

带状采伐毛竹林生产力变化规律研究 *

郑亚雄^{1,2} 范少辉¹ 张璇^{1,2} 周潇^{1,2} 官凤英^{1,2}

(国际竹藤中心 国家林业和草原局/北京市共建竹藤科学与技术重点实验室 北京 100102; 2. 江苏宜兴竹林生态系统国家定位观测研究站 宜兴 214200)

摘要:【目的】通过研究毛竹林带状采伐对其竹林恢复的影响, 阐明不同处理样地内生物量分配差异, 揭示林分生物量分配格局及年生产力动态变化, 以期为评估伐后林分质量恢复水平提供理论基础。【方法】以 8m 带宽采伐样地 (SC) 及其保留样地 (RB) 为研究对象, 以传统经营毛竹林 (CK) 为对照, 调查伐后 5 年不同处理样地毛竹各组分生产力及生物量积累规律, 采用相关性分析对不同处理样地毛竹各组分生产力与土壤养分含量的关系进行研究。【结果】1) 不同处理样地毛竹各组分生产力在发笋大年均表现为竹秆>竹蔸>竹根>竹枝>竹叶, 在发笋小年表现为竹根>竹蔸>竹秆>竹叶>竹枝。2) 伐后第 1 年 SC 的毛竹各组分生产力与 RB 和 CK 无显著差异; 伐后 3 年 CK 的竹枝生产力显著高于 SC 和 RB ($P<0.05$); 伐后 5 年 RB 的竹根生产力显著高于 SC 和 RB, 但竹蔸生产力显著低于 SC 和 RB ($P<0.05$), SC 地上生物量积累量 ($73357.74\text{kg}/\text{hm}^2$) 达到 CK ($63728.99\text{kg}/\text{hm}^2$) 水平。3) 相关性分析发现, 三种处理样地中新竹各组分生产力与土壤中碱解氮含量显著负相关, 与有效磷含量显著正相关。【结论】带状采伐没有降低竹林各组分生产力, 采伐样地中毛竹各组分生产力随恢复时间逐渐增加, 而保留样地生产力表现为先增加后降低的变化趋势。带状采伐后新竹生长并没有将更多的生产力分配给地上部分, 伐后 5 年, 带状采伐样地生物量积累量能够恢复到对照样地水平。

关键词: 毛竹林; 带状采伐; 自然恢复; 生产力; 相关性分析

Study on the productivity dynamics of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest after strip clearcutting

Abstract: 【Objective】To provide a theoretical basis for evaluating the quality restoration level of the strip clearcutting stand, in this paper, we study the effects of strip clearcutting on Moso bamboo forest restoration. The differences in biomass allocation in different plots were clarified, and the pattern of biomass allocation and the dynamic changes in annual productivity were revealed. 【Method】We selected the plots that strip cut with 8m width (SC) and its reserved belts (RB) as the research object and the traditional management forest (CK) as control. We monitored the productivity and biomass accumulation pattern of each component of bamboo at the different sample plots for 5 years after the cutting. Correlation analysis was used to study the relationship between the component productivity and soil nutrient content in different plots.

【Result】In the On-year, the productivity of each component of bamboo in different plots was shown: bamboo culm>bamboo stump>Bamboo root>Bamboo branch>Bamboo leaves. And in the Off-year, it was shown: bamboo root> bamboo stump>Bamboo culm>Bamboo branch. There was no significant difference in productivity between SC and RB and CK in the first year after cutting. After three years, the bamboo branch productivity in CK was significantly higher than that in SC and RB ($P<0.05$). After five years, the bamboo root productivity in RB was significantly higher than that in SC and RB, but the bamboo stump productivity in RB was significantly lower than that in SC and RB ($P<0.05$), the aboveground biomass accumulation ($73357.74\text{ kg}/\text{hm}^2$) reached the level of CK ($63728.99\text{ kg}/\text{hm}^2$). Correlation analysis showed that the productivity of each component of bamboo was negatively correlated with the content of alkali-hydrolyzable nitrogen in the soil, and positively correlated with the content of available phosphorus 【Conclusion】Strip clearcutting did not decrease the productivity of each component in the bamboo forest, and the productivity of each component in SC increased gradually with the recovery time, while the productivity of each component in RB increased first and then decreased. After cutting, the growth of New bamboo did not allocate more productivity to the aboveground part, and after 5 years, the biomass accumulation of SC could be restored to CK level.

收稿日期: 2022-05-14; 修回日期: 2022-11-09。

基金项目: 国际竹藤中心基本科研业务费“关键环境因子及抚育强度对竹林生产力的影响研究”(1632022004)。

*官凤英为通讯作者。

Key words: Moso bamboo forest; Strip clearcutting; Natural restoration; Productivity; Correlation analysis

毛竹(*Phyllostachys edulis*)是我国最重要的森林资源之一,具有重要的经济和生态价值(江泽慧, 2002)。劳动力资源短缺导致的采伐成本上升等问题已成为制约竹林培育及产业发展的实际问题(范少辉 等, 2018)。为此,专家学者们提出了适用于毛竹林的带状采伐方式以降低采伐成本(曾宪礼等, 2019; 詹美春等, 2020; 王树梅等, 2021)。对不同采伐宽度下毛竹恢复动态特征的研究发现,伐后毛竹鞭芽赤霉素含量增多,打破鞭芽休眠,采伐样地单位面积发笋数量均大于对照样地,且随采伐强度的增加发笋、成竹数量呈先增加后下降的趋势,9m 宽采伐样地发笋成竹数量最多(王树梅, 2021)。同时,伐后新竹质量下降,不同采伐强度下新竹的各器官非结构性碳水化合物含量均低于对照林地(曾宪礼, 2019; 詹美春, 2019)。在不同试验区域得出的结论一致认为 6-9m 带宽新生竹构成的竹林结构合理,土壤环境更适宜发笋和新生竹生长,是毛竹林带状采伐的适宜宽度(詹美春, 2019; 吴昌明, 2020; 曾宪礼, 2019)。但毛竹自肥能力差,且新竹快速生长,短期的研究不能全面了解林分恢复特征。

采伐作为一种重要的抚育措施和干扰形式,直接影响林分生产力(Mao et al., 2017; Vangansbeke et al., 2015)。对四种不同带状采伐宽度下竹林的自然恢复状况研究发现,单位面积内采伐带的发笋量均大于对照样地,但新竹的平均胸径、单位面积内新竹的生物量均小于对照样地(曾宪礼, 2019; 王树梅, 2021)。毛竹是典型的单轴散生型竹种,株间通过地下的竹鞭相连(庄明浩等, 2011)。母竹利用生理整合作用将营养物质通过地下鞭根系统输送给鞭上的新竹,新笋的萌发及地上生产力受地下鞭根年龄及空间结构的影响(Su et al., 2019)。带状采伐后,样地内竹株全部为新生竹,Ⅰ度竹对环境的适应能力强(刘广路等, 2017),新生竹的功能性状可能会对环境改变做出响应。同时,受母竹年龄结构和数量的影响,样地内新竹生物量可能会由于养分供应不足而产生长期的变化(陆媛媛等, 2011; Zheng et al., 2022a)。

此外,不同发育阶段毛竹的生理代谢水平也大不相同。Ⅰ度竹的生物量积累量要显著低于Ⅱ、Ⅲ度竹,且Ⅱ、Ⅲ度竹的生物量差异较小,这意味着毛竹干物质积累增速在生长至Ⅱ度以后大幅下降,由Ⅲ度向Ⅳ度竹生长时,毛竹各器官的生物量积累逐渐减缓(苏文会, 2012)。毛竹不同组分生物量分配和生产力水平同样存在差异。范少辉等 (2011)研究闽西北毛竹纯林生物量分配格局时发现,不同组分生物量分配和生产力排序均为竹秆>竹枝>竹莖>竹鞭>竹叶>鞭根。因此,带状采伐后竹林生物量及生产力可能会随着时间不断变化,这对于制定合理竹林经营措施至关重要。本文通过 5 年监测伐后竹林生物量变化动态,阐明不同处理样地内生物量分配差异特征,揭示林分生物量分配格局及年生产力动态变化规律,以期评估样地林分质量恢复水平提供理论基础。

1 研究区概况

本研究在江苏省宜兴市国有林场(31°13'-31°15' N, 119°41'-119°44' E)开展。试验区域属中亚热带北缘海洋季风气候区,四季分明,温和湿润,热量条件好,最低和最高气温分别为-4.5 °C 和 38.8 °C,年平均气温 16.5 °C,夏季最热月平均气温 28.3 °C。无霜期 239 d,生长期可达 250 d 左右,积温 5418 °C,日照充足,7-8 月日照时数最多。降水丰沛,全年有雨,年平均降雨日 129 d,年平均降水量 1229.9 mm,春夏雨水集中。地形以低山丘陵为主,土壤类型为黄棕壤(Zheng et al., 2021)。全场现有林地总面积 3191 hm²,森林覆盖率达 97%,植物种类丰富,其中,毛竹林 671.55 hm²。林场长期对毛竹林进行经营管理,主要措施包括采挖春笋、人工择伐Ⅳ度及以上毛竹,无病虫害侵扰,竹林大小年现象明显(Zheng et al., 2022b)。

2 研究方法

2.1 样地设置

2017 年 2 月，在宜兴市国有林场内选择经营措施一致、坡度相当、林分结构基本相同的毛竹纯林进行试验。设置 3 块宽 8 m，长 20 m 的采伐样地（SC），在采伐样地两侧设置相同宽度的保留样地（RB），同时在地块四周挖 50cm 宽、50cm 深的隔离沟，以消除毛竹生理整合对养分长距离运输的影响(Zheng *et al.*, 2022c)。设置 3 块 20 m×20 m 传统经营样地作为对照（CK）。对照样地依旧按照原来的措施经营包括小年出笋全部挖掉；大年采伐Ⅲ度及以上毛竹，并在发笋后期将未能成竹的竹笋全部挖掉。采伐样地进行自然恢复，与保留样地在试验期间均未采取任何经营管理措施。我们从 2017 年-2021 年对三种处理样地进行持续的调查取样，根据毛竹林的生长特性划分，监测期内包括 3 个毛竹发笋大年（2017 年、2019 年、2021 年）和两个发笋小年（2018 年、2020 年）。伐前样地基本信息如表 1 所示。

表 1 试验样地基本信息

Tab.1 Basic information of sample plots

样地	坡度	海拔	密度	竹龄结构	平均胸径	平均枝下高	平均竹高
Plot	Slope	Altitude	Density	Age structure	Mean DBH	Mean height to crown base	Mean tree height
		(m)	(individual·hm ⁻²)	I : II : III	(cm)	(m)	(m)
SC1	5°	113	3250	18:17:17	8.68	4.10	12.91
SC2	6°	113	3861	17:23:22	9.13	4.60	13.75
SC3	6°	113	3187	16:18:17	8.49	5.09	13.21
RB1	6°	113	3452	19:20:16	8.83	4.76	12.85
RB2	6°	114	3815	21:18:22	8.88	4.06	13.22
RB3	5°	114	3687	19:21:19	9.38	5.07	13.53
CK1	6°	113	3657	17:22:20	9.06	4.23	13.33
CK2	6°	113	3756	20:22:18	8.77	4.43	13.63
CK3	5°	114	3948	21:23:19	8.90	4.40	13.21

2.2 生物量调查

2017-2021 年，每年在竹林发笋结束后（5 月）对发笋情况进行调查统计。在抽枝展叶结束后（8 月）对样地内新生竹进行调查，测量新竹胸径、竹高、枝下高，并计算平均胸径、平均枝下高、平均竹高等指标。每年的 11 月，根据统计数据选定标准竹对生物量进行调查，为了避免标准竹采伐对样地的干扰，我们在样地周围按照标准竹的相关信息采用替代的方法进行生物量取样，每个处理选取 12 株标准竹，共 36 株。根据式 1 计算林分水平毛竹各器官生物量。

$$W_{ij} = n_i w_{ij} \quad (1)$$

其中，i 为竹龄，包括 I、II、III 度；j 为不同处理样地，包括 SC、RB、CK；W_{ij} 代表 j 样地内 i 龄毛竹竹枝、竹秆、竹叶干重总量；n_i 为 i 龄毛竹株数；w_{ij} 为 j 样地内 i 龄标准竹竹枝、竹秆、竹叶平均干重；

每年 11 月，利用直径为 6.5cm 的根钻，在样地中随机进行 10 个重复土壤采样，采取 0-40cm 土层的土壤样品，混合装入自封袋带回实验室。挑出土壤样品中所有根样，用水洗净，65°C 下烘干并称重，然后根据式 2 计算后得到根生物量。

$$W = w \times 10^6 / [\pi (d/2)^2 \times h] \quad (2)$$

W 为样地竹根生物量 (t/hm²)；w 为竹根干重 (g)；d 为根钻直径 (cm)；h 为土层厚度 (cm)。

竹笋由于取样困难,我们查阅已有的文章,参考苏文会 (2012)在安徽省黄山市黄山公益林场内采用“空间”替代“时间”的方法,以毛竹胸径为自变量,拟合出的不同年龄竹笋生物量模型,如表 2 所示。

表 2 竹笋生物量全干质量对胸径的拟合模型

Tab.2 The model of bamboo rhizome dry weight to DBH

竹龄 Age	模型 Model	R ²
I	$W=-6.8582+1.3196DBH$	0.4027
II	$W=-8.2178+1.5822DBH$	0.4020
III	$W=-8.4551+1.6288DBH$	0.4021

注: 单株毛竹的竹笋干重单位为 kg。Note: The unit of rhizome dry weight of single bamboo is kg.

2.3 生产力调查

根据毛竹标准竹所得的各器官(竹枝、竹秆、竹叶)生物量,推算不同器官的生产力,方法如下:

$$\Delta w = \sum n_i (\overline{w_i} - \overline{w_{i-1}}) \quad (3)$$

式中, Δw 为毛竹某器官生产力, i 为竹龄, n_i 为 i 龄竹株数, $\overline{w_i}$ 为 i 龄标准竹某器官生物量。

采用内生长法对地下生物量进行测定。2017 年 3 月按照上、中、下在样地中随机挖 5 个 20×20×50cm 的方形坑,筛出土壤中的根系,将尼龙网袋放入坑中,使其与土壤紧密贴合,将过筛后的土壤按照原来的层次逐步回填,当土壤全部回填后系紧袋口,使网袋与土壤表面保持水平,用原来的凋落物覆盖在网袋上方,以避免雨水直接冲刷网袋中的泥土。2017-2021 年每年 11 月在每个样地中挖取 1 个土坑,筛出土坑内的所有根系,洗去表面的泥土,在 65° C 中烘至恒重,称重。

2.4 土壤养分取样及测试

2017-2021 年,于每年 11 月用土钻在每块试验地中沿着中位线分层(0-10cm、10-20cm、20-40cm)取土,每块样地取 10 个土芯,将相同层次的土壤组成混合样品,平铺到干净的纸上,放置在室内阴凉通风处风干。挑出石块和没有分解的有机物,研磨,过 2mm(10 目)筛,用四分法将混合土壤选出 1kg 的土样,充分混匀后取一部分样品装入密封袋中,并注明取样信息,可用于 pH 及有效养分的测定。将剩余已通 2mm(10 目)筛的样品进一步研磨,使其全部通过 0.149mm(100 目)筛,装入密封袋中,并注明取样信息,可用于测定土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量。

土壤全氮采用凯氏定氮法检测,碱解氮采用碱解扩散法检测(LY/T 1228-2015);土壤全磷采用碱熔-钼锑抗比色法检测,有效磷采用钼锑抗比色法检测(LY/T 1232-2015);土壤全钾采用碱熔-火焰光度计法检测,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法检测(LY/T 1234-2015);土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法检测(LY/T 1237-1999);土壤 pH 值采用电位法测定(LY/T 1239-1999)。

2.5 数据处理

数据使用 Excel 2016 进行整理。采用 SPSS 进行方差分析,并用最小显著性检验(LSD)进行多重比较,统计学意义设为 $P<0.05$;分别用 Shapiro-Wilk's 检验和 Leven's 检验了正态性和齐次方差的假设。采用 Pearson 相关分析方法研究了毛竹各组分生产力与土壤养分的关系。

3 结果与分析

3.1 毛竹各组分生产力变化特征

由图 1 可知,带状采伐没有降低竹林生产力。采伐样地中毛竹各组分生产力随恢复时间逐渐增加,而保留样地生产力表现为先增加后降低的变化趋势。在采伐样地和对照样地中,毛竹枝、秆生产力在发笋大

年显著大于发笋小年 ($P<0.05$)；在保留样地中，2017 年和 2019 年样地枝生产力显著大于 2018 年，2020 年和 2021 年 ($P<0.05$)。三种处理样地竹叶生产力各年度均无显著性差异。2017 年、2021 年不同处理样地枝生产力无显著差异，2019 年对照样地枝生产力显著高于采伐样地和保留样地 ($P<0.05$)。2018 年保留样地竹秆生产力显著高于采伐样地和对照样地 ($P<0.05$)，其余年份竹秆生产力在不同处理样地间无显著差异。

由图 1-D 可知 2017-2020 年各处理样地间竹笋生产力无显著差异，2021 年保留样地竹笋生产力显著低于采伐样地和对照样地 ($P<0.05$)。在采伐样地中，毛竹根生产力在毛竹发笋大小年之间存在显著差异，表现为发笋大年根生产力显著低于出笋小年 ($P<0.05$)。在保留样地中，2019 年竹根生产力在显著低于 2017 年 ($P<0.05$)，但与 2021 年无显著差异。在对照样地中，发笋大年间竹根生产力无显著变化差异 (图 1-E)。

我们在计算保留样地和对照样地毛竹各组分生产力时，不仅计算了当年新竹的生长，而且也将原有毛竹各组分的生物量增量纳入到生产力中。采伐样地各组分生产力均与对照样地无显著差异，一方面说明了采伐宽度设置的合理性；在 8m 带宽的采伐宽度下对竹林的生产力无显著影响。另一方面，样地采伐后新竹大量生长，新竹的大量增长弥补了对照样地中原有竹株的生物量增量。

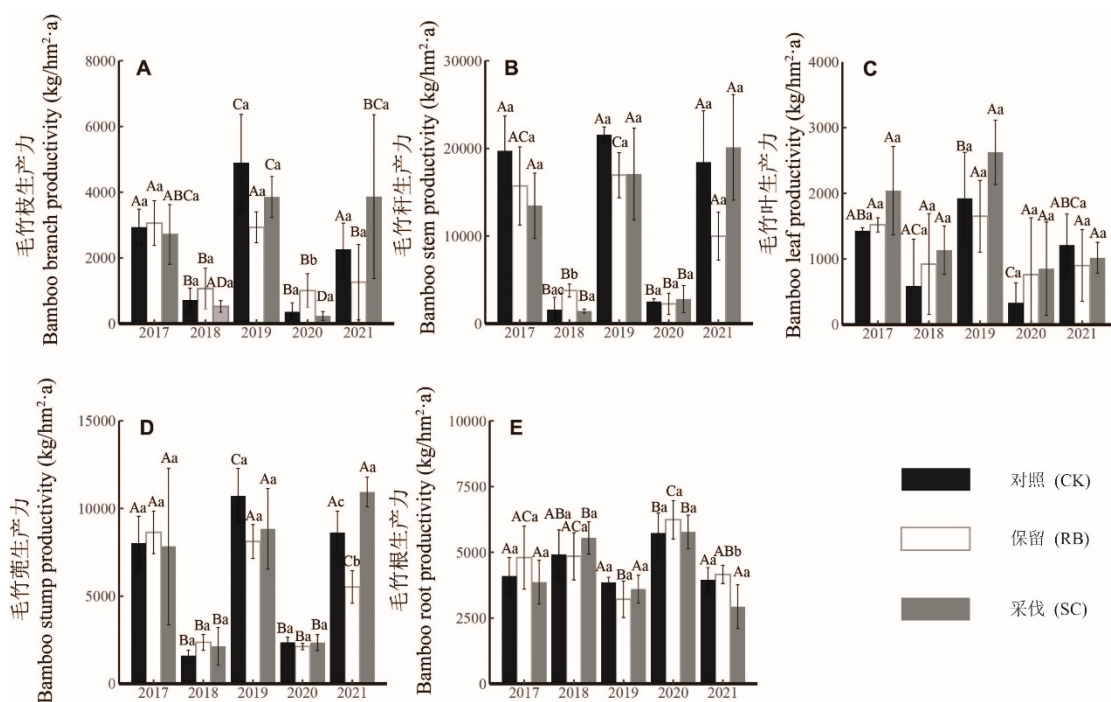


图 1 不同处理样地毛竹各组分生产力的变化动态

Fig.1 Dynamics of each component productivity of moso bamboo in different treatment plots

注：不同小写字母表示相同时间不同处理样地毛竹 (A 枝、B 秆、C 叶、D 笋、E 根) 生产力存在显著差异 ($P<0.05$)；不同大写字母表示同一处理样地不同时间毛竹 (A 枝、B 秆、C 叶、D 笋、E 根) 生产力存在显著差异 ($P<0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate a significant difference in (A branch, B stem, C leaf, D stump, E root) productivity between the different treatment plots at the same times ($P<0.05$) ; Different capital letters indicate a significant difference in (A branch, B stem, C leaf, D stump, E root) productivity between the different times in the same treatment plot ($P<0.05$) .

3.2 毛竹生物量分配变化动态

由图 2 可知，三种处理样地在发笋大年 and 发笋小年生物量分配均存在显著差异 ($P<0.05$)。在发笋大年，生物量主要分配给地上部分，而小年则主要分配给地下部分。符合毛竹林大小年变化的现象。不同处理样地毛竹地上新增生物量占比在发笋小年均无显著差异。采伐样地和对照样地的毛竹地上新增生物量占比在发笋大年均无显著差异；在保留样地中，2021 年毛竹地上新增生物量占比显著低于 2017 年和 2019 年 (P

<0.05)。

2017-2020 年，采伐样地地下新增生物量占比无显著差异；在 2021 年，地下新增生物量占比显著降低 ($P<0.05$)。在保留样地中，发笋小年地下新增生物量占比显著高于 2017 年和 2019 年 ($P<0.05$)，与 2021 年无显著差异。在对照样地中，地下新增生物量占比呈“M”型变化趋势，发笋小年地下新增生物量占比显著高于发笋大年 ($P<0.05$)；

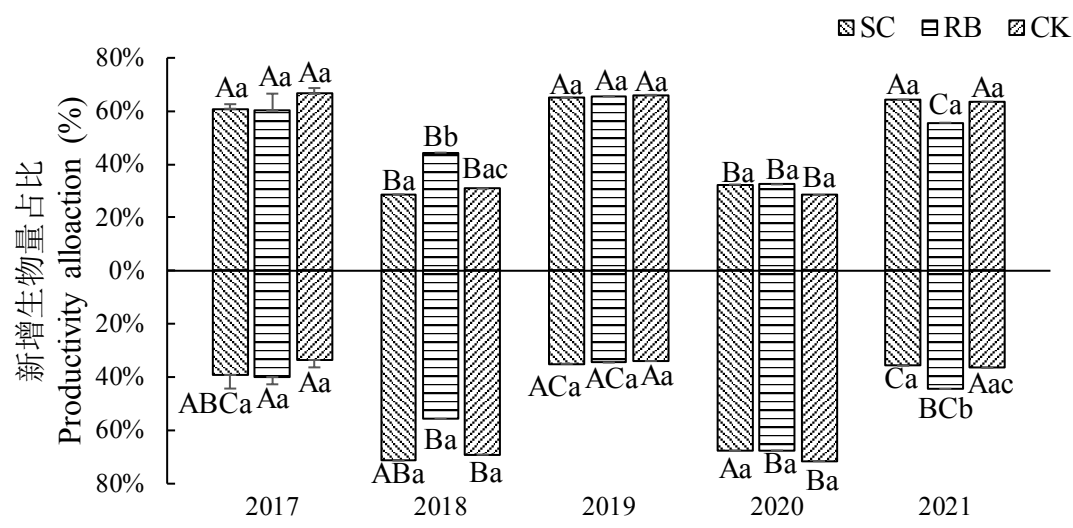


图 2 不同处理样地毛竹新增生物量分配变化动态

Fig.2 Dynamics of productivity allocation of new bamboo trees under different treatments

注：不同小写字母表示相同时间不同处理样地毛竹新增生物量占比存在显著差异 ($P<0.05$)；不同大写字母表示同一处理样地不同时间新增生物量占比存在显著差异 ($P<0.05$)。横坐标上部的柱状图代表毛竹地上部分新增生物量占比；横坐标下部的柱状图代表毛竹地下部分新增生物量占比。Note: Different lowercase letters indicate a significant difference in productivity allocation between the different treatment plots at the same time ($P<0.05$) ; Different capital letters indicate a significant difference in productivity allocation between the different times in the same treatment plot ($P<0.05$) . The column at the top of the abscissa represents the productivity allocation of new bamboo trees in the aboveground part; The column at the bottom of the abscissa represents the productivity allocation of new bamboo trees in the underground part.

3.3 伐后 5 年生物量积累

由图 3-A 可知，通过 5 年的生物量积累，不同处理样地地上生物量积累均表现为竹秆>竹枝、竹叶，竹枝、竹叶生物量积累量在三种不同处理样地间均无显著差异。保留样地的竹秆生物量积累量显著高于对照样地 ($P<0.05$)，采伐样地竹秆生物量积累量与对照样地和保留样地无显著差异。此外，不同处理样地竹根和竹蔸生物量积累不存在显著性差异（图 3B）。

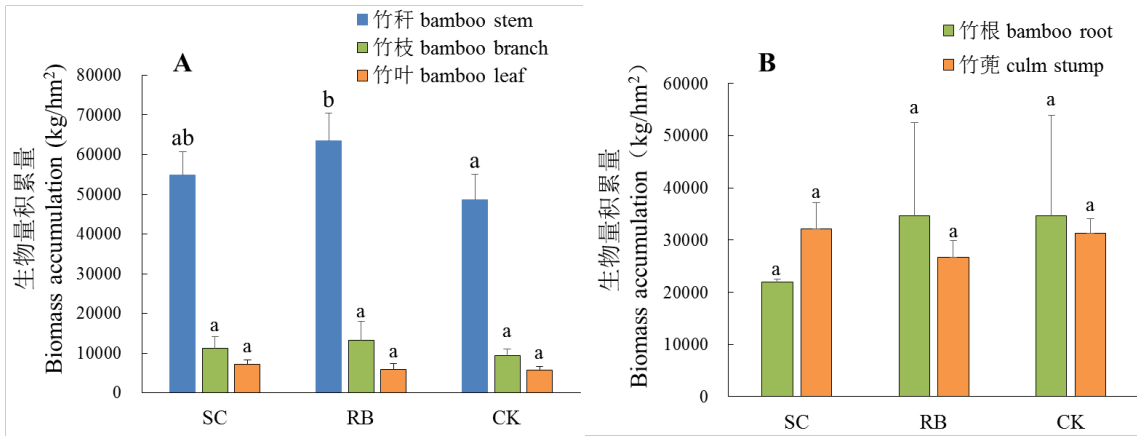


图 3 不同处理样地毛竹地上生物量积累量

Fig.3 Aboveground biomass accumulation of Moso bamboo forest under different treatments

注：不同小写字母表示同一组织生物量积累量在不同处理样地存在差异 ($P<0.05$)； Note: Different lowercase letters indicate a significant difference in aboveground biomass accumulation between the different treatment plots in the same tissue ($P<0.05$) .

3.4 各组分生产力与土壤养分的相关性分析

如图 4 所示，在采伐样地中，毛竹枝、秆、叶、笋生产力与 0-10cm 土壤的 pH 及 20-40cm 土壤的有效磷含量呈正相关；与 0-10cm 土壤的碱解氮含量、速效钾含量呈负相关；与 10-20cm 碱解氮、有效磷及速效钾含量呈负相关；与 20-40cm 土壤的有机碳含量呈负相关。毛竹根生产力与 0-10cm 土壤的碱解氮含量、速效钾含量及 10-20cm 土壤的速效钾含量呈正相关；与 0-10cm 土壤 pH 值、20-40cm 土壤的有效磷含量呈显著负相关。

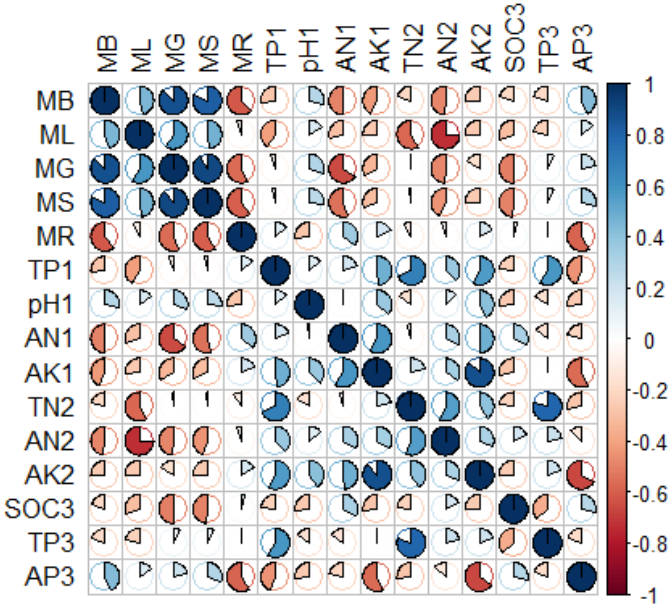


图 4 采伐样地中各器官生产力与土壤养分的关系

Fig.4 Correlation ship between component productivity and soil nutrients in strip clear-cutting plots

注：MB 为毛竹枝生产力；ML 为毛竹叶生产力；MC 为毛竹秆生产力；MS 为毛竹笋生产力；MR 为毛竹根生产力；1 代表 0-10cm 土层，2 代表 10-20cm 土层，3 代表 20-40cm 土，例如 SOC1 表示 0-10cm 土层土壤有机碳含量。Note: MB is the bamboo branch productivity; ML is the leaf productivity of Moso bamboo; MC is the moso bamboo stem productivity; MS is the moso bamboo stump productivity; MR is the root productivity; 1 represents 0-10cm soil layer, 2 represents 10-20cm soil layer, and 3 represents 20-40cm soil layer. For example, SOC1 represents the soil organic carbon content in the 0-10cm soil layer.

如图 5 所示，在保留样地中，毛竹枝、秆及竹笋生产力与 0-10cm 土壤的全氮、全磷及速效钾含量呈负相关，与各土层的碱解氮含量呈负相关，与各土层的有效磷含量呈正相关。毛竹叶生产力与 0-10cm 土壤的全氮、全磷、碱解氮、有效磷及速效钾含量呈负相关，与 10-20cm、20-40cm 的碱解氮含量呈负相关，与 10-20cm、20-40cm 的有效磷含量呈正相关。毛竹根生产力与 0-10cm 全氮、全磷、碱解氮含量呈正相关，与各土层有效磷含量呈负相关。

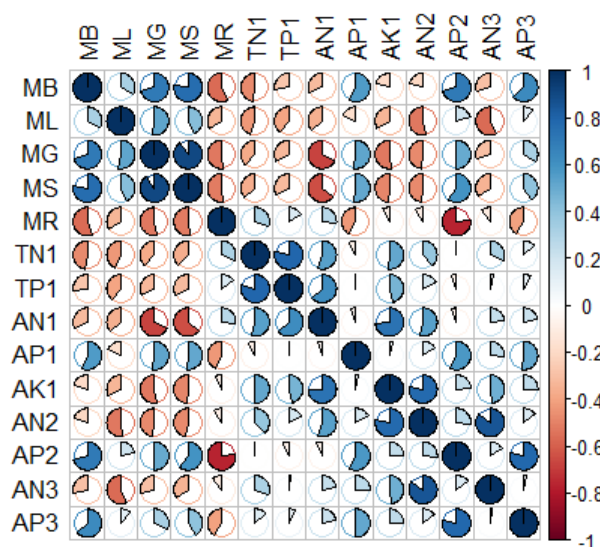


图 5 保留样地中各器官生产力与土壤养分的关系

Fig.5 Correlation ship between component productivity and soil nutrients in reserve belt plots

如图 6 所示,在对照样地中,毛竹枝、叶、秆及竹笋生产力都与 10-20cm 土壤有效磷含量显著正相关;与各土层全氮含量呈负相关;与 0-10cm 土壤碱解氮含量呈正相关,与 10-20cm 土壤及 20-40cm 土壤碱解氮含量呈负相关。毛竹根生产力与各土层全氮含量呈正相关,与 10-20cm 土壤碱解氮、速效钾含量呈正相关,与 10-20cm 土壤有效磷含量呈负相关,与 20-40cm 土壤碱解氮含量呈正相关。

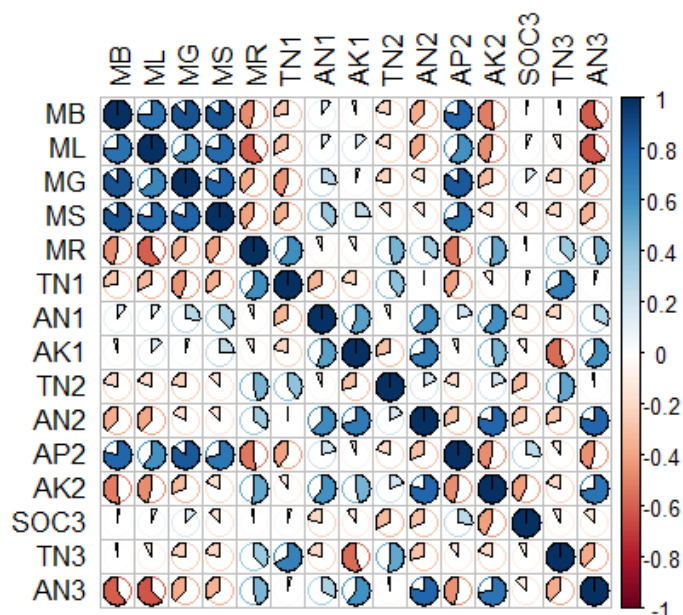


图 6 对照样地中各器官生产力与土壤养分的关系

Fig.6 Correlation ship between component productivity and soil nutrients in control plots

4 讨论

带状采伐初期样地内新笋萌发与生长依靠保留带内的母竹通过生理整合作用进行传输。一方面,保留样地内母竹对养分的提供存在限制,表现为随着带宽增加,春笋内的可溶性糖含量显著降低,新竹平均胸径、生物量减少;另一方面,由于毛竹的可塑性,新竹通过改变生物量的分配来适应环境,小径级毛竹将更多的生物量分配给竹叶,能够提高同化物生产能力进而促进样地恢复(曾宪礼, 2019)。在本研究中,采伐样地地下生产力在恢复第二年略大于对照样地。这与样地中新竹的数量以及竹叶的光合能力密切相关。竹

子可以通过增加叶片生物量来增加光合作用,为根茎系统的发育提供更多的营养。郑郁善等(1998)在福建竹产区的研究发现,地上部分的生长依赖良好的地下结构,这意味着经营方式会影响竹鞭的形态及年龄结构,进而又影响毛竹地上部分生物量及生产力。江国华等(2017)对毛竹地下竹鞭的分支系统及其数量特征的研究发现,新竹对于维持竹鞭的生长发育具有很重要的养分供给作用。采伐初期增加了土壤有机碳、碱解氮的含量,降低了土壤全氮、全磷含量,主要是林内光环境的改变以及土壤微生物的增加(王树梅, 2021),促进了凋落物的分解。在土壤肥力充足的情况下,毛竹通过增加枝和叶的生物量从而增强光合作用(宋艳冬等, 2010),进一步增加竹林的生产力(朱强根等, 2013; 庄若楠, 2013)。相关性研究发现,新竹各组分生产力与土壤有效磷含量显著正相关,与碱解氮含量呈负相关,这与郭宝华等(2014)研究不同生产力水平毛竹碳氮磷的计量特征时所得出的结论一致。

采伐样地中毛竹各组分生产力随恢复时间逐渐增加,而保留样地生产力表现为先增加后降低的变化趋势。保留样地生产力逐渐降低,说明样地中毛竹的年龄结构也是影响竹林生产力的重要因素,1-6年生毛竹生物量积累速度快(苏文会, 2012),之后生物量积累量逐渐下降。在保留样地中,受竹林密度影响,新竹数量减少,进而影响了样地生产力。伐后5年,采伐样地地上部分生物量积累量与对照样地无显著差异;保留样地中竹秆的生物量积累量大于对照样地。在我们的研究中,没有对保留样地进行经营管理,导致林分生产力逐渐降低对照。主要原因是样地内立竹密度过大,林内老竹数量多,不仅不能促进样地的林分质量发育,还消耗土壤内的养分,不利于新竹的生长。后续的研究可以结合保留样地内的新竹特征以及养分循环动态,探索适用于带状采伐竹林保留样地的经营模式。

在发笋大年,母竹利用生理整合作用将营养物质通过地下鞭根系统输送给鞭上的新竹,新笋的萌发及地上生产力受地下鞭根年龄及空间结构的影响;大年大量新竹的生长对竹林营养消耗大,从而影响降低了次年的出笋量(吴家森等, 2005)。小年毛竹新笋萌发非常少(Li et al., 2019),大部分的光合产物用于地下鞭根的生长,所以小年鞭根的生长受地上立竹年龄及其空间结构的影响比较大(张幼法等, 1999)。毛竹在小年积累了营养,又为翌年发笋提供了充足的养分,如此便呈现了发笋大小年交替现象(吴家森等, 2005)。在我们的研究中,伐后竹林生长仍存在明显的大小年现象。主要是由于伐后样地内凋落物及未分解有机物质中含有大量养分,为新竹的生长发育提供了充足的养分环境,新竹的光合产物能够满足新竹对鞭根生长的养分供给。虽然我们的研究认为采伐样地恢复5年后可以达到对照水平,但仅针对带状采伐样地的第一个恢复周期研究,轮伐后样地生产力的变化特征还不能确定。如果经过多次轮伐后,样地内的新竹生长发育受土壤肥力不足的限制,那么可能会进一步影响毛竹的大小年生长现象。所以需要持续对带状采伐样地继续进行研究,通过分析轮伐后竹林的变化特征,模拟多次轮伐后的林分生产力变化动态,从而制定科学合理的经营管理模式及采伐策略。

5 结论

带状采伐没有降低毛竹林生产力,但影响生产力的养分因子在不同处理样地不尽相同。在采伐样地中,毛竹各组分生产力随样地的恢复与对照样地均无显著差异;样地恢复5年后各组分生物量积累量与对照样地均无显著差异。在保留样地中,随着样地的自然生长,毛竹竹枝、竹秆、竹笋的生产力逐渐降低;样地自然生长5年后各组分生物量积累量与对照均无显著差异。不同处理样地毛竹各组分生产力表现一致,在毛竹发笋大年竹秆>竹笋>竹根>竹枝>竹叶;在小年排序为竹根>竹笋>竹秆>竹叶>竹枝。

参 考 文 献

- 范少辉, 刘广路, 苏文会, 等. 2018. 竹林培育研究进展. 林业科学研究, 31(1): 137-144.
- (Fan S H, Liu G L, Su W H, et al. 2018. Advances in Research of Bamboo Forest Cultivation. Forest Research, 31(1): 137-144. [in Chinese])
- 范少辉, 刘广路, 苏文会, 等. 2011. 闽西北不同类型毛竹林生物量分布格局. 安徽农业大学学报, 38(6): 842-847.
- (Fan S H, Liu G L, Su W H, et al. 2011. The biomass distribution of different *Phyllostachys edulis* forest types in Northwest of Fujian Province. Journal of Anhui Agricultural University, 38(6): 842-847. [in Chinese])
- 郭宝华, 刘广路, 范少辉等. 2014. 不同生产力水平毛竹林碳氮磷的分布格局和计量特征. 林业科学, 50(6): 1-9.
- (Guo B H, Liu G L, Fan S H, et al. 2014. Distribution Patterns and Stoichiometry Characteristics of C, N, P in *Phyllostachys edulis* Forests of Different Productivity Levels. Scientia Silvae Sinicae, 50(6): 1-9. [in Chinese])
- 江泽慧. 2002. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社.
- (Jiang, Z H. 2002. Bamboo and Rattan in the World. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House. [in Chinese])
- 江国华, 余立华, 李占东, 等. 2017. 毛竹地下竹鞭的分支系统及其数量特征. 生态学杂志, 36 (12): 3479 - 3484.
- (Jiang G H, Yu L H, Li Z D, et al. 2017. Hierarchical system and its quantitative attribute of moso bamboo rhizome. Chinese Journal of Ecology, 36 (12): 3479 - 3484. [in Chinese])
- 宋艳冬, 金爱武, 金晓春, 等. 2010. 施肥对毛竹叶片光合生理的影响. 浙江林学院学报, 27(3): 334-339.
- (Song Y D, Jin A W, Jin X C, et al. 2010. Physiology of leaf photosynthesis with fertilization in *Phyllostachys pubescens*. Journal of Zhejiang Forestry College, 27(3): 334-339. [in Chinese])
- 苏文会. 2012. 基于生长和养分积累规律的毛竹林施肥理论与实践研究. 北京: 中国林业科学研究院.
- (Su W H. 2012. Fertilization Theory and Practice for *Phyllostachys edulis* Stand Based on Growth and Nutrient Accumulation Rules. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 王树梅. 2021. 带状采伐毛竹林地下鞭根系统与地面成竹响应特征的研究. 北京: 中国林业科学研究院.
- (Wang S M. 2021. Study on response characteristics of underground whip root system and ground growth of *Phyllostachys edulis* forests under different strip cutting. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 王树梅, 范少辉, 肖箫, 等. 2021. 带状采伐对毛竹地上生物量分配及异速生长的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 45 (5): 19-24.
- (Wang S M, Fan S H, Xiao X, et al. 2021. Effects of strip cutting on aboveground biomass accumulation and allocation, and allometric growth of *Phyllostachys edulis*. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 45(5): 19-24. [in Chinese])
- 吴昌明. 2020. 闽中毛竹林带状采伐后土壤微生物群落结构的早期响应. 北京: 中国林业科学研究院.
- (Wu C M. 2020. Early response of soil microbial community structure after strip cutting in moso bamboo forest in central Fujian. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 吴家森, 周国模, 徐秋芳, 等. 2005. 不同年份毛竹营养元素的空间分布及与土壤养分的关系. 林业科学, (3): 171-173.
- (Wu J S, Zhou G M, Xu Q F, et al. 2005. Spatial Distribution of Nutrition Element and Its Relationship with Soil Nutrients in Different Years of *Phyllostachys pubescens*. Scientia Silvae Sinicae, (3): 171-173. [in Chinese])
- 曾宪礼. 2019. 皖南毛竹林带状采伐恢复特征及影响因子研究. 北京: 中国林业科学研究院.
- (Zeng X L. 2019. Recovery Characteristics and Influencing Factors of Moso Bamboo Forests under Different Strip Clearcutting in South Anhui Province. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 曾宪礼, 苏文会, 范少辉, 等. 2019. 带状采伐毛竹林恢复的质量特征研究. 西北植物学报, 39(5): 917-924.
- (Zeng X L, Su W H, Fan S H, et al. 2019. Qualitative Recovery Characteristics of Moso Bamboo Forests under Strip Clearcutting. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 39(5): 917-924. [in Chinese])
- 詹美春. 2019. 苏南带状采伐毛竹林林分恢复特征研究. 北京: 中国林业科学研究院.
- (Zhan M C. 2019. Characteristic research on rapid regeneration of strip harvesting bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest in Jiangsu province. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 詹美春, 官凤英, 晏颖杰, 等. 2020. 带状采伐对毛竹林林下植被物种多样性的影响. 生态学报, 40(12): 4169-4179.
- (Zhan M C, Guan F Y, Yan Y J, et al. 2020. Effects of strip harvesting on species diversity of undergrowth in bamboo (*Phyllostachys Edulis*) forest. Chinese Journal of Ecology, 40(12): 4169-4179. [in Chinese])

- 张会儒. 2006. 落叶松云冷杉林生长模拟及生态采伐更新技术体系研究. 北京: 中国林业科学研究院.
- (Zhang H R. 2006. Study on Growth Modeling and Technical System of Ecology-based Harvesting and Regeneration for Larch and Spruce-fir Stands. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 朱强根, 金爱武, 王意锟, 等. 2013. 不同营林模式下毛竹枝叶的生物量分配: 异速生长分析. 植物生态学报, 37(9): 811-819.
- (Zhu G Q, Jin A W, Wang Y K, et al. 2013. Biomass allocation of branches and leaves in *Phyllostachys heterocycla* 'Pubescens' under different management modes: allometric scaling analysis. Chinese Journal of Plant Ecology, 37(9): 811-819. [in Chinese])
- 庄明浩, 李迎春, 陈双林. 2011. 竹子生理整合作用的生态学意义及研究进展. 竹子研究汇刊, 30(2): 5-9.
- (Zhuang M H, Li Y C, Chen S L. 2011. Advances in the Researches of Bamboo Physiological Integration and Its Ecological Significance. JOURNAL OF BAMBOO RESEARCH, 30(2): 5-9. [in Chinese])
- 庄若楠, 金爱武. 2013. 施肥对毛竹秆型特征的影响. 中南林业科技大学学报, 33(1): 80-84.
- (Zhuang R N, Jin A W. 2013. Effects of fertilization on culm form characteristics of *Phyllostachys pubescens*. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 33(1): 80-84. [in Chinese])
- 郑郁善, 洪伟, 陈礼光, 等. 1998. 毛竹丰产林竹鞭结构特征研究. 林业科学, 34(S1): 52-59.
- (Zheng Y S, Hong W, Chen L G, et al. 1998. Study On Structure Characteristics Of Rhizomes In High Yield *Phyllostachys heterocycla* Cv. *Pubescens* Forests. Scientia Silvae Sinicae, 34(S1): 52-59. [in Chinese])
- Li L., Li N., Lu D., et al. 2019. Mapping Moso bamboo forest and its on-year and off-year distribution in a subtropical region using time-series Sentinel-2 and Landsat 8 data. Remote Sensing of Environment, 231: 111265.
- Mao F, Zhou G, Li P, et al. 2017. Optimizing selective cutting strategies for maximum carbon stocks and yield of Moso bamboo forest using BIOME-BGC model. Forest Ecology and Management, 191: 126-135.
- Su W H, Fan S H, Zhao J C, et al. 2019. Effects of various fertilization placements on the fate of urea-15N in moso bamboo forests. Forest Ecology and Management, 453: 117632.
- Vangansbeke P, De Schrijver A, De Frenne P, et al. 2015. Strong negative impacts of whole tree harvesting in pine stands on poor, sandy soils: A long-term nutrient budget modelling approach. Forest Ecology and Management, 356: 101-111.
- Zheng Y X, Fan S H, Zhou X, et al. 2022a. Dynamics of stand productivity in Moso bamboo forest after strip cutting. Frontiers in Plant Science, 13: 1064232.
- Zheng Y X, Fan S H, Guan F Y, et al. 2022b. Strip Clearcutting Drives Vegetation Diversity and Composition in the Moso Bamboo Forests. Forest Science, 68(1): 27-36.
- Zheng Y X, Guan F Y, Fan S H, et al. 2022c. Dynamics of Leaf-Litter Biomass, Nutrient Resorption Efficiency and Decomposition in a Moso Bamboo Forest After Strip Clearcutting. Frontiers in Plant Science, 12: 799424.
- Zheng Y X, Guan F Y, Fan S H, et al. 2021. Functional Trait Responses to Strip Clearcutting in a Moso Bamboo Forest. Forests, 12(6): 793.