

DOI: 10.20103/j.stxb.202404070735

叶鑫, 马英, 高光耀, 王洁. 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. 生态学报, 2024, 44(24): 11265-11275.

Ye X, Ma Y, Gao G Y, Wang J. Responses of soil water transport processes to rainfall events in *Platycladus orientalis* forests with two stand ages in the upper reaches of Baiyangdian. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11265-11275.

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

叶鑫^{1,3}, 马英^{1,3,*}, 高光耀^{2,3,4}, 王洁⁵

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 101408

4 陕西延安森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100085

5 保定市水土保持试验站, 保定 071000

摘要: 山区植被恢复能有效控制水土流失, 但随树种恢复年限增加和极端降雨事件频发, 森林土壤水分运移规律发生改变。研究不同林龄树种土壤水分对次降雨的响应规律, 对山区植被建设和提升森林生态系统水源调蓄功能具有重要意义。选取白洋淀上游山区崇陵流域内两种典型人工侧柏林(90 a 成熟林和 60 a 中龄林)为研究对象, 于 2021 年(极端丰水年)和 2022 年(平水年)降雨集中时段实时监测了林地土壤层(0—100 cm)水分动态变化过程, 研究侧柏人工林土壤水分运移过程对不同降雨事件的响应规律。结果表明: (1) 成熟林和中龄林土壤水分对降雨的总响应次数均随土层加深而减小, 在 10 cm 处最大, 分别为 31 次和 34 次。土壤水分峰值与峰值雨强的时间差随土层加深而增大, 在 100 cm 处最大, 分别为 82 h 和 42 h。(2) 降水入渗过程中不同林龄侧柏地的湿润锋运移速率(V_{wf})和土壤含水量最大增幅($\Delta\theta_{max}$)差异明显。成熟林 V_{wf} 和 $\Delta\theta_{max}$ 随土壤深度增加而减小, 而中龄林在 50 cm 以下土层湿润锋运移速率明显加快(深层比浅层快 6.9 cm/h), 土壤含水量最大增幅变大(深层比浅层增幅大 $0.021\text{ m}^3/\text{m}^3$), 且均大于成熟林(分别大出 3.3 cm/h 和 $0.037\text{ m}^3/\text{m}^3$)。中龄侧柏林需要较小的降雨量(18.8 mm)即能入渗至 100 cm 土层, 且入渗过程中优先流发生频繁。(3) 次降雨事件下中龄侧柏林 0—100 cm 土壤储水量(W)增量显著大于成熟侧柏林, 2021 年和 2022 年研究时段内降雨使中龄侧柏林 W 最大分别增加 291 mm 和 234 mm, 使成熟侧柏林最大增加 199 mm 和 167 mm。(4) 降雨量和峰值雨强与响应次数、响应最大深度、土壤含水量最大增幅和湿润锋运移速率均呈显著正相关关系($P < 0.05$), 是影响土壤水分动态响应过程的主控因素。研究可为气候变化下白洋淀上游流域水土保持、洪涝灾害防御和森林生态系统可持续发展提供科学依据。

关键词: 白洋淀上游; 侧柏; 林龄; 土壤水分; 降雨事件

Responses of soil water transport processes to rainfall events in *Platycladus orientalis* forests with two stand ages in the upper reaches of Baiyangdian

YE Xin^{1,3}, MA Ying^{1,3,*}, GAO Guangyao^{2,3,4}, WANG Jie⁵

1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

4 Shaanxi Yan'an Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Beijing 100085, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371036)

收稿日期: 2024-04-07; **网络出版日期:** 2024-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: maying@igsrr.ac.cn

5 Baoding Soil and Water Conservation Experimental Station, Baoding 071000, China

Abstract: Forest restoration can effectively reduce soil erosion in mountainous areas. However, the soil water movement processes changed with trees growing older and extreme rainfall events occurring frequently. Studying the responses of soil moisture to rainfall in the planted forests with different ages is crucial for the mountainous vegetation construction and forest ecosystem water storage function improvement. In this study, typical artificial *Platycladus orientalis* forests with two ages (90 years old and 60 years old) in Chongling catchment in the upper reaches of Baiyangdian were selected to analyze the responses of soil water movement to different rainfall events. The soil water dynamics in the 0—100 cm layer were monitored during rainy season in 2021 (extreme wet year) and 2022 (normal year), respectively. The results showed that: (1) The total number of soil water response times to rainfall events decreased with the increase of soil depth in both forests. The maximum number of soil water response times occurred at 10 cm, and the number was 31 and 34 times in the 90-year and 60-year *Platycladus orientalis* forests, respectively. The time lags between the maximum soil water content and the peak rainfall intensity increased as the soil depth deepened. It reached the maximum at 100 cm, which was 82 h and 42 h in the 90-year and 60-year *Platycladus orientalis* forests, respectively. (2) The wetting front movement velocity (V_{wf}) and the maximum increase of soil water content ($\Delta\theta_{max}$) were obviously different between two *Platycladus orientalis* forests with different ages. The V_{wf} and $\Delta\theta_{max}$ in the 90-year *Platycladus orientalis* forest decreased with the increase of soil depth. However, the V_{wf} was 6.9 cm/h faster at deeper soil depth below 50 cm than in shallower layers in the 60-year *Platycladus orientalis* forest. The maximum increase of soil water content was $0.021 \text{ m}^3/\text{m}^3$ higher in deeper layer below 50 cm than in shallower layer. Within soil layer of 50—100 cm, V_{wf} and $\Delta\theta_{max}$ of 60-year *Platycladus orientalis* forest were both higher than 90-year *Platycladus orientalis* forest, with an increase of 3.3 cm/h and $0.037 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectively. The 60-year *Platycladus orientalis* forest required less rainfall amount (18.8 mm) to infiltrate into the 100 cm layer, where preferential flow occurred more frequently. (3) The increment of soil water storage (W) in 0—100 cm layer in the 60-year *Platycladus orientalis* forest (Maximum increment was 291 mm and 234 mm in rainy season in 2021 and 2022, respectively) was higher than in the 90-year *Platycladus orientalis* forest (Maximum increment was 199 mm and 167 mm in rainy season in 2021 and 2022, respectively). (4) The total rainfall amount and peak rainfall intensity were positively correlated with the response times, the maximum response depth, the maximum increase of soil water content and the wetting front movement velocity ($P < 0.05$). They were main controlling factors that affected soil water movement processes under different rainfall events. The study can provide scientific basis for soil and water conservation, flood disaster prevention and forest ecosystem sustainable development in the upper reaches of Baiyangdian under climate change.

Key Words: upper reaches of Baiyangdian; *Platycladus orientalis*; forest stand age; soil water; rainfall events

植树造林是实现绿水青山的重要途径,人工林在涵养水源和防治土壤侵蚀等方面发挥了重要作用^[1]。作为山区人工林生长的关键水源,土壤水是保障山区生态系统恢复和可持续发展的核心。降雨是山区土壤水的重要补给源,气候变化背景下极端降雨事件的频率和强度明显增加^[2-4]。次降雨特征(包括降雨等级、降雨量、降雨强度和峰值雨强出现时间等)对土壤水运移过程具有显著的调控作用^[5-7]。土壤水对次降雨事件的响应差异直接影响了地表产流、坡面入渗和地下水补给等水循环过程^[8-10]。因此,研究不同降雨事件(包括极端降雨事件)下山区人工林土壤水的动态变化对水土保持、洪涝灾害防御和生态系统保护具有重要意义。

不同林龄的树木因其冠层和根系分布、蒸腾作用及凋落物厚度等的差异而影响土壤水力特性和水分运移过程^[11-12]。针对不同林龄的橡胶树(5、9、16 a)^[13]、黑松树(1—19 a 至 80—120 a)^[14]和刺槐(15、20、30 a)^[15]的研究表明,土壤含水量、土壤持水能力和总入渗量随着林龄的增加而增加。但也有研究发现,苹果树(5、9、17 a)^[16]、樟子松(4、9、15、30 a)^[17]和刺槐^[18-19]的生长年限越大,深层土壤储水消耗越多,干土层厚度越大,由此可能导致深层土壤水对降水的响应滞缓。然而,土壤水分并非随林龄的增加而单调变化^[20],同一

树种不同林龄的林地土壤水分变化规律研究结论不一。同时,受区域气候因素和土壤条件等影响,山区不同林龄植被覆盖下土壤水分对次降雨事件(包括极端降雨事件)的瞬时动态响应过程尚不明确。

白洋淀上游山区生态防护林是京津、雄安新区及周边的绿色屏障。常绿针叶树侧柏因其强大的根系可固定贫瘠的土壤,防止水土流失,且适应性及耐旱性极强,是白洋淀上游荒山造林的重要树种。崇陵流域位于白洋淀的重要集水区和燕山太行山生态涵养区^[21]。本研究选取崇陵流域内两种典型树龄的侧柏林,于2021年和2022年实时监测降雨和土壤水分变化过程,对比分析两种林龄的侧柏林地在不同降雨事件下土壤水分入渗过程(湿润锋运移速率、响应时间、土壤含水量最大增幅和土壤储水量变化),阐明土壤水分响应指标与降雨事件之间的相关关系,从而揭示侧柏林生态系统土壤水分对降雨事件的动态响应过程及其影响机制,以期为雄安新区的水资源管理和生态环境保护提供观测依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省易县崇陵流域(115°21'E, 39°23'N, 海拔74—261 m),地处白洋淀上游,流域面积6 km²(图1)。研究区属温带大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。年平均气温11.6℃,年平均降水量641 mm,无霜期210 d。流域内土壤从砂壤土到壤土粘土均有分布,沟道内土层较厚,一般为1—2 m,山坡上土层较薄,厚度在1 m以内^[22]。崇陵流域内主要造林树种为侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和毛白杨(*Populus tomentosa*)等乔木(图1),其中侧柏分布最为广泛。本研究在流域内选取两种典型树龄(90 a成熟林和60 a中龄林)的侧柏林地开展定位监测。90 a侧柏林(PO_M)和60 a侧柏林(PO_Y)样地面积均为20 m×10 m,坡度分别为22°和16°,坡向分别为253°和172°。PO_M和PO_Y林地内平均树高分别为(9.6±2.9) m和(10.9±1.9) m,平均胸径分别为(16.3±3.4) cm和(18.4±3.1) cm,郁闭度分别为(0.41±0.02)和(0.38±0.01),凋落物层厚度分别为(2.0±0.3)和(1.8±0.2) cm。

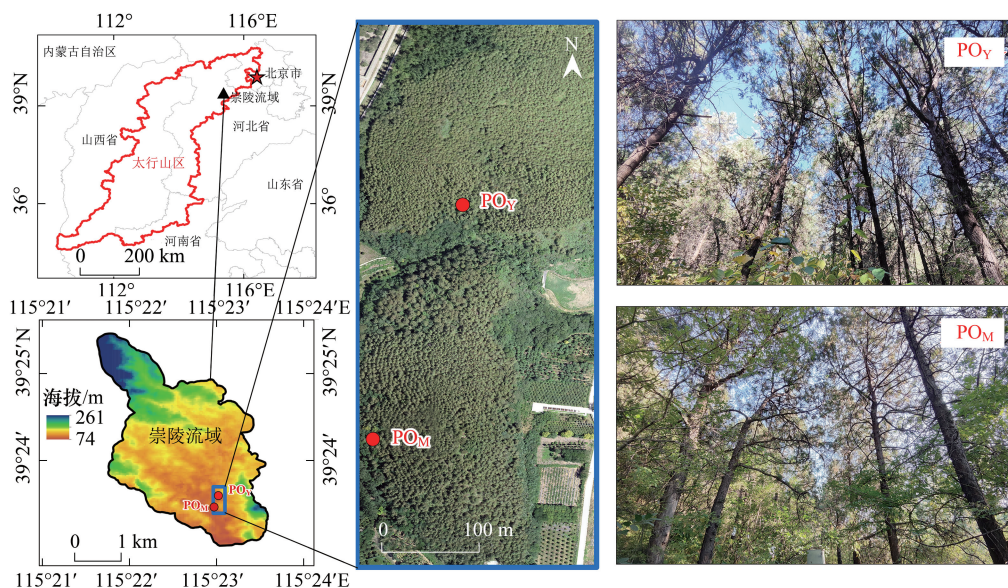


图1 研究区位置及侧柏林概况图(PO_M为成熟林,PO_Y为中龄林)

Fig.1 Location of the study area and *Platycladus orientalis* forests with mature (PO_M) and middle (PO_Y) stand ages

2 研究方法

2.1 定位监测与数据采集

在侧柏林附近气象场内利用SL3自记翻斗式雨量筒记录降雨量,采用HOB0数据采集器(Onset Computer

Corporation, USA) 每 10 分钟采集一次数据。分别在 PO_M 和 PO_Y 侧柏林中挖掘土壤剖面, 安装时域反射仪 (TDR-310H, Acclima, USA) 用以监测土壤体积含水量 (θ , m^3/m^3), 监测深度分别为 10、20、30、50、70 cm 和 100 cm, 利用数据采集器 (CR1000, Campbell Scientific, USA) 每 10 分钟记录一次土壤含水量。

2.2 数据计算与分析方法

选取降雨开始至结束期间总降雨量 (RA , Rainfall amount, mm) 大于 2 mm 的降雨事件, 两次降雨事件至少间隔 6 h。降雨事件按照中华人民共和国国家标准中的 12 h 或 24 h 内降水量等级标准进行分级 (GB/T 28592—2012), 根据 12 h 以内降雨量划分等级分别为: 小雨 (0.1—4.9 mm), 中雨 (5.0—14.9 mm), 大雨 (15.0—29.9 mm), 暴雨 (30.0—69.9 mm), 大暴雨 (70.0—139.9 mm); 根据 24 h 以内降雨量划分等级分别为小雨 (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), 大暴雨 (100.0—249.9 mm)。平均雨强 (AI , Average rainfall intensity, mm/h) 为降雨历时 (T_{rain} , Rainfall duration, h) 内的平均降雨强度。峰值雨强 (PI , Peak rainfall intensity, mm/h) 为最大 30 min 降雨强度。

依据次降雨特征, 从土壤水分变化量、响应时间和湿润锋运移速率等方面分析土壤水对降雨事件的响应规律^[9]。土壤含水量最大增幅 ($\Delta\theta_{max}$, Maximum soil water content increase, m^3/m^3) 为降雨事件发生前 (10 min 内) 的土壤初始含水量 (θ_{in} , Initial soil water content, m^3/m^3) 与事件发生后至下一次事件发生前的土壤含水量峰值的差值。当土壤体积含水量在 10 min 内增量大于 $0.002 m^3/m^3$ 时或连续 3 h 以上土壤体积含水量逐小时增加时, 即判断土壤水发生了响应。初始响应时间 (T_i , Initial response time, h) 为降雨开始到某一深度土壤含水量产生响应之间的时间差。通过对比降雨事件中不同深度相应的 T_i 值来估计降雨入渗过程中是否发生优先流, 当 20、30、50、70、100 cm 任一深度的 T_i 值比 10 cm 的 T_i 值小, 则认为该深度发生了优先流。进一步采用峰值雨强发生时间与土壤含水量峰值时间之间的时间差 (T_{p2p} , Peak to peak time, h) 来研究土壤水分对次降雨的响应过程。

每次降雨后湿润锋从地面向各土层移动的速率则定义为湿润锋运移速率 (V_{wf} , Wetting front velocity, cm/h), 其计算公式为:

$$V_{wf} = \frac{L}{T_i} \quad (1)$$

式中, L 为土层深度 (cm); T_i 为降雨开始到某一深度土壤含水量产生响应之间的时间差 (h)。

土壤储水量 (W , Water storage, mm) 指一定土层厚度内总的土壤含水量, 计算式为:

$$W_i = \theta_i \times h_i \times 10 \quad (2)$$

$$W = \sum_i^N W_i \quad (3)$$

式中, W_i 、 θ_i 和 h_i 分别为第 i 层的土壤储水量 (mm)、体积含水量 (m^3/m^3) 和土层厚度 (cm); i 为土层序号, 共有 N 层; W 为 1 m 土壤剖面内的总储水量 (mm)。

通过计算各响应指标的变异系数来分析研究期间某一深度土壤响应指标的时间变异性。计算各土壤水分响应指标和降雨特征参数、土壤初始含水量之间的皮尔逊相关系数来反映各指标之间的相关性。

3 结果与分析

3.1 次降雨特征与土壤水响应次数

2021 年和 2022 年 6 月 20 日至 10 月 20 日的总降水量分别为 976 mm 和 533 mm, 占全年降水量的 86% 和 81%, 是研究区降雨集中时段 (图 2)。2021 年最大日降雨量为 167.8 mm (2021-07-17), 2022 年最大日降雨量为 98.4 mm (2022-06-27)。研究时段内所有降雨事件的等级、降雨总量、降雨历时和峰值雨强特征如图 2 所示, 2021 年研究时段内小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨事件分别有 7、11、8、5、2 场, 2022 年分别有 3、6、5、3、1 场。2021 年大雨、暴雨和大暴雨的总降雨量为 843 mm, 占研究时段内总降雨量的 87%; 2022 年大雨、暴雨和

大暴雨的总降雨量为 451 mm,相对 2021 年减少了 392 mm,占研究时段内总降雨量的比例减少到了 83%,但其中暴雨总共 216 mm,暴雨的占比从 2021 年的 27%增加到 2022 年的 40%。2021 年降雨事件的最大平均雨强为 37.7 mm/h,最大峰值雨强达到 74 mm/h。2022 年的最大平均雨强为 29.1 mm/h,最大峰值雨强达到 138 mm/h。

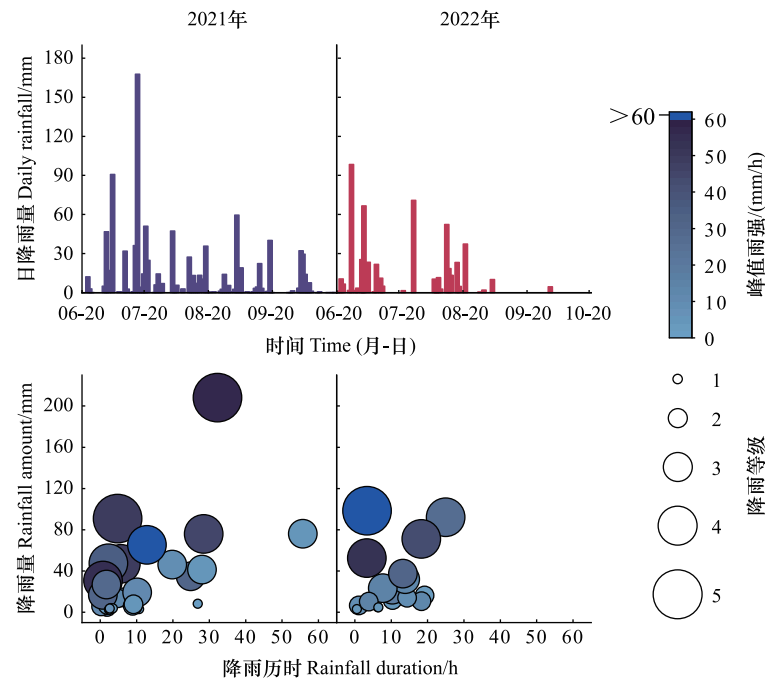


图 2 2021 和 2022 年降雨集中时段(6 月 20 日—10 月 20 日)日降雨量及次降雨特征

Fig.2 Daily rainfall and characteristics of rainfall events during rainfall concentration period (June 20th—October 20th) in 2021 and 2022
图中降雨等级 1、2、3、4 和 5 分别代表小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨

研究时段内不同降雨事件下 PO_M 和 PO_Y 林地各深度土壤水分的平均响应次数分别为 24 次和 21 次。两种林地的响应次数均随土层深度的增加而递减,其中 PO_M 林地 100 cm 处的响应次数(11 次)显著低于其他深度($P<0.05$)。在 PO_M 林地,使 0—30 cm 深度土壤发生响应的降雨事件次数占总降雨事件次数的 57%,使 100 cm 土壤发生响应的降雨事件占比 22%;在 PO_Y 林地,使 0—30 cm 深度土壤发生响应的降雨事件次数占总降雨事件次数的 39%,使 100 cm 土壤发生响应的降雨事件占比(31%)明显大于 PO_M 林地。由表 1 可知, PO_M 林地 100 cm 处土壤水分发生响应所需的最小降雨量 RA_{min} (平均 25.6 mm)大于 PO_Y 林地(平均 18.8 mm)。 PO_M 林地 20 cm 处共发生 3 次优先流, PO_Y 林地 20、30 和 70 cm 处均发生 1 次优先流,100 cm 处则发生了 5 次优先流。因此,在 PO_Y 林地 50 cm 以下土壤水入渗过程更快,优先流发生频繁,降雨更容易入渗到 100 cm 以下补给深层土壤水。

表 1 侧柏林地不同深度土壤水分发生响应所需的最小降雨量 RA_{min}/mm

Table 1 Minimum response rainfall amount RA_{min} at different soil depths in <i>Platycladus orientalis</i> forests with two stand ages				
深度 Depth/cm	2021 年 PO_M	2021 年 PO_Y	2022 年 PO_M	2022 年 PO_Y
10	2.4	2.4	4.8	10.2
20	2.4	7	4.8	14
30	5	13.4	4.8	14
50	17	13.4	16.2	23.2
70	19.2	14.4	23.2	23.2
100	19.2	14.4	32	23.2

PO_M 成熟林; PO_Y 中龄林

3.2 湿润锋运移速率

PO_M 和 PO_Y 林地所有深度的湿润锋运移速率 (V_{wf}) 平均值分别为 8.5 cm/h (CV 值 1.0) 和 7.8 cm/h (CV 值 0.8) (图 3)。 PO_M 林地 V_{wf} 随土层深度先增大后减小, 在 30 cm 处 V_{wf} 平均值达到最大 (10.1 cm/h); PO_Y 林地的 V_{wf} 随着土层深度的增加而增加, 在 100 cm 处 V_{wf} 平均值达到最大 (15.7 cm/h)。其中, PO_M 林地 0—30 cm 土层的平均湿润锋运移速率 (9.1 cm/h) 快于 PO_Y 林地 (4.3 cm/h), 但 50—100 cm 土层内 PO_Y 林地平均湿润锋运移速率 (11.2 cm/h) 快于 PO_M 林地 (7.9 cm/h)。2021 年湿润锋运移速率大于 30 cm/h 的降雨事件明显多于 2022 年, 其中 2021-07-05 大暴雨 (90.8 mm)、2021-07-11 大雨 (34.8 mm)、2021-07-20 中雨 (14.4 mm)、2021-08-04 暴雨 (47.4 mm) 和 2021-09-04 暴雨 (65.2 mm) 事件下 V_{wf} 均大于 30 cm/h, 最大值为 37.5 cm/h。而 2022 年仅在 2022-06-27 大暴雨 (98.4 mm) 事件下 V_{wf} 大于 30 cm/h。

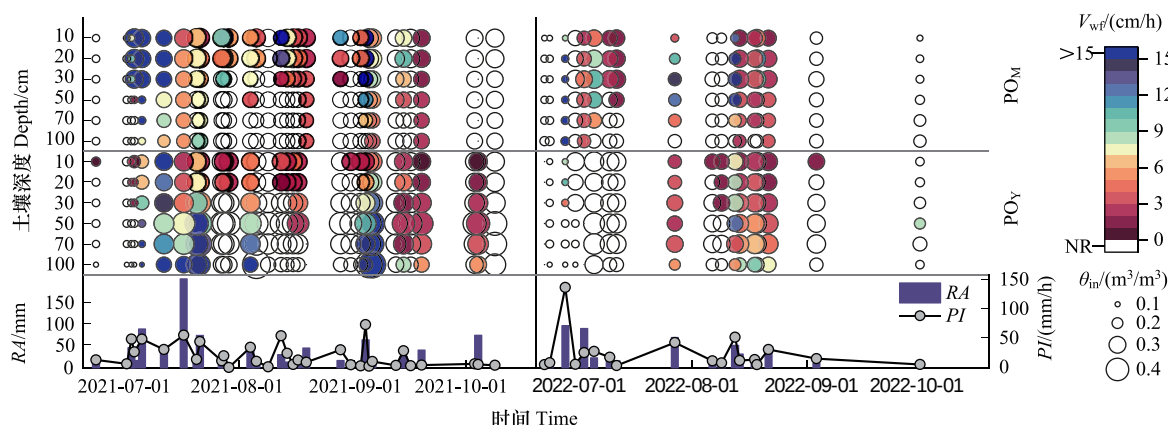


图 3 2021 和 2022 年 PO_M 和 PO_Y 林地不同降雨事件下湿润锋运移速率 (V_{wf})

Fig.3 Wetting front velocity (V_{wf}) under different rainfall events in 2021 and 2022 in the PO_M and PO_Y plots

V_{wf} : 湿润锋运移速率 Wetting front velocity; RA : 次降雨事件的总降雨量 Rainfall amount; PI : 次降雨事件的峰值雨强 Peak rainfall intensity; θ_{in} : 次降雨事件前土壤初始含水量 Initial soil water content before a rainfall event; NR: 对应深度无响应 No response

3.3 土壤含水量峰值与雨强峰值的时间差

次降雨事件下 PO_M 和 PO_Y 林地整个土壤剖面内土壤含水量峰值与雨强峰值时间差 (T_{p2p}) 的平均值分别为 26.7 h (CV 值 0.8) 和 27.2 h (CV 值 1.1)。两个林地的 T_{p2p} 均随着土层深度的增加而增加。 PO_M 林地 0—30 cm 土壤水分峰值相对于雨强峰值的平均滞后时间 (8.2 h) 比 PO_Y (20 h) 短; 但 PO_M 林地在 50—100 cm 的平均滞后时间 (45.1 h) 明显大于 PO_Y 林地 (34.2 h), PO_M 林地 100 cm 处 T_{p2p} 最长, 达 81.9 h (图 4)。

2021 年使各深度土壤水分均有响应的降雨事件中, 2021-07-05 大暴雨 (RA 和平均 T_{p2p} 分别为 90.8 mm 和 10.6 h) 和 2021-07-21 暴雨 (RA 和平均 T_{p2p} 分别为 75.8 mm 和 12.7 h) 事件后各深度响应迅速, 平均 T_{p2p} 低于 20 h。2021-09-19 大雨事件 (RA 为 41.4 mm) 后各深度平均 T_{p2p} 最长 (92.7 h)。但 2022 年, 只有两场降雨事件下所有土层深度都发生了响应, 分别为 2022-08-13 大雨事件 (RA 和平均 T_{p2p} 分别为 13.2 mm 和 17.7 h) 和 2022-08-21 大雨事件 (RA 和平均 T_{p2p} 分别为 37.4 mm 和 18.3 h)。

3.4 土壤含水量最大增幅

研究时间段内降雨后土壤水分最大增幅 $\Delta\theta_{max}$ 在 0.002—0.3 m^3/m^3 之间变化, 但不同林龄侧柏地 $\Delta\theta_{max}$ 的剖面变化差异明显 (图 5)。 PO_M 林地 10 cm 和 20 cm 处 $\Delta\theta_{max}$ 明显大于更深层的 $\Delta\theta_{max}$, 而在 PO_Y 林地 30 cm 及以下土层的 $\Delta\theta_{max}$ 则大于 0—20 cm 的 $\Delta\theta_{max}$ 。 PO_M 林地在 10 cm 处 $\Delta\theta_{max}$ 的平均值 (0.055 m^3/m^3) 大于 PO_Y (0.040 m^3/m^3) 林地, 在 20 cm 以下土层则相反, 其中在 50—100 cm 土层, PO_Y 林地 $\Delta\theta_{max}$ 平均值 (0.071 m^3/m^3) 明显大于 PO_M 林地 (0.034 m^3/m^3)。 PO_M 林地 $\Delta\theta_{max}$ 最大变异系数 (CV) 出现在 50 cm 深度处 (1.36), PO_Y

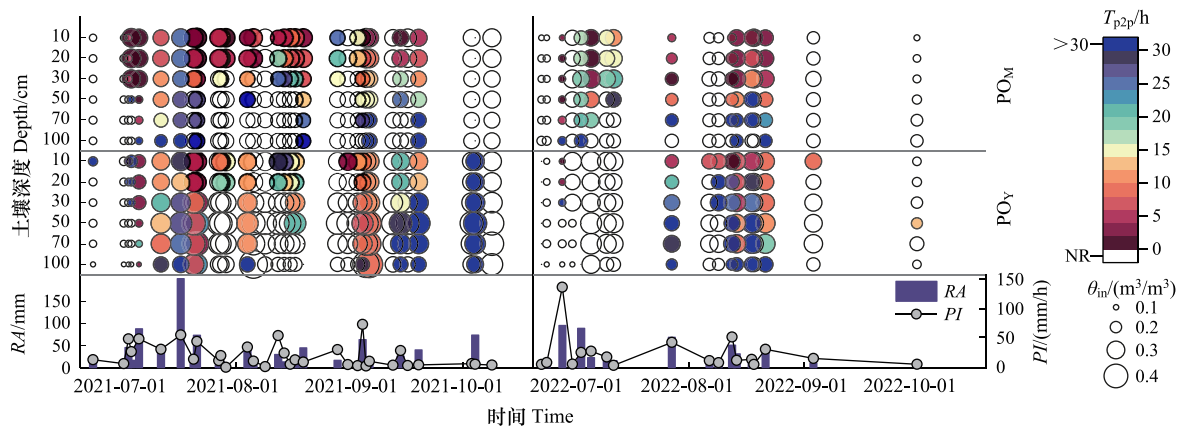


图4 2021 和 2022 年 PO_M 和 PO_Y 林地不同降雨事件下土壤含水量峰值与峰值雨强发生的时间差 (T_{p2p})

Fig.4 Response time of the maximum soil water content to peak rainfall intensity (T_{p2p}) under different rainfall events in 2021 and 2022 in the PO_M and PO_Y plots

T_{p2p} : 土壤含水量峰值与峰值雨强发生的时间差 Peak to peak time

林地最大 CV 值出现在表层 10 cm 处 (1.53)。

$\Delta\theta_{\max}$ 值及其发生次数对不同特征降雨事件的响应规律不同。2021-07-02 至 7-21 期间 7 场中雨到大暴雨事件中土壤水分增幅最大, 共有 25 次 $\Delta\theta_{\max}$ 大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (图 5 中深蓝色圆形), 占雨季 $\Delta\theta_{\max}$ 发生次数 (30 次) 的 83.3%。其中, PO_M 和 PO_Y 林地 $\Delta\theta_{\max}$ 最大值均发生在 2021-07-5 大暴雨事件下深层土壤中, 但 PO_M 林地 $\Delta\theta_{\max}$ 最大值 ($0.23 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 50 cm 处) 明显小于 PO_Y 林地 ($0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 100 cm 处)。同样, 2022-06-27 (大暴雨)、07-27 (暴雨) 和 08-12 (暴雨) 三场强降雨事件后 $\Delta\theta_{\max}$ 大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 的次数 (15 次) 占雨季 $\Delta\theta_{\max}$ 发生总次数 (16 次) 的 93.8%。其中两个林地 $\Delta\theta_{\max}$ 最大值均发生在 2022-06-27 大暴雨事件下, 但主要出现在浅层 (PO_M 林地 30 cm 处和 PO_Y 林地 10 cm 处)。此外, 次降雨事件前土壤初始含水量 (θ_{in}) 对 $\Delta\theta_{\max}$ 的影响有时会大于 RA 对 $\Delta\theta_{\max}$ 的影响, 例如 2021-07-17 年最大大暴雨事件 (RA 为 208 mm) 下 $\Delta\theta_{\max}$ 最大值 ($0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 小于前两次雨量较小的降雨事件 (2021-07-11 大雨, RA 为 34.8 mm, $\Delta\theta_{\max}$ 为 $0.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 和 (2021-07-5 大暴雨, RA 为 90.8 mm, $\Delta\theta_{\max}$ 为 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$)。

3.5 土壤储水量变化

2021、2022 年研究时段内 PO_M 林地 1 m 土壤剖面内土壤储水量 W 变化范围分别为 130—329 mm 和 130—297 mm, PO_Y 样地 W 变化范围分别为 125—416 mm 和 120—354 mm, 两个年份 PO_Y 林地的 W 值均极显著 ($P < 0.01$) 大于 PO_M 林地 (图 6)。2021 年 PO_M 和 PO_Y 林地时段末 W 比时段初 W 分别增加了 130 mm 和 189 mm; 2022 年 PO_M 和 PO_Y 林地时段末 W 值比时段初分别增加了 14 mm 和 29 mm。

土壤储水量对不同降雨事件的响应特征不同。典型暴雨事件后林地的土壤储水量明显增加, 2021 年和 2022 年雨季降雨事件使 PO_M 林地的 W 值最多分别增加了 199 mm 和 167 mm, PO_Y 林地 W 值最多增加了 291 mm 和 234 mm。2021 年期间 7-2 暴雨 (46.8 mm) 使 PO_M 的储水量增加了 81.8 mm, 7-5 大暴雨 (90.8 mm) 使 PO_Y 增加了 225.9 mm; 2022 年 6-27 暴雨 (98.4 mm) 使 PO_M 的储水量增加了 127.4 mm, 7-2 暴雨 (92 mm) 使 PO_Y 的储水量增加了 160.2 mm; 在典型暴雨及大暴雨事件后土壤储水量增加量均大于事件降雨量。

4 讨论

4.1 降雨特征对土壤水分动态的影响

不同降雨事件特征导致山区土壤水分运移速率、响应时间和变化幅度产生明显差异。由相关性分析发

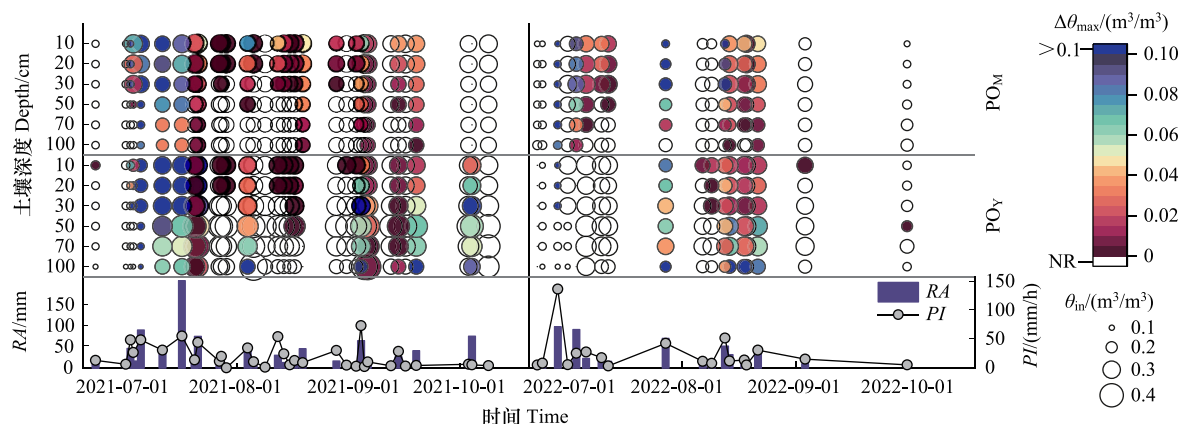


图5 2021 和 2022 年不同降水事件下侧柏成熟林 (PO_M) 和中龄林 (PO_Y) 各深度土壤含水量最大增幅 ($\Delta\theta_{\max}$)

Fig.5 Maximum increase of soil moisture ($\Delta\theta_{\max}$) at each depth under different rainfall events in 2021 and 2022 in *Platycladus orientalis* forests with mature (PO_M) and middle (PO_Y) stand ages

$\Delta\theta_{\max}$: 土壤含水量最大增幅 Maximum soil water content increase

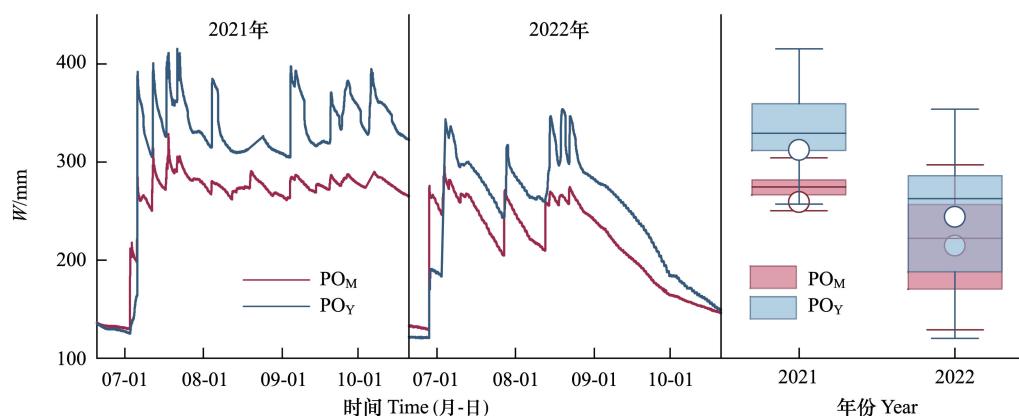


图6 2021 和 2022 年 PO_M 和 PO_Y 林地土壤储水量变化及其箱形图

Fig.6 Changes in the soil water storage in PO_M and PO_Y plots in 2021 and 2022 as well as the box diagram of soil water storage

W: 储水量 Water storage

现,降雨总量(RA)和峰值雨强(PI)与土壤水分响应次数(n)、最大响应深度($D_{\max}$)、土壤含水量最大增幅($\Delta\theta_{\max}$)和湿润锋运移速率(V_{wf})均呈显著($P<0.05$)正相关关系(图7)。降雨总量和峰值雨强是影响土壤水分响应过程的主控因素。尽管随着土层深度的增加,土壤含水量响应次数减少,滞后时间增加,降雨的影响程度逐渐减小^[23],但优先流可绕过土壤基质沿特定路径快速补给深层土壤^[24]。降雨强度能极大的增加降雨事件后优先流的发生次数^[25]。本研究表明,峰值雨强与优先流发生次数呈极显著正相关关系($P<0.01$),峰值雨强越大,越容易通过大孔隙通道产生优先流。本研究中,典型暴雨大暴雨事件后土壤储水量增量大于事件降雨量,表明山坡土壤在接受降雨垂向入渗补给的同时沿坡向发生了侧向渗流补给,可能是暴雨及大暴雨事件后产生的壤中暴流侧向补给了土壤储水,且有进一步汇流形成山洪的趋势^[26-27],这也是导致2021年研究区发生58年一遇大洪水的一个重要原因。

此外,降雨历时(T_{rain})与 n 、 $D_{\max}$ 和 T_{p2p} 均呈极显著正相关($P<0.01$),降雨历时越长,入渗深度越深,土壤水分峰值的滞后时间越长。平均雨强(AI)与 n 、 $\Delta\theta_{\max}$ 和 V_{wf} 呈显著正相关($P<0.05$),但与 $D_{\max}$ 不相关($P>$

0.05),说明平均雨强对土壤水分最大响应深度的影响有限(图7)。次降雨事件前土壤初始含水量(θ_{in})与 $\Delta\theta_{max}$ 呈极显著负相关关系($P<0.01$),说明土壤前期越干燥,土壤水分增幅越大。例如,相对2021-07-17大暴雨事件(降雨量208 mm),2021-07-05的大暴雨事件(降雨量90.8 mm)下 AI 更高且 θ_{in} 更低,使得湿润锋下移速率更快,土壤水分增量更大。同样,Rye等^[28]的研究也表明,在土壤水分亏缺状态下,降水的入渗补给作用更加显著,而在湿润状态下,土壤斥水性增强,土壤水分增量减小。

4.2 不同林龄侧柏对降水入渗过程的影响

在森林生态系统中,树木的生长对土壤理化性质和生物活性具有长期影响,能改变土壤的水力特性^[14,29]。本研究中,中龄侧柏林土壤具有更强的蓄水能力,降雨在深层土壤中的入渗速率更快,土壤含水量峰值对雨强峰值的响应时间相对较短,深层土壤水分增幅更大。以往研究发现,树木蒸腾量随林龄的增加而增加^[30-31]。在生长旺季,成熟侧柏林的蒸腾作用相对较强,侧柏根系可迅速吸收大量降水,这可能是成熟林土壤剖面含水量增幅相对较小的原因。同时,随着侧柏林龄的增加,成熟林细根生物量、土壤有机质的减少和微生物活性的变化也会改变土壤结构,削弱土壤的渗透性和蓄水能力^[32-34]。

本研究还发现在中龄侧柏林(60 a)中优先流发生更频繁,尤其是强降雨事件下,并且主要发生在20 cm以下土层中,深层土壤100 cm处发生优先流次数最多。以往也有研究发现优先流导致暴雨事件中100 cm土层比30 cm土层反应更快^[35]。在森林土壤中,优先流主要来自活的或腐烂的根系通道或土壤动物形成的连通空隙空间。有研究表明,根系生物量和根长密度显著影响优先流^[36]。李瑞霞等^[37]发现侧柏细根总生物量随着林龄增加而显著降低。在西加云杉林也显示了细根生物量随林龄(10、15、31、47 a)的增加呈下降趋势^[38],因此,成熟侧柏林中降水入渗的优先流通道会相应减少,而中龄侧柏林中更频繁的优先流可能是高细根生物量和高细根活性促进大孔隙通道发展的结果。此外,不同树龄侧柏人工林土壤水分运移过程对次降雨的响应还受到林地地形、凋落物、郁闭度等因素的影响,有待进一步研究。

5 结论

本研究于2021极端丰水年和2022平水年的降雨集中期(6月20日至10月20日),基于白洋淀上游崇陵流域内降雨和两种典型侧柏人工林(90 a成熟林和60 a中龄林)土壤水分实时定位监测,分析了侧柏林土壤水分入渗过程及储水量对不同降雨事件的动态响应规律。主要结论如下:

(1)不同降雨事件下土壤水分运移速率、响应时间和变化幅度等差异明显。降雨总量和峰值雨强是影响土壤水分响应过程的主控因素,降雨总量和峰值雨强越大,土壤水分响应越灵敏,湿润锋运移越快,下渗深度越深,土壤水分增量越大。降雨历时越长,土壤水分峰值的滞后时间越长($P<0.01$)。在降雨事件前,土壤初始含水量越低,土壤越干燥,土壤水分增量越大($P<0.01$)。

(2)不同林龄林地土壤水分响应规律差异明显。在降雨入渗过程中,中龄侧柏林50 cm以下土层湿润锋运移速率和土壤含水量最大增幅均明显大于成熟侧柏林,优先流发生更为频繁,水分能快速下渗以补充深层土壤水及地下水。整个雨季中龄侧柏林土壤储水量极显著($P<0.01$)大于成熟侧柏林,典型降雨事件后中龄

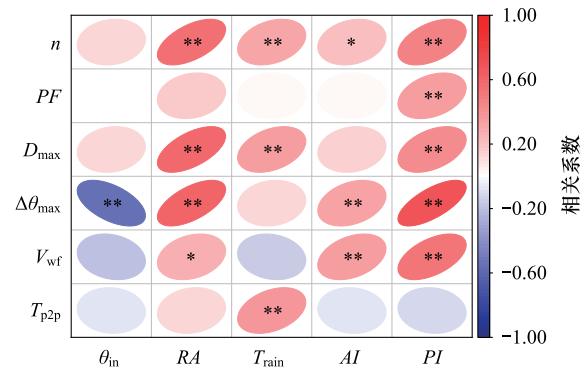


图7 土壤水分响应指标与降雨特征参数和初始土壤含水量之间的相关关系

Fig.7 Correlation analysis between response metrics and antecedent soil moisture and rainfall characteristics

n :响应次数 Response times; PF :优先流发生次数 Preferential flow occurrence times; D_{max} :土壤水最大响应深度 Maximum response soil depth; AI :次降雨事件的平均雨强 Average rainfall intensity; T_{rain} :降雨历时 Rainfall duration

侧柏林土壤储水量增量也显著高于成熟侧柏林,其土壤蓄水能力更强。

综上,随着白洋淀上游流域植被恢复年限的增加,侧柏中龄林转变为成熟林后林分蒸腾量、根系生物量、土壤结构和水力特性等发生改变,土壤水运移速率和储水量对降雨的响应均减弱,林地的土壤入渗性能和蓄水保水能力降低。因此应根据恢复年限适当进行树种调整或疏伐,以增强森林水源涵养功能及其应对极端降雨事件的能力,保障山区生态系统可持续发展,建立区域水资源安全屏障。

参考文献 (References):

- [1] Liu Y F, Liu Y, Shi Z H, López-Vicente M, Wu G L. Effectiveness of re-vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi-arid Loess Plateau. *Catena*, 2020, 195: 104787.
- [2] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, Madhusoodanan M S, Xavier P K. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, 2006, 314(5804): 1442-1445.
- [3] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2011, 47(1): 123-138.
- [4] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, O’Gorman P A, Maher N. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 508-513.
- [5] Li Q, Zhu Q, Zheng J S, Liao K H, Yang G S. Soil moisture response to rainfall in forestland and vegetable plot in Taihu Lake Basin, China. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(4): 426-437.
- [6] Chen L, Zhang K L, Zhang Z D, Cao Z H, Ke Q H. Response of soil water movement to rainfall under different land uses in Karst regions. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(1): 50.
- [7] A Y L, Wang G Q, Sun W C, Xue B L, Kiem A. Stratification response of soil water content during rainfall events under different rainfall patterns. *Hydrological Processes*, 2018, 32(20): 3128-3139.
- [8] Zehe E, Graeff T, Morgner M, Bauer A, Bronstert A. Plot and field scale soil moisture dynamics and subsurface wetness control on runoff generation in a headwater in the Ore Mountains. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(6): 873-889.
- [9] Singh N K, Emanuel R E, McGlynn B L, Miniati C F. Soil moisture responses to rainfall: implications for runoff generation. *Water Resources Research*, 2021, 57(9): e2020WR028827.
- [10] Detty J M, McGuire K J. Topographic controls on shallow groundwater dynamics: implications of hydrologic connectivity between hillslopes and riparian zones in a till mantled catchment. *Hydrological Processes*, 2010, 24(16): 2222-2236.
- [11] 侯宁宁, 苏晓琳, 杨钙仁, 于婧睿, 王玮. 桉树造林的土壤物理性质及其水文效应. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 101-107+114.
- [12] 马昀, 孟晨, 岳健敏, 宋乃平, 谢莉, 杜灵通. 宁夏荒漠草原不同林龄人工柠条林地土壤优先流研究. *生态学报*, 2022, 42(3): 895-903.
- [13] 林希昊, 陈秋波, 华元刚, 杨礼富, 王真辉. 不同树龄橡胶林土壤水分和细根生物量. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 331-336.
- [14] Lucas-Borja M E, Hedo J, Cerdá A, Candel-Pérez D, Viñegla B. Unravelling the importance of forest age stand and forest structure driving microbiological soil properties, enzymatic activities and soil nutrients content in Mediterranean Spanish black pine(*Pinus nigra* Ar. ssp. *salzmannii*) Forest. *Science of the Total Environment*, 2016, 562: 145-154.
- [15] Chen W L, Li Z S, Jiao L, Wang C, Gao G Y, Fu B J. Response of soil moisture to rainfall event in black locust plantations at different stages of restoration in hilly-gully area of the Loess Plateau, China. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(3): 427-445.
- [16] Wang Y Q, Shao M, Liu Z P, Zhang C C. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China. *Pedosphere*, 2015, 25(4): 546-554.
- [17] Nan W G, Ta F, Meng X Q, Dong Z B, Xiao N. Effects of age and density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on soil moisture in the semiarid Mu Us Dunefield, Northern China. *Forest Ecology and Management*, 2020, 473: 118313.
- [18] Kou M, Garcia-Fayos P, Hu S, Jiao J Y. The effect of *Robinia pseudoacacia* afforestation on soil and vegetation properties in the Loess Plateau (China): a chronosequence approach. *Forest Ecology and Management*, 2016, 375: 146-158.
- [19] 王稳, 高晓东, 赵西宁, 杨孟豪. 黄土高原不同气候区刺槐林恢复年限对水、碳及植物多样性的影响. *生态学报*, 2023, 43(23): 9770-9783.
- [20] Yang F, Huang M B, Li C H, Wu X F, Guo T Q, Zhu M Y. Changes in soil moisture and organic carbon under deep-rooted trees of different stand ages on the Chinese Loess Plateau. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2022, 328: 107855.
- [21] 胡珊珊, 杨丽虎, 张广英, 王胜宝. 太行山区典型小流域降雨产流特征分析. *人民黄河*, 2015, 37(12): 16-18, 22.
- [22] 胡珊珊. 华北石质山区坡面森林水文效应试验研究——以崇陵流域为例[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2009.
- [23] Gwak Y, Kim S. Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope. *Hydrological Processes*, 2017, 31(2): 431-445.

- [24] Bahr J M, Doe T W, Flint A W, Wheatcraft S W. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. Washington, DC: The National Academies Press, 2001: 149-187.
- [25] Demand D, Blume T, Weiler M. Spatio-temporal relevance and controls of preferential flow at the landscape scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(11): 4869-4889.
- [26] 苏辉东, 贾仰文, 龚家国, 赵思远, 牛存稳, 甘永德. 土石山区山坡壤中流汇流界面研究——以太行山崇陵流域为研究区. *水利水电技术*, 2018, 49(12): 52-58.
- [27] 崔鹏, 张国涛, 张晨笛. 壤中暴流水文机理与致灾效应. *地理学报*, 2023, 78(7): 1627-1640.
- [28] Rye C F, Smettem K R J. Seasonal variation of subsurface flow pathway spread under a water repellent surface layer. *Geoderma*, 2018, 327: 1-12.
- [29] Yesilonis I, Szlavecz K, Pouyat R, Whigham D, Xia L. Historical land use and stand age effects on forest soil properties in the Mid-Atlantic US. *Forest Ecology and Management*, 2016, 370: 83-92.
- [30] Köstner B, Falge E, Tenhunen J D. Age-related effects on leaf area/sapwood area relationships, canopy transpiration and carbon gain of Norway spruce stands (*Picea abies*) in the Fichtelgebirge, Germany. *Tree Physiology*, 2002, 22(8): 567-574.
- [31] Pei Y W, Huang L M, Shao M A, Zhang Y L, Pan Y H. Water use pattern and transpiration of Mongolian pine plantations in relation to stand age on northern Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 330: 109320.
- [32] Liu J L, Ngoc Ha V, Shen Z, Zhu H L, Zhao F, Zhao Z. Characteristics of bulk and rhizosphere soil microbial community in an ancient *Platycladus orientalis* forest. *Applied Soil Ecology*, 2018, 132: 91-98.
- [33] Hou G L, Delang C O, Lu X X, Gao L. A meta-analysis of changes in soil organic carbon stocks after afforestation with deciduous broadleaved, sempervirent broadleaved, and conifer tree species. *Annals of Forest Science*, 2020, 77(4): 92.
- [34] Wang W J, Qiu L, Zu Y G, Su D X, An J, Wang H Y, Zheng G Y, Sun W, Chen X Q. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2657-2676.
- [35] Dymond S F, Wagenbrenner J W, Keppeler E T, Bladon K D. Dynamic hillslope soil moisture in a Mediterranean montane watershed. *Water Resources Research*, 2021, 57(11): e2020WR029170.
- [36] Zhang Y H, Niu J Z, Yu X X, Zhu W L, Du X Q. Effects of fine root length density and root biomass on soil preferential flow in forest ecosystems. *Forest Systems*, 2015, 24(1): 12.
- [37] 李瑞霞, 凌宁, 郝俊鹏, 闵建刚, 陈信力, 关庆伟. 林龄对侧柏人工林碳储量以及细根形态和生物量的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(2): 21-27.
- [38] Saiz G, Byrne K A, Butterbach-Bahl K, Kiese R, Blujdea V, Farrell E P. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland. *Global Change Biology*, 2006, 12(6): 1007-1020.