北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

坝上高原不同植被类型土壤储水量时空变化及降雨响应

冯岩开 贾国栋 余新晓 蒋涛 王欲坤 王堃莹

Spatiotemporal variation in soil water storage and its response to rainfall under different vegetation types on the Bashang Plateau, Hebei Province of northern China

Feng Yankai, Jia Guodong, Yu Xinxiao, Jiang Tao, Wang Yukun, Wang Kunying

引用本文:
冯岩开, 贾国栋, 余新晓, 蒋涛, 王欲坤, 王堃莹. 坝上高原不同植被类型土壤储水量时空变化及降雨响应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(8):53–67. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260035
Feng Yankai, Jia Guodong, Yu Xinxiao, Jiang Tao, Wang Yukun, Wang Kunying. Spatiotemporal variation in soil water storage and its response to rainfall under different vegetation types on the Bashang Plateau, Hebei Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8):53–67. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260035

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260035

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应

Dynamic response of soil moisture content to rainfall under different vegetation cover types on the Bashang Plateau, northwestern Hebei Province of northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(5): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220220

吉林蛟河不同树种储水量分配特征与预测模型

Allocation characteristics and prediction models of water storage capacity among different tree species in Jiaohe, Jilin Province of northeastern China

北京林业大学学报, 2024, 46(9): 11–25. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230248

坝上地区典型防护林水源涵养功能对林分结构的响应

Response of water conservation function of typical protective forests in Bashang area of northern China to stand structure

北京林业大学学报, 2024, 46(9): 77–86. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240192

透光抚育强度对长白山“栽针保阔”林分凋落物截留和土壤蓄水动态的影响

Effects of release cutting intensity on dynamics of litter interception and soil water storage in “planting conifer and preserving broadleaved tree” stand in Changbai Mountain, northeastern China

北京林业大学学报, 2025, 47(7): 61–72. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240106

坝上地区退化小叶杨树干液流特征及对环境因子的响应

Characteristics of sap flow of degraded *Populus simonii* in Bashang Area, Hebei Province of northern China and its response to environmental factors

北京林业大学学报, 2024, 46(7): 36–43. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230332

基于CASA模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应

Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response to climate factors in the Loess Plateau based on the CASA model

北京林业大学学报, 2026, 48(4): 13–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250428

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260035

坝上高原不同植被类型土壤储水量时空变化及降雨响应

冯岩开[1]　贾国栋[1,2]　余新晓[1,2]　蒋　涛[1]　王欲坤[1]　王堃莹[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 北京林业大学水土保持学院首都圈森林生态系统国家定位观测研究站，北京 100083）

摘要:【目的】为揭示河北坝上高原不同植被类型下土壤储水量的时空变化特征及其对降雨的响应规律，明确不同植被类型在土壤储水量分布与调节过程中的差异。**【方法】**以河北省张北县天然草地、柠条人工林、小叶杨人工林和樟子松人工林为研究对象，基于 2019—2020 年土壤水分和降雨连续监测数据，计算 0 ~ 100 cm 土壤剖面储水量，分析其季节变化、垂向特征及对典型降雨事件的响应过程。**【结果】**(1)不同植被类型 0 ~ 100 cm 土壤储水量均表现出明显的季节变化特征，总体呈“1—2 月相对稳定、3—5 月快速回升、6—11 月维持较高水平并波动变化、12 月明显下降”的变化过程。(2)不同植被类型土壤储水量在剖面上存在明显分异。草地高值主要出现在 20 ~ 40 cm 土层，柠条 0 ~ 100 cm 剖面储水量分布相对均匀且整体活跃，小叶杨在 80 ~ 100 cm 土层表现出显著的深层储水优势，樟子松则表现为浅层较高、中层偏低的分布格局。(3)降雨对土壤储水量的影响具有明显层次性，主要集中于 0 ~ 20 cm 土层，中雨响应多限于浅层，大雨及连续降雨条件下影响范围可向中深层扩展；60 ~ 100 cm 深层土壤对单次降雨响应相对滞后，主要在较强或持续降雨条件下表现出累积补给特征。(4)不同植被类型对降雨响应的强度和持续性存在明显差异，草地和柠条表现为浅层快速响应，小叶杨深层调蓄能力较强，樟子松整体波动较缓。**【结论】**坝上高原不同植被类型在土壤储水过程、剖面分异和降雨响应方式上均存在显著差异，其中小叶杨在剖面尺度上表现出较强的储水与调蓄能力，草地和柠条更易形成浅层快速响应，樟子松则表现出相对稳定但深层持水受限的特征。区域植被恢复与配置应综合考虑不同植被类型的储水层位、降雨补给能力和耗水特征，避免单纯追求高覆盖度或大面积单一乔木化配置。

关键词：坝上高原；植被类型；土壤储水量；降雨响应
中图分类号：S714.7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)08−0053−15
引文格式：冯岩开，贾国栋，余新晓，等. 坝上高原不同植被类型土壤储水量时空变化及降雨响应 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(8)：53−67. Feng Yankai, Jia Guodong, Yu Xinxiao, et al. Spatiotemporal variation in soil water storage and its response to rainfall under different vegetation types on the Bashang Plateau, Hebei Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8): 53−67.

Spatiotemporal variation in soil water storage and its response to rainfall under different vegetation types on the Bashang Plateau, Hebei Province of northern China

Feng Yankai[1]　Jia Guodong[1,2]　Yu Xinxiao[1,2]　Jiang Tao[1]　Wang Yukun[1]　Wang Kunying[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Metropolitan Area Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2026−01−22　**修回日期:** 2026−05−27
基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFF1305302)，国家自然科学基金项目(42277062、42230714)。
第一作者: 冯岩开，博士生。主要研究方向：水土保持、森林生态水文研究。Email: fengyankai0205@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 余新晓，教授，博士生导师。主要研究方向：水土保持、生态水文研究。Email: yuxinxiao111@126.com　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] This study aimed to reveal the spatiotemporal variation in soil water storage and its response to rainfall under different vegetation types on the Bashang Plateau of Hebei Province of northern China, and to clarify the differences in soil water storage distribution and regulation among vegetation types. [**Method**] Native grassland, *Caragana korshinskii* plantation, *Populus simonii* plantation, and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Zhangbei County, Hebei Province were selected for this study. Based on continuous monitoring data of soil moisture and rainfall from 2019 to 2020, soil water storage in the 0−100 cm profile was calculated, and its seasonal dynamics, vertical distribution characteristics, and responses to typical rainfall events were analyzed. [**Result**] (1) Soil water storage in 0−100 cm profile under all vegetation types showed clear seasonal dynamics. In general, it remained relatively stable from January to February, increased rapidly from March to May, stayed at a relatively high level with noticeable fluctuations from June to November, and declined markedly in December. (2) Pronounced vertical differences in soil water storage were observed among vegetation types. In the grassland, high values mainly occurred in 20−40 cm layer. In the *Caragana korshinskii* plantation, soil water storage was relatively evenly distributed and remained active throughout 0−100 cm profile. In *Populus simonii* plantation, a significant deep-soil storage advantage was found in 80−100 cm layer. In *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation, soil water storage was relatively high in shallow layers but low in middle layers. (3) The effect of rainfall on soil water storage showed clear vertical stratification and was concentrated mainly in 0−20 cm layer. Under moderate rainfall, the response was mostly confined to shallow soil, whereas under heavy or continuous rainfall, the affected depth extended to middle and deep layers. The 60−100 cm layer responded to single rainfall events with an obvious lag and mainly showed cumulative recharge under intense or persistent rainfall. (4) The intensity and persistence of rainfall responses differed markedly among vegetation types. The grassland and *Caragana korshinskii* plantation showed rapid responses in shallow soil, the *Populus simonii* plantation exhibited strong deep-profile regulation capacity, and the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation showed relatively small overall fluctuations. [**Conclusion**] Different vegetation types on the Bashang Plateau differ significantly in soil water storage processes, vertical distribution patterns, and rainfall response modes. Among them, the *Populus simonii* plantation shows relatively strong soil water storage and regulation capacity at the profile scale; the grassland and *Caragana korshinskii* plantation are more likely to exhibit rapid responses in shallow soil; and the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation is relatively stable overall, but its deep-soil water retention capacity is limited. Vegetation restoration and configuration in this semi-arid region should consider the water storage layers, rainfall recharge capacity, and water consumption characteristics of different vegetation types, rather than simply pursuing high vegetation coverage or large-scale monoculture plantations.

Key words: Bashang Plateau; vegetation types; soil water storage; rainfall response

土壤储水量是陆地生态系统水文循环的重要组成，是连接降水入渗、土壤蒸发、植被耗水和深层渗漏等过程的关键纽带，对维持生态系统稳定、促进植被生长以及调节区域水资源具有关键作用[1−3]。尤其在干旱半干旱区，总降水量有限且时空分布不均，土壤储水量的变化不仅直接影响植被生长与抗旱能力，也决定了降雨输入在土壤剖面中的再分配过程。坝上高原位于我国北方生态脆弱带和京津冀生态屏障关键区域，是阻挡北方荒漠化向南扩展的重要生态功能区[4]。该区域人工植被长期面临较强水分约束，部分防护林已出现不同程度的衰退现象[5]。因此，揭示该区不同植被类型土壤储水量变化及其对降雨的响应特征是认识区域植被适应与优化配置的重要基础[6]。

近年来，坝上高原及其相邻张北地区围绕不同植被类型土壤水分过程已开展了一系列研究。已有研究[7]表明，不同植被类型土壤持水性能存在明显差异，农地土壤持释水能力最强，柠条（*Caragana korshinskii*）地释水能力相对较弱，说明植被类型会影响土壤储水与释水过程[7]。针对降雨事件的研究发现，草地、柠条灌木林和杨树（*Populus* spp.）乔木林土壤水分对降雨的响应存在明显差异，柠条灌木林的响应速度、补给量和补给速率均较大，而杨树乔木林较小[8]。另有研究[9]表明，坝上地区小

叶杨（*Populus simonii*）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）和草地在生长季表现出不同的土壤水势动态。在树木生长响应方面，河北坝上樟子松人工林径向生长与上 1 年生长季末期、休眠期及当年生长季的温度、降水和相对湿度相关，干旱胁迫会明显抑制其径向生长，表明坝上人工林生长过程受区域气候水分条件强烈约束[10]，上述研究为认识坝上高原不同植被的水分过程提供了基础。此外，半干旱区不同植被类型土壤水分季节动态及其降雨响应研究表明，土壤水分波动幅度通常随土层加深而减小，多数降雨事件主要影响浅层土壤，难以形成稳定的深层补给[11]。长期尺度研究也表明[12]，不同植被类型下土壤水分动态存在持续差异，植被类型是影响土壤水分时空变化的重要因素。

然而总体来看，现有研究仍多以土壤含水率或土壤水势为主要指标，对能够综合表征剖面水分状况的土壤储水量关注不足；同时，已有研究多聚焦单一降雨事件或单一植被类型，缺少事件尺度与雨季尺度相结合的系统分析，围绕草地、柠条、小叶杨和樟子松等坝上高原典型植被的综合比较仍有待加强。基于此，本文以坝上高原草地、柠条人工林、小叶杨人工林和樟子松人工林为研究对象，利用 2019—2020 年连续监测资料，分析不同植被类型土壤储水量的时空变化特征及其对降雨事件的响应规律，以期为该区植被恢复与水分管理提供依据。

1　研究区概况

本研究区位于河北省张家口市张北县小二台镇林场，地处冀西北坝上高原（40°57′ ~ 41°34′N，114°10′ ~ 115°27′E），研究区地势较为平坦，海拔为 1 370 ~ 1 420 m，位于内蒙古高原东南缘与冀西北坝上高原交接区域，属于典型农牧交错带。研究区属温带大陆性季风气候，年均气温为 3 ~ 4 ℃，年降水量不足 400 mm，降水主要集中于 5—9 月，年蒸发量约 1 700 mm，水分亏缺特征明显。研究区土壤母质以玄武岩、花岗岩、片麻岩及风积沙土为主构成，土壤酸碱度范围为 5.52 ~ 7.37。其土壤特征为有机质含量偏低，且受风蚀作用显著，导致土壤退化现象较为普遍。土壤类型以栗钙土和沙土占据主导地位，同时夹杂有盐碱土与草甸土等多种类型，整体土壤肥力较差，退化程度较高。此外，该地区土壤还经历季节性冻结过程，进一步影响了土壤中有机质及氮、磷、钾等关键养分的含量，使其处于较低水平。在植被分布上，该研究区域处于林草生态系统的过渡地带，生态系统较为脆弱。森林资源包括小叶杨、樟子松、白桦（*Betula platyphylla*）、榆树（*Ulmus pumila*）、杏（*Prunus armeniaca*）等；灌木林包括柠条、丁香（*Syringa oblata*）、沙棘；草本植物主要有羊草（*Leymus chinensis*）、阿尔泰狗娃花（*Heteropappus altaicus*）、黄花蒿（*Artemisia annua*）、冰草（*Agropyron cristatum*）、独行菜（*Lepidium apetalum*）等。

2　研究方法

2.1　数据来源

在 2019 年 1 月至 2020 年 12 月期间，在研究区内相同地形条件下，针对草地、柠条灌木林、小叶杨落叶乔木林及樟子松常绿乔木林，各设立了 5 块 20 m × 20 m 的监测样地。样地调查情况与研究区土壤理化性质见表 1、2。为监测土壤水分动态，在每块样地内挖掘了 2 个深度为 100 cm 的土壤剖面，并在不同土层（0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm）安装了高精度（± 3%）的土壤水分传感器，连接至数据采集器进行连续监测，每 15 min 记录 1 次数据。待传感器数值稳定后，采用人工土钻法在相同土层取样，通过室内烘干法验证并校准土壤水分监测系统[13]，采用环刀法采集原状土样，用于测定土壤物理性质；同时采集扰动土样，风干、研磨后过 2 mm 筛，用于土壤机械组成分析。该区域植被的根系大部分分布在 0 ~ 100 cm 范围内，尤其是草地和部分灌木类型的植被，其根系活动主要集中于 0 ~ 100 cm 内的土层，因此选择 0 ~ 100 cm 深度范围作为土壤水分监测的层次。

此外，为研究该区域降雨情况，在样地空旷处安装了自计式雨量计，设定每 5 min 记录 1 次数据，测量精度达 0.2 mm，并在使用前通过当地气象站进行了校准，以确保数据的准确性。

2.2　土壤储水量计算方法

相较于土壤含水量，土壤储水量能够更直观地反映土壤剖面水分储存状况。各土层土壤储水量计算公式如下[13]。

$$W_i = \frac{\theta_i}{100} \times H_i \tag{1}$$

0 ~ 100 cm 土层总储水量 W（mm）用公式（2）计算。

$$W = \sum_{i=1}^{n} W_i \tag{2}$$

式中：W_i 为第 i 土层土壤储水量，mm；θ_i 为第 i 土层土壤体积含水量，%；H_i 为第 i 土层厚度，mm；n 为土层数。

2.3　土壤储水量时空变异分析

随机变量的离散程度，即变异性的大小可用变异系数 CV 的大小来反映（公式（3））[14]。

表 1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of sample plots

植被类型	海拔/m	林龄/a	土壤类型	植被盖度/%	林高(冠层高)/m	地径(胸径)/cm
草地	1 408		栗钙土	49.67	0.13 ± 0.02	
	1 384		栗钙土	55.89	0.23 ± 0.03	
	1 366		栗钙土	57.67	0.25 ± 0.03	
	1 388		栗钙土	48.65	0.35 ± 0.05	
	1 395		栗钙土	52.34	0.18 ± 0.02	
柠条 *Caragana korshinskii*	1 396	20	栗钙土	78.54	1.65 ± 0.14	4.01 ± 0.28
	1 377	23	栗钙土	73.24	1.87 ± 0.16	3.83 ± 0.27
	1 385	21	栗钙土	69.33	1.56 ± 0.13	3.48 ± 0.24
	1 411	22	栗钙土	70.53	1.47 ± 0.12	3.73 ± 0.26
	1 435	24	栗钙土	65.87	1.75 ± 0.15	3.68 ± 0.26
小叶杨 *Populus simonii*	1 414	32	栗钙土	52.68	11.15 ± 0.89	21.11 ± 1.27
	1 435	31	栗钙土	49.50	12.35 ± 0.99	19.24 ± 1.15
	1 378	29	栗钙土	48.95	10.68 ± 0.85	20.85 ± 1.25
	1 360	35	栗钙土	50.31	13.55 ± 1.08	21.63 ± 1.30
	1 424	34	栗钙土	55.34	14.21 ± 1.14	22.44 ± 1.35
樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	1 367	35	栗钙土	55.98	9.95 ± 0.70	16.23 ± 1.14
	1 360	35	栗钙土	52.54	10.35 ± 0.72	15.84 ± 1.11
	1 355	34	栗钙土	56.33	11.22 ± 0.79	14.55 ± 1.02
	1 428	36	栗钙土	62.24	10.57 ± 0.74	13.35 ± 0.93
	1 395	33	栗钙土	59.47	11.56 ± 0.81	15.3 ± 1.07

$$CV = \frac{SD}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中：m为土壤储水量平均值；SD为标准差。根据变量程度分级：CV ⩾ 30% 为速变层，30% > CV ⩾ 20% 为活跃层，20% > CV ⩾ 10% 为次活跃层，CV < 10% 为相对稳定层[15]。

2.4 降雨事件划分与数据处理

依据降雨过程的连续性与水文意义，将间隔大于 24 h 的降雨作为 2 次独立的降雨事件[16]，为排除微弱降雨对土壤水分变化的干扰，剔除单次降雨量 < 0.1 mm 的降雨过程。按照国家气象局颁布的降水等级划分标准，将 24 h 降雨量分为 4 个等级：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）[17]。

利用 Excel、SPSS Statistic 27、Origin2022 软件对数据进行记录、分析及制图，采用单因素方差分析检验不同植被类型间差异，并采用 LSD 法进行多重比较，显著性水平设为 $P < 0.05$。

为定量分析雨季降雨量与土壤储水量变化之间的关系，分别计算 0 ~ 60 cm 和 60 ~ 100 cm 土层土壤储水量日变化量[18]。

$$\Delta W = W_t - W_{t-1} \quad (4)$$

式中：ΔW 为土壤储水量日变化量，mm；W_t 和 W_{t-1} 分别为当日和前 1 日土壤储水量，mm。采用 Pearson 相关分析评价雨季日降雨量与不同植被类型土壤储水量日变化量之间的相关关系。

为量化典型降雨事件下土壤储水量响应强度，计算降雨前后各土层土壤储水量增量。

$$\Delta W_i = W_{i,\text{maxafter}} - W_{i,\text{before}} \quad (5)$$

式中：ΔW_i 为第 i土层土壤储水量增量，mm；$W_{i,\text{before}}$ 为降雨前 1 日第 i土层土壤储水量，mm；$W_{i,\text{maxafter}}$ 为降雨后 1 ~ 3 d 内第 i土层土壤储水量最大值，mm。

3 结果与分析

3.1 不同植被类型土壤储水量季节变化特征

如图 1 所示，2019—2020 年不同植被类型 0 ~ 100 cm 土壤储水量均表现出明显的季节变化特征，但不同植被类型之间的储水量水平和波动幅度存在显著差异。总体上，1—2 月土壤储水量处于相对稳定阶段，3—5 月随气温回升和降雨增多开始快速增加，6—11 月总体维持较高水平并随降雨过程呈波

表 2　不同植被类型覆盖下土壤粒径组成

Tab. 2　Soil particle size composition under different vegetation types

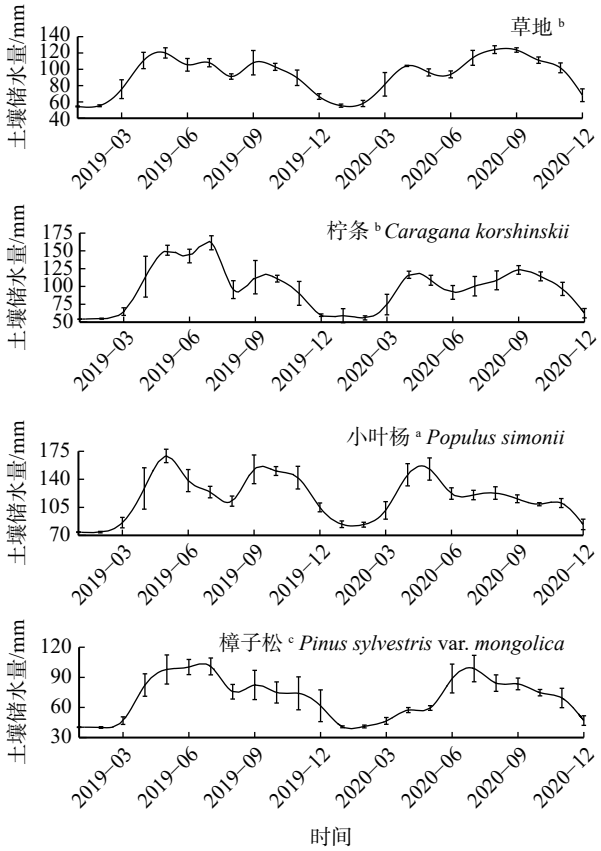
植被类型	土层深度/cm	容重/(g·cm^{-3})	总孔隙度/%	土壤粒径组成/%		
				黏粒(< 2 μm)	粉粒(2 ~ 50 μm)	砂粒(50 ~ 2 000 μm)
草地	0 ~ 20	1.62	34.11	1.64 ± 0.29	10.81 ± 0.70	87.55 ± 0.84
	20 ~ 40	1.72	26.51	2.28 ± 0.44	15.61 ± 0.74	82.11 ± 0.31
	40 ~ 60	1.74	27.69	1.28 ± 0.08	20.38 ± 0.56	78.34 ± 0.56
	60 ~ 80	1.63	32.41	1.76 ± 0.12	23.70 ± 0.48	74.54 ± 0.41
	80 ~ 100	1.59	30.11	1.81 ± 0.09	24.08 ± 1.09	74.11 ± 1.17
柠条 *Caragana korshinskii*	0 ~ 20	1.74	27.05	1.27 ± 0.08	25.80 ± 1.01	72.93 ± 0.95
	20 ~ 40	1.71	27.74	1.16 ± 0.18	23.33 ± 0.57	75.51 ± 0.73
	40 ~ 60	1.77	26.22	0.96 ± 0.11	18.49 ± 0.80	80.55 ± 0.82
	60 ~ 80	1.68	39.14	1.21 ± 0.11	23.18 ± 0.97	75.61 ± 1.07
	80 ~ 100	1.71	40.24	0.79 ± 0.07	17.91 ± 0.57	81.30 ± 0.63
小叶杨 *Populus simonii*	0 ~ 20	1.67	33.37	1.42 ± 0.08	20.22 ± 0.64	78.36 ± 0.71
	20 ~ 40	1.77	26.57	0.91 ± 0.11	15.83 ± 0.63	83.26 ± 0.52
	40 ~ 60	1.75	27.58	1.38 ± 0.09	22.71 ± 1.07	75.91 ± 1.03
	60 ~ 80	1.73	37.66	1.01 ± 0.07	14.17 ± 0.45	84.82 ± 0.39
	80 ~ 100	1.68	38.89	0.58 ± 0.11	11.57 ± 1.20	87.85 ± 1.09
樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	0 ~ 20	1.68	31.09	0.96 ± 0.42	16.03 ± 1.58	83.01 ± 1.81
	20 ~ 40	1.67	30.83	1.20 ± 0.52	16.49 ± 1.77	82.31 ± 1.47
	40 ~ 60	1.74	28.20	1.21 ± 0.47	17.43 ± 1.05	81.36 ± 0.59
	60 ~ 80	1.72	38.41	1.11 ± 0.05	16.52 ± 0.46	82.37 ± 0.51
	80 ~ 100	1.64	36.54	1.39 ± 0.10	18.82 ± 1.55	79.80 ± 1.65

注：表中最后3列数据为平均值 ± 标准差(n = 5)。

动变化，12 月明显下降。基于 2019—2020 年 24 个月月均土壤储水量的统计结果，不同植被类型 0 ~ 100 cm 土壤储水量差异显著(P < 0.05)。其中，小叶杨林平均土壤储水量最高，为 117.01 mm，显著高于草地、柠条和樟子松；柠条灌丛和草地分别为 96.79 和 92.55 mm，二者差异不显著(P > 0.05)；樟子松林最低，为 69.55 mm，显著低于其他 3 类植被。与樟子松相比，小叶杨、柠条和草地的平均土壤储水量分别提高了 68.25%、39.18% 和 33.08%。综合来看，不同植被类型具有相似的季节变化节律，但其土壤储水能力存在显著差异。

3.2　不同植被类型土壤储水量的空间分异特征

图 2 显示了草地、柠条、小叶杨和樟子松 4 种植被类型在 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 5 个土层的日均土壤储水量变化过程。在草地中，20 ~ 40 cm 层的储水量全年处于较高水平，在 4—10 月多次超过 30 mm，明显高于其他层；80 ~ 100 cm 层稳定维持在 20 ~ 25 mm 左右。0 ~ 20 cm 和 60 ~ 80 cm 层次处于中等水平，曲线相对平稳；40 ~ 60 cm 层为 5 层中储水量最低的 1 层，年内常低于 15 mm，变化幅度小。在柠条中，0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 层在 5—9 月阶段性升高明显，为全年储水量较高层次，最大可达 35 mm 左右，同时波动较大；80 ~ 100 cm 层在全年始终处于中高水平，基本保持在 25 ~ 30 mm。40 ~ 60 cm 和 60 ~ 80 cm 层则偏低，尤其是 40 ~ 60 cm，在年初至年末变化幅度不大，长期低于 15 mm。在小叶杨中，80 ~ 100 cm 层的储水量在全年持续维持最高水平，数值稳定在 30 ~ 40 mm 区间。60 ~ 80 cm 层次之，也表现出明显的高值特征，年中一度超过 30 mm。樟子松样地的 0 ~ 20 cm 土层储水量波动最为剧烈，自 4 月起该层迅速上升，在 6—9 月降雨集中期出现多次峰值，最大接近 30 mm；20 ~ 40 cm 土层，全年大部分时间维持在 10 ~ 15 mm 范围，5—10 月期间出现多次与降雨过程同步的上升波动，曲线趋势与表层较为一致，但振幅略低，响应略滞后。40 ~ 60 cm 土层在 5—7 月间出现小幅上升过程，但整体幅度小，且无明显波峰，全年变化较为平稳。60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 两个深层储水量水平略高于 40 ~ 60 cm 层，全年多处于 10 ~ 20 mm 范围内。



图中误差线表示平均值 ± 标准差；不同小写字母表示不同植被类型间差异显著（LSD，多重比较，$P < 0.05$）。

图 1 不同植被类型 0 ~ 100 cm 土壤月均储水量变化

Fig. 1 Changes in monthly mean soil water storage in 0−100 cm soil profile under different vegetation types

为进一步分析雨季不同植被类型各土层土壤储水量的波动特征，基于 2019 年 5 月 1 日至 10 月 31 日雨季日均土壤储水量数据，统计各土层土壤储水量的最小值、最大值、平均值和变异系数，并进行单因素方差分析，结果见表 3。不同植被类型土壤储水量在剖面上均存在明显空间异质性，且同一土层不同植被类型之间差异显著（$P < 0.05$）。从同一植被类型内看，草地土壤储水量在 20 ~ 40 cm 土层达到最大值（28.14 ± 5.09Aa），而 40 ~ 60 cm 最低（14.83 ± 2.15Ce），变异系数随深度增加总体减小。柠条剖面各层土壤储水量分布相对均匀，均值为 24.67 ~ 27.22 mm，80 ~ 100 cm 略高于其余土层，且各层变异系数均在 23% 以上，雨季柠条样地 0 ~ 100 cm 土层整体活跃。小叶杨 80 ~ 100 cm 土层平均储水量最高（36.18 ± 3.30Aa），显著高于其余土层，且该层变异系数最低，土壤储水量波动相对较小。樟子松则表现为浅层较高、中层偏低的分布格局，其中 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层储水量分别为 21.71 和 21.13 mm，而 40 ~ 60 cm 降至 10.38，为各植被类型中最低值，表明其剖面水分分布不均，浅层响应较快而中层储水能力较弱。从同一土层不同植被类型比较来看，0 ~ 20 cm 土层中柠条和小叶杨土壤储水量高于草地和樟子松；20 ~ 40 cm 土层则以草地最高，与其余植被差异显著；樟子松和草地分别在 40 ~ 60 cm 和 80 ~ 100 cm 土层处于最低水平。

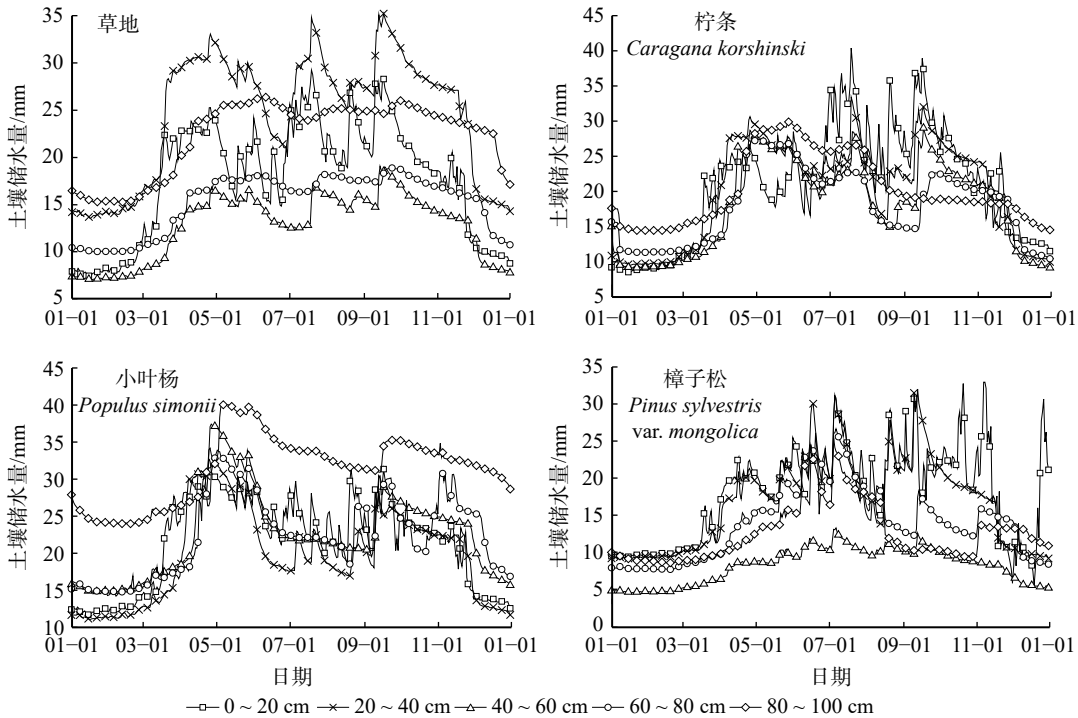


图 2 不同植被类型各土层日均土壤储水量变化

Fig. 2 Changes in daily mean soil water storage in different soil layers under varied vegetation types

表 3　2019 年雨季不同植被类型各土层土壤储水量特征

Tab. 3　Characteristics of soil water storage in different soil layers under different vegetation types during the rainy season of 2019

植被类型	土层深度/cm	土壤储水量/mm				层次
		最小值	最大值	平均值	变异系数/%	
草地	0 ~ 20	13.80	30.52	20.70 ± 4.66Bc	22.52%	活跃层
	20 ~ 40	20.02	37.87	28.14 ± 5.09 Aa	18.08%	次活跃层
	40 ~ 60	11.95	21.17	14.83 ± 2.15 Ce	14.51%	次活跃层
	60 ~ 80	15.16	19.40	17.43 ± 1.10 Dd	6.30%	相对稳定层
	80 ~ 100	22.64	27.98	24.88 ± 1.64Cb	6.60%	相对稳定层
柠条 *Caragana korshinskii*	0 ~ 20	12.22	43.99	25.31 ± 7.44Abc	29.39%	活跃层
	20 ~ 40	14.25	35.65	26.64 ± 6.23 Bab	23.39%	活跃层
	40 ~ 60	13.92	35.26	25.29 ± 5.98Bc	23.66%	活跃层
	60 ~ 80	14.45	32.87	24.67 ± 5.95 Bc	24.13%	活跃层
	80 ~ 100	18.72	36.64	27.22 ± 6.92Ba	25.44%	活跃层
小叶杨 *Populus simonii*	0 ~ 20	17.62	37.53	25.86 ± 4.76 Ac	18.40%	次活跃层
	20 ~ 40	16.49	39.29	24.48 ± 6.26 Cd	25.58%	活跃层
	40 ~ 60	20.11	40.80	27.99 ± 6.50 Ab	23.21%	活跃层
	60 ~ 80	15.77	40.20	26.66 ± 5.90 Ac	22.13%	活跃层
	80 ~ 100	30.93	42.46	36.18 ± 3.3 Aa	9.11%	相对稳定层
樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	0 ~ 20	5.43	61.91	21.71 ± 6.85Ba	31.56%	速变层
	20 ~ 40	12.92	36.26	21.13 ± 6.33 Da	29.94%	活跃层
	40 ~ 60	8.13	14.22	10.38 ± 1.38 Dd	13.31%	次活跃层
	60 ~ 80	13.38	27.32	19.96 ± 3.70Cb	18.53%	次活跃层
	80 ~ 100	13.01	18.52	15.47 ± 1.76 Dc	11.36%	次活跃层

注：不同小写字母表示土壤储水量在不同土层间差异显著，不同大写字母表示土壤储水量在不同植被间差异显著（$P < 0.05$）。

从变异系数的垂直变化来看，不同植被类型土壤储水量的波动强度随土层变化表现出明显差异。草地土壤储水量变异系数随土层加深总体降低，0 ~ 20 cm 土层变异系数为 22.52%，属于活跃层；20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 分别降至 18.08% 和 14.51%，为次活跃层；60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 进一步降至 6.30% 和 6.60%，表现为相对稳定层，说明草地土壤水分波动主要集中在 0 ~ 60 cm，深层储水量受降雨短期扰动较小。柠条各土层变异系数均较高，介于 23.39% ~ 29.39%，0 ~ 100 cm 剖面整体均表现为活跃层，表明柠条样地土壤储水量在整个剖面内均具有较强波动性，其水分变化不仅限于表层。小叶杨 20 ~ 80 cm 土层变异系数较高，分别为 25.58%、23.21% 和 22.13%，均属于活跃层，而 80 ~ 100 cm 土层变异系数仅为 9.11%，属于相对稳定层，说明小叶杨中层土壤水分交换较活跃，深层则具有较稳定的储水功能。樟子松 0 ~ 20 cm 土层变异系数最高，达到 31.56%，为速变层；20 ~ 40 cm 为 29.94%，属于活跃层；40 cm 以下土层变异系数明显降低，说明樟子松土壤储水量主要受浅层降雨入渗和蒸散过程驱动，中深层响应较弱。总体来看，草地和樟子松表现为“浅层高变异、深层低变异”的垂直变化特征，柠条表现为全剖面活跃，小叶杨则表现为中层活跃、深层稳定的储水格局。

3.3　雨季土壤储水量动态特征及植被差异

在雨季土壤储水量分析中，依据植被的根系垂向分布特征，将 0 ~ 100 cm 剖面划分为 0 ~ 60 cm 和 60 ~ 100 cm 2 个土层。7、8 月份为坝上高原全年降雨集中时期，7、8 两月降雨量占全年降雨量的 62.71%。同时 7—9 月也是植物生长旺季，植被生长需要大量的水分[19]，因此，研究区的土壤储水量观测期设为 5—10 月，观测期的降雨量与草地、柠条、小叶杨和樟子松各土层的土壤储水量的变化如图 3 所示。

已有研究[20]表明，樟子松根系数量和直径随深度显著降低，约 75% 的根数集中于 0 ~ 40 cm 土层，且根系总体呈浅层聚集分布，主根通常在 1.5 ~ 2.0 m。小叶杨虽可形成向下延伸至约 2 m 的深根系，但多

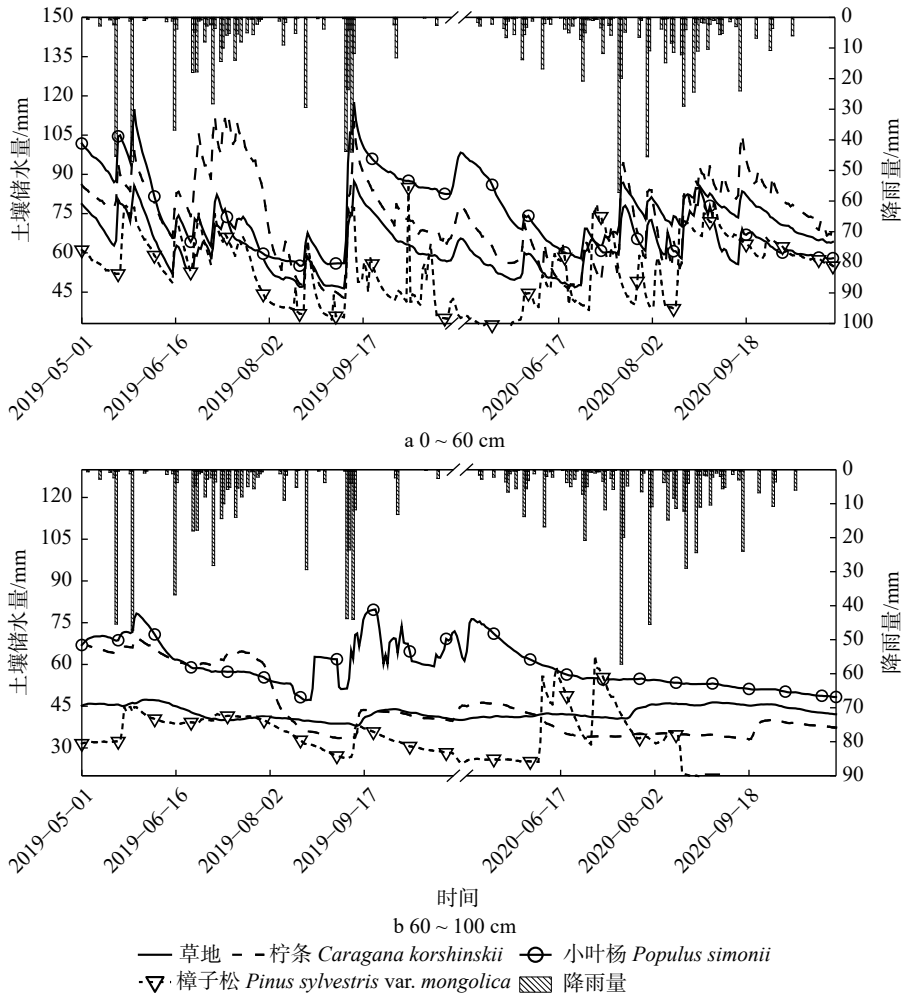


图 3 雨季降雨量与日均土壤储水量变化

Fig. 3 Changes in rainfall and daily mean soil water storage during the rainy season

项研究[21–23]结果表明，其大量细根及水平根主要集中在 0 ~ 60 cm 土层，根数随深度增加迅速减少。草地和灌丛群落中，大部分草本根系集中在 0 ~ 30 cm，而柠条灌木 0 ~ 60 cm 范围内分布了大部分根量[24–25]。因此，本研究将 0 ~ 60 cm 作为不同植被根系活动最集中的浅储水层，可敏感反映降雨和蒸散过程；将 60 ~ 100 cm 视为根系稀疏、变化相对缓慢的深储水层，以此来刻画不同植被类型在浅、深层土壤储水利用策略上的差异。

图 3 展示了 2019 年与 2020 年雨季期间，4 种植被类型在浅层土壤的日均储水量变化及其与同期降雨过程的关系。2019 年 5—9 月为降雨集中期，各植被类型储水量整体升高，储水量峰值通常滞后于连续降雨过程 1 ~ 3 d。10 月后，降雨频次减少，各类植被储水量均出现明显下降。2020 年雨季呈现降雨频率高但单次量小的特征，导致储水量波动频繁但峰值不高，整体水平略低于 2019 年。图 3a 所示，土壤浅层储水量对降雨事件表现出快速响应特征，但不同植被类型的响应强度、波动幅度及回落速度存在明显差异。

在不同植被类型间，柠条灌丛和小叶杨林在雨季储水量均值最高，表现出对降雨有较强的蓄水能力。柠条灌丛在多数降雨事件后迅速形成储水峰，随后虽有回落但维持时间较长，表明其在表层具备一定的水分保持能力。小叶杨储水量波动相对稳定，回落速率缓慢，体现出良好的缓释调节能力。草地储水量在雨后快速上升，也快速回落，对降雨的响应迅速但水分保持能力较差。樟子松在雨季初期储水量上升缓慢，但在持续降雨下维持中等水平，整体变幅较小，表现出对深层储水量的调节特征，其表层响应相对较弱。不同植被类型对雨后水分的保持能力有所差异，草地最为短暂，小叶杨和柠条保水能力最强。

图 3b 显示雨季期间 4 类典型植被 60 ~ 100 cm 深层日均土壤储水量变化与同期降雨过程的关系。土壤深层储水量对降雨的响应滞后于表层，变化幅度相对较小，但在强降雨频发阶段仍表现出一定的累积效应。在 2 年的时间序列中，深层土壤储水量

均呈现出相对平稳的变化趋势，缺乏表层土壤对降雨的短周期剧烈波动。在雨季，小叶杨与樟子松的储水量明显上升，前者峰值超过 70 mm，后者稳定在 50 mm 左右，表明在长时间连续降雨条件下，2 类乔木植被可实现对深层水分的有效补给与保持。相比之下，柠条灌丛和草地在同期储水量明显较低，且对个别降雨事件的响应幅度不明显。2020 年雨季降雨频率虽高，但降雨强度偏弱，导致各植被深层储水量整体偏低，补给过程受限，水分主要维持在前期储备基础上缓慢波动。此阶段，樟子松仍维持一定深层储水水平，小叶杨略有下降但仍高于灌丛与草地，说明乔木样地深层储水变化相对平缓，但其补给能力仍受降雨强度和前期土壤水分条件限制。小叶杨在 2 年中均表现出最高的深层储水能力，尤其在 2019 年对土壤深层储水量补给明显。樟子松在 2020 年雨季仍维持一定深层储水水平，但其对日降雨量的直接响应较弱。

分别对 0 ~ 60 cm 和 60 ~ 100 cm 土层土壤储水量日变化量与日降雨量进行了 Pearson 相关分析（表 4）。结果表明，不同植被类型土壤储水量对降雨的响应具有明显的土层差异。0 ~ 60 cm 土层土壤储水量变化量与降雨量的相关性整体较强，其中，草地相关系数最高，为 0.68，小叶杨次之，为 0.64，柠条为 0.56，说明草地、小叶杨和柠条浅层土壤储水量变化受降雨过程驱动较明显；樟子松相关系数仅为 0.11，表明其 0 ~ 60 cm 土层储水量变化与日降雨量之间的同步关系较弱。相比之下，60 ~ 100 cm 土层土壤储水量变化量与降雨量的相关系数整体较低，草地、柠条、小叶杨和樟子松分别为−0.058、0.15、0.24 和 0.058，说明深层土壤储水量对日降雨量的直接响应较弱。总体来看，降雨对 0 ~ 60 cm 浅层土壤储水量的影响更为直接，而 60 ~ 100 cm 深层土壤储水量变化更多表现为弱响应和滞后性特征。

3.4　不同降雨事件下土壤储水量的响应特征

为揭示不同植被类型下土壤储水量对单独降雨事件的响应差异，基于 2019—2020 年降雨监测数据，选取降雨前后无明显干扰的典型单场降雨事件进行分析。依据降雨量等级，选取 2019 年 7 月 16 日发生的 1 次中雨事件（13.2 mm）和 2019 年 8 月 20 日发生的 1 次大雨事件（29.4 mm），对草地、柠条、小叶杨和樟子松 0 ~ 100 cm 土层土壤储水量的响应过程进行对比分析。图 4 展示了 2019 年 7 月 16 日中雨事件（降雨量 13.2 mm）前后，草地、柠条、小叶杨和樟子松四类植被在 0 ~ 100 cm 土壤剖面 5 个分层中的土壤储水量变化过程，旨在反映不同植被类型对中等强度降雨的响应能力与特征。在草地中，0 ~ 20 cm 层储水量在降雨后明显上升，从 7 月 16 日的约 25 mm 增加至 7 月 17 日的近 29 mm，随后开始略有下降。40 ~ 60 cm 以下土层波动微弱，数值基本稳定，中雨未有效渗透至土壤深层。柠条的 0 ~ 20 cm 层储水量在 7 月 16 日至 17 日由 38 mm 增至 44 mm，变化幅度较大；20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 层也均出现小幅升高；60 ~ 100 cm 层基本无变化，曲线平稳。整体看，柠条对中雨事件的表层响应迅速且强烈，同时具备一定的浅层渗透补给能力。在小叶杨样地中，中雨事件后各土层储水量变化较小，0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层未表现出明显增加，说明 13.2 mm 中雨未对小叶杨样地 0 ~ 100 cm 土层形成有效补给。特别是 60 ~ 100 cm 层的储水量在整个期间维持在约 35 mm 无明显波动。该类型在中雨事件中的储水结构整体稳定，变化幅度最小。樟子松样地 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层在降雨后均有短暂提升，其中 0 ~ 20 cm 增量为 3.30 mm，40 cm 以下各层变化较小。总体来看，樟子松样地土壤储水量对中雨事件的响应主要局限于浅层，响应幅度小于草地和柠条，但大于小叶杨。

图 5 展示了 2019 年 8 月 20 日大雨事件发生前后（8 月 17 日至 8 月 23 日）不同植被类型 0 ~ 100 cm 土壤剖面各层储水量的变化过程。总体来看，大雨事件显著增强了 0 ~ 20 cm 浅层土壤储水响应，但不同植被类型的响应深度和增量存在差异（表 5）。草地响应主要集中在 0 ~ 20 cm 土层，该层储水量在降雨后由约 14 mm 增至 25.5 mm，增量为 11.42 mm；20 cm 以下土层变化较小，说明草地对大雨的响应仍以浅层补给为主。柠条样地同样表现出明显的表层响应，0 ~ 20 cm 土层储水量由约 17 mm 升至 32 mm，增量为 14.52 mm，而 20 cm 以下各土层增量均较小，表明其储水响应主要集中于表层。小叶杨样地除

表 4　雨季降雨量与不同土层土壤储水量变化量的 Pearson 相关系数

Tab. 4　Pearson correlation coefficients between rainfall and changes in soil water storage in different soil layers during the rainy season

土层	草地	柠条 *Caragana korshinskii*	小叶杨 *Populus simonii*	樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*
0 ~ 60 cm	0.68	0.56	0.64	0.11
60 ~ 100 cm	−0.058	0.15	0.24	0.058

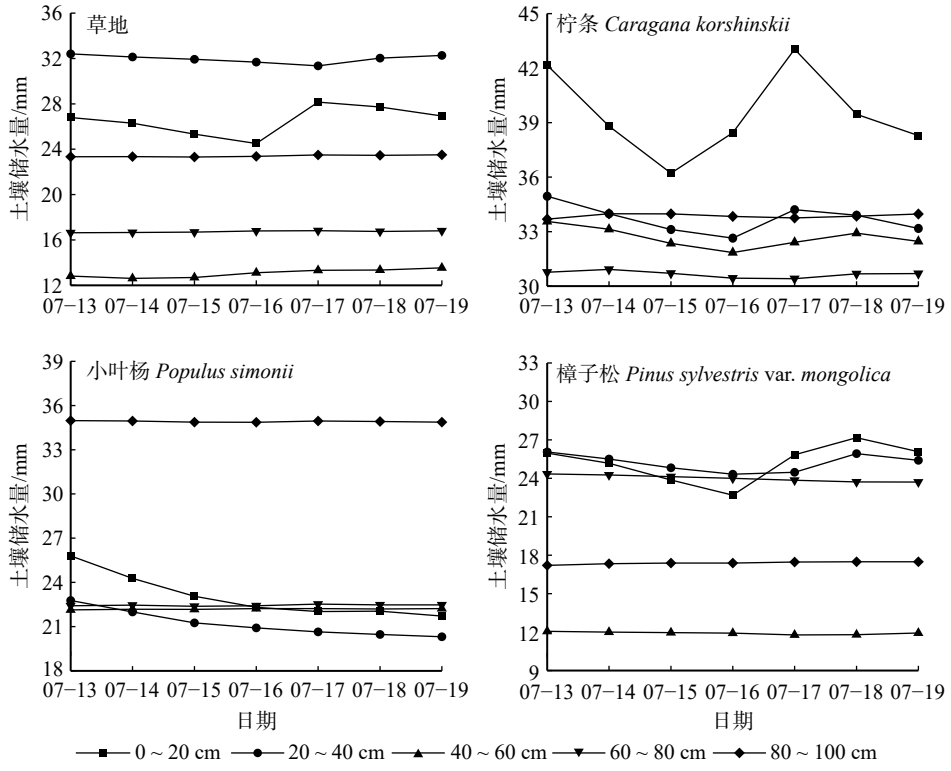


图 4 不同植被类型土壤储水量对中雨事件的响应特征

Fig. 4 Response characteristics of soil water storage to a moderate rainfall event under different vegetation types

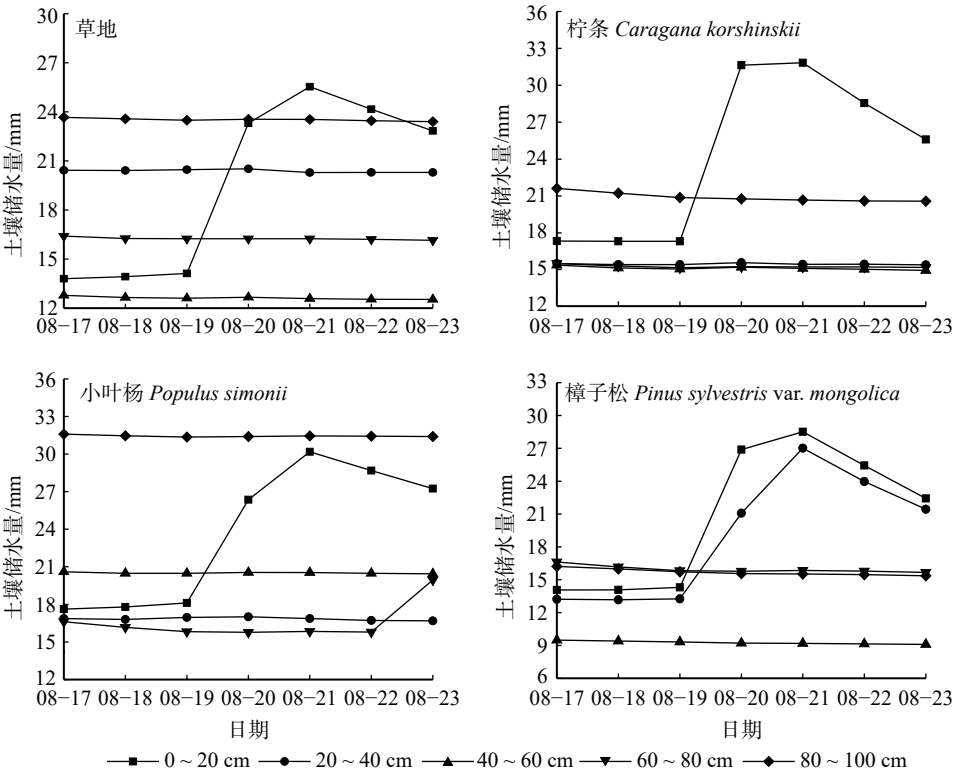


图 5 不同植被类型土壤储水量对大雨事件的响应特征

Fig. 5 Response characteristics of soil water storage to a heavy rainfall event under different vegetation types

0 ~ 20 cm 土层储水量明显增加外，60 ~ 80 cm 土层在雨后出现滞后上升，增量达到 4.13 mm，说明较强降雨条件下水分不仅补给浅层，也可向中深层传输并形成一定滞后补给。樟子松样地 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层响应最为明显，储水量分别由约 14 mm 和 13 mm 升至 28.5 mm 和 22.5 mm，增量分别为 14.22 mm 和 13.76 mm，表明其对大雨的响应深度可扩展至 40 cm；40 cm 以下土层变化较小。总体而言，

表 5　不同降雨事件下不同植被类型各土层土壤储水量增量

Tab. 5　Increment of soil water storage in different soil layers of varied vegetation types under different rainfall events

降雨事件	植被类型	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm	合计
中雨，13.2 mm	草地	2.82	0.34	0.85	0.12	0.19	4.33
	柠条 *Caragana korshinskii*	6.83	1.09	0.56	−0.02	−0.01	8.44
	小叶杨 *Populus simonii*	−1.01	−0.61	0.06	0.15	0.07	−1.34
	樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	3.30	1.11	−0.03	−0.27	0.09	4.20
大雨，29.4 mm	草地	11.42	−0.16	−0.02	0.00	0.05	11.28
	柠条 *Caragana korshinskii*	14.52	0.03	0.05	0.07	−0.21	14.46
	小叶杨 *Populus simonii*	12.07	−0.09	0.06	4.13	0.09	16.25
	樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	14.22	13.76	−0.13	0.02	−0.20	27.68

29.4 mm 大雨事件显著提高了各植被类型浅层土壤储水量，其中草地和柠条主要表现为 0 ~ 20 cm 表层响应，小叶杨表现出一定中深层滞后补给特征，樟子松则表现为 0 ~ 40 cm 土层同步响应。

中雨事件下，不同植被类型土壤储水量增量主要集中在 0 ~ 20 cm 土层，其中柠条 0 ~ 20 cm 土层增量最大，为 6.83 mm，樟子松和草地分别为 3.30 mm 和 2.82 mm；小叶杨 0 ~ 20 cm 土层未表现出明显增加，增量为−1.01 mm。20 ~ 40 cm 土层中，柠条和樟子松分别增加 1.09 mm 和 1.11 mm，草地仅增加 0.34 mm，而 40 cm 以下土层增量普遍较小，说明 13.2 mm 中雨主要影响浅层土壤，难以形成稳定的深层补给。

大雨事件下，各植被类型 0 ~ 20 cm 土层储水量增量明显提高，草地、柠条、小叶杨和樟子松分别增加 11.42、14.52、12.07 和 14.22 mm，表明 29.4 mm 降雨能够显著提高浅层土壤储水量。不同植被类型的响应深度存在差异：草地和柠条的增量仍主要集中在 0 ~ 20 cm，20 cm 以下土层变化较小；小叶杨除 0 ~ 20 cm 明显增加外，60 ~ 80 cm 土层增量达到 4.13 mm，说明大雨后水分具有向中深层传输并形成滞后补给的特征；樟子松 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层分别增加 14.22 mm 和 13.76 mm，表明其对大雨的响应深度可扩展至 40 cm。从降雨等级看，中雨事件下土壤储水量增量主要集中于 0 ~ 20 cm 土层；大雨事件不仅显著提高浅层土壤储水量增量，也使部分植被类型的响应深度扩展至 20 ~ 40 cm 甚至 60 ~ 80 cm。这表明降雨量级和事件过程是决定土壤水分入渗深度和储水响应强度的重要因素。已有研究也指出，土壤水分对降雨的响应不仅受降雨量控制，还受降雨强度、持续时间、前期土壤含水量和植物群落特征共同影响[26]。

4　讨　　论

4.1　不同植被类型下土壤储水过程的形成机制

不同植被类型下土壤储水过程的差异实质上受到植被结构、根系配置和土壤物理性质的共同控制。从表 1、2 可以看出，4 类植被在盖度、冠层高度、林龄、根系主要分布层，以及土壤粒径组成、容重和孔隙状况等方面均存在明显差异。这些差异会影响降雨到达地表后的截留、入渗、再分配和消耗过程，进而决定水分在土壤剖面中的停留层位、保持时间和储水稳定性。因此，不同植被类型虽然均受降雨输入驱动，但其储水形成和维持机制并不相同。

从植被结构看，草地植被盖度为 48.65% ~ 57.67%，冠层高度仅为 0.13 ~ 0.35 m，植被低矮，降雨穿透阻力小，雨水能够较快进入表层土壤；但草地根系主要集中在浅层，且地表蒸发作用较强，雨后新增水分容易被蒸发和浅层根系吸收消耗，因而表现出浅层快速响应和储水量波动较大的特征[27]。柠条盖度为 65.87% ~ 78.54%，是 4 类植被中盖度最高的类型，较高盖度增强了灌丛对降雨的截留和地表覆盖作用，有利于降低地表蒸发并促进浅层水分滞留；但较高盖度也意味着较强的群落耗水需求，降雨补给后水分仍容易被浅中层根系利用，从而限制其向深层持续补给[28−30]。小叶杨树高和胸径均较大，林分结构相对发育，有利于形成较稳定的林下微环境，并为剖面水分调蓄提供较好的植被结构条件。樟子松属于常绿针叶林，其冠层截留、枯落物层调蓄和生长季蒸散耗水过程可能削弱降雨向土壤剖面的直接补给；同时，樟子松根系具有浅层聚集特征，使其储水响应更多集中在浅层，中深层储水量提升受限。

已有研究[31−32]也表明，坝上高原不同植被类型下土壤水分对降雨的响应速度和补给过程存在明显差异，林分结构会进一步影响土壤持水和水源涵养功能。

从土壤物理性质看，4 类植被样地土壤均以砂粒为主，砂粒含量总体为 72.93% ~ 87.85%，黏粒含量较低，整体表现出明显砂质化特征。砂粒含量较高通常有利于降雨快速入渗，但细粒组分偏低会削弱土壤对水分的吸附和保持能力，因此土壤粒径组成、容重和孔隙状况是造成不同植被类型储水差异的重要基础。草地 0 ~ 60 cm 土层砂粒含量平均为 82.67%，其中 0 ~ 20 cm 土层砂粒含量达到 87.55%，说明浅层土体质地较粗，有利于降雨快速入渗；但随着土层加深，草地 60 ~ 100 cm 土层粉粒含量升高至 23.89%，砂粒含量降至 74.32%，可能有利于深层水分相对稳定保持，这与草地 60 ~ 100 cm 土层变异系数较低的结果相吻合[8−9]。柠条 0 ~ 40 cm 土层粉粒含量较高，分别为 25.80% 和 23.33%，且 0 ~ 60 cm 土层平均容重为 1.74 g/cm^3、平均总孔隙度为 27.00%，土体相对紧实，使降雨后水分更容易在浅层根区停留和积聚；同时，柠条在土壤干旱条件下具有较明显的保守型耗水特征，这与其浅层响应突出、深层补给有限的储水格局相一致[33]。小叶杨 60 ~ 100 cm 土层总孔隙度较高，平均为 38.28%，明显高于其 0 ~ 60 cm 土层，同时 60 ~ 100 cm 砂粒含量平均为 86.34%，说明其深层土体具有较大的孔隙空间和较强的水分传输条件，在较强降雨或连续降雨条件下更容易形成深层储水积累，这也是其 80 ~ 100 cm 土层储水量较高且波动较小的重要原因。樟子松 0 ~ 100 cm 土层砂粒含量为 79.80% ~ 83.01%，剖面质地整体偏砂且相对均一，但粉粒含量仅为 16.03% ~ 18.82%，黏粒含量为 0.96% ~ 1.39%，细粒组分整体偏低，土壤对水分的吸附和保持能力相对有限；叠加常绿针叶林冠层截留、枯落物层调蓄和浅层根系耗水作用，其 0 ~ 100 cm 土壤储水量偏低，中深层补给和持留能力相对不足。

4.2 不同降雨尺度下土壤储水量的响应机制

降雨尺度对土壤储水量的影响，并不只取决于单次雨量大小，而是由降雨量级、持续时间、事件组合方式以及前期土壤水分状况共同决定[34−36]。结合图 4、5 可以看出，中雨条件下，4 类植被的储水增量主要集中在 0 ~ 20 cm，部分样地可扩展至 20 ~ 40 cm，而 60 ~ 100 cm 深层基本无明显响应；大雨及雨季连续降雨条件下，入渗影响范围才开始向中深层扩展，并在小叶杨和樟子松样地中表现出一定的滞后补给。这说明当降雨输入不足以弥补表层土壤储水亏缺并突破蒸发和根系吸水消耗时，响应主要停留在浅层；只有当降雨输入达到一定强度或形成连续累积后，才可能进入深层储水层。

中雨及以下降雨条件下，土壤储水响应主要表现为浅层对降雨的快速接收和快速消耗。草地和柠条在中雨事件中响应较明显，表明浅层根区是其主要受水层，但二者的形成机制并不完全相同。草地表层和中层砂粒比例较高，0 ~ 60 cm 平均砂粒含量超过 80%，有利于降雨快速进入表层土体，但由于浅层根系密集、地表蒸发强，新增水分难以长期滞留，因此表现为波动型过程。大雨条件下，植被类型间土壤储水过程差异被进一步放大。小叶杨在大雨后 60 ~ 80 cm 土层出现滞后上升，说明其剖面内已经发生由表层向深层的水分传递。小叶杨 60 ~ 100 cm 土层总孔隙度分别为 37.66% 和 38.89%，明显高于草地同期水平，说明其深层土体具有较好的蓄水能力。樟子松在大雨事件中 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 同步升高，表明其对较强降雨同样具有较高响应能力，但樟子松 0 ~ 100 cm 土层砂粒含量为 79.80% ~ 83.01%，剖面质地整体偏砂且细粒组分较低，叠加常绿针叶林冠层截留、枯落物层调蓄和林地蒸散耗水作用，使其深层储水量对日降雨量的直接响应较弱。因此，较强降雨并不一定能够直接转化为樟子松样地的深层有效储水，是否形成稳定补给还取决于前期土壤水分状况、降雨连续性和土壤蓄持条件。

此外，降雨时序和前期土壤水分状况进一步调节了土壤储水响应过程。坝上高原属于典型半干旱区，降雨总量有限且年内分配集中，蒸发需求强，雨前土壤常存在不同程度的水分亏缺。在前期土壤较干的条件下，降雨进入土体后首先用于补偿表层土壤储水亏缺，并受到地表蒸发和浅层根系吸水消耗的共同影响，因此中雨事件通常只能引起 0 ~ 20 cm 土层储水量明显增加，难以推动水分持续向深层传输。当前期土壤含水量较高，或连续降雨使表层土壤储水亏缺得到部分填补后，后续降雨更容易突破浅层耗水屏障，形成向 20 ~ 40 cm 甚至 60 ~ 100 cm 土层的下移补给[37−39]。半干旱区已有研究也表明，前期土壤水分状况会影响入渗和径流分配，深层响应通常滞后于表层，并更依赖较大的单次降雨或连续降雨累积[38−40]。因此，坝上半干旱区土壤储水量对降雨的响应，本质上是降雨量级、前期土壤水分亏缺、植被结构、根系耗水和土壤蓄持能力共同作用的结果。

Pearson 相关分析结果进一步表明，降雨对土壤储水量的影响具有明显的垂向差异。0 ~ 60 cm 土层中，草地、小叶杨和柠条土壤储水量变化量与降雨量的相关系数分别为 0.68、0.64 和 0.56，说明浅层土壤

储水量对降雨输入具有较强响应。草地相关性最高,主要与其冠层截留弱、浅层土壤直接接受降雨补给有关;小叶杨相关性较高,说明降雨后水分能够在其 0 ~ 60 cm 根系活动层形成较明显储水变化;柠条相关性略低于草地和小叶杨,可能受灌丛冠层截留、浅层根系吸水和土壤持水条件共同影响。樟子松 0 ~ 60 cm 土层相关系数仅为 0.11,说明其浅层储水量变化与日降雨量同步性较弱,可能与冠层截留、枯落物层调蓄、林地蒸散和前期土壤水分状态有关。60 ~ 100 cm 土层中,各植被类型相关系数均较低,表明深层土壤储水量并不主要受单日降雨直接控制,而更依赖较大降雨、连续降雨后的水分下移以及前期土壤水分条件。

5　结　　论

(1)坝上高原不同植被类型 0 ~ 100 cm 土壤储水量均具有明显的季节变化特征,总体表现为年初相对稳定、春季回升、雨季高值波动、年末下降。不同植被类型在剖面分布上差异明显,草地储水高值主要集中于 20 ~ 40 cm 土层,柠条剖面分布相对均匀,小叶杨在 80 ~ 100 cm 土层具有明显优势,樟子松表现为浅层较高、中层偏低的垂向格局。

(2)土壤储水量对降雨的响应具有层次性与尺度依赖性。中雨条件下,响应主要集中于 0 ~ 20 cm 浅层土壤,部分可扩展至 20 ~ 40 cm;大雨及连续降雨条件下,水分影响范围才可能进一步向中深层扩展。60 ~ 100 cm 深层土壤对单次降雨事件响应有限,但在较强或持续降雨条件下可形成累积补给。

(3)不同植被类型在储水方式和水分调节能力上存在明显差异。草地和柠条表现为浅层快速响应,小叶杨表现出较强的剖面储水和深层调蓄能力,樟子松则整体波动较缓但深层持留能力受限。不同植被类型土壤储水差异的形成,是群落结构、林龄、盖度、根系利用层次、土壤粒径组成、孔隙状况和前期土壤水分条件共同作用的结果。

(4)从区域植被适应与优化配置角度看,坝上高原半干旱区植被恢复不宜单纯追求高覆盖度或单一乔木化配置,而应根据不同植被类型的储水层位和水分调节能力进行结构优化。草地和柠条可在浅层水分保持和快速利用方面发挥作用,小叶杨具有较强的剖面储水和深层调蓄潜力,但仍需关注林龄增长和密度增加带来的耗水风险;樟子松在配置中应控制密度并避免在水分补给不足区域大面积单一营建。未来坝上高原植被恢复与防护林优化应综合考虑降雨补给能力、前期土壤水分背景、土壤蓄持条件和植被耗水特征,以实现植被稳定性和土壤水分承载能力的协调。

参　考　文　献

[1] Fu X, Lyu H, Yu Z, et al. Effects of soil hydraulic properties on soil moisture estimation [J]. Journal of Meteorological Research, 2023, 37(1): 58−74.

[2] Wang C, Fu B, Zhang L, et al. Soil moisture–plant interactions: an ecohydrological review [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 1−9.

[3] 王正宁, 王新平, 刘博. 荒漠灌丛内降雨和土壤水分再分配 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 755−760.
Wang Z N, Wang X P, Liu B. Rainfall and soil moisture redistribution induced by xerophytic shrubs in an arid desert ecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 755−760.

[4] 梁潇瑜. 河北坝上地区退化小叶杨土壤水分时空分布及其影响因素 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
Liang X Y. Spatiotemporal distribution and influencing factors of soil water content in degraded *Populus simonii* Carr. in the Bashang Area, Hebei Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[5] 武娟娟, 邱云霄, 王渝淞, 等. 坝上地区不同退化程度小叶杨细根分布特征 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 242−248.
Wu J J, Qiu Y X, Wang Y S, et al. Fine roots distribution characteristics of *Populus simonii* with different degradation degrees in Bashang Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 242−248.

[6] Li W, Zhang Y, Wang N, et al. Nocturnal water use partitioning and its environmental and stomatal control mechanism in *Caragana korshinskii* Kom. in a semi-arid region of northern China [J]. Forests, 2023, 14(11): 2154.

[7] 柳金昊, 信忠保, 沈晗悦, 等. 河北坝上地区不同植被类型土壤持水性能研究 [J]. 土壤, 2021, 53(4): 833−840.
Liu J H, Xin Z B, Shen H Y, et al. Water holding capacities under different vegetation types in Bashang Area of Hebei Province [J]. Soils, 2021, 53(4): 833−840.

[8] 党毅, 王维, 张永娥, 等. 坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(5): 106−118.
Dang Y, Wang W, Zhang Y E, et al. Dynamic response of soil moisture content to rainfall under different vegetation cover types on the Bashang Plateau, northwestern Hebei Province of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(5): 106−118.

[9] 张益, 王渝淞, 武昱鑫, 等. 坝上地区人工林和草地生长季土壤水势动态 [J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 181−189.
Zhang Y, Wang Y S, Wu Y X, et al. Dynamics of soil water potential in growing season of plantation and grassland in Bashang Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 181−189.

[10] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 河北坝上樟子松人工林径向生长及其对气候因素的响应 [J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1830−1840.
Liu Y L, Xin Z B, Li Z S, et al. Response of radial growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate factors in Bashang Area of Hebei Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1830−1840.

[11] Zhou T, Han C, Qiao L, et al. Seasonal dynamics of soil water content in the typical vegetation and its response to precipitation in a semi-arid area of Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(10): 1015−1025.

[12] Zhao C, Jia X, Zhu Y, et al. Long-term temporal variations of soil water content under different vegetation types in the Loess Plateau, China [J]. CATENA, 2017, 158: 55−62.

[13] 沈晗悦, 信忠保, 王志杰. 北京山区侧柏林坡面土壤水分时空动态及其影响因素 [J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2676−2686.
Shen H Y, Xin Z B, Wang Z J. Spatial and temporal dynamics of soil moisture and its influencing factors on the slope of *Platycladus orientalis* in Beijing mountain area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2676−2686.

[14] 刘佩伶, 陈乐, 刘效东, 等. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤水分时空变异研究 [J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1798−1807.
Liu P L, Chen L, Liu X D, et al. Temporal and spatial variability of soil moisture in a forest succession series in Dinghushan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1798−1807.

[15] 张磊, 张晓煜, 卫建国, 等. 宁南山区不同种植体系土壤水分变化规律 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 104−108.
Zhang L, Zhang X Y, Wei J G, et al. Soil moisture distribution in different cultivating systems in mountainous area of south Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S1): 104−108.

[16] 王坤悦, 李旭红, 余新晓, 等. 北京山区典型植被土壤水分对次降雨的响应 [J]. 生态学报, 2024, 44(6): 2561−2571.
Wang K Y, Li X H, Yu X X, et al. Response of soil moisture of typical vegetation to individual rainfall in Beijing mountain area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2561−2571.

[17] 白盛元. 黄土土柱降雨特征与土壤水分入渗过程研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Bai S Y. Study on rainfall characteristics and soil moisture infiltration process in loess soil column[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

[18] Liu J, Chen W, Fang W, et al. Sub-shrub components change the soil water storage response to daily precipitation and air temperature in the Loess Plateau [J]. Water, 2023, 15(23): 4157.

[19] 费洪岩, 童倩, 万传宇, 等. 黄土高原不同林龄刺槐林土壤水分亏缺程度 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 240−246.
Fei H Y, Tong Q, Wan C Y, et al. Degree of soil moisture deficit of *Robinia pseudoacacia* plantations at different ages on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 240−246.

[20] 孔涛, 吴丹, 沈海鸥, 等. 沙地樟子松人工林根系及土壤养分分布特征 [J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 84−93.
Kong T, Wu D, Shen H O, et al. Distribution characteristics of root system and soil nutrients under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy soil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(4): 84−93.

[21] 刘鑫, 满秀玲. 毛乌素沙地梁地上小叶杨根系分布特征 [J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 48−53.
Liu X, Man X L. Distribution patterns of root systems of *Populus simonii* Carr. in highland of Mu Us Sandland [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(4): 48−53.

[22] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 37−49.
Xi B Y. Morphology, distribution, dynamic characteristics of poplar roots and its water uptake habits [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 37−49.

[23] 高岩, 党晓宏, 汪季, 等. 采煤沉陷区不同裂缝处小叶杨根系损伤特性 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 34−41.
Gao Y, Dang X H, Wang J, et al. Damage characteristics of *Populus simonii* root systems at different cracks in mining subsidence area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 34−41.

[24] 李鹏, 李占斌, 澹台湛. 黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 849−853.
Li P, Li Z B, Tantai Z. Dynamic distribution characteristics of herbaceous vegetation root systems in abandoned grasslands of Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(5): 849−853.

[25] 王甜, 徐姗, 赵梦颖, 等. 内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(11): 1168−1176.
Wang T, Xu S, Zhao M Y, et al. Allocation of mass and stability of soil aggregate in different types of Nei Mongol grasslands [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(11): 1168−1176.

[26] Zhu P, Zhang G, Wang H, et al. Soil moisture variations in response to precipitation properties and plant communities on steep gully slope on the Loess Plateau [J]. Agricultural Water Management, 2021, 256: 107086.

[27] 刘见波, 高光耀, 傅伯杰. 黄土区草地不同组分与土壤侵蚀关系及其对降雨情景的响应 [J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1496−1505.
Liu J B, Gao G Y, Fu B J. Relationship between grassland components and soil erosion and its responses to rainfall scenarios in the loess region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1496−1505.

[28] 龚世豪, 查同刚, 张晓霞, 等. 晋西黄土区典型林分凋落物−土壤养分对降雨再分配变化的响应 [J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7748−7759.
Gong S H, Zha T G, Zhang X X, et al. Responses of litter-soil nutrients to rainfall redistribution in typical stand on loess area of

western Shanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7748−7759.

[29] 韩青池, 裴志永, 孙小添, 等. 库布其沙漠人工沙柳灌丛降雨再分配特征及其抚育时间的影响 [J]. 生态学报, 2024, 44(19): 8661−8674.
Han Q C, Pei Z Y, Sun X T, et al. Rainfall redistribution characteristics in artificial *Salix psammophila* shrub plantations in the Kubuqi Desert and the impact of different management durations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8661−8674.

[30] 赵文玥, 吉喜斌, 金博文, 等. 西北干旱区泡泡刺灌丛的降雨再分配特征及影响因素分析 [J]. 生态学报, 2022, 42(2): 804−817.
Zhao W Y, Ji X B, Jin B W, et al. Rainfall partitioning patterns of the desert shrub *Nitraria sphaerocarpa* and its influencing factors in drylands of northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 804−817.

[31] 崔悦, 闫冰, 李治学, 等. 坝上地区典型防护林水源涵养功能对林分结构的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9): 77−86.
Cui Y, Yan B, Li Z X, et al. Response of water conservation function of typical protective forests in Bashang Area of northern China to stand structure [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9): 77−86.

[32] 赵荣玮, 张建军, 李玉婷, 等. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 178−183.
Zhao R W, Zhang J J, Li Y T, et al. Soil moisture characteristics and its response to rainfall in artificial forests in loess region of western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 178−183.

[33] Zhang Y, Li W, Yan H, et al. Canopy transpiration and stomatal conductance dynamics of *Ulmus pumila* L. and *Caragana korshinskii* Kom. plantations on the Bashang Plateau, China [J]. Forests, 2022, 13(7): 1081.

[34] Wang S, Fu B, Gao G, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China [J]. CATENA, 2013, 101: 122−128.

[35] Cheng R R, Chen Q W, Zhang J G, et al. Soil moisture variations in response to precipitation in different vegetation types: a multi-year study in the loess hilly region in China [J]. Ecohydrology, 2020, 13(3): e2196.

[36] Dai L, Fu R, Guo X, et al. Soil moisture variations in response to precipitation across different vegetation types on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 854152.

[37] Hou G, Bi H, Wei X, et al. Response of soil moisture to single-rainfall events under three vegetation types in the gully region of the Loess Plateau [J]. Sustainability, 2018, 10(10): 3793.

[38] Schoener G, Stone M C. Impact of antecedent soil moisture on runoff from a semiarid catchment [J]. Journal of Hydrology, 2019, 569: 627−636.

[39] Singh N K, Emanuel R E, McGlynn B L, et al. Soil moisture responses to rainfall: implications for runoff generation [J]. Water Resources Research, 2021, 57(9): e2020WR028827.

[40] Rossi M J, Ares J O, Jobbágy E G, et al. Vegetation and terrain drivers of infiltration depth along a semiarid hillslope [J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 1399−1408.

（责任编辑　李　契
责任编委　张会儒）