定样树平均液流速率和样地总边材面积进行尺度上推。

基于各坡位样地在代表性位置的 3 个自制的口径为 20 cm 的小型蒸渗装置^[17]测定林下蒸散(土壤蒸发、枯落物蒸发和草本蒸腾之和),每天傍晚 18:00 左右进行称重。林下日蒸散量(mm)为邻近 2 d 重量之差除以截面积。若期间有渗漏水,林下日蒸散量为邻近 2 d 重量之差减去渗漏水重量后除以截面积。

无雨时段的林地日蒸散(mm)为林分日蒸腾与林下日蒸散量之和。

1.3.4 土壤物理性质测定 2023 年 6 月,在 3 个坡位样地的上、中、下部位各挖取 1 个剖面,利用体积为 100 cm^3 的环刀按 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层取原状土样,带回实验室,按照《森林土壤水分-物理性质的测定》^[18]先测定田间持水量、最大持水量和孔隙度等,然后采用双环刀有压入渗法测定土壤饱和导水率,用烘干法测定体积质量,最后用排水法测定石砾体积分数。

1.3.5 坡面土壤水分体积分数的观测 在各坡位样地的中部选取接近样地林冠结构(用叶面积指数表征)平均水平的观测点监测土壤水分体积分数。前期研究^[19]表明,该研究区坡面华北落叶松的根系主要集中在 0~80 cm 土层,故在坡下、坡中、坡上的各样地分别按 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层布设土壤水分和温度传感器(ML3, Delta-T, UK)

监测土壤水分体积分数,利用 CR1000X 数据采集器每隔 10 min 记录 1 次数据。

1.4 数据处理与分析

参照已有研究^[9],将降雨间隔 $>6\text{ h}$ 的 2 次降雨划分为 2 次独立降雨事件,将 $\leq 2\text{ mm}$ 的降雨划分为无效降雨。

1.4.1 土壤储水量 土壤储水量指在自然状态下土壤中储存的水量,其大小由土层厚度和土壤水分体积分数确定,计算公式为^[20]:

$$W = \frac{\theta}{100} \times h \times 10 \quad (1)$$

式中: W 为土壤储水量, mm ; θ 为土壤体积含水量,%; h 为土层深度, cm 。

1.4.2 土壤储水量增加量 雨后土壤储水量增加量是衡量降雨对土壤水分补给多少的重要指标,计算公式为^[21]:

$$\Delta W = W_{s,\max} - W_{s,o} \quad (2)$$

式中: ΔW 为雨后土壤储水量增加量, mm ; $W_{s,\max}$ 为雨后土壤储水量峰值, mm ; $W_{s,o}$ 为雨前土壤储水量, mm 。

1.4.3 土壤储水量减少量 无雨时段土壤储水量减少量是衡量土壤水分散失多少的重要指标,计算公式为^[22]:

$$\Delta W_{\text{loss}} = W_{s,\max} - W_{s,1} \quad (3)$$

式中: ΔW_{loss} 为土壤储水量减少量, mm ; $W_{s,\max}$ 为雨后土壤储水量峰值, mm ; $W_{s,1}$ 为下一降雨事件前的土壤储水量, mm 。

1.4.4 变异系数 用变异系数(CV)表示土壤储水量随时间的波动程度,计算公式为^[9]:

$$CV = \frac{\sigma}{\alpha} \times 100\% \quad (4)$$

式中: σ 为标准差; α 为平均值。当 $CV < 10\%$ 时,为弱变异;当 $10\% \leq CV \leq 100\%$ 时,为中等变异;当 $CV > 100\%$ 时,为强变异。

1.4.5 统计分析 采用 SPSS 22.0 和 Origin 2022 软件中的 Pearson 相关分析和相关性热图,分析和绘制坡面土壤储水量增量(减少量)与降雨量(潜在蒸散)、降雨(无雨)时长、雨前(雨后)土壤储水量的关系;利用 Origin 2022 软件中的线性回归,确定影响土壤储水量增量和减少量坡位差异的主导因素。

2 结果与分析

2.1 气象条件、林地蒸散和土壤储水量变化

研究期间(2023 年 5 月 16 日至 10 月 31 日)共监测到 31 场降雨事件,单场降雨事件降雨量为 3.0~114.0 mm,累积降雨量为 435.0 mm。无雨时段,不同坡位潜在蒸散表现为坡上(426.6 mm) $>$ 坡中(393.4 mm) $>$ 坡下(372.2 mm)。林地蒸散由于受气象、植

被和立地环境等多因素影响,其坡位格局与潜在蒸散有所不同,表现为坡中>坡上>坡下(图2)。

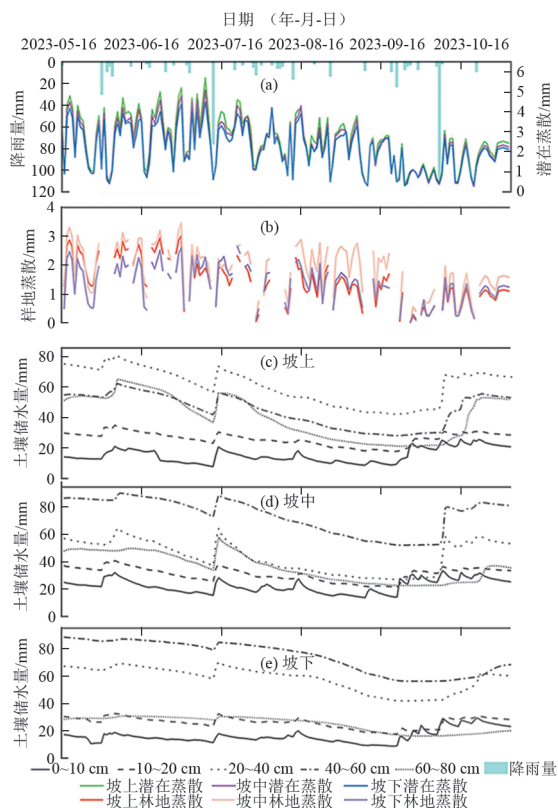


图2 不同坡位气象条件、林地蒸散和各层土壤储水量变化特征
Fig. 2 Variation characteristics of meteorological conditions, stand evapotranspiration, and soil water storage in each soil layer at different slope positions

由图2可知,在时间上,各土层深度土壤储水量在3个坡位均出现明显波动,土壤储水量的变异系数

总体上表现为在0~10、60~80 cm土层较大,20~60 cm土层较小。在空间(坡位)上,受不同坡位土壤水分补充与消耗差异的影响,土壤储水量存在坡位差异。尽管各土层土壤储水量大小的坡位排序不一致,但总体上,0~80 cm土层土壤储水量表现为坡中>坡下>坡上。

2.2 单场降雨事件下土壤储水量增量过程及时空变化特征

图3为典型降雨事件(16 mm)土壤储水量的增量变化过程。降雨1 h后,土壤储水量增量在坡中达60 cm,在坡下和坡上仅40 cm。土壤储水量增量在坡下随土层加深而降低,在坡中和坡上20~40 cm土层的大于10~20 cm土层,表明有明显的优先流通道。随降雨的持续(3、5.8 h),各坡位0~10 cm土壤储水量增量明显,坡下和坡上10~20 cm及坡中40~60 cm也有增加,进一步证实坡中优先流通道发育明显。

由图4可以看出,时间动态上,单场降雨事件中,0~80 cm土层土壤储水量增量均呈强变异,坡上、坡中和坡下的变异系数分别为226.5%、211.2%和225.1%;不同土层间,0~10、10~20 cm土层土壤储水量增量的变异较小。在不同坡位间,土壤储水量增量存在差异,其累积增量表现为坡中(345.4 mm)>坡下(285.5 mm)>坡上(243.6 mm),但20 cm以下土层土壤储水量增量坡位排序复杂,可能与坡中和坡上的优先流通道有关。

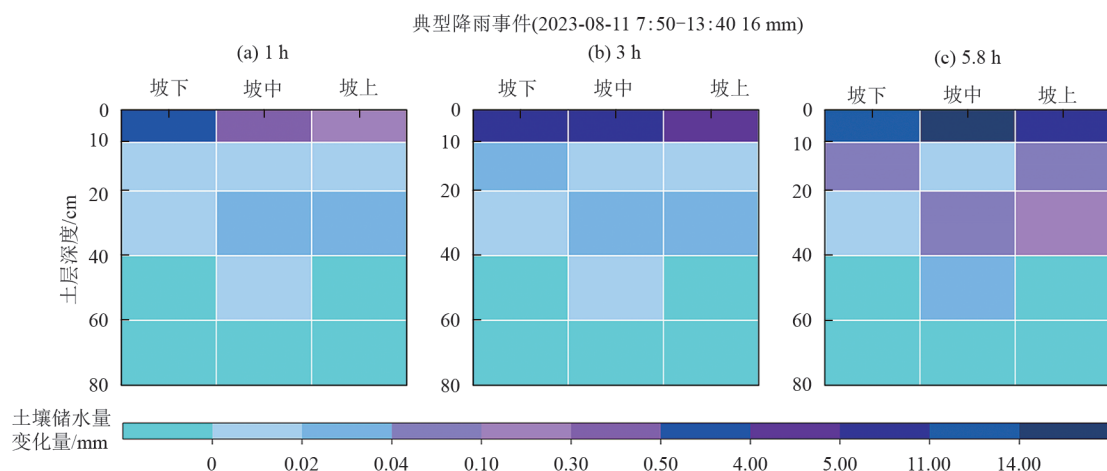


图3 典型降雨事件下不同土层土壤储水量的变化过程

Fig. 3 Changes in soil water storage in different soil layers during a typical rainfall event

2.3 无雨时段下土壤储水量减少量过程及时空变化特征

图5为典型无雨时段(7天)土壤储水量减少量变化过程。无雨2 d后,土壤储水量在坡上和坡下的

0~10、40~80 cm土层减少,10~20、20~40 cm土层增加;在坡中的0~10、20~80 cm土层减少明显,仅10~20 cm土层增加。无雨4 d后,除10~20 cm土层外,其他土层土壤储水量均减少。无雨7 d后,除坡

中 10~20 cm 土层外,其他土层土壤储水量减少明显。总体而言,土壤储水量在 0~10、20 cm 以下土层减少明显,在 10~20 cm 土层减少缓慢。

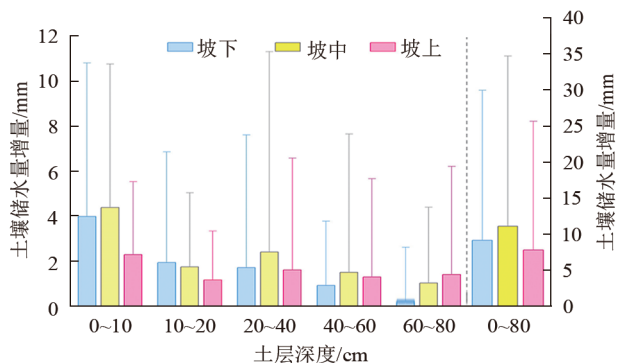


图 4 单场降雨事件下土壤储水量增量的统计特征

Fig. 4 Statistical characteristics of soil water storage increment during a single rainfall event

时间动态上,单个无雨时段中,0~80 cm 土层土壤储水量减少量呈强变异,坡上、坡中和坡下的变异系数分别为 115.6%、113.3% 和 108.1%;不同

土层间,10~20 cm 土层变异最小(图 6)。在不同坡位间,土壤储水量减少量存在差异,其累积减少量表现为坡中(282.1 mm)>坡上(258.4 mm)>坡下(238.8 mm),但 40~60、60~80 cm 土层中,坡上土壤储水量减少量高于坡中和坡下(图 6)。

2.4 土壤储水量增量和减少量时空变化的影响因素

相关分析(图 7)表明,土壤储水量增量的时间变异主要受降雨量和时长影响,与雨前土壤储水量无关,且随降雨量和时长增加而明显增加;土壤储水量减少量的时间变异主要受潜在蒸散和无雨时长影响,与雨后土壤储水量无关,且随潜在蒸散和无雨时长增加而明显增加。线性回归分析表明,土壤储水量增量的坡位变异与地上生物量、土壤体积质量和饱和导水率呈显著线性关系,其中土壤体积质量和饱和导水率是主导因素(图 8);林地蒸散、总孔隙度和石砾体积分数是影响土壤储水量减少量坡位变异的主导因素,均与土壤储水量减少量呈显著线性关系(图 9)。

典型无雨时段 (2023年8月11日13:50至8月18日13:50 7 d)

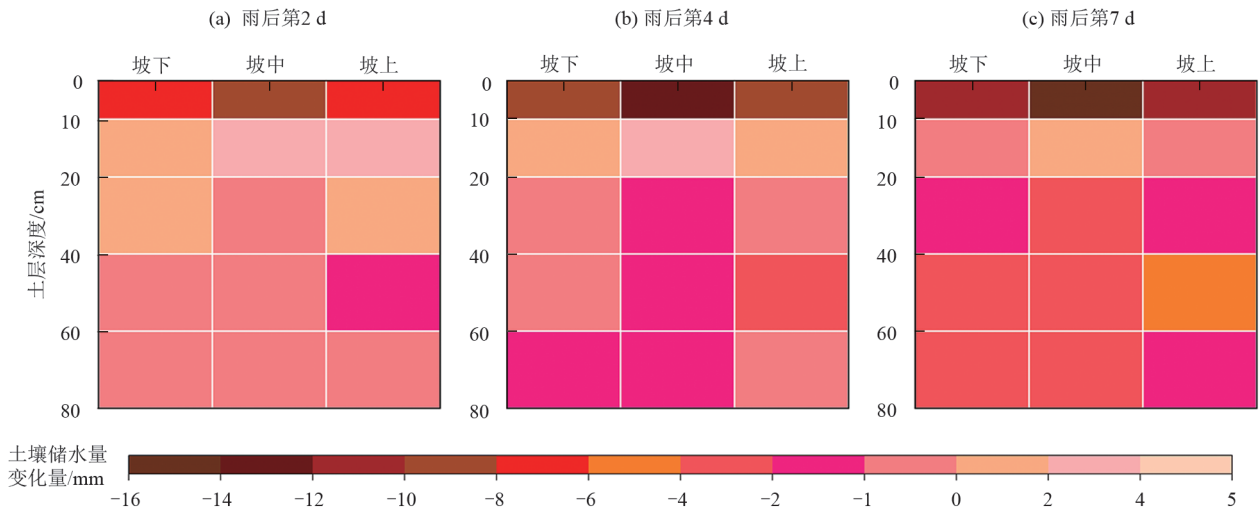


图 5 典型无雨时段下不同坡位各土层土壤储水量变化过程

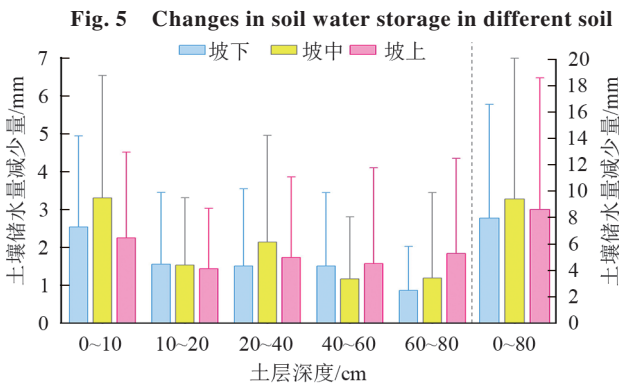
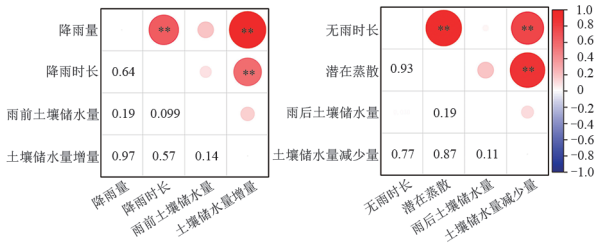


图 6 无雨时段土壤储水量减少量的统计特征

Fig. 6 Statistical characteristics of soil water storage reduction during a dry period



注: *表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$ 。

图 7 时间尺度上土壤储水量增量和减少量与主要因子的相关性

Fig. 7 Correlations between soil water storage increments/reduction and their primary influencing factors on timescales

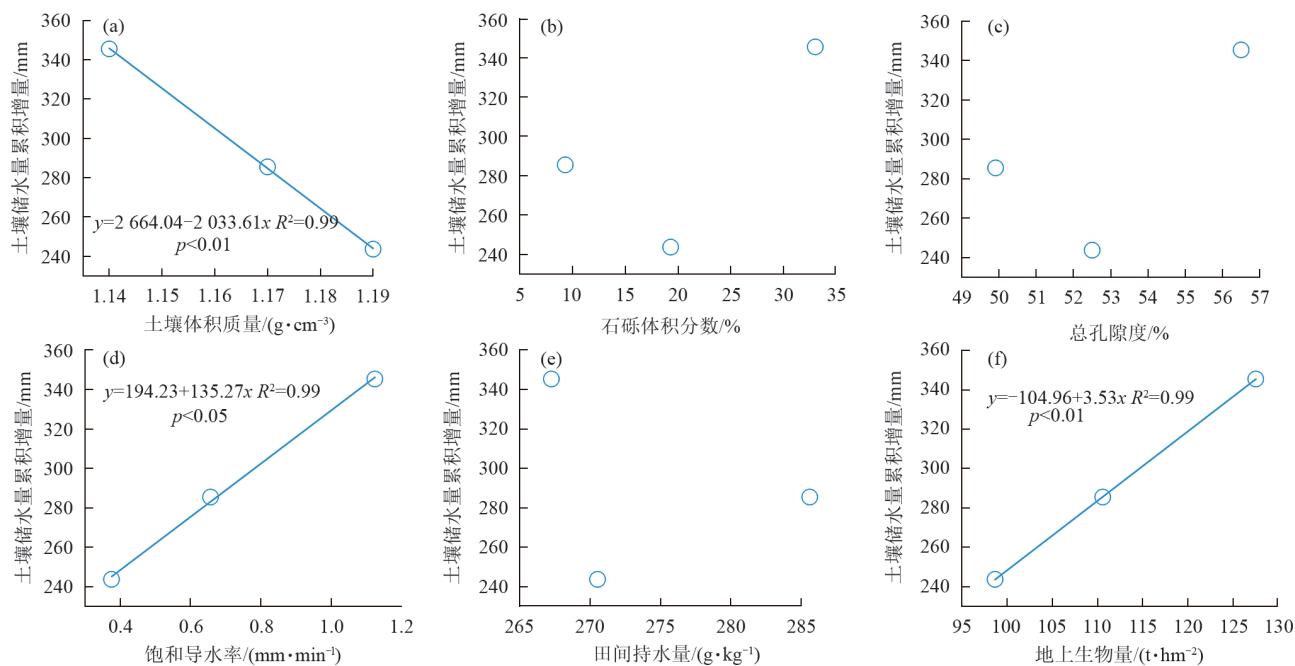


图8 土壤储水累积增量随坡面土壤水文物理性质和地上生物量的变化

Fig. 8 Variation of cumulative soil water storage increment with hillslope soil hydrophysical properties and aboveground biomass

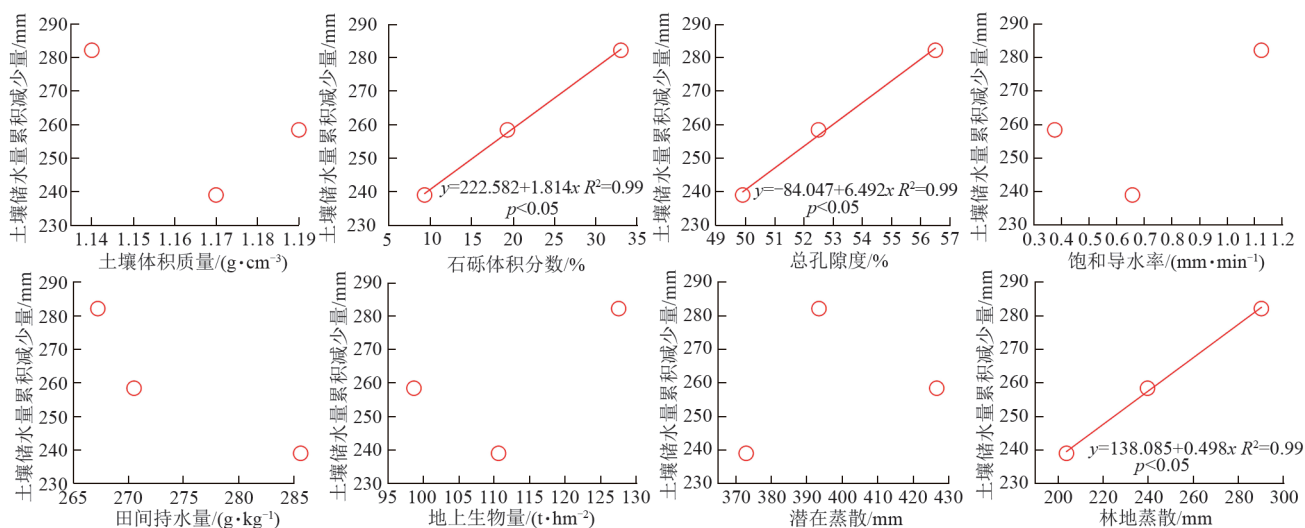


图9 土壤储水累积减少量随坡面土壤水文物理性质、林地蒸散和地上生物量的变化

Fig. 9 Variation of cumulative soil water storage reduction with hillslope soil hydrophysical properties, stand evapotranspiration, and aboveground biomass

3 讨论

3.1 土壤储水量坡位差异及其原因

土壤储水量(或土壤水分体积分数)具有坡位差异,但其坡位变化格局因区域环境特征和植被类型而异,如唐武等^[6]在华北土石山区的研究表明,土壤水分体积分数呈坡下>坡上>坡中的空间分布;而刘源等^[23]在祁连山区的研究则发现,土壤水分体积分数沿坡自上而下呈递减变化。本研究中,华北落叶松林坡面土壤储水量表现为坡中>坡下>坡上。通常立地环境(特别是土壤物理性质)和植被结构是导致土壤储水量坡位差异的主要因素,这些因素通过调

控土壤储水量的补充和消耗过程,最终决定土壤储水量的沿坡分布格局^[24]。本研究发现,土壤储水量净增量具有明显的坡位差异,在坡中最大(63.3 mm),坡下次之(46.7 mm),坡上最小(-14.8 mm)。这种差异性的水分收支格局是导致土壤储水量坡位差异的直接原因。

本研究观测到土壤储水量变化在坡中最为剧烈,可能的原因有:一是来自上坡的侧向水分输入更多,坡中作为坡面的过渡带,往往接收更多来自坡上的侧向流补给。尽管本研究坡面并未观测侧向补给量,但在六盘山其他华北落叶松林坡面的研究^[25]表

明,坡中接受的侧向补给最多。二是坡中具有更优的水力特性,坡中土壤饱和导水率高于坡下和坡上(表2),能够促进土壤水分的快速入渗和分配。三是坡中具有较好的水热条件(图2),林地蒸散和土壤水分体积分数均高于其他坡位,利于维持较高蒸散量。

3.2 土壤储水量增量的时空变化及影响因素

在坡面上,土壤储水量增量的时空变化受多种因素共同影响,包括气象条件、地形因子、土壤物理性质和植被结构等^[26]。在时间动态上,土壤储水量增量通常受降雨量、降雨时长和雨前土壤水分体积分数等^[27-28]影响。

本研究中,单场降雨事件土壤储水量增量与降雨量和降雨时长有关,降雨作为土壤水分补给的主要来源,其强度和持续时间直接影响水分入渗过程^[29]。

本研究发现,单场降雨事件土壤储水量增量与雨前土壤储水量无显著相关,可能与研究区以低强度、短历时的小雨为主有关。在空间上,0~80 cm 土层土壤储水量增量总体表现为坡中>坡下>坡上。相关分析表明,土壤储水量增量主要与地上生物量、土壤体积质量和饱和导水率显著相关,其中,土壤物理性质对土壤储水量增量坡位变化格局具有决定性影响,较低的土壤体积质量和较高的饱和导水率利于形成良好的土壤孔隙结构,促进降雨快速入渗,减少地表径流损失^[30],从而增加土壤储水量。地上生物量作为表征森林生态系统植被结构的关键参数,其与植被覆盖和结构复杂度紧密相关^[31]。理论上,较高的地上生物量增强降雨截留作用,减少达到地表的净雨量,但本研究发现,地上生物量与土壤储水量增量呈正相关,表明其并非主导控制因子。在不同土层深度上,土壤储水量增量也有坡位差异,特别是在20 cm 以下土层,这种空间差异更为复杂。王梦飞等^[9]在本研究坡面上发现,坡中和坡上的土壤优先流发育明显,土壤大孔隙和优先流路径的存在可能重塑水分在垂向的再分配过程,从而导致不同坡位土壤储水量增量在不同土层间呈复杂的空间分布。

3.3 土壤储水量减少量的时空变化及影响因素

土壤储水量减少量主要由土壤蒸发、植被蒸腾和深层渗漏等水文过程引起^[32],已有研究^[14]表明,由于坡面气象条件、植被结构和土壤物理性质的差异,植被蒸腾和土壤渗漏等水文过程存在明显的坡位变异,直接决定土壤储水量减少量的坡面变化格局。在时间动态上,土壤储水量减少量主要与潜在蒸散和无雨时长呈显著正相关。潜在蒸散作为土壤水分消耗的能量来源,其强度和持续时间显著影响土壤水分体积分数动态。但土壤储水量减少量与雨后的土壤初始储水量不显著相关,可能是与雨后水分在

土体中的再分配有关,在重力作用下,在雨后的较短时间内土壤水分运移(特别是垂向的深层渗漏)依旧活跃,从而切断雨后土壤初始储水量与其后续减少量的直接关联。在空间上,0~80 cm 土层土壤储水量减少量表现为坡中>坡上>坡下。相关分析表明,土壤储水量减少量与林地蒸散显著相关。坡中因林地蒸散较高,导致土壤水分消耗加剧,土壤储水量减少。同时,土壤储水量减少量与石砾体积分数和总孔隙度显著相关,较高土壤石砾体积分数和总孔隙度促进大孔隙网络的形成,降低土壤持水能力,从而加速水分向深层渗漏^[33],因此,坡位间土壤储水量减少量的差异同时受到蒸散作用和深层渗漏的共同调控。在不同土层间,土壤储水量的降低沿土层呈非连续的变化,在0~10、20 cm 以下土层减少较快,而在10~20 cm 土层减少较慢,表明10~20 cm 土层水分再补给通量大于其蒸发损失量。有研究^[34-35]表明,中间土层受特殊水力特性影响(特别是当土壤水势介于-33~-100 kPa 时,水力传导度的突变特性显著延缓水分耗散过程),其水分再补给通量可显著抵消蒸发损失,本研究结果进一步支持此现象。

3.4 研究不足与未来展望

尽管本研究系统探讨影响土壤储水量坡位差异的关键因素,但在坡位间水分传输与交换对土壤储水量坡面变化的影响方面考虑不足。另外,本研究仅观测3个典型坡位,样本量的不足可能导致对土壤储水量坡位差异影响机制的解析带来不确定性,未来研究中将优化样地布设方案,增加观测点位密度,并开展长期定位观测,在验证当前发现的同时,进一步深入理解土壤储水量坡位差异影响机制。

由于仪器设备的限制,每个坡位样地仅布设1套土壤水分观测系统。尽管选点充分考虑样地林冠结构的平均水平,但仍难以全面反映森林结构的高度空间异质性,可能对土壤水分动态的精确量化产生一定影响。基于此,未来研究将继续增加样地内土壤水分监测点的布设密度或基于空间插值技术提高林地土壤水分动态评估的精度和可靠性。

4 结 论

1)单场降雨事件80 cm 土层土壤储水量增量的时间变化属于强变异,主要与降雨量和降雨时长有关;土壤储水量累积增量总体表现为坡中>坡下>坡上,土壤体积质量和饱和导水率是导致土壤储水量增量坡位差异的主要因素。

2)单个无雨时段80 cm 土层土壤储水量减少量时间变化也属强变异,主要与潜在蒸散和无雨时长有关;土壤储水量累积减少量总体表现为坡中>坡上>坡下,林地蒸散、总孔隙度和石砾体积分数是导

致土壤储水量减少量坡位差异的主要因素。

3)土壤储水量净增量表现为坡中>坡下>坡上,是导致土壤储水量坡面变化格局的直接原因。

参考文献:

- [1] 朱洪盛,赵炯昌,池金洺,等.晋西黄土区典型造林整地措施对土壤水分动态的影响[J].浙江农林大学学报,2024,41(5):996-1004.
- ZHU H S, ZHAO J C, CHI J M, et al. Soil moisture characteristics under level bench and vegetation in loess area of western Shanxi Province [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(5):996-1004.
- [2] 韩新生,许浩,蔡进军,等.宁夏黄土区稀疏带状山杏人工林土壤湿度动态与影响因素[J].林业科学,2024,60(4):79-90.
- HAN X S, XU H, CAI J J, et al. Soil moisture dynamics and the influencing factors in the sparse strip-planted *Prunus sibirica* plantation in the loess region of Ningxia [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(4):79-90.
- [3] YANG L, CHEN L D, WEI W. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions [J]. Catena, 2014, 124:138-146.
- [4] GONG T X, ZHU Y J, QIAO J B, et al. Spatial variability and forecast of soil water in the ultra-deep loess profile across a south-north transect of the Chinese Loess Plateau [J]. Hydrological Processes, 2024, 38(3):e15108.
- [5] 李雪婷,刘目兴,卢世国,等.三峡库区茶园坡面土壤水分空间分布特征及对降雨补给的响应[J].水土保持学报,2023,37(5):137-144.
- LI X T, LIU M X, LU S G, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture on tea garden slope and its response to rainfall replenishment in the Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):137-144.
- [6] 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 W, LU S, WANG Y, et al. Dynamic changes of soil moisture on slopes and its response to rainfall in rocky mountain area of North China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6):77-87.
- [7] QIU Y, FU B J, 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.
- [8] CAI J J, ZHOU B T, CHEN S Y, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture and its driving factors in the northern agricultural regions of China [J]. Water, 2024, 16(4):e556.
- [9] 王梦飞,刘泽彬,于松平,等.华北落叶松林不同坡位土壤含水量对降雨的响应[J].森林与环境学报,2024,44(4):357-366.
- WANG M F, LIU Z B, YU S P, et al. Response of soil moisture content to rainfall at different slope positions in *Larix gmelinii* var. *Principis-rupprechtii* plantation [J]. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(4):357-366.
- [10] 石春茂,罗娅,杨胜天,等.干热河谷区不同坡位土壤水分对降雨的响应特征[J].应用生态学报,2022,33(5):1352-1362.
- SHI C M, LUO Y, YANG S T, et al. Responses of soil moisture at different slope positions to rainfall in dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(5):1352-1362.
- [11] LIU Z B, WANG Y H, YU P T, et al. Spatial pattern and temporal stability of root-zone soil moisture during growing season on a larch plantation hillslope in north-west China [J]. Forests, 2018, 9(2):e68.
- [12] ZHANG Z, ZHANG Y L, HENDERSON M, et al. Effect of land use type on soil moisture dynamics in the sloping lands of the black soil (mollisols) region of North-East China [J]. Agriculture, 2024, 14(8):e1261.
- [13] 晁阳,于松平,刘泽彬,等.六盘山半湿润区华北落叶松林内降雨的空间异质性及合理取样数[J].林业科学研究,2023,36(4):20-30.
- CHAO Y, YU S P, LIU Z B, et al. Spatial heterogeneity and reasonable sampling sizes of rainfall in a *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (mayr) pilg. plantation in the semi-humid Liupan Mountains [J]. Forest Research, 2023, 36(4):20-30.
- [14] 刘泽彬,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山华北落叶松林坡面土壤含水量的时空变化[J].山地学报,2018,36(1):43-52.
- LIU Z B, WANG Y H, XU L H, et al. Spatial-temporal variations and scale effect of soil moisture on *Larix principis-rupprechtii* plantation slope in semihumid Liupan Mountains, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(1):43-52.
- [15] ALLEN R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [J]. FAO Rome, 1998, 300(9):D05109.
- [16] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology, 1987, 3(4):309-320.
- [17] LIU Z B, WANG Y H, YU P T, et al. Environmental and canopy conditions regulate the forest floor evapotranspiration of larch plantations [J]. Forest Ecosystems, 2022, 9:e100058.
- [18] 国家林业局.森林土壤水分-物理性质的测定:LY/T 1215—1999[S].北京:中国标准出版社,2000:22-24.
- State Forest Administration. Analytic method of forest soil: LY/T 1215—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000:22-24.
- [19] 刘泽彬,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山华北落叶松林坡面的土壤水分时间稳定性[J].水土保持学报,2017,31(1):153-165.

- LIU Z B, WANG Y H, XU L H, et al. Temporal stability of soil moisture on a slope covered by *Larix principis-rupprechtii* plantation in Liupan Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 153-165.
- [20] 翟博超, 朱燕, 申小娟, 等. 黄土丘陵区两个典型成熟森林群落土壤水分时空变化特征及对降雨事件的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 170-178.
- ZHAI B C, ZHU Y, SHEN X J, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture and the responses to rainfall events in two typical mature forest stands in the loess hilly region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 170-178.
- [21] 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[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(4): 457-466.
- YANG L, ZHANG H D, CHEN L D. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(4): 457-466.
- [22] 李旭红. 华北土石山区降雨下渗下土壤水分垂直运移及其影响因素[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
- LI X H. Vertical transport of soil moisture under rainfall in the soil-rocky mountains of North China and its influencing factors[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [23] 刘源, 田杰, 王水献. 祁连山草地坡面土壤水时空动态及时间稳定性[J]. 高原气象, 2024, 43(5): 1249-1258.
- LIU Y, TIAN J, WANG S X. Spatiotemporal dynamics and temporal stability of soil moisture on grassland slopes in Qilian Mountains [J]. Plateau Meteorology, 2024, 43(5): 1249-1258.
- [24] ZHAO L R, LI K X, ZHU N, et al. Shrub encroachment accelerates the processes of moisture redistribution in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Geoderma, 2025, 454: e117196.
- [25] BAI Y S, YU P T, WAN Y H, et al. Spatio-temporal uneven distribution of soil moisture replenishment by rainfall events along a hillslope in the Liupan Mountains, Northwest China [J/OL]. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-9358-5>.
- [26] BAO H, LANN T, AO X L, et al. Evolution characteristic of soil water in loess slopes with different slope angles [J]. Geoenvironmental Disasters, 2024, 11(1): e43.
- [27] ZHANG P, XIAO P Q, YAO W Y, et al. Profile distribution of soil moisture response to precipitation on the Pisha sandstone hillslopes of China [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): e9136.
- [28] RAN B, XING Z G, FANG J, et al. Analysis of soil moisture dynamics and its response to rainfall in the mu us sandy land [J]. Water, 2025, 17(1): e105.
- [29] LIANG Z W, CHEN X A, WANG C, et al. Response of soil moisture to four rainfall regimes and tillage measures under natural rainfall in red soil region, Southern China [J]. Water, 2024, 16(10): e1331.
- [30] 张祯尧, 陈思瑾, 张振明, 等. 北京山区森林生态系统水源涵养功能沿海拔梯度的空间变异研究[J]. 生态学报, 2025, 45(3): 1239-1250.
- ZHANG Z Y, CHEN S J, ZHANG Z M, et al. Spatial variation of water conservation function of forest ecosystem along elevation gradient in Beijing mountainous area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1239-1250.
- [31] SHANKAR A, CHANDRA GARKOTI S. Shifts in the ecological drivers influence the response of tree and soil carbon dynamics in central Himalayan forests [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: e123755.
- [32] CHEN M Y, YANG X Q, ZHANG X T, et al. Response of soil water to long-term revegetation, topography, and precipitation on the Chinese Loess Plateau [J]. Catena, 2024, 236: e107711.
- [33] 李嘉楠, 周成乾, 胡广录, 等. 荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤大孔隙特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(12): 2015-2026.
- LI J N, ZHOU C Q, HU G L, et al. Characteristics and influencing factors of soil macropores in the root zone of sand-fixing plants in the desert-oasis transitional zone [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(12): 2015-2026.
- [34] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [35] JARVIS N, KOESTEL J, MESSING I, et al. Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(12): 5185-5195.