

## 格氏栲林土壤生态化学计量和微生物群落特征及其关联性分析

马瑞丰<sup>a,b</sup>, 刘金福<sup>a,b,①</sup>, 张广帅<sup>a</sup>, 吴则焰<sup>a,b</sup>, 洪伟<sup>a,b</sup>, 何中声<sup>a,b</sup>

(福建农林大学: a. 海峡自然保护区研究中心, b. 福建省高校生态与资源统计重点实验室, 福建 福州 350002)

**摘要:** 采用 Biolog-ECO 微平板技术、皮尔逊(Pearson)相关性分析及典范对应分析(CCA)等方法对福建省三明市小湖村的格氏栲(*Castanopsis kawakamii* Hay.)天然林和人工林土壤的生态化学计量特征、微生物群落特征及两者之间的关联性进行了比较研究。结果表明:天然林土壤的有机碳含量、全氮含量、C/P比、C/K比和N/K比以及土壤微生物群落的 Shannon-Wiener 指数和 McIntosh 指数均显著高于人工林;而2个林分间土壤的全磷含量、全钾含量、容重、含水量、分形维数、C/N比、N/P比和P/K比以及土壤微生物群落的 Simpson 指数差异不显著。用31个碳源或不同类型碳源进行培养,随培养时间延长2个林分土壤微生物群落的平均颜色变化率(AWCD)均逐渐升高;在31个碳源及碳水化合物、羧酸、多聚物和酚酸4类碳源中,天然林土壤微生物群落的 AWCD 值均高于人工林;总体上,天然林土壤微生物群落对碳源的利用率高于人工林。相关性分析结果表明:格氏栲林土壤微生物群落对碳水化合物的利用率与土壤的 N/P 比和 N/K 比呈极显著正相关,与土壤的 C/P 比和 C/K 比呈显著正相关,与土壤分形维数呈显著负相关;对羧酸的利用率与土壤的 N/P 比和 N/K 比呈显著正相关;对多聚物的利用率与土壤的 C/P 比和 C/K 比呈极显著正相关。CCA 分析结果表明:格氏栲林土壤微生物群落对碳水化合物的利用率与土壤的 C/P 比、C/K 比、N/P 比和 N/K 比的相关性均较强,对羧酸的利用率与土壤的 N/P 比和 N/K 比的相关性也较强;此外,5个天然林样地主要分布在 CCA 排序图的第3和第4象限,而5个人工林样地则主要分布在第1、第2和第4象限,表明天然林样地的土壤养分比例协调,而人工林样地的土壤肥力偏差、土壤结构不稳定。研究结果显示:格氏栲天然林的土壤生态系统优于人工林,建议适当减少对人工林的人为干扰,以促进林下土壤养分和微生物群落的良性发展。

**关键词:** 格氏栲;天然林;人工林;土壤;生态化学计量特征;微生物群落

中图分类号: Q938.1<sup>+</sup>3; S714; R282.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)01-0019-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.01.03

**Soil ecological stoichiometric and microbial community characteristics of *Castanopsis kawakamii* forest and their relevance analysis** MA Ruifeng<sup>a,b</sup>, LIU Jinfu<sup>a,b,①</sup>, ZHANG Guangshuai<sup>a</sup>, WU Zeyan<sup>a,b</sup>, HONG Wei<sup>a,b</sup>, HE Zhongsheng<sup>a,b</sup> (Fujian Agriculture and Forestry University: a. Cross-strait Nature Reserve Research Center, b. Key Laboratory of Fujian University for Ecology and Resource Statistics, Fuzhou 350002, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(1): 19-27

**Abstract:** Using methods of Biolog-ECO micro-plate technique, Pearson correlation analysis and canonical correspondence analysis (CCA), etc, ecological stoichiometric characteristics, microbial community characteristics and their relevance in soil of natural and artificial forests of *Castanopsis kawakamii* Hay. at Xiaohu Village in Sanming City at Fujian Province were studied. The results show that organic carbon and total nitrogen contents, C/P, C/K and N/K ratios in soil and Shannon-Wiener and McIntosh indexes of soil microbial community of natural forest all are significantly higher than those of artificial forest, while differences in total phosphorus and total potassium contents, bulk density, water content, fractal dimension and C/N, N/P and P/K ratios of soil and Simpson index of soil microbial

收稿日期: 2014-06-20

基金项目: 福建省自然科学基金重点项目(2008J008)

作者简介: 马瑞丰(1988—),女,河北张家口人,硕士研究生,主要从事植物地理学和土壤生态学方面的研究。

①通信作者 E-mail: fljif@126.com

community between two forest types are not significant. Using 31 carbon sources or different types of carbon sources for culturing, average well color development (AWCD) of soil microbial community of two forest types both increases gradually with prolonging of culture time. In 31 carbon sources and four types of carbon sources including carbohydrates, carboxylic acids, polymers and phenolic acids, AWCD values of soil microbial community of natural forest all are higher than those of artificial forest. Overall, utilization of soil microbial community of natural forest to carbon source is higher than that of artificial forest. The correlation analysis result shows that utilization of soil microbial community of *C. kawakamii* forest to carbohydrates appears an extremely significantly positive correlation with N/P and N/K ratios of soil, a significantly positive correlation with C/P and C/K ratios of soil, a significantly negative correlation with soil fractal dimension. Utilization to carboxylic acids appears a significantly positive correlation with N/P and N/K ratios of soil. Utilization to polymers appears an extremely significantly positive correlation with C/P and C/K ratios of soil. CCA analysis result shows that correlations of utilization of soil microbial community of *C. kawakamii* forest to carbohydrates with C/P, C/K, N/P and N/K ratios of soil all are stronger, those of its utilization to carboxylic acids with N/P and N/K ratios of soil are also stronger. Besides, five natural forest plots mainly distribute in the third and the fourth quadrants of CCA ordination diagram, while five artificial forest plots mainly distribute in the first, the second and the fourth quadrants, meaning that soil nutrient proportion of *C. kawakamii* natural forest is coordinate, while soil fertility of artificial forest is deviate and its soil structure is instability. The research results indicate that soil ecosystem of *C. kawakamii* natural forest is better than that of artificial forest, it is suggested that it is necessary to appropriately reduce the artificial interference to artificial forest, in order to promote better development of nutrients and microbial community in forest soil.

**Key words:** *Castanopsis kawakamii* Hay.; natural forest; artificial forest; soil; ecological stoichiometric characteristics; microbial community

土壤微生物在森林生态系统中的有机质分解、养分运输、土壤结构稳定及温室气体产生和环污染物净化等方面发挥着关键作用<sup>[1-2]</sup>。土壤微生物与土壤养分间存在复杂的交互作用,为植物生长提供了重要的营养保障。Thoms 等<sup>[3]</sup>的研究结果表明:温带落叶林通过影响土壤的养分变化来间接影响土壤微生物群落的多样性;McIntosh 等<sup>[4]</sup>认为,植物的种类分布和特定的根际环境造成土壤环境非均质,进而影响了土壤中微生物群落结构的多样性。

生态化学计量学(ecological stoichiometry)是研究生态过程和生态作用中化学元素平衡的科学<sup>[5]</sup>,主要通过分析生态系统组成部分的元素含量及其比值关系,探讨养分耦合循环特征、驱动力及作用机制等问题<sup>[6]</sup>。目前,国内外关于生态化学计量方面的研究报道主要局限于对土壤-植被系统及其演替过程中植物营养成分和土壤养分的化学计量研究<sup>[7-10]</sup>。虽然土壤微生物对土壤养分含量及其分布格局具有极强的敏感性,但有关土壤微生物与土壤生态化学计量特征关联性方面的研究却甚少。

格氏栲(*Castanopsis kawakamii* Hay.)是中亚热带南缘特有的壳斗科(Fagaceae)常绿阔叶大乔木,属国家Ⅱ级珍稀濒危保护植物,自然分布范围较窄;位于

福建省三明市小湖村的格氏栲林(面积近700 hm<sup>2</sup>)是中国目前面积最大且保存最完好的格氏栲天然林。1967年以后,部分格氏栲天然林被皆伐后营造为格氏栲、杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]、福建柏[*Fokienia hodginsii* (Dunn) A. Henry et H. H. Thomas]和楠木(*Phoebe zhennan* S. Lee)等人工纯林。可见,格氏栲人工林与现存格氏栲天然林具有相似的土壤本底条件,这为格氏栲天然林和人工林生态系统的对比研究提供了良好的实验场地。作者所在课题组前期已经对格氏栲天然林和人工林的生态学差异<sup>[11-13]</sup>、林窗更新特征<sup>[14]</sup>、土壤养分异质性特征<sup>[15]</sup>等进行了研究报道。

为了明确格氏栲天然林和人工林的土壤生态化学计量特征、土壤微生物群落特征以及二者间的关联性,作者采用Biolog-ECO微平板技术,以福建省三明市小湖村格氏栲自然保护区内的格氏栲天然林和人工林为研究对象,比较研究了不同林分类型土壤主要生态化学计量指标的差异及土壤微生物群落对碳源的利用特征,并对二者间的关联性进行了皮尔逊(Pearson)相关性分析和典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA),以初步探讨格氏栲林土壤化学计量特征对土壤微生物群落功能分布格局

的作用机制,为不同起源格氏栲林土壤肥力特征和土壤微生态系统稳定性的描述提供新思路和新方法,并为中亚热带濒危物种保护、林分地力维持及森林经营措施优化奠定研究基础。

## 1 研究区自然概况和研究方法

### 1.1 研究区自然概况

本研究调查区位于福建省三明市莘口镇小湖村的格氏栲自然保护区内,地理坐标为东经 117°24' ~ 117°27'、北纬 26°07' ~ 26°10',属武夷山东伸支脉,海拔 200 ~ 500 m,多地形雨;属典型亚热带湿润季风气候,年均气温 19.4 °C,年积温 6 215 °C;年均降水量 1 500 mm,雨季(3 月份至 8 月份)降水量占全年降水量的 75%。林下土壤类型主要为暗红壤,其次为紫色土,土层较厚,腐殖质丰富,水肥条件好,植物种类丰富。

本区域内的格氏栲天然林形成于 130 a 前,群落结构复杂,林内植物种类较多,主要伴生种类有马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.) 和米槠 [*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hay.] 等<sup>[16]</sup>,林分密度为 380 株·hm<sup>-2</sup>,郁闭度为 0.75,平均胸径为 39.86 cm,平均树高 22.65 m;林下植被以毛冬青 (*Ilex pubescens* Hook. et Arn.)、狗骨柴 [*Diplospora dubia* (Lindl.) Masam.]、狗脊 [*Woodwardia japonica* (Linn. f.) Sm.]、芒萁 [*Dicranopteris pedata* (Houtt.) Nakai.] 和南烛 (*Vaccinium bracteatum* Thunb.) 等种类为主。而格氏栲人工林则主要形成于 47 a 前,林内植物种类较少,群落结构也较单一<sup>[17]</sup>,林分密度为 900 株·hm<sup>-2</sup>,郁闭度为 0.93,平均胸径为 20.04 cm,平均树高为 19.42 m;林下植被以五月茶 [*Antidesma bunius* (Linn.) Spreng.]、杜茎山 [*Maesa japonica* (Thunb.) Moritzi. ex Zoll.]、狗脊、鸡血藤 (*Millettia reticulata* Benth.)、异形南五味子 [*Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib] 和玉叶金花 (*Mussaenda pubescens* Ait. f.) 等种类为主。

### 1.2 方法

1.2.1 实验设计及采样方法 由于土壤微生物生物量碳的季相变化不明显,而生物量氮则表现为冬季明显高于夏季<sup>[18]</sup>,故本研究于 2014 年 1 月进行格氏栲天然林和人工林土壤的调查取样。分别在格氏栲天然林和人工林内按“之”字形设置 5 个面积为 10 m×

10 m 的样方,5 个天然林样方依次编号 1 至 5,5 个人工林样方依次编号 6 至 10。每个样方大致按“S”形分布设置 5 个样点,采用环刀法对表层土进行取样并混匀,格氏栲天然林和人工林各取 5 个土壤样品。同时,记录样方的经度、纬度、海拔、土壤温度和光照强度等参数。将土样带回实验室后,称取约 20 g 土样用于各样方土壤含水量和土壤容重的测定;其余土样分为 2 份,一份过 2 mm 筛后置于 4 °C 冰箱中供土壤微生物群落特征分析,另一份置于室内通风处自然风干后用于土壤理化指标的测定。

1.2.2 土壤理化指标的测定 土壤容重测定采用环刀法<sup>[19]</sup>;土壤含水量测定采用烘干法<sup>[20]13-15</sup>;土样过 2 mm 筛后采用 Mastersizer 3000 马尔文激光粒度仪(英国马尔文仪器有限公司)测定土壤的颗粒组成<sup>[21]</sup>,并参照刘金福等<sup>[22]</sup>的方法计算土壤的分形维数。土样过 0.149 mm 筛后用于有机碳、全氮、全磷和全钾含量的测定。其中,有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化-外加热法<sup>[20]105-108</sup>;全氮含量测定采用半微量-凯氏法<sup>[20]74-77</sup>;全磷含量测定采用碱熔-钼锑抗显色法<sup>[20]87-90</sup>;全钾含量测定采用碱熔-火焰光度法<sup>[20]95-97</sup>。每个指标重复测定 3 次,结果取平均值。

1.2.3 土壤微生物群落特征分析 土壤微生物群落特征分析采用 Biolog-ECO 微平板技术<sup>[23]</sup>,该技术主要是通过分布于 32 孔中的碳源底物分析评价土壤微生物的生理代谢特征,每个微平板含 3 个重复共计 96 孔,共包含 31 个碳源。按化学基团性质,31 个碳源可分为 6 类,其中,碳水化合物有 10 种、多聚物有 4 种、氨基酸有 6 种、羧酸有 7 种、酚酸有 2 种、胺类有 2 种。分别在培养 24、48、72、96、120、144 和 168 h 检测每个碳源孔的吸光值,并据此计算土壤微生物群落的平均颜色变化率(average well color development, AWCD),具体计算公式为:AWCD = [Σ(C<sub>i</sub>-R)]/n。其中,C<sub>i</sub>为所有碳源孔的吸光值(其中,针对所有碳源的 AWCD 值计算时 C<sub>i</sub>为 31 个碳源孔的吸光值,针对每个类型碳源的 AWCD 值计算时 C<sub>i</sub>为所有该类型碳源孔的吸光值);R 为对照孔的吸光值;n 为碳源数量(其中,针对所有碳源的 AWCD 值计算时 n 为 31,针对每个类型碳源的 AWCD 值计算时 n 为该类型所有碳源数量)。

参照林瑞余等<sup>[24]</sup>的方法计算土壤微生物群落多样性的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数。

### 1.3 数据处理和分析

所有实验数据均采用 EXCEL 2007 软件建库和作图;根据土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量计算土壤的部分生态化学计量比(包括 C/N 比、C/P 比、C/K 比、N/P 比、N/K 比和 P/K 比);并利用 SPSS 19.0 统计分析软件对土壤的有机碳含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、容重、含水量、分形维数、各生态化学计量比以及土壤微生物群落多样性指数进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和皮尔逊(Pearson)相关性分析;利用 CANOCO 5.0 软件对格氏栲天然林和人工林的土壤生态化学计量特征与土壤微生物群落对不同碳源利用率和不同林分样地进行典范对应分析(CCA)。

## 2 结果和分析

### 2.1 格氏栲天然林和人工林土壤生态化学计量特征比较

2.1.1 土壤主要养分含量和物理结构指标的比较  
格氏栲天然林和人工林土壤中的有机碳、全氮、全磷和全钾含量以及土壤的容重、含水量和分形维数见表 1。由表 1 可见,格氏栲天然林土壤的有机碳、全氮和

全钾含量以及含水量均高于人工林,而天然林土壤的全磷含量、容重和分形维数则低于人工林。其中,天然林和人工林土壤的有机碳和全氮含量差异显著( $P<0.05$ ),而全磷和全钾含量以及容重、含水量和分形维数均无显著差异( $P>0.05$ )。

土壤的有机碳含量和全氮含量能够反映土壤中有机质矿化、积累以及地表凋落物和动植物残体养分归还的速率,而土壤分形维数则能够反映土壤微团聚体(粒径大于 0.25 mm)及水稳性团聚体(粒径大于 0.5 mm)对土壤结构及稳定性的影响,一般情况下,土壤的分形维数越小表明土壤质地越稳定。格氏栲天然林土壤的有机碳和全氮含量分别是人工林的 1.47 和 1.41 倍、土壤分形维数也小于人工林,说明格氏栲天然林土壤的综合肥力高于人工林、土壤结构也相对稳定。

2.1.2 土壤生态化学计量比的比较  
格氏栲天然林和人工林土壤生态化学计量比的比较结果见表 2。由表 2 可见,格氏栲天然林和人工林土壤的 C/N 比和 N/P 比均无显著差异,但天然林的 C/N 比和 N/P 比均略高于人工林;天然林和人工林土壤的 P/K 比数值相等;而天然林土壤的 C/P 比、C/K 比和 N/K 比均高于人工林,且差异显著( $P<0.05$ )。

表 1 格氏栲天然林和人工林土壤主要养分含量和物理结构指标的比较( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Comparison on main nutrient contents and physical structure indexes of soil of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural and artificial forests ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

林分类型 Forest type	土壤养分含量/g·kg <sup>-1</sup> Nutrient content of soil				BD/g·cm <sup>-3</sup>	WC/g·kg <sup>-1</sup>	FD
	OC	TN	TP	TK			
天然林 Natural forest	49.38±8.44a	1.65±0.26a	0.30±0.04a	8.72±0.95a	0.73±0.06a	0.36±0.05a	2.41±0.22a
人工林 Artificial forest	33.56±5.06b	1.17±0.13b	0.32±0.11a	8.68±0.99a	0.85±0.17a	0.30±0.07a	2.70±0.16a

<sup>1)</sup> OC: 有机碳 Organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; BD: 土壤容重 Bulk density of soil; WC: 土壤含水量 Water content of soil; FD: 土壤分形维数 Fractal dimension of soil. 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

表 2 格氏栲天然林和人工林土壤生态化学计量比的比较( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison on ecological stoichiometric ratios of soil of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural and artificial forests ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

林分类型 Forest type	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
天然林 Natural forest	31.17±9.43a	165.62±29.73a	5.65±0.60a	5.59±1.42a	0.19±0.03a	0.04±0.01a
人工林 Artificial forest	28.79±4.09a	105.31±13.30b	3.86±0.24b	3.67±0.31a	0.14±0.02b	0.04±0.03a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

### 2.2 格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落特征比较

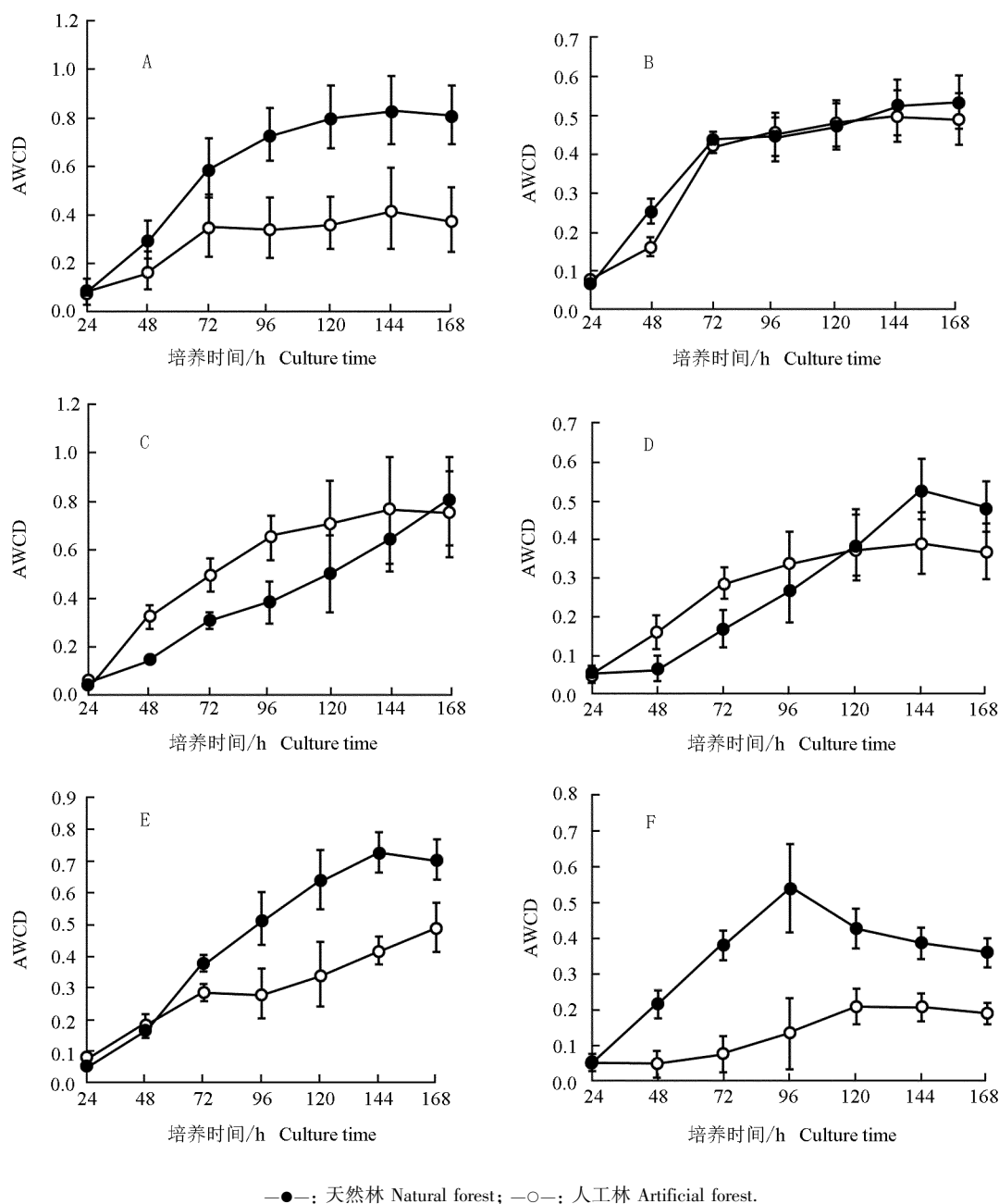
2.2.1 土壤微生物群落对不同碳源利用率变化趋势的比较  
本实验中,ECO 微平板上的 31 个碳源

按照其化学基团的性质可以分成 6 大类,包括碳水化合物(carbohydrates)、羧酸(carboxylic acids)、氨基酸(amino acids)、多聚物(polymers)、酚酸(phenolic acids)和胺类(amines)。平均颜色变化率(AWCD)能

够反映土壤微生物群落对碳源的综合利用情况及其利用活性, AWCD 值越大说明其对碳源的利用率越高。针对不同碳源格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落 AWCD 值的变化趋势见图 1。

由图 1 可知: 在 6 大类碳源培养下, 格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落对各类碳源的利用率基

本上均随着培养时间的延长而提高。其中, 用碳水化合物、多聚物、酚酸和羧酸 4 类碳源培养, 格氏栲天然林土壤微生物群落的 AWCD 值均高于人工林; 而用氨基酸培养 144 h 内, 格氏栲人工林土壤微生物群落的 AWCD 值均高于天然林, 但培养 168 h 后则表现为天然林的 AWCD 值高于人工林; 用胺类培养 120 h 内,

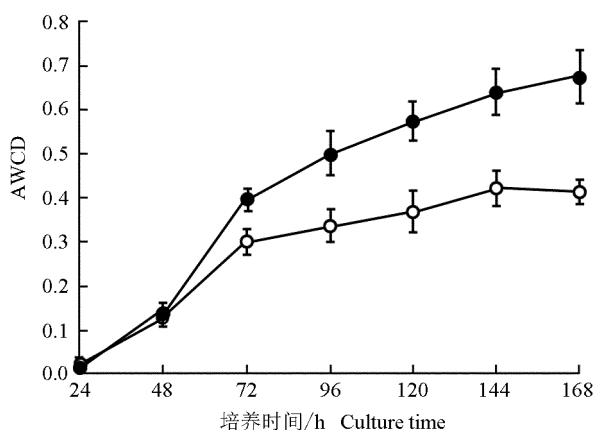


A: 碳水化合物 Carbohydrates; B: 多聚物 Polymers; C: 氨基酸 Amino acids; D: 酚酸 Phenolic acids; E: 羧酸 Carboxylic acids; F: 胺类 Amines.

图 1 对不同碳源格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落平均颜色变化率 (AWCD) 的变化  
Fig. 1 Change of average well color development (AWCD) of soil microbial community of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural and artificial forests to different types of carbon sources

格氏栲人工林土壤微生物群落的 AWCD 值均高于天然林,但培养 120 h 后则表现为天然林的 AWCD 值高于人工林。

2.2.2 土壤微生物群落对碳源综合利用率变化趋势的比较 格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落的平均 AWCD 值变化见图 2。由图 2 可知:针对 31 个碳源,格氏栲天然林土壤微生物群落的 AWCD 值总体上高于格氏栲人工林,且二者 AWCD 值的变化趋势相似,均表现为:培养 24 h 内 AWCD 值较低;此后随着培养时间的延长,AWCD 值逐渐增加;培养 72 h 后天然林和人工林土壤微生物群落的 AWCD 值出现较大差异。格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落 AWCD 值变化趋势的差异仅表现为培养 144 h 后人工林土壤微生物群落的 AWCD 值趋于稳定,而天然林土壤微生物群落的 AWCD 值却持续升高。



—●—: 天然林 Natural forest; —○—: 人工林 Artificial forest.

图2 格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落平均颜色变化率(AWCD)的变化

Fig. 2 Change of average well color development (AWCD) of soil microbial community of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural and artificial forests

2.2.3 土壤微生物群落多样性指数的比较 格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数见表 3。由表 3 可知:格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落的多样性差异显著,格氏栲天然林土壤微生物群落的上述 3 个多样性指数均大于人工林,其中,天然林与人工林土壤微生物群落的 Shannon-Wiener 指数和 McIntosh 指数均存在显著差异( $P < 0.05$ ),而二者的 Simpson 指数差异则不显著( $P > 0.05$ )。

表 3 格氏栲天然林和人工林土壤微生物群落多样性指数的比较 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison on diversity indexes of soil microbial community of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural and artificial forests ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

林分类型 <sup>2)</sup> Forest type <sup>2)</sup>	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Simpson 指数 Simpson index	McIntosh 指数 McIntosh index
NF	3.90±0.38a	1.01±0.02a	4.29±0.53a
AF	2.61±0.58b	0.89±0.00a	2.49±0.69b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

<sup>2)</sup> NF: 天然林 Natural forest; AF: 人工林 Artificial forest.

### 2.3 土壤生态化学计量特征与土壤微生物群落特征的关联性分析

2.3.1 Pearson 相关性分析结果 对格氏栲天然林及人工林土壤各生态化学计量比与土壤微生物群落对 6 大类碳源的利用率进行综合皮尔逊(Pearson)相关性分析,结果见表 4。

由表 4 可以看出:格氏栲林土壤微生物群落对碳水化合物的利用率与对氨基酸的利用率呈显著正相关,相关系数为 0.716;而对碳水化合物和氨基酸的利用率均与对羧酸的利用率呈极显著正相关,相关系数分别为 0.926 和 0.895。

由表 4 还可以看出:格氏栲林的土壤微生物群落对碳水化合物的利用率与土壤的 C/P 比和 C/K 比呈显著正相关,相关系数分别为 0.701 和 0.664;与土壤分形维数呈显著负相关,相关系数为 -0.657;与土壤的 N/P 比和 N/K 比呈极显著正相关,相关系数分别为 0.803 和 0.782。对羧酸的利用率与土壤的 N/P 比和 N/K 比呈显著正相关,相关系数分别为 0.664 和 0.634。对多聚物的利用率与 C/P 比和 C/K 比呈极显著正相关,相关系数分别为 0.797 和 0.780。

分析结果(表 4)还表明:格氏栲林土壤的 C/P 比与 N/P 比和 P/K 比分别呈显著正相关和显著负相关,相关系数分别为 0.657 和 -0.659;与 C/K 比呈极显著正相关,相关系数为 0.859。N/K 比与 N/P 比呈极显著正相关,相关系数为 0.848。此外,土壤分形维数与 C/K 比和土壤含水量分别呈显著和极显著负相关,相关系数分别为 -0.654 和 -0.779。

2.3.2 CCA 分析结果 对格氏栲天然林和人工林土壤各指标的综合 CCA 分析结果见图 3。结果表明:CCA 分析二维图的第 1 轴的解釋量为 0.76,第 2 轴的解釋量为 0.29,累计贡献率达到 85% 以上,说明得到

表 4 格氏栲林土壤生态化学计量比与土壤微生物群落对不同碳源利用率的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 4 Analysis on correlation between soil ecological stoichiometric ratio of *Castanopsis kawakamii* Hay. forest and utilization of soil microbial community to different types of carbon sources<sup>1)</sup>

指标 Index	不同指标间的相关系数 Correlation coefficient among different indexes														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
A	1.000														
B	0.716*	1.000													
C	0.926**	0.895**	1.000												
D	0.621	0.559	0.610	1.000											
E	0.251	-0.178	0.051	-0.289	1.000										
F	0.128	0.483	0.387	-0.113	-0.189	1.000									
G	-0.095	-0.176	-0.125	0.535	-0.177	-0.175	1.000								
H	0.701*	0.278	0.541	0.797**	0.079	-0.366	0.477	1.000							
I	0.803**	0.434	0.664*	0.678	0.238	-0.275	-0.346	0.657*	1.000						
J	0.664*	0.307	0.494	0.780**	0.010	-0.148	0.552	0.859**	0.413	1.000					
K	0.782**	0.499	0.634*	0.260	0.170	-0.051	-0.493	0.423	0.848**	0.446	1.000				
L	-0.342	0.025	-0.261	-0.336	-0.226	0.460	-0.174	-0.659*	-0.587	-0.195	-0.085	1.000			
M	-0.189	0.180	-0.009	-0.248	0.144	0.254	-0.244	-0.373	-0.168	-0.530	-0.297	-0.042	1.000		
N	0.475	0.588	0.495	0.384	-0.150	0.456	-0.086	0.042	0.065	0.407	0.447	0.576	-0.207	1.000	
O	-0.657*	-0.494	-0.611	-0.532	0.196	-0.400	-0.263	-0.407	-0.160	-0.654*	-0.321	-0.152	0.147	-0.779**	1.000

<sup>1)</sup> A: 对碳水化合物的利用率 Utilization to carbohydrates; B: 对氨基酸的利用率 Utilization to amino acids; C: 对羧酸的利用率 Utilization to carboxylic acids; D: 对多聚物的利用率 Utilization to polymes; E: 对酚酸的利用率 Utilization to phenolic acids; F: 对胺类的利用率 Utilization to amines; G: 土壤 C/N 比 C/N ratio of soil; H: 土壤 C/P 比 C/P ratio of soil; I: 土壤 N/P 比 N/P ratio of soil; J: 土壤 C/K 比 C/K ratio of soil; K: 土壤 N/K 比 N/K ratio of soil; L: 土壤 P/K 比 P/K ratio of soil; M: 土壤容重 Bulk density of soil; N: 土壤含水量 Water content of soil; O: 土壤分形维数 Fractal dimension of soil. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

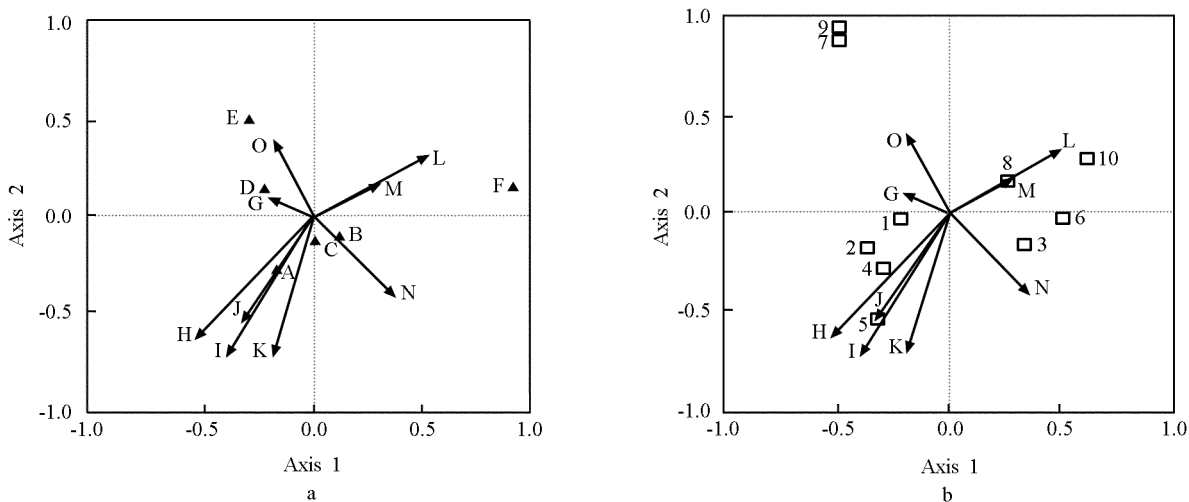


图 3 格氏栲林土壤生态化学计量特征与土壤微生物群落对不同碳源利用率 (a) 和不同林分样地 (b) 的 CCA 分析二维图  
 Fig. 3 Two dimensional graph of CCA analysis on soil ecological stoichiometric characteristics of *Castanopsis kawakamii* Hay. forest with utilization of soil microbial community to different types of carbon sources (a) and with plots of different forest types (b)

的排序结果良好。

由图 3-a 可以看出: 格氏栲林土壤微生物对碳水

化合物的利用率与土壤的 C/P 比、C/K 比、N/P 比和 N/K 比的相关性均较强, 对羧酸的利用率与 N/P 比

和 N/K 比的相关性也较强,与上述 Pearson 相关性分析结果一致。

由图 3-b 可以看出:格氏栲林土壤的 N/K 比、C/K 比、N/P 比、C/P 比、含水量和分形维数与第 1 轴的相关性均较强;土壤的 C/K 比、P/K 比和容重与第 2 轴具有一定的相关性但相关性并不显著。格氏栲天然林(1 至 5 号样地)主要分布在第 3 和第 4 象限,表明格氏栲天然林的林下土壤养分比例协调;格氏栲人工林(6 至 10 号样地)主要分布在第 1、第 2 和第 4 象限,表明格氏栲人工林的林下土壤肥力偏差、土壤结构也不稳定。

### 3 讨论和结论

对于一个完整的生态系统而言,其植物群落和土壤生态系统间必然存在紧密的联系,不同植被对土壤生态系统尤其是对土壤微生物群落具有显著的影响。植物群落类型、结构、数量和化学组成可能是土壤微生物群落多样性变化的主要动力<sup>[25]</sup>。一方面地上植被是土壤微生物赖以生存的营养物质和能源的主要来源,另一方面植物也影响着土壤的化学-物理环境、凋落物类型、堆积深度和地表水文过程。土壤作为植物生长的基质<sup>[26]</sup>,其养分含量是地形、气候以及生物因素相互作用的结果。格氏栲天然林和人工林林下土壤的有机碳和全氮含量差异显著,而全钾含量等其他指标均无显著差异,此结果与庞学勇等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。土壤有机碳含量受到有机质的矿化和积累以及植物残体和动物废弃物归还土壤等多方面的影响。郭剑芬等<sup>[28]</sup>的研究结果表明:格氏栲天然林的植被物种丰富,林下的枯落物和粗木质残体均显著多于格氏栲人工林,这些条件均为林下土壤微生物生长提供了充足的碳源。并且,由于格氏栲天然林的郁闭度低于人工林,导致其林下温度和湿度等气候因子的空间异质性较强,为碳源类型的多样化提供了良好的环境。土壤的有机碳和全氮含量对外界环境因子较敏感,而全磷及全钾含量在天然本底条件相同和成土母质相同的条件下则保持相对稳定的状态,因此,格氏栲天然林和人工林土壤的有机碳和全氮含量差异显著,而全磷和全氮含量的差异却较小。另外,格氏栲人工林中人类活动频繁,非常不利于土壤中有有机碳及氮的积累,这可能是导致其林下土壤中有有机碳和全氮含量均较低的原因之一。

格氏栲天然林林下土壤的 C/N 比、C/P 比、C/K 比、N/P 比和 N/K 比均高于人工林,但天然林和人工林土壤的 C/N 比和 N/P 比无显著差异,且 P/K 比基本一致。推测这可能是由于本研究所取土样的深度较浅,并未深入到土壤矿物质层所致。同时,本研究结果还验证了“不同生态系统土壤 C/N 比相对稳定<sup>[29]</sup>”的观点。

研究结果表明:在一定时间范围内,格氏栲天然林和人工林林下土壤微生物群落对不同碳源的利用率均随着时间的延长而增强,总体上表现为天然林高于人工林,这一研究结果与毕江涛等<sup>[30]</sup>和吴则焰等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。

Pearson 相关性分析和 CCA 分析结果均表明:格氏栲天然林和人工林林下土壤微生物群落对碳水化合物的利用能力与土壤的 C/P 比、C/K 比、N/P 比和 N/K 比,以及土壤微生物群落对羧酸的利用能力与土壤的 N/P 比和 N/K 比均具有显著相关性,并且 CCA 分析的二维排序结果与样方的实际情况相符,说明格氏栲天然林和人工林林下土壤微生物群落特征的差异主要源于土壤基质养分含量和代谢的异质性。土壤微生物群落在受到林下土壤养分状况、结构特征和生态化学计量比影响的同时也控制着土壤有机碳、氮和磷等重要营养元素的生物转化,进而影响着土壤的物理-化学结构。因此,土壤微生物群落与土壤生态化学计量特征具有显著的耦合作用。

综合分析结果显示:福建省三明市小湖村的格氏栲天然林土壤的有机碳和全氮含量以及 C/P 比、C/K 比和 N/K 比均高于人工林;天然林林下土壤微生物群落对 31 个碳源的综合利用能力均随着培养时间延长而增强且总体上高于人工林,其土壤微生物群落多样性指数 Shannon-Wiener 指数和 McIntosh 指数也均显著高于人工林。土壤微生物群落对碳水化合物的利用率与土壤的 C/P 比、C/K 比、N/P 比和 N/K 比以及对羧酸的利用率与土壤的 N/P 比和 N/K 比相关性的 Pearson 相关性分析和 CCA 分析结果一致;天然林土壤养分比例协调而人工林土壤肥力较差。因此,建议适当减少对格氏栲人工林的人为干扰,以促进其林下土壤养分和土壤微生物群落的良性发展。

#### 参考文献:

- [1] VITOUSEK P M, MATSON P A. Mechanism of nitrogen retention in forest ecosystem: a field experiment[J]. Science, 1984, 225: 51-52.



- [2] KENNEDY A C, SMITH K L. Microbial diversity and sustainability of agricultural soils[J]. *Plant Soil*, 1995, 23: 69-79.
- [3] THOMS C, GATTINGER A, JACOB M, et al. Direct and indirect effects of tree diversity drive soil microbial diversity in temperate deciduous forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 1558-1565.
- [4] McLINTOSH A C S, MACDONALD S E, QUIDEAU S A. Linkages between the forest floor microbial community and resource heterogeneity within mature lodgepole pine forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 63: 61-72.
- [5] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408: 578-580.
- [6] HE J S, WANG L, FLYNN D F B, et al. Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes[J]. *Oecologia*, 2008, 155: 301-310.
- [7] 刘佳庆, 孟莹莹, 包也, 等. 长白山林线植物岳桦和牛皮杜鹃养分化学计量特征及其影响因子[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3117-3124.
- [8] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [9] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 13-22.
- [10] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的 C:N:P 化学计量学特征[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 587-595.
- [11] 刘金福, 洪伟, 李俊清. 格氏栲天然林物种多度分布的核估计研究[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 120-124.
- [12] 何中声, 刘金福, 朱德煌, 等. 林窗对格氏栲天然林更新层物种生态位的影响[J]. *广西植物*, 2012, 32(5): 624-629.
- [13] LIU J F, HONG W, PAN D M, et al. A study on multidimensional time series of individual age's measurement in *Castanopsis kawakamii* population[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29: 232-236.
- [14] HE Z S, LIU J F, WU C T, et al. Effects of forest gaps on some microclimate variables in *Castanopsis kawakamii* natural forest[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9: 706-714.
- [15] 刘金福, 苏松锦, 何中声, 等. 格氏栲天然林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. *山地学报*, 2011, 29(6): 641-648.
- [16] 刘金福, 洪伟, 樊后保, 等. 中国珍稀格氏栲林的数量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(1): 14-19.
- [17] 杨玉盛, 邹双全, 朱锦懋, 等. 格氏栲天然林和人工林结构与持续地力的研究[C]//中国科协第二届青年学术年会论文集: 农科分册. 北京: 中国科学技术出版社, 1995: 400-404.
- [18] 梁月明, 何寻阳, 苏以荣, 等. 喀斯特峰丛洼地植被恢复过程中土壤微生物特性[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(5): 917-922.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 269-271.
- [20] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [21] 张广帅, 邓浩俊, 俞伟, 等. 泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析: 以云南小江流域为例[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(4): 646-654.
- [22] 刘金福, 洪伟. 不同起源格氏栲林地的土壤分形特征[J]. *山地学报*, 2001, 19(6): 565-570.
- [23] 董立国, 袁汉民, 李生宝, 等. 玉米免耕秸秆覆盖对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 444-446.
- [24] 林瑞余, 戎红, 周军建, 等. 苗期化感水稻对根际土壤微生物群落及其功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3644-3654.
- [25] WAID J S. Does soil biodiversity depend upon metabiotic activity and influences? [J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13: 151-158.
- [26] CAMPBELL B D, GRIME J P. A comparative study of plant responsiveness to the duration of episodes of mineral nutrient enrichment[J]. *New Phytology*, 1989, 112: 261-267.
- [27] 庞学勇, 胡泓, 乔永康, 等. 川西亚高山云杉人工林与天然林养分分布和生物循环比较[J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(1): 1-7.
- [28] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层和粗木质残体有机化学组成研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(3): 40-45.
- [29] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85: 235-252.
- [30] 毕江涛, 贺达汉, 沙月霞, 等. 荒漠草原不同植被类型土壤微生物群落功能多样性[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(5): 149-155.
- [31] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等. 中亚热带森林土壤微生物群落多样性随海拔梯度的变化[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(5): 397-406.

(责任编辑: 佟金凤)