

章古台地区樟子松人工林林下草本植物群落动态

张日升^{1,2}, 宋 鸽²

(1. 辽宁章古台科尔沁沙地系统国家生态定位观测研究站 辽宁 阜新, 123000; 2. 辽宁省固沙造林研究所 辽宁 阜新, 123000)

摘 要: [目的] 探究樟子松人工林林龄与林下草本植物多样性指数的关系, 分析樟子松林林下草本植物群落动态, 为樟子松林下的植被管理提供参考。[方法] 以科尔沁沙地南部章古台地区不同林龄(8, 18, 27, 35, 48 a)樟子松人工林为研究对象, 调查林下草本植被的植物种类、数量、盖度和生物量特征, 定量分析林龄对林下草本植物的影响。[结果] 在樟子松人工林林下, 马唐 *Digitaria sanguinalis* 的重要值高于其它草本植物, 能更好地适应林下环境, 是最主要的优势种。随着樟子松林龄的增长, 林下草本植被的生物量和多样性呈先减少后增加的趋势, 其中 27 a 生樟子松林的林下草本植被生物量和多样性最低。林龄与 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数均呈显著的二元回归关系。[结论] 樟子松人工林中龄林与近熟林林下草本植被存在退化现象, 需要通过间伐、中耕、围封等方法人工促进草本植被的生长与演替。

关键词: 樟子松人工林; 林下植被; 物种多样性; 植被退化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)01-0233-06

中图分类号: S753, S718.3

文献参数: 张日升, 宋鸽. 章古台地区樟子松人工林林下草本植物群落动态[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1):233-238. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.037; Zhang Risheng, Song Ge. Dynamics of herbaceous communities under *Pinus Sylvestris* var. *Mongolica* plantations in Zhanggutai area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1):233-238.

Dynamics of Herbaceous Communities Under *Pinus Sylvestris* var. *Mongolica* Plantations in Zhanggutai Area

Zhang Risheng^{1,2}, Song Ge²

(1. Liaoning Zhanggutai Horqin Desert Ecosystem Research Station, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Liaoning Institute of Sand Fixation and Afforestation, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: [Objective] In order to provide reference for understory herbaceous communities management in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations, the dynamic of understory herbaceous communities were investigated and the relationships between diversity index and stand age in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations were explored. [Methods] The *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations with different ages (8, 18, 27, 35 and 48-year-old) in Zhanggutai area in the Southern Horqin sandy land were selected as the study objects, the vegetation species, quantity, coverage and biomass of these plantations were investigated and the effects of stand age on diversity index were quantified. [Results] The importance value of *Digitaria sanguinalis* was the highest in all ages of the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations, indicating that the *D. sanguinalis* could adapt well to understory environment and was the dominant species of understory vegetation. With the increasing of stand age, the biomass and diversity of understory herbaceous vegetation decreased initially and then increased, and the lowest values occurred in the 27-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations. Stand age showed binary regression relationships with Patrick richness index, Shannon-Wiener index, Pielou evenness index and Simpson dominance index. [Conclusion] The degradation phenomena existed understory herbaceous vegetation in half-mature and near-mature *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations, thus artificial

收稿日期: 2018-07-14

修回日期: 2018-09-12

资助项目: 国家重点研发计划课题“科尔沁—浑善达克沙地沙化土地治理与沙产业技术研发及示范”(2016YFC0500803)

第一作者: 张日升(1976—), 男(汉族), 辽宁省桓仁县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事荒漠化防治和森林培育研究。E-mail: zrs973204@163.com。

promoting measures such as thinning, intertillage and enclosuring should be adopted to promote herbaceous vegetation growth and succession.

Keywords: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations; understory vegetation; species diversity; vegetation degradation

林下植被作为森林生态系统的重要组成部分,其生长与分布不仅受到上层乔木制约,同时也通过自身活动不断改变着林分环境^[1],从而影响着森林生态系统的多样性、稳定性,生产力与可持续发展^[2]。林下植被在森林群落分类、立地指示、森林演替方向及生产力维持等方面具有不可忽视的作用^[3-4]。特别是在针叶人工林中,乔木层树种种类单一,结构简单,养分分解及归还速率较慢,林下植被的作用更为重要^[5]。通常,随着林龄增长,上层乔木对林下植被生长抑制作用逐渐增加,生产力和多样性下降^[6],而林下植被动态变化规律影响着系统的生态过程,反应了生态系统的演替方向及稳定性^[7]。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)原产于中国大兴安岭和呼伦贝尔沙地,具有耐旱、耐寒、耐瘠薄、生长快的特点。1955年首次引种到科尔沁沙地南部的辽宁省章古台地区用于防风固沙造林,取得巨大成功。目前中国三北地区 10 多个省、市和自治区都有引种,是中国三北地区营造防风固沙林和农田防护林的主要树种^[8-9]。然而,自 1991 年起,在章古台地区出现了部分林分退化死亡现象,随后在辽宁所有引种栽培区、吉林、河北等地也出现了类似情况^[10-14]。林下植被在资源竞争、调控系统养分循环等方面发挥着重要作用,目前对沙地樟子松人工林林下植被的研究主要集中在对不同密度和不同经营方式下樟子松人工林林下植被变化^[15-17],而对樟子松人工林生长过程中林下植被动态响应过程尚不清楚,这对研究樟子松人工林生态系统的变化是重大的缺陷。本研究拟以不同林龄(8,18,27,35,48 a)樟子松林下

植被为研究对象,分析樟子松人工林生长对林下植被动态的影响及调控作用,为樟子松人工林的可持续经营提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地南部的章古台地区 42°43'—42°51'N, 121°53'—122°22'E,属暖温带半干旱半湿润气候区,隶属辽宁省阜新市彰武县。主要气候特点是干旱多风,年降水量 500 mm 左右,多集中于 6~8 月,年蒸发量约为降水量的 3 倍,空气相对湿度 60.4%。年均气温 5.1~6.1 °C,无霜期 154 d。年均风速 3.0~3.7 m/s。土壤类型以风沙土为主,占 89.4%,土壤有机质及其它养分含量都比较低。该地区 1955 年开始营建樟子松人工林,除营林干扰外,樟子松人工林的其它人为干扰来自于樵采和放牧^[18]。

1.2 样地的选择

经充分踏查,采用空间代替时间法,选择立地条件相似的 8,18,27,35,48 a 生 5 个林龄的樟子松人工林为研究对象。现有密度为樟子松人工林的经营密度,各样地基本情况见表 1。2017 年 8 月下旬,在不同样地内分别选取典型地段设置 3 个 10 m×10 m 的样方。在每个样方内,随机选取 5 个 1 m×1 m 小样方,每个样地 15 个小样方。在不同小样方内分别调查林下草本植物的种类、高度、数量、盖度和生长状况。待调查完毕后,将样方内的植物地上部分齐地收割,地下部分采挖收集,带回实验室,放入 80 °C 烘箱中烘干 24 h 后称重,计算样方内植物生物量。

表 1 章古台地区不同林龄樟子松人工林基本情况

林龄/ a	龄组	密度/ (株·hm ⁻²)	树高/ m	胸径/ cm	郁闭度	间伐情况
8	幼龄林	1200	1.4	2.1		2014 年抚育间伐 1 次,强度为 25%
18	幼龄林	1000	3.6	6.8	0.54	2002 年抚育间伐 1 次,强度为 25%
27	中龄林	700	7.2	13.8	0.74	2015 年卫生伐 1 次,强度为 30%
35	近熟林	560	12.6	6.7	0.66	1995 年抚育间伐,强度 25%
48	成熟林	290	12.0	23.2	0.45	2002 年、2015 年卫生伐各 1 次,强度分别为 25%和 30%

注:龄组按照辽宁省地方标准 DB21/ T706-2013《森林经营技术规程》划分。

1.3 指标选择

采用 α 多样性测度的 Patrick 丰富度指数、Shannon-

Wiener 指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数进行评定。

重要值 = [(相对多度 + 相对频度 + 相对盖度) / 3] × 100%

Patrick 丰富度指数

$$S = \text{出现在样地中的物种数 (种/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Simpson 优势度指数(辛普森指数)

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (2)$$

Shannon-Wiener 指数(Wiener 指数)

$$I_{sw} = - \sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数

$$J = - \sum (P_i \ln P_i) / \ln S \quad (4)$$

式中: S ——物种数目; P_i ——第 i 个种的个体数占所有个体数的比例。

采用 Microsoft Office Excel2007 软件进行数据处理和做图表;运用 DPS 14.0 对不同林龄间的总盖度、优势种高度及生物量间的差异进行单因素方差(one-way ANOVA)分析,采用 LSD 法比较各指标间的差异性,显著性水平设为 $\alpha = 0.05$ 。对林龄与多样

性指数之间关系进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 樟子松人工林林下草本植被组成与结构特征

由表 2 可以看出,本次研究共有草本植物 43 种,分属 19 科 39 属;主要为禾本科(9 属 9 种),藜科(4 属 6 种)、菊科(4 属 5 种),占总属数的 43.6%,占总种数的 46.5%。说明禾本科、藜科、菊科在沙地樟子松人工林林下草本植物群落演替过程中占据重要地位,其余物种豆科 3 属 3 种,萝藦科 2 属 3 种,大戟科、莎草科、牻牛儿苗科各有 2 属 2 种,蓼科、百合科、车前科、唇形科、马齿苋科、毛茛科、蔷薇科、桑科十字花科、石竹科、苋科、鸢尾科各 1 属 1 种。樟子松人工林林下草本植被的科属构成表现出多数种属于少数科,12 物种均为单科单属单种,这可能由于禾本科、藜科、菊科植物适应能力强,生活习性多样,对科尔沁沙地南部自然环境具有较好的适应性。

表 2 章古台地区不同林龄樟子松林下草本植物科、属特征

林龄/a	总科数	总属数	总种数	3 大科的种数分布(种)				占其群落的比例/%
				禾本科	菊科	藜科	合计	
8	11	24	26	7	5	4	16	61.54
18	10	21	21	6	2	3	11	52.38
27	15	26	27	7	3	5	15	55.56
35	10	20	20	7	2	3	12	60.00
48	9	20	21	8	2	3	13	61.90
合计	19	39	43	9	6	5	20	46.51

不同林龄樟子松人工林草本植物的科、属、种组成存在较大差异(表 3),8 a 生樟子松人工林包括 11 科 24 属 26 种;18 a 生林分包括 10 科 21 属 21 种;27 a 生林分包括 15 科 26 属 27 种,其科、属、种最多;35 a 生和 48 a 生林分均包括 20 种草本植物,分别隶属 10 科 20 属和 9 科 20 属。可见不同林龄樟子松人工林林下草本植物科、属组成并不一致,且随着林龄增长,科、属、种数量呈先增加后减少的规律。27 a 生樟子松人工林林下草本植被科与种数量最高,这主要由于其林分郁闭度增大,为喜阴、耐旱的草本植物种提供良好的生长环境,同时阳性植物种类还没有退去,因此草本植物种类最多;以后随着林分郁闭度增大,阳性草本植物从群落中减少甚至消失,科与种数量下降。

重要值是以综合数值来反映不同植物在群落中的地位和作用,其大小是确定优势种的重要依据。由表 3 可知,禾本科植物在樟子松人工林林下草本中占有优势地位,其中 8 a 生樟子松林的优势种为马唐、狗尾草、小画眉草,18 a 生樟子松林为虎尾草、狗尾

草、小画眉草,27 a、35 a、48 a 生樟子松林的优势种为马唐、虎尾草。林下植被生长情况是林分环境的综合体现,其优势种能反映生境的基本特征^[19],不同林龄樟子松对林下植被的影响不同,其中 18 a 生樟子松林时对林下草本植被影响最大,虎尾草取代马唐,成为优势种。樟子松进入中龄林后,林下植被的优势种逐渐稳定,马唐和虎尾草成为优势种。

2.2 樟子松人工林盖度与生物量

从表 4 可以看出,樟子松人工林林下植被总盖度随着林龄增加呈先降低再增高的趋势。8 a、18 a、27 a、35 a 和 48 a 生樟子松林的草本植被总盖度分别为 85.0%、68.53%、61.3%、64.2% 和 84.5%,18 a、27 a、35 a 生樟子松林分显著低于 8 a 和 48 a 生林分。樟子松幼龄林、中龄林中常见半灌木兴安胡枝子 *Lespedeza daurica* 和细叶胡枝子 *Lespedeza hedysaroides* 的分布,27 a 生樟子松林林下还发现了鸡桑 *Morus australis* 和白榆 *Ulmus pumila* 两种乡土灌木幼苗。而在 35 a 生和 48 a 生樟子松林中没有发现

乡土乔灌木种幼苗的分布。这说明近熟林和成熟林中受樟子松林生长及人为干扰的影响,林下植被以草本为主,乡土灌木很难在林下生长发育。生物量是衡量林下植被生长情况的重要指标,生物量越大,说明

林下植被生长越好。樟子松人工林林下植被生物量的变化随着林龄增长呈先降低后增加的趋势。8 a 生林分的草本植物生物量最大,27 a 生林分最小,48 a 生林分显著高于 35 a 生林分。

表 3 不同林龄樟子松人工林林下草本植被重要值分布

序号	种名	科名	属名	重要值/%				
				8 a	18 a	27 a	35 a	48 a
1	马唐(<i>Digitaria sanguinalis</i>)	禾本科	马唐属	21.97	6.62	43.42	40.44	34.74
2	虎尾草(<i>Chloris virgata</i>)	禾本科	虎尾草属	7.48	12.98	23.33	24.46	16.43
3	狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	禾本科	狗尾草属	12.79	25.57	2.19	5.00	9.50
4	小画眉草(<i>Eragrostis minor</i>)	禾本科	画眉草属	16.51	20.1	0.68	1.25	7.10
5	糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	禾本科	隐子草属	2.27	2.04	1.84	6.82	4.36
6	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	禾本科	披碱草属			1.71	0.42	4.87
7	少花蒺藜草(<i>Cenchrus pauciflorus</i>)	禾本科	蒺藜草属	8.92	1.78		0.44	0.41
8	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	禾本科	赖草属	2.43				
9	冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)	禾本科	冰草属			1.02		0.42
10	虫实(<i>Corispermum hyssopi folium</i>)	藜科	虫实属	1.89	0.83	0.42	1.23	
11	刺藜(<i>Chenopodium aristatum</i>)	藜科	藜属			0.42		0.42
12	尖头叶藜(<i>Chenopodium acuminatum</i>)	藜科	藜属	1.92	3.42	0.42	0.41	0.80
13	轴藜(<i>Axyris amaranthoides</i>)	藜科	轴藜属			0.52		
14	刺沙蓬(<i>Salsola ruthenica</i>)	藜科	猪毛菜属	0.39				
15	猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)	藜科	猪毛菜属	0.30	2.01	0.42	0.41	0.39
16	草木樨状黄芪(<i>Astragalus melilotoides</i>)	豆科	黄芪属	0.70				
17	鸡眼草(<i>Kummerowia striata</i>)	豆科	鸡眼草属	1.98	5.17	4.99	3.89	2.71
18	少花米口袋(<i>Gueldenstaedtia verna</i>)	豆科	米口袋属	1.27	1.65	0.85	3.10	0.81
19	苍耳(<i>Xanthium sibiricum</i>)	菊科	苍耳属	0.32				
20	大籽蒿(<i>Artemisia sieversiana</i>)	菊科	蒿属	3.00				
21	野艾蒿(<i>Artemisia lavandulae folia</i>)	菊科	蒿属	1.70		0.86		
22	中华小苦荬(<i>Ixeridium chinense</i>)	菊科	苦苣菜属	1.98	2.00	3.84	1.23	1.20
23	猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)	菊科	茵陈蒿属	3.79	2.85	0.96	1.88	2.33
24	叉分蓼(<i>Polygonum divaricatum</i>)	蓼科	蓼属	0.13				
25	小根蒜(<i>Allium macrostemon</i>)	百合科	葱属			0.86		
26	车前(<i>Plantago asiatica</i>)	车前科	车前属			0.90		
27	百里香(<i>Thymus mongolicus</i>)	唇形花科	百里香属			0.50		
28	地锦草(<i>Euphorbia humifusa</i>)	大戟科	地锦属	0.62		3.08		
29	铁苋菜(<i>Acalypha australis</i>)	大戟科	铁苋菜属					0.38
30	雀瓢(<i>Cynanchum thesioides</i> var. <i>australe</i>)	萝藦科	鹅绒藤属	0.73		0.44		
31	细叶白前(<i>Cynanchum thesioides</i>)	萝藦科	鹅绒藤属					0.39
32	萝藦(<i>Metaplexis japonica</i>)	萝藦科	萝藦属		1.09			
33	马齿苋(<i>Portulaca oleracea</i>)	马齿苋科	马齿苋属	1.03	0.79	3.15	2.73	4.40
34	牻牛儿苗(<i>Erodium stephanianum</i>)	牻牛儿苗科	牻牛儿苗属	2.71	0.36	0.93		
35	飞燕草(<i>Consolida ajacis</i>)	毛茛科	飞燕草属				0.41	
36	中华委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i>)	蔷薇科	委陵菜属	0.64	0.66			
37	大麻(<i>Cannabis sativa</i>)	桑科	大麻属	2.56				
38	球穗扁莎(<i>Pycnus flavidus</i>)	莎草科	扁莎属		0.38	0.44		6.69
39	寸草(<i>Carex duriuscula</i>)	莎草科	苔草属		7.45	1.39	4.57	0.43
40	山莴苣(<i>Lagedium sibiricum</i>)	十字花科	山莴苣属				0.42	
41	女娄菜(<i>Silene aprica</i>)	石竹科	女娄菜属		1.89	0.43	0.41	1.22
42	反枝苋(<i>Amaranthus retro flexus</i>)	苋科	苋属		0.36			
43	细叶鸢尾(<i>Iris tenui folia</i>)	鸢尾科	鸢尾属				0.46	

表 4 樟子松林下草本植物群落盖度与高度的关系

林龄/a	总盖度/%	优势种高度/cm	生物量/(kg·m ⁻²)	乔灌木种类
8	85.0±5.2 ^a	42±7 ^a	0.29±0.01 ^a	兴安胡枝子、细叶胡枝子
18	68.5±6.1 ^b	45±5 ^a	0.16±0.01 ^{cd}	兴安胡枝子、细叶胡枝子
27	61.3±5.4 ^b	21±5 ^c	0.12±0.03 ^d	兴安胡枝子、细叶胡枝子、鸡桑、白榆
35	64.2±4.8 ^b	30±8 ^b	0.17±0.04 ^c	
48	84.5±6.2 ^a	35±5 ^b	0.24±0.01 ^b	

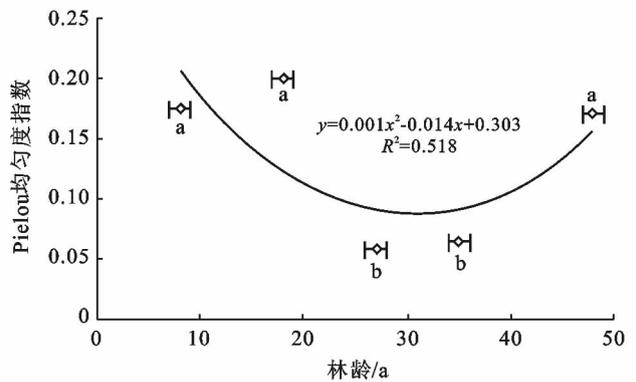
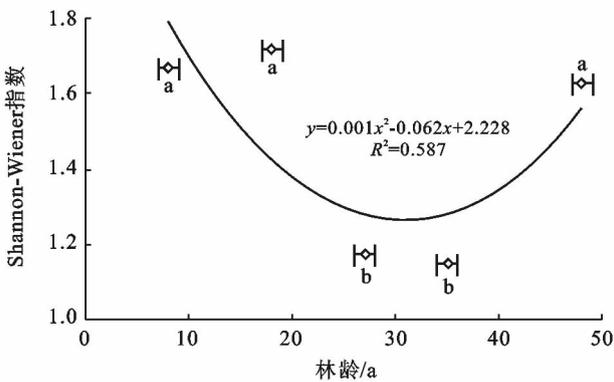
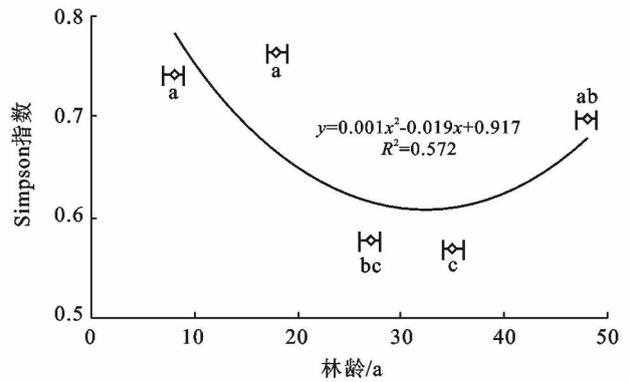
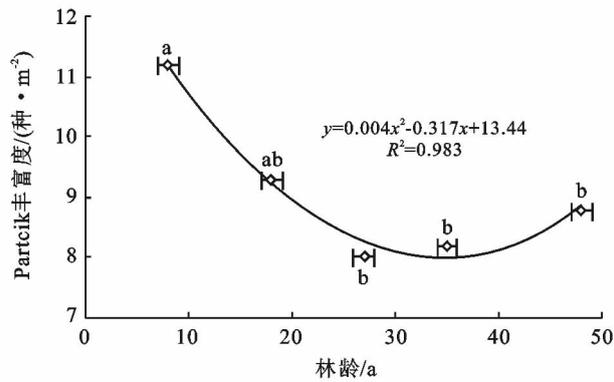
注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.3 樟子松人工林林下植被多样性

随着樟子松林龄增加,植物种类发生更替,林下草本群落的多样性做出相应变化(图 1)。幼龄林阶段的 8 a 和 18 a 生林分的 Partcik 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度之间差异不明显。随着林龄增加,27 a 和 35 a 生时樟子松林下植被的多样性下降,显著低于 8 a 和 18 a 生林

分,而 27a 与 35 a 生林分间差异不明显。48 a 生林分的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数比 27a 和 35 a 生林分明显增大,说明成熟林林下群落多样性呈增加趋势。

对林龄与林下草本多样性进行回归分析,Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数均呈先降低后上升的趋势(详见图 1)。



注:不同字母表示不同林龄间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 樟子松林下植物群落多样性与林龄的关系

3 结论与讨论

樟子松人工林林下共有 43 种草本植物,隶属 19 个科,39 个属(表 3);其中以禾本科植物最多,其次是藜科、菊科、豆科、萝藦科。除 18 a 生樟子松林分外,其它林龄中马唐的重要值最大,说明马唐比其它草本

植被更适应中龄及以上樟子松人工林林下生长,是林下植被最主要的优势种,其次是虎尾草。辽宁省章古台樟子松人工林林下草本植被动态变化与孟祥楠等^[20]在嫩江沙地的研究结果的动态变化相似,发育初期一年生的植物(狗尾草)较多,发育后期多年生植物(马唐、虎尾草)的优势明显超过一年生植物,而嫩江

沙地樟子松人工林发育后期多年生植物主要为鼠掌老鹳草,这是因为不同区域植被不同造成的。研究发现,27 a 生前樟子松人工林林下有 4 种灌木,其中包括细叶胡枝子和兴安胡枝子,说明 2 种半灌木比较适合樟子松林下生境。35 a 和 48 a 生林分没有灌木分布,这可能与放牧与樵采等人为干扰有关。因此,建议应在樟子松近熟林后进行围封,促进林下植被正向演替。

研究还发现,樟子松人工林林下草本植被的生物量和多样性随着樟子松林龄的增加呈先减少后增加的趋势,27 a 生樟子松人工林林下植被生物量最小,之后逐渐增加(见表 4)。林下草本植被多样性呈现先降低再升高的趋势,在中龄林和近熟林时表现较低(见图 1)。这主要由于在科尔沁沙地南部种植樟子松后,沙地固定,8 a 生樟子松林没有郁闭,对植被的影响较小;幼林期林分管护严格,人为干扰较小,林下植被生物量较大,植物多样性较高。随着樟子松人工林中龄林与近熟林郁闭度增大,阳光无法透过林冠,林下植被稀疏;同时樟子松人工林对水分、土壤养分消耗多,影响了林下植被的生长和发育,林下草本植被生物量低,多样性少,分布不均匀,存在退化现象。因此 27 a 和 35 a 生林分需要人工调控草本植被的生长与演替。在樟子松成熟林中,为了防止人工林退化以及修复退化林分,生产上常采用间伐和修枝等方法,降低了林分郁闭度,林分生长对水分和养分的需要减少,林下草本植被得到了一定恢复。

林下植被在维持林地养分^[21],维护生态系统的多样性和稳定性方面具有显著作用^[22],当林下植被达到一定覆盖度和生物量时,土壤肥力有明显改善^[23-25];而林下植被退化将导致地力衰退,林地养分累积循环不畅,群落结构和功能下降。已有研究发现,樟子松人工林退化经常发生在 30 a 左右^[11,26],同时林地的地力也出现退化^[27]。本研究发现樟子松人工林林下草本植被的多样性与林龄之间存在着显著的相关性,林下草本状况影响着樟子松人工林的健康。樟子松人工林林下几乎没有灌木,林下草本植被作为调整林分结构及恢复地力的主导驱动因子,对维护樟子松人工林健康很重要。因此有必要对樟子松人工林林下的草本植被进行人为管理,特别是中龄林和近熟林。人为管理包括间伐、中耕、围封等措施。对过密的中龄林,可通过疏伐和修枝增加林分的通风透光程度,促进林下草本植被的发育和演替;对达到森林经营规程规定密度的林分,可通过中耕的方法,加速草本植被对林分自养机制的启动和运行。樟子松近熟林可通过卫生伐,降低林分密度,同时对林分进行围封,促进林下植被的正向演替。

[参 考 文 献]

- [1] 彭剑华,詹潮安,肖泽鑫,等. 汕头地区台湾相思人工次生林林下木本植物的物种多样性分布研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2013,38(3):87-93.
- [2] 杨青青,杨众养,薛杨,等. 海南文昌滨海台地不同森林林下灌草多样性及其与土壤因子关联分析[J]. 热带作物学报,2015,36(12):2238-2244.
- [3] 何艺玲,傅懋毅. 人工林林下植被的研究现状[J]. 林业科学研究,2002,15(6):727-733.
- [4] 邓超. 马尾松纯林与混交林生态系统生物多样性与生物量研究[D]. 成都:四川农业大学,2015.
- [5] 徐扬,刘勇,李国雷,等. 间伐强度对油松中龄人工林林下植被多样性的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(3):135-138.
- [6] 林娜,刘勇,于海群,等. 不同林龄飞播油松林林下植被多样性研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(3):16-20.
- [7] 董生健,何小谦. 黄土球陵区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤系统演变特征[J]. 水土保持通报,2016,36(5):20-27.
- [8] 朱教君,郑晓,闫巧玲,等. 三北防护林工程生态环境效应遥感监测与评估研究[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [9] Liu Changan, Siddique K H M, Hua Shuai, et al. The trade-off in the establishment of artificial plantations by evaluating soil properties at the margins of oases[J]. Catena, 2017,157:363-371.
- [10] 张日升,肖巍,于洪军,等. 沙地樟子松人工林合理经营密度的研究[J]. 辽宁林业科技,2014(4):12-15.
- [11] 宋晓东. 章古台沙地樟子松人工林衰退机理与营林措施控制技术研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2005.
- [12] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松提早衰弱的原因与防治措施[J]. 林业科学,2001,37(2):131-138.
- [13] 刘明国,苏芳莉,马殿荣,等. 多年生樟子松人工纯林生长衰退及地力衰退原因分析[J]. 沈阳农业大学报,2002,33(4):274-277.
- [14] Zhu Jiaojun, Fan Zhiping, Zeng Dehui, et al. Comparison of stand structure and growth between artificial and natural forests of *Pinussylvestris* var. *mongolica* on sandy land[J]. Journal of Forestry Research, 2003,14(2):103-111.
- [15] 代青格乐,赵国平,王新星,等. 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[J]. 水土保持通报,2015,35(6):86-91.
- [16] 宋鸽,张日升,孙海红,等. 3 种经营措施对沙地樟子松人工林林下植被的影响[J]. 辽宁林业科技,2013(5):16-19,55.
- [17] 韩辉,张柏习,张素清,等. 2 种密度下樟子松人工林的物种多样性特征[J]. 防护林科技,2015(4):1-3.

[参 考 文 献]

- [1] Cheng J D, Huang Y C, Wu H L, et al. Hydrometeorological and landuse attributes of debris flows and debris floods during typhoon Toraji, July 29—30, 2001 in Central Taiwan[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 306: 161-173.
- [2] 陈明,唐川,甘伟,等.震区急陡沟道型泥石流特征及动力过程研究:以汶川瓦窑沟为例[J].*云南大学学报:自然科学版*,2018,40(2):272-278.
- [3] Dai Fuchu, Xu Chong, Yao Xin, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011,40(4):883-895.
- [4] 黄润秋,李为乐.汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J].*地质灾害与环境保护*,2009,20(3):1-7.
- [5] 唐川.汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J].*山地学报*,2010,28(3):341-349.
- [6] 齐信,唐川,铁永波,等.基于 GIS 技术的汶川地震诱发地质灾害危险性评价:以四川省北川县为例[J].*成都理工大学学报:自然科学版*,2010,37(2):160-167.
- [7] 吕义清,刘鸿福,李晓聪.基于趋势面分析法的地质灾害危险性评价系统[J].*水土保持通报*,2011,31(2):155-158.
- [8] 刘洋,唐川,李为乐,等.四川省都江堰市龙池地区群发性泥石流物源敏感性分析[J].*灾害学*,2013,28(2):107-113.
- [9] 唐川,丁军,梁京涛.汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J].*工程地质学报*,2010,18(1):1-7.
- [10] 常鸣,唐川,蒋志林,等.强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演变[J].*山地学报*,2014,32(1):89-97.
- [11] 蒋志林,朱静,常鸣,等.汶川地震区红椿沟泥石流形成物源量动态演化特征[J].*山地学报*,2014,32(1):81-88.
- [12] 余斌,马煜,张健楠,等.汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J].*山地学报*,2011,29(6):738-746.
- [13] Chang Ming, Tang Chuan, Zhang Dandan, et al. Debris flow susceptibility assessment using a probabilistic approach: A case study in the Longchi area, Sichuan Province, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014,11(4):1001-1014.
- [14] 王莲芬,许树柏.层次分析法引论[M].北京:中国人民大学出版社,1990.
- [15] 许冲,戴福初,姚鑫,等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡敏感性评价[J].*岩石力学与工程学报*,2009,28(S2):3978-3985.
- [16] Conoscenti C, Maggio C D, Rotigliano E. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy)[J]. *Geomorphology*, 2008, 94(3/4):325-339.
- [18] 张日升,贾树海,徐贵军,等.营林措施对沙地樟子松人工林土壤养分、酶活性及微生物量碳的影响[J].*土壤通报*.2011,42(1):65-69.
- [19] 侯学煜.中国植被地理及优势植物化学成分[M].北京:科学出版社,1982.
- [20] 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.
- [21] Liu Shirong, Li Xuemin, Niu Limin. The degradation of soil fertility in pure larch plantation in the northeastern part of China[J]. *Ecological Engineering*, 1998,10(1):75-86.
- [22] Vanderschaaf C L. Estimating understory vegetation response to multi-nutrient fertilization in Douglas-fir and ponderosa pine stands[J]. *Journal of Forest Research*,2008,13(1):43-51.
- [23] 姚茂和,盛炜彤,熊有强.林下植被对杉木林地力影响的研究[J].*林业科学研究*,1991,4(3):246-252.
- [24] 盛炜彤,杨承栋.关于杉木林下植被对改良土壤性质效用的研究[J].*生态学报*.1997,17(4):377-385.
- [25] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J].*应用生态学报*.2009,20(10):2323-2331.
- [26] 宋晓东,刘桂荣,陈江燕,等.樟子松枯死原因与防治技术研究[J].*北华大学学报:自然科学版*,2003,4(2):166-169.
- [27] 苏芳莉,刘明国,韩辉.樟子松不同林型沙地土壤肥力的差异[J].*东北林业大学学报*.2006,34(6):26-28.

(上接第 238 页)