



毛竹向杉木林扩展对土壤养分含量及计量比的影响

范少辉,申景昕,刘广路*,冯云,刘希珍,蔡春菊

(国际竹藤中心 竹藤科学与技术重点实验室,北京 100102)

摘要:该研究以毛竹(*Phyllostachys edulis*)-杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林扩展界面为研究对象,通过对比回分析不同扩展阶段土壤有机碳(SOC)、全氮(N)、全磷(P)、碱解氮(H-N)、有效磷(A-P)含量及其相关性,揭示毛竹扩展对土壤养分以及化学计量特征的影响,为毛竹林合理调控与生态经营提供依据。结果表明:(1)毛竹向杉木扩展过程中,随着毛竹所占比例的增加,土壤SOC含量呈先升高后降低的趋势,且随土层的加深SOC的变异系数逐渐增加;N含量呈先升高后下降的变化趋势,且扩展后期大于扩展前期;P、H-N和A-P含量随着毛竹的扩展呈升-降-升-降的波浪型变化趋势,扩展后期P与A-P的含量低于扩展前期,且H-N含量大于扩展前期。(2)毛竹向杉木扩展过程中,C:N随着毛竹的扩展呈上升趋势,且不同扩展阶段的差异达到了显著水平;N:P随着毛竹的扩展呈上升的趋势,其中0~20 cm土层各扩展阶段间的差异达到显著水平;H-N:A-P随着毛竹的扩展呈先上升后降低的趋势,不同扩展阶段的差异达到了显著水平,且扩展后期小于扩展前期。(3)C、N、P与C:N、N:P、H-N:A-P存在显著的相关性,其中C、N与H-N:A-P,以及P与N:P、H-N:A-P均呈显著负相关关系。研究表明,随着毛竹向杉木林的扩展,立地土壤养分状况发生了规律性变化,N、P元素更加缺乏,建议及时补充N、P元素,促进群落健康稳定发展。

关键词:毛竹;扩展;杉木;土壤养分;化学计量比

中图分类号:Q948.113

文献标志码:A

Soil Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics after *Phyllostachys edulis* Expansion to *Cunninghamia lanceolata* Forest

FAN Shaohui, SHEN Jingxin, LIU Guanglu*, FENG Yun, LIU Xizhen, CAI Chunju

(Key Laboratory for Bamboo and Rattan, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: In this study, taking the interface of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*)-Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forest as the research object, we compared and analyzed contents and correlations of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (N), total phosphorus (P), alkali-hydrolyzed nitrogen (H-N) and available phosphorus (A-P) at different expansive stages to reveal the effects of moso bamboo expansions on soil nutrients and stoichiometric characteristics, and to provide basis for rational regulation and ecological management of moso bamboo forest. The study shows: (1) for moso bamboo to Chinese fir, with the increase of moso bamboo proportion, the content of SOC increased first and then decreased, and the coefficient of variation of SOC increased gradually with the deepening of soil layer; the content of N increased

收稿日期:2019-05-21;修改稿收到日期:2019-07-16

基金项目:十三五重点研发课题(2018YFD0600103);林业公益性行业科研专项项目(201404408)

作者简介:范少辉(1962—),男,博士,研究员,主要致力于竹林生态和培育理论与技术研究。E-mail:fansh@icbr.ac.cn

*通信作者:刘广路,博士,研究员,主要致力于竹林生态和培育理论与技术研究。E-mail:liuguanglu@icbr.ac.cn

first and then decreased, and the final stage of expansion is higher than the initial stage of expansion; The contents of P, H-N and A-P showed wave-like change trend with the expansion of moso bamboo. The contents of P, H-N and A-P in different expansion stages reached significant levels. The contents of P and A-P in final expansion stage were lower than that in initial expansion stage, and the content of H-N was higher than that in initial expansion stage. (2) During the expansion of moso bamboo to Chinese fir, C : N showed an upward trend with the expansion of moso bamboo, and the difference between different expansion stages reached a significant level; N : P showed an upward trend with the expansion of moso bamboo. The difference of N : P in 0—20 cm soil layers reached a significant level, while that in 20—30 cm soil did not reach a significant level. H-N : A-P increased first and then decreased with the expansion of moso bamboo, and the difference between different expansion stages reached a significant level, and the final expansion stage was smaller than the initial expansion stage. (3) SOC, N, P and C : N, N : P, H-N : A-P are significantly correlated, and the correlation coefficient reaches a significant level. Among them, SOC and N are negatively correlated with H-N : A-P, P is negatively correlated with N : P and H-N : A-P. This reflects that with the expansion of bamboo, soil N and P elements were more scarce. It is suggested that N and P elements be supplemented in time to promote the stable and healthy development of community.

Key words: *Phyllostachys edulis*; expansion; *Cunninghamia lanceolata*; soil nutrient; stoichiometry

毛竹(*Phyllostachys edulis*)属于禾本科竹亚科刚竹属植物,原产于中国亚热带地区,后引种至其他国家^[1],其经济价值高,在中国南方地区广泛种植,是中国南方重要的森林资源^[2-3]。研究发现,毛竹具有较发达的地下鞭根结构,其通过发达的竹鞭向四周扩张,同时通过竹鞭克隆繁衍生长发育^[4-6]。毛竹在扩展过程中,对光照、空间等地上资源,以及养分、水分等地下资源有一定的竞争。已有研究表明,毛竹扩展导致生物多样性降低,群落结构发生变化^[7-8],进而导致森林景观格局^[4]、生态功能^[9]发生一定的变化。迄今,众多学者从人类活动^[10-11]、毛竹生物学特征^[4,7]、环境改变^[12-13]、竞争^[7]、化感作用^[14-16]、光^[11]、地形^[4]等方面已对毛竹扩展机理做了较深入的探究。比如,毛竹在向针阔叶林扩展过程中,通过改变细根在土壤中分布,调整叶功能性状,增强自身对资源的竞争能力^[17-19]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国南方重要森林资源之一,生长习性与毛竹基本相同,因此毛竹向杉木林扩展过程中常形成竹-杉混交林。目前,已有学者对毛竹向杉木扩展做了一定的研究。如刘广路等^[20]通过研究毛竹纯林、毛竹-杉木混交林和杉木林发现,毛竹向杉木扩展过程中叶片的适应性发生改变。蔡春菊等^[21]通过对毛竹向杉木扩展过程毛竹细根可塑性研究,发现细根为适应新环境发生了规律性变化。虽然,人们对毛竹扩展过程中毛竹自身的可塑性反应做了大量研究,但对土壤养分特征的影响研究鲜有报道。土壤是植被生长发育的载体,在一定程度上影响群落的演替速度,而且在同一相似的气候带里决定着植被群落的演替方

向^[22-23]。C、N、P元素是土壤重要组成部分,反映了土壤对植被提供养分的潜在能力,与土壤有机质及其动态平衡共同构成了土壤肥力的重要指标^[24]。土壤养分元素在循环过程中是相互耦合的关系,仅考虑养分元素本身的变异特征对了解土壤质量变异是不全面的,还需了解各元素之间的比例关系^[25-26]。本研究以福建永安竹林生态定位观测研究站内毛竹-杉木扩展界面为对象,通过分析毛竹向杉木扩展过程中不同扩展阶段土壤养分及其化学计量特征的变化规律,揭示毛竹扩展对土壤养分的影响,为毛竹林的扩展调控提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建永安竹林生态系统定位观测研究站天宝岩国家级自然保护区($117^{\circ}28'03''$ ~ $117^{\circ}35'28''$ E, $25^{\circ}50'51''$ ~ $26^{\circ}01'20''$ N),属于戴云山余脉,属中低山地貌,海拔高580~1 604.8 m,中亚热带东南季风气候型。年平均气温15℃,绝对最低温度-11℃,绝对最高气温40℃,年平均相对湿度80%以上,年平均无霜期290 d左右。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温4 520~5 800℃,持续天数为225~250 d,空气相对湿度月均为80%左右。年平均降水量2 039 mm,多集中于5~9月。土壤为花岗岩和砂岩风化发育成的红壤,大部分地区土层较薄,表土质地为壤土,土壤呈酸性。竹林主要分布在海拔800 m以下,土壤为红壤。研究区内竹林覆盖率96.8%,主要为毛竹,其间混生江南油杉(*Keteleeria cycloepis*)、杉木、杨梅(*Myrica rubra*)、南酸枣(*Choeros-*

表1 样带基本信息

Table 1 Basic characteristics of the transects

样带编号 Transect No.	海拔 Elevation/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/°	密度 Density/(trees · ha ⁻¹)		平均胸径 Mean DBH/cm	
				毛竹 Moso bamboo	杉木 Chinese fir	毛竹 Moso bamboo	杉木 Chinese fir
样带 1 Transect No. 1	524	西南 SW	20	900	700	11.89	14.65
样带 2 Transect No. 2	506	西南 SW	15	960	620	10.70	15.21
样带 3 Transect No. 3	610	西南 SW	25	1100	597	10.20	16.85

pondias axillaries)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、木荷(*Schima superba*)等树种。竹-杉混交林由毛竹经过近15年向杉木林扩展形成,杉木林林龄约40年,其中伴生有极少量木荷(*Schima superba*)等阔叶树种^[20]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 沿毛竹向杉木林扩展方向设置10 m×50 m调查样带3个,每一样带平均划分为7个样方,从杉木纯林到毛竹纯林方向分别编号为1、2、3、4、5、6、7,毛竹平均占比依次为15.80%、32.60%、35.50%、52.20%、64.50%、78.90%和95.00%;每个样方面积大小为5 m×10 m。随着毛竹的扩展,毛竹株数增多,其在样方内比例逐渐升高,杉木所占比例逐渐降低,为了更好反映毛竹和杉木的变化情况,本研究选取了样方内毛竹胸高断面积与林分总胸高断面积的比值(毛竹比例)作为反映不同扩展阶段的指标。扩展前沿毛竹占比小,作为扩展前期;随毛竹向杉木扩展,毛竹占比逐渐增大,作为扩展后期。于2014年7月取样。样带的基本情况见表1。

1.2.2 取样方法 在样方内沿“S”型选取采样点,每个样方5个采样点,去除地表枯落物,用内径为65 mm的土钻由上至下,分3层钻取土芯样品,每层10 cm(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm),编号后放入塑料袋内。同一样方内相同土层的土样充分混合,采用四分法,称取1 kg土壤样品装入自封袋内,标好编号,带回通风、干燥的实验室内风干,供测试使用。

1.2.3 样品处理及测试 将采集的样品过2 mm筛去除枯枝物及大块砾石,研磨,过1 mm与0.15 mm筛。土壤养分测定方法:土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾氧化法测定;土壤全氮(N)含量采用开氏-蒸馏滴定法;土壤全磷(P)含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;土壤全钾(K)含量采用火焰分光光度计法测定;碱解氮(H-N)含量采用碱解扩散法;有效磷(A-P)含量采用盐酸-氟化铵提取-

钼锑抗比色法。

1.3 数据处理

试验数据采用SPSS 22统计软件进行方差分析,采用Pearson相关分析法分析土壤养分及化学计量间相关性,采用Excel 2010软件作图、制表。

2 结果与分析

2.1 毛竹向杉木林扩展过程中土壤有机碳含量的变化

样地0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm土层有机碳含量均随着毛竹所占比例增加,呈先上升后降低的变化趋势,且随土层加深逐渐减少(图1)。不同土层土壤有机碳含量的变异系数不同,0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm土层土壤有机碳的变异系数分别为23%、25%、39%,说明表层土壤有机碳的含量更为均匀。方差分析表明,不同扩展阶段间土壤有机碳含量之间的差异达到显著水平($P < 0.05$)。其中,扩展前沿土壤有机碳含量最低,平均为 $17.30 \pm 0.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;毛竹比例达到50%时土壤有机碳含量最高($30.79 \pm 1.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);随后随着毛竹比例的增加土壤有机碳含量降低,扩展后期土壤有机碳含量为 $28.03 \pm 2.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

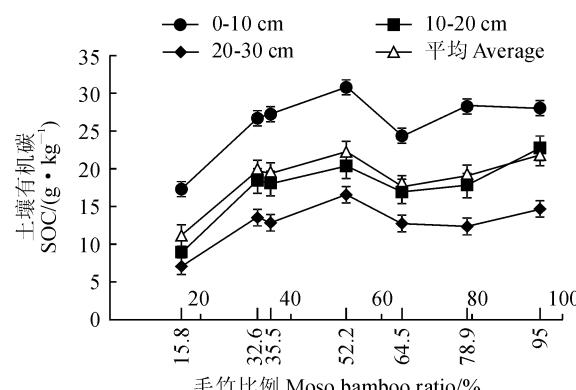


图1 毛竹向杉木林扩展过程中土壤有机碳含量的变化

Fig. 1 Changes of soil organic carbon (SOC) content during the expansion from moso bamboo forests to Chinese fir forests

2.2 毛竹向杉木林扩展过程中土壤氮、磷含量的变化

在0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm土层中,土壤全氮含量随着毛竹所占比例增加呈先上升后降低的趋势,但是不同土层全氮含量在扩展阶段间的变化幅度不同,其中0~10 cm、20~30 cm土层全氮含量在各扩展阶段间的差异未达到显著水平($P>0.05$),而10~20 cm土层全氮含量的差异达到显著水平($P<0.05$)(图2,a)。毛竹扩展前沿土壤全氮含量最低($0.90\pm0.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),毛竹比例达到36%时土壤全氮含量最高($1.41\pm0.09\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其后随着毛竹比例的增加土壤全氮含量降低,扩展后期全氮含量平均为 $1.21\pm0.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

同时,在0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm土层中,土壤全磷、碱解氮和有效磷含量随着毛竹的扩展呈升-降-升-降的波浪型变化趋势,且不同扩展阶段间的全磷、碱解氮和有效磷含量的差异达到显著水平($P<0.05$)(图2,b-d)。其中,土壤全磷含量至少扩展前沿最低(平均分为 $0.21\pm0.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),在毛竹比例35.50%~78.90%时较高(平均为 $0.23\pm0.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),在扩展后期较低,平均为 $0.18\pm0.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤碱解氮含量也在扩展前沿最低(平均为 $75.62\pm9.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在毛竹比例为

32.60%~64.50%间较高(平均为 $93.87\pm5.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在扩展后期下降到 $68.40\pm4.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤有效磷含量仍在扩展前沿最低($1.75\pm0.34\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在毛竹比例35.50%时最高($3.09\pm0.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在扩展后期降低为 $2.02\pm0.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3 毛竹向杉木林扩展过程中土壤碳、氮、磷计量比的变化

在0~30 cm土层,土壤C:N随着毛竹所占比例增加呈上升的趋势,并在毛竹比例15.8%(扩展前沿)时最低(12.11 ± 0.40),扩展后期最高(17.70 ± 0.54),且随着毛竹比例的增加其有一定的波动(图3,a)。土壤N:P随着毛竹的扩展也呈上升的趋势,其中0~20 cm土壤N:P在不同扩展阶段间的差异达到显著水平($P<0.05$),20~30 cm土壤N:P的差异未达到显著水平($P>0.05$);扩展前期N:P最低平均为 3.57 ± 0.28 ,扩展后期土壤N:P最高平均为 6.56 ± 0.26 (图3,b)。土壤H-N:A-P随着毛竹的扩展呈先上升后降低的趋势,其中扩展前沿H-N:A-P较低(52.92 ± 9.47),毛竹比例为64.50%时最高(77.24 ± 5.42),扩展后期最低(平均为 35.93 ± 1.85)(图3,c)。

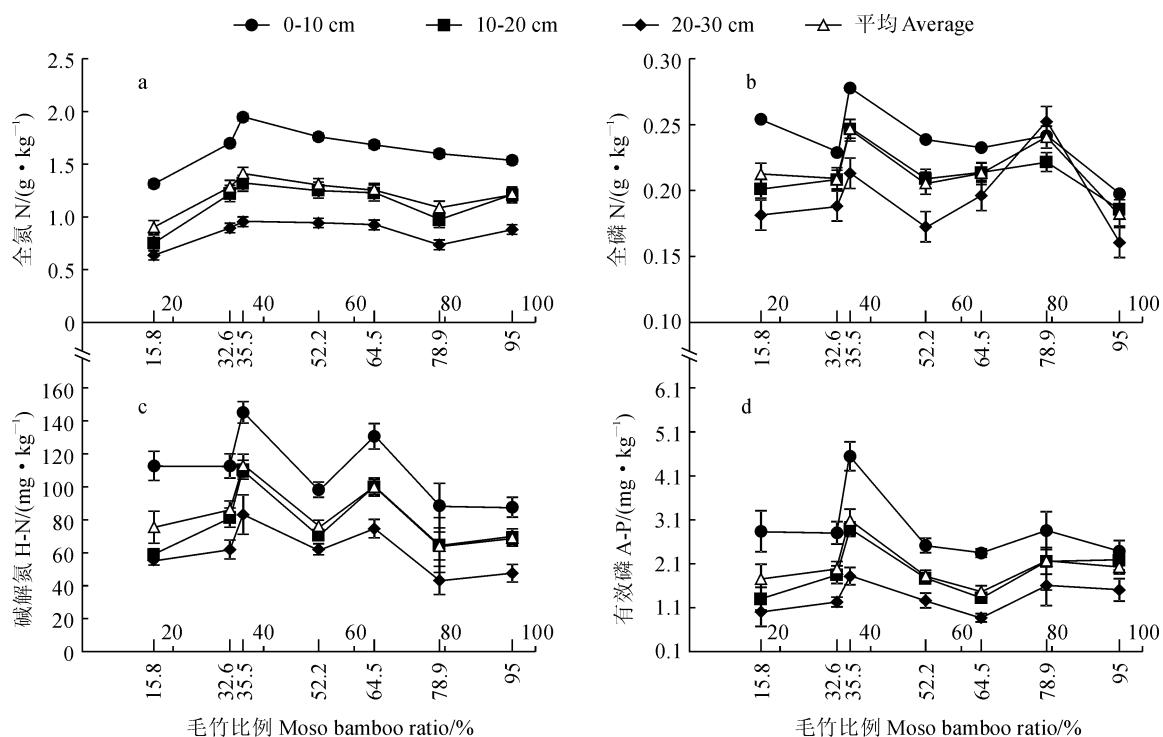


图2 毛竹向杉木林扩展过程中土壤全氮(N)、全磷(P)、碱解氮(H-N)、有效磷(A-P)含量的变化

Fig. 2 Changes of total nitrogen (N), total phosphorus (P), alkali-hydrolyzable nitrogen (H-N) and available phosphorus (A-P) contents of soil during the expansion from moso bamboo forests to Chinese fir forests

2.4 毛竹向杉木林扩展过程中土壤养分及计量比的耦合关系

相关分析结果表明(表2),土壤C、N含量与土壤P、H-N、A-P、C:N、N:P为显著正相关,与H-

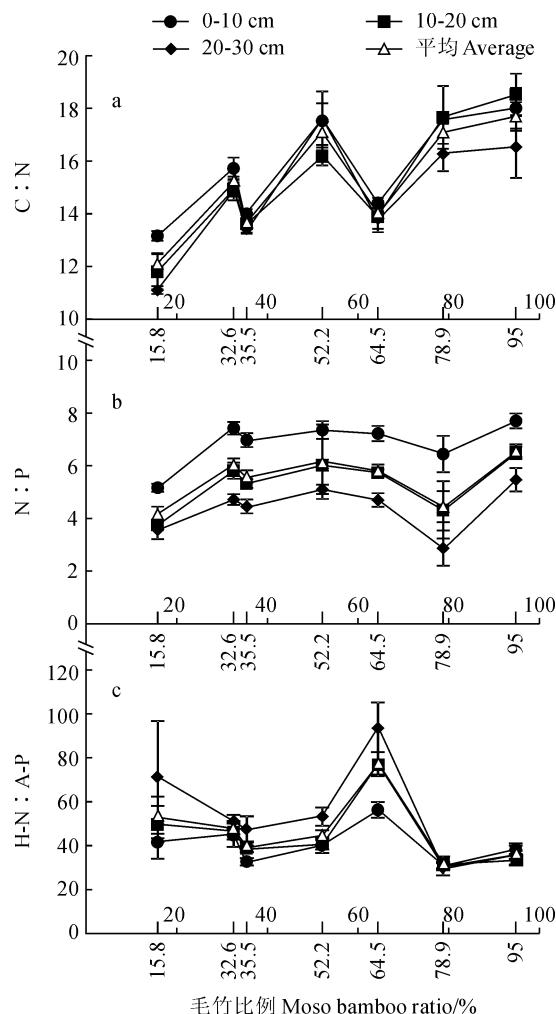


图3 毛竹向杉木林扩展过程中土壤养分化学计量比的变化

Fig. 3 Changes of stoichiometric ratios during the expansion from moso bamboo forests to Chinese fir forests

表2 土壤养分含量与化学计量比间的相关性分析($df=199$)

Table 2 Correlations between soil nutrients and ecological stoichiometric ratios

指标 Index	C	N	P	H-N	A-P	C:N	N:P
N	0.964 0 **						
P	0.630 0 **	0.634 0 **					
H-N	0.839 0 **	0.893 0 **	0.586 0 **				
A-P	0.786 0 **	0.778 0 **	0.650 0 **	0.668 0 **			
C:N	0.491 0 **	0.273 0 **	0.273 0 **	0.250 0 **	0.386 0 **		
N:P	0.416 0 **	0.437 0 **	-0.159 0 *	0.381 0 **	0.285 0 **	0.097 0	
H-N:A-P	-0.236 0 **	-0.193 0 **	-0.300 0 **	-0.040 0	-0.619 0 **	-0.264 0 **	-0.045 0

注: * 和 ** 分别表示 $0.05 (P < 0.05)$ 和 0.01 水平 ($P < 0.01$) 显著性相关

Note: * showed significant correlation at 0.05 level ($P < 0.05$); ** showed significant correlation at 0.01 level ($P < 0.01$)

N:A-P呈显著负相关,且土壤C、N之间呈显著正相关,但C与H-N:A-P、N与C:N、N与H-N:A-P相关系数绝对值均小于0.40,其相关程度较弱;土壤P与H-N、A-P、C:N呈显著正相关,与N:P、H-N:A-P呈显著负相关,土壤P与C:N、N:P、H-N:A-P相关程度较弱;土壤H-N:A-P与土壤A-P、C:N呈显著负相关,但与C:N相关程度较弱,与N:P无显著相关。以上结果说明,土壤C、N、P含量与H-N、A-P含量具有协同作用,可能由于研究区N、P元素的缺乏,导致与养分计量比的相关程度较弱。

3 讨论

3.1 毛竹向杉木扩展过程中C、N、P变化特征

土壤养分含量及其化学计量比是土壤有机质组成和质量程度的重要指标^[27]。本研究中,土壤有机碳、全氮含量随着毛竹所占比例增加,呈现先增加后降低的趋势。研究表明,毛竹扩展过程中改变了群落结构以及生物多样性^[8,28],地表枯落物的分解速度以及植被的吸收发生改变,造成土壤有机碳、全氮含量随着群落结构的变化发生一定的变化。养分的输入与输出两个周转过程决定了土壤中养分状况^[29-30]。毛竹具有发达的地下鞭根系统,通过根系吸收土壤养分供应植物体生长发育^[33]。据报道,毛竹向杉木扩展过程中,扩展前期毛竹通过增加比根长和细根N、P含量的策略,增强扩展能力,且扩展后期细根生物量和比根长大于扩展前期^[21];在毛竹-杉木扩展界面具有良好的水热条件,促进了枯落物的分解,导致土壤有机碳与全氮呈现先升高后降低的单峰变化规律。全磷也是土壤中重要元素之一,其来源于岩石的风化,而土壤有机碳、全氮除了受土壤母质的影响外,还受枯落物的分解以及植物

的吸收利用的影响^[32-33],造成全磷的变化规律与有机碳、全氮有一定的差异。本研究的毛竹向杉木扩展过程中,土壤全磷含量的变化范围为0.19~0.25 g·kg⁻¹,远低于中国土壤磷平均水平(0.56)^[27],说明本研究区P元素缺乏。另外,本研究表明,随着土层的加深,土壤有机碳、全氮、全磷含量及其变异系数均逐渐降低。这可能是由于土壤表层丰富的枯落物分解对土壤养分元素进行了有效补充,使其变异系数较小;而深层土壤主要通过养分向下的迁移以及根系的腐烂补充,造成其变异系数较大。

3.2 毛竹向杉木扩展过程中碱解氮、有效磷的变化特征

本研究表明,随着毛竹向杉木的扩展碱解氮与有效磷的变化趋势为“升-降-升-降”。毛竹扩展后期和前期土壤碱解氮含量分别为68.40和75.62 mg·kg⁻¹,即扩展后期小于扩展前期。这可能是由于随着毛竹比例的增加,扩展后期毛竹根系比根长与根生物量增加,为了维持植被的生长发育,消耗的养分增加,导致扩展后期土壤碱解氮含量小于扩展前期。有效磷是植物可以直接吸收利用的磷^[34],毛竹扩展前期和后期土壤有效磷的含量分别为1.75和2.02 mg·kg⁻¹,且全磷与有效磷呈显著正相关,均位于较低的有效水平。

3.3 毛竹向杉木扩展过程中土壤养分化学计量比的变化特征

本研究中土壤有机碳与全氮的含量呈显著正相关,表明土壤中的碳氮具有很强的耦合性。研究表明,C:N与有机质分解速度呈反比,C:N越低说明有机质具有较快的矿化速度^[35]。本研究中,毛竹向杉木扩展过程中,土壤C:N在扩展前期和后期分别为12.11和17.70,均大于中国土壤平均水平(10~12)^[27]。本研究区土壤矿化速率较弱,扩展后期毛竹的比例较大,对N元素的需求较大,造成扩展后期C:N比远大于扩展前期。

研究表明,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^[33]。本研究的毛竹向杉木扩展过程中,N:P变化范围为4.17~6.56,小于全国土壤平均水平(9.3)^[33,36]及全球平均水平(13.1)^[33,37],且研究区P元素缺乏,因此本地区缺乏N元素的可能性较大。毛竹比例越大,根系越多,吸收的水分与养分越多,这也是造成毛竹扩展过程中N:P比逐渐增加的原因。

H-N:A-P的比值可以反映出植物对氮、磷吸收情况。本研究中H-N:A-P比值与A-P呈显著负相关,这与吴统贵等^[38-39]研究湿地系统结果相一致。毛竹向杉木扩展过程中,H-N:A-P比值呈现先升高后降低的趋势,且扩展后期小于扩展前期,说明毛竹在扩展过程中改变了原有群落结构,造成不同扩展阶段植被对N、P的利用率发生了改变,导致不同扩展阶段间H-N:A-P的差异。

综上所述,毛竹向杉木扩展过程中,植被群落结构发生变化,土壤养分含量发生了规律性变化。随着毛竹所占比例增加,土壤碳、氮含量先上升后降低,土壤有机碳和全氮含量分别在毛竹比例50%和36%时达到最大值,其后逐步降低,但扩展后期土壤有机碳(28.03±2.88 g·kg⁻¹)、全氮含量(1.21±0.07 g·kg⁻¹)均高于扩展前期的有机含量(17.30±0.89 g·kg⁻¹)和氮含量(0.90±0.11 g·kg⁻¹);土壤全磷、碱解氮、有效磷含量在扩展过程中呈波浪型变化,峰值出现在毛竹比例32.60%~78.90%之间,土壤全磷、碱解氮扩展后期小于扩展前期,有效磷则相反。C:N、N:P在扩展过程中呈现逐渐增加的趋势,毛竹比例增加大,对土壤氮和磷元素的消耗增加;H-N:A-P呈先升高后降低的趋势,在毛竹比例为64.50%时最高为77.24±5.42,且扩展后期小于扩展前期。本研究中土壤全P含量、N:P均小于中国土壤平均水平,而C:N大于中国土壤平均水平,且C、N、P含量之间呈显著正相关,反映了研究区土壤N、P元素相对缺乏,建议补充一定的N、P元素,以维持群落稳定健康发展。

参考文献:

- [1] 易同培,史军义,马丽莎,等.中国竹类图志[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 宋艳冬,金爱武,金晓春,等.施肥对毛竹叶片光合生理的影响[J].浙江林学院学报,2010,27(3):334-339.
- SONG Y D, JIN A W, JIN X C, et al. Physiology of leaf photosynthesis with fertilization in *Phyllostachys pubescens* [J].

Journal of Zhejiang Forestry College, 2010, 27(3): 334-339.

- [3] 施建敏,郭起荣,杨光耀.毛竹光合动态研究[J].林业科学研究,2005,18(5):551-555.
- SHI J M, GUO Q R, YANG G Y. Study on the photosynthetic dynamic variation of *Phyllostachys edulis* [J]. *Forest Research*, 2005, 18(5): 551-555.
- [4] ISAGI Y, TORII A. Range expansion and its mechanisms in a

- naturalized bamboo species, *Phyllostachys pubescens*, in Japan [J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 1998, 6: 127-141.
- [5] 刘广路,范少辉,蔡春菊,等.不同混交模式毛竹林下土壤抗侵蚀性研究[J].水土保持通报,2015,35(4): 12-17.
- LIU G L, FAN S H, CAI C J, et al. Soil antierodibility under moso bamboo with different mixture patterns[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4): 12-17.
- [6] 杨清培,杨光耀,宋庆妮,等.竹子扩张生态学研究:过程、后效与机制[J].植物生态学报,2015,39(1): 110-124.
- YANG Q P, YANG G Y, SONG Q N, et al. Ecological studies on bamboo expansion: process, consequence and mechanism [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39 (1): 110-124.
- [7] KIYOSHI O, SHIGEYUKI S, HIROKO F. Causal analysis of the invasion of broad-leaved forest by bamboo in Japan [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7: 723-728.
- [8] 白尚斌,周国模,王懿祥,等.天目山保护区森林群落植物多样性对毛竹入侵的响应及动态变化[J].生物多样性,2013,21(3): 288-295.
- BAI S B, ZHOU G M, WANG Y X, et al. Plant species diversity and dynamics in forests invaded by Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) in Tianmu Mountain Nature Reserve [J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(3): 288-295.
- [9] 李伟成,盛海燕,钟哲科.竹林生态系统及其长期定位观测研究的重要性[J].林业科学,2006,42(8): 95-101.
- LI W C, SHENG H Y, ZHONG Z K. Importance of long-term location investigation for bamboo ecosystem[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(8): 95-101.
- [10] 蔡亮,张瑞霖,李春福,等.基于竹鞭状态分析的抑制毛竹林扩散的方法[J].东北林业大学学报,2003,31(5): 68-70.
- CAI L, ZHANG R L, LI C F, et al. A method to inhibit the expansion of *Phyllostachys pubescens* stands based on the analysis of underground rhizome [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(5): 68-70.
- [11] SUZUKI T, NAKATSUBO T. Impact of the bamboo *Phyllostachys bambusoides* on the light environment and plant communities on riverbanks[J]. *Journal of Forest Research*, 2001, 6: 81-86.
- [12] 刘砾,周国模,白尚斌.基于光照强度变化的毛竹扩张对杉木影响的探讨[J].浙江农林大学学报,2011,28 (4): 550-554.
- LIU S, ZHOU G M, BAI S B. Light intensity changes on *Cunninghamia lanceolata* in mixed stands with different concentrations of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2011, 28(4): 550-554.
- [13] 宋庆妮,杨清培,刘骏,等.毛竹扩张对常绿阔叶林土壤氮素矿化及有效性的影响[J].应用生态学报,2013,24(2): 338-344.
- SONG Q N, YANG Q P, LI J, et al. Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on soil nitrogen mineralization and its availability in evergreen broadleaf forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 338-344.
- [14] 白尚斌,周国模,王懿祥,等.毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究[J].环境科学,2013,34(10): 4 066-4 072.
- BAI S B, ZHOU G M, WANG Y X, et al. Allelopathic potential of *Phyllostachys edulis* on two dominant tree species of evergreen broad-leaved forest in its invasive process [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10): 4 066-4 072.
- [15] CHOU C H, YANG C M. Allelopathic research of subtropical vegetation in Taiwan II. Comparative exclusion of understory by *Phyllostachys edulis* and *Cryptomeria japonica* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1982, 8: 1 489-1 507.
- [16] 梁倩倩,白尚斌,周国模,等.毛竹浸提液对高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J].浙江农业学报,2012,24 (3): 434-439.
- LIANG Q Q, BAI S B, ZHOU G M, et al. Effect of aqueous extracts of *Phyllostachys heterocycla* cv. *Pubescens* on seed germination and seedling growth of *Festuca arundinacea* [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24(3): 434-439.
- [17] 刘骏,杨清培,宋庆妮,等.毛竹种群向常绿阔叶林扩张的细根策略[J].植物生态学报,2013,37(3): 230-238.
- LI J, YANG Q P, SONG Q N, et al. Strategy of fine root expansion of *Phyllostachys pubescens* population into evergreen broad-leaved forest [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(3): 230-238.
- [18] 刘希珍,封焕英,蔡春菊,等.毛竹向阔叶林扩展过程中的叶功能性状研究[J].北京林业大学学报,2015,37(8): 8-17.
- LI X Z, FENG H Y, CAI C J, et al. Response of leaf functional traits of Moso bamboo during the invading process into the broad-leaved forest [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(8): 8-17.
- [19] 沈蕊,白尚斌,周国模,等.毛竹种群向针阔林扩张的根系形态可塑性[J].生态学报,2016,36(2): 326-334.
- SHEN R, BAI S B, ZHOU G M, et al. The response of root morphological plasticity to the expansion of a population of *Phyllostachys edulis* into a mixed needle-and broad-leaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(2): 326-334.
- [20] 刘广路,范少辉,唐晓鹿,等.毛竹向杉木林扩展过程中叶功能性状的适应策略[J].林业科学,2017,53(8): 17-25.
- LI G L, FAN S H, TANG X L, et al. Adaptive strategies of leaf functional traits of moso bamboo during its expansion to Chinese fir forests [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(8): 17-25.
- [21] 蔡春菊,范少辉,刘希珍,等.毛竹向杉木林扩展过程中细根适应策略[J].生态学杂志,2019,38(4): 967-972.
- CAI C J, FAN S H, LIU X Z, et al. Fine root adaptation strategy of moso bamboo during its expansion into Chinese fir forest [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(4): 967-972.
- [22] CROCKER R L, MAJOR J. Soil development in relation to vegetation and surface age at Glacier Bay, Alaska [J]. *Journal of Ecology*, 1955, 43(2): 427-488.
- [23] 高贤明,马克平,黄建辉.北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅱ.山地草甸β多样性[J].生态学报,1998,18(1):

- 24-32.
- GAO X M, MA K P, HUANG J H. Studies on plant community diversity in Donglingshan Mountain, Beijing, China: XI. the β diversity of mountain meadow[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(1): 24-32.
- [24] 李东, 王子芳, 郑杰炳, 等. 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[J]. *土壤通报*, 2009, **40**(2): 311-314.
- LI D, WANG Z F, ZHENG J B, et al. Contents of soil organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium under different land-use patterns in purple hill area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, **40**(2): 311-314.
- [25] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, **3**(6): 540-550.
- [26] SABINE G. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, **164**(2): 243-266.
- [27] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [28] 刘希珍, 范少辉, 刘广路, 等. 毛竹林扩展过程中主要群落结构指标的变化特征[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(12): 3 165-3 171.
- LIU X Z, FAN S H, LIU G L, et al. Changing characteristics of main structural indexes of community during the expansion of moso bamboo forests[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(12): 3 165-3 171.
- [29] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(1): 153-163.
- ZHAO Q, ZENG D H. Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, **29**(1): 153-163.
- [30] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(1): 99-105.
- ZHOU L, LI B G, ZHOU G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, **20**(1): 99-105.
- [31] FARRISH K W. Spatial and temporal fine root distribution in three Louisiana forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, **55**(6): 1 752-1 757.
- [32] LIU X Z, ZHOU G Y, ZHANG D Q, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 64-71.
- [33] ZHAO F, KANG D, HAN X, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **74**: 415-422.
- [34] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特性[J]. *水土保持学报*, 2004, **18**(4): 193-195.
- WANG G P. Character of phosphorus biogeochemistry on wetlands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, **18**(4): 193-195.
- [35] WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3 937-3 947.
- [36] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85**(3): 235-252.
- [37] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**: 139-151.
- [38] 吴统贵, 吴明, 刘丽, 等. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化[J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 23-28.
- WU T G, WU M, LIU L, et al. Seasonal variations of leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of three herbaceous species in Hangzhou Bay coastal wetlands, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 23-28.
- [39] 雷学明, 段洪浪, 刘文飞, 等. 鄱阳湖湿地碟形湖沿高程梯度土壤养分及化学计量研究[J]. *土壤*, 2017, **49**(1): 40-48.
- LEI X M, DUAN H L, LIU W F, et al. Soil nutrients and stoichiometry along elevation gradients in shallow-lakes of Poyang Lake wetland[J]. *Soils*, 2017, **49**(1): 40-48.

(编辑:裴阿卫)