

2种水分条件下华北落叶松林的林下日蒸散量变化差异

韩新生^{1,2}, 王晓¹, 王彦辉¹, 李振华³

(1. 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; 2. 宁夏农林科学院 林业与草地生态研究所 宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室/宁夏生态修复与多功能林业综合研究中心, 宁夏 银川 750002; 3. 新乡学院 土木工程与建筑学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 【目的】探讨土壤湿度对华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 林下日蒸散变化的影响, 为理解林地蒸散适应气候变化的机制及制定林水协调管理方案提供理论基础。【方法】以宁夏六盘山半干旱区叠叠沟小流域华北落叶松人工林为对象, 设置了遮断降水输入(防水处理)和自然降水输入2种处理, 人为加大土壤湿度梯度, 分析2种土壤湿度条件下气温、太阳辐射、降水量等因子对林下日蒸散量的影响。【结果】在8、9、10月, 自然降水的林下日蒸散量分别为67.06、36.32、29.49 mm·d⁻¹, 防水处理分别为54.22、20.07、11.35 mm·d⁻¹, 各月自然降水下的日蒸散量均大于防水处理。2种水分条件的林下日蒸散量随时间进程总体呈逐渐减小趋势, 且自然降水下波动大于防水处理。8—10月, 2种水分条件的林下日蒸散量差值总体呈先升后降的波浪状变化, 比值总体呈逐渐升高的波浪状变化; 在8、9、10月, 各日自然降水日蒸散量与防水处理日蒸散量之差的均值依次为0.41、0.54、0.59 mm·d⁻¹, 比值依次为1.29、1.91、2.74。随潜在蒸散增大, 2种水分条件的林下日蒸散量差与土壤体积含水量差的比值逐渐增加。土壤湿度对林下蒸散的影响在日潜在蒸散量小于3 mm·d⁻¹时较小, 在大于3 mm·d⁻¹时增大, 在大于5 mm·d⁻¹时增大极为明显。【结论】2种水分条件的林下蒸散影响因子大致相同, 区别为自然降水的林下日蒸散量更多受降水影响, 而防水处理则更多受土壤湿度影响。未来应增加多个土壤湿度梯度对林下蒸散差异的影响研究。图7表1参28

关键词: 水分条件; 林下蒸散; 华北落叶松人工林; 半干旱区

中图分类号: S716 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)05-0949-10

Difference of daily understory evapotranspiration under two water conditions in *Larix principis-rupprechtii* plantation

HAN Xinsheng^{1,2}, WANG Xiao¹, WANG Yanhui¹, LI Zhenhua³

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation of Ningxia/Research Center for Ecological Restoration and Multi-Functional Forestry of Ningxia, Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang 453003, Henan, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this study is to explore the impact of soil moisture on the daily understory evapotranspiration in *Larix principis-rupprechtii* plantation, so as to provide a theoretical basis for understanding the mechanism of forest evapotranspiration adapting to climate change and developing plans for

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-06-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFYBB2021ZW002); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助项目(U20A2085, U21A2005); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(42161144008); 宁夏自然科学基金资助项目(2023AAC03404)

作者简介: 韩新生(ORCID: 0009-0004-2890-1107), 副研究员, 博士, 从事森林生态水文与植被多功能管理研究。E-mail: hanxs@caf.ac.cn。通信作者: 王晓(ORCID: 0009-0004-9855-2969), 助理研究员, 博士, 从事森林生态水文研究。E-mail: wangxiao@caf.ac.cn

coordinated forest water management. [Method] Taking *L. principis-rupprechtii* plantation in Diediegou small watershed in semi-arid area of Liupan Mountain in Ningxia as the research object, two experiments (blocking precipitation or water-proof input, and natural precipitation input) were conducted. Soil moisture gradient was artificially increased, and the effects of environmental factors (air temperature, solar radiation intensity, precipitation, and so on) on the daily understory evapotranspiration under the two soil moisture conditions were analyzed. [Result] The daily understory evapotranspiration in August, September and October under natural precipitation condition was 67.06, 36.32 and 29.49 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, which was greater than that under water-proof treatment (54.22, 20.07, and 11.35 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$). The daily understory evapotranspiration under the two water conditions was characterized by a gradual decrease, and the fluctuations under natural condition was greater than those under water-proof treatment. From August to October, the difference in daily understory evapotranspiration under both water conditions generally showed a wavy pattern of first increasing and then decreasing, while the ratio showed a gradually increasing wavy pattern. In August, September and October, the mean difference between natural evapotranspiration and water-proof evapotranspiration was 0.41, 0.54 and 0.59 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, with ratios of 1.29, 1.91 and 2.74, respectively. As the potential evapotranspiration increased, the ratio of daily evapotranspiration difference to soil volumetric water difference under both water conditions gradually increased. The effect of soil moisture on understory evapotranspiration was small when the daily potential evapotranspiration was less than 3 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, but increased when the daily potential evapotranspiration was more than 3 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, and increased significantly when the daily potential evapotranspiration was more than 5 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$. [Conclusion] The factors affecting daily understory evapotranspiration are roughly the same under both water conditions. The difference lies in that the daily understory evapotranspiration under natural condition is more affected by precipitation, while that under waterproof treatment is more affected by soil moisture. Future study should focus on the influence of multiple soil moisture gradients on understory evapotranspiration difference. [Ch, 7 fig. 1 tab. 28 ref.]

Key words: water condition; understory evapotranspiration; *Larix principis-rupprechtii* plantation; semi-arid region

森林蒸散与许多生态水文功能紧密相关,尤其在旱区森林水量平衡中往往占据主导地位,其大小同时受林分密度、郁闭度、叶面积指数等植被特征^[1-3]及气候、地形、土壤等环境因子^[4-6]的影响。为实现森林与水资源的协调管理,减少生态耗水成本,提高水分利用效率,保障供水安全,需深入理解不同蒸散组分变化与林分结构和环境因子(如土壤湿度)的关系。为便于观测分析,通常把森林蒸散划分为林冠截留、林木蒸腾、林下蒸散3个组分^[7],其中林下蒸散包含林下草灌的截持与蒸腾、土壤蒸发等。间伐降低林分密度是减少森林蒸散的常用措施,这可直接减少林木蒸腾和林冠截持,但却增大了林下蒸散,使森林蒸散不随林分密度呈相同比例线性下降^[8]。相比林冠截持和林木蒸腾,对林下蒸散的研究还不足,需要加深对林下蒸散变化规律的理解。

林下蒸散测定方法较多,其中优先选用的是微型蒸渗仪(Micro-Lysimeter),它可直接观测林下蒸散^[9-10]。以往有限的研究表明:林下蒸散在森林蒸散中的占比往往较高且变化范围较大^[8,11-18]。这说明林下蒸散的影响因素和作用机制都具有高度复杂性。以往相关研究主要集中于林地蒸散特征及其与林分结构、环境条件的关系。在旱区,土壤水分状况对林地蒸散的影响机制的相关研究成果较少。

在气候变化背景下,降水的年际波动和季节性波动较大,导致林下蒸散的关键影响因子(降水、土壤湿度等)多变,这就增加了定量描述和定性理解林下蒸散变化机制及对多个环境因子响应特征的难度。为此,本研究在宁夏六盘山北部半干旱区的叠叠沟小流域,选择当地主要造林树种华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 人工林,利用微型蒸渗仪监测林下蒸散的日变化规律,并通过设置防水措施形成人为土壤湿度梯度,探究土壤水分对林下蒸散的影响,为科学调控林水关系提供科学依据。

1 研究区概况

研究区为六盘山北部叠叠沟小流域, 位于宁夏回族自治区固原市原州区, 距固原市市区约 15 km。35°54'12"~35°58'33"N, 106°04'55"~106°09'15"E。小流域面积为 25.4 km², 属典型的半干旱大陆性季风气候, 年均降水量为 449.0 mm, 集中于 6—9 月, 潜在蒸散为 1 100.0 mm, 年均气温为 6.5 °C, 无霜期为 130.0 d; 海拔为 1 975~2 615 m, 相对海拔为 640 m。东坡、西坡为主要坡向, 坡度为 10°~42°。土壤类型主要为灰褐土, 占总面积的 90% 以上, 其石砾体积含量平均为 5.96%。

小流域内土地利用类型以自然草地为主, 种类主要有铁杆蒿 *Artemisa gmelinii*、本氏针茅 *Stipa capillata*、白羊草 *Bothriochloa ischaemum* 等; 森林以人工林为主, 主要为阴坡、半阴坡的华北落叶松林, 以及少量的杨树 *Populus spp.* 林, 郁闭的林下灌木少且分布不均; 灌丛分布较多, 主要有虎榛子 *Ostryopsis davidiana*、黄刺玫 *Rosa xanthina*、沙棘 *Hippophae rhamnoides* 等。

2 研究方法

2.1 样地选择

在小流域下游建立面积为 30 m×30 m 的华北落叶松人工林固定样地, 地理坐标为 35°58'18"N, 106°08'50"E, 海拔为 2 050 m, 坡向为北偏西 30°, 下坡位, 坡度约为 11°。该林营造于 1986 年, 2013 年观测时的林分密度为 1 600 株·hm⁻², 平均胸径为 10.56 cm, 平均树高为 10.1 m, 郁闭度为 0.89, 最大叶面积指数为 4.0。该林分结构层次单一, 林下灌木层不明显, 盖度小于 0.05; 林下草本层盖度为 0.75, 主要有铁杆蒿、羽叶凤毛菊 *Saussurea maximowiczii*、茼蒿 *Artemisia giraldii* 等。土壤为灰褐土, 质地为砂壤土, 厚度大于 1 m。

2.2 林下日蒸散量测定

采用微型蒸渗仪测定林下日蒸散量^[4]。为保持固定监测样地内的土壤完整性, 在样地外附近选择可代表样地内树冠遮蔽、冠层重叠程度及草本植物覆盖情况的地点, 在空间上相对均匀地安装了 11 个微型蒸渗仪, 其内筒上方均包含未扰动的原状土柱 [30 cm (高)×20 cm (直径)]、原状凋落物及草本植物。为分析不同土壤水分条件的林下日蒸散量差异, 对 6 个微型蒸渗仪进行了防水处理, 即在蒸渗仪内加水使其土壤含水量达到饱和, 并在蒸渗仪上方 1.5 m 处设置防水布架并保持自由通风。遮雨处理通过人工实现, 即白天基于天气预报每次降水来临前及时盖上防水布以遮断降水输入, 不降水时打开防水布使其处于自然条件, 夜间因林内空气相对湿度大, 保持防水布始终盖上的状态。这种没有降水输入的林下蒸散量称为防水蒸散量。另外 5 个蒸渗仪均处于自然条件下, 其蒸散量称为自然蒸散量。测定时间为 8 月 1 日至 11 月 1 日, 每天 8:00 称量 1 次。称取蒸渗仪当天质量 (m_1 , kg) 和后 1 天质量 (m_2 , kg), 观测得到时段内的林内穿透水量 (P , mm) 和接水盆渗漏水量 (L , mm), 由公式 $E_T = [(m_1 - m_2)/(3.14 \times 0.01) + P - L]$ 计算林下日蒸散量 (E_T , mm), 精确到 0.001 kg。

2.3 气象条件监测

在林外开阔处, 设置 1 台 WeatherHawk-232 自动气象站, 测定的气象指标包括太阳辐射强度、气温、空气相对湿度、风速、降水量等。参考有关文献计算饱和水汽压差^[19]和潜在蒸散^[20]。此外, 在固定样地内设置 1 台 LI-1400 小型自动气象站, 连续观测 20 cm 深度的土壤温度。在样地内选择能代表树冠遮蔽和冠层重叠程度的地点, 按照上、中、下位置利用棋盘式共布置 12 个雨量筒 (直径 20 cm), 其测定雨量的算术平均值为林内穿透水量 (P , mm)。

2.4 土壤体积含水量监测

在蒸渗仪安装前, 对每个蒸渗仪编号并称量 (G_e)。11 月 3 日, 将带土柱的各蒸渗仪称量后倒出湿土混匀, 并取 6 个土样, 放入铝盒中带回实验室, 在烘箱内 105 °C 烘 24 h 后, 计算蒸渗仪内土壤在 11 月 3 日的含水量 (V_1), 并由此计算各蒸渗仪中的干土质量 (G_{dw})。然后, 利用研究期间测定的各日蒸渗仪质量 (G_d) 计算各日的土壤质量含水量 (V_d): $V_d = (G_d - G_e - G_{dw})/G_{dw}$ 。

利用环刀法分别测定 0~10、10~20、20~30 cm 土层的土壤密度 (D_s), 取其均值作为 0~30 cm 土层的土壤密度, 用于计算每日蒸渗仪内的土壤体积含水量 (V_{SMd}): $V_{SMd} = V_d \times D_s$ 。在样地上、中、下 3 个部

位, 安装管式土壤水分测定仪 (TDR), 采用 TDR 时域反射仪监测土壤湿度, 测定时间与每日蒸渗仪同步, 测量深度为 0~80 cm, 均分 4 层测定。将 3 处监测点的平均值作为样地的土壤体积含水量。

2.5 数据处理

使用 Excel 2016 整理数据, 利用 Origin 21.0 作图, 利用 Origin 21.0 中 Correlation Plot 作防水和自然条件林下日蒸散量与气象因子、土壤温度、土壤体积含水量的相关分析图。

3 结果与分析

3.1 研究期间气象因子、土壤湿度变化

研究期间日均气温和日潜在蒸散量总体呈逐渐降低的波浪状变化 (图 1), 其均值分别为 12.02 °C 和 2.61 mm·d⁻¹, 极差分别为 18.69 °C 和 5.53 mm·d⁻¹, 变异系数分别为 41.43% 和 51.86%; 降水量总和为 297.0 mm, 其中, 8 和 9 月分别为 145.0、119.0 mm, 占比分别为 48.82% 和 40.07%; 林地土壤体积含水量呈波浪状变化, 平均为 37.57%, 在 8、9、10 月分别为 35.69%、38.93%、38.13%。

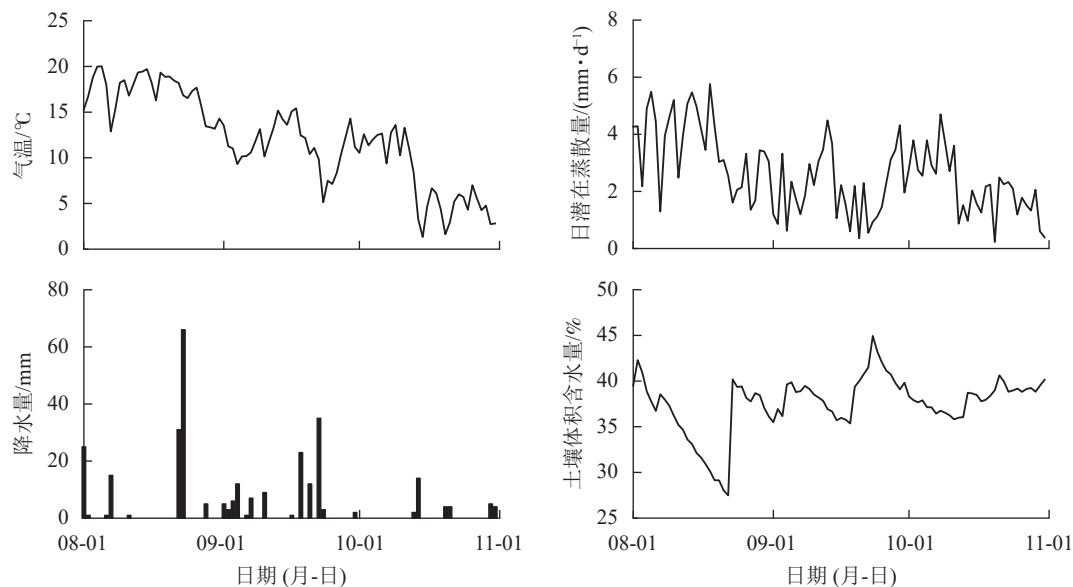


图 1 气象因子和土壤湿度的变化动态

Figure 1 Change dynamics of meteorological factors and soil moisture

3.2 有无雨水输入时的林下蒸散量日变化特征

由图 2 可见: 在 8、9、10 月, 自然降水的平均土壤体积含水量分别为 42.85%、45.66%、40.67%, 总蒸散量分别为 67.06、36.32、29.49 mm; 土壤体积含水量因降水不断输入干扰而呈波动范围大和减幅较小的变化特征, 与林下日蒸散量的变化趋势不同且相关不显著 (图 2)。在 8、9、10 月, 防水条件的平均土壤体积含水量分别为 38.93%、24.60%、17.36%, 总蒸散量分别为 54.22、20.07、11.35 mm; 土壤体积含水量连续降低, 波动幅度小且降幅逐渐减小, 8、9、10 月的减幅分别为 21.81%、8.17%、4.62%, 与林下日蒸散量的变化趋势基本相同, 且与林下日蒸散量极显著正相关 ($P < 0.01$)。

3.3 有无雨水输入时的林下日蒸散量与环境因子的关系

相关分析 (图 3) 显示: 2 种水分条件的林下日蒸散量与多个环境因子的相关性呈相似的变化特征。林下日蒸散量与空气相对湿度、降水量、自然条件的土壤湿度呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与其他环境因子均呈正相关。自然条件的林下日蒸散量与降水量显著负相关 ($P < 0.05$), 与空气相对湿度、风速、饱和水汽压、降水量的相关性强于防水条件的林下日蒸散量, 与太阳辐射、土壤温度、气温、潜在蒸散的相关性弱于防水条件的林下日蒸散; 防水条件的林下日蒸散量与土壤体积含水量显著正相关 ($P < 0.05$)。

3.4 有无雨水输入时的林下日蒸散量差异

3.4.1 林下日蒸散量差值与比值的变化 从 8 月 1 日至 10 月 31 日, 有无雨水输入造成的不同土壤水分条件下的林下日蒸散量差值的变化见图 4A。在 8 月, 除了前 2 d 内因人为浇水导致自然降水的日蒸散量

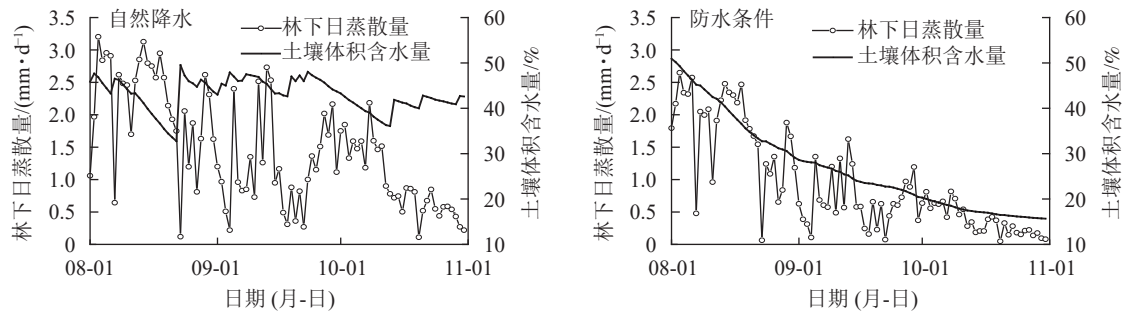
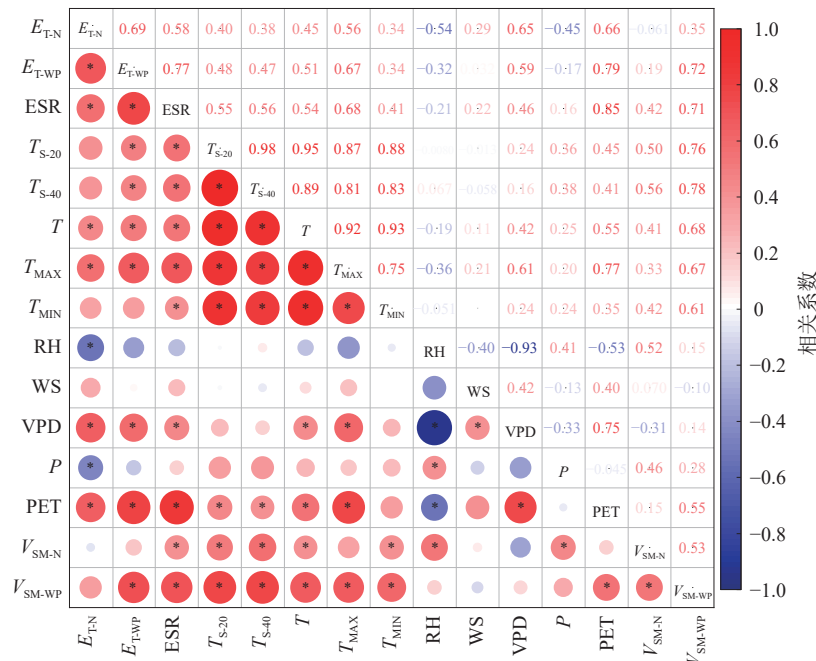


图 2 2 种水分条件的林下日蒸散量与土壤体积含水量的变化动态

Figure 2 Change dynamics of understory evapotranspiration and volumetric soil moisture under two water conditions



E_{T-N} . 自然林下日蒸散量; E_{T-WP} . 防水林下日蒸散量; ESR. 太阳辐射强度; T_{S-20} . 20 cm 处土壤温度; T_{S-40} . 40 cm 处土壤温度; T . 日平均气温; T_{MAX} . 日最高气温; T_{MIN} . 日最低气温; RH. 空气相对湿度; WS. 风速; VPD. 饱和水汽压差; P . 降水量; PET. 潜在蒸散量; V_{SM-N} . 自然土壤体积含水量; V_{SM-WP} . 防水土壤体积含水量。*表示显著相关 ($P < 0.05$)。

图 3 林下日蒸散量与影响因子的相关分析

Figure 3 Correlation analysis between daily understory evapotranspiration and influencing factors

低于防水条件从而使两者差值为负值外，之后的两者差值均为正值。2 种土壤水分条件的林下日蒸散量差值总体在中期较大，前期、后期相对较小，主要是因前期两者的土壤湿度差异较小，后期的潜在蒸散能力减弱。在 8、9、10 月，自然降水与防水条件下日蒸散量之差的均值依次为 0.41、0.54、0.59 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在 9、10 月，两者的差值较大，甚至高于防水条件日蒸散量，说明 8—10 月随着土壤水分差异的增大 (8、9、10 月两者的土壤体积含水量差值依次为 3.92%、21.06%、23.31%) 对林下日蒸散量的影响也在逐渐增加。

自然降水、防水条件 2 种条件的林下日蒸散量比值的日变化存在很大波动 (图 4B)，变异系数为 38.49%，但总体呈逐渐增大趋势，在 8、9、10 月依次为：1.29、1.91、2.74，主要因为 2 种条件的蒸渗仪内土壤湿度差异 (8、9、10 月两者的土壤体积含水量比值依次为 1.13、1.87、2.36) 逐渐增大导致的。

在晴天、多云、阴雨天气下，2 种土壤水分条件的林下日蒸散量差值依次为 0.74、0.46、0.26 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，主要是因不同天气条件的蒸散潜力存在差异，晴天较大、阴雨天较小；两者的林下日蒸散量比值依次为 2.12、1.79、2.11，这与多云天多集中在 8 月，土壤湿度差异相对较小 (两者的土壤体积含水量比值依次为 1.88、1.69、1.82) 有关。

3.4.2 不同潜在蒸散时的林下日蒸散差异 相关分析 (图 3) 表明：2 种水分条件的林下日蒸散量与潜在

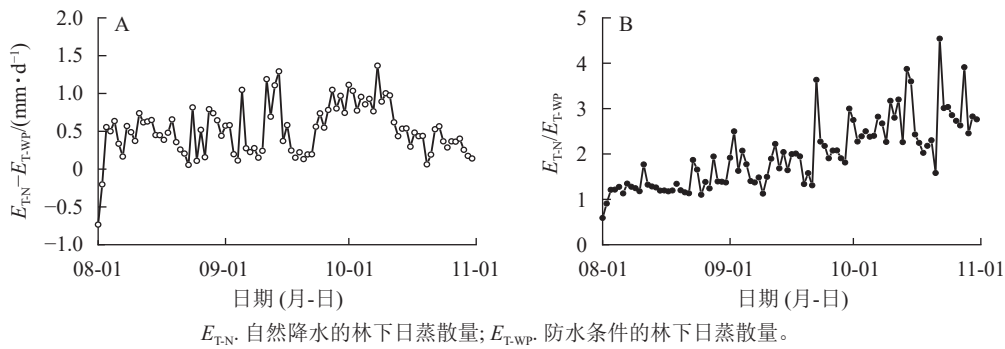


图4 2种水分条件的林下日蒸散量差值和比值的季节变化

Figure 4 Seasonal variation of understory evapotranspiration difference and ratio under two water conditions

蒸散均呈显著正相关 ($P < 0.05$)。为在排除潜在蒸散影响后评价土壤水分条件对林下日蒸散量的影响, 将潜在蒸散分为6组 ($0\sim 1$ 、 $1\sim 2$ 、 $2\sim 3$ 、 $3\sim 4$ 、 $4\sim 5$ 、 $5\sim 6 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$) 作图分析 (图5), 可知在各级潜在蒸散时2种水分条件的林下日蒸散量均随土壤体积含水量增加而增加。总体来看, 自然降水的林下日蒸散量均高于防水条件的林下日蒸散量。这主要是因为前者土壤湿度一般都高于后者, 但在两者土壤湿度相近时 (图5中潜在蒸散大于 $3 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的个别数据), 其林下日蒸散量数值也相近, 说明两者遵循相同的林下蒸散变化规律。

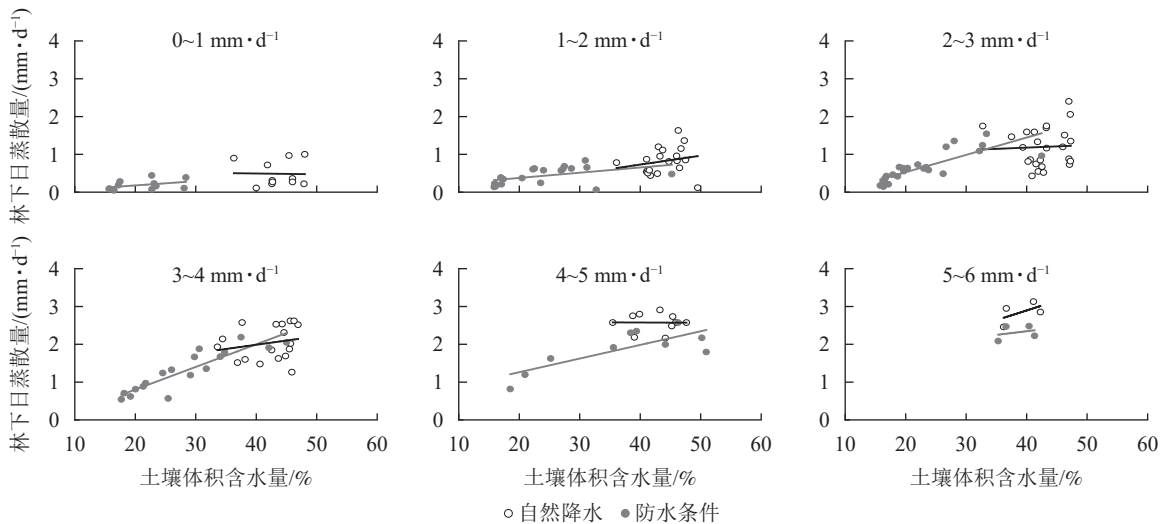


图5 不同潜在蒸散时林下日蒸散量随土壤体积含水量的变化

Figure 5 Variation of daily understory evapotranspiration with volumetric soil moisture under different potential evapotranspiration

由图6可知: 随着2种水分条件的土壤体积含水量差值增加, 两者林下日蒸散量的差值在潜在蒸散为 $3\sim 6 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时呈明显的逐渐增大趋势, 但在其他潜在蒸散范围 ($0\sim 3 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$) 内增加的较为平缓。当潜在蒸散为 $3\sim 6 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时, 土壤体积含水量的差异极大地影响林下日蒸散量。由表1可知: 随着潜在蒸散量逐渐增加, 自然降水和防水条件日蒸散量、防水条件土壤体积含水量均呈明显逐渐增大趋势, 两者间均呈线性关系 (图7), 而自然降水土壤体积含水量呈微弱逐渐下降趋势。

随着潜在蒸散量逐渐增加, 2种水分条件的林下日蒸散量差值呈现先增大后减小的单峰变化, 两者呈二项式关系 (图7), 土壤体积含水量差值呈逐渐减小的趋势 (表1), 林下日蒸散量差值与土壤体积含水量差值的比值呈指数函数变化 (图7)。当平均潜在蒸散分别为 0.64 、 $5.38 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时, 土壤体积含水量的差值分别为 22.58% 、 0.66% , 林下日蒸散量的差值分别为 0.30 、 0.53 mm 。在潜在蒸散量较大时, 水分条件变化对林下日蒸散量的影响更大。这可用2种水分条件的林下日蒸散量差值与土壤体积含水量差值的比值来表示, 当潜在蒸散大于 $3 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时, 两者的比值成倍增加; 当潜在蒸散大于 $5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时, 两者的比值成指数增加。由此可知: 当潜在蒸散大于 $3 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时, 土壤湿度对林下蒸散影响增大; 当潜在蒸散大于 $5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时, 土壤湿度对林下日蒸散量影响极为明显。

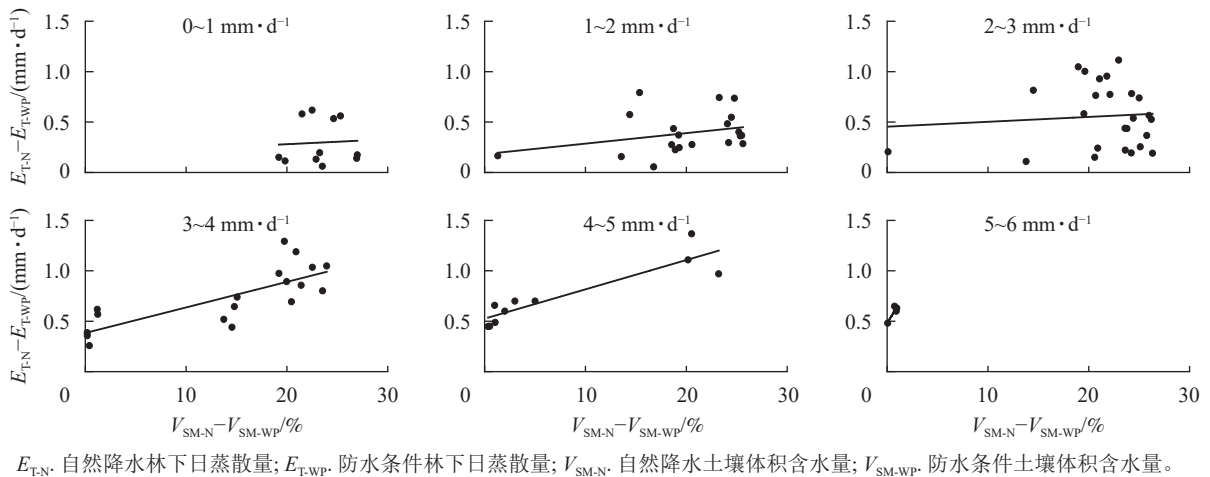


图 6 不同潜在蒸散时 2 种条件的林下日蒸散量差值随土壤体积含水量差值的变化

Figure 6 Daily variation of understory evapotranspiration difference between two water conditions with the volumetric soil moisture under different potential evapotranspiration

表 1 不同潜在蒸散时 2 种水分条件的林下日蒸散量与土壤体积分含水量的均值、差值

Table 1 Mean and difference of daily understory evapotranspiration and volumetric soil moisture under two water conditions and different potential evapotranspiration

潜在蒸散量 分组/(mm·d ⁻¹)	潜在蒸散量 均值/(mm·d ⁻¹)	林下日蒸散量均值/(mm·d ⁻¹)		土壤体积分含水量均值/%		林下日蒸散量 差值/(mm·d ⁻¹)	土壤体积分含水量 差值/%	林下日蒸散量差值/ 土壤体积分含水量差值
		自然降水	防水条件	自然降水	防水条件			
0~1	0.64	0.49	0.19	43.59	21.00	0.30	22.58	1.33
1~2	1.46	0.82	0.43	43.88	23.92	0.39	19.96	1.95
2~3	2.39	1.20	0.64	42.82	22.42	0.56	20.40	2.75
3~4	3.46	2.04	1.30	42.25	28.27	0.74	13.98	5.29
4~5	4.46	2.36	1.87	42.47	36.96	0.49	5.51	8.89
5~6	5.38	2.85	2.31	41.07	40.41	0.53	0.66	80.30

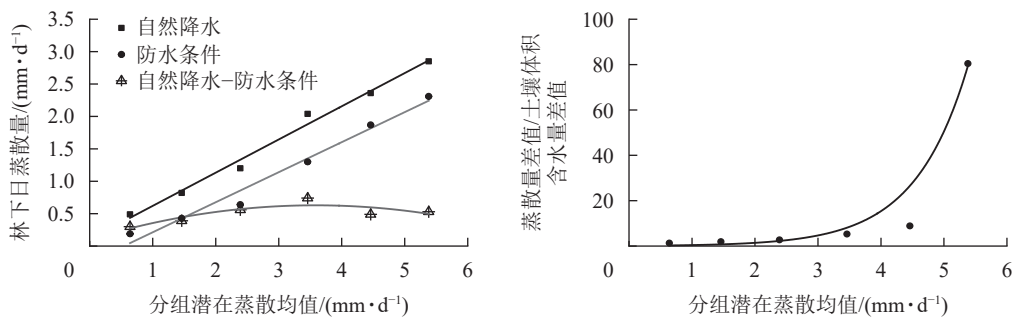


图 7 2 种水分条件的林下日蒸散量及差值、蒸散量差值与含水量差值的比值随分组潜在蒸散均值的变化

Figure 7 Variation of daily understory evapotranspiration and its difference, the ratio of understory evapotranspiration difference to volumetric soil moisture difference under two water conditions with the mean value of potential evapotranspiration

4 讨论

4.1 林下蒸散对环境因子的响应

本研究表明：虽然林下蒸散同时受降水、气温、太阳辐射等气象条件的综合影响，但在 8—10 月的研究期间，林下日蒸散量整体呈逐渐减小趋势。这主要是因为研究期间与林下蒸散呈正效应的气象因子（太阳辐射、气温、风速、饱和水汽压差等）均呈逐渐降低趋势，气温和土温降低、太阳辐射减弱、饱和水汽压差和潜在蒸散减小等均会导致林下蒸散量减小，而相对湿度与林下蒸散存在负效应。以往研究得出相似结论，如有分析表明：潜在蒸散与气温、风速、日照时数呈正相关，与相对湿度呈负相关^[21]，蒸

散的减小与太阳辐射减弱有关^[22],潜在蒸散量主要受风速和温度的影响^[23]。本研究中,林下日蒸散量波动幅度较大,这与波浪状的日潜在蒸散和脉冲式降水条件密切相关。自然条件时的林下日蒸散量数值及波动范围均大于防水处理,原因是防水处理遮断了降水输入,造成土壤含水量低于自然条件,从而限制了林下蒸散。自然条件的林下日蒸散量与土壤体积含水量相关性不显著,主要是因为受脉冲式降水输入的不断干扰,土壤湿度对林下蒸散的影响较小;防水条件的林下日蒸散量与土壤体积含水量显著正相关,表明林下蒸散受土壤湿度的影响较大。

2种水分条件下的林下日蒸散量影响因子大致相同。总体上看,林下蒸散量与潜在蒸散、太阳辐射、土壤温度、气温、饱和水汽压差等因子的相关系数较高。王云霓等^[16]研究表明:太阳辐射、饱和水汽压差、土壤水分是内蒙古大青山华北落叶松林林地蒸散的主要影响因子;穆艳等^[15]认为:苹果 *Malus pumila* 林地土壤蒸发量的季节变化与气温、太阳辐射等密切相关。上述研究中,林地蒸散的主要影响因子与本研究相似。自然条件时林下日蒸散量受降水影响较大,而降水输入导致土壤湿度仅在一定范围内波动,所以对林下蒸散量的影响较小;防水处理的林下日蒸散量受土壤体积含水量影响较大。然而,林冠结构、林分叶面积特征均会影响林冠下的气温、太阳辐射等气象条件^[24],因此林下蒸散还受林冠遮阴、叶面积指数的影响^[25]。还有研究发现:林下草本植被高度、盖度、生物量等特征也会影响林下蒸散^[14,26],所以影响2种水分条件下林下蒸散的环境因子相似但其作用大小有异。

4.2 2种水分条件时的林下日蒸散量差异

2种水分条件的林下日蒸散量差值的逐日变化也有较大波动,总体表现为中期较大,前期和后期相对较小,主要是由降水、太阳辐射等气象条件及土壤湿度不同导致的。2种水分条件的林下日蒸散量差值晴天时($0.74\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)较大,阴雨天时($0.26\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)较小,主要是因为阴雨天太阳辐射和气温较低,空气相对湿度较高^[19],导致大气蒸散潜力相对较弱,2种条件的林下日蒸散量均较小,两者的差值也随之变小。2种水分下的林下日蒸散量差值的变化顺序主要受土壤含水量差异影响,如8、9、10月的日均土壤体积含水量差值依次为3.92%、21.06%、23.31%,日均蒸散量差值依次为0.41、0.54、0.59 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。原因是8月土壤含水量(可蒸散用水)差异不大,导致日均蒸散量差值较小;9月气温相对较高、土壤湿度差异较大,日均蒸散量差值居中;10月气温降低、太阳辐射减弱(潜在蒸散减小),但土壤湿度差异最大,导致日均蒸散量差值最大,表明了土壤湿度的影响大于气象条件的影响。

本研究区降水主要集中于7—9月。有学者在相同区域发现:林下蒸散主要集中在6—9月,其中8月林下蒸散量最大^[18]。以往研究主要集中于环境因子对林下蒸散(林地蒸散、土壤蒸发)的作用,如刘栋等^[27]认为:影响油茶 *Camellia oleifera* 林地土壤蒸发的因子存在阶段性差异,前期主要为气温、地温等,中期为气温、空气相对湿度等,后期为地温、太阳辐射等。吴友杰等^[28]认为:影响土壤蒸发的主要因素为土壤含水量和太阳辐射。本研究主要对遮断降水输入和自然降水输入2种条件的林下蒸散进行分析,采用不同蒸散潜力时2种水分条件的林下日蒸散量差与土壤体积含水量差的比值表示土壤湿度对林下蒸散的影响大小,表明当潜在蒸散小于 $3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,土壤湿度对林下蒸散影响较小;当潜在蒸散大于 $3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时土壤湿度的影响增大;当潜在蒸散大于 $5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,土壤湿度的影响极明显。随着潜在蒸散增加,2种水分条件的林下日蒸散量差与土壤体积含水量差的比值成指数倍地增加,土壤湿度对林下蒸散的影响增强。本研究从8月初开始,在11月初结束,潜在蒸散基本呈现逐渐减小趋势。若实验是从5月初开始,不同蒸散潜力时的林下日蒸散量与土壤体积含水量、2种水分条件的林下日蒸散量差值与土壤体积含水量差值的关系可能会与现有研究结果有所不同,所以未来应该继续加强研究。

5 结论

本研究在六盘山北部半干旱的叠叠沟小流域,监测分析了自然降水和防水处理2种水分条件的华北落叶松人工林林下日蒸散动态。总体上,2种条件的林下日蒸散量在8—10月均呈逐渐减小趋势,自然条件的林下日蒸散量及波动均大于防水处理。相关分析表明:自然降水的林下蒸散量与降水呈极显著负相关,防水处理的林下蒸散量与土壤湿度呈极显著正相关($P<0.01$),2种条件的林下蒸散与其他环境因子的相关性相似。自然降水与防水处理的林下日蒸散量的差值总体在中期较大,前期和后期相对较小;自然降水与防水处理的林下日蒸散量的比值为逐渐增大的波浪状变化。在将潜在蒸散分为6级后,随其

平均值增加, 2 种条件的林下蒸散量均呈明显增大的线性关系, 林下日蒸散量差值呈先升后降的二项式关系, 林下日蒸散量差值与土壤体积含水量差值的比值呈指数函数关系。

6 参考文献

- [1] WANG Yanbing, WANG Yanhui, LI Zhenhua, *et al.* Interannual variation of transpiration and its modeling of a larch plantation in semiarid Northwest China[J]. *Forests*, 2020, **11**(12): 1303 – 1327.
- [2] 曹恭祥, 王云霓, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山 3 种针叶林蒸散及其组分特征[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(25): 16 – 22.
CAO Gongxiang, WANG Yunni, WANG Yanhui, *et al.* The characteristics of evapotranspiration and its components of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(25): 16 – 22.
- [3] WANG Lei, LIU Zebin, GUO Jianbin, *et al.* Estimate canopy transpiration in larch plantations via the interactions among reference evapotranspiration, leaf area index, and soil moisture[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **481**: 118749 – 118762.
- [4] 韩新生, 王彦辉, 李振华, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松人工林林下日蒸散特征及其影响因子[J]. 林业科学, 2019, **55**(9): 11 – 21.
HAN Xinsheng, WANG Yanhui, LI Zhenhua, *et al.* Daily forest floor evapotranspiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its influencing factors in the semi-arid area of Liupan Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, **55**(9): 11 – 21.
- [5] 张荣, 毕华兴, 焦振寰, 等. 生长季刺槐树干液流昼夜变化特征及其对气象因子的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(6): 1238 – 1246.
ZHANG Rong, BI Huaxing, JIAO Zhenhuan, *et al.* Diurnal and nocturnal changes in stem sap flow of *Robinia pseudoacacia* during growing season and its response to meteorological factors[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(6): 1238 – 1246.
- [6] 陈孟涤, 覃鑫浩, 毛炎新, 等. 半干旱区华北落叶松林冠层蒸腾特征及其影响因子[J]. 西北林学院学报, 2022, **37**(4): 10 – 17.
CHEN Mengdi, QIN Xinhao, MAO Yanxin, *et al.* Transpiration characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its impact factors in the semi-arid area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, **37**(4): 10 – 17.
- [7] RAN-YASEEF N, YAKIR D, SCHILLER G, *et al.* Dynamics of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **157**(2): 77 – 85.
- [8] 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 等. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究[J]. 中国水土保持科学, 2006, **4**(4): 19 – 25, 32.
WANG Yanhui, XIONG Wei, YU Pengtao, *et al.* Study on the evapotranspiration of forest and vegetation in dryland[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, **4**(4): 19 – 25, 32.
- [9] KELLIHER F M, HOLLINGER D Y, SCHULZE E D, *et al.* Evaporation from an eastern Siberian larch forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **85**(3/4): 135 – 147.
- [10] SCHAAP M G, BOUTEN W. Forest floor evaporation in a dense Douglas fir stand[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, **193**(1/4): 97 – 113.
- [11] GRELLA A, LUNDBERG A, LINDROTH A, *et al.* Evaporation components of a boreal forest: variations during the growing season[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, **197**(1/4): 70 – 87.
- [12] DAIKOKU K, HATTORI S, DEGUCHI A, *et al.* Influence of evaporation from the forest floor on evapotranspiration from the dry canopy[J]. *Hydrological Processes*, 2008, **22**(20): 4083 – 4096.
- [13] 李青华, 穆艳, 王延平. 黄土丘陵沟壑区山地苹果林蒸散特征[J]. 地球科学, 2019, **44**(8): 2818 – 2828.
LI Qinghua, MU Yan, WANG Yanping. Evapotranspiration characteristics of apple forest in hilly-gully region of the Loess Plateau[J]. *Earth Science*, 2019, **44**(8): 2818 – 2828.
- [14] 王轶浩, 符裕红, 王彦辉. 重庆铁山坪马尾松林蒸散及其组分特征[J]. 东北林业大学学报, 2022, **50**(7): 33 – 39.
WANG Yihao, FU Yuhong, WANG Yanhui. Characteristics of masson pine forests evapotranspiration and its components at Tieshanping of Chongqing[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, **50**(7): 33 – 39.
- [15] 穆艳, 王延平. 黄土长武塬区苹果林地水量平衡研究[J]. 农业现代化研究, 2017, **38**(1): 161 – 167.
MU Yan, WANG Yanping. Study on soil water balance of apple orchards in the loess tableland of China[J]. *Research of*

- Agricultural Modernization*, 2017, **38**(1): 161 – 167.
- [16] 王云霓, 曹恭祥, 徐丽宏, 等. 内蒙古大青山华北落叶松人工林蒸散特征及其影响因子[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, **47**(4): 148 – 156.
WANG Yunni, CAO Gongxiang, XU Lihong, *et al.* Evapotranspiration characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its impact factors in the Daqing Mountains of Inner Mongolia[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, **47**(4): 148 – 156.
- [17] 刘文浩, 王晓, 段文标, 等. 西宁市油松人工林生长季水量平衡特征[J]. 林业科学, 2023, **59**(4): 46 – 56.
LIU Wenhao, WANG Xiao, DUAN Wenbiao, *et al.* Water balance characters of *Pinus tabulaeformis* plantation in Xining City of China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, **59**(4): 46 – 56.
- [18] 李振华, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林的生长季蒸散量和组分特征[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(2): 222 – 228.
LI Zhenhua, WANG Yanhui, YU Pengtao, *et al.* The evapotranspiration and its partition in growing season for a stand of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the semi-arid region of Liupan Mountains, NW China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(2): 222 – 228.
- [19] 韩新生, 许浩, 安钰, 等. 不同天气条件下山杏树干液流速率对环境因子变化的响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, **43**(6): 54 – 64.
HAN Xinsheng, XU Hao, AN Yu, *et al.* Responses of trunk sap flow of *Armeniaca sibirica* to varied environmental factors in different weather conditions[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2023, **43**(6): 54 – 64.
- [20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, *et al.* *Crop Evapotranspiration-guidelines for Computing Crop Water Requirements* [R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998: 1 – 15.
- [21] 张安宁, 刘任涛, 杜灵通. 气候梯度下潜在蒸散分布差异及影响因素[J]. 西北林学院学报, 2020, **35**(5): 23 – 28, 96.
ZHANG Anning, LIU Rentao, DU Lingtong. Distribution differences and influencing factors of potential evapotranspiration in climate gradients[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, **35**(5): 23 – 28, 96.
- [22] 何慧娟, 王钊, 董金芳, 等. 基于 MODIS 产品的秦岭地区 NDVI、地表温度和蒸散变化关系分析[J]. 西北林学院学报, 2019, **34**(4): 179 – 184, 191.
HE Huijuan, WANG Zhao, DONG Jinfang, *et al.* NDVI, LST and ET variation analysis based on MODIS datasets in the Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, **34**(4): 179 – 184, 191.
- [23] 代海燕, 梁显丽, 宝秋利, 等. 近 46 年毛乌素沙地和科尔沁沙地潜在蒸散量的变化特征及影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2019, **34**(2): 8 – 13, 27.
DAI Haiyan, LIANG Xianli, BAO Qiuli, *et al.* Variation characteristics and influencing factors of potential evapotranspiration in Mu Us and Khorchin sandy land in recent 46 years[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, **34**(2): 8 – 13, 27.
- [24] MORECROFT M D, TAYLOR M E, OLIVER H R. Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **90**(1/2): 141 – 156.
- [25] LIU Zebin, WANG Yanhui, YU Pengtao, *et al.* Environmental and canopy conditions regulate the forest floor evapotranspiration of larch plantations[J]. *Forest Ecosystems*, 2022, **9**(5): 606 – 616.
- [26] 韩新生, 许浩, 蔡进军, 等. 宁南黄土丘陵区 3 种典型林分的结构与水文影响比较[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(6): 192 – 199.
HAN Xinsheng, XU Hao, CAI Jinjun, *et al.* Comparison of structure and hydrological influence of three typical stands in loess hilly regions of southern Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(6): 192 – 199.
- [27] 刘栋, 岳伶俐, 吴友杰, 等. 长沙丘陵区油茶林地土壤蒸发的时空变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, **47**(1): 63 – 70.
LIU Dong, YUE Lingli, WU Youjie, *et al.* Spatiotemporal variation of soil evaporation in *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2021, **47**(1): 63 – 70.
- [28] 吴友杰, 杜太生. 西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(12): 110 – 116.
WU Youjie, DU Taisheng. Evaporation and its influencing factors in farmland soil in the arid region of northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(12): 110 – 116.