

## 土壤氮与微生物调控对毛竹和日本柳杉生长的影响 ——毛竹扩张潜在机制

张茜<sup>1</sup> 方海富<sup>1</sup> 赵红<sup>2</sup> 申家成<sup>2</sup> 刘亮英<sup>1</sup> 徐昕彤<sup>1</sup> 张令<sup>1\*</sup>

(1. 江西农业大学林学院, 亚热带森林资源培育江西省重点实验室, 南昌 330045; 2. 江西省交投养护科技集团有限公司, 南昌 330200)

**摘要** 毛竹(*Phyllostachys edulis*)向周边林分扩张影响植物和土壤稳定性, 而其成功扩张机制尚不明确。通过研究不同氮形态和土壤微生物对毛竹和日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)生长的影响, 揭示全球变化背景下毛竹扩张的营养与微生物机制。该研究采用盆栽试验, 设置 $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 氮输入处理(对照, Con; 铵态氮, N1, 施用硫酸铵溶液; 硝态氮, N2, 施用硝酸钾溶液), 并调控土壤微生物群落(对照, Con; 细菌抑制, B, 施用 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 链霉素溶液; 真菌抑制, F, 施用 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 扑海因溶液), 探讨单一和混合种植下毛竹和日本柳杉幼苗对氮输入和微生物的响应。结果表明: 相比于对照, 无论在单一种植还是混合种植下, 氮输入可显著提高毛竹和日本柳杉幼苗的生物量和苗高, 但显著降低根冠比。微生物处理中, 在2种植模式下, 细菌和真菌抑制均降低2个物种的生物量和苗高( $P<0.01$ ), 植物生长受限。与对照相比, 细菌抑制下毛竹和日本柳杉生物量分别降低13.93%和11.57%, 苗高分别降低9.41%和4.56%; 真菌抑制下生物量分别降低15.84%和10.46%, 苗高分别降低6.90%和3.20%。与单一种植相比, 混合种植显著提高毛竹生物量和苗高, 但同时将毛竹和日本柳杉根冠比分别降低6.01%和5.77%( $P<0.05$ ), 混合种植下毛竹表现出较强的生长优势。氮输入处理中, 与单种日本柳杉相比, 单种毛竹和混合种植下土壤有机碳和全氮含量显著降低。N1、N2形态氮输入均显著降低各种种植模式下土壤pH, 混合种植土壤pH高于单一种植。在全球变化背景下, 氮沉降导致的生态系统氮输入可能与毛竹扩张相互作用, 形成正反馈, 进而促进毛竹成功扩张。随着氮沉降加剧, 土壤养分有效性及土壤微生物群落通过促进植物养分吸收和资源分配, 促使植物竞争能力增强, 导致毛竹向周边林分成功扩张。

**关键词** 日本柳杉; 氮输入; 微生物调控; 毛竹扩张

中图分类号: S718.5 文献标志码: A doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2025.05.010

## The Effects of Soil Nitrogen and Microbial Community on Growth of Moso Bamboo and Japanese Cedar Seedlings: Potential Mechanisms of Bamboo Expansion

ZHANG Xi<sup>1</sup> FANG Haifu<sup>1</sup> ZHAO Hong<sup>2</sup> SHEN Jiacheng<sup>2</sup> LIU Liangying<sup>1</sup> XU Xintong<sup>1</sup> ZHANG Ling<sup>1\*</sup>

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2. Jiangxi Communications Investment Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanchang 330200)

**Abstract** The expansion of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) into adjacent forest stands affects plant and soil stability, but the mechanism underlying its successful expansion remains unclear. By investigating the effects of different nitrogen forms and microbes on growth of moso bamboo and Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*), the nutrient and microbial mechanisms of moso bamboo expansion under the background of global change were revealed. In this study, a pot experiment was conducted. Nitrogen addition treatments of  $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  were set up (control, Con; ammonium nitrogen, N1, with ammonium sulfate ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) solution applied; nitrate nitrogen, N2, with potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ ) solution applied), and the soil microbial community was regulated (control, Con; bacterial inhibition, B, with  $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  streptomycin solution applied; fungal inhibition,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31770749); 江西省科技厅科技项目(2022H0065)。

第一作者简介: 张茜(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环研究。

\* 通信作者: E-mail: lingzhang09@126.com。

收稿日期: 2024年11月21日。

F, with  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  iprodione solution applied). The responses of moso bamboo and Japanese cedar seedlings to nitrogen addition and microorganisms under single and mixed plantings were explored. The results showed that compared to the control, biomass and seedling height of moso bamboo and Japanese cedar significantly increased by nitrogen addition under monoculture and mixed planting, while the root-to-shoot ratio significantly decreased. In microbial treatments, both bacterial and fungal inhibition significantly reduced the biomass and height of both species ( $P < 0.01$ ), indicating growth limitations. Compared to the control, bacterial inhibition reduced biomass by 13.93% and 11.57%, and height by 9.41% and 4.56% for moso bamboo and Japanese cedar, respectively. Fungal inhibition resulted in reductions of 15.84% and 10.46% in biomass and 6.90% and 3.20% in height for moso bamboo and Japanese cedar, respectively. Compared to monoculture, mixed planting significantly increased the biomass and height of moso bamboo while reducing the root-to-shoot ratio of both species by 6.01% and 5.77% ( $P < 0.05$ ), respectively. Moso bamboo demonstrated stronger growth dominance under mixed planting. In nitrogen addition treatments, significant reductions in soil organic carbon and total nitrogen were observed under monoculture of Japanese cedar compared to monoculture of moso bamboo and mixed planting. Both N1 and N2 nitrogen forms significantly decreased soil pH across planting systems, with soil pH in mixed planting being higher than in monoculture. Under the context of global change, nitrogen deposition resulting from ecosystem nitrogen additions may interact with moso bamboo expansion to form a positive feedback loop, further promoting its successful expansion. With intensified nitrogen deposition, soil nutrient availability and soil microbial communities will enhance plant competitive ability by promoting nutrient absorption and resource allocation, leading to the successful expansion of moso bamboo into adjacent forest stands.

**Key words** Japanese cedar; nitrogen addition; microbial regulation; moso bamboo expansion

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 是我国栽培面积最大、用途广泛的竹种, 主要分布在我国南方亚热带地区, 日本、北美和朝鲜等均有引种栽培<sup>[1-2]</sup>。毛竹根茎繁殖能力强, 可以通过地下竹鞭不断向邻近森林蔓延, 在林分中形成扩张现象, 进而形成混交林甚至毛竹纯林<sup>[3-4]</sup>。日本柳杉 (*Cryptomeria japonica*) 作为温带针叶林的一种高大乔木, 是我国重要的造林树种, 在我国南方海拔 800 m 以上的山地有分布, 表现出较强的生长优势和抗逆性<sup>[5]</sup>。近年来, 高海拔地带大量毛竹林向日本柳杉林扩张, 引发了多方面的生态问题, 包括土壤肥力下降<sup>[6-8]</sup>、土壤性质改变<sup>[9-10]</sup>、植物多样性减少<sup>[11-12]</sup>和微生物群落结构破坏<sup>[13]</sup>等。研究<sup>[14-15]</sup>表明, 外源氮输入和特定微生物类群的响应可能是毛竹种群扩张的重要驱动因素。因此, 在氮沉降加剧和土壤微生物变化背景下, 探究不同种植模式对毛竹和日本柳杉生长及土壤养分的影响, 对于有效控制毛竹扩张具有重要意义。

氮是植物生长所需的重要元素, 其中, 铵态氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 和硝态氮 ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) 是植物根系可以直接吸收的主要氮形态, 不同植物类型对 2 种氮素的吸收偏好存在差异<sup>[16]</sup>。前人<sup>[17-18]</sup>研究表明: 毛竹是典型的“喜铵厌硝”植物, 不同形态的氮输入对毛竹生长发育产生显著影响。刘宇馨等<sup>[19]</sup>研究发现, 土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度提高有利于毛竹幼苗的生长及提

高种间竞争优势, 尤其是在  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为  $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 竞争优势最显著。邹欢欢等<sup>[20]</sup>研究显示,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  输入会干扰毛竹幼苗生长, 随着土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度提高, 毛竹根长、根尖数量、根体积、根表面积均呈显著下降趋势。此外, 土壤氮输入在调控植物资源分配上也发挥重要作用。“资源可利用性增强”假说认为, 某一群落内资源可利用水平增加会导致外来植物入侵该群落的可能性增加<sup>[21-22]</sup>。Ren 等<sup>[23]</sup>研究指出, 高氮沉降条件下加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis*) 通过增加根生物量、减少叶生物量来提高资源获取能力, 增强竞争优势。Zou 等<sup>[24]</sup>研究表明, 部分入侵植物相比于原产地植物具有较强的氮吸收速率, 这意味着氮沉降的加剧可能会加剧植物入侵<sup>[25-26]</sup>。由此可见, 毛竹扩张过程与土壤氮输入有密切关系。土壤微生物是生态系统不可或缺的部分, 在土壤养分循环中扮演重要角色<sup>[27]</sup>。土壤细菌和真菌作为土壤微生物的主要类群, 其丰度和多样性受土壤性质和环境因子的直接影响<sup>[28]</sup>。严淑娴等<sup>[29]</sup>比较分析毛竹林和杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林土壤微生物特征时发现, 毛竹林土壤细菌和真菌总操作分类单元 (OTU) 和特有 OTU 数量远高于杉木林和阔叶林, 毛竹林土壤细菌和真菌群落结构对土壤有效磷含量、速效钾含量及 pH 均表现为正响应。土壤细菌和真菌对植物生长和资源分配意义重大<sup>[30-31]</sup>。已

有研究<sup>[32-33]</sup>表明,植物在生长过程中能够与土壤有益微生物结合形成共生体,促进根系发育,提高土壤氮、磷养分利用率。在氮沉降背景下,通过调节土壤细菌和真菌群落,研究毛竹与日本柳杉生长和土壤养分变化,有利于深入理解气候变化下日本柳杉林毛竹扩张的生态效应。

毛竹扩张现象在世界多地已有报道,其对生态系统造成的影响不容忽视。本研究旨在探讨毛竹向日本柳杉林扩张现象及潜在机制。目前,关于毛竹扩张对森林碳库<sup>[34]</sup>和生物多样性<sup>[35]</sup>的影响已有较多报道,而氮输入和土壤微生物调控对毛竹和日本柳杉生长及土壤养分的影响鲜见报道。基于此,本研究采用盆栽控制试验,以毛竹和日本柳杉为研究对象,通过调控不同形态氮输入(对照、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )和土壤微生物群落(细菌和真菌),探究不同种植模式下毛竹和日本柳杉的生长响应,以揭示全球变化背景下毛竹向日本柳杉林成功扩张的机制,研究结果可为毛竹扩张预测和科学评估提供基础数据,同时为科学管控毛竹扩张提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验土壤取自江西农业大学科技园(28°45' N, 115°50' E),采集0~20 cm土层土壤(土壤为裸土),移除石块和其他杂物,过2 mm筛备用。土壤有机碳质量分数为(14.41±2.19)  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮质量分数为(1.33±0.19)  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数为(1.12±0.18)  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数为(1.24±0.42)  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷质量分数为(0.32±0.03)  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,pH为5.26±0.01。

研究开始前,在25 °C条件下用蒸馏水对毛竹和日本柳杉种子浸种48 h,并用0.1%  $\text{KMnO}_4$ 溶液消毒4 h,以促进种子萌发和育苗。待幼苗生长至适合移栽时,选择苗高相近的幼苗(毛竹平均苗高12 cm,日本柳杉平均苗高9 cm)移栽于1.2 L塑料花盆。研究自2023年5月开始,同年10月底结束,试验期间各处理管理方式一致,根据气候状况和土壤干燥情况定期补水,保证植株正常生长,无其他施肥处理。

### 1.2 试验设计

该试验采用全因子完全交互设计。试验因素包括3种植植模式(单种日本柳杉、单种毛竹和两

者混合种植)×3种氮输入处理(Con、N1和N2)×2种细菌处理(Con和B)×2种真菌处理(Con和F),每种处理重复5次,共180盆幼苗。使用硫酸铵溶液和硝酸钾溶液模拟8  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 氮输入,每次加入5 mL溶液(相当于0.03  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。用5 mL 3  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 链霉素溶液实现细菌抑制,用5 mL 1  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 扑海因溶液实现真菌抑制<sup>[36-37]</sup>,对照土壤施用等体积的去离子水。细菌和真菌处理分别在7月下旬和8月下旬进行,共2次。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 幼苗生长指标测定

10月下旬试验结束时,测定幼苗生长指标。分别在试验初始和结束时测量日本柳杉和毛竹幼苗苗高。试验结束后,将幼苗整株取出带回实验室,分离地上部(茎、叶)和地下部(根),清洗泥沙后,放入烘箱杀青(105 °C,30 min),65 °C烘干至恒质量,称量生物量并计算根冠比。

#### 1.3.2 土壤样品测定

采用重铬酸钾-硫酸外加热法<sup>[38]</sup>测定土壤有机碳(TOC)含量;采用半微量凯氏消化法<sup>[38]</sup>测定土壤全氮(TN)和全磷(TP)含量;采用2  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KCl溶液浸提土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,取过滤液待测<sup>[38]</sup>;采用钼锑抗比色法<sup>[38]</sup>测定TP含量;使用全自动化学间断分析仪(Smart Chem 200, Westco, Rome, Italy)<sup>[39]</sup>测定TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量;采用水浸提酸度计法<sup>[40]</sup>测定(水土比为2.5:1)土壤pH。

### 1.4 数据处理

采用4因素方差分析(Four-way ANOVAs)评估种植模式、氮输入、细菌抑制剂处理和真菌抑制剂处理对植物生物量、苗高、根冠比和土壤化学性质(TOC、TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和pH)的影响。使用JMP 13.0 (Gary NC USA)软件进行统计分析,显著水平 $\alpha=0.05$ ,采用Tukey's HSD法进行多重比较,数据采用均值±标准误(means±SE)的形式。采用Origin 2018软件绘图,利用Excel 2010制表。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮输入、微生物调控及种植模式对日本柳杉幼苗生长的影响

氮输入、微生物调控及种植模式对日本柳杉幼苗生长产生不同程度的影响(表1)。与对照相比,N1和N2处理下日本柳杉幼苗生物量分别提高45.76%和44.28%( $P<0.001$ ;图1A),而细菌和真菌

抑制剂对日本柳杉幼苗生物量均具有负效应,分别降低 11.57% 和 10.46% ( $P<0.01$ ; 图 1B、1C)。就苗高而言,与对照相比,氮输入具有显著促进作用,N1 和 N2 处理下日本柳杉苗高从 9.51 cm 分别增长到 10.31 cm 和 10.75 cm,分别提高 8.39% 和 13.04%,且 N2 处理促进作用显著高于 N1 处理 ( $P<0.001$ ; 图 1D)。细菌和真菌抑制剂处理及交互作

用对苗高均具有负效应 ( $P<0.01$ ; 图 1E、1F)。在生物量分配上,N1、N2 处理及真菌抑制下日本柳杉根冠比较对照分别降低 8.18%、7.07% 和 7.98% ( $P<0.01$ ; 图 1G、1H)。与单一种植相比,混合种植模式下日本柳杉幼苗根冠比从 0.94 降低到 0.89,降低 5.77% ( $P<0.05$ ; 图 1I)。

表 1 氮输入、微生物调控和种植模式对日本柳杉生物量、苗高及根冠比的影响方差分析

Table 1 Effects of nitrogen input, microbial regulation and planting patterns on biomass, plant height and root/shoot ratio of Japanese cedar in ANOVAs

处理 Treatments	自由度 $d_f$	生物量 Biomass		苗高 Plant height		根冠比 Root/shoot ratio	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
N	2	39.88	<b>&lt;0.000 1</b>	37.48	<b>&lt;0.000 1</b>	7.76	<b>0.000 8</b>
B	1	11.28	<b>0.001 1</b>	16.06	<b>0.000 1</b>	3.01	0.085 8
F	1	9.12	<b>0.003 2</b>	7.83	<b>0.003 2</b>	18.38	<b>&lt;0.000 1</b>
P	1	0.82	0.367 3	0.01	0.921 8	9.41	<b>0.022 8</b>
N×B	2	0.16	0.848 2	0.71	0.493 0	1.49	0.230 9
N×F	2	0.02	0.982 7	1.34	0.267 1	2.84	0.063 2
B×F	1	0.14	0.706 7	10.01	<b>0.002 1</b>	1.25	0.267 0
N×B×F	2	0.15	0.859 1	0.46	0.632 1	0.45	0.640 3
N×P	2	0.51	0.603 6	0.14	0.867 3	0.09	0.915 9
B×P	1	0.01	0.988 9	0.89	0.348 5	0.13	0.715 3
F×P	1	0.01	0.910 1	0.06	0.811 6	0.01	0.977 6
N×B×P	2	0.14	0.871 4	1.24	0.294 0	0.84	0.434 0
N×F×P	2	0.29	0.749 3	0.17	0.841 1	0.02	0.985 1
B×F×P	1	0.04	0.857 2	0.01	0.966 4	0.03	0.873 6
N×B×F×P	2	0.09	0.915 9	0.08	0.926 4	0.39	0.677 2

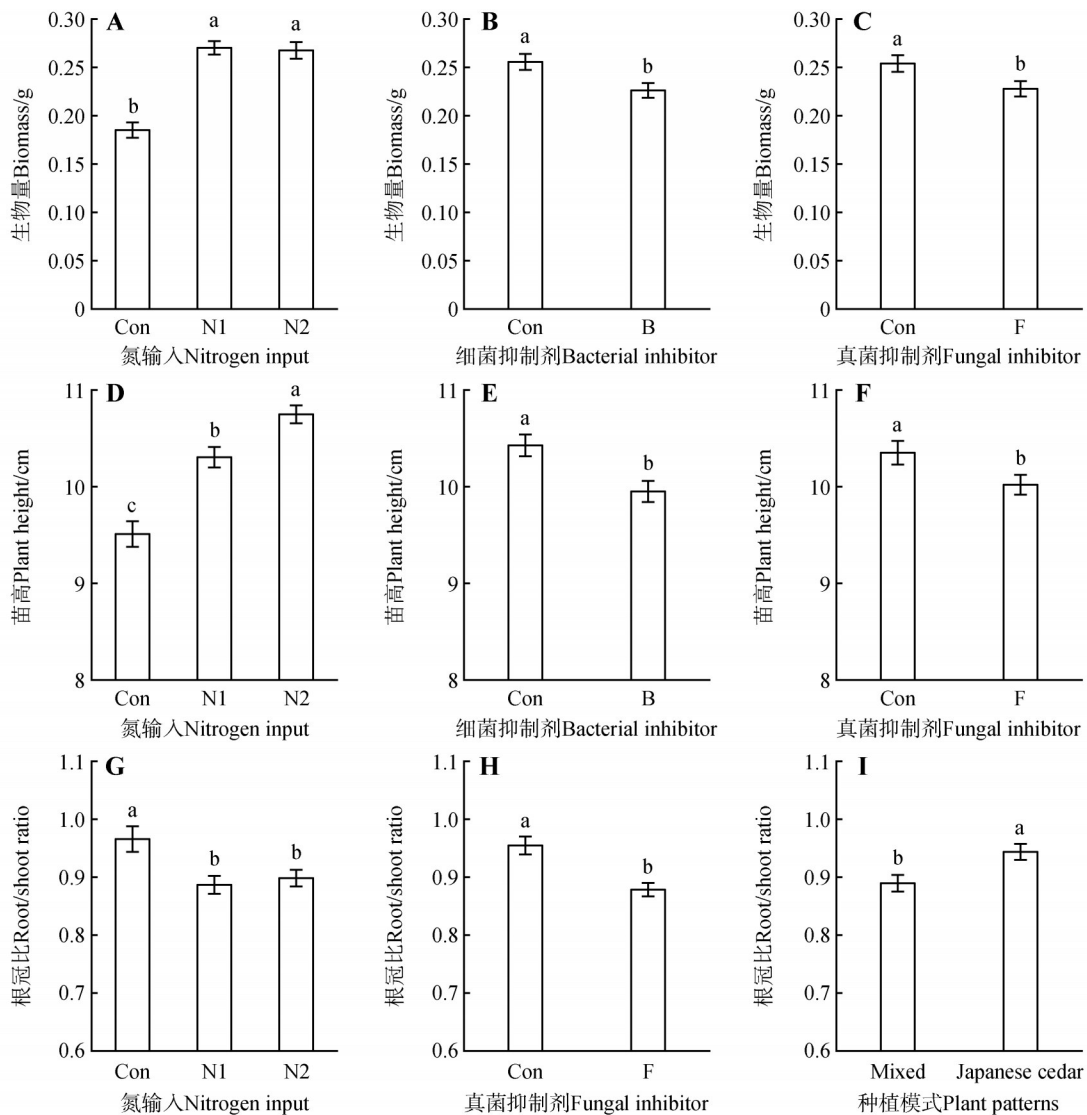
注: N. 氮输入; B. 细菌抑制剂; F. 真菌抑制剂; P. 种植模式; 显著结果 ( $P<0.05$ ) 以粗体形式表示。

Note: N. Nitrogen input; B. Bacterial inhibitors; F. Fungal inhibitors; P. Plant patterns; significant results ( $P<0.05$ ) were shown by the bold.

## 2.2 氮输入、微生物调控及种植模式对毛竹幼苗生长的影响

氮输入、微生物调控及种植模式对毛竹幼苗生长有显著影响(表 2)。在生物量方面,与对照相比,氮输入显著增加毛竹幼苗生物量,在 N1 和 N2 处理下分别提高 34.86% 和 37.29% ( $P<0.001$ ; 图 2A)。相反,细菌和真菌抑制剂处理对毛竹幼苗生物量均具有显著负效应,分别降低 13.93% 和 15.84% ( $P<0.01$ ; 图 2B、2C)。混合种植模式下毛竹幼苗生物量显著高于单一种植模式,生物量增大 10.59% ( $P<0.05$ ; 图 2D)。在苗高方面,与对照相比,N1 和 N2 处理下毛竹苗高分别增加 2.56 cm

和 2.99 cm,促进作用十分显著 ( $P<0.001$ ; 图 2E); 而细菌和真菌抑制剂处理下苗高分别降低 9.41% 和 6.90% ( $P<0.001$ ; 图 2F、2G); 混合种植模式下毛竹苗高较单一种植模式增加 9.78% ( $P<0.001$ ; 图 2H)。在根冠比方面,与对照相比,氮输入、细菌和真菌抑制剂处理对毛竹根冠比均具有显著负效应,而单一种植模式下毛竹幼苗根冠比显著高于混合种植模式。N1 和 N2 输入下毛竹根冠比分别降低 8.00% 和 7.07% ( $P<0.001$ ; 图 2I),细菌和真菌抑制剂处理下分别降低 4.16% 和 8.62% ( $P<0.05$ ; 图 2J、2K),而单一种植模式下根冠比提高 6.01%,达到了 0.95 ( $P<0.05$ ; 图 2L)。



Con. 对照; N. 氮输入; N1.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; N2.  $\text{KNO}_3$ ; B. 细菌抑制剂; F. 真菌抑制剂。不同小写字母表示处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

Con. Control; N. Nitrogen input; N1.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; N2.  $\text{KNO}_3$ ; B. Bacterial inhibitors; F. Fungal inhibitors. Different lowercase letters indicated significant difference between treatments at  $P < 0.05$ .

图1 氮输入和微生物调控对日本柳杉生物量(A、B、C)、苗高(D、E、F)及氮输入、真菌抑制剂和种植模式对根冠比(G、H、I)的影响

Fig.1 Effects of nitrogen input and microbial regulation on biomass (A, B, C), plant height (D, E, F), as well as the effects of nitrogen input, fungal inhibitors, and planting patterns on root/shoot ratio (G, H, I) of Japanese cedar

### 2.3 氮输入、微生物调控及种植模式对日本柳杉和毛竹土壤养分的影响

氮输入、微生物调控及种植模式对日本柳杉和毛竹土壤理化性质均产生不同程度的影响。方差分析表明:土壤养分含量主要受氮输入、种植模式及交互作用的影响,而细菌和真菌抑制剂处理对其无显著性影响 ( $P > 0.05$ ; 表3)。氮输入下,与单种日本柳杉相比,单种毛竹和两者混合种植土壤TOC和TN含量均显著降低 ( $P < 0.05$ )。在N1处理下,单种毛竹和混合种植土壤TOC含量分别降低

44.55%和25.29%,土壤TN含量分别降低42.93%和26.49%;而在N2处理下,单种毛竹和混合种植土壤TOC含量分别降低38.63%和20.78%,土壤TN含量分别降低36.36%和39.12%(图3A、3B)。与对照相比,氮输入下单种毛竹对土壤TOC和TN含量均具有显著负效应,而单种日本柳杉具有显著正效应,且在N1处理下,土壤TOC和TN含量达到最大值,分别为  $6.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $1.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3A、3B)。混合种植模式下,N2处理对土壤TN含量具有显著负效应,N1处理无显著差异(图3B)。

表2 氮输入、微生物调控和种植模式对毛竹生物量、苗高及根冠比影响的方差分析

Table 2 Effects of nitrogen input, microbial regulation and planting patterns on biomass, plant height and root/shoot ratio of moso bamboo in ANOVAs

处理 Treatments	自由度 $d_f$	生物量 Biomass		苗高 Plant height		根冠比 Root/shoot ratio	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
N	2	16.11	<0.000 1	28.62	<0.000 1	8.35	<b>0.000 5</b>
B	1	9.58	<b>0.002 6</b>	34.60	<0.000 1	5.31	<b>0.023 3</b>
F	1	12.64	<b>0.000 5</b>	18.14	<0.000 1	23.96	<0.000 1
P	1	4.32	<b>0.040 3</b>	30.89	<0.000 1	11.32	<b>0.001 1</b>
N×B	2	0.90	0.408 2	0.53	0.593 1	1.93	0.150 4
N×F	2	0.58	0.564 1	0.31	0.737 1	3.15	<b>0.047 1</b>
B×F	1	8.90	<b>0.003 6</b>	2.39	0.125 2	1.97	0.163 9
N×B×F	2	1.47	0.235 6	2.37	0.098 8	0.71	0.494 1
N×P	2	0.26	0.768 0	1.56	0.215 6	0.23	0.794 1
B×P	1	0.07	0.787 9	2.28	0.134 6	0.16	0.688 4
F×P	1	0.02	0.899 2	0.27	0.607 3	0.01	0.961 0
N×B×P	2	0.02	0.980 3	2.01	0.139 5	0.78	0.462 8
N×F×P	2	0.03	0.969 3	0.15	0.862 7	0.02	0.975 4
B×F×P	1	0.01	0.949 5	0.33	0.568 0	0.02	0.883 3
N×B×F×P	2	0.01	0.993 0	0.66	0.521 6	0.26	0.770 2

注: N. 氮输入; B. 细菌抑制剂; F. 真菌抑制剂; P. 种植模式; 显著结果( $P<0.05$ )以粗体形式表示。

Note: N. Nitrogen input; B. Bacterial inhibitors; F. Fungal inhibitors; P. Plant patterns; significant results( $P<0.05$ ) were shown by the bold.

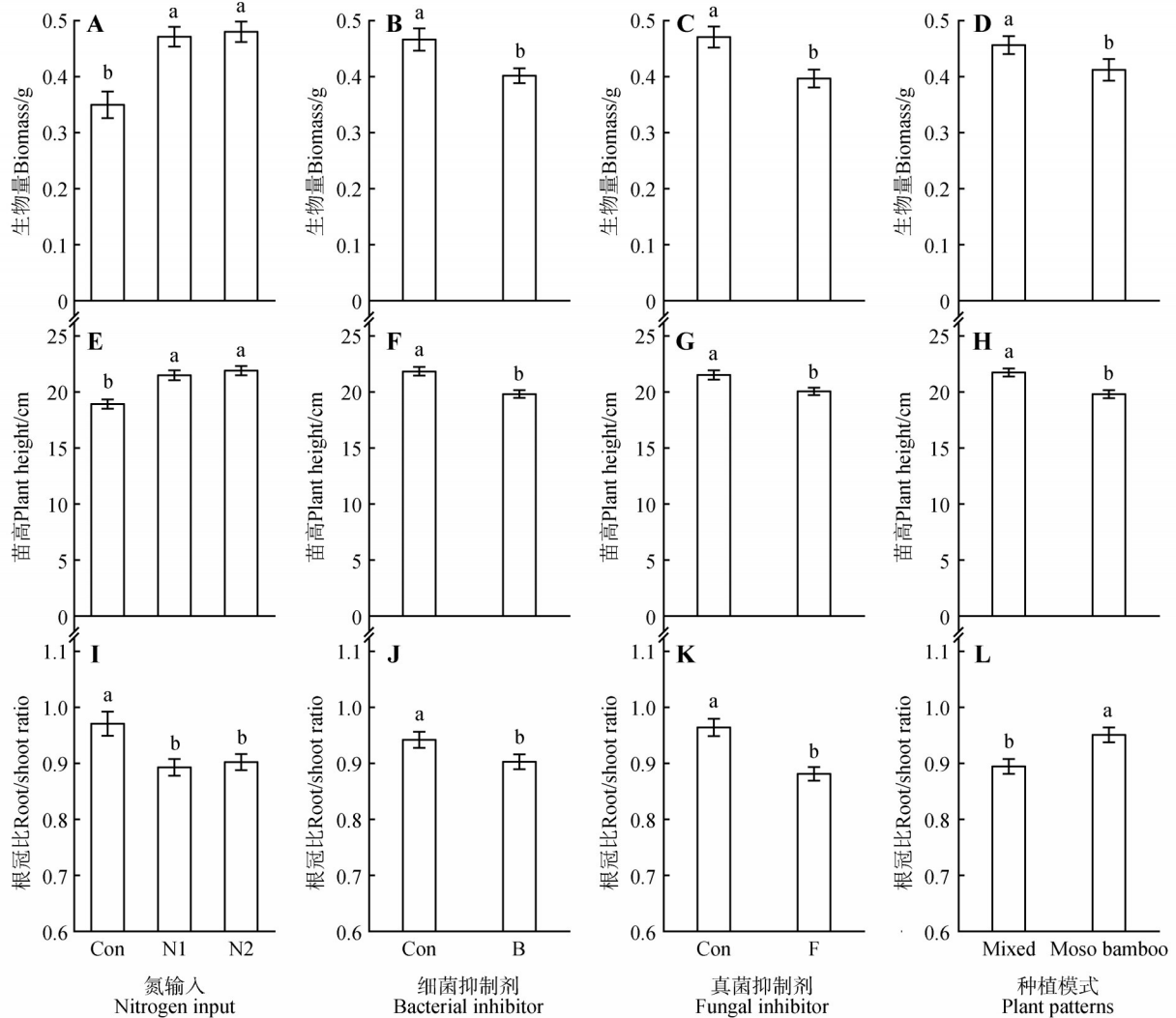
与单种日本柳杉相比,单种毛竹及混合种植模式下土壤 TP 含量分别提高 24.67% 和 19.62% ( $P<0.05$ )。在 N1 和 N2 处理下,单种毛竹土壤 TP 含量无显著差异,而单种日本柳杉和两者混合种植的土壤 TP 含量均有所提高,混合种植模式下土壤 TP 含量在 N2 处理下最高,达到  $0.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 3C)。采用单种毛竹和两者混合种植的土壤 pH 显著高于单种日本柳杉,分别提高 2.31% 和 3.35%。氮输入处理中, N1 和 N2 处理均显著降低各种种植模式下的土壤 pH(图 3D)。

与对照相比, N1 处理显著提高土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量,且混合种植模式的促进效应显著高于单一种植模式,最高达到  $12.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 3E)。氮输入是影响土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的主要因素(表 3)。与对照组相比, N1 和 N2 处理均显著提高土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,且 N2 处理促进效果显著高于 N1 处理(图 3F)。

### 3 讨论

#### 3.1 日本柳杉和毛竹幼苗生长对氮输入与微生物调控的响应机制

氮输入和微生物调控能够直接或间接作用于植物的资源分配,进而影响植物生长发育<sup>[30, 41]</sup>。氮是植物生长所需的限制性大量元素之一,其输入可以提高土壤养分有效性,还有利于植物各器官合成抗胁迫物质,提高土壤氮的可利用性,从而促进植物快速生长<sup>[42]</sup>。根冠比是植物地下部与地上部生物量的比值,反映植物对环境条件的适应能力及生长策略,是评估植物生长状况的重要指标<sup>[43]</sup>。本研究中,日本柳杉和毛竹的生物量、苗高和根冠比均受到氮输入的极显著影响( $P<0.001$ ), 2 种不同形态氮输入均显著促进日本柳杉和毛竹幼苗的生物量积累和苗高生长,同时降低根冠比。



Con. 对照; N. 氮输入; N1.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; N2.  $\text{KNO}_3$ ; B. 细菌抑制剂; F. 真菌抑制剂。不同小写字母表示处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

Con. Control; N. Nitrogen input; N1.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; N2.  $\text{KNO}_3$ ; B. Bacterial inhibitor; F. Fungal inhibitor. Different lowercase letters indicated significant difference between treatments at  $P < 0.05$ .

图2 氮输入、微生物调控和种植模式对毛竹生物量(A、B、C、D)、苗高(E、F、G、H)和根冠比(I、J、K、L)的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen input, microbial regulation and planting patterns on biomass (A, B, C, D), plant height (E, F, G, H) and root/shoot ratio (I, J, K, L) of moso bamboo

这说明外源氮输入在一定程度上满足日本柳杉和毛竹幼苗生长需求,进而提高生物量和苗高,而根冠比降低可能与植物对氮输入响应敏感性有关。毛晋花等<sup>[41]</sup>的Meta分析结果表明,外源氮输入下植物总生物量明显增加,氮沉降会显著促进植物地上部生物量分配,使得植物根冠比降低,本研究结果支持这一结论。“功能平衡”假说认为,植物会根据生长环境来调整资源分配,在养分贫瘠的环境下,植物倾向将更多生物量分配给根部来提高养分吸收效率,而在养分充足环境下,植物则将更多生物量分配给地上部,以实现快速生长和繁殖<sup>[44]</sup>。由

于氮输入增加了土壤有效态氮含量,植物更高效地利用土壤养分并将更多的资源分配到地上部,导致2种幼苗根冠比在施氮条件下显著降低<sup>[21, 45-46]</sup>。

植物在生长过程中通常与土壤有益微生物(如丛枝菌根真菌、根瘤菌等)形成互利共生关系,它们能够在正常或胁迫条件下,促进植物对土壤养分的吸收。生物抑制剂添加会扰乱植物-微生物-土壤之间的物质循环和能量流动,影响植物和土壤稳定性。研究<sup>[47]</sup>发现,生物抑制剂产生的负效应可能与植物-土壤系统之间的相互作用有关。土壤微生物在植物-土壤系统中扮演重要角色,可

表3 氮输入、微生物调控及种植模式对日本柳杉和毛竹土壤养分含量影响的方差分析

Table 3 Effects of nitrogen input, microbial regulation and planting patterns on soil nutrient content of Japanese cedar and moso bamboo in ANOVAs

处理 Treatments	自由度 $d_f$	F					
		有机碳 TOC	全氮 TN	全磷 TP	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	pH
N	2	<b>20.97</b>	<b>10.21</b>	<b>55.50</b>	<b>55.73</b>	<b>197.62</b>	<b>58.98</b>
B	1	1.83	1.87	2.31	0.10	0.03	1.03
F	1	1.41	1.37	1.87	3.41	1.41	1.59
P	2	<b>91.33</b>	<b>36.28</b>	<b>130.14</b>	2.67	1.47	<b>36.56</b>
N×B	2	2.50	1.48	<b>10.76</b>	0.02	0.27	0.16
N×F	2	<b>3.17</b>	5.01	2.05	<b>6.01</b>	0.12	0.88
B×F	1	0.68	<b>17.71</b>	0.81	2.96	0.01	<b>6.22</b>
N×B×F	2	1.24	0.42	4.95	<b>4.57</b>	0.07	<b>3.58</b>
N×P	4	<b>38.29</b>	<b>12.55</b>	<b>55.24</b>	<b>3.16</b>	1.30	<b>10.77</b>
B×P	2	1.78	2.63	<b>4.29</b>	1.76	2.83	0.65
F×P	2	2.98	1.18	3.99	2.82	0.48	1.70
N×B×P	4	<b>5.17</b>	<b>6.74</b>	<b>13.42</b>	1.86	0.84	0.90
N×F×P	4	<b>5.07</b>	2.27	2.43	2.09	0.54	0.39
B×F×P	2	0.71	0.42	<b>3.78</b>	2.59	0.82	<b>3.77</b>
N×B×F×P	4	0.61	0.41	<b>2.88</b>	<b>2.99</b>	1.87	0.22

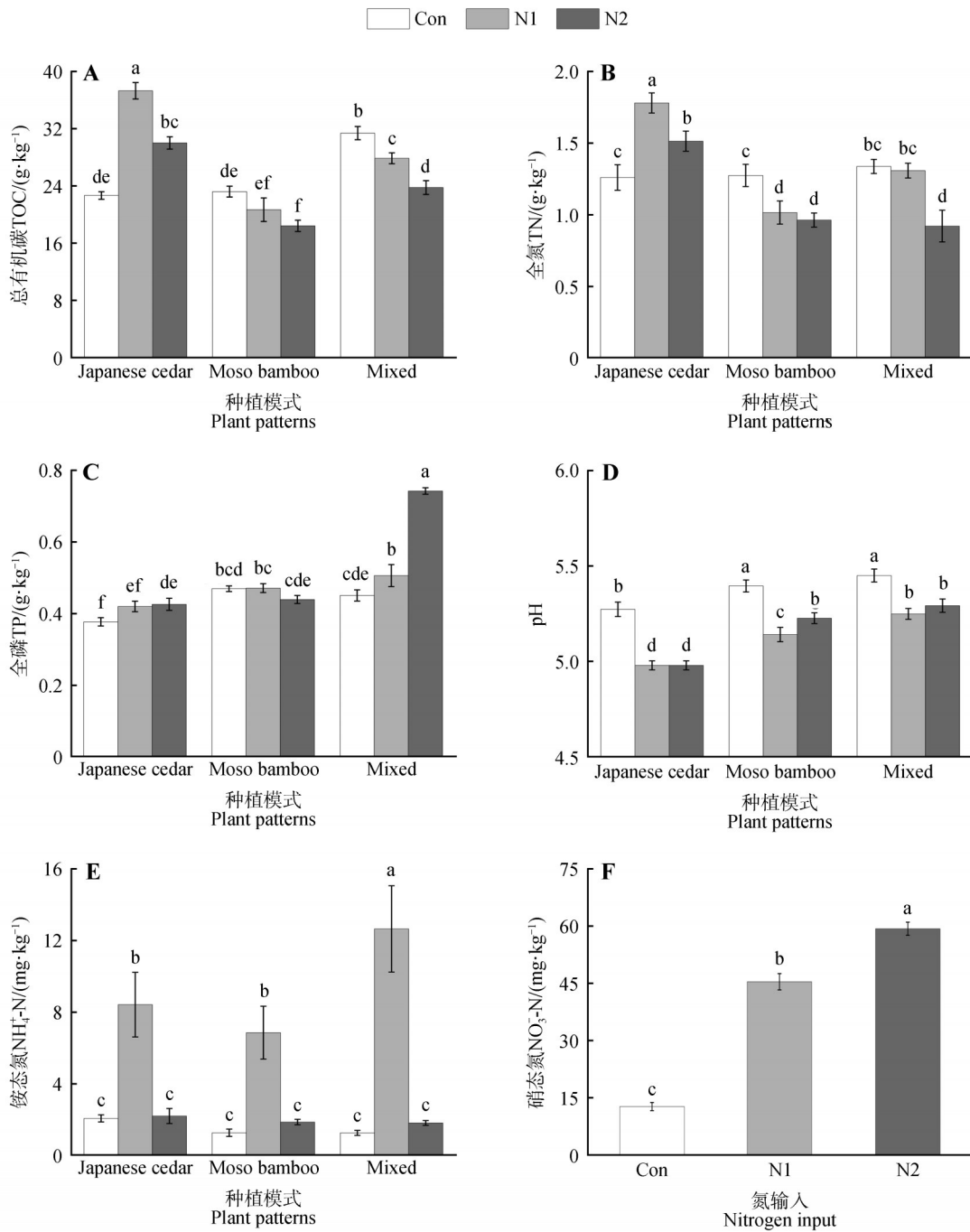
注: N. 氮输入; B. 细菌抑制剂; F. 真菌抑制剂; P. 种植模式; 显著结果( $P < 0.05$ )以粗体形式表示。

Note: N. Nitrogen input; B. Bacterial inhibitor; F. Fungal inhibitor; P. Plant patterns; significant results( $P < 0.05$ ) were shown by the bold.

以通过适应环境变化和进行代谢活动(如分解有机质或产生病原菌)调节土壤结构并参与养分循环,从而影响植物生长<sup>[48]</sup>。本研究通过比较微生物抑制后植物生长差异,发现细菌和真菌抑制处理均削弱毛竹和日本柳杉幼苗生长,表明微生物抑制对植物生长具有负作用,这可能是因为微生物抑制剂限制了土壤有益微生物与植物相互作用,使得土壤养分循环受阻、结构恶化,从而抑制植物生长。细菌和真菌在分解有机物质过程中会释放养分,微生物抑制剂的添加影响土壤养分循环及养分有效性,间接地影响植物生长<sup>[49]</sup>。此外,根际微生物对植物根系沉积物的分解可以改善土壤质量和结构,当这些微生物受到抑制时,土壤结构会逐渐变差,不利于植物根系的伸展和生长<sup>[50]</sup>。

### 3.2 日本柳杉和毛竹幼苗生长对不同种植模式的响应机制

幼苗成功生长主要受两类因素调控:一是环境因子(如养分、光照和水分等),二是植物自身特性(生长发育能力、抗逆性、遗传特性等)。不同种植模式会通过改变环境条件、资源分配及植物间相互作用影响幼苗生长。本研究结果显示,混合种植模式降低日本柳杉根冠比,这可能是混合种植过程中日本柳杉与毛竹发生种间竞争导致的。一方面,毛竹凭借快速生长特性,苗高高于日本柳杉,获得更多光照,影响日本柳杉光合作用,进而影响日本柳杉幼苗生长。另一方面,毛竹可以通过根系分泌、茎叶淋洗等途径释放化感物质到环境中,对日本柳杉幼苗生长产生影响。李欣欣等<sup>[51]</sup>研究表明,除毛竹根际土浸提液外,毛竹各器



A. 总有机碳; B. 全氮; C. 全磷; D. pH; E. 铵态氮; F. 硝态氮。不同小写字母表示处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

A. Total organic carbon (TOC); B. Total nitrogen (TN); C. Total phosphorus (TP); D. pH; E. Ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ); F. Nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ). Different lowercase letters indicated significant difference between treatments at  $P < 0.05$ .

图3 种植模式和氮输入对日本柳杉和毛竹土壤理化性质的影响

Fig.3 Effects of plant patterns and nitrogen input on soil physicochemical properties of Japanese cedar and moso bamboo

官高浓度浸提液对杉木种子萌发具有抑制作用。陈娟等<sup>[52]</sup>对毛竹化感效应的研究发现,毛竹浸提液对苦槠 (*Castanopsis sclerophylla*) 幼苗生长表现为高浓度抑制、低浓度促进的双重作用,这表明毛竹潜在的化感效应可能使其在种间竞争中获得一

定优势,而不同来源、不同浓度的毛竹浸提液产生的化感效应存在差异,其影响机制还有待进一步研究。

生物量、苗高和根冠比是衡量植物生长状况的重要参数。本研究结果表明,混合种植模式较

单一种植模式显著增加毛竹幼苗生物量和苗高,表明在混合种植模式下,毛竹凭借较强的资源获取能力,具有更强竞争力和适应性。然而,单一种植和混合种植的毛竹幼苗地上部生物量均大于地下部生物量,根冠比小于1。在混合种植模式下,毛竹根系生长优势增强其对外界环境抵抗能力,并促进资源从防御部位向生长部位重新分配<sup>[24]</sup>,导致根冠比低于单一种植。一方面,毛竹通过优化资源分配,将更多的资源投入到地上部分的生长,从而占据更多的光照空间。另一方面,毛竹通过优化根系结构,提高根系吸收效率,增强竞争力和适应性。有研究<sup>[19]</sup>指出,当毛竹与柳杉发生种间竞争时,毛竹可以通过增加对地上部的投资占据更多生长空间,以及改变地下部根系构型获得更多资源,从而在竞争中获得优势地位。

### 3.3 日本柳杉和毛竹土壤养分对氮输入与种植模式的响应机制

土壤养分有效性及周转与氮输入和物种组成密切相关。本研究采用的土壤条件一致,因此,试验结束时观察到的土壤性质差异可归因于短期的土壤-植物互作效应。结果表明,在氮输入下,与单种日本柳杉相比,单种毛竹和两者混合种植显著降低土壤 TOC 和 TN 含量,与 Qin 等<sup>[13]</sup>研究结果一致,这可能与毛竹发达的根茎系统及其旺盛的养分吸收能力有关。由于毛竹扩张性较强,其根茎不断向周边蔓延,苗期吸收大量养分,快速生长,导致土壤 TOC 和 TN 含量降低。磷是土壤养分中的重要元素之一,土壤氮、磷间存在复杂的耦合关系,外源氮输入可能会影响土壤磷转化,进而影响植物生长代谢。本研究发现,除了 N2 处理下单种毛竹土壤 TP 含量降低外,其他处理 TP 含量均提高,这可能与氮输入改变土壤微生物群落的结构和功能,影响磷的矿化和固定过程有关。以往研究<sup>[53]</sup>表明,外源氮输入可以提高土壤磷酸酶活性,进而加快土壤磷矿化过程,也有研究<sup>[54-55]</sup>指出,氮输入可能引起土壤 pH 降低,抑制土壤磷酸酶活性,影响磷的释放及植物对磷素的吸收。本研究中,氮输入显著降低各种种植模式下土壤 pH,进一步验证了氮输入可能通过影响土壤酸碱度,改变土壤微生物活性,进而影响土壤 TP 含量。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  是植物从土壤中获得的主要氮形态,在混合种植下,土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量显著高于单一种植,原因可能是混合种植增强相关微生物

活性,从而促进土壤氮转化。土壤微生物对氮转化起着至关重要的作用,它们通过参与氨化作用、硝化作用和反硝化作用等过程,调节土壤中氮素供应,影响植物生长。毛竹扩张能够改变根系生物量、凋落物类型及质量,这将直接影响到土壤微生物的结构与功能<sup>[4]</sup>。根系分泌物和凋落物的分解会为土壤微生物提供更多的有机物质和能量来源,促进氨化微生物生长和繁殖,从而有利于氨化作用,使土壤有机氮更多地转化为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ <sup>[56]</sup>。研究<sup>[14,57]</sup>表明,毛竹向日本柳杉林和常绿阔叶林扩张均显著提高土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量,降低氮矿化速率。此外,不同形态氮输入均显著降低各种种植模式下土壤 pH,这种酸化效应可能与植物吸收利用氮素及植物-土壤反馈过程有关<sup>[47,58]</sup>。氮输入会促进硝化作用,铵根离子在硝化细菌作用下转化为硝酸盐,同时释放出  $\text{H}^+$ ,引起土壤酸化<sup>[59]</sup>。另外,植物在生长过程中对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等金属阳离子的吸收,也可能导致土壤 pH 降低。

## 4 结论

氮输入和微生物调控通过增加土壤养分有效性和改变微生物活性影响毛竹和日本柳杉幼苗生长。2 种形态氮输入均显著促进毛竹和日本柳杉的生物量和苗高,降低根冠比,证实其在养分供应条件下将更多资源分配到地上部分,优化资源分配策略。土壤细菌和真菌抑制剂干扰土壤微生物的结构组成和群落多样性,进而对毛竹和日本柳杉产生抑制作用。混合种植模式下,毛竹表现出较强的生长优势,生物量和苗高均显著高于单一种植,证实模拟扩张阶段的混合种植更有利于毛竹生长,这符合毛竹扩张的生理、生态学特性,与其成功扩张密切相关。因而,毛竹在扩张阶段可通过高效利用土壤养分,实现苗高和生物量高效增长,进而提高竞争力,实现进一步扩张。未来应基于原位观测,结合不同生态因子,在时间和空间背景下深入探讨毛竹扩张机制,为全球变化背景下毛竹的管理和评估提供基础数据和理论支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 刘喜帅. 毛竹扩张对凋落物-土壤碳氮磷含量的影响及其微生物学机制研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.  
LIU X S. The effect of *Phyllostachys edulis* expansion on the content of carbon, nitrogen and phosphorus in litter and soil and its microbiological mechanism [D]. Nan-

- chang: Jiangxi Agricultural University, 2018.
- [2] 史军义, 易同培, 马丽莎, 等. 中国引进竹亚科植物种类及特征[J]. 林业科学研究, 2008, 21(3): 362-369.
- SHI J Y, YI T P, MA L S, *et al.* Bambusoideae introduced in China and their bionomics[J]. Forest Research, 2008, 21(3): 362-369.
- [3] 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.
- [4] 余雅迪, 张茜, 王皓, 等. 土壤二氧化碳及氧化亚氮排放对毛竹扩张的响应及机制[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(3): 659-668.
- YU Y D, ZHANG X, WANG H, *et al.* Response of soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions to *Phyllostachys edulis* expansion and its mechanism[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(3): 659-668.
- [5] 方海富, 江亮波, 张毅, 等. 武功山日本柳杉林与草甸土壤碳氮特征和pH比较[J]. 福建农业学报, 2019, 34(6): 705-710.
- FANG H F, JIANG L B, ZHANG Y, *et al.* Carbon, nitrogen and pH in meadow soil at *Cryptomeria japonica* forests in Mt. Wugong[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(6): 705-710.
- [6] LI Z Z, ZHANG L, DENG B L, *et al.* Effects of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) invasions on soil nitrogen cycles depend on invasion stage and warming[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(32): 24989-24999.
- [7] WU C S, MO Q F, WANG H K, *et al.* Moso bamboo (*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau) invasion affects soil phosphorus dynamics in adjacent coniferous forests in subtropical China [J]. Annals of Forest Science, 2018, 75(1): 24.
- [8] 吴家森, 姜培坤, 王祖良. 天目山国家级自然保护区毛竹扩张对林地土壤肥力的影响[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(4): 689-692.
- WU J S, JIANG P K, WANG Z L. The effects of *Phyllostachys pubescens* expansion on soil fertility in National Nature Reserve of Mount Tianmu [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2008, 30(4): 689-692.
- [9] 赵雨虹, 罗嘉东, 范少辉. 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, LUO J D, FAN S H. 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.
- [10] PAN J, LIU Y Q, YUAN X Y, *et al.* Root litter mixing with that of Japanese cedar altered CO<sub>2</sub> emissions from Moso bamboo forest soil[J]. Forests, 2020, 11(3): 356.
- [11] 欧阳明, 杨清培, 陈昕, 等. 毛竹扩张对次生常绿阔叶林物种组成、结构与多样性的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(6): 649-657.
- OUYANG M, YANG Q P, CHEN X, *et al.* Effects of the expansion of *Phyllostachys edulis* on species composition, structure and diversity of the secondary evergreen broad-leaved forests[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(6): 649-657.
- [12] LIU X S, SIEMANN E, CUI C, *et al.* Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) invasion effects on litter, soil and microbial PLFA characteristics depend on sites and invaded forests[J]. Plant and Soil, 2019, 438(1/2): 85-99.
- [13] QIN H, NIU L M, WU Q F, *et al.* Bamboo forest expansion increases soil organic carbon through its effect on soil arbuscular mycorrhizal fungal community and abundance[J]. Plant and Soil, 2017, 420(1/2): 407-421.
- [14] 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.
- [15] 毛莹儿, 周秀梅, 王楠, 等. 毛竹扩张对杉木林土壤细菌群落的影响[J]. 生物多样性, 2023, 31(6): 22659.
- MAO Y E, ZHOU X M, WANG N, *et al.* Impact of *Phyllostachys edulis* expansion to Chinese fir forest on the soil bacterial community[J]. Biodiversity Science, 2023, 31(6): 22659.
- [16] 张秦泽, 郝广, 李洪远. 外源输入氮的有效性及其对植物生长与生理影响的研究进展[J]. 生态学杂志, 2024, 43(3): 878-887.
- ZHANG Q Z, HAO G, LI H Y. Effects of availability and form of exogenous nitrogen on plant growth and physiology: progress and prospects[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(3): 878-887.
- [17] ZOU N, HUANG L, CHEN H J, *et al.* Nitrogen form plays an important role in the growth of moso bamboo

- (*Phyllostachys edulis*) seedlings [J]. PeerJ, 2020, 8: e9938.
- [18] ZOU N, SHI W M, HOU L H, *et al.* Superior growth, N uptake and  $\text{NH}_4^+$  tolerance in the giant bamboo *Phyllostachys edulis* over the broad-leaved tree *Castanopsis fargesii* at elevated  $\text{NH}_4^+$  may underlie community succession and favor the expansion of bamboo [J]. Tree Physiology, 2020, 40(11): 1606-1622.
- [19] 刘宇馨, 邹娜, 颜卓佳, 等.  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度对毛竹和杉木幼苗生长及种间竞争的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(3): 526-539.
- LIU Y X, ZOU N, YAN Z J, *et al.* Effects of  $\text{NH}_4^+$ -N concentration on growth and interspecific competition of *Phyllostachys edulis* and *Cunninghamia lanceolata* seedlings [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(3): 526-539.
- [20] 邹欢欢, 程明圣, 邹娜, 等. 硝态氮对毛竹幼苗生长的抑制性研究 [J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 290-298.
- ZOU H H, CHENG M S, ZOU N, *et al.* Inhibition of nitrate nitrogen on the growth of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) seedlings [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(2): 290-298.
- [21] 邓邦良, 刘倩, 刘喜帅, 等. UV-B 辐射增强和氮沉降对入侵植物乌桕生长的影响 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(4): 471-479.
- DENG B L, LIU Q, LIU X S, *et al.* Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen deposition on the growth of invasive plant *Triadica sebifera* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(4): 471-479.
- [22] 方海富, 冯为迅, 罗来聪, 等. 氮沉降背景下土壤微生物对入侵植物乌桕叶绿素荧光特征的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9377-9387.
- FANG H F, FENG W X, LUO L C, *et al.* Effects of soil microorganisms on chlorophyll fluorescence characteristics of invasive *Triadica sebifera* with nitrogen deposition [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23): 9377-9387.
- [23] REN G Q, LI Q, LI Y, *et al.* The enhancement of root biomass increases the competitiveness of an invasive plant against a co-occurring native plant under elevated nitrogen deposition [J]. Flora, 2019, 261: 151486.
- [24] ZOU J, ROGERS W E, SIEMANN E. Differences in morphological and physiological traits between native and invasive populations of *Sapium sebiferum* [J]. Functional Ecology, 2007, 21(4): 721-730.
- [25] BRADLEY B A, BLUMENTHAL D M, WILCOVE D S, *et al.* Predicting plant invasions in an era of global change [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(5): 310-318.
- [26] 陈彤, 刘文莉, 张崇邦, 等. 加拿大一枝黄花入侵对本土植物群落动态的影响及其机制 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(3): 253-261.
- CHEN T, LIU W L, ZHANG C B, *et al.* Effects of *Solidago canadensis* invasion on dynamics of native plant communities and their mechanisms [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(3): 253-261.
- [27] 李艺雪, 叶冬梅, 郝龙飞, 等. 土壤灭菌、AM 真菌接种与氮添加对柠条根际土壤的影响 [J]. 植物研究, 2024, 44(4): 590-601.
- LI Y X, YE D M, HAO L F, *et al.* The responses of rhizosphere soil of *Caragana korshinskii* under soil sterilization, AM fungi inoculation and N addition [J]. Bulletin of Botanical Research, 2024, 44(4): 590-601.
- [28] FOX C A, MACDONALD K B. Challenges related to soil biodiversity research in agroecosystems—issues within the context of scale of observation [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2003, 83(Sup.): 231-244.
- [29] 严淑娟, 刘茗, 刘彩霞, 等. 毛竹纯林土壤微生物多样性高于杉木纯林 [J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1704-1717.
- YAN S X, LIU M, LIU C X, *et al.* Soil microbial diversity is higher in pure stands of moso bamboo than in pure stands of Chinese fir [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(6): 1704-1717.
- [30] WANG C Q, KUZYAKOV Y. Mechanisms and implications of bacterial-fungal competition for soil resources [J]. The ISME Journal, 2024, 18(1): wrae073.
- [31] 方海富. 毛竹扩张对日本柳杉林土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响及微生物机制研究 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
- FANG H F. Effects of moso bamboo expansion into Japanese cedar forest on soil  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and the microbial mechanism [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.
- [32] ZHANG L, ZHANG Y J, WANG H, *et al.* Chinese tallow trees (*Triadica sebifera*) from the invasive range outperform those from the native range with an active soil community or phosphorus fertilization [J]. PLoS One, 2013, 8(9): e74233.
- [33] ZHANG M Y, ZHANG W Y, BAI S H, *et al.* Minor increases in *Phyllostachys edulis* (moso bamboo) biomass despite evident alterations of soil bacterial community structure after phosphorus fertilization alone: based on field studies at different altitudes [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 451: 117561.

- [34] 徐道炜,刘金福,何中声,等.毛竹向杉木林扩张对土壤活性有机碳及碳库管理指数影响[J].西部林业科学,2019,48(5):22-28.  
XU D W, LIU J F, HE Z S, *et al.* Effect of *Phyllostachys edulis* to *Cunninghamia lanceolata* forest on soil active organic carbon and carbon management index [J]. Journal of West China Forestry Science, 2019, 48(5): 22-28.
- [35] 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.
- [36] FANG H F, GAO Y, ZHANG Q, *et al.* Moso bamboo and Japanese cedar seedlings differently affected soil N<sub>2</sub>O emissions [J]. Journal of Plant Ecology, 2022, 15(2): 277-285.
- [37] NIJJER S, ROGERS W E, LEE C T A, *et al.* The effects of soil biota and fertilization on the success of *Sapium sebiferum* [J]. Applied Soil Ecology, 2008, 38(1): 1-11.
- [38] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000.
- [39] XIE J Y, FANG H F, ZHANG Q, *et al.* Understory plant functional types alter stoichiometry correlations between litter and soil in Chinese fir plantations with N and P addition [J]. Forests, 2019, 10(9): 742.
- [40] 罗来聪,白健,高宇,等.油茶壳及凋落叶生物质炭对土壤温室气体排放的影响[J].江西农业大学学报,2022,44(5):1177-1187.  
LUO L C, BAI J, GAO Y, *et al.* Effects of *Camellia oleifera* leaf litter and fruit shell-derived biochar on soil greenhouse gas emissions [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(5): 1177-1187.
- [41] 毛晋花,邢亚娟,闫国永,等.陆生植物生物量分配对模拟氮沉降响应的Meta分析[J].生态学报,2018,38(9):3183-3194.  
MAO J H, XING Y J, YAN G Y, *et al.* A meta-analysis of the response of terrestrial plant biomass allocation to simulated N deposition [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3183-3194.
- [42] BOZZOLO F H, LIPSON D A. Differential responses of native and exotic coastal sage scrub plant species to N additions and the soil microbial community [J]. Plant and Soil, 2013, 371(1/2): 37-51.
- [43] 令狐克念,王姝.不同生长阶段苘麻生物量分配对种群密度和土壤水分的响应[J].植物研究,2023,43(2):272-280.  
LINGHU K N, WANG S. Responses of biomass allocation to population density and soil water in *Abutilon theophrasti* at different growth stages [J]. Bulletin of Botanical Research, 2023, 43(2): 272-280.
- [44] YANG Y H, FANG J Y, MA W H, *et al.* Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands [J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(2): 268-277.
- [45] REYNOLDS H L, PACALA S W. An analytical treatment of root-to-shoot ratio and plant competition for soil nutrient and light [J]. The American Naturalist, 1993, 141(1): 51-70.
- [46] YANG Q, LI B, SIEMANN E. The effects of fertilization on plant-soil interactions and salinity tolerance of invasive *Triadica sebifera* [J]. Plant and Soil, 2015, 394(1/2): 99-107.
- [47] 王珍,金轲,丁勇,等.植物-土壤微生物反馈在草地演替过程中的作用机制[J].中国草地学报,2022,44(1):95-103.  
WANG Z, JIN K, DING Y, *et al.* The mechanism of plants-soil microbial feedback in grassland succession [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(1): 95-103.
- [48] STRECKER T, BARNARD R L, NIKLAUS P A, *et al.* Effects of plant diversity, functional group composition, and fertilization on soil microbial properties in experimental grassland [J]. PLoS One, 2015, 10(5): e0125678.
- [49] 沈仁芳,赵学强.土壤微生物在植物获得养分中的作用[J].生态学报,2015,35(20):6584-6591.  
SHEN R F, ZHAO X Q. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6584-6591.
- [50] ZHANG R F, VIVANCO J M, SHEN Q R. The unseen rhizosphere root-soil-microbe interactions for crop production [J]. Current opinion in microbiology, 2017, 37: 8-14.
- [51] 李欣欣,赖金莉,岳建华,等.毛竹各器官和根际土壤浸提液对杉木种子萌发的化感作用[J].生态学报,2018,38(22):8149-8157.  
LI X X, LAI J L, YUE J H, *et al.* Allelopathy of *Phyllostachys pubescens* extract on the seed germination of Chinese fir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 8149-8157.
- [52] 陈娟,白尚斌,周国模,等.毛竹浸提液对苦楮幼苗生

- 长的化感效应[J].生态学报,2014,34(16):4499-4507.
- CHEN J, BAI S B, ZHOU G M, *et al.* Allelopathic effects of *Phyllostachys edulis* extracts on *Castanopsis sclerophylla*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16):4499-4507.
- [53] DENG M F, LIU L L, SUN Z Z, *et al.* Increased phosphate uptake but not resorption alleviates phosphorus deficiency induced by nitrogen deposition in temperate *Larix principis-rupprechtii* plantations [J]. New Phytologist, 2016, 212(4):1019-1029.
- [54] CHANG E H, CHIU C Y. Changes in soil microbial community structure and activity in a cedar plantation invaded by moso bamboo [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 91(2):1-7.
- [55] TIAN J H, WEI K, CONDRON L M, *et al.* Impact of land use and nutrient addition on phosphatase activities and their relationships with organic phosphorus turnover in semi-arid grassland soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(5):675-683.
- [56] 吴金凤. 氮沉降背景下凋落物对松嫩草地土壤磷循环的调节作用[D]. 长春:东北师范大学,2021.
- WU J F. Regulation of litter on soil phosphorus cycling in Songnen grassland under the background of nitrogen deposition[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2021.
- [57] 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.
- [58] PAN J, LIU Y Q, NIU J H, *et al.* Moso bamboo expansion reduced soil N<sub>2</sub>O emissions while accelerated fine root litter decomposition: contrasting non-additive effects [J]. Plant and Soil, 2024, 501(1):7-21.
- [59] 张普河, 姚佳, 王雪韧, 等. 短期氮添加对荒漠草原土壤无机碳及土壤酸缓冲能力的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(7):2081-2088.
- ZHANG P H, YAO J, WANG X R, *et al.* Effects of short-term nitrogen addition on soil inorganic carbon and soil acid buffering capacity in desert grasslands [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7):2081-2088.