



带状采伐毛竹林恢复的质量特征研究

曾宪礼¹, 苏文会^{1*}, 范少辉¹, 金 艺^{1,2}

(1 国际竹藤中心 国家林业局竹藤科学与技术/北京市共建重点实验室, 安徽太平竹林生态定位观测研究站, 北京 100102; 2 安徽农业大学, 合肥 230000)

摘 要:以安徽省黄山区毛竹林样地内 2018 年春笋和新竹为研究对象, 以传统择伐林为对照(CK), 设置 4 个梯度的采伐强度, 分别为 3 m 采伐带(D1)、6 m 采伐带(D2)、9 m 采伐带(D3)和 12 m 采伐带(D4), 分析带状采伐后毛竹林主要生产力指标(春笋数量、新竹数量、胸径和生物量等)的差异, 探讨不同强度带状采伐方式对毛竹林恢复更新的影响程度, 为毛竹林合理带状采伐提供理论依据。结果表明: (1) 4 种带状采伐处理单位面积发笋数量均大于对照, 且随采伐强度增加, 单位面积发笋数量呈现增加的趋势; 较高采伐强度(9 m 和 12 m 采伐带)下单位面积退笋数量和退笋率比采伐强度较低处理(3 m 和 6 m 采伐带)和 CK 更低; 单位面积成竹数量和成竹率以较高采伐强度(9 m 和 12 m 采伐带)处理下相对较高。(2) 4 种带状采伐处理的新竹平均胸径均小于对照, 较高采伐强度(9 m 和 12 m 采伐带)下新竹平均胸径显著小于母竹, 林地中小径级新竹比例增加, 且新竹胸径与采伐带边距呈负相关关系。(3) 4 种带状采伐处理下单位面积新竹地上生物量均小于对照, 表现为 CK>D3>D4>D2>D1。研究认为, 毛竹林恢复的质量特征对不同强度带状采伐措施存在响应差异, 6~9 m 采伐带的毛竹林恢复能力较强, 但毛竹林带状采伐后恢复是一个周期性过程, 需要综合考虑不同强度带状采伐措施对新竹质量影响的长期效应。

关键词:毛竹; 带状采伐; 质量特征; 生物量

中图分类号:S750 **文献标志码:**A

Qualitative Recovery Characteristics of Moso Bamboo Forests under Strip Clearcutting

ZENG Xianli¹, SU Wenhui^{1*}, FAN Shaohui¹, JIN Yi^{1,2}

(1 International Centre for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of Science and Technology of Bamboo and Rattan of State Forestry Administration, Anhui Taiping Bamboo Forest Ecosystem Observation Station, Beijing 100102, China; 2 Anhui Agricultural University, Hefei 230000, China)

Abstract: In November 2017, we designed 5 treatments under different strip clearcutting in Moso bamboo forests in Huangshan District of Anhui Province, including the contrast (CK), 3 m logging strip (D1), 6 m logging strip (D2), 9 m logging strip (D3) and 12 m logging strip (D4). We investigated several indexes of spring shoot and new bamboo in 2018, mainly including the number of spring shoot and new bamboo, the diameter of breast height (DBH) of new bamboo and the biomass of new bamboo. We discussed the effects of different strip clearcutting measures on Moso bamboo forest restoration in order to provide a theoretical basis for scientific and reasonable logging widths of strip clearcutting of Moso bamboo forests. (1) The number of spring shoot per hectare in four logging treatments was larger than that of CK, and it increased with the increase of logging intensity. The number and rate of degraded shoot per hectare in

收稿日期: 2019-01-25; 修改稿收到日期: 2019-04-22

基金项目: 国家重点计划研发项目(2018YFD0600103)

作者简介: 曾宪礼(1991—), 男, 在读博士研究生, 主要从事森林培育研究。E-mail: zengxl723@163.com

* 通信作者: 苏文会, 副研究员, 主要从事森林培育和森林生态研究。E-mail: swh612@icbr.ac.cn

treatments with higher intensity (9 m and 12 m logging strips) was lower than that of treatments with lower intensity (3 m and 6 m logging strips) and CK. (2) The mean DBH of new bamboo in four logging treatments were lower than that of CK, and the mean DBH of new bamboo in treatments with higher intensity (9 m and 12 m logging strips) was significantly lower than that of mother bamboo, and it was negatively correlated with logging strip margin. The proportions of new bamboo with small and medium DBH were increased in treatments with higher intensity (9 m and 12 m logging strips). (3) The biomass of aboveground per hectare of new bamboo in four logging treatments were lower than that of CK, following the order of CK, D3, D4, D2, and D1, respectively. There are different responses to different strip clearcutting measures on qualitative characteristics in Moso bamboo forests. In conclusion, the recovery ability of spring shoot and new bamboo in 6—9 m logging strips is better. However, the recovery of Moso bamboo forest after strip clearcutting is a periodic process, and it is necessary to consider the long-term effects of different logging intensity on the quality of new bamboo.

Key words: *Phyllostachys edulis*; strip clearcutting; qualitative characteristics; biomass

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 是中国森林资源的重要组成部分,具有很高的经济、生态和社会价值^[1-2]。据第八次全国森林资源清查数据显示,中国现有毛竹林 $4.43 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[3],占中国竹林总面积的 70% 以上。由于竹林典型的异龄结构,为了保障优质竹材的获取和维持林分的稳定,几千年来竹材收获通常采用人工择伐的方式^[4]。当前竹林经营正面临着国际竹产品结构调整引起的原材料价位下跌和农村劳动力减少引起的人工成本上升的双重压力,导致竹林经营效益空间被持续压缩,大量优质竹材无法采伐利用^[5],这已经成为当前竹林经营乃至整个竹产业发展的最大瓶颈问题。

针对上述问题,基于毛竹作为克隆植物,分株间具有资源传递和共享的生理整合的发育特征^[6-7],对异质性环境资源具有独特的适应性,我们探索一种能够提高作业效率、降低成本的毛竹采伐方式——带状采伐,即按照一定的宽度对毛竹林实施条带式皆伐。通过在采伐带之间设置保留带的方式,保留带成熟母竹通过碳素和水分生理整合等方式供给采伐带春笋和幼竹生长^[7-8],从而有利于采伐带毛竹分株度过短暂的不利时期。

然而,带状采伐可能会影响毛竹自然的生长发育规律。带状采伐后,竹林是否能够正常恢复、恢复特征及恢复质量如何尚不清楚。本研究以安徽省黄山区毛竹林为对象,设置 4 个梯度的采伐强度,以传统择伐林为对照,研究了不同强度带状采伐毛竹林的质量恢复特征,分析带状采伐后毛竹林主要生产指标(春笋数量、新竹数量、胸径和生物量等)的差异,得出不同强度带状采伐方式对毛竹林恢复更新的影响程度,以期科学合理开展毛竹林带状采伐提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于安徽省黄山区黄山国有林场(E118°14'~118°21',N30°4'~30°10'),属亚热带季风性湿润气候,夏季高温多雨,冬季温和湿润,四季分明,年降雨量 1 500 mm 左右,年平均气温 15.5 ℃,年蒸发量 1 400~1 900 mm,年日照时数 2 300 h 左右,无霜期大于 220 d,植被茂密,野生动植物资源繁多。

试验样地分布在黄山国有林场千紫山管护区的大坪工区,毛竹连片分布,基本为毛竹纯林,大小年明显。成土母岩为千枚岩和花岗岩,土壤类型为山地黄壤或红黄壤,土层较厚;竹林边缘有部分针阔树种零星分布,针叶树主要有杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松 (*Pinus massoniana*),阔叶树主要为枫香 (*Liquidambar formosana*)、泡桐 (*Paulownia fortunei*) 和木荷 (*Schima superba*) 等。毛竹林下植被茂密,主要有山胡椒 (*Lindera glauca*)、白背叶 (*Mallotus apelta*)、黄山杜鹃 (*Rhododendron maculiferum* subsp. *anhweiense*) 等灌木,以及苎麻 (*Boehmeria nivea*)、芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 等草本植物。试验毛竹纯林经营措施主要为劈灌除草、清除雪压竹和小年伐除Ⅳ度及以上毛竹,无施肥和垦复等行为。竹林平均密度 2 250~3 750 株/hm²,土壤 pH4.8~4.9 之间,土壤平均有机质含量 31.30 g·kg⁻¹,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 171.31 mg·kg⁻¹、2.55 mg·kg⁻¹和 62.13 mg·kg⁻¹。

2 研究方法

2.1 样地设置

根据毛竹生长发育规律,在晚秋或冬季伐竹最为适宜^[9],2017 年 11 月中旬,在试验区选择经营措施一

致,坡度和海拔相当,林分结构一致的毛竹纯林,设置 4 种强度带状采伐处理(D1、D2、D3 和 D4),各标准地水平采伐宽度分别为 3、6、9 和 12 m,垂直采伐长度均为 20 m,形成采伐宽度和面积不同的 4 种标准地,相邻标准地之间为保留区域(水平宽度 10 m);对照样地为 20 m×20 m,采伐方式为当地传统择伐(小年冬季采伐Ⅳ度及以上毛竹);试验重复 3 次,各标准地采伐前毛竹林基本情况详见表 1。

2.2 样地调查

从 2018 年 3 月底毛竹林萌发春笋开始至 2018 年 4 月底发笋结束,对标准地进行每日踏查,调查、记录每日春笋萌发数量,并对春笋进行挂牌,记录发笋日期和数量、退笋数量和高度。2018 年 8 月初对样地新竹进行每木检尺,调查并记录新竹的胸径、高度,并使用皮尺(量程 30 m)对标准地新竹进行坐标调查,将每块标准地左下角约定为坐标零点(0,0),新竹在标准地中的坐标定义为(X,Y),水平方向为横轴(X 值),垂直方向为纵轴(Y 值),新竹距离坐标零点(0,0)越远,X 值和 Y 值越大,调查并记录各标准地内新竹坐标信息;约定水平方向新竹距离标准地边界长度为边距(若 $X<1/2$ 采伐宽度,则边距 = X;若 $X\geq 1/2$ 采伐宽度,则边距 = $|X-\text{带宽}|$),如新竹坐标信息为 Z1(4,12)和 Z2(6,15),则 Z1 和 Z2 边距分别为 4 m 和 3 m。

2.3 数据处理

利用 IBM SPSS Statistics 20 进行单因素方差分析(ANOVA)和最小显著性检验(LSD),利用 Excel 2013 进行数据整理和绘图。

3 结果与分析

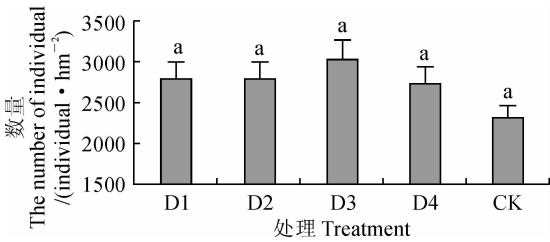
3.1 带状采伐毛竹林的发笋、退笋与成竹数量特征

3.1.1 发笋数量特征 毛竹林经不同强度带状采伐后,次年萌发春笋数量存在一定差异,但差异不显著($P>0.05$)(图 1)。带状采伐处理单位面积发笋

数量均大于 CK,说明带状采伐方式激发了林地春笋的萌发;带状采伐各处理发笋数量表现为 $D3>D1\approx D2>D4$,可以看出,随带状采伐强度增加,林地单位面积发笋数量呈现出先增加再减少的趋势,9 m 采伐带(D3)发笋数量最大,为 $3\,019\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$,当采伐宽度达 12 m 时,林地单位面积发笋数量又下降,且低于 3 m 和 6 m 采伐带。

3.1.2 退笋数量特征 春笋出土后,林地退笋现象比较普遍,由于林地养分、水分和温度等条件差异,单位面积退笋数量通常存在较大差异。不同强度带状采伐毛竹林退笋数量见图 2。不同处理单位面积退笋数量表现为 $D1>D2>CK>D3>D4$,可以看出,较低强度带状采伐处理(3 m 和 6 m 采伐带)单位面积退笋数量显著高于较高强度带状采伐处理(9 m 和 12 m 采伐带),与 CK 差异不显著。林地单位面积退笋数量表现出随采伐强度增加呈降低的趋势。

林地单位面积退笋数量占总发笋数量的百分比称为退笋率,可以间接反映竹林养分和水分等资源的供应程度。不同强度带状采伐毛竹林退笋率差异显著($P<0.05$),表现为 $D1>D2>CK>D4>D3$ (图 3),可以发现,3 m 和 6 m 采伐带退笋率较高(分别为 63.42%和 60.38%),CK 处理退笋率居中



不同字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$),下同

图 1 不同采伐强度下林分发笋量

Different letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$), the same as below

Fig.1 The number of spring shoots under different logging intensities

表 1 毛竹林标准地基本情况

Table 1 Basic information of sample area in Moso bamboo forests

处理 Treatment	采伐带宽 Logging band width /m	密度 Density /(individual · hm ⁻²)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均高 Mean height/m	年龄结构 Age structure (Ⅰ : Ⅱ : Ⅲ)	坡度 Slope/°	海拔 Altitude/m
D1	3	2 444	9.1	11.4	0.49 : 0.26 : 0.25	28	487
D2	6	2 194	9.3	11.9	0.45 : 0.27 : 0.28	28	485
D3	9	2 500	9.0	11.0	0.48 : 0.28 : 0.24	30	480
D4	12	2 194	9.3	11.7	0.42 : 0.25 : 0.33	33	478
CK	—	2 650	9.4	11.6	0.51 : 0.28 : 0.21	26	475

(接近 50%),而 9 m 和 12 m 采伐带退笋率低于 40%。较低强度带状采伐处理(3 m 和 6 m 采伐带)退笋率显著高于较高强度带状采伐处理(9 m 和 12 m 采伐带)。

3.1.3 成竹数量特征 成竹数量特征反映了单位面积新竹的数量,不同强度带状采伐毛竹林成竹数量存在较大差异(图 4)。不同处理单位面积成竹数量表现为 D3>D4>CK>D2>D1,与林地单位面积发笋数量规律相似,随采伐强度增加,单位面积成竹数量呈现先增加再降低的趋势,9 m 采伐带(D3)成竹数量最多,显著高于较低强度带状采伐处理(3 和 6 m 采伐带)。

单位面积新竹数量占总发笋数量的百分比称为成竹率,不同强度带状采伐毛竹林成竹率差异显著($P<0.05$),表现为 D3>D4>CK>D2>D1(图 5),较低强度带状采伐处理(3 m 和 6 m 采伐带)成竹率显著低于较高强度带状采伐处理(9 m 和 12 m 采伐带)。

3.2 带状采伐毛竹林恢复的新竹胸径特征

3.2.1 新竹平均胸径 从图 6 可见,带状采伐后,不同处理次年新竹平均胸径处于 6.6~9.6 cm 之间,新竹平均胸径差异显著($P<0.05$),表现为 CK>D1>D2>D3>D4,6 m、9 m 和 12 m 采伐带的新

竹平均胸径显著低于 CK,表现出随带状采伐强度增加,新竹平均胸径逐渐减少的趋势。

比较同一带状采伐处理新竹与母竹之间的差异发现,CK、3 m 和 6 m 采伐带新竹与母竹之间平均胸径差异不显著($P>0.05$),且对照新竹平均胸径(9.6 cm)略大于母竹平均胸径(9.4 cm);但 9 m 和 12 m 采伐带,新竹平均胸径显著小于母竹平均胸径($P<0.05$),分别减少了 20%和 29%,说明较高强度带状采伐对新竹的平均胸径影响更强烈。

3.2.2 新竹胸径的次数分布 不同强度带状采伐样地的新竹胸径在不同胸径区间内分布有一定差异(图 7),其中 3 m 采伐带胸径分布表现为双峰型,峰值分别在 4.0~6.0 cm 和 8.0~10.0 cm(最大峰值);6 m、9 m、12 m 和 CK 的新竹胸径分布均表现为单峰型,最大峰值分别出现在 8.0~10.0 cm,6.0~8.0 cm,4.0~6.0 cm 和 8.0~10.0 cm。与 CK 相比,较高强度的带状采伐方式可能导致新竹胸径分布的最大峰值降低(9 m 和 12 m 采伐带)。带状采伐处理之间比较发现,随采伐强度的增加,新竹胸径分布的最大峰值有逐渐降低的趋势,从 8.0~10.0 cm 逐渐降至 4.0~6.0 cm。

带状采伐强度增加可能导致中小径级新竹(胸径低于 6 cm)的比例增加,由图 7 可见,对照新竹胸

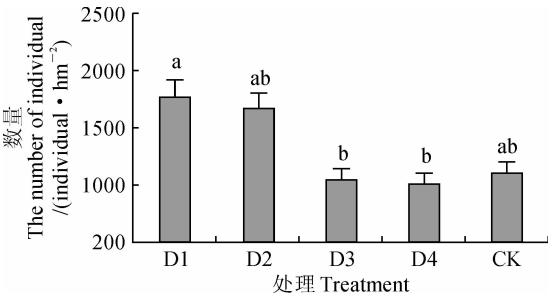


图 2 不同采伐强度下林分退笋量

Fig. 2 The number of degraded shoots under different logging intensities

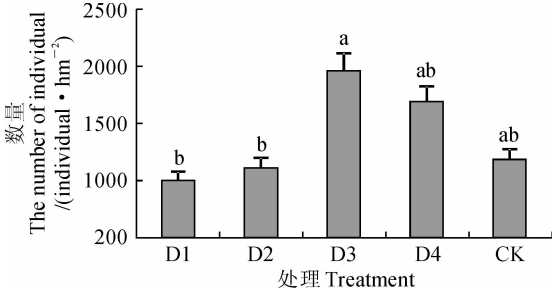


图 4 不同采伐强度下林分成竹量

Fig. 4 The number of new bamboos under different logging intensities

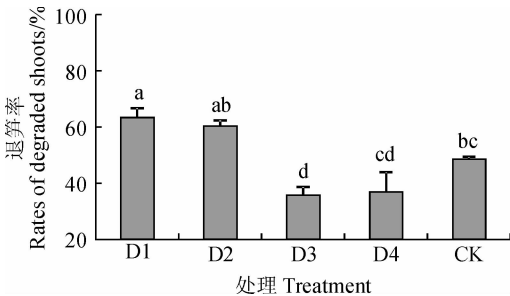


图 3 不同采伐强度下林分退笋率

Fig. 3 Rates of degraded shoots under different logging intensities

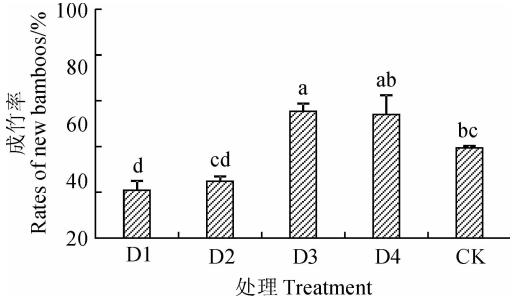


图 5 不同采伐强度下林分成竹率

Fig. 5 Rates of new bamboos under different logging intensities

径 6 cm 以下的比例仅占 4.29%,而带状采伐处理(D1~D4)新竹胸径 6 cm 以下的比例分别为 23.53%、10.52%、31.07%和 49.16%,其中 9 m 采伐带中小径级新竹占比将近 1/3,12 m 采伐带中小径级新竹占比将近 1/2,通常中小径级竹材的加工利用价值很低,同时,中小径级新竹比例的增加不利于毛竹林后期恢复,因此带状采伐的强度不宜过大。

3.2.3 新竹胸径与采伐带边距相关性 通过新竹胸径和边距散点图(图 8)可以发现,部分处理新竹胸径和边距可能存在线性关系,对各处理新竹胸径和边距进行线性相关性分析(表 2),发现 CK、3 m

表 2 新竹胸径与边距相关性分析

Table 2 The correlation coefficient between the DBH of new bamboo and margin

处理 Treatment	Pearson 相关系数	显著性 Sig.
D1	-0.141	0.590
D2	-0.062	0.711
D3	-0.340 **	0.000
D4	-0.214 *	0.020
CK	-0.021	0.809

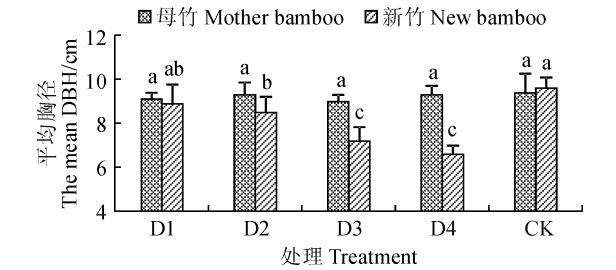


图 6 不同采伐强度下毛竹平均胸径

Fig. 6 The mean DBH of *Phyllostacheys edulis* under different logging intensities

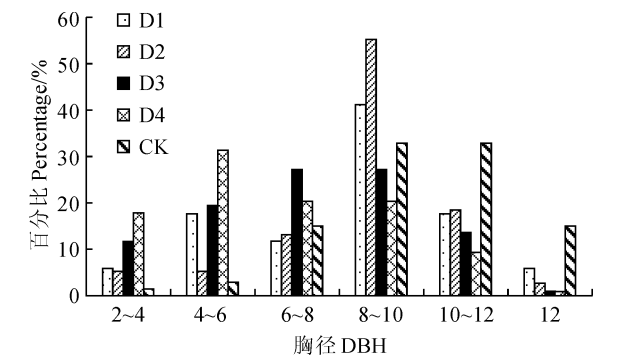


图 7 不同采伐强度下林分新竹胸径次数分布

Fig. 7 The DBH distribution of new bamboos under different logging intensities

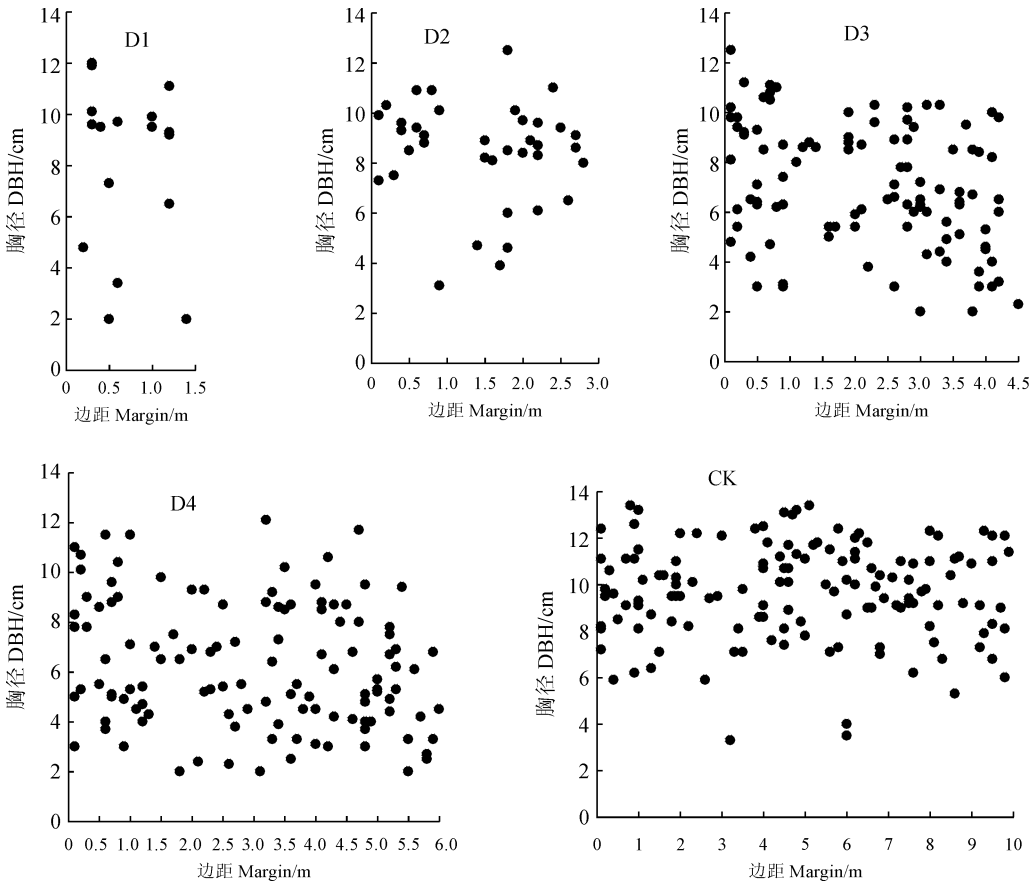


图 8 新竹胸径与边距散点图

Fig. 8 The scatter plots between the DBH of new bamboo and margin

表 3 不同采伐强度下林分新竹地上生物量

Table 3 The aboveground biomass of new bamboos under different logging intensities

处理 Treatment	密度 Density/(individual · hm ⁻²)	平均胸径 Mean DBH/cm	标准单株地上生物量 Biomass of individual/kg	单位面积林分新竹地上生物量 Aboveground biomass/(kg · hm ⁻²)
D1	840±165b	8.9±1.46ab	10.70±2.96ab	9 130.34±918.15b
D2	1 050±338b	8.5±1.27b	10.49±2.79b	10 391.87±1 251.18b
D3	1 850±304a	7.2±1.05c	8.00±1.73c	14 138.69±2 362.56a
D4	1 525±352ab	6.6±0.67c	6.79±0.83c	10 404.36±1 058.45b
CK	1 165±324ab	9.6±0.82a	11.97±1.86a	14 346.96±2 730.52a

和 6 m 采伐带新竹的胸径和采伐带边距之间不相关($P>0.05$),但 9 和 12 m 采伐带新竹胸径和边距之间有较弱的负相关($P<0.05$),相关系数分别为-0.34 和-0.214,说明随着新竹与采伐带边界距离的增加,新竹胸径有逐渐减小的趋势,距离采伐带边界较大的新竹可能由于养分供应不足或环境因子抑制等因素而使笋期发育受到限制,从而在外形上表现出矮小等不良性状。

3.3 带状采伐毛竹林恢复的新竹生物量特征

由表 3 可见,不同强度带状采伐毛竹林新竹地上生物量差异明显,各处理新竹单位面积地上生物量表现为 CK>D3>D4>D2>D1。带状采伐处理(D1~D4)新竹单位面积地上生物量均小于对照,比对照分别减少了 36.4%、27.6%、1.5% 和 27.5%。平均单株毛竹地上生物量 CK>D1>D2>D3>D4,随采伐强度的增加,平均单株毛竹地上生物量逐渐降低,其中 12 m 采伐带单株毛竹地上生物量降低的最为明显,与对照相比仅为其 56.7%。

平均胸径和新竹密度是影响单位面积新竹地上生物量的主要因素,带状采伐对新竹平均胸径和单位面积数量均有影响。与对照相比,带状采伐处理(D1~D4)新竹每公顷地上生物量分别减少了 36.4%、27.6%、1.5% 和 27.5%,其中 9 m 和 12 m 采伐带主要由于新竹胸径显著减小导致单株毛竹地上生物量减少,但 9 和 12 m 采伐带单位面积新竹数量大于对照,因此新竹单位面积地上生物量略低于对照;而 3 和 6 m 采伐带新竹的平均胸径和单位面积数量均小于对照,因此新竹单位面积地上生物量均小于对照。带状采伐措施均导致伐后次年单位面积新竹地上生物量下降,说明带状采伐对新竹的生长带来了一定的短期负面影响。

4 结论与讨论

森林采伐既是收获林产品的重要方式,也是森林更新的重要手段,采伐可能导致森林植物种群结

构和数量发生变化^[10-12],从而影响恢复更新进程和效果。竹类植物作为典型的克隆植物,主要通过地下竹鞭上的笋芽膨大萌发,形成新的植株繁衍后代,完成种群自我更新^[13]。春笋和新竹的数量特征一定程度上能够表征毛竹林繁殖和更新能力,分析其差异对研究带状采伐后竹林恢复至关重要。本研究带状采伐处理单位面积发笋数量均大于 CK,说明带状采伐方式促进了林地春笋的萌发,通常光照的增强有利于克隆植株产生更多的克隆分株^[14],带状采伐方式伐除了林地毛竹,增强了林地光照时长和质量,从而有利于林地春笋的萌发;也可解释为植物的补偿性生长^[15],采伐增加了笋芽的相对增长率^[16]。本研究较高强度带状采伐处理(9 和 12 m 采伐带)单位面积成竹数量明显大于 CK,该结果与同为刚竹属的桂竹(*Phyllostachys bambusoides*)和淡竹(*Phyllostachys glauca*)皆伐试验结果一致^[17-18],较低强度带状采伐处理(3 和 6 m 采伐带)因退笋率较高,单位面积成竹数量略低于 CK,王仁等^[19]研究毛竹林皆伐和择伐试验发现,采伐后次年皆伐处理单位面积新竹数量(2 600 株·hm⁻²)低于择伐处理(4 400 株·hm⁻²)和未采伐处理(3 233 株·hm⁻²),与本研究结果一致;采伐后单位面积成竹数量差异可能与林分类型、林分质量(林分密度和母竹胸径等)、采伐强度以及环境条件有较大联系。

大多数双子叶植物通过形成层干细胞分裂实现茎秆的径向生长^[20],森林采伐后,从幼苗生长至幼树,再到林分成熟,通常需要较长的周期,林分质量(胸径和生物量等)的完全恢复可能需要几十年甚至上百年^[21-22]。竹类植物竹秆没有形成层,竹秆的增粗无需周期性的径向生长过程,新竹的胸径在笋期基本已经固定^[23],因而竹林采伐后,新竹胸径恢复状况一定程度上可以评价采伐竹林恢复质量。不同的采伐方式对伐后新竹的胸径影响不同,择伐可能会增加次年新竹平均胸径,但皆伐通常会致次年新竹平均胸径减小^[18],由于竹子是克隆植物^[24],具

有特殊的生理整合能力(逆境时整合养分和水分等),即使成熟母竹被采伐,与母竹相连的地下竹鞭上的侧芽也可能通过竹鞭从邻近别的成熟母竹获取生长发育所需的碳水化合物^[25],但碳水化合物的供给并非充足且运输距离有限,因此可能导致春笋养分供应不足而导致胸径变小甚至退化。本研究发现择伐后次年,新竹平均胸径较母竹有略微增加,但带状采伐后毛竹林新竹胸径较母竹有不同程度减小,其中 9 m 和 12 m 采伐带新竹平均胸径明显小于母竹,分别减少了 20% 和 29%;不同强度带状采伐处理之间 2018 年新竹胸径差异显著,且随采伐强度增加,新竹平均胸径逐渐减小,说明带状采伐对次年新竹平均胸径造成了一定的负面影响,这与其他学者开展竹林皆伐试验研究结果一致^[26,17,19];随着采伐带宽度增加到 9~12 m 时,林分中小径级新竹比例明显上升,且新竹的平均胸径和边距之间有显著的负相关,说明带状采伐次年,当采伐带宽度超过 9 m 时,新竹平均胸径会随着采伐带宽度的增加而显著减小,离采伐带边界距离较大的新竹可能由于养分供应不足生长受到限制,从而导致中小径级新竹比例明显增加,因此,选择适当强度的带状采伐方式对竹林恢复至关重要。

森林采伐对林分年平均蓄积生长量和地上生物量有影响,随采伐强度增加,林分地上生物量呈下降

趋势^[27],林分年平均蓄积生长量呈现先增加再降低的趋势,采伐强度过大时,林分年平均蓄积生长量不升反降^[28]。林分平均胸径和密度是影响单位面积毛竹地上生物量的主要因素^[29],带状采伐对新竹平均胸径和单位面积株数有影响,与 CK 相比,带状采伐处理(D1~D4)新竹单位面积地上生物量分别减少了 36.4%、27.6%、1.5% 和 27.5%,带状采伐措施均导致伐后次年单位面积新竹地上生物量下降,这与王仁等^[19]研究结果一致,较低强度带状采伐处理(3 和 6 m 采伐带)因新竹林分平均胸径和单位面积数量均低于 CK,导致新竹地上生物量较低,较高强度带状采伐处理(9 和 12 m 采伐带)新竹平均胸径显著低于 CK,从而导致新竹地上生物量低于 CK。

带状采伐方式对单位面积新竹数量、胸径和地上生物量影响存在差异,总体来看,较高强度带状采伐方式(9 和 12 m 采伐带)有利于新竹数量的增加,但新竹胸径呈现明显下降趋势,采伐林分次年新竹地上生物量均呈下降趋势,从采伐林分初期质量恢复特征来看,6~9 m 采伐带宽度,春笋和新竹恢复能力较强。由于时间紧迫,本研究仅分析了带状采伐次年后新竹的质量恢复特征,并不足以评价不同强度带状采伐方式的恢复效果,需要综合考虑不同强度带状采伐措施对新竹质量影响的长期效应,才能探索出最佳的带状采伐方式。

参考文献:

[1] 江泽慧. 世界竹藤[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 2002.

[2] LIESE W, KÖHL M. Bamboo-The Plant and Its Uses[M]. Springer, 2015.

[3] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. 林业资源管理, 2014, (1): 1-2.

SFA. Results of the eighth national forest resources inventory [J]. *Forest Resources Management*, 2014, (1): 1-2.

[4] 刘仕咄, 谢乔武. 毛竹的生长特性与竹林采伐[J]. 湖南林业, 2009, (5): 26-27.

LIU S D, XIE Q W. Growth characteristics of *Phyllostachys edulis* and logging of Moso bamboo forest[J]. *Hunan Linye*, 2009, (5): 26-27.

[5] 孙正军, 费本华. 中国竹产业发展的机遇与挑战[J]. 世界竹藤通讯, 2019, (1): 1-5.

SUN Z J, FEI B H. Opportunities and challenges for the development of bamboo industry in China[J]. *World Bamboo and Rattan*, 2019, (1): 1-5.

[6] 庄明浩, 李迎春, 陈双林, 等. 竹子生理整合作用的生态学意义及研究进展[J]. 竹子研究汇刊, 2011, 30(2): 5-9.

ZHUANG M H, LI Y C, CHEN S L, *et al.* Advances in the researches of bamboo physiological integration and its ecological significance[J]. *Journal of Bamboo Research*, 2011, 30(2): 5-9.

[7] 盛丽娟, 李德志, 朱志玲, 等. 克隆植物的碳素生理整合及其生态学效应[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(6): 888-894.

SHENG L J, LI D Z, ZHU Z L, *et al.* Carbon physiological integration in clonal plants and its ecological effects[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2007, 13(6): 888-894.

[8] 朱志玲, 李德志, 王绪平, 等. 克隆植物的水分生理整合及其生态效应[J]. 西北植物学报, 2006, 26(12): 2 602-2 614.

ZHU Z L, LI D Z, WANG X P, *et al.* Water physiology integration and its ecological effect of clonal plants[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(12): 2 602-2 614.

[9] 曾令志. 毛竹采伐讲究“度”[J]. 湖南林业, 2008, (10): 27.

ZENG L Z. The harvesting of *Phyllostachys edulis* depends on ‘Du’[J]. *Hunan Linye*, 2008, (10): 27.

- [10] KÖHLER P, HUTH A. Impacts of recruitment limitation and canopy disturbance on tropical tree species richness[J]. *Ecological Modelling*, 2007, **203**(3): 511-517.
- [11] MCDONALD R I, MOTZKIN G, FOSTER D R. The effect of logging on vegetation composition in Western Massachusetts[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**(12): 4 021-4 031.
- [12] OKUDA T, SUZUKI M, *et al.* Effect of selective logging on canopy and stand structure and tree species composition in a lowland dipterocarp forest in peninsular Malaysia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, **175**(2 003): 297-320.
- [13] 刘 庆, 钟章成. 斑苦竹无性系种群克隆繁殖的动态与调节研究[J]. 植物研究, 1996, **16**(2): 228-234.
LIU Q, ZHONG Z C. Studies on dynamics and regulation of propagative module of *Pleiblastus maculata* clone population [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 1996, **16**(2): 228-234.
- [14] 罗学刚, 董 鸣. 蛇莓克隆构型对光照强度的可塑性反应[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(4): 494-497.
LUO X G, DONG M. Architectural plasticity in response to light intensity in the stoloniferous herb, *Duchesnea indica* Focke [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(4): 494-497.
- [15] MCNAUGHTON S J. Compensatory plant growth as a response to herbivory[J]. *Oikos*, 1983, **40**(3): 329-336.
- [16] JOSÉ MARTÍN VÁZQUEZ-LÓPEZ, VIBRANS H, EDMUNDO GARCÍA-MOYA, *et al.* Effects of harvesting on the structure of a neotropical woody bamboo (*Oatea*: Guaduinae) populations [J]. *Interciencia*, 2004, **29**(4): 207-211.
- [17] UEDA K, HASHIMOTO E, WATANABE M. On the Influence of the clear cutting of mature culms upon the growth of new culms and rhizomes[J]. *Bulletin of The Kyoto University Forests*, 1960, **29**: 129-139.
- [18] 王龙凤, 范承芳, 梁 宽, 等. 基于克隆整合特性的劳动节约型竹林采伐新模式探索[J]. 江西农业大学学报, 2016, **38**(6): 1 110-1 118.
WANG L F, FAN C F, LIANG K, *et al.* An approach to a labor-saving cutting model for bamboo forest management, a study based on clonal integration[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2016, **38**(6): 1 110-1 118.
- [19] 王 仁, 陳財輝, 陳信佑, 等. 孟宗竹林伐採後二年間地上部生物量與碳吸存量動態[J]. 林業研究季刊, 2010, **32**(3): 35-44.
WANG R, CHEN C H, CHEN X Y, *et al.* Estimating aboveground biomass and carbon sequestration of Moso bamboo grown under selection cutting after two years[J]. *Quarterly Journal of Forest Research*, 2010, **32**(3): 35-44.
- [20] SHI D, LEOVKA I, LÓPEZ-SALMERÓN V, *et al.* Bifacial cambium stem cells generate xylem and phloem during radial plant growth[J]. *Development*, 2019, **146**(1): 1-8.
- [21] KARIUKI M, KOOYMAN R M, SMITH R G B, *et al.* Regeneration changes in tree species abundance, diversity and structure in logged and unlogged subtropical rainforest over a 36-year period[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **236**(2 006): 162-176.
- [22] ELLIOTT K J, KNOEPP J D. The effects of three regeneration harvest methods on plant diversity and soil characteristics in the southern Appalachians[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **211**(3): 296-317.
- [23] 张 莹, 田 埂, 路慧萍, 等. 厚壁毛竹六个节气笋芽发育的转录组分析[J]. 江西农业大学学报, 2015, (3): 466-474.
ZHANG Y, TIAN G, LU H P, *et al.* Transcriptome characterization of *Phyllostachys edulis* ‘Pachyloen’ shoots in different solar terms [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2015, (3): 466-474.
- [24] 施建敏, 叶学华, 陈伏生, 等. 竹类植物对异质生境的适应——表型可塑性[J]. 生态学报, 2014, **34**(20): 5 687-5 695.
SHI J M, YE X H, CHEN F S, *et al.* Adaptation of bamboo to heterogeneous habitat: phenotypic plasticity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(20): 5 687-5 695.
- [25] SONG X Z, PENG C H, ZHOU G M, *et al.* Dynamic allocation and transfer of non-structural carbohydrates, a possible mechanism for the explosive growth of Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 25 908.
- [26] KODANI J, ESAKI K. Effect of the duration of abandonment on development of understory vegetation in bamboo forests[J]. *Japanese Journal of Forest Environment*, 2012, **54**(1): 19-28.
- [27] 王 敏, 贺红士, 梁 宇, 等. 采伐强度对长白山森林地上生物量和景观格局的长期影响[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(10): 2 581-2 587.
WANG M, HE H S, LIANG Y, *et al.* Long-term effects of harvest intensity on forest above-ground biomass and landscape pattern of Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(10): 2 581-2 587.
- [28] 董希斌, 王立海. 采伐强度对林分蓄积生长量与更新影响的研究[J]. 林业科学, 2003, **39**(6): 122-125.
DONG X B, WANG L H. Impacts of cutting intensity on volume increment and regeneration of different forests[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, **39**(6): 122-125.
- [29] ZHANG H X, ZHUANG S Y, SUN B, *et al.* Estimation of biomass and carbon storage of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex Houz.) in southern China using a diameter-age bivariate distribution model[J]. *Forestry An International Journal of Forest Research*, 2014, **87**(5): 674-682.

(编辑:潘新社)