

# 黄土高原人工林深层土壤水分利用研究

杨敏<sup>1,2</sup>, 赵西宁<sup>1,3,4</sup>, 高晓东<sup>1,3,4</sup>, 杨世伟<sup>3</sup>

(1.西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**探讨黄土高原人工林的深层土壤水分利用状况,对该区植被恢复的可持续发展具有重要意义。以黄土高原半干旱偏旱区、半干旱区、半湿润区的刺槐林和柠条林为研究对象,通过野外实地调查,分析了不同气候区人工林 0—800 cm 土层土壤水分含量、深层(200—800 cm)土壤水分消耗量及土壤耗水速率,探究了不同气候区人工林对深层土壤水分的影响。结果表明:(1) 3 个气候区农地土壤含水量显著高于刺槐林和柠条林。刺槐林、柠条林在 2 个气候区 0—800 cm 土层的土壤水分含量变化范围分别为 6.64%~11.01%, 6.38%~11.41%, 均在半干旱偏旱区平均土壤含水量最低。(2) 刺槐林和柠条林的深层土壤耗水量、深层土壤耗水速率均以半干旱偏旱区最高,分别为:808 mm, 698 mm, 32.33 mm/a, 31.76 mm/a。(3) 人工林在半干旱偏旱区和半干旱区的植物根系较半湿润区活跃,特别是在 0—300 cm 土层,对土壤水分影响较大。(4) 土壤质地是人工林深层土壤水分变化的重要因素之一。黏粒含量与土壤水分呈正相关,砂粒含量与土壤水分呈负相关。半干旱偏旱区、半干旱区、半湿润区的黏粒含量依次增加,砂粒含量则相反。不同气候区人工林对深层土壤水分影响不同,同时受根系和土壤质地影响较大,因此选择合理的人工植被配置模式对深层土壤水的保护和持续利用非常重要。

**关键词:**黄土高原; 人工林; 深层土壤水分; 根系; 土壤质地

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0100-07

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.015

## Deep Soil Moisture Use of Planted Forests in the Loess Plateau

YANG Min<sup>1,2</sup>, ZHAO Xining<sup>1,3,4</sup>, GAO Xiaodong<sup>1,3,4</sup>, YANG Shiwei<sup>3</sup>

(1.Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Deep soil moisture use of planted forest in the Loess Plateau is discussed in this study, which is of great significance to sustainable development of revegetation. Based on field sampling of soil moisture of deep soil layers in the stands of *Robinia pseudoacacia* and *Caragana Korshinskii* Kom in the semi-humid zone, semi-arid zone and semi-arid/arid zone of the Loess Plateau, deep soil moisture consumption and deep soil moisture consumption rate were calculated to analyze the effect of afforestation on deep soil moisture in different climate zones. The results are as follows. (1) The soil moisture content of farmland is significantly higher than that of *Robinia pseudoacacia* and *Caragana Korshinskii* Kom. in different climate zones. Mean soil moisture contents in the depth of 0—800 cm of *Robinia pseudoacacia* and *Caragana Korshinskii* Kom. range from 6.64% to 11.01%, from 6.38% to 11.41%, respectively; with the lowest in the semi-arid/arid zone. (2) The deep soil moisture consumption and deep soil moisture consumption rate in the stands of *Robinia pseudoacacia* and *Caragana Korshinskii* Kom. are 808 mm, 698 mm and 32.33 mm/a, 31.76 mm/a, respectively. (3) Roots of the planted forests in semi-arid and semi-arid/arid zones are significantly active than those in semi-humid zones, especially in the depth of 0—300 cm layers, which has the great influence on soil moisture. (4) Soil texture is one of key factors affecting deep soil moisture status of planted forests. Soil moisture is positively correlated with the clay and silt contents and negatively correlated with sand content.

收稿日期:2018-12-24

修回日期:2019-01-16

资助项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400204; 2017YFC0403605); 国家自然科学基金(41571506, 41771316, 51579212); 陕西省重点科技创新团队计划(2017KCF-15)

第一作者:杨敏(1993—),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为农业水土资源利用与保护。E-mail: yangmin@nwafu.edu.cn

通信作者:赵西宁(1976—),男,陕西渭南人,博士,研究员,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: xiningz@aliyun.com

The clay content increases gradually in semi-arid/arid zone, semi-arid zone and semi-humid zone, while the sand content is opposite. Afforestation has different impacts on deep soil moisture in different climate zones, and the deep soil moisture is greatly influenced by roots and soil texture. Thus, it is very important to choose the suitable vegetation arrangement pattern to protect and sustainably utilize the deep soil moisture.

**Keywords:** the Loess Plateau; planted forest; deep soil moisture; roots; soil texture

土壤水分是干旱、半干旱区植物生长和生存的关键因子<sup>[1-2]</sup>。尤其是深层土壤水分作为植物生长利用的储备水资源,在植物应对长期干旱等极端气候事件中起着至关重要的作用<sup>[3]</sup>。但是植被蒸腾耗水作用强烈,会对生态水文过程及区域水平衡产生深远的影响<sup>[4]</sup>。因此,准确认识植被对深层土壤水分的影响对干旱、半干旱区植被恢复的可持续性具有重要意义。

黄土高原退耕还林(草)工程实施以来,刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)、柠条林(*Caragana Korshinskii* Kom.)等人工林得到大规模推广种植,该区生态环境得到显著改善<sup>[5]</sup>。但黄土高原干旱缺水,人工林的大规模发展改变了原有的水量平衡,水分消耗通常大于降水补给。近期研究表明黄土高原植被建设已接近水资源承受极限,土壤水分循环出现负平衡,导致深层土壤干燥化风险增大<sup>[6]</sup>。

众多学者就人工林对土壤水分的影响开展了大量研究<sup>[7-9]</sup>。郭忠升等<sup>[10]</sup>研究发现黄土丘陵区柠条随着树龄增加,对土壤水分利用深度逐渐增强,导致土壤水分亏缺严重;王力等<sup>[11]</sup>研究也发现深根系刺槐生长速率高、种植密度大,水分供需矛盾,为维持自身正常生长,需极大地消耗土壤深层储水。黄土高原部分地区人工林常年水分收支负平衡,土壤水分利用深度逐年增加,形成了明显的土壤干层<sup>[12]</sup>。但是目前有关人工林对土壤水分的影响大多针对单点试验,缺乏不同气候区之间的比较,而且多集中在5 m以上,5 m以下的研究相对匮

乏。本文通过选取黄土高原半干旱偏旱区、半干旱区以及半湿润区的刺槐林和柠条林,通过野外取样,分析不同气候区人工林对深层土壤水分的影响,定量评价人工林的深层干燥化现状,为黄土高原人工林植被建设的可持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国黄土高原,属于典型的大陆性季风气候。年平均气温 3.6~14.3℃;多年平均降水量为 150~800 mm,主要集中在 6—9 月份,占全年降水量的 55%~78%;光能资源丰富,年总辐射量为  $5.0 \times 10^9 \sim 6.7 \times 10^9$  J/m<sup>2</sup>。根据黄土高原气候分布特征,本研究选择黄土高原北部半干旱偏旱区的子洲、中部半干旱区延安和南部半湿润区的长武 3 个代表区域典型的植被类型人工乔木林(刺槐 *Robinia pseudoacacia*)和人工灌木林(柠条 *Caragana Korshinskii* Kom.)作为研究对象。子洲的多年平均降雨量为 424 mm,年均气温 9.2℃,土壤为黄绵土。延安的年均降雨量为 530 mm,年均气温 9.4℃,土壤为黄绵土。长武的年均降雨量为 560 mm,年均气温 9.1℃,土壤为轻壤—中壤质黑垆土。3 个代表区植被退化严重,生态环境脆弱,气候干燥,蒸发强烈。研究进行野外采样同时记录海拔、生长年限、树高、胸径、冠幅直径和郁闭度等基本信息(表 1)。

表 1 采样区基本样地信息

采样点	植被类型	海拔/m	树龄/a	树高/m	胸径/cm	冠幅直径/m×m	郁闭度
长武	刺槐	1078	22	7.8	13.7	4.1×4.4	0.9
	柠条	1053	20	1.5	—	—	0.7
	玉米	1150	—	—	—	—	—
延安	刺槐	1195	23	12.1	9.93	3.6×4.4	0.9
	柠条	1233	23	1.8	—	—	0.95
	小米	1187	—	—	—	—	—
子洲	刺槐	966	25	7.1	8.85	3.1×3.4	0.8
	柠条	946	22	1.2	—	—	0.6
	玉米	910	—	—	—	—	—

注:“—”代表未发现,下表同。

### 1.2 采样及测定方法

1.2.1 土壤样品的采集与测定 采用土钻法( $d=40$  mm),采集土壤样品,取样深度要求如下:0—200 cm 土层,每 20 cm 取一个土样;200—800 cm 土层,每 40

cm 取一个土样。所采集土样一分为三:一部分采用烘干法(105℃,10 h)测定土壤含水量;另外两部分带回实验室测定颗粒组成和有机碳含量(土壤颗粒组成用马尔文激光粒度仪进行测定;土壤有机碳含量用重

铬酸钾氧化法测定)。采样时间从 2018 年 5 月 25 日—2018 年 7 月 5 日,共 42 d。

1.2.2 根系的收集与测定 采用根钻法( $d=75\text{ mm}$ ) 在距树干 40 cm 处采集根系样品,取样深度间隔要求同土壤水分。各层钻取的土样用自来水仔细清洗,用 0.5 mm 筛网对悬浮液中的土壤进行筛分,从筛后的土壤浆液中仔细挑选出细根( $\leq 2\text{ mm}$ ),在吸湿纸上短时间风干。利用扫描仪获取根系图像(300 dpi),使用 Delta-t scan 图像分析软件分析根系图像(Delta-t scan, Delta-T Devices Company, UK),获取细根根长。将扫描后各层细根 75℃ 烘干,利用电子天平称重,获取细根干重。将获得的各土层细根根长除以对应取样土体体积即为植物的各土层细根根长密度。

1.2.3 土壤水分状况评价指标 由于 0—200 cm 土层土壤水分受降雨入渗和植被蒸散发影响较大,因此不予考虑<sup>[13]</sup>。本研究将 200 cm 以下的土层定义为深层土壤,主要针对 200—800 cm 的深度范围,探讨人工林刺槐林和柠条林对深层土壤水分的影响。选取农地作为参考,通过对比深层土壤含水量之间的差值间接判断深层水分利用状况是目前常用的方法<sup>[12]</sup>。研究使用以下方程来计算深层耗水量和深层消耗速率。土壤储水量按公式(1)计算:

$$S_{ms} = 0.1\theta \cdot \rho \cdot H \quad (1)$$

式中: $S_{ms}$  为土壤储水量(mm); $\theta$  为质量含水量(%); $\rho$  为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $H$  为土层深度(cm)。土壤耗水量为土壤初始储水量和现有储水量的差值,对照地(农地)储水量视为该地区土壤初始储水量,即:

$$W_{deplete} = S_{initial} - S_{present} \quad (2)$$

式中: $W_{deplete}$  为土壤耗水量(mm); $S_{initial}$  为农地储水量(mm); $S_{present}$  为土壤现有储水量(mm)。深层耗水速率根据以下公式计算:

$$V_{deplete} = \frac{W_{deplete}}{T_{age}} \quad (3)$$

式中: $V_{deplete}$  为深层耗水速率( $\text{mm}/\text{a}$ ); $T_{age}$  为树龄(a)。对于 200—800 cm 土层的容重(BD),用以下公式进行估算<sup>[14]</sup>:

$$BD = \frac{100}{\frac{OM}{0.244} + \frac{100-OM}{1.64}} \quad (4)$$

式中:OM 为有机质;0.244 为有机质含量与土壤容重之间的转换系数;1.64 为非有机质含量与土壤容重之间的转换系数,土壤有机质含量(OM)通过以下公式计算得到:

$$OM = \frac{SOC}{0.58} \quad (5)$$

式中:SOC 为有机碳;0.58 为有机碳含量与有机质含量之间的转换系数。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2017 (Microsoft, Redmond, USA) 和 SPSS 17.0 (SPSS, Chicago, USA) 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析 ANOVA 和多重比较 LSD 方法分析不同处理之间的差异。采用 Origin 2017 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤颗粒组成和根系分布

3 个地区刺槐林和柠条林 0—800 cm 土层的细根根长密度和土壤颗粒组成分布如图 1 所示。同一地区不同植被类型土壤颗粒组成分布具有同质性。子洲、延安和长武 3 个地区的剖面土壤平均黏粒含量变化范围分别为 11.61%~13.55%, 16.58%~17.36%, 24.19%~24.84%, 平均砂粒含量变化范围为 27.80%~30.95%, 17.60%~18.45%, 9.74%~11.15%。而不同地区的土壤颗粒组成存在较大差异。黏粒含量变化趋势为子洲<延安<长武,砂粒含量变化趋势为子洲>延安>长武。

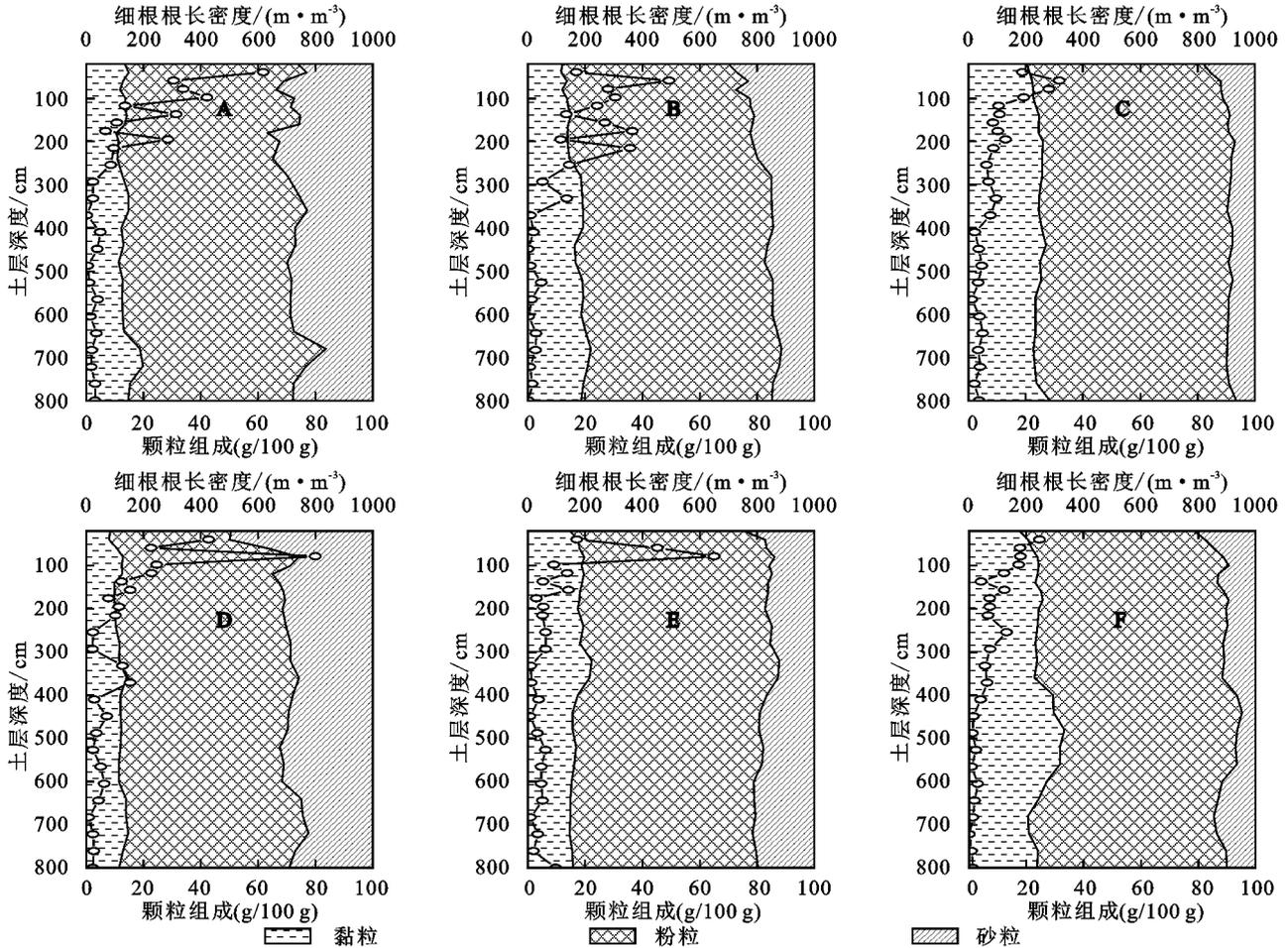
3 个地区的刺槐林和柠条林的剖面细根根长密度分布表现出高度异质性(图 1)。子洲和延安地区两种植被 0—300 cm 土层的细根根长密度均明显高于长武地区,300 cm 以下则无显著差异( $p>0.05$ )。总体来看,3 个地区两种人工林的细根根长密度随土层深度的增加而减小,最大细根根长密度均出现在 0—60 cm 土层。子洲、延安和长武地区,刺槐林 0—300 cm 土层中的细根根长密度分别占总根长密度的 90%, 94%, 80%;而柠条林分别为 83%, 81%, 83%, 均显著高于 300 cm 以下土层( $p<0.05$ )。

### 2.2 人工林剖面土壤含水量垂直分布

不同地区人工林刺槐和柠条的土壤含水量垂直变化特征如图 2 所示。受降雨、蒸散发的双重影响,0—200 cm 土层土壤水分波动较剧烈;随着深度增加,降雨和蒸散发影响减弱,200—800 cm 土层土壤含水量相对稳定,呈现近似垂直分布。不同地区刺槐林和柠条林 200—800 cm 土层土壤含水量存在显著差异( $p<0.05$ ),均表现为子洲<延安<长武(表 2)。同一地区刺槐林和柠条林 200—800 cm 土层土壤含水量无显著差异,均显著低于农地( $p<0.05$ )。

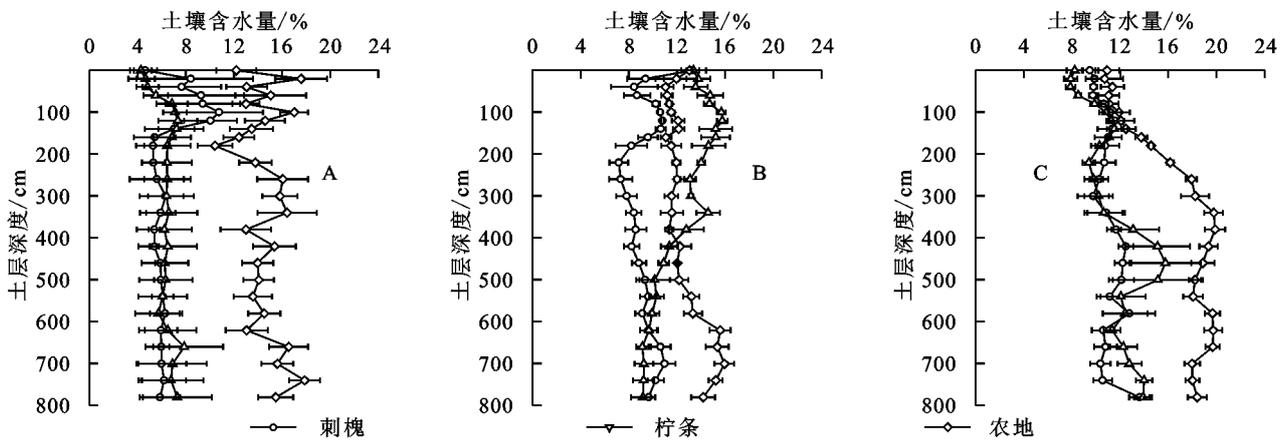
200—800 cm 土层土壤含水量与细根根长密度和土壤颗粒组成相关性见表 3。整体来看,除延安地区刺槐林外,3 个地区两种人工林的土壤含水量与黏粒含量呈显著正相关( $p<0.05$ ),与砂粒含量呈显著负相关( $p<0.05$ )。此外,子洲和长武地区刺槐林和

柠条林的深层土壤含水量与细根根长密度均呈负相关,而在延安地区与细根根长密度呈正相关。



注:A,B,C代表子洲、延安和长武的刺槐林;D,E,F代表子洲、延安和长武的柠条林。

图 1 颗粒组成和细根根长密度垂直分布



注:A,B,C分别代表子洲、延安和长武。

图 2 人工林的土壤含水量垂直分布

表 2 不同地区各土地利用类型 200—800 cm 土层土壤含水量

采样点	刺槐林/%	柠条林/%	农地/%
长武	11.32Ab	12.53Ab	18.66Aa
延安	9.04Bb	11.11Bb	13.17Ca
子洲	5.87Cb	6.56Cb	15.01Bb

注:不同小写字母表示同一地区不同植被土壤含水量存在显著性差异;不同大写字母代表同一植被不同地区土壤含水量存在显著性差异。

### 2.3 人工林的深层耗水量和深层耗水速率垂直分布特征

不同地区刺槐林和柠条林 200—800 cm 土层耗水量存在明显差异(图 3)。除延安地区柠条林的部分土层外,3 个地区刺槐林和柠条林均存在明显的深层土壤水分消耗(图 3)。其中子洲地区刺槐林和柠

条林深层耗水量(200—800 cm)最大,其值分别为 808,698 mm,显著高于延安和长武地区两种人工林深层耗水量( $p < 0.05$ )(表 4)。刺槐林和柠条林在子洲和长武地区深层耗水量变化趋势基本一致,均呈现 200—400 cm,600—800 cm 土层耗水量高,400—600 cm 土层耗水量低的趋势。延安地区刺槐林 200—800 cm 各土层耗水量较稳定,无明显波动;而柠条林深层耗水量随深度的增加而增加,至 680—720 cm 土层达到最大值 55.97 mm。

黄土高原不同地区人工林深层耗水速率差异如图 4 所示。3 个地区刺槐林和柠条林深层(200—800 cm)耗水速率垂直分布规律与深层(200—800 cm)耗

水量大致相似,最大值均出现在子洲地区,其值分别为 32.33,31.76 mm/a,显著高于延安和长武地区两种人工林深层耗水速率(表 4)。刺槐林在子洲、延安 200—800 cm 土层的剖面深层耗水速率均较稳定,无明显波动;在长武地区呈现先增加后减少再增加的趋势,最低值出现在 560—600 cm 土层,为 0.68 mm/a。柠条林在子洲和长武地区深层(200—800 cm)耗水速率则呈现先增加后减少再增加的趋势,最低值分别出现在 600—640 cm 和 440—480 cm 土层,为 1.66, 0.41 mm/a;在延安地区,深层(200—800 cm)耗水速率随深度增加而逐渐增加,至 680—720 cm 土层达到最大值 2.43 mm/a。

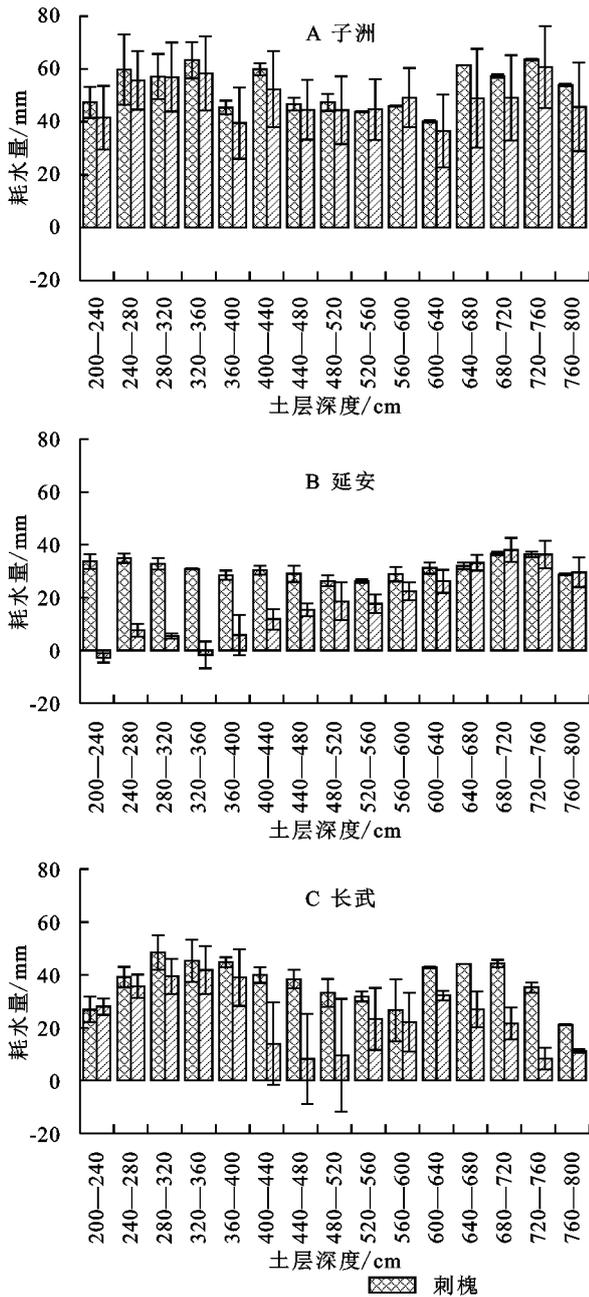


图 3 人工林的深层耗水量垂直分布

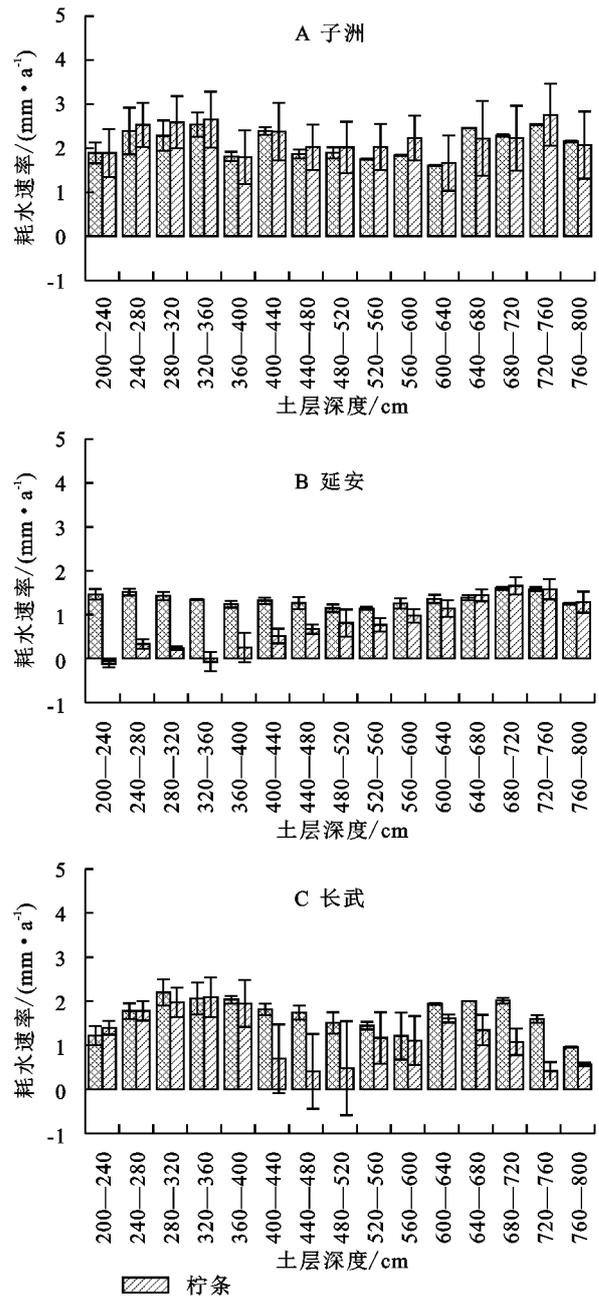


图 4 人工林的深层耗水速率垂直分布

表 3 不同地区各土地利用类型深层土壤含水量(200—800 cm)与黏粒、粉粒、砂粒含量和细根根长密度的相关性

地点	土地利用类型	皮尔逊相关			
		黏粒	粉粒	砂粒	细根根长密度
长武	刺槐林	0.684**	0.249	-0.617	-0.394
	柠条林	0.684**	-0.070	-0.667**	-0.824**
	农地	0.819**	0.395	-0.884**	—
延安	刺槐林	-0.103	-0.448**	0.261	0.062
	柠条林	0.741**	0.376	-0.670**	0.203
	农地	0.944**	0.670**	-0.860**	—
子洲	刺槐林	0.689**	0.135	-0.440*	-0.079
	柠条林	0.489*	0.712	-0.695**	-0.641**
	农地	0.068	0.326	-0.272	—

注:\*表示存在显著相关( $p < 0.05$ ),\*\*表示存在极显著相关( $p < 0.01$ )。

表 4 不同地区刺槐林和柠条林 200—800 cm 土层耗水量和耗水速率

采样点	刺槐林		柠条林	
	耗水量/ mm	耗水速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )	耗水量/ mm	耗水速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )
长武	571.95b	26.00b	369.73b	18.49b
延安	477.60b	20.77c	385.60b	16.77b
子洲	808.30a	32.33ba	698.89a	31.76a

注:不同小写字母表示同一植被不同地区的深层土壤耗水量、耗水速率存在显著性差异( $p < 0.05$ )。

### 3 讨论

降水是黄土高原植被恢复与生态建设的主要水分来源<sup>[15]</sup>。群落密度过大、生产力过高导致人工林植被对土壤水分的消耗严重超出天然降雨的补偿能力,极大地影响了生态系统的水平衡。本研究表明目前黄土高原不同气候区人工林土壤水分均出现了不同程度的亏缺现状,所得结论与以往研究相似<sup>[16-20]</sup>。

植物水分吸收和根系分布密切相关<sup>[21-22]</sup>。分析 3 个地区两种人工林细根根长密度发现,半干旱偏旱区(子洲)和半干旱区(延安)细根根长密度较半湿润区(长武)发达,原因可能是半干旱区降水补给不足,土壤水分条件差,植物通过发展更为发达的根系来吸收水分维持其生长。这与 Collins 等<sup>[23]</sup>研究结果相似,干旱、半干旱地区遭受水分胁迫的植物往往存在更深更发达的根系分布。Jackson 等<sup>[24]</sup>研究发现尽管深层根系分布较少,但其根系吸水效率很高,潜力巨大。当发生水分胁迫时,植物通过其深层根系吸收水分来提高生存能力。也有研究表明植物根系可以通过水力提升作用将深层土壤水分分配到浅层土壤缓解水分胁迫<sup>[25]</sup>。此外,土壤质地也是影响深层土壤水分状况的关键因素<sup>[26]</sup>。半干旱偏旱区(子洲)深层(200—800 cm)土壤耗水量显著高于半湿润区(长

武)(表 4)。皮尔逊相关分析表明,深层土壤含水量与黏粒含量呈正相关,与砂粒含量呈负相关(表 3)。半干旱偏旱区(子洲)的砂粒含量(30%左右)显著高于半湿润区(长武)的砂粒含量(10%左右),土壤持水性和土壤结构相对较差,加之该区潜在蒸散发大,导致浅层土壤水分大量损失,植物通过增加吸水深度吸收利用大量深层土壤水分来维持其生长,这与兰志龙等<sup>[27]</sup>的发现一致。

本研究通过分析不同气候区两种人工林深层耗水规律发现,由于生长速度快且根系发达,当浅层土壤水难以满足其正常需求时,人工林会通过深根吸水消耗大量的深层土壤水分,导致深层土壤干燥化,尤以半干旱偏旱区最为严重。这和已有研究得出结果相似。程积民等<sup>[28]</sup>发现由于深根系灌木柠条种植密度大导致较高的深层耗水速率,加剧了黄土高原深层土壤水分亏缺现状。Liang 等<sup>[29]</sup>对不同树龄刺槐林土壤水分研究发现,随树龄增加土壤含水量逐渐降低,10~20 龄左右刺槐林深层耗水速率最大。在黄土区未来暖干化背景下,大规模的人工林种植可能并不是植被恢复和生态建设的最佳办法,尤其在半干旱偏旱区,造林加速土壤干燥化,不利于生态系统的可持续发展。因此,有必要采取科学合理的管理措施来调控人工林的土壤水分状况。鱼鳞坑、修梯田等水土保持工程措施可以有效拦截降雨、增加土壤水分入渗,改善人工林土壤水分状况;同时可以考虑调整人工植被密度,选择合理的人工植被配置模式,辅以有效的水土保持工程措施,在达到植被恢复的同时尽可能减少对土壤水分的消耗。此外,降水通过补给浅层土壤水来改变植物的水分利用模式,进而影响植物对深层土壤水分的利用,因此不同降雨年型人工林深层耗水规律如何有待进一步深入研究。

### 4 结论

(1) 黄土高原不同气候区不同土地利用方式 0—800 cm 土层土壤平均含水量均表现为农地>刺槐林>柠条林。其中,半干旱偏旱区(子洲)、半干旱区(延安)及半湿润区(长武)的刺槐林平均土壤含水量分别为 6.64%,9.42%,11.01%,柠条林平均土壤含水量分别为 6.38%,12.52%,11.41%。

(2) 3 个气候区刺槐林和柠条林在 200—800 cm 土层均发生了不同程度的土壤干燥化。两种人工林 200—800 cm 土层的深层耗水量、深层耗水速率最大值均出现在半干旱偏旱地区,其值分别为 808 mm,698 mm 以及 32.33 mm/a,31.76 mm/a,该区的深层土壤干燥化最严重。

(3) 影响植被深层土壤含水量的因素主要有植物根系和土壤质地。不同地区同一植被根系分布情

况存在差异,半干旱偏旱和半干旱区的刺槐林和柠条林根系分布均较半湿润区发达。不同地区的同一植被土壤质地也存在明显差异,半湿润区土壤黏粒含量最高,砂粒含量最低,半干旱偏旱区相反;黏粒含量与土壤含水量呈正相关,一定程度上,黏粒含量越高,土壤含水量越高。

#### 参考文献:

- [1] Chen L, Wei W, Fu B, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective[J]. *Progress in Physical Geography*, 2007,31(4):389-403.
- [2] 李玉山,黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].*生态学报*,1983,3(2):91-101.
- [3] Yang F, Feng Z, Wang H, et al. Deep soil water extraction helps to drought avoidance but shallow soil water uptake during dry season controls the inter-annual variation in tree growth in four subtropical plantations[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017,234/235:106-114.
- [4] Jian S, Zhao C, Fang S, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015,206:85-96.
- [5] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2015,9(1):38-41.
- [6] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(11):1019-1022.
- [7] 王志强,刘宝元,张岩,等.不同退耕还林类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J].*地理学报*,2008,63(7):703-713.
- [8] 陈洪松,王克林,邵明安,等.黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J].*林业科学*,2005,41(4):155-161.
- [9] 张晨成,邵明安,王云强,等.黄土区切沟对不同植被下土壤水分时空变异的影响[J].*水科学进展*,2016,27(5):679-686.
- [10] 郭忠升,邵明安,黄土丘陵半干旱区柠条林锦鸡儿人工林对土壤水分的影响[J].*林业科学*,2010,46(12):1-7.
- [11] 王力,邵明安,李裕元,陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究[J].*林业科学*,2004,40(1):84-91.
- [12] 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:地球科学*,2009,39(9):1297-1303.
- [13] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012,16(9):3199-3217.
- [14] Adams W A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1973,24(1):10-17.
- [15] 杨文治,黄土高原土壤水资源与植树造林[J].*自然资源学报*,2001,16(5):433-438.
- [16] 杨磊,卫伟,莫保儒,等.半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J].*生态学报*,2011,31(11):3060-3068.
- [17] Duan L, Huang M, Zhang L, et al. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016,537:356-366.
- [18] Gao X, Li H, Zhao X, 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] Wang Y, Shao M, Zhu Y, 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.
- [20] 索立柱,黄明斌,段良霞,等.黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素[J].*生态学报*,2017,37(6):2045-2053.
- [21] Li L, Gao X, Wu P, et al. Soil water content and root patterns in a rain-fed jujube plantation across stand ages on the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28:207-216.
- [22] 王迪海,赵忠,李剑,土壤水分对黄土高原主要造林树种细根表面积季节动态的影响[J].*植物生态学报*,2010,34(7):819-826.
- [23] Collins D B G, Bras R L. Plant rooting strategies in water-limited ecosystems [J]. *Water Resources Research*, 2007,43(6):1-10.
- [24] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997,94(14):7362-7366.
- [25] Oliveira R S, Bezerra L, Davidson E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil[J]. *Functional Ecology*, 2005,19(4):574-581.
- [26] Fang X, Zhao W, Wang L, et al. Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016,20(8):3309-3323.
- [27] 兰志龙,潘小莲,赵英,等.黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤含水量的影响[J].*应用生态学报*,2017,28(3):847-855.
- [28] 程积民,万惠娥,王静,等.半干旱区柠条林生长与土壤水分消耗过程研究[J].*林业科学*,2005,41(2):37-41.
- [29] Liang H, Xue Y, Li Z, 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.