doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.03.008

阔叶化改培对马尾松林土壤碳氮转化的影响

高　伟[1,2],林国江[1,2],颜　耀[1,2],郑兆飞[3],郑清东[4]

(1.福建林业职业技术学院森林生态与碳汇计量研究所,福建 南平 353000)
(2.福建林业职业技术学院林学系,福建 南平 353000)
(3.南平市林业局,福建 南平 353000)
(4.福建农林大学林学院,福建 福州 350001)

[**摘要**]　深入探究亚热带地区不同阔叶化改培措施对马尾松人工林土壤碳氮转化过程的具体影响及其微观机制,为解决低效马尾松人工林改造及经营管理中的实际问题提供科学且精准的理论依据. 选取亚热带地区 27a 生马尾松人工林作为研究对象,设置未间伐马尾松林作为对照,以间伐套种木荷、间伐套种毛红椿两种改培模式为处理组,通过对土壤呼吸、氮矿化等指标的测定,系统研究不同阔叶化改培模式对马尾松人工林土壤碳氮转化过程的影响及作用机制. 结果显示:(1)3 种改培模式的土壤呼吸速率在春季、夏季和秋季均表现出明显的日变化,最高值均出现在 12:00—16:00,最低值基本都出现在 2:00 左右,而在冬季均没有明显的日变化;(2)3 种改培模式的土壤呼吸速率季节变化均为夏高冬低,且在不同季节均为间伐套种木荷模式最高,未间伐马尾松纯林最低;(3)3 种改培模式的土壤铵态氮、硝态氮、总矿质氮含量、土壤净氨化速率、净硝化速率和总矿化速率季节变化均为单峰曲线,不同季节中,2 种套种模式的氮转化速率均高于对照;(4)3 种改培模式的土壤呼吸除受土壤温度变化外,还受到土壤湿度的调控,土壤呼吸的温度敏感系数最高为间伐套种木荷模式. 年凋落物量、土壤全碳、土壤全氮、土壤 pH 和细根生物量与土壤呼吸速率和总氮矿化速率呈显著正相关,凋落物碳氮比、凋落物木质素/N、土壤容重、细根碳氮比与土壤呼吸速率和总氮矿化速率呈显著负相关. 间伐初期的林窗效应和由套种不同阔叶树介导的土壤有机碳输入数量和质量、土壤理化性质和微生物活性差异,导致阔叶化改培提高了马尾松林的土壤呼吸速率、土壤呼吸温度敏感性和土壤氮转化速率.

[**关键词**]　马尾松人工林,阔叶树,质量提升,土壤呼吸,氮矿化
[**中图分类号**]S714.2　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1001-4616(2025)03-0063-10

Effects of Broad-Leaved Cultivation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation in *Pinus massoniana* Plantation

Gao Wei[1,2],Lin Guojiang[1,2],Yan Yao[1,2],Zheng Zhaofei[3],Zheng Qingdong[4]

(1.Institute of Forest Ecology and Carbon Sink Measurement,Fujian Forestry Vocational and Technical College,Nanping 353000,China)
(2.Department of Forestry,Fujian Forestry Vocational and Technical College,Nanping 353000,China)
(3.Nanping Forestry Bureau,Nanping 353000,China)
(4.College of Forestry,Fujian Agriculture and Forestry University,Fuzhou 350001,China)

Abstract:To conduct an in-depth exploration of the specific impacts and micro-mechanisms of different broad-leaved transformation and cultivation measures on the soil carbon and nitrogen transformation processes in *Pinus massoniana* plantations in subtropical regions,and to provide a scientific and precise theoretical basis for solving practical problems in the transformation and management of inefficient *Pinus massoniana* plantations. Taking 27-year-old *Pinus massoniana* plantations in subtropical regions as the research objects,the un-thinned *Pinus massoniana* plantations were set as the control group,and the two transformation and cultivation modes of thinning and interplanting *Schima superba* and thinning and interplanting *Toona ciliata* were used as the treatment groups. Through the determination of indicators such as soil respiration and nitrogen mineralization,the impacts and action mechanisms of different broad-leaved transformation and cultivation modes on the soil carbon and nitrogen transformation processes in *Pinus massoniana* plantations were

收稿日期:2024-01-03.
基金项目:福建省中青年教师教育科研重点项目(JZ230077)、福建省林业科学研究项目(2023FKJ31)、福建省科技计划项目(2021Y6003).
通讯作者:高伟,博士,高级工程师,研究方向:森林生态系统碳氮循环研究. E-mail:gao01271@163.com

systematically studied. The results showed that:(1)The soil respiration rates of the three transformation and cultivation modes showed obvious daily variations in spring, summer and autumn. The highest values all occurred in 12:00-16:00, and the lowest values basically appeared around 2:00. However, there was no obvious daily variation in winter. (2)The seasonal variation of the soil respiration rates of the three transformation and cultivation modes was higher in summer and lower in winter. In different seasons, the soil respiration rate of the thinning and interplanting *Schima superba* mode was the highest, and that of the un-thinned *Pinus massoniana* plantation was the lowest. (3)The seasonal changes of soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total mineral nitrogen content, soil net ammonification rate, net nitrification rate, and total mineralization rate of the three transformation and cultivation modes all presented unimodal curves. In different seasons, the nitrogen transformation rates of the two interplanting modes were higher than those of the control. (4)The soil respiration of the three transformation and cultivation modes was not only affected by the change of soil temperature but also regulated by soil moisture. The temperature sensitivity coefficient of soil respiration was the highest in the thinning and interplanting *Schima superba* mode. Annual litterfall, soil total carbon, soil total nitrogen, soil pH, and fine root biomass were significantly positively correlated with soil respiration rate and total nitrogen mineralization rate, while litter carbon-nitrogen ratio, litter lignin/N, soil bulk density, and fine root carbon-nitrogen ratio were significantly negatively correlated with soil respiration rate and total nitrogen mineralization rate. The forest gap effect in the early stage of thinning and the differences in the quantity and quality of soil organic carbon input, soil physical and chemical properties, and microbial activity mediated by interplanting different broad-leaved trees led to the improvement of soil respiration rate, soil respiration temperature sensitivity, and soil nitrogen transformation rate in *Pinus massoniana* plantations through broad-leaved transformation and cultivation.

Key words: *Pinus massoniana* plantation, broad-leaved tree, quality improvement, soil respiration, nitrogen mineralization

碳氮循环为森林生态系统的核心驱动机制,调节着生态系统生产力、维持稳定性和有序运行[1]. 全球尺度上,陆地土壤是巨型碳库,相关研究显示其碳储量约 115×10^{15} kg,达陆地植被总碳储量的 3 倍,超全球大气碳库的 2 倍[2]. 在陆地生态系统碳循环中,土壤呼吸与氮矿化是森林土壤碳氮循环的关键过程,其中,土壤呼吸为第二大碳通量组分,对生态系统碳收支平衡起关键支撑作用[3],其微小变化都可能极大地影响全球碳平衡[4-5]. 氮素是植物生长和发育必须的大量营养元素,土壤氮的转化与循环是生态系统氮循环最重要和最活跃的过程. 土壤氮多以有机氮存在,微生物矿化作用是其向无机氮转化的关键路径[6],土壤中氮的迁移和转化直接影响土壤的供氮能力和林地生产力[7]. 在大部分森林生态系统中,氮可利用性是林木生长关键限制因子,与碳、磷、硫等耦合深刻影响养分有效性[8]. 在森林生态系统氮循环中,土壤是氮的主要贮存场所,其氮储量常超系统总量 90%,且多为有机态,需经微生物作用转化成铵态氮、硝态氮后,植物方可吸收利用. 因此,深入探究森林经营措施对土壤氮转化影响及机制,对制定科学森林经营策略、维系森林可持续发展意义重大. 森林土壤氮转化涵盖矿化、固定、反硝化、氨挥发及硝态氮淋溶等复杂过程,森林土壤有效氮以铵态氮、硝态氮为主,是植物直接吸收的关键氮形态[9]. 在森林生态系统研究中,氮的氨化与硝化统称矿化作用,净氮矿化可反映土壤氮供应状况,对其速率的探究有助于理解该生态系统生产力及氮循环,意义重大.

森林植被与土壤的互作关系对土壤微环境、微生物群落结构和生物地球化学循环过程均有显著影响. 大量研究认为,对低效针叶林间伐后补植阔叶树可增加林分结构层次,提高物种多样性,并改善土壤理化性质[10-11]. 但也有研究认为,由于不同树种的生态功能存在差异,针叶林下套种阔叶树对林地土壤质量的影响并非均为正效应[12-13]. 程分生等研究发现,在红壤侵蚀区马尾松林下套种无患子和杨梅后生态系统表现为“碳汇”,而套种油茶和黄栀子则表现为“碳源”[13],但其过程与机制尚不清楚,此外,杨梅属于固氮树种,针叶林下套种无患子和杨梅对碳增汇的机制尚不清楚.

马尾松是我国亚热带地区特有的乡土树种和荒山造林先锋树种,也是重要的工业原料林树种,生态和经济效益显著. 福建马尾松林面积达 68.53 万 hm^2,占全省乔木林面积的 11.03%,因长期纯林经营与短轮伐期皆伐,现面临物种多样性锐减、地力衰退及林分固碳功能弱化等生态问题[14]. 此外,马尾松人工林的抗逆性差,病虫害频发,低质低效林增加,生态服务功能受限. 因此,福建省提出举全省之力对马尾松人工林进行阔叶化改培,精准提高其森林质量,对于全省森林生态效益提升具有重要意义. 针对马尾松人工林退化等关键科学问题,采用抚育间伐并套种阔叶树种对林分质量进行改培提升是目前采取的主要措

施. 然而,林下套种不同树种后对马尾松人工林土壤养分的分布和转化是否有积极效应尚存在不确定性,而这将直接影响相关森林经营策略的制定和实施. 鉴于此,本研究以亚热带不同间伐套种模式(套种木荷 *Schima superba* 和毛红椿 *Toona ciliata*)的马尾松人工林为对象,研究了阔叶化改培措施对土壤碳氮转化过程的影响及微观机制,以期为低效马尾松人工林的改造和经营管理提供科学依据.

1　研究区概况

试验地设在建瓯市玉山镇岭口村 168 林班 03 大班 020 小班,面积为 314 亩,地理位置位于 26°50′41″N,118°32′41″E,坡位:下部,坡向:南坡,坡度 23~25 °,海拔 710~913 m,地貌系武夷山支脉的低山丘陵,属亚热带季风气候带,气候温和,雨量充沛,四季分明,春暖、夏热、秋凉、冬寒,年平均温度 16 ℃,年均日照时数 1 788.8 h,最热月平均温度 35 ℃,最冷月平均温度 3 ℃,绝对最高温 38 ℃,绝对最低温度-8 ℃,年积温 5 500~6 000 ℃,年降雨量 1 700 mm,相对湿度 79%,山地红壤.

选择 27a 生马尾松人工林作为试验样地,该林分于 2014 年进行择间伐,间伐强度为 50%,套种 3a 生木荷和毛红椿实生苗,套种密度分别为 1 200 株·hm^{-2}和 1 500 株·hm^{-2}. 对照林地为 27a 生马尾松纯林(不间伐). 3 种林分基本情况详见表 1. 试验期间研究区的气温和降水量变化如图 1.

表 1　马尾松林不同提质改培模式林分基本情况

Table 1　Essential details of *Pinus massoniana* forest stands under diverse quality-upgrading and cultivation approaches

变量	间伐套种木荷	间伐套种毛红椿	未间伐马尾松纯林
林龄/a	27	27	27
套种年限/a	9	9	—
套种密度/株·hm^{-2}	1200	1500	—
郁闭度	0.7	0.8	0.8
海拔/m	740	730	710
坡度	22°	20°	25°
胸径/cm	16.3(马尾松)6.7(木荷)	15.6(马尾松)8.6(毛红椿)	13.5
树高/m	17.2(马尾松)9.3(木荷)	15.7(马尾松)10.6(毛红椿)	13.7
年凋落物量/(t·hm^{-2}·a^{-1})	4.83	5.46	2.33
凋落物 C:N	22.05	38.23	59.13
凋落物木质素/N	15.74	26.53	44.72
细根生物量/(t·hm^{-2})	2.16	1.19	0.09
细根碳氮比	26.69	47.06	65.76
土壤全碳/(g·kg^{-1})	11.7	9.8	6.3
土壤全氮/(g·kg^{-1})	0.91	0.94	0.50
土壤 C:N	12.86	10.43	12.60
土壤 pH	4.95	4.62	4.39
容重/(g·cm^{-3})	1.33	1.31	1.41

注:表中"—"表示无该项数据.

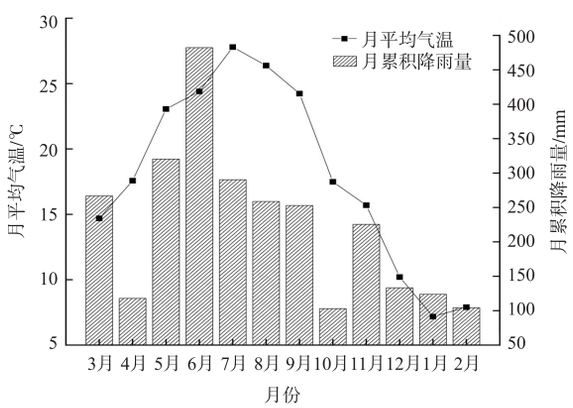


图 1　研究期间月平均气温和月累积降雨量

Fig. 1　Monthly average temperature and monthly accumulated rainfall during the study period

2 材料与方法

2.1 样地选择与调查

2022 年 3 月,在多种改培模式的林分中选择代表性区域,设置 4 个 20 m×20 m 样地,相邻样地间隔不少于 10 m,保障样本独立性. 对样地内全部乔木实施每木调查,精确记录种名、树高、胸径、冠幅等参数. 完成乔木调查后,将各样本样地细化为 4 个 10 m×10 m 小样方,选择对角线的 2 个小样方,开展其中灌木与草本植物的种类及生长量测定.

2.2 凋落物层和土壤层碳含量测定

样地调查的同时,在每个 20 m×20 m 的样地内布设 3 个 1 m×1 m 的凋落物收集器,收集不同改造模式的林分凋落物,测定年凋落物量. 调查结束后,在每个样地内沿对角线设置 5 个取样点,用内径为 5 cm 的不锈钢管,分别采集 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤,分层混合装袋,在实验室内拣出细根(根径 <2 mm),根据外形、颜色和弹性区分死根和活根,风干后称重,在烘箱内 65 ℃烘干至恒重,参照 Yang 等[15]的方法估算细根生物量. 细根拣出后的土壤过 2 mm 筛分为 2 份:一份于 4 ℃冰箱保存,用于测定可溶性有机碳氮、土壤微生物量碳氮等指标;另一份于通风处自然风干,用来测定土壤全碳、全氮及其他理化性质指标. 同时在每个样地内挖取 1 个土壤剖面,用环刀法测定不同土层的土壤容重.

2.3 土壤呼吸测定

2022 年 3 月,在不同改造模式的林分中,选择有代表性的区域设置 4 个 20 m×20 m 的样地,样地之间间隔 10 m 以上. 在每个样地内均匀布设 4 个内径为 20 cm、高为 10 cm 的 PVC 土壤呼吸圈,呼吸圈打入土壤深度为 5 cm,露出高度为 5 cm.

分别于 2022 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)和 2023 年 1 月(冬季)中旬,选择连续 5 个晴朗天气,采用青岛明华电子仪器有限公司生产的 TY2000-B 型便携式气体检测仪对不同改造模式进行土壤呼吸日动态测定,测定时间为上午 8:00 至次日凌晨 6:00,每 2 h 测定一次,测定时齐地表减去呼吸圈内的植物. 将这 5 d 测定的土壤呼吸数据进行平均,得到该时间段的土壤呼吸速率平均值.

测定土壤呼吸的同时,采用 TDR 温湿度测定仪同步测定土壤呼吸圈周边 0~10 cm 土层深度的土壤温湿度. 采用 TMS 温湿度计记录监测期内土壤温湿度的变化,记录间隔为 30 min.

2.4 土壤氮矿化速率测定

自 2022 年 3 月起,针对不同改造模式的林分,运用原位培养法对土壤氮矿化速率予以测定. 具体为:于不同改培模式所设置的 4 个样地内,沿对角线精准布设 5 个采样位点,在各采样点处,将 2 根内径 5 cm 的 PVC 管垂直打入土壤,入土深度为 10 cm. 其中一根 PVC 管随即取出,并及时带回实验室,用于测定土壤无机氮含量,此数值作为培养初始值;另一根则留置原地,开展为期 3 个月的原位培养,期满后取出带回实验室,测定其无机氮含量,所得结果即为春季土壤氮矿化量. 此后,按季度重复上述操作流程,以此构建氮矿化的季节动态. 氮矿化的取样时间与土壤呼吸测定时间相互契合,即为 2022 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)以及 2023 年 1 月(冬季).

土壤矿质氮含量($mg\cdot kg^{-1}$)、土壤净矿化速率和净硝化速率($mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$)按照文献[16]计算.

2.5 样品测定方法

植物与土壤碳氮含量测定采用德国 Elementar Analysensysteme GmbH 公司生产的 Vario EL Ⅲ型碳氮元素分析仪. 土壤微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸硫酸钾浸提法[17],浸提液有机碳浓度用日本岛津公司的 TOC-VCPH/CPN Analyzer 测定,参考已有研究,转换系数取 0.45[18],有机氮浓度用 Skalar Analytical B.V. 公司的 SAN++连续流动分析仪测定,转换系数为 0.54[19],土壤总有机碳和全氮含量测定同样选用上述德国公司的 Vario EL Ⅲ型元素分析仪;土壤 pH 值测定采用数字式酸度计,水土比为 2.5∶1.

2.6 数据统计分析

分别采用线性建立不同森林类型土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T)、土壤湿度(W)之间的关系模型,模型如下:

$$R_s = a\mathrm{e}^{bT},$$

$$R_s = aW + b.$$

式中,T 为 10 cm 土壤温度(℃),W 为 10 cm 土壤湿度(%),a、b 为待定参数,土壤呼吸温度敏感系数 $Q_{10}=e^{10b}$,b 为模型 $R_s=ae^{bT}$ 中的温度系数.

数据处理采用 PASW Statistics 18.0 软件,以样地为单元,剔除数据异常值后开展统计分析. 将不同季节土壤呼吸数据构建日动态序列,以均值表征季节动态. 运用单因素方差分析与 Duncan's 法多重比较检验($\alpha=0.05$)甄别不同林分变量差异. 利用 Origin8.5 绘图,误差线表示标准差.

3　结果与分析

3.1　不同改培模式土壤呼吸日动态

由图 2 可见,3 种改培模式的土壤呼吸表现出相似的变化模式,在不同季节,均为夏季土壤呼吸速率最高,其次为春季,冬季最低. 在春、夏、秋 3 季,3 种改培模式的土壤呼吸速率表现出明显的日变化,最高值均出现在 12:00—16:00,最低值基本都出现在 2:00 左右. 在冬季 3 种改培模式土壤呼吸则均没有明显的日变化. 不同季节中,间伐套种木荷模式的土壤呼吸速率最高值为 7.44 μmol·m^{-2}·s^{-1},间伐套种毛红椿模式的土壤呼吸速率最高值为 5.81 μmol·m^{-2}·s^{-1},未间伐马尾松纯林的土壤呼吸速率最高值为 2.93 μmol·m^{-2}·s^{-1}.

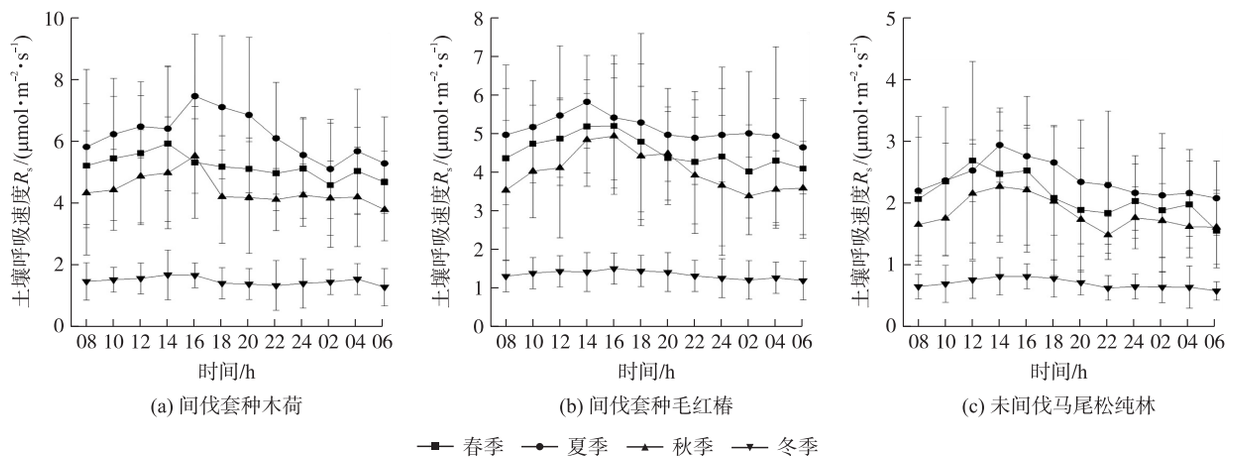


图 2　不同改培模式土壤呼吸日动态

Fig. 2　Daily dynamics of soil respiration under different cultivation improvement modes

3.2　不同改培模式土壤呼吸季节动态

由图 3 可见,3 种改培模式的土壤呼吸速率表现出相同的季节变化,均为夏高冬低,且在不同季节均为间伐套种木荷模式最高,未间伐马尾松纯林最低. 3 种改培模式的土壤呼吸最高值分别为 6.15 μmol·m^{-2}·s^{-1}(间伐套种木荷)、5.12 μmol·m^{-2}·s^{-1}(间伐套种毛红椿)和 2.38 μmol·m^{-2}·s^{-1}(未间伐马尾松纯林).

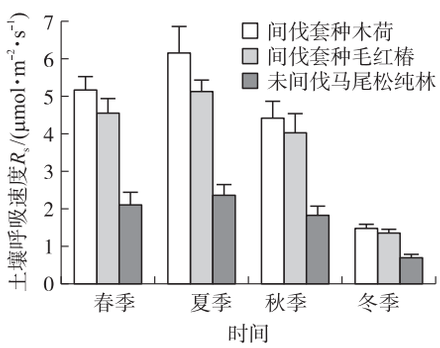


图 3　不同改培模式土壤呼吸季节动态

Fig. 3　Seasonal dynamics of soil respiration under different cultivation improvement modes

由图 4 可见,3 种改培模式的土壤温度表现出相同的季节变化趋势,均为夏季最高,冬季最低,且在不同季节,3 种改培模式之间土壤温度无显著差异. 而土壤含水量均为春夏季较高,秋冬季较低,且 2 种间伐套种模式的土壤含水量显著高于未间伐马尾松纯林,可见间伐套种处理增加了林下植被物种多样性的同时,也显著提高了土壤的含水能力.

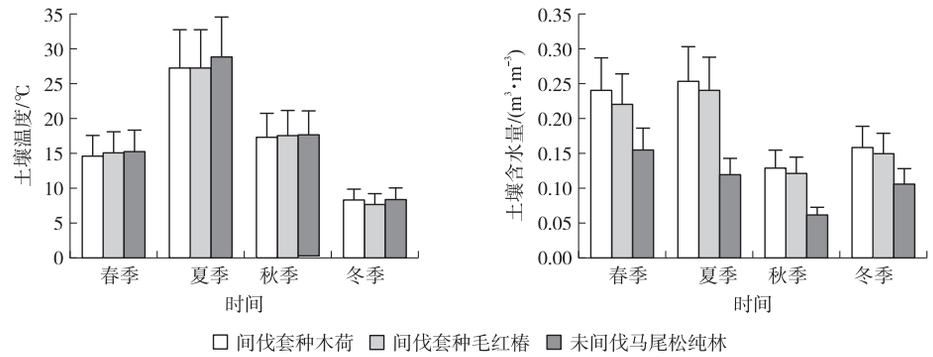


图 4　不同改培模式 10 cm 土壤温度和含水量季节变化

Fig. 4　Seasonal changes in the soil temperature and water content at a depth of 10 cm under different cultivation improvement modes

3.3　土壤无机氮含量及氮矿化速率季节动态

由图 5 可见,3 种改培模式的土壤铵态氮、硝态氮和总矿质氮含量季节变化均为单峰曲线,除间伐套种木荷模式的土壤硝态氮峰值出现在秋季外,其他改培模式的无机氮含量峰值均出现在夏季. 土壤总矿质氮含量的最高值分别为 74.65 mg·kg^{-1}(间伐套种木荷)、67.66 mg·kg^{-1}(间伐套种毛红椿)和 39.74 mg·kg^{-1}(未间伐马尾松纯林),年均值分别为 37.09 mg·kg^{-1}(间伐套种木荷)、34.40 mg·kg^{-1}(间伐套种毛红椿)和 19.34 mg·kg^{-1}(未间伐马尾松纯林).

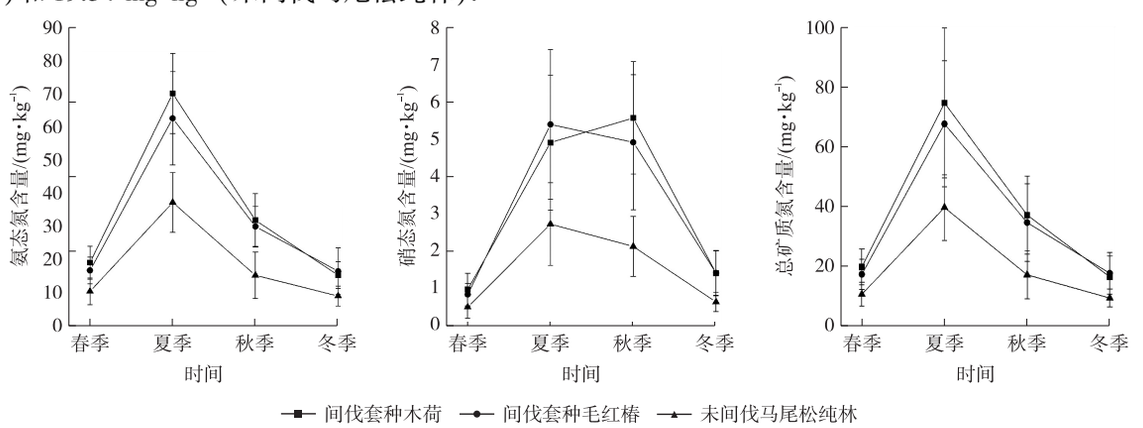


图 5　不同改培模式土壤无机氮含量季节动态

Fig. 5　Seasonal dynamics of soil inorganic nitrogen content under different cultivation improvement modes

由图 6 可见,3 种改培模式的土壤净氨化速率、净硝化速率和总矿化速率季节变化均为单峰曲线,且均为夏季最高,冬季最低. 不同季节中,2 种套种模式的氮转化速率均高于对照. 一年中,间伐套种木荷模式的平均净氨化速率为 0.36 mg·kg^{-1}·d^{-1},间伐套种毛红椿模式的平均净氨化速率为 0.32 mg·kg^{-1}·d^{-1},未间伐马尾

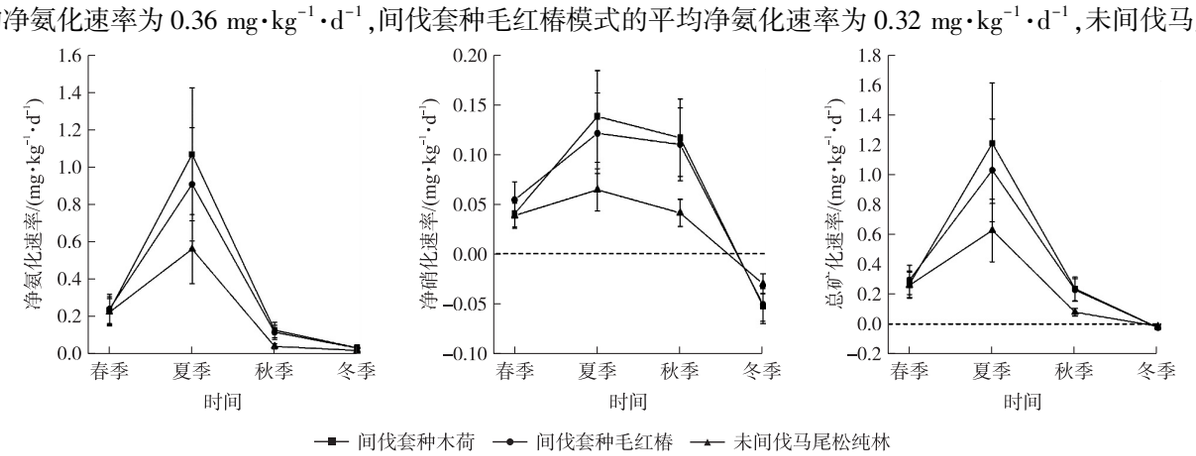


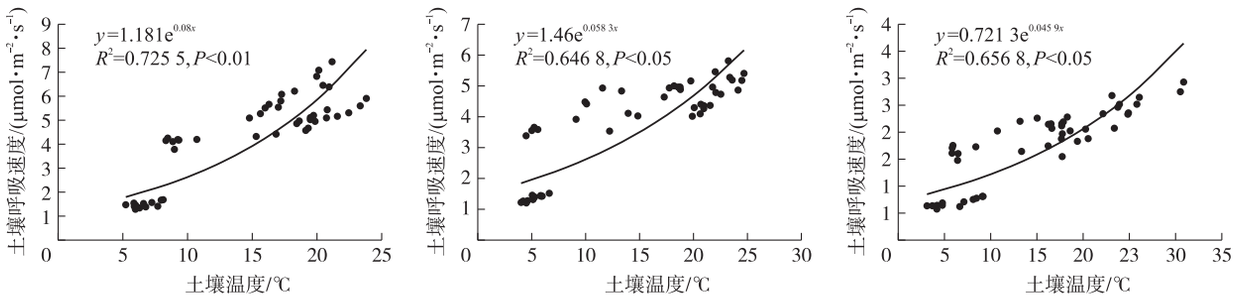
图 6　不同改培模式土壤氮矿化速率季节动态

Fig. 6　Seasonal dynamics of soil nitrogen mineralization rate under different cultivation improvement modes

松纯林的平均净氨化速率为 0.21 mg·kg^{-1}·d^{-1}. 间伐套种木荷模式的平均净硝化速率为 0.06 mg·kg^{-1}·d^{-1},间伐套种毛红椿模式的平均净硝化速率为 0.06 mg·kg^{-1}·d^{-1},未间伐马尾松纯林的平均净硝化速率为 0.03 mg·kg^{-1}·d^{-1}. 间伐套种木荷模式的平均总氮矿化速率为 0.42 mg·kg^{-1}·d^{-1},间伐套种毛红椿模式的平均总氮矿化速率为 0.38 mg·kg^{-1}·d^{-1},未间伐马尾松纯林的平均总氮矿化速率为 0.24 mg·kg^{-1}·d^{-1}.

3.4　环境因子与土壤碳氮转化的关系

由图 7 可见,不同改培模式的土壤呼吸速率与土壤温度均存在显著的指数关系,10 cm 土壤温度可以解释土壤呼吸动态变化的 64.7%~72.6%,相关系数最高为间伐套种木荷模式,最低为间伐套种毛红椿模式.



(a) 间伐套种木荷　(b) 间伐套种毛红椿　(b) 未间伐马尾松纯林

图 7　不同改培模式的土壤呼吸速率与土壤温度的关系模型

Fig. 7　Relationship model between soil respiration rate and soil temperature under different cultivation improvement models

由表 2 可见,不同改培模式土壤呼吸的温度敏感系数最高为间伐套种木荷模式,为 2.23;其次为套种毛红椿模式,为 1.79;未间伐马尾松纯林最低,为 1.58.

与土壤温度相比,土壤湿度与土壤呼吸速率之间的相关性相对较低,10 cm 土壤湿度可以解释土壤呼吸动态变化的 6%~43.9%. 3 种改培模式的土壤呼吸动态变化与土壤湿度均呈正相关,说明这 3 种改培模式的土壤呼吸除受土壤温度变化外,还受到土壤湿度的调控.

表 2　不同改培模式的土壤呼吸速率与土壤温湿度的回归模型及 Q_{10} 值

Table 2　Regression models of soil respiration rate and soil temperature and humidity, and Q_{10} values under different cultivation improvement modes

改培模式	$R_s=ae^{bT}$			$R_s=aW+b$			Q_{10}
	a	b	R^2	a	b	R^2	
间伐套种木荷	1.181	0.080	0.726*	21.869	0.048	0.439	2.23
间伐套种毛红椿	1.460	0.058	0.647*	17.690	0.539	0.365	1.79
未间伐马尾松纯林	0.723	0.046	0.657*	4.855	1.214	0.066	1.58

注:* 表示 $P<0.05$.

由表 3 可见,3 种改培模式的年凋落物量、土壤全碳、土壤全氮、土壤 pH 和细根生物量与土壤呼吸速率和总氮矿化速率呈显著正相关,凋落物碳氮比、凋落物木质素/N、土壤容重、细根碳氮比与土壤呼吸速率和总氮矿化速率呈显著负相关.

表 3　环境因子与土壤呼吸与总氮矿化速率的关系

Table 3　Relationship between environmental factors, soil respiration and total nitrogen mineralization rate

环境因子	土壤呼吸速率		总氮矿化速率	
年凋落物量	$R=0.803^*$	$P=0.046$	$R=0.807^*$	$P=0.042$
凋落物碳氮比	$R=-0.967^*$	$P=0.164$	$R=-0.969^*$	$P=0.016$
凋落物木质素/N	$R=-0.987^*$	$P=0.014$	$R=-0.988^*$	$P=0.049$
土壤全碳	$R=0.988^*$	$P=0.038$	$R=0.989^*$	$P=0.033$
土壤全氮	$R=0.966^*$	$P=0.047$	$R=0.964^*$	$P=0.031$
土壤 C/N	$R=-0.225$	$P=0.856$	$R=-0.218$	$P=0.860$
土壤 pH	$R=0.902^*$	$P=0.024$	$R=0.905^*$	$P=0.028$
容重	$R=-0.951^*$	$P=0.021$	$R=-0.948^*$	$P=0.025$
细根生物量	$R=0.947^{**}$	$P=0.009$	$R=0.949^{**}$	$P=0.005$
细根碳氮比	$R=-0.946^*$	$P=0.021$	$R=-0.948^*$	$P=0.026$

注:* 表示 $P<0.05$, * * 表示 $P<0.01$.

4 讨论

以亚热带不同间伐套种模式的马尾松人工林为对象,研究了抚育改培措施对土壤碳氮转化过程的影响及微观机制,结果发现在春夏秋 3 季,不同改培模式的土壤呼吸速率在春季、夏季和秋季均表现出明显的日变化,最高值均出现在 12:00—16:00,最低值基本都出现在 2:00 左右,而在冬季均没有明显的日变化,土壤呼吸的日变化模式与土壤温度具有显著的正相关性,这与中国亚热带竹林的研究结果一致[20]. 这种显著的正相关性说明土壤温度是控制不同改培模式森林土壤呼吸的关键因子,相同的趋势也在大量研究中被报道[21-22].

森林采伐一般会导致地上部分碳储量发生巨大的变化,同时造成森林生态系统中生物因子(根系、土壤动物和微生物等)和气候因子(温度、湿度等)的变化,从而影响森林土壤的 CO_2 排放[23]. 通常认为,采伐干扰短期内会增加土壤呼吸[24-25]. 本研究中,同未间伐马尾松纯林相比,两种间伐套种模式的土壤呼吸 Q_{10}值均高于对照,说明间伐套种提高了土壤呼吸的温度敏感性,这与雷蕾等对三峡库区的马尾松纯林研究结果一致[26],在其研究中,15%间伐强度的马尾松纯林土壤呼吸 Q_{10}值与对照无显著差异,而 70%间伐强度的马尾松林土壤呼吸 Q_{10}值显著高于对照,高强度的采伐显著提高了土壤温度与湿度,采伐强度与土壤呼吸速率增值呈正比. 本研究中,两种间伐套种模式的高 Q_{10}值可能与较高的间伐强度(50%)有关系. 间伐套种木荷模式中较高的 Q_{10}值说明该模式中土壤呼吸对温度变化的敏感性要强于间伐套种毛红椿和对照模式,这可能跟间伐套种木荷模式中较高的土壤有机碳含量和较低的凋落物碳氮比有关. 由此可以预见的是,随着全球气候变暖,相比套种毛红椿,针叶林间伐套种木荷可能会排放更多的 CO_2.

本研究中,不同改培模式的土壤呼吸存在差异. 首先,间伐能够增加林内光照,改变林下微气候环境,为土壤微生物和植物根系活动创造更有利条件. 间伐套种木荷模式土壤呼吸速率最高,可能因为木荷作为套种树种,其自身生物学特性使得林分结构更为合理. 木荷枝叶分布和冠层结构能更好地调节林内光照和通风,促使土壤微生物更活跃,进而增强土壤呼吸作用. 其次,间伐套种木荷模式的年凋落物量较高,而其凋落物碳氮比和木质素/N 较低,这意味着凋落物分解相对容易,能更快为土壤微生物提供丰富的有机碳源,微生物活动增强,土壤呼吸速率随之提高. 此外,间伐套种木荷和毛红椿模式的土壤全碳、全氮含量相对较高,土壤 pH 也更适宜微生物生长繁殖,良好的土壤理化环境有助于提升土壤呼吸作用. 间伐套种木荷模式细根生物量较大,细根碳氮比较低,细根的呼吸作用和周转速率更快,进一步促进了土壤呼吸.

在 3 种模式中,均没有发现土壤呼吸速率与土壤湿度的显著相关性,相同的研究结果在中国亚热带的研究中也被多次报道[27],但也有研究认为土壤湿度与土壤呼吸之间存在显著相关性[28]. 这些不一致的结论预示着土壤呼吸与土壤湿度之间的关系是不确定的,有待于进一步研究.

氮素作为植物有机合成重要的营养元素,是森林生态系统生产力主要的限制元素之一. 本研究中,3 种改培模式的土壤铵态氮、硝态氮、总矿质氮含量、土壤净氨化速率、净硝化速率和总矿化速率季节变化均为单峰曲线. 不同季节中,2 种套种模式的土壤有效氮含量和氮转化速率均高于对照,这首先可能与间伐有关. 欧江等人研究了长江上游马尾松人工林土壤铵态氮和硝态氮对采伐林窗的初期响应,发现森林采伐后形成的林窗可能会提升土壤的有效氮含量,特别是在生长季初期,林窗对土壤温度及微生物活性的改变可能是影响土壤有效氮含量的主要因素[29]. 因此,本研究中,两种间伐套种模式土壤的高氮含量和氮转化速率可能归因于间伐初期的林窗效应和套种木荷和毛红椿后,由树种介导的向土壤输入的有机碳数量和质量、理化性质和微生物活性显著不同,最终影响了土壤碳氮转化.

间伐套种木荷模式土壤氮转化速率高于间伐套种毛红椿模式和未间伐马尾松纯林,可能是由于木荷本身的生物学特性. 木荷凋落物分解相对较快(低 C:N),能更迅速地为土壤提供养分,且其根系分泌物等可能对土壤微生物群落结构产生更有利的影响,促进了微生物对土壤有机氮的矿化作用,进而提高了土壤氮转化速率. 间伐套种毛红椿模式氮转化速率高于未间伐马尾松纯林,一方面源于间伐形成的林窗效应,另一方面毛红椿独特的根系分布和生理活动也可能增加了土壤中微生物的活性和多样性,有助于氮的转化. 而未间伐马尾松纯林由于林分结构单一,土壤微生物活性相对较低,凋落物质量和数量有限,导致其土壤氮转化速率相对较低.

5　结论

对马尾松人工纯林间伐套种木荷和毛红椿后,其土壤呼吸速率在春季、夏季和秋季均表现出明显的日变化,而在冬季均没有明显的日变化. 与未间伐马尾松纯林相比,两种间伐套种模式均提高了土壤呼吸速率和土壤呼吸的温度敏感性,以间伐套种木荷最为显著,随着全球气候变暖,相比套种毛红椿,针叶林间伐套种木荷可能会排放更多的 CO_2. 两种间伐套种模式提高了土壤的氮转化速率,这可能归因于间伐初期的林窗效应和套种木荷和毛红椿后,由树种介导的向土壤输入的有机碳数量和质量、理化性质和微生物活性显著不同,最终影响了土壤碳氮转化.

[参考文献]

[1] 项文化,黄志宏,闫文德,等. 森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述[J]. 生态学报,2006,26(7):2365-2372.

[2] 陈玉平,吴佳斌,张曼,等. 枯落物处理对森林土壤碳氮转化过程影响研究综述[J]. 亚热带资源与环境学报,2012,7(2):84-94.

[3] RAICH J W,SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus,1992,44(2):81-99.

[4] SONG X Z, YUAN H Y, KIMBERLEY M O, et al. Soil CO_2 flux dynamics in the two main plantation forest types in subtropical China[J]. Science of the total environment,2013(444):363-368.

[5] DIXON R K,SOLOMON A M,BROWN S,et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science,1994,263(5144):185-190.

[6] 郎漫,李平,魏玮. 不同质地黑土净氮转化速率和温室气体排放规律研究[J]. 农业环境科学学报,2020,39(2):429-436.

[7] 毛超,漆良华. 森林土壤氮转化与循环研究进展[J]. 世界林业研究,2015,28(2):8-13.

[8] BRUUN S,LUXHOI J,MAGID J,et al. A nitrogen mineralization model based on relationships for gross mineralization and immobilization[J]. Soil biology & biochemistry,2006,38(9):2712-2721.

[9] 李建平,欧江,宋小艳,等. 马尾松人工林林窗土壤有效氮和氮转化酶活性的季节动态[J]. 生态学杂志,2015,34(9):2598-2604.

[10] 赵苏亚,王瑞辉,刘凯利,等. 抚育间伐对不同年龄杉木人工林生长及林下植被多样性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(12):34-43.

[11] 王祖华,李瑞霞,王晓杰,等. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及生物量的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(12):2778-2782.

[12] 赵辉,周运超,任启飞. 不同林龄马尾松人工林土壤微生物群落结构和功能多样性演变[J]. 土壤学报,2020,57(1):227-238.

[13] 程分生,尤龙辉,叶功富,等. 亚热带红壤侵蚀区马尾松不同套种模式生态系统碳平衡[J]. 应用生态学报,2021,32(4):1163-1174.

[14] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(10):2323-2331.

[15] YANG Y S,CHEN G S,LIN P,et al. Fine root distribution,seasonal pattern and production in four plantations compared with a natural forest in Subtropical China[J]. Annals of forest science,2004,61(7):617-627.

[16] 高伟. 南亚热带海岸沙地主要林分类型碳氮特征研究[D]. 福州:福建师范大学,2019.

[17] BROOKES P C, LANDMAN A, PRUDEN G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. Soil biology and biochemistry,1985,17(6):837-842.

[18] JOERGENSEN R G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EC} value[J]. Soil biology & biochemistry,1996,28(1):25-31.

[19] JOERGENSEN R G, MUELLER T. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the kEN value[J]. Soil biology & biochemistry,1996,28(1):33-37.

[20] FAN S H,XIAO F M,WANG S L,et al. Soil respiration of Moso Bamboo plantation in Huitong,Hu'nan Province[J]. ACTA ecologica sinica,2009,25(12):241-249.

[21] TANG X L, LIU S G, ZHOU G Y, et al. Soil-atmospheric exchange of CO_2, CH_4, and N_2O in three subtropical forest

ecosystems in southern China[J]. Global change biology,2010,12(3):546-560.
[22] LIU J,JIANG P K,WANG H L,et al. Seasonal soil CO_2 efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso Bamboo plantations in subtropical China[J]. Forest ecology & management,2011,262(6):1131-1137.
[23] TANG J W,QI Y,XU M,et al. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada[J]. Tree physiology,2005,25(1):57-66.
[24] CONCILIO A,MA S Y,LI Q L,et al. Soil respiration response to prescribed burning and thinning in mixed-conifer and hardwood forests[J]. Canadian journal of forest research,2005,35(7):1581-1591.
[25] MISSON L,TANG J W,XU M,et al. Influences of recovery from clear-cut,climate variability,and thinning on the carbon balance of a young ponderosa pine plantation[J]. Agricultural & forest meteorology,2005,130(3/4):207-222.
[26] 雷蕾,肖文发,曾立雄,等. 不同营林措施对马尾松林土壤呼吸影响[J]. 林业科学研究,2015,28(5):713-719.
[27] SHENG H,YANG Y S,YANG Z J,et al. The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China[J]. Global change biology,2009,16(3):1107-1121.
[28] 周文嘉,石兆勇,王娓. 中国东部亚热带森林土壤呼吸的时空格局[J]. 植物生态学报,2011,35(7):731-740.
[29] 欧江,刘洋,张捷,等. 长江上游马尾松人工林土壤铵态氮和硝态氮对采伐林窗的初期响应[J]. 应用与环境生物学报,2015,21(1):147-154.

[责任编辑:黄 敏]