

# 黄土高原丘陵区柠条根系生长发育特性研究

朱元龙<sup>1</sup>, 王桑<sup>2</sup>, 林永刚<sup>1</sup>, 鲁秦安<sup>3</sup>

(1. 甘肃省陇西县林业局, 甘肃 陇西 748100; 2. 甘肃省林木种苗管理总站, 甘肃 兰州 730046;

3. 西安文理学院 生命科学系, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 以陇西黄土高原丘陵沟壑区 1~3 a 柠条荒山直播苗为研究对象, 应用挖掘法对其根系的形态、生长发育、分布及根瘤特性进行了观测分析。结果表明, 幼龄期柠条主根生长速度远大于株高生长, 根冠比值在 4~6 之间; 侧根主要发生在主根的 5~15 cm 段; 柠条胚根平均向上伸长 5 cm, 合理的播种深度为 3 cm; 根瘤主要集中在 10—30 cm 土层中主根及一级侧根上; 速生、发达的根系和根瘤, 使得柠条具有超强的抗旱、耐瘠薄能力和蓄水保土、改良土壤的生态功能。柠条秋播较春播能更大程度地与当地的光、热、水等资源相拟合, 应大力倡导秋季直播造林。

**关键词:** 柠条; 根系; 黄土高原; 根瘤特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0232-06

中图分类号: S727.22

## Development of *Caragana Microphylla* Seedling Root System in Hilly Regions of Loess Plateau

ZHU Yuan-long<sup>1</sup>, WANG Sang<sup>2</sup>, LIN Yong-gang<sup>1</sup>, LU Qin-an<sup>3</sup>

(1. Forestry Bureau of Longxi County, Longxi, Gansu 748100, China;

2. Forest Seed and Seedling Management Station of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730046, China;

3. Department of Life Science, Xi'an University of Arts and Science, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** The major objective of this study was to characterize the root system of the 1~3 year old seedlings of *Caragana microphylla*, an important shrub species in Longxi hilly region of the Loess Plateau, China. Root morphology, growth and development, distribution and nodule characteristics were determined after excavation. The results show that the growth rate of the major root of *Caragana microphylla* was much greater than that of the stem. The ratio of root to shoot ranged from four to six. The lateral roots were found mainly on the 5~15 cm section of the major root. The radicles of *Caragana microphylla* in average elongated 5 cm upward, implying a reasonable sowing depth of 3 cm. The nodules concentrated mainly on the major root and the first-division lateral roots in the 10—30 cm soil layer. The fast-growing, well-developed root system and nodules provided the plant with superior drought resistance and ecological functions of improving soil quality and conserving soil and water. Compared with spring sowing, fall sowing agreed to local light, heat, and water resources better and should be promoted to a higher level.

**Keywords:** *Caragana microphylla*; root system; the Loess Plateau; nodule characteristics

柠条(*Caragana microphylla*)属于蝶形花科锦鸡儿属,是黄土高原地区主要的旱生落叶灌木树种之一。柠条耐旱、耐寒、抗风沙,根系发达,固土保水能力强<sup>[1-5]</sup>。多年造林实践证明,柠条是该区植被的建群种、荒山造林先锋树种。

柠条直播造林是黄土高原丘陵沟壑区最为经济、高效、实用、使用广泛的造林方式,科学应用该方法可

以取得“费省效宏”的造林效果。因此,开展柠条荒山无灌溉直播造林的相关研究具有十分重要的现实意义。柠条根系是柠条吸收水分和养分的必由通道和正常生长的“瓶颈”,是柠条研究的重要内容。近年来关于柠条根系的研究已有较多报道<sup>[1-9]</sup>,且主要集中在 1 a 以上柠条根系生长发育、形态结构特征、根系分布特点、动态、生物量、影响根系生长发育的环境因

子等方面<sup>[2,4]</sup>。吴钦孝等、牛西午等对黄土丘陵半干旱地区柠条发育特征及有关生理特性进行了较为详尽、系统的研究。毕建琦等对黄土高原丘陵区不同立地条件下3 a 柠条的根系进行了研究,指出柠条在幼龄期适宜生长的立地类型为阳坡和半阳坡。马增旺等、刘占德等、周元福等对柠条生长量与生物量进行了调查研究。荀俊杰等对幼龄柠条细根现存量与环境因子的关系进行了研究。张灿娟等对内蒙古草原3 a 小叶锦鸡儿根瘤特征及其对环境变化的响应进行了研究,结果表明水分是限制小叶锦鸡儿根瘤菌侵染根系形成根瘤的关键因子。目前柠条根系有关生理基础的研究已成为热点和重点,如根系的抗旱性和抗盐碱性及其机理,根系对养分离吸收动力学,根系有关酶活性变化,根分泌物的种类、数量以及对土壤矿质营养的活化、利用和机理等方面的研究<sup>[2]</sup>。

本研究对1~3 a 柠条荒山直播苗根系的生长发育特点、在土层中的分布情况及地下与地上生长发育的相关性作了相关研究,以探索柠条直播造林的关键技术,为促进柠条大面积的荒山无灌溉人工造林提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地选择

试验地设于甘肃省陇西县渭河北部山区的退耕还林工程区,地理位置位于 $34^{\circ}51'—35^{\circ}23'N$ , $104^{\circ}19'—105^{\circ}54'E$ 。陇西地区处于黄土高原丘陵沟壑区,地形破碎,自然条件严酷,林草植被稀少,水土流失严重,生态环境脆弱。该区域属中温带半干旱大陆性季风气候,主要特点是降水稀少,蒸发量大。年平均气温 $7.7^{\circ}C$ ,极端高温为 $35.9^{\circ}C$ ,极端低温为 $-24.4^{\circ}C$ ;年平均无霜期162 d,年平均日照时数2 260.6 h, $\geq 0^{\circ}C$ 的有效积温为 $3 254.2^{\circ}C$ , $\geq 10^{\circ}C$ 的活动积温为 $2 897.4^{\circ}C$ 。年平均降水量439.2 mm,其中7—9月降雨量为225.5 mm,占年降雨量的52.2%,而冬春近6个月降水量达不到年降水量的10%。年蒸发量1 434.4 mm,多年平均蒸发量是平均降水量的3.2倍,干旱指数高达2左右。土壤为黄绵土,土层深厚,质地疏松,透水性能好,抗冲力低,易流失。土壤pH值8.1~8.7。

2005—2006年在柠条荒山无灌溉人工直播造林区选择标准地,对1 a春播苗、1 a秋播苗、2 a秋播苗、3 a秋播苗分别进行根系的调查研究。标准地选择标准为海拔高度约在2 000 m,相差不超过100 m,阳坡或半阳坡,坡位中上,每小区面积为 $667 m^2$ 。柠条种子由甘肃省安定区生产提供。于2004年,2005年和

2006年春、秋季进行穴播,整地方式为反坡鱼鳞坑,穴行距 $1 m \times 3 m$ ,播种深度3 cm,每穴下籽30粒。

### 1.2 研究方法

采用传统的标准地挖掘法在柠条生长停止期(即11月至翌年2月),在不同苗龄柠条标准地各随机确定20穴,约400株,带土挖取其根系,然后用清水浸泡,洗去泥土,进行根系测定<sup>[1]</sup>。从中各选取株高接近平均值的植株100株,进行数据分析。

1.2.1 株高、株径和主根测定 柠条发芽属于子叶出土型,其子叶脱落后形成子叶脱落痕,据此提出应以此为株高与主根测量起始点;从子叶痕起向上,以每年的生长节间为界,依次测量第1 a、第2 a、第3 a的株高生长量;主根测量则从子叶痕起向下,直至主根尖;株径用游标卡尺在紧挨子叶痕上方测量。

1.2.2 侧根测定 幼龄期柠条的侧根外观纤细、质地软绵、易于断损,其直径用常规仪器很难准确测量,而其长度却较易测量,故可将侧根(含1级、2级、3级侧根)按不同长度分为5个等级(即 $>10 cm$ , $10 \sim 5 cm$ , $5 \sim 2 cm$ , $2 \sim 1 cm$ , $<1 cm$ ),分别计算根数,再乘以其中间值即可计算出各个长度等级侧根总长。

1.2.3 侧根分布区测定 测量侧根在主根上的着生区间,同时测量最长侧根的长度以及着生位置。

1.2.4 第1侧根距测定 测量主根最上部的第一条侧根与子叶脱落痕之间的距离。

1.2.5 根瘤菌测定 测量并记录根瘤菌数量、大小、着生位置、形状、颜色等。

## 2 结果与分析

### 2.1 柠条根系的形态特征

据观测,柠条主根表面光滑,呈乳白色至浅淡黄色。柠条苗期根系从形态上看属于圆锥直根系,由1根主根和在主根上着生的多条、各级侧根组成,主根明显,侧根发达,属于主侧根均衡发育型。主根在根系中占主导地位,侧根的发展随着主根的生长而不断递增,侧根从上到下依次排列,长度依次变短。主根较通直,从上到下渐细,其皮层下有质地柔韧的维管束,侧根外观纤细、质地绵软、易于断损、分布较均匀。地表附近茎与根连接的部分为根茎过渡区,即子叶脱落痕与地表之间的根,它实质是柠条种子胚根向上伸长露出地面形成的特化根,其上偶尔可见有侧根着生<sup>[1]</sup>。

### 2.2 不同苗龄柠条植株根系的生长发育特征

柠条植株在苗期阶段的生长发育以根系为主,根系生长速度远远快于地上部的生长,特别是主根长度增长迅速,所以根冠比很高。柠条主根快速伸长能形成较深的根系,随之形成大量的侧根、根毛,这种根构

型有利于根系吸收土壤深层的水分和养分,是柠条抗逆能力强的生理基础。试验观测结果(表 1—2)表明,播期不同的 4 类柠条苗总株高生长之间差异显著,1~3 a 秋播苗之间的主根长、侧根总长、侧根长/主根长差异显著,1 a 春播苗与 1~3 a 秋播苗的第一年株高生长差异显著,但 1~3 a 秋播苗之间却差异不显著,这说明秋播当年的株高生长因受生长期短的限制而均低于 1 a 春播苗。

限制而均低于 1 a 春播苗。

随着苗龄的增大,株高、主根、侧根总长显著增长,根冠比值很高,在 4.2~11.4 之间,但呈逐年下降趋势。这说明在播后 3 a 内,柠条根系的生长发育占绝对优势,株高生长和主根生长呈正相关,但植株生长发育的中心逐步由地下部分向地上部分转移<sup>[2]</sup>。这与前人的研究结果一致。

表 1 不同苗龄柠条植株根、冠生长量比较

苗龄	平均株高/cm				主根长/cm	侧根总长/cm	根冠比	侧根长/ 主根长
	合计	1 a	2 a	3 a				
1 a 春播苗	2.8±0.2 <sup>c</sup>	2.8±0.2 <sup>a</sup>			17.5±1.2 <sup>c</sup>	11.0±3.2 <sup>c</sup>	6.4±0.5 <sup>b</sup>	0.6±0.2 <sup>c</sup>
1 a 秋播苗	1.5±0.1 <sup>d</sup>	1.5±0.1 <sup>b</sup>			17.1±0.8 <sup>c</sup>	12.1±2.4 <sup>c</sup>	11.4±0.6 <sup>a</sup>	0.7±0.1 <sup>c</sup>
2 a 秋播苗	4.4±0.2 <sup>b</sup>	2.0±0.3 <sup>b</sup>	2.4±0.3 <sup>b</sup>		21.9±1.0 <sup>b</sup>	29.4±5.6 <sup>b</sup>	5.1±0.3 <sup>c</sup>	1.3±0.2 <sup>b</sup>
3 a 秋播苗	9.4±0.4 <sup>a</sup>	1.8±0.2 <sup>b</sup>	3.5±0.3 <sup>a</sup>	4.1±0.4	39.6±2.4 <sup>a</sup>	89.2±14.2 <sup>a</sup>	4.2±0.2 <sup>c</sup>	2.2±0.3 <sup>a</sup>

注:表中数据为平均值±标准误差;小写字母表示  $p=0.05$  水平(SSR 检验),同一列内标有不同字母者差异显著。下同。

值得注意的是,1 a 秋播苗(实际生长期仅为 60 d 左右)与 1 a 春播苗(实际生长期为 240 d 左右)比较,株高、根冠比的差异显著,主根长、侧根总长、侧根长/主根长、最长侧根等生长指标的差异不显著,其数值很接近。结合调查柠条春播、秋播样地的立地条件,出现此现象的原因可能是:柠条虽耐干旱,但在幼苗期更喜温凉气候,要求土壤湿润,忌高温、日灼、水涝,特别在柠条播种发芽出土阶段,需要良好的水分条件,土壤墒情的优劣直接关系到根系生长发育的速度、数量、质量。秋季光、热、水基本同步,非常适宜柠条种子的播种发芽、生根。由于柠条秋播较春播能更大程度地与当地的光、热、水等资源相拟配合匹配,因此在陇西柠条秋播优于春播。

### 2.3 不同苗龄柠条植株各级侧根的生长及分布

2.3.1 各级侧根的生长发育 侧根的数量和长度直接关系到根系吸收水分、养分、矿质元素的能力和耐瘠薄、抗旱性的强弱<sup>[4]</sup>。从表 2 可以看出,随着苗龄的增加,1~3 a 秋播苗的侧根总数和侧根总长度剧增,侧根长/主根长的比值也大幅增长。从表 3 还可以看出,1~3 a 直播苗侧根总长、根数和各等级侧根的长度、根数都随苗龄的增大而大幅增加,>10 cm 和 5~10 cm 侧根长度占总侧根长度的比率大幅上升,而 0~2 cm 侧根长度占总侧根长度的比率却大幅下降。这表明 1~3 a 柠条直播苗在个体发育中,根量的变化存在着一定的规律性,1 a 春播苗、1 a 秋播苗的侧根长度几乎全部为 5 cm 以下,其中 5~2 cm 的侧根平均 0.63~0.94 根/株,0~2 cm 侧根平均 6.95~9.40 根/株;2 a 秋播苗开始出现 5~10 cm 侧根,平均 0.68 根/株;3 a 秋播苗开始出现 >10 cm 侧根,平均

1.57 根/株,5~10 cm 侧根则增至 2.39 根/株。同时最长侧根也随苗龄的增长而增长,由 1 a 直播苗的 1.7~2.3 cm 增至 2 a 秋播苗的 3.8 cm 和 3 a 秋播苗的 13.9 cm。这说明在苗期阶段,随着苗龄的增长,柠条侧根的生长发育非常迅速,它随着主根的伸长在土壤中迅速扩大营养空间,根系日益庞大,从而获得尽可能多的水分、养分、矿质元素,这既是柠条具有极强的抗旱性、抗寒性、耐瘠薄等抗逆性的重要原因之一,同时也为柠条的抗逆性、后期的速生奠定了坚实的生物学基础。

2.3.2 各级侧根的垂直分布 柠条根系为直根系,主根明显,侧根发达,主根上着生有多条侧根<sup>[2]</sup>。表 4 反映了不同苗龄柠条侧根垂直分布情况。试验表明,1~3 a 苗的侧根在主根上的发生部位随苗龄的增大而不断向下拓展,其上限极值基本稳定在 3~4 cm,下限极值则随主根的向下延伸而下延。柠条侧根在主根上的密集着生区间也存在类似变化规律。1~3 a 苗侧根的发生部位集中在主根的 5~15 cm 段,这表明这个区间的土壤湿度、地温、土壤空气等立地条件最适宜幼龄柠条侧根发育生长<sup>[2,4,11-12]</sup>。

2.3.3 最长侧根距 最长侧根距是指最长侧根在主根上的发生部位。2 a 秋播苗的最长侧根距为 10.9 cm,3 a 秋播苗的为 10.7 cm。这也反映出 5~15 cm 区间土层是发生最大侧根的理想区域,是根系发育的“温床”。1 a 春播苗与 1 a 秋播苗相比较,其侧根密集着生区、第一侧根距、侧根着生上限极值、侧根着生下限极值等数值均比后者大 1 cm 左右,即入土深度要大 1 cm 左右,这可能是由于春播的土壤表层墒情较秋播的表层土壤墒情差,侧根发育受到干旱胁迫只能下移发展的缘故所致。

表 2 不同苗龄柠条植株侧根生长量比较

苗龄	测定项目	合计	侧根分级/cm				最长侧根/cm
			>10	10~5	5~2	2~0	
1 a 春播苗	侧根数/根	7.99	0	0.10	0.94	6.95	2.3±0.6 <sup>c</sup>
	侧根长/cm	11.0±3.2 <sup>c</sup>	0	0.78	3.28	6.94	
1 a 秋播苗	侧根数/根	10.09	0	0.06	0.63	9.40	1.7±0.3 <sup>c</sup>
	侧根长/cm	12.1±2.4 <sup>c</sup>	0.03	0.45	2.22	9.40	
2 a 秋播苗	侧根数/根	15.35	0.18	0.68	3.15	11.34	3.8±0.7 <sup>b</sup>
	侧根长/cm	29.4±5.6 <sup>b</sup>	1.79	5.13	11.14	11.34	
3 a 秋播苗	侧根数/根	40.30	1.57	2.39	7.69	28.65	13.9±2.3 <sup>a</sup>
	侧根长/cm	89.2±14.2 <sup>a</sup>	15.67	17.96	26.91	28.65	

表 3 不同苗龄柠条植株各级侧根生长量比较

苗龄	合计		侧根分级/cm							
			>10		5~10		2~5		0~2	
	生长量/cm	比例/%	生长量/cm	比例/%	生长量/cm	比例/%	生长量/cm	比例/%	生长量/cm	比例/%
1 a 春播苗	11.0±3.2 <sup>c</sup>	100	0	0	0.78	7.1	3.28	29.8	6.94	63.1
1 a 秋播苗	12.1±2.4 <sup>c</sup>	100	0.03	0.2	0.45	3.7	2.22	18.3	9.40	77.7
2 a 秋播苗	29.4±5.6 <sup>b</sup>	100	1.79	6.1	5.13	17.4	11.14	37.9	11.34	38.6
3 a 秋播苗	89.2±14.2 <sup>a</sup>	100	15.67	17.6	17.96	20.1	26.91	30.2	28.65	32.1

表 4 不同苗龄柠条植株侧根垂直分布

苗龄	密集着生区/cm	着生上限极值/cm	着生下限极值/cm	第一侧根距/cm	最长侧根距/cm
1 a 春播苗	6.6~9.0	4.1	9.2	6.7±0.3 <sup>a</sup>	—
1 a 秋播苗	5.3~7.5	3.3	7.8	5.5±0.2 <sup>b</sup>	—
2 a 秋播苗	5.9~13.6	3.8	20.0	4.9±0.2 <sup>b</sup>	10.9
3 a 秋播苗	5.2~15.0	2.6	30.1	4.6±0.3 <sup>b</sup>	10.7

2.3.4 第一侧根距 柠条发芽属于子叶出土型,播种后胚根的胚轴向上伸长生长,将子叶顶出土面发芽。经观测,这段主根一般不着生侧根。第一侧根距是指主根上着生在最上部的第 1 条侧根与子叶痕之间的距离,它实质是胚根的胚轴向上伸长生长的长度。从表 4 可知,1~3 a 秋播苗的第一侧根距分别为:5.5, 4.9, 4.6 cm, 它们之间的差异不显著,这说明柠条胚根的胚轴向上伸长生长的平均长度约为 5 cm,它决定了柠条播种的深度不得大于 5 cm,否则,覆土过深将导致种胚无法透土出苗、进而屈苗死亡,过浅则容易受到干旱威胁。研究第一侧根距可以探索出合理的播种深度。考虑到子叶(脱落痕)下出土部分的特化根一般约为 1 cm,合理的播种深度应该为 2~4 cm,最佳深度为 3 cm。这已在多年的柠条直播造林实践中得到了充分的验证。

#### 2.4 不同苗龄柠条根系生长与地上部分的关系

柠条根系在土壤中的生长发育与地上部分的生长发育必须维持一定的平衡,这是因为柠条的地上部

分必须依赖根系从土壤中吸收水分和养分,并借助根系固着于土壤;而根系在植株进入真叶期后,子叶中储藏的营养基本消耗殆尽,必须依赖地上部分的光合作用提供养分。从表 5 可以看出,1~3 a 秋播苗的根系与地上部分具有明显的相关性。1 a 春播苗、1 a 秋播苗上没有分生侧枝,2 a 秋播苗上也几乎没有,3 a 秋播苗上开始出现分生侧枝,其发生侧枝的植株占 39.6%,平均有侧枝 0.9 条/株,侧枝总长 3.0 cm/株;株高也逐年加速递增。上述数据反映出 1~3 a 直播苗的根系在整株生长发育中占主导地位,但是从第 3 a 开始,植株的地上部分的生长发育程度明显加强,其生物量呈现出逐年加速增长的趋势,柠条的生长也即将由幼苗期进入速生期<sup>[2]</sup>。

#### 2.5 柠条根瘤特性

根瘤菌(*Rhizobium*)是一类土壤细菌,能够侵入豆科植物的根系,并形成形状各异、大小不一、具有固氮作用的根瘤,根瘤可固定空气中游离氮素,供给豆科植物利用<sup>[10,13-15]</sup>。

表 5 3 a 柠条秋播苗根系与地上部分生长量

项目	株高/cm				主根长/ cm	侧枝数/ 条	侧枝总长/ cm	株径/ mm
	合计	2004 年	2005 年	2006 年				
平均值	9.4±0.4	1.8±0.2 <sup>b</sup>	3.5±0.3 <sup>a</sup>	4.1±0.4 <sup>a</sup>	39.6±2.4	0.9±0.1	3.0±0.3	1.83±0.12
最大值	16.0	4.5	5.5	9.3	59.6	7	37.6	2.75
最小值	7.3	0.7	1.5	1.4	20.8	0	0	1.00

陇西地处甘肃中部干旱地区,土壤偏碱性,多数豆科植物适于在中性或偏碱性土壤中结瘤固氮,钙质土壤尤为有利。从表 6 可知,1 a 直播苗着生根瘤植株比例为 41.7%~57.7%,2~3 a 秋播苗的根系几乎全都着生有根瘤;单株平均着生根瘤数量与苗龄呈正相关,从 1.9 个/株增至 7.7 个/株;根瘤多呈不规则棒形、球状、“Y”状,颜色为淡黄棕色,最长可达 12 mm;根瘤着生部位与苗龄和根系的发育进程有关,1 a 直播苗 55.8%~58.7% 的根瘤着生在主根上,2

~3 a 秋播苗 80% 以上的根瘤着生在侧根上;1~3 a 直播苗的根瘤主要集中在 10—30 cm 土层中的主根及一级侧根上。这与前人的研究结果基本一致<sup>[2,10,14-15]</sup>。试验还发现,根瘤的发达程度与柠条 1~3 a 直播苗的生物量呈正相关。在柠条幼苗生长发育中,特别是在子叶营养大量消耗、真叶尚未大量形成、植株光合作用弱小期间,根瘤为植株及时提供营养补充、保障,对克服土壤瘠薄、营养相对不足、促进植株发育生长有着不容忽视的生物学意义。

表 6 不同苗龄柠条植株的根瘤状况

苗龄	着生根瘤植株 的比例/%	根瘤(个/株)			着生在主根上的 根瘤/%	着生在侧根上的 根瘤/%
		平均	最大	最小		
1 a 春播苗	57.7	1.9±0.5 <sup>c</sup>	9	0	55.8	44.2
1 a 秋播苗	41.7	1.9±0.6 <sup>c</sup>	19	0	58.7	41.3
2 a 秋播苗	96.9	4.9±1.0 <sup>b</sup>	16	0	16.6	83.4
3 a 秋播苗	97.0	7.7±1.4 <sup>a</sup>	26	0	8.8	91.2

### 3 结论

(1) 柠条 1~3 a 直播苗的高生长和主根生长呈正相关,根系的生长发育占绝对优势,根冠比值在 4~6 之间,但呈逐年下降趋势,植株生长发育的中心逐步由地下部分向地上部分转移。根系先期快速发育、地上部分跟随发育的生长规律,使得柠条具有极强的抗逆性,充分体现出它对黄土丘陵沟壑区干旱生长环境极强的适应性,这也是长期自然选择的必然结果。这一结论与前人的研究结果一致<sup>[1-3]</sup>。

(2) 柠条 1~3 a 直播苗的侧根集中发生在主根的 5~15 cm 段,这个土层区间的土壤湿度、地温、土壤空气等立地条件最适宜柠条侧根发育生长。利用造林整地改善立地条件可以有效促进柠条根系的发育生长,继而获得较理想的造林成活率、生长量。这与前人的研究结果基本一致<sup>[1-3]</sup>。

(3) 土壤水分是影响柠条 1~3 a 直播苗根系生长发育的速度、数量、质量的关键因子。柠条秋播较春播能更好地与当地的光、热、水等资源的相拟合匹配,最大程度地利用了气候资源,特别是获得了足够的水分。因此在黄土高原丘陵沟壑区应大力倡导柠条秋播造林。

(4) 柠条 1~3 a 直播苗的“第一侧根距”平均为

5 cm 左右,即柠条胚根的胚轴向上伸长生长的平均长度为 5 cm 左右,亦即柠条种子的透土深度不超过 5 cm。据此合理的播种深度为 2~4 cm,最佳深度为 3 cm。并提出了“第一侧根距”的概念,比较科学、精确地揭示了胚根的胚轴向上伸长生长、顶土发芽的实质,探索、确定了合理的柠条播种深度。

(5) 柠条是豆科植物里结根瘤最多、最早的种类之一,根瘤通过固氮功能给柠条植株提供生长发育所必需的氮素。速生、发达的根系和丰富的根瘤,是柠条具有超强抗逆性和蓄水保土、改良土壤等生态功能的重要的生物学基础。本研究客观地反映出了柠条幼苗期茎叶发育相对滞后于根系、光合作用较弱的缺陷,强调了柠条根瘤为柠条整株特别是苗期的生长发育提供营养补充、保障的重要意义。

(6) 本研究改进、创新了柠条根系测定方法,充分考虑柠条发芽属于子叶出土型、胚根的胚轴向上伸长生长、具子叶脱落痕的特性,首次提出并采用以柠条子叶脱落痕为株高与主根测量起始点、株径测定位置;以长度而非直径分级测量侧根。传统的测定方法是地表为株高与主根测量起始点、株径测定位置,忽略了柠条发芽属于子叶出土型的特性,而地表土壤易受诸如风蚀、水蚀、人畜活动的影响,进而影响测定的严密性、准确性,与之相比较,本方法似乎更注重、符

合柠条根系生长发育实际,测量结果更加精细、准确、科学,具有较好的可操作性。

(7) 限于研究条件等因素,本研究尚存在许多不足之处,如未能测定各土层土壤含水量、各土层的根系分布数量、各级侧根的质量等,尤其是对于柠条根系在 3 a 后的生长发育还有待于进一步研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吴钦孝,丁汉福,刘克俭. 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.
- [2] 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.
- [3] 牛西午. 柠条生物学特性研究[J]. 华北农学报,1998,13(4):122-129.
- [4] 毕建琦,杜峰,梁宗锁,等. 黄土高原丘陵区不同立地条件下柠条根系研究[J]. 林业科学研究,2006,19(2):225-230.
- [5] 马增旺,顾新庆,贺登飞. 柠条生长量与生物量调查研究[J]. 河北林业科技,1998(4):25-27.
- [6] 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.
- [7] 周元福,王占林. 青海省乐都地区人工柠条林生长量调查[J]. 青海农林科技,1995(3):37-40.
- [8] 荀俊杰,李俊英,陈建文,等. 幼龄柠条根现存量与环境因子的关系[J]. 植物生态学报,2009,33(4):764-771.
- [9] 叶冬梅,德永军,赵翠平,等. 带状柠条林灌草根系质量空间分布格局[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2009,30(1):101-104.
- [10] 贾丽. 豆科锦鸡儿属植物研究进展[J]. 植物研究,2001(21):515-518.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 牛西午. 广植柠条,恢复植被:关于在我国西北地区大力发展柠条林的建议[J]. 科技导报,1999(2):59-62.
- [14] 张灿娟,吴冬秀,张琳,等. 内蒙古草原 3 a 小叶锦鸡儿根瘤特征及其对环境变化的响应[J]. 植物生态学报,2009,33(6):25-27.
- [15] 刁治民. 青海豆科植物根瘤菌的初步研究[J]. 青海科技,1996,3(4):1-5.

(上接第 231 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 万里强,李向林,苏加楷,等. 不同放牧强度对三峡地区灌丛草地植物产量的影响[J]. 草业学报,2002,11(2):51-58.
- [2] 周光裕,叶正丰,李相敢. 中国北方的灌草丛[J]. 江西农业大学学报,1986(3):45-47.
- [3] 许志信,曲永全,白飞. 草甸草原 12 中牧草生长发育规律和草群地上生物量变化动态研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2001,22(2):28-32.
- [4] 王长庭,龙瑞军,丁路明. 高寒草甸不同草地类型功能群多样性及组成对植物群落生产力的影响[J]. 生物多样性,2004,12(4):403-409.
- [5] 王琳,张祖陆. 济南市南部山区生态恢复与重建途径讨论[J]. 地理与地理信息科学,2003,19(3):71-75.
- [6] 王立红,秦艳红. 济南市南部山区渗漏带汇水区景观恢复与优化[J]. 山地学报,2004,22(4):433-438.
- [7] 王月海,房用,隋日光. 山东石灰岩山地荒山植被恢复技术的研究[J]. 水土保持研究,2006,13(4):240-242.
- [8] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [9] 孙涛,毕玉芬,赵小社,等. 围栏封育下山地灌丛草地植被植物多样性与生物量的研究[J]. 云南农业大学学报,2007,22(2):246-250.
- [10] 李自珍. 应用生态学研究—生态系统的分析、调控与模拟[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1991.
- [11] 李自珍,刘小平,蒋文兰. 人工草地放牧系统优化模式研究 I:人工草地的最大持续产量模型和最优控制方法及应用[J]. 草业学报,1998,7(4):61-66.
- [12] 白永飞,许志信,李德新. 羊草草原群落生物量季节动态研究[J]. 中国草地,1994(3):1-5.
- [13] 多立安,田德昌,崔艳丽,等. 羊草+杂类草草原地上生物量增长动态的研究[J]. 东北农业大学学报,1995,26(3):297-301.
- [14] 杜国桢,李自珍,惠苍. 甘南高寒草地资源保护及优化利用模式[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2001,37(5):82-87.
- [15] 卞文轩,吴志芬. 山东石灰岩山地丘陵灌草丛的生态分析及其在造林中的指示意义[J]. 山东林业科技,1981(4):20-25.
- [16] 余新晓,张晓明,王雄宾. 北京山区天然灌丛植被群落特征与演替规律[J]. 北京林业大学学报,2008,30(S2):107-111.
- [17] 岳喜成,郑观玉,刘耀曾. 野生黄背草人工繁殖及开发利用试验研究[J]. 中国水土保持,1994(12):29-30.
- [18] 董全民,马玉寿,李青云,等. 牦牛放牧率对小嵩草高寒草甸暖季草场植物群落组成和植物多样性的影响[J]. 西北植物学报,2005,25(1):94-102.
- [19] 胡宏友,林鹏,杨志伟. 宽叶雀稗群落生物量和生长规律的研究[J]. 福建农业学报,2002,17(4):226-230.
- [20] 李文龙,李自珍,王刚. 西部高寒湿地系统的草地资源保护与优化利用模式研究[J]. 西北植物学报,2004,24(9):1640-1645.