

网络出版时间:2016-06-08 16:21 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.07.017
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160608.1621.034.html

鹰嘴界常绿阔叶林不同演替阶段 土壤微生物的生物量与活性

曾掌权¹,汪思龙^{2,3},张灿明¹,汤 宏⁴,吴子剑¹,李锡泉¹

(1 湖南省林业科学院,湖南慈利森林生态系统定位观测研究站,湖南 长沙 410004;

2 中国科学院会同森林生态实验站,森林与土壤生态国家重点实验室,中国科学院沈阳应用生态研究所,
辽宁 沈阳 110164;3 湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站,湖南 会同 418307;

4 凯里学院 环境与生命科学学院,贵州 凯里 556011)

【摘 要】【目的】研究常绿阔叶林恢复演替过程对土壤微生物量碳、氮及微生物活性的影响。【方法】从湖南鹰嘴界代表常绿阔叶林不同演替阶段的马尾松林(PF)、针阔混交林(MF)、常绿阔叶林(BF)样地上、中、下坡挖取土壤剖面,按 0~10 和 10~20 cm 分层采集土壤样品,测定土壤微生物生物量碳(C_{mic})、氮(N_{mic})及土壤基础呼吸、土壤有机碳(SOC)和全氮(TN),以分析常绿阔叶林不同演替阶段的土壤微生物量碳、氮及微生物活性。【结果】随着常绿阔叶林演替递进,0~10 cm 土层土壤 SOC 由 20.29 g/kg 增至 41.96 g/kg, TN 由 1.18 g/kg 增至 2.33 g/kg, C_{mic} 由 448.62 mg/kg 增至 1 021.95 mg/kg, N_{mic} 由 35.21 mg/kg 增至 109.62 mg/kg, 土壤基础呼吸由 1.12 mg/(kg·h) 增加到 1.36 mg/(kg·h), 代谢熵(qCO_2) 由 2.51 mg/(g·h) 降低到 1.33 mg/(g·h)。由相关分析可知, C_{mic} 、 N_{mic} 均与 SOC 和 TN 显著正相关;微生物熵(C_{mic}/SOC) 在 PF 中最低, MF 中次之, BF 中最高, 且与 SOC、TN 存在显著的负相关性, 与 C_{mic} 、土壤微生物量碳氮比存在显著正相关;土壤基础呼吸与 SOC、TN 和 C_{mic} 存在显著的正相关性;代谢熵与 SOC、 C_{mic} 、 N_{mic} 有极显著负相关关系。【结论】研究区内植被演替可使土壤微生物生物量增加、土壤肥力改善。凋落物输入质量的改善、土壤肥力的提高, 是中亚热带常绿阔叶林微生物量碳、氮和微生物熵随演替进程逐渐增大的主要原因。通过封山育林、择伐等经营措施, 可以促进针叶林向常绿阔叶林递进和森林土壤肥力恢复。

【关键词】 常绿阔叶林;土壤微生物量;微生物活性;中亚热带

【中图分类号】 S715.3

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)07-0115-07

Biomass and activity of soil microbes in evergreen broad-leaf forests at different succession stages in Yingzuijie

ZENG Zhangquan¹, WANG Silong^{2,3}, ZHANG Canming¹,
TANG Hong⁴, WU Zijian¹, LI Xiquan¹

(1 Hunan Academy of Forestry, Cili Research Station of Forest Ecosystem, Changsha, Hunan 410004, China;

2 Huitong Experimental Station of Forest Ecology, State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110164, China; 3 Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong, Hunan 418307, China; 4 College of Environment and Life Science, Kaili University, Kaili, Guizhou 556011, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of forest succession on soil microbial biomass and activity. 【Method】 The soil samples were collected at the layers of 0—10 cm and 10—20 cm from up-

【收稿日期】 2014-12-25

【基金项目】 科技部国际科技合作专项(2015DFA90450);中科院先导科技专项(XDA05050205);湖南省自然科学基金项目(2015JJ6050);湖南省林业科技计划项目(XLK201417, XLGYLJCJ-201501);湖南省林业科学院科研创新基金项目(2013LQJ08);世界银行贷款湖南森林恢复与发展项目(JC-3)

【作者简介】 曾掌权(1976—),男,湖南益阳人,助理研究员,博士,主要从事森林土壤肥力研究。E-mail: zengzquan@163.com

【通信作者】 汪思龙(1964—),男,安徽池州人,研究员,博士生导师,主要从事森林碳氮循环研究。E-mail: slwang@iae.ac.cn

hill, middle slope and downhill of pine (*Pinus massoniana*) forest (PF), pine and broadleaf mixed forest (MF) and evergreen broadleaf forest (BF) representing different succession stages of evergreen broad-leaf forest in the Yingzuijie Biosphere Reserve, Hunan, China. Biomass carbon (C_{mic}), nitrogen (N_{mic}), soil respiration, soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) were measured and compared. 【Result】 During the succession from PF, MF to BF, SOC, TN, C_{mic} , N_{mic} and soil respiration in layer of 0–10 cm increased from 20.29 g/kg to 41.96 g/kg, 1.18 g/kg to 2.33 g/kg, 448.62 mg/kg to 1 021.95 mg/kg, 35.21 mg/kg to 109.62 mg/kg, and 1.12 mg/(kg·h) to 1.36 mg/(kg·h), while qCO_2 decreased from 2.51 mg/(g·h) to 1.33 mg/(g·h). Correlation analysis showed that C_{mic} and N_{mic} were strongly correlated to SOC and TN. Contribution of C_{mic} to SOC (C_{mic}/SOC) was the lowest in PF, and was significantly and negatively correlated to SOC, TN, and strongly correlated to C_{mic} and C_{mic}/N_{mic} . Soil respiration was strongly correlated with SOC, TN and C_{mic} . The qCO_2 was significantly and negatively correlated to SOC, C_{mic} and N_{mic} . 【Conclusion】 Succession from PF, MF to BF resulted in increase in biomass and soil fertility of soil microbes. The quality of litter and the improvement of soil fertility were the main reason for the increase of microbial biomass with the succession. Forest management practices such as enclosures and selective cutting could accelerate the succession of coniferous forest into evergreen broad-leaved forest and restore soil fertility.

Key words: evergreen broad-leaf forest; soil microbial biomass; microbial activity; mid-subtropical region

植被的演替过程是植被与土壤相互影响和作用的过程^[1]。植被通过光合作用向土壤输送有机物质并从土壤吸收养分,从而对有机碳的积累和周转产生深刻影响;而土壤有机质积累与植被演替之间也存在反馈关系,是物种竞争替代和植物群落演替的重要推动力^[2]。土壤微生物是土壤物质循环的调节者,也是土壤有机碳库和速效养分的一部分,在土壤生态过程中发挥了重要作用^[3]。土壤微生物对生物因素和非生物因素的变化非常敏感,即使立地条件相同,但树种组成不同的森林也会引起土壤微生物生物量较大的差异^[4]。土壤微生物生物量既是土壤有机质和土壤养分转化与循环的动力,又可作为土壤中植物有效养分的储备库^[5]。土壤微生物生物量碳(C_{mic})含量仅占土壤总有机碳含量的 1%~5%^[6],但其能快速反映土壤有机质和养分的变化^[7],是土壤生物活性大小的标志,常用于评价土壤肥力和生态环境质量^[8]。土壤微生物活性调控着土壤碳截获能力、碳矿化过程、养分循环以及生态系统生产力^[9]。

我国的亚热带常绿阔叶林破坏现象严重,天然林已经残留很少,大部分都是次生林和人工林,其树种种类组成复杂,包括杉木林、马尾松林以及针阔混交林等。次生林演替过程可划分为 3 个阶段:第 1 阶段为先锋树种马尾松纯林阶段,第 2 阶段为包括马尾松与阔叶树的针阔混交林阶段,第 3 阶段是以栲树、青冈等为主的常绿阔叶林阶段^[10]。尽管土壤

微生物在生态系统中的关键作用已得到广泛认识,但常绿阔叶林不同演替阶段土壤微生物生物量及微生物活性如何变化,对区域森林土壤碳循环产生怎样的影响,相关研究仍相当缺乏^[11]。探讨植物群落正向演替过程中,土壤微生物生物量及活性的变化规律,对于揭示中亚热带常绿阔叶林的自然恢复规律及土壤固碳过程具有理论和实践意义。为此,本研究选择湖南鹰嘴界常绿阔叶林不同演替阶段为试验对象,开展土壤微生物生物量和活性研究,揭示常绿阔叶林不同演替阶段对土壤微生物生物量和活性的影响,为亚热带天然次生林的恢复演替提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

调查样地设在湖南省会同县鹰嘴界国家级自然保护区,地理位置北纬 26°46′~26°59′,东经 109°49′~109°58′。海拔 270~938 m,属于亚热带湿润气候区,年平均气温 13.1~16.6℃,年极端高温 39.1℃,最低气温-8.6℃,无霜期 303 d。年降雨量 1 304~1 603 mm,集中于 4—9 月份,年蒸发量 1 140 mm,空气相对湿度 83%左右。保护区土壤平均容重为 1.25 g/cm³,黏粒淋溶而下移较弱,土壤 C/N 值介于 10.65~11.07,表层有机质含量 24.62~118.18 g/kg,平均 73.19 g/kg,全氮 1.35~5.07 g/kg^[12]。

在对自然保护区进行广泛实地调查的基础上,

选择林分立地条件相似的马尾松林、针阔(马尾松阔叶树)混交林、常绿阔叶林代表中亚热带常绿阔叶林的不同演替阶段,各设置 3 块 20 m×20 m 的固定样地,不同演替阶段林分概况见表 1。马尾松林(PF)位于保护区缓冲区,林龄为 25~30 年,林下灌木稠密,以欐木(*Loropetalum chinensis* (R. Br.) Oliv)、野漆(*Rhus sylvestris* Sieb. & Zucc)、油茶(*Camellia oleosa*)等为主;针阔混交林(MF)位于保护区核心区,为栲树(*Castanopsis fargesii*)、豹皮樟(*Litsea rotundiflora*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等阔叶树种逐渐入侵而成,是马尾松纯林向常绿阔叶林演替的过渡阶段,林龄 45~50 年,灌木层主要有

表 1 湖南鹰嘴界常绿阔叶林不同演替阶段的林分特征

Table 1 Stand characteristics of the evergreen broad-leaved forests under different succession stages in Hunan Yingzuijie (mean±SE, n=3)

森林类型 Forest type	林龄/a Stand age	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height	密度/(株·hm ⁻²) Wood plant density	坡向 Slope aspect	坡度/(°) Slope gradient	土壤容重/ (g·cm ⁻³) Bulk density
马尾松林 PF	25~30	16.35±0.51	13.5±0.31	1100±51	东南 Southeast	15	1.36±0.04
针阔混交林 MF	45~50	17.23±0.45	13.9±0.25	1325±55	东南 Southeast	15	1.32±0.03
常绿阔叶林 BF	65~70	19.20±0.68	14.8±0.32	1150±52	东南 Southeast	15	1.29±0.04

1.2 土壤样品的采集与处理

2010 年 8 月在所研究的 3 种林分类型的每块样地中,于上、中、下坡位挖取土壤剖面,每个剖面均按 0~10 和 10~20 cm 分层,每土层采集约 2 kg 土壤样品,放入无菌塑料袋,带回实验室,清除土样中的根系、凋落物和石砾,每个样品混合均匀后分成 2 等份:1 份过 2 mm 土壤筛后,装入无菌塑料袋密封,放入冰箱 0~4 ℃ 保存,用于土壤微生物生物量碳、氮和土壤基础呼吸测定;另 1 份土样在室温条件下风干,碾磨过孔径 0.25 mm 筛,用于测定土壤有机碳和全氮。

1.3 土壤样品的分析

土壤有机碳(SOC)含量用油浴加热-K₂Cr₂O₇容量法^[13]测定;土壤全氮(TN)含量采用浓 H₂SO₄消煮、流动注射分析仪(AutoAnalyzer III Bran+Luebbe GmbH, Gernany)测定;土壤微生物生物量碳(C_{mic})含量采用氯仿熏蒸浸提法^[14]测定;土壤微生物生物量氮(N_{mic})含量采用氯仿熏蒸浸提茚三酮比色法^[15]测定。土壤微生物生物量碳与土壤有机碳的比值即微生物熵(C_{mic}/SOC)。

土壤微生物活性指标以土壤基础呼吸和代谢熵表示。土壤基础呼吸采用 NaOH 吸收、盐酸滴定法测定:将新鲜土壤的含水率调节至田间持水量的 60%,称取 100 g 新鲜土壤均匀平铺于 1 L 的广口瓶中,28 ℃ 下培养 48 h,用 0.1 mol/L NaOH 吸收

杜茎山(*Maesa japonica* (Thunb.) Moritzi ex Zoll)、野漆、野柿(*Diospyros kaki silvestris*)、菝葜(*Smilax china*)等;常绿阔叶林(BF)是该地区具有代表性的地带性植被类型,研究样地林龄 65~70 年,乔木层以栲树、刨花楠(*Machilus pauhoi* Kaneh)、杜英(*Elaeocarpus decipiens* Hemsl)等为优势树种,灌木层植物主要包括杜茎山、大果卫矛(*Euonymus myrianthus*)、菝葜、油茶、山胡椒(*Lindera glauca*)等^[12]。对各样地内植物进行每木检尺,乔木树种以胸径(DBH)5 cm 为起测径级。乔木调查主要包括种名、胸径、树高和冠幅,灌木、草本层主要调查种名、基径与株高。

释放的 CO₂,培养结束后,用 0.05 mol/L 盐酸滴定剩余 NaOH,同时设 3 个空白处理作为对照。代谢熵(qCO₂)是土壤基础呼吸与微生物生物量碳的比值。

1.4 数据处理

试验数据经 Excel 整理后,利用 SPSS 13.0 软件包进行平均值和标准差的分析,并对不同演替阶段土壤碳氮、微生物生物量碳氮和活性进行单因素方差分析(one-way ANOVA),不同演替阶段土壤属性的多重比较采用最小显著差值(LSD)法,同时对不同土壤属性进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 常绿阔叶林不同演替阶段土壤碳氮含量

如图 1 所示,处于不同演替阶段的 3 种森林土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量均表现为 0~10 cm 土层高于 10~20 cm 土层。同一土层 SOC 含量均表现为常绿阔叶林>针阔混交林>马尾松林。在 0~10 cm 土层,马尾松林的 SOC 平均含量是常绿阔叶林、针阔混交林的 48.36%和 84.65%,且马尾松林与常绿阔叶林的差异显著(P<0.05),而马尾松林与针阔混交林之间差异不显著(P>0.05)。在 10~20 cm 土层,马尾松林的 SOC 平均含量是常绿阔叶林、针阔混交林的 61.41%和 88.71%,且常绿阔叶林与马尾松林、针阔混交林的差异均显著(P<

0.05),而马尾松林与针阔混交林之间差异不显著($P>0.05$)。

分析表明,土壤全氮与有机碳含量呈极显著正相关性($P<0.01$),其变化趋势与有机碳一致。由图 1 还可看出,同一土层 TN 平均含量表现为常绿阔叶林>针阔混交林>马尾松林。在 0~10 cm 土层,马尾松林的 TN 平均含量是常绿阔叶林、针阔混交林的 50.64%和 66.29%,且马尾松林与常绿阔叶林、针阔混交林的差异均显著($P<0.05$)。在 10~

20 cm 土层,马尾松林的 TN 平均含量是常绿阔叶林、针阔混交林的 50%和 60.4%,且马尾松林与常绿阔叶林之间差异显著($P<0.05$),而针阔混交林与常绿阔叶林和马尾松林之间差异均不显著($P>0.05$)。在不同演替阶段的不同土层,土壤碳氮比均是针阔混交林低于常绿阔叶林和马尾松林,且针阔混交林与常绿阔叶林和马尾松林之间差异均显著($P<0.05$)。

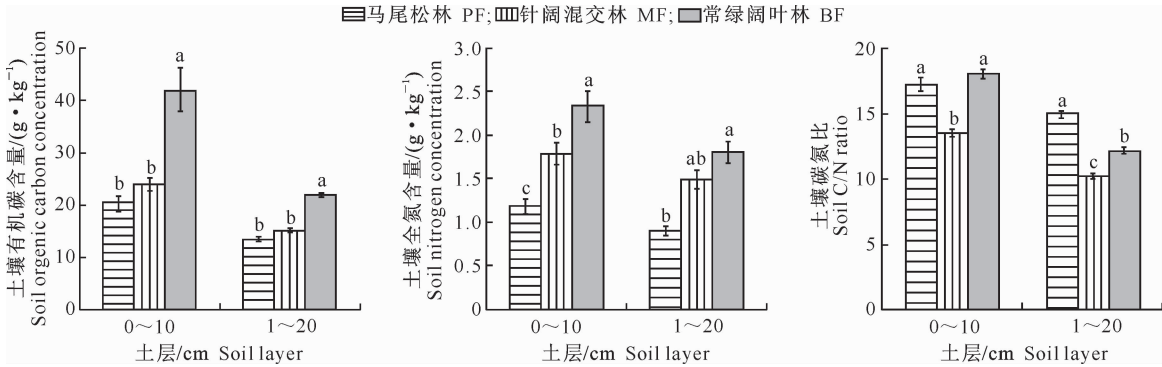


图 1 湖南鹰嘴界常绿阔叶林不同演替阶段土壤有机碳、全氮含量及碳氮比($n=3$)

图柱上标不同小写字母代表同一土层不同林分之间差异显著($P<0.05$)

Fig.1 Soil organic carbon, total nitrogen concentrations and C/N ratio of the evergreen broad-leaved forests under different succession stages in Hunan Yingzuijie($n=3$)

Lowercase letters mean significant difference in the same soil layer between different stand ($P<0.05$)

2.2 常绿阔叶林不同演替阶段土壤微生物量碳氮含量

如表 2 所示,3 种森林土壤微生物量碳氮平均含量的变化与土壤 SOC 平均含量的变化趋势基本一致,随土层深度增加而下降。同一土层中,3 种森林土壤微生物量碳氮平均含量的变化规律基本一致,均以常绿阔叶林最高,针阔混交林次之,马尾松林最低。在 0~10 cm 土层,马尾松林的微生物量碳平均含量是常绿阔叶林、针阔混交林的 43.9%和 78.83%,微生物量氮依次是常绿阔叶林、针阔混交林的 32.12%和 66.75%。在 10~20 cm 土层,马尾松林的微生物量碳平均含量是常绿阔叶林、针阔混交林的 37.02%和 52.53%,微生物量氮依次是阔叶林、针阔混交林的 28.19%和 40.34%。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,常绿阔叶林、针阔混交林和马尾松林三者之间土壤微生物量碳、土壤微生物量氮平均含量差异均显著($P<0.05$)。

土壤微生物量碳氮比反映了土壤中细菌和真菌的比例。本研究中,在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,土壤微生物量碳氮比均表现为马尾松林>针阔混交林>常绿阔叶林,且马尾松林土壤微生物量碳

氮比显著($P<0.05$)高于针阔混交林和常绿阔叶林(表 2)。

本研究中,土壤微生物熵介于 1.44%~2.44%,马尾松林与常绿阔叶林和针阔混交林之间差异显著($P<0.05$) (表 2),并且土壤微生物熵与土壤有机碳、全氮存在显著的负相关性($P<0.05$),与土壤微生物量碳、土壤微生物量碳氮比存在显著正相关($P<0.05$) (表 3)。

2.3 常绿阔叶林不同演替阶段土壤微生物活性

如表 2 所示,3 种森林 0~10 cm 土壤基础呼吸表现为常绿阔叶林>针阔混交林>马尾松林,但三者之间差异不显著($P>0.05$),其中马尾松林土壤基础呼吸比常绿阔叶林低 17.65%,针阔混交林土壤基础呼吸比常绿阔叶林低 7.35%。10~20 cm 土壤基础呼吸表现为针阔混交林>常绿阔叶林>马尾松林,三者之间差异也不显著($P>0.05$),其中马尾松林土壤基础呼吸比针阔混交林低 32.94%,常绿阔叶林土壤基础呼吸比针阔混交林低 12.94%。在本研究中,土壤基础呼吸与土壤有机碳、全氮和微生物量碳存在显著的正相关性($P<0.05$) (表 3)。

由表 2 还可知,在 0~10 cm 和 10~20 cm 土

层,土壤代谢熵均表现为马尾松林>针阔混交林>常绿阔叶林,且马尾松林与常绿阔叶林之间差异显著 ($P<0.05$)。在 0~10 cm 土层,常绿阔叶林、针阔混交林代谢熵分别比马尾松林低 47.01% ($P<0.05$)和 11.55% ($P>0.05$);在 10~20 cm 土层,常

绿阔叶林、针阔混交林代谢熵分别比马尾松林低 51.85% ($P<0.05$)和 22.22% ($P>0.05$)。代谢熵与有机碳、微生物生物量碳和氮有极显著负相关关系 ($P<0.01$) (表 3)。

表 2 湖南鹰嘴界常绿阔叶林不同演替阶段土壤微生物生物量与活性

Table 2 Soil microbial biomass and activity of the evergreen broad-leaved forests under different succession stages in Hunan Yingzuijie (mean±SE, n=3)							
土层/cm Soil layer	森林类型 Forest type	微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹) C _{mic}	微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹) N _{mic}	微生物量碳氮比 C _{mic} /N _{mic}	基础呼吸/ (mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹) Basal respiration	代谢熵/ (mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹) qCO ₂	微生物熵/% C _{mic} /SOC
0~10	马尾松林 PF	448.62±5.01 c	35.21±1.26 c	12.74±1.25 a	1.12±0.05 a	2.51±0.12 a	2.22±0.11 b
	针阔混交林 MF	569.12±7.83 b	52.75±1.47 b	10.78±0.93 b	1.26±0.04 a	2.22±0.05 ab	2.38±0.05 a
	常绿阔叶林 BF	1 021.95±34.86 a	109.62±2.39 a	9.32±0.26 b	1.36±0.08 a	1.33±0.07 b	2.44±0.05 a
10~20	马尾松林 PF	193.29±3.81 c	14.35±0.23 c	13.47±0.68 a	0.57±0.06 a	2.97±0.11 a	1.44±0.07 b
	针阔混交林 MF	367.93±16.42 b	35.57±0.95 b	10.34±0.38 b	0.85±0.03 a	2.31±0.03 ab	2.17±0.04 a
	常绿阔叶林 BF	522.12±19.97 a	50.91±1.37 a	10.25±0.57 b	0.74±0.02 a	1.43±0.05 b	2.42±0.02 a

注:同列数据后标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different letters mean significant difference at $P<0.05$ level.

表 3 湖南鹰嘴界常绿阔叶林不同演替阶段土壤属性的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correction coefficients of soil properties of the evergreen broad-leaved forests under different succession stages in Hunan Yingzuijie							
指标 Index	微生物 生物量氮 N _{mic}	微生物量 碳氮比 C _{mic} /N _{mic}	微生物熵 C _{mic} /SOC	基础呼吸 Basal respiration	代谢熵 qCO ₂	有机碳 SOC	全氮 TN
微生物生物量碳 C _{mic}	0.756 *	0.357	0.685 *	0.643 *	-0.859 **	0.996 **	0.987 **
微生物生物量氮 N _{mic}		-0.732 **	0.109	0.191	-0.857 **	0.725 **	0.762 **
微生物量碳氮比 C _{mic} /N _{mic}			0.624 *	0.146	0.153	0.273	0.141
微生物熵 C _{mic} /SOC				0.218	0.109	-0.619 *	-0.635 *
基础呼吸 Basal respiration					0.213	0.651 *	0.612 *
代谢熵 qCO ₂						-0.846 **	0.138
有机碳 SOC							0.989 **

注: * 表示差异显著($P<0.05$); ** 表示差异极显著($P<0.01$)。
Note: * means significant difference ($P<0.05$); ** means extremely significant difference ($P<0.01$).

3 讨 论

本研究中,3 种森林各层土壤 TN、SOC 含量的变化趋势基本一致,两者呈极显著正相关(相关系数为 0.989, $P<0.01$, $n=36$)。马尾松林中土壤 TN 含量明显低于其他森林类型,表明 N 可能是马尾松生长的一个限制因素^[12]。针阔混交林和常绿阔叶林中 SOC 和 TN 比马尾松林高,可能由于凋落物输入的增加和表层凋落物分解产物下渗的降低所致。研究表明,常绿阔叶林凋落物产量大,土壤 SOC 和 TN 含量较高,针叶林较低^[11]。马尾松林凋落物分解后残留大量的酚类化合物和木质素,分解速度放缓^[16],尽管其地表凋落物层现存量高于常绿阔叶林和针阔混交林^[12],但未分解层现存量占地表凋落物层现存总量的百分比过高,影响其土壤 SOC 和 TN

的含量。针阔混交林或常绿阔叶林阶段,阔叶树种入侵改善了凋落物质量,通过凋落物分解返还给土壤的养分比马尾松林高,因而土壤有机碳的补给也获得提高。

本研究中,常绿阔叶林土壤 C_{mic}、N_{mic} 平均含量高于马尾松林和针阔混交林,森林凋落物量随群落演替而增加,土壤孔隙度增大,容重降低,有利于土壤有机碳和土壤微生物生物量积累。常绿阔叶林凋落物 C/N 较低,养分易释放,微生物可利用成分多,土壤微生物生物量较大,而针叶林凋落物 C/N 较高,难分解,土壤微生物生物量较低,针阔混交会改善土壤养分状况和提高微生物活性^[17]。微生物生物量在许多生态系统中似乎与地上植物生产力密切相关^[18],这可能是由于微生物生物量取决于输入土壤的碳。Diaz-Ravina 等^[19]研究表明,较低的土壤有

机碳,其微生物生物量也减少,反之亦然。本研究中,微生物生物量更多地存在于生物量较大的常绿阔叶林和针阔混交林中,SOC 与 C_{mic} 、 N_{mic} 呈极显著正相关, C_{mic} 在演替过程中的变化与 SOC 的变化趋势相似。因为常绿阔叶林和针阔混交林积累生物量的同时能产生更多根际分泌物和凋落物,其 SOC 增加,导致微生物生物量也增加。

本研究中,常绿阔叶林土壤微生物熵高于马尾松林和针阔混交林,这是由于植物凋落物输入碳增加,因此微生物熵上升。表明演替过程中,微生物熵能有效地预测土壤有机碳数量和质量的改变,可表征演替对土壤碳库的影响。范跃新等^[20]研究发现,中亚热带常绿阔叶林演替中、后期微生物熵显著高于初期;演替前期土壤碳积累增加,土壤有效碳库增强。李胜蓝等^[21]研究显示,湘中丘陵区不同森林土壤微生物熵为 2.3%~2.9%,且阔叶林高于针叶林,阔叶林维持土壤微生物生物量的能力及土壤碳的积累强度均高于针叶林。

土壤基础呼吸速率取决于土壤微生物生物量和基质利用效率^[22]。在本研究中,土壤基础呼吸与土壤有机碳、全氮和微生物量碳存在显著的正相关性($P<0.05$)。与针阔混交林、常绿阔叶林相比,马尾松林凋落物较难分解,因此演替前期土壤基础呼吸差异不显著。随着演替的进行,土壤微生物生物量增加,土壤基础呼吸速率增加,说明植被凋落物输入的变化改善了土壤的肥力,增强了土壤的生物活性。

代谢熵(qCO_2)反映了土壤微生物种群利用土壤有机成分的效率,它可以表示微生物生物量的大小和活性,指示土壤质量的变化趋势和土壤生态系统的成熟程度^[23],在一个较稳定和成熟的生态系统内其值较低。本研究中,代谢熵随着演替的推进而显著降低($P<0.05$),而且代谢熵与有机碳、微生物生物量碳和氮有极显著负相关关系($P<0.01$)。演替初期由于人为干扰较多,凋落物质量、土壤微生物利用基质的效率降低^[24],代谢熵增加。随着阔叶树种入侵,外部干扰减少以及微生物群落结构发生变化,微生物的基质利用效率增加,代谢熵逐渐降低^[24]。陈璟等^[25]在研究衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物特性时发现,草坡群落阶段的 qCO_2 显著高于灌草、灌丛、乔灌群落恢复阶段的 qCO_2 ($P<0.05$)。微生物有效地将底物碳转化为微生物量碳,只有很少的碳通过呼吸释放,代谢熵降低^[26]。因此,马尾松林中 qCO_2 较高反映了其土壤微生物群落底物的利用效率下降。马尾松林中微生

物 C 利用效率降低的结果与牟守国^[27]早期的报告是一致的,他发现混交林土壤 CO_2 释放量明显低于落叶林和针叶林,这种差异的一个可能解释是土壤 pH 值发生了改变。Anderson 等^[28]报道,在酸性条件下土壤 qCO_2 增加,而微生物熵降低。一些阔叶树在针阔混交林或常绿阔叶林中被证明能降低土壤 pH 值,然而这种效果还是不明显,需要持续的长期研究。

[参考文献]

- [1] 韩兴国,黄建辉,姜治平.关键种概念在生物多样性保护中的意义与存在的问题[J].植物学通报,1995,12(S2):168-184.
Han X G, Huang J H, Lou Z P. The significance and problems associated with the keystone species concept in biodiversity conservation [J]. Chinese Bulletin of Botany, 1995, 12 (S2): 168-184.
- [2] 张全发,郑重,金义兴.植物群落演替与土壤发展之间的关系[J].武汉植物学研究,1990,8(4):325-334.
Zhang Q F, Zheng Z, Jin Y X. The relationship between the plant communities succession and the soil development [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1990, 8(4): 325-334.
- [3] 王小利,苏以荣,黄道友,等.土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响[J].中国农业科学,2006,39(4):750-757.
Wang X L, Su Y R, Huang D Y, et al. Effect of land use on soil organic C and microbial biomass C in hilly red soil region in subtropical China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(4): 750-757.
- [4] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil [J]. Biological Reviews, 1992, 67(3): 321-358.
- [5] Sicardi M, Garcia-Prechac F, Frioni L. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay [J]. Applied Soil Ecology, 2004, 27: 125-133.
- [6] 何友军,王清奎,汪思龙,等.杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系[J].应用生态学报,2006,17(12):2292-2296.
He Y J, Wang Q K, Wang S L, et al. Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and their relationships with soil nutrients in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17 (12): 2292-2296.
- [7] Díaz-Raviña M, Acea M J, Carballas T. Microbial biomass and its contribution to nutrient concentrations in forest soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25: 25-31.
- [8] 徐华勤,章家恩,冯丽芳,等.广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J].生态学报,2009,29(8):4112-4118.
Xu H Q, Zhang J E, Feng L F, et al. Effects of different land use patterns on microbial biomass carbon and nitrogen in

- Guangdong province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(8): 4112-4118.
- [9] Han W, Kemmitt S J, Brookes P C. Soil microbial biomass and activity in Chinese tea gardens of varying stand age and productivity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1468-1478.
- [10] 余树全. 浙江淳安天然次生林演替的定量研究 [J]. *林业科学*, 2003, 39(1): 17-22.
- Yu S Q. The quantitative study on the secondary forest succession in Chun'an county, Zhejiang province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(1): 17-22.
- [11] Wang Q K, Wang S L. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(3): 210-216.
- [12] Zeng Z Q, Wang S L, Zhang C M, et al. The carbon storage of evergreen broad-leaf forests in mid-subtropical region of China at four succession stages [J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(4): 677-682.
- [13] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 等. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- Liu G S, Jiang N H, Zhang L D, et al. Analysis of soil physical and chemical properties and description of soil profiles [M]. Beijing: China Standards Press, 1996.
- [14] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进 [J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 63-66.
- Lin Q M, Wu Y G, Liu H L. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2): 63-66.
- [15] Joergensen R G, Brookes P C. Ninyhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5M K₂SO₄ soil extracts [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 1023-1027.
- [16] Scholes M C, Nowicki T E. Effects of pines on soil properties and processes [M]//Richardson D M. *Ecology and biogeography of Pinus*. UK: Cambridge Univ Press, 1998: 341-353.
- [17] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍镬, 等. 杉木人工林取代天然次生阔叶林对土壤生物活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1411-1416.
- Hu Y L, Wang S L, Yan S K, et al. Effects of replacing natural secondary broad-leaved forest with *Cunninghamia lanceolata* plantation on soil biological activities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1411-1416.
- [18] Zak D R, Tilman D, Parmenter R R, et al. Plant production and soil microorganisms in late-successional ecosystems: a continental-scale study [J]. *Ecology*, 1994, 75: 2333-2347.
- [19] Diaz-Ravina M, Caraballas T, Acea M J. Microbial biomass and activity in four acid soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, 20: 817-823.
- [20] 范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态 [J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5751-5759.
- Fan Y X, Yang Y S, Yang Z J, et al. Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5751-5759.
- [21] 李胜蓝, 方 晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区4种森林类型土壤微生物生物量碳氮含量 [J]. *林业科学*, 2014, 50(5): 8-16.
- Li S L, Fang X, Xiang W H, et al. Soil microbial biomass carbon and nitrogen concentrations in four subtropical forests in hilly region of central Hunan province, China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(5): 8-16.
- [22] Islam K R, Weil R R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2000, 79: 9-16.
- [23] Wardle D A, Ghani A. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO₂) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27: 1601-1610.
- [24] Liao J D, Boutton T W. Soil microbial biomass response to woody plant invasion of grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 1207-1216.
- [25] 陈 璟, 杨 宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物特性 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 739-742.
- Chen J, Yang N. Soil microbial properties under different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 739-742.
- [26] Behera N, Sahani U. Soil microbial biomass and activity in response to *Eucalyptus* plantation and natural regeneration on tropical soil [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174: 1-11.
- [27] 牟守国. 温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的比较研究 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 564-570.
- Mu S G. Respiration of soils under temperate deciduous, coniferous and mixed forest [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 564-570.
- [28] Anderson T H, Domsch K H. Soil microbial biomass: the eco-physiological approach [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 2039-2043.