

毛乌素沙地生态经济型防护林体系效益研究※ (技术总报告)

周心澄 李广毅 薛智德 李会科 廖超英 高国雄

王忠林 肖 智 吕悦来 郭建斌 张龙生

(西北林学院 陕西杨陵 712100)

摘 要 从经济效益、生态效益和社会效益等三个方面对毛乌素沙地生态经济型防护林体系进行了比较全面的分析。以防风固沙林为重点建立了评价生态效益的指标体系,并用层次分析法计算了生态效益指数;此外,还建立了评价经济效益的指标体系,对指标的计量给出了方法、建立了公式并进行了具体的计算。

关键词 沙地 生态经济型 防护林体系 生态效益 经济效益

Study on the Benefits of Eco—economic Type of Shelter Systems in the Maowusu Desert

Zhou Xincheng Li Guangyi Xue Zhide Li Huike Liao Chaoying Gao Guoxiong

Wang Zhonglin Xiao Zhi Lu Yuelai Guo Jianbin Zhang Long sheng

(Northwestern College of Forestry, Yangling Shaanxi 712100)

Abstract With consideration of economic, ecological and social benefits, the eco—economic types of shelter systems in the Maowusu desert have been comprehensively analyzed in the paper. Emphasized on the windbreak and sand stabilization forest, a target system for assessing the ecological benefit was set up, meanwhile, the indexes of ecological benefit were counted by the method of AHP (analysis of Hierarchical Programming). Forthefore, target system for assessing the economic benefit was constructed, the methods, formulas and the concrete calculation for scaling the targets have also been put into action.

Key words desert eco—economic types shelter systems ecological benefit economic benefit

绿色植物在生态系统中具有吸收、储存、传递能量和改善系统的全方位功能,是生态系统中一个最重要、最活跃的因素。人们将植物的作用概括地分为三个方面:即植物(主要指自然植被和人工植被)的生态效益、经济效益和社会效益。对于沙区防护林体系,这种研究十分必要,它不仅可以促进学科本身的发展,而且有利于使沙区防护林取得社会公认,从而推动沙区林业的发展和

资源的合理利用。

森林生态经济效益的研究已呈现出从定性到定量评价的趋势,效益指标体系的建立是生态效益评价的基础。而沙区防护林体系的核心是防风固沙林,而防风固沙林的构成是以灌木为主体的。因此,本报告以灌木防风固沙林为重点,全面探讨各林种的生态效益指标体系和权重体系,此外,对防护林体系的经济效益也进行了必要的分析,建立其指标体系并对计量方法进行探讨。

防护林体系的效益研究成果,将为林业规划、布局、林种结构、林分质量等决策方案提供理论依据。在效益分析的过程中将选择有代表性的植物种进行比较研究,以期对沙区的林业生产提供理论指导。

第一部分 研究区概况及研究方法

1 研究区概况

1.1 自然地理基本情况

毛乌素沙地位于北纬 $37^{\circ}30'$ ~ $39^{\circ}20'$,东经 $107^{\circ}20'$ ~ $111^{\circ}30'$ 。面积 4 万 km^2 ,其中包括内蒙古伊克昭盟,陕北榆林地区和宁夏东北部。

毛乌素沙地具有中温带气候,属荒漠草原—干草原—森林草原的过渡地带。其年降水 260~450mm,干燥度 1.0~2.5。在热量条件方面则处于由中温带向暖温带的过渡。具有固定—半固定沙丘向黄土丘陵过渡的地貌特征,兼具风蚀、风积与水土流失的特点。

就植被地理来说,在上述过渡性气候与地质地貌的背景条件下,毛乌素沙地具有从西北部的超旱生半灌木荒漠,经灌丛沙丘而向森林草原与落叶阔叶林地带过渡的地位,其地带性植被是与沙基质相联系的各种灌木生活型为主的植物群落。

上述三方面的自然地理背景在很大程度上决定了毛乌素沙地防护林建设在造林类型与植物种选择方面的基本原则与方向。在结构上,应以沙生及旱生灌木网带为基本构架,结合以局部的乔木树种与草地的栽植模式,因地制宜地构成各类“草(灌木)—林—农”的复合系统。这是由其自然地带性所决定的,生态经济型防护林体系的建设也不能违背这一客观规律。

1.2 气候特征

在大气环流方面,毛乌素沙地受到西北部与北部蒙古—西伯利亚大陆高压的控制;夏季降水系统则受到东南季风的影响。因而这里的水份状况明显地形成由东南向西北的梯度。年平均降水量东南部为 440mm,向西递减至 250mm,7~9 月降水约占全年的 60%~70%,尤以 8 月最多。

毛乌素沙地在热量方面可划分为两个亚带,即北中温亚带与南中温亚带,大致可以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3 000 $^{\circ}\text{C}$ 与 1 月均温 -10°C 南中温亚带的界限为分界线。

从干燥度或水热平衡条件看,毛乌素沙地基本上处于干旱区,其中部大部分地区的降水在 300~400mm 之间,蒸散率为 1.1~1.7,湿度指数 -42~54,属干草原湿度状况;其西部边缘在 300mm 以下,最低只有 250mm 左右,蒸散率超过 1.7,可达 2.5 属荒漠草原,并逐渐向荒漠过渡;在东部与东南缘的榆林、神木一带,降水 400~480mm,蒸散率低于 1.1,湿度指数大于 -42,局部达 -30,已属森林草原带。沙丘是最典型的景观,不同厚度的沙层上生长有灌木和沙蒿及其他草本植物,当地称为“巴拉”。沙丘间的低地水份条件较好,常有天然生长的沙柳灌丛,当地称为“柳湾”。

1.3 植被与土壤特征

毛乌素沙地的植被可以划分为三个地带与三大类群。从植被地带来说,其西部边缘属于向荒

漠过渡的荒漠草原亚地带,占90%以上的中部和东部则属于干草原亚地带。在东南缘,开始向森林草原过渡,但由于沙基质的覆盖,在植被上差异不显著,一般仍划为干草原亚地带。

本区的三大植被类群是梁地上的草原与灌丛植被,半固定、固定沙丘与沙地上的沙生灌丛,滩地上的草甸,盐土与沼泽植被。与其相对应的土壤类型是梁地上的栗钙土和淡栗钙土,沙地上的各类风沙土,以及滩地上的草甸土,盐碱土和沼泽潜育土。毛乌素沙地大部分位于淡栗钙土干草原地带,向西北过渡到棕钙土半荒漠地带,向东南过渡为黄土高原暖温带黑垆土地带,恰处于几个自然地带的过渡地区。

1.4 水文条件

毛乌素沙地与全国各沙漠、沙地相比较,最突出的特点是水份条件较好。地表径流达14亿 m^3 ;东南部有若干河流注入黄河,主要有无定河、秃尾河、窟野河等;可利用水量约4亿 m^3 。

内陆水系多年平均径流量为1.05亿 m^3 。长城沿线沙区还有内陆海子200余个。本区东南部地下水,潜水补给条件好,地下水相当丰富,埋藏浅,水质良好。

1.5 社会经济条件

毛乌素沙区包括内蒙古自治区伊克昭盟的南部(伊金霍洛旗南部、乌审旗、鄂托克旗南部),陕西榆林地区北部(神木、府谷、榆林、横山、靖边、定边六县的北部和佳县西北一小部分)以及宁夏回族自治区的盐池、灵武、陶乐,共计14个县旗的151个乡镇,总人口133.45万,农业人口117.44万,农村劳力42.69万,人口密度34人/ km^2 ,土地总面积4万 km^2 。

本区草场辽阔,类型多,有悠久的畜牧业发展历史。本区有干草原类草场,沙生植被类草场,沼泽草甸类草场等,牲畜以羊为主,大家畜次之。林地包括天然灌木林,防护林和经济林等。

本区有丰富的矿产资源,煤、石油、天然气等蕴藏量大,对本区的经济发展起重要作用。

2 研究方法

2.1 标准地调查

本项研究利用了“毛乌素沙地生态经济型防护林体系结构研究”的标准地调查资料,其方法同该项专题。

2.2 室内外土壤分析方法

(1) 外业调查。土壤剖面选择在标准地中央,无人破坏的区段,剖面规格宽1.0m,长1.5m,深度一般挖至母质或地下水位。同时采用蛇形取样法采集样品,每样点分0~10,10~20cm两个层次取样。土壤剖面形态记载:层次、土层厚度、湿度、颜色、结构、土壤紧密度、土壤质地、侵入体及新生体、潜水水质、石砾含量等内容。

(2) 室内分析方法^[1]。(1)土壤颗粒组成:悬浮土粒法;(2)pH值:电位法;(3)全盐量:质量法;(4)有机质:重铬酸钾氧化法^[2];(5)全氮:半微量凯氏法;(6)土壤速效磷:碳酸氢钠法。

2.3 林分小气候的测定

(1) 风速的测定。用轻便式三杯风向风速表分0.3m、1.5m、2.0m、2.5m四个高度观测各标准地的梯度风速,求出断面平均风速,透风系数等,并以旷野为对照求出降低风速值。

(2) 沙量的测定。输沙量是指风沙流在单位时间内通过单位宽度的断面所搬运的沙量。输沙量用集沙仪测定。在测定风速的同时,将集沙仪放置在标准地中,孔口面对气流,经1h取出各层小盒,倒出砂子称重,得出1h通过2cm,距离地面20cm各层的输沙量。

(3) 空气温度、湿度和地温的观测。用通风干湿表,分5、20、100、150cm四个高度进行梯度观测;土壤温度的观测分5、10、15、20、25cm五个深度,用地温表进行观测,同时观测地面最低、

最高温度。观测点分丘间地和迎风坡,每个林种各设一个。

2.4 光能利用率的测定

(1) 生物量的测定。

(2) 热能值的测定。植物热能值是植物储能强度的衡量指标,是确定植物光能利用率的重要因素,用氧弹式热量计法测定。

(3) 光能利用率的计算。根据灌木 4~7 月的生物量和热能值测定结果,计算单位面积植物光合作用积累的有机物质所含能量,进而与太阳在该时段的总辐射能相比而得出光能利用率。

2.5 植被演替的调查

(1) 地点:榆林市古城滩林场。该林场已有近 40 年的造林历史,从无间断,林地封闭良好,少有人为干扰,为本项调查所采取的时间和空间序列调查法提供了很好的条件。

(2) 样方法调查群落特征^[3]。沿垂直于沙丘链方向,设 30m×30m 标准地,每块标准地含 10m×10m 大样方三个用以调查灌木;1m×1m 小样方三个调查草本。调查内容有:群落植物种组成、种的密度、盖度、频度、生活力及种的更新调查,同时记录样地环境并按上述方法进行土壤调查。确定群落植物种的重要值。

重要值(IV)=相对密度+相对显著度+相对频度

相对密度=某种的个体数/全部种的个体总和×100%

相对显著度=某种的显著度/全部种显著度之和×100%

相对频度=某个种的频度/全部种的频度之和×100%

(3) 测定样地土壤含水率和沙面结皮。土壤含水率采用烘干法;沙面结皮测定其厚度、硬度、颜色、形状等。

2.6 灌木固沙林水分利用及水分平衡的测定

(1) 沙地水量平衡各因子的观测。沙面土壤蒸发的测定,用口径 20cm,长 80cm 的铁桶,分别嵌入流沙和灌木林地内根据桶内,水分得失称重求得,实测 5~8 月蒸发量,其它季节由自由水面蒸发推算;林冠截留降水量,用雨量桶分别设置在旷地和林地,计算雨量比值而得;人工降水试验,在裸地取 4m² 样方,分别挖取 10、30、50cm 不同沙层,测定其含水率,观察其渗透深度和速度,取得田间持水量等数据。

(2) 蒸腾强度的测定。在灌木标准地内选择标准丛,用快速称重法^[3]测定蒸腾,利用这一方法可以得到接近于生长在自然条件下的林木的蒸腾值。在测定蒸腾的同时,观测光照、空气温、湿度和风速等四个气象因子。

2.7 固沙林的指标体系、权重体系及生态效益指数

生态效益指标体系的确定是森林生态效益理论研究的主要内容之一,也是实现森林生态效益综合、定量评价的基础。本项研究在采取专家信息,确立指标体系和权重体系的同时,运用层次分析法,进行数学分析。具体内容在论文中说明。

2.8 农田防护林生态效益研究方法

研究内容和测定方法参看本集有关论文。

防护林体系对综合生态效益起作用的林种主要是防风固沙林和农田防护林;用材林的带状林分 and 片状林分,其生态作用和防风固沙林或农田防护林无本质的不同。本沙区这三个主要林种占林业用地面积的 92.7%,因此对生态效益的研究以防风固沙林和农田防护林为主,并以防风固沙林为核心。

2.9 防护林体系的经济效益和社会效益

分林种计算防护林的经济效益和分析其社会效益,建立防护林体系经济效益的指标体系,在这方面充分考虑市场机制的作用。

第二部分 防风固沙林的生态效益的研究

固沙植物的生态效益就是其利用、稳定和改善环境的系统功能值,因此,效益指标可以从对有利和不利环境的改善给以确定。正如在“毛乌素沙地生态经济型防护林结构研究”一文指出的那样,毛乌素的固沙林,和任何其它事物一样,都是具有两重性的,固沙林从建立的第一天起就开始从正反两方面作用于环境。我们认为,效益的概念决不止是单向的概念,而是既有正值,也有负值,也符合一般哲学规律,在某一个“度”的范围内,其表现为正值,但超出这个范围,也并不是不可能产生副作用。这也可能是干旱、半干旱沙区的特殊性,需要深入探讨。我们之所以在完成“八五”这两项子课题的过程中,提出这一论点,是因为在见到的报道中,尚未见到这种分析。而对这一问题的正确分析将影响各级政府部门的决策。我们的研究仅仅是初步涉及这一问题,还需继续深入下去。

防风固沙林在吸收、利用太阳能的基础上,防风固沙、同时作用于小气候,土壤的物理和化学性质,促进沙地的植被演替,改变沙地水分状况,并对其周围环境发生影响,在一定规模条件下可能引起气象因子的变化,因此,从上述几方面进行效益分析。本研究采取对比观测法,选择典型固沙植物种沙柳、花棒、踏郎、紫穗槐、柠条进行观测分析,以求定量的评价固沙林的生态效益。

1 光能利用率※

植物光能利用率是单位土地面积上一定时间内植物通过光合作用积累的有机物所含能量(以卡表示)与同期照射单位土地面积上太阳辐射量之比。它是衡量植物生产力大小和生活力强弱指标,也是生物生态系统建立的基础,直接决定系统的效益。植物光能利用率的研究不仅可以作为造林树种选择的依据并结合其生物生态学特性解决造林方式等一系列造林学问题,而且据一些专家提出的生态经济效益指标体系中,把光能利用率列为第一个衡量指标。

1.1 生物量测定

灌木生物量为单位面积(亩)4~7 月生物量的增量,即为植物在该时期内通过光合作用积累的有机物量。本次就五个灌木种在两个立地类型上进行生物量调查,每个类型林龄均为 25 年。各类型、各林种分别调查了五块标准地,其生物量测定的平均结果如下表(表 2-1)。

表 2-1 灌木生物量测定表

| 项 目 | | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|-----|----------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 丘间地 | 生物量(鲜重) * (kg) | 152.41 | 49.65 | 113.39 | 248.57 | 140.16 |
| | 含水率(%) | 67.0 | 62.1 | 68.6 | 69.7 | 72.0 |
| | 生物量(干重) * (kg) | 50.29 | 18.82 | 35.6 | 75.32 | 39.25 |
| | 生物量(鲜重) * (kg) | 93.24 | 48.15 | 125.41 | 80.27 | 90.26 |
| | 含水率(%) | 65.3 | 61.9 | 66.7 | 64.2 | 67.3 |
| 迎风坡 | 生物量(干重) * (kg) | 32.35 | 18.35 | 41.7 | 28.74 | 29.52 |

※ 生物量为单位面积(亩)4~7 月生物量增量。

可以看出,丘间地的生物量高于迎风坡生物量,两者相差根据不同树种达 33%到 162%。其中,花棒在两立地类型上差异最小,反映其对生境的适应性强,而紫穗槐差异显著,反映其对立地要求严格。其它树种介乎两者之间。

此外,据测定五个灌木种的单丛生物量与冠幅成正相关,相关系数 $Y=0.82$;而单位面积的生物量增量却主要决定于自然保存密度,简单线性分析结果,其相关系数 $Y=0.71$,相关性均较显著。其中,花棒单丛生物量最大,为每丛 0.412kg ,而紫穗槐最小,为每丛 0.172kg ,但因紫穗槐保存密度大,每亩达 473.57 丛,其亩生物量达 75.32kg ,而花棒保存密度仅每亩 33.35 丛,生物量仅 18.82kg 。因此,为获得更大的生物量,应在保证植物个体生长的前提下,增加其造林和保存密度,密度增大,在生物量增加的同时,还能发挥固沙植物的“群体”效益,有效地削减风沙流,加快流沙的固定。

但是,由于沙地水分因子的制约,密度增大,将使植物个体水分营养面积减小,导致水分欠缺,单株产量降低,从而影响单位面积的生物产量。根据野外调查,在低于下文所论述的理论造林密度的情况下,各种灌木单位面积平均生物量和密度、灌高、灌幅的多元回归模型如下:

$$Y = -0.0238 + 0.0749X_1 + 0.2445X_2 + 0.1832X_3$$

1.2 灌木热能值的测定

植物热能值是单位重量的干物质完全燃烧后发出的热能,是植物贮藏强度的衡量指标,也是确定植物光能利用率的又一重要因素。上述五种固沙植物热能值测定结果如下(表 2-2)。

表 2-2 五种灌木植物种的热能值 单位:千卡/kg

| 树种 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 热能值(cal/kg) | 4226.18 | 4518.36 | 4264.21 | 4407.91 | 4338.27 |

1.3 灌木光能利用率的计算

根据以上五种灌木 4~7 月份的生物量增量和热能值测定结果,可计算出单位面积上五种灌木在测定时段有机质所贮能量,进而与该时段太阳总辐射相比取得各种树种光能利用率(表 2-3)。

表 2-3 五种灌木植物种光能利用率 单位:千卡/亩

| 项 目 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|-------------------|--|--------|--------|--------|--------|
| 太阳总辐射(千卡/亩)(4-7月) | $6666.7 \times 666.7 \times 104 = 417154190$ | | | | |
| 植物储能(千卡/亩) | 212535 | 85041 | 151806 | 332004 | 170277 |
| 丘间地 植物光能利用率(%) | 0.0509 | 0.0204 | 0.0364 | 0.0796 | 0.0408 |
| 植物储能(千卡/亩) | 136717 | 82917 | 178073 | 126683 | 128066 |
| 迎风坡 植物光能利用率(%) | 0.0328 | 0.0199 | 0.0427 | 0.0303 | 0.0307 |
| 植物光能利用率平均 | 0.0419 | 0.0202 | 0.0396 | 0.0550 | 0.0358 |

从表中可以看出:

(1)固沙灌木光合作用利用的太阳能极低,一般情况下树木平均光合作用利用的太阳能为 $1\% \sim 2\%$,而固沙灌木受生境条件,特别是水份亏缺的制约,降低了原生质特别是叶绿体的水合程度,引起胶体结构的变更和酶活性的降低,抑制了光合速率,故其光能利用率低,仅为传统意义上的森林的 $2 \sim 5\%$ 。但是,正是这种物质和能量的超常消耗,才使固沙植物具有较强的抗逆性。

(2)在丘间地,五种灌木光能利用率的高低顺序为:紫穗槐、沙柳、柠条、踏郎、花棒;而在沙丘迎风坡,其顺序为:踏郎、沙柳、柠条、紫穗槐、花棒。这种状况真实地反映了树种的生物生态学特征。踏郎萌蘖性强多群丛生长,具有很强的抗风蚀能力,在流动沙丘上能迅速生长发育,因此,在迎风坡光能利用率高,而紫穗槐抗旱抗风能力相对较弱,在风蚀强水份条件差的迎风坡生长不良,光合利用率也低。沙柳喜湿而抗旱,根系发达,耐沙压沙埋,在丘间地和迎风坡上部光能利用

率均较高,是一种分布较广的固沙灌木种。花棒的光能利用率低,一是因叶片退化,光能接受面积小,二是其个体需要的营养面积大,自然保存密度明显偏低。

(3)固沙植物种一方面对立地有相当的适应性,对不良环境也有较强的抗逆性,但另一方面,生境条件对其光能利用率的影响也是明显的。这种影响从同一树种在两种不同立地类型上的光能利用可以看到,其差异大的影响也大,如紫穗槐,光能利用率从丘间地的 0.0793%到迎风坡的 0.0303%,下降达 148%,而花棒仅下降 2.51%。花棒虽然光能利用率低,但却是一个对环境适应性和抗逆性最强的植物种。

(4)固沙灌木吸收光能,进行有机质的生产与积累,是沙漠生态系统的第一要素,也是稳定和改善生态环境的基础,同时也是系统整体生态功能的表征。因此,光能利用率作为综合生态效益评价主要指标是恰当的。

2 固沙林的防风固沙效益

风沙危害是风作用下的因“起沙”作用而造成风蚀和沙埋,流沙吞没农田、牧场、道路、村庄并使土壤肥力降低,导致生产力的下降,也是荒漠化发生与发展的自然动力因素之一。防风固沙林的重要作用在于其通过增加地表粗糙度,降低风速,减小或控制风沙流,达到固沙的目的。

表 2-4 固沙林降低风速观测表※

| 项 目 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|----------------|------|------|------|------|------|
| 0~5cm 分枝数 | 21 | 3 | 30 | 23 | 19 |
| 0.3cm 处降低风速(%) | 45.6 | 37.8 | 77.1 | 46.8 | 45.0 |
| 透风系数 | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 0.5 | 0.5 |
| 2.5m 断面降低风速(%) | 30.2 | 52.2 | 33.3 | 42.2 | 50.2 |

※ 降低风速(%)系与旷野风速比较而得,5次观测旷野风速为 5.6(aw)7.0(N)6.5(WN)7.6(WN)5.2(WN)m/s。

2.1 灌木固沙林降低风速的作用(表 2-4)

从整个 2.5m 的垂直断面风速降低的平均值来看,花棒由于植株高大,遮挡面大,总体防风效果较好,降风达 52.2%,这也和观测点平均高度为 1.57m 处透风系数相符;同样的原因,沙柳、踏郎总体防风效果较差,分别为花棒的 57.9%和 53.8%。相反,在 0.3m 处,踏郎、沙柳由于分枝数较多,透风系数较小而有效地降低了近地层 0.3m 处的风速,踏郎、沙柳降低风速分别达 77.1%和 45.6%。

以上述相关因子,地表分枝数(分枝数/丛)、密度(株/亩)、平均高度(cm)、平均冠(灌)幅(cm)、及草本植物盖度(%)5个因子对防风效能分层次进行逐步回归的结果为:

线性方程: $Y = -1.630 + 0.368X_1 + 0.038X_2 + 15.653X_3 + 0.391X_4 - 4.078X_5$

标准化的线性方程: $Y = \{-0.239X_1 + 0.104X_2 + 0.896X_3 + 0.013X_4 - 0.167X_5\}$

逐步回归的线性方程: $Y = -2.112 + 14.878X_3$

从上式可以看出,对防风效能,密度和树高所占的权重较大,而地面分枝数所起的作用较小,反映了防风效能和林分上层的“形态”有紧密的相关性,计算结果,其相关系数为 0.859。

2.2 固沙林输沙量的观测(表 2-5)

表 2-5 固沙林输沙量的观测

| 项 目 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 | 流沙 |
|-------------|------|------|------|------|------|-------|
| 输沙率(g/h·cm) | 2.53 | 4.02 | 0.89 | 2.57 | 2.76 | 65.42 |

本次试验证实,气流中搬运的沙量绝大部分是在近地气层 10cm 内通过的,特别集中在贴地

面的 0~5cm 气流层内。0~10cm 的输沙量均占 0~20cm 层的 95% 以上,而 18~20cm 不到总量的 5%,说明了气流输沙的贴地表性。可以看出,固沙林显著地降低输沙量,仅为流沙的几十分之一(见图 1),这是固沙的基本原理,为人为干预固沙林,通过抚育管理,改变固沙林的断面结构,提高其防风固沙效益,提供了理论依据。

各灌木种阻止流沙移动的功能是有差别的,而这个差别与 0.3m 高程处风速削弱情况相符,即踏郎最优,花棒最差,其它介乎两者之中。

同样以上述 5 个因子对输沙量进行逐步回归的结果:

线性回归方程: $Y = 1.268 - 0.008X_1 - 0.002X_2 + 0.100X_3 - 0.164X_4 - 1.168X_5$;

标准化的回归方程: $Y = \{-0.391X_1 - 0.423X_2 + 0.138X_3 - 0.191X_4 - 0.374X_5\}$;

逐步回归的线性方程: $Y = 1.158 - 0.009X_1 - 0.002X_2 - 0.374X_5$

和防风效能相反,对输沙量来说,地面分枝数、密度和草本植物的盖度所占权重较大,逐步回归的结果也只筛选出这三个因子,反映了风沙流贴地面运动的特点,只有具地面“形态”的因子,才对输沙量产生影响。

3 固沙林的小气候效应

固沙植被形成的过程中会对其控制区的局部气象因子如气温、空气湿度、地温等产生影响,能够产生对环境的某些改善和某些有利于植物生长的因素(表 2-6)和降低风速的效应,应该是固沙林综合生态效益中首要的和最重要的指标。

表 2-6 固沙林小气候效应观测表

| 项 目 | | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|-----|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 气 | 林内 | 17.99 | 17.96 | 17.48 | 17.80 | 18.09 |
| 温 | 林外 | 18.36 | 18.36 | 18.36 | 18.36 | 18.36 |
| (℃) | 差值 | -0.37 | -0.40 | -0.88 | -0.56 | -0.27 |
| 湿 | 林内 | 60.27 | 58.40 | 58.27 | 58.82 | 58.23 |
| 度 | 林外 | 56.52 | 56.52 | 56.52 | 56.52 | 56.52 |
| (%) | 差值 | +3.75 | +1.88 | +1.75 | +2.30 | +1.80 |
| 地 | 林内 | 17.66 | 17.55 | 18.05 | 16.86 | 17.57 |
| 温 | 林外 | 18.36 | 18.36 | 18.36 | 18.36 | 18.36 |
| (℃) | 差值 | -0.20 | -0.81 | -0.31 | -1.50 | -0.79 |

对固沙林的小气候效应不少学者进行了研究,一般认为在春秋季节具有增温作用,而在夏季具有降温作用,带来的对地温的影响也有其一致性。由于使相对湿度增加,在其控制区的蒸发力要比旷野减少 43.4%~59.2%。但是,可以看出,固沙林改变空气湿度和地温的作用并不显著,林龄 20 年,盖度在 50% 以上的固沙林,虽能在炎热的夏季降温,但不过 1℃;局部空气相对湿度固然有所增加,但也不超过 6%~7%(大多数学者的测定结果也是如此),有些人根据某种程度增加了空气湿度,减小林内蒸发力,说明固沙林减少 40%~50% 的无效水损失,节约了沙地水分,进而说明固沙林增加空气相对湿度的价值。但是,我们知道,沙地蒸腾量与蒸发量是相当大的。由于空气干燥,沙地蒸发力一般在 1000~2000mm,而沙地水分在总体上还是处于一种相对平衡的状态。据观测,1990 年古城滩林场地区降水量为 430.3mm,沙面蒸发为 210.6mm,而水面蒸发达 1402.2mm,蒸发力与蒸发量相差甚远。因此,用蒸发力大小评价水分消耗是不确切的,况且,固沙林内空气湿度的增加是以植被强烈的蒸腾为代价的。总的看来,固沙林的小气候效应在综合生

态效益中应占较小的权重。

4 固沙林系统的水分利用和水分平衡

水分是沙区林木生长的第一限制因子,固沙林在这种特定的环境条件下,通过自身形态、生理及生态等方面的变化实现对干旱环境的适应,同时,也对沙地系统的水分平衡和循环产生一定的影响,以达到林木与环境的统一。为了解这一过程,对古城滩林场灌木固沙林的水分平衡进行了研究。

4.1 流沙地的水分平衡^[4]

沙地的水分平衡用下式表示:

$$P = E + N + R + \Delta S$$

式中: P ——降水量; E ——沙面蒸发量; N ——地表径流量; R ——渗透量; ΔS ——湿沙层蓄水量。

在试验区对以上因子进行了观测,结果如下:

年降水量 P 为 430.3mm;

湿沙层蓄水量 ΔS 的平均值变幅很小,2m 各沙层 5~10 月平均含水量分别为:1.92、2.10、2.21、2.60、2.25、2.31%,因此, ΔS 可以忽略不计;

沙面蒸发量 E ,试验计算结果为 210.6mm;

地表径流 N ,根据 1984 年本文作者在榆林红石峡做的人工降水试验表明:在降水强度 50mm/h 的情况下,未发现地表径流。该降水强度在试验区是 20 年一遇,属小概率事件,可以满足研究沙地水分平衡的需要;

由以上结果可以推算出流沙渗透量 R 为 219.7mm。因此流沙的水分平衡动态为:

降水(P)430.3mm=沙面蒸发(E)210.6mm+渗透量(R)219.7mm。

4.2 固沙林地的水量平衡

林地陆面蒸发与流沙地不同,由于林冠的遮荫,使蒸发量比较小,再者一部分降水被林冠截留而蒸发损失掉。对以上两项进行观测后,得出各林地的水分平衡动态(表 2-7)。

表 2-7 林地水分平衡表

| 项 目 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 降水(P) | 430.3 | 430.3 | 430.3 | 430.3 | 430.3 |
| 土壤蒸发(E1) | 95.0 | 101.4 | 90.3 | 90.0 | 92.2 |
| 林冠截留蒸发(E2) | 21.3 | 25.2 | 25.0 | 26.2 | 22.3 |
| 渗透量(R) | 314.0 | 303.7 | 315.0 | 314.2 | 315.8 |

4.3 固沙林的水分利用

(1)可供植物生长的有效水量。对土壤持水量的测定表明,在正常的沙地含水情况下(1m 沙层平均含水为 2.07%),1m 沙层仍可继续容水 36.2t/亩,相当于 54.3mm 的降水量,也就是说,20 年一遇 50mm/h 的暴雨持续 1h,可全部保留在 1m 沙层内。据 1978 年 8 月 26 日~9 月 1 日 5 天降水的观测结果,降水已达年降水的 1/4,各沙层的含水率均未超过田间持水量,特别是林地 100~200cm 沙层含水率仍接近正常值。因此,即使有一部分向深层入渗,一般也保持在根系可达

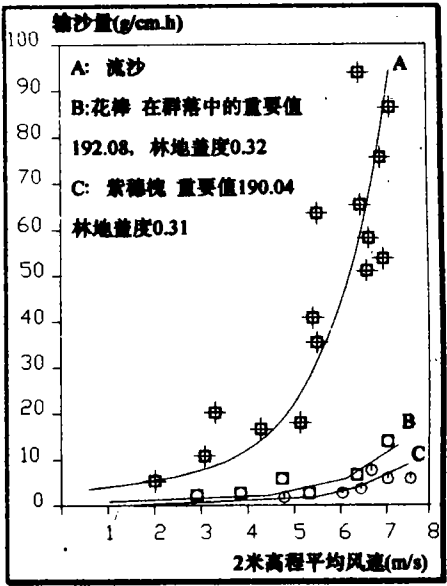


图 1 不同林地的风速与输沙量

到的沙层中,表 2-7 中的 R,绝大部分可供植物吸收利用。当土壤含水量接近萎蔫系数时,土壤水势为-15Pa 左右,能供植物吸收的水分已经很少。因此,在测定各林地萎蔫含水量的基础上,求得各林地的有效含水量(表 2-8)。

表 2-8 1m 沙层的有效水

| 项 目 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 渗透量(R)(mm) | 314.0 | 303.7 | 315.0 | 314.3 | 315.8 |
| 土壤萎蔫含水率(mm) | 8.7 | 9.0 | 9.2 | 8.6 | 8.3 |
| 土壤有效含水量(mm) | 305.3 | 294.7 | 305.8 | 305.7 | 307.5 |

(2)固沙林的蒸腾耗水量及水分利用率。固沙植物的蒸腾耗水量及水分利用率是衡量其生态功能的又一重要指标。测得各植物种生长季的蒸腾强度及其鲜重后,就可以推算其单株耗水量,并在此基础上和当年生物量相比较而得到水分利用率(生产每克干物质所消耗的水分,也叫蒸腾系数)。耗水量的计算式为:

生长季耗水量/株=蒸腾强度×鲜叶重×24(h)×150(d)。

表 2-9 固沙灌木单株耗水量及水分利用率

| 项 目 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|----------------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 单株鲜重(g) | 350.6 | 987.6 | 262.3 | 193.3 | 262.6 |
| 蒸腾强度(g/g 鲜重·h) | 0.668 | 1.087 | 1.001 | 0.898 | 0.932 |
| 生长季耗水量(kg) | 843.12 | 3864.68 | 946.67 | 624.90 | 881.08 |
| 单株生物量(kg) | 0.310 | 2.03 | 0.542 | 0.540 | 0.643 |
| 蒸腾系数 | 1041 | 1904 | 1747 | 1157 | 1370 |

从上表可知,水分利用效率由高到低的顺序是沙柳、紫穗槐、柠条、踏郎、花棒。

(3)固沙林地理论造林密度。由固沙林的单株耗水量和沙地土壤的有效含水量,确定各灌木种的理论造林密度(表 2-10)。

所得出的理论造林密度实际上就是沙地对灌木的土地承载能力,这个结果和调查的实际情况基本相符。经调查,20 年生灌木纯林的平均密度为:沙柳 236、花棒 47、踏郎 210、紫穗槐 320、柠条 222 株/亩,与理论密度非常接近,证实了以上得出的固沙林水分动态过程的正确性。以上理论密度及通过蒸腾系数得出的灌木林种水分利用率由高到低的结果,应成为造林实践的理论依据之一。同时,灌木植物种的水分利用率,也是干旱适应性和系统整体功能的表征。因此,应作为综合生态效益的衡量指标。

表 2-10 固沙灌木的理论造林密度

| 项 目 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|---------------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 土壤有效水含量(kg/亩) | 203533 | 196467 | 203867 | 203800 | 205000 |
| 灌木单株耗水量(kg) | 843.12 | 3864.68 | 646.67 | 624.90 | 881.00 |
| 理论造林密度(株/亩) | 241 | 51 | 251 | 326 | 233 |

4.4 固沙林的水分动态

固沙林由于土壤蒸发和植物蒸腾,导致土壤含水率下降,沙地变得逐渐干燥,人工林种群的优势度降低,更耐干旱的植物种群开始侵入,从而引发植被演替。这一问题将在下文论述。

5 固沙林改良土壤的作用

在植物—土壤物质转化和循环过程中,植物吸收土壤元素合成有机质,同时植物又将其枯落

物回归大地,在微生物的作用下,分解释放养分,进入土壤。此外,由于植物根系的物理化学作用,使土壤中许多必要元素处于可利用状态,土壤肥力逐步得到改善。

5.1 固沙林的地被物

固沙林地被物包括苔藓植物、林下枯落物和地表结皮。其中,苔藓植物由孢子繁殖、发育生成,而孢子的传播受风的影响很大,在干旱的流动沙地上难以生存。随着固沙林对环境的改善,苔藓植物有所发育。因此苔藓植物的存在与数量可以作为沙地环境的指示植物。毛乌素固沙林内的苔藓植物经鉴定,同属于一种真藓属的真藓。真藓为广布种,也被称为先锋植物。真藓长得密集而低矮,可以提高下垫面粗糙度1~2cm,同时覆盖地表,削弱风沙流,是沙地综合生态效益的指标之一(表2-11)。

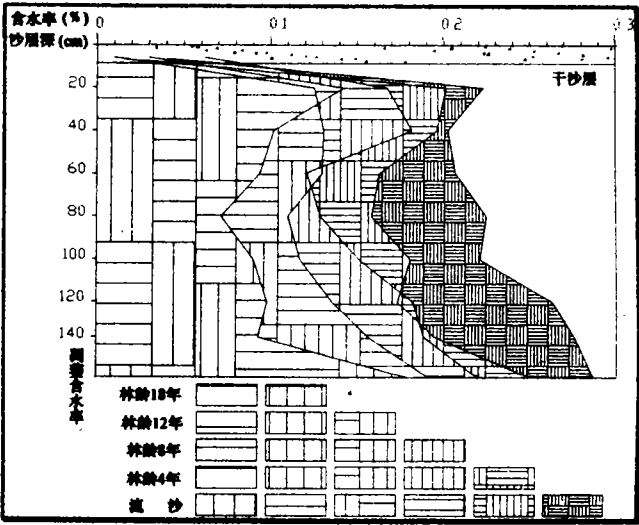


图2 不同阶段的固沙林土壤含水率的比较

表 2-11 固沙林地苔藓植物盖度 单位: %

| 沙丘部位 | 油松 | 花棒 | 紫穗槐 | 踏郎 | 沙柳 |
|------|------|------|------|------|-----|
| 上部 | 36.0 | 40.6 | 73.5 | 37.7 | 无 |
| 中部 | 55.7 | 23.3 | 70.0 | 57.5 | 无 |
| 下部 | 24.0 | 15.2 | 30.0 | 21.3 | 2.0 |
| 平均 | 36.8 | 26.3 | 57.8 | 38.8 | 0.7 |

从上表可以看出,盖度由大到小依次为紫穗槐、踏郎、油松、花棒、沙柳。而且,出现了上、中坡的盖度大于下坡的情况,上坡平均为37.6%,中坡41.3%,下坡仅为18.5%,这是由于微地形作用,前方沙丘造成反向气旋所致。至于盖度状况,基本上和上述近地气层风速及输沙量降低的趋势接近。沙地地表结皮的厚度和苔藓植物成正相关,枯落物的数量随机性较大,此处不再进行分析。

5.2 土壤有机质的测定

土壤有机质含量直接影响着土壤的保墒性、缓冲性、耕性、通气状况和土壤温度,是土壤肥力高低的指标之一(表2-12)。

表 2-12 土壤有机质测定表 单位: %

| 林 地 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 | 对照 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 有 0~10cm | 0.264 | 0.067 | 0.092 | 0.163 | 0.346 | 0.025 |
| 机 10~20cm | 0.045 | 0.030 | 0.040 | 0.083 | 0.302 | 0.004 |
| 质 平 均 | 0.155 | 0.049 | 0.066 | 0.126 | 0.325 | 0.015 |
| 与对照比较增加倍数 | 9.33 | 2.27 | 3.40 | 7.40 | 20.60 | |

从上表可见,沙地土壤有机质含量普遍很低,一般不超过1%,本次测定中,最高者仅为0.324%,即使如此,和流沙对照,也有几倍、几十倍的增加。

5.3 土壤全氮的测定

氮素是植物生命活动过程中必须的大量营养元素之一,土壤及位团聚体中氮素的储量、分

配、存在形式及其调节释供的能力,与植物产量关系密切。林地全氮应作为生态效益指标之一(表 2-13)。

表 2-13 土壤全氮测定表 单位:N%

| 林 地 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 | 对照 |
|-----------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 全 0~10cm | 0.002 | 0.004 | 0.001 | 0.006 | 0.017 | 0.001 |
| 10~20cm | 0.001 | 0.009 | 0.001 | 0.006 | 0.005 | 0.000 |
| 氮 平 均 | 0.0015 | 0.0065 | 0.001 | 0.006 | 0.011 | 0.0005 |
| 与对照比较增加倍数 | 3 | 13 | 20 | 12 | 22 | |

沙地土壤氮素含量是极低的,本次测定结果均低于 0.02。我国东北黑土的含量最高,在 0.15~0.35 之间;黄土高原和黄淮海平原较低,在 0.03~0.099 之间。但林地与流沙地相比,则要高出几倍到几十倍。

5.4 土壤速效磷的测定

植物生长必须的磷,几乎全部由土壤供给,而磷在土壤中的移动性和挥发性小,土壤中的磷素大部分是以迟效性状态存在,而只有速效磷的供应和存在状态才是土壤磷素供应能力的表征。测定表明,固沙林地土壤速效磷的含量也是相当低的一低于土壤有效磷低含量类指标 0.5mg/100g 土。而固沙林对土壤速效磷的改善并不显著(表 2-14)。

表 2-14 土壤速效磷测定表 单位:mg/100g

| 林 地 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 | 对照 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 速 0~10cm | 0.020 | 0.016 | 0.033 | 0.006 | 0.014 | 0.008 |
| 效 10~20cm | 0.031 | 0.008 | 0.013 | 0.022 | 0.006 | 0.012 |
| 磷 平 均 | 0.026 | 0.012 | 0.023 | 0.014 | 0.010 | 0.010 |
| 与对照比较增加倍数 | 1.6 | 0.2 | 1.3 | 0.4 | 0 | |

可以看出,土壤养分状况和植物种枯落物成分具有一致性,豆科植物使土壤全氮增加是沙柳的 4~7 倍,而沙柳使土壤速效磷的增加又是其它豆科植物的 1~8 倍。

5.5 土壤机械组成的测定

土壤颗粒组成及其结构直接影响着土壤液体、气体、固体的组成状况,从而对土壤的排水性、通气性以及保水保肥能力有直接的決定作用。测定表明,除柠条林地外,其它林地砂粒(1.00~0.05mm)含量均大于 70%,按照“我国土壤颗粒组成及质地命名”,属粗砂土类;按照“沙地养分分级”,属贫瘠沙地(表 2-15),肥力特征是,粘粒含量低,胶粒贫乏,吸收性差,自然肥力低。从调查可知,乔木树种在此类立地上生长不良,多呈“小老树”状,而只有在靠近地下水及沙丘背风坡基部立地上,旱柳、杨树等乔木树种才能正常生长。

表 2-15 土壤机械组成测定表 单位:%

| 项 目 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 | 对照 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A 0.5~0.05mm | 81.30 | 84.47 | 83.72 | 73.92 | 45.46 | 69.99 |
| 层 <0.05mm | 0.80 | 1.10 | 0.50 | 0.30 | 1.01 | 0.20 |
| B 0.5~0.05mm | 80.84 | 93.78 | 82.30 | 79.56 | 54.10 | 90.34 |
| 层 <0.05mm | 0.30 | 0.20 | 1.11 | 0.50 | 1.32 | 1.31 |
| 平均 0.5~0.05mm | 81.10 | 89.13 | 83.01 | 76.74 | 49.78 | 80.17 |
| 均 <0.5mm | 0.55 | 0.65 | 1.06 | 0.40 | 1.17 | 0.76 |

固沙林对沙地土壤颗粒组成的改善是一个非常缓慢的过程,不会有短期效果。从表中可见,

20 龄林地,粉粒和粘粒的含量仍然很低,和流沙相比几无大的改观。其原因是沙地的成土过程因风蚀与堆积而很不稳定,加之有机质积累少,缺乏物理粘粒,所以成土作用微弱。在综合生态效益中,土壤机械组成没有比较价值,不必作为一个指标。

6 固沙林对沙地植被的影响和动态

固沙植被的存在是一个动态过程,从植物种的侵入,到定居、竞争、反应,而达到群落和环境的相互作用、相互依赖、相互适应的状态,这就是植被的演替过程。固沙植物作用于环境,反过来环境又作用于固沙植物。和其它任何事物一样,固沙植物也有其发生、发展、衰亡的过程,一种固沙植物的衰亡意味着另一种植物的兴起。由于沙地生境脆弱,固沙林地作用往往带来“质”的影响而加快沙地植被演替的过程。这种动态过程是衡量综合生态效益的主要指标之一。

6.1 固沙林植被演替分析

由于调查区少有人为干扰,而且具有各个林龄段的林分,通过调查不同林龄的固沙林后,计算其重要值,可以得出灌木、半灌木、草本群落的随时间变化的演替过程(图3)。从图中可以看出,人工固沙林介入后,沙地植被的演替过程可以分为如下几个阶段。

(1)天然稀疏草本阶段。本阶段沙地基本上处于流动状态,植物入侵与定居相当困难。人为的干预的根本目的在于改变这种状态,使先锋植物种能够在流沙上站住脚。此前,在天然稀疏草本阶段,只有一些串根草本,如沙竹(*Psammochloa villosa*)和一些短命草本,如沙米(*Agriophyllum sibiricum*)。覆被率很低,为结构简单的,极不稳定的草本群落。

(2)人工灌木固沙林阶段。人工建立固沙林后,改变了地表粗糙度,减弱了近地气层风速,减小了输沙量。据测定,固沙林能使 0.3m 处的风速降低 30%~70%;此外,固沙植物根系发达,

大多数分布在 10~60cm 沙层,根幅很大,沙柳达 10m 以上,紫穗槐 5~6m,柠条可达 12m 以上。因此,从根本上改变了沙地的流动性,为天然植物种的入侵创造了条件。在生境逐渐改善的条件下,半灌木沙蒿,一年生草本植物绵蓬、草木樨、紫云英、冰草等开始侵入并定居,形成了以人工灌木固沙林为建群种,半灌木和草本植物拌生的人工固沙林群落。这个阶段将持续 10 年左右,在此期间,沙丘由流动逐渐向半固定过渡。沙面结皮开始出现。

(3)人工灌木—天然半灌木—天然草本混交阶段。经过上一阶段人工固沙植物群落对环境的改造过程,标志着流沙固定和成土过程开始的沙面结皮已经形成。据测定,15 年左右的固沙林地形成灰褐色结皮,厚度在 0.8cm 左右,基本上控制了风沙流,使沙丘成为固定沙丘。加之小气候和土壤养分状况的改善,林下灌木和草本迅速蔓延,生长旺盛,特别是耐沙埋,种子遇水产生胶质,发芽迅速的半灌木沙蒿,扩展极为迅速,在群落中的优势度明显增加(重要值约 40%以上)。此时,固沙林的郁闭度在 50%~60%。

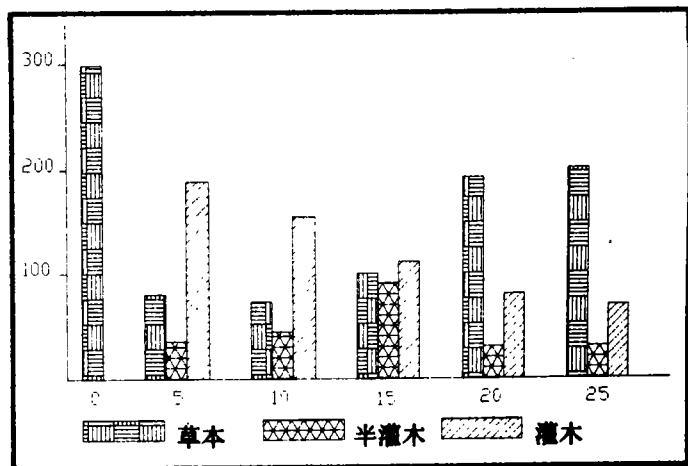


图3 群落重要值变化直方图

群落郁闭度的增加造成沙地土壤水分大量蒸腾消耗,土壤含水率显著下降,这在干旱年份尤为明显。沙地含水率随植被盖度的增加而降低(表 2—16)。

2—16 植被盖度与土壤含水率

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 植被盖度(%) | 0.05 | 0.31 | 0.32 | 0.47 | 0.59 | 0.69 | 0.79 | 0.83 |
| 土壤含水率(%) | 5.2 | 4.3 | 3.8 | 4.0 | 2.9 | 2.1 | 1.7 | 1.1 |

由于水分承载能力下降,导致根系主要分布在 10~60cm 沙层的灌木树种部分死亡,以增加生活植株的吸水面积,此时灌木树种从整体上呈衰退趋势,重要值下降达 32%,而草本植物变化不大。此时草本、半灌木、灌木三者优势程度不相上下。

(4)天然草本优势种阶段。由于半灌木沙蒿的迅速扩展,成为与灌木相抗衡的群落组成部分,但是,优势明显的沙蒿群落很快使土壤坚实化并向淡栗钙土方向发展,促使生境转化得不利于自身。沙蒿是好氧植物,氧气供应减少则不能生长,在非灌木人工生境的自然状态下,非沙质生境或沙地坚实化后也很少有沙蒿分布。因此,这一阶段,沙蒿群丛明显衰退。

经过以上几个阶段的植被演替过程,使植被层次更加复杂,植被盖度增大,沙地成土过程继续深入,并形成了较厚的沙面结皮。据测定,20 年生的沙柳、花棒、紫穗槐林地沙面结皮分别达 13.0mm、12.3mm、11.1mm 厚,其对大气降水截留后蒸发,减少了沙地水分补给,造成灌木、半灌木生根层水分的进一步匮乏,导致灌木、半灌木的进一步衰退,重要值分别降低了 18%和 54%。相反,由于沙面结皮的持水作用,使表土层含水量阵性增加,为浅根性草本植物创造了较优越的条件,使其迅速扩展,重要值上升了 72%,一跃为群落优势种。此时形成的以草本植物为优势种,灌木、半灌木为伴生种的群落和造林前的天然稀疏草本为优势群落相比,具有结构复杂,功能齐全,状态稳定等特点,是个生物进化的飞跃过程。图 4 反映了随着这个进程地上和地下部分的变化过程。

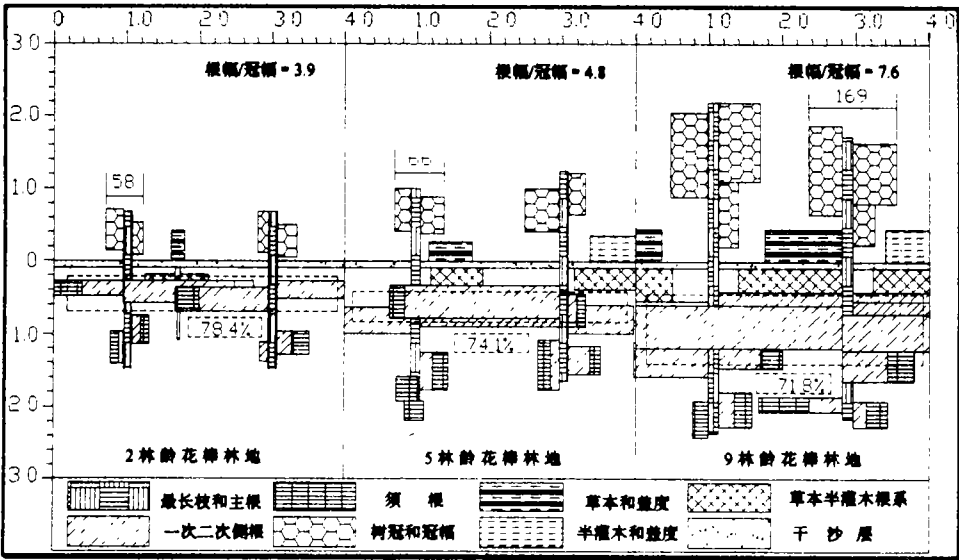


图 4 固沙林植被演替各阶段林地状态图

在人工林的介入下,毛乌素沙地植被,经过天然稀疏草本阶段—人工灌木固沙林阶段—人工、天然林混交阶段—天然草本优势种阶段的演替过程,这是一种在时间上、空间上、功能上的有

序过程,正是固沙林的基本生态效益的所在。

6.2 群落结构分析

(1)群落结构的主成分排序。 对固沙林群落结构进行主成分排序后,发现固沙林明显地分为两个群落类型(图 5),群落 A 包括标准地 4、5、11、15;群落 B 包括标准地 9、10、12、14、16、17、18 构成。从图可见,群落 A 位于 Y2 左边,群落 B 位于 Y2 右边,说明群落 A、B 的划分主要由主分量 Y2 起作用,由因子负荷量计算结果可知,与主成分 Y2 正相关最大的是紫穗槐和柠条,负荷量分别为 0.80、0.68;负相关最大的是沙竹和沙米,负荷量分别是 -0.61、-0.51。说明紫穗槐、柠条与沙竹、沙米一般不会同时出现,他们是划分这两个类型的主要因素。两个群落植物种结构有很大差异(表 2—17)。

可见,沙地植被依环境分为两类,分布在流动沙丘或固定沙丘迎风坡的以踏郎、沙米、沙竹、绵蓬为建群种的群落;分布在固定沙丘底部和丘间地的以紫穗槐、沙蒿、绵蓬为建群种的群落;其它类型处于两类的过渡态。

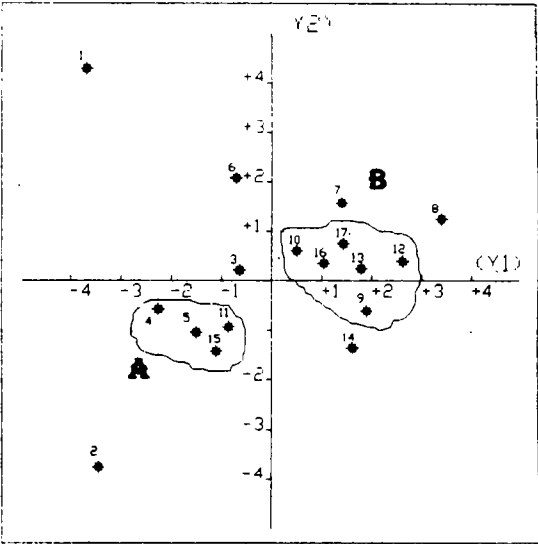


图 5 主成分排序图

(2)主要建群种在植被演替中的作用。 踏郎和紫穗槐是分布于环境梯度两个端点—水分条件差且沙丘流动性大与水分条件好且沙丘流动性小的两种生境,其它植被均处于中间态,而以上两个植物种之所以能够成为群落的建群种,完全是植物与环境的统一。

①踏郎。踏郎是一种适应性强、分枝多、固沙能力强的灌木树种,其显著地特点是根的萌芽力强,主根、侧根、不定根都能萌蘖,以不定根最强,侧根次之,凡根所到的地方都能萌蘖。据调查,3 年生踏郎的直播苗,即开始发出萌蘖苗,5 年后可向四周放射远达 2.5m。因此,踏郎的群体抗风蚀的能力显著,在流动沙丘上较易定居和生长。

踏郎叶片栅栏组织特别发达,为海绵组织的 2 倍,表皮细胞有两层,后壁表皮被毛覆盖,具有典型的旱生解剖构造;对踏郎的含水量、束缚水、束/自等抗旱生理指标测定结果表明,踏郎的抗旱性优于紫穗槐等灌木树种,踏郎喜好通气性良好的疏松沙土或沙质壤土。踏郎的这些生理生态特征是决定它分布的基本原因,使它成为该环境下的适宜种和建群种。由于踏郎和沙竹、沙米等短命植物具有不同的根层分布和相同的流沙适应性,因此,以踏郎为建群种的群落具有结构的合理性和群落的稳定性。

表 2—17 群落类型植物种构成 *

| A | 植物种 | 踏郎 | 沙竹 | 绵蓬 | 沙柳 | 紫穗槐 | 花棒 | 其它 |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 类 | 重要值 | 82.94 | 76.72 | 55.49 | 52.70 | 9.47 | 8.89 | 4.64 9.15 |
| B | 植物种 | 紫穗槐 | 沙蒿 | 绵蓬 | 沙柳 | 花棒 | 针茅 | 柠条 其它 |
| 类 | 重要值 | 62.67 | 60.38 | 39.20 | 24.31 | 23.40 | 22.01 | 16.69 51.34 |

※ 群落 A 分布于流动沙丘和固定沙丘迎风坡,群落 B 分布于丘间地。

② 紫穗槐。紫穗槐是中性树种,在水分条件较好的沙地上生长良好。据测定,紫穗槐 5~8

月水势的均值(−10.0Pa)大于花棒和踏郎(分别为−11.6Pa 和 −10.2Pa),表明紫穗槐吸水能力较弱,抗旱能力较差。紫穗槐的分布和水分供应是正相关的。但紫穗槐叶片较大,枝叶较为繁茂,具有较高的光能利用率,经测定,紫穗槐为 0.079 6,沙柳、花棒、踏郎、柠条分别为 0.050 9、0.040 8、0.036 4、0.020 4,紫穗槐居首;同时,紫穗槐蒸腾量又较低,具有较高的水分利用率。由于其对自然光能和水分的充分有效的利用,使其具有较强的生活力和较高的生产力,据测定,植苗造林的花棒、踏郎的二次根极少,平均 2~4 条,而紫穗槐的二次根为 6.8 条,三次根 17.6 条,在根长 30cm 范围内,花棒、踏郎与紫穗槐根重之比为 1:2 左右[5],茎与叶与根在重量方面存在明显的对数关系。测定结果表明紫穗槐具有较高生产力。因此,在水分条件较好的地段,紫穗槐具有较强竞争力,且与半灌木沙蒿、草本绵蓬等具有不同的根系分布,成为群落的建群种,同样形成结构合理,生态稳定的群落。

6.3 固沙灌木在植被结构中的重要值

重要值反应了种群在群落中重要地位和优势程度,应作为综合生态效益的评价因素之一(表 2-18)。

表 2-18 固沙灌木的重要值

| 树种 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 重要值 | 20.62 | 16.13 | 17.61 | 38.47 | 16.28 |

所测定的固沙灌木在植被结构中的优势程度,以紫穗槐、沙柳较优,而以柠条、花棒、踏郎较差。这个顺序与其光能利用率表现了很好的拟合性。

7 固沙林生态效益指标体系

生态效益指标体系的确定是森林生态效益理论研究的主要内容,也是实现森林生态效益综合、定量评价的基础。因此,固沙林生态效益指标体系的确定,对固沙林生态效益的定量研究具有理论的和实践上的意义。

7.1 指标体系及其权重

根据专家信息和上述研究成果筛选出综合生态效益的指标体系及层次结构如下:

A 固沙林综合生态效益

B1 光能利用率指标

B2 防风固沙效益指标

C1 降低风速 C2 减少输沙量

B3 小气候效应指标

C3 增加空气湿度 C4 调节空气温度 C5 缓和地表、地中温度

B4 水分利用效率指标

B5 改良土壤效益指标

C6 增加土壤地被物 C7 增加土壤有机质含量 C8 增加土壤全氮含量

C9 增加土壤速效磷含量

B6 种的群落优势度指标

采用定性和定量分析相结合^[6],把复杂问题的各种因素按照一定的顺序划分成相互联系的有序层次,使决策者对复杂问题的决策思维过程系统化、模型化、数学化层次分析法^[7、8]来确定固沙林生态效益指标的权重。根据 B 层次各元素间对 A 而言的相对重要性,来构造判断矩阵,其相对重要性的判断值以 1、3、5、7、9 以及它们的倒数来表示。即,1—表示 B_i 与 B_j 同样重要;3—B_i

与 B_j 稍微重要;5— B_i 与 B_j 明显重要;7— B_i 与 B_j 很重要;9— B_i 与 B_j 极端重要。这些数字的倒数表示不同程度的不重要性。

就以上生态效益指标体系的权重,向 25 位知识渊博、经验丰富的有关专家作了专家评分调查,根据调查结果和效益的具体分析,构造出 A—B 判断矩阵如下:

| A | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| B1 | 1 | 1/3 | 7 | 1 | 5 | 3 |
| B2 | 3 | 1 | 9 | 3 | 5 | 5 |
| B3 | 1/7 | 1/9 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1/3 |
| B4 | 1 | 1/3 | 5 | 1 | 3 | 3 |
| B5 | 1/5 | 1/5 | 3 | 1/3 | 1 | 1/3 |
| B6 | 1/3 | 1/5 | 3 | 1/3 | 3 | 1 |

由判断矩阵推算本层次—B 各因素对上一层次—A 的重要性次序,用相对数值的大小一权重来表示。对于 n 阶判断矩阵, B 层 n 个元素对于上一层次中元素 A_k 的相对重要性可用权重向量表示如下式:

由判断短阵推算本层次—B 各因素对上一层次—A 的重要性次序,用相对数值的大小一权重来表示。对于 n 阶判断短阵, B 层 n 个元素对于上一层次中元素 A_k 的相对重要性可用权重向量表示如下式:

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$$

其中, $W_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的大小反应了各因素重要性的相对大小,且 $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ 。W 的计算采用最大特征根法[9]。根据以上判断矩阵算得 B 层各元素对 A 的权重向量为:

$$W = [0.2149, 0.4208, 0.0314, 0.1858, 0.0905]^T$$

同样,可构造出 C 层各元素与 B 层相应元素的判断矩阵如下:

| B2 | C1 | C2 |
|----|----|-----|
| C1 | 1 | 1/3 |
| C2 | 3 | 1 |

| B3 | C3 | C4 | C5 |
|----|-----|-----|----|
| C3 | 1 | 3 | 5 |
| C4 | 1/3 | 1 | 3 |
| C5 | 1/5 | 1/3 | 1 |

| B5 | C6 | C7 | C8 |
|----|-----|-----|----|
| C6 | 1 | 3 | 5 |
| C7 | 1/3 | 1 | 3 |
| C8 | 1/5 | 1/3 | 1 |

求得它们的权重向量分别为:

$$W_{B_2} = [0.250 \ 0, 0.750 \ 0]^T$$

$$W_{B_3} = [0.637 \ 0, 0.258 \ 3, 0.104 \ 7]^T$$

$$W_{B_5} = [0.637 \ 0, 0.258 \ 3, 0.104 \ 7]^T$$

7.2 一致性检验

衡量判断矩阵优劣的标准是看其是否具有-致性,所谓-致性是指如果在 n 阶矩阵 B 中对所有 i, j, k 满足:

$$b_{ij} = \frac{b_{ia}}{b_{ja}}, \text{则称 } B \text{ 为完全一致。}$$

但由于客观事物的复杂性,以及人们认识问题的局限性,要达到完全-致性是困难的。通常采用两个衡量指标:(1)-致性指标 $C \cdot I$

单层次排序:

$$C. I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(2)随机-致性比值 $C \cdot R$

单层次排序:

$$C \cdot R = \frac{C \cdot I}{R \cdot I}$$

其中, $R \cdot I$ 为一系数,可查表求得。

上面 A—B 判断矩阵的最大特征根为 $\lambda_{\max}=6.266\ 637$, B—C 矩阵的最大特征根为 $\lambda_{\max}=3.038\ 511$;当 $n=3$ 和 $n=6$ 时, RI 分别为 0.58 和 1.24。检验结果如下:

| 判断矩阵 | C · I | C · R |
|------|-------|-------|
| A—B | 0.053 | 0.043 |
| B—C | 0.019 | 0.033 |

以上结果均小于 0.10,符合一致性要求,说明判断矩阵比较理想。由此可得,生态效益指标重要值由大到小的次序为:防风固沙效益(0.420 80)、光能利用率(0.214 9)、水分利用效率(0.185 8)、种的群落优势度(0.090 5)、改良土壤效益(0.057 6)、小气候效益(0.031 4)。在防风固沙效益中,降低风速和减小输沙量的权重分别为 0.25 和 0.75;在改良土壤效益中,增加土壤有机质、增加土壤全氮量、增加土壤速效磷三个分指标权重分别为:0.64、0.26 和 0.10;在小气候效益中,增加空气湿度、调节空气温度度和缓和地温的权重也分别为 0.64、0.26 和 0.10。

7.3 数据标准化处理

为了使各指标值能加权相加和便于比较分析,对原始数据进行标准化处理[8],得到无量纲且保持原来信息的标准化数据。标准化处理公式为:

$$X'_{ik} = \frac{X_{ik} - \bar{X}_k}{\delta_k} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad k = 1, 2, \dots, m$$

式中: x_{ik} ——为第 i 个样品第 k 个因子的值; \bar{X}_k ——为第 k 个因子序列的平均值; δ_k ——为第 k 个因子序列的标准差; X'_{ik} ——为经标准化处理后的新序列,其平均值为 0,方差为 1。

7.4 生态效益指数

在指标权重的确定和数据标准化处理的基础上,可以求得各树种生态效益指数的数值,计算公式为:生态效益指数

$$(A) = 0.240\ 8[0.576C1 + 0.25C2] + 0.214\ 9B1 + 0.185\ 8B4 + 0.090\ 5B6 + 0.057[0.637\ 0C6 + 0.258\ 3C7 + 0.104\ 7C8] + 0.031\ 4[0.637\ 0C3 + 0.238\ 3C4 + 0.104\ 7C5]$$

表 2—19 固沙林生态效益原始数据表※

| 指 标 | 沙柳 | 花棒 | 踏郎 | 紫穗槐 | 柠条 | 平均 | 标准差 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 光 能 利 用 率 | 0.0419 | 0.0202 | 0.0396 | 0.0550 | 0.0358 | 0.0385 | 0.0112 |
| 固沙 降低风速 | 0.5 | 0.4 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.52 | 0.0982 |
| 效益 减小输沙 | 96.13 | 93.86 | 98.64 | 96.07 | 9578 | 96.10 | 1.5214 |
| 小气 增加湿度 | 3.75 | 1.88 | 1.75 | 2.30 | 1.80 | 2.296 | 0.7525 |
| 候效 调节气温 | 0.37 | 0.4 | 0.88 | 0.56 | 0.27 | 0.0496 | 0.2134 |
| 应 缓和地温 | 0.20 | 0.81 | 0.31 | 1.50 | 0.79 | 0.722 | 0.4604 |
| 水 分 利 用 率 | 0.0010 | 0.0005 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.00017 |
| 改良 有机质增加 | 9.33 | 2.27 | 3.40 | 7.40 | 20.60 | 8.60 | 6.5281 |
| 土壤 全氮量增加 | 2 | 12 | 1 | 11 | 21 | 9.4 | 7.3376 |
| 效益 速效磷增加 | 1.6 | 0.2 | 1.3 | 0.4 | 0.0 | 0.7 | 0.6325 |
| 种的群落优势度 | 20.62 | 16.13 | 17.61 | 38.47 | 16.28 | 21.822 | 8.4788 |

※单位:减小输沙率——%;小气候效应——℃;改良土壤效益——倍。种的群落优势度用重要值表示;降低风速值用透风系数表示。

以上用层次分析法确定了灌木固沙林生态效益的层次结构和各指标的权重,进而给出

了灌木固沙林生态效益的计算公式,在此基础上,计算了灌木固沙林生态效益指数值。结果表明,紫穗槐、踏郎、沙柳以其较好的防风固沙效益,较高的系统生产力及水分利用效率表现为综合生态效益较好。效益指数分别为 0.61、0.47、0.39。花棒防风固沙效果较差,这是由其近地面层分枝少、透风系数大等因子起作用的;另外,水分消耗量也大,蒸腾系数大 1 094,居于首位,所以其生态效益指数值最低。柠条处于中间状态。需要指出的是,我们讨论的是固沙林的综合生态效益,而不涉及植物种的生态特征,如果从沙生植物的生态适应性,花棒的适生性还要优于其它植物种。花棒与另几种固沙植物混交造林,可以有效地削弱近地气层的上层风速,仍有较高的利用价值,但从固沙的角度看,花棒不宜营造纯林。结合群落格局分析,沙丘迎风坡上、中部以踏郎最佳;丘间地及落沙坡以营造紫穗槐为好;沙柳两处均可,当然,最好和两树种混交造林。这是本区生态效益好,结构稳定的优化模式。

表 2—20 固沙林生态效益标准化数据表

| 指 标 | | 沙 | 柳 | 花 | 棒 | 踏 | 郎 | 紫 | 穗 | 槐 | 柠 | 条 |
|---------|-------|---------|---------|---|---------|---|---------|---|---------|---|---|---|
| 光能利用率 | | 0.3036 | -1.6339 | | 0.0982 | | 1.4732 | | -0.2411 | | | |
| 固沙效益 | 降低风速 | -0.2041 | -1.2245 | | 1.8367 | | -0.2041 | | | | | |
| | 减小输沙 | 0.0297 | -1.4723 | | 1.6695 | | -0.0197 | | -0.2103 | | | |
| 小气\ | 增加温度 | 1.9322 | -0.5528 | | -0.7256 | | 0.0053 | | -0.6591 | | | |
| | 调节气温 | -0.5905 | -0.4499 | | 1.7994 | | 0.2999 | | -1.0590 | | | |
| 候效 | 缓和地温 | -1.1338 | 0.1911 | | -0.8949 | | 1.6898 | | 0.1477 | | | |
| | 应 | 1.3939 | -1.2121 | | -0.9697 | | 0.7879 | | 0.000 | | | |
| 水分利用率 | | 0.1118 | -0.9697 | | -0.7966 | | -0.1838 | | 1.8382 | | | |
| 改良土壤 | 有机质增加 | -0.0085 | 0.3543 | | -1.1448 | | 0.2118 | | 1.5809 | | | |
| | 全氮量增加 | 1.4229 | -0.7905 | | 0.9486 | | -0.4743 | | -1.1067 | | | |
| 速效磷增加 | | -0.1418 | -0.6713 | | -0.4968 | | 1.9635 | | -0.6536 | | | |
| 种的群落优势度 | | | | | | | | | | | | |

其中,A,Bx,Cx 的意义见生态效益结构图。

计算结果由表 2—21 给出。

表 2—21 固沙林生态效益指数表

| 林 种 | 沙 | 柳 | 花 | 棒 | 踏 | 郎 | 紫 | 穗 | 槐 | 柠 | 条 |
|--------|------|-------|---|------|---|------|---|-------|---|---|---|
| 生态效益指标 | 0.39 | -1.33 | | 0.47 | | 0.61 | | -0.04 | | | |

8 结 论

1、由于水分因子的限制,防风固沙林的光能利用率很小。作为重点研究的五种固沙植物光能利用率也有差别,丘间地以紫穗槐和沙柳较高,迎风坡中上部以踏郎最大,除踏郎外,其它灌木在迎风坡中上部的光能利用率均小于丘间地。

2、固沙林能显著降低风速,减小输沙率。降低风速与林冠高及地面草本植物的盖度正相关;而减小输沙率以灌木地表分枝数、草本盖度及密度的“权”为重。营造乔、灌混交林可以兼顾不同近地气层的防风效能。

3、固沙林有改善小气候的作用,形成某些有利于植物生长的因素,但这种作用并不很明显,因此,在衡量固沙林的综合生态效益中,它所占的权重很小。

4、固沙林直接影响着沙地的水动态,固沙植物和沙地水分的平衡处于相互的作用之中,这是发生植被演替的主要动力。沙地对植被具有一定的承载能力,各固沙植物种只能保持一定的密度。对水分平衡动态估算的结果,各植物种理论造林密度为:沙柳 241、花棒 51、踏郎 215、紫穗槐 326、柠条 233 株/亩。

5、由于林木的生物、物理、化学作用,固沙林对沙地土壤具有改良作用,使土壤有机质增加,

养分状况改善,但这是一个非常缓慢的过程,特别是对沙地机械组成的改善。

6、固沙林对沙地生境产生影响的各个因子具有不可替代性,但互相之间产生一定的影响。对固沙林生长发育所需的各种因子,同样适用于“水桶原理”,取决于最短的一块“木板”,也就是制约因素,而这制约因素就是水分。不管其它因子的改良如何优越,因水分不足,植物演替照常要发生。在人工林的影响下,沙地植被向结构复杂、趋于稳态的方向发展:天然稀疏草本阶段—人工灌木林阶段—人工灌木、天然草本混交阶段—天然草本优势种阶段。毛乌素东南部固沙植物依环境梯度明显分为两个群落,即分布于流沙和迎风坡上部的以踏郎、沙竹、沙米为建群种的群落和分布于丘间地的以紫穗槐、沙蒿、绵蓬为建群种的群落。

7、固沙林生态效益指标体系的构成及权重次序如下:防风固沙效益(0.420 8)、光能利用率(0.214 9)、水分利用率(0.185 8)、种的群落优势度(0.090 5)、改良土壤效益(0.057 6)、小气候效益(0.031 4)。其中,防风固沙效益包括减小输沙率(0.75)和降低风速(0.25)两个分指标;改良土壤效益指标包括有机质的增加(0.637 0)、全氮含量增加(0.258 3)和速效磷增加(0.104 7)三个分指标;小气候效益包括增加空气湿度(0.637 0)、缓和空气温度(0.258 3)和缓和地温(0.104 7)三个分指标。以上指标相加,可得固沙林生态效益指数值。

第三部分 农田防护林生态效益研究

农田防护林在毛乌素沙地具有举足轻重的地位,是为农、牧业生产提供基本条件的关键措施。这已被科学研究与生产实践所证明。农田防护林的生态效益随时间和空间的转移具有不同的防风效能,其空间效益状态,在本项研究中由专题报告论述,本部分就农田防护林在时间序列上的观测结果加以分析,即林龄从1年到4年防风效能的增强过程,以补充这方面研究的不足。同时,对林网系统作用下的生态效益和局地防风效能进行评估。

1 观测结构和分析

1.1 林带的防风效能

(1) 防风效能随林龄的变化。在时间序列上研究农田防护林的作用,是本项研究的特点之一,通过对新栽林带连续4年,分春、夏、秋三季的定位观测得出林带时间序列的防护效能值(表3—1)。

表 3—1 防风效能随林龄的变化※

| 时间 | 林龄 (a) | 疏透度 (%) | 林带高度 (m) | 防风效能 (%) | 对照 (m/s) |
|------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1991 | 3 | 80.5 | 3.42 | 9.61 | 6.5 |
| 1992 | 4 | 68.5 | 4.15 | 15.3 | 6.4 |
| 1993 | 5 | 60.7 | 4.67 | 20.45 | 6.8 |
| 1994 | 6 | 55.0 | 5.24 | 27.80 | 7.0 |
| 平均 | 4.5 | 65.2 | 4.37 | 18.29 | 6.68 |

※ 表中数值为十个观测点平均值,以下表同。

降低到55.0%,林带的透风空隙减少,由高度通风型演变为低度通风型。同时,有效防护距离有明显的增加。

(2) 林带防风效能值随季节的变化表(3—2)。树木的季相不同,防风效能差异较大,这是显而易见的。盛叶期的夏季,平均防风效能为19.72%,其次是秋季,而春、冬季为15.59%和15.76%。由此可以分析农田防护林的树种选择标准:应为生长期长,枝叶繁茂的树种。造林方式应采用乔灌混交造林。