煤矸石山刺槐林分生产力及生态效应的研究

胡振琪[1]，张光灿[1,2]，毕银丽[1]，魏忠义[1,3]

（1. 中国矿业大学北京校区，北京 100083；2. 山东农业大学水土保持系，泰安 271018；3. 山西农业大学水土保持系，太谷 030801）

摘要 通过野外实地观测，对煤矸石山 9 年生刺槐林分（株行距 1.5m×2.0m）的生长规律、生产力水平和生态效应及其制约因素进行了研究。结果表明 林分树高、胸径和材积具有不同的生长节律，树高的速生期出现最早，生长高峰出现在 1 年生（年生长量 1.65m），以后逐渐下降 胸径速生期出现在 2～4 年生（年生长量 0.6～1.0cm），4 年生以后便明显下降；材积速生期出现在 3～6 年生（单株材积年生长量 0.001m^3 以上），7 年生以后明显下降。林分胸高直径分布的顶峰极度偏左（偏度 *SK* 达 0.5889），细小林木个体数量偏多，林分密度偏大，应进行间伐调整。刺槐林分具有明显减小煤矸石山渗透速率、提高持水、供水能力的作用，林地植树带初始入渗率为 7.41mm·min^{-1}，稳渗率为 1.75 mm·min^{-1} 而对照坡面初始入渗率高达 13.03 mm·min^{-1}，稳渗率为 2.18 mm·min^{-1}。林分能防止矸石山酸化、增加矸石山全 N 量并促进 N 素的有效化，刺槐林地的 pH 值为 7.68，比裸露矸石山（pH 5.47）高出 34.7% 林地有机质含量为 26.12%，比裸露矸石山（19.20%）高出 36% 全 N 量和速效 N 量分别为 0.33%和 52.95 mg·kg^{-1}，分别比裸露矸石山高出 43.5%和 20.8%。

关键词 煤矸石山 刺槐 林分生产力 生态效应

Stand Productivity and Ecological Effects of Black Locust in a Coal Waste Pile

HU Zhen-Qi[1], ZHANG Guang-Can[1,2], BI Yin-Li[1], WEI Zhong-Yi[1,3] (1. *China University of Mining and Technology, Beijing*, 100083, *China*; 2. *Shandong Agricultural University, Taian*, 271018, *China*; 3. *Shanxi Agricultural University, Taigu*, 030801, *China*). ***Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 621～628.**

Abstract: This paper studied the growth, stand productivity, ecological effects of nine-years-old Black Locust and their limiting factors in Wangzhuan coal waste pile. The results showed that the tree height, diameter at breast height (*DBH*) and timber volume had different growth rhythm: tree height had the earliest fast-growing period, which was in the first year (growth rate is 1.65m per year), the fast-growing period of *DBH* was in the second and fourth years (growth rate is 0.6～1.0cm per year); the fast-growing period of timber production was in the third to sixth years (growth rate is above 0.001m^3 per year) and significantly reduced after 7 years. The peak of *DBH* (average value is 5.27cm) distribution curve leans to left tremendously (*SK* is 0.5889). There were many small trees and their stand density was over dense. So it should be adjusted by thin-cutting. Since successful revegetation of the pile, properties of the "soil" in the pile such as infiltration and water-holding capacity were improved, i.e., slowing down infiltration rate and increasing water-holding capacity. The initial infiltration rate of planting strip was 7.41mm·min^{-1} and the steady infiltration rate was 1.75mm·min^{-1}; while the initial infiltration rate of control plots was 13.03mm·min^{-1} and the steady infiltration rate was 2.18mm·min^{-1}. The good stand productivity of locust woodland in the pile could also prevent acidification of coal waste piles and increase the quantity of total N and plant-available N. The pH of Locust woodland in the pile (7.68) was higher than that of the bare parts (5.47). The organic matter of the revegetated areas (26.12%) was 36% higher than

基金项目 国家自然科学基金资助项目（40071045，49701010）；潞安矿务局王庄矿和教育部跨世纪优秀人才计划资助项目

收稿日期：2001-05-15；**修订日期**：2001-10-10

作者简介 胡振琪（1963－），男，安徽嘉山县人，博士，教授。主要从事土地复垦与生态重建方面的研究。E-mail：huzq@cumtb.edu.cn

万方数据

that of bare areas (19.20%). Total N and available N content in Locust woodland (0.33% and 52.95 mg·kg^{-1}) was 43.5% and 20.8% higher than that of bare areas respectively.

Key words: coal waste piles; black locust; stand productivity; ecological effects
文章编号:1000-0933(2002)05-0621-08 **中图分类号**:Q948,S718.5 **文献标识码**:A

矿区土地复垦是在国际上备受关注的研究领域,也是退化生态系统与恢复生态学研究的重要内容之一[1,2],尽可能减少对土地的破坏和尽快进行植被重建是矿区生态恢复的最佳策略[3,4]。煤矿开采对土地的破坏类型一般有塌陷地、挖损地和占压地 3 种基本形式,与国外相比,我国煤矿区土地资源破坏严重,复垦利用率低只有 10 %左右,而一些发达国家的土地复垦率在 65%以上,美国已达到 80%[5,6],所以,我国的矿区废弃土地复垦研究工作非常迫切;另外,在土地复垦的目标和措施上,发达国家以恢复生态环境和工程措施为主,中国则侧重于对土地因地制宜的合理利用和生物措施[7]。

煤矸石是井工开采和洗煤排放的废弃物,迄今为止,将其作为建筑和工业原料的直接利用率不到 20%[6,8],大量煤矸石不断堆积形成矸石山。全国现有矸石山 1500 多座,占地约 10000hm^2,不仅直接占压土地,使原有土地失去利用价值,更主要的是通过扬尘、自燃、雨水淋溶等方式导致严重的土地、水体、空气和景观污染[6,9~11]。目前,虽有一些在煤矸石种植农作物和牧草的报道[12,13],但由于重金属污染问题,难以用作农牧业用地。而对煤矸石山实施林业复垦,进行造林绿化,恢复植被,建立起稳定的人工植物群落是煤矸石山治理根本途径和煤矿区生态重建的前提与核心[2,14]。但至目前为止,尽管全国已有十几座煤矸石山得到绿化,取得了初步成效并积累了一定的实践经验。但对煤矸石山植被恢复的一些理论及技术问题还远远没有解决,不能满足生产实践的要求。如煤矸石山的立地评价、适生的植物种类选择、植物种群的合理组成及结构、植物种群的生态效益计量与评价等均缺乏必要的研究。

刺槐(*Robinia poseudacacia* L.)具有生长迅速、适应性强、耐干旱瘠薄、改良土壤能力较强等优良特性,是矿业废弃地林业复垦的主要先锋造林树种之一。目前,虽然对刺槐在煤矸石山的造林技术、成活及生长状况有些报道[10,15,16],但由于受研究材料所限,其研究多集中于幼林,而对成林期林分的生产力水平及生态效益问题尚未见报道。本文以山西潞安矿务局王庄煤矿矸石山 9 年生刺槐试验林分为对象,对其生长规律、生产力水平和生态效应及其制约因素进行研究,对其合理的群体结构问题进行探讨,旨在为矸石山建立刺槐造林和营林的科学模式提供试验及技术依据。

1 试验地概况

1.1 立地条件

王庄矿地处黄土高原东南部的丘陵沟壑区,温带大陆性气候。年均温为 9.5℃,极端最高温 37.8℃,极端最低温为 -25.3℃,无霜期为 148d;年降水量 678.65mm,多集中在夏季(6~9 月份),占全年降雨量的 57%;年降雪量为 30.3mm,占全年降水量的 4.5%。造林绿化前,矸石山高差为 60m,坡度达 2138°;其结构松散,粒径级配中,80%以上是粒径大于 1mm 的石砾或石块;孔性差,非连续的缝隙和空洞多,孔隙少(总孔隙度 24%27%),田间持水量在 7%11%之间,平均值为 8.92%;煤矸石的 pH 值大多在 7.3 左右,有机质和全氮量丰富,分别是 113.5g.kg^{-1}和 2.16 g·kg^{-1},速效氮、磷、钾相对缺乏,分别为 42mg·kg^{-1}、3.1 mg·kg^{-1}、97.4 mg·kg^{-1}。

1.2 试验林分

所调查的刺槐林分于 1990 年利用植苗截干造林方法营造,坡向为西南坡,林分密度为 1.5m×2m。9 年生林分平均胸径为 5.27cm,平均树高为 5.15m,平均冠幅东西向为 3.3m,南北向为 2.4m,枝下高 1.1m,平均单株叶面积 13.11m^2,叶面积指数为 4.37,冠层叶面积密度为 1.38m^2·m^{-3}。

2 研究内容及方法

2.1 林木生长调查

采用标准地法,在林分中选取有代表性地段建立标准地,面积为约 667m^2,林木株数约 445 株;对标准地内所有林木进行每木检尺,分别测定树高、胸径、冠幅及枝下高等;按上述测定指标平均值找出标准木,

万方数据

伐倒后分别称其叶、枝、干的鲜重,测定鲜重生物量;分别取一定重量的干、枝、叶样品将其烘干后称重,求出含水率,计算林木的干重生物量。

利用方格法求算单位重量叶片的叶面积,用称重法推算平均木叶面积。对标准木进行树干解析,计算树高、胸径及材积年生长量,研究其生长动态过程。

2.2　林木直径分布规律

按数理统计原理,将胸径(DBH,简称 D)作为随机变量,利用 SPSS[17] 对其进行描述性统计分析,分别求出偏度系数(SK)、峰度系数(K)和整齐度(R),分析林木直径分布规律[18]。

2.3　土壤水文效应——入渗性能

环刀法测定矸石山入渗过程。采用单环定水头逐次加水法测定不同时间的入渗速率。将环刀插入矸石层 20cm 深,环口留有 5cm 高的空间。每次加入一定水头高度的清水后,记录入渗时间,等连续 3 次入渗所用时间基本相同时,表明已达矸石山的稳渗速率(渗透系数),观测结束。入渗速率用下式计算:

入渗速率($mm \cdot min^{-1}$) = 水头高度(mm)/入渗时间(min)

表 1　煤矸石山 9 年生刺槐单株及林分生物量(地上部分)

Table 1　Biomass of locust stand in 9 years old of coal waste piles

树体器官 Tree body	单株 Individual(kg)		林分 Stand($kg \cdot hm^{-2}$)	
	生物量鲜重 Fresh weight	生物量干重 Dry weight	生物量鲜重 Fresh weight	生物量干重 Fresh weight
主干 Trunk	4.816	3.283	16050.062	10942.932
侧枝 Brunch	2.215	1.422	7382.595	4740.364
叶 Leaves	1.610	0.727	5366.130	2421.734
合计 Total	8.641	5.432	28798.787	18105.031

2.4　土壤改良效应

分别在矸石山的上、中、下坡,选取有代表性的样地挖取 60cm 深的土壤剖面,分 3 层样品,带回室内进行化学分析。

3　结果及分析

3.1　林分生长规律

3.1.1　林分生物量　由表 1 中可以看出:刺槐 9 年生单株平均生物量达 8.641kg,每公顷生物量达 28.7988t。这一结果与黄土区同林龄、同密度刺槐林分的生物量(单株 8.70kg)基本接近[19]。

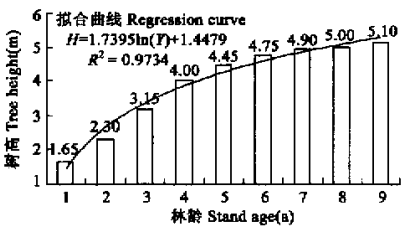


图 1　煤矸石山刺槐林分不同林龄树高平均值

Fig. 1　The tree height of Locust stand in different stand age

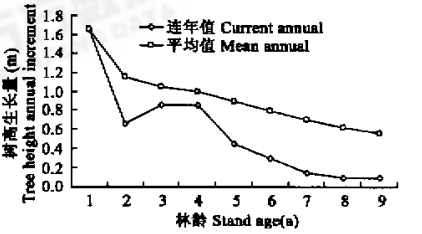


图 2　煤矸石山 9 年生刺槐林分树高生长过程

Fig. 2　Growing process of tree height in 9-years-old Locust

3.1.2　树高生长规律　结果(见图 1 和图 2)表明,刺槐林分树高生长节律曲线符合对数规律,拟合方程为:$H = 1.7395\ln(Y) + 1.4479$($D$ 为树高;Y 为林龄),树高生长随林龄增长的变率为:$dH/dY = 1.7395Y^{-1}$。可以看出 在 1～4 年生时树高生长较快,以后生长速度逐渐减缓,例如第 1、第 2 年的连年生长量分别为 1.65m 和 0.65m,增长变率为 1.74 和 0.87,而在 8 年生时的连年生长量只有 0.10m,增长变率下降为 0.22。从第 1 年生起,树高连年生长量一直小于平均生长量,并呈连续下降的趋势。

3.1.3　胸径生长规律　刺槐胸径生长的测定分析结果(图 3 和图 4)表明,胸径生长节律符合对数规律,生长模型为:$D = 1.759\ln(Y) + 0.1646$(D 为林木胸高直径;Y 为林龄);胸径增长的变率(胸径增长随林龄

万方数据

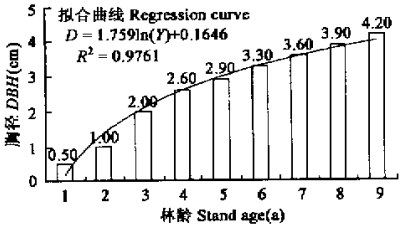


图 3 矸石山刺槐林分不同林龄胸径平均值

Fig. 3 The tree *DBH* of Locust in different stand age

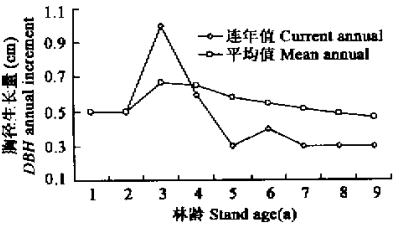


图 4 矸石山 9 年生刺槐林木胸径生长过程

Fig. 4 Tree *DBH* growing process of Locust in 9-years-old

变化的速率)为 :$dD/dY = 1.759\,Y^{-1}$。

可以看出 :在 1～4 年生时,林木胸径增长较快(第 3 年生的连年生长量最大,为 1.0cm),但 4 年生后变缓。其增长变率在 4 年生后急骤下降并逐渐趋向于稳定 :刺槐胸径连年生长量在 1～4 年时大于平均生长量,从第 5 年生开始急骤下降,并小于平均生长量,维持在 0.3cm 左右。

3.1.4 林木材积生长规律 单株材积研究结果见图 5 和图 6。由图 5 可以看出,刺槐单株材积随林龄的变化呈二次抛物线规律。单株材积与林龄的关系模型为 :$V = -2\times10^{-6}Y^2 + 0.001\,Y - 0.0001$($V$ 为林木单株材积,Y 为林龄) ;单株材积增长变率(材积随林龄增加的变率)为 :$dV/dY = -4\times10^{-6}\,Y + 0.001$。即单株材积与林龄呈明显正相关,随林龄增加,立木材积明显增加,但增加速率以每年 $4\times10^{-6}m^3$ 的速率递减。

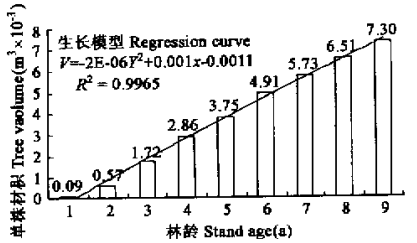


图 5 煤矸石山不同林龄刺槐平均单株材积

Fig. 5 The tree volume of Locust stand in different age

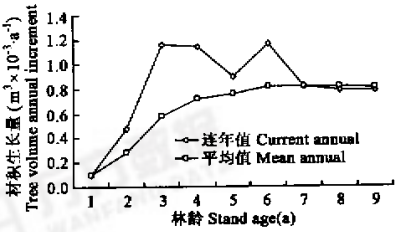


图 6 煤矸石山刺槐林分平均单株材积生长过程

Fig. 6 Tree volume growing process of Locust in 9-years-old

由图 6 可以看出 :单株材积连年生长量在 7 年生以前大于平均生长量,而在 7 年生以后小于平均增长量(两条曲线相交于 7 年生)。材积生长的速生期在 36 年生。一般认为,材积连年生长曲线和平均生长曲线相交的年份为林分的数量成熟年龄,是林分衰老和生产力下降的标志,应实施采伐[18]。

3.2 林木株数按径级分布的规律

图 7 是煤矸石山 9 年生刺槐林分胸高直径的株数分布图型,可以看出 :直径分布的顶峰极度偏左,表明细小林木个体(小于平均胸径)数量偏多。

以各林木胸径为自变量,经过统计分析得出描述林木直径分布特征的参数,偏度系数(SK)为 0.5889,峭度系数(K)为 -0.6880,整齐度(R)为 3.5549。SK 越接近 0(生态分布),表明直径分布越合理(接近正态分布) ;K 越大,说明集中于平均直径附近的林木株数越多 ;而 R 越大,意味着林木生长越整齐(分化越小)。具有上述直径分布特点的林分密度越趋向于合理。

万方数据

3.3 刺槐林分生态效应

3.3.1 土壤层水文作用 矸石山由于结构性差，大孔隙多，毛管孔隙少，土壤保水保肥能力极差而渗透速率过高，虽然不易产生地表径流，但易导致土壤的垂直侵蚀(即养分的淋溶损失和水分的渗漏损失)，影响植被生长。所以，与其他立地条件不同，煤矸石山植被土壤水文效应的重点是通过植被改良土壤的作用，减少大孔隙(非毛管孔隙)和增加毛管孔隙、提高土壤持水量和保肥能力、减少渗透速率。

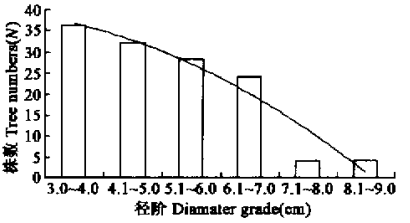


图 7 煤矸石山 9 年生刺槐林分林木直径分布规律

Fig. 7 The *DBH* distribution of Locust stand in 9-years-old

表 2 煤矸石山刺槐林地土壤渗透特征

Table 2 Infiltration of locust woodland in coal waste piles

测位 Site	初渗率 Initial infiltration rate($mm \cdot min^{-1}$)	稳渗率 Steady infiltration rate($mm \cdot min^{-1}$)	下渗容量模型 Model of infiltration capacity	累计入渗模型 Model of accumulative infiltration
植树带 Planting strip	7.41	1.75	$i=8.9304\ t^{-0.3716}$	$I=6.7787\ t^{0.4324}$
对照 Control plot	13.03	2.18	$i=14.483\ t^{-0.4626}$	$I=12.229\ t^{0.3509}$

表 2、图 8 和图 9 是对刺槐林地土壤入渗性能的观测结果。可以明显看出：

(1) 刺槐林具有明显减少矸石山土壤渗透速率的作用，尤其在土壤初始入渗阶段更加明显。例如，刺槐植树带初始入渗率为 7.41mm·min^{-1}，稳渗率为 1.75 mm·min^{-1}；而坡面初始入渗率高达 13.03 mm·min^{-1}，稳渗率为 2.18 mm·min^{-1}。

(2) 各测位土壤入渗率随时间变化呈幂函数递减，但植树带入渗速率的衰减指数小于坡面入渗速率的衰减指数。各测位土壤累计入渗量随时间的变化呈幂函数增加，但植树带入渗量增加指数大于坡面入渗量增加指数。

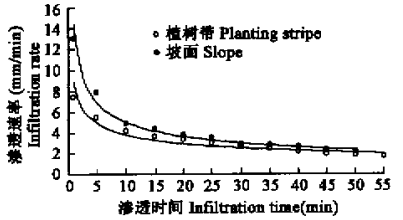


图 8 煤矸山 9 年生刺槐林地土壤渗透速率

Fig. 8 Soil infiltration rate of Locust woodland in coal waste pile

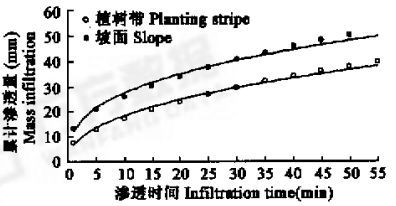


图 9 煤矸山 9 年生刺槐林地土壤累积入渗过程

Fig. 9 Soil mass infiltration of Locust woodland in coal waste pile

上述函数关系的通式可表示为：$i(I)=at^b$(见表 2) 式中，i 为入渗率($mm \cdot min^{-1}$)，I 为入渗量(mm)，t 为入渗时间(min)。

造林前煤矸石山的入渗量随时间的变化呈线性增加[16]，即入渗率为不随入渗时间变化的常数。本研究结果表明了造林 9 年后，煤矸石山 的入渗特征有了很大变化，入渗速率随入渗时间的增加而减小，提高了煤矸石山的持水、保肥能力。

3.4 土壤改良效应

对刺槐林地和未造林矸石山土壤(煤矸石风化物)主要营养成分的测定结果见表 3，可以看出，刺槐林矸石山养分含量和裸露矸石山有明显不同。

(1) pH 值 新煤矸石的 pH 一般是中性偏碱，因混有硫铁矿石(主要是 FeS_2)，在大气中暴露后酸化，使

万方数据

pH 值降低。由表 3 可知,裸露矸石山的 pH 值为 5.7,而刺槐林地的 pH 为 7.68,表明矸石山刺槐林分具有防止地表物质酸化的作用。

(2)有机质 有机质是土壤肥力的重要标志,分析结果表明,刺槐林地有机质含量比裸露矸石山高出 36%,明显提高了矸石山的有机质含量。

(3)全 N 和速效 N 刺槐是豆科植物,具有固氮作用,刺槐林地全 N 量和速效 N 量分别比裸露矸石山高出 43.5%和 20.8%,说明矸石山刺槐林分可以增加全氮量并促进氮素的有效化。

(4)P 和 K 刺槐林地的速效 K 比裸露矸石山高出 64.4%,但全 P 和全 K 量分别比裸露矸石山低 45.1%和 31.9%,表明矸石山刺槐林分具有促进养分有效化的作用,但由于林木生长吸收,使 P 和 K 含量减少。

表 3 9 年生刺槐林地 0~60cm 矸石层营养成分测定结果

Table 3 Soil nutrition of locust stands in 9-year-old coal waste piles

样点 Site	坡位 Position of slope	pH 值 pH	有机质 Organic matter(%)	全量 Total (%)			速效 Available (mg·kg^{-1})		
				N	P	K	N	P	K
矸石山 Coal waste pile	上坡 Top	4.51	10.70	0.29	1.08	0.97	41.70	3.43	60.06
	中坡 Middle	6.07	13.33	0.16	1.29	1.12	31.60	1.95	65.48
	下坡 Bottom	5.85	33.56	0.25	1.37	0.66	58.21	3.37	54.40
	平均值 Average	5.47	19.20	0.23	1.25	0.91	43.84	2.92	59.98
刺槐林地 Woodland	上坡 Top	7.61	13.49	0.24	0.89	0.84	55.05	2.93	114.98
	中坡 Middle	7.09	55.55	0.60	0.82	0.47	78.67	2.25	90.51
	下坡 Bottom	8.35	9.31	0.15	0.85	0.75	25.14	2.45	90.20
	平均值 Average	7.68	26.12	0.33	0.85	0.69	52.95	2.55	98.56

4 讨论

刺槐是抗性强,适应性广,生长迅速,速生期长,林分生产力较高的树种[20、27],但对结果的分析认为,所研究的煤矸石山刺槐林分,生长受到较大抑制,没有发挥出生产潜力,其原因可能有水分或养分等立地因子的限制,也与林分密度不合理有关。

4.1 林分树高生长规律

已有的研究[20、27]表明,刺槐高生长的速生期一般在 5 年生之前,而且持续时间短,只有 3~4a 速生期后生长量很快下降,连年生长量低于平均生长量,10 年生后连年生长量大都在 0.3~0.4m。矸石山刺槐生长过程基本符合上述节律 (图 1 和图 2),但从 1 年生起,树高连年生长量便小于平均生长量,并呈连续下降的趋势,6 年生以后低于 0.15m (只有正常生长量的 37.5%~50%),表明刺槐树高生长受到较大抑制。林分平均树高或优势木树高的生长受诸多因子的影响,其中对立地条件的变化反映最为敏感,而与密度因素关系不大[18]。所以煤矸石山虽然适合刺槐生长,但由于立地环境 (尤其是土壤条件)的限制,难以发挥树高生长潜力。

4.2 胸径生长及分布规律

林木胸径生长既受立地环境影响,又与林分结构(尤其是密度)因素有密切关系。在相同立地条件下,胸径生长节律常常反映出林分密度适宜程度的大小[18]。在水肥条件较好的立地上,刺槐正常生长时,胸径生长量在 0.9~2.7cm 之间,速生期持续时间长[20、27];本研究(图 3、图 4)结果是刺槐速生期出现在 1~4 年生 (最大平均生长量为 0.67cm,只有正常生长量的 25%~67%),但 4 年生后变缓;胸径连年生长量在 1~4a 时大于平均生长量,但从 5 年生开始小于平均生长量,并急骤下降,维持在 0.3cm 左右,表明胸径生长受到较大抑制。其原因除了立地条件 (水分或养分缺乏) 限制外,林木直径分布规律的结果 (图 7) 表明,林分密度偏高也是重要原因。

依据造林学理论[18],林木个体大小数量的分布,能反映林分生长状况、林木之间的竞争关系和林分密度的状况。常运用株数按径阶分布的偏态类型,检验林分密度的适宜状态,作为调整林分密度的依

据[22、23]。在密度适中、生长正常的年龄阶段内,林木株数按径级的分布状况,都呈正态分布或近似于正态分布曲线,但当林分密度高,细小个体占林木的多数时,胸高直径的株数分布呈顶峰偏左的曲线类型。而且这种株数按径阶分布的规律,同树种、地位级无关,同林分的年龄有一定关系[18]。具有合理密度的林分,直径分布的偏度系数(SK)在 $-0.300.3$ 之间,峰度系数(SK)在 -0.5 以上,整齐度(R)在 6.0 以上;SK 越接近 0(生态分布),直径分布越合理(接近正态分布),K 越大,集中于平均直径附近的林木株数越多,整齐度越大,林木生长越整齐(分化越小),林分密度越趋向于合理[22、23]。从本研究的结果看,直径分布的顶峰极度偏左(图 7),直径分布的特征参数 SK 为 0.5889,K 为 -0.6880,整齐度 R 为 3.5549。显然,煤矸石山刺槐林分的直径分布与上述理想的特征值相比,还有较大差距,原因是密度偏大,导致细小林木个体数量偏多,林木个体生长受到严重制约,群体生产力下降。

4.3　林木材积生长规律

在较好的立地上,正常生长的刺槐林分,材积速生期大都出现在 15～20 年生以后,数量成熟年龄达 36a 以上 即使在较差的立地上,材积速生期大都在 6～15 年生,数量成熟龄出现在 10～15 年生[20、27]。而本研究结果 (图 5、图 6) 是材积速生期出现在 3～6 年生,7 年生时便达到数量成熟,表明刺槐的生长和生产力水平受到抑制,材积生长量提前下降,没能发挥出刺槐的生产潜力。林分单株材积和蓄积量是目前衡量林分生产力水平和生长效应的标准之一,其增长是随林分树高、胸径的生长并受到林分密度所控制的一种动态生产过程,影响这一过程的因素中,立地环境是第一位的,密度因素是第二位的[18、21]。

4.4　煤矸石山刺槐生长的限制因子及林分密度问题

上述讨论表明煤矸石山刺槐林分的生长生产力水平受到较大抑制,其原因是水分或养分等立地因子的限制和林分密度偏大共同作用的结果。需要改善林地条件和密度状况才能进一步发挥其生长和生产潜力。关于矸石山养分水平的研究结论并不一致,有的研究认为风化后矸石山缺乏有效氮,应施用氮肥[28],而有研究认为煤矸石山风化后的养分高于一般山地,有利于植被恢复[29] 本研究的结果与后者相似 (见表 3),而且,刺槐是固氮树种,有增加全氮量并促进氮素的有效化的功能,所以,限制煤矸石山刺槐生长的主导因子的不是养分因子,而是水分条件,尤其是在干旱半干旱地区更为突出 已有的研究也表明干旱缺水是影响煤矸石山植物生长的主导因子[24、25]。

另一方面,从中国国情出发,由于经济和技术原因,笔者认为对煤矸石山进行较大规模立地改良的措施并不现实,而对林分进行密度调控,使林分达到最佳的生长状态才是可行的技术措施。但问题是,目前关于煤矸石山林分适宜密度的研究还未见报道,本试验地也没有更多的密度试验材料,很难说明适宜的密度应是多少,这是煤矸石山植被恢复今后需要研究的重要问题。

参考文献

[1] Bai Z K(白中科), Zhao J K(赵景逵), Li J C(李晋川), *et al*. Ecosystem damage in a large opencast coal mine－A case study on Pingshuo surface coal mine, China. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报),1999,**19**(6):870～875.

[2] Peng S L(彭少麟). Restoration ecology and vegetation reconstruction. *Ecologic science* (in Chinese)(生态科学),1996,**15**(2):26～31.

[3] Jajer D A. Bioremediation of agricultural and forestry soil with symbiotic microorganisms. *Aust J Soil Res*., 1994,**32**:1301～1319.

[4] Wei C Y(韦朝阳), Zhang L C(张立城), He S J(何书金). A discussion on the eco-environmental conditions in the coal mining areas in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese)(地理学报), 1997,**52**(4):300～307.

[5] He S J(何书金), Guo H C(郭焕成), Wei C Y(韦朝阳), *et al*. A study on the restoration in coal mining fields in China. *Geographical Research* (in Chinese)(地理研究), 1996, **15**(3):23～32.

[6] Su G Q(苏光全), He S (何书金), Guo H C(郭焕成). Suitability Assessment on The Waste Land Resources of China's Mining Areas. *Progress in Geography* (in Chinese)(地理科学进展), 1998,**17**(4):39～46.

[7] Bian Z F(卞正富). View on the land reclamation in mining areas. *China Land Science* (in Chinese)(中国土地科学), 2000,**14**(1):6～11.

万方数据

[8] Wand X B(王孝本), Lin Y L(林玉利). Ecological succession of the waste rock heap of a coal mine. *Territory & Natural Resources Study*(in Chinese)(国土与自然资源研究), 2000, (1): 44～45.

[9] Gao B Y(高宝玉), Gao G X(高国雄), Zhu S J(朱首军). Microclimatic effect of sand obstruct comprised of gangue. *Journal of Shanxi Normal University*(in Chinese)(陕西师范大学学报), 1999, **27**(Sup.): 159～163.

[10] Hu Z Q(胡振琪). Afforestation of waste coal pile in semi-arid areas. *Journal of China Coal Society* (in Chinese)(煤炭学报), 1995, **20**(3): 322～327.

[11] Guo X J(郭小娟), Jia P(贾萍), Liu X(刘霞). Environmental problem of coal refuse piles and its control. *Journal of Shanxi Agricultural University*(in Chinese)(山西农业大学学报), 1998, **18**(2): 139～141.

[12] Feng J S(冯金生), Fan J E(范俊娥), Zhao J K(赵景逵), *et al*. The research on reclamation of planting gress on the coal gobs in Yangquan. *Journal Shanxi Agricultural University*(in Chinese)(山西农业大学学报), 1995, **15**(4): 370～374.

[13] Hong J P(洪坚平), Xie Y H(谢英荷), Lin D Y(林大仪), *et al*. The roles green forage grass in the improvement of ecological environment of coal gangue hills. *Rural Eco-environment*(in Chinese)(农村生态环境), 1996, **12**(4): 55～57,62.

[14] Li W Y(李文银), Zhang Z G(张治国), Cai J Q(蔡继清) ed. Soil and water conservation of mining areas(in Chinese). BeiJing: Science Press, 1996. 145～160.

[15] Zhou S L(周树理), Leng G Y(冷国友), Han X R(韩修荣), *et al*. Study on reclamation afforestation and its environmental evaluation in waste coal piles. In: Zhou S L(周树理) ed. *Reclamation and afforestation of wasteland in mining areas*(in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1995. 112～117.

[16] Hu Z Q. Impact of coal waste piles on environment and their afforestation techniques in China, in the proceedings of 9th international conference on coal science, September 7～12 1997 Essen, Germany.

[17] Hong N (洪楠) ed. *Statistics and analysis tutorial of SPSS for Windows*(in Chinese). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 91～98.

[18] Sun S X(孙时轩) ed. Silviculture (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1990. 248～258.

[19] Wang B R(王斌瑞), Wang B T (王百田) ed. *Runoff Forestry on the Loess Plateau*(in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1996. 155～162.

[20] Forestry research institute of Shandong (山东林业研究所) ed. *Black Locust* (in Chinese). Beijing: Agriculture Publishing House, 1974. 81～101.

[21] Sun L D(孙立达), Zhu J Z (朱金兆) ed. *Study and evaluation of comprehensive effects on soil and water forest system*(in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1995.

[22] Huang W D(黄文丁), Zhang L J(张立均). Diameter distribution dynamics of stands in agroforestry system. *Journal of Nanjing Forestry University* (in Chinese)(南京林业大学学报), 1989, (4): 86～91.

[23] Zhang G C(张光灿), Liang Y T(梁玉堂), Long Z R(龙庄如). Study on suitable stand density of Black Locust clone. *Journal of Shandong Agricultural University*(in Chinese) (山东农业大学学报), 1999, (Supp.): 118～128.

[24] Duan Y H(段永红), Zhao J K(赵景逵). Moisture status in waste coal piles and its measure method. In: Zhou S L(周树理) ed. *Reclamation and afforestation of wasteland in mining areas* (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1995. 40～44.

[25] Hu Z Q(胡振琪), Li Y(李毅), Li J M(李金明). Moisture characteristics of waste coal piles and its effect on afforestation. In: Zhou S L(周树理) ed. *Reclamation and afforestation of wasteland in mining areas*(in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1995. 50～54.

[26] Wu Z Z(吴增志), Yang R G(杨瑞国), Wang W Q(王文全) ed. *Reasonable density of plant population* (in Chinese). Publishing House of China Agricultural University, 1996. 1～22.

[27] China Forestry Association (中国林学会) ed. *Afforestation technology of main tree species in China* (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1983. 631～635.

[28] Wang Y Q(王有栓), Feng J S(冯金生), Jia P(贾平). Study on reclamation planting in coal waste piles. In: Zhou S L(周树理) ed. *Reclamation and afforestation of wasteland in mining areas* (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1995. 137～148.

[29] Lin Y(林鹰). Study on reclamation technology with afforestation in coal waste piles. In: Zhou S L(周树理) ed. *Reclamation and afforestation of wasteland in mining areas*(in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1995. 157～162.

万方数据