

黄土高原不同林龄刺槐林土壤水分亏缺程度

费洪岩¹, 童倩¹, 万传宇¹, 潘若鹏¹, 韩凤朋^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2.中科院水利部水土保持研究所,水利部水土保持生态工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100)

摘要:通过定点监测刺槐林土壤水分含量,探究不同林龄刺槐林土壤水分分布与亏缺程度。采用空间代替时间的研究方法,选择 10,15,25,40 年人工刺槐林为研究对象,农地(0 年)为对照,调查分析 0—200 cm 土层土壤水分分布情况。结果表明:各样地平均土壤含水量大小顺序为农地(18.80%)>10 年刺槐林(16.43%)>15 年刺槐林(15.47%)>40 年刺槐林(13.87%)>25 年刺槐林(13.38%);不同林龄刺槐林土壤水分均处于亏缺状态,随着林龄增加,土壤水分亏缺呈增大趋势,平均土壤水分亏缺程度为 19.38%,25 年刺槐林土壤水分亏缺程度最大(27.76%),40 年时略有恢复(25.80%);表层土壤水分变异程度最大,变异程度随林龄增加呈增大趋势,速变层、活跃层、次活跃层和相对稳定层 4 个层次只在 40 年刺槐林均有出现。研究结果可为黄土高原植被生态恢复和科学经营人工林提供一定的理论基础。

关键词:黄土高原;刺槐林;不同林龄;土壤水分;亏缺程度

中图分类号:S152.7; S792.27 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)05-0240-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.05.030

Degree of Soil Moisture Deficit of *Robinia pseudoacacia* Plantations at Different Ages on the Loess Plateau

FEI Hongyan¹, TONG Qian¹, WAN Chuanyu¹, PAN Ruopeng¹, HAN Fengpeng^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Soil and Water Conservation Ecological Engineering Technology Research Center, Ministry of Water Resources, Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Soil moisture content of *Robinia pseudoacacia* plantation was monitored at fixed points to investigate the distribution and deficit degree of soil moisture of *R. pseudoacacia* plantation at different ages. Using the method of spatial sequence instead of time successional sequence, 10, 15, 25 and 40 years *R. pseudoacacia* plantations were selected as the research objects, and farmland (0 years) was served as control to investigate and analyze the distribution of soil moisture content in the 0—200 cm soil layer. The results showed that the average soil moisture content was in order of 0 years (18.80%)>10 years (16.43%)>15 years (15.47%)>40 years (13.87%)>25 years (13.38%). The soil moisture deficit was found in all stands and showed an increase trend with the increasing of stand age. The average degree of soil moisture deficit was 19.38%, the highest value was observed in the 25 years plantation (27.76%), and there was a slight recovery in the 40 years plantation (25.80%). The variation degree of surface soil water was the largest, and it increased with the increasing of stand age. The four levels of rapid change layer, active layer, sub-active layer and relatively stable layer were only observed in the 40 years plantation. The above research results could provide a certain theoretical basis for vegetation ecological restoration and scientific management of plantations on the Loess Plateau.

Keywords: the Loess Plateau; *Robinia pseudoacacia* plantation; different stand ages; soil moisture; degree of deficit

收稿日期:2021-12-24
资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504504,2016YFA0600801);中国科学院“西部青年学者”项目(XAB2016A04);中国科学院 STS 项目(KFJ-STQ-QYZD-177);国家自然科学基金项目(41471437)
第一作者:费洪岩(1998—),男,硕士研究生,主要从事土壤水分循环研究。E-mail:fhyan13563317149@163.com
通信作者:韩凤朋(1980—),男,副研究员,博士生导师,主要从事土壤环境化学研究。E-mail:hanxiangzi007@163.com

黄土高原地区水土流失严重且降水稀少,土壤水分成为限制该地区植被恢复及自然生态环境重建的一个重要因子^[1]。在过去的几十年,为了满足人们日益增长的口粮需求,改善居民的生活质量,黄土高原坡地被大面积开垦,使得坡地具有植被覆盖率低、水土流失严重的特点^[2]。进入新世纪,为响应国家号召,践行“绿水青山就是金山银山”的生态理念,黄土高原地区开展了全面的植被恢复和退耕还林工作。在这一过程中,大部分坡地农田被转化为相应的草地、灌木林地和乔木林地,这种转化产生了很多积极的环境效益,如涵养水源、改善土壤和防风固沙等^[3-4]。其中刺槐便是黄土高原还林树种中极为重要的一种,它原产于北美,为豆科、刺槐属落叶乔木,现在我国西北地区被广泛引入种植^[5]。然而,与原有的天然植被相比,引入的人工植被在水分利用方面表现出明显的不适宜性,在引进植物耗水特性不明确的前提下,高密度种植造成过度消耗土壤水分,从而导致土壤水资源的亏缺^[6],尤其在干旱、半干旱的黄土高原地区,大规模的高密度人工造林造成更加严重的土壤干燥化,反而给当地的水资源利用造成巨大压力^[7-8]。

针对人工造林引起的黄土高原土壤水分亏缺问题,已有学者开展研究和探讨,并发现引入人工林的土壤下出现明显的水分亏缺,甚至局部形成干层。张建军等^[9]研究发现,人工林地和次生林地均造成土壤水分的亏缺,且人工林地主要消耗深层的土壤水分;赵丹阳等^[3]以晋西黄土区蔡家川流域 5 种典型林地为研究对象,结果表明,不同植被的耗水量依次为刺槐林地>油松×刺槐混交林地>侧柏林地>油松林地>次生林地;Nan 等^[10]通过 1 次采样,分析了黄土高原中部地区 5,20,40 年林龄刺槐土壤水分含量变化情况表明,随刺槐年限的增加,土壤水分含量逐渐减少。黄土高原地区不合理的人工造林造成土壤水分亏缺,但以往研究多从不同立地条件^[11-13]或单一林龄^[14]等方面展开,时间跨度长短不一,不能反映刺槐

林在整个生长阶段中的土壤水分变化情况。本研究结合刺槐生长特性,选择 10,15,25,40 年刺槐林为研究对象,农地(0 年)为对照,探究刺槐林在不同生长阶段土壤水分的亏缺情况,为深入认识人工造林对土壤水分的消耗提供进一步参考,对未来黄土高原退耕还林和科学经营人工林有所启示。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市宝塔区(109°14′10″—110°50′43″E,36°11′33″—37°02′05″N),地处陕北黄土高原中部丘陵沟壑区与高原沟壑区相连的过渡地带,素有“塞上咽喉”“秦地要区”之称。该地总面积约 3 556 km²,平均海拔为 898.5 m,相对高差超过 500 m,气候为大陆性季风气候,年平均降水量 550 mm,年平均气温 7 ℃,无霜期约 150 天。地势中部隆起,西南、西北部高,大致呈向东倾斜的丘陵河谷地形。其境内沟涧地与沟谷地交错纵横,支离破碎,峁基、黄土梁居多且呈连续分布,在各种坡面、峭壁发育有线沟、悬沟、切沟、细沟、黄土柱及缓坡等,黄土覆盖厚度最深处可达 180 m。当地土壤类型以黄绵土为主,间有黑垆土、黄褐土和风沙土。植被类型主要包括天然植被和人工植被 2 类,天然植被主要有山杨(*Populus daviana*)、杠柳(*Periploca sepium*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等,人工植被有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus. orientalis*)、油松(*Pinus. tabulaeformis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等。

1.2 样地设置与数据获取

通过查阅文献和请教当地农户确定了 10,15,25,40 年(分别代表幼龄林、中龄林、成熟林以及过熟林)坡向与坡度相似的刺槐林地。农地没有过多的水分消耗,土壤水分含量保持在相对稳定的水平,故以农地作为对照^[15-16]。农地种植作物为玉米,生长期为 6—9 月,期间无人为灌溉,其余时间处于休耕期。试验样地基本概况见表 1。

表 1 样地概况

林龄/a	土壤类型	海拔/ m	坡向	坡度/ (°)	密度/ (株·hm ⁻²)	树高/ m	胸径/ cm
0	黄绵土	1338	南偏西 5°	12	—	—	—
10	黄绵土	1276	南偏东 20°	20	1600	6.9±0.4	6.4±0.5
15	黄绵土	1338	南偏西 25°	18	2800	7.3±0.2	6.9±0.3
25	黄绵土	1352	南偏西 20°	16	1500	9.8±0.9	15.3±1.6
40	黄绵土	1342	南偏东 25°	18	1300	10.7±0.3	17.3±0.2

注:表中数据为平均值±标准差;树高为树木从地面至最高生长点之间的垂直距离;胸径为树木距地面 1.3 m 处的直径。

每块样地设 50 m×50 m 的采样小区,每个小区沿坡顶到坡底按相同距离设 4 个监测点,提前埋有 PVC

管,稳定半年后利用时域反射仪(TDR, TRIME-PICO-IPH, 德国)定点监测土壤含水量,监测深度为 200 cm,

每 10 cm 为 1 个测量层,取 4 次读数的平均值作为该层的土壤体积含水量。在每个采样小区内分别设 6 个 1 m×1 m 的草本样方和 5 m×5 m 的灌木样方,分

别调查灌草的种类、数量、盖度和高度,同时记录枯落物平均厚度,林下植被情况见表 2。试验时间为 2021 年 3 月下旬,监测前 1 周无降雨发生。

表 2 不同林龄刺槐林下植被形态特征

林龄/ a	植物 种数	平均 盖度/%	平均 高度/m	枯落物 厚度/cm	林下植被
10	24	65	0.8	3.5	唐松草、铁线莲、兴安胡枝子、长芒草、狗尾草、猪毛菜、刺儿芽
15	18	75	0.4	4.2	长芒草、铁线莲、臭草、白莲蒿、茵陈蒿、杠柳、猪毛菜
25	18	55	0.9	4.9	臭草、长芒草、委陵菜、五月艾、黄刺玫、虎榛子、黄庐
40	22	60	1.1	5.4	阿尔泰狗娃花、五月艾、黄杨、尖叶栒子、黄蔷薇、刚毛忍冬、杠柳

1.3 数据处理与分析

土壤储水量计算公式^[17]为：
$$W_i = \theta_i \times B_i \times D_i \times 10^{-1}$$
$$W = \sum W_i$$
式中： W_i 为第 i 层土壤储水量(mm)； W 为总土壤储水量(mm)； θ_i 为第 i 层土壤质量含水量(%)； B_i 为土壤容重(g/cm³)； D_i 为第 i 层的土层厚度(cm)。

土壤水分亏缺程度计算公式^[10]为：
$$SMCD = \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{li} - \theta_{ci}}{\theta_{li}} \times 100\% \quad i = 10, 20, \dots, 200$$
式中：SMCD 为土壤水分亏缺程度(%)； θ_{li} 为农地第 i 层土壤体积含水量(%)； θ_{ci} 为不同林龄刺槐林第 i 层土壤体积含水量(%)。

采用 SPSS 25.0 统计分析软件计算各土层土壤含水量的均值、标准差($n=4$)和变异系数。采用最小显著性差异法(LSD)进行不同样地土壤平均含水量的事后多重比较,采用单因素方差分析法分析各样地不同土层土壤含水量的差异性显著情况,采用沃勒—邓肯检验进行不同土层土壤水分亏缺程度的差异分析及差异显著性水平标记, $p<0.05$ 。文中图表均采用 Origin 2018 和 Excel 2019 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同林龄刺槐林土壤水分分布情况

由图 1 可知,不同林龄刺槐林土壤含水量随林龄增加呈现减小趋势,在垂直剖面上的变化情况大致相同,均呈现先增大后减小的趋势,其中 0—10 cm 处含水量最低,分别为 9.51%,8.66%,5.05%和 12.39%,20 cm 处土壤含水量迅速增加,其中 40 年刺槐林土壤含水量达到最大值 19.14%。其余林龄刺槐在 40 cm 左右分别达到的最大值为 21.35%,20.90%和 16.18%,之后含水量变化与 40 年刺槐林相同,缓慢减小,在 150 cm 以下趋于稳定。农地土壤含水量大于不同林龄刺槐林,尤其 0—20 cm 土壤含水量达到 25.36%,远大于不同林龄刺槐林土壤表层含水量。

对不同林龄刺槐林土壤水分数据收集处理后得

出,各林龄刺槐林土壤平均含水量大小依次为农地>10 年刺槐林>15 年刺槐林>40 年刺槐林>25 年刺槐林,不同林龄刺槐林土壤平均含水量均低于农地对照(表 3)。与农地相比,10,15,25,40 年刺槐林的含水量分别减小 2.37%,3.33%,5.42%和 4.93%。其中,10,15 年刺槐林的土壤水分条件较好(土壤含水量分别为 16.43%和 15.47%),随刺槐林龄增加土壤含水量逐渐降低,25 年时达到最小值,40 年时又有所恢复。从图 2 可以看出,土壤剖面的储水量以 50 cm 为间隔计算得出,4 个土层的土壤储水量随着林龄的增加先降低后趋于稳定,与林龄呈显著的负相关,这也进一步印证造林对土壤水分的消耗。0—50 cm 土层的土壤储水量最高,分别为 121.18,93.39,89.18,70.94,81.94 mm,之后逐渐降低,呈现与深度变化相反的趋势。方差分析表明,10,15 年刺槐林土壤水分含量无显著差异,但与 25,40 年刺槐林存在显著差异;农地土壤水分含量只在 0—60 cm 土层与 10,15 年刺槐林存在显著差异,与 25,40 年刺槐林在整个垂直剖面上均存在显著差异($p<0.05$)。

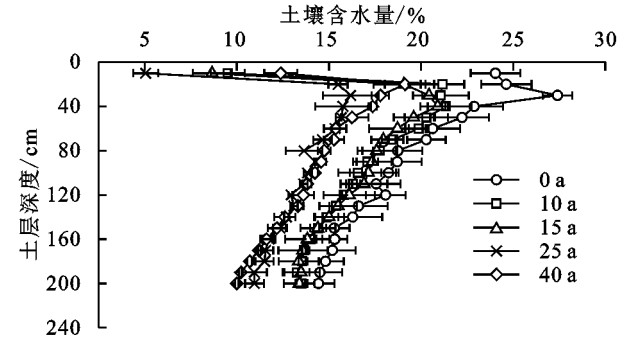


图 1 不同林龄刺槐林土壤含水量分布

表 3 不同林龄刺槐林土壤平均含水量多重比较

林龄/a	均值/%	0 a	10 a	15 a	25 a	40 a
0	18.80		0*	0*	0*	0*
10	16.43	2.37*		0.004*	0*	0*
15	15.47	3.33	0.96		0*	0*
25	13.38	5.42	3.05	2.09		0.110
40	13.87	4.93	2.57	1.61	-0.49	

注:表内上三角为差异显著性,下三角为均值差(%);*表示差异显著性水平为 0.05。

2.2 不同林龄刺槐林土壤水分亏缺程度

在过去 40 年中,刺槐林持续耗水显著降低土壤含水量。由图 3 可以看出,刺槐林土壤含水量年变化率大小依次为 10 年(0.24%)>25 年(0.23%)>15 年(0.18%)>40 年(0.12%)。可以看出,10 年时土壤水分消耗速率最快,此时刺槐林正处于生长发育旺盛阶段,密度大,根系发达,需水量大。40 年时,刺槐林老化严重,土壤水分消耗速率最慢。从整个垂直剖面来看,0—60 cm 土层的含水量亏缺随林龄增加先增大,后表现出一定程度的恢复(0.03%~7.34%),140—200 cm 处土层含水量亏缺呈增大趋势,其中 150—200 cm 土层处消耗最大,范围为 1.69%~2.70%。本

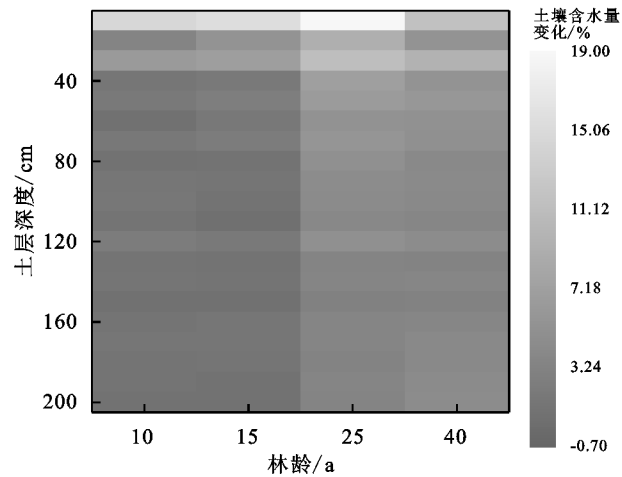
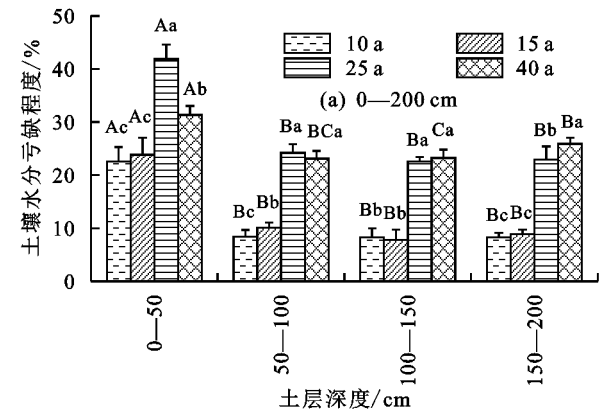


图 3 不同林龄刺槐林土壤含水量变化和含水量年变化率的垂直分布

与农地相比,无论在造林的早期(10 年)、中期(15 年)、中后期(25 年)或者后期(40 年),刺槐林的土壤水分均处于亏缺状态(SMCD 分别为 11.49%,12.46%,27.76%和 25.80%),在 25 年时土壤水分亏缺程度最大。可以看出,25 年刺槐林在整个土壤剖面的水分亏缺比 15 年增加 15.30%,而 40 年的土壤水分亏缺比 25 年减小 1.96%,这说明人工造林最主要的水分亏缺期为 15~25 年,40 年时土壤水分亏缺有所缓解。在垂直剖面上,把 0—200 cm 分为 4 组(图 4a),组内间隔 50 cm,随着造林



次研究中 4 块刺槐林的土壤水分消耗相对偏低,原因可能为采样时间的差异,刺槐未到生长旺季,耗水量较夏季偏少。

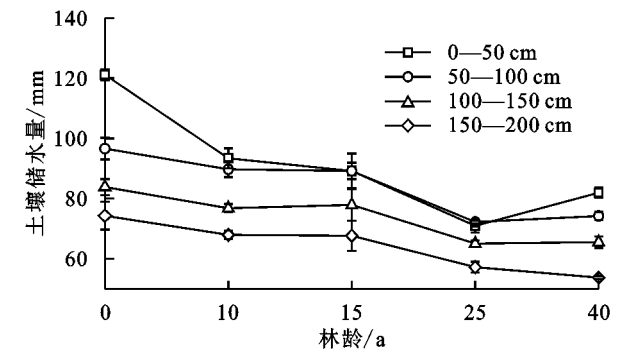
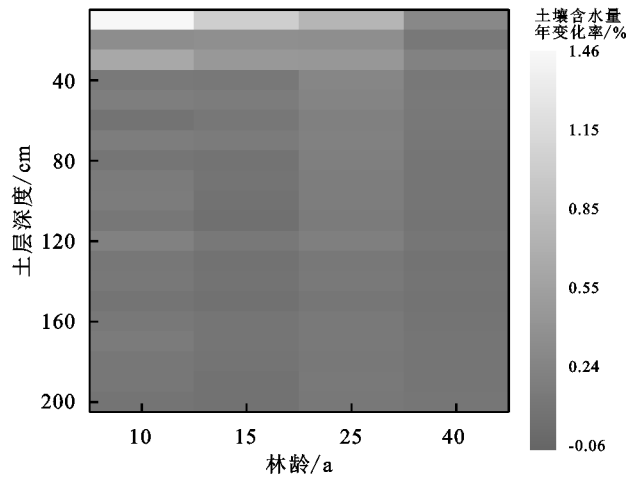
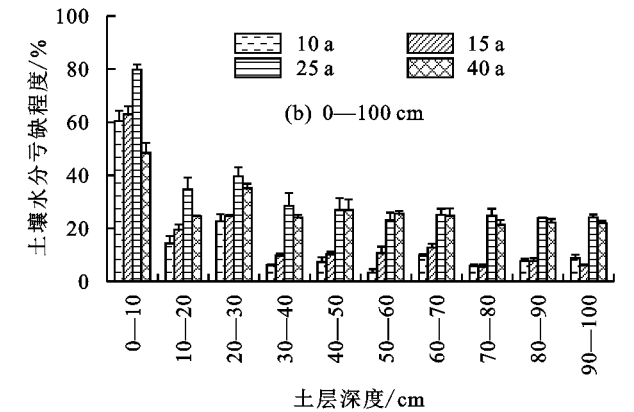


图 2 不同林龄不同土层土壤储水量比较



年限增加,100—200 cm 水分亏缺呈增加趋势,其余 2 层的水分亏缺程度呈先增加后降低的趋势。0—50 cm 的水分亏缺最大,除 40 年刺槐林在 150—200 cm 处造成水分亏缺有所增加外,其余刺槐林在 50—200 cm 处的水分亏缺不存在显著差异。为研究 0—100 cm 的具体水分亏缺情况绘制图 4b,可以看出,0—100 cm 的具体土壤水分亏缺情况随造林年限的变化趋势与 0—200 cm 相同,随土层深度的变化为先降低后趋于稳定,其中 0—30 cm 的水分亏缺程度最大。



注:图柱上方不同的大写字母和小写字母分别表示同一林龄不同土层深度之间和不同林龄同一土层深度之间存在显著性差异($p<0.05$)。

图 4 不同林龄不同土层土壤水分亏缺程度比较

2.3 不同林龄刺槐林垂直剖面土壤水分变异程度

由图 5 可知,不同林龄刺槐林的土壤水分变异系数在整个剖面上具有相似的变化特征,土壤水分变异系数分别为 9.51%,10.44%,25.06%和 21.36%。总体来说,表层的土壤水分变异系数大于深层。其中 0—10 cm 的 CV 值最大,彼此间相差达 47.10%,远大于其他土层。在 50—100 cm 处各刺槐林的 CV 值趋于稳定,在 160—200 cm 处 CV 值有缓慢增大趋势。从造林年限来看,25,40 年刺槐林的土壤水分变异程度大于 10,15 年,由方差分析可知,二者之间的 CV 值存在显著性差异($p<0.05$)。

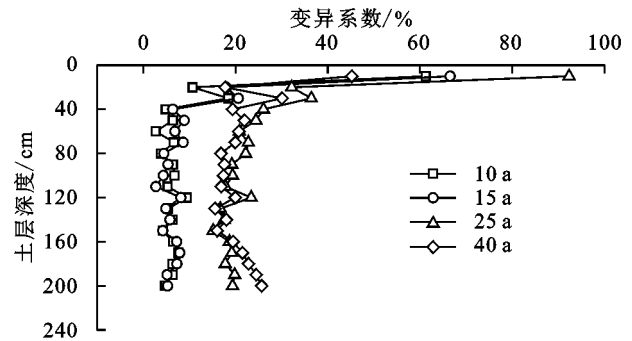


图 5 不同林龄刺槐林土壤水分变异系数

对于划分垂直剖面土壤水分变化层次的方法,学者们已经进行了大量的系统研究。其中贾志清^[18]利用不同灌草植被和降雨年型的土壤水分变异系数将整个土壤垂直剖面划分为速变层($CV>30\%$)、活跃层($20\%<CV\leq 30\%$)、次活跃层($10\%<CV\leq 20\%$)和相对稳定层($CV\leq 10\%$)。为进一步明确整个土壤剖面土壤水分的变异程度,本试验采用该划分方法确定 4 种不同林龄刺槐林 0—200 cm 土层上的土壤水分变化层次。由图 6 可知,在 0—200 cm 的深度范围内,10,15 年刺槐林土壤水分变化层划分相同,自上而下依次为速变层、次活跃层和相对稳定层,其中相对稳定层占比 85%,可见除 0—30 cm 外,10,15 年刺槐林与农地相比土壤水分无太大变异。25 年出现速变层、活跃层和次活跃层,其中次活跃层占比最大,为 60%,40 年刺槐林 4 个变化层次均有出现,70—160 cm 为次活跃层,160—200 cm 为活跃层,这直接说明造林后期对深层土壤水分的消耗变大。

3 讨论

3.1 土壤水分动态变化对造林的响应

在过去几十年,为了恢复生态和治理水土流失,我国在以黄土高原为主的干旱半干旱地区开展了大规模的植树造林活动,经过不懈努力取得了举世瞩目的成就,但同时也给当地生态带来了其他的负面影响。在黄土高原地区,黄土厚度一般在 50~80 m,降

水是土壤水分的主要补给来源,其入渗深度基本不会超过 1.5 m,深层土壤对降水几乎无任何响应^[19],大规模不合理的人工造林给黄土高原地区土壤水分利用造成了巨大压力,尤其加重深层土壤的水分亏缺,不同类型和林龄的人工林对土壤水分的消耗程度各有不同^[20]。本研究中,通过对比不同林龄和不同土层深度的土壤水分和储水量变化(图 1 和图 2)发现,二者随林龄和土层深度的增加均呈现减小的变化趋势,这与前人^[21-22]的研究结果一致。不同之处在于,除土壤深层外,本研究 40 年刺槐林较 25 年刺槐林土壤水分有所恢复,原因可能为 40 年刺槐林树木老化,根系退化,对水分的需求量有所降低,随生态群落演替其本身有一定的蓄水能力^[23]。但由于刺槐生长耗水是一个累积的过程,在干旱半干旱的气候条件下,降水补充有限,随着林龄增加,整个刺槐林地的土壤水分亏缺愈加严重,为满足正常生长发育的需要,植被需要不断向下扎根延伸以获取深层水分,导致土壤深层出现土壤干燥化^[24],这符合本试验中造林后期深层土壤水分较低的结果。表层土壤水分受降水和蒸散发影响作用大,变化活跃且相对剧烈。除去刺槐生长耗水,林下植被对人工林地土壤水分也产生影响,如何精确区分二者的耗水情况及相互作用仍需要进一步的探究。

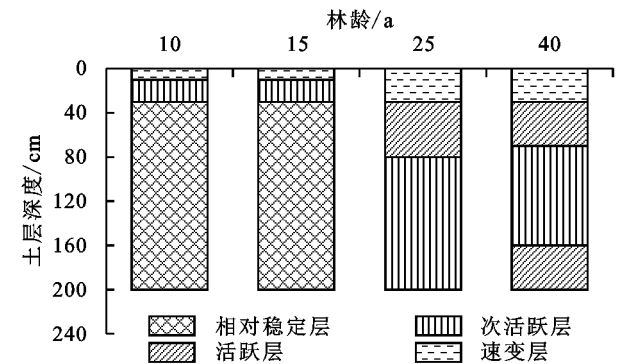


图 6 不同林龄刺槐林土壤水分垂直变化层分布

3.2 土壤水分亏缺程度随造林年龄的变化

前人^[25-26]已经证明,人工造林会造成黄土高原地区土壤水分的严重亏缺。从农地转化为各种人工造林时,由于需水量更大,且叶片与枯落物对水分的截留作用和蒸腾作用更强^[27],土壤中大部分水分被树木的根系所吸收利用。刺槐林龄在 10,15 年时,0—100 cm 土层处的土壤水分亏缺程度明显偏大,这与 Deng 等^[28]观察到造林初期主要在土壤表层发生水分耗竭的结论一致,主要原因为刺槐根系的分布特征,虽然刺槐根系可延伸到 200 cm 以下,但细根在 0—60 cm 土层分布最为集中,根系密度可占整个剖面(0—350 cm)的 59.48%,并在 40 cm 处达到峰值^[29]。随着造

林年限增加,表层土壤水分亏缺程度显著增加,40年刺槐林表层土壤水分又有所恢复,原因可能为造林后期林下表层有较厚的枯枝落叶层,可减少蒸散发并通过增加表面水力传导来提高土壤的保水能力^[30],使得表层土壤含水量相对偏高,同时证实造林后期人工林涵养水源的能力增强。然而,由于人造林本身具有强耗水性,100 cm以下的土层始终处于水分枯竭状态,其中150—200 cm土层更加严重,且深层的亏缺程度随着造林年限和土层深度的增加呈正相关。从图4b可以看出,除土壤深层处的水分亏缺程度逐渐增大外,70—100 cm处土壤水分亏缺程度随土层深度的增加也有所增大,这表明,如果土壤深层处的水分不能满足植被的生长发育时,水分消耗会从深层向浅层进行蔓延,从而加剧浅层的水分亏缺程度^[10]。由于人工林耗水是一个长期持续的过程,水分长期利用不平衡,在干旱半干旱地区仍然形成普遍的土壤干层^[31]。严重的水资源枯竭又反向制约植被生长,这样的恶性循环严重影响当地生态环境的恢复与重建,如在西北广泛存在的“小老树”便是最好的例子,成年树木仅能生长到正常高度的20%~30%^[32]。

3.3 土壤水分垂直剖面变异程度随造林年龄的变化

在垂直剖面上,表层土壤直接与大气接触,土壤水分受外部环境的影响最大,最主要的影响因素为降水,降水入渗后最先影响土壤表层含水量,且不同的土质和地表条件降水入渗的难易和速率有较大差别。由于农地 and 不同林龄刺槐林表层根系分布和蒸散发的差异,导致二者表层土壤水分变异程度较大。小规模降水影响十分有限,且外部因素对土壤水分的影响随土层深度的增加逐渐减弱,因此变异系数随土层深度增加总体呈减小趋势,这与前人^[33-34]得出结论一致。10,15年刺槐林在30 cm以下均为相对稳定层,土壤含水量与农地无显著差异。随着造林年限增加,25,40年刺槐林有着复杂的变化分层(图6),30—160 cm土层虽有降水补充,但由于蒸散发和刺槐根系密度大,耗水大于补充,土层水分较农地亏缺程度大,因此出现活跃层和次活跃层。40年刺槐林在160 cm土层以下为活跃层,说明降水和地下水难以补充该区域,且该土层范围内刺槐粗、细根的根系密度均有所增加^[29],经过刺槐长期耗水土壤水分已处于严重亏缺状态。不同林龄刺槐林垂直剖面上土壤水分的变化分层恰好印证造林对土壤水分的耗竭模式。

4 结论

(1)各样地平均土壤含水量大小表现为农地(18.80%)>10年刺槐林(16.43%)>15年刺槐林

(15.47%)>40年刺槐林(13.87%)>25年刺槐林(13.38%)。随着造林年限增加,土壤水分亏缺程度呈增大趋势,40年时土壤水分略有恢复,但深层土壤水分仍亏缺严重。在垂直剖面上,土壤水分呈现先升高后降低的趋势,160—200 cm处土壤水分含量最低。

(2)刺槐林土壤水分年消耗速率大小依次为10年刺槐林(0.24%)>25年刺槐林(0.23%)>15年刺槐林(0.18%)>40年刺槐林(0.12%),其中,10年刺槐林因树木生长发育旺盛而耗水速率最大。与农地相比,刺槐林的土壤水分均处于亏缺状态(SMCD分别为11.49%,12.46%,27.76%和25.80%),其中25年时亏缺程度最大,15~25年土壤水分亏缺程度显著增加(15.30%, $p<0.05$)。

(3)刺槐林土壤水分变异程度为表层大于深层,随林龄增加呈增大趋势。表层土壤与外界直接接触,水分迁移交换活跃,其中0—10 cm土层CV值的范围为45.22%~92.32%,而深层土壤受外部条件影响十分有限。10,15年刺槐林除0—30 cm外,其余各层均为相对稳定层,而25,40年刺槐林在30 cm以下仍有活跃层和次活跃层出现,说明因刺槐林耗水导致严重的土壤水分亏空,这种亏空尤以深层土壤(160—200 cm)更为明显。

综上所述,不合理的人工造林会造成土壤水分的亏缺,且随造林年限增加土壤水分呈下降趋势。因此,今后在采用人工造林的方式恢复生态时,需要充分考虑其生长过程对土壤水分的消耗,制定合理的更新抚育策略,根据当地水分植被承载力,合理设计种植密度,同时优先考虑采用自然恢复以及引入一些浅根草本植物来进行生态环境的恢复。

参考文献:

- [1] 王舒,马岚,张栋,等.晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(3):253-258.
- [2] 施万喜.陇东黄土高原农业资源特点与农业可持续发展路径分析[J].草业科学,2009,26(5):116-122.
- [3] 赵丹阳,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2021,35(1):181-187.
- [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] 李靖,马永禄,罗杰,等.黄土丘陵沟壑区不同林龄刺槐林养分特征与生物量研究[J].西北林学院学报,2013,28(3):7-12.
- [6] 刘江华,刘国彬,陈淑芸.刺槐林地土壤水分与林下植物生物量的关系[J].水土保持研究,2009,16(3):57-60.
- [7] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture de-

- cline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [8] 梁海斌, 薛亚永, 安文明, 等. 黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化效应[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 77-85.
- [9] 张建军, 张岩, 张波. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J]. *林业科学*, 2009, 45(11): 63-69.
- [10] Nan G W, Wang N, Jiao L, et al. A new exploration for accurately quantifying the effect of afforestation on soil moisture: A case study of artificial *Robinia pseud-acacia* in the Loess Plateau (China) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 459-466.
- [11] 刘青柏, 刘明国, 王玉涛, 等. 不同林型立地土壤水分性状及其持水能力的比较[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(5): 775-779.
- [12] 孔凌霄, 毕华兴, 周巧稚, 等. 晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 163-169.
- [13] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 31-35.
- [14] 向慧昌, 赵小虎. 水分胁迫对刺槐生理和生化的影响[J]. *水土保持应用技术*, 2021(1): 16-19.
- [15] 施政乐, 张建军, 申明爽, 等. 晋西黄土区不同土地利用类型对土壤水分的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 190-197.
- [16] 包维斌, 王幼奇, 刘鹏, 等. 宁南山区不同林龄杏树地土壤干层特征研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(8): 101-110.
- [17] 高宇, 樊军, 彭小平, 等. 水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J]. *生态学报*, 2014, 34(23): 7038-7046.
- [18] 贾志清. 晋西北黄土丘陵沟壑区典型灌草植被土壤水分动态变化规律研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(1): 10-15.
- [19] Liu B X, Shao M A. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 974-984.
- [20] 杨智姣, 温晨, 杨磊, 等. 半干旱黄土小流域不同恢复方式对生态系统多功能性的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8606-8617.
- [21] 于博威, 刘高焕, 崔保山. 晋西黄土丘陵区人工刺槐林土壤干燥化效应[J]. *环境生态学*, 2020, 2(增刊 1): 51-58.
- [22] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, 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.
- [23] Jia X X, Wang Y Q, Shao M A, et al. Estimating regional losses of soil water due to the conversion of agricultural land to forest in China's Loess Plateau [J]. *Ecohydrology*, 2017, 10: 596-606.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 张永旺, 万珊珊, 王俊, 等. 黄土高原植被演替过程中土壤水分亏缺[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 120-125, 132.
- [27] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2014, 115: 123-133.
- [28] Deng L, Yan W M, Zhang Y W, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 366: 1-10.
- [29] 张良德, 徐学选. 延安燕沟流域刺槐根系分布特征[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(2): 9-14.
- [30] Robichaud P R. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231: 220-229.
- [31] 井乐, 李建平, 张翼, 等. 黄土高原不同土地利用方式下土壤干层差异[J]. *草业科学*, 2018, 35(8): 1829-1835.
- [32] Jin T T, Fu B J, Liu G H, et al. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 2519-2530.
- [33] 冯向星, 王玲, 石伟, 等. 晋西北不同植被类型土壤水分空间分异[J]. *湖南林业科技*, 2016, 43(2): 92-96, 112.
- [34] 赵伶俐, 王福平. 宁夏南部黄土丘陵地土壤水分空间变异性分析[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(24): 236-240.