

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.06.001

带状改造对川中丘陵区柏木人工林林下 植物多样性的影响

别鹏飞¹, 斯顺江², 周大松^{3,4}, 陈俊华^{3,4}, 赵润¹, 慕长龙^{3,4*}

(1. 绵阳师范学院, 四川 绵阳 621000; 2. 四川长江生态景观建设有限公司, 四川 成都 610000;

3. 四川龙门山森林生态系统国家定位观测研究站, 四川 平武 622553; 4. 四川省林业科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要:对川中丘陵区 35 a~40 a 生、天然更新差的柏木纯林进行了不同宽度的带状采伐实验, 目的是研究不同采伐带宽对柏木林下灌草物种多样性以及柏木生长量的影响。分别于 2011 年、2012 年、2014 年和 2016 年调查了保留带林下植物物种多样性以及柏木年均生长量。数据分析显示, 不同采伐带对灌木层、草本层的生物多样性指数、林分生长量均产生了不同影响, 随年份的增加 8 m、10 m 保留带林下灌木物种多样性指数逐渐高于其他带宽, 且显著高于对照 ($P < 0.05$), 而草本物种多样性指数相对于灌木物种多样性呈逐渐降低趋势; 保留柏木年均株高、年均胸径生长量显著大于对照 ($P < 0.05$), 其中 8 m、10 m 带最高。据以上结果, 就本实验的 5 种处理而言, 对于改良低效柏木人工林林下植物多样性适宜的采伐带宽度应为 8 m 和 10 m。

关键词:带状改造; 人工柏木林; 林分生长; 植物多样性

中图分类号: S718.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5508(2018)06-0001-06

Effects of Strip Reform on Understory Plant Diversity of *Cupressus funebris* Plantations in Hilly Areas of Central Sichuan

BIE Peng-fei¹ SI Shun-jiang² ZHOU Da-song^{3,4} CHEN Jun-hua^{3,4}
ZHAO Run¹ MU Chang-long^{3,4*}

(1. Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China;

2. Sichuan Changjiang Ecological Landscape Construction Co., Ltd., Chengdu 610000, China;

3. National Positioning Observation and Research Station of Forest Ecosystem in the Longmen Mountains, Pingwu 622553, Sichuan, China;

4. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

Abstract: In order to study the effects of different cutting bands on the species diversity and the growth of cypress trees in the pure cypress forest with 35 ~ 40 years old and poor natural regeneration in the hilly area of central Sichuan. In 2011, 2012, 2014 and 2016, investigations were made on the species diversity of understory plants and annual growth of cypress trees. The data analysis showed that different cutting zones had different effects on the biodiversity index and stand growth of shrub and herbage layers. With the increase of years, the species diversity index of 8 m and 10 m wide shrubs was higher than that of other bandwidth, and significantly higher than that of the control group ($P < 0.05$), but the diversity index of herbaceous species showed a gradual decrease relative to the shrub species diversity. Average annual growth of plant height and DBH of the reserved cypress were significantly higher than those of the control group ($P < 0.05$). The highest annual growth of 8 m and 10 m wide reserved cypress was found in the

收稿日期: 2018-07-31

基金项目: 国家科技支撑计划子课题(2015BAD07B0402); 四川省财政专项项目(2018CZZX11); 森林和湿地生态恢复与保育四川省重点实验室资助项目。

作者简介: 别鹏飞(1990-), 男, 研究实习员, 本科, 研究方向: 生态保护与评价。

* 通讯作者: 慕长龙, e-mail: mucl2006@yahoo.net。

reserved cypress. For the five treatments, the suitable cutting bands for improving the plant diversity under the inefficient cypress plantation should have the width of 8 m and 10 m.

Key words: Strip reform, *Cupressus funebris* plantation, Stand growth, Plant diversity

植物物种多样性是群落多样性和其所在生态环境多样性的总和^[1],物种多样性是生态系统中反映群落结构与功能的一个重要指标^[2,3]。对生态系统的物种多样性评价是当前生态学、林业等领域的热点话题,而较高的物种多样性对于森林系统稳定性、平衡性有重要意义^[4,5]。对于人工林而言,林下生物多样性对于其生态效益、经济效益有重要意义^[6~9],同时,林下的灌木层、草本层及其枯落物层与人工林土壤性质改良、水土保持、水源涵养功能有密切相关性^[10~12]。研究发现,人工林林分过于单一,其水土流失现象严重,而林下物种多样性丰富——即林分构成相对复杂的林分,其水土保持功能明显优于前者^[13]。目前,我国人工林普遍存在生物多样性低、结构单一以及自然演替过缓等问题^[14],对人工林经营模式的探究显得尤为重要。

川中丘陵区是长江上游生态屏障的重要组成部分,目前仍存在大面积林分结构单一、物种多样性低下、天然更新不良、水土流失严重和经济效益明显下降的人工柏木防护林,急需进行结构调整^[15]。人工柏木林的研究目前主要集中在林分结构与水土保持^[16~18]、抚育改造和土壤养分^[19~21]以及林下植被生物量^[22,23]等方面。而对于人工柏木林林下物种多样性研究也限于间伐、林窗对林下物种多样性的影响^[24~26],而带状改造对柏木人工林林下植被多样性和环境的影响,主要是针对改善叶蜂危害状况^[27],少见有关于保留带林下物种多样性及其年均生长量的动态研究。

本研究以2010年对四川省盐亭县柏木纯林带状改造试验,并于2011年、2012年、2014年及2016年进行了林下植物物种多样性及保留柏木年生长量调查,以探讨不同带宽采伐对保留带林下植物多样性及林分生长的影响,为开展生态、经济、高效型的防护林研究提供参考。

1 研究区概况

研究区位于四川省盐亭县林山乡(105°27'E, 31°16'N),地处川中丘陵地带,地貌以丘陵和低山为主;属亚热带湿润季风气候区,四季分明,日照1 300 h~1 400 h,年均气温13.7℃~16.1℃;年均

降雨量800 mm~1 200 mm,主要集中在5月—8月,土壤以紫色土为主^[16];无霜期300d以上^[15]。20世纪60年代四川荒山绿化造林主要树种为柏木(*Cupressus funebris*),目前人工柏木林仍为川中丘陵区的主要林型之一。随着柏木生长,林分密度过大、林下植被物种多样性低、自然演替不良、水土保持效益差等问题突出^[28]。

对研究区调查发现,除主要树种柏木外,其他乔木主要有桤木(*Alnus cremastogyne* Burk)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)以及少数栎类;林下主要灌木有化香(*Platycarya strobilacea* Sieb)、黄荆(*Vitex negundo* Linn)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、瑞香(*Daphne odora* Thunb)、铁籽(*Myrsine africana*)、悬钩子(*Rosaceae*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、鼠李(*Rhamnus davurica* Pall)、蔷薇(*Rosa multiflora* Thunb)、烟管莢蒾(*Viburnum utile* Hemsl)、胡颓子(*Elaeagnus pungens* Thunb)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz)、小叶菝葜(*Smilax microphylla* C. H. Wright)等;主要草本为白茅(*Imperata cylindrica* Beauv)、酢浆草(*Oxalis corniculata* Linn)、地瓜藤(*Caulis Fici Tikouae*)、飞蓬(*Erigeron acer* Linn)、过路黄(*Lysimachia christinae* Hance)、苘草(*Arthraxon hispidus* Makino)、栗褐苔草(*Carex brunnea* Thunb)、蛇莓(*Duchesnea indica* Focke)、铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris* Linn)、蜈蚣草(*Eremochloa ciliaris* Merr)、夏枯草(*Prunella vulgaris* Linn)、凤尾蕨(*Pteridaceae*)、蛇葡萄(*Ampelopsis sinica* W. T. Wang)、青茅(*Deyeuxia arundinacea* Beauv)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

于2010年在盐亭县林山乡选取地形、土壤等立地条件相对一致人工柏木林。沿垂直于等高线方向从坡脚至坡顶对样地进行带状采伐处理,分别做4 m、6 m、8 m、10 m带宽采伐带以及对照组(即未经人为处理柏木林)5种处理,每种处理3个重复。另外,每个采伐带之间保留相同带宽的保留带,在采伐带内,分别栽植桤木(*Alnus cremastogyne*)、台湾桤木(*Alnus formosana*)、喜树(*Camptotheca acuminata*)、

樟(*Cinnamomum camphora*)4种阔叶树,栽植株行距均为2 m×3 m。采用近自然方式经营。分别于2011年、2012年、2014年、2016年对实验样地进行调查与数据收集。

2.2 柏木生长及林下物种多样性调查

对保留带的所有柏木进行每木检尺,测量其胸径、树高,计算不同保留带柏木的年均生长量。

胸径:用围尺在胸高位置逐株测量,用断面积加权法求算林分平均胸径和断面积。

树高:用测高标杆测量林木高度,并绘制树高生长曲线,以林分平均胸径所对应的曲线树高作为林分平均树高。

林下灌草物种多样性:由于每个采伐带和保留带相对较长,为保证取样数据能更准确反映样地真实情况,每条带分别于坡顶、坡中以及坡底位置分别沿带宽方向均匀设置3个2 m×2 m的样方对灌木种数、高度、盖度、株数进行统计;在每个灌木样方内设置1 m×1 m的样方对草本种数、盖度、高度进行统计。计算灌草的丰富度指数(S)、Shannon-Weiner多样性指数、Simpson优势度指数以及Pielou均匀度指数,计算公式如下:

重要值=(相对密度+相对盖度+相对频度)/300
丰富度指数(S): $S = i$ (种*i*所在样方物种总数)

Shannon-Weiner多样性指数:

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

Simpson多样性指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s (N_i/N)^2$$

Pielou均匀度指数:

$$P = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i / \ln S$$

式中: N_i 为种*i*的重要值; N 为种*i*所在样方的各个种重要值之和; P_i 为种*i*的相对重要值; S 为所计算样地中的物种数目。

2.3 数据分析

采集数据用Excel 2016进行整理,采用单因素方差分析(One-way Anova)和Duncan多重比较,分析林下物种多样性之间以及各保留带柏木年均生长量的差异性。

3 结果与分析

3.1 不同保留带在不同年份对林下物种多样性影响

除2014年灌木层的Simpson指数最高为10 m带外,其他3个年份最大值都为8 m带,且均与对照(CK)处理之间存在显著性差异($P < 0.05$);从2011年至2016年4个年份中灌木层的Simpson指数由大到小分别为8 m带>4 m带>CK>6 m带>10 m带,8 m带>4 m带>10 m带>6 m带>CK、10 m带>8 m带>4 m带>6 m带>CK、8 m带>10 m带>6 m带>4 m带>CK。草本层Simpson指数在2011年4 m带、6 m带与8 m带、10 m带、对照(CK)之间存在显著性差异($P < 0.05$),其他3个年份各个处理之间无显著性差异。

草本层Simpson指数在前3个年份中的各个处理间均大于灌木层Simpson指数;但在2016年,除6 m带之外各个处理的灌木Simpson指数均大于草本层Simpson指数(见表1)。

表1 不同年份保留带林下灌草 Simpson 指数

Tab. 1 Simpson index of understory shrubs and herbs in preservation beltds in different years

冠层	年度	采伐带宽(m)				
		4 m	6 m	8 m	10 m	ck
灌木层	2011	0.56 ± 0.02ab	0.43 ± 0.05c	0.64 ± 0.04a	0.20 ± 0.05d	0.52 ± 0.10b
	2012	0.68 ± 0.07ab	0.56 ± 0.09b	0.84 ± 0.09a	0.62 ± 0.14b	0.49 ± 0.19b
	2014	0.67 ± 0.84b	0.64 ± 0.04bc	0.74 ± 0.07ab	0.79 ± 0.84a	0.55 ± 0.09c
	2016	0.75 ± 0.12bc	0.81 ± 0.10ab	1.01 ± 0.10a	0.91 ± 0.06a	0.65 ± 0.14c
草本层	2011	0.84 ± 0.07a	0.90 ± 0.05a	0.78 ± 0.06b	0.80 ± 0.08b	0.79 ± 0.10b
	2012	0.89 ± 0.06a	0.90 ± 0.09a	0.88 ± 0.07a	0.89 ± 0.08a	0.82 ± 0.16a
	2014	0.84 ± 0.09a	0.84 ± 0.18a	0.88 ± 0.70a	0.84 ± 0.07a	0.80 ± 0.13a
	2016	0.76 ± 0.11a	0.83 ± 0.05a	0.87 ± 0.14a	0.79 ± 0.15a	0.90 ± 0.10a

注:同行中相同字母表示无显著差异,For each line, means with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$.

对保留带灌木 Shannon-Weiner 指数统计可知,除2014年中10 m带最大且与对照(CK)之间不存在显著性差异;其余3个年份中灌木 Shannon-Weiner 指数最大值均为8 m带,其中2011年、2016年

显著大于对照($P < 0.05$);从2011年至2016年4个年份中各个处理间灌木 Shannon-Weiner 指数由大到小分别为8 m带>CK>4 m带>6 m带>10 m带,8 m带>CK>10 m带>4 m带>6 m带、10 m

带 > CK > 8 m 带 > 6 m 带 > 4 m 带、8 m 带 > 10 m 带 > 6 m 带 > 4 m 带 > CK。对于保留带草本层 Shannon-Wiener 指数,2011 年、2012 年、2014 年、2016 年最大值分别为 4 m 带、6 m 带、8 m 带、10 m 带。

灌木层与草本层对比可知,前 3 个年份各个带宽林下灌木 Shannon-Wiener 指数均小于草本层,而 2016 年除 6m 带和对照组灌木层 Shannon - Wiener 指数略小于草本层外,其余带宽均为灌木层大于草本层(见表 2),这与林下灌草的 Simpson 指数规律基本一致;并且随年份增加草本层 Shannon-Wiener

指数呈下降趋势,而灌木层呈上升趋势。

以上原因可能是采伐后,保留带柏木林下环境异质性得到改变,更加适应植物生长需要。但是由于带宽不同,对保留带环境的影响也不尽相同。采伐初期,草本由于自身生长周期快、适应性强等原因,可以较快的速度占据林下生长空间和资源;灌木较草本生长周期慢,但经过一定时间,灌木生长也逐渐趋于稳定,由于灌木相对草本根系发达以及植株较高等原因,可以通过竞争获得较多光照、水分等资源。

表 2 不同年份保留带林下灌草 Shannon-Wiener 指数

Tab. 2 Shannon-Wiener index of understory shrubs and herbs in preservation beltds in different years

冠层	年度	采伐带宽(m)				
		4 m	6 m	8 m	10 m	ck
灌木层	2011	0.94 ± 0.03b	0.69 ± 0.11c	1.35 ± 0.18a	0.46 ± 0.06d	1.12 ± 0.25b
	2012	1.23 ± 0.12b	0.92 ± 0.07c	1.88 ± 0.14a	1.24 ± 0.18b	1.67 ± 0.31a
	2014	1.10 ± 0.16b	1.15 ± 0.13b	1.45 ± 0.14a	1.65 ± 0.19a	1.53 ± 0.27a
	2016	2.09 ± 0.21b	2.15 ± 0.17b	2.70 ± 0.20a	2.67 ± 0.32a	1.91 ± 0.1b
草本层	2011	1.97 ± 0.15a	1.74 ± 0.07a	1.76 ± 0.26a	1.80 ± 0.16a	1.74 ± 0.35a
	2012	2.37 ± 0.28a	2.46 ± 0.26a	2.22 ± 0.25ab	2.29 ± 0.18ab	1.99 ± 0.25b
	2014	2.03 ± 0.36a	1.97 ± 0.21a	2.25 ± 0.15a	2.02 ± 0.19a	2.11 ± 0.40a
	2016	1.85 ± 0.10b	2.40 ± 0.13a	2.61 ± 0.34a	2.45 ± 0.35a	2.43 ± 0.26a

注:同行中相同字母表示无显著差异,For each line,means with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$.

随着年份的增加,不同处理林下灌木层和草本层的 Pielou 均匀度指数均大于对照组,其中后 3 个年份中 6 m 带、8 m 带、10 m 带与对照均存在显著性差异($P < 0.05$)。林下灌木层 Pielou 指数,在 2012 年至 2016 年 4 个年份最大值分别出现在 8 m 带、8 m 带、10 m 带、6 m 带,除 2014 年外均显著大于对照

组($P < 0.05$)。林下草本 Pielou 指数除 2011 年外,其他 3 个年份各带宽均显著大于对照组($P < 0.05$) (见表 3)。说明采伐带对保留带林下灌草均匀度存在显著的影响效应,并且随着年份增加,各个带宽的 Pielou 值趋于一致水平。

表 3 不同年份保留带林下灌草 Pielou 均匀度指数

Tab. 3 Pielou index of understory shrubs and herbs in preservation beltd under different years

冠层	年度	采伐带宽(m)				
		4 m	6 m	8 m	10 m	ck
灌木层	2011	0.68 ± 0.08a	0.63 ± 0.04a	0.69 ± 0.15a	0.54 ± 0.13a	0.57 ± 0.19a
	2012	0.89 ± 0.17ab	0.84 ± 0.07ab	0.97 ± 0.10a	0.77 ± 0.09b	0.51 ± 0.10c
	2014	0.70 ± 0.12bc	0.83 ± 0.17ab	0.90 ± 0.14a	0.92 ± 0.08a	0.62 ± 0.10c
	2016	0.94 ± 0.05a	0.95 ± 0.08a	0.91 ± 0.20a	0.94 ± 0.05a	0.70 ± 0.11b
草本层	2011	0.70 ± 0.12a	0.64 ± 0.10a	0.71 ± 0.09a	0.73 ± 0.13a	0.67 ± 0.18a
	2012	0.88 ± 0.15a	0.91 ± 0.12a	0.89 ± 0.15a	0.92 ± 0.08a	0.63 ± 0.11b
	2014	0.88 ± 0.13a	0.95 ± 0.15a	0.94 ± 0.06a	0.88 ± 0.13a	0.66 ± 0.06b
	2016	0.80 ± 0.10a	0.97 ± 0.13a	0.97 ± 0.08a	0.96 ± 0.19a	0.77 ± 0.10b

注:同行中相同字母表示无显著差异,For each line,means with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$.

对于各保留带林下灌木丰富度指数 S 分析发现,2011 年各带宽丰富度指数(S)均小于对照组,但各个带宽均随时间均呈增加趋势,至 2016 年各个带宽的丰富度指数(S)均大于对照组。而草本层丰富度指数(S)起初在 2011 年从大到小顺序为 4 m 带 > 6 m 带 > 对照 > 8 m 带 > 10 m 带;各带及对照

随时间均呈先下降后上升的趋势,于 2014 年各个处理达到最低值,至 2016 年各保留草本层丰富度指数(S)均小于对照组,这与林下灌木丰富度指数(S)的规律相反(见图 1)。说明随着灌木的不断生长,对周围草本产生竞争影响,例如随着灌木冠幅不断增大,一些喜阳草本被逐渐淘汰。

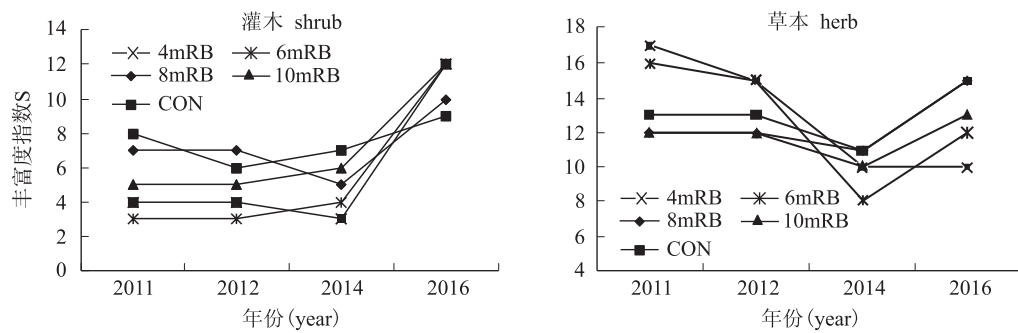


图1 不同年份保留带林下灌草物种丰富度指数

Fig. 1 Specie richness index of understory shrubs and herbs in preservation belts in different years

3.2 不同采伐带宽对保留柏木生长的影响

通过对保留带柏木胸径和树高的年均生长量分析,10 m 带的柏木胸径和树高的年均生长量均为最高,其次是 8 m 带;且各带宽均显著大于对照组 ($P < 0.05$),其中 6 m 带、8 m 带、10 m 带之间胸径和树高年均生长量之间无显著性差异(见图 2)。说明采

伐带对保留柏木的生长具有显著促进作用,随着带宽的增加,林分内水汽条件得到不同的改善,通过林下灌草结构的改变,土壤的理化性质也得到改善,从而促进林木生长,不同的带宽对柏木年均生长量影响效果不同。

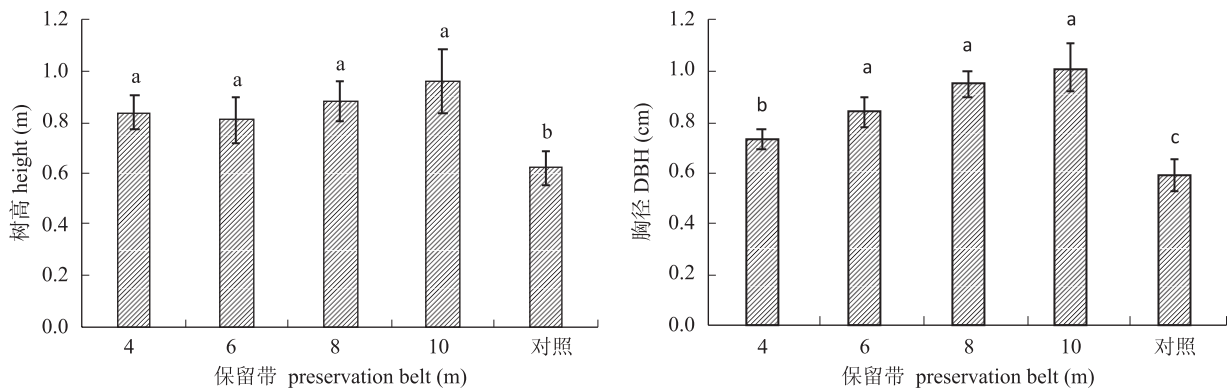


图2 保留带柏木年均生长量

Fig. 2 Annual average growth of preservation belt cypress

4 结论与讨论

林下植被多样性是衡量森林生态系统健康程度的重要指标之一,对调节森林结构、功能等方面有着重要作用^[29]。较高的物种多样性有助于人工林的更加稳定以及促使其正向演替^[30,31]。而林下植物的生长和繁殖主要受林下光照和水分的影响,当林分中出现人为的林窗或者采伐林带,林分内光照和水分得到改善进而促进林下灌草生长^[32]。本研究进行人工设置采伐带实验后,保留带柏木得到了更多的生长空间,其胸径和树高的年均生长量都得到了明显提高,这与其他研究结论一致^[33~34]。

通过 4 个年份的保留柏木林下灌草的物种多样性研究发现, Simpson 多样性指数、Shannon-Weiner 指数两者规律一致,即随时间演替草本层逐渐减小,

而灌木层逐渐增大,至 2016 年 8 m 带、10 m 带均大于草本层,其中 8 m 带此两项指标最大,10 m 带次之。另外,采伐初期林下灌木层的 Simpson 指数、Shannon-Weiner 指数均低于草本层,但 2016 年数据显示 8 m 带、10 m 带灌木层的这两个指标均高于草本层,其余处理间趋于相等。说明林下灌木层与草本层为竞争性的演替关系,且灌木层正向演替速度大于草本层,其原因可能与采伐后随着时间推移林分内及周围的生长资源环境配置不断变化有关,当出现最适宜的配置时,林下灌草表现出较好的生长趋势。

Pielou 均匀度指数从采伐初期各带宽均于对照组没有显著性差异,到 2016 年的各带宽的 Pielou 值均显著大于对照组 ($P < 0.05$),且各带宽之间差异不显著。说明采伐后,随时间各带宽林下物种均匀度均显著提高。此外,灌木层和草本层的丰富度指

数(S)随年份变化规律总体相反,及灌木呈逐渐增加趋势,在2016年各带宽均大于对照组,而草本层恰恰相反。原因为采伐初期草本植物可较快占据林下生长空间资源,而灌木生长较慢,故前期草本为优势群落;随着灌木生长,其高度、盖度及根系逐渐发达,通过竞争,淘汰一些草本植物。但以上3个指标总体趋势仍然是草本层的各个多样性指数普遍大于灌木,这与岳永杰^[35]研究的华北落叶松人工林的物种多样性指数变化规律相同。

综上所述,带状采伐对柏木的生长和林下植物物种多样性有显著影响,但是试验区立地条件较差,采伐带过宽可能影响柏木林整体稳定性,因此没有进行10 m以上带宽的采伐。对于4种设置带宽而言,应以8 m带、10 m带改造柏木人工林为宜,为下一步营造生态、健康林分提供参考。

参考文献:

- [1] Al-Amin M, Akter S R, ahman M, et al. Diversity of Forest Undergrowth of North Eastern Region of Bangladesh. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2007, 3(3): 143 ~ 148.
- [2] 王永健,陶建平,张炜银,等.茂县土地岭植被恢复过程中物种多样性动态特征. *生态学报*, 2006, 26(4): 1028 ~ 1036.
- [3] 闫明,毕润成.山西霍山植被分类及不同演替阶段群落物种多样性的比较分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(3): 56 ~ 62.
- [4] 曹小玉,李际平,周永奇,等.杉木林林层指数及其与林下灌木物种多样性的关系. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 589 ~ 595.
- [5] Alicia, Ledo, Sonia, et al. Forest Biodiversity Assessment in Peruvian Andean Montane Cloud Forest. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(3): 372 ~ 384.
- [6] 吴彦,刘庆,何海,等.亚高山针叶林人工恢复过程中物种多样性变化. *应用生态学报*, 2004, 15(08): 1301 ~ 1306.
- [7] 冯耀宗.物种多样性与人工生态系统稳定性探讨. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 853 ~ 857.
- [8] 郭连金,张文辉,刘国彬.黄土丘陵区沙棘人工林发育过程中物种多样性及种间关联变化. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 9 ~ 15.
- [9] Nagaike T, Hayashi A, Abe M, et al. Differences in plant species diversity in *Larix kaempferi* plantations of different ages in central Japan. *Forest Ecology & Management*, 2003, 183(1): 177 ~ 193.
- [10] 张志强,余新晓,赵玉涛,等.森林对水文过程影响研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 113 ~ 116.
- [11] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 1 ~ 5.
- [12] Boix - Fayos C, De Vente J, Barberú G G, et al. The impact of land use change and check dam on catchment sediment yield. *Hydrological Processes*, 2010, 22(25): 4922 ~ 4935.
- [13] 杨臣坤,柏富通,陈益宝,等.红壤丘陵防护林幼林林分结构水土流失规律的研究. *湖南林业科技*, 1998, 25(4): 31 ~ 37.
- [14] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林下物种多样性及土壤理化性质的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(03): 732 ~ 738.
- [15] 刘宗成,周晓波,黎燕琼,等.川中丘陵区人工柏木林灌草生物多样性研究. *四川林业科技*, 2013, 34(3): 5 ~ 10.
- [16] 龚固堂,黎燕琼,朱志芳,等.川中丘陵区人工柏木防护林适宜林分结构及水文效应. *生态学报*, 2012, 32(3): 923 ~ 930.
- [17] 黄志霖,田耀武,王俊青,等.人工干扰对三峡库区柏木人工林下植物物种多样性的影响. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 132 ~ 135.
- [18] 黎燕琼,龚固堂,郑绍伟,等.低效柏木纯林不同改造措施对水土保持功能的影响. *生态学报*, 2013, 33(3): 934 ~ 943.
- [19] 李平,李凤汀,范川,等.川中丘陵区柏木低效林改造模式植物多样性对土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2015, 35(8): 2667 ~ 2675.
- [20] 王峰,李仁洪,周立江,等.川中丘陵柏木林抚育改造技术与应用示范. *四川林业科技*, 2017, 38(03): 105 ~ 110.
- [21] 范川,李贤伟,李平,等.川中丘陵区柏木低效林不同改造模式土壤有机碳特征. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1437 ~ 1444.
- [22] 金艳强,包维楷.四川柏木人工林林下植被生物量与林分结构的关系. *生态学报*, 2014, 34(20): 5849 ~ 5859.
- [23] 黎燕琼,郑绍伟,龚固堂,等.不同年龄柏木混交林下主要灌木黄荆生物量及分配格局. *生态学报*, 2010, 30(11): 2809 ~ 2818.
- [24] 杨育林,李贤伟,周义贵,等.林窗式疏伐对川中丘陵区柏木人工林生长和植物多样性的影响. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(6): 971 ~ 977.
- [25] 杨育林,李贤伟,王海明,等.抚育间伐对川中丘陵区柏木人工林生长和植物多样性的影响. *山地学报*, 2015, 33(2): 199 ~ 207.
- [26] 龚固堂,牛牧,慕长龙,等.间伐强度对柏木人工林生长及林下植物的影响. *林业科学*, 2015, 51(4): 8 ~ 15.
- [27] 雷静品,肖文发,黄志霖,等.带状改造对柏木人工林林下植被多样性和环境的影响. *江西农业大学学报*, 2009, 31(3): 381 ~ 387.
- [28] 李贤伟,罗承德,胡庭兴,等.长江上游退化森林生态系统恢复与重建刍议. *生态学报*, 2001, 21(12): 2117 ~ 2124.
- [29] 张柳桦,齐锦秋,柳莘玉,等.林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响. *西北植物学报*, 2018, 38(01): 166 ~ 175.
- [30] Rota E, Caruso T, Bargagli R. Community structure, diversity and spatial organization of enchytraeids in Mediterranean urban holm oak stands. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 62(5): 83 ~ 91.
- [31] 马克平. 2013.生物多样性与生态系统功能的实验研究. *生物多样性*, 21(3): 247 ~ 248.
- [32] Adrian A, Andrew N, Klausj P. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(7): 1104 ~ 1113.
- [33] 张水松,陈长发,吴克选,等.杉木林间伐强度试验20年生长效应的研究. *林业科学*, 2005, 41(5): 56 ~ 65.
- [34] Cañellas I, Río M D, Roig S, et al. Growth response to thinning in *Quercus pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(3): 243 ~ 250.
- [35] 岳永杰,余新晓,牛丽丽,等.北京雾灵山植物群落结构及物种多样性特征. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 165 ~ 170.