DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.06.015

林分密度对毛乌素沙地樟子松人工林林分结构和林下植被的影响

代青格乐[1]，赵国平[2]，王新星[1]，邓继峰[1]，丁国栋[1]，赵媛媛[1]，毛振华[3]

（1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室，北京 100083；
2. 陕西省治沙研究所，陕西 榆林 719000；3. 内蒙古鄂尔多斯市水土保持工作站，内蒙古 鄂尔多斯 017000）

摘　要：[目的] 研究不同密度下，樟子松人工林林分结构和林下物种多样性的变化，以期为毛乌素沙地以樟子松为建群种的植物固沙模式提供理论依据。[方法] 以毛乌素沙地榆林地区 5 种不同密度 25 a 生樟子松人工林为研究对象，采用样方调查和测试分析法，探究樟子松人工林林分结构和林下物种多样性随林分密度的变化特征。[结果] 樟子松人工林密度与平均胸径呈幂函数递减关系，与高径比呈显著的线性正相关关系。樟子松人工林林下共出现植物 8 科 13 属 16 种。草本以禾本科的狗尾草为优势种，草本丰富度、多样性指数随着密度的不断减小，表现出明显的增加趋势。林分密度与物种丰富度指数、多样性指数呈显著的负相关关系，Shannon 多样性指数对密度变化最为敏感。[结论] 毛乌素沙地樟子松人工林的林分密度与林分结构、林下物种多样性的相关关系十分显著，可以将林下物种多样性指数作为衡量林分密度是否合理的参考指标。

关键词：毛乌素沙地；樟子松；林分密度；种群结构；物种多样性

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2015)06-0086-06　　**中图分类号**：Q948

Effects of Stand Density on Stand Structure and Understory Vegetation of *Pinus Sylvestris* Plantations in Mu Us Sandland

Daiqing Gele[1], ZHAO Guoping[2], WANG Xinxing[1], DENG Jifeng[1],
DING Guodong[1], ZHAO Yuanyuan[1], MAO Zhenhua[3]

(1. *School of Soil & Water Conservation, Key Lab of Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2. *Desert Control Research Institute of Shaanxi Province, Yulin, Shaanxi* 719000, *China*; 3. *Ordos Soil & Water Conservation Station, Ordos, Inner Mongolia* 017000, *China*)

Abstract: [Objective] *Pinus sylvestris* is considered to be one of the preferred coniferous species in the Mu Us sandland afforestation. Studying the effect of stand density on the stand structure and understory vegetation development in order to provide important support for the stabilization of sands by afforestation in this region. [Methods] We selected the *Pinus sylvestris* plantations of 25 years old at different densities in Yulin City, and analyzed the changes in plantation structure and understory species diversity of *Pinus sylvestris* plantations with variations in stand density. [Results] The results showed the stand density and average diameter followed exponential relationship. And the height to diameter ratio showed a significant positive linear correlation with stand density. A total of 16 understory plant species were recorded, belonging to 13 genera and 8 families. Gramineae of foxtail grass was dominant species. Herbal species richness and diversity index showed an obvious increasing trend with decreasing density. The stand density was negatively correlated with the species richness and diversity index. Shannon diversity index was the most sensitive to changes in density. [Conclusion] In the management of *Pinus sylvestris* plantations in Mu Us sandland, the understory species diversity index can be seen as an indicator of the suitability of stand density.

Keywords: **Mu Us sandland**; ***Pinus sylvestris* plantations**; **stand density**; **stand structure**; **species diversity**

收稿日期:2014-08-20　　**修回日期**:2014-08-26

资助项目:国家重点基础科学(973)研究发展计划“植物固沙的生态水文过程、机理及调控”(2013CB429906)；国家林业局公益性行业科研专项经费项目(201304325)；“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD16B02)

第一作者:代青格乐(1991—)，男(蒙古族)，内蒙古自治区通辽市人，本科生，研究方向为荒漠化防治。E-mail:542131551@qq.com。

通信作者:赵媛媛(1985—)，女(汉族)，山东省济宁市人，博士，讲师，主要从事荒漠化防治方面的研究。E-mail:yuanyuan0402@126.com。

樟子松(*Pinus sylvestris*)是分布在呼伦贝尔沙地上的温寒性天然松林群落,具有重要的防风固沙生态功能。主要吸收干燥的沙丘表层 50 cm 以内土壤的水分和养分[1],主根长一般达 1～2 m,侧根特别发达,多分布在地表 10—50 cm 沙层内,常形成许多侧面下垂根,能充分吸收土壤中的水分,而且根系的可塑性很强,能适应不同的环境条件[2-3],因此,在"三北"地区治沙中被大量引种栽植。经过多年引种驯化,已在增加固沙植物的多样性、改变沙地景观、促进沙地生态环境逆转等过程中发挥了重要的作用[4]。因此,经营管理樟子松人工林,探索一种以樟子松为建群种的植物固沙模式,对于我国干旱、半干旱区植物固沙具有重要意义。林分结构和林下物种多样性是有效反映种群性状、群落稳定性和演替规律的重要指标,因此也是樟子松人工林固沙模式建设中需要考虑的重要参数。林分结构是对林分发展过程的综合反映。有研究[5-6]表明,在未有严重干扰的情况下,林分特征因子,如胸径、树高、冠幅、树种组成等,都具有一定的分布状态,而且表现出较为稳定的规律性。物种多样性是对生态系统功能与健康的综合表达,较高的物种多样性可以增加植物群落的生产力和生态系统的稳定性[7]。揭示樟子松固沙林林分结构和林下物种多样性不仅是评估其生态功能的一个有效途径,还能够为沙地人工林的合理经营、人工林天然化培育等提供依据。林分密度会对林分结构和物种多样性产生显著影响[8-9]。合理的林分密度会使人工林的物种多样性有较大的改善,有利于人工林向天然群落方向发展[10]。因此,研究林分密度对林分结构、林下物种多样性的影响是十分重要的。毛乌素沙地是中国 12 大沙漠和沙地之一,生态环境脆弱,是西部生态环境建设的重点区域。樟子松在该地区适应性强,被认为是毛乌素沙地针叶树造林的优选树种之一[11]。但当前毛乌素沙地樟子松固沙的相关研究多集中在樟子松造林技术[12-14]等方面,而对于林分密度与樟子松人工林林分结构和林下物种多样性的关系研究还鲜见报道。因此,本研究以毛乌素沙地樟子松人工林为研究对象,研究不同密度下,樟子松人工林林分结构和林下物种多样性的变化,以期为毛乌素沙地以樟子松为建群种的植物固沙模式提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于毛乌素沙地南缘的榆林市城北 6 km 的红石峡沙地植物园。该区属于典型的大陆性边缘季风气候,年平均降水量约为 365.7 mm,主要集中在 7—9 月,年平均气温 8.3 ℃。土壤以风沙土为主[15]。沙丘类型以新月型沙丘链为主,沙丘高度 7～9 m,迎风坡年风蚀带 5～27 cm,地下水位 1～7 m,天然植被覆盖度 1.8%～6.2%。冬春季多西北风,夏秋多东南风,年平均风速 3.6 m/s,最大可达 28 m/s[16]。该植物园建于 1957 年,当时全部为流动沙地,植被盖度不到 3%,植物种单一,只有沙蒿、沙柳零星分布。经过 50 a 来的飞播治沙、植物引种、沙地植被建设等措施,已经全部改造为固定沙地,植被盖度达到 85% 以上。现已搜集选育出了包括樟子松、油松、云杉、侧柏、紫穗槐、花棒、沙打旺等几十个适合中国北方干旱半干旱地区种植的林草植物种。

1.2　研究方法

1.2.1　样地选择与设置　经 2013 年 6—8 月对区域进行踏查,选择 20 世纪 80 年代末期栽种的樟子松人工林为研究对象,主要研究不同密度的樟子松人工林,林龄为 23～25 a,每种林地分别布设 3 个 20 m×20 m 的样地,总共测了 1 245 棵树。根据试验区的自然情况,样地均为水平固定沙地,且造林后人为干扰相对较少。在样地内对乔木进行每木检尺,计测样地内樟子松的株数、胸径、高度、冠幅等指标。每个样地中心和四角共布设 5 个 1 m×1 m 的草本样方,对物种的组成、盖度、高度、频度等做详细的记录,最后取平均值,同时挖土壤剖面,测得 0—100 cm 土壤层的平均含水率。样地林分和土壤特征详见表 1。

表 1　不同密度樟子松人工林的林分特征和土壤含水率

样地编号	密度/(株·hm^{-2})	平均胸径/cm	平均树高/m	平均高径比	冠幅/m	0—100 cm 土壤平均含水率/%
$P_{Ⅰ}$	3 850	11.29	9.79	0.922	1.99	5.27
$P_{Ⅱ}$	2 250	13.00	8.89	0.782	3.12	5.39
$P_{Ⅲ}$	2 050	13.65	10.35	0.716	2.50	6.05
$P_{Ⅳ}$	1 300	15.17	10.16	0.691	4.07	4.92
$P_{Ⅴ}$	925	16.67	10.26	0.634	4.19	6.28

1.2.2　林分结构　依据孟祥楠等[19]的研究,每 2 cm 为一个径级,共分为 11 个径级,按样地每一径级的个体百分比绘制径级结构图。每 0.1 cm 为一个高径比等级,共分为 11 个等级,按样地统计每一高径比等级

的个体百分比，绘制高度级结构图。

1.2.3 林下物种多样性 根据样方记录，计算不同物种相对盖度、相对高度、相对频度，进而计算每个样地不同物种的重要值，并统计不同密度的样地内各物种的多样性指数和均匀度指数和相似性指数[17-19]。

$$I=(C+H+F)/3 \quad (1)$$

式中：I——重要值；C——相对盖度；H——相对高度；F——相对频度。

丰富度指数：S=出现在样方的物种数。

Simpson 多样性指数：$D=1-\sum P_i^2$ (2)

式中：P_i——第 i 个物种的重要值占所有种重要值之和的比例。

Shannon 多样性指数：$H'=-\sum P_i \ln P_i$ (3)

式中：P_i——第 i 个物种的重要值占所有种重要值之和的比例。

Pielou 均匀度指数：

$$J_w=(-\sum P_i \ln P_i)/\ln S=H'/\ln S \quad (4)$$

Alatalo 均匀度指数：

$$E_a=[(\sum P_i^2)^{-1}-1]/[\exp(-\sum P_i \ln P_i)-1] \quad (5)$$

Sorensen 相似性指数：$SC=2w/(a+b)$ (6)

式中：w——不同样地地表植被共有物种数；a，b——两样地的物种数。

利用 Excel 和 SPSS 软件对各指数进行计算和统计，并对各指数与林分密度进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 林分密度对樟子松人工林林分结构的影响

2.1.1 林分密度对胸径生长的影响 由图 1 可以看出，随着密度的不断增大，樟子松平均胸径明显减小。樟子松人工林林分密度与平均胸径呈幂函数递减关系（$R^2=0.996$）。

进一步统计不同密度樟子松人工林样地内各径级内个体百分比，并以 11 cm 为中值，统计该胸径以上个体的数量分布特征。结果表明樟子松个体胸径生长呈钟形分布，随着密度的减小，大径级的个体数逐渐增加。密度最大的 $P_{Ⅰ}$ 样地中，樟子松个体平均高径比为 0.922，以分布在 0.8～0.9 范围内最多，比例为 31.17%，高径比大于 0.7 的个体比例为 87.01%；$P_{Ⅱ}$ 样地中，樟子松个体平均高径比为 0.782，以分布在 0.7～0.8 范围内最多，比例为 30.49%，高径比大于 0.7 的个体比例为 71.95%；$P_{Ⅲ}$ 样地中，樟子松个体平均高径比为 0.716，以分布在 0.6～0.7 范围内最多，比例为 33.33%，高径比大于 0.7 的个体比例为 51.11%；$P_{Ⅳ}$ 样地中，樟子松个体平均高径比为 0.691，以分布在 0.6～0.7 范围内最多，比例为 30.77%，高径比大于 0.7 的个体比例为 42.31%；密度最小的 $P_{Ⅴ}$ 样地中，樟子松个体平均高径比为 0.634，以分布在 0.6～0.7 范围内最多，比例为 43.24%，高径比大于 0.7 的个体比例为18.92%。

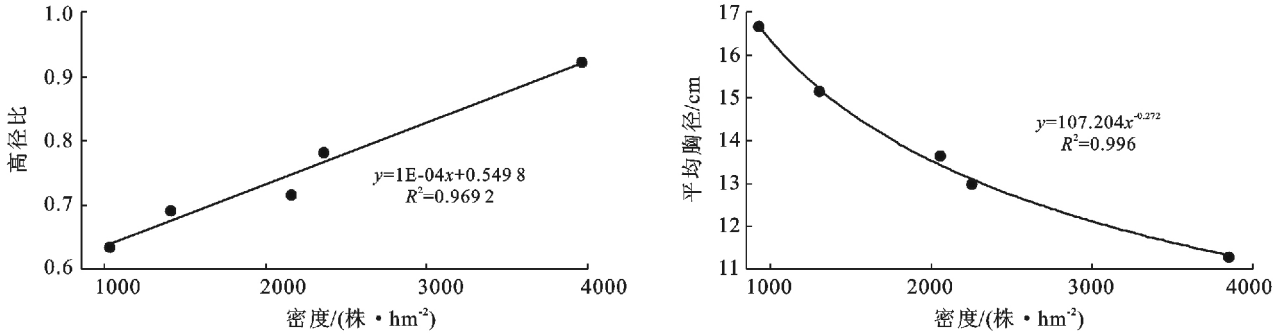


图 1 林分密度与平均胸径、高径比的关系

如图 2 所示，$P_{Ⅰ}$ 样地（密度为 3 850 株/hm²）中，樟子松个体平均胸径为 11.29 cm，以分布在 11～13 cm 径级范围内最多，比例为 21.79%，胸径在 11 cm 以上的个体比例为 29.49%；$P_{Ⅱ}$ 样地（密度为 2 250 株/hm²）中，樟子松个体平均胸径为 13.00 cm，也以分布在 11～13 cm 径级范围内最多，但比例略高，为 22.22%，胸径在 11 cm 以上的个体比例为 44.44%；$P_{Ⅲ}$ 样地（密度为 2 050 株/hm²）中，樟子松个体平均胸径为 13.65 cm，以分布在 13～15 cm 径级范围内最多，比例为 25.61%，胸径在 11 cm 以上的个体比例为 56.10%；$P_{Ⅳ}$ 样地（密度为 1 300 株/hm²）中，樟子松个体平均胸径为 15.17 cm，以分布在 17～19 cm 径级范围内最多，比例为 29.63%，胸径在 11 cm 以上的个体比例为 83.33%；$P_{Ⅴ}$ 样地（密度为 925 株/hm²）中，樟子松个体平均胸径为 16.67 cm，以分布在 17～19 cm 径级范围内最多，比例为 32.43%，胸径在 11 cm 以上的个体比例为 81.08%，该林分密度内，出现了径级为 23～25 cm 的个体，比例为 2.70%。

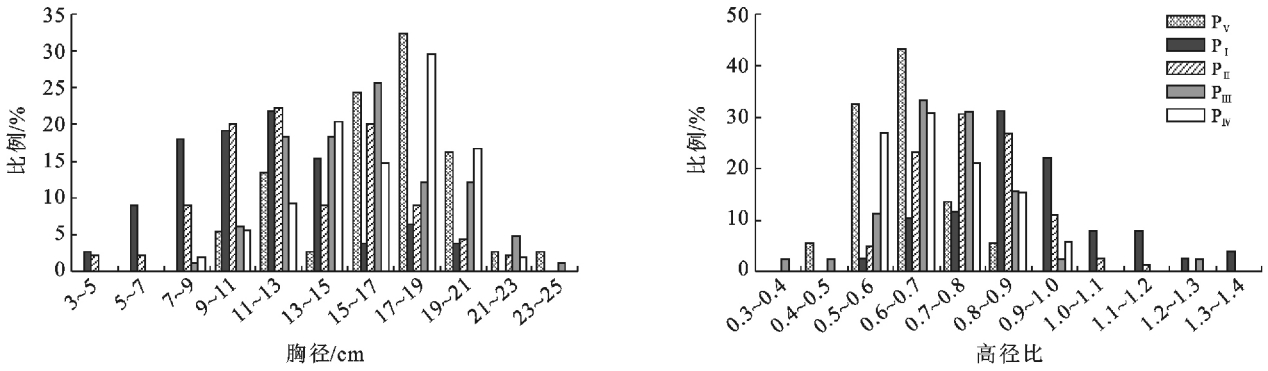


图 2　不同密度樟子松人工林种群径级和高径比分级结构

2.1.2　**林分密度对树高和高径比的影响**　本研究中,林分密度与树高无明显的相关关系,但密度和高径比呈显著的线性正相关关系($R^2=0.97$)(图 1)。进一步统计不同密度条件下样地内各高径比等级的百分比,并以 0.7 为中值,统计该高径比以上个体的数量分布特征。结果发现,随着樟子松人工林密度的减小,其高径比较大的个体逐渐减少。

2.2　林分密度对樟子松人工林林下植被的影响

2.2.1　**林分密度对樟子松人工林植被盖度的影响**　随着密度的不断减小,樟子松林下植被盖度变化明显。密度为 3 850 株/hm^2(P_I)时,林下植被盖度为 31%;密度减小到 2 250 株/hm^2(P_{II})时,林下植被盖度增加到 92%;密度更小时,林下植被盖度达到 100%。

2.2.2　**不同密度樟子松人工林林下植物的组成及物种重要值**　本研究所有样地里没有出现除了樟子松以外的乔木,因此这里只讨论林下草本层的植物多样性特征。对不同密度樟子松人工林林下的植物进行统计。结果发现,16 个植物种类,隶属于菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、紫草科(Boraginaceae)、藜科(Chenopodiaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)、萝藦科(Asclepidaceae)、茜草科(Rubiaceae)、茄科(Solanaceae)等 8 个科 13 个属。

表 2 表明,不同密度下林下均以禾本科的狗尾草(*Setaria viridis*)为优势种,在 5 个样地中,狗尾草的重要值分别为 38.48,41.61,39.48,33.24,35.27。随着密度的不断减小,植物种类由 5 种(P_I)分别增加到 7 种(P_{II})、6 种(P_{III})、8 种(P_{IV})、10 种(P_V)。同时,密度减小,林内光照增加,林下物种组成发生明显变化,喜阴植物的比例降低。从各物种重要值的排序结果可以发现,茜草(*Rubia cordifolia*)和枸杞(*Lycium chinense*)等喜阴物种是密度最大的 P_I 样地的优势种,而金色狗尾草(*Setaria pumilc*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等喜阳物种是密度较小的 P_{IV} 和 P_V 样地的优势种。

表 2　不同密度樟子松人工林林下物种的重要值

物种名	林分样地				
	P_I	P_{II}	P_{III}	P_{IV}	P_V
狗尾草	38.48	41.61	39.48	33.24	35.27
茜 草	17.19	0	6.44	0	0
枸 杞	16.80	0	10.51	0	0
沙生针茅(*Stipa caucasica*)	13.77	0	0	0	0
猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)	13.77	0	0	0	0
地锦草(*Euphorbia humifusa*)	0	15.40	0	13.98	7.05
黄花蒿(*Artemisia annua*)	0	10.74	0	3.60	0
阿尔泰狗娃花	0	10.52	14.21	16.18	8.19
藜(*Chenopodium album*)	0	8.75	11.36	0	6.92
小花鬼针草(*Bidens parviflora*)	0	6.87	0	6.56	5.25
糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)	0	6.1	0	0	3.68
鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)	0	0	18	0	0
金色狗尾草	0	0	0	13.76	21.20
鹤虱(*Lappula myosotis*)	0	0	0	7.86	4.87
附地菜(*Trigonotis peduncularis*)	0	0	0	4.82	3.60
刺藜(*Dysphania aristata*)	0	0	0	0	3.97

2.2.3 不同密度樟子松人工林林下物种多样性的变化 由表 3 可以看出，林分密度对草本层植物多样性和均匀度有一定的影响。本研究的密度范围内，随着林分密度的减小，樟子松人工林草本丰富度增加，由 $P_{Ⅰ}$ 的 5 增加到 $P_{Ⅴ}$ 的 10；Shannon 多样性指数 H' 增加明显，由 $P_{Ⅰ}$ 的 1.516 增加到 $P_{Ⅴ}$ 的 1.944，但 Simpson 多样性指数 D 无明显变化。从均匀度指数的变化来看，J_w 值与 E_a 值的变化趋势基本一致，均随着樟子松林分密度的减小而减小。

表 3 不同密度樟子松人工林草本层物种多样性指数

样地编号	S	D	H'	J_w	E_a
$P_{Ⅰ}$	5	0.756	1.516	0.942	0.873
$P_{Ⅱ}$	7	0.764	1.697	0.872	0.728
$P_{Ⅲ}$	6	0.763	1.613	0.900	0.803
$P_{Ⅳ}$	8	0.811	1.853	0.891	0.796
$P_{Ⅴ}$	10	0.805	1.944	0.844	0.689

注：S 为丰富度指数；D 为 Simpson 多样性指数；H' 为 Shannon 多样性指数；J_w 为 Pielou 均匀度指数；E_a 为 Alatalo 均匀度指数。下同。

对樟子松林下草本的物种丰富度指数（S）、多样性指数（D，H'）、均匀度指数（J_w，E_a）与林分密度的 Pearson 相关系数进行分析。结果表明（表 4），樟子松人工林林分密度与物种丰富度指数、多样性指数（D，H'）呈显著的负相关关系，相关系数 R 分别为 −0.892，−0.832，−0.920；与均匀度指数 J_w 呈显著正相关关系，相关系数 R 为 0.862。其中，Shannon 多样性指数 H' 对密度变化最为敏感。同时，物种丰富度指数与多样性指数、均匀度指数均显著相关；多样性指数 D 与 H' 显著相关；均匀度指数 J_w 和 E_a 显著相关；但多样性指数与均匀度指数之间相关性不明显。

表 5 显示了不同密度樟子松人工林林下草本共有种数和相似系数。由表 5 可见，不同密度林下物种组成存在较大的差异。高密度林分（$P_{Ⅰ}$，3 850 株/hm^2）与其他密度林分的共有种和相似性尤其小，其与其他样地共有种数分别仅为 1，3，1，1，相似系数分别仅为 0.167，0.545，0.154，0.133。而林分密度为 925 和 1 300 株/hm^2 时，与其他密度林分的林下物种相似性明显增加。

表 4 樟子松人工林林分密度与林下物种多样性指数的相关性

相关系数	密度	S	D	H'	J_w	E_a
密度	1.000	−0.892*	−0.832*	−0.920*	0.862*	0.768
S		1.000	0.855*	0.982*	−0.900*	−0.844*
D			1.000	0.928*	−0.597	−0.481
H'				1.000	−0.849*	−0.773
J_w					1.000	0.986*
E_a						1.000

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关。

表 5 不同密度樟子松人工林林下共有种数和植物物种的相似系数

项目	$P_{Ⅰ}$	$P_{Ⅱ}$	$P_{Ⅲ}$	$P_{Ⅳ}$	$P_{Ⅴ}$
$P_{Ⅰ}$		0.167	0.545	0.154	0.133
$P_{Ⅱ}$	1		0.500	0.667	0.706
$P_{Ⅲ}$	3	3		0.286	0.353
$P_{Ⅳ}$	1	5	2		0.778
$P_{Ⅴ}$	1	6	3	7	

注：行为 Sorensen 相似性系数，列为共有物种数。

3 结论与讨论

（1）对各林分密度与胸径、高径比之间关系的统计分析发现，樟子松人工林密度与平均胸径呈幂函数递减关系，与高径比呈显著的线性正相关关系。樟子松人工林林下共出现植物 8 科 13 属 16 种。草本以禾本科的狗尾草为优势种，随着密度的不断减小，物种多样性发生明显的变化，喜阴植物的比例有所降低。统计分析发现，林分密度与物种丰富度指数、多样性指数（D，H'）呈显著的负相关关系，Shannon 多样性指数 H' 对密度变化最为敏感。

（2）本研究得到的各林分密度与胸径、高径比之间的关系，与已有的油松人工林、华北落叶松人工林等的相关研究结论是相一致的。研究表明，樟子松人工林林下草本以禾本科的狗尾草为优势种，这与孟祥楠等[19]在嫩江沙地的研究结果相一致。但由于毛乌素沙地与嫩江沙地自然条件的不同，物种组成差异较大。本研究获得的林分密度与物种丰富度指数、多样性指数之间的关系，也与相关研究结论相符合。参考本研究结果，在毛乌素沙地的樟子松人工林经营中，可以将物种丰富度和林下物种多样性指数作为衡量林分密度是否合理的参考指标。

（3）毛乌素沙地樟子松人工林能够有效改善土

壤肥力。研究表明,樟子松林的土壤细菌数量是流沙的 14 倍,速效磷含量是流沙的近 5 倍,速效氮含量最高达到 8.55 mg/kg ,土壤有机质含量较其他乔木林最高,可达 7.74 g,土壤养分主要集中在 0—20 cm,20—40 cm 土层的养分含量显著减少[20]。合理的林分密度可提高人工林生态系统的稳定性,改善生态系统的功能。本研究表明,在毛乌素沙地樟子松人工林的林分密度与林分结构、林下物种多样性的相关关系是十分显著。林分密度是森林经营中的一个可控因子,因此可以通过调整人工林密度来有效改善林分胸径、冠幅、树高等的结构特征,改善植物的物种多样性。

[参 考 文 献]

[1] 苏芳莉,刘明国,郭成久,等. 沙地樟子松根系垂直分布特征及对土壤的影响[J]. 中国水土保持,2006(1):20-22.

[2] 李吉跃,张建国. 北方主要造林树种耐旱机理及其分类模型的研究(Ⅰ):苗木叶水势与土壤含水量的关系及分类[J]. 北京林业大学学报,1993,15(3):1-11.

[3] Zhao Qiong, Zeng Dehui, Lee Donkoo, et al. Effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* afforestation on soil phosphorus status of the Keerqin Sandy Lands in China [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 69(4): 569-582.

[4] 李陆平,廖超英,李晓明,等. 毛乌素沙地樟子松人工林对土壤微生物及酶活性的影响[J]. 西北林学院学报,2012,27(3):12-16.

[5] 韩照日格图,白静,田有亮. 大青山区油松人工林密度对林木生长影响的研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2007,28(4):67-70.

[6] 梁文俊,丁国栋,韦立伟,等. 落叶松人工林密度对林木生长的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(4):78-86.

[7] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems [J]. Nature, 1996, 379(6567):718-720.

[8] 曾德慧,姜凤岐,范志平,等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报,1996,7(4):337-343.

[9] Sullivan T P, Sullivan D S, Lindgren P M F, et al. Long-term responses of ecosystem components to stand thinning in young lodgepole pine forest. IV. Relative habitat use by mammalian herbivores[J]. Forest Ecology & Management, 2007, 240(1):32-41.

[10] 王树森,余新晓,罗于洋,等. 人工造林对八达岭森林植被木本植物生物多样性的影响[J]. 北京林业大学学报,2008.20(2):155-159.

[11] 吕荣,刘朝霞,李维向. 毛乌素沙地固沙造林针叶林树种选择的研究[J]. 中国沙漠,1998,18(1):81-86.

[12] Otoda T, Zhang Guosheng, Wang Linhe, et al. Effects of different planting methods on the early establishment of two introduced tree species in the Mu Us Sandy Land of China[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2013,9(1):59-66.

[13] 孟鹏,李玉灵,张柏习. 盐碱胁迫下沙地彰武松鹤樟子松苗木生理特性[J]. 应用生态学报,2013,24(2):359-365.

[14] 李陆平,廖超英,李晓明,等. 毛乌素沙地樟子松人工林对土壤微生物及酶活性的影响[J]. 西北林学院学报,2012,27(3):12-16.

[15] 张忠,姬康,申世永. 榆林市榆阳区樟子松地径、胸径、树高的调查[J]. 内蒙古林业科技,2012,38(2):55-56.

[16] 蒋伟,王洁琼. 榆林市沙地樟子松生长状况调查初探[J]. 商业文化:学术版,2011(9):293-294.

[17] 郭正刚,刘慧霞,孙学刚,等. 白龙江上游地区森林植物群落物种多样性的研究[J]. 植物生态学报,2003,27(3):388-395.

[18] 王晓荣,程瑞梅,肖文发,等. 三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系[J]. 生态学报,2010,30(21):5821-5831.

[19] 孟祥楠,赵雨森,郑磊,等. 嫩江沙地不同年龄樟子松人工林种群结构与林下物种多样性动态[J]. 应用生态学报,2012,23(9)2333-2334.

[20] 徐恒,廖超英,李晓明,等. 榆林沙区人工固沙林土壤养分,微生物数量和酶活性研究[J]. 西北林学院学报,2008,23(3):12-15.