

配比施肥对带状采伐毛竹林林下植被多样性的影响

李承基^{1,2} 官凤英^{1,2*} 郑亚雄^{1,2} 周 潇^{1,2}

(1 国际竹藤中心, 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, 江苏无锡 214200)

摘 要:【目的】毛竹是具有经济、生态等综合价值的重要树种, 带状采伐为一种新型的高效的可机械化经营模式, 在伐后自然恢复过程中, 施肥是加快林分恢复的重要措施。【方法】2019 年选取大年毛竹纯林, 在带状采伐后选取 N:P₂O₅:K₂O 为 2:1:1、3.5:1:2、5:1:2.5 (A1、A2、A3) 3 种施肥配比和 450、600、750 kg·hm⁻² (B1、B2、B3) 3 种施肥量进行二因素三水平施肥试验, 探究林下植被多样性对养分输入的响应机制。【结果】(1) 采伐当年, 林下植被多样性随施肥配比的 N、K 比例升高, Shannon 指数 (H) 和 Gleason 物种丰富度指数 (D') 呈显著递增趋势, 与对照处理相比表现出两重性; Simpson 指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (E) 呈显著单峰趋势, 各指数受不同施肥量影响的差异不显著。(2) 2021 年, 指数 H 和 D' 的显著变化趋势消失; 指数 D 和 E 保持显著单峰趋势, 施肥配比为 A2 时达到峰值。(3) 在时间动态上, 施肥处理对林下植被多样性的影响表现出“先促进后抑制”的模式, 2021 年指数 H、D' 和 D 较 2019 年呈下降趋势, 指数 E 呈上升趋势。(4) 林下植被生物量对施肥处理的响应与多样性相似, 采伐当年施肥显著提高了林下植被生物量, 一个大小年后出现显著抑制作用, A2 施肥配比下生物量最低。【结论】施肥可促进林下植被生长, 增加物种多样性。而配比为 N:P₂O₅:K₂O=3.5:1:2 的施肥处理下, 林下植被对养分的利用更为充分, 有利于提高毛竹林分稳定性, 实现可持续发展。

关键词: 毛竹; 带状采伐; 施肥; 林下植被; 生物多样性

Effects of fertilization application on understory vegetation diversity in strip-harvested *Phyllostachys edulis* forests.

Abstract: 【Objective】Moso bamboo is an important tree species with integrated economic and ecological values, and strip harvesting is considered feasible as a relatively new efficient and mechanizable management model to accelerate stand recovery through nutrient input on the basis of natural recovery after harvesting. 【Method】In 2019, pure stands of old-growth moso bamboo were selected, three fertilization ratios of N:P₂O₅:K₂O=2:1:1, 3.5:1:2, and 5:1:2.5 (A1, A2, A3) and three fertilization application rates of 450, 600, and 750 kg·hm⁻² (B1, B2, B3) from and a two-factor, three-level experiment was set up to investigate the response mechanism of understory vegetation diversity to nutrient input and to analyze the variability and correlation. 【Result】(1) In the year of harvesting, the vegetation diversity of understory vegetation increased with the proportion of N and K fertilization applied, and the Shannon index (*H*) and Gleason species richness index (*D'*) showed a significant increasing trend, showing bimodality compared with the control treatment, and the Simpson index (*D*) and Pielou evenness index (*E*) showed a significant single-peaked trend, and the differences of each index by different fertilization application were not significant. (2) The significant trend of *H* and *D'* disappeared in 2021. *D* and *E* maintained a significant single-peak trend, peaking at the fertilization application ratio of A2. (3) In terms of temporal dynamics, the effect of treatments on understory vegetation diversity showed a pattern of “promotion followed by suppression”, with *H*, *D'* and *D* in 2021 showing a decreasing trend and *E* an increasing trend compared to 2019. (4) The biomass of understory vegetation was affected by fertilization treatments similarly to diversity and was closely correlated, with fertilization application significantly increasing the biomass of understory vegetation in the year after logging, with significant inhibition occurring in the first major year after logging and the lowest biomass under A2 fertilization application ratio. 【C

公益性科研院所专项资金 (1632018009, 1632021009) 资助。

收稿日期: 2022-05-18 接受日期: 2022-11-

*通讯作者 E-mail: guanfy@icbr.ac.cn

onclusion】 Therefore, fertilization can promote the growth of understory vegetation and increase species diversity. And under the fertilization treatment with the ratio of $N:P_2O_5:K_2O=3.5:1:2$, the nutrients were more fully utilized by the understory vegetation, which was conducive to improving the stability of the moso bamboo stand and achieving sustainable development.

Key words: moso bamboo; strip harvesting; fertilization; understory vegetation; species diversity

林下植被包括森林群落中的灌木层、草本层及层间植物,是森林生态系统的重要组成部分(何艺玲等,2002;胡冬冬等,2018)。林下植被一定程度影响林分立地条件及森林生态系统的物质循环(朱喜等,2014),同时与主林层之间的竞争关系也直接影响到林分的质量与生产力(李国雷等,2009)。林下植被多样性是森林群落物种多样性的重要组成部分,也是影响林分生态功能与稳定性的重要因子之一(张柳桦等,2019)。森林生态系统中,影响林下植被演替的因子可分为环境因子与人为因素干扰两大类,同时两类因素之间通常存在交互作用(安树青等,1997;王纪军等,2004;曾馥平等,2007)。干扰能够显著影响群落演替,在生态系统的自然更新方面有着重要作用。国内外众多学者开展的研究,主要围绕干扰对森林生态系统结构、功能的影响,以及森林生态系统对干扰的响应机制开展(De Candido *et al.*,2004;朱教君等,2004)。目前普遍认为,强度适宜的增益性干扰对提高森林群落物种多样性,进而提升森林生态系统结构稳定性,以及影响演替进程等方面有着积极作用。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)原产于我国,广泛分布于我国南方地区,具有可观的经济、社会、生态等综合效益(江泽慧,2002)。近年来,有学者提出了毛竹林的带状采伐经营模式,相较于传统的择伐具有高效率、低成本、可机械化等优点,同时综合环境、小气候、新竹恢复和形态结构等特征,确定了最适采伐带宽为 6~9 m(曾宪礼等,2019a;申景昕等,2020;王树梅等,2021;曾宪礼等,2019b)。但带状采伐产生的大面积积林窗,将对林分产生巨大干扰,进而影响毛竹的生长发育状况(张洋洋等,2020)。研究证明,施肥等抚育措施能够促进伐后恢复,改善土壤养分状况(张洋洋等,2021)。本研究以带状采伐毛竹纯林为对象,设置不同施肥配比及施肥量,从提高林分稳定性及间接提高林分生产力的角度,探究林下植被多样性受施肥影响的变化特征,为达到生产与生态平衡的竹林可持续经营提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省无锡市宜兴市国有宜兴市林场(31°15'N, 119°44'E),地形以低山丘陵为主,平均海拔 100 m 左右。全场现有毛竹林地 672 hm²,基本为纯林,大小年现象明显。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度及以上老竹、病虫害防治等,所有营林行为其强度规模均可控。该地区属北亚热带季风气候,全年温暖湿润,热量条件好,年平均气温 15.7 ℃,积温 5418 ℃。平均最高及最低气温,分别为-4.5 ℃和 38.8 ℃。降水丰沛,年平均降水量 1177 mm,春夏雨水较为集中。研究区由于地形、成土母质原因,土壤粗骨化明显,发育的主要为粗骨土、砂红土等类型,土层厚度在 60 cm 以上,具有酸性、肥沃、排水和透气性良好等特点。

1.2 样地设置

2019 年初在研究区内选取立地条件、经营条件一致的大年毛竹林,共设置 8 m×20 m 带状采伐样地 32 块,其中不施肥带状采伐对照样地 5 块,施肥处理带状采伐样地 27 块。在采伐带两侧设置同样宽度的保留带,并在样地四周挖 50 cm 宽×50 cm 深的隔离沟,与传统择伐经营毛竹林隔开。不同处理样地概况如表 1 所示,带状采伐样地示意图如图 1 所示。样地所在林区属封山护林区域,2019—2021 年无采笋伐竹等经营活动,林分基本状况稳定,除试验涉及的处理外无其他人为因素干扰。

表 1 样地基本概况

Tab.1 General situation of the sample plots

样地编号	坡向	坡度	海拔	立竹平均胸径	平均立竹密度
Plot number	Aspect	Slope (°)	Altitude (m)	Average diameter (cm)	Average density (individual·hm ⁻²)
CK	SE	2	103	7.62	1479
A1B1	SE	3	104	7.59	1875
A1B2	S	6	102	7.38	2200
A1B3	SE	5	101	6.50	1917
A2B1	SE	8	101	7.64	1833
A2B2	W	8	106	8.93	1521
A2B3	W	11	105	7.93	1208
A3B1	N	10	98	8.15	1083
A3B2	N	9	94	8.42	1250
A3B3	N	13	91	8.13	1604

注：样地编号中，A1~A3 代表 N:P₂O₅:K₂O=2:1:1、3.5:1:2、5:1:2.5 施肥配比；B1~B3 代表 450、600、750 kg·hm² 施肥量；CK 代表对照组。坡向中，S、N、E、W 分别代表南、北、东、西。

Note: In the sample plot number, A1~A3 represent fertilizer ratios of N:P₂O₅:K₂O=2:1:1、3.5:1:2、5:1:2.5; B1~B3 represent application rate of 450、600、750 kg·hm²; CK represents control group. A and B indicate the fertilizer application ratio and fertilizer application amount, respectively; S, N, E and W in the slope direction represent south, north, east and west, respectively.

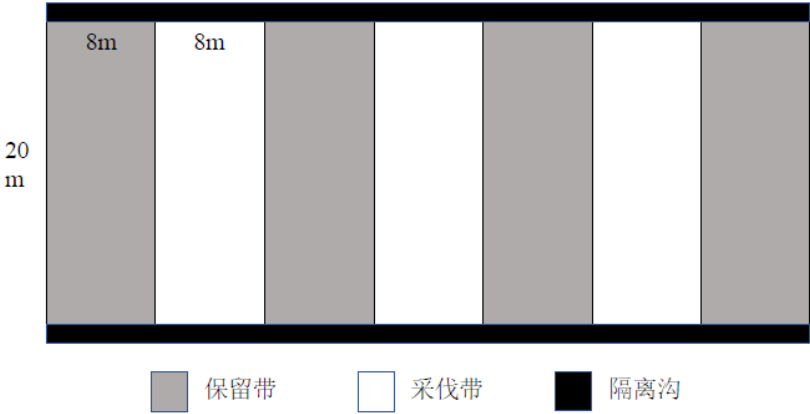


图 1 带状采伐样地示意图

Fig.1 Schematic diagram of strip harvesting plots

1.3 施肥试验设计

本研究采用二因素三水平完全试验设计, 选用尿素 (N 含量 $\geq 46\%$)、钙镁磷肥 (P_2O_5 含量 $\geq 12\%$)、氯化钾 (K_2O 含量 $\geq 60\%$) 3 种市面常见肥料。施肥配比依据毛竹林施肥模型及决策得出的经济最优和产量最优施肥方案 (顾小平, 2004), 设置为 $N:P_2O_5:K_2O=2:1:1$ 、 $3.5:1:2$ 、 $5:1:2.5$ 三个水平, 分别记为 A1、A2、A3。施肥量设置为 450、600、750 $kg \cdot hm^{-2}$ 三个水平, 记为 B1、B2、B3, 共 9 组处理。每组施肥处理 3 个重复。施肥时间为 2019 年 7 月和 11 月, 2020 年 5 月和 10 月及 2021 年 3 月。施肥对象为所有施肥处理的采伐带, 保留带不进行施肥。施肥方式统一采用穴施的方法, 每个矩形样地沿长方向间隔 1~2 m, 沿宽方向间隔 2~3 m, 均匀开设 20 个施肥穴, 深度为 10~20 cm。各样地按相应施肥配比和施肥量将复合肥料翻拌均匀后等量施入 20 个穴中, 覆土掩埋。

1.4 物种多样性统计

在 2019 年和 2021 年的 8 月上旬, 对所有施肥样地及对照样地的林下植被进行调查。于每个样地内随机设置 5 m $\times$ 5 m 标准灌草样方 3 个 (本研究不做草本与灌木调查区分) 进行调查。将各样地调查数据进行分别统计, 包括物种组成、重要值、 α 多样性指数三部分。物种组成即将样地内出现的灌草, 按科、属、种统计。因研究区内林下植被以亚灌木、匍匐藤本和矮小草本为主, 因此未将植株高度纳入重要值内计算, 重要值计算方法如下 (马克平等, 1994):

物种相对重要值=(相对密度+相对盖度+相对频度)/3

林下植被物种多样性测定以重要值作为 α 多样性指数测度依据, 选用 Shannon 指数 (H)、Gleason 物种丰富度指数 (D')、Simpson 指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (E) 四项指标对物种多样性进行描述。各指数计算公式如下:

$$H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$D' = S / \ln A$$

$$D = 1 / \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$E = \frac{-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i}{\ln S}$$

式中, S 为样地中物种数; P_i 为物种 i 的相对重要值; A 为面积。将多样性调查数据统计完毕后, 按不同处理取均值, 即以每组处理 3 个重复的均值代表该处理的平均水平, 供进一步分析使用。

1.5 生物量调查

在 2019 年和 2021 年的 8 月上旬, 采用全收获法, 将各样地的各调查样方内所有灌草全部进行整株收获, 并按根、茎、叶三部分进行分解, 相同样地同一器官的灌草混合为一个样品, 并在野外立刻测定鲜重。带回实验室后置于 80 $^{\circ}C$ 下烘干至恒重后称干重, 并换算成单位面积干物质的量。

1.6 数据处理及图表制作

数据统计采用 Microsoft Office Excel 软件, 数理统计各项检验及分析采用 SPSS 18.0 进行, 图表制作采用 R Studio 及 Microsoft Office Excel。

2 结果与分析

2.1 林下植被物种组成及重要值

2019 年共记录到林下植被 49 科 73 属 77 种, 2021 年共记录到林下植被 44 科 60 属 64 种, 以莎草科、茜草科、蔷薇科、夹竹桃科、苋科、禾本科为主。对不同施肥处理后的带状采伐样地内出现的草本和灌木

物种进行物种重要值的统计和计算, 根据该物种在各处理样地的出现频次和重要值排名划定优势种。一大小年的施肥处理前后, 优势种的物种组成和重要值无显著差异 (表 2)。2019 年调查显示 (表 2), 施肥处理样地内优势种重要值由高到低依次为青绿薹草 (*Carex breviculmis*)、臭鸡矢藤 (*Paederia cruddasiana*)、络石 (*Trachelospermum jasminoides*)、金毛耳草 (*Hedyotis chrysotricha*)、山莓 (*Rubus corchorifolius*) 和蓬蘽 (*Rubus hirsutus*)。对对照样地中, 上述优势种的重要值在 0.11 以上, 仍保持一定的优势地位。调查显示, 2019 年进行带状采伐后, 与对照处理相比, 青绿薹草和金毛耳草重要值变化了 316.79%、-51.42%, 臭鸡矢藤、络石、山莓和蓬蘽重要值分别变化了 12.17%、13.88%、31.66%、-11.82%。

2021 年施肥处理样地优势种重要值由高到低依次为青绿薹草、莲子草 (*Alternanthera sessilis*)、臭鸡矢藤、淡竹叶 (*Lophatherum gracile*)、络石和金毛耳草 (表 2)。对对照样地中, 除淡竹叶外, 其他优势种的重要值均在 0.20 以上。各优势种相较于对照处理, 重要值分别变化了 103.20%、35.89%、-42.01%、359.46%、-27.95%、-52.37%。由此可知, 短时间内, 草本对施肥处理的响应较灌木更敏感, 而较长一段时间内, 草本与灌木响应程度的差异消失。

表 2 2019 年和 2021 年施肥处理样地优势种及其重要值

Tab.2 Dominant species and the important values of plots under fertilization in 2019 and 2021

年份 Year	物种名称 Species name	处理 Treatment									CK	
		A	A 1 B	A1 B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3	平均值	Average
		1B1	2									
2019	青绿薹草 <i>Carex breviculmis</i>	0.375	0.582	0.493	0.520	0.477	0.485	0.759	0.695	0.751	0.571	0.137
2019	臭鸡矢藤 <i>Paederia cruddasiana</i>	0.374	0.466	0.447	0.440	0.247	0.387	0.335	0.122	0.171	0.332	0.378
2019	络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	0.200	0.141	0.256	0.385	0.281	0.111	0.174	0.375	0.250	0.242	0.281
2019	金毛耳草 <i>Hedyotis chrysotricha</i>	0.498	0.176	0.268	0.238	0.156	0.173	0.148	0.192	0.153	0.222	0.457
2019	山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	0.179	0.120	0.148	0.105	0.263	0.190	0.027	0.107	0.085	0.136	0.199
2019	蓬蘽 <i>Rubus hirsutus</i>	0.086	0.095	—	0.150	0.194	0.162	—	0.082	0.093	0.123	0.110
2021	青绿薹草 <i>Carex breviculmis</i>	0.416	0.481	0.459	0.468	0.340	0.593	0.645	0.521	0.651	0.508	0.250
2021	莲子草 <i>Alternanthera sessilis</i>	0.466	0.229	0.154	0.337	0.354	0.190	0.235	0.326	0.264	0.284	0.209
2021	臭鸡矢藤 <i>Paederia cruddasiana</i>	0.238	0.317	0.125	0.359	0.195	0.319	0.243	0.138	0.192	0.236	0.407
2021	淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	0.086	0.481	0.205	0.009	0.254	0.144	0.013	—	—	0.170	0.037
2021	络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	0.224	0.096	0.206	0.056	0.115	0.081	0.208	0.278	0.223	0.165	0.229
2021	金毛耳草 <i>Hedyotis chrysotricha</i>	0.138	0.122	0.108	0.182	0.489	0.179	0.127	0.056	0.047	0.161	0.338

2.2 林下植被物种 α 多样性

由图 2 可知, 2019—2021 年, 研究区内施肥样地的林下植被各多样性指数相较于对照样地均产生一定变化。2019 年各施肥处理样地 Shannon 指数 (H)、Simpson 指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (E) 整体差异显著, 当施肥用量相同时, 随施肥配比中 N、K 肥比例升高, 指数 H 和 Gleason 物种丰富度指数 (D') 逐渐增大, 分别为 1.73~2.36 和 2.64~3.53; 指数 D 、 E 呈单峰型变化趋势, 分别为 0.719~0.815 和 0.576~0.766, 峰值均出现在 A2B2。当施肥配比相同时, 随施肥用量增大, 各指数无显著差异。2021 年指数 H 差异显著性消失, 指数 D 、 E 整体保持显著差异。当施肥用量相同时, 随施肥配比增大, 指数 D 、 E 维持单峰型变化趋势, 分别为 0.67~0.75 和 0.59~0.74, 峰值均出现在 A2B2。当施肥配比相同时, 随施肥用量增大, 各指数无显著差异。

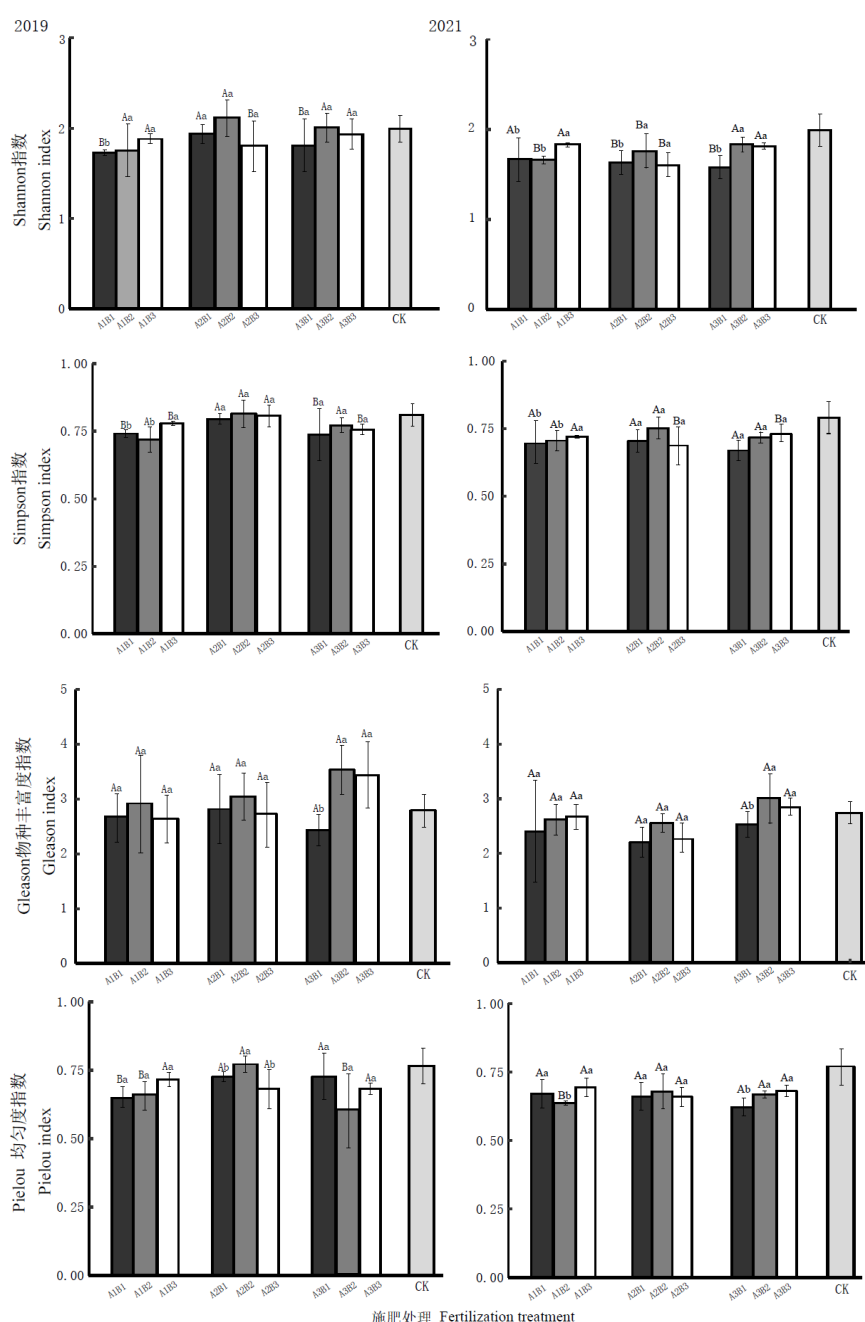


图 2 2019 年和 2021 年不同施肥处理带状采伐毛竹林样地林下植被物种多样性

Fig.2 Species diversity of understory vegetation in strip harvesting bamboo forest with different fertilization in 2019 and 2021

注：不同大写字母表示相同施肥量不同施肥配比具有显著差异（ $P<0.05$ ），不同小写字母表示相同施肥配比不同施肥量具有显著差异（ $P<0.05$ ）。A1~A3：N:P₂O₅:K₂O=2:1:1、3.5:1:2、5:1:2.5 施肥配比；B1~B3：450、600、750 kg·hm⁻² 施肥量；CK：对照组。下同。

Note: Different capital letters indicate significant differences ($P<0.05$) in different fertilizer ratios for the same application rate, and different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in different fertilizer ratios for the same application rate. A1~A3: Fertilizer ratios of N:P₂O₅:K₂O=2:1:1、3.5:1:2、5:1:2.5; B1~B3: Application rate of 450、600、750 kg·hm⁻²; CK: Control group. The same below.

2.3 林下植被生物量

由图 3 可知，2019 年施肥处理样地林下植被生物量随施肥配比和施肥量变化的差异不显著，以 A2B2 样地为最小值（54.91 g·m⁻²），以 A3B1 样地为最大值（74.21 g·m⁻²）。生物量分配格局方面，对照、A1B3、A2B3 及 A3 全组处理生物量集中于根部和叶部，A1B1、A2B2 及 A2B1 处理生物量接近均匀分布。2021 年施肥样地林下植被生物量小于对照样地，随施肥配比增大，呈现显著的先减后增趋势，为 39.47~67.73 g·m⁻²，最小值出现在 A2B2 处理；而随施肥量变化的差异不显著。生物量分配格局方面，对照处理生物量接近均匀分布，施肥处理生物量均集中于根部和茎部。

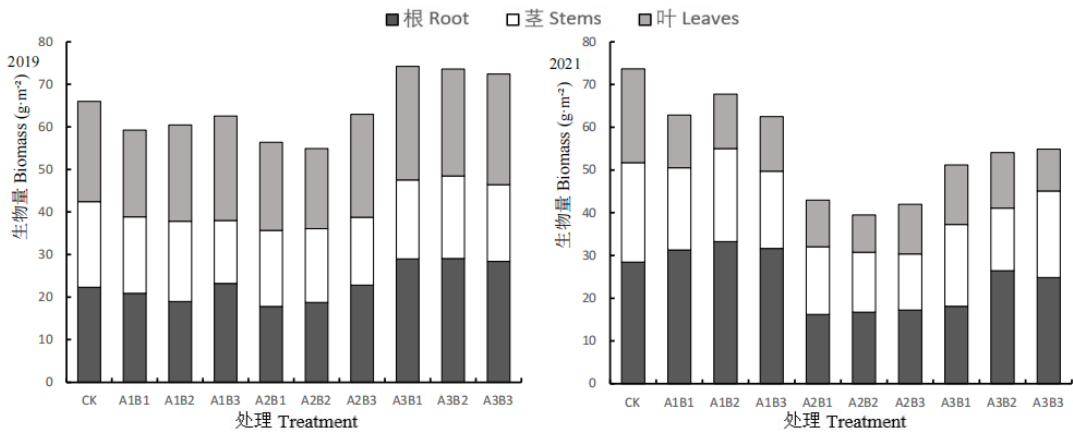


图 3 2019 年和 2021 年施肥处理样地林下植被生物量及分布格局

Fig.3 Biomass and the distribution of understory vegetation in different fertilization plots in 2019 and 2021

2.4 配比施肥与物种多样性和生物量的关系

对施肥处理中的施肥配比和施肥量与林下植被 α 多样性各指数及根、茎、叶各部生物量进行相关性分析（表 3），由于林下植被对于施肥在短期和长期时间的响应不同，导致 2019 年与 2021 年在某些指标上的相关性和相关系数存在差异。2019 年施肥配比与 Shannon 指数、Gleason 丰富度指数和根生物量呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），与 Pielou 均匀度指数呈极显著负相关；施肥量仅与叶生物量呈极显著正相关。2021 年施肥配比与指数 Shannon 指数呈极显著正相关，与 Pielou 均匀度指数和根生物量呈极显著负相关，其余指数相关性不强，施肥量与所有指数均无显著相关性。

表 3 施肥处理与林下植被 α 多样性及生物量相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of fertilization with understory vegetation α diversity and biomass								
年份	施肥因素	Shannon 指数	Gleason 丰富度指数	Simpson 指	Pielou 均匀度	生物量 Biomass		
Year	Fertilization factor	Shannon index (H')	Gleason index (D')	数	指数	根	茎	叶
				Simpson index (D')	Pielou index (E')	Roots	Stems	Leaves

2019	A	0.940**	0.847**	0.160	-0.597**	0.738**	0.301	0.283
	B	0.105	-0.017	0.227	-0.048	0.194	-0.348	0.554**
2021	A	0.846**	0.312	-0.18	-0.578**	-0.524**	-0.215	-0.081
	B	0.081	0.387	0.185	-0.022	0.229	-0.104	-0.250

注：施肥因素中 A、B 分别表示施肥配比和施肥量。

Note: Fertilizer application factors A and B denote fertilizer application ratio and fertilizer application amount, respectively.

3 讨论

3.1 配比施肥对林下植被多样性的影响

物种多样性是反映群落的组成、结构、复杂性和演替特征的重要指标，在维持林分稳定性和生产力中起重要作用（舒韦维等,2021）。由于乔木层只有主要树种毛竹，因此林下植被的多样性可以完全代表林分的物种多样性。在本研究中，林下植被多样性对施肥处理的两个因素，即施肥配比和施肥量的响应机制不同。多样性指数和相关性分析表明，施肥配比与 Shannon 指数呈极显著正相关，随施肥配比中 N 肥、K 肥的比例增大，施肥处理带状采伐毛竹林的 Shannon 指数呈现递增趋势，并在低比例和高比例表现出抑制和促进的两重性；与 Pielou 均匀度指数呈极显著负相关，随施肥配比增大，Pielou 均匀度指数在其抑制作用下呈现单峰趋势。但 Shannon 指数和 Pielou 均匀度指数与施肥量之间不存在相关性，当施肥配比相同施肥量改变时，其组内差异也不显著。由于不同植物对土壤养分利用的方式和效率的差异，导致不同植物在土壤养分状况改善的条件下，生长呈现差异化。Sean 等（1999）研究认为，施肥对群落的物种多样性及演替过程的影响，主要是通过促进群落内物种组成的稳定并作用于演替后期来实现。施肥能改善土壤养分状况，实际上是通过改变土壤中的有效资源影响植物生长，作用于群落内的养分竞争，进而引起植物种群的变化（蔡志风等,2011），这也是施肥对林下植被的影响存在两重性的原因。

林下植被多样性仅在施肥配比影响下存在显著差异，受施肥量的影响差异不显著。原因有两方面，一方面在于土壤养分库存在一系列平衡和缓冲机制，施肥带来直接的养分输入，能够一定程度提高土壤有效养分，但是存在一定阈值（李娟等,2008），因此当施肥量较大时，对土壤有效养分的改善程度可能与低、中施肥量相近；另一方面，毛竹纯林因人工经营以及物种本身特点，相对于林下植被，毛竹在群落中占据极优势地位，林下植被除了受到施肥处理的直接影响，还会受到毛竹的间接影响，顾小平（2004）通过对毛竹纯林配方施肥的主效应分析认为，N、P、K 三因素对毛竹林增产的作用大小依次为 N 肥>P 肥>K 肥，且在超过一定施用量时，会对生产力带来明显的负作用。本研究施肥配比中 N 肥、K 肥比例的增大，显著促进了毛竹的生长，进而间接影响林下植被的生长状况，而施肥量的增大，使土壤有效养分逼近土壤缓冲阈值的上限，同时相对于低、中施肥量，高施肥量对毛竹的促进作用有限甚至可能触发抑制作用，进而影响林下植被的差异显著性。

3.2 林下植被多样性受施肥影响的时间动态变化趋势

基于毛竹大年集中出笋，小年换叶、进一步郁闭的物候特征（郑郁善等,1998），人工营造的毛竹纯林，其林分环境在大年与小年有着明显的区别。带状采伐本质是对毛竹林分的干扰处理，其产生的林窗带来林下环境和小气候的改善，林窗未闭合期间有利于林下植被生长（詹美春等,2020）。施肥短时间内能够改善土壤养分条件，但施肥对毛竹的伐后恢复有着促进作用，林窗闭合的进程加快，长时间内改善毛竹林分的个体大小和密度状况，促进林分郁闭，因此施肥对于林下植被多样性存在先促进后抑制的影响。基于时间尺度，综合来看所有施肥处理下的带状采伐毛竹林，2019—2021 年其林下植被的 α 多样性各指数变化趋势

与对照组相似, Shannon 指数、Gleason 物种丰富度指数和 Simpson 指数均呈现不同程度的先上升后下降的趋势, 这与“先促进后抑制”的影响机制是符合的; Shannon 指数和 Gleason 物种丰富度指数从不同角度直接解释物种的多样性及群落的复杂性, 其值越高, 群落越趋近于“无序”, 复杂性越高, 物种多样性越高; Simpson 指数是描述群落中所包含物种数目的多寡, 即丰富程度的高低 (郑德祥等,2016;薛世玉等,2021), 2021 年施肥处理林下植被物种数较 2019 年减少了 13 种, 这与 Simpson 指数的变化相契合。Pielou 均匀度指数能够描述群落中全部物种个体数目分布的均匀程度 (陈丝露,2017), 与 α 多样性其他指数相反, 呈现先下降后上升的趋势。原因从微观的角度看, 采用穴施的方法相对于整个样地, 是点与面的关系, 局部的养分条件改善促使草本和藤本植物向该处集中拓植; 而从宏观的角度, 人为干扰处理是林分内物种多样性, 包括分布均匀程度的重要影响因素 (朱锦懋等,1997;艾训儒,2006), 且与干扰强度有关。郝建峰等 (2016) 研究指出, 林下植被层均匀度指数表现为中度干扰>重度干扰>轻度干扰, 施肥与采伐作用的累加属于重度干扰, 林分郁闭后仅剩施肥起作用, 属于中度干扰, 在干扰理论中属增益性干扰 (McKinney,2006), 因此呈现“先减后增”的趋势。

3.3 配比施肥对林下植被生物量及分配格局的影响

林下植被生物量作为群落总生物量的重要组成部分, 是群落发挥物质生产、生态维持等功能的重要基础 (Con *et al.*,2013)。林下植被生物量与乔木生物量在林分光、热、水、肥条件上存在直接的竞争关系, 两者间的平衡能够一定程度影响群落的稳态。温远光等 (2008) 在桉树人工林研究中, 阐述了物种多样性与生物量之间的密切关系。相关性分析表明, α 多样性四指数与根、茎、叶各部分生物量存在多组极显著和显著相关, α 多样性指数内部同样存在一定相关关系, 证明了带状采伐毛竹林内林下植被物种多样性与生物量之间的相关性同样较为密切, 与 Guo (2007) 的研究一致。进而解释了施肥处理对带状采伐毛竹林内林下植被的总生物量的影响具有两重性, 在时间尺度上存在“先促进后抑制”的影响, 与多样性相同。在施肥处理的影响下, 生物量分配格局方面, 呈现由近似均匀分布向叶部占比减少、集中于根茎的变化模式 (图 3)。采伐当年的施肥配比与根部生物量呈极显著正相关, 施肥量与叶部生物量呈极显著正相关。由此可以得出, 采伐后林分养分竞争缓和, 养分输入后林下植被的生态位拓宽, 根部和叶部启动一系列响应机制: 促进根系扩张, 提升水肥摄取及繁殖能力; 促进叶片生长, 提高叶面积指数, 提升光合速率, 进而促进林下植被生长发育, 提高物种多样性, 这是一方面的原因。另一方面可以从凋落物的角度考虑, 施肥能够影响植被地上与地下部分物质的分配平衡, 进一步影响土壤的理化特征和养分循环过程 (Landuyt *et al.*,2020), 进而再反作用于林下植被的物种多样性。而持续施肥至采伐后第二个大年, 采伐迹地上的毛竹充分恢复, 此时的养分输入主要是为毛竹提供充足养分条件, 一部分储存于母竹以做之后的换叶的储备, 一部分进入地下部分促进进行鞭, 为之后出笋提供结构基础, 对林下植被的生长产生胁迫, 且直接对根部起极显著负作用, 进而降低其多样性。

4 结论

在持续一大小年的配比为 $N:P_2O_5:K_2O=3.5:1:2$ 的施肥处理下, 带状采伐毛竹林林下植被的多样性、复杂程度和均匀程度最高, 生物量最低。表示林下植被对养分的利用更为充分, 林分的稳定性及可持续性较好。但在指导实际生产过程中, 仍应结合伐后新竹及林分恢复特征, 来确定促进恢复的最优施肥方案, 后续研究可进一步关注成本, 为带状采伐毛竹林的高效经营提出经济最佳的养分输入方案。

参 考 文 献

- 艾训儒. 2006. 人为干扰对森林群落及生物多样性的影响. 福建林业科技, 33(3): 5-9.
- 安树青, 王峥峰, 朱学雷, 等. 1997. 土壤因子对次生森林群落演替的影响. 生态学报, 17(1): 47-52.
- 蔡志风, 郝明德, 吴振海, 等. 2011. 长期施肥对黄土区连作苜蓿草地植被特征的影响. 水土保持通报, 31(1): 46-52.
- 陈丝露, 赵敏, 李贤伟, 等. 2018. 柏木低效林不同改造模式优势草本植物多样性及其生态位. 生态学报, 38(01): 143-155.
- 顾小平, 吴晓丽, 汪阳东. 2004. 毛竹材用林高产优化施肥与结构模型的建立. 林业科学, 40(03): 96-101.
- 郝建锋, 李 艳, 齐锦秋, 等. 2016. 人为干扰对碧峰峡栲树次生林群落物种多样性及其优势种群生态位的影响. 生态学报, 36(23): 7678-7688.
- 何艺玲, 傅懋毅. 2002. 人工林林下植被的研究现状. 林业科学研究, 15(6): 727-733.
- 胡冬冬, 唐 丹, 王文欢, 等. 2018. 人工林林下植被演替及其人为影响因子. 山西农业科学, 46(3): 471-475.
- 江泽慧. 2002. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社: 10-17.
- 李国雷, 刘 勇, 于海群, 等. 2009. 油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林林下植被发育对油松生长节律的响应. 生态学报, 29(3): 1264-1275.
- 李 娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 2008. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. 中国农业科学, 41(1): 144-152.
- 马克平. 1994. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 2(3): 162-168.
- 马克平, 刘玉明. 1994. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 2(4): 231-239.
- 申景昕, 范少辉, 刘广路, 等. 2020. 毛竹林采伐林窗近地层温度时空分布特征. 生态学杂志, 39(11): 3549-3557.
- 舒韦维, 卢立华, 李 华, 等. 2021. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. 生态学报, 41(11): 4521-4530.
- 王纪军, 裴铁璠. 2004. 气候变化对森林演替的影响. 应用生态学报, 15(10): 1722-1730.
- 王树梅, 范少辉, 官凤英, 等. 2021. 带状采伐对毛竹林土壤细菌群落结构及多样性的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 45(2): 60-68.
- 温远光, 陈 放, 世 荣, 等. 2008. 广西桉树人工林物种多样性与生物量关系. 林业科学, (4): 14-19.
- 薛世玉, 李小飞, 徐大平, 等. 2021. 抚育措施对檀香+降香黄檀混交林林下植被多样性的影响. 热带作物学报, 42(8): 2422-2429.
- 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 等. 2007. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征. 生态学报, 27(12): 5110-5119.
- 曾宪礼, 苏文会, 范少辉, 等. 2019a. 带状采伐毛竹林土壤质量评价. 生态学杂志, 38(10): 3015-3023.
- 曾宪礼, 苏文会, 范少辉, 等. 2019b. 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.
- 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.
- 张柳桦, 齐锦秋, 李婷婷, 等. 2019. 林分密度对新津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响. 生态学报, 39(15): 5709-5717.
- 张洋洋, 凡莉莉, 徐文达, 等. 2020. 带状采伐后不同时期毛竹林恢复和土壤养分特征. 西北植物学报, 40(8): 1407-1413.
- 张洋洋, 凡莉莉, 黄 霞, 等. 2021. 毛竹林带状采伐后垦复施肥对新竹生长及土壤养分含量的影响. 热带作物学报, 42(4): 1047-1054.
- 郑德祥, 苏凌燕, 钟兆全, 等. 2016. 闽北闽粤栲天然林林隙物种多样性变化分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 44(12): 81-87.
- 郑郁善, 洪 伟, 邱尔发. 1998. 毛竹出笋退笋规律的研究. 林业科学, 34(S1): 73-77.
- 朱教君, 刘足根. 2004. 森林干扰生态研究. 应用生态学报, 15(10): 1703-1710.
- 朱锦懋, 姜志林, 蒋 伟, 等. 1997. 人为干扰对闽北森林群落物种多样性的影响. 生物多样性, 5(4): 24-31.
- 朱 喜, 何志斌, 杜 军, 等. 2014. 林下植被组成和功能研究进展. 世界林业研究, 27(5): 24-30.
- Con TV, Thang NT, Ha DTT, et al. 2013. Relationship between aboveground biomass and measures of structure and species diversity in tropical forests of Vietnam. Forest Ecology and Management, 310: 213-218.

DeCandido R, Muir AA, Gargiullo MB. 2004. A First Approximation of the Historical and Extant Vascular Flora of New York City: Implications for Native Plant Species Conservation. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 131: 243-251.

Guo QF. 2007. The diversity-biomass-productivity relationships in grassland management and restoration. *Basic and Applied Ecology*, 8: 199-208 .

Landuyt D, Ampoorter E, Bastias CC, et al. 2020. Importance of overstorey attributes for understorey litter production and nutrient cycling in European forests. *Forest ecosystems*, 7: 45-56.

McKinney ML. 2006. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 127: 247-260.

Sean C, Thoma S, Charles B, et al. 1999. Plant diversity in managed forests: understory responses to thinning and fertilization. *Ecological Applications*, 9: 864-879.

作者简介 李承基, 男, 1998年生, 硕士研究生, 主要研究方向为竹林高效经营。E-mail: lcjlcj19980618@163.com