

黄土高原丘陵区不同立地条件下柠条根系研究

毕建琦¹, 杜峰², 梁宗锁^{1, 2*}, 冉隆贵^{2, 3}

(1. 西北农林科技大学生命科学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100
3. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 对黄土高原丘陵区不同立地条件下3年生柠条的根系作了初步研究, 结果表明: 柠条侧根发生的主要部位在距地表0~20 cm的土层中, 除在阳坡、半阳坡分布的植株外, 其它的在50 cm以下没有侧根发生, 侧根总数以阳坡最多, 半阴坡最少; 不同立地地下根系生物量的垂直分布, 均表现为从土壤表层到深层逐次递减; 在各土层中, 0~60 cm土层中分布的根系生物量所占的比重最大, 超过了总量的80%。不同立地条件下单株根系生物量以阳坡最大, 为66.63 g, 阴坡最低, 仅为6.69 g。不同立地条件下柠条的地上部分差异显著, 阳坡、半阳坡的株高、生物量等都高于阴坡和半阴坡的。柠条在幼龄期适宜生长的立地类型为阳坡和半阳坡。

关键词: 柠条; 根系; 立地条件; 黄土高原

中图分类号: S727.122 文献标识码: A

Research on Root System of *Caragana korshinskii* at Different Site Conditions in the Hilly Regions of Loess Plateau

BI Jianqi¹, DU Feng², LIANG Zongluo^{1, 2}, RAN Longgui^{2, 3}

(1. College of Life Science of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China
3. Agriculture College of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract The root systems of 3 years *Caragana korshinskii* at different site conditions in the hilly regions of Loess Plateau were studied. The results showed that the lateral roots of *Caragana korshinskii* mainly grew in the depth of 0~20 cm underground and under all site conditions there were no lateral roots below 50 cm depth except sunny slope and semi-sunny slope. The total amount of lateral roots sunny slope was the most and that of shady slope was the least. The vertical distribution of root biomass of *Caragana korshinskii* under different site conditions showed a gradually decreasing from soil top layer to deep layer. The ratio of root biomass in 0~60 cm soil layer to the total was the biggest and beyond 80 percent. The individual root biomass in sunny habitat was 66.63 g and larger than that of others, the shady habitat was the lowest, only 6.69 g. The aboveground of *Caragana korshinskii* under different site conditions had significant difference, the height and biomass of *Caragana korshinskii* in sunny and semi-sunny slope were higher than that on other site conditions. *Caragana korshinskii* in young age period were suitable for growing on the sunny and semi-sunny slope on Loess Plateau.

Key words *Caragana korshinskii*; root system; site condition; Loess Plateau

收稿日期: 20052023

基金项目: 国家自然科学基金项目/黄土高原森林草原过渡带植被演替过程中水分平衡及其调控机理(90302005)及中国科学院西部之光人才基金项目(KZCX1206)资助

作者简介: 毕建琦(1981), 男, 山西高平人, 在读硕士, 主要从事植物生理生态学研究。电话: 13572883774 E-mail: bj_q_1981@126.com

* 通讯作者电话: 029287014582 E-mail: liangz@ms.iswc.ac.cn

黄土高原丘陵沟壑区是中国水土流失最严重的地区,也是黄河泥沙的主要来源地^[1]。柠条(*Caragana korshinskii* Kcm1)属锦鸡儿属(*Caragana* Fabr1)植物,是黄土高原地区的主要旱生落叶灌木树种。多年来的造林实践证明,柠条根系发达,具有很强的适应性和抗逆性,是营造水土保持林、防风固沙林、薪炭林和饲料林的优良树种之一^[2,3]。

由于黄土高原复杂的地形地貌、水热资源的再分配不均匀等因素导致了不同立地条件下微环境变化差异较大^[4],选择最适宜的立地环境栽植柠条,可使这一抗旱树种发挥更有效的水土保持作用,因此,在黄土高原半干旱区开展柠条对不同立地条件的适应性研究具有十分重要的现实意义。本文对柠条在不同立地条件下根系的生长发育特点,在土层中的分布情况及地下与地上部分之间的相关性进行了系统研究,阐明柠条最适宜生长的立地条件,为人工柠条林种植时选择适宜的立地提供理论依据。

1 试验地概况及材料

试验地设于陕西省延安地区安塞县高桥乡境内。安塞县地处黄土高原丘陵沟壑区,属中温带半干旱大陆性季风气候,多年平均气温 8.8 e,极端最高气温 36.8 e,极端最低气温 -23.6 e;年平均日照时数 2397.3 h,总辐射量 492.95 kJ # cm⁻², \ 0 e 的活动积温 3824.1 e, \ 10 e 有效积温 3524.1 e,无霜期在 4 月上旬至 10 月下旬,平均 157 d 多年平均降水量 513 mm,因受季风影响大,年际变化较大,每年的降雨多集中在 7、8、9 三个月,占全年降水量的 60%;年蒸发

量 490 mm;土壤类型主要为黄绵土,部分区域为黑垆土和灰褐土。区内地形复杂多变,梁峁起伏,地形支离破碎,水土流失严重,生态环境恶化。植被类型主要为人工林和天然草地。

由于在黄土高原地区,成土母质主要是黄土母质,且土层深厚,水分是当地植被生长的主要限制因子,而坡向是影响水分分布的主要因子。因此,在选择不同立地条件时,以坡向为主要的参考因子。2002年在试验区选择同一海拔高度、不同坡向的 5 种典型立地条件类型:阳坡、半阳坡、阴坡、半阴坡、峁顶。5 种立地于播种前进行整地处理,共 5 个小区,每小区 6.67 @ 10⁻² hm²,5 种立地的基本情况见表 1。柠条种子由安塞县安塞水土保持试验站提供,于 2002 年 5 月份进行穴播,播种深度 3~5 cm,株行距为 1 m @ 2 m。

2 研究方法

在挖根前测定 5 种立地条件下各小区柠条的株高、冠幅、地径等指标,分别计算其平均值。每个小区选择 3 株与平均值相近的标准株,做标记,在 2004 年的生长末期对 3 年生柠条根系进行测定。

挖根前,对地上部分(株高、冠幅、地径)进行调查记载,随后齐地面剪割,烘干称其质量。之后按标准株挖掘法挖根,即每 20 cm 为一层挖取根系,同时记录主根上的侧根数、侧根距地面的距离,侧根离主根 0.5 cm 处的直径 \ 0.1 cm 时,可计入, < 0.1 cm 时,不计入。将每一层的根系放在双层纱布内洗净,剔除杂物后再将每一层的根系按直径 (< 0.1, 0.1~0.3, 0.3~0.5, 0.5~1.0, > 1.0 cm) 分为 5 级,在 105 e 的烘箱中烘至恒质量,冷却后称干质量。

表 1 5 种立地的基本情况

坡向	海拔 /m	坡度 /b	坡位	树龄 /a	土壤类型	全 N	全 P	全 K	土壤含
						(g # kg ⁻¹)			水量 / (g # kg ⁻¹)
阳坡	1293	40	下	3	黄绵土	0.023	0.047	1.207	60.8
半阳坡	1305	35	中	3	黄绵土	0.041	0.052	1.053	63.9
阴坡	1308	30	中	3	黄绵土	0.032	0.046	1.018	86.7
半阴坡	1319	35	中	3	黄绵土	0.039	0.051	1.176	75.3
峁顶	1332	5	顶部	3	黄绵土	0.040	0.049	0.964	70.5

注:土壤含水量为 0~100 cm 土层的含水量。

3 结果与分析

3.1 侧根的垂直分布

侧根数的多少直接关系到根系吸收养分、水分、微量元素的能力和耐瘠薄、抗旱性的强弱^[5]。同一

植物在不同的生长环境条件下,侧根总数越多,根系体积和表面积相对越大,越有利于根系吸收多的水分、养分和微量元素供给地上部分,促进整株植物的生长;这说明侧根分布越多,其植物所在的生长环境越适合植物的生长。

柠条根系为直根系, 主根明显, 侧根发达, 主根上有多层侧根^[6], 表 2 反映了各立地间柠条侧根的垂直分布情况。从表 2 可以看出: 阳坡的侧根数最多, 为 33 条, 显著高于其余立地 ($p < 0.05$), 半阳坡和峁顶同为 15 条, 半阴坡的侧根数最少, 仅 12 条, 这说明与其它立地条件相比, 阳坡更适合柠条的生长。此外, 侧根在主根上的发生部位反映了植物利用土壤水分、养分和微量元素的立体分异性, 试验表明: 除阳坡外, 柠条侧根的发生部位集中在主根的 0

~ 20 cm 段, 在此段的侧根数占总侧根数的 53.3% ~ 75.0%。阳坡柠条在 0~ 20 cm 及 20~ 40 cm 主根段的侧根数相等, 同为 13 条, 而在 40~ 60 cm 主根处的侧根数除阳坡有 7 条外, 其它立地的都较少。侧根的发生部位可能与土壤结构有关, 侯喜禄等^[7]人研究发现: 柠条林地中 25~ 50 cm 土层的土壤密度明显大于其它土层, 较大的土壤密度不利于侧根的发生, 导致了侧根的发生部位主要集中在土壤密度相对较小的 0~ 20 cm 土层中。

表 2 不同立地柠条侧根的垂直分布

土层深度 /cm	阳坡		半阳坡		阴坡		半阴坡		峁顶	
	侧根 条	%	侧根 条	%	侧根 条	%	侧根 条	%	侧根 条	%
0~ 20	13	39.4	8	53.3	11	73.4	9	75.0	10	71.4
20~ 40	13	39.4	4	26.7	2	13.3	1	8.3	3	21.4
40~ 60	7	21.2	3	20.0	2	13.3	2	16.7	1	7.2
总计	33 a	100	15 b	100	15 b	100	12 c	100	14 b	100

注: 同一行内标有不同字母者 (检验差异显著 ($p < 0.05$), 下同)。

据挖根时观察, 柠条的侧根系主要分布在 0~ 60 cm 的土层中, 而侧根的发生区则集中在 0~ 20 cm 的主根段, 除在阳坡、半阳坡分布的植株外, 其它的在 50 cm 以下没有侧根发生。

主根的长度与侧根发生的总数密切相关, 主根越长, 侧根发生的潜在机会越多, 如阳坡、半阳坡的主根长分别为 231、208 cm, 其侧根数为 33、15 条, 且在 50 cm 以下的土层中仍有分布, 这一特征是柠条适应性的体现: 在贫瘠缺水的黄土高原, 植株必须凭借较深的侧根发生部位、较多的侧根数目, 吸收土壤深层的水分、养分和微量元素以满足生长发育的需求。

3.2 根系生物量的垂直分布

根系的生长与多种因素有关, 而根系生物量则是所有因素共同作用结果的反映。前人的研究发现: 柠条根系的可塑性较大, 在不同立地条件下其生长发育情况差异明显, 立地条件的微小变化都能引起柠条生长情况的差异^[8,9]。

土壤不同深度的根系生物量, 可以反映该植物在某一土层深度的生长能力, 积累的生物量越多, 说明在该层中利用土壤营养、水分和微量元素的能力越强。各立地柠条根系在垂直层次上变化较为复杂, 由表 3 可以看出: 各立地条件下柠条根系均表现为各土层根质量随土层的加深而减小; 5 种立地中, 0~ 20 cm 这一土层中柠条根质量占总根质量的比例最大, 阴坡最高达 57.0%, 半阳坡最小, 也达 44.1%。在 60 cm 以下的土层中, 各立地根系生物

量仅为总根质量的 10% ~ 20%, 说明柠条的根系主要分布在 0~ 60 cm 的土层中。

试验中发现: 柠条根系生物量在不同立地条件下差异很大 (表 3)。阳坡、半阳坡和峁顶之间差异显著 ($p < 0.05$), 阴坡与半阴坡两者之间差异不明显。在 5 种立地条件下, 阳坡的根系生物量最大, 为 66.63 g# 株⁻¹, 阴坡和半阴坡的生物量较小, 分别为 6.96、8.72 g# 株⁻¹。

根系在生长过程中要受到各种环境因子的影响, 这些因子包括土壤质地类型、土壤养分、土壤含水量以及土壤中的各种微生物等, 而根系生物量则是这些因子综合作用的最终表现。从表 1 中可以发现: 5 种立地的土壤类型是一致的, 都为黄绵土, 并且各立地中土壤养分 (N、P、K) 的差异并不显著, 这说明这两种因子不是影响柠条根系生长的主要因子。不同立地柠条 1 m 土层中土壤平均含水量分别是: 阳坡 6018 g# kg⁻¹, 半阳坡 6319 g# kg⁻¹, 峁顶 7015 g# kg⁻¹, 半阴坡 7513 g# kg⁻¹ 和阴坡 8617 g# kg⁻¹。阴坡与阳坡, 半阴坡与半阳坡分别相差 2519 g# kg⁻¹ 和 1114 g# kg⁻¹, 其中阳坡和半阳坡与其它立地的土壤含水量差异明显。各立地土壤含水量的大小次序为: 阴坡 > 半阴坡 > 峁顶 > 半阳坡 > 阳坡, 而从表 3 中可以看出, 5 种立地条件下根系生物量的大小顺序恰恰与土壤含水量相反, 为: 阳坡 > 半阳坡 > 峁顶 > 半阴坡、阴坡, 这说明在土壤水分能满足根系生长的前提下, 柠条根系在水分较低的土

壤中其生长状况好于水分较高的土壤,也说明土壤含水量对柠条根系的生长影响较大。有的学

者指出柠条根系不耐涝,当土壤含水量达到 16119%,死亡率较高^[9]。

表 3 不同立地柠条根系生物量的垂直分布

土层深度 /cm	阳坡		半阳坡		阴坡		半阴坡		峁顶	
	均值 / (g# 株 ⁻¹)	%	均值 / (g# 株 ⁻¹)	%	均值 / (g# 株 ⁻¹)	%	均值 / (g# 株 ⁻¹)	%	均值 / (g# 株 ⁻¹)	%
0~20	35.07	52.6	9.76	44.1	3.97	57.0	4.62	53.0	8.02	51.2
20~40	16.30	24.5	4.98	22.5	1.38	19.8	2.63	30.2	3.01	19.2
40~60	4.30	6.5	2.66	12.0	0.77	11.1	0.35	4.0	2.58	16.5
60~80	3.65	5.5	1.56	7.0	0.46	6.6	0.35	4.0	1.05	6.7
80~100	2.50	3.8	1.02	4.7	0.15	2.2	0.20	2.3	0.31	2.0
100~120	1.59	2.4	0.80	3.6	0.16	2.3	0.19	2.2	0.27	1.7
120~140	1.10	1.7	0.56	2.5	0.07	1.0	0.17	1.9	0.20	1.3
>140	2.12	3.2	0.79	3.6	0	0	0.21	2.4	0.22	1.4
总根质量 / (g# 株 ⁻¹)	66.63? 3.16 a		22.13? 1.46 b		6.96? 0.97 d		8.72? 0.88 d		15.66? 1.31 c	

3.3 不同立地各级根量比例及其在土层中的分布

从不同立地条件下柠条根系不同根级的分布调查结果(表 4)可以看出:阳坡、半阳坡有 1 级根的分布,分别占总根质量的 45.0% 和 11.49%,而在阴坡、半阴坡和峁顶则没有直径 > 1.0 cm 的根存在,

这也是此 3 种立地条件下根系生物量比阳坡和半阳坡的小很多的一个重要原因。另外,从表 4 可以看出:4、5 级根质量在整个根生物量中所占比例较高,此类根是根系中的活性根,数量大则有利于柠条从土壤中吸收水分和矿物质元素。

表 4 不同立地柠条各级根量的比较

坡向	总根质量 / (g# 株 ⁻¹)	1 级 (> 1.0 cm)	2 级 (0.5~1.0 cm)	3 级 (0.3~0.5 cm)	4 级 (0.1~0.3 cm)	5 级 (< 0.1 cm)
阳坡	66.63? 3.16 a	29.98(45.0)	9.27(13.9)	11.42(17.1)	12.27(18.4)	3.69(5.5)
半阳坡	22.13? 1.46 b	2.53(11.4)	4.36(19.7)	4.03(18.2)	7.49(33.8)	3.72(16.8)
阴坡	6.96? 0.97 d	0	2.54(36.5)	0.79(11.4)	2.19(31.5)	1.44(20.7)
半阴坡	8.72? 0.88 d	0	2.65(30.4)	0.88(10.1)	3.94(45.2)	1.25(14.3)
峁顶	15.66? 1.31 c	0	5.19(33.1)	1.55(9.9)	5.77(36.8)	3.15(20.1)

注:括号内的数字为占总数的百分比。

3.4 不同立地柠条根系的生长与地上部分的关系

柠条根系的生长发育与分布状况与地上株丛密切相关,不仅影响到植株的大小和地径的粗细,且直接关系到地上株丛生物产量的高低。

柠条的株高、冠幅、地径、生物量见图 1(A~D)。由图 1(A)可以看出:阳坡、半阳坡的株高与各立地之间差异显著 ($p < 0.05$),阴坡与半阴坡的差异显著 ($p < 0.05$),但与峁顶的差异不显著。阳坡株高最大值为 83.6 cm,最小值出现在阴坡,只有 39.9 cm,不到阳坡株高的一半。挖根时发现阳坡根深可达 231.7 cm,阴坡根深仅 140.0 cm,同时播种下,造成株高及主根深差异较大的主要原因可能是受不同立地条件下光照、土壤水分等因子差异的影响。

从图 1(C)中可以看出:阳坡、半阳坡和峁顶的

柠条地径最大,且差异显著 ($p < 0.05$),阴坡、半阴坡地径较小,差异不显著;冠幅也反映出同样的情况,阳坡、半阳坡明显比阴坡和半阴坡的冠幅大(图 1(B))。

不同立地条件下柠条生长季末的地上部生物量见图 1(D)。阳坡的生物量明显大于阴坡、半阴坡和峁顶,生物量平均值达 102.68 g# 株⁻¹,而阴坡、半阴坡和峁顶分别为 16.48、19.80、32.59 g# 株⁻¹,差异达极显著 ($p < 0.01$)。地上部分生物量的差异,缘于不同立地环境因子的差异使得柠条地下根系的生长发育水平不同,进而对地上部分产生相关的影响,使得生长季末的柠条地上生物量积累产生了较大的差别,从而导致柠条人工林的总生产力的差异。

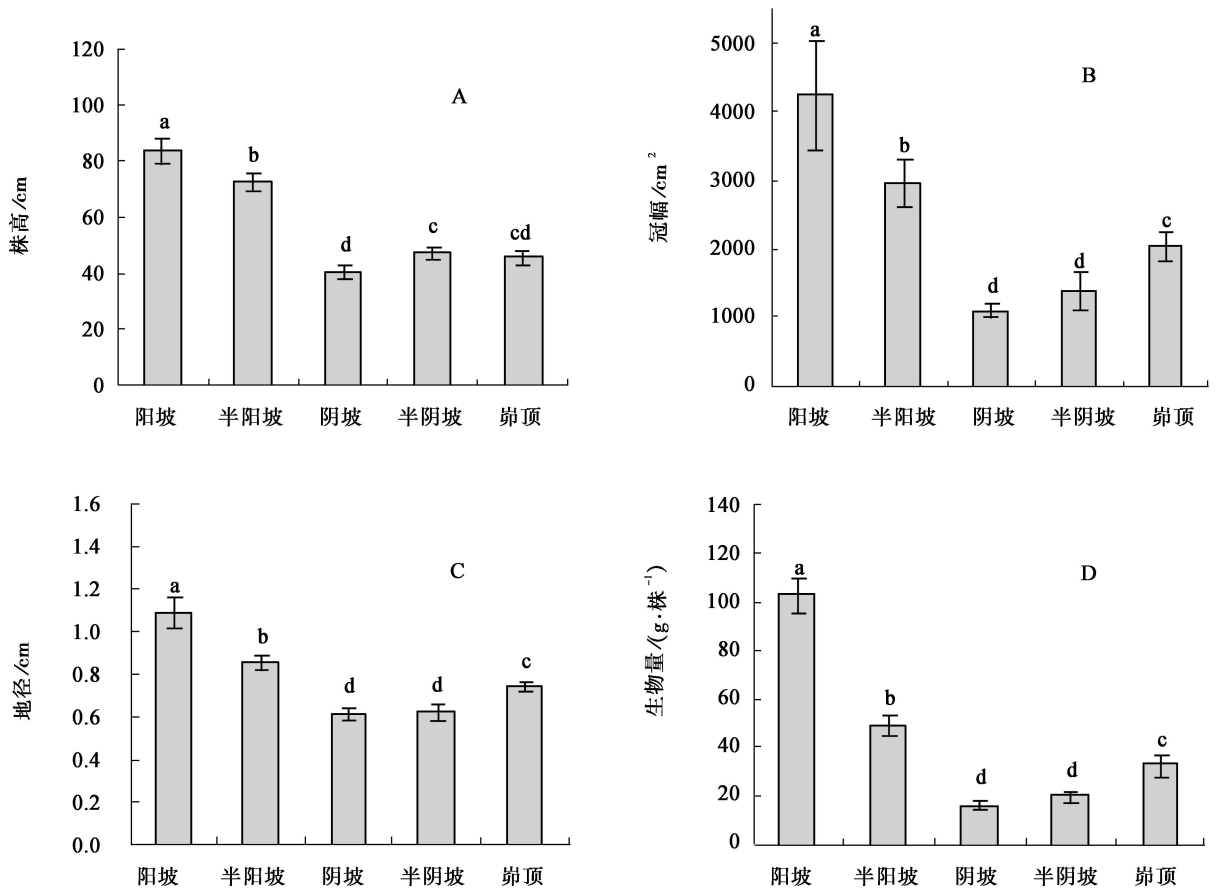


图 1 生长季末不同立地柠条的株高 (A)、冠幅 (B)、地径 (C)、生物量 (D)

4 小结

(1) 在本试验所选的 5 种立地都是黄土高原典型的立地, 3 年生柠条的根系在阳坡、半阳坡有较强的发育能力, 表现为侧根多, 根系体积和表面积较大, 主根较长, 单株占有的地下资源空间大, 因此在该立地下的柠条根系吸收养分、微量元素和水分的能力强, 促进了其地上部分的生长。

侧根数的多少反映了该植物对环境的适应情况, 阳坡的侧根数为 33 条, 而半阴坡和阴坡的侧根分别为 12 和 15 条, 从侧根数方面讲, 在阳坡种植的柠条其地下侧根的生长发育状况好于阴坡和半阴坡。

在所有立地条件下, 3 年生柠条的根系分布主要集中在 0~60 cm 的土层中, 而侧根的发生则集中在土壤密度相对较小的 0~20 cm 土层中。随着根系的伸长, 在深层土壤中也会有侧根的发生, 如阳坡的根系在 120 cm 有侧根生长, 阳坡 7 年生的柠条在 185 cm 处还有侧根的发生。

(2) 柠条地下生物量在土壤中的垂直分布表现为: 从表层到深层逐次递减。一方面是由于随土层

加深根系分布在不断的减少, 另一方面在于随土层加厚根系逐渐变细, 使得各土层总根质量较少。5 种立地中, 0~20 cm 这一土层中柠条根质量占总根质量的比例最大, 阴坡最高达 57.0%, 半阳坡为 44.1%。在距地表 60 cm 的土层中, 各立地根系生物量占总根质量的 80%~89%, 说明柠条的根系主要分布在 0~60 cm 的土层中。不同立地条件下柠条根系生物量的差异显著, 阳坡的根系生物量最大, 为 66.63 g#株⁻¹, 阴坡和半阴坡的生物量较小, 分别为 6.96 和 8.72 g#株⁻¹。

(3) 通过对地上株高、生物量、冠幅等调查发现: 不同立地条件下柠条的地上部分差异显著, 阳坡、半阳坡的株高、生物量等都高于阴坡和半阴坡。阳坡的株高和生物量分别为 83.6 cm 和 102.68 g#株⁻¹, 而阴坡仅为 39.9 cm 和 16.48 g#株⁻¹, 说明柠条在阳坡的生长状况明显好于阴坡及其它立地。

由以上结论可以得出: 不同立地条件下 3 年生柠条不论是地上部分, 还是地下根系部分都说明适宜其生长的立地条件为阳坡和半阳坡。此结论与刘占德等^[10, 11]人的研究有所差别, 这可能与所选柠条

的年龄及样地不同有关,程积民等^[12]人的研究结果表明:在半干旱区柠条生长前 6 a 为幼龄期, 6~ 14 a 为中龄期, 14 a 后进入老龄期, 幼龄期土壤中 0~ 800 cm 未形成干层, 中龄期土壤中干层厚度为 240~ 260 cm。作者研究的柠条为 3 年生, 正处于幼龄时期, 此时土壤水分供应比较充足, 土壤含水量还不是限制柠条生长的关键因子, 同时柠条是一种喜阳、耐旱, 具有高光合生理特征^[13]的植物, 光照强度的大小可能是其生长的限制因子。因此阴坡和半阴坡的土壤含水量虽然明显高于阳坡, 但由于在此立地条件下光照强度较低, 光合产物较低, 生物量反而小于土壤含水量较低的阳坡和半阳坡; 而刘占德等人研究的柠条为中龄期, 此时土壤中已出现干层, 土壤水分则成为主要的影响因子, 由于阴坡、半阴坡的土壤含水量要高于阳坡, 因此他得出的结论是阴坡、半阴坡的生长好于阳坡和半阳坡。本试验的最终结论为柠条在幼龄期适宜生长的立地类型次序为阳坡 > 半阳坡 > 峁顶 > 半阴坡、阴坡, 而对于不同立地条件下柠条在中龄期和成龄期的生长情况还有待于继续研究。

参考文献:

[1] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与可持续发展 [M]. 北京:

科学出版社, 1998

- [2] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 柠条的水分生理生态学特性 [J]. 植物生态学报, 1996, 20(6): 494~ 501
- [3] 陈世绩. 内蒙古草原植物根系类型 [M]. 内蒙古人民出版社, 1986: 76~ 77
- [4] 山仑, 徐炳成, 杜峰, 等. 陕北地区不同类型植物生产力及生态适应性研究 [J]. 水土保持通报, 2004, 24(1): 1~ 7
- [5] 郭正刚, 张自和, 肖金玉, 等. 黄土高原丘陵沟壑区紫花苜蓿品种间根系发育能力的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1007~ 1012
- [6] 牛西午, 丁玉川, 张强, 等. 柠条根系发育特征及有关生理特性研究 [J]. 西北植物学报, 2003, 23(5): 860~ 865
- [7] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 刺槐、柠条、沙棘林土壤入渗及抗冲性对比试验 [J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 90~ 95
- [8] 吴钦孝, 丁汉福, 刘克俭, 等. 黄土丘陵半干旱地区柠条根系的研究 [J]. 水土保持通报, 1989, 9(3): 45~ 49
- [9] 牛西午. 柠条生物学特性研究 [J]. 华北农学报, 1998, 13(4): 122~ 129
- [10] 马增旺, 顾新庆, 贺登飞, 等. 柠条生长量与生物量调查研究 [J]. 河北林业科技, 1998(4): 25~ 27
- [11] 刘占德, 刘增文. 沙棘柠条的生物量及立地因子分析 [J]. 西北农业学报, 1994, 3(2): 92~ 96
- [12] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究 [J]. 林业科学, 2005, 41(2): 37~ 41
- [13] 徐炳成, 山仑. 半干旱黄土丘陵区沙棘和柠条水分利用与适应性特征比较 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2025~ 2028