

## 桉树林分改造提升对土壤活性碳氮组分的影响

王冬雪 (福州市闽华工程设计有限公司, 福建福州 350003)

**摘要** 对福建省莆田市桉树林套种不同阔叶树种 2 年后表层土壤(0~10 cm)土壤可溶性有机碳(DOC)、土壤可溶性有机氮(DON)、土壤微生物量碳(MBC)、土壤微生物量氮(MBN)、铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )含量特征进行分析,并与细根生物量(FRB)、凋落物现存量(LSC)及其碳氮含量、土壤含水率(SMC)、土壤容重(SBD)、pH、P、K 含量等进行相关性分析。结果表明,套种香樟+枫香+山樱花模式 FRB(0.59 t/hm<sup>2</sup>)、LSC(1.58 t/hm<sup>2</sup>)、DOC(219.91 mg/kg)、DON(44.91 mg/kg)、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ (14.95 mg/kg)均显著高于其他模式;套种香樟+枫香+山樱花模式的土壤微生物量碳氮(MBC/MBN)比显著低于其他模式;主成分分析(PCA)结果表明, DON、FRB、MBN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  呈显著正相关, MBC/MBN、凋落物碳氮比(LCC/LNC)、细根碳氮比(FRC/FRN)、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  之间存在显著负相关;冗余分析(RDA)结果显示,短期内桉树林分改造后土壤总磷(STP)、SBD、pH、LCC/LNC 和 FRC 会显著影响土壤活性碳氮组分。

**关键词** 桉树林;土壤活性碳氮组分;细根;凋落物;碳氮比

中图分类号 S714 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)21-0135-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.21.031

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Effects of Forest Transformation on Active Carbon and Nitrogen Components in *Eucalyptus* Stand

WANG Dong-xue (Fuzhou Minhua Engineering Design Limited Liability Company, Fuzhou, Fujian 350003)

**Abstract** The content characteristics of DOC, DON, MBC, MBN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  in the surface soil (0~10cm) of eucalyptus forest interplanted with different broad-leaved trees in Putian City, Fujian Province were analyzed, meanwhile, correlation analysis was made with the following indicators, such as FRB, LSC and their C and N content, SMC, SBD, pH, STP and STK content. The results showed that, FRB (0.59 t/hm<sup>2</sup>), LSC(1.58 t/hm<sup>2</sup>), DOC(219.91 mg/kg), DON(44.91 mg/kg),  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ (14.95 mg/kg) in the *Eucalyptus* interplanting *Cinnamomum czmpchora*+*Liquidambar formosana*+*Cerasus serrulata* mode were significantly higher than the others. MBC/MBN of the *Eucalyptus* forest interplanting *C. czmpchora*+*L. formosana*+*C. serrulata* mode was significantly lower than the others, indicating that the soil microbial community composition changed significantly after interplanting. PCA results showed that there was a highly positive correlation between SOC, SON, FRB, MBC, MBN, and  $\text{NO}_3^--\text{N}$ , but negatively related to MBC/MBN, FRC/FRN, LCC/LNC and  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ . RDA results showed that STP, SBD, pH, LCC/LNC and FRC significantly affected soil active C and N components in the short term after transformation.

**Key words** *Eucalyptus* stand; Soil active C and N components; Fine roots; Litter; C/N ratio

森林土壤碳氮循环是森林生态系统重要的功能过程之一,在调解和维持生态系统生产力和稳定性方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。按照分解难易和对植物有效性,土壤碳氮可划分为活性碳氮、稳态碳氮和难分解碳氮。其中,活性碳氮组分周转周期短,对包括树种结构变化在内的环境变化反应较敏感<sup>[3]</sup>。桉树是亚热带地区分布面积较大,颇具争议的一个树种,也是林分改造提升的重点<sup>[4]</sup>。现有研究主要集中于林下植被多样性<sup>[5]</sup>、生物量和生产力<sup>[6-7]</sup>和土壤理化性质<sup>[8-9]</sup>等方面。笔者以福建省桉树林分改造为研究对象,从土壤活性碳氮组分变化的角度评价了土壤质量对不同改造模式的响应,以期为改良树种选择提供参考。

## 1 材料与方

**1.1 研究地概况** 研究区位于福建省莆田市涵江区,地理坐标 119°02'43"E, 25°34'05"N。属亚热带,多年平均气温 20.3℃,1月最冷,平均气温 11.3℃,7月最热,平均气温 28.6℃。年日照时数 1 977 h,多年平均降雨量 1 500 mm,4—9月为雨季,约占全年降雨量的 80%。土壤以红壤为主。

**1.2 样地设置与取样** 2019年7月,选取3个套种模式的桉树成熟林分小班(表1)。每种林分随机设置3个20 m×20 m样地;沿南北对角线等距布设10~12个取样点,利用土钻获取0~10 cm表层土壤,按四分法取样,1份放入有生物

冰袋的便携式保温箱,另1份放入布袋带回实验室。环刀法测定土壤容重(SBD);沿东西对角线等距设置4个1 m×1 m小样方,采用全收获法收集样方内的凋落物,80℃鼓风烘箱烘至恒重,推算凋落物现存量(LSC),部分粉碎过筛备用。

在实验室,取一半布袋土样过筛,后经流水浸泡、漂洗,拣出小于2 mm细根,并区分死活根,80℃鼓风烘箱烘至恒重,推算细根生物量(FRB),粉碎过筛备用。

**1.3 样品分析方法** 土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法处理, MBC采用 TOC-VCPH/CPN 分析仪(Shimadzu, Japan)测定, MBN采用 SmartChem 200 全自动分析仪(Alliance, France)测定,转换系数 MBC=EC/0.45, MBN=EN/0.54。土壤可溶性有机碳(DOC)、土壤可溶性有机氮(DON)采用 2 mol/L 氯化钾浸提法处理, DOC 采用 TOC-VCPH/CPN 分析仪(Shimadzu, Japan)测定, DON、硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )采用 SmartChem<sup>2</sup>00 全自动分析仪(Alliance, France)测定。土壤有机碳(STC)、有机氮(STN)、凋落物碳(LCC)、凋落物氮(LNC)和细根碳(FRC)、细根氮(FRN)利用碳氮元素分析仪(Vario EL III, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany)测定。土壤全钾(STK)、全磷(STP)、速效磷(SAP)和速效钾(SAK)的测定方法参照中国林业行业标准(LY/T 1228—1237)。

**1.4 数据处理方法** 利用 Excel 2010 整理,利用 SPSS 17.0 对数据进行 Duncan 多重比较, Canoco 5.0 对数据进行 PCA

**作者简介** 王冬雪(1984—),女,吉林柳河人,工程师,硕士,从事水土保持、森林生态修复工程设计研究。

**收稿日期** 2021-08-15; **修回日期** 2021-12-22

和 RDA 分析,利用 Origin 9.5 作图。

表 1 4 种林分模式基本情况

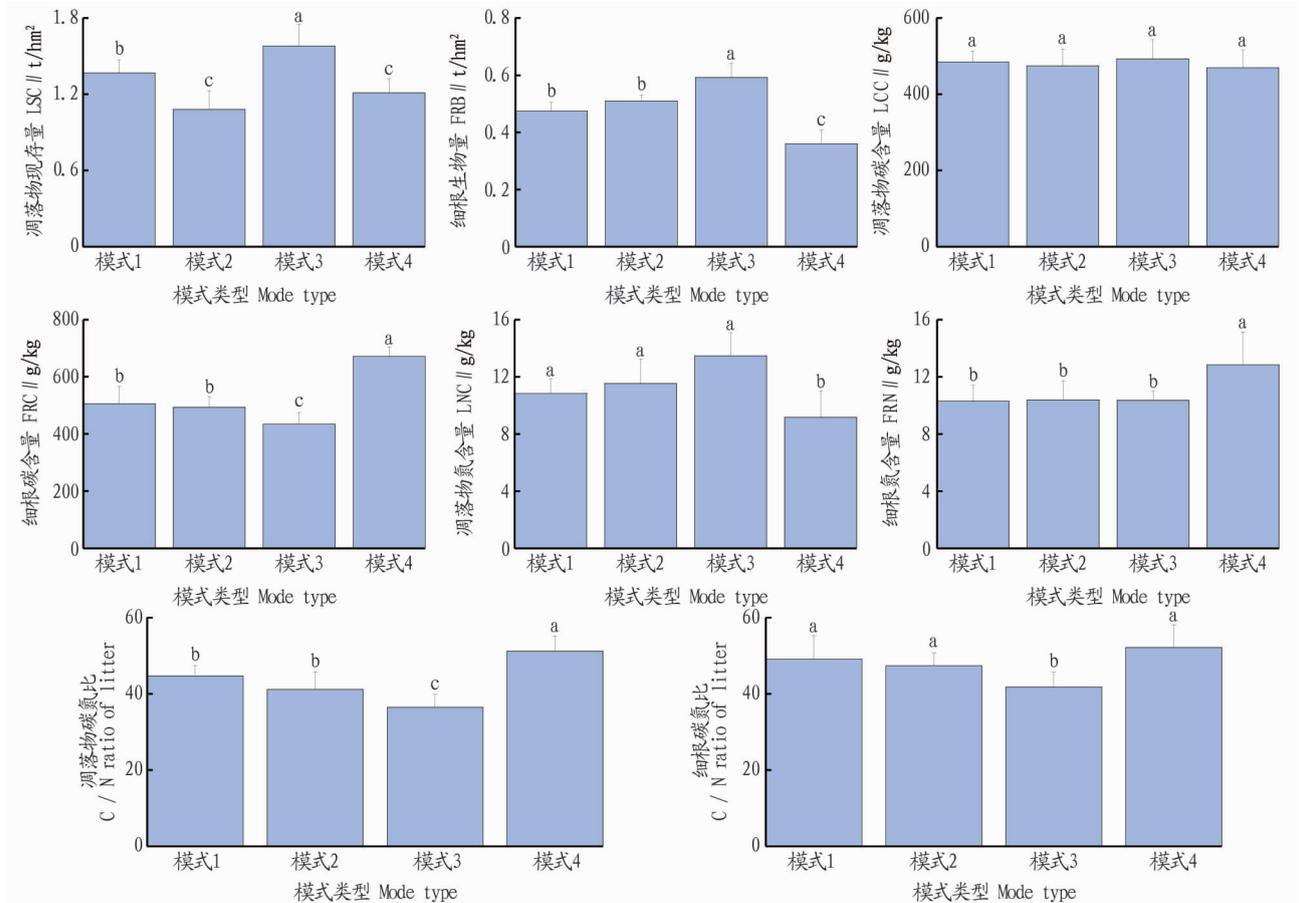
Table 1 Basic information of four stand models

模式 Mode	海拔 Altitude m	坡度 Slope °	密度 Density 株/hm <sup>2</sup>	林龄 Forest age//a	郁闭度 Canopy closure	平均树高 Average tree height//m	平均胸径 Average DBH//cm	套种模式 Interplanting mode	套种时间 Interplanting time//a	林下主要植物 Main plants under the forest
模式 1 Mode 1	140	22	1 255	9	0.5	14.5	16.4	225 株/hm <sup>2</sup> 枫香, 225 株/hm <sup>2</sup> 天竺 桂,225 株/hm <sup>2</sup> 火 力楠	2	盐肤木 ( <i>Rhus chinensis</i> )、菝 葜 ( <i>Smilax china</i> )、铁芒萁 ( <i>Dicranopteris linearis</i> )、梅叶 冬青 ( <i>Ilex asprella</i> )、雀稗 ( <i>Paspalum orbiculare</i> )、山乌 柏 ( <i>Sapium discolor</i> )、杠板归 ( <i>Perforate fleecflower</i> )、悬钩 子 ( <i>Rubus corchorifolius</i> )、千 金藤 ( <i>Stephania japonica</i> )、火 炭母 ( <i>Polygonum chinense</i> )
模式 2 Mode 2	140	22	1 240	9	0.5	13.8	17.2	225 株/hm <sup>2</sup> 枫香, 225 株/hm <sup>2</sup> 香樟, 225 株/hm <sup>2</sup> 山杜英	2	
模式 3 Mode 3	140	22	1 315	9	0.5	13.2	15.9	450 株/hm <sup>2</sup> 香樟, 450 株/hm <sup>2</sup> 枫香, 300 株/hm <sup>2</sup> 山樱花	2	
模式 4 Mode 4 (CK)	185	22	1 200	9	0.5	14.1	16.8	—	2	

## 2 结果与分析

**2.1 不同林分模式细根及凋落物性质** 从图 1 可以看出,模式 3 的 LSC 与 LCC、LNC 含量均较大,LCC/LNC 表现为模式 3 最小,模式 4 最大。多重比较显示,模式 3 的 LSC 和 LCC/LNC 与其他模式有显著差异。0~10 cm 土层的 FRB 以

模式 3 最大,其次依次为模式 1、模式 2,模式 4 最小;FRC、FRN、FRC/FRN 则相反,表现为模式 3 最小,模式 1 和模式 2 次之,模式 4 最大;Duncan 多重比较显示,模式 3 和模式 4 存在显著差异。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different letters indicate significant differences at 0.05 level

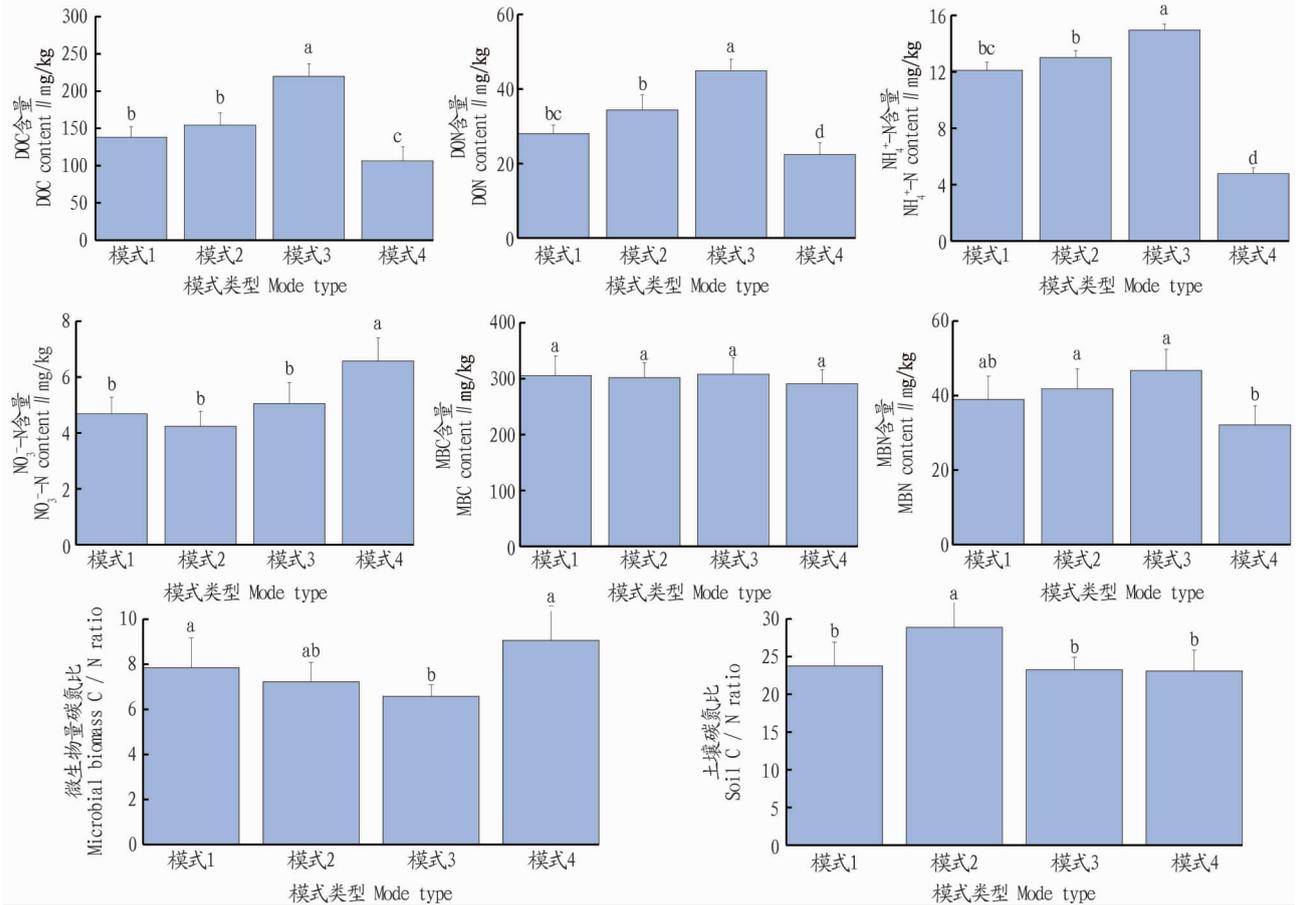
图 1 不同林分模式细根及凋落物特征

Fig. 1 Fine root and litter properties of different forest models

**2.2 不同林分模式土壤活性碳氮组分含量** 由图 2 可知,模式 3 的土壤 DOC 含量、 $\text{NH}_4^+$ -N 含量显著高于其他各模式,模式 1 和模式 2 间差异不显著。各模式 MBC、MBN 含量差异不显著,MBC/MBN 从小到大表现为模式 3、模式 2、模式 1、模式 4, $\text{NO}_3^-$ -N 则表现为模式 4 显著高于其他模式。

**2.3 细根、凋落物性质与土壤理化因子的相关关系** 从图 3 可以看出,PC1 和 PC2 两轴能够共同解释总方差的比例为 84.12%。其中,模式 4 的 3 个样地 mode41~mode43 集中在

FRC、FRN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的高值区域,MBC/MBN、FRC/FRN 和 LCC/LNC 也较高。模式 3 的 3 个样地 mode31~mode33 集中在 DON、DOC、FRB、MBC、MBN、 $\text{NH}_4^+$ -N 含量的高值区域。模式 2 和模式 3 的样地各土壤理化指标介于模式 3 和模式 4 之间。DON、DOC、FRB、MBC、MBN、 $\text{NH}_4^+$ -N 之间呈正相关关系,MBC/MBN、LCC/LNC 和 FRC/FRN、 $\text{NO}_3^-$ -N 之间存在正相关关系,但是 2 组指标之间呈负相关关系。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different letters indicate significant differences at 0.05 level

图 2 不同林分模式土壤活性碳氮组分含量

Fig. 2 Content of soil active carbon and nitrogen components in different forest models

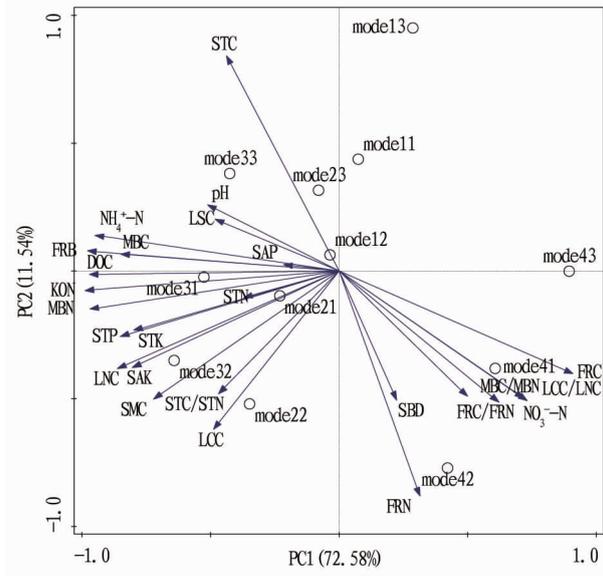
**2.4 土壤活性碳氮组分与细根、凋落物性质及土壤理化因子的关系** 以 DON、DOC、MBC、MBN、MBC/MBN、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 为响应变量,土壤理化性质和 LSC、LCC、LNC、LCC/LNC、FRB、FRC、FRN、FRC/FRN 为环境变量进行 RDA 排序(图 4),排序结果显示,RDA1 第 1 轴单独解释总方差的比例达到 98.32%,第 2 轴单独解释总方差的比例为 1.45%,二者共同解释总方差的比例为 99.77%。

pH(贡献度为 35.9%, $F=31.7$ , $P=0.002$ )、STP(贡献度为 25.7%, $F=13.6$ , $P=0.002$ )、土壤含水率(SMC)(贡献度为 13.9%, $F=8.1$ , $P=0.04$ )、LCC/LNC(贡献度为 8.2%, $F=6.4$ , $P=0.006$ )、FRC(贡献度为 5.6%, $F=28.2$ , $P=0.008$ )对于样方沿着第 1 轴的分布起到关键作用,DON、DOC、 $\text{NH}_4^+$ -N、MBC、MBN 主要与 pH、STP 和 SMC 较高的模式 4 的 3 个

样地 mode31~mode33 所在林地密切相关,而 MBC/MBN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 则主要与 LCC/LNC 和 FRC 较高的模式 4 的 3 个样地 mode41~mode43 所在林地密切相关。

### 3 结论与讨论

土壤表层(0~10 cm)是森林地下生态过程活跃的区域,不同质量的凋落物分解淋溶的养分及产生的次生代谢物能够影响土壤微生物群落组成和植物细根的分布<sup>[10]</sup>。该研究中,模式 3 凋落物现存量显著高于其他模式,达到 1.58 t/hm<sup>2</sup>,这与林分套种株数和套种树种有关,模式 3 套种密度是模式 1 和模式 2 的近 2 倍,对林分凋落物现存量的贡献大,间接影响了土壤表层的细根分布。该研究与王微等<sup>[11]</sup>研究得出的细根生物量与凋落物层生物量存在显著线性相关关系的结论一致,相关系数  $R^2$  达到 0.925。



注:mode11~13 表示模式 1 的 3 个样地;mode21~23 表示模式 2 的 3 个样地;mode31~33 表示模式 3 的 3 个样地;mode41~43 表示模式 4 的 3 个样地

Note:modes 11 - 13 represent 3 plots of mode 1; modes 21 - 23 represent three plots of mode 2; modes 31 to 33 represent three plots of mode 3; modes 41 to 43 represent three plots of mode 4

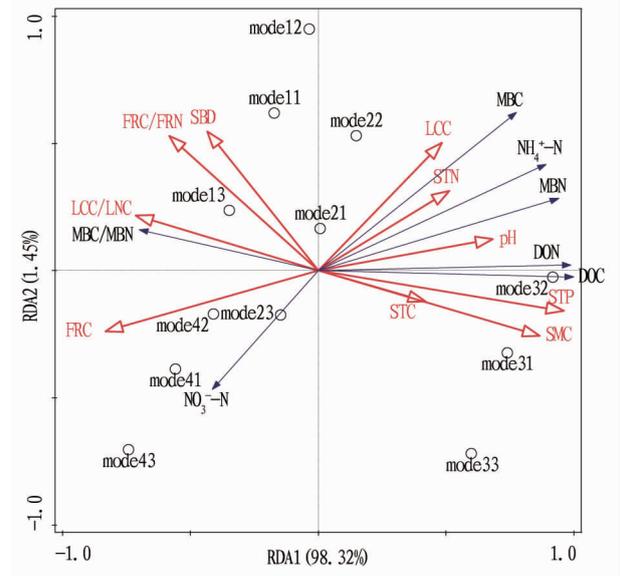
图 3 不同林分模式细根、凋落物及土壤理化因子的 PCA 主成分分析

Fig. 3 PCA principal component analysis of fine roots, litter and soil physical and chemical factors in different forest models

已有研究表明,土壤有机碳氮含量受不同的土壤可分解底物的数量和质量的显著影响,而土壤底物的差异主要受动植物残体、凋落物、根系及微生物群落及树种不同的影响<sup>[12]</sup>。不同的微生物群落分解土壤有机碳氮,可进一步影响土壤活性碳氮组分含量<sup>[13]</sup>。该研究中,模式 3 的土壤 STC、STN 及  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量显著高于其他模式,桉树纯林显著低于套种模式。各模式的 MBC、MBN 含量差异虽然不显著,但是 MBC/MBN 却表现出模式 3 显著低于其他模式,说明该模式的土壤微生物群落组成结构经过套种阔叶树种改造后发生明显变化,形成以高效利用丰富有机氮源为主的微生物群落。

主成分分析表明,DOC、DON、FRB、MBC、MBN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  之间存在正相关关系,与土壤 MBC/MBN、LCC/LNC 和 FRC/FRN、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  存在显著负相关关系,而模式 3 个样地均集中在具有高土壤 DOC、DON、FRB、MBC/MBN 及  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的区域,桉树纯林模式 4 则集中在高 MBC/MBN、LCC/LNC、FRC/FRN 和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的区域,模式 1 和模式 2 则介于两者之间,说明桉树林套种阔叶树可显著提高林地土壤活性碳氮组分含量,降低林地土壤的碳氮比。

为了进一步探讨能够显著影响土壤微生物群落组分结构的土壤活性碳氮含量与其他土壤环境因子的关系,研究进行了冗余分析。结果表明,STP 含量是影响土壤活性碳氮首要环境因素,其次是 SBD、pH、LCC/LNC 和 FRB 含量。这表明 STP 含量是影响桉树林分土壤微生物组分结构的限制性



注:mode11~13 表示模式 1 的 3 个样地;mode21~23 表示模式 2 的 3 个样地;mode31~33 表示模式 3 的 3 个样地;mode41~43 表示模式 4 的 3 个样地

Note:modes 11 - 13 represent 3 plots of mode 1; modes 21 - 23 represent three plots of mode 2; modes 31 to 33 represent three plots of mode 3; modes 41 to 43 represent three plots of mode 4

图 4 不同林分模式土壤活性碳氮组分与细根、凋落物及土壤理化因子的 RDA 冗余分析

Fig. 4 RDA redundancy analysis of soil active carbon and nitrogen components, fine roots, litter and soil physical and chemical factors in different forest models

因子,而凋落物作为影响微生物分解的重要底物之一,其碳氮比也会显著影响微生物群落组分结构,并与已有研究结果一致<sup>[14]</sup>。

#### 参考文献

- [1] VAN DER WERF G R, MORTON D C, DEFRIES R S, et al. CO<sub>2</sub> emissions from forest loss[J]. Nature geoscience, 2009, 2(11): 737-738.
- [2] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions [J]. Science, 2008, 320(5878): 889-892.
- [3] PAUL E A, JUMA N G. Mineralization and immobilization of soil nitrogen by microorganisms [J]. Ecological bulletins, 1981, 33: 179-195.
- [4] 邓海燕, 胡绍平, 莫晓勇, 等. 桉树人工混交林营造技术研究综述[J]. 桉树科技, 2017, 34(4): 53-58.
- [5] 尤龙辉, 聂森, 陈金章, 等. 桉树林分改造模式对林下植被物种多样性的影响[J]. 林业勘察设计, 2019, 39(1): 16-22, 26.
- [6] 夏承博. 施氮对桉树纯林及桉树×红锥混交林生物量和碳储量的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [7] 施福军, 覃丽群, 吴敏, 等. 15 年生桉树中大径材人工林生物量与生产力研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(6): 113-116.
- [8] 尤龙辉, 聂森, 陈金章, 等. 林分改造对湿地松和桉树林土壤理化性质的影响[J]. 防护林科技, 2018(12): 19-22.
- [9] 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.
- [10] SMYTH C E, MACEY D, TROFYMOW J A. Long-term litter decay in Canadian forests and the influence of soil microbial community and soil chemistry [J]. Soil biology and biochemistry, 2015, 80: 251-259.
- [11] 王微, 伍小刚, 胡凯, 等. 凋落物输入对中亚热带不同森林细根生物量及分布的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3391-3401.

