

黄土高原生态林耗水深度和深层耗水量研究

孟廷芳^{1,2,3}, 陈光杰^{4,5}, 武文杰⁶, 李敏⁵, 司炳成⁷, 冯浩^{1,2,4*}

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 6. 中南林业科技大学林学院, 湖南 长沙 410004; 7. 萨斯喀彻温大学土壤科学系, 萨斯卡通 S7N5A8)

摘要:【目的】探讨黄土高原生态林耗水深度和深层耗水量, 以明确黄土高原生态林的耗水规律。【方法】选取延安地区 16 年生的侧柏、沙棘和刺槐三种常见的黄土高原生态林种, 以土钻法获取不同生态林和草地的土壤水分含量。首先基于年际的土壤水分含量确定生态林的土壤水分活跃层; 其次, 基于 > 25 m 深剖面的土壤水分数据来确定三种生态林的耗水深度和深层耗水量, 并分析不同土层的耗水速率。【结果】依据年际土壤水分含量变化, 2 m 土层为该地区土壤水分活跃层。侧柏、沙棘和刺槐的最大耗水深度分别为 12.0 m、12.2 m 和 23.2 m, 其 16 年内耗水总量分别为 304 mm、664 mm 和 1763 mm。刺槐的深层土壤耗水速率最大, 为 110 mm a⁻¹; 其次为沙棘, 为 42 mm a⁻¹; 最小为侧柏, 为 19 mm a⁻¹。在 2~10 m 土层刺槐的耗水量仅占总耗水量的 44%。【结论】探究黄土高原生态林的耗水量需要根据生态林物种的耗水特性选择合适取样土层深度。

关键词: 深层土壤水; 深根植物; 土壤干层; 黄土高原

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)01-0050-07

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022093004

孟廷芳, 陈光杰, 武文杰, 李敏, 司炳成, 冯浩. 黄土高原生态林耗水深度和深层耗水量研究 [J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 50-56

MENG Ting-fang, CHEN Guang-jie, WU Wen-jie, LI Min, SI Bing-cheng, FENG Hao. Depth and Amount of Deep Soil Water Consumption in Ecological Forests on the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(1): 50-56

【研究意义】深层土壤水分是干旱、半干旱地区维系植物生长和生存重要的水资源^[1], 在植物应对气候变化和极端天气中起到了重要的作用^[2]。因此, 准确认识深层土壤水分对植被的响应对于土壤水资源的保护具有重要的意义。黄土高原作为全球最大最为深厚的黄土区^[3], 为探究深层土壤水的动态提供了良好的研究场所。【前人研究进展】自从 1999 年退耕还林还草工程开展以来, 黄土高原生态修复取得了显著的成效^[4]。但由于黄土高原地区水资源的限制, 大面积植被恢复加剧了土壤水分的过度消耗^[5]。研究表明深层土壤水分的消耗受树龄^[6]、气候^[7]、种植密度^[8]、树种^[9]等因素的影响。深层土壤水分的过度消耗往往形成土壤干层^[10], 从而阻碍了地下水的补给, 危及水资源安全^[11]。当深层土壤水分过度消耗也将抑制植物的蒸腾^[12], 影响植物生长的可持续性。所以, 探究深层土壤水分的耗水具有重要意义。耗水深度和深层耗水量作为深层土壤水分消耗的重要指

标, 表征深根系林地对深层水资源的有效利用能力。耗水深度涵盖了林地根系能够到达的最大深度范围, 反映了在有限水资源环境下林地对水分获取的适应能力和对环境变化的响应。深层耗水量是指植物根系从土壤深层吸收水分的数量, 反映了林地水分获取和生态适应的潜力。现有研究发现, 延安地区 16 年的刺槐根系深度超过 21 m^[13]。长武地区 26 年的苹果树的最大根深达 18 m^[14]。【本研究切入点】但目前对黄土高原深层土壤水分消耗的研究大多局限于 5 m 土层^[15-16] 或者 10 m 土层^[17-18], 鲜有报道生态林的最大耗水量和耗水深度。同时, 未有探究不同土层的耗水占总耗水量的比例。【拟解决的问题】本文通过选取黄土高原半干旱地区三种不同类型的生态林(侧柏、沙棘和刺槐), 通过野外获取 > 25 m 深剖面土壤水分数据, 定量研究深层土壤水分消耗深度和耗水量, 并分析不同土层的耗水量占深层土壤总耗水量的比例, 为理解黄土高原深层土壤水分

收稿日期: 2022-09-30; 修订日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630860)和国家自然科学基金面上项目(41877017)资助

作者简介: 孟廷芳(1993-), 女, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向为生态水文过程。E-mail: mengtingfang16@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者: E-mail: nercwsi@vip.sina.com

消耗特征和规律提供一定的借鉴意义。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

研究区位于黄土高原半干旱地区的延安市天河流域 (36°39'~36°40'N, 109°22'~109°23'E) (图 1a)。该地区属于温带大陆性气候, 多年平均气温为 9.4 °C。长期 (1961~2018 年) 年降水量和潜在蒸散发量分

别为 543 ± 131 mm 和 991 ± 81 mm, 60% 以上的降水集中在 7~9 月份。该地区属于典型的丘陵沟壑区, 海拔在 988~1344 m 之间, 地下水位在 40~100 m^[19]。土壤质地以粉壤土为主 (粉粒含量 > 60%), 深层土壤剖面由黄土与古土壤交替出现。自从退耕还林工程实施以来, 该流域经历了剧烈的土地利用类型变化。流域主要的生态林类型有沙棘, 柠条, 火炬树, 侧柏, 油松, 刺槐等。

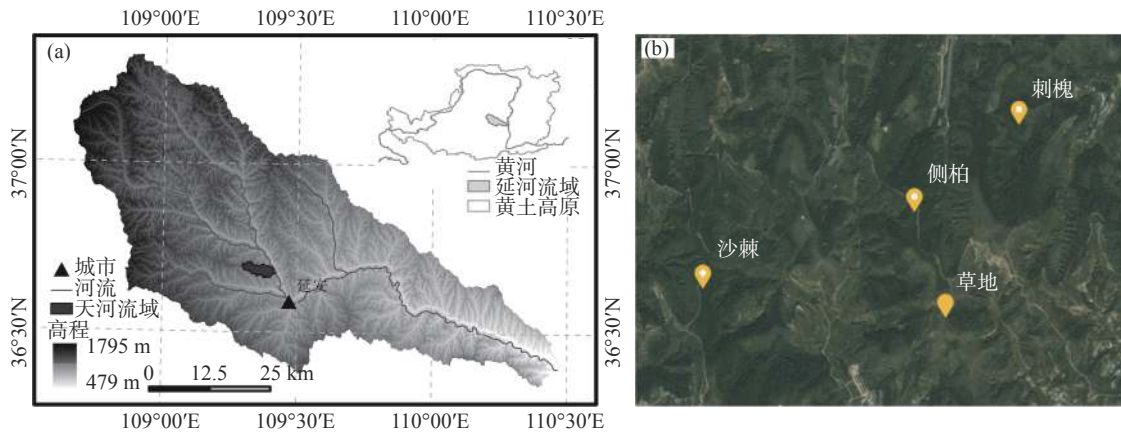


图 1 研究区地理位置及试验区样点图

Fig.1 The geographical location of the study area and the distribution of sampling sites

1.2 采样及测定方法

选取黄土高原典型生态林物种为研究对象, 且具有不同的生物学特性分类 (常绿针叶林、灌木、落叶阔叶林): 侧柏 (*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.) 和刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) (图 1b)。采用“空间换时间”的方法, 草地的深层土壤水分作为深根植物的初始含水量。于 2018 年 8 月记录了野外试验地的基本信息 (表 1)。采用土钻法采集土壤样品, 钻头直径为 60 mm。采样位置位于中坡段且周围生态

林长势良好的地点。为获取生态林的最大耗水深度, 在 2018 年 8 月 1 日至 8 月 25 日获取三种生态林和草地的土壤样品, 取样深度为 25~30 m, 取样间隔为 20 cm。为确定因季节性降水和蒸发影响的土壤活跃层, 在 2018 年 8 月~2019 年 10 月份别获取了三种生态林各 7 次土壤深剖面含水量, 取样深度为 10 m。每层鲜土混合均匀后, 将 30~50 g 土样装入铝盒, 并带回实验室采用烘干法 (105 °C, 8 h) 测定土壤含水量, 并用吸管法以 40 cm 剖面深度间隔测定土壤机械组成。

表 1 采样试验区样地基本信息

Table 1 The basic information of sampling sites in the study area

植被类型 Land use type	海拔 Altitude (m)	树高 Height of tree (m)	胸径 Diameter at breast height (cm)	种植密度 (棵 hm ⁻²) Planting density	坡向 Slope aspect	坡度 Slope gradient (°)
侧柏	1234	4.7 ± 0.17	10.8 ± 0.42	1550	北坡	25
沙棘	1251	2.4 ± 0.42	3.5 ± 0.42	—	北坡	25
刺槐	1244	15.6 ± 0.81	10.3 ± 0.85	2500	北坡	29
草地	1244	—	—	—	北坡	27

1.3 数据分析

通过获取林地与草地的不同深度土层土壤体积含水量来判定土壤耗水深度, 依照季节内多次测定的同一深度土层土壤含水量的变异系数来判定土壤

水分活跃层。同时, 通过林地和草地的储水量差值确定深层耗水量。通过多年深层总耗水量除以生态林的林龄以获取生态林树种每年平均的深层土壤耗水速率^[20]。

土壤体积含水量按公式 (1) 计算:

$$\theta_v = \frac{m_w - m_d}{m_d - m_a} \times \rho \quad (1)$$

式中: θ_v 为土壤体积含水量 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); m_w 为土壤湿土和铝盒的总重量 (g); m_d 为土壤干土和铝盒的总重量 (g); m_a 为铝盒的重量 (g); ρ 为土壤容重 (g cm^{-3}), 取当地土壤剖面容重数据平均值, $\rho = 1.3$ 。

土壤储水量按公式 (2) 计算:

$$S = 10 \times \sum_{i=1}^n h_i \theta_i \quad (2)$$

式中: S 为土壤储水量 (mm); θ_i 为土壤体积含水量 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); h_i 为土层厚度 (cm); i 土层序号; n 土层数。

深层土壤耗水量按公式 (3) 计算:

$$D = S_g - S_f \quad (3)$$

式中: D 为深层土壤水分消耗量 (mm); S_g 为林地所对应的草地土壤储水量 (mm); S_f 为林地的土壤储水量 (mm)。

深层土壤耗水速率指的是单位时间内消耗的土壤水量, 可按公式 (4) 计算:

$$R = \frac{D}{T} \quad (4)$$

式中: R 为土壤耗水速率 (mm a^{-1}); T 为生态林树

龄 (a), 本研究中, 三种植被的树龄为 16 年。

土壤体积含水量的变异系数按公式 (5) 计算:

$$CV_i = \frac{SD_i}{\bar{\theta}_i} \times 100\% \quad (5)$$

$$SD_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\theta_{i,k} - \bar{\theta}_i)^2} \quad (6)$$

式中: i 为测定土层深度序号 ($i=1, 2, \dots, 50$); k 为取样的次数序列 ($k=1, 2, \dots, 7$); n 为取样的总次数; SD_i 和 $\bar{\theta}_i$ 为 i 土层深度的土壤体积含水量的标准差和平均值; $\theta_{i,k}$ 为 k 次测量 i 土层深度的土壤体积含水量 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)。当变异系数大于 20% 时, 该土层被确定为土壤水分活跃层^[20]。

2 结果与分析

2.1 土壤水分动态

三种生态林季节性剖面土壤水分动态如图 2 所示。受降水和蒸散发的影响, 土壤水分在 0~2 m 土层变化剧烈。其中, 在 0~2 m 土层上侧柏平均含水量为 $0.14 \pm 0.04 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$; 沙棘为 $0.13 \pm 0.02 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$; 刺槐为 $0.12 \pm 0.02 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 。而在 2 m 以下, 三种生态林土壤水分趋于稳定。三种生态林 2~10 m 土层的土壤含水量存在显著性差异 ($P < 0.05$), 表现为侧柏 > 沙棘 > 刺槐; 其中, 侧柏为 $0.17 \pm 0.005 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$, 沙棘为 $0.14 \pm 0.003 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$, 刺槐为 $0.11 \pm 0.003 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 。

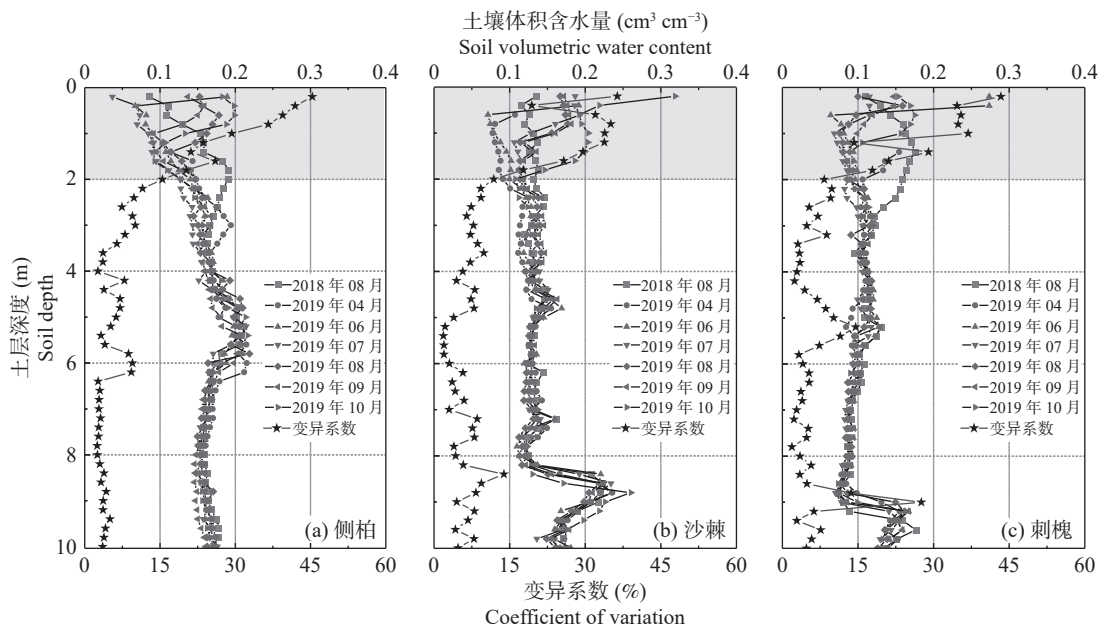


图 2 不同生态林土壤体积含水量季节性剖面分布特征及其变异系数

Fig.2 The seasonal distribution characteristics and coefficient of variation of soil water content in soil profile for ecological forests

三种生态林的土壤体积含水量的变异系数随土层深度增加呈现出相似的变化趋势。即在 0~2 m 土层随着剖面深度的增加, 变异系数逐渐减小; 土层深度增至 2 m 及其以下, 变异系数趋于稳定。从三种生态林深剖面的土壤水分变异系数发现, 土壤水分活跃层可以定义为 0~2 m 土层。

2.2 生态林最大耗水土层深度和深层耗水量

草地土壤体积含水量由于古土壤层的存在, 在深度上出现明显的两个峰值, 分别位于深度 13.0 m 和 23.2 m (图 3)。在 0~30 m 深剖面草地的土壤机械组成平均为 13±3% (粘粒)、68±5% (粉粒)、

19±5% (砂粒); 2~30 m 土层上平均含水量为 $0.20 \pm 0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 。而侧柏、沙棘和刺槐各深剖面的平均土壤黏粒含量均为 $14 \pm 4\%$; 平均土壤粉粒含量分别为 $63 \pm 4\%$ 、 $64 \pm 7\%$ 和 $64 \pm 8\%$; 平均土壤砂粒含量分别为 $24 \pm 9\%$ 、 $22 \pm 8\%$ 和 $23 \pm 9\%$ 。由于不同深度的剖面存在土层错位, 我们依照古土壤层深度将草地土壤水分向上平移以此为生态林的初始含水量参考值。基于草地为林地含水量的初始值, 确定的侧柏、沙棘和刺槐的最大耗水深度分别为 12.0 m, 12.2 m 和 23.2 m, 其 16 年内深层 (>2 m) 土壤总耗水量分别为 304 mm、664 mm 和 1763 mm。

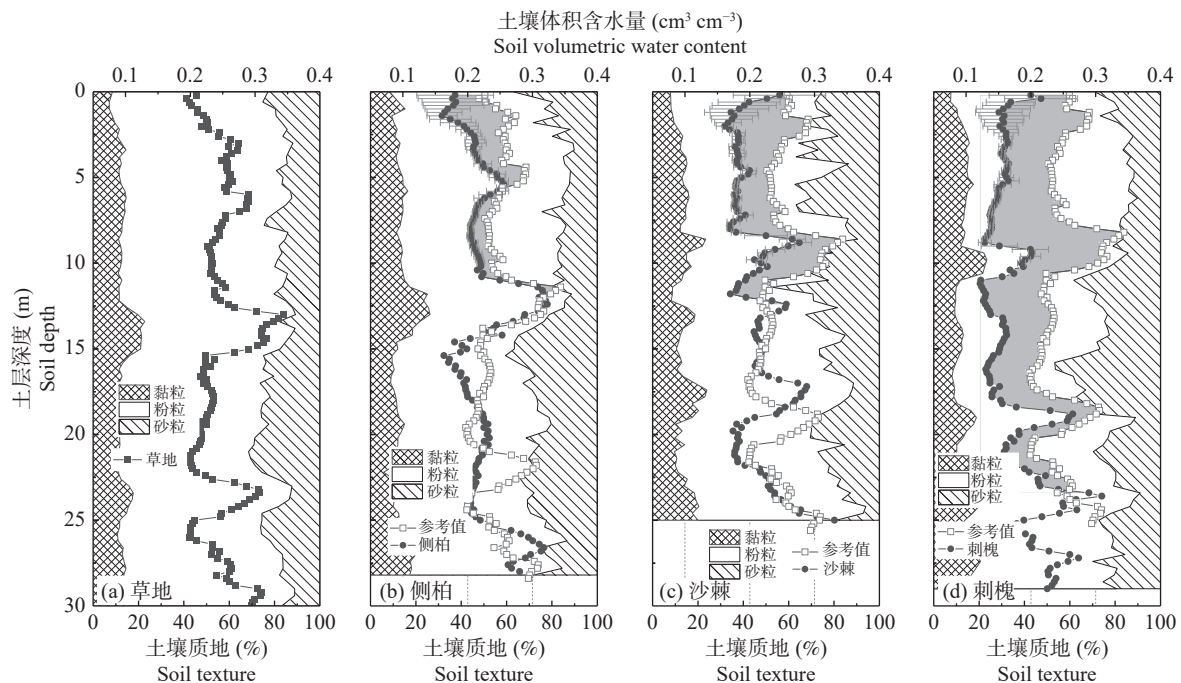


图 3 草地和生态林的土壤体积含水量剖面分布

Fig.3 The vertical distribution of volumetric soil water content in grassland and ecological forests

2.3 深层耗水速率垂向分布特征

三种不同生态林的深层耗水速率存在显著性差异 (图 4)。刺槐的深层耗水速率最大, 其次为沙棘, 侧柏最小。侧柏的深层耗水速率在 2~5 m 的单位深度上较为接近, 平均为 $2.96 \pm 0.02 \text{ mm a}^{-1}$; 在 5~12 m 深度上也较为稳定, 平均为 $1.44 \pm 0.27 \text{ mm a}^{-1}$ 。沙棘的深层耗水速率在深度上表现出先减小后增加再减少的趋势。最低值出现在 4~5 m 土层, 为 $2.60 \pm 0.33 \text{ mm a}^{-1}$ (12~13 m 除外)。最高值出现 2~3 m 和 9~10 m, 分别为 $5.72 \pm 0.56 \text{ mm a}^{-1}$ 和 $5.72 \pm 0.46 \text{ mm a}^{-1}$ 。刺槐的深层耗水速率在 2~9 m 的单位深度上较为相近, 单位深度上平均深层耗水速率为

$6.40 \pm 0.44 \text{ mm a}^{-1}$ 。在 9~10 m 以下, 整体上体现出逐渐减少的趋势, 单位深度上平均深层耗水速率为 $4.30 \pm 1.18 \text{ mm a}^{-1}$ 。

为了探究取样深度对于深层耗水量所带来的误差, 我们基于三种深度来分析深层耗水量及其所占比例 (表 2)。在 2~5 m 土层深度上, 侧柏耗水量占到总耗水量的 47%, 沙棘为 30%, 刺槐为 17%。而在 2~10 m 土层深度上, 侧柏耗水量占总耗水量的 86%, 沙棘占 82%, 刺槐占 44%。三种生态林 2~10 m 土层深层耗水量均较 2~23.2 m 土层有所低估, 但以刺槐低估的幅度最大; 刺槐 2~10 m 土层耗水 775 mm, 较 2~23.2 m 土层总耗水量低估了 56% (表 2)。

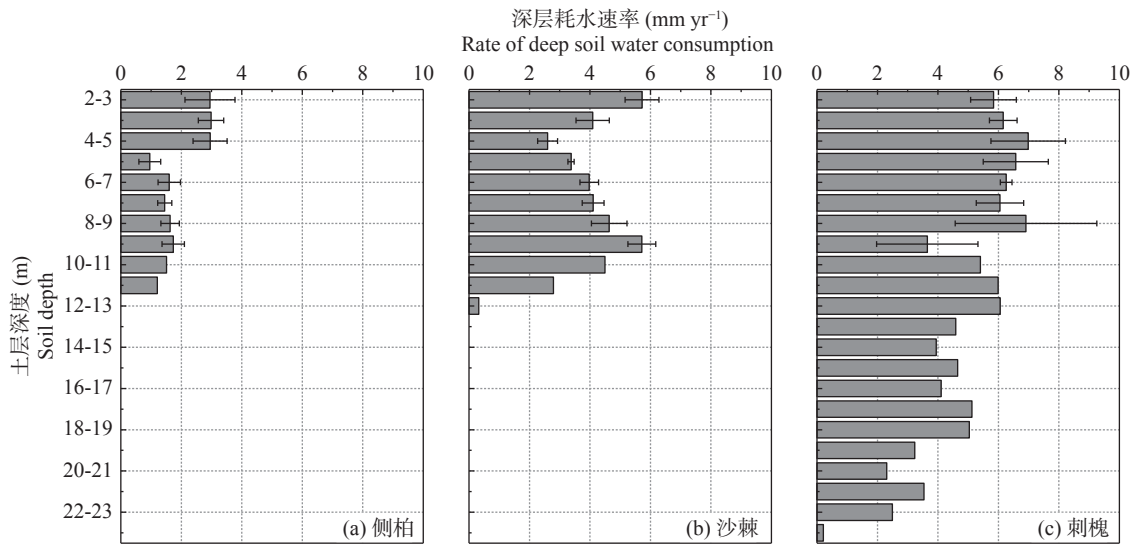


图 4 不同生态林深层耗水速率剖面分布特征

Fig.4 The distribution characteristics in rate of deep-water consumption in ecological forests of different soil layers

表 2 不同土层耗水量及其占总深层土壤耗水量的比例

Table 2 Water consumption and proportion to the total deep soil water consumption of different soil layers

土层深度 Soil depth (m)	侧柏 <i>P. orientalis</i>		沙棘 <i>H. rhamnoides</i>		刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	
	深层耗水量 Deep water consumption (mm)	所占比例 Proportion (%)	深层耗水量 Deep water consumption (mm)	所占比例 Proportion (%)	深层耗水量 Deep water consumption (mm)	所占比例 Proportion (%)
2~5	142 ± 21	47 ± 8	199 ± 20	30 ± 3	304 ± 38	17 ± 2
2~10	260 ± 38	86 ± 14	548 ± 20	82 ± 3	775 ± 31	44 ± 2
>2	304	100	664	100	1763	100

3 讨论

本研究中, 土壤水分活跃层被定义为 0~2 m 土层, 这由于浅层 0~2 m 土层土壤含水量季节性波动较大, 是降水入渗和蒸散发的主要土层。该结果与模型模拟的结果相一致^[21-22]; 而深层土壤含水量在年内并无显著性差异 ($P < 0.05$), 这表明虽然生态林消耗深层土壤水分, 但在短期内每层土壤水分的消耗量很小, 这与 Li 等^[22-23]的结果一致。结合前人基于同位素的研究发现季节内深层土壤水分变化较小的结果^[23-24], 表明了林地土壤水分补给方式主要以活塞流为主, 受优势流影响的几率不大^[24-25]。林地的不同时间土壤含水量变异系数随土层深度增加而减弱, 但也出现异常点, 例如刺槐的 8.8 m 土层, 这是由于深层土壤的空间异质性导致的。

由于黄土高原地下水位深, 降水就成为了维系植物生长和生存的唯一来源。研究表明林地的蒸散发大于降水, 特别是在干旱半干旱地区^[12]。当补给到浅层的土壤水资源无法满足植物蒸散发时, 植物还消耗深层土壤水分。本研究表明, 16 年的侧柏、沙

棘和刺槐分别以 19 mm a^{-1} , 42 mm a^{-1} 和 110 mm a^{-1} 的速率消耗深层土壤水分, 占年平均降水量的 3%、8% 和 20%。这表明年内降水所补给的浅层土壤水分仍然是植物主要的耗水来源, 水量平衡的方法研究结果也表明浅层土壤水分对植物蒸散发保持着较高的比例^[25-26]。然而, 在黄土高原深层土壤水分具有难以补给和恢复的特性, 深层土壤水分的消耗极易形成生态水文负效应。所以, 探究深层水消耗具有重要的意义。

研究表明, 三种生态林的耗水深度均超过 10 m, 此结果在黄土高原地区得到普遍的认识。例如: 7 年苜蓿、23 年柠条和 23 年油松的最大耗水深度达到 15.5 m, 22.4 m 和 21.5 m^[26-27]。虽然侧柏和沙棘的耗水深度相似, 但沙棘的深层土壤耗水量明显大于侧柏, 这说明深层土壤水分消耗不仅与根系深度和土壤的物理特性有关^[20,27], 还受物种特性的影响。刺槐较侧柏和沙棘不仅具有更深的耗水深度, 同时平均每层耗水速率也最大。这主要有两个原因, 首先, 刺槐的蒸腾量远远大于侧柏和沙棘^[28]; 再者, 本研究中刺槐的种植密度大于侧柏 (表 1)。若按照前人常

采用的 5 m 或 10 m 取样深度, 则刺槐的深层水消耗将得到极大的低估, 这将导致生态水文过程中的水量平衡无法闭合。同时, 若采用水量平衡法来计算地下水补给^[29], 其补给量也将被高估。本研究结果将进一步加剧了我们对黄土高原生态恢复是否可持续性的担忧。

4 结论

在延安地区, 三种生态林的土壤水分活跃层为 0~2 m。侧柏、沙棘和刺槐的最大耗水深度分别为 12.0 m, 12.2 m 和 23.2 m, 16 年内深层土壤总耗水量分别为 304 mm、664 mm 和 1763 mm。在仅考虑 2~10 m 土层水分的情况下, 侧柏、沙棘和刺槐深层土壤耗水量将低估 14%、18% 和 56%。在探究黄土区深层土壤耗水量时应选择合适的土层深度以达到正确地认识深层土壤耗水量的目的。

参考文献:

- [1] Chitra-Tarak R, Xu C, Aguilar S, et al. Hydraulically-vulnerable trees survive on deep-water access during droughts in a tropical forest[J]. *New Phytologist*, 2021, 231: 1798 – 1813.
- [2] Germon A, Laclau J P, Robin A, et al. Tamm review: Deep fine roots in forest ecosystems: Why dig deeper?[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 118135.
- [3] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223 – 243.
- [4] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11 – 19.
- [5] 丁文斌, 王飞. 植被建设对黄土高原土壤水分的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5531 – 5542.
- [6] Liu Y, Miao H T, Huang Z, et al. Soil water depletion patterns of artificial forest species and ages on the Loess Plateau (China)[J]. *Forest Ecology Management*, 2018, 417: 137 – 143.
- [7] Liang H B, Xue Y Y, Li Z S, et al. Soil moisture decline following the plantation of *Robinia pseudoacacia* forests: Evidence from the Loess Plateau[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 412: 62 – 69.
- [8] Nan W G, Ta F, Meng X Q, et al. Effects of age and density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on soil moisture in the semiarid Mu Us Dunefield, northern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 473: 118313.
- [9] Liang H B, Xue Y Y, Li Z S, et al. Afforestation may accelerate the depletion of deep soil moisture on the Loess Plateau: Evidence from a meta-analysis[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(18): 3829 – 3840.
- [10] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14 – 22.
- [11] Turkeltaub T, JIA X X, Zhu Y J, et al. Recharge and nitrate transport through the deep vadose zone of the Loess Plateau: A regional-scale model investigation[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(7): 4332 – 4346.
- [12] Li H J, Ma X J, Lu Y, et al. Growing deep roots has opposing impacts on the transpiration of apple trees planted in subhumid loess region[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 258: 107207.
- [13] Zhou Z X, Wang Y Q, An Z S, et al. Deep root information “hidden in the dark”: A case study on the 21-m soil profile of *Robinia pseudoacacia* in the critical zone of the Chinese loess Plateau[J]. *Catena*, 2022, 213: 106121.
- [14] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(4): 546 – 554.
- [15] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113 – 122.
- [16] He M N, Wang Y Q, Wang L, et al. Spatial-temporal dynamics and recovery mechanisms of dried soil layers under *Robinia pseudoacacia* forest based on in-situ field data from 2017 to 2020[J]. *Land Degradation & Development*, 2022: 1 – 12.
- [17] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437 – 448.
- [18] Gao X D, Li H C, Zhao X N, et al. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: Considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration[J]. *Geoderma*, 2018, 319: 61 – 69.
- [19] Chen G J, Meng T F, Wu W J, et al. Evaluating potential groundwater recharge in the unsteady state for deep-rooted afforestation in deep loess deposits[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159837.
- [20] 杨 敏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土高原人工林深层土壤水分利用研究[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 100 – 106.
- [21] Suo L Z, Huang M B, Zhang Y K, et al. Soil moisture dynamics and dominant controls at different spatial scales over semiarid and semi-humid areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 635 – 647.
- [22] Li H Y, Luo Y, Sun L, et al. Modelling the artificial forest (*Robinia pseudoacacia* L.) root-soil water interactions in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26: 17 – 34.
- [23] Li H J, Si B C, Wu P T, et al. Water mining from the deep critical zone by apple trees growing on loess[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(2): 320 – 327.
- [24] Chen, G J, Wu, W J, Meng, T F, et al. Quantitative partitioning of

- temporal origin of transpiration into pre- and post-plantation under deep-rooted vegetation on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128964.
- [25] Xiang W, Si B C, Biswas A, et al. Quantifying dual recharge mechanisms in deep unsaturated zone of Chinese Loess Plateau using stable isotopes[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 773 – 781.
- [26] 陆蕴青, 向伟, 李敏, 等. 黄土塬区土地利用变化对地表蒸散的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(1): 89 – 98.
- [27] 王志强, 刘宝元, 刘刚, 等. 黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究[J]. *中国科学: D辑: 地球科学*, 2009, (9): 1297 – 1303.
- [28] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(20): 148 – 159.
- [29] Zhang Z Q, Li M, Si B C, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622-623: 584 – 953.

Depth and Amount of Deep Soil Water Consumption in Ecological Forests on the Loess Plateau

MENG Ting-fang^{1,2,3}, CHEN Guang-jie^{4,5}, WU Wen-jie⁶, LI Min⁵, SI Bing-cheng⁷, FENG Hao^{1,2,4*}

(1. *The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4. *Institute of Soil and Water Conservation Northwest A&F University, Yangling 712100, China*; 5. *College of water resources and architectural engineering northwest A&F university, Yangling 712100, China*; 6. *College of Forestry Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China*; 7. *Department of Soil Science University of Saskatchewan, Saskatoon S7N5A8, Canada*)

Abstract: [Objective] It is important to clarify the water consumption pattern of ecological forests in Loess Plateau for water resources management. However, it is limited to the sampling depth, and there is a lack of research on the depth and amount of maximum water consumption for ecological forests. [Method] Three common ecological forest species of Loess Plateau, namely, 16-year-old *Platycladus orientalis*, *Hippophae rhamnoides*, and *Robinia pseudoacacia* in Yan'an, were selected. Soil water contents under different ecological forests and natural grassland were obtained by hand-made auger. Firstly, the active soil water layer of the ecological forests was determined based on the annual seasonal soil water content change. Secondly, the water consumption depth and amount of the three ecological forests were determined based on the soil water contents in the soil depth profile (>25 m) compared with grassland. Finally, the rate of water consumption of ecological forests from different soil layers was analyzed. [Result] The active soil water layer was considered in 2 m depth through seasonal soil water changes in Yan'an area. The more water consumption depths were 12.0 m, 12.2 m and 23.2 m with the water consumption amounts of 269 mm, 664 mm and 1727 mm for *Platycladus orientalis*, *Hippophae rhamnoides*, and *Robinia pseudoacacia*, respectively. The deep soil water consumption rate of *Robinia pseudoacacia* was the highest, which was 108 mm yr⁻¹, followed by *Hippophae rhamnoides* (42 mm a⁻¹) and *Platycladus orientalis* (17 mm a⁻¹). The water consumption amount from the 2-10 m soil layer of *Robinia pseudoacacia* only accounted for 45% of the total water consumption. [Conclusion] We need to select the appropriate sampling depth of soil layer according to the water consumption characteristics of ecological forest species.

Key words: Deep soil water; Deep-rooted forest; Dried soil layer; The Loess Plateau

[责任编辑: 张玉玲]