

DOI: 10.5846/stxb201403300595

张天文, 郭忠升, 宁婷, 白冬妹. 黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响. 生态学报, 2015, 35(3): 725-732.

Zhang W W, Guo Z S, Ning T, Bai D M. The effects of plant density on soil water and plant growth on semi-arid loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 725-732.

黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响

张天文^{1,2}, 郭忠升^{1,3,*}, 宁 婷^{1,2}, 白冬妹³

1 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 研究密度对土壤水分和植物生长的影响对森林植被恢复和生态建设具有重要的意义。以黄土丘陵半干旱区人工柠条为研究对象, 对相同立地条件下不同密度柠条林生长与林地土壤水分进行了长期定位观测和分析。研究表明, 1—5 年生柠条不同密度林地土壤水资源量差异显著, 从第 3 年开始, 土壤水资源量随着密度增加而增加; 10—12 年生柠条密度越低土壤水资源量越高 (Treatment4 除外, T_4), 不同密度之间水资源量差异不显著。1—3 年生柠条密度越高会促进其株高生长; 从第四年开始, 柠条密度过高会抑制其株高生长; 1—5 年生柠条密度越高基径生长越快, 不同密度生长差异不显著; 10—12 年生密度过高 (Treatment1, T_1) 或过低 (T_4) 均会抑制柠条株高与基径生长。在柠条播种后第 5 年, 高密度试验小区 (T_1 和 Treatment2, T_2) 柠条林地最大入渗深度土壤水资源量降到水资源利用限度, 此时需要依据土壤水分植被承载力通过平茬来降低林分密度, 以达到减少土壤水分消耗和可持续利用土壤水资源之目的。

关键词: 植物密度; 土壤水资源; 生长; 水资源利用限度

The effects of plant density on soil water and plant growth on semi-arid loess hilly region

ZHANG Wenwen^{1,2}, GUO Zhongsheng^{1,3,*}, NING Ting^{1,2}, BAI Dongmei³

1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: *Caragana korshinskii* Kom. is widely distributed on the Loess Plateau, China, and it is a very ecologically adaptable shrub with an extensive root system capable of adsorbing large amounts of water and resistant to adverse environmental conditions. Moreover, *Caragana korshinskii* Kom. is the main shrub species for semi-arid loess hilly region to create of soil and water conservation forest. Therefore, it is necessary to explore the influence of *Caragana korshinskii* Kom. on the soil water resources in semi-arid loess hilly region. Plant density is one of the most important factors affecting the soil water resources, there are many studies on relationship between plant density and soil water resources, and also some researches about the effect of plant density on plant growth. However, rather less attention has been paid to the effect of plant density both on plant growth and soil water resources. The influence of density on soil water and plant growth has great significance on forest vegetation restoration and ecological construction. The effects of *Caragana korshinskii* Kom. forest

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271539)

收稿日期: 2014-03-30; 网络出版日期: 2014-10-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guozs@ms.iswc.ac.cn

density on plant growth and soil water volumetric content under the same site condition were conducted by long-term in-situ observation and analysis. The results showed that there are significant differences between the different density treatments of 1 to 5-year-old *Caranaga korshinskii* Kom. woodland. The soil water resources increased with the increase of plant density from the third year. However, the Soil water resources were negatively correlated to plant density of 10 to 12-year-old *Caranaga korshinskii* Kom. treatment (except Treatment 4, T_4) and the differences between the different density treatments were not significant. The plant height growth was positively correlated to plant density for 1 to 3-year-old *Caranaga korshinskii* Kom. treatments. The excessive high density restrained the plant height growth from the fourth year. The basal diameter increased with increasing density of the 1 to 5-year-old *Caranaga korshinskii* Kom. woodland, but the differences caused by density were not significant. The plant height and basal diameter growth were both restrained under the condition of excessive high (Treatment 1, T_1) or low density (T_4) of 10 to 12-years-old *Caranaga*. The soil water resources of the maximum infiltration depth layer in high-density experimental treatment (both T_1 and Treatment 2, T_2) dropped to the soil water resource use limit at the fifth year of *Caranaga korshinskii* Kom. growth, meanwhile, the plant density should be reduced by cutting according to the soil water carrying capacity for vegetation in order to reduce the soil water consumption and realizing the sustainable utilization of soil water resources in this situation.

Key Words: plant density; soil water resources; growth; soil water resource use limit

柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.) 属于豆科锦鸡儿属, 落叶灌木。萌蘖力和再生能力极强、易繁殖; 根系发达, 吸水能力强; 抗逆性强, 耐旱耐寒^[1], 还可以改善土壤物理性质^[2], 培肥土壤^[3-4]。此外, 柠条还具有一定的经济价值, 可做蜜源、入药以及薪炭^[5], 并且是一种食用蛋白质资源^[6]和饲料原料^[7-8]。柠条林能防风固沙、拦泥蓄水、减少地表径流, 从而达到减少土壤养分及水分流失, 保持水土之目的^[9-10], 发挥良好的环境效益。

在黄土高原地区, 生态环境脆弱, 自然资源匮乏。有研究发现植被恢复对黄土丘陵半干旱地区的生态保护具有重要的意义^[11-14], 在植被恢复的过程中, 一般通过增加树种的初植密度来达到迅速覆盖地表的目的, 但是密度过高易引起土壤水分供需矛盾^[15]。在黄土丘陵干旱半干旱地区, 密度对土壤水分的影响仅次于降雨^[16], 且密度对于水分紧缺地区具有重要意义, 目前关于植物密度对土壤水分影响的研究已经引起广泛的关注^[15, 17-22]。如贾海坤等研究了皇甫川流域植被盖度与土壤水分的关系^[15], 潘占兵等对宁夏盐池地区不同种植密度的柠条林土壤水分进行研究^[19]。在半干旱黄土丘陵地区, 植物生长的限制因子是水分, 尤其指土壤水分, 林分密度对土壤水分的影响进一步影响植物生长, 林分密度变化对植物生长影响吸引了大量研究^[20, 23-25]。目前关于半干旱黄土丘陵区造林密度变化对不同林龄阶段柠条生长与土壤水分影响的系统性研究较少, 本文通过对黄土丘陵半干旱区不同密度人工柠条林多年土壤容积含水量和生长定位观测和分析, 系统地研究密度变化与土壤水资源和柠条生长的影响, 为当地森林植被恢复和生态建设过程中密度调控提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于黄土丘陵半干旱区的上黄生态试验站 (宁夏固原), 该站位于 $35^{\circ}59'—36^{\circ}02'N$, $106^{\circ}26'—106^{\circ}30'E$ 范围内, 海拔高度约 1534—1824m。降水年内分配不均, 主要集中在 6—9 月份, 雨季降水量占年降水的 70% 以上。自有数据记载以来, 降水变化在 259.9mm (1991 年)—634.7mm (1984 年) 之间, 降水的年际变化较大。土壤类型为黄绵土, 植被类型为森林草原向典型草原过渡型。试验区为柠条林, 林下主要植物种类有长芒草 (*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)、芨芨蒿 (*Artemisia giraldi*)、百里香 (*Thymus mongolicus*) 等。

1.2 研究方法与观测项目

1.2.1 试验设计

2002 年 6 月 24 日在立地条件比较均一的地段,进行翻土、平整土地和撒播柠条,建立 5 个面积为 100m^2 ($20\text{m}\times 5\text{m}$) 的标准径流观测场,试验播量分别为 2.0、1.5、1.0、0.5 $\text{kg}/100\text{m}^2$ 和多年撂荒地(对照)。小区海拔约 1650m,坡度约为 8° ,5 个小区位于南北向同一水平线上。在每个径流场中心地带各安置两个相距 1m 且长为 4m 的中子仪铝合金套管作为两个重复进行水分观测,铝合金套管外露 10cm,用橡皮盖封口减少因蒸发或降雨对观测数据的干扰。安置铝合金套管前取土样,测定土壤水分,然后再用中子仪测定土壤水分,进行对比、分析和校对。测定深度为 0—390cm,除测点 5 cm 代表深度 0—10cm,其他测点代表深度为测点深度 $\pm 10\text{cm}$ 。测定前对中子仪进行了标定,标定方程为:

$$y = 55.76x + 1.89$$

式中, y 为土壤容积含水量, x 为中子仪读数。2011 年对径流观测场及其径流桶等野外设备进行维护和检修,更换了 10 年生不同密度小区 4m 的铝合金中子管为 8m 的 PVC 管后,2011—2013 年测定深度增加到 0—770cm。测量换管前后两种不同材质下土壤容积含水量,基于铝管测量的土壤容积含水量值 Y_1 与基于 PVC 管测量的土壤容积含水量值 Y_2 存在关系:

$$Y_2 = 0.64Y_1 + 1.58$$

1.2.2 气象资料

降水量等气象资料来源于距试验地西北 50m 的上黄生态试验站气象站和试验地附近安置的雨量器记录观测。

试验地历年降水量平均值为 415.6mm (1983—2001 年)。2002 年到 2006 年期间,除 2003 年降水量 (623.3mm) 超过多年平均值外,其余 4a 降水量 (2002 年降水量为 384.8mm,2004 年降水量为 328.3mm,2005 年降水量为 379mm,2006 年降水量为 303.5mm) 均低于多年平均值。2011 年到 2013 年降水量差异较大,这 3a 仅有 2013 年降水量 (543.1mm) 超过多年平均值,2011 年与 2012 年均出现了干旱,其中 2011 年干旱严重,降水量仅为 279.4mm (其中 1—4 月份为预测值),2012 年全年降水量仅为 370.9mm。根据国内较常用的降水年型划分标准^[26] 对监测年份进行降水年型划分,监测年份中仅 2003 年和 2013 年为丰水年,2002 年和 2005 年为平水年,2004、2006、2011 年和 2012 年均为干旱年。

1.2.3 柠条林地剖面土壤水分观测

由于中子仪测定土壤水分精度高^[27],便于连续定位观测,故采用 CNC503A (DR) 型智能中子水分仪定期测定剖面土壤水分。用中子仪测定时,每 20cm 记录 1 次,中子计数时间为 16s。对土壤水分进行定期和不定期测量,每年从柠条开始萌发的 4 月中旬开始 (第 1 年为播种时) 到落叶 (10 月中旬) 之前,每隔 15d 测定 1 次,11 月到次年 3 月于每月月初测定 1 次。同时,非定期的进行降雨前和降雨后土壤水分观测,测定次降雨土壤水分入渗深度。

1.2.4 柠条林生长调查

于 2002 年 9 月和 2012 年 5 月采用样线法调查不同播量柠条幼林密度。2002 年调查时在每个小区中部 (分别距两边边缘 1m) 沿小区长轴方向选择 2 条样线,沿这条线从 0.5m 开始,每隔 1m 布设一个样方,每个小区共调查 18 个样方,样方面积为 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 。并设立固定样方,在试验小区上半部和下半部各选接近平均高和基径的 20 株柠条,用红漆对柠条基径进行标定 (距地表 2cm 处),用于生长状况和保存率调查。2012 年在不同密度小区分别选择可代表平均高和基径的 40 株柠条,用红漆标定观测位置用于生长状况和保存率调查。各小区播量及密度见表 1。在生长季对柠条林生长和不同密度剖面土壤水分进行全年测定。观测周期内,柠条生长季每 15d 测定 1 次基径和株高。其中基径用游标卡尺测量,以标记位置为准;株高用米尺测量,以地表至顶芽高度为准。

1.2.5 试验数据处理

试验数据采用 Excel 2010 进行预处理,用 SPSS16.0 统计软件对数据进行分析。土壤水资源量计算公

式为:

$$D_w = \sum_{i=1}^n \text{VSWC}_i \times \frac{H_i}{10}$$

式中, D_w 为土壤水资源量(mm),VSWC 为每层土壤容积含水量(%), H 代表土层厚度(cm), i 为土层序数, n 为土层总数。本试验 $H=20\text{cm}$, $n=20$,地面处 5cm 测量点实际代表深度 0—10cm,此时 $H=10$ 。

2 结果与讨论

2.1 柠条林地密度变化

由表 1 可知,随着时间变化,10a 间柠条密度变化较大。与 2002 年相比,2012 年 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 柠条密度分别减少了 29、22、24、2 株/ m^2 ,降低幅度为 43.3%、33.8%、47.1%、8%。由此可见,高密度小区由于密度过高,可能由于林木对水肥竞争激烈,个体死亡较多,因此柠条数量在十年内变化较大;低密度小区(T_4)则因为有足够的播种初期营养面积,个体对水肥的竞争不太激烈,因此个体死亡较少,密度变化较小。

表 1 2002 年与 2012 年柠条林密度调查表
Table 1 Density of Caragana forest in 2002 & 2012

项目 Item	处理一 Treatment 1 (T_1)	处理二 Treatment 2 (T_2)	处理三 Treatment 3 (T_3)	处理四 Treatment 4 (T_4)	对照 CK (T_5)
播量 Seeding rate/(kg/100m ²)	2	1.5	1.0	0.5	0
2002 年密度 Density/(株/m ²)	67	65	51	25	0
2012 年密度 Density/(株/m ²)	38	43	27	23	0

2.2 密度对土壤水分的影响

撂荒地(对照)土壤水分变化主要受降雨和蒸发的影响,多年撂荒地 在柠条生长期始末剖面土壤容积含水量垂直变化情况见图 1、图 2。由图看出,撂荒地剖面土壤水分在一定时期内差异不显著($P>0.05$)。受蒸发和降雨的影响,土壤水分变化主要发生在 180cm 土层内,在最大降雨入渗深度(290cm)内^[28]。因此,撂荒地受蒸散发造成的土壤水分损失可以通过降水补给得到恢复。

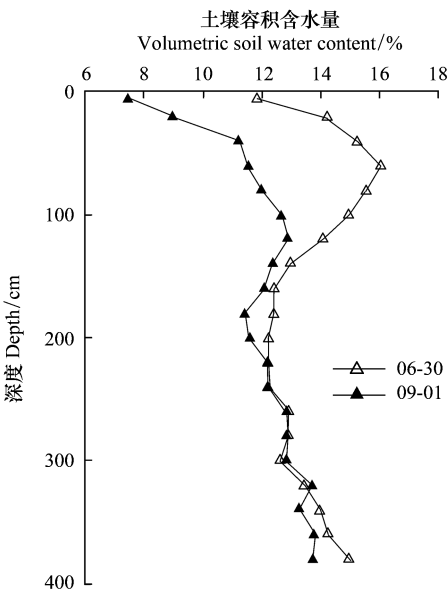


图 1 2002 年撂荒地生长期始末土壤容积含水量
Fig.1 Volumetric soil water content of abandoned land at the beginning and end of the growing season in 2002

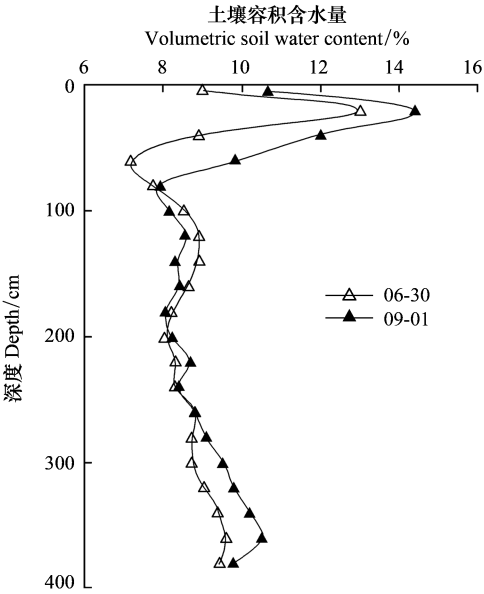


图 2 2012 年撂荒地生长期始末土壤容积含水量
Fig.2 Volumetric soil water content of abandoned land at the beginning and end of the growing season in 2012

土壤水资源是可更新资源,储存在土壤孔隙中的土壤水只有被植物吸收利用之后才能蓄存新一轮的雨水,否则会造成土壤水资源浪费,但是植物不能无限制地利用土壤水资源。植物利用土壤水资源可以降低土壤容积含水量,增加土壤颗粒吸水力,有利于提高降水的初渗速率和入渗量,减少地表径流,使土壤水资源得到合理的利用^[16,29-30]。由表 2 看出,播种当年除 T₄小区外,其他 3 个样地土壤水资源显著高于撂荒地。2003 年雨水充足,不同密度小区土壤水资源均出现富余,各小区土壤水资源量之间差异不显著(除 T₄小区外)。3—5 年生柠条林地土壤水资源除 T₁小区低于 T₂小区外,总体随着密度增大而增加,不同密度对土壤水资源量造成的差异达显著水平。由于 T₄小区盖度较低,因蒸散发造成的水分损耗较多加上柠条生长对水分消耗,1—5 年生柠条林 T₄小区的土壤水资源量显著低于其他 4 个小区。10—12 年生柠条林除 T₄小区土壤水资源量低于 T₃小区土壤水资源量外,10—12 年生柠条林土壤水资源量总体呈现出“密度低的小区土壤水资源量高,密度高的小区土壤水资源量低”的趋势,撂荒地土壤水资源量显著高于其他 4 个处理小区,10—12 年生不同密度柠条林之间的的水资源量差异不显著。总体看来,在柠条幼龄时期不同密度柠条小区土壤水资源之间差异较显著,中龄期土壤水资源之间差异不显著。

表 2 不同密度小区土壤水资源历年变化

Table 2 Changes of soil water resources in different density plot over the years

年份 Year	不同密度小区 Different density plot				
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
2002	487.11±4.68a	466.32±4.58c	477.73±6.9b	401.16±3.6e	455.56±4.04d
2003	476.96±39.76a	483.43±38.03a	487.34±41.02a	426.96±36.5b	482.81±36.16a
2004	482.83±24.84b	488.79±23.63ab	463.37±34.73c	419.19±28.42d	503.38±13.54a
2005	439.71±13.22c	451.13±11.24b	399.94±14.82d	373.87±11.14e	485.75±11.42a
2006	383.72±15.61c	400.77±14.37b	341.01±16.63d	329.61±12.11e	453.03±8.57a
2011	268.61±18.12c	272.09±20.07c	287.03±17.89b	281.85±18.14bc	353.67±17.01a
2012	285.68±19.49b	288.68±22.82b	298.55±18.58b	294.37±19.07b	358.73±19.16a
2013	299.06±33.62b	298.78±30.23b	316.18±30.49b	313.67±29.9b	375.8±29.74a

同行相同字母表示差异不显著($P>0.05$),同行字母不同表示差异显著($P<0.05$)

自柠条播种后,生长较好、迅速达到较高盖度,有利于减弱光照和风速对地表的作用,减少土壤水分蒸发,有效蓄存降雨进而使柠条地土壤水资源增加,加之 2003 年是丰水年,因此第一年柠条林地土壤水资源呈上升趋势。随着柠条的生长,植物对土壤水资源的消耗也逐渐增加,高盖度带来的优势无法弥补因生长造成的土壤水资源的消耗,因此在柠条林地土

壤水资源达到最高时开始下降,个体之间因为竞争水资源而出现自疏现象^[31],林地密度发生较大变化,直到柠条进入中龄阶段,柠条林土壤水资源趋于稳定,此时土壤水资源主要受降雨影响。对表 2 中每列数据进行分析发现土壤水资源随着时间总体呈现下降趋势,需要注意的是,在多年生人工柠条林内,降雨会造成短期内土壤水资源的突然回升,这与土壤水资源量总体降低趋势是不矛盾的^[11]。

2.3 密度对柠条生长的影响

关于密度对植物生长影响的研究很多。有的学者认为密度对植物高生长有影响,但比较弱^[32];有的认为密度对植物高生长无影响^[33],对胸径影响显著^[34];有些研究认为密度与高生长呈负相关关系,林分密度越大,高生长表现越差^[35];也有研究认为树木高生长随着密度的增大而增加,两者是正相关关系^[36]。本研究认为密度变化对林木生长的影响是一个随林龄而变化的复杂过程。

如表 3 所示,在播种初期,高密度小区的柠条幼林抵抗不良环境的能力强,柠条生长较好。柠条播种后 3 年内,密度越高株高生长越好,播种后两年内不同密度之间株高生长差异不显著,直到第三年 T₁小区株高生长显著高于 T₃小区。从第 4 年生长季开始,密度最高的小区高生长出现生长不良的现象,高密度所带来的生长优势开始减弱,表 3 显示 T₂小区株高显著高于 T₄小区,而 T₁小区株高生长比 T₂小区差,说明 3—5 年生柠条

林在一定的密度范围内(低于 65 株/m^2),增加造林密度会促进柠条高生长,密度过大对高生长又起抑制作用^[39]。10—12年生柠条 T_1 小区与 T_4 小区株高生长均显著低于其他两个小区。 T_1 小区生长最差,原因是该小区 0—290cm 土层的土壤水资源过早达到水资源利用限度,高密度使柠条之间水分竞争激烈,从而使柠条生长受到限制。 T_4 小区生长缓慢的原因是林分密度过低难以达到较高的盖度,因此林内水分蒸发严重。因此只有保持适宜密度和承载力水平,才会保证柠条有较好生长。

表 3 不同密度柠条林地生长变化

Table 3 Growth variation of Caranaga woodland with different plant density

年份 Year	株高 Height/cm				基径 Diameter/mm			
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_1	T_2	T_3	T_4
2002	$14.1 \pm 4.49a$	$14.1 \pm 4.29a$	$14.5 \pm 4.51a$	$12.7 \pm 3.95a$	$2.86 \pm 0.53a$	$2.71 \pm 0.66a$	$2.78 \pm 0.85a$	$2.53 \pm 0.67a$
2003	$27.9 \pm 8.57a$	$24.6 \pm 5.64a$	$24.0 \pm 4.51a$	$25.7 \pm 3.95a$	$3.61 \pm 0.82a$	$3.45 \pm 0.9a$	$3.42 \pm 0.85a$	$3.35 \pm 0.61a$
2004	$32.0 \pm 8.51a$	$29.8 \pm 8.46ab$	$25.8 \pm 6.68b$	$27.6 \pm 6.08ab$	$4.13 \pm 1.1a$	$3.96 \pm 0.94a$	$3.89 \pm 0.62a$	$3.85 \pm 0.75a$
2005	$40.6 \pm 7.43a$	$43.8 \pm 8.97a$	$38.1 \pm 9.59ab$	$34.5 \pm 9.73b$	$4.43 \pm 0.79a$	$4.27 \pm 0.93a$	$4.12 \pm 1.02a$	$4.34 \pm 0.88a$
2006	$45.2 \pm 7.81a$	$45.7 \pm 10.25a$	$40.9 \pm 11.68ab$	$36.6 \pm 9.65b$	$4.83 \pm 0.82a$	$4.82 \pm 0.97a$	$4.95 \pm 0.91a$	$4.62 \pm 1.08a$
2011	$114.3 \pm 15.69b$	$126.8 \pm 15.9a$	$131.0 \pm 19.32a$	$117.3 \pm 15.06b$	$7.98 \pm 1.15ab$	$7.86 \pm 1.38bc$	$8.56 \pm 1.35a$	$7.33 \pm 1.41c$
2012	$128.5 \pm 18.79bc$	$145.8 \pm 18.97a$	$136.0 \pm 18.65b$	$124.2 \pm 16.84c$	$8.70 \pm 1.56b$	$9.34 \pm 1.37b$	$10.10 \pm 1.76a$	$9.41 \pm 1.56ab$
2013	$134.2 \pm 17.5b$	$150.3 \pm 24.37a$	$153.7 \pm 21.72a$	$132.4 \pm 21.56b$	$10.15 \pm 1.72b$	$10.54 \pm 1.96b$	$11.93 \pm 1.77a$	$9.72 \pm 2.01b$

密度与基径也存在密切的关系,由表 3 可知,1—5年生柠条密度越高,其基径生长越好;密度越小基径生长越差,不同密度小区基径生长差异不显著;10—12年生柠条 T_3 小区基径生长显著高于其他 3 个小区。对 10—12年生柠条来说,密度过高过低均会抑制基径生长。除 T_4 小区外,柠条密度越低基径生长越好,不同密度柠条小区基径生长差异较显著。

2.4 不同密度柠条林地土壤水资源与土壤水资源利用限度

随着柠条生长,柠条对土壤水分的利用就会过度,导致土壤中水分含量低于萎蔫系数,造成多年生人工林草地最大入渗深度以下出现严重的土壤旱化现象,会形成土壤干层,即永久土壤干层。在人工林草地,表面以下至降水最大入渗深度范围内,当所有土层的土壤含水量等于萎蔫系数,则最大入渗深度内所有土层成为干层时的残留土壤储水量称为土壤水资源利用限度(SWRUL)^[11,37]。因此,为了可持续利用水资源紧缺地区的土壤水资源,必须确保植物对土壤水资源的利用不能超过土壤水资源利用限度。在本文研究区内,降水最大入渗深度为 290cm。

如图 3 所示,以 5 年生柠条林地 0—290cm 土壤水资源量年内变化与土壤水资源利用限度的关系为例来说明不同密度柠条达到土壤水分利用的限度的时间差异。由图 3 可知, T_1 小区在 2006 年 6 月 1 日地表至最

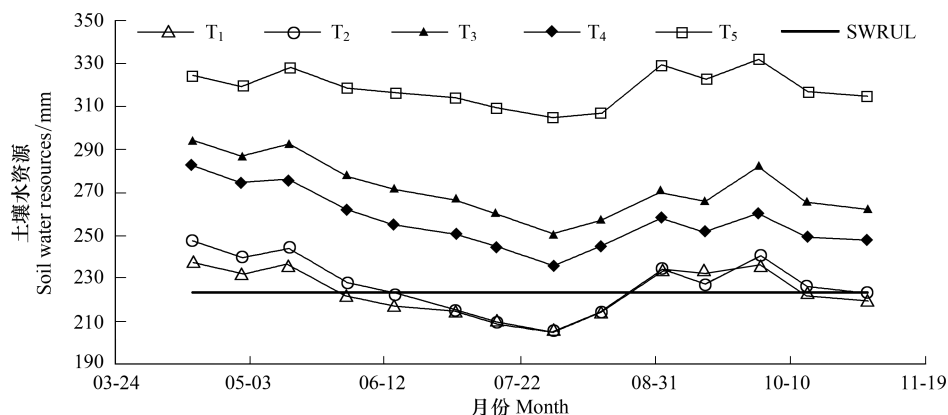


图 3 2006 年柠条林地土壤水资源年变化

Fig.3 Variation of Soil Water resources in 0—290cm soil layers in 2006

大入渗深度范围内的土壤水资源量低于土壤水资源利用限度(221.6mm),在2006年6月15日, T_2 小区0—290cm土层内土壤水资源量也出现低于土壤水资源利用限度的现象(222.5mm),此时应该及时依据土壤水分植被承载力进行调控,这不仅可以抑制土壤水分消耗、生产部分薪柴或饲料,也可以促进保留木生长^[11]。直到2006年末 T_3 小区和 T_4 小区均未发现土壤水资源量低于水资源利用限度,说明 T_3 小区与 T_4 小区林地土壤水资源达到土壤水分利用限度较晚。

理论上,调控植物水关系方法有两种方案。一种是以需定水,即按照植物需水量,通过灌溉补水满足其生长需要;另一种是以水定需,即依据土壤水分状况,减少植物的密度和单位面积枝叶量,拟制植物生长,减少蒸腾耗水^[38]。以需定水在黄土高原地区难以全面实现,而以水定需方案对黄土高原地区等水资源紧缺地区林地土壤水资源管理更有意义和具有可操作性。如平茬可以有效地抑制林分生长;还可以以土壤水分植被承载力为标准,通过降低林分密度进而减少植物对水分过多消耗^[39]。在对半干旱黄土丘陵区人工柠条地研究发现,10年生柠条林地土壤水分承载力为48株/ m^2 ,11年生与12年生柠条土壤水分植被承载力均为43株/ m^2 ^[11]。结合试验地保存密度调查和土壤水分植被承载力研究,受降水量的影响,在2011—2013年柠条林地土壤水资源承载植被能力较高,不需对柠条密度进行调控。

3 结论

(1)自播种后第3年开始,除 T_1 小区外,柠条林地土壤水资源随着林分密度增加而增加,不同密度之间差异达显著水平;除 T_4 小区外,10—12年生柠条林地土壤水资源随着密度增加而减少,不同密度之间的差异不显著。

(2)柠条密度变化对株高与基径的影响与林龄有关。密度增加对1—3年生柠条株高起促进作用,从第4年开始密度过高会抑制株高生长;1—5年生柠条密度越高基径生长越好;10—12年生柠条密度过高过低均会抑制其株高与基径生长。柠条生长初期不同密度小区生长差异不显著,随着林龄增加不同密度生长差异逐渐显著。

(3)随着柠条林生长,林地土壤水资源将下降到土壤水资源利用限度。不同密度小区林地土壤水资源下降到土壤水资源利用限度的时间存在差异:高密度小区(T_1 小区和 T_2 小区)在第5年先后达到土壤水资源利用限度,低密度小区(T_3 小区和 T_4 小区)超过5a。为了不影响柠条生长,此后就需要依据土壤水分植被承载力对柠条密度进行调控(平茬),以实现土壤水资源可持续利用。

参考文献(References):

- [1] 朱岷, 张义智, 焦阳. 柠条在库勒的适应性分析. 草业科学, 2008, 25(8): 148-149.
- [2] 周玉珍. 柠条林对黄土丘陵区土壤物理性质和肥力的影响分析. 太原理工大学学报, 2008, 39(6): 620-622.
- [3] Jia G M, Liu B R, Wang G, Zhang B L. The microbial biomass and activity in soil with shrub (*Caragana korshinskii* K.) plantation in the semi-arid loess plateau in China. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(1): 6-10.
- [4] Yang Z P, Zhang Q, Wang Y L, Zhang J J, Chen M C. Spatial and temporal variability of soil properties under *Caragana microphylla* shrubs in the northwestern Shanxi Loess Plateau, China. Journal of Arid Environments, 2011, 75(6): 538-544.
- [5] 左忠, 王金莲, 张玉萍, 牛创民, 杨润霞, 王宁庚. 宁夏柠条资源利用现状及其饲料开发潜力调查--以盐池县为例. 草业科学, 2006, 23(3): 17-22.
- [6] 晁中彝. 锦鸡儿属种子蛋白的营养. 中国油脂, 1987, (5): 30-32.
- [7] 王峰, 温学飞, 张浩. 柠条饲料化技术及应用. 西北农业学报, 2004, 13(3): 143-147.
- [8] 左忠, 张浩, 王峰, 郭永忠, 刘旭宇. 柠条饲料加工利用技术研究. 草业科学, 2005, 22(3): 30-35.
- [9] 贾丽, 曲式曾. 豆科锦鸡儿属植物研究进展. 植物研究, 2001, 21(4): 515-518.
- [10] Zhang G H, Liu G B, Wang G L. Effects of *Caragana Korshinskii* Kom. cover on runoff, sediment yield and nitrogen loss. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3): 245-257.
- [11] 郭忠升. 土壤水分植被承载力的理论与实践. 北京: 科学出版社, 2014.
- [12] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 霍竹, 郑纪勇. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响. 生态学报, 2010, 30(16): 4306-4316.

- [13] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 陈利顶. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺. 生态学报, 2011, 31(11): 3060-3068.
- [14] 张建军, 李慧敏, 徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响. 生态学报, 2011, 31(23): 7056-7066.
- [15] 贾海坤, 刘颖慧, 徐霞, 王昆, 高琼. 皇甫川流域柠条林地水分动态模拟——坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系. 植物生态学报, 2005, 29(6): 910-917.
- [16] 郭忠升, 邵明安. 黄土丘陵半干旱区柠条锦鸡儿人工林对土壤水分的影响. 林业科学, 2010, 46(12): 1-7.
- [17] Guo Z S, Shao M A. Impact of afforestation density on soil and water conservation of the semiarid Loess Plateau, China. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 68(5): 401-410.
- [18] 舒维花, 蒋齐, 王占军, 何建龙. 宁夏盐池沙地不同密度人工柠条林土壤水分时空变化分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 172-176.
- [19] 潘占兵, 李生宝, 郭永忠, 王占军, 温学飞. 不同种植密度人工柠条林对土壤水分的影响. 水土保持研究, 2004, 11(3): 265-267.
- [20] Toillon J, Fichot R, Dallé E, Berthelot A, Brignolas F, Marron N. Planting density affects growth and water-use efficiency depending on site in *Populus deltoides* × *P. nigra*. Forest Ecology and Management, 2013, 304: 345-354.
- [21] 石元亮, 秦裕波, 孙毅, 朱平, 王晶. 土壤水分与玉米种植密度及产量的相关性研究. 土壤通报, 2008, 39(4): 792-796.
- [22] 郭德亮, 樊军, 米美霞. 黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1199-1208.
- [23] 杨文斌, 王晶莹, 王晓江, 刘立城, 魏永新. 科尔沁沙地杨树固沙林密度、配置与林分生长过程初步研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 33-38.
- [24] 周志宇, 李锋瑞, 陈亚明, 吴彩霞, 傅华, 李雪瑞. 阿拉善荒漠不同密度白沙蒿人工种群生长、繁殖与土壤水分的关系. 生态学报, 2004, 24(5): 895-899.
- [25] 李勃, 德永军, 韦勤, 王一, 王艳兵, 包玉泉. 3 种密度对兴安落叶松人工林生长的影响. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2013, 34(2): 65-68.
- [26] 陶林威, 马洪, 葛芬莉. 陕西省降水特性分析. 陕西气象, 2000, (5): 6-9.
- [27] 王贵彦, 史秀捧, 张建恒, 梁卫理. TDR 法、中子法、重量法测定土壤含水量的比较研究. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 23-26.
- [28] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林地土壤入渗过程分析. 土壤学报, 2009, 46(5): 953-958.
- [29] 郭忠升. 半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量. 水土保持通报, 2009, 29(5): 69-72.
- [30] 沈荣开. 土壤水资源及其计算方法浅议. 水利学报, 2008, 39(12): 1395-1400.
- [31] 黎磊, 周道玮, 盛连喜. 植物种群自疏过程中构件生物量与密度的关系. 生态学报, 2012, 32(13): 3987-3997.
- [32] 湛红辉, 丁贵杰, 温恒辉, 陆毅. 造林密度对马尾松林分生长与效益的影响研究. 林业科学研究, 2011, 24(4): 470-475.
- [33] 王春胜, 赵志刚, 曾冀, 郭俊杰, 沙二, 郭文福, 曾杰, 郑海水. 广西凭祥西南桦中幼林林木生长过程与造林密度的关系. 林业科学研究, 2013, 26(2): 257-262.
- [34] 王玉芬. 林分密度在营林生产中的应用. 林业勘查设计, 2011, (1): 59-63.
- [35] 童书振, 盛伟彤, 张建国. 杉木林分密度效应研究. 林业科学研究, 2002, 15(1): 66-75.
- [36] 徐勃, 张仕清. 同仁地区青杨速生丰产林几种常用造林密度对生长的影响. 青海大学学报: 自然科学版, 2002, 20(2): 8-10.
- [37] 郭忠升. 黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3029-3035.
- [38] 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.
- [39] 李耀林, 郭忠升. 平茬对半干旱黄土丘陵区柠条林地土壤水分的影响. 生态学报, 2011, 31(10): 2727-2736.