

DOI: 10.5846/stxb201905311151

刘丙霞, 任健, 邵明安, 贾小旭. 黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究. 生态学报, 2020, 40(11): 3795-3803.

Liu B X, Ren J, Shao M A, Jia X X. The process of soil desiccation under artificial shrub and grass in northern Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3795-3803.

黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究

刘丙霞¹, 任 健², 邵明安^{3,4}, 贾小旭^{3,*}

1 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050022

2 河北地质大学土地资源与城乡规划学院, 石家庄 050031

3 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

4 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

摘要: 黄土高原北部水蚀风蚀交错区是典型的生态脆弱区, 人工灌草植被土壤干燥化发生频繁。土壤干化层的形成影响生物小循环并削弱水文大循环, 严重制约植被建设成效和区域生态稳定。为阐明人工灌草植被土壤干燥化过程, 并确定适宜的种植年限, 选择该区典型人工灌草植被—柠条和苜蓿为研究对象, 分析两种植被土壤水分和地上生物量随生长年限的变化特征。结果表明: 2—8 年生柠条和 1—7 年生苜蓿对剖面土壤水分消耗强烈, 并随生长年限呈快速下降趋势, 9—12 年生柠条和 8—11 年生苜蓿 1.0—4.0 m 剖面含水量分别降低至 8.2%—9.0% 和 8.5%—10.5% 之间, 并处于相对稳定状态。4—5 年生柠条地 1—1.4 m 开始产生干层, 6 年生柠条地干层深度达 2.4 m, 干层厚度为 1.4 m; 9—12 年生柠条地干层深度超过 4.0 m。2—4 年生苜蓿地无干燥化; 5 年生苜蓿生长季末土壤干层深度达 3.6 m, 干层厚度为 2.6 m, 且 7 年生以后土壤干层的深度超过 4.0 m。因此, 为调控土壤干层, 减少深层土壤干化的发生, 建议柠条和苜蓿的生长年限分别不要超过 6 年和 5 年, 其对应的地上最大干生物量分别为 5050 kg/hm² 和 1980 kg/hm²。研究结果可为黄土高原北部生态脆弱区人工灌草植被管理与土壤干层调控提供科学依据。

关键词: 生长年限; 柠条; 苜蓿; 土壤干层; 黄土高原

The process of soil desiccation under artificial shrub and grass in northern Loess Plateau

LIU Bingxia¹, REN Jian², SHAO Ming'an^{3,4}, JIA Xiaoxu^{3,*}

1 Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Hebei Laboratory of Agricultural Water-Saving, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China

2 College of Land Resources and Urban and Rural Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

3 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: The water-wind erosion crisscross region, located in northern Loess Plateau, is a typical ecologically fragile area. Soil desiccation occurs frequently under artificial shrubs and grass. The formation of dried soil layer (DSL) affects eco-hydrological cycle and threatens vegetation construction and ecological stability. To understand the soil desiccation process under artificial shrub and grass and to determine their suitable planting years, dynamics of soil water content and aboveground biomass with growth year for caragana and alfalfa were analyzed in the Liudaogou catchment. The results showed that soil water was consumed strongly and decreased rapidly under 2—8-year old caragana and 1—7-year old alfalfa.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601216)

收稿日期: 2019-05-31; **网络出版日期:** 2020-03-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaxx@igsnrr.ac.cn

After then, soil water was relatively stable, changing slightly between 8.2%—9.0% under caragana and 8.5%—10.5% under alfalfa, respectively. The DSL was develop at depth of 1—1.4 m under 4—5 year-old caragana. The DSL reached 2.4 m depth, and the thickness of the DSL was 1.4 m under 6 year-old caragana. The depth of DSL exceeded 4.0 m under 9—12 year-old caragana. There was no desiccation under 2—4 year-old alfalfa, however, the DSL reached at 3.6 m depth and the thickness was 2.6 m at the end of growing season for 5 year-old alfalfa. The depth of DSL exceeded 4.0 m after 7 year-old alfalfa. Therefore, in order to decrease the risk of DSL formation, it is suggested that the growth years of caragana and alfalfa should not exceed 6 and 5 years, respectively. Their corresponding maximum dry biomass is about 5050 kg/hm² for caragana and 1980 kg/hm² for alfalfa, respectively. The results can provide scientific basis for management of artificial vegetation and regulation of DSL in northern Loess Plateau.

Key Words: growing year; caragana; alfalfa; dried soil layer; Loess plateau

黄土高原北部水蚀风蚀交错区是黄河下游河床粗泥沙的主要来源区^[1],也是土壤严重侵蚀与干旱并存的特殊区域,生态环境非常脆弱。为了防止水土流失,改善该区域脆弱的生态环境,近几十年,黄土高原地区开展了大量的退耕还林还草措施^[2]。基于遥感影像分析,黄土高原植被覆盖度从 1999 年的 31.6%增加到了 2013 年的 59.6%,植被恢复在该区域综合治理水土流失和改善生态环境中发挥了重要作用^[3-4]。柠条和苜蓿具有生态适应性强、根系发达以及保水固土效果显著的特点,又是优质饲料,是黄土高原地区人工植被建设的主要灌木和草本种类^[5]。因此,柠条和苜蓿在研究区广泛种植,是该区保持水土和植被恢复的典型植被。由于柠条和苜蓿的多年生、深根系和强耗水的特性,其持续生长对土壤水分消耗十分强烈,导致黄土高原深层土壤干燥化加剧、土壤水分生态环境恶化及人工植被逐渐退化^[6-8]。研究典型人工灌草植被建设下土壤水分的消耗和干燥化过程,以及土壤干层的形成发育,对黄土高原植被管理与生态环境重建具有重要的参考价值。

基于不同植被类型下土壤干层与生长年限的相互关系研究,一些学者发现,苜蓿、柠条、油松和沙打旺等植被下的土壤干层受植物生长年限影响显著^[9-11]。李军等^[8]研究表明,3 年生苜蓿草地出现中度干燥化,土壤干化深度可达 5.0—7.6 m,4 年生以上的苜蓿草地已达到严重干燥化,土壤干层厚度超过 10.0 m。程积民等^[12]研究发现柠条幼龄期(0—6 年)在 0—8.0 m 土层中未形成干层,中龄期(6—14 年)形成土壤干层,其厚度为 2.4—2.6 m,老龄期(大于 14 年)土壤干层厚度达到 7.0 m,土壤干燥化的程度和干层厚度均随着柠条生长年限的延长而增加。然而,以往关于不同年限植被下土壤干层的研究大部分是借助空间代替时间的方法,时间序列不连续甚至年限差别较大,且空间代替时间的方法忽略了土壤属性、地形地貌等对土壤水分的影响差异。因此,由于数据的不连续以及长期土壤水分观测数据的缺乏,限制了对不同植被类型下土壤干燥化过程的准确认识。

本文在黄土高原北部的神木六道沟小流域,基于长期连续的土壤水分定位观测数据,研究柠条灌木和苜蓿草地土壤干层的形成发育过程及其动态变化规律,探讨不同生长年限柠条和苜蓿对土壤水分的消耗特征,确定该区柠条和苜蓿的适宜种植年限,为黄土高原北部脆弱生态区灌草植被管理和土壤干层调控提供科学依据。

1 材料与方法

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的神木市以西六道沟小流域(110°21′—110°23′E, 38°46′—38°51′N)。流域面积 6.89 km²,海拔 1094.0—1273.9 m,北依长城,地处毛乌素沙漠的边缘,属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心。该区属于中温带半干旱气候,年平均蒸发力 785.4 mm,多年均降水量 415.4 mm(1971—2014),年际降水分布不均匀(图 1),且年内降水分布主要集中在 6—9 月,其降雨量占全年降水量的 77.4%,年均气温 8.4℃。地貌为片沙覆盖的黄土丘陵,主要土壤类型有绵砂土、硬黄土、红黄土和风砂土。

流域位于森林草原向干旱草原过渡带,其植被类型属于灌丛草原类型。随着国家退耕还林还草工程的推进和区域经济的发展,坡耕地逐步转变为林草地,特别是苜蓿草地、柠条灌木地和果园林地面积显著增加。

1.2 实验设计

本研究在一远离侵蚀沟、坡度为 12—14°、坡向为西北方向的完整坡面,建设人工柠条和苜蓿植被小区。坡面地形、土壤理化性质和土壤质地等较为一致,试验小区内的土壤类型均为黄绵土,从而消除了土壤质地在空间上的差异。小区规格为 5.0 m×61.0 m,并于 2004 年栽植 1 年生柠条幼苗,植被密度为 12000 丛/hm²;苜蓿小区播种种植,植株行距为 50.0 cm×50.0 cm。为实现土壤水分的长期定位观测,在每个试验小区从坡顶向坡底依次布设 11 根中子管,相互间隔距离为 5.0 m,监测土壤深度为 4.0 m。

1.3 数据观测与处理

对于柠条和苜蓿小区,观测时间均为 2004 年至 2014 年,柠条对应的生长年限为 2—12 年,苜蓿对应的生长年限为 1—11 年。利用 CNC503DR 型中子仪对 0—4.0 m 土壤剖面体积含水量进行测定,其中 0—1.0 m 土层测定间隔为 10 cm,1.0 m 以下土层测定间隔为 20 cm。测定频率为每半月测定一次。发生较大降水后加密测定土壤含水量。本研究中所用的土壤含水量数据为不同植被下 11 个监测样点的平均值。

柠条地上生物量用代表样枝方法测定,在植被小区外采取与小区内相似的标准枝 9 枝,先以 110℃ 高温杀青 1 小时,然后在 80℃ 恒温烘箱里烘 72 小时,最后用精度为 0.01 g 电子天平称重。在小区内测定柠条的株高和基径利用植被生长(基径和高)与生物量间的 Allometry 关系计算柠条生物量。采用全收获法或 1.0 m×1.0 m 样方刈割法计算苜蓿地上生物量,苜蓿每年在 7 月底和 10 月底刈割两次。

1.4 土壤干层

王云强^[13]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得到及时的补充,认为该土层不属于土壤干层的范畴。在本研究中,我们主要研究的是具有较强稳定性的土壤干层的发生发育过程,因此,我们将土壤干层的起始深度定为 1.0 m。基于黄土高原北部土壤的基本物理属性,土壤稳定含水量通常被认为是约等效于 60% 的田间持水量,并认为土壤含水量低于土壤稳定含水量时,即形成土壤干层^[14]。本研究将土壤稳定含水量值确定为田间持水量的 60%,作为土壤干层的上限,并以此作为判断干层是否出现的标准。

为了便于定量描述各类土地利用方式下土壤干燥化程度,李军等^[8]定义土壤干燥化指数—SDI (soil desiccation index) 为某一土层土壤实际有效含水量占该层土壤稳定有效含水量比值的百分数,公式表达为:

$$SDI = \frac{SM - WM}{SSM - WM} \times 100\%$$

式中,SDI 为土壤干燥化指数,SM 为土壤含水量,WM 为凋萎含水量,SSM 为土壤稳定含水量。

土壤干燥化指数 SDI 值越小,表明土壤干燥化强度越高,可供植物吸收利用的土壤有效含水量也越少。依据土壤干燥化指数 SDI 值的大小,土壤干燥化强度可划分为 6 级(表 1)。

2 结果与分析

2.1 柠条和苜蓿植被对土壤水分的消耗特征

柠条和苜蓿地中的剖面土壤含水量的时间变化趋势相似,随着植被的生长,大量土壤水分被消耗,剖面土

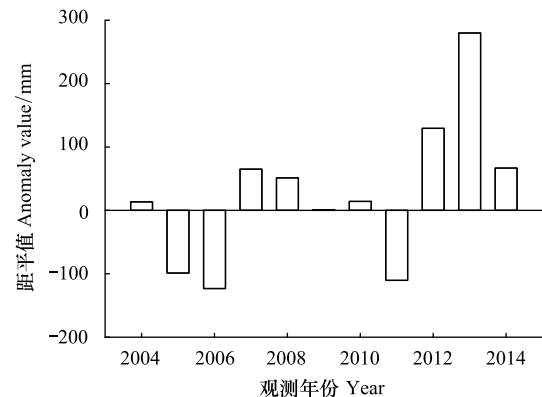


图 1 2004—2014 年研究区年降水量的逐年距平值变化图
Fig. 1 Differences of annual precipitation and the mean precipitation from 2004 to 2014 at the study site

壤含水量逐渐降低(图2)。2—8年生柠条对1.0—4.0 m剖面土壤水分消耗强烈,剖面含水量均值表现出随着植被生长年限的延长呈现迅速下降趋势,剖面含水量均值由观测初期的21.4%(2年生)减小到9.4%(8年生),含水量减少速率每年可达2.0%;之后9—12年生柠条地中剖面含水量均值处于相对稳定状态,变化幅度很小(8.2%—9.0%)。不同生长年限苜蓿对土壤水分的消耗特征与柠条相似,1—7年生苜蓿地剖面土壤含水量均值先迅速下降,含水量均值由观测初期的21.3%(1年)减小到8.6%(7年),含水量减少速率每年可达2.1%;之后苜蓿地剖面含水量均值相对稳定,在8.5%—10.5%之间浮动(图2)。

表1 土壤干燥化强度分级划分

Table 1 The division of soil desiccation intensity

干燥等级 Desiccation grade	无干燥化 No desiccation	轻度干燥化 Slightly	中度干燥化 Medium	严重干燥化 Seriously	强烈干燥化 Strongly	极度干燥化 Extremely
SDI 值	$SDI \geq 100\%$	$75\% \leq SDI < 100\%$	$50\% \leq SDI < 75\%$	$25\% \leq SDI < 50\%$	$0 \leq SDI < 25\%$	$SDI < 0$

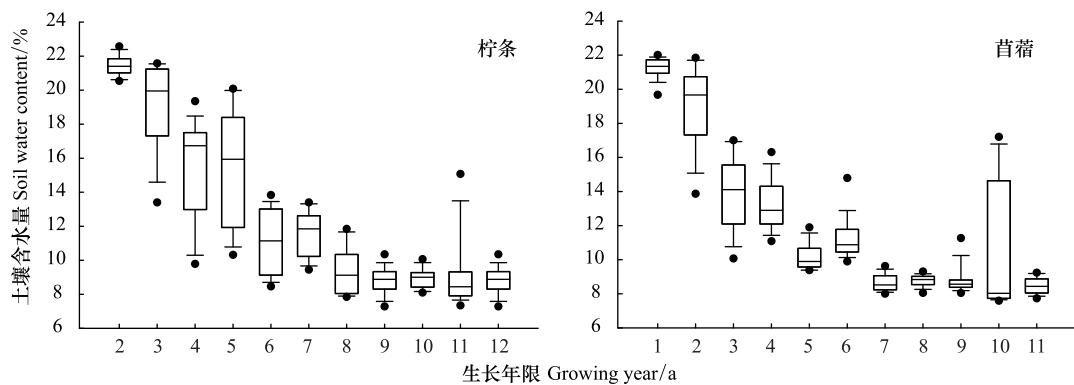


图2 不同生长年限柠条和紫花苜蓿地1.0—4.0 m土壤水分均值箱式图

Fig.2 The boxplots of mean soil water in depths of 1.0—4.0 m of caragana and alfalfa under different years

观测初期,柠条和苜蓿地土壤水分在1.0—4.0 m剖面上分布比较均匀,1.0—2.0 m,2.0—3.0 m和3.0—4.0 m土层储水量接近,随着植被生长3个土层储水量呈现随深度增加而减小的趋势,且随着生长年限增大3个土层储水量逐年减小(图3)。2—8年生柠条和1—7年生苜蓿,土壤储水量减少量和消耗速率由大到小依次为1.0—2.0 m,2.0—3.0 m和3.0—4.0 m,之后各土层储水量趋于接近。由图3可知,柠条和苜蓿地土壤水分消耗可分为3个阶段,第一阶段:快速消耗阶段(种植前5年),2—6年生柠条地1.0—2.0 m,2.0—3.0 m和3.0—4.0 m土层储水量的消耗速率分别为:24.3 mm/a,21.3 mm/a,16.0 mm/a;1—5年生苜蓿地3个土层对应的储水量消耗速率分别为23.9 mm/a,23.45 mm/a,20.0 mm/a。第二阶段:缓慢消耗阶段(种植6—8年)柠条地各层储水量的消耗速率分别为:1.7 mm/a,10.2 mm/a,12.5 mm/a;苜蓿地中3个土层对应的的储水量消耗速率分别为3.7 mm/a,3.1 mm/a,7.2 mm/a。第三阶段:相对稳定阶段(种植9—11年),柠条和苜蓿地各层土壤水分都处于相对稳定状态,且3个土层储水量差异很小,在80.0—100.0 mm之间变化。在第三阶段,1.0—2.0 m土层水分对年降水量有一定的响应,尤其在2013年,降水较多,1.0—2.0 m土层水分得到补给,且苜蓿地中补给量明显大于柠条地。2.0 m以下土层储水量变化幅度较小。

2.2 不同生长年限柠条和苜蓿地土壤干燥化特征

2—12年生柠条地土壤剖面平均含水量、储水量和SDI值均表现出逐年减小的趋势(表2)。由1.0—4.0 m剖面平均SDI可知,2—7年生柠条地在1.0—4.0 m剖面上无干燥化现象。但3年生的柠条地土壤剖面已经出现水分亏缺现象,4年生柠条地开始出现干层,厚度为0.4 m。6年生柠条地土壤干层深度可达2.4 m,干层的厚度为1.4 m。8年生柠条1.0—4.0 m土壤剖面出现中度干燥化,1.0—3.0 m土层干化严重,3.0—4.0 m

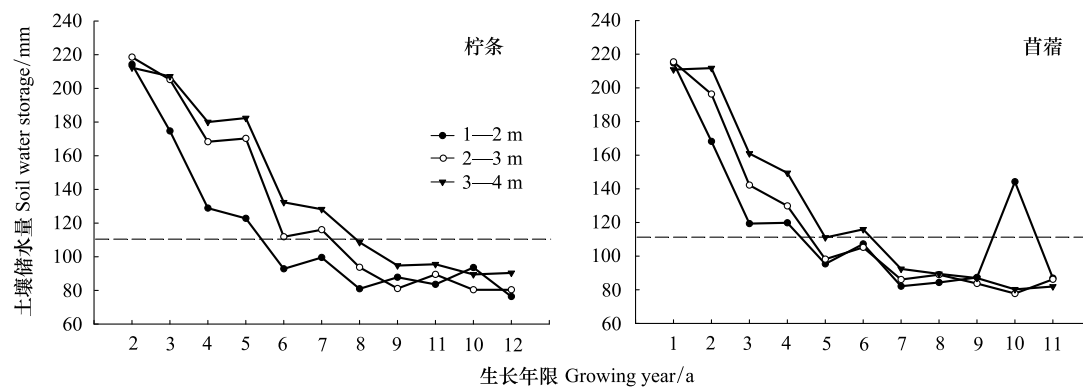


图3 不同年限紫花苜蓿和柠条地1—2、2—3和3—4 m土层储水量,虚线表示稳定储水量(111.0 mm)

Fig.3 Soil water storage at various depths of 1.0—4.0 m of alfalfa and caragana under different years

土层含水量也接近稳定土壤含水量(表2和图4)。9年生柠条1.0—4.0 m土壤剖面全部形成干层,9—12年生柠条土壤干层深度均超过4.0 m。12年生柠条地1.0—4.0 m剖面处于严重干燥化,土壤含水量分布于6.5%—9.4%范围内。柠条地土壤干化程度随着生长年限的增长而增强。

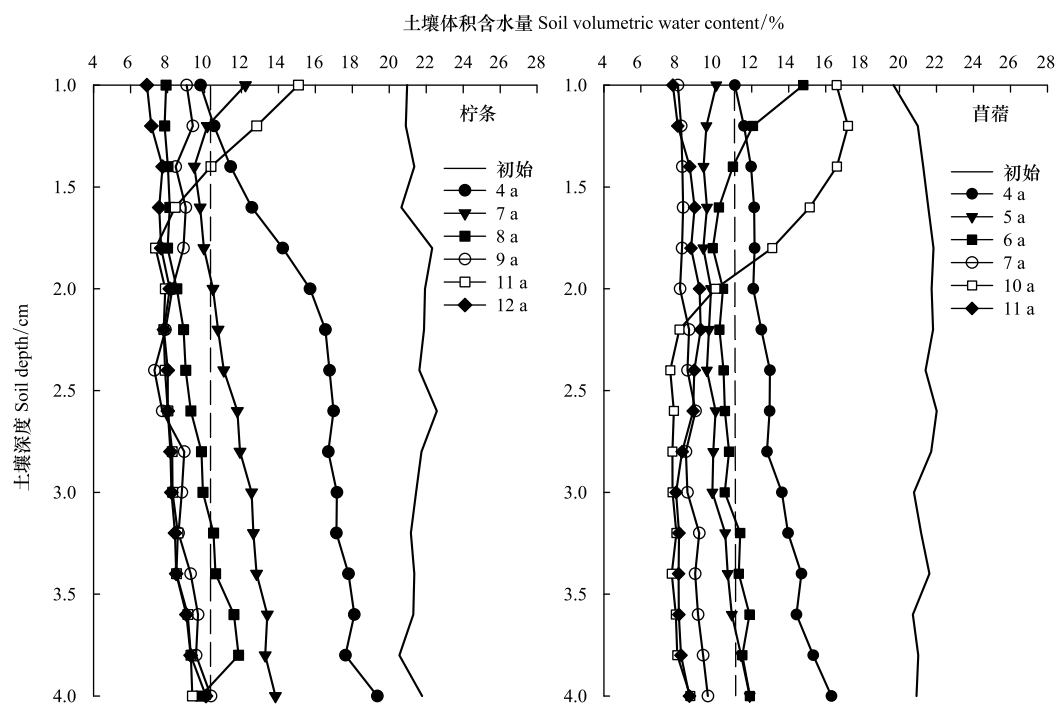


图4 不同年限柠条和苜蓿土壤剖面水分分布。黑色实线是柠条和苜蓿地初始含水量虚线为土壤稳定含水量(11.1%)

Fig.4 Vertical distributions of soil moisture to a depth of 4.0 m of alfalfa and caragana under different years

1—11年生苜蓿地土壤剖面平均含水量和储水量均表现出逐年减小的趋势(表3)。1—4年生苜蓿剖面土壤处于无干燥化状态,但2—4年生土壤剖面均出现水分亏缺,且亏缺量逐年增大;5年生苜蓿生长量迅速增大,土壤剖面开始出现轻度干燥化现象,生长季末干层深度达3.6 m,干层厚度为2.6 m(图4);除10年生苜蓿外,6—11年生苜蓿土壤剖面干燥化程度逐年加重,由轻度干燥化到严重干燥化状态,且7年以后土壤干层的深度超过4.0 m,厚度大于3.0 m。10年生苜蓿地中土壤水分亏缺量和干层的厚度均减小,土壤干燥化程度减弱,主要是由于2013年降水较多(图1),降水补给1.0—2.0 m土层。

表 2 不同生长年限柠条地 1.0—4.0 m 剖面土壤水分及土壤干燥化分析

Table 2 Changes of soil water and soil desiccation in depths of 1.0—4.0 m of caragana under different years

生长年限/a Growing year	含水量均值/% Mean soil moisture	土壤储水量/mm Soil water storage	水分亏缺量/mm Water deficit	剖面平均 SDI/% Mean SDI	干燥化程度 Grade of desiccation	干层厚度/cm Thickness of DSL
2	21.4	642.9	-90.9(盈余)	320	无	0
3	19.1	587.0	35.0	280	无	0
4	15.4	474.1	77.9	200	无	40
5	14.6	448.2	103.8	182	无	40
6	11.0	334.7	217.3	101	无	140
7	11.5	343.8	208.2	108	无	120
8	9.4	284.4	267.6	66	中度	240
9	8.8	263.7	288.3	51	中度	>300
10	9.0	268.9	283.1	55	中度	>300
11	8.8	263.4	288.6	51	中度	>280
12	8.2	247.9	304.1	40	严重	>300

表 3 不同生长年限苜蓿地 1.0—4.0 m 剖面土壤水分及土壤干燥化分析

Table 3 Changes of soil water and soil desiccation in depths of 1.0—4.0 m of alfalfa under different years

生长年限/a Growing year	含水量均值/% Mean soil moisture	土壤储水量/mm Soil water storage	水分亏缺量/mm Water deficit	剖面平均 SDI/% Mean SDI	干燥化程度 Grade of desiccation	干层厚度/cm Thickness of DSL
1	21.3	641.1	-89.1(盈余)	318	无	0
2	16.4	500.4	51.6	219	无	0
3	13.8	422.5	129.5	163	无	0
4	13.2	399.1	152.9	147	无	0
5	10.1	304.6	247.4	80	轻度	260
6	10.9	328.3	223.7	97	轻度	180
7	8.7	265.6	286.4	52	中度	>300
8	9.0	266.7	285.3	53	中度	>300
9	8.8	258.0	294.0	47	严重	>300
10	10.0	302.2	249.8	78	中度	200
11	8.5	255.0	297.0	45	严重	>300

2.3 苜蓿与柠条生物量随生长年限的变化

柠条和苜蓿地上最大干生物量随生长年限增大,其变化趋势不同(图 5)。总体上 2—12 年生柠条地上最大干生物量随柠条生长年限的增长呈逐渐增大趋势。6 年和 9 年生柠条生物量均小于前一年生物量,主要是由于这两个年份(2008 年和 2011)均为枯水年,降水较少影响了植被生物量。已有的研究表明柠条生长被分为三个阶段:幼龄期(0—6 年),中龄期(7—13 年)和老龄期(≥ 14 年),且地上生物量在 13 年之前随植物生长增加^[12]。因此 2—12 年生的柠条经历了幼龄期和中龄期,还未进入老龄期,所以柠条地上最大生物量随植被年限的增加呈不断增加趋势。

1—11 年生苜蓿地上最大干生物量随生长年限的增长呈先增大后减小,即中间高两头低的趋势(图 5)。苜蓿自播种后生长迅速,生长至第 6 年其地上生物量达到高峰,之后苜蓿产量开始下降,并逐渐开始退化。在第 10 年(2013 年),即使年降水量较大,处于丰水年,生物量依旧减少。11 年生苜蓿地多数苜蓿植株趋于生理衰败,加之深层水分的大量消耗殆尽,生物产量极低。研究表明苜蓿地上部生物量与生长年限呈显著的负相关关系,苜蓿草地生长高峰期第 5—6 年,苜蓿生长至 6—7 年之后,产量迅速下降,其经济生长年限一般为 10 年^[15-16]。研究期间的苜蓿生物量较柠条低,但两者的耗水量差异不大,因此,柠条的水分利用效率高于苜蓿。白永红等^[17]研究表明,黄土区柠条的水分利用效率显著高于苜蓿($P < 0.05$),是苜蓿的 1.5 倍,与我们的研究结果一致。

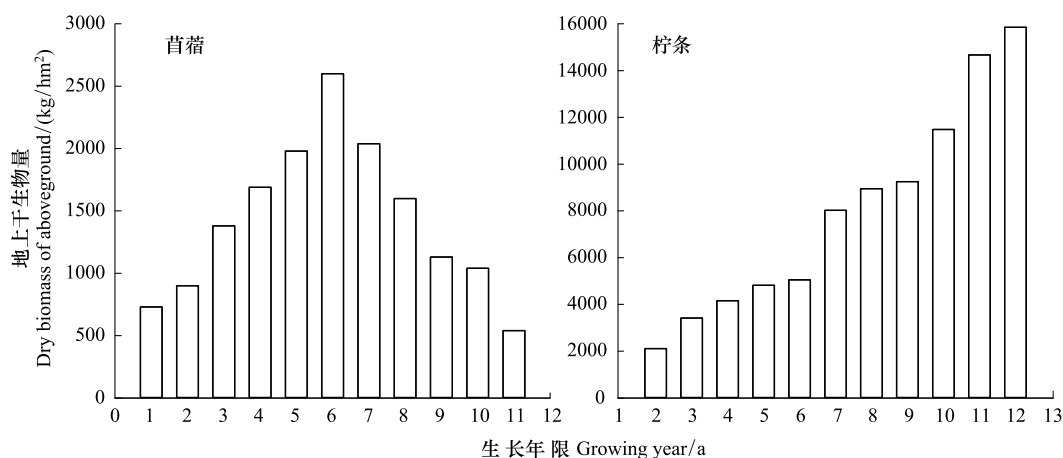


图5 柠条和苜蓿的地上最大生物量随植被年限的变化

Fig.5 Changes of the annual maximum dry biomass with plant growth for caragana and alfalfa

3 讨论

黄土高原近 50 年来的人工林草建设,人为引进很多外来高耗水植物物种,人工植被过度耗水打破降水和原生植被之间的动态平衡,普遍出现了以土壤干层为代表的新的生态环境问题^[6,9,18-19]。近年来已有大量研究发现,人工植被大量消耗土壤储水导致土壤水分减少^[20],几乎所有的人工乔、灌木和紫花苜蓿等多年生豆科牧草都能使土壤形成干燥化土层,土壤干层现象分布相当广泛^[21-23]。王力等^[14]研究表明,黄土高原地区人工植被用地与自然植被恢复土地相比,其土壤水分总是较低且使土壤干化。黄土区,柠条和苜蓿的耗水量是降雨量的 1.3 倍和 1.2 倍,降雨无法满足柠条和苜蓿的需求,它们只能过度消耗土壤水分来满足生长,最终造成土壤干化^[17]。在该研究区,也有研究表明,三种典型植被恢复类型土壤水分由大到小依次为撂荒地>柠条地>苜蓿地。观测初期,三种植被恢复用地含水量剖面分布相似,但随观测年限增加,柠条和苜蓿地中土壤水分消耗深度加深,耗水程度增强,尤其是在 1.0 m 以下土层更为明显,并在种植 2 年后,1.0 m 以下土层开始出现干化^[24]。在黄土区,多年种植柠条和苜蓿会导致土壤产生干层,且干层深度和干燥化程度随着柠条和苜蓿生长年限的延长而增大^[25-26]。

本研究表明,柠条和苜蓿的大量耗水使得其均在种植 5 年(6 年生柠条和 5 年生苜蓿)后剖面土壤水分显著减少并形成土壤干层;且剖面土壤水分变化速率在种植 5 年时存在一个“拐点”,在这之前土壤含水量和储水量大量减少,5 年之后土壤剖面水分减少速率降低,深层土壤水分变化较小。种植 8 年后,土壤中的储水被消耗殆尽,土壤水分处于相对稳定状态,这表明低于该年限所对应的土壤含水量时,柠条和苜蓿不能吸收利用,只能依靠当年的降水生存生长。

2—6 年生柠条,随着生长年限的增长,剖面土壤含水量迅速减少;在 6—12 年生长期间,柠条生物量不断增大,柠条地剖面土壤含水量仍然随着生长年限的增长而呈减少趋势,但深层土壤剖面水分变化较小,表明在柠条生长 6 年之后,剖面土壤水分随着生长年限降低的速率减小,深层土壤含水量在不同年限间变化相对较小。这与李小芳等^[27]研究结果一致,其研究表明随着柠条生长年限延长和柠条根系的下伸,土壤干层逐年加深加厚,5 年生柠条干层深度达 3.0 m,7 年生超过 4.0 m,10 年生干层深度接近 7.0 m,11 年以后,1.0—9.0 m 土层土壤湿度基本稳定,接近土壤萎蔫湿度。程积民等^[28]将柠条的生长发育期分为幼龄期(0—6 年)、中龄期(6—14 年)和老龄期(大于 14 年)。柠条在幼龄期生长主要依靠天然降水和土壤水分补给;在中龄期,土壤储水量较少,植被主要依靠天然降水补给维持植被生长。因此,本研究建议柠条种植的生长年限在 5—6 年左右,最大不要超过 6 年,其对应的地上最大生物量为 5050 kg/hm²。

本研究中苜蓿在 1—6 年,生物量随着生长年限的增长而增大,为苜蓿生长的旺盛期,对土壤水分需求增加,导致土壤水分迅速减少;种植 6 年后深层土壤水分已产生严重亏缺,水分供应受到限制,从而使得土壤剖面水分减小速率变小。因此,在苜蓿生长过程中,1—6 年生长前期土壤干燥化进程明显快于 7—12 年生长后期,前 6 年耗水深度和干层厚度逐年增加,7—12 年生苜蓿生长衰退,耗水深度和干层厚度有所减小^[29-30]。苜蓿生长至第 5 年,1—3.6 m 土层出现干层,在第 10 年(2013 年),即使处于丰水年条件下,仅 1.0—2.0 m 土层水分得到补给,其干层得到短时间的恢复,2.0 m 以下干层难以恢复^[31]。表明在研究区苜蓿种植 5 年后就会产生干层,且难以恢复。因此,建议苜蓿在研究区种植年限不要超过 5 年,其对应的地上最大生物量为 1980 kg/hm²。或者在苜蓿种植的第 4 年采取一定的水分调控措施,如条带状减少苜蓿种植,苜蓿与农作物或自然恢复植被间作,维持土壤水分平衡,以防止深层土壤干化层的形成。

4 结论

本文研究了黄土高原北部水蚀风蚀交错区六道沟小流域内两种典型人工灌草植被——柠条和苜蓿,在不同生长年限下土壤水分时空动态变化特征及土壤干层的形成过程,取得如下结论:

(1) 种植多年生的柠条和苜蓿会导致深层土壤干燥化,且土壤干化的程度随生长年限增大而加剧。柠条和苜蓿的耗水速率在种植 5 年时存在一个“拐点”,在这之前土壤含水量和储水量大量减少,5 年之后剖面土壤水分下降速率减小。种植 8 年后,土壤水分处于相对稳定的低水平状态,为无效水,不能被柠条和苜蓿根系吸收利用,植被只能依靠当年的降水维持生存。

(2) 土壤干层的形成速率和厚度与植被类型有关。苜蓿从第 5 年开始,1.0 m 以下出现干层,干层厚度达到 2.6 m;柠条从第 6 年开始形成干层,厚度达 1.4 m。因此,为减少深层土壤干层的发生发育,建议苜蓿在该地区的种植年限不超过 5 年,其对应的地上最大生物量为 1980 kg/hm²;柠条的生长年限不超过 6 年,其对应的地上最大生物量为 5050 kg/hm²。

参考文献(References):

- [1] 查轩,唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究. 自然资源学报, 2000, 15(1): 97-100.
- [2] Song X Z, Peng CH, Zhou G M, Jiang H, Wang W F. Chinese Grain for Green Program led to highly increased soil organic carbon levels: A meta-analysis. Scientific Reports, 2014, 4: 4460.
- [3] Chen, Y P. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.
- [4] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic Ecosystem Responses to Natural and Anthropogenic Changes in the Loess Plateau of China. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45(1): 223-243.
- [5] 张素霞,吕家珑,杨瑜琪,符孟虎. 黄土高原不同植被坡地土壤无机磷形态分布研究. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 29-32.
- [6] 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. Geoderma, 2010, 159(1-2): 99-108.
- [7] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. 土壤学报, 2002, 39(3): 404-411.
- [8] 李军,陈兵,李小芳,程积民,郝明德. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应. 生态学报, 2007, 27(1): 75-89.
- [9] 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. Journal of Hydrology, 2010, 381(1/2): 9-17.
- [10] Jia X X, Shao M A, Zhang C C, Zhao C L. Regional temporal persistence of dried soil layer along south-north transect of the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2015, 528: 152-160.
- [11] Li J, Chen B, Li X F, Zhao Y J, Chen Y J, Jiang B, Hu W, Chen J M, Shao M A. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [12] 程积民,万惠娥,王静,雍绍萍. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究. 林业科学, 2005, 41(2): 37-41.
- [13] 王云强. 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D]. 陕西: 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.
- [14] 王力,邵明安,王全九,贾志宽,李军. 黄土区土壤干化研究进展. 农业工程学报, 2004, 20(5): 27-31.
- [15] 王延平. 陕北黄土区陡坡地土壤水分植被承载力研究. 西北农林科技大学, 2009.
- [16] 李裕元,邵明安,上官周平,樊军,王丽梅. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植被演替研究. 草业学报, 2006, 15(2): 85-92.

- [17] 白永红, 高志永, 陆静, 汪有科, 董建国. 模拟干化土壤中的植被生长及土壤水分变化. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 1-8.
- [18] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143(1): 91-100.
- [19] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151: 437-448.
- [20] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, Luo Y. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [21] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [22] 魏天兴, 余新晓. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究. 应用生态学报, 2001, 12(2): 185-189.
- [23] 王志强, 刘宝元, 路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究. 生态学报, 2003, 23(9): 1944-1950.
- [24] 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. *Journal of Hydrology*, 2014, 517(2): 974-984.
- [25] Liu B X, Shao M A. Modeling soil-water dynamics and soil-water carrying capacity for vegetation on the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2015, 159(2): 176-184.
- [26] Jia Y H, Shao M A. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 523-531.
- [27] 李小芳, 李军, 王学春, 赵玉娟, 程积民, 邵明安. 半干旱黄土丘陵区柠条林水分生产力和土壤干燥化效应模拟研究. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3): 113-119.
- [28] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438.
- [29] 余冬立. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域植被恢复的水土环境效应研究[D]. 陕西: 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), 2009.
- [30] 刘沛松, 李军, 贾志宽, 于亚军, 刘世新. 宁南旱区苜蓿草地土壤水分消耗规律及粮草轮作土壤水分恢复效应研究. 中国农学通报, 2005, 21(9): 270-274.
- [31] Liu B X, Shao M A. Response of soil water dynamics to precipitation years under different vegetation types on the northern Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(1): 47-59.