

模拟干化土壤中的植被生长及土壤水分变化

白永红¹,高志永^{2*},陆 静²,汪有科^{3,4*},董建国⁴

(1.西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨陵 712100;

2.西安理工大学 西北旱区生态水工程国家重点实验室培养基地,陕西 西安 710048;

3.中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨陵 712100;4.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨陵 712100)

摘 要:为了探讨黄土丘陵干化土壤中栽种植物生长及其土壤水分问题,试验采用野外地下大型土柱模拟当地深层干化土壤,并在试验土柱栽植典型植物早熟禾、柠条、苜蓿和刺槐,于2014—2016年定期观测试验植物生长及土柱内10 m土层土壤水分,分析干化土壤中不同植被生长状况及土壤水分变化和水分利用效率,以期为干化土壤建造植被提供依据。结果表明:1)模拟干化土壤中,早熟禾、柠条、苜蓿和刺槐种植地土壤水分活跃层分别为0~2.6、0~3.2、0~3 m和0~10 m,其中早熟禾种植地土壤活跃层水分得到提升,该层次土壤储水量较初期增加115.07 mm,柠条、苜蓿和刺槐在2014年后活跃层干化加剧,与初期土壤储水量相比,该层土壤储水量至2016年分别减少42.90、45.57 mm和241.57 mm。2)稳定层分别为2.6、3.2、3 m和10 m以下,稳定层土壤水分无显著差异($P>0.05$),与初期相近。3)干化土壤中植被生长受当年降水量影响较大,株高生长量和单株生物量在2016年丰水年显著高于2015年枯水年($P<0.05$)。4)早熟禾和苜蓿水分利用效率在枯水年>丰水年,柠条和刺槐水分利用效率在丰水年>枯水年。

关键词:模拟;干化土壤;植被;土壤水分;水分利用效率

中图分类号:S718.516

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2018)05-0001-08

Effects of Simulated Dry Soil on Vegetation Growth and Soil Water Variaton

BAI Yong-hong¹,GAO Zhi-yong^{2*},LU Jing²,WANG You-ke^{3,4*},DONG Jian-guo⁴

(1. College of Nature Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China;

2. Key Laboratory for Northwest Water Resource and Ecological Environment of Ministry of Education Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shanxi 712100, China;

4. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract: Soil water is an important resource for the vegetations in the loess plateau, because most area of loess plateau belongs to arid and semi-arid region where rainfall is less and groundwater is deeper. The root of vegetation absorbs the deep soil water to keep the water consumption in dry season and caused soil desiccation that can result in the development of dry soil layer. However, information regarding management of soil drying layer is scarce. 12 large underground soil columns, which diameter is 0.8 m and depth is 10 m, was used to simulate the deep dry soil, and *Pratensis*, *Caragana*, *Alfalfa* and *Robinia* was planted in the large underground soil columns. We observed the plant height, ground diameter and individual biomass using tape measure, vernier caliper and balance. Soil moisture in all treatment groups was determined by using

收稿日期:2017-11-19 修回日期:2018-02-03

基金项目:陕西统筹项目:陕北风沙区设施枣树节水提质增效技术研究(2016KTZDNY-01-05);国家支撑计划项目:陕北水蚀区植被功能调控技术与示范(2015BAC01B03);陕西统筹项目:红枣优质高效生产关键技术集成与示范(2014KTCG01-03)。

作者简介:白永红,男,工程师,研究方向:生态经济林栽培技术。E-mail:byhx0123@163.com

*通信作者:高志永,男,博士研究生,讲师,研究方向:近地表汽态水。E-mail:GZYstruggling@163.com

汪有科,男,博士生导师,研究方向:水资源高效利用。E-mail:gjzwyk@vip.sina.com

CNC100 neutron water gauging tubes placed at different depths, at 20 cm intervals, and measured over the course of 10 days during 2014 to 2016, while water consumption and water use efficiency were calculated using water balance methods. Significance and variance analysis were done using SPSS 18.0. Our results showed that 1) the range and rule of soil water content for different vegetation in simulated dry soil were different. Soil moisture changeable layer of *Pratensis*, *Caragana*, *alfalfa* and *robinia* were 0—2.6 m, 0—3.2 m, 0—3 m and 0—10 m, respectively. And soil moisture stable layer of which were 2.6—10 m, 3.2—10 m and 3—10 m, respectively. The water content of changeable layer was restored by planting *Pratensis*, and comparing the initial soil water storage in 2011, soil water storage at this level increased by 115.07 mm in 2016. However, the water content of changeable layer planted *Caragana*, *Alfalfa* and *Robinia* became more and more dry after 2014, and soil moisture of which soil layer could not be restored in wet years, which rainfall was 581.3 mm. Comparing with the initial soil water storage at changeable layer in 2011, soil water storage decreased 42.90 mm, 45.57 mm and 241.57 mm in 2016, respectively. 2) There was no significant difference at 0.05 level in soil moisture stable layer for those vegetation, the soil moisture were ranged from 7.04% to 7.58%. Which was close to initial dried soil moisture. 3) The growth of vegetation affected by rainfall, height growth and biomass per plant was significantly higher at 0.05 level in 2016 (wet year) than that in 2015 (dry year). 4) Water use efficiency of *Pratensis* and *Alfalfa* was greater in dry years than in wet years, and water use efficiency of *Caragana* and *Robinia* was greater in wet years than in dry years. These results proved that different vegetation planted in dried soil layer resulted in different soil moisture changeable layer. *Pratensis* based on soil water content in the region was proper types of vegetation to manage dried soil layer, it could restore soil moisture in 0—2.6 m. The results of this study are critical for the development of sustainable management practices in the Loess Plateau, with the goal of relieving soil desiccation, and improving water use efficiency.

Key words: simulated; dry soil; vegetation; soil moisture; water use efficiency

土壤干化是黄土高原地区存在的一种特殊水文现象,近 50 a 气候变暖和降雨减少是造成黄土高原地区土壤干化的主要原因,而植被类型选择不当,种植密度过大,生产力过高,大范围植被重建加速土壤水资源的消耗,导致土壤干化进一步加深^[1],甚至形成永久性干层^[2]。如 Y. Q. Wang^[3]等发现黄土高原林地土壤干层厚度达最大,李军^[4]等通过对 23 种林地土壤水分的分析发现土壤干层厚度达到或超过 10 m。土壤干层的存在会影响土壤水分运移,阻碍降水入渗补给,弱化“土壤水库”功能,导致土壤质量和土壤生产能力降低,进而影响植被的水土保持、水文调节、水源涵养等生态系统服务功能^[5-8]。

迄今,关于土壤干化研究主要集中在量化指标、影响因素、形成过程、模型预测和人为调控上^[1-2,6,9-14]。土壤干化的形成,不仅制约已有植被生长,而且会对后续植被的选择和生存影响巨大^[10,15]。目前关于该问题的研究较为薄弱,此外,尚未见对深层土壤干化后续栽植多年生植物进行报道。在黄土高原大规模退耕还林还草的背景下,研究干化土壤水分和再植植被生长的动态及其互馈关系对于维持该区域生态稳定至关重要。

本研究模拟生长 28 a 的山地苹果(*Malus pum-*

ila)园伐后干化土壤,并在干旱土壤上栽植早熟禾(*Poa pratensis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、苜蓿(*Medicago sativa*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)4 种典型植物,利用 CNC-503B 型中子仪于 2014—2016 年监测 4 种典型植被 0~10 m 土壤水分,测定其植株株高、地径和生物量,以期对干化土壤后续植被建造及深入研究人工林耗水形成的干层治理提供参考。

1 研究区概况

研究区位于陕西省米脂县境内远志山红枣(*Ziziphus jujuba*)示范基地(37°12'N, 109°28'E),为典型黄土高原丘陵沟壑区;属中温带半干旱性气候,年平均气温 8.4℃,极端最高气温 38.2℃,极端最低气温 -25.5℃;2012—2015 年降雨量分别为 404.4、530.1、460.4 mm 和 334.8 mm,年均降水量 451.6 mm,主要集中在夏季,其中 7、8 月降雨量占全年降水量的 49%;土壤以黄土母质发育的黄绵土为主,容重为 1.24 g·cm⁻³,质地为粉质沙壤土。研究区 1984—2007 年间为旱作苹果(*Malus pumila*)园地,2007 年苹果林伐后休闲至 2011 年栽植枣树,同年布设试验区。

2 研究方法

2.1 试验土柱设置

试验在一水平阶地上布设,试验土柱为 12 个直径 0.8 m、深 10 m 的大型土柱。土柱采用开挖后回填,开挖时按照之前测定的土壤质地层分 3 层开挖,并将 3 层土壤分别堆放保存,以保证回填时按原来的土壤质地层次分层回填。土壤回填前用厚约 1 mm 的大棚塑料膜铺设在土柱井壁,使柱体土壤与外界土壤隔离,避免土柱内外水分交流扩散。回填时,一方面按照之前测定的土壤质地分层回填,逐层压实;另一方面重点控制回填土的土壤容重($1.29 \pm 0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和含水率(7%左右),从而最大程度模拟旱作枣林地干化土壤。回填土经过均匀掺混后分层回填踩实,土柱内垂向剖面土壤含水量较均一,含水率 7.5%左右。12 个土柱分别设置为早熟禾、柠条、苜蓿和刺槐的 4 个植被处理,每种处理 3 个重复。栽植时间是 2011 年 4 月。其中刺槐是栽植 2 年生苗木,早熟禾、苜蓿和柠条均为种子直播。

2.2 观测指标

2.2.1 土壤水分测定 在每个土柱的中间位置安置 10 m 长铝管,利用 CNC-503B 型中子土壤水分仪观测,试验于 2014 年 5 月至 2016 年 10 月每月观测 3 次,分别于每月 3 日、13 日和 23 日测定,若遇雨雪天气则后延。

土层储水量(W)根据土壤体积含水率计算:

$$W = 10\omega h \quad (1)$$

式中, ω 为体积含水率(%); h 为土层深度(cm)。

为了反映土壤水分的亏缺和补偿状况,采用土壤储水亏缺度和土壤储水亏缺补偿度^[16]来描述 4 种典型植被干化再植土壤水分状况。

土壤储水亏缺度(%):

$$D_{sw} = \frac{F_w - W_c}{F_w} \quad (2)$$

式中, F_w 为凋萎含水量(mm); W_c 为实际含水量(mm)。

土壤储水亏缺补偿度(%):

$$C_{sw} = \frac{W_e - W_b}{F_c - W_b} \quad (3)$$

式中, W_e 为年末土壤实际含水量(mm); W_b 为年初土壤实际含水量(mm); F_c 为田间持水量(mm)。

土壤水分在土层中运动状况,可以用方差来描述,方差 >1 的土层为活跃层,方差 <1 的土层为稳定层^[17]。方差公式如下:

$$\delta = \frac{1}{n-1} \sum_j^3 (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (4)$$

式中, x_{ij} 为 j 年 i 层的土壤含水量(%); x_i 为土壤含

水量在 2014—2016 年 i 土层均值(%)。

2.2.2 生物量测定 2015 年开始测定全部试验土柱内的株高、密度(株 \cdot m⁻²)、地径(柠条),刺槐以土柱试验处理中的 3 棵林木为样本,每隔 7 d 测量其各个枝条的长度和基部直径。地上生物估算,每月一次采用在试验区附近收获与试验土柱内相同的植物、相同规格和数量的枝条和草叶,室内烘干,并用电子天平称重。

2.2.3 耗水量 试验区植被耗水量利用农田水量平衡法计算。试验区植被均为雨养,无灌水,不发生深层渗漏,无地下水补给,试验期间未发生地表径流。因此,植被耗水量(E_T , m²·hm⁻²)公式可简化为:

$$E_T = P_r + \Delta W \quad (5)$$

式中, P_r 为降雨量(mm); ΔW 为计算时段初与计算时段末土壤储水量之差(mm)。

2.2.4 水分利用效率 水分利用效率(kg·m⁻³)指作物消耗单位水所制造的干物质量,公式为:

$$W_{UE} = \frac{Y}{E_T} \quad (6)$$

式中: Y 为干物质量(kg·hm⁻²)。

2.3 数据处理

用 SPSS18.0 软件进行数据统计分析,利用 origin2016 绘图软件作图。

3 结果与分析

3.1 不同植被下土壤水分变化

图 1 为早熟禾、苜蓿、柠条和刺槐在月和季尺度上土壤含水率的变化,4 种植被土壤含水率在 1—4 月及 11—12 月维持相对稳定,在 5—10 月受降雨及植被耗水等影响,波动较大;在季尺度上,土壤含水率变化在冬季较低,其他季节相对稳定。4 种植被种植初期及 2014—2016 年不同土壤深度处水分状况表明(图 2),早熟禾、柠条、苜蓿和刺槐在种植初期 0~10 m 土层土壤含水率相近,分别为 7.44%、7.47%、7.31%和 7.50%。除早熟禾外,柠条、苜蓿和刺槐种植地 0~10 m 土层土壤含水量于 2014 年后低于初始含水量;与初始含水量相比,早熟禾种植地土壤含水量变化率为 0.46%、0.61%和 1.14%;柠条种植地土壤含水率变化量为 0.62%、-0.40%和 -0.55%;苜蓿种植地土壤含水率变化量为 0.65%、-0.29%和 -0.62%;刺槐种植地土壤含水率变化量为 0.28%、-2.29%和 -2.30%。从作物耗水量来看(表 1),早熟禾耗水量低于同期降水量,其耗水量在 2015 年和 2016 年均显著低于同期其他植物的耗水量($P < 0.05$),是柠条、苜蓿和刺槐的 0.78~0.89、0.78~0.86 倍和 0.53~0.91 倍;柠

条、苜蓿和刺槐耗水量在 2015 年和 2016 年高于同期降水量;刺槐耗水量在 2014 年和 2015 年显著高于其他 ($P < 0.05$),其耗水量是同期(2014 年、2015

年)降水量的 0.94 倍和 1.79 倍;苜蓿耗水量在 2016 年显著高于其他 ($P < 0.05$),是同期(2016 年)降水量的 1.06 倍。

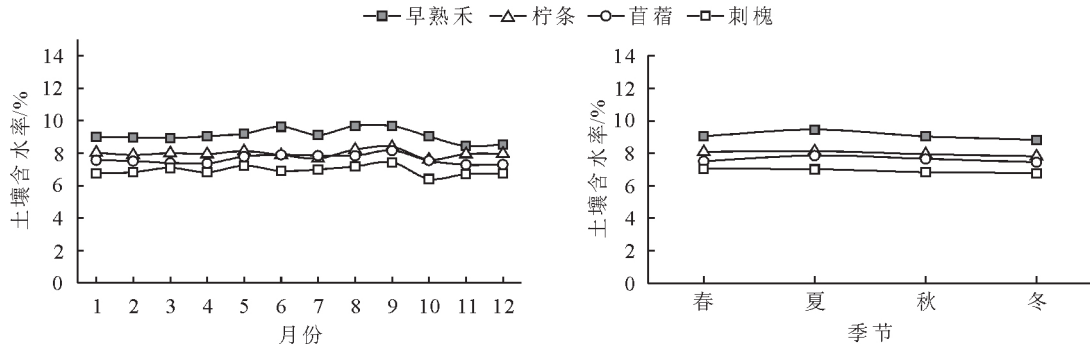


图 1 在月和季尺度上早熟禾、苜蓿、柠条和刺槐地土壤含水率

Fig. 1 Soil water content in pratensis, caragana, alfalfa and robinia on the monthly and seasonal scales

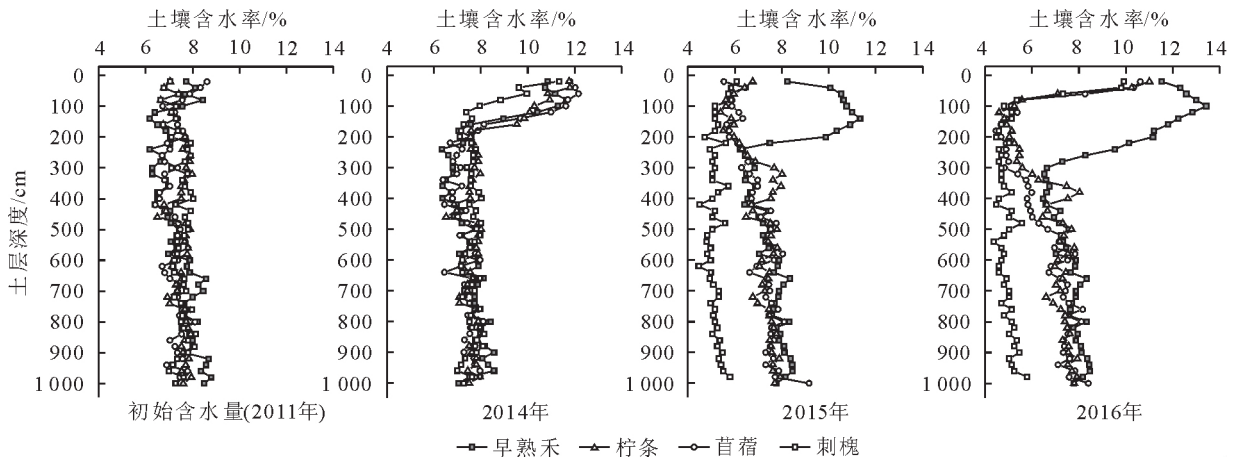


图 2 早熟禾、苜蓿、柠条和刺槐土壤含水率

Fig. 2 Soil water content in pratensis, caragana, alfalfa and robinia

表 1 不同植被耗水量

Table 1 Water consumption of Pratensis, caragana, alfalfa and robinia

年份	降雨量/mm	耗水量/(mm · hm ⁻²)			
		早熟禾	柠条	苜蓿	刺槐
2014	460.4	414.7 ± 5.3c	397.8 ± 11.2c	397.3 ± 9.8c	431.6 ± 5.6a
2015	342.0	326.3 ± 7.8d	444.0 ± 6.2b	419.4 ± 2.3c	611.0 ± 5.7a
2016	581.3	528.4 ± 6.7c	596.8 ± 1.2b	614.3 ± 3.1a	582.6 ± 4.5b

注:不同小写字母不同表示不同作物在同一年份耗水量存在显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

图 3 为 4 种植物种植地土壤含水率的方差分析。就活跃层而言(表 2),早熟禾、柠条、苜蓿和刺槐地土壤水分活跃层深度分别为 2.6、3.2、3.0 m 和 10 m。早熟禾土壤水分不存在亏缺现象 ($D_{sw} < 0$),得到降雨的补充 ($C_{sw} > 0$);早熟禾土壤水分均值显著高于其他 3 种植物土壤水分 ($P < 0.05$),其土壤水分在 2015 年(枯水年)达 9.53%,是其他 3 种植物的 1.57、1.51 倍和 1.83 倍,其土壤水分在 2016 年(丰水年)达 11.54%,是其他 3 种植物的 1.96、1.90 倍和 2.23 倍。柠条、苜蓿和刺槐土壤水

分在 2014 年后出现亏缺状态 ($D_{sw} > 0$),降雨无法补偿亏缺的土壤水分 ($C_{sw} < 0$),使土壤水分亏缺呈现逐年增加趋势,其中刺槐土壤水分亏缺显著高于苜蓿和柠条 ($P < 0.05$), D_{sw} 值 $> 17%$;刺槐土壤水分均值在 2015 年(枯水年)和 2016 年(丰水年)分别为 5.2% 和 5.18%,这表明刺槐在枯水年(2015)已耗尽土壤中可用的土壤水分,即使在丰水年(2016),亏缺的土壤水分也得不到补偿,只能依靠当年降雨维持生长;此外,柠条和苜蓿土壤水分亏缺程度无显著差异 ($P > 0.05$)。就稳定层而言(表 2),早熟禾、

苜蓿和柠条土壤水分接近初始含水量,土壤水分均值无显著差异 ($P > 0.05$),其范围为 7.04%~7.58%;早熟禾土壤水分无论在枯水年(2015)还是丰水年(2016)向下移动,出现显著补偿稳定层土壤现象($C_{sw} > 0, P < 0.05$),而柠条和苜蓿稳定层土壤水分得不到补偿($C_{sw} < 0$)。

3.2 模拟干化土壤中的植被生长

模拟干化土壤中早熟禾、柠条、苜蓿、刺槐各处理生育期内株高、地径、单株生物量见图 4 和表 2。图 4 表明,植被株高、地径和单株生物量均随着时间增长,达到一定值后趋于稳定。由表 3 可以看出,4 种植物的株高生长量存在显著性差异 ($P < 0.05$),其中早熟禾株高生长量最小,为 17.6 cm 和 22.7 cm,刺槐株高生长量最大,为 53 cm 和 55.5 cm;地径的生长量也存在显著性差异 ($P < 0.05$),其中苜蓿地径变化量最小,为 1 mm 和 1.2 mm,刺槐地径变化量最大,为 3.6 mm 和 3.9 mm;早熟禾、柠条、苜蓿单株生物量无显著差异 ($P > 0.05$),刺槐单株生物量显著高于其他三者 ($P < 0.05$),是上述 3 种

植被生物量的 22.7~33.5 倍。此外,同种植物株高生长量和单株生物量在丰水年(2016)显著高于枯水年(2015, $P < 0.05$),地径生长量在丰水年和枯水年无显著变化 ($P < 0.05$)。

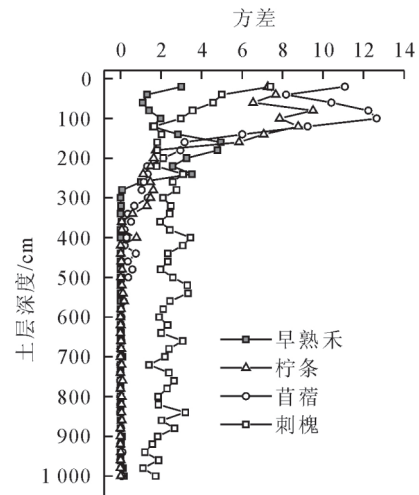


图 3 不同植物土壤水分方差分析

Fig. 3 Variance of soil moisture of different vegetation types

表 2 不同植物土壤水分在活跃和稳定层亏缺和补偿状况

Table 2 Soil water deficit and compensation in changeable and stable layers for different vegetation

年份	植被	活跃层				稳定层			
		C_s/m	$D_{sw}/\%$	$C_{sw}/\%$	$\theta_m/\%$	S_s/m	$D_{sw}/\%$	$C_{sw}/\%$	$\theta_m/\%$
2014	早熟禾	0~2.6	-46.19±1.2b	12.09±1.1a	9.03±0.1a	2.6~10	-21.32±1.7a	0.36±0.05a	7.52±0.32a
	柠条	0~3.2	-48.66±2.3b	11.49±1.3a	9.19±0.08a	3.2~10	-22.59±0.9a	0.49±0.03a	7.58±0.45a
	苜蓿	0~3.0	-49.28±1.4b	11.61±1.5a	9.23±0.05a	3.0~10	-16.27±1.1a	0.79±0.01a	7.40±0.51a
	刺槐	0~10	-25.94±3.1a	1.86±0.9b	7.79±0.03b				
2015(枯水年)	早熟禾	0~2.6	-54.17±1.32c	3.53±0.52a	9.53±0.02a	2.6~10	-21.96±2.1a	0.25±0.08a	7.54±0.32a
	柠条	0~3.2	1.77±0.78b	-20.98±0.74c	6.30±0.07c	3.2~10	-20.39±1.8a	-0.88±0.05b	7.44±0.28a
	苜蓿	0~3.0	1.95±0.95b	-22.99±0.58c	6.07±0.05c	3.0~10	-20.35±1.6a	-1.59±0.04b	7.40±0.41a
	刺槐	0~10	17.60±2.3a	-17.68±0.32b	5.26±0.03b				
2016(丰水年)	早熟禾	0~2.6	-86.73±2.3c	14.93±1.3a	11.54±0.1a	2.6~10	-22.09±1.1c	0.52±0.04a	7.55±0.03a
	柠条	0~3.2	2.06±1.06b	-1.42±0.3c	6.05±0.08b	3.2~10	-18.50±1.3b	-0.75±0.06c	7.32±0.05a
	苜蓿	0~3.0	4.58±1.1b	-1.26±0.2c	5.90±0.07b	3.0~10	-13.85±0.9a	-2.58±0.07b	7.04±0.07a
	刺槐	0~10	17.80±1.7a	-0.18±0.05b	5.12±0.05c				

注: C_s 为活跃层深度; S_s 为稳定层深度; θ_m 为平均含水率;同列小写字母不同表示 5% 差异显著水平。

3.3 不同植被水分利用效率

表 4 为 2015—2016 年干化土壤中不同植被生物量及水分利用效率。可以看出,早熟禾的生物量显著低于其他植被 ($P < 0.05$),其生物量分别是柠条、苜蓿和刺槐的 0.6、0.8、0.4 倍(2015 年)和 0.6、0.9、0.6 倍(2016 年)倍;刺槐生物量显著高于早熟禾,分别达 21 100 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 24 100 $kg \cdot hm^{-2}$;早熟禾和苜蓿的水分利用效率无显著差异 ($P > 0.05$),该值的范围为 2.6~2.9 $kg \cdot m^{-3}$;柠条的水分利用效率显著高于早熟禾和苜蓿 ($P < 0.05$),是早熟禾和苜蓿的 1.2 倍和 1.5 倍。此外,模拟干化

土壤中 4 种植物生物量受当年降水量影响较大,丰水年(2016)生物量高于枯水年(2015),其中柠条生物量变化最大,丰水年生物量是枯水年的 1.6 倍;早熟禾和苜蓿的水分利用效率在枯水年高于丰水年 0.2 $kg \cdot m^{-3}$ 和 0.3 $kg \cdot m^{-3}$,而柠条和刺槐的水分利用效率丰水年高于枯水年,刺槐在丰水年的水分利用效率是枯水年的 1.7 倍。

4 结论与讨论

4.1 结论

通过在模拟干化土壤中种植植被并监测土壤水

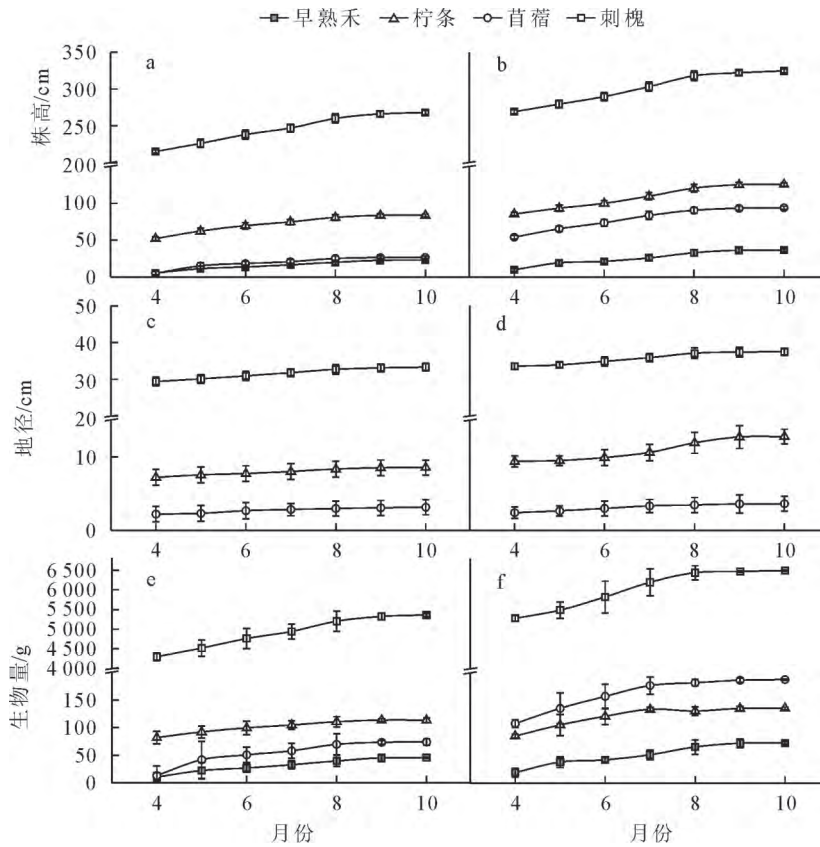


图 4 2015 年和 2016 年不同植被株高(a,b)、地径(c,d)及生物量(e,f)

Fig. 4 Plant height (a,b), ground diameter(c,d) and individual biomass(e,f) for different vegetation in 2015 and 2016

表 3 不同植被生长情况

Table 3 Growth of different vegetation

植被	株高生长量/(cm·hm ⁻²)		地径生长量/(cm·hm ⁻²)		单株生物量/(g·hm ⁻²)	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
早熟禾	17.6±0.3cB	22.7±1.1cA			35.2±5.6bB	53.4±7.5bA
柠条	31.6±1.2bB	40.2±0.9bA	1.3±0.6bA	3.4±0.8aA	31.6±12.2bB	50.2±11bA
苜蓿	21.7±2.3cB	39.9±1.5bA	1.0±0.8bA	1.2±0.6bA	60.8±4.1bB	79.8±9.7bA
刺槐	53.0±5.4aB	55.5±2.7aA	3.6±1.8aA	3.9±1.2aA	1060±53aB	1210±44aA

注:不同大写字母表示同一植被在不同年份同一处理存在显著性差异($P<0.05$)。

表 4 不同植被 2015—2016 年生物量、耗水量及水分利用效率

Table 4 Biomass, ET, WUE of different vegetation in 2015 and 2016

植被	2015 年			2016 年		
	生物量 /(kg·hm ⁻²)	耗水量 /(m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率 /(kg·m ⁻³)	生物量 /(kg·hm ⁻²)	耗水量 /(m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率 /(kg·m ⁻³)
早熟禾	9 000±256d	3 263±13d	2.8±0.07c	14 000±752c	5 284±43c	2.6±0.12b
柠条	15 000±132b	4 440±68b	3.4±0.08a	24 000±364a	5 968±75b	4.0±0.06a
苜蓿	11 000±214c	4 194±12c	2.9±0.04bc	16 000±572b	6 143±82a	2.6±0.11b
刺槐	21 100±151a	6 110±15a	2.4±0.03d	24 100±694a	5 826±79b	4.1±0.06a

分及各生长指标,分析各植被土壤水分动态变化、植物生长状况及水分利用效率,得到以下结论:

1) 干化再植早熟禾在监测期(2014—2016 年)年耗水量均<当年降水量,土壤储水量及水分变化深度逐年增加,使得土壤水分活跃层(0~260 cm)的

水分得到恢复,该层次土壤的储水量较初期增加 115.07 mm。

2) 干化再植柠条和苜蓿在 2014 年耗水量<当年降水量,其 0~320 cm(柠条地)和 0~300 cm(苜蓿地)土层土壤水分(活跃层)得到临时补充,该土层

储水量较初期分别增加 57.42 mm 和 54.28 mm, 逢枯水年(2015)该土层土壤水分消耗殆尽, 再次出现干化现象, 遇丰水年(2016)此层土壤水分得不到补偿。

3) 干化再植刺槐在 2014 年耗水量 < 当年降水量, 活跃层(0~1 000 cm)土壤水分变化剧烈, 2014 年后干化加剧, 至 2016 年 0~1 000 cm 范围内土壤储水量较初期减少 241.57 mm。

4) 模拟干化土壤中种植早熟禾、苜蓿、柠条和刺槐, 其生长受当年降水量影响较大, 株高生长量和单株生物量在丰水年(2016)显著 > 枯水年(2015)。

4.2 讨论

土壤水分是限制黄土高原植被生长的关键性因子^[18], 黄土高原土壤干化日趋严重, 干层空间分布增大^[8]。植被选择不当、种植密度过高等因素促进干层进一步恶化^[19]。为分析干化条件下土壤水分及植被生长状况, 于 2011 年在土壤干化的基础上栽植早熟禾、柠条、苜蓿和刺槐 4 种典型植被, 研究表明, 干旱土壤再植早熟禾能够恢复 0~10 m 土层土壤水分; 干化再植柠条和苜蓿初期在降雨量充沛条件下(2011—2014 年年均降雨量为 495 mm)能够使土壤活跃层(0~3 m)土壤水分得到临时恢复, 后期遇枯水年(年降雨量 342 mm)土壤活跃层再次出现干化。已有研究表明早熟禾水分利用层和 87% 的主根系分布在 0~30 cm 土层内^[20], 柠条和苜蓿在干旱胁迫下主根生长受限, 生物量下降, 减弱“大根系”冗余消耗过多的水分和养分, 使其趋向适应干化环境, 显著降低蒸腾耗水^[21-22], 监测期降雨量(2011—2014 年)不仅能满足植被生长而且能够入渗至 2~3 m 补充土壤水分^[23], 至 2014 年活跃层土壤水分在降雨的补给下达到 9.03%~9.23%(表 2), 较初期干化土壤水分增加 1.8%~1.92%。在枯水年(2015 年), 早熟禾仅消耗 0~30 cm 表层土壤水分, 其耗水量低于同期降雨量, 部分降雨入渗至较深土层, 而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, 它们只能过度消耗活跃层土壤水分来满足生长, 最终造成活跃层土壤再次干化, 致使活跃层土壤水分由原来的 9.13%, 9.23% 降至 6.3%, 6.07%, 稳定层(3~10 m)干化难以得到降水补给, 土壤水分长期维持在初期干化状态(7.4%), 即使遇丰水年(2016 年), 活跃层和稳定层的土壤水分并不能得到恢复。柠条林地 11 年后 2~9 m 土层全部干化^[24], 苜蓿地 7 年后土壤干层达到 10 m^[25]。预计后期, 柠条和苜蓿耗水深度还会增加, 稳定层土壤水分会进一步被消耗, 再次出现通体干化现象。如果要实现干层土壤水分恢

复, 只能通过撂荒或种植如早熟禾等浅根系 1 年生植被来降低耗水强度, 经多年降雨入渗, 逐步恢复活跃层土壤水分, 通过较长时间恢复稳定层土壤水分。

干化再植刺槐土壤水分活跃层 0~10 m, 即 0~10 m 土层土壤水分变化剧烈, 这与已有的研究结果一致^[26], 随着林龄增加, 土壤干旱化加重, 2011 年初始干化土壤含水率为 7.50%, 2016 年降至 5.18%, 也就是说干化再植刺槐不仅达不到恢复土壤水分的目的, 而且使得土壤干化进一步加重。刺槐是干旱敏感型树种, 对水分的需求量较高, 林地土壤水分多寡影响蒸腾耗水大小^[27], 刺槐生长前期, 在降水和土壤水分供给条件下, 生长旺盛, 蒸腾耗水大于降雨量, 使得深层土壤水分降低, 在 2015 年(枯水年)将前期储存在土壤中水量消耗殆尽, 在 2016 年(丰水年)只能依靠当年降雨维持生长, 其耗水量与降雨量接近。随着林龄的增长, 其生产力将会明显降低且年际波动剧烈, 最终出现生长衰败和死亡现象。此外, 刺槐林地干化程度和干化发展速度与造林密度有关, 密度过大, 出现干化程度越严重, 干化发展速度越快, 生长衰败越早^[26]。

植物的水分利用效率反映了植物在消耗水分后所固定 CO₂(干物质积累)的量, 可反映植物生长与水分利用的关系, 高的水分利用效率被认为植物在干旱半干旱地区成功生长的一个特征^[28-30]。早熟禾对土壤水分消耗方式属于迅速消耗型, 土壤含水量充足时蒸腾剧烈^[31], 其在 2016 年活跃层土壤含水率达 11.54%, 较 2015 年高 2.01%, 造成 2016 年耗水是 2015 年的 1.62 倍, 尽管生物量 2016 年高于 2015 年, 但高耗水导致其水分利用效率在丰水年降低。苜蓿、柠条和刺槐的水分利用效率随着干旱胁迫的加剧而升高, 土壤水分的亏缺降低植物的气孔导度, 为了维持光合速率, 叶片胞间 CO₂ 浓度和大气 CO₂ 浓度比值降低, 提高了水分利用效率^[32]。然而植物的水分利用效率对干旱胁迫相应的存在阈值, 如果干旱胁迫进一步加剧, 气孔表皮细胞失水过快, 光合系统受损, 气孔被动开大, 降低了气孔限制, 导致光合速率降低, 蒸腾速率升高, 促使水分利用效率降低^[33]。如苜蓿活跃层土壤水分降低 0.17%, 水分利用效率降低了 0.3 kg·m⁻³, 刺槐活跃层土壤水分降低 0.14%, 水分利用效率增加了 1.7 kg·m⁻³, 即不同植被对干旱胁迫阈值不同, 苜蓿干旱胁迫超出阈值, 水分利用效率降低, 而刺槐还在阈值范围之内。此外, 干化再植植被受制于干旱胁迫, 其生长量和生物量随着降水量的年际变化发生波动性变化, 丰水年份生长量 > 枯水年份。

参考文献:

- [1] CHEN H S, SHAO M A, LI Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2008, 143(1): 91-100.
- [2] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 87-90.
WANG L, SHAO M A, HOU Q C. Preliminary research on measured indexes of dried soil layer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 87-90. (in Chinese)
- [3] 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): 99-108.
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] WANG L, WANG S P, SHAO H B, *et al.* Simulated water balance of forest and farmland in the hill and gully region of the Loess Plateau in China[J]. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2012, 146 (Supp. 1): 226-243.
- [7] SHI H, SHAO M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(1): 9-20.
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] 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, 28(1): 75-89.
- [10] WANG Z Q, LIU B Y, LU B J. A study on water restoration of dry soil layers in the semi-arid area of Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1944-1950.
- [11] XIA Y Q, SHAO M A. Soil water carrying capacity for vegetation: a hydrologic and biogeochemical process model solution [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 214(2): 112-124.
- [12] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 77-83.
WANG Z Q, LIU B Y, WANG X Y, *et al.* Soil water restoration of different land use after artificial forest in the semi-arid area of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23 (11): 77-83. (in Chinese)
- [13] 谢军红, 柴强, 张仁陟, 等. 黄土高原区多年生苜蓿地土壤干层恢复的适宜后茬筛选[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 51-57.
XIE J H, CHAI Q, ZHANG R S, *et al.* Suitable succession crop screening after perennial alfalfa for soil dedication restoration in Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 51-57. (in Chinese)
- [14] 王美艳, 李军, 孙剑, 等. 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4526-4534.
WANG M Y, LI J, SUN J, *et al.* Soil desiccation characteristics of alfalfa grasslands and soil water restoration effects in alfalfa-grain crop rotations on the semi-arid areas of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2009, 29(8): 4526-4534. (in Chinese)
- [15] 王素梅, 贾志宽, 韩清芳, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1045-1051.
- [16] 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(11): 2395-2401.
- [17] WANG Z Q, LIU B Y, ZHANG Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(6): 707-718.
- [18] 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[J]. *生态学报*, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [19] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 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.
CHEN H S, WANG K L, SHAO M A, *et al.* A review soil the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 155-161. (in Chinese)
- [20] 孙强, 韩建国, 刘帅, 等. 草地早熟禾草坪土壤水分动态与根系生长分布[J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1306-1311.
- [21] 朱元龙, 王桑, 林永刚, 等. 黄土高原丘陵区柠条根系生长发育特性研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 232-237.
- [22] 李文娆, 张岁岐, 丁圣彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(19): 5140-5150.
LI W R, ZHANG S Q, DING S Y, *et al.* Root morphological variation and water use in alfalfa under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(19): 5140-5150. (in Chinese)
- [23] 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.
YANG W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433-438. (in Chinese)
- [24] 李小芳, 李军, 王学春, 等. 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[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 113-119.
LI X F, LI J, WANG X C, *et al.* Simulation of water productivity and soil desiccation of *Caragana microphylla* shrub land on semi-arid Hilly Region of the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(3): 113-119. (in Chinese)
- [25] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 430-438.
HAN S Y, LIU W Z, CHENG L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 430-438. (in Chinese)

(下转第 74 页)

- tion of water retention agent and organic fertilizer on plant grow on iron tailings[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2016, 37(3): 44-50. (in Chinese)
- [11] 姜培坤, 周国模, 钱新标. 侵蚀型红壤植被恢复后土壤养分含量与物理性质的变化[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 12-14. JIANG P K, ZHOU G M, QIAN X B. Changes in soil nutrients and physical properties under erosion red soil by vegetation recovery[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 12-14. (in Chinese)
- [12] 罗毅, 胡顺军, 王兴繁, 等. 一种电导率指标测可溶性盐分含量新方法[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1257-1261.
- [13] 郭新送, 宋付朋, 鞠正山. 不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆电导率的比较研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 812-818. GUO X S, SONG F P, JU Z S. Comparative study on electrical conductivity between saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios[J]. Soils, 2015, 47(4): 812-818. (in Chinese)
- [14] 王合云, 李红丽, 董智, 等. 滨海盐碱地不同造林树种改良土壤效果研究[J]. 水土保持研究, 2016, 52(2): 161-165. WANG H Y, LI H L, DONG Z, et al. Study on the effects of different afforestation species on the soil improvement in coastal saline area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 52(2): 161-165. (in Chinese)
- [15] 张国印. 河北平原土壤质量评价指标和方法初探[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [16] 王岩, 李玉灵, 石娟华, 等. 不同植被恢复模式对铁尾矿物种多样性及土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 112-117. WANG Y, LI Y L, SHI J H, et al. Effect of different vegetation restoration measures on the species diversity and soil properties of iron tailings[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 112-117. (in Chinese)
- [17] ZHANG H, SCHRODER J L, PITTMAN J J, et al. Soil salinity using saturated paste and 1:1 soil to water extracts[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1146-1151.
- [18] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(Supp. 1): 85-87. LIU G M, YANG J S. Study on the correlation of soil salt content with electric conductivity and soil water content[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(Supp. 1): 85-87. (in Chinese)
- [19] 陈欣, 靖淑慧, 冯若昂. 黄河对滨海湿地地表水可溶性盐的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(2): 27-30. CHEN X, JING S H, FENG R A. Influence of Yellow River on soluble salty ions in surface water of coastal wetlands[J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(2): 27-30. (in Chinese)
- [20] 季洪亮, 路艳. 滨海盐碱地生态修复效果评价[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 301-307. JI H L, LU Y. Evaluation of the eco-restoration effect on coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 301-307. (in Chinese)

(上接第 8 页)

- [26] 李军, 王学春, 邵明安, 等. 黄土高原半干旱和半湿润地区刺槐林地生物量与土壤干燥化效应的模拟[J]. 植物生态学报, 2010, 34(3): 330-339. LI J, WANG X C, SHAO M A, et al. Simulation of biomass and soil desiccation of *Robinia pseudoacacia* forestlands on semi-arid and semi-humid regions of China's Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(3). (in Chinese)
- [27] DU S, WANG Y L, KUME T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(1): 1-10.
- [28] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3882-3892. CAO S K, FENG Q, SI J H, et al. Summary on the plant water use efficiency at leaf level[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3882-3892. (in Chinese)
- [29] 金华, 玉米提·哈力克, 阿丽亚·拜都热拉, 等. 阿克苏 8 种常见树种叶片水分利用效率特征[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 44-50. JIN H, UMUT H, ALIYA B, et al. Characteristics of leaf water use efficiency of eight common tree species in Aksu [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 44-50. (in Chinese)
- [30] 邱权, 潘昕, 李吉跃, 等. 青藏高原 20 种灌木幼苗生物量分配、水分利用效率及叶片 $\delta^{13}C$ 比较[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 8-14. QIU Q, PAN X, LI J Y, et al. Comparison on biomass allocation and leaf water use efficiency and $\delta^{13}C$ of 20 shrub seedlings in Tibetan Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 8-14. (in Chinese)
- [31] 苏敏, 王艳荣, 赵文丽, 等. 持续干旱下四种地被植物对土壤水分利用的比较研究[J]. 中国草地学报, 2012, 34(2): 65-70. SU M, WANG Y R, ZHAO W L, et al. Comparative research of soil moisture utilization of four kinds of groundcover plants under long-term drought [J]. Chinese Journal of Grassland, 2012, 34(2): 65-70. (in Chinese)
- [32] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507. HU Z M, YU G R, WANG Q F, et al. Ecosystem level water use efficiency: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1498-1507. (in Chinese)
- [33] RASCHKE K, RESEMANN A. The midday depression of CO_2 assimilation in leaves of *Arbutus unedo* L.: diurnal changes in photosynthetic capacity related to changes in temperature and humidity[J]. Planta, 1986, 168(4): 546-558.