

# 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应

梁海斌<sup>1,2,3</sup>, 史建伟<sup>3</sup>, 李宗善<sup>1</sup>, 牛俊杰<sup>3,4</sup>

(1. 中国科学院 生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 山西大学 黄土高原研究所, 太原 030006; 4. 太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心, 太原 030012)

**摘要:**开展晋西北黄土丘陵区土壤干燥化效应研究对该区域植被恢复重建具有重要的现实意义。以晋西北五寨县张家坪林场3种不同林龄的人工柠条林为研究对象,对照撂荒地,分别对其2013年生长季(4—10月)0—600 cm深层土壤水分进行了测定分析。结果表明:研究区内的不同林龄柠条林及撂荒地均发生了不同程度的土壤水分亏缺及土壤干燥化现象。(1)不同林龄柠条林及撂荒地由于降雨的人渗补充,除部分土层剖面土壤储水量有少量亏缺外,其余均呈不同程度的盈余状态,土壤储水量总体变化情况为:20 a柠条>10 a柠条>35 a柠条>撂荒地;(2)不同林龄柠条林0—600 cm土层的土壤干燥化强度达轻度至中度干燥化强度,平均土壤干层厚度达447 cm,并且随着林龄的增长,土壤干燥化的强度逐渐加强,各强度土壤干燥层厚度、总干层厚度及干化深度均呈增加趋势。而对照撂荒地的土壤干燥化指数SDI值为78%,并以轻度和中度干燥层居多;(3)综合考虑各降水年型,不同林龄柠条林及撂荒地剖面土壤干层水分恢复所需年限随着林龄的增加而逐渐增加,土壤湿度恢复难度呈增加趋势。

**关键词:**土壤水分; 土壤干层; 柠条; 土壤干燥化; 黄土丘陵区

**中图分类号:**S152.7; S793.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2018)02-0087-07

## Evaluation of Soil Desiccation Intensity in Different Ages of *Caragana korshinskii* Kom. in Loess Hilly Region, Northwestern Shanxi

LIANG Haibin<sup>1,2,3</sup>, SHI Jianwei<sup>3</sup>, LI Zongshan<sup>1</sup>, NIU Junjie<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 4. Research Center for Science Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030012, China)

**Abstract:** It was of great significance to carry out a study on the evaluation of soil desiccation intensity for vegetation restoration in water-limited hilly areas of the Loess Plateau. In this paper, soil moisture dynamics in profile with depth of 600 cm was measured under three different ages of *Caragana* shrub sites and the uncultivated land at Zhangjiaping forestry station of Wuzhai County in the growing season (from April to October) in 2013. By analyzing, there were different levels of soil water deficits and soil desiccation in each sample plot, and the main findings were as follows: (1) As for the rainfall infiltration function, most of the soil layers showed the surplus state except for few soil layers, and the overall water storage in different ages of *Caragana* shrubs decreased in the order: 20-year *Caragana* > 10-year *Caragana* > 35-year *Caragana* > the uncultivated land. (2) In general, soil desiccation level reached to the mild or moderate desiccation intensity at each sampling site, and the average thickness of desiccated soil layer was approximately 447 cm. Both of the dried soil density, total thickness of the desiccated soil layer and the initial formation depth of soil dry layers gradually increased with the growth age of forest. (3) With respect to all kinds of precipitation years, the time needed for water restoration in desiccated soil layers increased with the increase of forest ages. Meanwhile, the difficulty coefficient for soil moisture restoration gradually experienced the increasing trend as well.

**Keywords:** soil water content; desiccated soil layer; *Caragana korshinskii* Kom.; soil desiccation; The Loess Hilly Region

收稿日期: 2017-01-17

修回日期: 2017-05-17

资助项目: 国家自然科学基金重大项目“黄土高原草灌生态系统对土壤水变化的响应机制”(41390462); 国家自然科学基金“晋西北生态重建优势种林地土壤水分研究——以沙棘和柠条为例”(41171423)

第一作者: 梁海斌(1988—), 男, 山西孝义人, 博士研究生, 研究方向为全球变化与区域生态。E-mail: lhb1011@126.com

通信作者: 史建伟(1975—), 男, 山西岚县人, 博士, 主要从事植物生理生态学、土壤水文学研究。E-mail: sjwsx@sxu.edu.cn

李宗善(1977—), 男, 山东潍坊人, 博士, 主要从事树木年轮气候学、生态水文学研究。E-mail: zsls\_st@rcees.ac.cn

晋西北黄土丘陵区是半湿润区与半干旱区中非常典型的生态过渡带与环境脆弱区,气候干旱,大气降水是区域土壤水分的唯一可靠来源,同时也是当地植被建设的主要限制性因子之一。深层土壤干燥化,是该地区普遍存在的一种特殊土壤水文亏缺现象,其最直接的后果就是形成土壤干层,导致土壤水分环境恶化,并引起一系列的生态环境问题。因此,进行区域土壤干燥化效应的深入研究对植被恢复与建设有着重要的现实意义。

土壤干燥化是黄土高原的干旱气候、风成土壤和林草植被等各种生物、非生物因素共同作用下所形成的一种独特的土壤水文现象,是由于自然降水、土壤贮水和林草植被耗水关系失衡所导致的,其直接结果就是深层土壤的贮水量明显减少,并形成具有较低土壤含水量范围、位于降水入渗层以下、形成后具有持久性等一系列特点的土壤干层<sup>[1]</sup>。土壤干燥化会引起土壤质量下降、地表水与地下水联系中断、干层厚度的加深、林草植被衰退、局部小气候环境趋于旱化等问题。自 20 世纪 60 年代,在陕西的蒲城、澄城地区最早发现以来,土壤干燥化范围逐步扩大,干层厚度不断增加,给整个黄土区土壤水文状况带来了严重影响<sup>[2]</sup>,并成为黄土高原生态环境建设中最棘手的问题。由于土壤干燥化现象所带来的日益严重的危害,越来越多的学者开始重视,并研究处理这一问题。但目前,有关黄土高原地区的土壤干燥化研究仍然处于初期的现象揭示阶段,只从宏观方面对土壤干层的涵义、分布类型、成因危害、影响因素和减缓措施等方面进行了初步研究<sup>[3-16]</sup>,并没有从定量分析的角度形成统一的土壤干层的量化指标和分级标准。虽然部分学者提出了土壤干燥化的判别标准和量化指标<sup>[8,10,17]</sup>,但这些指标有着一定的随机性和区域性,并不能够完全适应整个广袤的黄土高原地区。目前,李军等<sup>[13]</sup>基于土壤含水量、土壤稳定湿度和凋萎湿度建立起的土壤干燥化指数,已经在黄土高原的南部半湿润地区、中部半干旱地区和北部半干旱偏旱地区等不同降水类型区域内,广泛地研究了林草植被和农田的土壤干燥化效应,这个指数基本上可以当作黄土高原地区的土壤干层的统一评价标准。

另外,在晋西北黄土丘陵区,土层深厚,地下水埋深大,一般不参与土壤水循环的过程,对人工林地的土壤干层水分恢复的意义不大,所以人工林地土壤干层水分的恢复、补偿与大气降水和土壤水分的蒸散发密切相关。近年来,关于降水在土壤层中的入渗深度及对土壤干层水分的恢复程度研究越来越引起学者的关注<sup>[18-19]</sup>,其中李军<sup>[13]</sup>、樊军<sup>[15]</sup>等比较分析了紫花苜蓿草地及不同年限苜蓿翻耕地的土壤湿度恢复状况,得出翻耕休

闲和作物轮作两种方式都可以有效地促进苜蓿草地土壤干层水分的逐步恢复。因此,本研究通过对晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林(*Caragana korshinskii* Kom.)及对照撂荒地深层土壤水分测定与分析,定量评价其土壤干燥化强度、土壤干层厚度,判断土壤干层水分恢复到土壤稳定湿度和撂荒地土壤湿度的所需时间,以揭示该区域内不同林龄柠条林地的深层土壤干燥化特征,探索土壤干燥化防治措施,为晋西北黄土丘陵区人工柠条林的建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省忻州市五寨县张家坪林场,地理坐标介于 111.771°—111.787°E,38.962°—38.981°N,海拔 1 397~1 533 m。本区气候属温带大陆性气候,四季分明,春季干旱多风,夏秋雨量集中。年平均降雨量为 478.5 mm,且年降雨量的 50% 以上集中在 7—9 月(图 1),年平均气温 4.1℃~5.5℃,最冷月(1 月)平均温度 -13.2℃,最热月(7 月)平均温度 20.0℃,平均日照时数 2 872 h,平均无霜期 125 d。该区土壤类型主要为黄土状淡栗褐土,林场内为人工植被覆盖,乔木主要有:小叶杨(*Populus simonii* Carr.)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.),灌木主要为人工柠条林(*Caragana korshinskii* Kom.),林下草本植物有白羊草[*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng]、蒿类(*Artemisia* spp.)、沙蓬[*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq.]等。

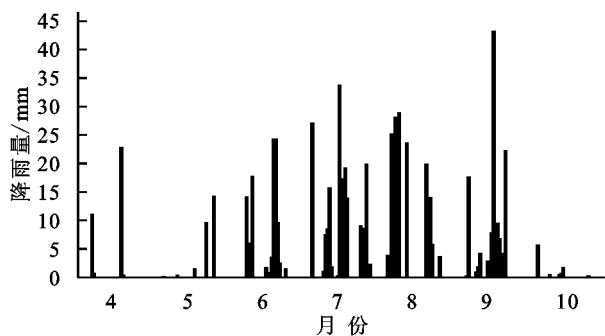


图 1 研究区 2013 年生长季降水分配

本文主要针对五寨县张家坪林场 3 种不同林龄(10 a, 20 a, 35 a)的柠条林地进行研究,并以多年撂荒地作为对照,各样地基本概况见表 1。

### 1.2 研究方法 with 数据处理

1.2.1 野外取样 为避免地貌部位、坡度和坡向等的不同对土壤水分的影响,采样点均选择在同一坡面、地形因子等立地条件相近的地方。选取试验区中 3 种不同林龄(10 a, 20 a, 35 a)的人工柠条林地及对照撂荒地,布设典型样地 4 块,用 GPS 定位并作标

记。于 2013 年 4 月下旬—10 月下旬定期对标记过的 10 a,20 a,35 a 人工柠条林及对照撂荒地进行土壤样品采集,共采集 7 次。根据 W 形路线在距离柠条基部 1 m 左右处布设取样点,每一样方内布设 3 个

取样点,采用人工土钻取样,取样深度为 600 cm,取样间距为 10 cm,每孔共计取样 60 层。所取土样装入铝盒内,为避免水分散失,铝盒用胶带密封包装,并遮光保存,带回实验室分析测定。

表 1 试验样地基本特征

植被类型	地形	经纬度	海拔/ m	株高/ m	冠幅/ m	行距/ m	土壤	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤 孔隙度/%	饱和持水量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	田间持水量/ (g·kg <sup>-1</sup> )
10 a 柠条	低缓坡地	111.771542°E 38.980594°N	1445	0.86~1.25	1.21×1.55	2	黄绵土	1.32	43.30	32.89	21.32
20 a 柠条	低缓坡地	111.785770°E 38.965403°N	1406	1.17~2.02	1.80×2.34	2	黄绵土	1.32	43.15	32.51	24.07
35 a 柠条	低缓坡地	111.772057°E 38.980631°N	1439	1.56~2.35	2.00×2.85	2	黄绵土	1.29	43.28	34.64	21.11
撂荒地	低缓坡地	111.771032°E 38.980209°N	1450	—	—	—	黄绵土	1.40	42.07	29.00	20.41

1.2.2 相关土壤水分指标计算 本试验研究采用烘干称重法进行土壤水分含量测定,将样品及时用分析天平称重后,置于电热恒温鼓风干燥箱,在 105℃ 高温条件下,连续烘干 24 h,达到恒重后称重。

土壤含水量的计算公式为:

$$SMC = (g_1 - g_2) / (g_2 - g) \times 100\%$$
 (1)

式中:SMC 为土壤含水量(%);g 为空铝盒重量(g);g<sub>1</sub> 为空铝盒与湿土重(g);g<sub>2</sub> 为空铝盒与干土重(g)。

土壤贮水量(mm)=0.1×土壤含水量×土壤容重×土层厚度(cm)

土壤有效贮水量(mm)=土壤贮水量-凋萎湿度时土壤贮水量

土壤干燥化指数计算公式为:

$$SDI = (SMC - WM) / (SSM - WM) \times 100\%$$
 (4)

式中:SDI 为土壤干燥化指数;SMC 为土壤湿度;WM 为凋萎湿度;SSM 为土壤稳定湿度。SDI 值越小,说明土壤的干燥化强度越高;反之,SDI 值越大,则土壤的干燥化强度就越低。

对于获得的数据采用 Microsoft Excel 2007, Origin 8 和 SPSS 17.0 软件进行处理与绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄柠条林土壤水分总量水平

在本研究区内,对不同林龄的柠条林和撂荒地进行 0—600 cm 土层土壤含水量的比较(表 2),10 a,20 a,35 a 人工柠条林在 0—600 cm 土层的土壤平均含水量分别为 12.47%,11.56%和 9.21%,明显低于试验区的土壤稳定湿度值 13.12%,而且随着人工柠条林林龄的增长,35 a 柠条林土壤含水量(9.21%)明显低于对照撂荒地土壤含水量值 11.24%。3 种林龄的人工柠条林在 0—600 cm 土层的土壤储水量为 713.12~974.02 mm,平

均值为 864.39 mm;其土壤有效储水量的变动范围为 362.12~623.02 mm,平均值为 513.39 mm,每米土层的有效储水量为 60.35~103.84 mm,平均值为 85.57 mm,远低于试验区中土壤稳定湿度时的土壤储水量及土壤有效储水量,并且随着林龄的增长,土壤储水量和土壤有效储水量等各项指标都明显降低,其中 35 a 柠条林地的土壤储水量要远低于撂荒地。3 种林龄人工柠条林地的土壤水分过耗量在 49.34~310.24 mm 变动,平均值为 158.97 mm,并且要高于撂荒地的土壤水分过耗量值 135 mm,随着人工柠条林林龄的增长,土壤水分过耗量在明显上升,其中尤其要以 35 a 柠条林最为严重。而撂荒地 0—600 cm 土层内的土壤含水量为 888.36 mm,土壤有效含水量为 537.36 mm,土壤水分过耗量为 135 mm,都明显优于 35 a 柠条林地的各项指标。人工柠条林地平均土壤干燥化速度为 4.934~8.864 mm/a,平均值为 6.555 mm/a,35 a 柠条林土壤干燥化速度最快,其次为 20 a 柠条林,随着人工柠条林林龄的增加,土壤干燥化程度加剧,年均土壤干燥化速度加快。

2.2 不同林龄柠条林土壤水分亏缺分析

土壤水分亏缺表现为区域内土壤水分的供需差额,它是用于判定土壤水分盈亏状态的一种重要指标。对不同林龄柠条林及对照撂荒地 0—600 cm 土层生长季始末土壤水分亏缺量进行分析得出(表 3),2013 年生长季(4—10 月)降水总量为 668 mm,各样地土壤水分经过雨季的补充,均未出现亏缺现象,其土层储水量变化情况由大到小排序为:20 a 柠条>10 a 柠条>35 a 柠条>撂荒地。

土壤储水量的年变化量有效地反映了土壤水分的盈亏平衡状态<sup>[20]</sup>,由图 2 可以看出,不同林龄柠条林及对照撂荒地 2013 年生长季 0—600 cm 土层剖面土壤水分均有盈余。各样地土壤垂直剖面表现出不同的水分盈亏状态,具体为:10 a 柠条林 10—40 cm,260—290 cm

及 560 cm 处的土壤水分储量是亏缺的,20 a 柠条林在 10—120 cm 土层范围内土壤水分储量有少量的亏缺,35 a 柠条林土壤水分储量亏缺层主要位于 10—50 cm 及 380—510 cm 处,撂荒地则在 10—40 cm,320—430 cm 土层范围内土壤水分储量处于亏缺状态,各样地的其余土层剖面土壤水分储量均处于盈余状态。

表 2 不同林龄柠条林和撂荒地 0—600 cm 土层土壤含水量比较

项目	土壤	土壤	土壤有效	每米土层土壤有效	土壤水分	平均土壤干燥化
	含水量/%	储水量/mm	储水量/mm	储水量/(mm·m <sup>-1</sup> )	过耗量/mm	速度/(mm·a <sup>-1</sup> )
10 a 柠条	12.47	974.02	623.02	103.84	49.34	4.934
20 a 柠条	11.56	906.04	555.04	92.51	117.32	5.866
35 a 柠条	9.21	713.12	362.12	60.35	310.24	8.864
撂荒地	11.24	888.36	537.36	89.56	135.00	—
凋萎湿度	4.50	351	0	—	—	—
土壤稳定湿度	13.12	1023.36	672.36	112.06	—	—
田间持水量	21.73	1694.94	1343.94	223.99	—	—

注:100 cm 以下由于同一试验区内各植被类型土壤下层的土壤质地基本一致,土壤容重均取 1.3 g/cm<sup>3</sup>。

表 3 不同林龄柠条林及撂荒地 0—600 cm

植被类型	4—10 月 降水量	土层土壤水分亏缺量				mm
		生长季初土层水分		生长季末土层水分		生长季土层
		储水量	亏缺量	储水量	亏缺量	储水量变化
10 a 柠条	668	986.33	708.61	1069.03	625.91	82.70
20 a 柠条	668	898.96	795.98	1037.48	657.46	138.52
35 a 柠条	668	719.25	975.69	776.31	918.63	57.06
撂荒地	668	879.71	815.23	925.26	769.68	45.55

注:土壤水分亏缺量是土壤田间储水量与土壤实际储水量之间的差值。

2.3 不同林龄柠条林土壤干燥化评价

据 Li 等<sup>[21]</sup>研究表明,将土壤干燥化强度当作判定指标,土壤干层是指土壤干燥化指数 SDI<100% 的土层,各类型土壤干燥层的划分指标具体为:SDI<100% 的土层为轻度干燥层,SDI<75% 的土层为中度干燥层,SDI<50% 的土层为严重干燥层,SDI<25% 的土层为强烈干燥层,SDI<0 的土层为极度干燥层。由此对研究区不同林龄柠条林及对照撂荒地进行土壤干燥化强度及土壤干层范围评价(表 4)。在试验区内,不同林龄柠条林 0—600 cm 土层的平均土壤干燥化指数 SDI 值在 55%~92%,平均值为 76%,并且随着林龄的增加,不同林龄柠条林地的土壤干燥化指数呈下降趋势。10 a,20 a 柠条林均表现为轻度干燥化,而 35 a 柠条林则为中度偏严重干燥化,随着林龄的增加,不同林龄柠条林地的土壤干燥化强度逐渐增强。对照撂荒地的平均土壤干燥化指数 SDI 值为 78%,其干燥化强度为轻度偏中度范围。

2.4 不同林龄柠条林剖面土壤干层分布

在研究区内,分别将土壤稳定湿度值和土壤凋萎

湿度值作为判定土壤干燥化的上限和下限指标,对不同林龄柠条林及对照撂荒地生长季始末(4 月、10 月)0—600 cm 土层剖面的土壤湿度进行比较,结果见图 3。从生长季初期(4 月)到生长季末期(10 月),经过一个生长季的消耗及入渗补充,10 a,20 a,35 a 柠条林及对照撂荒地剖面土壤水分含量得到了不同程度地补充,其土壤干层状况有所缓解,但随着柠条林林龄的增加,其土壤干层分布深度及干层程度在逐渐加剧。

根据土壤干燥化指数 SDI 值依次对不同林龄柠条林及撂荒地 0—600 cm 土层进行土壤干层划定(表 5),结果表明,撂荒地除 200—300 cm 的土层为严重干层外,其余各土层都属于轻度干层;10 a 柠条林地除 200—300 cm 土层范围内为中度干层外,其余各土壤层剖面干化程度均为轻度干层或无干层;20 a 柠条林地在 0—200 cm,300—600 cm 土层范围内为轻度干层或无干层,而在中部 200—300 cm 土层范围内则为严重干层,这是由于 20 a 柠条林正处于生长旺盛期,其根部耗水加大所致;35 a 柠条林地只有上层 100—200 cm 范围内土壤层剖面干化程度为轻度干层,其余表层 0—100 cm 及中下层 200—600 cm 范围内土壤层剖面干化程度均为中度甚至严重干层,这既与 35 a 柠条生长需水量大有关,还与柠条达中龄后郁闭度增大,枝叶截流,基部降水入渗减少相关。35 a 柠条林地中的中度干层甚至严重干层,对 35 a 柠条植被的生长造成了严重的影响,由于其经常处于极度缺水状态,导致部分植被已经开始枯萎甚至死亡。

表 4 不同林龄柠条林及撂荒地土壤干燥化强度和土壤干层范围评价

植被类型	平均土壤干燥化指数(SDI)/%	土壤干燥化强度	极度干燥层/cm	强烈干燥层/cm	严重干燥层/cm	中度干燥层/cm	轻度干燥层/cm	土壤干层/cm
10 a 柠条	92	轻度干燥	0	0	30	130	180	340
20 a 柠条	82	轻度干燥	0	0	80	130	230	440
35 a 柠条	55	中度干燥	0	50	250	190	70	560
撂荒地	78	轻度干燥	0	0	80	190	220	490

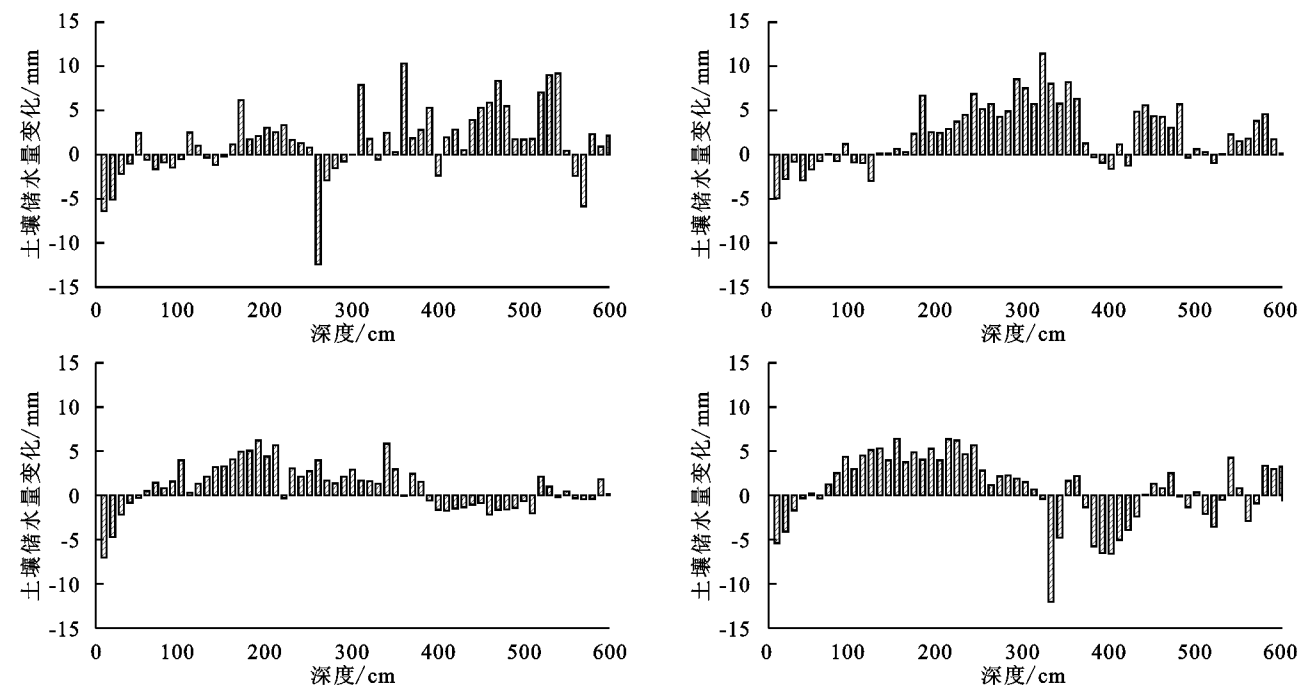


图 2 不同林龄柠条林及撂荒地剖面土壤水分盈亏

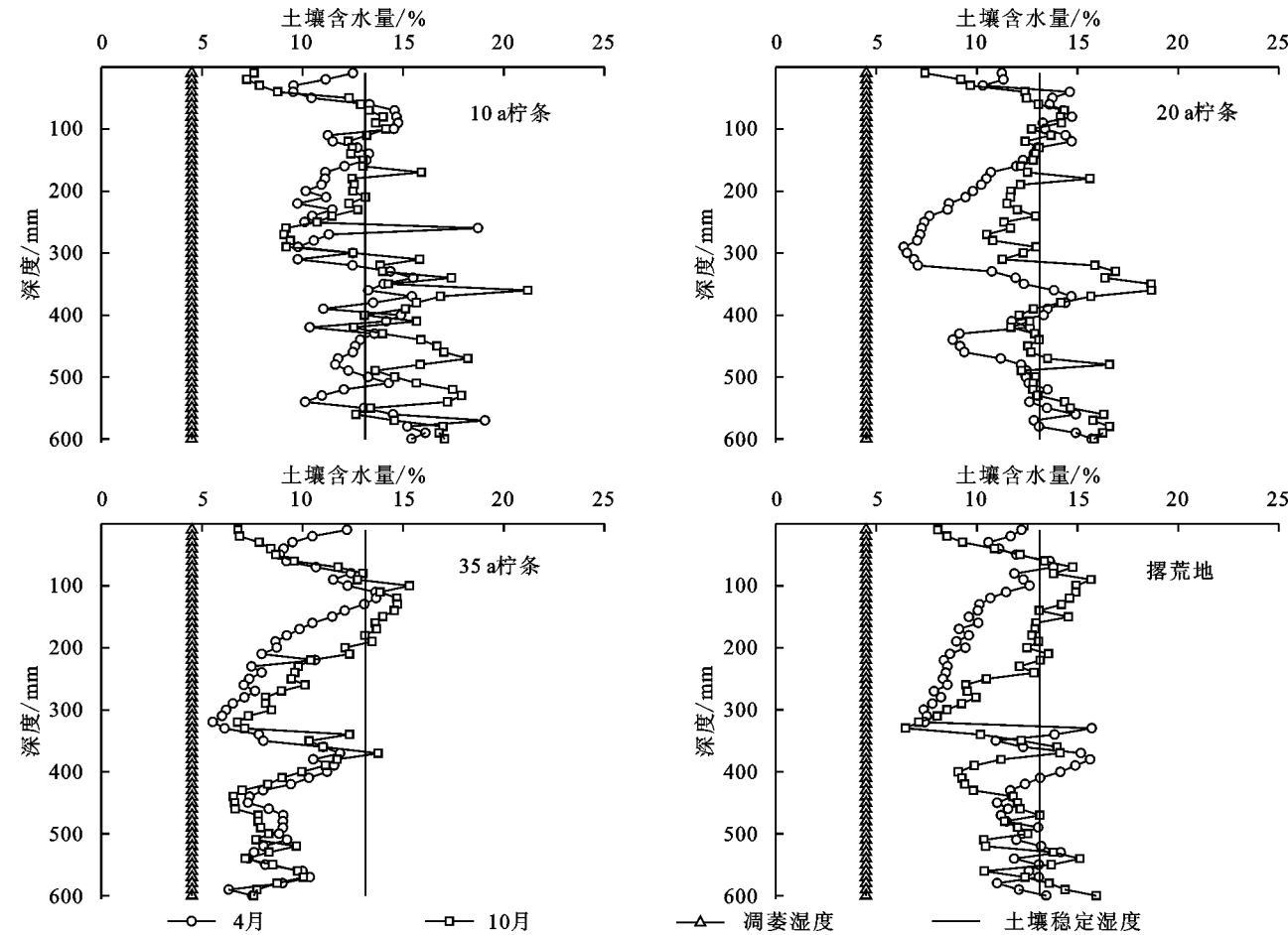


图 3 不同林龄柠条林及撂荒地生长季始、末土壤干层的演化

由此可推断出,在植株密度相同的情况下,随着人工柠条林林龄的增大,对土壤水分的消耗也在增加。同时也再次说明,在本区域由于受到特殊地理环境因素的影响,土壤水分是限制植被恢复的主要因素

之一,因此除选择合适的树种外,采取适宜的管理措施(如合理控制造林密度,选择适宜的植物配置模式,进行适度间伐等)是本区域植被恢复建设中的主要任务之一。

2.5 不同林龄柠条林剖面土壤干层水分恢复估算

为探讨研究区不同林龄柠条林及撂荒地剖面土壤干层水分恢复的所需年限,综合近 30 a 降水数据,1984—2013 年降水量值介于 315.8~682.2 mm,平均降水量为 470.6 mm,在 2013 年达到最大值 682.2 mm。若按照丰水年、平水年、欠水年的平均降水量分别为 682.2,484.6,315.8 mm,当地作物一季耗水量 300 mm<sup>[13]</sup> 计算,则可供不同林龄柠条林及对照撂荒地土壤湿度恢复的降水量分别为 382.2,184.6,15.8 mm。研究

结果表明,在连续丰水年和连续平水年的情况下,研究区各林龄柠条林及撂荒地土壤干层经过降水量的入渗补充可自行恢复到土壤稳定湿度时的含水量(表 6),但在连续欠水年情况下,10 a,20 a,35 a 柠条林及撂荒地则分别需要 3.12 a,7.43 a,19.64 a 和 8.54 a。总之,综合考虑各降水年型,随着林龄的增加,研究区不同林龄柠条林及撂荒地土壤干层水分恢复到土壤稳定湿度时所需年限逐渐增加,分别需要 1.17 a,2.79 a,7.38 a 和 3.21 a,即分别需要 2 a,3 a,8 a 和 4 a 以上。

表 5 不同林龄柠条林及撂荒地剖面土壤干层分布

土层 深度/cm	10 a 柠条		20 a 柠条		35 a 柠条		撂荒地	
	土壤干燥化	干化	土壤干燥化	干化	土壤干燥化	干化	土壤干燥化	干化
	指数(SDI)/%	程度	指数(SDI)/%	程度	指数(SDI)/%	程度	指数(SDI)/%	程度
0—100	84.69	轻度	91.34	轻度	71.29	中度	86.03	轻度
100—200	91.79	轻度	81.10	轻度	86.34	轻度	83.17	轻度
200—300	62.02	中度	42.28	严重	37.44	严重	47.70	严重
300—400	100.23	无	78.63	轻度	53.03	中度	81.15	轻度
400—500	102.26	无	80.76	轻度	37.79	严重	80.74	轻度
500—600	113.66	无	117.57	无	41.85	严重	90.17	轻度

表 6 不同林龄柠条林及撂荒地土壤干层水分恢复所需水量和时间

植被 类型	土壤含水量		土壤稳定湿度		总需 水量/mm	土壤湿度恢复年需水量/mm			土壤湿度恢复 所需年限/a
	土壤	土壤储	土壤	土壤储		平水年	丰水年	欠水年	
	湿度/%	水量/mm	湿度/%	水量/mm					
10 a 柠条	12.47	974.02	13.12	1023.36	49.34	382.2	184.6	15.8	1.17
20 a 柠条	11.56	906.04	13.12	1023.36	117.32	382.2	184.6	15.8	2.79
35 a 柠条	9.21	713.12	13.12	1023.36	310.24	382.2	184.6	15.8	7.38
撂荒地	11.24	888.36	13.12	1023.36	135	382.2	184.6	15.8	3.21

3 讨论

不同林龄柠条林及撂荒地的土壤储水量总体变化情况为:20 a 柠条>10 a 柠条>35 a 柠条>撂荒地,除各样地部分土层剖面的土壤储水量有少量的亏缺外,其余均呈盈余状态。究其原因主要包括两个方面,一是研究时段内降雨总量达 668 mm,为近 30 年之最,有充足的降雨入渗补充深层土壤水分;二是各林龄柠条林的根系和生长状况的作用。10 a 柠条林正值生长旺盛期,植被的蒸腾量和需水量都较大,从而使土壤储水量明显减少;20 a 柠条林生长稳定,且根系下扎深度及根系量大于 10 a 柠条,降雨随根系渗深加大,土壤储水量也随之加大,加之 20 a 柠条林植被冠层盖度大,有利于降低近地表的风速和太阳辐射作用,从而减少土壤水分的蒸发量;35 a 柠条林可能已进入衰败期,植被蒸腾量及水分消耗量均加大,大量消耗深层土壤水分,导致土壤储水量明显减少。而撂荒地由于草本植被稀疏,降雨随地表径流流失明显,并且土壤蒸散发强烈,其土壤储

水量明显低于柠条灌木林。

由于研究区各林龄柠条林的生长年限不同,其根系的分布深度及分布密度有较大的差异,并且各林龄柠条林的土壤蒸发量和植被蒸腾耗水量也不同,所以导致了其土壤干燥化程度不尽相同。同时,由土壤干燥化效应所产生的土壤干层是由于当地植被生长需水量不能被降水量满足时,为了维持自身正常的生长活动而透支深层的土壤水分所造成的。前人研究表明,雨季是土壤水分的主要补给时期,如有降雨显著增加,土壤干层有可能出现不同程度的恢复。本研究根据土壤干燥化指数 SDI 值对不同林龄柠条林及撂荒地 0—600 cm 土层剖面进行土壤干层划定,结果表明不同林龄柠条林剖面干化程度随着林龄的增长逐渐加剧,且干化深度随林龄的增长呈现增加趋势。李军等<sup>[18]</sup>对黄土高原地区不同人工林地的深层土壤干燥化效应的研究表明,随着林龄的增长,人工林地的深层土壤湿度逐渐降低,土壤干层呈现出加深和加厚的趋势,与本文研究的结果一致。

## 4 结论

在晋西北黄土丘陵区,不同林龄柠条林及撂荒地均发生了不同程度的土壤水分亏缺及土壤干燥化现象。

(1) 研究区 2013 年生长季内的降水量达到 668 mm,属于丰水年型,不同林龄柠条林及撂荒地受降雨的入渗补充影响,除各样地的部分土层剖面土壤储水量有少量亏缺外,其余均有不同程度的盈余,土壤储水量的总体变化情况为:20 a 柠条>10 a 柠条>35 a 柠条>撂荒地。

(2) 不同林龄柠条林 0—600 cm 土层的平均土壤干燥化指数 SDI 值为 55%~92%,土壤干燥化强度达到轻度至中度干燥化强度,平均土壤干层厚度达 447 cm,并且随着林龄的增长,土壤干燥化的强度逐渐加强,各强度土壤干燥层厚度及总干层厚度呈增加趋势。对照撂荒地的土壤干燥化指数 SDI 值为 78%,干燥化强度为轻度接近中度干燥化,其土壤干层的总厚度为 490 cm,并以轻度和中度干燥层居多。

(3) 对研究区各样地 0—600 cm 的剖面土层进行土壤干层划定,不同林龄柠条林地的土壤剖面干化程度随着林龄的增长逐渐加剧,且干化深度也随之加深。

(4) 研究区不同林龄柠条林及撂荒地剖面土壤干层水分在连续丰水年和连续平水年的情况下,经过降水量的补充可自行恢复到土壤稳定湿度时的含水量状态,综合考虑各降水年型,其恢复所需年限随着林龄的增加而逐渐增加,土壤湿度恢复难度呈增加趋势。

### 参考文献:

- [1] 周旗,赵景波. 关中地区干旱化的环境响应与应对对策[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [2] 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 management on the Loess Plateau of China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(4): 546-554.
- [3] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [4] 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.
- [5] Jia X X, Shao M A, Zhang C C, et al. Regional temporal persistence of dried soil layer along south-north transect of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 152-160.
- [6] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1/2): 9-17.
- [7] Zhang C C, Shao M A, Jia X X. Spatial continuity and local conditions determine spatial pattern of dried soil layers on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(8): 2030-2039.
- [8] Yan W M, Deng L, Zhong Y Q W, et al. The characters of dry soil layer on the Loess Plateau in China and their influencing factors [J]. *PloS one*, 2015, 10(8): e0134902.
- [9] Wang L, Wei S P, Shao H B, et al. Simulated water balance of forest and farmland in the hill and gully region of the Loess Plateau of China[J]. *Plant Biosystem*, 2012, 146(4): 226-243.
- [10] 陈洪松,邵明安. 黄土区深层土壤干燥化程度的评价标准[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 164-166.
- [11] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2008, 143: 91-100.
- [12] 杨磊,卫伟,陈利顶,等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. *地理研究*, 2012, 31(1): 71-81.
- [13] 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 75-89.
- [14] 陈宝群,赵景波. 黄土高原土壤水分环境评价初步研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(5): 184-189.
- [15] 樊军,邵明安,王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J]. *草地学报*, 2006, 14(3): 261-264.
- [16] 牛俊杰,赵景波,王尚义. 汾河流域上游人工林地深层土壤干燥化探讨[J]. *地理研究*, 2007, 26(7): 773-781.
- [17] 杨建军,李会科,张广军,等. 黄土高原土壤干层减缓方法初探[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 186-190.
- [18] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原人工植被建设与持续发展[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [19] 王进鑫,黄宝龙,罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征[J]. *生态学报*, 2004, 24(4): 2395-2401.
- [20] 胡良军,邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [21] 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.