

带状轮伐毛竹林林分恢复特征研究

厉振¹ 官凤英^{1*} 周潇¹ 张璇¹ 傅大伟¹ 黎旻恺¹

(1.国际竹藤中心 北京 100102)

摘要:【目的】毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 是我国重要的森林资源。带状采伐是一种高效、适宜机械化作业的新型竹林经营模式, 该模式利用毛竹克隆整合特性, 设置采伐带和保留带, 保留带养分通过鞭根系统传输支撑采伐带更新。为探究不同采伐带宽 (3 m、5 m、8 m) 和轮伐期 (2 a、4 a、6 a) 下毛竹林林分恢复特征, 【方法】本研究以原保留带为采伐带, 以原采伐带为保留带进行轮伐, 调查分析不同采伐带宽和轮伐期样地轮伐后样地新竹生长特征, 为带状采伐可持续经营提供依据。【结果】研究表明, 轮伐后, 新生竹恢复与首次采伐恢复特征相似, 即与传统择伐相比, 出笋量、成竹数增加, 平均胸径、枝下高降低, 新生竹叶生物量占比上升, 此现象随着采伐带宽增大而愈明显。各轮伐期下的新生竹表现相似。【结论】总体来看, 缩小带状采伐的采伐带宽可以一定程度上减缓新生竹的质量下降的情况; 3 种轮伐期下的毛竹林林分恢复情况接近, 可按具体生产经营目标确定轮伐期。

关键词: 毛竹; 带状采伐; 轮伐; 林分恢复

Research on Restoration Characteristics of Bamboo (*Phyllostachys edulis*) Forest Stands after RotaviteStrip Cutting

LiZhen¹ GuanFengying^{1*} ZhouXiao¹ ZhangXuan¹ FuDawei¹ LiMinkai¹

(1. International Center for Bamboo and Rattan Beijing 100102)

Abstract: 【Objective】Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) is an important component of forest resources in China. Strip cutting is a new type of efficient and suitable mechanized bamboo forest management model. This model utilizes the integration characteristics of bamboo clones to set up harvesting and retention zones, and the nutrients in the retention zone are transmitted through the whip root system to support the renewal of the harvesting zone. To explore the recovery characteristics of bamboo stands in different logging bandwidths (3 m, 5 m, 8 m) and rotation periods (2 a, 4 a, 6 a), this study used the original reserve zone as the logging zone and the original logging zone as the reserve zone for rotation. 【Method】The study investigated and analyzed the growth of new bamboo, changes in soil nutrients, and underground whip root characteristics in different logging bandwidths and rotation periods after rotation, providing a basis for sustainable management of strip cutting. 【Result】After rotational logging, the recovery characteristics of newly formed bamboo are similar to those of the first harvesting, that is, compared with traditional selective logging, the number of shoots and mature bamboo increases, the average diameter at breast height and height under branches decrease, and the proportion of biomass of newly formed bamboo leaves increases. This phenomenon becomes more pronounced as the harvesting bandwidth increases. The performance of newly grown bamboo is similar in each rotation period. 【Conclusion】Overall, reducing the cutting bandwidth of strip cutting can to some extent slow down the decline in the quality of new bamboo; The recovery situation of bamboo stands under three different rotation periods is similar. The rotation period can be determined according to specific production and management goals.

Key words: Moso bamboo; strip cutting; rotation; forest stand recovery

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 是我国南部地区广泛分布的多年生禾本科植物, 具有重要的经济和生态价值。在全球限塑令的推广下, 寻找可再生且环保的原料来代替塑料已成热点问题, 毛竹生长速度快、产量高、且可再生, 具有可持续性。2023 年 10 月, 国家发改委等部门发布了《加快发展“以竹代塑”三年行动计划》, 提出了到 2025 年初步建立“以竹代塑”产业体系等行动目标。以竹代塑的应用可以减少塑料的使用量, 降低对环境的破坏和污染, 同时也有利于促进可持续发展的生态平衡。毛竹资源丰富, 是优质的以竹代塑原材料, 但因毛竹林属于典型的异龄林, 传统的竹林择伐采收方式, 劳动力需求量大, 采伐成本随着社会人口城市化加剧而日益增加(范少辉等, 2018), 影响了竹产业的发展和效益提升。近年来, 基于毛竹的克隆整合特性, 提出了带状皆伐经营模式, 旨在通过机械化经营和成本节约, 实现生产的集中和效率提高。带状采伐通过设置采伐带和保留带, 利用保留带母竹的地下结构为采伐带内的竹笋和幼竹提供水分和养分, 促进竹林的更新(谭宏超等, 2017; 陈家洪等, 2010; 王龙凤等, 2016; 刘仕咄等, 2009)。国际竹藤中心官凤英研究团关于带状采伐模式开展了系统研究, 研究表明: 带状采伐自然恢复需要 4 年采伐带竹林恢复至采伐前的状态, 通过采伐竹林养分管理, 采伐后的竹林在 1 年内恢复到伐前水平(曾宪礼等, 2019; 詹美春等, 2019; 李承基等, 2024)。但是关于更新后的采伐带能否支撑轮伐带竹林持续更新研究尚未开展, 因此, 本研究开展第二次采伐后带状采伐毛竹林恢复特征研究, 掌握轮伐后不同采伐带宽以及不同轮伐期下的毛竹林的新生竹数量、林分结构等方面的变化规律, 明确轮伐后不同采伐带宽以及不同轮伐期的带状采伐毛竹林的恢复情况, 为带状采伐毛竹林可持续经营提供理论依据。

1 研究区概况

试验样地设置于中国江苏省无锡市宜兴市丁蜀镇国有宜兴林场(如图 1)。国有宜兴林场地处江苏省与浙江省交界处, 北纬 $31^{\circ} 07' - 31^{\circ} 37'$, 东经 $119^{\circ} 31' - 120^{\circ} 03'$ 之间, 占地 5.1 万亩, 是苏南地区最大的国有林场, 活立木蓄积 10 万 m^3 , 毛竹立竹数 250 万枝, 森林覆盖率达 97%, 属北亚热带季风气候, 是毛竹分布区的东北边缘地带。研究区主要经营措施包括人工择伐 IV 度及以上老竹、病虫害防治、伐除灌草枯死木、雪压木等, 不开展施肥、垦复等集约经营措施。研究区同时还开展毛竹冬、春采挖及开放旅游观光, 所有人为因素的强度均为可控。



图 1 地理位置

Fig.1 Location of plots

2 研究方法

2.1 样地设置

以宜兴市国有林场内 2017 年初，2019 年初，2021 年初开展带状采伐研究的样地进行试验。2023 年初，以原保留带为采伐带，相邻的原采伐带为保留带交替带状采伐的方式进行轮伐（如图 2）。2023 年初对原带状采伐样地进行第二次采伐时，2017 年初次采伐的样地已恢复 6 a，原采伐带有 I 度、II 度、III 度竹； 2019 年初次采伐的样地已恢复 4 a，保留带有 I 度、II 度竹；2021 年初次采伐的样地已恢复 2 a，保留带有 I 度竹。试验所选样地长度均为 20 m。在 2022 年 12 月初、对全部的采伐样地与保留样地进行每亩 80 kg 穴施毛竹丰产肥，促进新生竹恢复，使全部样地均为人工施肥经营样地。样地信息如表 1 所示。

探究不同采伐带宽下经历第二次采伐后的带状采伐毛竹林恢复情况，挑选带宽 8 m 的原保留样地 3 块，带宽 5 m 的原保留样地 3 块，带宽 3 m 的原保留样地 3 块，轮伐期均为 6 a，在 2023 年 2 月进行皆伐，相邻的原采伐带为保留带。

探究不同轮伐期下经历第二次采伐后的带状采伐毛竹林恢复情况，挑选轮伐期 6 a 的原保留样地 3 块，轮伐期 4 a 的原保留样地 3 块，轮伐期 2 a 的原保留样地 3 块，采伐带宽均为 8 m，在 2023 年 2 月进行皆伐，相邻的原采伐带为保留带。

表 1 研究样地基本概况
Tab. 1 Basic characteristics of the three sampling plots

样地代号	采伐带或保留带	带宽	轮伐期	样地面积(m2)	采伐时间	样地数量 (n)	海拔 (m)	坡度 (°)	坡向
Code	Cutting or Reserve	Width	Rotation	Areas	Cutting time	Number	Altitude	Slope	Slope direction
3 m	采伐带	3 m	6 a	20×3	2023 年	3	166.43	2	无
	保留带				2017 年	5			
5 m	采伐带	5 m	6 a	20×5	2023 年	3	165.55	2	无
	保留带				2017 年	5			
8 m (6 a)	采伐带	8 m	6 a	20×8	2023 年	3	164.29	2	无
	保留带				2017 年	5			
4 a	采伐带	8 m	4 a	20×8	2023 年	3	107.83	2	无
	保留带				2019 年	3			
2 a	采伐带	8 m	2 a	20×8	2023 年	3	108.68	4	无
	保留带				2021 年	3			
CK	—	—	—	10×10	—	3	121.88	2	无
CK2017	—	—	—	20×20	—	3	167.10	2	无

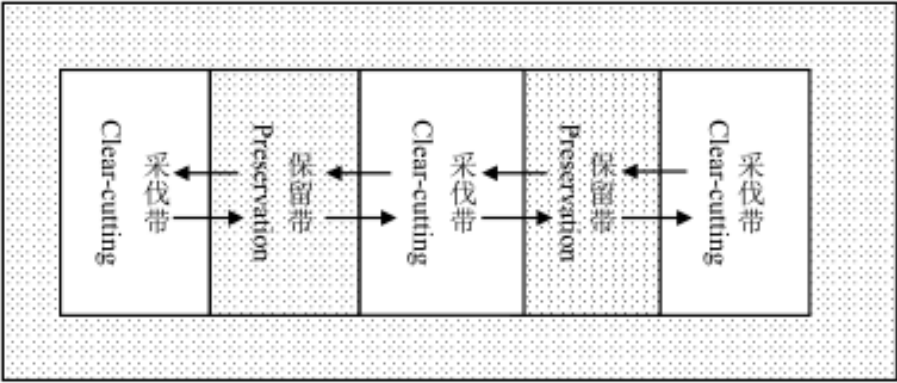


图 2 带状轮伐设计示意图

Fig.2 Rotavite strip cutting design

2.2 研究方法

2.2.1 出笋成竹特征调查 2023 年 3 月、11 月开展，调查对象为所有的采伐样地及相邻保留样地，笋期自出笋第一天起，每隔 3 天调查 1 次，记录出退笋，调查项目及方法如表 2 所示。

表 2 新生竹调查项目及方法

Tab.2 Survey items and methods of newborn bamboo	
调查项目 Survey items	调查方法 Survey methods
出笋数、成竹率	统计样地内所有的出笋数与退笋数 成竹率=成竹数/出笋数
新生竹平均胸径、枝下高、立竹密度	春笋成竹后，每木检尺，计算平均胸径、枝下高 立竹密度=立竹数/样地面积，株/hm ² 为单位
径阶分布	将新生竹按 2cm 径阶整化，统计径阶分布情况
新生竹生物量	采集枝、秆、叶，分别测其鲜重烘干至恒重测其干重
郁闭度	使用鱼眼镜镜头竖直向冠层拍摄，用 HemiView 冠层数字分析仪分析

2.2.2 生物量特征调查 2023 年 11 月，进行地上生物量的调查，调查对象为所有的采伐样地。采用标准木解析法（根据计算得到的各样地新生竹的平均胸径，从所有新生竹中筛选相应大小的作为标准竹，贴地伐倒并打掉枝叶。分别称量竹秆和竹枝、叶总重，根据毛竹林冠的上、中、下层选取标准枝，拆解带回实验室。根据伐倒竹全高，以 2 m 为区分段，称量各区分段鲜重后，在每段的形态学上端取一段竹秆带回实验室）。使用烘箱 105℃杀青 30 分钟后 75℃烘干至恒重，之后测定其干重，换算出毛竹单株生物量。

2.2.3 郁闭度特征调查 2023 年 11 月开展，调查对象为所有的采伐样地及相邻保留样地。该时间处于毛竹换叶后，叶片凋落减弱，冠层稳定的时期。在各样地内均匀的设 5 个观测，在离地相同高度（1.5 m）使用加装鱼眼镜镜头的手机竖直向冠层拍摄。

2.2.4 数据处理 数据统计采用 Microsoft Office Excel 2016，数理统计各项检验及分析采用 SPSS 20.0 进行，显著性水平设置为 0.05。图表制作采用 Origin 2021 及 Microsoft Office Excel 2016。

3 结果与分析

3.1 出笋特征

如表 3,4,5,6 所示，采伐可促进带状采伐毛竹林地发笋，各类型带状采伐样地发笋时间较对照样地约提前 1 周左右，平均出笋天数相近，采伐带出笋数和成竹率均显著高于（ $p<0.05$ ）对照样地，保留带出笋数也全部显著高于（ $p<0.05$ ）对照样地，且各类型带状采伐样地采伐带出笋数均高于保留带。根据表 3，3 种不同带宽的带状采伐样地采伐带的笋数和成竹率接近，3 m 带宽的出笋数略低于 5 m 与 8 m，5 m 带宽的成竹率略低于 3 m 与 8 m，首次出笋时间以及平均出笋天数一致。根据表 4，3 种不同轮伐期的带状采伐样地采伐带的出笋数和成竹率接近，无显著性差异（ $p>0.05$ ），首次出笋时间以及平均出笋天数也相近。每公顷分别提高 1404.17、8562.50、1820.83 颗。根据表 5,6，各类型带状采伐样地保留带的出笋数接近，且均显著高于（ $p<0.05$ ）CK 对照组，带宽 8 m 轮伐期 6 a 的带状采伐样地保留带成竹率最高。

表 3 不同采伐带宽样地出笋情况

Tab.3 Shooting situation in sampling sites with different logging bandwidths				
样地代号	出笋数((n·hm ⁻²)	成竹率%	首次出笋时间	平均出笋天数(d)
Code	Average number of shoots	Rates of new bamboos	First shooting date	Average days of shoots
3 m	3500.00±833.33 ab	0.47±0.03 a	3 月 29 日	35

样地代号	出笋数((n·hm ⁻²)	成竹率%	首次出笋时间	平均出笋天数(d)
5 m	4566.67±757.19 a	0.42±0.08 ab	3 月 29 日	35
8 m	4104.17±473.24 a	0.48±0.02 a	3 月 29 日	35
CK	2700.00±374.16 b	0.37±0.04 b	4 月 7 日	32

表 4 不同轮伐期样地出笋情况

Tab.4 Shooting situation in sample plots with different rotation years

样地代号	出笋数((n·hm ⁻²)	成竹率%	首次出笋时间	平均出笋天数 (d)
Code	Average number of shoots	Rates of new bamboos	First shooting date	Average days of shoots
6 a	4104.17±473.25 a	0.48±0.03 a	3 月 29 日	35
4 a	3562.50±572.82 a	0.45±0.06 a	4 月 1 日	32
2 a	4520.83±531.56 a	0.39±0.02 a	4 月 1 日	35
CK	2700.00±374.10 b	0.37±0.04 b	4 月 7 日	32

表 5 不同采伐带宽样地出笋情况（保留带）

Tab.5 Shooting situation in sampling sites with different logging bandwidths (keepeland)

样地代号	出笋数(n·hm ⁻²)	成竹率%
Code	Average number of shoots	Rates of new bamboos
3 mK	3111.11±481.13 a	0.36±0.05 a
5 mK	4033.33±1115.05 a	0.40±0.02 a
8 mK	3458.00±236.62 a	0.42±0.08 a
CK	2700.00±374.16 b	0.37±0.04 a

表 6 不同轮伐期样地出笋情况（保留带）

Tab.6 Shooting situation in sample plots with different rotation years (keepeland)

样地代号	出笋数(n·hm ⁻²)	成竹率%
Code	Average number of shoots	Rates of new bamboos%
6 aK	3458.00±236.62 a	0.42±0.08 a
4 aK	3437.50±390.31 a	0.38±0.03 a
2 aK	3625.00±380.17 a	0.37±0.05 a
CK	2700.00±374.16 b	0.37±0.04 a

3.2 新生竹胸径、枝下 特征

如表 7,8,9,10 所示，各类型带状采伐样地采伐带相较于 CK 对照组均出现平均胸径下降、平均枝下高下降、立竹密度下降的情况。根据表 7，3 种不同带宽的带状采伐样地采伐带的平均胸径、平均枝下高随着带宽的增加而下降，为 3 m>5 m>8 m,差异显著（ $p<0.05$ ），但从成竹数量来看 3 m<5 m<8 m。呈现平均胸径和枝下高随带宽增加而降低，平均立竹度随带宽增加而增高的趋势。根据表 8，3 种不同轮伐期的带状采伐样地采伐带平均胸径、平均枝下高相较 CK 对照组显著下降（ $p<0.05$ ），轮伐期 6 a 的样地下降最为明显。如表 9,10 所示，各类型带状采伐样地保留带的平均胸径基本与 CK 对照组相似，仅 5 m 带宽的平均胸径未恢复至 CK 对照组水平，但 5 m 带宽的新生竹立竹密度高于 3 m 与 8 m 带宽，且较对照组提高了 54.84%。各样地新生竹平均枝下高依然显著低于（ $p<0.05$ ）CK 对照组。根据表 9,10，3 种不同带宽以及 3 种不同轮伐期的带状采伐样地保留带新生竹胸径与 CK 相近，且平均立竹度普遍高于 CK 对照组。

根据表 11 显示, 带状采伐第二次采伐的 CK 对照组新生竹质量低于第一次采伐的 CK 对照组, 平均胸径下降 0.93 cm, 立柱密度每公顷下降 952.67 株。第二次采伐后 3 种不同采伐带宽的带状采伐样地采伐带, 相较于第一次采伐后相比平均胸径分布下降 0.30 cm、0.44 cm、0.90 cm, 下降幅度小于 CK 对照组。

根据表 12 显示, 3 种不同轮伐期的带状采伐样地, 4 cm 径阶的小径竹占比较高(本研究中 4 cm 径阶包含全部胸径小于 5 cm 的小径竹), 分别为 27.37%、26.31%、27.06%, 而 CK 对照组无 4 cm 径阶竹; 12 cm 径阶的大径竹占比极低, 而 CK 对照组为 7.89%。3 种不同恢复年限的带状采伐样地中, 4 cm 径阶, 10、12 cm 径阶的新生竹占比相似, 在 6 cm 径阶占比中, 恢复 6 a>4 a>2 a, 8 cm 径阶则相反。虽然带状采伐样地相较于 CK 样地小径竹占比增加, 中大径竹占比减小, 但由于带状采伐样地成竹总数高于 CK 对照组, 从立竹密度来看 8 cm 径阶的中大径竹高于 CK 对照组。

表 7 不同采伐带宽样地新生竹情况

Tab.7 The situation of new bamboo in different logging bandwidth sample plots

样地代号	平均胸径(cm)	平均枝下高(m)	立竹密度(individual·hm ⁻²)
Code	Average DBH	Average CH	Average density
3 m	8.26±0.24 b	4.02±0.33 b	1666.67±500.00 a
5 m	7.24±0.12 c	3.54±0.03 c	1900.00±264.58 a
8 m	6.58±0.14 d	3.01±0.18 d	1979.17±144.34 a
CK	8.78±0.166 a	5.05±0.16 a	1033.33±249.44 b

表 8 不同轮伐期样地新生竹情况

Tab.8 The situation of new bamboo in different rotation years of sample plots

样地代号	平均胸径(cm)	平均枝下高(m)	立竹密度(individual·hm ⁻²)
Code	Average DBH	Average CH	Average density
6 a	6.58±0.14 b	3.01±0.18 c	1979.17±144.35 a
4 a	6.80±0.33 b	3.58±0.22 b	1583.33±236.62 a
2 a	6.93±0.16 b	3.50±0.14 b	1770.83±281.83 a
CK	8.78±0.166 a	5.05±0.16 a	1033.33±249.44 b

表 9 不同采伐带宽样地出笋情况(保留带)

Tab.9 The situation of new bamboo growth in different logging bandwidth sample plots (keepeland)

样地代号	平均胸径(cm)	平均枝下高(m)	立竹密度(individual·hm ⁻²)
Code	Average DBH	Average CH	Average density
3 mK	8.79±0.27 a	4.35±0.28 b	1111.11±96.23 ab
5 mK	7.93±0.42 b	3.94±0.35 b	1600.00±458.26 a
8 mK	8.27±0.37 a	3.94±0.23 b	1437.50±286.41 a
CK	8.78±0.17 a	5.05±0.16 a	1033.33±249.44 b

表 10 不同轮伐期样地出笋情况(保留带)

Tab.10 The situation of new bamboo in different rotation years of sample plots (keepeland)

样地代号	平均胸径(cm)	平均枝下高(m)	立竹密度(individual·hm ⁻²)
Code	Average DBH	Average CH	Average density
6 aK	8.27±0.37 a	3.94±0.23 b	1437.50±286.41 a
4 aK	8.21±0.89 a	4.41±0.58 b	1312.50±250.00 a
2 aK	8.23±0.54 a	4.15±0.40 b	1354.17±180.42 a
CK	8.78±0.166 a	5.05±0.16 a	1033.33±249.44 b

表 11 不同采伐带宽样地新生竹情况（首次采伐与第二次采伐对比）

Tab.11 The distribution of new bamboo diameter in different rotation years in sample plots (Comparison between First and Second Cutting)

样地代号 Code	平均胸径(cm) Average DBH		平均枝下高(m) Average CH		立竹密度(individual·hm ⁻²) Average density	
	2017 年	2023 年	2017 年	2023 年	2017 年	2023 年
3 m	8.56	8.26	4.39	4.02	2111.00	1667.67
5 m	7.68	7.24	3.61	3.54	3167.00	1900.00
8 m	7.48	6.58	3.65	3.01	2625.00	1979.17
CK2017/CK	9.71	8.78	6.54	5.05	1986.00	1033.33

表 12 不同轮伐期样地新生竹径阶分布

Tab.12 The distribution of new bamboo diameter in different rotation years in sample plots

样地代号 Code	各径阶立竹度及占比(individual·hm ⁻²) Vertical bamboo degree and proportion of each diameter step											
	4cm		6cm		8cm		10cm		12cm		总计	
6 a	541.67	27.37%	625	31.58%	520.83	26.31%	291.67	14.74%	0	0%	1979.17	100%
4 a	416.67	26.31%	291.67	18.42%	645.83	40.79%	208.33	13.16%	20.83	1.32%	1583.33	100%
2 a	479.17	27.06%	229.17	12.94%	854.16	48.24%	208.33	11.76%	0	0%	1770.83	100%
CK	0	0%	266.67	21.05%	466.66	36.84%	400	26.32%	100	7.89%	1033.33	100%

3.3 新生竹生物 特征

由于采伐后各样地内毛竹平均胸径减小，所选标准竹毛竹单株生物量较对照组下降。在不同采伐带宽样地的比较中，平均胸径随带宽增加而降低，单株生物量亦随带宽的增加而降低。在不同轮伐期样地的比较中，各组新生竹标准竹单株生物量接近。相较于 CK 对照，各组均呈现叶占比增多的趋势（图 3）。

轮伐后，新竹的平均胸径下降，平均立竹度上升，3 m、5 m 带宽下的新竹林分生物量高于 CK 对照组，8 m 带宽下的新竹林分生物量略低于 CK 对照组（图 4）。轮伐期 2 a、4 a、6 a 的样地中新生竹林分生物量较为接近，均略低于 CK 对照组（图 4）。

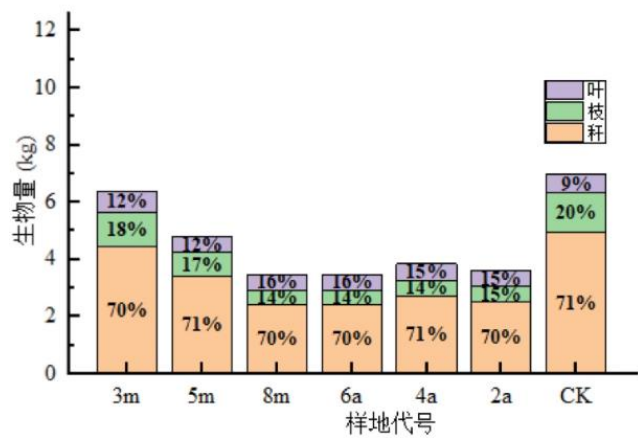


图 3 不同采伐带宽与轮伐期的新竹单株生物量

Fig.3 Individual biomass of bamboo under different harvesting bandwidths and recovery years

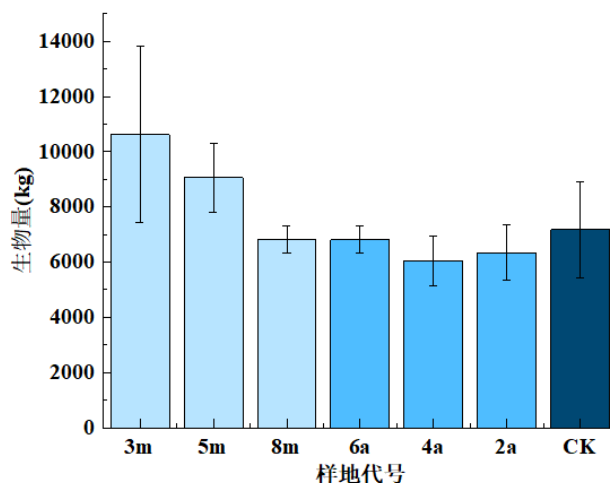


图 4 不同采伐带宽与轮伐期的新竹林分生物量

Fig.4 Stand biomass of bamboo under different harvesting bandwidths and recovery years

3.4 林分郁闭度特征

各组保留带郁闭度与 CK 对照组相比均无显著性差异 ($p>0.05$, 图 5), 3 种不同带宽的带状采伐样地中, 采伐带郁闭度为带宽 $5\text{ m}>3\text{ m}>8\text{ m}$, 3 种不同轮伐期带状采伐样地中, 采伐带郁闭度为轮伐期 $6\text{ a}>2\text{ a}>4\text{ a}$ 。

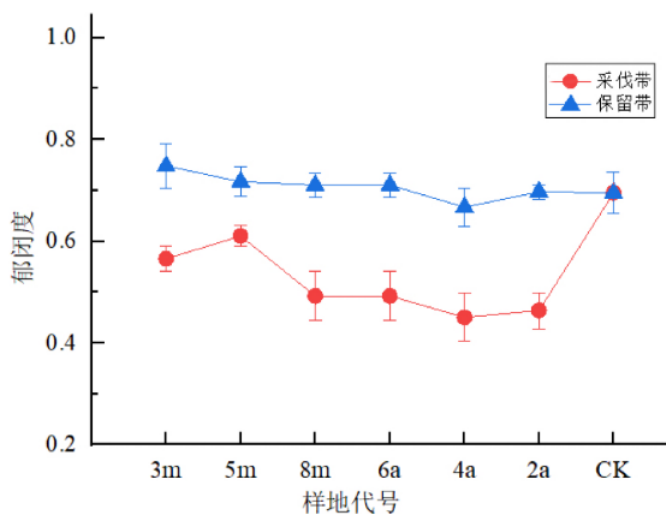


图 5 不同采伐带宽与轮伐期的毛竹林郁闭度

Fig.5 Canopy closure of bamboo forests with different harvesting bandwidths and recovery years

4 讨论

4.1 轮伐后毛竹林新竹胸径、枝下高与立竹密度特征

带状采伐作为一种集中度较高的管理方法, 通过其引起的林地养分的快速大量流失和林分环境的急剧变化, 构成了对毛竹林环境的一次强烈扰动 (周芳纯, 1998)。针对这样的扰动, 林分能否恢复到采伐前的状态, 包括其数量和质量的特性, 是竹林管理研究领域中的一个迫切需要探讨的问题。现有研究指出, 带状采伐后的毛竹林在数量和质量上能够实现恢复 (曾宪礼等, 2019), 尽管会出现伐后新生竹平均胸径降低、

立竹密度增加及中小径竹比例上升的情况。因此,在追求带状采伐的高效和高产目标中,首要挑战是如何解决“数量上升,质量下降”的问题。本研究进行了人工经营施肥干预,对各类型带状采伐第二次采伐后毛竹林恢复过程中数量和质量特征都有一定影响,对林分恢复的具有一定促进作用。春笋的发芽数量和成竹数量作为评估新生竹恢复效果的重要指标,前者为新生竹数量提供基础,后者直接反映了林分更新的情况。作为一种高强度管理措施,带状采伐创造的大面积林窗优化了林内光照环境,从而改善了水分、肥料和温度等环境条件,促进了春笋的生长。与传统的毛竹林管理相比,在带状采伐区域内不执行挖笋操作,加之较大的林窗为春笋提供了比传统方法更为有利的自然资源如光照、温度和水分,导致新生竹之间的竞争更加剧烈。本研究表明带状采伐第二次采伐后的单位面积出笋数量、成竹数量高于传统经营的毛竹林,但新生竹的平均胸径和平均枝下高度比传统管理的林地要低,与第一次采伐后新生竹表现相似。通过对采伐带宽度的分析显示,随着带状采伐带宽宽度的扩大,新生竹的平均胸径和平均枝下高度总体呈现下降趋势,而新生竹的数量即立柱密度呈现上升趋势。然而,与其他类型林分不同,毛竹林的恢复速度快,林窗的闭合速度也很快,导致林窗内部及周边保留区的环境条件在短期内急剧变化。采伐区域和保留区域的水分保持能力差异,加之直接或斜射的阳光照射,造成了生长环境的复杂性增加。因此,光、水、温 and 土壤肥力等环境因子的变化不仅共存也各不相同,这也使得带状采伐区域内新生竹的各项指标表现出明显差异。研究显示(詹美春等,2019),新生竹的数量与其平均胸径及枝下高度之间存在典型的负相关关系,而与总胸高断面积及采伐面积之间则表现为显著的正相关。较大的采伐面积或林窗面积对竹笋的发育和生长产生积极影响,即林窗面积增加,竹笋和新生竹株数亦增多。随着新生竹株数的增加,林分的新生竹胸高断面积也相应增大。然而,由于种内竞争加剧,新生竹的平均胸径和平均枝下高度随林窗面积的扩大而减小。换言之,尽管采伐操作可降低毛竹林在自然恢复条件下的平均质量(例如平均胸径和枝下高度),但它能在一定程度上确保毛竹林通过数量取胜,从而获得数量上的优势。因此,作为禾本科的一种,毛竹不仅具有显著的自然适应能力和繁殖力,还能作为优质的造林先锋树种、荒地水土保持和固碳树种。其强大的繁殖能力使其能在荒地上快速建立毛竹群落。带状采伐第二次采伐后,各个带宽之间新生竹的表现与第一次带状采伐后基本一致,第二次采伐后较短带宽的新生竹恢复表现更好。表明缩小带状采伐的采伐带宽可以一定程度上减缓新生竹的“质量下降”的情况,且一定程度上保留“数量上升”促进效果。新生竹胸径、枝下高、立竹度等总体恢复情况均为3 m 优于5 m 优于8 m,表明缩小带状采伐的采伐带宽可以一定程度上减缓新生竹的质量下降的情况。关于不同轮伐期之间的对比,总体来看,人工施肥干预下的带状采伐原采伐带在第一次采伐后恢复2 a,足够支撑原保留带作为新采伐带,进行采伐带-保留带交替的带状采伐第二次采伐。

4.2 轮伐后毛竹林生物量、郁闭度特征

土对毛竹地上生物量的分析表明,其不仅是毛竹林管理的关键目标和产出,还是评价林分生产力的关键标准(高歌等,2022)。通过带状采伐,实现了对毛竹生长周期中春笋发育至成竹阶段的有意调控,这种人为的调节改变了毛竹原有的养分分配模式;不同施肥调控对于毛竹地上部分生物量及其在秆、枝、叶等不同部位的分布具有不同影响,对于发现提升毛竹林分效益和产量的施肥策略具有重要参考价值(王树梅等,2022; Li 等,2024)。带状采伐增加了林分内的竞争,资源受限,使得新生竹通过调整自身生物量分配,以最大化地适应环境变化。施肥可以显著改善养分状况,减少毛竹的生长压力。因此,施肥后毛竹的单株总生物量相较未施肥的情况有所增加(Li 等,2024)。杉木的施肥实验也显示了施肥能显著提高目标树种的单株生物量(高歌等,2022)。施肥促进毛竹生物量增加的机制一方面是直接通过养分进入植物体,尤其是以钾为主的元素促进枝杆硬化生长;另一方面是通过增强光合作用,大量补充氮元素促进叶绿素合成和提

高光合作用速率,从而增加干物质的积累(郭强等,2022)。有研究表明在高氮高钾的施肥比例或大量施肥的条件下,新生毛竹的质量显著提升(李承基等,2024)。在生长初期,新生毛竹通过快速生长主导林层空间,随后发展枝叶。带状采伐导致小径毛竹数量增多,这些小径毛竹由于无法在高林层获取充足的光照,其生物量分配需要更多地侧重于光合器官;同时,这些小径新生毛竹需要在叶部投入更多养分,以增强其抗倒伏和抗断梢的能力。带状采伐后,小径毛竹的叶部生物量比例提高,反映出毛竹对环境变化具有较强的适应能力和较高的生物量分配可塑性。森林的顶层,由植物的叶片和枝干及其中的空气组成,构成森林生态系统与外界环境交流的重要层面(郭强等,2022)。该层面的结构在生态系统中对光能捕捉和物质循环起着关键作用。氮肥在施肥策略中扮演关键角色,是促进植物叶片生长、叶绿素合成及光合活动的主要元素。有研究表明(Li等,2024)毛竹林分冠层结构的变化产生了显著影响,导致新生竹叶的生物量相对减少。在毛竹林密集生长时,其树冠相互之间会发生竞争和挤压,自然发生整枝现象。施肥有助于恢复林分的立竹密度至采伐前的水平,缓解了因养分环境改善而可能引起的密度过高带来的竞争压力。由此,每株毛竹的树冠得以自由扩展,减少了树冠间的遮蔽和挤压,使得有效叶面积得到增加。植物调整叶片的倾斜角度以最大化光照吸收,是其进行光合作用并积累生长所需营养的策略。已有研究显示,作物的叶倾角与其叶片的形状、大小及根系分布和生长状况紧密相关,良好的水肥条件下作物的平均叶倾角会更大。本研究进行了穴施毛竹丰产肥的人为经营干预,但新生竹生物量各恢复年限与CK相比均为总量低,叶占比高,原因是因为采伐带小径竹占比增多,平均胸径降低,已至于选择的标准竹过小。采伐带郁闭度较CK对照与保留带低,除了因为采伐带中只有单一年龄结构的新生竹,还由于过多的小径竹出现了倒伏的情况,影响了郁闭度的恢复。

5 结论

带状轮伐(采伐带-保留带交替带状采伐)的第二次采伐,促进了春笋萌发,使毛竹提早出笋,出笋时间提前1周左右,出笋持续时间与未采伐样地相同。轮伐后的新生竹依然呈现“数量上升,质量下降”的情况,与第一次采伐相似。探究轮伐后不同采伐带宽下带状采伐毛竹林恢复情况,新生竹质量和郁闭度恢复情况均为3 m 优于 5 m 优于 8 m。表明缩小带状采伐的采伐带宽可以一定程度上减缓新生竹的“质量下降”的情况,且一定程度上能保持“数量上升”的优势。在探究轮伐后不同轮伐期下带状采伐毛竹林恢复情况中,轮伐期2 a的带状采伐毛竹林样地从出笋成竹、新生竹胸径、新生竹单株生物量与林分生物量等新生竹数量、质量指标来看,与轮伐期4 a、6 a的样地相比没有显著差异,各采伐带郁闭度接近,各保留带郁闭度接近并达到CK对照组水平。表明带状采伐样地在第一次采伐后,恢复2 a的原采伐带,足够支撑原保留带作为新采伐带,进行采伐带-保留带交替的带状采伐第二次采伐。3种轮伐期下的毛竹林林分恢复情况接近,可按具体生产经营目标确定轮伐期。

参 考 文 献

- 范少辉,刘广路,苏文会等.竹林培育研究进展.林业科学研究,2018,31(1):137-144.
- 谭宏超,谭汝强,张翼飞.3种皆伐方式对毛竹林更新生长的影响[J].世界竹藤通讯,2017,15(3):52-55.
- 陈家洪,张喜,尹洁等.抚育和采伐组合措施对毛竹林生产力的影响[J].安徽农业科学,2010,38(4):2110-2111.
- 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):1110-1118.
- 刘仕咄,谢乔武.毛竹的生长特性与竹林采伐[J].林业与生态,2009,1(5):26-27.
- 曾宪礼,苏文会,范少辉等.带状采伐毛竹林土壤质量评价[J].生态学杂志,2019,38(10):3015-3023.
- 曾宪礼,苏文会,范少辉等.带状采伐毛竹林恢复的质量特征研究[J].西北植物学报,2019,39(5):917-924.
- 詹美春.苏南带状采伐毛竹林林分恢复特征研究[D].中国林业科学研究院硕士学位论文,2019,64-66.
- 李承基,官凤英,周潇等.配比施肥对带状采伐毛竹林立竹数量和质量恢复的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(02):79-85.

周芳纯. 竹林培育学 [m]. 北京: 中国林业出版社, 1998.

高歌, 李正才, 葛晓改等. 施氮对干旱胁迫下毛竹幼苗生物量和根系形态的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(05): 858-864.

王树梅, 范少辉, 肖箫等. 带状采伐对毛竹地上生物量分配及异速生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(05): 19-24.

Li Z ,Guan F ,Zhou X , et al.Effect of Fertilization on Soil Fertility and Individual Stand Biomass in Strip Cut moso Bamboo (*Phyllostachys edulis*) Forests[J].Forests,2024,15(2).

高歌, 葛晓改, 周君刚等. 施氮和干旱对杉木和青冈幼苗生物量及根系形态的影响[J]. 生态环境 学报, 2022, 31(12): 2292-2301.

郭强, 官凤英, 辉朝茂等. 密度和施肥调控对巨龙竹新生竹生长及生物量特征的影响[J]. 北京林业 大学学报, 2022, 44(04): 95-106.

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): 2602-2614.

Mcnaughton S J. Compensatory plant growth as a response to herbivory[J]. Oikos, 1983, 40(3):329.

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.

Kodani J,Esaki K. Effect of the duration of abandonment on development of understory vegetation in bamboo forests[J]. Japanese Journal of Forest Enviroment, 2012, 54(1):19-28.

刘恩斌, 周国模, 葛宏立等. 基于最大熵原理的多尺度毛竹胸径分布统一模型构建及应用[J]. 生 态学报, 2009, 29(08): 4070-4077.