



周天玲, 罗会潭, 任泽文, 等. 毛竹扩张与去除过程中土壤碳氮磷化学计量比的变化特征[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47(3): 671–682.

ZHOU T L, LUO H T, REN Z W, et al. Variation characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry during the expansion and removal of *Phyllostachys edulis*[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2025, 47(3): 671–682.

毛竹扩张与去除过程中土壤碳氮磷 化学计量比的变化特征

周天玲¹, 罗会潭², 任泽文¹, 邓梦阳¹, 张盼盼¹, 张舒星¹, 刘 骏^{1*}

(1. 江西农业大学 林学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西齐云山国家级自然保护区管理局, 江西 赣州 341300)

摘要:【目的】土壤碳氮磷化学计量特征能够有效地指示土壤营养状况以及养分间的耦合关系。旨在探究毛竹扩张及去除过程中土壤养分分布格局及其生态化学计量特征变化, 在江西齐云山国家级自然保护区内建立阔叶林、竹阔混交林和纯毛竹林3种林分类型的样地。【方法】采用时空替代法模拟毛竹向阔叶林扩张过程, 并通过人工伐除的方式去除混交林和毛竹林内毛竹。采集毛竹扩张及去除过程中样地内0~10 cm和10~20 cm土壤样品, 测定其理化性状及碳氮磷化学计量比。【结果】毛竹向阔叶林扩张会导致土壤含水率、pH、NH₄⁺-N含量升高, 有效磷含量在0~10 cm土层升高。对竹阔混交林和毛竹林伐竹100%处理后土壤含水率在0~10 cm土层均显著降低。C/N在毛竹扩张和去除过程中均无显著性变化。C/P在纯毛竹林伐竹100%处理后0~10 cm土层显著降低, 在竹阔混交林毛竹去除过程中0~10 cm和10~20 cm土层C/P均表现出先升高后降低的趋势。N/P的变化趋势与土壤TN含量变化趋势一致, 表明当毛竹扩张样地内N/P<14时, 毛竹扩张和去除过程中N/P主要是由土壤氮素进行调控。【结论】以上变化过程探明了毛竹扩张及去除过程的驱动机制, 即毛竹通过改变土壤C、N、P化学计量特征进行扩张, 引起植物体C、N、P元素及其化学计量比发生转变。为评价毛竹扩张及去除的生态效应以及有效防治扩张具有非凡意义。

关键词:生态化学计量; 毛竹扩张; 毛竹去除; 齐云山

中图分类号: S795.702; Q948.113 文献标志码: A

文章编号: 1000-2286(2025)03-0671-12

CSTR: 32399.14.aauj.2025058

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Variation characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry during the expansion and removal of *Phyllostachys edulis*

ZHOU Tianling¹, LUO Huitan², REN Zewen¹, DENG Mengyang¹,
ZHANG Panpan¹, ZHANG Shuxing¹, LIU Jun^{1*}

收稿日期: 2024-11-13 修回日期: 2024-12-18

基金项目: 江西省“千人计划”引进类创新领军人才长期青年项目(jxsq2020101079)

Project supported by Jiangxi Province “Thousand talents Plan” to Introduce Innovative Leading Talent Long-term Youth Project(jxsq2020101079)

作者简介: 周天玲, 硕士生, orcid.org/0009-0003-3669-3515, 15648827908@163.com; *通信作者: 刘骏, 副教授, 博士, 主要从事生物地球化学循环、稳定同位素生态学及大数据分析等研究, orcid.org/0000-0001-9311-1874, ljaim99@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Qiyunshan National Nature Reserve Administration, Ganzhou, Jiangxi 341300, China)

Abstract: [Objective] The stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus can effectively indicate the soil nutritional status and the coupling relationship among nutrients. To explore the distribution pattern of soil nutrients and the changes in ecological stoichiometric characteristics during the expansion and removal of moso bamboo, sample plots of three forest stand types, namely broad-leaved forest, bamboo-broadleaf mixed forest, and pure moso bamboo forest, were established in the Qiyunshan National Nature Reserve, Jiangxi Province. [Method] The expansion process of moso bamboo into broad-leaved forests was simulated using the space-for-time substitution method, and moso bamboo within mixed forests and moso bamboo stands was removed through manual cutting. Soil samples at depths of 0–10 cm and 10–20 cm within the sample plots during the expansion and removal of moso bamboo were collected, and their physicochemical properties and stoichiometric ratios of carbon, nitrogen, and phosphorus were determined. [Result] The results indicate that the expansion of moso bamboo into broad-leaved forests led to an increase in soil moisture content, pH, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content, and an increase in available phosphorus content in the 0–10 cm soil layer. After 100% bamboo cutting in bamboo-broadleaf mixed forests and moso bamboo forests, the soil moisture content in the 0–10 cm soil layer decreased significantly. There was no significant change in the C/N ratio during the expansion and removal of moso bamboo. The C/P ratio in the pure moso bamboo forest decreased significantly after 100% bamboo cutting in the 0–10 cm soil layer. During the bamboo removal process in the bamboo-broadleaf mixed forest, the C/P ratio showed a trend of first increasing and then decreasing in both the 0–10 cm and 10–20 cm soil layers. The change trend of the N/P ratio was consistent with that of soil TN content, indicating that when the N/P ratio in the moso bamboo expansion sample plots was <14 , the N/P ratio during the expansion and removal of moso bamboo was mainly regulated by soil nitrogen. [Conclusion] The above change process has clarified the driving mechanism of the expansion and removal of moso bamboo, that is, moso bamboo expands by altering the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P, causing changes in the elements of C, N, and P and their stoichiometric ratios in plants. This is of great significance for evaluating the ecological effects of the expansion and removal of moso bamboo and for effectively preventing and controlling its expansion in the future.

Keywords: ecological stoichiometry; moso bamboo expansion; moso bamboo removal; qiyunshan

【研究意义】我国是竹子大国,竹类资源面积广泛,种类繁多约有48属500种^[1]。其中毛竹(*Phyllostachys edulis*)是中国亚热带地区数量最多,分布面积最大,最具有代表性的竹种^[2],面积达 $4.68 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[3]。主要分布在江西、福建、浙江和湖南等南方省份,其中江西的毛竹总面积占全面的1/4,是我国亚热带地区主要的经济树种^[4]。但是近年来,由于时代的发展和经济结构的转型,劳动力成本日渐攀升以及竹林管理强度下降等原因,毛竹持续向邻近的森林扩张^[5]。【前人研究进展】1985—2003年,浙江天目山保护区内毛竹林面积就增加了近34倍^[6]。1994—2007年,河南鸡公山保护区内毛竹林总面积增加了 63.83 hm^2 ^[7]。毛竹巨大的竹鞭系统能够支持其快速向邻近的森林扩张,迅速侵占其他树种所需的生存资源,快速成林,甚至成为纯毛竹林^[8]。因此合理规划毛竹种植的密度、采取科学的毛竹伐除措施有利于毛竹种植与土壤生态系统的良性互动和协同发展^[9]。毛竹扩张不仅会降低原有森林物种丰富度和结构层次,削弱原有森林生态系统抵抗力稳定性^[10],还会改变原有森林的土壤养分分布格局^[8]。土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)是土壤养分循环的主要元素,也是植物生长发育不可或缺的营养元素^[11],是研究森林生态系统必不可少的部分。而生态化学计量学是研究多种元素之间相互关系的一种方法,常用于揭示养分之间的耦合关系,近年来已逐渐成为一个新兴的研究领域^[12]。相关研究表明,毛竹扩张对土壤养分影响并不是单一的,不同养分间也具有相互作用,比如毛竹扩张会影响原有森林林分组成,造成竹进林退的局

面^[13],这会导致森林原有凋落物产量发生变化。同时毛竹叶片具有高 N、低 C/N 等特点,其凋落物输入土壤会改变原有林分的凋落物质量,进而对土壤养分化学计量比产生影响^[6]。在毛竹向柳杉林扩张过程中,毛竹扩张显著提高了土壤 AM 真菌群落的物种丰富度^[14],并且林分类型变化也会显著影响土壤微生物的生境稳定性^[15],间接影响土壤养分化学计量比。此外,毛竹扩张能通过影响土壤养分矿化速率影响土壤养分化学计量比^[16]。

【本研究切入点】目前,对于毛竹入侵的研究主要集中在毛竹扩张的各个方面,包括对原有森林植物及其土壤理化性状、生态系统生物多样性等^[17],而关于毛竹入侵管控的研究相对较少。毛竹生长对环境要求较高,干旱等极端气候容易导致毛竹大面积死亡,对森林生态系统产生不利影响。因此有必要对毛竹扩张进行合理的砍伐管控,维持原有森林生态系统稳定。土壤养分格局是影响树木生长发育的主要因素,关于合理管控毛竹后森林土壤养分格局如何变化的研究相对较少。Tropathi 等^[18]研究发现,将毛竹从岳桦林中去除后,森林土壤微生物量碳氮都有所增加。宋庆妮等^[19]研究发现,毛竹砍伐后土壤氮含量发生显著变化。此外,毛竹大面积砍伐会形成林窗,光照和温度能够促进凋落物分解,加速土壤养分循环^[20]。以上毛竹砍伐对土壤养分格局的影响均能够通过土壤化学计量比体现。江西齐云山国家级自然保护区以亚热带常绿阔叶林和珍稀动植物为主要保护对象,但其在成为自然保护区以前,曾长期遭到人类的破坏,导致大面积的原始常绿阔叶林退化为次生林,自然保护区建立后,次生林向原始林演替的同时也遭到邻近毛竹扩张的影响^[21]。【拟解决的关键问题】本研究以齐云山保护区内阔叶林、竹阔混交林和纯毛竹林 3 种不同林分类型的自建样地为研究对象,根据毛竹扩张及伐除的不同阶段采集土壤样品,测定毛竹扩张及伐除的不同阶段下土壤 C、N、P 含量及其他土壤理化性状,以探究毛竹扩张和伐除不同阶段下土壤化学计量比分布格局及其与其他土壤环境因子之间的耦合关系。研究结果有助于更清晰的认识到毛竹扩张及伐除过程中土壤化学计量比的变化情况,为如何管控毛竹扩张,促使其更好地发挥生态经济效益提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

样地选择在江西齐云山国家级自然保护区(25°41′~25°54′N,113°54′~114°07′E),位于赣州崇义县西北边缘地带,是罗霄山脉南端主峰。保护区总面积约 171 km²,属于中亚热带季风湿润区,四季分明,水热条件充沛,年降雨量为 1 552~1 660 mm^[22],年平均气温为 18.0~18.4 °C,海拔为 400~2 061 m^[23],地貌类型属山岳地貌,地势东高西低,土壤类型多样,有红壤、黄红壤、黄壤、暗黄棕壤,山地草甸土等,有机质和养分含量相对较高。植被类型以常绿阔叶林和针叶林为主,其中常绿阔叶林占总面积的 52.7%^[24]。

表 1 3 种林分样地基本情况(平均值±标准误差)

Tab.1 The basic general situation of the sample site in three types of forest(mean±SE)

林分类型	土壤含水率%	林分郁闭度	阔叶林高度/m	毛竹高度/m	阔叶林胸径/cm	毛竹胸径/cm	阔叶林密度	毛竹密度/
Forest	Soil moisture	Canopy	Hardwood	Moso bamboo	Hardwood	Moso bamboo	Hardwood	(株·hm ⁻²)
types	content	density	forest height	height	forest diameter	diameter at	forest density	Moso bamboo
					at breast height	breast height		density
阔叶林	18.3%±0.01	0.81	4.7±0.10	—	4.5±0.18	—	726±41.34	—
竹阔混交林	25.7%±0.01	0.76	4.2±0.05	11±0.11	3.3±0.94	8.4±0.08	723±114.64	526±16.21
纯毛竹林	31.1%±0.01	0.33	—	12.5±0.16	—	10.1±0.08	—	1116±126.61

1.2 样地设计

2021 年,在江西齐云山选择具有代表性的典型地段设置 20 个 40 m×40 m 的典型森林群落,总面积

32 000 m²。具体建设方式为:选择样地西南角作为基线的起点,选取 50 m 作为基线长度,并根据坡度换算投影长度 40 m,然后在每 10 m 处打上 PVC 管,做好标记。记录方位角,并旋转 90°、180°、360°,进行样地布设,记录海拔、坡度、坡向、郁闭度等样方基本信息。为方便植株坐标读取,将每个大样方分为 16 个 10 m×10 m 的小样方。采用相邻格子法进行样地调查,对样方内所有胸径(DBH)≥5.0 cm 的木本植物进行每木检尺,并在高度 1.3 m 处涂上红油漆,用已经标号的铝合金牌对调查树种进行标记挂牌,并记录植物的编号、物种名称、胸径、树高、枝下高、植株位置等数据。

针对本研究,2021 年 9 月在该齐云山自然保护区内,采用时空替代法,依据毛竹向常绿阔叶林的扩张程度以及毛竹伐除程度选择纯竹林、竹阔混交林和阔叶林 3 种林分共 7 种处理类型(图 1)选取 20 m×20 m 的样地,各样地间间隔 10 m 以上,每种处理设置 3 个重复,共计 21 个样地,并将阔叶林、竹阔混交林、毛竹林和竹阔混交林伐竹 50%、竹阔混交林伐竹 100%、毛竹林伐竹 50%、毛竹林伐竹 100% 分别设定为毛竹扩张过程样地和毛竹去除样地。同时本试验将纯竹林和竹阔混交林样地 4 个方向的竹鞭斩断,防止相邻样地内毛竹鞭根的相互干扰。

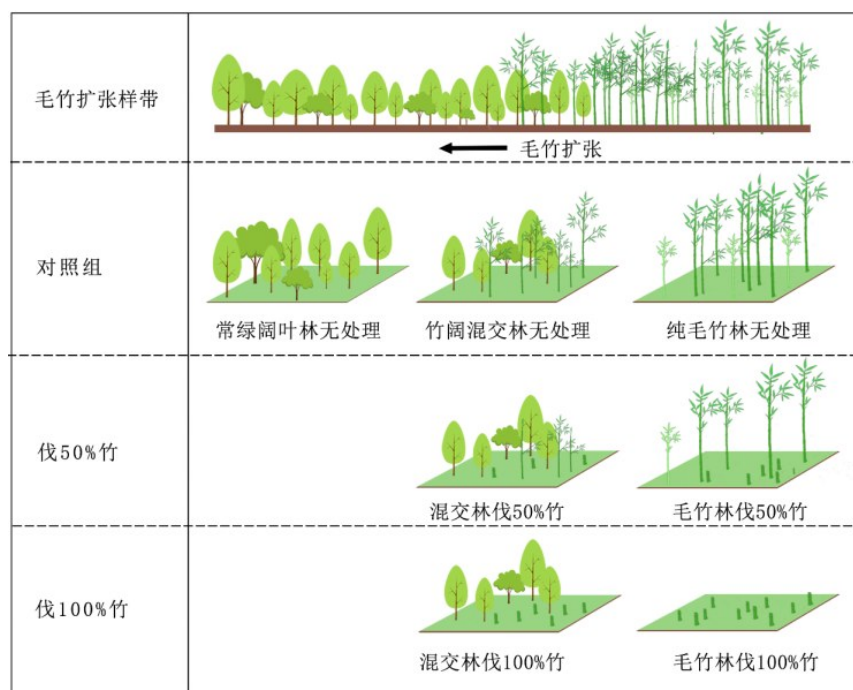


图 1 试验样地建设及处理示意图

Fig.1 Schematic diagram of construction and treatment of test plot

1.3 样品采集

为观察毛竹扩张和去除过程的变化,计划采样 5 次,分别为伐竹处理后第 7 天(2021 年 9 月)、1 个月(2021 年 10 月)、3 个月(2022 年 1 月)、6 个月(2022 年 4 月)和 1 年(2022 年 9 月),毛竹扩张样地采样时间同毛竹去除样地。采用梅花五点采样法,在样地中选取 5 个点,去除表层凋落物后用土钻采集 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤,将同一样地内 5 个点所采集的土壤样品混合均匀,即为每个样地的土壤混合样品。将采集好的土壤样品迅速置于保温箱带回实验室,将动植物残体、根系及石头等去除后,取适量土壤样品,一部分于-20 ℃温度下保存,一部分自然风干后用于测定 SOC、TN、TP 含量和其它土壤基本理化指标。土壤 C、N 含量使用元素分析仪测定,土壤 pH 值使用 pH 计测定。使用土壤温湿度计收集的 6 cm 深处的土壤温度数据,以监测期间平均值作为每个样地土壤温度。土壤含水率采用烘干称重法进行测定。土壤铵态氮(NH₄⁺-N)采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法进行测定,硝态氮(NO₃⁻-N)直接采用紫外分光光度法测定。全磷(TP)、有效磷(AP)采用钼锑抗比色法测定^[25]。

1.4 数据处理

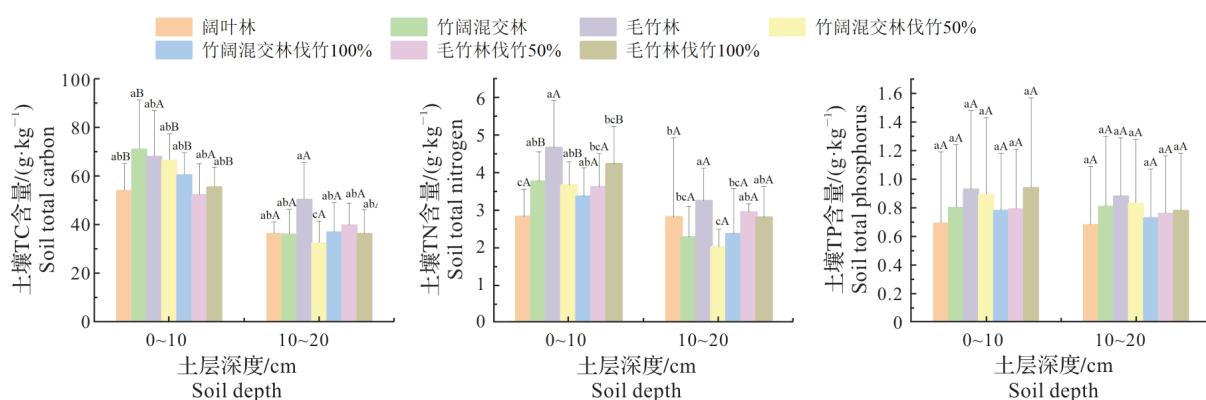
本试验利用 Excel2016 与 SPSS Statistics 26.0 软件进行数据处理与分析,所得结果利用 Origin2021 进

行绘图。采用双因素方差分析比较土壤理化性质、化学计量特征在不同林分类型和不同土壤深度下的差异。基于 Pearson 相关性分析,检验土壤化学计量比与土壤环境因子之间的显著性关系。利用 Canoco 5 进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),以确定齐云山自然保护区毛竹扩张及伐除过程中土壤碳氮磷变化的关键调控因子。

2 结果与分析

2.1 毛竹扩张及去除过程中土壤碳氮磷含量

研究区域内,在毛竹扩张过程中,样地内 0~10 cm 土层 TC 含量随毛竹扩张呈先增加后减小的趋势,10~20 cm 土层 TC 含量随毛竹扩张不断增加。毛竹去除则导致样地内 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤 TC 含量不同程度的减少(图3)。土壤 TN 含量在 0~10 cm 土层中随毛竹扩张显著增加,在 10~20 cm 土层为先减小后增加。毛竹去除则降低了样地内土壤 TN 含量(图3)。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层内,土壤 TP 含量与毛竹扩张均呈正相关关系,阔叶林内土壤 TP 含量与伐竹强度呈正相关关系,而毛竹林内土壤 TP 含量则随着伐竹强度先减小后增加(图2)。



不同小写字母表示同一土层不同林分间指标差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同林分不同土层间指标差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences in indicators between different forest stands in the same soil layer ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences in indicators between different soil layers in the same forest stand ($P<0.05$).

图2 不同处理下 TC、TN、TP 含量变化特征分析

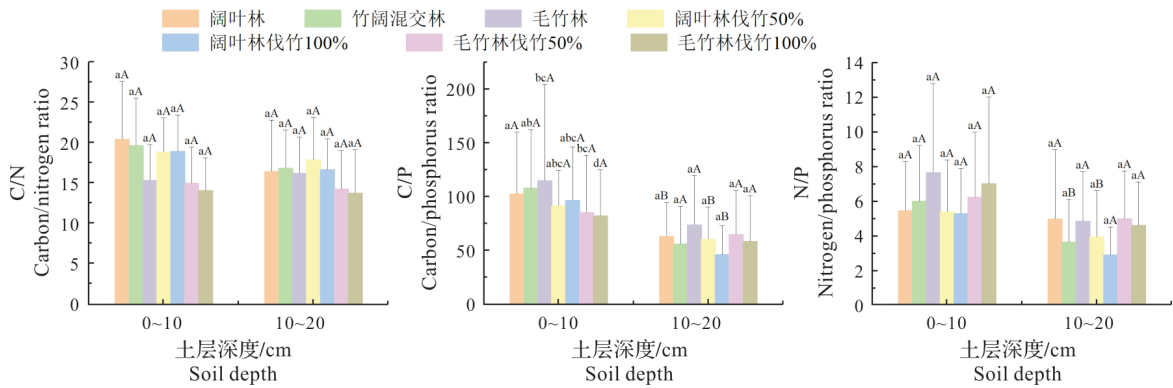
Fig.2 Characteristics of TC, TN and TP content changes under different treatments

2.2 毛竹扩张及去除过程中土壤化学计量比

研究区域内,毛竹扩张过程中 C:N:P 在 0~10 和 10~20 cm 土层分别为 108.57:6.33:1 和 64.31:4.44:1,毛竹去除过程中 C:N:P 在 0~10 和 10~20 cm 土层分别为 88.85:5.94:1 和 57.47:4.07:1。在 0~10 cm 土层中,C/N 随着毛竹扩张不断下降,而 C/P 和 N/P 则随着毛竹扩张不断增加,在 10~20 cm 土层中,C/N 随着毛竹扩张先增加后减小,C/P 和 N/P 随着毛竹扩张先减小后增加(图4)。在毛竹去除过程中,毛竹纯林的 C/N 和 C/P 在 0~10 和 10~20 cm 土层内均随着伐竹强度增加而降低;而竹阔混交林在 0~10 cm 土层中 C/N 和 C/P 随伐竹强度均呈先降低后增加的趋势,在 10~20 cm 土层中 C/N、C/P、N/P 则随伐竹强度先升高后降低(图3)。

2.3 毛竹扩张及去除过程中土壤理化指标

毛竹扩张过程中样地内 0~10 cm 土层土壤温度平均值为 $(18.37\pm0.35)^{\circ}\text{C}$; 0~10 和 10~20 cm 土层 pH 的平均值分别为 4.15 ± 0.16 和 4.32 ± 0.13 , AP 的平均含量分别是 $(33.17\pm6.82)\text{mg/kg}$ 和 $(28.90\pm4.25)\text{mg/kg}$, NH_4^+-N 的平均含量分别是 $(17.90\pm3.19)\text{mg/kg}$ 和 $(15.26\pm2.90)\text{mg/kg}$, NO_3^--N 的平均含量分别为 $(8.72\pm1.19)\text{mg/kg}$ 和 $(6.77\pm0.93)\text{mg/kg}$ (图4)。而毛竹去除过程中样地内 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤含水率分别为 $(26.33\pm3.12)\%$ 和 $(29.84\pm1.59)\%$, pH 的平均值分别为 4.36 ± 0.22 和 4.39 ± 0.17 , AP 的平均值分别为 $(32.5\pm1.75)\text{mg/kg}$ 和 $(30.18\pm1.48)\text{mg/kg}$, NH_4^+-N 的平均含量分别是 $(20.91\pm3.85)\text{mg/kg}$ 和 $(17.02\pm3.03)\text{mg/kg}$, NO_3^--N 的平均含量分别为 $(8.66\pm0.86)\text{mg/kg}$ 和 $(6.52\pm0.97)\text{mg/kg}$ (图4)。



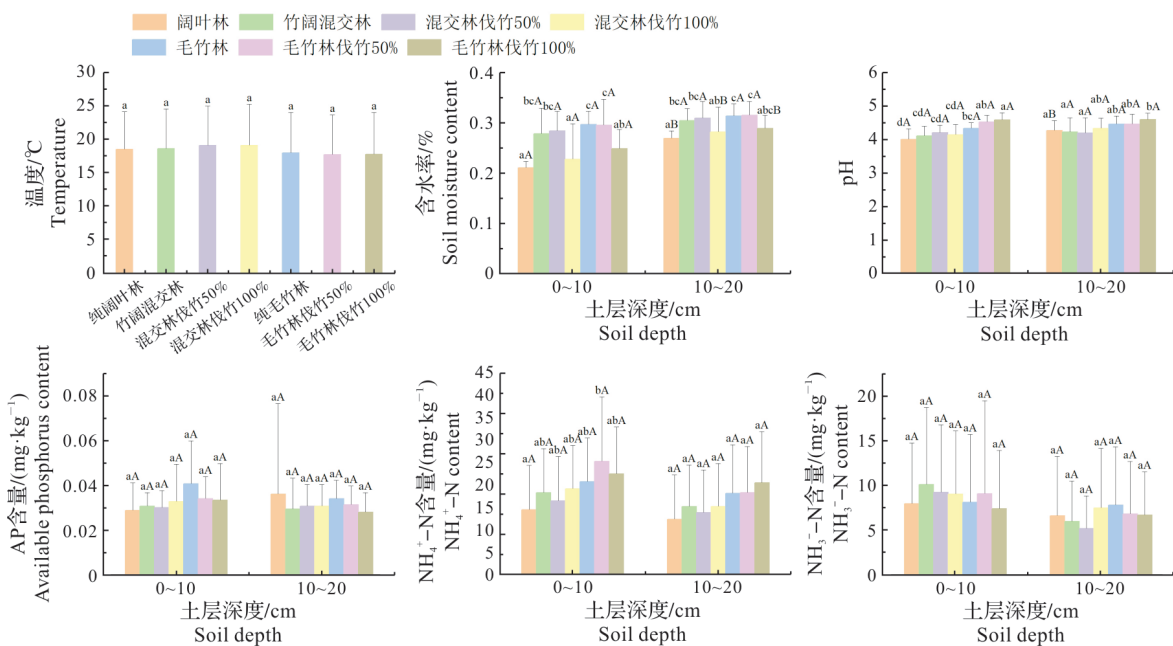
不同小写字母表示同一土层不同林分间指标差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同林分不同土层间指标差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences in indicators between different forest stands in the same soil layer ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences in indicators between different soil layers in the same forest stand ($P<0.05$).

图3 不同处理下 C/N、C/P、N/P 变化特征分析

Fig.3 Characteristics of C/N, C/P and N/P changes under different treatments

与毛竹扩张前的阔叶林相比,毛竹从阔叶林扩张到竹阔混交林和毛竹纯林,0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤含水率均显著增加,分别增长为 $(29.13\pm 4.54)\%$ 和 $(29.53\pm 2.35)\%$,增长率可达 25% 和 34%。在毛竹去除过程中,当伐竹强度为伐竹 100% 时,竹阔混交林和毛竹林样地 0~10 cm 土层土壤含水率、竹阔混交林 10~20 cm 土层土壤含水率显著下降,分别为 $(26.33\pm 3.12)\%$ 和 $(29.84\pm 1.59)\%$,其降低率分别为 6.4% 和 2.5%。在毛竹扩张到毛竹纯林时 0~10 cm 土层 pH 较阔叶纯林显著增加,在毛竹纯林伐竹 100% 后 0~10 cm 土层 pH 显著增加。



不同小写字母表示同一土层不同林分间指标差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同林分不同土层间指标差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences in indicators between different forest stands in the same soil layer ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences in indicators between different soil layers in the same forest stand ($P<0.05$).

图4 不同处理下温度、含水量、pH、AP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 变化特征分析

Fig.4 Variation characteristics of temperature, water content, pH, AP, NH_4^+-N and NO_3^--N under different treatments

2.4 毛竹扩张及去除过程中化学计量比的影响因素

研究区域内土壤化学计量比与其他土壤理化性状之间的相关关系在毛竹扩张和毛竹去除过程中

强弱不一,毛竹去除过程中它们的相关性要强于毛竹扩张过程。在毛竹扩张过程中,C/N 与 NO_3^- -N 和 TC、N/P 和 C/P 与 NO_3^- -N、TC、TN 呈极显著正相关关系($P<0.01$);而 C/N 与 NH_4^+ -N、pH、TN 以及 C/P、N/P 与 TP 以及 C/P 与 NH_4^+ -N 均呈极显著负相关关系($P<0.01$)(图 5)。在毛竹去除过程中,C/N 分别与 NO_3^- -N、TC 呈现为极显著正相关关系,与 NH_4^+ -N、TN、pH 呈极显著负相关关系($P<0.01$),而 C/N 与 AP、TP 则呈现为显著正相关关系($P<0.05$);N/P、C/P 与 NO_3^- -N、TC、TN 均呈现为极显著正相关关系,与 TP 和 NH_4^+ -N 呈极显著负相关关系, ($P<0.01$);C/P 则与 AP 和 pH 分别呈极显著正相关与极显著负相关关系($P<0.01$)(图 6)。

冗余分析显示,调控毛竹扩张和去除过程中土壤碳氮磷化学计量比的主要因素均为 TC 和 TP(图 7)。在毛竹扩张过程中,TC 和 TP 的贡献率分别为 55.9% 和 41.2%。在毛竹去除过程中,TC 和 TP 的贡献率分别为 46.2% 和 51.2%(图 7)。

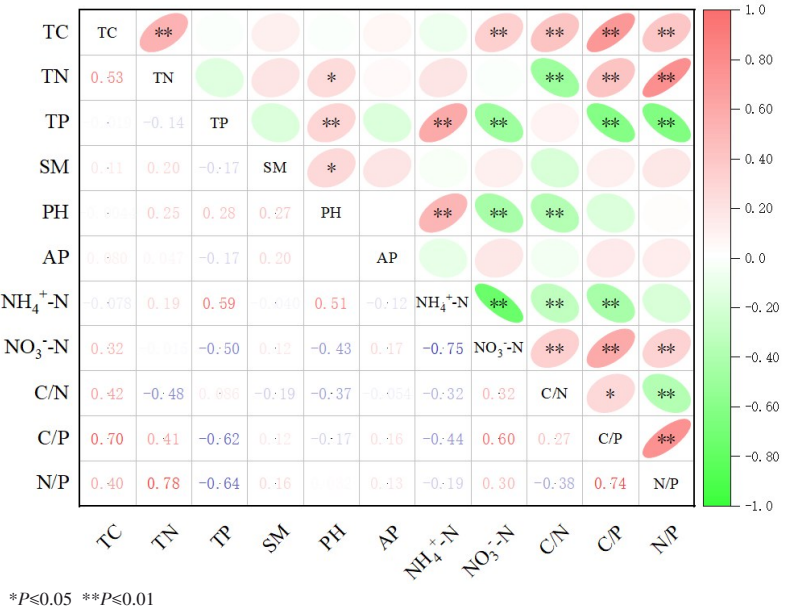


图5 毛竹扩张过程土壤理化性状和土壤碳氮磷化学计量特征相关分析

Fig.5 Correlation analysis of soil physicochemical properties and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics

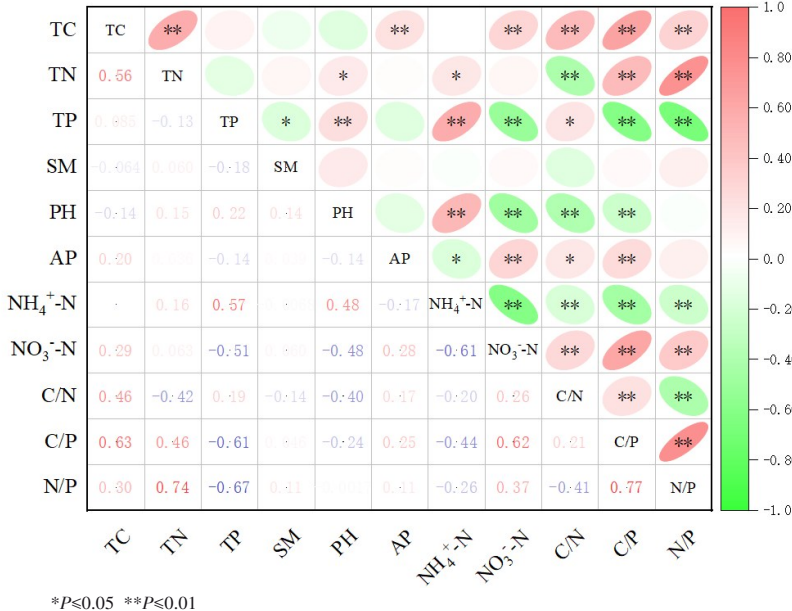


图6 毛竹去除过程土壤理化性状和土壤碳氮磷化学计量特征相关分析

Fig.6 Correlation analysis of soil physicochemical properties and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics

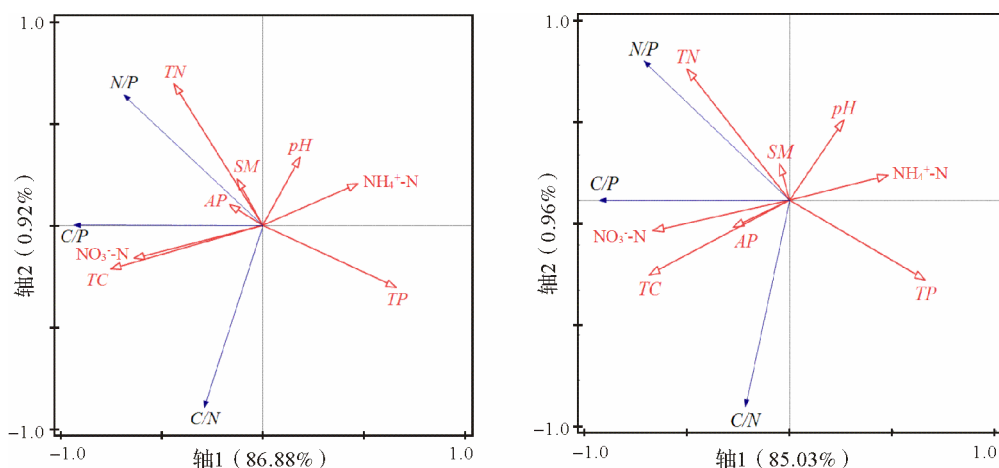


图7 毛竹扩张与去除过程环境因子与化学计量比之间的冗余分析

Fig.7 Redundancy analysis between environmental factors and stoichiometric ratio during bamboo expansion and removal.

3 讨论

3.1 土壤理化性质对毛竹扩张和去除过程的响应

本研究发现,在毛竹扩张形成毛竹纯林后土壤含水率在0~10 cm土层和10~20 cm土层显著升高($P<0.05$),而对毛竹扩张样地进行伐竹100%处理后,0~10 cm土层含水率显著降低,此研究结果与其他学者的相关研究结果基本一致。赵雨虹等^[26]在江西大岗山关于毛竹扩张的研究发现,毛竹扩张能够改善常绿阔叶林的持水能力,增加土壤持水量。崔诚^[16]在毛竹扩张的研究中发现,毛竹扩张形成的竹阔混交林和毛竹纯林土壤含水率并没有发生显著变化,但是土壤毛管持水量、田间持水量和土壤最大持水量都由于毛竹扩张而增加,并认为这是毛竹在扩张过程中大量的竹鞭改变了土壤的物理结构以及土壤孔隙度所导致的。本研究对竹阔混交林和纯毛竹林伐竹100%处理后,样地内0~10 cm土层含水率显著降低,且与阔叶林相比无显著差异,这从侧面证明毛竹扩张能够增强土壤含水率。此外,毛竹扩张还会导致土壤pH升高,当毛竹扩张到毛竹纯林时0~10 cm土层土壤pH与阔叶林具有显著差异。与李永春等^[27]和Xu等^[28]关于毛竹扩张的研究结果一致。这可能是由于毛竹扩张时对 NH_4^+-N 具有一定的偏向吸收^[29],同时毛竹扩张会增强土壤氨化作用,削弱硝化作用^[19],而土壤氨化作用增强会产生大量的 OH^- ,增加土壤pH^[30]。本研究中, NH_4^+-N 含量随毛竹扩张呈增加趋势, NO_3^--N 含量随毛竹扩张呈减少趋势,但二者含量变化均未达到显著水平。同时土壤的pH升高会增加土壤中磷酸根离子的溶解度,导致土壤AP含量在0~10 cm土层随毛竹扩张不断增加^[31]。

3.2 生态化学计量特征对毛竹扩张和去除过程的响应

土壤C/N是用来评价土壤N素矿化能力的重要指标。通常来说,C/N越低,N的矿化能力越强^[32]。本研究中C/N在0~10 cm和10~20 cm土层均无显著差异性。这与夏恩龙等^[33]的研究结果一致。C和N是土壤中主要的营养元素,虽然二者存在一定的空间异质性,但其之间紧密的耦合关系使得其对环境变化表现出一定的协同效应,使得其在环境中的比值总是保持在相对稳定的状态^[34]。这是因为当土壤C含量升高时,土壤微生物会进行更多的N积累而不是N矿化作用,其中大部分的N参与到有机质合成过程中,从而降低N矿化速率^[35]。这可能是导致本研究中C/N在毛竹扩张和去除过程中无显著性差异的原因。土壤C/P是反映土壤P矿化能力的重要指标,同时也能反映植物对土壤有效磷利用的能力^[36],较低的C/P有利于土壤微生物对有机质的分解以及P元素的释放^[37]。本研究中毛竹扩张和去除过程中C/P比分别是78.81和78.17,均高于我国毛竹分布区域土壤C/P的平均水平(66.74)^[38]。本研究中土壤C/P在纯毛竹林与毛竹林伐竹100%处理之间具有显著性差异,同时竹阔混交林在毛竹去除过程中在不同土层C/P均表现为先升高后降低的趋势。由于毛竹扩张会减缓土壤有机质矿化作用^[37],当进行毛竹去除处理时,土壤有机质分解速率增加导致C/P增加。N/P通常用于判断土壤N、P的养分限制作用及其阈值,N/P越低,植物生长受N元素的限制越大^[39]。相关研究表明,土壤 $\text{N/P}<14$ 时,植物被认为受到了N素限制; $\text{N/P}>16$ 时,植物生长则受到了P限制^[40]。本研究中N/P在毛竹扩张和去除过程中均低于14,说明研究区内土壤受到

N素限制,这与欧阳明等^[41]的研究结果一致。本研究中N/P的变化趋势与土壤TN含量变化趋势表现一致,土壤TP含量在毛竹扩张和去除过程中均无显著性差异(图2、图3),同时冗余分析也证实土壤TN含量对N/P的贡献率最大(图7),印证了毛竹扩张和去除过程中N/P主要是由土壤TN含量进行调控。并且有相关研究也表明,在N沉降普遍存在的情况下我国毛竹林仍旧受到N素的限制^[42]。

3.3 毛竹扩张和去除过程中土壤碳氮磷含量及化学计量比变化的影响因素

随着毛竹的不断扩张及去除,其地下根系部分对土壤氮元素转化过程产生了干扰。在本研究中,随着毛竹扩张,林分类型发生转变,土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随之增加,而 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量下降,其主要原因可能如下:首先是由于不同植被类型对不同土壤养分的吸收存在偏好性,会使得土壤中不同养分的分布表现出差异性^[43]。宋庆妮等^[19]研究表明毛竹入侵阔叶林过程中,随着毛竹生长,土壤净氨化速率升高,而净硝化和总矿化速率则会降低,这证明毛竹可能偏好吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。与本研究结果相同,毛竹扩张导致林分转换后,为了满足毛竹能够快速对阔叶林进行扩张所需的大量氮素,使得氮元素的供应大量增加。但本研究中, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量在不同毛竹扩张程度下没有表现出明显趋势,但总体来说纯竹林和阔叶林都要显著低于竹阔混交林。这可能是由于毛竹扩张期间土壤中的氮元素主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在,而阔叶林的生长则需要大量的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 来供应,这就导致了 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量受到一定的抑制作用,进而导致其供应水平的下降。由此可见,毛竹扩张改变了土壤中氮元素的供应方式,与阔叶林相比毛竹林能够提高土壤氮含量。另一原因可能是随着毛竹扩张,土壤中凋落物的组成也随之发生转变,不同凋落物会对土壤的理化性质产生不同影响,正如本研究结果显示土壤有效磷含量在毛竹扩张过程中表现为:毛竹林>竹阔混交林>阔叶林,表明毛竹向阔叶林扩张过程中,显著增加土壤有效磷含量。这一发现,与以前的一些研究结果不尽相同,徐健鸿等^[44]研究表明毛竹入侵日本柳杉人工林后导致土壤全磷含量显著下降;Hu等^[45]则认为外来物种入侵后土壤有效磷并未显著增加。干旱和土壤酸化都会明显促进磷的矿化,但是毛竹的生长需要大量的水^[46],且入侵过程中又表现出偏好 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的特性,因此,入侵后将使得土壤含水量和pH下降,这可能就是导致土壤有效磷含量增加的重要原因。

针对以上研究内容可知氮元素对毛竹的生长起到了关键作用。程明圣等^[47]研究发现毛竹在氮形态响应上偏向喜好 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,但过高浓度铵却会对毛竹生长产生抑制效果。Zou等^[48]研究也证实了毛竹在 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 条件下生长不良的现象。综上所述,利用高铵或高硝抑制毛竹氮吸收,可以作为管控毛竹扩张的有效手段。

4 结 论

本研究以齐云山国家级自然保护区内毛竹扩张及毛竹去除为基础,探究了毛竹扩张及毛竹去除对土壤碳氮磷含量及其化学计量比之间的影响机制。毛竹向阔叶林扩张及对竹阔混交林和毛竹林伐竹100%均导致土壤含水率升高,有效磷含量在毛竹扩张后的0~10 cm土层升高。C/N在毛竹扩张和去除过程中均无显著性变化。C/P在纯毛竹林伐竹100%处理后0~10 cm土层显著降低,在竹阔混交林毛竹去除过程中土壤C/P均表现出先升高后降低的趋势。N/P的变化趋势与土壤TN含量变化趋势表现一致,反映了当毛竹扩张样地内 $\text{N/P}<14$ 时,毛竹扩张和去除过程中N/P主要是由土壤TN进行调控。以上变化过程探明了毛竹扩张及去除过程的驱动机制,即毛竹通过改变土壤C、N、P化学计量特征进行扩张,引起植物体C、N、P元素及其化学计量特征发生转变,这对以后评价毛竹扩张及去除的生态效应及防治扩张具有非凡意义。

参考文献 References:

- [1] 杨豆.毛竹向阔叶林和针叶林扩张对土壤磷生物有效性的影响及其机制[D].南昌:江西农业大学,2022.
YANG D.Effect of moso bamboo expands to broadleaf and conifer forests on soil phosphorus bioavailability and its mechanism[D].Nanchang:Jiangxi Agricultural University, 2022.
- [2] 邵帅,王中乾,潘灵强,等.毛竹扩张对常绿阔叶林土壤微生物残体碳累积的影响[J].浙江农林大学学报,2024,41(5):1005-1012.
SHAO S, WANG Z Q, PAN L Q, et al.Effects of phyllostachys edulis expansion on soil microbial residue carbon accumula-

- tion in evergreen broad-leaved forests[J].Journal of Zhejiang A&F university 2024,41(5):1005-1012.
- [3] 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.
- [4] 余林,李万和,徐海宁,等.江西安福不同类型毛竹林地土壤微生物量碳特征研究[J].经济林研究,2017,35(1):80-85.
YU L,LI W H,XU N H,et al.Characteristics of soil microbial biomass carbon of different types of phyllostachys edulis forest lands in Anfu of Jiangxi Province[J].Nonwood forest research,2017,35(1):80-85.
- [5] SONG X,PENG C,ZHOU G,et al.Climate warming-induced upward shift of moso bamboo population on Tianmu Mountain, China[J].Journal of mountain science,2013,10(3):363-369.
- [6] 牛杰慧.模拟氮沉降下毛竹扩张及其砍伐管控对土壤温室气体排放的影响[D].南昌:江西农业大学,2020.
NIU J H.The effects of moso bamboo expansion and logging control on soil greenhouse gas emissions with simulated nitrogen deposition[D].Nanchang:Jiangxi Agricultural University,2020.
- [7] 杨怀,刘丹,赵海燕,等.论鸡公山国家级自然保护区的生态地位及其保护价值[J].现代农业科技,2010(12):17-18.
YANG H,LIU D,ZHAO H Y,et al.Ecological status and conservation value of Jigongshan national nature reserve[J].Modern agricultural science and technology,2010(12):17-18.
- [8] BAI S,ZHOU G,WANG Y,et al.Plant species diversity and dynamics in forests invaded by moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) in Tianmu mountain nature reserve[J].Biodiversity science,2013(3):288-295.
- [9] 杨怀,李培学,戴慧堂,等.鸡公山毛竹扩张对植物多样性的影响及控制措施[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2010,23(4):553-557.
YANG H,LI P X,DAI H T,et al.Effects of phyllostachys pubescens expansion on plant species diversity in Jigong mountain and discussion of control measures[J].Journal of Xinyang normal university (natural science edition),2010,23(4):553-557.
- [10] 王晓荣,胡兴宜,庞宏东,等.毛竹扩展对杉木林和阔叶林群落结构与多样性的影响[J].森林与环境学报,2022,42(5):474-482.
WANG X R,HU X Y,PANG H D,et al.Effects of moso bamboo expansion on community structure and diversity of artificial forests, Chinese fir stands, and broad-leaved forest[J].Journal of forest and environment,2022,42(5):474-482.
- [11] COLLEGE OF SCIENCE NAFU, COLLEGE OF NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT NAFU, COLLEGE OF NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT NAFU, et al.Response of soil C:N:P stoichiometry, organic carbon stock, and release to wetland grasslandification in Mu Us Desert[J].Journal of soils and sediments,2019,19(12):3954-3968.
- [12] YANHAO W,ZIJUN W,SIMIN J,et al.Elemental stoichiometry (C,N,P) of soil in the wetland critical zone of Dongting Lake, China: understanding soil C,N and P status at greater depth[J].Sustainability,2022,14(14):8337.
- [13] 童冉,周本智,姜丽娜,等.毛竹入侵对森林植物和土壤的影响研究进展[J].生态学报,2019,39(11):3808-3815.
TONG R,ZHOU B Z,JIANG L N,et al.Influence of moso bamboo invasion on forest plants and soil:a review[J].Acta ecologica Sinica,2019,39(11):3808-3815.
- [14] 邹贵武.庐山日本柳杉林地下菌根真菌群落对毛竹扩张和林窗形成的响应[D].南昌:江西农业大学,2017.
ZOU G W.The response of arbuscular mycorrhizal fungal community under Japanese cedar forest to bamboo expansion and forest gap formation in Lushan mountain[D].Nanchang:Jiangxi Agricultural University,2017.
- [15] 王运曦,丁访军,周华,等.高海拔地区3种林分类型土壤酶活性与微生物生物量特征[J].森林与环境学报,2025,45(1):11-19.
WANG Y X,DING F J,ZHOU H,et al.Characteristics of soil enzymes activity and microbial biomass in three forests at high altitude areas[J].Journal of forest and environment,2025,45(1):11-19.
- [16] 崔诚.毛竹扩张对土壤结构组成及碳氮磷化学计量特征的影响研究[D].南昌:江西农业大学,2018.
CUI C.The effects of phyllostachys edulis expansion on soil structure composition and stoichiometric characteristics of carbon,nitrogen and phosphorus[D].Nanchang:Jiangxi Agricultural University,2018.
- [17] 邵慧妹,于水强,谭蕊,等.毛竹入侵对落叶阔叶林土壤理化性质和胞外酶活性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(4):75-84.
SHAO H M,YU S Q,TAN R,et al.Effects of *Phyllostachys edulis* invasion on soil physical and chemical properties and ex-

- tracellular enzyme activities in deciduous broad-leaved forest[J].Journal of northwest A&F university(natural science edition),2024,52(4):75-84.
- [18] TRIPATHI S K,SUMIDA A,SHIBATA H,et al.Leaf litterfall and decomposition of different above- and belowground parts of birch(*Betula ermanii*)trees and dwarf bamboo(*Sasa kurilensis*)shrubs in a young secondary forest in northern Japan[J].Biology and fertility of soils,2006,43(2):237-246.
- [19] 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,LIU 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.
- [20] 申景昕,范少辉,刘广路,等.毛竹林采伐林窗近地层温度时空分布特征[J].生态学杂志,2020,39(11):3549-3557.
- SHEN J X,FAN S H,LIU G L,et al.Spatiotemporal distribution characteristics of temperature on the surface layer of cutting gap of phyllostachys edulis forest[J].Chinese journal of ecology,2020,39(11):3549-3557.
- [21] 曾小霞.毛竹扩张对树木生长的影响与毛竹伐除后的短期效应及水分生理[D].南昌:江西农业大学,2024.
- ZENG X X.The impact of phyllostachys edulis expansion on the tree growth,the short-term effects after bamboo removal and water physiology mechanisms[D].Nanchang:Jiangxi Agricultural University,2024.
- [22] 宋庆妮,杨清培,欧阳明,等.毛竹扩张的生态后效:凋落物水文功能评价[J].生态学杂志,2015,34(8):2281-2287.
- SONG Q N,YANG Q P,OUYANG M,et al.Changes in the hydrological functions of litter layer following phyllostachys edulis expansion into evergreen broadleaved forest[J].Chinese journal of ecology,2015,34(8):2281-2287.
- [23] JIANMIN S,SIYU M,LONGFENG W,et al.Clonal integration driven by source-sink relationships is constrained by rhizome branching architecture in a running bamboo species(*Phyllostachys glauca*):A 15N assessment in the field[J].Forest ecology and management,2021,481:118754.
- [24] 宋述望,罗会潭,黄萌,等.江西齐云山自然保护区植被类型与森林资源特征[J].南方林业科学,2021,49(5):34-38.
- SONG S W,LUO H T,HUANG M,et al.The vegetation types and forest resources in Jiangxi Qiyunshan nature reserve[J].South China forestry science,2021,49(5):34-38.
- [25] 任泽文,陈昕,陈玥,等.亚热带森林演替中优势种茎干-土壤碳氮磷生态化学计量的变化特征[J].江西农业大学学报,2024,46(2):401-410.
- REN Z W,CHEN X,CHEN Y,et al.Carbon,nitrogen and phosphorus stoichiometry in soil and dominant trees' stem at different stages of subtropical secondary forest succession [J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(2):401-410.
- [26] 赵雨虹,范少辉,罗嘉东.毛竹扩张对常绿阔叶林土壤性质的影响及相关分析[J].林业科学研究,2017,30(2):354-359.
- ZHAO Y H,FAN S H,LUO J D,et al.The Influence of phyllostachys edulis expanding into evergreen broadleaf forest on soil property and its related analysis[J].Forest research,2017,30(2):354-359.
- [27] 李永春,梁雪,李永夫,等.毛竹入侵阔叶林对土壤真菌群落的影响[J].应用生态学报,2016,27(2):585-592.
- LI Y C,LIANG X,LI Y F,et al.Effects of phyllostachys edulis invasion of native broadleaf forest on soil fungal community [J].Chinese journal of applied ecology,2016,27(2):585-592.
- [28] XU Q,JIANG P,WU J,et al.Bamboo invasion of native broadleaf forest modified soil microbial communities and diversity [J].Biological invasions,2015,17(1):433-444.
- [29] ZHIHAO C,YONGCHUN L,X. C S,et al.Linking enhanced soil nitrogen mineralization to increased fungal decomposition capacity with moso bamboo invasion of broadleaf forests[J].Science of the total environment,2021,771:144779.
- [30] TURNER B L,BLACKWELL M S A.Isolating the influence of pH on the amounts and forms of soil organic phosphorus[J].European journal of soil science,2013,64(2):249-259.
- [31] PENN C J,CAMBERATO J J.A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants[J].Agriculture,2019,9(6):120.
- [32] ZHANG P,WEI T,LI Y,et al.Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C,total N and C:N ratio in a semiarid region of China[J].Soil & Tillage research,2015,153:28-35.
- [33] 夏恩龙,农珺清,魏松坡,等.毛竹向阔叶林扩展过程中土壤养分变化特征[J].生态环境学报,2022,31(6):1110-1117.

- XIA E L, NONG J Q, WEI S P, et al. Changes in soil nutrient characteristics in moso bamboo forest expanding into broad-leaved forest[J]. *Ecology and environmental sciences*, 2022, 31(6): 1110-1117.
- [34] TIAN H, CHEN G, 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(1-3): 139-151.
- [35] K M K, E H S, M P W. Conversion from agriculture to grassland builds soil organic matter on decadal timescales.[J]. *Ecological applications*, 2006, 16(1): 143-153.
- [36] ZHANG Z, LU X, SONG X, et al. Soil C, N and P stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and *Carex lasiocarpa* wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Journal of soils and sediments*, 2012, 12(9): 1309-1315.
- [37] 王晓荣, 胡兴宜, 龚苗, 等. 毛竹扩张对幕阜山区森林土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征的影响[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2024, 44(2): 77-85.
- WANG X R, HU X Y, GONG M, et al. Effects of moso bamboo expansion on soil carbon, nitrogen, phosphorus and ecological stoichiometry characteristics of forest in Mufu mountain area[J]. *Journal of southwest forestry university*, 2024, 44(2): 77-85.
- [38] 杜满义, 范少辉, 刘广路, 等. 中国毛竹林碳氮磷生态化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(8): 760-774.
- DU M Y, FAN S H, LIU G L, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in *Phyllostachys edulis* forests of China[J]. *Chinese journal of plant ecology*, 2016, 40(8): 760-774.
- [39] 毛翼虎, 金爱武, 朱强根, 等. 毛竹林细根生长的趋富特化及对养分限制的响应[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(6): 78-83.
- MAO Y H, JIN A W, ZHU G Q, et al. The "specialization for abundance" and response of nutrition limitation of fine root growth of *Phyllostachys heterocycle* cv. *pubescens*[J]. *Journal of central south university of forestry & technology*, 2019, 39(6): 78-83.
- [40] MULLER M, OELMANN Y, SCHICKHOFF U, et al. Himalayan treeline soil and foliar C:N:P stoichiometry indicate nutrient shortage with elevation[J]. *Geoderma*, 2017, 291: 21-32.
- [41] 欧阳明. 毛竹扩张影响森林植物多样性的氮磷化学计量学机制[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- OUYANG M. The nitrogen and phosphorus stoichiometrical mechanism of *Phyllostachys edulis* expansion effect on forests plant diversity[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [42] 翁俊, 顾鸿昊, 王志坤, 等. 氮沉降对毛竹叶片生态化学计量特征的影响[J]. *生态科学*, 2015, 34(2): 63-70.
- WENG J, GU H H, WANG Z K, et al. The effects of nitrogen deposition on ecological stoichiometry of leaf of moso bamboo with extensive management[J]. *Ecological science*, 2015, 34(2): 63-70.
- [43] 岳环玉. 毛竹扩张对土壤氮矿化的影响及其微生物群落响应机制[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- YUE H Y. Effects of moso bamboo expansion on soil nitrogen mineralisation and its microbial community response mechanism[D]. Changsha: central south university of forestry & technology, 2024.
- [44] 徐健鸿, 周波, 李凯, 等. 毛竹扩张对日本柳杉林土壤氮矿化速率温度敏感性的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2023, 45(6): 1409-1417.
- XU J H, ZHOU B, LI K, et al. Effects of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) expansion to Japanese cedar forest on temperature-sensitivity of soil nitrogen mineralization[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(6): 1409-1417.
- [45] HU C C, LEI Y B, TAN Y H, et al. Plant nitrogen and phosphorus utilization under invasive pressure in a montane ecosystem of tropical China[J]. *Journal of ecology*, 2019, 107(1): 372-386.
- [46] 刘骏, 杨清培, 杨光耀, 等. 厚壁毛竹非结构性碳水化合物分配格局[J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(5): 924-928.
- LIU J, YANG Q P, YANG G Y, et al. Allocation pattern of non-structural carbohydrates of *Phyllostachys edulis* 'pachyloen'[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(5): 924-928.
- [47] 程明圣, 邹娜. 毛竹扩张对森林生态的影响及其管控研究进展[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 49-55.
- CHENG M S, ZOU N. Research progress on impacts of *Phyllostachys edulis* expansion on forest ecology and its control[J]. *J. Jiangnan univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2021, 49(3): 49-55.
- [48] NA Z, WEIMING S, LIHAN H, et al. Superior growth, N uptake and NH_4^+ tolerance in the giant bamboo *Phyllostachys edulis* over the broad-leaved tree *Castanopsis fargesii* at elevated NH_4^+ may underlie community succession and favor the expansion of bamboo[J]. *Tree physiology*, 2020, 40(11): 1606-1622.