

不同林地清理和培肥措施对桉树人工林植物多样性的影响*

Effects of Different Ground Clearance and Fertilizing Treatments on Plant Diversity of *Eucalyptus* Plantations in Subtropical China

温远光^{1,2,3}, 严宇航¹, 陶彦良¹, 蔡道雄^{3,4}, 周晓果^{1**}, 朱宏光^{1,2,3}, 贾宏炎^{3,4},
明安刚^{3,4}, 赵明威¹, 陆艳仙¹, 严理¹, 李武志⁴

WEN Yuanguang^{1,2,3}, YAN Yuhuang¹, TAO Yanliang¹, CAI Daoxiong^{3,4},
ZHOU Xiaoguo¹, ZHU Hongguang^{1,2,3}, JIA Hongyan^{3,4}, MING Angang^{3,4},
ZHAO Mingwei¹, LU Yanxian¹, YAN Li¹, LI Wuzhi⁴

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室培育基地, 广西南宁 530004; 2. 广西大学林学院, 广西高校林业科学与工程重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 广西凭祥 532600; 4. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600)

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Forestry Science and Engineering, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Guangxi Youyiguang Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi, 532600, China; 4. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

摘要:【目的】探讨不同林地清理方式下不同培肥措施对植物多样性的作用规律,为桉树人工林的可持续经营提供理论依据。【方法】基于两种不同林地清理(火烧清理和人工清理)和3种不同培肥措施(加炭C、加氮N和套种绿肥)处理试验,比较研究不同林地清理和培肥措施的独立和交互作用对桉树人工林下植物多样性的影响。

【结果】火烧清理和人工清理4年后,火烧清理林地的物种丰富度显著低于人工清理林地($P < 0.001$);两种清理方式下加C、加N和套种绿肥均明显改变植物群落的组成和结构,但优势种保持不变,均为蔓生莠竹、弓果黍、小花露籽草和五节芒(套种绿肥中的小花露籽草除外),显著降低植物多样性指数(包括Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou均匀度指数);两种清理方式各处理林下植物功能群谱完全相同,均表现为禾草植物>木本植物>蕨类植物>藤本植物>杂草植物>入侵植物;两因素方差分析表明,火烧清理和人工清理条件下,加C、加N、套种绿肥处理均极显著影响林下植物多样性指数,林地清理方式与不同处理的交互作用也对林下植物多样性指数产生极显著的影响。【结论】火烧和人工清理林地

收稿日期:2018-01-29

作者简介:温远光(1957—),男,博士生导师,教授,主要从事森林生态和森林培育学研究。

* 国家自然科学基金项目(31460121),广西高等学校重大科研项目(201201ZD001),广西森林生态与保育重点实验室培育基地开放课题(QZKFKT2017-01),广西林业厅科研项目(桂林科字[2009]第八号)和广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2015016)资助。

** 通信作者:周晓果(1980—),女,博士,副教授,主要从事森林生态学研究,E-mail:xgzhou2014@126.com。

及加 C、加 N、套种绿肥等培肥措施对林下植物多样性存在显著影响。从维护生物多样性的视角出发,在桉树人工林的经营中应尽量减少加 C、加 N 和套种绿肥等培肥措施的应用。

关键词:桉树人工林 林地清理 加炭 加氮 植物多样性 植物功能群谱

中图分类号:S718.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2018)02-0117-11

Abstract:【Objective】To explore the effects of different fertilization measures on plant diversity under different ground clearance methods, and to provide theoretical basis for sustainable management of *Eucalyptus* plantations. **【Methods】**Based on two different ground clearance methods (fire and manual ground clearance) and three different fertilization measures (C addition, N addition and green manure plant interplantation), tests were conducted to compare and study the independent and interactive effects of different fertilization measures on plant diversity of *Eucalyptus* plantations. **【Results】**After 4 years of fire and manual ground clearance, the species richness in plantations with fire ground clearance method was significantly lower than that in plantations with manual ground clearance method ($P < 0.001$). C addition, N addition and manure plant interplantation significantly changed the composition and structure of the plant community under two types of ground clearance methods and significantly reduced the plant diversity index (including the Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou's evenness index). While the dominant plants remained unchanged, all of them were *Microstegium vagans*, *Cyrtococcum patens*, *Ottocloa nodosa* and *Miscanthus floridulus*, except for *Ottocloa nodosa* in manure plant interplantation treatments. The plant functional groups spectrum in different ground clearance and treatments were identical with the trend of graminoids > woody > ferns > vines > herbaceous > invasive functional groups. The result of two-way ANOVAs revealed that treatments and the interaction between ground clearance and different treatments significantly influenced understory diversity index. **【Conclusion】**Fire ground clearance, manual ground clearance, C addition, N addition and manure plant interplantation had significant influence on understory diversity index. In order to maintain biodiversity, the application of fertilization measures such as adding C, adding N, and interplanting green manure should be minimized in the management of *Eucalyptus* plantations.

Key words: *Eucalyptus* plantations, ground clearance, C addition, N addition, plant diversity, plant functional group spectrum

0 引言

【研究意义】在我国南方林区,热量丰富,雨量充沛,雨热同期,植被茂密,采伐迹地剩余物堆积较多,林地清理困难,因此,常以火烧(炼山)方式进行林地清理,这一直是桉树人工造林的重要技术环节之一^[1-2]。近年来由于桉树连栽生物多样性下降^[3-5]、地力衰退严重^[6-7],炼山引起的生态问题备受社会的广泛关注^[8-9]。**【前人研究进展】**林下植被是森林生态系统中生物多样性和生态可持续性的基石^[10-11],在人工林可持续经营中具有不可替代的作用^[12]。近年来,生物炭作为土壤改良剂已被世界广泛应用和关注^[13]。同时,由于氮循环的全球性和氮沉降的普遍性,氮添加对生态系统的影响也成为研究的热点^[14-15]。国内外学者虽然对炼山的生态效应进行过许多评述和研究^[16-18],但就不同林地清理方式下不同培肥措施对桉树人工林下植物多样性的影响研究还相对缺乏,尤其缺乏成对比较的试验研究,对不同林地清理方式下植物多样性对不同的培肥措施(加炭 C、加氮 N、套种绿肥)的响应缺乏机理性认识,缺乏应对全球气候变化和氮沉降背景下的人工林发展良

策。**【本研究切入点】**在地形地貌、气候和土壤条件相同的区域,研究不同林地清理方式下,不同培肥处理对桉树人工林植物多样性的影响及植物多样性的响应机制,对于桉树人工林的可持续经营具有重要意义。**【拟解决的关键问题】**基于两种不同林地清理(火烧清理和人工清理)和 3 种不同培肥措施(加炭 C、加氮 N 和套种绿肥)处理试验,比较研究不同林地清理和培肥措施的独立和交互作用对桉树人工林下植物多样性的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域的自然环境概况

研究区域选择在广西凭祥市(北纬 21°57'~22°19',东经 106°41'~106°59'),低山丘陵地貌,一般海拔 300~600 m,最高峰大青山海拔 1 045.9 m。该区域属我国亚热带季风气候区,年均气温 20.5~21.7℃,极端低温 -1.5℃,极端高温 40.3℃;≥10℃的年活动积温为 6 000~7 600℃;年均降水量 1 200~1 500 mm,年蒸发量 1 261~1 388 mm,相对湿度 80%~84%。地带性土壤为中酸性火山岩和花岗岩发育而成的砖红壤性土,土层深厚,通常在 1 m

以上。该区域的地带性植被为热带雨林和季雨林,至今几乎荡然无存,已被各种人工林所取代。这里已成为我国南方人工林的重点区域和示范区,受到国内外广泛关注。

1.2 林分的建立、试验处理及样地设置

试验地位于中国林业科学研究院热带林业实验中心青山试验场 67 林班,林班面积 42 hm²。2011 年 11 月对试验地 35 年生的马尾松人工林进行采伐,采取火烧清理(炼山)和人工清理两种林地清理方式,火烧清理即是采伐剩余物处以火烧清除,人工清理是

将采伐剩余物全部清除林地。2012 年 2—4 月,按照试验设计要求实施挖坎整地和造林。桉树采用“双龙出海”造林模式,株行距为 2 m×2 m,双行与双行的间距为 5 m,密度为 1 428 株/hm²。试验设置 4 种处理,包括对照(采用常规生产标准,每穴施 200 g 氮磷钾复合肥作基肥)、加 C(在对照基础上加 C,为每株桉树加施 500 g 以毛竹为原料生产的生物质炭)、加 N(在对照基础上加 N,为每株桉树加施尿素 100 g)、套种绿肥(在对照基础上套种绿肥,即在桉树宽行间套种山毛豆,行距为 50 cm)。样地概况见表 1。

表 1 样地概况

Table 1 General situation of sample plots

林地清理方式 Ground clearance method	处理 Treatment	海拔 Altitude (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)	坡位 Slope position	郁闭度 Canopy density (%)	林下植被盖度 Understory vegetation coverage (%)	
人工清理 Manual ground clearance	CK1	230	西南 Southwest	27	下坡 Downslope	45	90	
	CK2	233	西北 Northwest	24	下坡 Downslope	43	95	
	CK3	259	西北 Northwest	25	中坡 Midslope	40	78	
	加 C 1 C addition 1	258	东南 Southeast	17	上坡 Upslope	45	100	
	加 C 2 C addition 2	251	东北 Northeast	19	中坡 Midslope	45	81	
	加 C 3 C addition 3	227	北 North	19	下坡 Downslope	43	78	
	套种绿肥 1 Green manure interplantation 1	229	西南 Southwest	23	中坡 Midslope	45	100	
	套种绿肥 2 Green manure interplantation 2	227	东北 Northeast	25	下坡 Downslope	42	73	
	套种绿肥 3 Green manure interplantation 3	264	北 North	24	中坡 Midslope	42	71	
	加 N 1 N addition 1	263	东南 Southeast	22	上坡 Upslope	43	100	
	加 N 2 N addition 2	247	东北 Northeast	20	中坡 Midslope	42	98	
	加 N 3 N addition 3	233	北 North	17	下坡 Downslope	42	88	
	火烧清理 Fire ground clearance	CK1	237	西南 Southwest	21	下坡 Downslope	45	60
		CK2	229	东北 Northeast	23	下坡 Downslope	43	68
		CK3	269	北 North	20	中坡 Midslope	42	95
加 C 1 C addition 1		243	西南 Southwest	25	中坡 Midslope	45	100	
加 C 2 C addition 2		249	东北 Northeast	27	上坡 Upslope	45	85	
加 C 3 C addition 3		259	北 North	20	下坡 Downslope	43	77	
套种绿肥 1 Green manure interplantation 1		235	西南 Southwest	21	下坡 Downslope	43	90	
套种绿肥 2 Green manure interplantation 2		234	西北 Northwest	23	下坡 Downslope	43	63	
套种绿肥 3 Green manure interplantation 3		265	北 North	20	中坡 Midslope	42	100	
加 N 1 N addition 1		242	西南 Southwest	24	中坡 Midslope	40	100	
加 N 2 N addition 2		246	东北 Northeast	24	中坡 Midslope	42	90	
加 N 3 N addition 3		245	北 North	19	下坡 Downslope	40	89	

1.3 样地群落物种多样性调查

2016年1月,对各处理林分建立调查样地,每个样地面积为600 m²(30 m×20 m),每个处理设3次重复。将每个600 m²样地进一步细分为24个5 m×5 m的中样方,在每个中样方的左上角设置1个1 m×1 m的小样方,分别调查灌木层(中样方)和草本层(小样方)的植物种名、个体数、高度和盖度。

1.4 重要值和物种多样性指数的计算

重要值(I_v): $I_v = \text{相对多度}(Dr) + \text{相对显著度}(Pr) + \text{相对频度}(Fr)$,

其中: $Dr = \text{某个种的个体数}/\text{全部种的个体总数} \times 100\%$; $Pr = \text{某个种的盖度}/\text{全部种的总盖度} \times 100\%$; $Fr = \text{某个种的频度}/\text{全部种的总频度} \times 100\%$ 。

物种丰富度(S): S 为每个30 m×20 m调查样方中出现的物种种数。

Shannon-Wiener指数(H'): $H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$,

Simpson指数(D): $D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$,

Pielou均匀度指数(J_{sw}): $J_{sw} = H'/\ln S$,

式中: $P_i = N_i/N$, N_i 为种 i 的个体数, N 为种 i 所在调查样方中所有物种的个体数之和。

1.5 数据处理与统计分析

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同林地清理条件下加C、加N、套种绿肥对桉树人工林植物多样性影响的差异显著性,采用最小显著性差异法(Least significant difference, LSD)进行多重比较;采用两因素方差分析(two-way ANOVA)检验植物多样性指数在不同林地清理条件、不同处理及其交互作用间的效应。数据分析在SPSS 19.0软件下

完成,显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 植物种类组成和功能群落

2.1.1 火烧清理

火烧清理林地共记录到维管植物92种。从表2可以看出,在火烧清理条件下,CK林下植被的优势种是蔓生莠竹,其重要值为117.9,占群落总值(300)的39.3%;其次是五节芒和弓果黍,重要值分别是30.3和24.9;重要值较大的植物还有小花露籽草(16.6)、金毛狗(12.9)、山乌柏(10.1)、铁芒萁(9.7)和细圆藤(6.1)。在火烧清理条件下,加C、加N、套种绿肥(GF)对林下植物组成及其重要值产生一定的影响,但群落优势种保持不变(表2)。与CK相比,加C、加N、套种绿肥处理均显著降低蔓生莠竹的重要性,其重要值分别比CK减少43.94%、9.75%、38.76%。其他重要值较大的植物种类在不同处理间有所不同,例如,除重要值前三的优势种外,加C、加N和套种绿肥3处理中,重要值超过5以上的种类分别有8种、9种和10种。种类和重要值大小顺序也不同,在加C处理中,为小花露籽草(23.2)>粽叶芦(14.6)>铁芒萁(9.6)>山乌柏(7.2)>三叉苦(6.3)>黄毛榕(6.0)>玉叶金花(5.8)>鲫鱼胆(5.7);在加N处理中,为小花露籽草(24.4)>山乌柏(14.0)>山黄麻(8.6)>金毛狗(7.1)>华南鳞盖蕨(6.6)=乌毛蕨(6.6)=海金沙(6.6)>钩藤(6.3)>黄毛榕(5.8);而在套种绿肥处理中,相应为粽叶芦(14.1)>山乌柏(13.9)>山毛豆(13.1)>乌毛蕨(9.9)>粗叶榕(9.6)>三叉苦(7.6)>钩藤(7.0)>金毛狗(6.5)=萆草(6.5)>山菅兰(5.3)(表2)。

表2 火烧清理林地不同处理的物种组成和重要值

Table 2 Species composition and importance values of different treatments under fire ground clearance

种名 Species	加C C addiction	加N N addiction	套种绿肥 Green manure interplantation	CK
蔓生莠竹 <i>Microstegium vagans</i>	66.1	106.4	72.2	117.9
弓果黍 <i>Cyrtococcum patens</i>	55.0	25.8	30.0	24.9
五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>	24.5	25.0	47.6	30.3
小花露籽草 <i>Otochloa nodosa</i>	23.2	24.4		16.6
粽叶芦 <i>Thysanolaena maxima</i>	14.6	3.7	14.1	2.1
铁芒萁 <i>Dicranopteris linearis</i>	9.6			9.7
山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	7.2	14.0	13.9	10.1
三叉苦 <i>Evodia lepta</i>	6.3	3.1	7.6	
黄毛榕 <i>Ficus esquiroliana</i>	6.0	5.8		1.5
玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	5.8		1.8	
鲫鱼胆 <i>Maesa perlaris</i>	5.7	3.0		1.8
白楸 <i>Mallotus paniculatus</i>	4.9		3.8	1.9

Continue table 2

种名 Species	加 C C addition	加 N N addition	套种绿肥 Green manure interplantation	CK
半边旗 <i>Pteris semipinnata</i>	4.7	3.3	3.1	3.6
山黄麻 <i>Trema tomentosa</i>	4.5	8.6	2.0	
山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	4.2		1.4	
中平树 <i>Macaranga denticulata</i>	4.1	2.8	1.3	1.2
光野漆 <i>Toxicodendron succedaneum</i>	3.3	1.5	4.5	
粗叶榕 <i>Ficus hirta</i>	3.3	1.4	9.6	4.6
粗糠柴 <i>Mallotus philippensis</i>	3.2	3.4		1.5
大叶榕 <i>Ficus altissima</i>	3.0			
毛银柴 <i>Aporosa villosa</i>	2.6		3.2	1.3
对叶榕 <i>Ficus hispida</i>	2.6			
毛茛 <i>Melastoma sanguineum</i>	2.2	3.1		1.5
楸木 <i>Aralia chinensis</i>	2.0			1.7
山姜 <i>Alpinia japonica</i>	1.8	2.8		4.0
漆 <i>Toxicodendron vernicifluum</i>	1.7			2.6
华南鳞盖蕨 <i>Microlepia hancei</i>	1.7	6.6	4.1	
越南悬钩子 <i>Rubus cochinchinensis</i>	1.7	3.3		2.0
金毛狗 <i>Cibotium barometz</i>	1.7	7.1	6.5	12.9
钩藤 <i>Uncaria rhynchophylla</i>	1.7	6.3	7.0	1.8
乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i>	1.3	6.6	9.9	4.2
海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	1.3	6.6	2.7	4.0
山芝麻 <i>Helicteres angustifolia</i>	0.0	3.4		4.3
毛桐 <i>Mallotus barbatus</i>	0.0	2.1	2.7	
潺槁树 <i>Litsea glutinosa</i>	0.0	1.9	4.8	
细圆藤 <i>Pericampylus glaucus</i>	0.0	1.5	3.0	6.1
山毛豆 <i>Tephrosia candida</i>	0.0		13.1	2.0
荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	0.0		6.5	1.7
山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	0.0		5.3	
草豆蔻 <i>Alpinia katsumadai</i>	0.0		2.4	3.1
飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>	0.0		1.6	
其他 Others	18.5(17)	16.6(13)	14.3(8)	19.1(9)
合计 Total	300.0	300.0	300.0	300.0

注:括号中的数字为物种数

Note: Numbers in bracket are species numbers

2.1.2 人工清理

人工清理林地共记录到维管植物 85 种。由表 3 可以看出,在人工清理条件下,CK 林下植被中重要值居前三的优势物种是蔓生莠竹、小花露籽草和五节芒,重要值居第一的蔓生莠竹,其重要值仅为 65.9,三者重要值之和只占群落总值的 46.5%。在人工清理条件下,加 C 和加 N 处理的优势种都是蔓生莠竹和小花露籽草,重要值分别是 110.9、30.6 和 133.6,

表 3 人工清理林地不同处理的物种组成和重要值

Table 3 Species composition and importance values of different treatments under manual ground clearance

种名 Species name	加 C C addition	加 N N addition	套种绿肥 Green manure interplantation	CK
蔓生莠竹 <i>Microstegium vagans</i>	110.9	133.6	102.6	65.9
小花露籽草 <i>Otochloa nodosa</i>	30.6	51.7		49.5
山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	14.2		2.4	3.0
金毛狗 <i>Cibotium barometz</i>	12.3	4.1	9.4	15.3

51.7;而套种绿肥处理群落的优势种为蔓生莠竹和五节芒,重要值分别是 102.6 和 34.5。与 CK 相比,加 C、加 N、套种绿肥 3 种处理均显著增加蔓生莠竹的重要性,其重要值分别比 CK 提高 68.29%、102.73%、54.32%。不同植物对不同的处理有不同的响应,例如,加 C 处理显著增加了山鸡椒、山乌柏、钩藤、山麻黄、细圆藤等许多物种的重要值,相反,却降低了半边旗、三叉苦、粽叶芦等的重要值(表 3)。

续表 3

Continue table 3

种名 Species name	加 C C addition	加 N N addition	套种绿肥 Green manure interplantation	CK
山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	11.2	9.8	11.3	5.2
钩藤 <i>Uncaria rhynchophylla</i>	11.2	6.4	1.8	1.0
五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>	9.0	5.6	34.5	24.1
山麻黄 <i>Ephedra equisetina</i>	8.6	6.1		
细圆藤 <i>Pericampylus glaucus</i>	7.4		3.1	2.2
乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i>	7.2	4.1	5.6	3.6
铁芒萁 <i>Dicranopteris linearis</i>	6.3	2.0	5.3	3.3
海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	5.2	3.6	2.1	2.5
毛桐 <i>Mallotus barbatus</i>	4.7	3.4	5.6	3.4
半边旗 <i>Pteris semipinnata</i>	4.7	4.8	8.4	17.1
三叉苦 <i>Evodia lepta</i>	4.0		2.6	10.2
橄榄 <i>Canarium album</i>	3.8			
粗叶榕 <i>Ficus hirta</i>	3.3	6.3	2.5	2.0
萆苈 <i>Arthraxon hispidus</i>	3.0			
毛茛 <i>Melastoma sanguineum</i>	2.9	5.6	2.8	2.1
火炭母 <i>Polygonum chinense</i>	2.6			
粽叶芦 <i>Thysanolaena maxima</i>	2.2	2.0	7.6	7.1
粗糠柴 <i>Mallotus philippensis</i>	2.2	2.3	2.5	1.8
华南鳞盖蕨 <i>Microlepia hancei</i>	3.0	5.2	1.3	
鲫鱼胆 <i>Maesa perlaris</i>	1.8	2.4	3.8	4.5
筋樨花椒 <i>Zanthoxylum avicennae</i>	1.6	2.4	2.5	1.2
楸木 <i>Aralia chinensis</i>	1.6	1.5	3.9	1.3
玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	1.5			2.1
山姜 <i>Alpinia japonica</i>	1.4	5.0	2.2	
中平树 <i>Macaranga denticulata</i>	1.2	5.2	2.5	3.3
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	1.2		6.2	
毛银柴 <i>Aporosa villosa</i>	1.0	1.9	3.2	2.7
潺槁树 <i>Litsea glutinosa</i>		3.1	6.9	2.7
钝叶黄檀 <i>Dalbergia obtusifolia</i>		2.9		
山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>		2.5		
飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>		2.5	4.9	
黄毛榕 <i>Ficus esquiroliana</i>		2.0		3.5
漆 <i>Toxicodendron vernicifluum</i>		1.1	3.1	3.3
山毛豆 <i>Tephrosia candida</i>			10.9	
弓果黍 <i>Cyrtococcum patens</i>			10.5	19.3
白楸 <i>Mallotus paniculatus</i>			7.0	1.4
柳叶箬 <i>Isachne globosa</i>			4.6	
对叶榕 <i>Ficus hispida</i>			1.4	
两面针 <i>Zanthoxylum nitidum</i>			1.1	
牛白藤 <i>Hedyotis hedyotideae</i>				
鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>				1.8
杠板归 <i>Polygonum perfoliatum</i>				2.1
光野漆 <i>Toxicodendron succedaneum</i>				3.2
草豆蔻 <i>Alpinia katsumadai</i>				6.3
大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>				3.7
其他 Others	19.2(13)	10.9(7)	14.8(8)	19.3(12)
合计 Total	300.0	300.0	300.0	300.0

注:括号中的数字为物种数

Note: Numbers in bracket are species numbers

2.1.3 植物功能群谱

将某一植物群落内各类植物功能群的数量(重要

值)对比关系作为功能群谱,以此分析群落功能群结构对不同处理的响应。从表 4 看出,不同林地清理和

培肥方式植物功能群谱的谱序基本一致,按数量大小排序,都表现为禾草植物>木本植物>蕨类植物>藤本植物>杂草植物>入侵植物。火烧清理条件下,与CK比较,加C和加N处理的禾草植物、蕨类植物和杂草植物功能群有所减弱,而木本植物、藤本植物功能群有所增加;套种绿肥植物功能群的响应与加C、加N相近,所不同的是套种绿肥使杂草数量增加,并出现入侵植物。人工清理条件下,与CK比较,加C

和套种绿肥降低禾草植物、蕨类植物功能群的数量,增加木本植物,加N却增加禾草植物、杂草植物,降低木本植物、蕨类植物和藤本植物功能群;加N和套种绿肥出现入侵植物,但比例很小。平均而言,火烧清理禾草植物高于人工清理,木本植物、蕨类植物、杂草植物和入侵植物均低于人工清理,两者的藤本植物比较接近,分别为8.47和8.41(表4)。

Table 4 Plant functional group spectrum of different ground clearance with different treatments(%)

处理 Treatments	功能群 Functional groups	加C C addition	加N N addition	套种绿肥 Green manure interplantation	CK	平均±标准差 Mean±S. D.
火烧清理 Fire ground clearance	禾草植物 Graminoids	61.13	61.70	56.83	64.50	81.39±3.17
	木本植物 Woody plants	24.83	18.50	25.50	16.10	28.31±4.65
	蕨类植物 Ferns	6.77	10.07	9.27	12.07	12.73±2.19
	藤本植物 Vines	6.33	8.80	5.30	4.97	8.47±1.73
	杂草植物 Herbaceous plants	0.87	0.93	2.57	1.03	1.80±0.82
	入侵植物 Invasive plants	0.00	0.00	0.53	0.00	0.18±0.27
	合计 Total		100.00	100.00	100.00	100.00
人工清理 Manual ground clearance	禾草植物 Graminoids	51.90	64.30	52.97	55.30	74.92±5.58
	木本植物 Woody plants	22.10	17.93	27.13	21.47	29.54±3.79
	蕨类植物 Ferns	13.57	8.73	10.70	14.40	15.80±2.62
	藤本植物 Vines	9.73	3.77	5.60	6.13	8.41±2.50
	杂草植物 Herbaceous plants	3.03	4.37	1.67	2.80	3.96±1.11
	入侵植物 Invasive plants	0.00	0.83	1.53	0.00	0.79±0.74
	合计 Total		100.00	100.00	100.00	100.00

2.2 植物多样性指数

2.2.1 物种丰富度

从图1a可以看出,火烧清理(CK)和人工清理(CK)林下植被的物种丰富度存在极显著差异($P < 0.001$),而两种林地清理方式下3种培肥处理间的物种丰富度没有显著差异($P > 0.05$)。在人工清理条件下,加C、加N、套种绿肥3种处理均降低林下植被的物种丰富度,其中加N处理的物种丰富度降低最明显,显著低于CK、加C和套种绿肥处理,而CK、加C和套种绿肥间差异不显著。在火烧清理条件下,加C显著增加群落的物种丰富度($P < 0.05$),其他差异不显著。

C和套种绿肥间差异不显著。在火烧清理条件下,加C显著增加群落的物种丰富度($P < 0.05$),其他差异不显著。

2.2.2 Shannon-Wiener 指数

由图1b可知,火烧清理(CK)和人工清理(CK)林下植被的Shannon-Wiener指数无显著差异($P > 0.05$)。在人工清理条件下,加C、加N及套种绿肥均显著降低植被的Shannon-Wiener指数($P < 0.05$)。在火烧清理条件下,加N和套种绿肥也显著

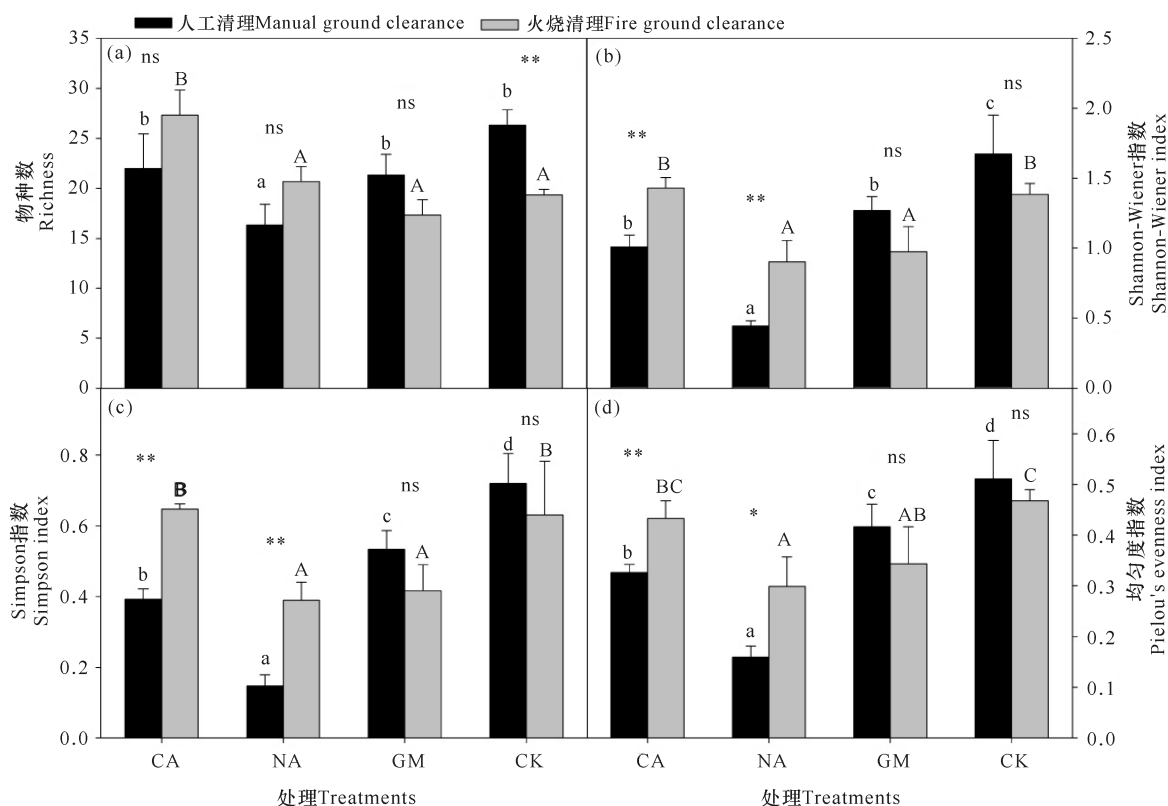
降低植被的 Shannon-Wiener 指数,但加 C 对 Shannon-Wiener 指数的影响与 CK 无显著差异。

2.2.3 Simpson 指数

由图 1c 可知,人工清理条件下,不同培肥方式均降低林下植被的 Simpson 指数,加 N 处理的最低,显著低于其他处理。火烧清理条件下,加 C 使得林下植被的 Simpson 指数略有提高,但与 CK 无显著差异;加 N、套种绿肥均降低林下植被 Simpson 指数,与 CK 差异显著。火烧清理条件下加 C 和加 N 处理林下植被 Simpson 指数极显著高于人工清理条件下的。套种绿肥林下植被 Simpson 指数表现为人工清理条件下高于火烧清理,但差异不显著。

2.2.4 Pielou 均匀度指数

由图 1d 可知,人工清理条件下,不同培肥方式均降低林下植被的均匀度指数,加 N 处理的最低,显著低于其他处理;但套种绿肥林下植被 Pielou 均匀度指数与 CK 差异不显著。火烧清理条件下,加 N、套种绿肥显著降低林下植被 Pielou 均匀度指数,而加 C 对林下植被 Pielou 均匀度指数无显著影响。火烧清理条件下加 C、加 N 处理林下植被 Pielou 均匀度指数分别极显著、显著高于人工清理条件下的,套种绿肥林下植被 Pielou 均匀度指数表现为人工清理条件下高于火烧清理,但差异不显著。



CA: 加 C; NA: 加 N; GM: 套种绿肥; ns 表示两种林地清理方式间无差异, * 表示显著差异, ** 表示极显著差异; 不同小写字母表示人工清理方式下各处理差异显著; 不同大写字母表示火烧清理方式下各处理差异显著

CA: C addition; NA: N addition; GM: Green manure interplantation; ns indicates no significant difference between ground clearance. * and ** indicate statistical differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. Different lowercase indicates significant difference under manual ground clearance, Different capital letters indicate significant difference under fire ground clearance

图 1 不同林地清理方式不同处理林下植物多样性指数比较

Fig. 1 Understory plant diversity in plantations with different ground clearance and fertilizing treatments

2.3 不同林地清理方式、处理及其交互作用

两因素方差分析表明,不同林地清理方式对物种丰富、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数的影响不显著 ($P > 0.05$), 对 Simpson 指数影响显著

($P = 0.027$); 而不同培肥方式极显著影响林下植物多样性指数 ($P < 0.01$); 林地清理方式与不同处理的交互作用也对林下植物多样性指数产生极显著的影响 ($P < 0.01$, 表 5)。

表 5 不同林地清理方式、处理及其交互作用对林下植物多样性指数的影响

Table 5 Effects of different ground clearance methods, treatments and their interactions on understory plant diversity index

多样性指数 Diversity index	林地清理方式 Ground clearance methods		处理 Treatments		林地清理方式×处理 Ground clearance methods×treatments	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
物种丰富度 Species richness	0.155	0.699	11.832	<0.001	13.023	<0.001
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	1.664	0.215	37.186	<0.001	13.211	<0.001
Simpson 指数 Simpson index	5.942	0.027	31.301	<0.001	11.540	<0.001
Pielou 均匀度指数 Pielou's evenness index	2.709	0.119	29.013	<0.001	7.122	0.004

注:加粗字体表示差异显著($P < 0.05$)Note: Bold fonts indicate significant differences ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 不同林地清理方式对植物组成和功能群的影响

关于火烧清理和人工清理对植物组成影响的比较研究不多,对功能群的影响研究报道就更少。据马祥庆等^[16]对杉木人工林的研究,认为火烧清理比人工清理更有利于杉木林下植被发育,前者的物种数为 53 种,后者为 42 种,其中以草本和阳性植物种类增加较为明显。在本研究中,按 1 800 m² 调查样地(72 个 5 m×5 m 样方)内的物种统计,火烧清理林地的植物种类为 93 种,人工清理林为 85 种,火烧清理比人工清理的多 8 种;若排除不同处理的影响,仅对 18 个 5 m×5 m 的 CK 样方统计,人工清理林地的物种数为 46 种,而火烧清理林地的只有 38 种,人工清理又比火烧清理的多 8 种。因此,关于火烧清理和人工清理对植物多样性的影响不能简单地地下结论,更重要的是需要了解植物多样性对不同清理方式的响应与适应。

火烧清理和人工清理林地对植物功能群的影响存在较大差异。火烧清理特别是反复的火烧清理,植物功能群明显向着草本、小型和一年生植物功能群转变^[5]。本研究再次证明,火烧清理林地更有利于禾草植物功能群发展,而人工清理则更有利于木本植物、蕨类植物、藤本植物功能群的发育。这是不同功能群的生态和生物学特性决定的,同时,与不同林地清理条件下植物繁殖体保存及丰富程度有密切关系^[4]。火烧清理有利于耐火植物功能群的保持和发展,但导致植物繁殖体的丰富度降低,并直接使不耐火植物丧失活力^[19]。

本研究首次以植物功能群谱的概念分析桉树人工林植物功能群结构及其对不同处理的响应,结果表明,研究林分的植物功能群谱结构为禾草植物>木本

植物>蕨类植物>藤本植物>杂草植物>入侵植物。根据作者对桉树人工林植物多样性和功能群的长期研究,随着连栽代数的增加,桉树林下植物功能群谱的变化是非常明显的。在南亚热带地区,人工林下以木本植物功能群为优势则表明生态系统的完整性较高,以蕨类植物和禾草植物功能群为优势则表明生态系统存在一定程度退化,而林下以入侵种植物功能群为优势则指示生态系统已严重退化。作者认为,植物功能群谱可以作为评估人工林生态系统退化的重要指标,它具有准确、简便、高效的特点。

3.2 植物多样性指数对不同林地清理方式和处理的响应

本研究表明,火烧清理林地极显著降低群落的物种丰富度,这与早期的研究结果基本一致^[8,19]。本研究还发现,加 C、加 N、套种绿肥 3 种处理对植物多样性指数均存在不同程度的负作用,其中,加 N 对 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数的负作用最明显,其各多样性指数值都是最低的。最近,有研究表明,氮添加显著降低热带山地雨林原始林和次生林林下物种丰富度,且下降幅度随 N 添加浓度的上升而增加^[14],N 添加还改变了植物群落的结构^[20]。因此,全球 N 沉降加剧很有可能成为全球生物多样性丧失的又一个重要驱动因素。

目前,关于套种绿肥对植物多样性指数的影响研究报道极少。山毛豆于 20 世纪 30 年代引种到中国,1965 年广东省推广种植面积达 5 万 hm²^[21]。山毛豆适应性强,生长快,分枝多,茎叶繁茂;根系发达,根瘤多,再生力强,耐瘠、耐旱,喜阳,是一种良好的绿肥覆盖作物^[22]。近年来的观察发现,山毛豆的出现显著的降低了群落植物多样性,可能是一个潜在的外来入侵物种^[23-25]。在本研究中,在桉树林下套种山毛豆,对植物多样性存在显著影响,显著降低植物 Shannon-

Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数。由于本试验管理比较粗放,山毛豆的保存率较低(约为 40%~50%),对林下植物多样性的影响尚需进一步研究。

4 结论

本研究对不同林地清理方式下、不同培肥处理对桉树人工林植物多样性的影响进行分析,结果表明,火烧清理和人工清理条件下,加 C、加 N、套种绿肥处理均极显著影响林下植物多样性指数,林地清理方式与不同处理的交互作用也对林下植物多样性指数产生极显著的影响。因此,从生物多样性维持的视角出发,在桉树人工林的经营中应尽量减少加 C、加 N 和套种绿肥等培肥措施。

参考文献:

[1] 温远光. 桉树生态、社会问题与科学发展[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
WEN Y G. *Eucalyptus* ecological, social issues and scientific development [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008.

[2] 中国林学会. 桉树科学发展问题调查报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 1-120.
Chinese Society of Forestry. Investigation reports for scientific development of *Eucalyptus* plantations [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016: 1-120.

[3] ZHOU X G, ZHU H G, WEN Y G, et al. Effects of understory management on trade-offs and synergies between biomass carbon stock, plant diversity and timber production in *Eucalyptus* plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 410: 164-173.

[4] 温远光, 刘世荣, 陈放. 连栽对桉树林下物种多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1667-1671.
WEN Y G, LIU S R, CHEN F. Effects of continuous cropping on understory species diversity in *Eucalyptus* plantations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1667-1671.

[5] 温远光, 左花, 朱宏光, 等. 连栽对桉树人工林植被盖度、物种多样性及功能群的影响[J]. *广西科学*, 2014, 21(5): 463-468, 483.
WEN Y G, ZUO H, ZHU H G, et al. Effect of successive rotations on vegetation cover, species diversity and functional groups in *Eucalypt* plantations of South China [J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(5): 463-468, 483.

[6] 温远光, 刘世荣, 陈放. 桉树工业人工林的生态问题与可持续经营[J]. *广西科学院学报*, 2005, 21(1): 13-18.
WEN Y G, LIU S R, CHEN F. The ecological problems and sustainable management of *Eucalyptus* industrial

plantation[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2005, 21(1): 13-18.

[7] 夏体渊. 桉树人工林对土壤综合肥力的影响及其水土保持效应[D]. 昆明: 云南大学, 2007.
XIA T Y. The effects of water and soil conservation and soil fertility in man-made *Eucalyptus* forest [D]. Kunming: Yunnan University, 2007.

[8] WILLIAMS R A. Mitigating biodiversity concerns in *Eucalyptus* plantations located in south China [J]. *Journal of Biosciences and Medicines*, 2015, 3: 1-8.

[9] ZHOU X G, WEN Y G, GOODALE U M, et al. Optimal rotation length for carbon sequestration in *Eucalyptus* plantations in subtropical China [J]. *New Forests*, 2017, 48(5): 609-627.

[10] NAGAIKE T, HAYASHI A, ABE M, et al. Differences in plant species diversity in *Larix kaempferi* plantations of different ages in central Japan [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 183(1/2/3): 177-193.

[11] BENGTTSSON J, NILSSON S G, FRANC A, et al. Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of *European* forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 132: 39-50.

[12] NAGAIKE T, HAYASHI A, KUBO M, et al. Plant species diversity in a managed forest landscape composed of *Larix kaempferi* plantations and abandoned coppice forests in central Japan [J]. *Forestry Sciences*, 2006, 52(3): 324-332.

[13] 李国平, 张卫强, 张卫华, 等. 桉树林和针阔混交林对土壤理化性质的影响比较 [J]. *广东农业科学*, 2014, (20): 67-74.
LI G P, ZHANG W Q, ZHANG W H, et al. Physical and chemical characteristics of soil in *Eucalypt* plantation and conifer-broadleaved forest [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014(20): 67-74.

[14] 胡钧宇, 朱剑霄, 周璋, 等. 氮添加对 4 种森林类型林下植物多样性的影响 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(5): 904-910.
HU J Y, ZHU J X, ZHOU Z, et al. Effects of experimental nitrogen additions on understory species diversity in four forests in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(5): 904-910.

[15] 鲁显楷, 莫江明, 董少峰. 氮沉降对森林生物多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5532-5548.
LU X K, MO J M, DONG S F. Effects of nitrogen deposition on forest biodiversity: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5532-5548.

[16] 马祥庆, 杨玉盛, 林开敏, 等. 不同林地清理方式对杉木人工林生态系统的影响 [J]. *生态学报*, 1997, 17(2):

- 176-183.
- MA X Q, YANG Y S, LIN K M, et al. Effect of different ground clearance on Chinese fir plantation ecosystems[J]. 1997, 17(2):176-183.
- [17] 杨尚东, 吴俊, 谭宏伟, 等. 红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7788-7797.
- YANG S D, WU J, TAN H W, et al. Variation of soil fertility in *Eucalyptus robusta* plantations after controlled burning in the red soil region and its ecological evaluation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24):7788-7797.
- [18] 潘辉. 不同林地清理方式对巨尾桉林地生产力的影响[J]. 福建林学院学报, 2003, 23(4):312-316.
- PAN H. Effect of different ground clearance on productivity of *E. grandis* × *E. urophylla* forests[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2003, 23(4):312-316.
- [19] WEN Y G, YE D, CHEN F, et al. The changes of understory plant diversity in continuous cropping system of *Eucalyptus* plantations, South China [J]. Journal of Forest Research, 2010, 15(4):252-258.
- [20] 吴建平, 刘文飞, 袁颖红, 等. 亚热带杉木人工林下植物多样性对氮沉降的响应[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4):87-98.
- WU J P, LIU W F, YUAN Y H, et al. Response of understory plant diversity to nitrogen deposition in subtropical Chinese fir plantation forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4):87-98.
- [21] 杨国清, 赵贵, 郑日红, 等. 农林复合经营研究——桉树间种山毛豆对林木和土壤的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(2):71-75.
- YANG G Q, ZHAO G, ZHENG R H, et al. Study on agroforestry management—Effects of interplanting of *Eucalyptus* plantation with white tephrosia on tree growth and soil[J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1997, 6(2):71-75.
- [22] 廖观荣, 李淑仪, 蓝佩玲, 等. 桉树人工林生态系统养分循环与平衡研究 I. 桉树人工林生态系统的养分贮存[J]. 生态环境, 2003, 12(2):150-154.
- LIAO G R, LI S Y, LAN P L, et al. The nutrient cycling and balance of *Eucalyptus* plantation ecosystem. I. The nutrient storage of *Eucalyptus* plantation ecosystem[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(2):150-154.
- [23] 宋晓梅, 孙海龙, 肖稀, 等. 13种护坡植物萌发特性研究[J]. 种子, 2014, 33(5):1-7.
- SONG X M, SUN H L, XIAO X, et al. A study on the germination characteristics of 13 species plants for slope protection[J]. Seed, 2014, 33(5):1-7.
- [24] 赵怀宝, 张燕, 袁文豪, 等. 外来物种白灰毛豆(*Tephrosia candida*)繁殖生物学研究[J]. 琼州学院学报, 2015, 22(5):81-85.
- ZHAO H B, ZHANG Y, YUAN W H, et al. Reproductive biology of *Tephrosia candida* [J]. Journal of Qiongzhou University, 2015, 22(5):81-85.
- [25] 孙乐帆, 廖婉莹, 赵怀宝, 等. 白灰毛豆对土壤 pH 的生态适应性研究[J]. 海南热带海洋学院学报, 2017, 24(5):21-26.
- SUN L F, LIAO W Y, ZHAO H B, et al. Ecological adaptability of *Tephrosia candida* to pH[J]. Journal of Hainan Tropical Ocean University, 2017, 24(5):21-26.

(责任编辑:陆雁)