

毛竹林带采伐宽度对土壤碳氮磷含量及计量比的影响

申景昕^{1,2,3} 范少辉^{1,3} 刘广路^{1,3*} 魏松坡^{1,3}

(¹ 国际竹藤中心竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102; ² 福建水利电力职业技术学院, 福建永安 366000; ³ 福建永安竹林生态系统定位观测研究站, 福建永安 366000)

摘要 毛竹带状采伐是近年来为了适应机械化作业而提出的新理念, 探讨带状采伐宽度对土壤养分含量及计量比的影响, 对选择合理的采伐带宽, 支撑毛竹林采伐模式的更新具有重要的作用意义。本研究设置 4 种采伐带宽 (3 m、6 m、9 m、12 m) 的试验样地, 以传统择伐毛竹林为对照 (CK), 比较不同处理土壤 C、N、P 含量及比值的差异性。结果表明: 随着采伐宽度的增加, 土壤 C、N、P 呈先增加后降低的趋势, 采伐带宽 6 m 时含量最高, 12 m 时含量最低; 土壤 C/P、N/P 随着采伐宽度增加先增加后降低, C/N 相对稳定, 其中采伐带宽 6 m 土壤 C/P 显著大于采伐带宽 12 m, 采伐带宽 3 m 和采伐带宽 6 m 土壤 N/P 显著大于采伐带宽 12 m。研究区 C/N、C/P、N/P 的变化范围为 14.52~16.50、159.88~172.54 和 9.03~10.70。综上所述, 采伐带宽 6 m 时对土壤 C、N 的积累最有利, 具有较高的 C/N、C/P、N/P, 养分比例更趋平衡; 同时研究区毛竹林受到氮、磷元素含量的双重制约, 且土壤 P 元素更为缺乏, 需通过人工施磷肥保证土壤养分平衡, 促进带状采伐毛竹林短期内迅速恢复。

关键词 毛竹; 带状采伐; 土壤养分; 化学计量比

Effects of soil nutrients on C,N,P and stoichiometry of *Phyllostachys edulis* forests under different strip clear cutting.

SHEN Jing-xin^{1,2,3}, FAN Shao-hui^{1,3}, LIU Guang-lu^{1,3*}, WEI Song-po^{1,3} (¹Key Laboratory for Bamboo and Rattan, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; ²Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an 366000, China; ³Yong'an Bamboo Forest Ecosystem Research Station, Fujian 366000, China)

Abstract: In order to scientifically manage the strip clear cutting of moso bamboo forests, we studied the effects of different cutting widths (3 m, 6 m, 9 m, 12 m) on the soil characteristics of moso bamboo forests after strip clear cutting. The results showed that with the increase of cutting width, the content of soil C, N and P increased at first and then decreased. The content of soil C, N and P was the highest at 6 m and the lowest at 12 m; Soil C/P and N/P increased first and then decreased with the increase of cutting width, and C/N was relatively stable, among which the cutting width of 6 m soil C/P was significantly greater than the cutting width of 12 m, and the cutting width of 3 m and 6 m soil N/P was significantly greater than the cutting width of 12 m. The variation range of C/N, C/P and N/P in the study area was 14.52-16.50, 159.88-172.54 and 9.03-10.70. In conclusion, when the cutting width was 6 m, it was most beneficial to the accumulation of soil C and N, with higher C/N, C/P, N/P, and more balanced nutrient ratio; At the same time, moso bamboo forest in the experimental area was influenced by the dual constraints of nitrogen and phosphorus content, and the soil P element was more deficient. It is necessary to ensure the soil nutrient balance through artificial application of phosphorus fertilizer, and promote the rapid recovery of moso bamboo forest in strip cutting area in the short term.

Keywords: *Phyllostachys edulis*; strip clearcutting; soil nutrients; ecological stoichiometry characteristics.

中国是竹资源最丰富的国家之一, 种类约占世界竹资源的 50%, 面积 641 万 hm^2 (国家林业与草原局, 2019a)。其中, 毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 在我国南方被大面积种植, 面积 467 万 hm^2 , 占我国竹资源总面积的 73%, 具有重要的生态价值和经济价值 (Zhou *et al.*, 2011; 国家林业和草原局, 2019b)。毛竹具有发达的地下鞭根系统, 竹鞭不断向四周延伸生长 (施建敏等, 2014; 赵建诚等, 2016)。同时, 毛竹生长发育除了自身通过从土壤中获取所需要的养分, 相连分株也可以通过地下茎对其输送物质, 其具有较强的生理整合能力 (Xu *et al.*, 2010)。基于毛竹的生长特性, 有学者提出了毛竹林带状采伐理念, 来解决传统择

国际竹藤中心基本业务专项 (1632021003) 和福建省中青年教师教育科研项目 (科技类) (JAT210746) 资助。

*通讯作者 E-mail: liuguanglu@icbr.ac.cn。

伐经营模式高成本、低效率等制约竹产业发展的瓶颈问题。以特定的带宽对毛竹进行带状采伐,通过一定的周期自然恢复成林,可以为毛竹林机械化采伐提供技术支撑。已有研究表明,带状采伐对毛竹林恢复初期具有显著影响,并与采伐宽度密切相关。目前,有关毛竹林带状采伐已有研究,主要集中在不同采伐带宽新竹恢复特征(曾宪礼等,2019a)、林下植被多样性维持(詹美春等,2020)、土壤微生物变化(吴昌明等,2021)、土壤理化性质变化(曾宪礼等,2019b;张洋洋等,2020)、林内微气候特征(申景昕等,2020)等方面研究,如曾宪礼等(2019a、2019b)对安徽省黄山区不同采伐宽度毛竹林的研究表明,采伐带内竹笋出笋率和成竹率增加,退笋率降低,但新竹胸径较低,土壤质量随采伐宽度的增大而提升;詹美春等(2020)对江苏宜兴国有林场5种宽度(3 m、5 m、8 m、12 m、15 m)带状采伐的林下植被多样性的研究表明,8 m和15 m采伐带宽显著促进了林下植被生长。但缺乏对于土壤C、N、P元素的循环和平衡机制的研究。土壤是生态系统的重要组成部分,其主要养分含量及其计量比是衡量土壤肥力状况的关键因子,对带状采伐毛竹林的恢复以及生产力长期保持具有重要作用(Liu *et al.*, 2010)。同时,研究土壤养分比值,可反映土壤养分限制,对揭示采伐后毛竹林养分的限制元素以及养分循环和平衡机制具有重要意义(Wei *et al.*, 2007)。前期的研究重点侧重于土壤理化性质的状况分析,缺乏对土壤养分特征的系统分析。因此,本研究以福建永安竹林生态系统定位观测研究站不同采伐带宽毛竹林为对象,探究采伐宽度对毛竹林地土壤养分含量及化学计量比的变化规律,筛选限制带状采伐毛竹生长的养分元素,选择适宜的采伐宽度,对带状采伐毛竹林的恢复具有理论和现实意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省永安市,坐标为117°27'7"E、26°0'36"N,属于戴云山脉和武夷山脉,该地区大多为山地丘陵,平原面积极少,海拔580~1604 m,属于亚热带季风气候,同时又具有一定的大陆性气候。年平均气温19.3℃,年平均相对湿度80%以上,年均降雨量为1557 mm,无霜期超过了290 d;土壤有红壤、黄壤、水稻土、石灰土、紫色土、潮土、草甸土等多种类型(刘广路等,2017)。森林面积24.28万hm²,森林覆盖率82.85%;竹林面积6.83万hm²。研究区竹林经营方式以人工除草为主,除草方式为劈灌除草,每年劈草一次,无施肥和垦复等集约经营行为,竹林密度平均4000株·hm⁻²,毛竹林出笋为花年。竹林内零星混生锥(*Castanopsis chinensis*)、檫木(*Sassafras tzumu*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、杨梅(*Myrica rubra*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、木荷(*Schima Superba*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等树种;林下植被主要有白背叶(*Mallotus apelta*)、翅铃(*Eurya alata*)、紫金牛(*Ardisia japonica*)、菝葜(*Smilax china*)、悬钩子(*Rubus spp.*)、大叶金牛(*Polygala latouchei*)等灌木;草本植物主要是柔枝莠竹(*Microstegium vimineum*)、地慈(*Melastoma dodecandrum*)、金丝草(*Pogonatherum crinitum*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)等。

1.2 试验设计与样品采集

实验地设置在福建永安竹林生态系统定位观测站毛竹林观测区。实验设计采用典型样方法选取试验区,共选择了3个经营状况一致(土壤有机碳28.97 g·kg⁻¹、全氮1.87 g·kg⁻¹、全磷0.17 g·kg⁻¹)、海拔和坡向相近的试验小区(1、2、3),每个试验小区分别设置传统择伐(CK)、水平采伐带宽为3 m(C1)、6 m(C2)、9 m(C3)、12 m(C4)的标准地,样地采伐前的基本情况见表1。

表1 试验区基本状况

Table 1 Basic information of experimental area

试验区 Experimental area	平均胸径 Mean DBH (cm)	平均高 Height (m)	年龄结构 Age structure (I:II:III:IV)	立竹度 Stand density (tree·hm ⁻²)	海拔 Altitude (m)	坡度 Gradient (°)	坡向 Aspect
1	9.32±0.75	11.5±0.51	0.22:0.15:0.17:0.46	4500	498	30	北
2	9.19±0.65	11.0±0.73	0.18:0.19:0.20:0.43	5083	474	31	西北
3	9.54±0.71	12.0±0.34	0.13:0.23:0.14:0.50	4000	450	30	西北

注:小于1年的竹子为I度竹,2~3年的竹子为II度竹,4~5年的竹子为III度竹,6~7年的竹子为IV度竹。

Note: The bamboo less than 1 year is I du bamboo, the bamboo of 2-3 years is II du bamboo, the bamboo of 4-5 years is III du bamboo, and the bamboo of 6-7 years is IV du bamboo.

2019年6月,进行毛竹林带状采伐处理,带状采伐样地长度20 m,采伐宽度分别为3 m、6 m、9 m、12 m,每个带宽3次重复,水平采伐带间为保留区域(保留区域为2倍采伐带宽),传统择伐为对照。采伐后的毛竹残留物全部移出样地,同时使用样地绳将采伐处理的样地围起来,方便以后竹林的调查取样。

2020年9月毛竹展叶后采集土壤样品,每个样地内按“S”形随机选取5个采样点。采用6.5 cm土钻自上而下分两层取样(0~20 cm、20~40 cm),将每层土充分混合,采用四分法,称取1 kg土壤样品分别装入事先准备的无菌袋内,标好编号,带回实验室内进行处理,过2 mm筛子,去除土壤样品中的大块砾石、枯枝落叶等杂质,在室内通风处进行风干。

1.3 样品处理及测试

将采集过2 mm筛去除枯枝物及大块砾石后的样品,研磨,过1 mm与0.15 mm筛子测定土壤养分含量。土壤养分测定方法参考《土壤农化分析》(鲍士旦,2000):土壤有机碳(C)含量采用重铬酸钾氧化法测定;土壤全氮(N)含量采用半微量凯氏法测定;土壤全磷(P)含量采用硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法测定;碱解氮(HN)采用碱解扩散法测定;有效磷(AP)采用盐酸—氟化铵提取—钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理

采用SPSS 22.0软件对数据进行方差分析、LSD多重比较、相关性分析。通过Excel软件完成数据整理、作图及制表。

2 结果与分析

2.1 带状采伐毛竹林土壤有机碳的变化

带状采伐后毛竹林地0~20、20~40 cm层土壤有机碳含量发生了规律性变化,呈先增加后降低的变化趋势(6 m>3 m>9 m>CK>12 m,采伐带宽3~9 m林地土壤有机碳含量大于对照样地,采伐12 m林地土壤有机碳含量低于对照样地,其中采伐带宽6 m时,有机碳含量最高(图1)。方差分析表明,带状采伐对土壤有机碳含量具有显著影响($P<0.05$),在采伐带宽度12 m时0~20 cm层有机碳含量显著低于3 m、6 m、9 m($P<0.05$),低于对照但差异不显著($P>0.05$);在20~40 cm土层,12 m显著低于6 m,与3 m、9 m、CK差异不显著($P>0.05$)。带状采伐宽度在3~9 m时,有机碳含量较高,采伐带宽6 m时有机碳含量最高,且带状采伐对表层土壤有机碳的影响程度大于下层土壤。

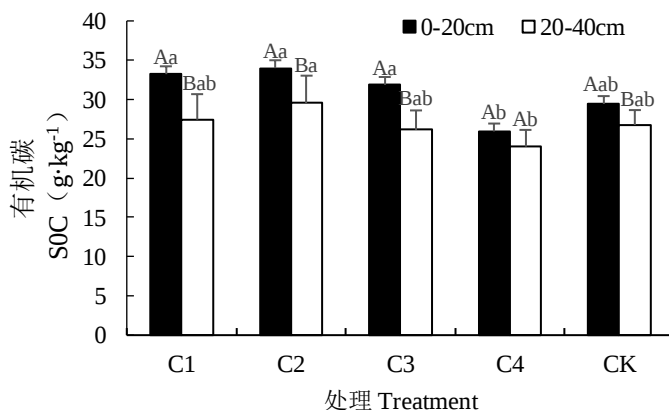


图1 带状采伐毛竹林土壤有机碳的变化

Fig.1 Changes of soil organic carbon of moso bamboo under strip clearcutting

注: 图中不同大写字母表示同一处理不同土层之间差异显著; 不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different soil layers in the same treatment; different little letters indicate significant differences between different treatment of the same soil layer, the same below.

2.2 带状采伐毛竹林土壤氮、磷含量的变化

在 0~20、20~40 cm 土层中, 土壤全氮、碱解氮含量均呈现先增加后降低的趋势, 差异达到显著水平 (图 2)。在 0~20 cm 土层, 6 m 土壤全氮含量最高 ($2.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 大于对照 ($1.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 差异未达到显著水平 ($P>0.05$), 12 m 土壤全氮含量最低 ($1.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 6 m 土壤碱解氮含量最高, 12 m 最低, 但各处理间差异不显著。在 20~40 cm 土层, 9 m、C4 土壤全氮、碱解氮含量显著低于 6 m ($P<0.05$), 与对照差异不显著 ($P>0.05$)。土壤全磷、有效磷含量变化趋势与全氮、碱解氮相同, 呈先增加后降低的趋势, 且在 0~20 cm 土层不同处理间土壤全磷含量达到了显著水平, 6 m 土壤含量最大, 显著大于 12 m ($P<0.05$), 与 3 m、9 m、CK 差异不显著 ($P>0.05$); 土壤有效磷的变异程度大于全磷, 3 m、6 m 显著大于对照 ($P<0.05$), 9 m、12 m 显著小于对照 ($P<0.05$)。在 20~40 cm 土层全磷含量变化趋势与 0~20 cm 土层相同, 但不同处理间差异未达到显著水平 ($P>0.05$); 不同处理土壤有效磷含量差异达到了显著水平, 在 6 m 达到最大值 (平均 $1.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 显著大于对照 ($0.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P<0.05$), 其他处理间差异未达到显著水平 ($P>0.05$)。土壤全氮、全磷、碱解氮和有效磷含量均在 6 m 采伐带宽最高, 显著高于对照林分, 12 m 采伐带宽土壤养分含量较低, 低于对照林分。

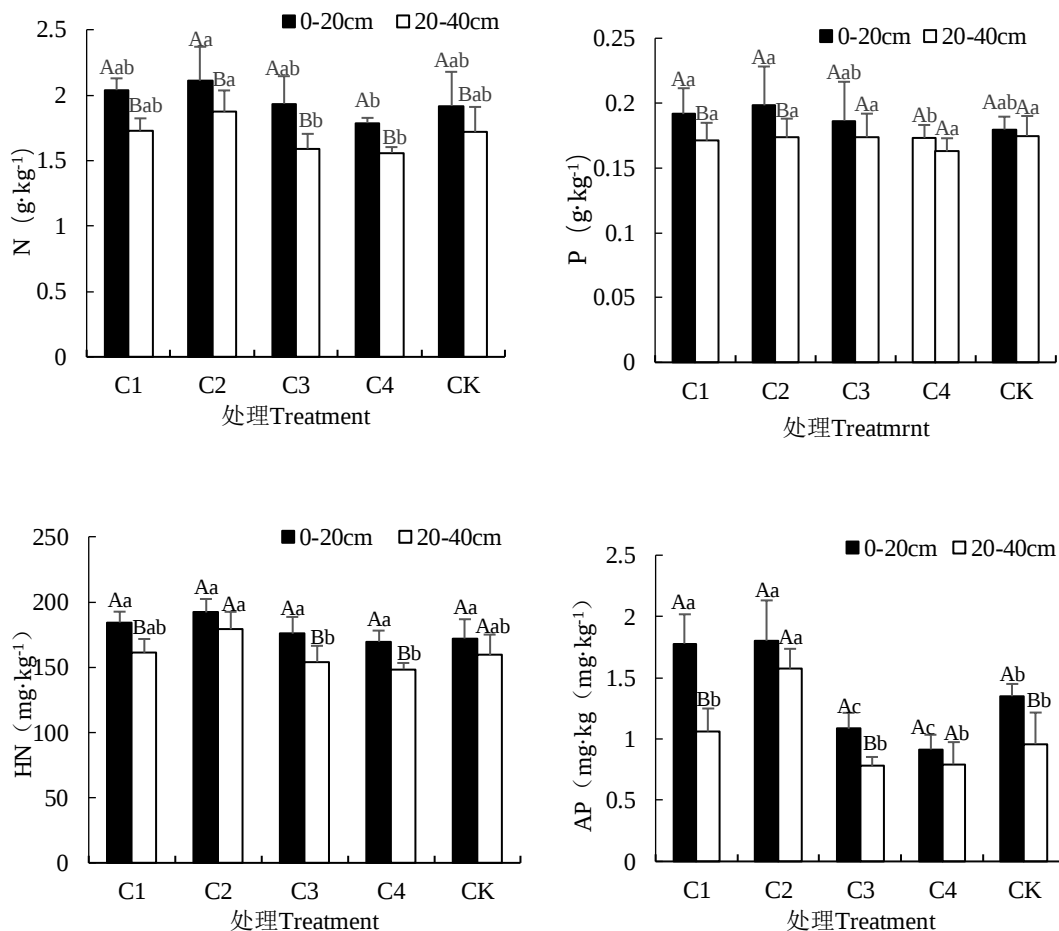


图 2 带状采伐毛竹林土壤 N、P、H-N、A-P 含量的变化

Fig.2 Changes of soil N, P, HN and AP contents of moso bamboo under strip clearcutting

2.3 带状采伐毛竹林土壤碳、氮、磷比值的影响

在 0~40 cm 土层中, 土壤 C/N 随着采伐宽度的增加呈现先增加后降低的趋势, 差异达到了显著水平 ($P<0.05$), 其中 9 m 采伐带 C/N 最大为 16.46 (图 3)。土壤 C/P 在 0~20 cm 土层变异程度大于 C/N, 但不同采伐带间差异不显著; 在 20~40 cm 土层差异达到了显著水平, 6 m 采伐带中达到最高为 170.84, 在 12 m 采伐带中最低为 139.38。随着采伐宽度的增加, 0~20 cm 土层 N/P 在不同采伐带宽间差异不显著; 20~40 cm 土层 N/P 随着采伐宽度的增加呈先增加后降低的趋势, 不同处理的差异达到显著水平 ($P<0.05$), 其中

6 m 最高 10.82, 显著大于 9 m、12 m, 与 CK 差异未达到显著水平 ($P>0.05$)。

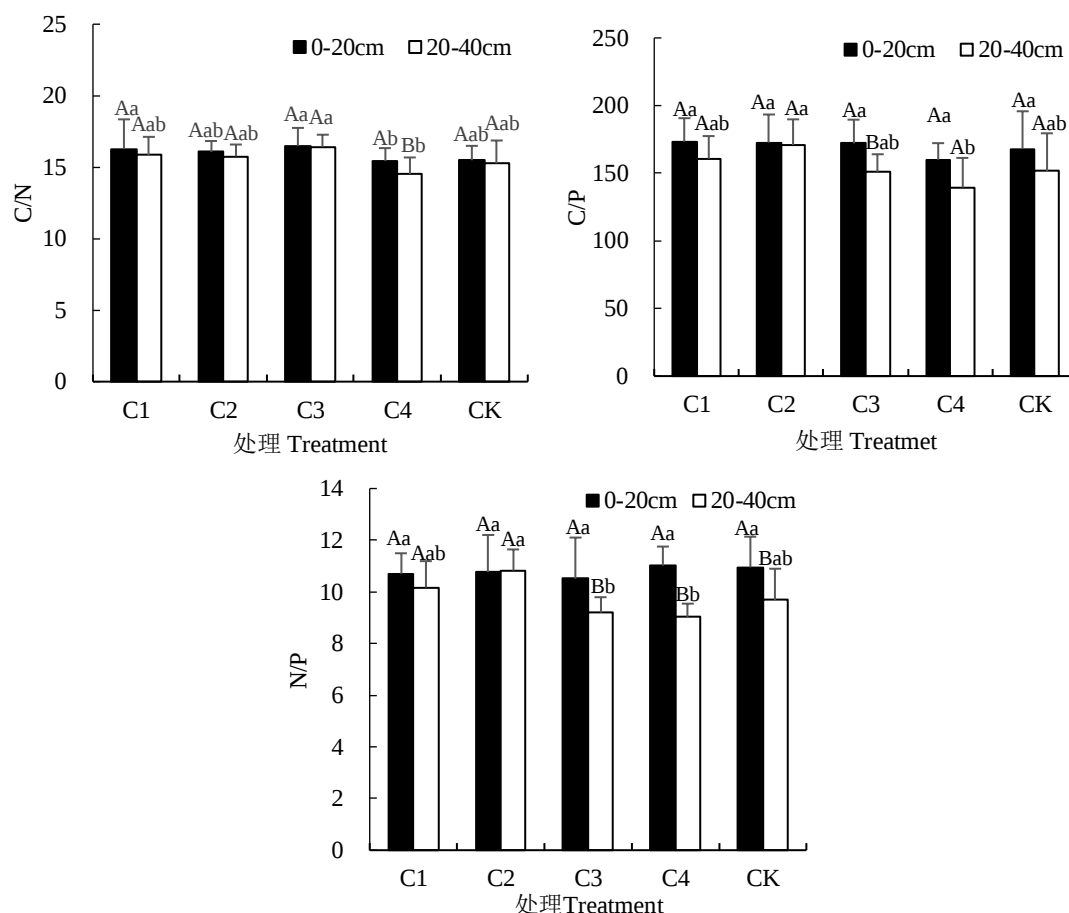


图3 带状采伐毛竹林土壤养分化学计量比的变化

Fig.3 Changes of stoichiometric ratio of soil nutrients of moso bamboo under strip clearcutting

2.4 带状采伐毛竹林土壤养分含量与化学计量比的耦合关系

相关分析表明 (表 2), 土壤有机碳与全氮、全磷、碱解氮、有效磷极显著正相关, 全氮与全磷、碱解氮、有效磷呈极显著正相关, 土壤全磷与碱解氮呈极显著正相关, 土壤主要养分之间存在明显的耦合关系。土壤有机碳与 C/N、C/P、N/P 呈现极显著正相关; 土壤全氮与 C/P、N/P 正相关, 达到极显著水平; 土壤全磷与 C/N 呈极显著正相关, 与 N/P 呈极显著负相关。

表2 土壤养分含量与化学计量比间的相关性分析

Table 2 Correlations between soil nutrients and ecological stoichiometric ratios

	SOC	N	P	HN	AP	C/N	C/P
N	0.871**						
P	0.548**	0.467**					
HN	0.784**	0.903**	0.350**				
AP	0.427**	0.565**	0.077	0.556			
C/N	0.662**	0.213	0.346**	0.198	-0.001		
C/P	0.756**	0.665**	-0.129	0.655**	0.435**	0.517**	
N/P	0.419**	0.624**	-0.395**	0.623**	0.491**	-0.086	0.806**

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

3 讨 论

3.1 采伐宽度对毛竹林地土壤碳、氮、磷含量的影响

土壤 C 是表征土壤肥力的重要指标,其含量关系着森林健康和森林生产力;同时土壤是生态系统中最大的碳库,关系着土壤与大气之间的碳平衡,对森林固碳起着重要作用(龙攀等,2019)。N、P 是土壤的重要组成元素,反映了土壤对植被提供养分的潜在能力,与土壤有机碳及其动态平衡共同构成了土壤肥力的重要指标(李东等,2009)。森林采伐对林分结构、地表植被、光照、温度和水分等环境条件具有显著影响(周新年等,2015),如森林采伐之后增大了林内林隙面积,林内光照时长增加,地表温度增加,土壤含水量、微生物活性等受到影响(胡小飞等,2007; Scharenbroch *et al.*, 2007),进而凋落物分解速率发生改变,有机质含量增加,导致土壤养分发生改变(张景普等 2016; 陈蕾等, 2020);同时采伐后森林密度降低,林内水土流失以及淋溶作用对土壤养分含量也有影响(巫志龙等, 2015; 吕倩等, 2019; Zhao *et al.*, 2019)。本研究发现,不同采伐带宽毛竹林地土壤有机碳和全氮含量随着土层的增加而降低,这与以往的研究一致(Maisto *et al.*, 2011)。在未干扰的条件下,土壤 C、N 元素除了受母质的影响外,亦受凋落物的分解、根系分泌物的影响,表层土壤直接与枯落物以及腐殖质直接接触,富集大量养分,部分养分在水分的下渗作用下淋溶到下层,毛竹属于浅根层,因此 0~20 cm 层土壤 C、N 含量大于 20~40 cm 土层(张勇强等, 2020)。另外,随着采伐宽度的增加,土壤 C、N 含量呈现先增加后降低的趋势,这与宋启亮(2014)、田佳歆等(2021)研究结果一致。但与张洋洋等(2020)、曾宪礼等(2019b)等研究结果不一致,可能是由于采伐宽度过大,地表直接裸露在大气中,受到光照时长增加,地表温度、大气空湿度变化幅度增加,土壤生物活性受到抑制,地表凋落物、腐殖质等分解受到影响,进而造成土壤养分循环速率降低;另一方面,采伐宽度过大,降低了冠层对降雨的拦截效果,林内受雨面积、穿透雨量增加,加强了降雨雨滴对表层土壤侵蚀,破坏了土壤结构,导致地表径流对土壤侵蚀强度增加,造成表层土壤养分含量降低(Mao, 2002; Xu *et al.*, 2003; Guo *et al.*, 2006; 张华等 2013; 刘广路等, 2013; 陈蕾等 2019),适度的采伐宽度有利于土壤有机碳、氮的积累,本研究中 3~9 m 采伐带宽的有机碳、氮含量较好,尤其是 6 m 采伐带宽具有最高的有机碳和氮含量,是较为合理的采伐带宽。土壤磷元素主要受人工施肥、岩石风化的影响,本研究中表层土壤磷元素含量较下层土壤磷元素含量变化幅度更大,可能与表层受降雨淋溶、地表径流的侵蚀作用较大有关(邓成华等,2019)。本研究 0~20 cm 土层 C、N、P 含量变化范围分别为 29.43~33.99、1.78~2.10、0.16~0.20 g·kg⁻¹,其中土壤 C、N 含量大于全国毛竹林的平均水平(21.53 g·kg⁻¹、1.66 g·kg⁻¹),土壤全磷含量小于全国土壤磷含量的平均水平(0.44 g·kg⁻¹)(杜满义等, 2016),更低于我国土壤磷含量的平均水平(0.78 g·kg⁻¹)(Tian *et al.*, 2010)。本研究区毛竹林的 P 元素含量相对较低,毛竹的生长受磷的限制程度较大。

3.2 带状采伐对毛竹林地化学计量比的影响

土壤 C/N、C/P、N/P 是判断养分平衡的重要参数,同时是土壤有机质组成和养分有效性的重要指标。C/N 是衡量土壤 C、N 营养平衡状况的指标,可以衡量土壤氮素矿化能力,且土壤 C/N 越小有机质的分解速率越快(Majdi *et al.*, 2004)。研究表明,当土壤 C/N 较高时,土壤微生物作用下矿化氮量小于自身需要输入的量,与植被吸收生长产生竞争关系;当土壤 C/N 较低时微生物碳增加,矿化 N 量超过微生物自身生长被释放到土壤中,土壤中 N 素含量增加(Bengtsson *et al.*, 2003)。本研究结果显示,随着采伐宽度的增加,土壤中 C/N 呈现先增加后降低的趋势,这可能是由于采伐后凋落物和有机质的分解速率发生了变化,土壤 C、N 的质量增加,从而增加了 C/N(王惠等, 2017),过大的采伐宽度土壤温度增加,有机质快速分解,而凋落物减少,土壤养分得不到及时补充,不利于土壤质量的恢复。但 20~40 cm 土层 C/N 差异不显著,0~20 cm 土层差异显著,这符合化学计量学的基本原则,即有机物质的形成需要一定数量的 N 和其他营养成分与其相应的相对固定比率的 C。此外,各处理 0~20 cm 土壤 C/N 的变化范围为 14.52~16.50,大于全国竹林平均水平(14.2)(杜满义等, 2016)与中国土壤平均水平(14.4)(Tian *et al.*, 2010),反映了研究区缺乏氮元素。同时 C、N 元素呈极显著正相关,C/N 与 C 呈正相关,与 N 不相关,说明土壤 C/N 主要受土壤 C 的限制。

土壤 C/P 可以反映磷的有效利用,较低的 C/P 是土壤 P 有效性高的一个重要指标(曾全超等, 2015)。

研究表明,当 $C/P < 200$ 时,土壤发生 P 矿化作用;当土壤 $C/P > 200$ 时,微生物 C 素大幅度增加,竞争土壤中的速效磷, P 素发生净固持作用(贾宇等, 2007)。本研究土壤 C/P 随着采伐宽度的增加呈先增加后降低的趋势,各处理变化范围为 159.88~172.54,远高于中国竹林平均水平(66.74)(杜满义等, 2016)与中国平均水平(136)(Tian *et al.*, 2010)。说明虽然采伐带毛竹林土壤中 C 素增加,但 P 的有效性仍然较低,这可能与自然条件下土壤 P 含量总体偏低有关。

土壤 N/P 可用作 N 饱和的诊断指标,并被用于确定养分限制的阈值(Zhao *et al.*, 2015), Koerselman 和 Meuleman(1996)提出植物 N:P<14 时,植物生长倾向于受到 N 限制(田地等, 2021)。研究区采伐毛竹林地土壤 N/P 变化范围为 9.03~10.70,远大于全国竹林平均水平(4.28)(杜满义等, 2016),亦大于热带亚热带平均水平(6.4)(Tian *et al.*, 2010),但均小于 14,反映了试验区既缺乏氮元素又缺乏磷元素,随着采伐宽度的增加,土壤 N/P 呈先增加后降低的趋势,反映了合适宽度的带状采伐可以有效增加土壤氮含量,但磷元素含量相对稳定、偏低。通过相关性分析,土壤 N/P 与 N 极显著正相关($R^2=0.624$),与 P 显著负相关($R^2=0.395$),土壤 N 是不同采伐宽度土壤 N/P 变化的主要因素。本研究区的 N 素主要来源于凋落物的分解释放 N 素,但由于采伐宽度过大,植被对降雨的拦截作用减弱,增强了地表径流冲刷和降水淋溶作用,使表层 N 流失,导致 N/P 降低。

4 结 论

带状采伐对土壤养分含量及计量比有显著影响,随着采伐宽度的增加,土壤 C、N、P 呈先增加后降低的趋势,采伐带宽 6 m 时土壤 C、N、P 含量最高,采伐带宽 12 m 时最低,采伐带宽 6 m 对土壤 C、N 的积累最有利。不同采伐宽度毛竹林地 0~20 cm 层土壤养分含量大于 20~40 cm,均具有表聚现象。不同采伐宽度毛竹林地土壤 C/N、C/P 均大于全国竹林土壤平均水平,研究区竹林受到氮磷元素的双重制约,N/P 低于全国竹林土壤水平,研究区土壤 P 元素更为缺乏,需通过人工施氮磷肥保证土壤养分平衡,促进毛竹林恢复。

参考文献

- Bengtsson G, Bengtson P, Månsson KF. 2003. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, **35**: 143-154.
- Guo JF, Wang YS, Chen GS, *et al.* 2006. Soil C and N pools in Chinese fir and evergreen broadleaf forests and their changes with slash burning in mid-subtropical China. *Pedosphere*, **16**: 56-63.
- Koerselman W, Meuleman AFM. 1996. The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, **33**: 1441-1450.
- Liu R, Zhang WG, Jiang XL, *et al.* 2010. Study on the characteristics of degradation succession of *Elymus nutans* community and its correlation to soil properties. *Pratacultural Science*, **27**: 96-103.
- Maisto G, Marco AD, Meola A, *et al.* 2011. Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ. *Soil Biology and Biochemistry*, **43**: 520-530.
- Majdi H, Ohrvik J. 2004 Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality, and longevity in a Norway spruce stand in Northern Sweden. *Global change biology*, **10**: 182-188.
- Mao ZJ. 2002. Summary of estimation methods and research advances of the carbon balance of forest ecosystems. *Acta Phytoecologica Sinica*, **26**: 731-738.
- Scharenbroch BC, Bockheim JG. 2007. Impacts of forest gaps on soil properties and processes in old growth northern hardwood-hemlock forests. *Plant and soil*, **294**: 219-233.
- Tian HQ, Chen GS, Zhang C, *et al.* 2010. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, **98**: 139-151.
- Wei XR, Shao MA. 2007. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, **27**: 603-612.
- Xu CY, Schooler SS, Van Klinken RD. 2010. Effects of clonal integration and light availability on the growth and physiology of two invasive herbs. *Journal of Ecology*, **98**: 833-844.
- Xu QF, Xu JM. 2003. Changes in soil carbon pools induced by substitution of plantation for native forest. *Pedosphere*, **133**: 271-278.
- Zhao F, Kang D, Han X, *et al.* 2015. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity. *Ecological Engineering*, **74**: 415-422.
- Zhao JC, Su WH, Fan SH, *et al.* 2019. Effects of various fertilization placements on the fate of urea- ^{15}N in moso bamboo forests. *Forest Ecology and Management*, **453**: 117632.
- Zhou GM, Meng CF, Jiang PK, *et al.* 2011. Review of carbon fixation in bamboo forests in China. *The Botanical Review*, **77**: 262-270.
- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
- 陈 蕾, 董希斌. 2019. 应用森林土壤化学性质和枯落物持水性对不同改造模式效果的评价——以大兴安岭阔叶混交低质林为例. *东北林业大学学报*, **47**(2): 8-11.
- 陈 蕾, 董希斌. 2020. 抚育间伐强度对兴安落叶松林初冬时期土壤呼吸及理化性质的影响. *东北林业大学学报*, **48**(6): 146-

151

- 邓成华, 吴龙龙, 张雨婷, 等. 2019. 不同林龄油茶人工林土壤一叶片碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, **39**(24): 9152-9161.
- 杜满义, 范少辉, 刘广路, 等. 2016. 中国毛竹林碳氮磷生态化学计量特征. 植物生态学报, **40**(8): 760-774.
- 国家林业和草原局. 2019a. 中国森林资源报告. 北京: 中国林业出版社.
- 国家林业和草原局. 2019b. 中国林业和草原统计年鉴. 北京: 中国林业出版社.
- 胡小飞, 陈伏生, 葛 刚. 2007. 森林采伐对林地表层土壤主要特征及其生态过程的影响. 土壤通报, **38**(6): 1213-1218.
- 贾 宇, 徐炳成, 李凤民, 等. 2007. 半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应. 生态学报, **27**(1): 42-47.
- 李 东, 王子芳, 郑杰炳, 等. 2009. 紫色丘陵区不同土地利用方式下土壤有机质和全量氮磷钾含量状况. 土壤通报, **40**(2): 310-314.
- 刘广路, 范少辉, 刘蔚漪, 等. 2013. 闽北不同类型毛竹林水量平衡. 南京林业大学学报(自然科学版), **37**(3): 41-46.
- 刘广路, 范少辉, 唐晓鹿, 等. 2017. 毛竹向杉木林扩展过程中叶功能性状的适应策略. 林业科学, **53**(8): 17-25.
- 龙 攀, 苏 姗, 黄亚男, 等. 2019. 双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响. 应用生态学报, **30**(4): 1135-1142.
- 吕 倩, 康文斯, 郭茂金, 等. 2019. 柏木人工林目标树经营初期对林下植物多样性及土壤理化性质的影响. 应用与环境生物学报, **25**(5): 1036-1043.
- 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.
- 施建敏, 叶学华, 陈伏生, 等. 2014. 竹类植物对异质生境的适应——表型可塑性. 生态学报, **34**(20): 5687-5695.
- 宋启亮, 董希斌. 2014. 大兴安岭低质阔叶混交林不同改造模式综合评价. 林业科学, **50**(9): 18-25.
- 田 地, 严正兵, 方精云, 等. 2021. 植物生态化学计量特征及其主要假说. 植物生态学报, **45**(7): 682-713.
- 田佳歆, 刘 盛, 刘冠兵, 等. 2021. 带状皆伐对长白落叶松林草本多样性和土壤养分的影响. 应用与环境生物学报, **27**(4): 901-907.
- 王 惠, 苗福泓, 孙 娟, 等. 2017. 鲁东南地区不同年龄紫花苜蓿 N、P 生态化学计量特征研究. 草业学报, **26**(8): 216-222.
- 巫志龙, 周成军, 周新年, 等. 2015. 杉阔混交林不同强度择伐对土壤温度的影响. 森林与环境学报, **35**(1): 8-12.
- 吴昌明, 范少辉, 冯 云, 等. 2021. 带状采伐对毛竹林土壤细菌群落结构的影响. 中南林业科技大学学报, **41**(7): 42-51.
- 曾全超, 李 鑫, 董扬红, 等. 2015. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征. 自然资源学报, **30**(5): 870-879.
- 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 华, 范少辉, 刘蔚漪, 等. 2013. 闽北不同类型毛竹林径流特征的研究. 中南林业科技大学学报, **33**(12): 42-45.
- 张景普, 于立忠, 刘丽芳, 等. 2016. 不同作业方式对落叶松人工林土壤养分及酶活性的影响. 生态学杂志, **35**(6): 1403-1410.
- 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.
- 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 等. 2020. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响. 土壤学报, **57**(1): 239-250.
- 赵建诚, 刘广路, 范少辉, 等. 2016. 鞭生竹克隆生长及其对相邻系统的影响. 世界林业研究, **29**(1): 24-28.
- 周新年, 赖阿红, 周成军, 等. 2015. 山地森林生态采运研究进展. 森林与环境学报, **35**(2): 185-192.