

种植竹荪后毛竹林土壤微生物生物量和微生物熵的动态变化

夏捷^{1,2}, 陈胜¹, 吴一凡¹, 张玮¹, 谢锦忠^{1*}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037)

摘要:【目的】竹林下种植竹荪会对林地微生物活动产生影响, 明确种植竹荪对毛竹林地土壤微生物生物量、微生物熵及其化学计量不平衡性的影响, 揭示竹荪种植后毛竹林地土壤质量的变化, 为竹-菌复合生态系统的管理提供参考。【方法】以未种植竹荪(CK)和竹荪收获完成时立即取样(T0), 以及收获后1 a(T1)、2 a(T2)的林地土壤为研究对象, 测定并分析不同处理林地土壤微生物生物量、微生物熵变化规律及其与土壤-微生物化学计量不平衡性间的耦合关系。【结果】与未种植竹荪林地相比, 竹荪种植后林地土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、土壤微生物生物量碳、氮、磷(MBC、MBN、MBP)含量和土壤微生物熵碳、氮、磷(q_{MBC} 、 q_{MBN} 、 q_{MBP})总体上均明显升高, 而土壤全磷(TP)含量显著降低。随竹荪收获后间隔时间的延长, 土壤MBC含量和 q_{MBC} 呈降低趋势; 土壤MBN含量和 q_{MBN} 均呈先明显降低后略升高趋势, 而土壤SOC含量呈先显著降低后显著升高趋势; 土壤TN、TP、MBP含量及 q_{MBP} 均呈先升高后降低趋势, T1土壤TN、TP、MBP含量及 q_{MBP} 显著高于T0和T2。土壤-微生物碳氮化学计量不平衡性(记为 C_{imb}/N_{imb})、碳磷化学计量不平衡性(记为 C_{imb}/P_{imb})和氮磷化学计量不平衡性(记为 N_{imb}/P_{imb})均以竹荪收获当年(T0)处理较低。MBC与MBN呈显著正相关, MBC、MBN与 C_{imb}/N_{imb} 、 C_{imb}/P_{imb} 均呈负相关, MBP与 C_{imb}/P_{imb} 、 N_{imb}/P_{imb} 呈正相关。【结论】种植竹荪后林地土壤质量短期内较未种植林地土壤有明显提升, 种植竹荪可以改善毛竹林地土壤质量; 竹荪刚收获后毛竹林地土壤质量最优, 随着竹荪收获后间隔年份的增加, 林地土壤质量呈现劣变趋势, 且较未种植竹荪林地土壤质量差。

关键词: 毛竹林; 竹荪; 土壤微生物生物量; 土壤微生物熵; 土壤-微生物化学计量不平衡性

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2022)04-0127-08



Dynamic changes of soil microbial biomass and microbial entropy after planting *Dictyophora indusiata* in *Phyllostachys edulis* forests

XIA Jie^{1,2}, CHEN Sheng¹, WU Yifan¹, ZHANG Wei¹, XIE Jinzhong^{1*}

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China;

2. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: 【Objective】 *Dictyophora indusiata* planted in a *Phyllostachys edulis* forest could influence the microbial activity of soil. The study aimed to reveal the changes in soil quality and provide a reference for the management of bamboo-fungus composite ecosystems by analyzing the effects of *D. indusiata* on the biomass, entropy and stoichiometry imbalance of soil microbia in a *P. edulis* forest. 【Method】 Using the soils of non-planted *D. indusiata* (CK) and those after 0 (T0), 1 (T1) and 2 (T2) years of *D. indusiata* harvest, the relationships among soil microbial biomass, microbial entropy, and soil-microbial stoichiometry imbalance were investigated in different treatments. 【Result】 The results indicated that the soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), soil microbial biomass carbon and nitrogen (MBC, MBN), and soil microbial entropy carbon, nitrogen, phosphorus (q_{MBC} , q_{MBN} , q_{MBP}) in T0, T1, T2 soils were significantly higher than those in the control, whereas the soil total phosphorus (TP) content was significantly lower than

收稿日期 Received: 2021-01-13

修回日期 Accepted: 2021-06-15

基金项目: 浙江省公益计划项目(LGN19C160002); 宁波市科技计划项目(2019C10048, 2019B10020); 浙江省省院合作林业科技项目(2020SY05); 中央财政林业科技推广示范资金项目[(2020)TS 17号]。

第一作者: 夏捷(18404969158@163.com)。* 通信作者: 谢锦忠(jzhxie@163.net), 研究员。

引文格式: 夏捷, 陈胜, 吴一凡, 等. 种植竹荪后毛竹林土壤微生物生物量和微生物熵的动态变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(4): 127-134. XIA J, CHEN S, WU Y F, et al. Dynamic changes of soil microbial biomass and microbial entropy after planting *Dictyophora indusiata* in *Phyllostachys edulis* forests[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(4): 127-134. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202101018.

that in the control. Soil MBC and q_{MBC} gradually decreased with the increasing harvest time. Soil MBN and q_{MBN} initially decreased and then increased slightly, whereas soil SOC content initially decreased and then increased significantly; Soil TN, TP, MBP and q_{MBP} increased initially and then decreased. The TN, TP, MBP and q_{MBP} in T1 soil were significantly higher than those in T0 and T2 soils. The soil-microbial stoichiometry (C_{imb}/N_{imb} , C_{imb}/P_{imb} , N_{imb}/P_{imb}) of T0 had the lowest imbalance compared with the other periods. Soil MBC was positively correlated with MBN and both were negatively correlated with C_{imb}/N_{imb} and C_{imb}/P_{imb} . Soil MBP was positively correlated with C_{imb}/P_{imb} and N_{imb}/P_{imb} . 【Conclusion】 The soil quality of *P. edulis* forests was improved significantly in the short term after planting *D. indusiata*. However, the soil quality of *P. edulis* forests tends to deteriorate with the increasing annual gap after the harvest of *D. indusiata*, and the soil quality is worse than that of *P. edulis* forest without planting *D. indusiata*; The best soil quality in the *P. edulis* forest was observed just after the harvest of *D. indusiata*.

Keywords: *Phyllostachys edulis* forest; *Dictyophora indusiata*; soil microbial biomass (SMB); soil microbial entropy; soil-microbia stoichiometry imbalance

土壤微生物是土壤生命体的重要组成成分,参与土壤系统内的多种生物化学反应^[1]。土壤微生物在土壤系统中占据比例较低,但由于其对环境的变化敏感,能够显著反映土壤系统发生的变化,因此可将土壤微生物参数用作评价土壤质量的指标^[2]。土壤微生物生物量(SMB)是指土壤中体积小于 $5.0 \times 10^3 \mu m^3$ 的生物总量^[3]。土壤微生物生物量随土壤有机质的积累而增加,是表征土壤生态系统中物质循环和能量流动的重要参数^[4-5]。土壤微生物熵主要受土壤有机质质量和含量影响,反映了单位资源所能支持的微生物生物量^[6]。土壤微生物熵通过反映土壤养分及其利用效率的变化来表现土壤生态系统的动态变化,有研究表明,土壤微生物熵越大而土壤养分积累越多时,土壤养分损失越多^[7-8]。因此,微生物熵可用于探究土壤养分的积累和变化。生态化学计量主要用于研究化学元素(主要是碳、氮和磷)的质量平衡对生态交互作用的影响。土壤-微生物化学计量不平衡性可反映土壤微生物与土壤化学组成的差异性,有助于了解土壤与微生物之间的养分动态平衡状态^[3]。研究表明,土壤微生物熵碳随着土壤 N/P(化学计量比,下同)的增加而减小,土壤微生物量氮随着土壤微生物化学计量不平衡性(记为 N_{imb}/P_{imb} 等)的增加而减小,土壤微生物熵磷随着土壤 C/P、N/P 的增加而增加^[9]。同时,微生物熵也会随土壤化学计量不平衡性的增加而降低^[10]。土壤与微生物之间的化学计量不平衡性综合考虑了土壤和微生物两者 C、N、P 化学计量比的变异性,可更准确地衡量植物化学组成与资源化学组成的差异性,化学计量不平衡性越小则资源质量越高,微生物生长效率也越高^[11-12]。因此,探索土壤-微生物 C、N、P 生态化学计量和微生物熵的动态变化,有利于进一步明确土壤与资源的变化特征。

竹荪(*Dictyophora indusiata*)又名竹参、竹蕈等,为自然生长于竹林下的一类珍贵食用菌,其营养丰富,富含大量的氨基酸和多糖等,具有降压、抗癌和延缓衰老等作用^[13]。近年来,竹荪的需求量日益增加,已成为我国重要的食用菌产品^[14]。在竹林下仿野生栽培条件培育竹荪,既有利于充分利用竹林废弃物和林下空间,又可节约栽培成本、实现资源的有效利用。研究表明,竹荪属于大型土生真菌,土壤质量与竹荪产量、品质密切相关^[15]。而在竹荪栽培过程中会对毛竹(*Phyllostachys edulis*)林地土壤产生一定影响,进而影响竹林的生长发育。同时竹荪存在连作障碍,会阻碍竹菌复合经营模式的发展。因此,开展竹荪种植后林地土壤质量变化的研究尤为重要。然而,目前关于林下竹荪栽培的研究主要集中在栽培技术^[16]、产量及品质^[17]和单个生长过程中土壤微生物变化^[18],有关林地土壤质量变化的研究鲜见报道。因此,为了明确种植竹荪对林地土壤的影响,以竹荪收获后不同时间的林地土壤为研究对象,分析土壤微生物生物量、微生物熵的变化规律,探索收获竹荪后不同时间土壤微生物生物量、微生物熵及其与土壤-微生物化学计量参数间的关系,旨在明确竹荪种植后林地及土壤肥力变化及土壤和微生物之间的相互作用,从而为竹荪高质高效培育提供参考,为竹-菌复合生态系统的经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验设计

试验地位于浙江省杭州市富阳区庙山坞实验林场(119°56'~120°02'E, 30°03'~30°06'N),属亚热带季风气候,年平均降水量 1 200 mm,年平均气温 16.9℃,无霜期 237 d。试验地海拔约 80 m,坡度约 15°,东南坡向,为毛竹纯林,立竹度 2 500~

2 600 株/hm²;实行季节性伐竹和留笋养竹,经营比较粗放。

由于试验林地内可供选择平整地面不多,采用随机区组设计进行试验。完全随机区组设计采用 DPS 数据处理系统实现,具体试验安排见图 1。每块样地 20 m×20 m(四周有深 0.5 m 隔离沟),设置 3 个重复,后分别于各试验样地中挑选 1 块样方在对应年份进行竹荪种植实验,样方为 4 m×4 m。种植竹荪时,先在各样地中挖宽 30 cm、深 10 cm 的水平状种植沟,平铺 15 kg/m² 的发酵竹屑基质,厚约 20 cm;接着在基质料面中部挖 10 cm 深沟,将约 30 g 菌块放入基质沟中,每个菌块间隔 6 cm,菌种用量为 1.25 kg/m²(菌种袋规格为 8 cm×6 cm×13 cm);菌块播种好填入基质,并覆盖 5 cm 厚的竹林土块。

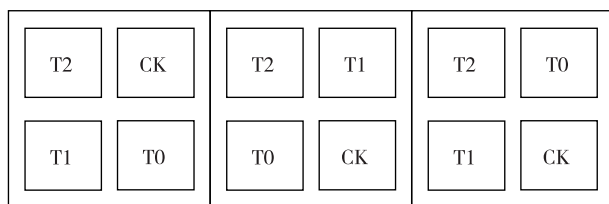


图 1 试验地安排

Fig.1 Experimental arrangement

2018—2020 年进行竹荪种植和收获工作,各年均于当年 8 月底完成竹荪收获,2018 年和 2019 年在竹荪收获后林地土壤不做处理,待至 2020 年 8 月当年竹荪收获完成后于同一时间(2020 年 8 月)进行林地土壤取样。从 2020 年 8 月完成竹荪收获的林地中立刻取样记为 T0(收获与取样同时进行),从 2019 年 8 月完成竹荪收获的林地中取样记为 T1(收获与取样时间间隔 1 a),从 2018 年 8 月完成竹荪收获的林地中取样记为 T2(收获与取样时间间隔 2 a),未种植竹荪的林地于 2020 年 8 月取样记为对照组(CK)。在各样地均铺设美国雨鸟 ESP-RZX 控制器控制的下挂式自动喷雾装置,进行日常水分灌溉。

1.2 土壤取样及指标测定

2020 年 8 月下旬在各样方中分别设置 5 个 1 m×1 m 样方作为取样点,用土钻采集 0~20 cm 土层的土壤,共得 60(3 重复×4 处理×5 样地)份土样。将采集的土样混合均匀后采用四分法保留部分样品作为样地的土壤样品,所有土样带回实验室过 2 mm 筛去除根系、残留基质及石块后保留样品 400 g,取 200 g 土壤样品风干研磨,用于测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量,剩余

200 g 土样置于 4 ℃ 冰箱冷藏保存,用于测定土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBP)含量。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定;土壤全磷含量采用钼锑抗比色法测定;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定^[19]。MBC、MBN、MBP 测定采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法^[20]。

1.3 数据处理

数据均表示为平均值±标准误差,用 Excel 2016、Origin 2018 进行整理和图表制作,在 SPSS 24.0 中进行单因素方差分析(ANOVA),显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。用 Pearson 法对土壤碳氮磷含量、土壤微生物生物量、土壤微生物熵和土壤-微生物化学计量不平衡性进行相关分析,并对以上指标进行主成分分析。其中,土壤-微生物化学计量不平衡性(stoichiometry imbalances,文中以 C_{imb}/N_{mic} 、 C_{mic}/N_{mic} 、 C_{imb}/P_{imb} 、 C_{mic}/P_{mic} 、 N_{imb}/P_{imb} 和 N_{mic}/P_{mic} 表示)用以衡量土壤微生物与土壤化学组成的差异性,化学计量不平衡性越大表明土壤质量越低。各计量参数表示为:C/N 化学计量不平衡性(C_{imb}/N_{imb})=土壤碳氮比(记为 C/N)与微生物生物量碳氮比(C_{mic}/N_{mic})之比;C/P 化学计量不平衡性(C_{imb}/P_{imb})=土壤碳磷比(C/P)与微生物生物量碳磷比(C_{mic}/P_{mic})之比;N/P 化学计量不平衡性(N_{imb}/P_{imb})=土壤氮磷比(N/P)与微生物生物量氮磷比(N_{mic}/P_{mic})之比^[11]。土壤微生物熵碳(q_{MBC})=土壤微生物生物量碳与土壤有机碳含量之比;土壤微生物熵氮(q_{MBN})=土壤微生物生物量氮与土壤氮含量之比;土壤微生物熵磷(q_{MBP})=土壤微生物生物量磷与土壤磷含量之比。

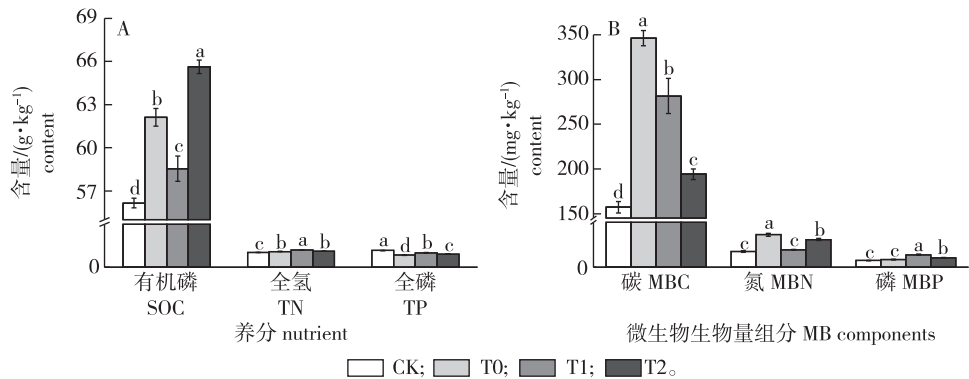
2 结果与分析

2.1 种植竹荪对土壤和土壤微生物生物量碳、氮、磷含量的影响

种植竹荪后林地土壤 C、N、P 含量和微生物生物量变化见图 2。与对照相比,T0、T1 和 T2 处理林地土壤 SOC 和 TN 含量均显著增加,而土壤 TP 含量则显著降低($P<0.05$)。T0、T2 处理 SOC 含量显著高于 T1,分别是后者的 1.06 和 1.12 倍,且前两者间差异显著($P<0.05$)。T1 处理土壤 TN 含量显著高于 T0 和 T2($P<0.05$),是后两者的 1.10 和 1.08 倍,而后两者间差异不显著($P<0.05$)。T1、T2 处理 TP 含量显著高于 T0,分别是后者的 1.18 和 1.10 倍,且前两者间差异显著($P<0.05$)。从林地土壤微生物生物量来看,与对照相比,T0、T1 和 T2 处理林地土壤 MBC 显著升高($P<0.05$),分别

达到对照的 2.20、1.79、1.24 倍。T0、T2 处理土壤 MBN 显著高于对照 ($P<0.05$), 分别是对照的 2.07 和 1.77 倍, T1 处理 MBN 含量与对照组无显著差异 ($P<0.05$)。T1、T2 处理 MBP 含量显著高于对照 ($P<0.05$), 分别是对照的 1.88 和 1.42 倍, 而 T0 处理与对照相比无显著差异 ($P<0.05$)。随竹荪收

获后时间的延长, 土壤 MBC 含量显著降低 ($P<0.05$), T2 处理较 T0 减少了 44.01%。T0 处理土壤 MBN 含量显著高于 T1 和 T2, 分别是后两者的 1.86 和 1.17 倍 ($P<0.05$)。T1、T2 处理 MBP 含量显著高于 T0, 分别是其 1.66 和 1.33 倍, 且前两者间差异显著 ($P<0.05$)。



不同小写字母表示同一指标间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among the same characteristics. The same below.

图 2 不同处理林地土壤 C、N、P 含量和微生物生物量变化

Fig.2 Changes in C, N, P content and microbial biomass of forest soil under different treatments

2.2 种植竹荪对土壤微生物熵和土壤-微生物化学计量不平衡性的影响

不同处理土壤微生物熵和土壤-微生物化学计量不平衡性的变化见表 1。由表 1 可知, T0 和 T1 处理林地土壤 q_{MBC} 均显著高于对照 ($P<0.05$), 分别是对照的 1.99 和 1.72 倍, 而 T2 处理与对照相比无显著差异 ($P<0.05$)。且随着竹荪收获后时间的延长, q_{MBC} 显著降低 ($P<0.05$), T2 处理较 T0 减少 46.86%; T0 处理 q_{MBN} 显著高于 T2 ($P<0.05$), 且两者 q_{MBN} 均显著高于对照和 T1 ($P<0.05$), 其大小顺

序表现为 $T0>T2>CK>T1$; T1、T2 和 T3 处理林地土壤 q_{MBP} 均显著高于对照 ($P<0.05$), 分别是对照的 1.58、2.21、1.79 倍。土壤-微生物化学计量不平衡性 C_{imb}/N_{imb} 以 T2 处理最高, 显著高于 T0、T1 和 CK 处理 ($P<0.05$), T0 处理和 CK 显著高于 T1 处理 ($P<0.05$), 且前两者间无显著差异 ($P<0.05$); C_{imb}/P_{imb} 也以 T2 处理最高, 显著高于 T0、T1 和 CK 处理 ($P<0.05$); 而 N_{imb}/P_{imb} 以 T1 处理最高, 显著高于 T0、T2 和 CK ($P<0.05$), T2 和 CK 处理显著高于 T0 处理 ($P<0.05$), 且前两者间无显著差异 ($P<0.05$)。

表 1 不同处理土壤微生物熵和土壤-微生物化学计量不平衡性的变化特征

Table 1 Variation characteristics of soil microbial entropy and soil-microbial stoichiometry imbalance in different treatments

处理 treatment	q_{MBC}	q_{MBN}	q_{MBP}	C_{imb}/N_{imb}	C_{imb}/P_{imb}	N_{imb}/P_{imb}
CK	2.80±0.13 c	17.04±0.60 c	6.38±0.16 d	6.09±0.21 b	2.28±0.06 c	0.37±0.01 b
T0	5.57±0.19 a	33.10±1.37 a	10.05±0.78 c	5.94±0.05 b	1.80±0.10 d	0.30±0.02 c
T1	4.81±0.26 b	16.01±0.43 c	14.12±1.09 a	3.34±0.27 c	2.95±0.38 b	0.88±0.04 a
T2	2.96±0.09 c	27.71±0.71 b	11.44±0.54 b	9.37±0.52 a	3.87±0.29 a	0.41±0.01 b

2.3 土壤和土壤微生物生物量、微生物熵及其土壤-微生物化学计量不平衡性的相关性

土壤和土壤微生物生物量、微生物熵和土壤-微生物化学计量不平衡性的相关性见表 2。由表 2 可知, SOC 与 TP 呈显著负相关 ($P<0.05$), 与 MBN、 q_{MBN} 、 C_{imb}/N_{imb} 呈显著正相关 ($P<0.05$); TN 与 MBP、 q_{MBP} 、 N_{imb}/P_{imb} 均呈显著正相关 ($P<$

0.05); TP 与 MBC、MBN、 q_{MBC} 、 q_{MBN} 均呈显著负相关 ($P<0.05$)。MBC 与 MBN、 q_{MBC} , MBN 与 q_{MBN} , MBP 与 q_{MBP} 、 N_{imb}/P_{imb} 均分别呈显著正相关 ($P<0.05$)。整体上, C_{imb}/N_{imb} 与 q_{MBC} 呈负相关关系, N_{imb}/P_{imb} 与 MBP、 q_{MBP} 呈正相关关系, 但与 q_{MBN} 、 C_{imb}/N_{imb} 呈负相关关系, 而 C_{imb}/P_{imb} 与以上指标关系均不显著。

表 2 土壤和土壤微生物生物量、微生物熵和土壤-微生物化学计量不平衡性的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of soil and soil microbial biomass, microbial entropy and soil-microbial stoichiometric imbalance

参数 parameter	SOC	TN	TP	MBC	MBN	MBP	q_{MBC}	q_{MBN}	q_{MBP}	C_{imb}/N_{imb}	C_{imb}/P_{imb}
TN	0.208										
TP	-0.769**	-0.415									
MBC	0.203	0.480	-0.751**								
MBN	0.792**	-0.001	-0.890**	0.646*							
MBP	0.077	0.946**	-0.202	0.230	-0.214						
q_{MBC}	0.050	0.487	-0.644*	0.987**	0.419	0.257					
q_{MBN}	0.752**	-0.134	-0.828**	0.487	0.991**	-0.340	0.361				
q_{MBP}	0.339	0.961**	-0.530	0.458	0.134	0.937**	0.443	0.003			
C_{imb}/N_{imb}	0.697*	-0.416	-0.195	-0.450	-0.493	-0.393	-0.579*	0.534	-0.262		
C_{imb}/P_{imb}	0.486	0.389	-0.054	-0.460	-0.047	0.544	-0.523	-0.111	0.499	0.499	
N_{imb}/P_{imb}	-0.298	0.825**	0.121	0.132	-0.543	0.917**	0.214	-0.647*	0.747**	-0.656*	0.324

注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

2.4 土壤和土壤微生物生物量、微生物熵及土壤-微生物化学计量不平衡性的主成分分析

不同处理土壤和土壤微生物各指标主成分分析结果见表 3、表 4。

表 3 不同处理土壤和土壤微生物各指标的特征根、特征向量及贡献率

Table 3 Characteristic polynomial, characteristic vectors and contribution rates of different treatment soils and soil microbial indicators

参数 parameter	PC1	PC2	PC3
SOC	0.150	-0.029	-0.217
TN	0.137	-0.149	0.109
TP	-0.173	-0.070	0.024
MBC	0.133	0.127	0.178
MBN	0.152	0.122	-0.098
MBP	0.098	-0.206	0.086
q_{MBC}	0.118	0.130	0.222
q_{MBN}	0.138	0.147	-0.111
q_{MBP}	0.148	-0.141	0.057
C_{imb}/N_{imb}	-0.033	0.387	0.039
C_{imb}/P_{imb}	-0.044	0.213	0.193
N_{imb}/P_{imb}	-0.031	0.217	-0.195
特征根 characteristic polynomial	5.552	3.940	2.508
贡献率/% contribution rate	46.268	32.835	20.897
累计贡献率/% cumulative contribution rate	46.268	79.103	100.000

由表 3 可以看出,第 1 主成分(PC1)、第 2 主成分(PC2)和第 3 主成分(PC3)的累计贡献率为 100%,能够全部反映指标的信息。其中第 1 主成

分对 MBN、 q_{MBP} 、 q_{MBN} 标准化变量的特征向量值较大,以 MBN 的系数(0.152)最大,反映了竹荪收获后年份对土壤微生物生物量氮和微生物熵氮、磷的影响。在第 2 主成分中,以 C_{imb}/N_{imb} 的系数(0.387)最大,其次为 N_{imb}/P_{imb} 、 C_{imb}/P_{imb} ,反映了竹荪收获后年份对土壤-微生物化学计量不平衡性的影响。在第 3 主成分中,以 q_{MBC} 的系数(0.222)最大,其次为 MBC,而其余变量的特征向量值均较小,反映了收获后年份对土壤微生物生物量碳和微生物熵碳的影响。

结合各指标在主成分中的载荷状况,按主成分模型分别对各处理进行排序(表 4),可以看出,在 PC1、PC2 中,T0 有利于土壤微生物生物量氮和微生物熵氮、磷的积累,CK 处理养分含量最差;在 PC3 中,T1 有利于土壤微生物生物量碳和微生物熵碳积累。综合主成分 PC 值结果显示,T0 处理土壤养分含量、土壤微生物生物量和微生物熵较高,其次为 T1,CK 处理最低。

表 4 不同处理土壤和土壤微生物主成分载荷及综合得分
Table 4 Principal component scores and comprehensive scores of soils and soil microorganisms under different treatments

处理 treatment	PC1	排名 rank	PC2	排名 rank	PC3	排名 rank	PC	综合 排名 rank
T0	0.70	1	1.28	1	0.35	2	0.82	1
T1	0.36	3	-1.06	4	1.00	1	0.03	2
T2	0.42	2	-0.44	3	-1.37	4	-0.24	3
CK	-1.48	4	0.22	2	0.03	3	-0.61	4

3 讨 论

试验地竹荪收获时和收获后 1、2 a 土壤 C、N

含量均显著高于对照,表明土壤 C、N 含量显著升高,这可能由于本实验中竹秆粉碎形成的竹屑经发酵后用作栽培竹荪的基质是林地土壤重要的有机肥源^[21],秸秆含有丰富的营养物质,分解后改善了竹林土壤 C、N 环境。同时,叶片凋落、土壤微生物活动等方式输入竹林土壤系统的 N 素相对较多,使得土壤 C 和 N 含量有所提高。竹荪收获后 1 年林地土壤有机碳含量较刚收获时显著减少,这可能与竹荪栽培过程中对林地表层土壤的团聚体结构造成破坏,使土壤有机碳暴露于地表,加速了土壤有机碳的分解和流失^[22]。竹荪栽培后林地土壤 P 含量变化与 C、N 相反,表现为竹荪收获时和收获后 1、2 a 土壤 P 含量均显著低于对照,这可能一方面是由于竹荪生长吸收了土壤中的 P 元素;另一方面是由于土壤 P 不会像 C、N 那样会随着植物光合作用和微生物固氮作用将大气中的 C、N 不断输入土壤,使得 P 含量呈相反的变化规律^[10]。而收获后 1、2 a 土壤 P 含量较收获时显著升高,这可能由于竹荪生长结束后,林地仍残留竹屑基质,分解后促使土壤 P 含量增加。土壤微生物生物量是植物有效养分的储备库,也是土壤养分转化与循环的驱动力,其对土壤环境因子的变化极为敏感,常被作为衡量土壤微生物生态系统质量的关键指标^[23-24]。本研究发现,竹荪收获时和收获后 1、2 a 土壤微生物生物量碳、氮、磷均显著高于对照,表明种植竹荪与未种植竹荪相比,竹荪栽培过程中的林地开沟和基质添加改善了土壤结构,林地土壤结构相对变好,同时水分管理措施改善了土壤温湿度,促使土壤微生物活性增大^[25];另一方面,竹屑基质分解增加了土壤有机质和养分含量,土壤微生物活动和繁殖可利用碳源、氮源增加,为微生物的生命活动塑造有利的生态环境,从而提高土壤微生物生物量碳、氮、磷^[26-27]。但随着竹荪收获后时间的延长土壤微生物生物量碳含量则显著降低,分析认为,在竹荪栽培过程中对林地土壤进行的浅翻耕破坏了表层土壤团聚体,进而使土壤表层微生物生物量随着竹荪收获后时间的延长,呈现降低趋势。土壤微生物对土壤 N 素的循环有重要贡献^[28],竹荪收获后 1、2 a 土壤微生物生物量氮均较收获时显著降低,表明随着竹荪收获后时间的延长栽培竹荪对林地土壤产生的影响效应逐渐变小。土壤微生物生物量的减少表明参与土壤氮素循环的微生物活性变弱,因此,土壤微生物对土壤 N 素矿化与固持的作用减弱^[3],土壤中植物和微生物对土壤 N 素的利用效率降低,而土壤全氮含量得到提高。竹

荪收获后 1、2 a 土壤微生物生物量磷则显著升高,这可能是与土壤微生物生物量磷相对较高的周转速率有关。本实验中,随着竹荪收获后时间的延长,土壤微生物生物量碳、磷比值逐渐减小,说明土壤微生物生物量碳、磷比值越小,土壤微生物中含磷量越高,在周转过程中能够通过矿化和转化作用释放的磷越多^[29]。

土壤微生物熵主要受土壤有机质的数量和质量影响,可以从微生物学的角度揭示土壤肥力差异机制^[30]。本研究中,竹荪收获时和收获后 1、2 a 土壤微生物熵(q_{MBC} 、 q_{MBN} 、 q_{MBP})总体均显著高于对照,这是因为种植竹荪有利于改善林地的土壤生态环境,使土壤微生物活性增强,进而增加了土壤微生物生物量。土壤有机碳的活性程度越高,土壤中有有机碳向微生物生物量转化的速率加快,进而增加了土壤微生物熵值^[31-32]。在收获时和收获后 1、2 a 中,收获时的土壤微生物熵(q_{MBC} 、 q_{MBN})相对较高,表明收获时有机质积累和土壤微生物代谢速率较收获后 1、2 a 快。分析认为栽培竹荪的竹屑基质具有高碳氮比,以及竹荪的生长发育过程在短期内可促使土壤微生物活动增强,进而加快了土壤有机质积累效率及生物代谢速率。本研究中,竹荪收获时土壤-微生物的化学计量不平衡性(C_{imb}/P_{imb} 、 C_{imb}/N_{imb} 、 N_{imb}/P_{imb})总体显著低于对照,表明竹荪收获时土壤质量变好,微生物的生长效率明显升高,而 C_{imb}/P_{imb} 、 C_{imb}/N_{imb} 、 N_{imb}/P_{imb} 却随着收获后时间的延长明显升高,表明土壤质量随着竹荪收获后时间的延长有劣变的趋势。测定认为竹荪收获后 1 a 和 2 a 林地土壤质量较未种植竹荪样地差。

土壤碳含量与土壤微生物生物量氮呈显著正相关,这可能意味着高含量土壤有机碳可能为土壤微生物生长创造良好的土壤物理环境和养分环境,促进微生物 N 素养分积累^[33],土壤磷含量与土壤微生物生物量碳、氮均呈显著负相关,表明微生物碳、氮的吸收受到土壤磷元素的负限制,也即土壤微生物生物量随土壤养分的变化而变化。土壤微生物生物量碳、氮的升高引起土壤-微生物化学计量不平衡性的降低,且土壤微生物以调节自身生物量的动态变化的方式适应土壤-微生物化学计量不平衡性的变化。本研究通过主成分分析反映出竹荪收获时较收获后 1、2 a 能维持最优的土壤养分,物质循环最佳。毛竹林下栽培竹荪短期内提高了林地土壤质量,这种利好趋势维持时间短,随着竹荪收获后时间的延长,林地土壤质量变差,而关于林地土壤质量长期的变化走势尚需进一步研究。

参考文献(reference):

- [1] PASCUAL J A, GARCIA C, HERNANDEZ T, et al. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32 (13): 1877–1883. DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00161-9.
- [2] CARAVACA F, ALGUACIL M M, FIGUEROA D, et al. Re-establishment of *Retama sphaerocarpa* as a target species for reclamation of soil physical and biological properties in a semiarid Mediterranean area [J]. *For Ecol Manag*, 2003, 182 (1/2/3): 49–58. DOI: 10.1016/S0378-1127(03)00067-7.
- [3] 吴秀芝, 刘秉儒, 阎欣, 等. 荒漠草地土壤微生物生物量和微生物熵对沙漠化的响应 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (8): 2691–2698. WU X Z, LIU B R, YAN X, et al. Response of soil microbial biomass and microbial entropy to desertification in desert grassland [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, 30 (8): 2691–2698. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201908.009.
- [4] ROGERS B F, TATE R L III. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in pineland soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33 (10): 1389–1401. DOI: 10.1016/S0038-0717(01)00044-X.
- [5] 魏媛, 张金池, 喻理飞. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物生物量碳的变化 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32 (5): 71–75. WEI Y, ZHANG J C, YU L F. Changes of soil microbial biomass carbon along successional processes of degraded Karst vegetation [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, 32 (5): 71–75. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2008.05.016.
- [6] SRIVASTAVA S C, SINGH J S. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: effects of alternate land-uses and nutrient flux [J]. *Soil Biol Biochem*, 1991, 23 (2): 117–124. DOI: 10.1016/0038-0717(91)90122-Z.
- [7] ANDERSON T H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2003, 98 (1/2/3): 285–293. DOI: 10.1016/S0167-8809(03)00088-4.
- [8] SPARLING G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. *Soil Res*, 1992, 30 (2): 195. DOI: 10.1071/sr9920195.
- [9] 胡宗达, 刘世荣, 刘兴良, 等. 川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤-微生物生物量及其化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2021, 41 (12): 4900–4912. HU Z D, LIU S R, LIU X L, et al. Soil and soil microbial biomass contents and C:N:P stoichiometry at different succession stages of natural secondary forest in subalpine area of western Sichuan, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, 41 (12): 4900–4912. DOI: 10.5846/stxb202008202170.
- [10] 周正虎, 王传宽. 生态系统演替过程中土壤与微生物 碳氮磷化学计量关系的变化 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40 (12): 1257–1266. ZHOU Z H, WANG C K. Changes of the relationships between soil and microbes in carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry during ecosystem succession [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, 40 (12): 1257–1266. DOI: 10.17521/cjpe.2016.0218.
- [11] MOOSHAMMER M, WANEK W, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, et al. Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources [J]. *Front Microbiol*, 2014, 5: 22. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00022.
- [12] MÜLLER 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. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.12.015.
- [13] 冯杰, 冯娜, 刘艳芳, 等. 面向规模化应用的竹荪多糖液态深层发酵工艺优化 [J]. *食品科学*, 2020, 41 (2): 181–187. FENG J, FENG N, LIU Y F, et al. Optimization of medium components for large-scale production of intracellular polysaccharides from *Dictyophora indusiata* in submerged fermentation [J]. *Food Sci*, 2020, 41 (2): 181–187. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20181101-014.
- [14] 彭超, 艾文胜, 谢韵帆, 等. 竹基质与菌种密度对棘托竹荪产量及营养品质的影响 [J]. *热带作物学报*, 2020, 41 (6): 1100–1107. PENG C, AI W S, XIE Y F, et al. Effect of bamboo sawdust substrate and strain planting density to yield and nutritional quality of *Dictyophora echinorolvata* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2020, 41 (6): 1100–1107. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2020.06.005.
- [15] 苏德伟, 林辉, 林春梅, 等. 不同生长时期竹荪覆土层土壤微生物、理化性质及其酶活性的变化研究 [J]. *西南农业学报*, 2014, 27 (3): 1170–1174. SU D W, LIN H, LIN C M, et al. Study on changes of microorganisms, physicochemical property and enzyme activities about soil over *Dictyophora indusiata* at different growth stages [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2014, 27 (3): 1170–1174. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2014.03.066.
- [16] 卢鹏, 谢锦忠, 童龙, 等. 麻竹林下竹荪仿野生种植关键技术研究 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40 (4): 177–182. LU P, XIE J Z, TONG L, et al. Study on the wild imitation cultivation technique for *Dictyophora indusiata* in *Dendrocalamus latiflorus* stands [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, 40 (4): 177–182. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.04.028.
- [17] 白会超. 不同竹基料配方对竹荪产量和品质影响的研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2015. BAI H C. The study of effects of different bamboo base formula on the yield and quality of *Dictyophora* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.
- [18] 常颖萃, 蒋文静, 石妍, 等. 竹荪不同生育期土壤微生物动态变化 [J]. *热带作物学报*, 2013, 34 (7): 1228–1231. CHANG Y C, JIANG W J, SHI Y, et al. Dynamic change of soil microorganisms at various growing stage of *Dictyophora* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2013, 34 (7): 1228–1231.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [20] 张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等. 云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布 [J]. *生态学报*, 2012 (7): 2056–2065. ZHANG L Q, PENG W X, SONG T Q, et al. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a Karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012 (7): 2056–2065. DOI: 10.5846/stxb201108171204.
- [21] SHAO Y H, XIE Y X, WANG C Y, et al. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dry-land regions of north China [J]. *Eur J Agron*, 2016, 81: 37–45. DOI: 10.1016/j.eja.2016.08.014.
- [22] 赵睿宇, 李正才, 王斌, 等. 毛竹林地表稻草覆盖后翻耕对土壤有机碳的影响 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36 (8): 2118–2126. ZHAO R Y, LI Z C, WANG B, et al. Effects of straw mulching and scarification on soil labile organic carbon pool in a *Phyllostachys edulis* plantation [J]. *Chin J Ecol*, 2017, 36 (8): 2118–2126. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201708.016.

- [23] 徐阳春,沈其荣,冉炜.长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J].土壤学报,2002,39(1):83-90. XU Y C, SHEN Q R, RAN W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping[J]. Acta Pedol Sin, 2002, 39(1): 83-90. DOI: 10.11766/trxb200103110113.
- [24] SPEDDING T A, HAMEL C, MEHUIJS G R, et al. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems[J]. Soil Biol Biochem, 2004, 36(3): 499-512. DOI: 10.1016/j.soilbio.2003.10.026.
- [25] 汤宏,沈健林,张杨珠,等.秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J].水土保持学报, 2013, 27(1): 240-246. TANG H, SHEN J L, ZHANG Y Z, et al. Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field[J]. J Soil Water Conserv, 2013, 27(1): 240-246. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2013.01.045.
- [26] 徐华勤,肖润林,宋同清,等.稻草覆盖与间作三叶草对丘陵茶园土壤微生物群落功能的影响[J].生物多样性, 2008, 16(2): 166-174. XU H Q, XIAO R L, SONG T Q, et al. Effects of mulching and intercropping on the functional diversity of soil microbial communities in tea plantations[J]. Biodivers Sci, 2008, 16(2): 166-174. DOI: 10.3321/j.issn:1005-0094.2008.02.009.
- [27] 张奇,陈黎,陈效民,等.不同深度秸秆还田对黄棕壤氮素和微生物生物量碳氮的影响[J].水土保持通报, 2019, 39(2): 56-61. ZHANG Q, CHEN C, CHEN X M, et al. Effects of straw returning to different soil depths on soil nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen in yellow brown soil[J]. Bull Soil Water Conserv, 2019, 39(2): 56-61. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.009.
- [28] SCHNÜRER J, ROSSWALL T. Mineralization of nitrogen from ^{15}N labelled fungi, soil microbial biomass and roots and its uptake by barley plants[J]. Plant Soil, 1987, 102(1): 71-78. DOI: 10.1007/BF02370903.
- [29] 崔纪超,毛艳玲,杨智杰,等.土壤微生物生物量磷研究进展[J].亚热带资源与环境学报, 2008, 3(4): 80-89. CUI J C, MAO Y L, YANG Z J, et al. Advances in soil microbial biomass phosphorus[J]. J Subtrop Resour Environ, 2008, 3(4): 80-89. DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2008.04.011.
- [30] 任天志.持续农业中的土壤生物指标研究[J].中国农业科学, 2000, 33(1): 68-75. REN T Z. Soil bioindicators in sustainable agriculture[J]. Sci Agric Sin, 2000, 33(1): 68-75.
- [31] 唐海明,李超,肖小平,等.有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J].应用生态学报, 2019, 30(4): 1335-1343. TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Effects of different manure nitrogen input ratio on rhizosphere soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial quotient in double-cropping rice field[J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(4): 1335-1343. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201904.014.
- [32] SINGH J S, RAGHUBANSHI A S, SINGH R S, et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna [J]. Nature, 1989, 338: 499-500. DOI: 10.1038/338499a0.
- [33] 陈安娜,王光军,陈婵,等.亚热带不同林龄杉木林叶-根-土氮磷化学计量特征[J].生态学报, 2018, 38(11): 4027-4036. CHEN A N, WANG G J, CHEN C, et al. Variation in the N and P stoichiometry of leaf-root-soil during stand development in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China[J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(11): 4027-4036. DOI: 10.5846/stxb201707141278.

(责任编辑 郑琰琰 孟苗婧)