

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.022.

马雅莉, 刘喜东, 张立强, 等. 白于山区土壤干燥化对人工林植被恢复 40 年的响应特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 192-198.

Ma Yali, Liu Xidong, Zhang Liqian, et al. Response Characteristics of Soil Desiccation to Plantation Vegetation Restoration in Baiyu Mountain Area for 40 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 192-198.

# 白于山区土壤干燥化对人工林植被恢复 40 年的响应特征

马雅莉<sup>1</sup>, 刘喜东<sup>1</sup>, 张立强<sup>1</sup>, 张晨晨<sup>1</sup>, 高东治<sup>1</sup>,

张艳<sup>1</sup>, 段永强<sup>2</sup>, 张彦昶<sup>3</sup>, 乔江波<sup>4</sup>, 石长春<sup>1,5</sup>

(1.陕西省林业科学院, 西安 710082; 2.靖边县林业局, 陕西 靖边 718500;

3.定边县林业局, 陕西 定边 718699; 4.西北农林科技大学水土保持研究所,

陕西 杨凌 712100; 5.陕西榆林毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** [目的] 确定白于山区典型人工林的土壤干燥化特征, 为白于山区人工林的合理选择和可持续发展提供理论依据。[方法] 选取植被恢复 40 年的人工林(河北杨、油松、樟子松)为研究对象, 以荒草地作为对照, 采用人工土钻法研究人工林 0—5 m 土壤的干燥化特征及影响因素。[结果] (1) 不同人工林土壤平均含水量依次为荒草地(4.95%)>樟子松林(4.49%)>河北杨林(4.39%)>油松林(2.44%)。(2) 不同人工林的土壤干层均存在且形成深度和干层厚度基本一致, 但干层内土壤平均含水量不同, 油松最低, 荒草地最高。(3) 不同人工林的土壤干燥化指数依次为油松林(69.75%)>河北杨林(28.83%)>樟子松林(26.73%)>荒草地(17.05%)。(4) 相关性分析和多元逐步线性回归模型表明, 粉粒、砂粒和深度分别是影响樟子松、油松和河北杨土壤干燥化特征的主要因素。[结论] 樟子松林在种植 40 年后土壤干燥化程度最低, 可作为白于山区典型人工林造林的最优选择。

**关键词:** 白于山区; 人工林; 土壤干燥化

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0192-07

## Response Characteristics of Soil Desiccation to Plantation Vegetation Restoration in Baiyu Mountain Area for 40 Years

Ma Yali<sup>1</sup>, Liu Xidong<sup>1</sup>, Zhang Liqiang<sup>1</sup>, Zhang Chenchen<sup>1</sup>, Gao Dongzhi<sup>1</sup>,

Zhang Yan<sup>1</sup>, Duan Yongqiang<sup>2</sup>, Zhang Yanchang<sup>3</sup>, Qiao Jiangbo<sup>4</sup>, Shi Changchun<sup>1,5</sup>

(1. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an, Shaanxi 710082, China; 2. Jingbian County Forestry Bureau, Jingbian,

Shaanxi 718500, China; 3. Dingbian County Forestry Bureau, Dingbian, Shaanxi 718699, China; 4. Institute of Soil

and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. State Long-term Observation

and Research Station for Maowusu Study Desert Ecosystem in Yulin of Shanxi, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to determine the soil desiccation characteristics of a typical plantation in the Baiyu Mountain area, and to provide theoretical basis for reasonable selection and sustainable development of plantation in Baiyu Mountain area. [Methods] The plantations with 40 years of vegetation restoration (*Populus × hopeiensis* Hu & Chow, *Pinus tabulaeformis*, and *Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv.) were taken as the samples. The barren grassland was taken as the control. Artificial soil drilling method was used to study the drying characteristics and influencing factors of 0—5 m soil in the

收稿日期: 2023-07-14

修回日期: 2023-12-02

资助项目: 陕西省科学技术厅青年项目(2021JQ-168); 陕西省林业科学院科技创新计划(SXJK2021-0104, SXJK2021-0207); 陕西林业科技创新重点专项(SXJK2023-02-11); 陕西林业科技创新青年人才培养专项(SXJK2023-06-6); 陕西省哲学社会科学专项(2022HZ1757、2022HZ1789); 陕西省榆林市发展和改革委员会 2023 年度市本级政府投资项目“陕北地区退化生态系统治理与修复植物配置模式研究”(2023-YLSFGW-60); 榆林市科技计划项目(YF-2022-9, YF-2022-11); 榆林市委、市政府专项“榆林防止二次沙化与水土流失调查研究”(榆政财资发[2021]47 号)

第一作者: 马雅莉(1995—), 女, 山西长治人, 硕士, 工程师, 主要从事森林培育研究。E-mail: mayalisary@163.com

通信作者: 石长春(1974—), 男, 陕西榆林人, 学士, 正高级工程师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 468058917@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

artificial forest. [Results] (1) The average soil water content of different plantations was in the order: grassland (4.95%) > *Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv. (4.49%) > *Populus × hopeiensis* Hu & Chow (4.39%) > *Pinus tabulaeformis* (2.44%). (2) The soil dry layer existed in different plantations and the formation depth and thickness of the dry layer were basically the same, but the average water content of the soil in the dry layer was different, the lowest value was observed in *Pinus tabulaeformis* and the highest value was observed in the wasteland. (3) The soil desiccation index of different plantations followed the order: *Pinus tabulaeformis* (69.75%) > *Populus × hopeiensis* Hu & Chow (28.83%) > *Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv. (26.73%) > grassland (17.05%). (4) Correlation analysis and multiple linear regression model showed that silt, sand and depth were the main factors affecting soil desiccation characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv., *Pinus tabulaeformis* and *Populus × hopeiensis* Hu & Chow, respectively. [Conclusion] The soil desiccation degree of *Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv. was the lowest after 40 years of planting, *Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv. could be used as the best choice for afforestation of typical plantation in Baiyu Mountain area.

**Keywords:** Baiyu Mountain area; plantation forest; soil desiccation

黄土高原 2/3 面积处于干旱半干旱地区,生态环境脆弱,水土流失严重<sup>[1-2]</sup>。为了改善生态环境,1999 年国家实施了退耕还林(草)工程,大量人工林种植,植被覆盖率显著增加,水土流失减少,生态环境明显改善<sup>[3-4]</sup>。然而,在黄土高原植被建设过程中,由于不合理的种植及配置方式,植被大量消耗深层土壤水,且有限的降水量无法有效补给深层土壤水,导致深层土壤干燥化严重,形成了深厚的土壤干层<sup>[5-6]</sup>。土壤干层的存在会切断或减缓土壤水分上下层之间的交换,导致“土壤水库”功能减弱,土壤环境恶化,土壤质量降低,植被退化等,进而影响植被的水土保持、水源涵养、固碳等生态系统服务功能<sup>[7-8]</sup>。因此深入揭示黄土高原人工林土壤干燥化特征对于黄土高原生态环境的可持续发展具有重要意义。

目前相关学者关于黄土高原人工林土壤干燥化特征进行了大量研究<sup>[9-11]</sup>,如苟清平等<sup>[12]</sup>在陕北黄土区发现与荒草地相比,不同林地(小叶杨、山杏、沙棘、油松和刺槐)深层土壤水均被过度消耗,形成了土壤干层,其中刺槐、小叶杨和山杏土壤干层达到了 10 m 以下,植被是深层土壤水分的主要影响因素。包维斌等<sup>[13]</sup>在宁夏宁南山区发现草地、弃耕地和农地未出现土壤干层,林地和灌木出现了中等和轻度干燥化,土地利用类型、土壤和植被养分是影响土壤干燥化的主控因子;刘丙霞等<sup>[14]</sup>在黄土高原北部基于长期研究发现:种植多年的苜蓿和柠条会导致深层土壤干燥化,且随生长年限增加,土壤干化程度加剧,而土壤水分消耗速率呈现降低的趋势;Wang 等<sup>[15]</sup>在区域尺度上调查了黄土高原土壤干层的分布特征发现,黄土高原土壤干层分布广泛,且具有独特的分布格局,具体表现为在黄土高原西部和中部地区土壤干层深度较

厚,而在黄土高原沿黄灌区、内陆灌区、汾河灌区、南部关中平原等地,土壤干层较薄。综上,相关学者对于黄土高原人工林土壤干燥化特征的研究主要集中在不同区域、不同植被类型等方面,而关于同一植被恢复年限下不同人工林的干燥化特征报道较少,尤其是植被恢复 20 a 以上的人工林。

白于山区地处黄土高原西北部,植被稀少,黄土裸露、土壤侵蚀严重,是陕西省植被盖度最差、生态环境最为脆弱的地区之一,在生态治理中占有重要区位<sup>[16]</sup>。了解该区典型人工林对长时间植被恢复的响应特征,对人工林的合理选择具有重要意义。基于此,本研究通过野外调查选取植被恢复 40 a 的河北杨、樟子松、油松典型人工林为研究对象,荒草地作为对照,分析不同人工林 0—5 m 的土壤水分分布特征,定量评价土壤干层指标和干燥化程度,揭示其影响因素,以期对白于山区生态修复及重建提供理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原北部水蚀风蚀交错区,由黄土高原向毛乌素沙漠过渡、森林草原向典型干旱草原过渡的中间地带(图 1)。气候类型为暖温带大陆性季风气候,冬春季干冷多风,夏季温暖湿润,海拔 1 800~1 907 m。降雨稀少,年均降雨量约 349 mm,年内降雨分布不均,7—9 月降雨量占全年降雨量的 60% 以上,且多以暴雨为主。土壤类型以黄绵土、坝地淤积土和风沙土为主。主要的人工林有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、河北杨(*Populus hopeiensis* Hu & Chow)等。

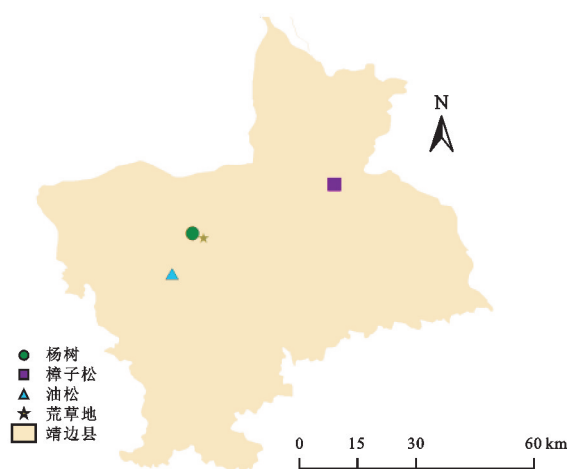


图 1 研究地点示意图

Fig. 1 Map of the research area

表 1 不同人工林的基本信息

Table 1 The basic information of different plantations

植被类型	海拔/m	纬度 N	经度 E	树高/m	胸径/cm	郁闭度/%	林龄/a	栽植密度	土壤类型
河北杨	1500	37°31'28"	108°39'01"	5.62	8.49	60	40	3.75 m×1.94 m	砂壤土
油松	1520	37°25'53"	108°36'11"	10.33	15.50	85	41	6.48 m×2.00 m	砂壤土
樟子松	1310	37°25'30"	108°58'05"	4.77	14.01	80	41	1.72 m×1.68 m	砂壤土
荒草地	1510	37°31'28"	108°39'01"	—	—	—	—	—	砂壤土

### 1.3 土壤干层量化指标

土壤干层的定义(DSL, Dried soil layers)是指位于多年平均降水入渗深度以下,因气候变化、地表植被过度消耗深层土壤储水导致水分失衡,在土壤剖面形成的干燥化土层,其湿度上限是土壤稳定持水量,下限为土壤凋萎系数<sup>[17]</sup>。通常认为土壤稳定持水量约等于 60% 的田间持水量。考虑到本研究区域土壤类型以风沙土为主,本文的田间持水量取 9.6%,凋萎系数取 1%<sup>[18-19]</sup>。

常用的土壤干层量化指标有(1)土壤干层厚度(DSL-T, Dried soil layers-Thickness);(2)干层内的平均土壤含水(DSL-MSWC, Dried soil layers-Mean soil wayer contents);(3)土壤干层形成的起始深度

### 1.2 样地选取和土壤采样

研究地点位于陕西省榆林市靖边县,地处白于山区,通过野外调查并选取相同林龄的典型人工林河北杨、油松和樟子松作为研究对象(林龄通过访问当地的居民获取),以荒草地作为对照,选取地形一致、平坦地带作为试验样地,且土壤类型均为砂壤土。林地采用 10 m×10 m 的样地,荒草地采用 1 m×1 m 的样地调查植被生长状况(表 1)。在每块样地沿“S”型打钻,钻孔 3 个作为重复。利用土钻获取 0—5 m 的土壤样品,0—1 m 间隔 10 cm,2—5 m 间隔 20 cm。取出的土样一部分置于铝盒中用于土壤质量含水量的测定(精确到小数点后两位),另一部分用于土壤基本理化性质的测定。采样时间为 2023 年 3 月 17 日—2023 年 4 月 19 日。

(DSL-FD, Dried soil layers-Forming depth)。详细的计算公式见文献<sup>[19]</sup>。

### 1.4 土壤干燥化强度评价方法

为了定量描述不同植被类型的土壤干燥化程度,本研究采用土壤干燥化指数 SDI(soil desiccation index)来量化不同人工林的土壤干燥化强度<sup>[20-21]</sup>。

$$SDI = (1 - \frac{SM - SWM}{SSM - SWM}) \times 100\% = \frac{SSM - SM}{SSW - SWM} \times 100\% \quad (1)$$

式中:SDI 是土壤干燥化指数(%);SM 是土壤湿度(%);SWM 是凋萎湿度(%);SSM 是土壤稳定湿度(%). 土壤湿度用土壤质量含水量表示(%);根据 SDI 大小,土壤干燥化强度划分等级见表 2。

表 2 土壤干燥化大小划分标准

Table 2 Classification standard of soil desiccation intensity

土壤干燥化指数	范围					
	SDI≥100%	75%≤SDI<100%	50%≤SDI<75%	25%≤SDI<50%	0≤SDI<25%	SDI<0
土壤干燥化强度等级	极度干燥化	强烈干燥化	严重干燥化	中度干燥化	轻度干燥化	无干燥化

## 2 结果与分析

### 2.1 不同人工林 0—5 m 土层土壤含水量描述性统计分析

不同人工林的土壤平均含水量为荒草地(4.95%)>樟子松(4.49%)>河北杨(4.39%)>油松(2.44%)(表 3),平均含水量在样点间差异显著( $p<0.05$ )。4

个样点的土壤水分均表现为中等变异,从大到小分别为河北杨(69.96%)>樟子松(65.69%)>油松(47.19%)>荒草地(27.59%)(表 3),整体上林地的变异系数大于荒草地。这主要是由于林地根系深扎,对土壤水分影响不仅表现在浅层,而且影响深层,而荒草地主要影响在浅层,导致林地土壤水分较大的变异系数。

表 3 不同植被类型下土壤水分的统计特征值

Table 3 Statistical characteristic values of soil moisture for different vegetation types

植被类型	极小值/%	极大值/%	均值/%	标准差	变异系数/%
河北杨	1.51	11.00	4.39	3.07	69.96
油松	1.07	5.62	2.44	1.15	47.19
樟子松	1.69	13.91	4.49	2.95	65.69
荒草地	3.05	8.29	4.95	1.37	27.59

2.2 不同人工林土壤水分的垂直分布特征

随着土层深度的增加,河北杨、樟子松和荒草地土壤水分呈现先降低后趋于稳定的趋势,油松整体上趋于平稳,2.5 m 后土壤水分较 0—2.5 m 降低(图 2)。由图知,河北杨和油松 5 m 处土壤水分仍未出现缓解的趋势,因此耗水深度可能超过 5 m,而樟子松和荒草地土壤水分从 3 m 开始显著增加,推断耗水深度主要集中在 3 m 以内。根据土壤干层的定义,土壤干层指多年降水入渗层以下,王云强<sup>[19]</sup>研究定义土壤干层的上边界土层为 1.0 m,因为 0—1.0 m 土层的土壤水分通常能够通过当年的降水补给,因此,我们将土壤干层的起始深度定为 1.0 m。由图 2 可知 1.0 m 以下不同植被类型均为土壤干层,即不同植被类型土壤干层形成起始深度均为 1.0 m,且 1.0—5.0 m 几乎全部为土壤干层。土壤干层内平均含水量为荒草地(4.11%)>樟子松(3.39%)>河北杨(2.44%)=油松(2.44%)(表 4),可见油松和河北杨深层土壤水分亏缺最严重。

2.3 不同人工林土壤干燥化程度

不同人工林的平均土壤干燥化指数由大到小依次为油松(69.75%)>河北杨(28.83%)>樟子松(26.73%)>荒草地(17.05%)(表 5),其中油松属于严重干燥化,河北杨和樟子松属于中度干燥化,荒草地属于轻度干燥化。可见油松土壤干燥化最严重。河北杨和油松强烈干燥层厚度占比最大,分别为 2.4 m 和 2.8 m,而樟子松和荒草地干燥层厚度占比最大的是轻度干燥层和中度干燥层,均为 2.0 m。由于不同

人工林恢复年限相同,因此可以得出油松的年平均干燥化速度最高,樟子松的年平均干燥化速度最低。

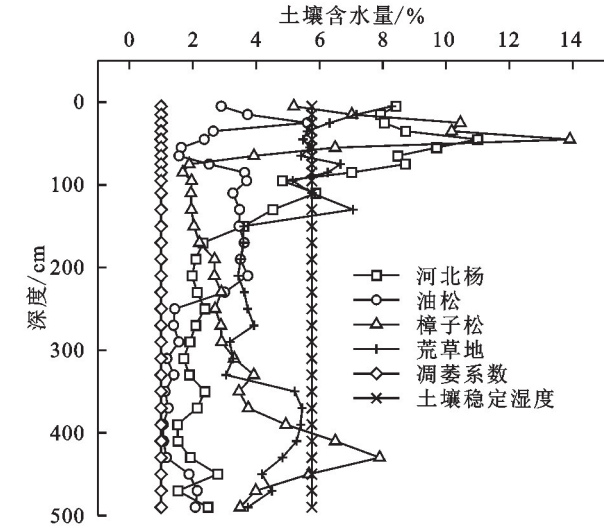


图 2 不同植被类型土壤水分分布  
Fig. 2 Vertical distributions of soil water of different vegetation types

表 4 不同植被类型土壤干层指标

Table 4 Dried soil layers indicators of different vegetation types

植被类型	土壤干层 起始深度/m	干层 厚度/m	干层内平均 含水量/%
河北杨	1.0	4.0	2.44
油松	1.0	4.0	2.44
樟子松	1.0	3.6	3.39
荒草地	1.0	3.8	4.11

表 5 不同植被类型土壤干燥化指数

Table 5 Soil desiccation index of different vegetation types

植被类型	平均干燥 化指数/%	土壤干燥 化强度	强烈 干燥层/cm	严重 干燥层/cm	中度 干燥化/cm	轻度 干燥化/cm	无干燥化/ cm
河北杨	28.83	中度干燥化	240	100	40	10	110
油松	69.75	严重干燥化	280	80	130	10	0
樟子松	26.73	中度干燥化	0	160	100	200	40
荒草地	17.05	轻度干燥化	0	60	200	150	90

2.4 土壤干燥化特征的影响因素

为了揭示影响不同人工林土壤干燥化特征的影响因素,对不同人工林土壤水分与土壤属性进行了相关性分析(图 3)。由图知,不同人工林土壤水分与土壤属性相关性不同。樟子松土壤水分与全氮和 pH 无显著相关性( $p>0.05$ ),而与深度、容重、有机质、全

磷、砂粒、粉粒和黏粒均存在显著相关性( $p<0.05$ )。油松土壤含水量与粉粒和黏粒显著正相关( $p<0.05$ ),而与砂粒显著负相关( $p<0.05$ )。河北杨土壤含水量与深度显著负相关( $p<0.05$ ),而与土壤养分(有机质、全氮和全磷)显著正相关( $p<0.05$ )。为了进一步揭示土壤干燥化特征的影响因素,基于逐步线性回归模型对有显著相



关性的变量与土壤水分进行了模拟(表 6),结果表明:影响樟子松、油松和河北杨土壤干燥化特征的主要因素分别是粉粒、砂粒和深度,分别解释了土壤干燥化特征变异的 91.5%,39.9%和 64.3%。

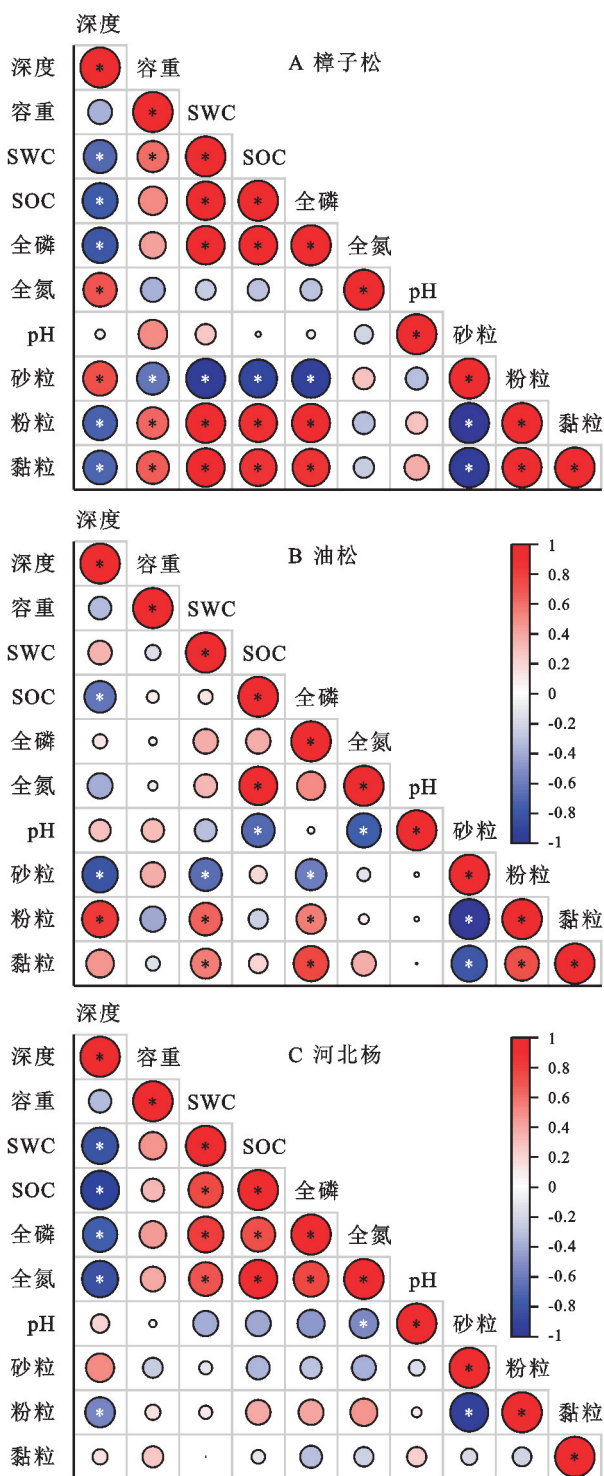


图 3 不同人工林土壤水分与土壤基本性质的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between soil water content and soil basic properties

### 3 讨论

黄土高原 2/3 处于干旱半干旱地区,土壤水分是物

质循环和能量流动的核心。自黄土高原实施退耕还林还草以来,植被恢复明显,土壤水分受到不同程度的影响,许多学者对其进行了大量和深入研究<sup>[22-24]</sup>,目前关于黄土高原不同植被利用类型对土壤水分的影响形成的共识是林地影响最大,草地次之,农地最小<sup>[24-25]</sup>。如王云强等<sup>[26]</sup>在区域尺度上对整个黄土高原地区不同土地利用类型 0—5 m 土壤水分进行了研究,得出土壤平均含水量依次为农地>草地>林地。林国伟等<sup>[27]</sup>也发现黄土高原白草塬不同土地利用类型 0—10 m 平均土壤含水量表现为农地>荒草地>草地>林地。本研究的土壤平均含水量大小也表现为荒草地>林地,这与目前的共识基本一致。与土壤水分类似,本研究得出不同人工林深层土壤干层起始深度和干层厚度基本一致,而干层内土壤平均含水量不同,依次为荒草地>樟子松>油松=河北杨,即林地的深层土壤水分亏缺程度要高于荒草地,这与众多研究者的结果一致<sup>[15,25,28]</sup>。然而也有研究结果与目前形成的共识不同,如刘丙霞等<sup>[14]</sup>比较了黄土高原北部人工灌草植被的土壤干燥化过程,发现苜蓿从第 5 年开始 1 m 以下形成了土壤干层,厚度达到了 2.6 m,而灌木柠条从第 6 年才开始形成,且厚度只有 1.4 m。这主要是由于土壤干层不仅受到植被恢复类型的影响,而且受到气候因素(降水、温度等)、人工林结构、土壤属性等因素的影响,导致了不一致的结果。

表 6 不同人工林土壤含水量多元逐步回归方程

Table 6 Multiple stepwise regression equation for SWC of different artificial forests

人工林	模拟方程	决定系数 $R^2$	$p$
樟子松	$SWC = 1.63 + 0.18Silt$	91.5	<0.001
油松	$SWC = 4.64 - 0.02Sand$	39.9	<0.001
河北杨	$SWC = 10.75 - 0.05Depth$	64.3	<0.001

本研究得出 3 种植被类型中的油松平均干燥化速度最高,樟子松最低。苟清平等<sup>[12]</sup>基于相同方法和指标对陕北黄土区不同林地(山杏、油松、刺槐、河北杨和沙棘)的平均干燥化速度分析也得出油松的平均干燥化速度最高,达到了 44.7 mm/a。可见在该地区相同的气候和地形条件下,油松年耗水量最高。因此在未来的物种选择中,应避免种植耗水量高的油松,选择樟子松耗水量低的树种。此外,本研究发现该区人工林深层均存在不同程度的水分亏缺,在未来人工林深层土壤干燥化可能加剧且面临死亡的风险。因此,为了该地区人工林的可持续发展,应该及时地对不同人工林进行抚育管理,如间伐、浇水等。

相关性分析和多元逐步回归模型表明得出不同人工林土壤水分的影响因素不同,这与众多研究结果

一致,如 Wang 等<sup>[29]</sup>在区域尺度上分析了黄土高原不同人工林 0—21 m 土壤水分的垂直分布特征及影响因素,发现不同地区的草地、乔木林或灌木林土壤水分影响因素不同,且同一地区的草地、乔木林或灌木林土壤水分影响因素也不同。熊瑛楠等<sup>[30]</sup>以晋西黄土区 3 种典型植被恢复类型为研究对象(自然恢复的次生林、刺槐和油松),发现不同植被类型下土壤水分(0—100 cm)与土壤基本理化性质相关性不同。这主要是由于一方面土壤属性本身存在空间异质性,另一方面不同植被类型对土壤水分影响不同<sup>[25]</sup>,导致了不同人工林土壤水分的影响因素不同。

## 4 结论

(1) 荒草地土壤平均含水量最高,不同人工林中樟子松最高,河北杨次之,油松最低。

(2) 不同人工林土壤干燥化的影响因素不同,樟子松、油松和河北杨土壤干燥化特征的主要因素分别是粉粒、砂粒和深度。

(3) 本研究表明,樟子松林在种植 40 a 后土壤干燥化程度最低,可作为白于山区典型人工林造林的最优选择。

### 参考文献(References):

- [1] 朱显谟.黄土高原国土整治“28 字方略”的理论与实践[J].中国科学院院刊,1998,13(3):232-236.  
Zhu X M. Theory and practice of ‘28-character general plan’ for land consolidation in Loess Plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 1998, 13(3): 232-236.
- [2] An Z S, Porter S, Kukla G, et al.最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据[J].科学通报,1990,41(7):529-532.  
An Z S, Porter S, Kukla G, et al. Evidence for magnetic susceptibility of monsoon changes in the Loess Plateau during the last 130,000 years[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 41(7): 529-532.
- [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: 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.  
Liu G B, Shangguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 11-19.
- [5] 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.
- [6] 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.  
Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 14-22.
- [7] Chen L D, Wei W, Fu B J, 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.
- [8] Czerepko J. A long-term study of successional dynamics in the forest wetlands[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(3/4): 630-642.
- [9] 易小波,贾小旭,邵明安,等.黄土高原区域尺度土壤干燥化的空间和季节分布特征[J].水科学进展,2017,28(3):373-381.  
Yi X B, Jia X X, Shao M A, et al. Regional spatial and seasonal characteristics of soil desiccation on the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 373-381.
- [10] 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.  
Zhang C C, Shao M A, Wang Y Q, et al. Effects of gullies on the spatiotemporal variability of soil-water under different vegetation types on the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 679-686.
- [11] 王力,邵明安,张青峰.陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征[J].应用生态学报,2004,15(3):436-442.  
Wang L, Shao M A, Zhang Q F. Distribution and characters of soil dry layer in North Shaanxi Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 436-442.
- [12] 苟清平,朱清科,李依璇,等.陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应[J].生态学报,2019,39(19):7161-7168.  
Gou Q P, Zhu Q K, Li Y X, et al. Soil desiccation effects under different vegetation types in the Loess Region of Northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7161-7168.
- [13] 包维斌,王幼奇,刘鹏,等.宁南山区不同土地利用类型下土壤水分分布及其干燥化特征[J].草地学报,2020,28(3):775-783.  
Bao W B, Wang Y Q, Liu P, et al. Characteristics of soil desiccation and soil water distribution in different land types in mountainous area of southern Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(3): 775-783.
- [14] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被

- 土壤干燥化过程研究[J].生态学报, 2020, 40(11): 3795-3803.
- Liu B X, Ren J, Shao M A, et al. The process of soil desiccation under artificial shrub and grass in northern Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3795-3803.
- [15] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010, 159(1/2): 99-108.
- [16] 白岗栓. 白于山山区大扁杏适应性评价及花期延后研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- Bai G S. Evaluation of Adaptability and the research about postponing florescence of almond-apricot in Baiyushan hilly area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2005.
- [17] 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.
- Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91-101.
- [18] 赵炜, 赵举, 魏占民, 等. 气化渣改良风沙土对土壤水分物理性质的影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 64-69.
- Zhao W, Zhao J, Wei Z M, et al. Effect of aeolian sandy soil improved by gasification slag on soil water physical properties [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 64-69.
- [19] 王云强. 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- Wang Y Q. Spatial distribution and influence factors of dried soil layers across the Loess Plateau [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [20] 曹裕, 李军, 张社红, 等. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 72-79.
- Cao Y, Li J, Zhang S H, et al. Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and landform zones of Loess Plateau in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(15): 72-79.
- [21] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1429-1445.
- Li J, Chen B, Li X F, et al. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [22] 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.
- [23] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199: 102962.
- [24] 杨磊, 张子豪, 李宗善. 黄土高原植被建设与土壤干燥化: 问题与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7382-7388.
- Yang L, Zhang Z H, Li Z S. Effects of large-scale re-vegetation on soil desiccation in the Loess Plateau: Problems and perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7382-7388.
- [25] 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.
- Ding W B, Wang F. Effects of vegetation construction on soil moisture in Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13): 5531-5542.
- [26] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 310-316.
- Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(3): 310-316.
- [27] 林国伟, 李志, 李晨曦, 等. 黄土高原白草原土壤水分特征及对土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 32-38.
- Lin G W, Li Z, Li C X, et al. Characteristics of soil water and response to land use changes on Baicao loess tableland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 32-38.
- [28] 刘新春, 赵勇钢, 刘小芳, 等. 晋西黄土区典型人工植被生长季深层土壤储水量与细根生物量分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(1): 95-101.
- Liu X C, Zhao Y G, Liu X F, et al. Distribution of moisture storage and fine root biomass in deep soil layers under typical artificial vegetation during the growing season in the Loess Plateau of western Shanxi, China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(1): 95-101.
- [29] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21 m profile on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2013(193/194): 300-310.
- [30] 熊瑛楠, 冯天骄, 王平, 等. 晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 228-237.
- Xiong Y N, Feng T J, Wang P, et al. Effects of long-term artificial forest restoration on soil moisture and nutrient characteristics in the loess area of western Shanxi Province, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 228-237.