

DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.202506008

酸化红壤石灰和氮添加对杉木根系功能性状的影响

余鑫¹, 黄跃¹, 余叶¹, 伊晓霞², 范淇玮^{3,4}, 郑文辉^{3,4}

(1.竹资源开发与利用福建省高校重点实验室, 福建 三明 365004; 2.安庆师范大学生命科学学院, 安徽 安庆 246133; 3.福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室, 福建 三明 365004; 4.福建农林大学林学院, 福建 福州 350002)

摘要: 为探究石灰和氮添加对杉木根系功能性状的影响, 以杉木幼苗为研究对象, 设置对照、氮添加($26.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ N}$)、石灰添加($1.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CaCO}_3$)、石灰+氮添加($26.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ N} + 1.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CaCO}_3$) 4种盆栽模拟处理试验, 分析不同功能根(吸收根和运输根)形态结构和化学指标的变化特征。结果表明: 石灰添加处理和石灰+氮添加处理分别使土壤pH值从4.5提升到5.5和5.7, 可交换性钙离子含量显著升高了540%和660% ($P < 0.05$), 可交换性镁离子含量显著升高了521%和927% ($P < 0.05$), 而单一氮添加处理仅使土壤硝态氮含量显著升高了56% ($P < 0.05$)。在石灰添加处理和石灰+氮添加处理下, 吸收根的生物量分别显著提高了47%和41% ($P < 0.05$), 根长显著增长了71%与42% ($P < 0.05$), 其中石灰添加处理还使运输根生物量显著提高了40% ($P < 0.05$), 但未影响其他运输根形态参数。氮添加处理对根系形态无显著影响。石灰添加处理和石灰+氮添加处理分别使吸收根钙含量显著提高了29%和34% ($P < 0.05$), 镁含量显著提高了44%和39% ($P < 0.05$), 同时也显著提高运输根镁含量 ($P < 0.05$), 而氮添加处理仅使吸收根氮含量显著提高了23% ($P < 0.05$)。主成分分析表明, 吸收根在形态可塑性方面较运输根更敏感, 但二者在根系化学指标上呈现协同响应机制。

关键词: 酸化红壤; 石灰添加; 氮添加; 杉木; 根系功能性状



开放科学标识码
(OSID 码)

中图分类号: S714.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-0018(2025)06-0561-09

Effects of lime and nitrogen addition on root functional traits of *Cunninghamia lanceolata* in acidified red soil

YU Xin¹, HUANG Yue¹, YU Ye¹, YI Xiaoxia², FAN Qiwei^{3,4}, ZHENG Wenhui^{3,4}

(1.Fujian Provincial Key Laboratory of Bamboo Resources Development and Utilization, Sanming, Fujian 365004, China; 2.College of Life Sciences, Anqing Normal University, Anqing, Anhui 246133, China; 3.Fujian Provincial Key Laboratory of Resources and Environment Monitoring and Sustainable Management and Utilization, Sanming, Fujian 365004, China; 4.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: To investigate the effects of lime and nitrogen addition on root functional traits of *Cunninghamia lanceolata*, a pot experiment was conducted for the seedlings with four treatments: control (CK), nitrogen (N) addition ($26.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ N}$), lime (Ca) addition ($1.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CaCO}_3$), and Ca+N addition ($26.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ N} + 1.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CaCO}_3$). Morphological and chemical traits of different functional roots (absorptive roots and transport roots) were analyzed. The results showed that Ca and Ca+N treatments increased soil pH from 4.5 to 5.5 and 5.7, exchangeable Ca content by 540% and 660%, and exchangeable Mg content by 521% and 927%, respectively ($P < 0.05$). The N treatment alone only increased soil nitrate content by 56% ($P < 0.05$). In terms of root traits, Ca and Ca+N treatments increased absorptive root biomass by 47% and 41% and the root length by 71% and 42%, respectively ($P < 0.05$). In addition, the Ca treatment increased the transport root biomass by 40% ($P < 0.05$), but had no effect on other morphological traits of transport roots. The N treatment had no significant effect on root morphology. Regarding chemical traits, Ca and Ca+N treatments increased the Ca content in absorptive roots by 29% and 34% and the Mg content by 44% and 39%, respectively, while also enhancing Mg content in transport roots ($P < 0.05$). The N treatment only increased N content in absorptive roots by 23% ($P < 0.05$). Principal component analysis revealed greater morphological plasticity in absorptive roots than in transport roots, though both exhibited synergistic responses in chemical indicators.

Key words: acidified red soil; lime addition; nitrogen addition; *Cunninghamia lanceolata*; root functional traits

植物功能性状是植物为适应外界环境而表现出的一系列特征属性, 与植物的生长、繁殖、生存和死

收稿日期: 2025-06-12 修回日期: 2025-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目“酸雨背景下杉木凋落物诱导的激发效应与其酸缓冲能力的关系研究”(42007102); 福建省自然科学基金项目“土壤酸化缓解对杉木凋落物激发效应的影响及机理研究”(2021J011123); 福建省中青年骨干教师教育科研项目“土壤酸化背景下钙镁添加对杉木根系经济图谱的影响”(JAT200644); 三明学院引进高层次人才项目(19YG13, 20YG06)。

第一作者简介: 余鑫(1992-), 男, 副教授, 从事森林生态学研究。Email: yuxin769@outlook.com。

通信作者: 郑文辉(1987-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事森林生态学研究。Email: zhengwenhui87@163.com。

亡密切相关。这些性状能单独或联合反映生态系统对外界环境变化的响应,同时也能对多种生态过程(如凋落物分解和土壤碳固存等)产生显著影响^[1]。植物功能性状通常可以划分为根、茎、叶性状等类别。迄今,针对植物地上部分功能性状的研究已较为丰富,然而关于根系功能性状的研究仍显不足^[2]。根系作为植物的重要器官,承担着固持土壤以及吸收水分和养分的功能^[3]。根系对环境变化极为敏感,会通过调整比根长、根组织密度等形态特征以及化学指标作出响应。这些性状调整一方面反映了植物适应环境变化的策略,另一方面也会进一步影响植物的生长发育^[4]。因此,深入研究根系功能性状对于理解植物如何响应环境变化、预测生态系统功能至关重要。

氮(N)沉降是我国面临的主要生态环境问题之一。研究表明,近 10 a 来陆地生态系统氮沉降速率提升迅猛,预期到 21 世纪中叶,氮沉降速率仍会显著升高 2~3 倍,这对土壤资源可利用性及生态系统碳(C)、氮循环都将产生深远影响^[5]。过量氮沉降已被发现会降低土壤 pH 值,造成钙(Ca)、镁(Mg)等阳离子淋失,加速土壤酸化进程^[6],伤害生物多样性和影响生态系统功能^[7]。石灰(CaCO_3)添加是有效的缓解土壤酸化措施,在农业和森林中的应用都较为广泛。石灰添加可以有效提高土壤 pH 值、阳离子含量,恢复森林生产力^[8]。关于氮沉降对植物根系功能性状的影响研究报道较多。例如,最近的 Meta 分析表明,氮沉降主要影响根系的养分含量,包括提高了根系氮含量,降低了根系碳氮比,但没有显著影响细根形态和生理特征^[9]。然而,关于石灰添加对植物根系功能性状的研究仍然欠缺,且没有一致响应。有研究表明,石灰添加提高了根系比根长,增大了比根面积,提高了根系氮、钙含量^[10]。相反,另有一些研究则表明石灰添加降低了根系比根长,减小了比根面积^[11],降低了根系氮含量^[12]。这些不一致的结果可能是因为没有考虑到不同功能根系的响应差异。已有的研究通常将直径小于 2 mm 的根系定义为细根,这一定义方法比较粗略,可能导致环境改变对根系功能性状的影响被掩盖。最近的研究逐渐重视将根系按照根序级的方法分为不同的功能根(通常将 1~2 级根作为吸收根,将 3~5 级根作为运输根)^[3],并发现不同序级的根对土壤环境的响应存在差异。例如,有研究发现氮肥添加对罗浮栲和米槠的低序级根的比根长和比表面积有显著影响,而未显著影响高序级根的相应指标^[4];钙肥的添加抑制了柏木小径级根的长度和表面积,而没有影响大径级根的长度和表面积^[13]。此外,已有关于石灰添加的研究通常忽视了与氮沉降的交互作用。在自然生态系统中添加石灰通常是和氮沉降过程同步存在,目前仍缺乏石灰和氮添加交互作用下根系功能性状分异响应的系统研究,特别是吸收根与运输根在形态可塑性和化学指标上的响应规律亟待阐明。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的优良速生树种,栽培面积广泛,约占人工林面积的 25%,在我国木材生产和森林蓄积量中占有重要地位^[14]。然而杉木主要分布于遭受氮沉降严重的亚热带地区^[15],高氮沉降导致的土壤酸化可能会损害根系,降低杉木的生产力^[16]。为此,本研究以杉木幼苗为研究对象,采用盆栽模拟的方法,探究石灰添加和氮添加及其交互作用对杉木不同功能根系形态特征和养分特征的影响,为亚热带人工林碳汇可持续经营提供实践探索和理论支持。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验设置在福建省三明市三明学院的科学试验大棚($26^{\circ}11'N$, $117^{\circ}33'E$)。三明市属于亚热带季风气候区,年平均气温约为 19.6°C ,年平均降水量为 1 600 mm,海拔 169 m,降雨主要集中在 3—8 月。

盆栽试验开始于 2021 年 3 月,挑选长势一致的 1 年生杉木幼苗(平均苗高 26 cm)栽植于容器内(容器直径 25 cm,高 30 cm),每盆栽培 1 株。土壤取自三明学院校园周边国有林场的杉木人工纯林表层 20 cm 土壤,为酸性红壤。试验采用 2×2 双因素完全随机设计:未经氮、石灰添加处理为对照(CK);氮添加处理的氮添加量为 $26.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (相当于 $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[17];石灰添加处理的石灰添加量为 $1.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (相当于 $4\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[8,10];石灰+氮添加处理的石灰和氮添加量分别为 $1.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $26.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。每处理 6 个重复,共 24 盆。缓苗 1 月后,2021 年 5—7 月的中旬,向氮添加处理和石灰+氮添加处理的盆栽土壤喷施 NH_4NO_3 溶液,每个盆栽总喷施氮量为 $26.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,同时向对照处理和石灰添加处理喷施等量的水;2021 年 4 月,将碳酸钙(分析纯)的粉末撒在石灰添加处理和石灰+氮添加处理的盆栽土壤表面。

试验期间正常浇水维持杉木生存。

1.2 植物收获与分析测定

于 2021 年 11 月收获植株, 小心将杉木幼苗从容器中取出, 首先测试土壤的基本理化性质, 然后将根系与土壤分开, 并用去离子水将根系冲洗干净, 将根系按照 MCCORMACK *et al*^[3] 的研究方法分级, 根系的 1~2 级定义为吸收根(absorptive roots, AR), 根系的 3~5 级定义为运输根(transport roots, TR)。吸收根和运输根分别利用根系扫描仪和根系图像分析软件 WinRHIZO, 分析其根长(root length, RL)、根面积(root area, RA) 和根体积。将分析所用的不同功能根系分别在烘箱中 65 ℃ 烘干 72 h, 称取其生物量(root biomass, RB), 以此计算吸收根和运输根的比根长(specific root length, SRL)、比根面积(specific root area, SRA) 和根组织密度(root tissue density, RTD)。烘干的根系样品磨碎过筛, 测量其化学指标。土壤的 pH 值采用 pH 计测定, 硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N) 含量采用流动注射仪测定, 可交换性钙离子(exchangeable Ca, Caex)、可交换性镁离子(exchangeable Mg, Mgex) 含量用乙酸铵浸提后采用原子吸收分光光度计测定; 根系碳、氮含量采用元素分析仪测定, 钾(K)、钙、镁含量用硝酸和高氯酸消煮后, 采用原子吸收分光光度计测定。

1.3 数据处理与分析

采用双因素方差分析检测石灰添加和氮添加及其交互作用对杉木幼苗不同功能根系形态结构和化学指标的影响。采用单因素方差分析检测不同处理对土壤的理化性质, 以及杉木幼苗吸收根和运输根的根系形态结构、化学指标的影响。当方差齐性时, 事后多重比较采用最小显著差异法; 当方差不齐时, 事后多重比较采用盖姆斯-豪厄尔法, 显著性水平均为 $P<0.05$ 。主成分分析(principal component analysis, PCA) 采用 R 包 “FacatoMineR” 检测不同功能根同一指标的相关性。Pearson 相关性分析检测土壤指标和不同功能根功能性状的相关性。统计分析在 R 4.2.1 软件上进行。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤理化性质的影响

如表 1 所示, 石灰添加处理和石灰+氮添加处理均显著提高了土壤的 pH 值, 分别提高了 1.0 和 1.2, 可交换性钙离子含量分别显著提高了 540% 和 660%, 可交换性镁离子含量分别显著提高了 521% 和 927% ($P<0.05$), 而氮添加处理未显著改变这些指标。在氮添加处理下, 土壤硝态氮含量显著提高了 56% ($P<0.05$)。

表 1 不同处理下的土壤理化性质
Table 1 Physicochemical properties of soil under different treatments

处理 Treatment	pH 值 pH value	可交换性 钙离子含量 Caex content /(mg·kg ⁻¹)	可交换性 镁离子含量 Mgex content /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮含量 NH ₄ ⁺ -N content /(mg·kg ⁻¹)	硝态氮含量 NO ₃ ⁻ -N content /(mg·kg ⁻¹)
对照 CK	4.5±0.0b	55.8±3.3b	17.3±0.2b	3.6±0.2a	8.1±0.7b
石灰添加 Lime addition	5.5±0.1a	357.3±38.5a	107.5±5.0a	3.5±0.4a	6.1±0.5b
氮添加 N addition	4.4±0.1b	52.7±4.3b	15.4±1.1b	3.9±0.4a	12.6±1.4a
石灰+氮添加 Lime+N addition	5.7±0.1a	424.2±39.5a	177.6±2.9a	3.7±0.2a	7.2±1.5b

注: 同列数据后不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。Note: different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

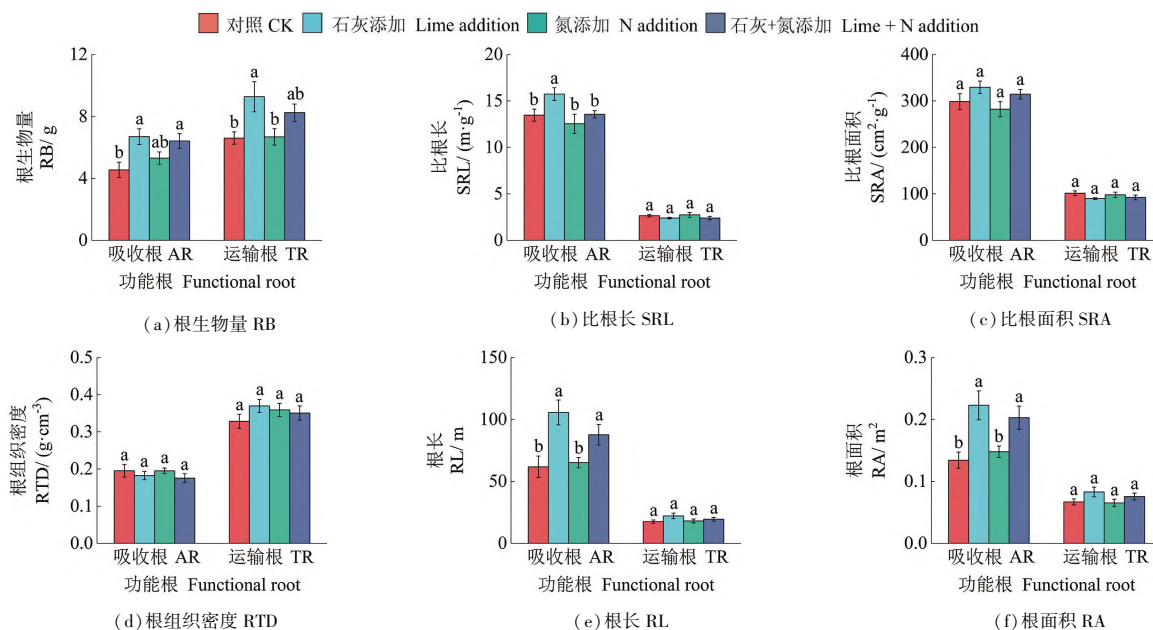
2.2 不同处理对杉木幼苗根系形态结构的影响

双因素方差分析表明, 石灰添加处理显著影响了杉木幼苗吸收根的根生物量、比根长、比根面积、根长和根面积 ($P<0.05$), 而未影响根组织密度; 石灰添加处理显著影响了运输根的根生物量和根面积 ($P<0.05$), 而未影响比根长、比根面积、根组织密度和根长(表 2)。如图 1 所示, 在石灰添加处理和石灰+氮添加处理下, 吸收根的根生物量分别显著提高了 47% 和 41%, 根长分别显著增长了 71% 和 42%, 根面积分别显著增大了 66% 和 51% ($P<0.05$)。在石灰添加处理下, 吸收根的比根长显著提高了 17% ($P<0.05$), 运输根的根生物量显著提高了 40% ($P<0.05$)。氮添加处理未显著影响吸收根和运输根的形态指标。

表 2 不同处理根系功能性状的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of the effects of different treatments on root functional traits

指标 Index	石灰添加处理 Lime addition		氮添加处理 N addition		石灰+氮添加处理 Lime +N addition	
	吸收根	运输根	吸收根	运输根	吸收根	运输根
	AR	TR	AR	TR	AR	TR
根生物量 RB	<0.05	<0.05	0.616	0.475	0.285	0.406
比根长 SRL	<0.05	0.099	<0.05	0.824	0.396	0.792
比根面积 SRA	<0.05	0.087	0.293	0.909	0.964	0.542
根组织密度 RTD	0.206	0.378	0.784	0.751	0.792	0.190
根长 RL	<0.05	0.098	0.374	0.537	0.203	0.368
根面积 RA	<0.001	<0.05	0.854	0.475	0.332	0.646
碳含量 C content	0.164	0.959	0.879	0.790	0.104	0.747
氮含量 N content	<0.05	0.103	<0.05	0.273	0.446	0.870
碳氮比 C/N ratio	0.061	0.083	<0.05	0.327	0.820	0.918
钙含量 Ca content	<0.001	<0.05	0.999	0.484	0.458	0.993
镁含量 Mg content	<0.001	<0.05	0.381	0.552	0.837	0.660
钾含量 K content	<0.05	0.058	0.272	0.426	0.500	0.234



注：不同小写字母表示同一功能根在不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。Note: different lowercase letters denote significant differences of the same functional root among different treatments ($P<0.05$).

图 1 不同处理下杉木幼苗吸收根和运输根的形态特征

Figure 1 Morphological traits of absorptive roots and transport roots of *C. lanceolata* seedlings under different treatments

2.3 不同处理对杉木幼苗根系化学指标的影响

双因素方差分析表明, 石灰添加处理显著影响了杉木幼苗吸收根的氮、钾含量 ($P<0.05$), 极显著影响了钙、镁含量 ($P<0.001$), 也显著影响了运输根的钙、镁含量 ($P<0.05$), 而氮添加处理显著影响了吸收根的氮含量和碳氮比 ($P<0.05$) (表 2)。如图 2 所示, 在氮添加处理下, 吸收根氮含量显著提高了 23% ($P<0.05$)。在石灰添加处理和石灰+氮添加处理下, 吸收根的钙含量分别显著提高了 29% 和 34%, 镁含量分别显著提高了 44% 和 39% ($P<0.05$)。在石灰+氮添加处理下, 吸收根的钾含量显著降低了 22% ($P<0.05$)。在石灰添加处理下, 运输根的钙含量显著提高了 17% ($P<0.05$)。在石灰添加处理和石灰+氮添加处理下, 运输根的镁含量分别显著提高了 33% 和 43% ($P<0.05$)。氮添加处理未显著影响运输根的化学指标。

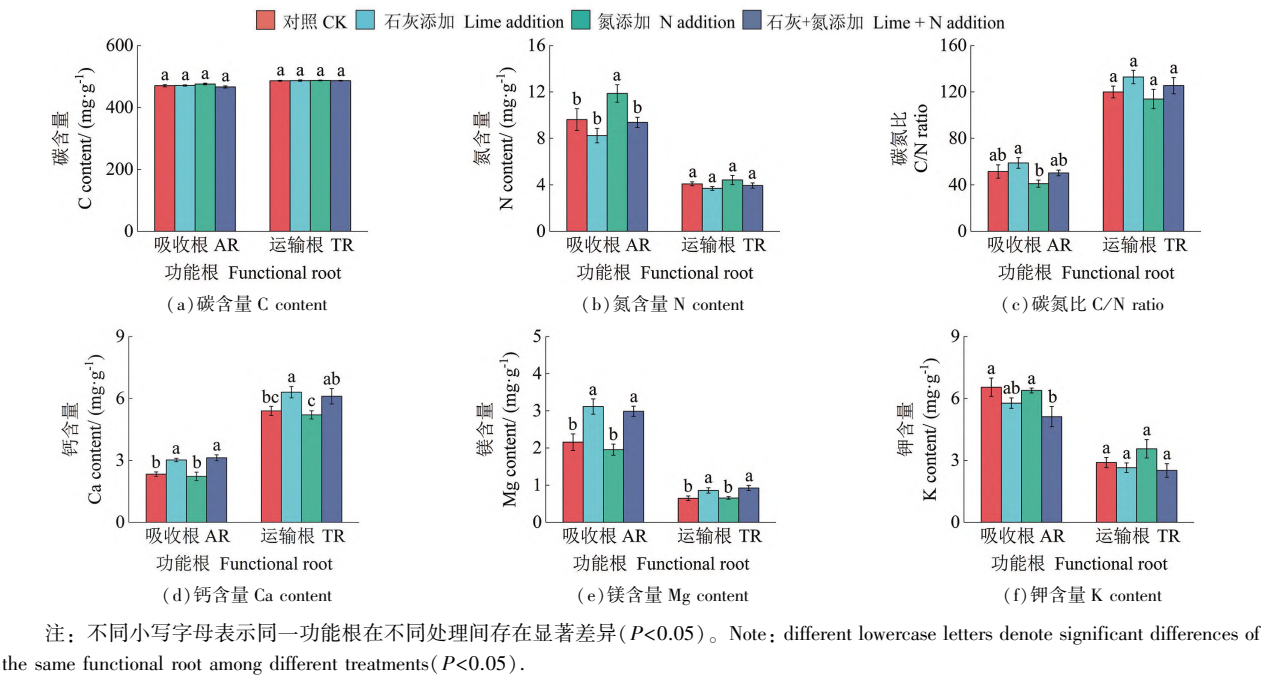


图 2 不同处理下杉木幼苗吸收根和运输根的化学指标
Figure 2 Chemical properties of absorptive roots and transport roots of *C. lanceolata* seedlings under different treatments

2.4 不同处理杉木幼苗根系功能性状的主成分分析

主成分分析的结果如图 3 所示。第 1 轴可以解释方差的 38.4%，第 2 轴可以解释方差的 17.3%。对照、氮添加处理的置信椭圆与石灰添加、石灰+氮添加处理的置信椭圆在第 1 轴上能较好地分开，说明与氮添加处理相比，包含石灰的添加处理均能显著地改变根的形态结构和化学指标。吸收根的比根长、比根面积和根组织密度分别同运输根的比根长、比根面积和根组织密度呈直角，说明二者具有较弱的相关关系。而其他吸收根与运输根的指标间均呈较小的锐角，说明二者之间具有较强的正相关关系。

2.5 土壤理化性质与根系功能性状的相关性

如表 3 所示，土壤的 pH 值与杉木幼苗两种功能根的根生物量、根长、根面积、钙含量、镁含量，以及吸收根的比根长、比根面积显著正相关，而与吸收根的氮、钾含量显著负相关($P<0.05$)。土壤可交换性钙离子含量与两种功能根的根生物量、根面积、镁含量，以及吸收根的根长、钙含量显著正相关，而与氮、钾含量显著负相关($P<0.05$)。土壤可交换性镁离子含量与两种功能根的生物量、钙含量、镁含量，以及与吸收根的根

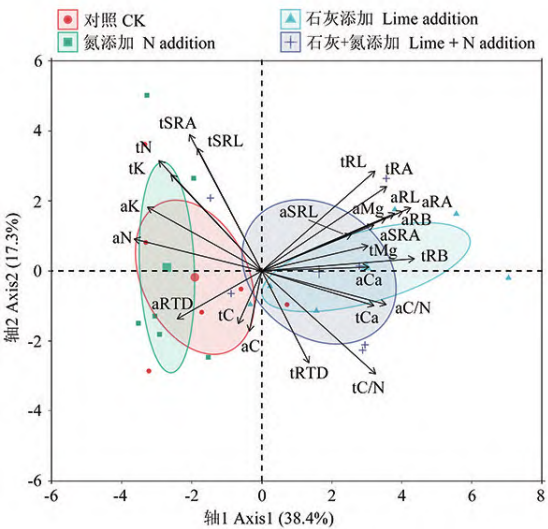


图 3 不同处理下杉木幼苗根系功能性状的主成分分析
Figure 3 PCA of root functional traits of *C. lanceolata* seedlings under different treatments

长、根面积显著正相关,而与吸收根的钾含量显著负相关($P<0.05$)。土壤硝态氮含量与吸收根的比根长、比根面积、根长、根面积、镁含量,以及两种功能根的碳氮比、钙含量显著负相关,而与两种功能根的氮含量显著正相关($P<0.05$)。

表 3 土壤理化性质与根系功能性状的相关性

Table 3 Correlation coefficients between soil properties and root functional traits of absorptive roots and transport roots

指标 Index	pH 值 pH value		可交换性钙离子含量 Caex content		可交换性镁离子含量 Mgex content		铵态氮含量 NH ₄ ⁺ -N content		硝态氮含量 NO ₃ ⁻ -N content	
	吸收根 AR	运输根 TR	吸收根 AR	运输根 TR	吸收根 AR	运输根 TR	吸收根 AR	运输根 TR	吸收根 AR	运输根 TR
根生物量 RB	0.601 *	0.600 *	0.562 *	0.528 *	0.549 *	0.491 *	0.127	0.158	-0.321	-0.363
比根长 SRL	0.428 *	-0.254	0.380	-0.284	0.259	-0.328	-0.305	-0.159	-0.543 *	0.160
比根面积 SRA	0.439 *	-0.312	0.395	-0.303	0.353	-0.321	-0.229	-0.160	-0.476 *	0.221
根组织密度 RTD	-0.270	0.206	-0.229	0.159	-0.283	0.139	0.071	0.171	0.155	-0.149
根长 RL	0.673 *	0.451 *	0.614 *	0.357	0.542 *	0.283	-0.047	-0.007	-0.506 *	-0.241
根面积 RA	0.689 *	0.484 *	0.637 *	0.412 *	0.603 *	0.364	0.007	0.022	-0.469 *	-0.261
氮含量 N content	-0.508 *	-0.352	-0.438 *	-0.299	-0.370	-0.294	-0.019	-0.171	0.657 *	0.466 *
碳含量 C content	-0.308	-0.086	-0.244	-0.111	-0.337	-0.019	-0.041	-0.460 *	0.203	0.206
碳氮比 C/N ratio	0.406 *	0.353	0.340	0.313	0.250	0.310	0.086	0.191	-0.552 *	-0.442 *
钙含量 Ca content	0.697 *	0.529 *	0.675 *	0.395	0.731 *	0.518 *	-0.218	-0.013	-0.513 *	-0.416 *
镁含量 Mg content	0.723 *	0.583 *	0.734 *	0.633 *	0.689 *	0.679 *	0.005	-0.006	-0.438 *	-0.309
钾含量 K content	-0.475 *	-0.382	-0.545 *	-0.415 *	-0.584 *	-0.393	-0.170	-0.180	0.252	0.265

注: * 表示显著相关($P<0.05$)。Note: * indicate significant correlation($P<0.05$) .

3 讨论与结论

3.1 石灰添加和氮添加对土壤理化性质的影响

本研究中,石灰添加处理显著提高了土壤的 pH 值及可交换性钙、镁离子含量。这与李志勇等^[18]的研究一致,该研究发现石灰添加($4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)3 a 后,马尾松林土壤的 pH 值从 3.6 上升到 5.6。同时,LI *et al*^[8]还发现,石灰添加 11 a 后的土壤 pH 值较对照处理仍约提高了 0.8,可交换性钙离子含量较对照处理仍提高了 180%。这些结果表明,石灰添加可以持久有效地改善森林土壤的严重酸化环境,有利于森林生产力的恢复。本研究中,石灰添加处理显著提高了土壤可交换性镁离子含量,这与张秀颖^[19]的研究一致。其原因可能是碳酸钙的施用引入的大量钙离子与土壤中的镁离子竞争相同吸附位点,导致被土壤吸附的交换性镁释放出来。本研究中,石灰添加处理对土壤铵态氮与硝态氮含量的影响不显著,这与胡敏等^[20]的研究结果不一致,该研究发现石灰添加提高了土壤硝态氮的含量。这一差异可能是由于本研究中的盆栽试验存在植物干扰,而胡敏等^[20]研究使用的是土壤样品。钙的添加可能促进了植物对铵态氮的吸收,“收紧”了氮循环的过程,降低了硝化速率^[21]。此外,本研究表明,氮添加处理显著提高了土壤硝态氮含量,但未显著影响土壤 pH 值及可交换性钙、镁离子含量。这与王娇等^[22]关于氮肥显著提高土壤硝态氮含量的发现一致。然而,王娇等^[22]同时报道了氮肥添加会显著降低土壤 pH 值,而本研究则未观察到这一效应。该差异可能源于本研究土壤初始 pH 值相对较低或处理时间较短。本研究中,氮添加处理对土壤 pH 值及可交换性钙、镁离子含量无显著影响,这可能也是导致石灰+氮添加处理与单一石灰添加处理效应一致的原因,石灰添加可能比氮添加对土壤理化性质的影响更快速。未来的研究可考虑利用长期氮沉降试验平台,进一步探究石灰添加对植物生长的促进作用及其机理。

3.2 石灰添加对杉木幼苗根系功能性状的影响

植物可通过调整根系功能性状以快速适应环境的变化,从而达到最佳的生长状态。本研究中,石灰添加处理显著提高了根系的比根长,这与 YU *et al*^[10]的研究结果一致,其原因主要有两个方面。一方面,已有的研究^[23]表明酸性土壤中根系伸长生长受到铝毒的制约,而石灰添加可以有效缓解根系的铝毒。石灰添加提高了土壤的 pH 值,当 pH 值低于 5.5 时,铝主要以可被植物吸收的形式存在,而当 pH

值高于 5.5 时,铝通常与 OH^- 结合发生沉淀,难以被植物吸收^[24]。本研究,石灰添加处理和石灰+氮添加处理的土壤 pH 值均超过了上述阈值,因此有助于缓解根系遭受铝毒害,促进根系生长。另一方面,石灰添加引入大量钙离子,钙离子在细胞壁和细胞膜中起结构作用,钙离子还存在于质外体中,维持细胞和组织的活力,参与调控根和茎的伸长生长^[25]。本研究相关性分析的结果也表明土壤的 pH 值与吸收根的比根长正相关。根系的比根长通常反映单位成本根系对土壤探索的潜在范围^[26]。因此,本研究表明石灰添加处理有助于提高根系对土壤的探索效率。

本研究中,石灰添加处理也显著提高了根生物量,可能同样归因于石灰添加处理显著提高了土壤的 pH 值及可交换性钙、镁离子含量。土壤 pH 值的提高有助于提高微生物的活性,加速土壤有机质矿化,从而提高土壤养分有效性^[27]。钙和镁均为植物生长的必须元素:钙在植物胞内胞外信号传导和维持细胞膜、细胞壁的活力和完整性方面有重要作用^[24];镁则在光合过程、酶的活化以及蛋白质合成中发挥关键作用^[28]。南方酸性红壤中的阳离子,特别是钙、镁离子大量淋失^[29],可能导致植物面临钙、镁限制^[13]。本研究中,石灰添加处理有效提高了酸性土壤中的可交换性钙、镁含量,因此显著提高了根系钙、镁含量。本研究中,石灰添加处理降低了根系中的钾离子含量,这与 HAN *et al*^[30] 的研究一致,该研究发现土壤可交换性钙、镁离子的含量与钾离子的吸收量负相关。这可能是由于细胞膜上的钾离子通道被过量的钙离子占据,抑制了根系对钾离子的吸收。综上所述,在酸性土壤上添加石灰不仅增加了根系的总长度也提高了根系钙、镁离子的含量。更长的根系可扩大植物对土壤的探索范围,而钙、镁离子的补充则有利于促进关键生理过程,二者共同促进了植物对土壤养分和水分的吸收。

本研究也观察到石灰和氮同时添加对根系形态和化学指标的影响与石灰单独添加的结果趋势一致,与单独添加氮的结果不一致。说明亚热带杉木人工林的根系功能性状的调整可能主要受到土壤 pH 值以及钙、镁等阳离子限制而不是受到氮元素限制。本研究表明,在当前及未来氮沉降加剧情境下,需优先缓解土壤酸性以促进根系高效利用土壤养分;盲目增施肥料不仅导致人工林增产受限,还可能引发环境污染问题。

3.3 氮添加对杉木幼苗根系功能性状的影响

本研究中,氮添加处理对根生物量及根系形态结构(如比根长、比根面积、根组织密度)均未产生显著影响,此结果与近期一项 Meta 分析结果一致:ZHAO *et al*^[9] 研究表明,氮沉降对根生物量、比根长、比根面积及根组织密度均无显著影响,但显著提高了根系的氮含量并降低了根系的碳氮比。其可能的原因如下:其一,亚热带土壤通常受到磷限制而不是氮限制^[31],植物可能无需增加向根系分配的碳以获取氮素;其二,尽管氮沉降常通过土壤酸化抑制根系生长^[32],但本研究中由于土壤初始 pH 值较小或处理时间较短,模拟氮沉降未显著改变土壤 pH 值,因此可能避免了由此产生的根生物量及根系形态结构调整,由于根生物量和比根长未受显著影响,因此根长和根面积均未受到显著影响。在根系化学特征方面,本研究观察到氮添加处理显著提高了根系的氮含量,相关性分析结果进一步表明土壤硝态氮含量与根系的氮含量正相关。这与 PENG *et al*^[33] 的研究结果一致,模拟氮沉降增强了土壤氮的有效性,促进了植物氮吸收,从而提高了根系的氮含量。

3.4 杉木幼苗不同功能根系对石灰添加和氮添加的响应

本研究将细根按照根序级分为了吸收根和运输根,考察两种功能根对环境变化是否有一致的响应。结果表明,吸收根和运输根在部分形态特征上对石灰添加处理的响应并不一致,表现为石灰添加处理未显著影响运输根的比根长、根长和根面积,而显著影响了吸收根的相应指标。这与郑一等^[13] 的研究结果一致,施钙会影响小径级的细根长度和表面积,而对大径级的根系影响不显著。可能是因为吸收根的木质化程度较低,而运输根木质化程度更高^[3],低木质化程度的根更容易调整形态,因此吸收根通常对环境的响应更为敏感。与形态结构不同,吸收根和运输根的生物量响应具有一致性。这和 YU *et al*^[10] 的结果一致,可能是因为植物根系的构型需要维持一定的比例。此外,石灰添加处理对运输根钙、镁含量的影响与吸收根的影响一致,说明运输根的化学指标相较于形态特征更容易受到环境变化的影响。综

上所述,根系形态结构的调整可能会被传统的细根定义方法所掩盖,采用根系分级的方法有助于全面了解根系功能性状对环境改变的调整策略。

3.5 结论

研究表明,一个生长季的氮添加处理未显著影响杉木幼苗根生物量及形态结构,仅提高了吸收根氮含量;石灰添加处理显著增大了吸收根的比根长、根长、根面积,以及提高了吸收根和运输根的钙、镁离子含量,但对运输根形态结构无显著影响;石灰+氮添加处理与石灰添加处理基本一致。这些结果说明:石灰添加处理通过改善土壤酸化环境,有利于增强根系的空间拓展能力与资源获取效率;吸收根在形态可塑性方面较运输根更敏感;现阶段亚热带杉木人工林根系功能性状的调整主要受土壤 pH 值与钙、镁等阳离子调控,而非氮元素主导。因此,在当前及未来氮沉降加剧情境下,需优先缓解土壤酸性以提升根系养分利用效率,从而有效提升森林生产力。

参考文献

- [1] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2015, 45(4): 325-339.
- [2] WEI B, ZHANG D Y, WANG G Q, *et al.* Experimental warming altered plant functional traits and their coordination in a permafrost ecosystem[J]. *New Phytologist*, 2023, 240(5): 1 802-1 816.
- [3] MCCORMACK M L, DICKIE I A, EISSENSTAT D M, *et al.* Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes[J]. *New Phytologist*, 2015, 207(3): 505-518.
- [4] 贾林巧, 陈光水, 张礼宏, 等. 罗浮栲和米槠细根形态功能性状对短期氮添加的可塑性响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4 003-4 011.
- [5] GAO W C, CHEN D M, HU X P, *et al.* Nitrogen deposition drives the intricate changes of fine root traits[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 43: e02 443.
- [6] 许延琴, 周冰倩, 刘隋赞昊, 等. 模拟氮沉降对土壤酶活性和微生物组成的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8 417-8 429.
- [7] 鲁显楷, 莫江明, 张伟, 等. 模拟大气氮沉降对中国森林生态系统影响的研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(5): 500-522.
- [8] LI Z Y, DAI P F, WANG Y H, *et al.* Effects of liming on health and growth of young *Schima superba* trees under canopy of a *Pinus massoniana* stand damaged by soil acidification in Chongqing, China[J]. *New Forests*, 2016, 47(6): 801-813.
- [9] ZHAO X X, TIAN Q X, HUANG L, *et al.* Fine-root functional trait response to nitrogen deposition across forest ecosystems: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 844: 157 111.
- [10] YU X, GUAN X, XIAO F M, *et al.* Effects of liming on the morphologies and nutrients of different functional fine roots of *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J]. *Forests*, 2022, 13(6): 822.
- [11] 江佳, 盛笑羚, 邵炯妮, 等. 马尾松和木荷幼苗主要功能性状对氮磷和石灰添加的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(2): 410-416.
- [12] 张崇哲. 氮沉降和酸度改良对红壤地区植物细根功能性状及生态过程的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [13] 郑一, 张振, 金国庆, 等. 低肥力土壤施用氮磷钾肥影响柏木家系根系发育和养分吸收对钙肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1 501-1 512.
- [14] 纪娇娇, 张秋芳, 杨智杰, 等. 模拟氮沉降对中亚热带杉木幼树根系生物量的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6 118-6 125.
- [15] 毛馨月, 沈育伊, 褚俊智, 等. 模拟氮沉降对中亚热带桉树人工林土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 1 032-1 045.
- [16] BLANCO J A, WEI X H, JIANG H, *et al.* Impacts of enhanced nitrogen deposition and soil acidification on biomass production and nitrogen leaching in Chinese fir plantations[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 42(3): 437-450.
- [17] 杜旭龙, 余恒, 高艳丽, 等. 氮沉降对杉木幼树生物量及其分配的影响[J]. 森林与环境学报, 2023, 43(5): 523-529.
- [18] 李志勇, 刘桂君, 王彦辉, 等. 石灰石粉施用量对重庆酸雨区马尾松林下木荷生长的影响[J]. 林业科学研究, 2011, 24(2): 263-266.

- [19] 张秀颖. 模拟氮沉降和石灰添加对草甸草原土壤环境的影响[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2024.
- [20] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 72-77.
- [21] GROFFMAN P M, FISK M C. Calcium constrains plant control over forest ecosystem nitrogen cycling[J]. Ecology, 2011, 92(11): 2 035-2 042.
- [22] 王娇, 关欣, 张伟东, 等. 杉木幼苗生物量分配格局对氮添加的响应[J]. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1 231-1 240.
- [23] OSTONEN I, PÜTTSEPPÜ, BIEL C, *et al.* Specific root length as an indicator of environmental change[J]. Plant Biosystems-an International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology, 2007, 141(3): 426-442.
- [24] MERIÑO-GERGICHEVICH C, ALBERDI M, IVANOV A G, *et al.* Al³⁺-Ca²⁺ interaction in plants growing in acid soils: Al-phytotoxicity response to calcareous amendments[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 10(3): 217-243.
- [25] CHEN J, DUAN R X, HU W J, *et al.* Unravelling calcium-alleviated aluminium toxicity in *Arabidopsis thaliana*: insights into regulatory mechanisms using proteomics[J]. Journal of Proteomics, 2019, 199: 15-30.
- [26] GENG P F, JIN G Z. Fine root morphology and chemical responses to N addition depend on root function and soil depth in a Korean pine plantation in Northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 520: 120 407.
- [27] VÁZQUEZ E, BENITO M, ESPEJO R, *et al.* No-tillage and liming increase the root mycorrhizal colonization, plant biomass and N content of a mixed oat and vetch crop[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 200: 104 623.
- [28] GUO W L, NAZIM H, LIANG Z S, *et al.* Magnesium deficiency in plants: an urgent problem[J]. The Crop Journal, 2016, 4(2): 83-91.
- [29] 孙本华, 胡正义, 吕家珑, 等. 模拟氮沉降对红壤阳离子淋溶的影响研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 18-21.
- [30] HAN T F, CAI A D, LIU K L, *et al.* The links between potassium availability and soil exchangeable calcium, magnesium, and aluminum are mediated by lime in acidic soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(3): 1 382-1 392.
- [31] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5-15.
- [32] LU X K, MAO Q G, GILLIAM F S, *et al.* Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems[J]. Global Change Biology, 2014, 20(12): 3 790-3 801.
- [33] PENG Y F, GUO D L, YANG Y H. Global patterns of root dynamics under nitrogen enrichment[J]. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26(1): 102-114.

(责任编辑: 江英)