

林下植物多样性及养分积累量对杨树林分结构的响应*

燕亚飞^{1,2} 方升佐^{1**} 田野¹ 宋浩¹ 匡兴建¹

(¹南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; ²河南科技大学林学院, 河南洛阳 471003)

摘要 为研究林分结构对林下植物特征的影响,对江苏省泗洪陈圩林场南林 95 杨(*Populus ×euramericana* cv. “Nanlin-95”)4 种不同结构的林分林下植物进行了调查。结果表明:低密度杨树林林下植物的 Shannon 指数高于高密度林分,而高密度林分林下植物 Pielou 均匀度指数较高,分布较均匀;低密度杨树林林下植物生物量高于高密度林分,低密度林分的林下植物具有较高的 N、P、K、Mg 养分浓度和积累量,但 Ca 的浓度和积累量在不同林分结构下差异不大;林下植物 5 月的 N、P、Ca 浓度和积累量大于 11 月,而 K、Mg 则小于 11 月。

关键词 杨树人工林; 林下植物; 多样性指数; 生物量; 养分

中图分类号 S718 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)5-1170-08

The response of understory plant diversity and nutrient accumulation to stand structure of poplar plantation. YAN Ya-fei^{1,2}, FANG Sheng-zuo^{1**}, TIAN Ye¹, SONG Hao¹, DUN Xing-jian¹ (¹ College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; ² College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(5): 1170–1177.

Abstract: Poplar (Nanlin-95) plantations with different stand densities and spacing were investigated to study the effects of stand structure on understory characteristics in Chenwei Forest Farm, Sihong County, Jiangsu Province. The results showed that the Shannon index of the understory was higher under the low density stands than under the high density ones, while the distribution of understory was much homogeneous under high density stands, with a higher Pielou evenness index. The diversity index of the understory was lower in May than in November. The biomass of the understory was higher in the low density stands than in the high density stands. Low stand densities increased the concentration and accumulation of N, P, K, and Mg in understory, while no significant effects of stand structure were detected on the concentration and accumulation of Ca in understory. The concentration and accumulation of N, P, and Ca were higher in May than in November while the concentration and accumulation of K and Mg were lower in May than in November.

Key words: poplar plantation; understory; diversity index; biomass; nutrient.

随着人工林营造目的从单一性(如木材生产)向多元化转变,生物多样性与生态系统功能的关系以及人工林是否能起到维护生物多样性的作用已成为生态学与环境科学关注的前沿(方升佐和田野, 2012)。森林培育过程是最典型的人为干扰,它不

仅能改变林分的组成、结构,而且也可改变立地环境资源和基质的有效性,从而对人工林生物多样性产生深刻影响。林下植物是森林林下灌木层和草本层植物的统称,也是人工林生物多样性的重要组成部分。研究表明,林下植物在维持林地养分(Liu *et al.*, 1998)、维护生态系统的多样性和稳定性(VanderSchaaf, 2008)方面有突出作用,常被认为是向土壤返还养分元素的主导因子(李国雷等, 2009)。近 20 年来,林下植物在林分养分循环以及

* 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB416900)、江苏高校协同创新计划项目、江苏高校优势学科建设工程项目和江苏省自然科学基金项目(BK2011821)资助。

** 通讯作者 E-mail: fangsz@njfu.edu.cn

收稿日期: 2013-10-27 接受日期: 2013-12-27

稳定林分生产力方面日趋受到重视(冯宗炜等,1985;方升佐和田野,2012)。

杨树(*Populus*)是世界中纬度平原地区栽培面积最大、木材产量最高的速生用材树种之一。杨树人工林多为同龄纯林,并进行集约化的短轮伐期经营,在组成、结构和功能上极为单一,导致生物多样性的丧失和地力衰退(方升佐,2008)。以往对杨树的研究主要集中于杨树生长与生产力提高等方面(Fang *et al.*,2007;Fang *et al.*,2011),而对如何维护林分的生物多样性及长期立地生产力研究较少。调控林分密度及其配置是人工林经营的首要技术环节,直接影响到人工林群落的光、热、水分等生态因子的分配,使林下物种的多样性及结构发生变化,从而影响人工林的长期立地生产力维持。本文研究了不同林分结构杨树人工林对林下植物多样性、植物生物量以及养分的影响,旨在为杨树人工林的可持续经营提供理论依据和技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于江苏省宿迁市泗洪县陈圩林场(33°32'N,118°36'E),地处江苏中北部的洪泽湖西岸,属中纬度暖温带半湿润气候区。年平均气温14.4℃,无霜期为197 d左右,全年日照时间为2250~2350 h,年平均降水量为972.5 mm,降水主要集中在6—8月。土壤母质为洪泽湖淤积土,土壤质地多为中壤至轻粘,结构良好,透气透水性较强。

试验林分设于陈圩林场马浪湖试验点,2007年3月采用杨树2根1干苗造林,杨树品种为南林-95杨(*Populus ×euramericana* cv. “Nanlin-95”),采用4种造林密度和配置方式,株行距分别为3 m×8 m、4.5 m×8 m、5 m×5 m、6 m×6 m,其中株行距6 m×6 m和4.5 m×8 m的林分为相同栽植密度下的正方形和长方形配置,5 m×5 m和3 m×8 m为近似栽植密度下的正方形和长方形配置。试验林分基本情况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样方调查 分别于2012年5月上旬和11月上旬在每种林分结构的林地中选取3个20 m×20 m的标准样地,样地设置时避开林地最外围的行列,以去除边缘效应。其林下植物多为草本,少见灌木,因此只设置草本样方。在每个样地的

表1 试验林分基本状况
Table 1 Basic conditions of the experimental stands

株行距 (m)	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	郁闭度 (%)
6×6	18.81	16.00	63.0
4.5×8	18.45	15.85	62.4
5×5	18.02	15.40	63.8
3×8	17.09	15.15	64.9

两条对角线上随机选取4个,对角线中点设置1个,共5个1 m×1 m的草本样方,分别记录每个样方内的林下植物种类、个体数、高度、覆盖度。采用收获法,采集林下植物的地上部分带回实验室进行进一步处理分析。在每个样方调查的同时,在取样点处利用鱼眼数码相机(Nikon,D80)获取人工林林分冠层的半球图像,具体做法:将相机放置于高度为1 m的支架上,保持水平状态,于林分冠层下方,在相机视阈内无人的情况下拍照,获取杨树人工林冠层图像,每个样方获取2张图像(赵传燕等,2009)。通过Gap Light Analyzer(GLA,Version 2.0)软件处理所获得植被冠层图像并进行分析,获得林分冠层空隙度(gap fraction in canopy)数据。

1.2.2 林下植物多样性指数分析 林下植物多样性的分析选择物种丰富度指数R、Shannon指数和Pielou均匀度指数,并计算每个样地调查到的物种的重要值。参照魏天兴等(2012)、杨立学等(2013)的计算方法,计算公式如下:

物种丰富度指数: $R=S$ (1)

Shannon 指数:

$H' = - \sum_{i=1}^n P_i \times \ln P_i$ (2)

Pielou 均匀度指数:

$E = H' / \ln S$ (3)

重要值 = (相对密度+相对盖度+相对频度)/3 (4)

各式中, S 为样地中物种总数, P_i 为该种的个体数(N_i)占群落中总个体数(N)的比例,即 $P_i = N_i / N$ 。

1.2.3 林下植物生物量测定 采用传统的全收获法来测定林下植物的生物量(刘凤娇和孙玉军,2011)。在多样性调查的同时,将各个样方内的林下植物地上部分全部收集,带回实验室置于65℃烘箱中,烘干至恒重后测定其干重,并根据样方面积推算出林分单位面积的林下植物地上部分生物量。

1.2.4 养分含量测定 将林下植物混合样品烘干后磨碎,过1 mm筛,采用硫酸-高氯酸法消煮,测定养分

含量。N、P 浓度采用 AA3 流动分析仪 (Bran + Luebbe, 德国) 测定, K、Ca、Mg 浓度采用原子吸收分光光度计 (UNICAM 969, 美国) 测定。每种养分在各月份的累积量为该养分含量与当月生物量的乘积。

1.3 数据处理

采用 EXCEL 2007 进行基础数据的统计处理, 采用 SPSS 16.0 分析软件进行单因素方差分析, 通过 LSD 检验比较不同林分结构之间多样性指数、生物量及养分的差异。

2 结果与分析

2.1 不同林分结构的林下植物多样性

2.1.1 林下植物的物种组成 经过调查统计, 5 月份 4 种不同林分结构林下共有植物种 22 种, 分属于 14 科 22 属; 11 月共有植物种 26 种, 分属于 14 科 26 属 (表 2)。常见的科包括禾本科、菊科、苋科、百合科、茜草科、蓼科 (表 3、表 4)。

4.5 m×8 m 与 6 m×6 m 林分的物种丰富度 (即种的数量) 要高于 3 m×8 m 与 5 m×5 m 林分, 5 月份的林下植物物种丰富度低于 11 月。5 月的林下植物物种多为冬型一年生植物, 而 11 月则多为夏型一年生植物, 本调查林分的林下植物主要以夏型一

表 2 不同结构林分林下植物物种数目
Table 2 Species composition of the understory vegetation of different stand structures

株行距 (m)	5 月			11 月		
	科数	属数	种数	科数	属数	种数
6×6	11	15	15	9	15	15
4.5×8	11	17	17	8	18	18
5×5	7	10	10	6	11	11
3×8	5	10	10	7	11	11

年生植物为主, 5 月时, 夏型植物种类尚未或刚刚开始萌发, 在调查时并未能进行采样统计。

2.1.2 林下植物物种重要值 5 月, 苦苣菜、猪殃殃在 4 种林分结构下均有出现 (表 3), 且重要值相对较大, 因此可以认为是该季节的优势种; 而鬼针草、黄鹌菜、泥胡菜、小蓟、天名精、茅草、牛膝、田旋花在 3 种林分结构下有出现, 可以视为常见种; 藜、野葱、繁缕、蔊菜均只在 1 种林分中出现, 占总物种比例的 18.18%, 且重要值都不大, 可以认为是该季节杨树林下植物的偶见种。11 月, 稗、黄鹌菜、牛膝、喜旱莲子草在 4 种林分结构下均有出现 (表 4), 老鹳草、茅草、青葙、蛇莓、小蓟在 3 种林分结构中出现, 且有较高的重要值, 可以认为这些种是该地区的

表 3 5 月不同结构杨树林分下林下植物种类及重要值
Table 3 Species and importance value of understory vegetation of different stand structures in May

科名	种名	拉丁名	株行距 (m)			
			6×6	4.5×8	5×5	3×8
菊科	鬼针草	<i>Bidens pilosa</i>	0.307	0.070	0.197	—
	黄鹌菜	<i>Youngia tenuifolia</i>	0.074	—	0.127	0.111
	泥胡菜	<i>Hemistepta lyrata</i>	—	0.020	0.024	0.037
	小蓟	<i>Cephalanoplos segetum</i>	0.056	0.027	—	0.093
	苦苣菜	<i>Lxeridium dentatum</i>	0.089	0.143	0.054	0.107
	天名精	<i>Carpesium abrotanoides</i>	0.066	0.028	—	0.049
	一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	—	0.067	—	0.026
禾本科	白茅	<i>Imperata cylindrica</i>	0.031	—	0.090	0.055
苋科	牛膝	<i>Achyranthes bidentata</i>	0.012	—	0.075	0.021
	藜	<i>Chenopodium album</i>	—	0.013	—	—
	杠板归	<i>Polygonum perfoliatum</i>	0.030	0.037	—	—
蓼科	红蓼	<i>Polygonum orientale</i>	—	0.013	0.070	—
	老鹳草	<i>Geranium wilfordii</i>	0.030	0.035	—	—
牻牛儿苗科	蛇莓	<i>Duchesnea indica</i>	—	0.022	0.126	—
蔷薇科	田旋花	<i>Convolvulus arvensis</i>	0.154	0.052	0.202	0.092
旋花科	通泉草	<i>Mazus japonicus</i>	0.026	0.283	—	—
玄参科	薄荷	<i>Mentha haplocalyx</i>	0.029	0.111	—	—
唇形科	鹅肠草	<i>Stellaria aquaticum</i>	0.012	—	—	—
石竹科	萝藦	<i>Metaplexis japonica</i>	—	0.015	—	—
萝藦科	蔊菜	<i>Rorippa indica</i>	—	0.019	—	—
十字花科	野葱	<i>Allium chrysanthum</i>	0.061	—	—	—
百合科	猪殃殃	<i>Galium aparine</i>	0.026	0.045	0.035	0.410
茜草科						

表 4 11 月不同结构杨树林分下林下植物种类及重要值
Table 4 Species and importance value of understory vegetation of different stand structures in November

科名	种名	拉丁名	株行距 (m)			
			6×6	4.5×8	5×5	3×8
菊科	苍耳	<i>Xanthium sibiricum</i>	—	—	0.052	—
	鬼针草	<i>Bidens pilosa</i>	—	0.046	—	—
	黄鹌菜	<i>Youngia tenuifolia</i>	0.353	0.075	0.187	0.170
	醴肠	<i>Eclipta prostrata</i>	—	0.085	—	0.023
	泥胡菜	<i>Hemistepta lyrata</i>	—	0.012	—	—
	小蓬草	<i>Conyza canadensis</i>	0.023	—	—	—
	小薊	<i>Cephalanoplos segetum</i>	0.022	0.022	—	0.123
禾本科	稗	<i>Echinochloa crusgali</i>	0.102	0.014	0.191	0.147
	狗尾草	<i>Setaira viridis</i>	0.043	—	0.027	—
	结缕草	<i>Zoysia japonica</i>	—	0.129	—	0.043
	白茅	<i>Imperata cylindrica</i>	—	0.031	0.101	0.057
	早熟禾	<i>Poa nemoralis</i>	0.031	0.031	—	—
	牛膝	<i>Achyranthes bidentata</i>	0.189	0.057	0.145	0.025
苋科	青葙	<i>Celosia argentea</i>	0.035	0.026	0.020	—
	喜旱莲子草	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	0.022	0.265	0.126	0.249
百合科	麦冬	<i>Ophiopogon japonicus</i>	—	0.030	—	—
茜草科	鸡矢藤	<i>Paederia scandens</i>	—	0.013	—	—
大戟科	铁苋菜	<i>Acalypha australis</i>	—	0.049	—	—
堇菜科	匍匐堇菜	<i>Viola pilosa</i>	0.016	—	—	0.098
爵床科	爵床	<i>Rostellularia procumbens</i>	0.020	—	—	0.037
里白科	芒萁	<i>Dicranopteris dichotoma</i>	0.017	—	0.021	—
牻牛儿苗科	老鹳草	<i>Geranium wilfordii</i>	0.022	0.045	—	0.022
蔷薇科	蛇莓	<i>Duchesnea indica</i>	0.067	0.026	0.098	—
莎草科	扁穗莎草	<i>Cyperus compressus</i>	—	—	0.032	—
蹄盖蕨科	假蹄盖蕨	<i>Athyriopsis japonica</i>	—	0.043	—	—
旋花科	田旋花	<i>Convolvulus arvensis</i>	0.016	—	—	—

常见种。苍耳、鬼针草、鸡矢藤、泥胡菜、扁穗莎草、假蹄盖蕨、田旋花、铁苋菜、沿阶草都只在 1 种林分中出现过且重要值也不大,可以被认为是偶见种,11 月偶见种所占比例相比 5 月较大。

2.1.3 植物多样性指数 5 月,4 种林分结构之间 Shannon 指数无显著差异,4.5 m×8 m 与 6 m×6 m 的 Shannon 指数分别为 2.03 与 1.94,稍微高于高密度林分 5 m×5 m 与 3 m×8 m 的 1.86 与 1.88。11 月,4.5 m×8 m 林分的 Shannon 指数(2.31)最高,与其他 3 种林分结构之间存在显著差异,5 m×5 m 林分 Shannon 指数(1.93)最小。杨树人工林林下植物 Pielou 均匀度指数与 Shannon 指数呈相反的变化趋势。5 月,3 m×8 m 林分的 Pielou 均匀度指数较高,与低密度的 4.5 m×8 m 与 6 m×6 m 林分之间存在显著差异。11 月,同样是 3 m×8 m 林分的 Pielou 均匀度指数较高,而 6 m×6 m 林分的最低,两者之间存在显著差异。总体上看,高密度林分林下植物 Pielou 均匀度指数较大,可能是因为高密度林分林下植物物种数少,分布更均匀。

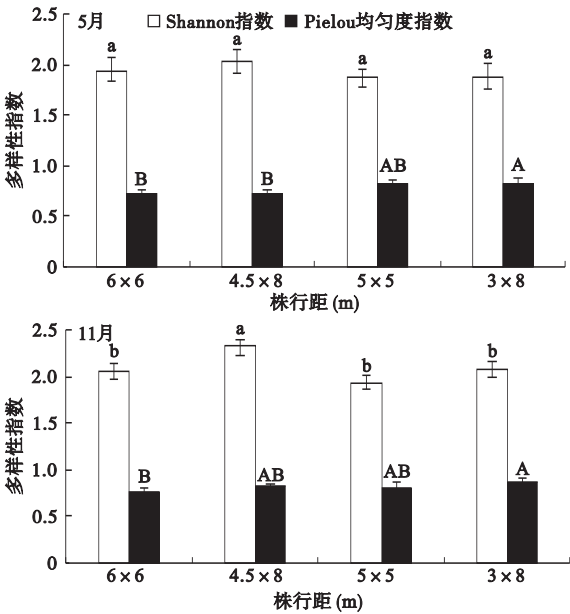


图 1 不同林分结构林下植物多样性指数
Fig.1 Diversity index of the understory vegetation of different stand structures
不同小写字母表示不同林分结构林下植物 Shannon 指数的差异显著 (P<0.05); 不同大写字母表示不同林分结构林下植物 Pielou 均匀度指数的差异显著性 (P<0.05)。

2.2 不同林分结构林下植物生物量的差异

5 月的林下植物地上部分生物量在不同林分结构下不存在显著差异,但低密度栽植的林分林下植物生物量明显高于高密度栽植的林分。至 11 月,3 m×8 m 林分林下植物生物量显著低于低密度林分(图 2)。低密度的杨树林分林内的光照和温、湿度条件要略优于高密度林分;在相同的林分密度下,不同的配置方式对林下植物的生物量有的一定影响,但影响程度并不大。5 月的林下植物物种多为冬型一年生植物,11 月则多为夏型一年生植物,而本调查林分的林下植物主要以夏型一年生植物为主,因此 11 月采样的林下植物及其生物量要多于 5 月。

2.3 不同林分结构林下植物养分积累的差异

2.3.1 林下植物养分含量 林分结构不同,其林下植物的养分含量也有所不同(图 3)。5 月,N、P、Mg 含量均以低密度长方形配置的 4.5 m×8 m 林分最大,其中 4.5 m×8 m 林分的 N 含量与高密度的 3 m×8 m 与 5 m×5 m 林分之间存在显著差异;K、Ca 含量在 4 种林分结构之间无差异,均为 6 m×6 m 林分较高,5 m×5 m 林分最低。11 月,N、Mg 含量以 4.5 m×8 m 林分与 3 m×8 m 林分较大,与 6 m×6 m 和 5 m×5 m 之间存在显著差异;P、Ca 含量在 4 种林分结构之间无差异,但均为 5 m×5 m 林分的含量较低。5 月养分含量依大小顺序排列为 Ca>K>N>Mg>P,11 月则为 K>Ca>Mg>N>P。11 月 Mg 浓度较高,可能是由于 Mg 元素在植物体内保留时间稍微长一些的原因。

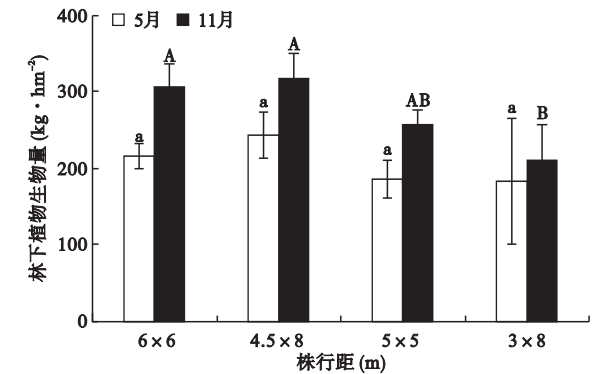


图 2 不同林分结构下林下植物的地上部分生物量
Fig.2 Biomass of understory vegetation in different stand structures
不同小写字母表示 5 月不同林分结构林下植物生物量的差异显著 ($P<0.05$);不同大写字母表示 11 月不同林分结构林下植物生物量的差异显著 ($P<0.05$)。

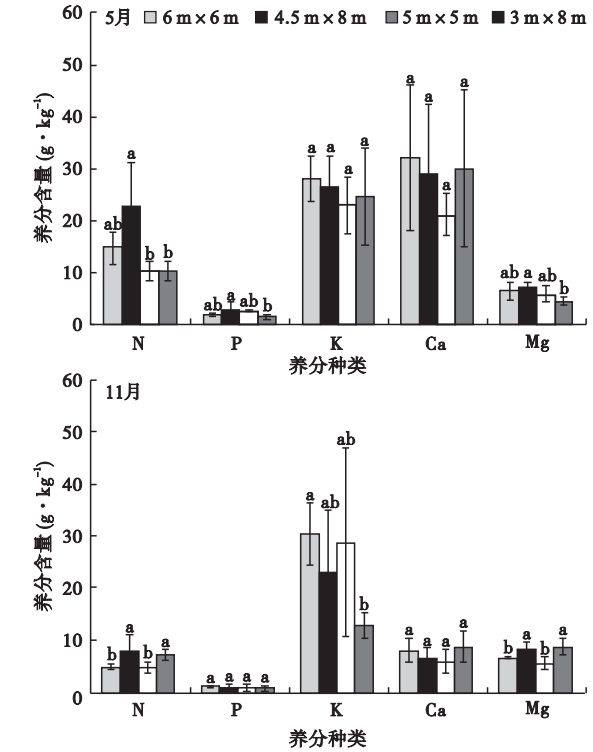


图 3 不同林分结构林下植物养分含量比较
Fig.3 Comparison of nutrient concentration of understory vegetation in different stand structures
不同小写字母表示不同林分结构林下植物养分含量的差异显著 ($P<0.05$)。

2.3.2 林下植物养分累积量 5 月,4.5 m×8 m 林分林下植物 5 种养分的累积量均要高于其他 3 种结构的林分(表 5),N 的累积量与其余 3 种林分之间存在显著差异;除 P 外,其余养分的累积量均为低密度林分高于高密度林分。11 月,4.5 m×8 m 林分 N 的累积量与其余 3 种林分之间存在显著差异;P、Ca 养分累积量在 4 种林分结构之间均无差异;3 m×8 m 林分 K 的累积量最低,与其余 3 种林分之间存在显著差异;Mg 养分累积量 4.5 m×8 m 林分最高,5 m×5 m 林分最低,且存在显著差异。各种林分结构之间的养分累积量与其养分差异性一致,可能是因为 4 种林分结构的生物量不存在显著差异,所以养分累积量主要还是由各林分的养分含量决定。

3 讨论

3.1 林下植物多样性

物种多样性指数是把物种数、个体数、分布特性等信息结合起来的一个统计量,能定量反映林分中物种的丰富度、变化程度及均匀性(于立忠等, 2006)。物种多样性反映了生物群落在组成、结构、功能和动态方面的异质性,体现了群落结构类型、组

表 5 不同林分结构林下植物养分积累量
Table 5 Accumulated nutrient of understory vegetation of different stand structures

月份	株行距(m)	N(kg·hm ⁻²)	P(kg·hm ⁻²)	K(kg·hm ⁻²)	Ca(kg·hm ⁻²)	Mg(kg·hm ⁻²)	合计(kg·hm ⁻²)
5	6×6	3.16±0.65 ab	0.44±0.06 b	6.08±0.94 ab	6.93±1.02 a	1.40±0.27 ab	18.02
	4.5×8	5.53±0.51 a	0.74±0.12 a	6.44±1.00 a	7.06±0.94 a	1.74±0.26 a	21.51
	5×5	1.93±0.38 b	0.50±0.03 ab	4.26±0.80 b	3.93±0.76 a	1.09±0.27 bc	11.71
	3×8	1.88±0.34 b	0.28±0.10 b	4.48±0.72 b	5.45±0.75 a	0.86±0.16 c	12.94
11	6×6	1.50±0.17 B	0.29±0.06 A	9.28±1.77 A	2.45±0.65 A	2.05±0.07 B	15.57
	4.5×8	2.55±0.57 A	0.26±0.07 A	7.31±1.80 A	2.08±0.73 A	2.66±0.38 A	14.86
	5×5	1.19±0.30 B	0.22±0.03 A	7.35±1.66 A	1.54±0.43 A	1.44±0.25 C	11.73
	3×8	1.57±0.24 B	0.17±0.06 A	2.70±0.54 B	1.88±0.46 A	1.86±0.30 B	8.18

不同小写字母表示 5 月不同林分结构林下植物各养分积累量的差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示 11 月份不同林分结构林下植物各养分积累量的差异显著 ($P<0.05$)。

织水平、发展阶段、稳定程度和生境的差异(杨立学和孙悦志,2013)。林下植物的多样性与林分密度的关系密切,但如何影响并无定论。有研究表明,降低密度会减少物种多样性(Buongiorno *et al.*, 1994; Nagai & Yoshida, 2006),或对物种多样性无影响(Reader & Bricker, 1992),但多数研究认为,降低密度林分可增加物种丰富度和多样性(雷相东等, 2005; 李民义等, 2013),这可能与合适的密度选择有关。吕婧娴等(2010)对不同密度油松人工林研究后发现,随着林分密度的增大,其林下灌木层多样性指数先增大后减小,草本层则先增大后减小再增大,只有在林分密度为 1717~1867 株·hm⁻²时,多样性指数均达到最大。本研究中,低密度林分的物种丰富度(即种的数量)要高于高密度林分,这可能是因为随着杨树林分密度的降低,林内郁闭度减小,改善了林内的光照及温湿条件,增加了环境的异质性(李春义等, 2007),有利于林下植物的发育。同时,不同配置方式对林下环境也会产生一定影响,长方形配置由于其郁闭度要小于正方形配置方式,所以其林下植物多样性会比正方形配置林分的多样性指数高。通过分析林分冠层空隙度与林下植物物种丰富度的关系发现(图 4),二者之间呈一定的正相关性。林分密度低使得林分冠层空隙度增加,更多的入射光线到达冠层内部,使杨树林下植物得到迅速更新,提高群落物种的多样性,林下植物物种丰富度增加。而随着密度的增大,林下光照及水热条件发生变化,林内空间环境更适合阴生植物繁衍生长,物种结构趋于单一(李民义等, 2013)。

本研究表明,低密度长方形配置的 4.5 m×8 m 林分结构林下植物多样性指数最高,高密度正方形配置的 5 m×5 m 林分 Shannon 指数最小,这表明低密度的林分有利于林下植物的生长,其 Shannon 指

数大于高密度林分。5 月 4 种林分结构林下植物的 Shannon 指数变化趋势不大,这可能是因为 5 月主要是冬型植物,种类不多,同时由于冬天落叶,林下环境受林分结构影响不大。11 月 4 种林分结构林下植物 Shannon 指数变化趋势明显,应该是由于 11 月林下植物主要是夏型一年生植物,种类较多,而夏季林木生长旺盛,林下环境受林木影响较大。5 月与 11 月的优势种与常见种并不完全重叠,这可能是由于 5 月的林下植物物种多为冬型一年生植物,而 11 月则多为夏型一年生植物。同时,由于不同结构林分的环境不同,其林下植物种类、生长期的早晚和长短也有一定差异。

林分的 Pielou 均匀度指数与物种数目关系不大,而与各物种在群落内分布的均匀程度有关,种间的个体数量差异程度越小,群落内的均匀性就越高。许多研究表明, Pielou 均匀度指数与 Shannon 指数基本一致,随着密度的降低而增加(于立忠等, 2006; 魏天兴等, 2012),但本研究发现 Pielou 均匀度指数与 Shannon 指数变化趋势并不一致,有可能是

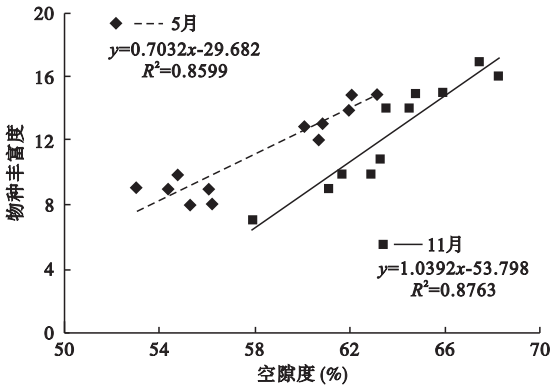


图 4 林下植物物种丰富度与林分冠层空隙度关系
Fig. 4 Relationship between understory species abundance and stand gap fraction

本研究对象为幼龄林,林分内群落系统未达到稳定状态,所以高密度配置林分的林下植物种类较少,生长更均匀。因此,为了维持和增加物种多样性,在林分发展的一定阶段,可以采取合理经营措施如间伐来控制林分密度。

3.2 林下植物养分含量与养分归还量

虽然林下植物的生物量占森林地上部分生物量的比例很小 (Peichl & Arain, 2006; Maya *et al.*, 2013), 但其在森林生态系统中有着重要地位 (Gilliam, 2007)。目前, 森林植物生物量的研究方法较多, 研究内容也相对丰富, 但对人工林林下植物生物量的研究较少, 且研究方法变化不大, 仍以传统的全收获法为主 (刘凤娇和孙玉军, 2011)。本研究表明, 林下植物的生物量与林分密度之间呈显著的负相关性, 这与其他结果类似 (肖珍彪, 2006; 张炜平等, 2007), 可能是密度较低的林分有较好的光照条件, 有利于林下植物生物量积累 (Ares *et al.*, 2010)。

林下植物在人工林生态系统中的主要作用之一是提高系统的自肥功能, 保持和提高地表养分。许多研究 (马祥庆等, 2000; 文仕知等, 2012) 表明, 林下植物养分含量相对较高, 尤以 K、Ca、Mg 元素明显, 可见林下植物对养分的富集能力较强, 而且林下植物积累的养分归还快, 大部分在当年就归还给了林地, 因此加强林下植物管理对维护人工林系统的养分平衡有积极意义。本研究中, 5 月低密度林分林下植物养分含量均要高于高密度林分, N 元素浓度以 4.5 m×8 m 林分最大, 这可能是因为低密度林分林木的养分吸收量相对较少, 林下植物有较好的 N 素营养, 同时因为光照等条件相对优于高密度林分, 植物的生长状况也相对更好。研究发现, 5 月林下植物养分含量高于 11 月, 可能由于 5 月林下植物正盛, 体内 N、P、Ca 营养较多; 至 11 月林下植物生长进入枯萎期, 体内一部分 N、P、Ca 随着落叶归还给土壤。

同样, 低密度的林分林下植物 5 种元素累积量在 5 月与 11 月均要大于高密度林分, 这可能是因为低密度林分其光照等条件相对优于高密度林分 (李春义等, 2007), 植物的生长状况相对较好, 在养分竞争中相对占优势从而累计较多的养分。不同林分结构对于林下植物中大量元素的含量和累积量的影响是不同的, 合适的栽植密度可以调节林分光照和林下微环境, 减少林木对于养分的大量吸收, 利于林下植物养分元素的积累。

不同的配置方式对于杨树林林下植物的物种数、生物量、多样性指数以及养分含量的影响是复杂的, 还有待进一步研究探讨, 而实际操作中, 应兼顾发挥杨树林的生态功能以及用材林功能而采取最优的营林措施。

参考文献

- 方升佐. 2008. 中国杨树人工林培育技术研究进展. 应用生态学报, **19**(10): 2308–2316.
- 方升佐, 田野. 2012. 人工林生态系统生物多样性与生产力的关系. 南京林业大学学报: 自然科学版, **36**(4): 1–6.
- 冯宗炜, 陈楚莹, 王开平, 等. 1985. 亚热带杉木纯林生态系统中营养元素的积累、分配和循环研究. 植物生态学与地植物学丛刊, **9**(4): 245–256.
- 雷相东, 陆元昌, 张会儒, 等. 2005. 抚育间伐对落叶松云冷杉混交林的影响. 林业科学, **41**(4): 78–85.
- 李春义, 马履一, 王希群, 等. 2007. 抚育间伐对北京山区侧柏人工林林下植物多样性的短期影响. 北京林业大学学报, **29**(3): 60–66.
- 李国雷, 刘勇, 吕瑞恒. 2009. 华北落叶松人工林密度调控对林下植被发育的作用过程. 北京林业大学学报, **31**(1): 19–24.
- 李民义, 张建军, 郭宝妮, 等. 2013. 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应. 生态学杂志, **32**(5): 1083–1090.
- 刘凤娇, 孙玉军. 2011. 林下植被生物量研究进展. 世界林业研究, **24**(2): 53–58.
- 吕婧娴, 王得祥, 张宋智, 等. 2010. 小陇山林区不同密度油松人工林林下植物多样性研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **38**(11): 49–55.
- 马祥庆, 刘爱琴, 马壮, 等. 2000. 不同代数杉木林养分积累和分布的比较研究. 应用生态学报, **11**(4): 501–506.
- 魏天兴, 陈致富, 赵健, 等. 2012. 低效低质人工林优化改造后林下植被多样性研究. 生态环境学报, **25**(1): 800–806.
- 文仕知, 黄采艺, 杨丽丽, 等. 2012. 桉木人工林营养元素的季节动态、空间分布与生物循环研究. 水土保持学报, **26**(6): 96–101.
- 肖珍彪. 2006. 不同密度福建柏林下植物和土壤肥力变化. 引进与咨询, (7): 81–82.
- 杨立学, 孙悦志. 2013. 不同林龄胡桃楸林下植物多样性的差异. 生态学杂志, **32**(4): 807–812.
- 于立忠, 朱教君, 孔祥文, 等. 2006. 人为干扰(间伐)对红松人工林林下植物多样性的影响. 生态学报, **26**(11): 3757–3764.
- 张炜平, 黄聚聪, 李熙波. 2007. 杉木林林下植被生物量影

- 响因素. 福建林业科技, **34**(3): 97–99.
- 赵传燕, 齐家国, 沈卫华, 等. 2009. 利用半球图像反演祁连山区青海云杉(*Picea crassifolia*)林盖度. 生态学报, **29**(8): 4196–4205.
- Ares A, Neill AR, Puettmann KJ. 2010. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands. *Forest Ecology and Management*, **260**: 1104–1113.
- Buongiorno J, Dahir SL, Hsien C, *et al.* 1994. Tree size diversity and economic returns in uneven-aged forest stands. *Forest Science*, **41**: 83–103.
- Fang SZ, Xie BD, Liu D, *et al.* 2011. Effects of mulching materials on nitrogen mineralization, nitrogen availability and poplar growth on degraded agricultural soil. *New Forests*, **41**: 147–162.
- Fang SZ, Xie BD, Zhang HC. 2007. Nitrogen dynamics and mineralization in degraded agricultural soil mulched with fresh grass. *Plant and Soil*, **300**: 269–280.
- Gilliam FS. 2007. The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems. *Bioscience*, **57**: 845–858.
- Liu SR, Li XM, Niu LM. 1998. The degradation of soil fertility in pure larch plantation in the northeastern part of China. *Ecological Engineering*, **10**: 75–86.
- Maya G, Laurent A, Anne GB, *et al.* 2013. Contribution of understory species to total ecosystem aboveground and belowground biomass in temperate *Pinus pinaster* Ait. forests. *Forest Ecology and Management*, **289**: 38–47.
- Nagai M, Yoshida T. 2006. Variation in understory structure and plant species diversity influenced by silvicultural treatments among 21- to 26-year old *Picea glehnii* plantations. *Journal of Forest Research*, **11**: 1–10.
- Peichl M, Arain AA. 2006. Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, **140**: 51–63.
- Reader RJ, Bricker BD. 1992. Value of selectively cut deciduous forest for understory herb conservation: An experimental assessment. *Forest Ecology and Management*, **51**: 317–327.
- VanderSchaaf CL. 2008. Estimating understory vegetation response to multi-nutrient fertilization in Douglas-fir and ponderosa pine stands. *Journal of Forest Research*, **13**: 43–51.
-
- 作者简介 燕亚飞,女,1977年生,博士研究生,主要从事人工林定向培育研究。E-mail: gigi0924@163.com
- 责任编辑 张 敏
-