

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200052

## 格氏栲林窗土壤微生物群落功能多样性季节动态特征

王雪琳<sup>1</sup> 刘金福<sup>1</sup> 何中声<sup>1</sup> 吴则焰<sup>2</sup> 江蓝<sup>1</sup> 朱静<sup>1</sup> 邢聪<sup>1</sup> 谷新光<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 生态与资源统计福建省高校重点实验室, 海峡自然保护区研究中心, 福建 福州 350002;

2. 福建农林大学生命科学学院, 福建 福州 350002)

**摘要:**【目的】林窗作为森林生态系统中的小尺度干扰, 对森林土壤养分循环与微生物群落功能多样性维持起着重要作用。明确不同林窗大小土壤养分和微生物群落功能多样性及其季节动态响应机制, 有助于改善格氏栲林窗土壤生态环境。【方法】以格氏栲天然林窗为对象, 采用 Biolog 微平板法, 研究不同林窗大小土壤理化性质、碳源利用能力和代谢特征的季节动态变化规律。【结果】(1)林窗生长季土壤温度、速效钾含量显著高于非生长季, pH 值、速效磷含量显著低于非生长季。林窗形成促进了土壤 pH 值升高与速效钾积累, 加速了微生物对碱解氮与速效磷的吸收和利用。(2)林窗生长季土壤微生物平均颜色变化率在培养的中后期显著高于非生长季。林窗内土壤微生物在生长季中主要利用碳源为羧酸、多聚物和氨基酸类, 在非生长季中主要利用碳源为氨基酸类和羧酸类。(3)林窗土壤微生物功能多样性指数中, 生长季 Shannon-Wiener 和 Pielou 指数显著高于非生长季, Simpson 指数显著低于非生长季。林窗面积对生长季土壤微生物群落功能多样性指数影响不明显。非生长季小林窗 Simpson 指数最高, 中林窗 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数最高。(4)广义线性模型表明, 林窗生长季的土壤温度和土壤速效钾含量升高有利于土壤微生物常见种优势度升高; 非生长季土壤碱解氮含量降低, 速效钾含量升高有利于微生物功能多样性升高。【结论】生长季林窗内土壤微生物群落功能多样性保持较高水平, 土壤养分循环效率高; 非生长季非林窗土壤环境有利于土壤微生物生长代谢, 维持土壤生态系统功能。林窗形成导致土壤温度与速效养分含量的异质性是影响土壤微生物群落代谢特征和功能多样性的主要因素。

**关键词:** 林窗; 土壤微生物; 功能多样性; Biolog 微平板法; 格氏栲林

中图分类号: S714.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)07-0077-12

引文格式: 王雪琳, 刘金福, 何中声, 等. 格氏栲林窗土壤微生物群落功能多样性季节动态特征 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(7): 77-88. Wang Xuelin, Liu Jinfu, He Zhongsheng, et al. Seasonal dynamics of functional diversity of soil microbial communities in *Castanopsis kawakamii* forest gaps [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(7): 77-88.

### Seasonal dynamics of functional diversity of soil microbial communities in *Castanopsis kawakamii* forest gaps

Wang Xuelin<sup>1</sup> Liu Jinfu<sup>1</sup> He Zhongsheng<sup>1</sup> Wu Zeyan<sup>2</sup> Jiang Lan<sup>1</sup>  
Zhu Jing<sup>1</sup> Xing Cong<sup>1</sup> Gu Xinguang<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Key Laboratory of Ecology and Resources Statistics of Fujian Colleges, Cross-Strait Nature Research Center, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:** [Objective] As a small-scale disturbance in the forest ecosystem, the forest gap plays an important role in nutrient cycling and functional diversity of microbial community in the soil of forest. Clarifying the seasonal dynamic response mechanism of soil nutrients and functional diversity of microbial community to the forest size will help to improve the soil ecological environment of *Castanopsis kawakamii*

收稿日期: 2020-02-24 修回日期: 2020-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770678、31700550), 福建省自然科学基金项目(2019J01367、2018J01617), 福建林业科技推广项目(2018TG14-2), 福建农林大学科技创新基金项目(CXZX2018125)。

第一作者: 王雪琳。主要研究方向: 生物多样性。Email: wangxl0026@163.com 地址: 350002 福建省福州市上下店路 15 号福建农林大学林学院。

责任作者: 刘金福, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林生态学。Email: fjlf@126.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

forests. [Method] The gaps of *C. kawakamii* natural forests were used as research objects, and the Biolog micro-plate method was used, combining the regularity of soil physical and chemical properties, carbon source utilization capacity and metabolic characteristics with different size of forest gaps during growing season and non-growing season. [Result] (1) The soil temperature (ST), available potassium (AK) content in the growing season of the gaps were significantly higher than those in the non-growing season, and pH value, available phosphorus (AP) content were significantly lower than those in the non-growing season. The formation of forest gaps promoted the increase of soil pH value and the accumulation of available potassium (AK), and accelerated the absorption and utilization of alkali-hydrolyzable nitrogen (HN) and available phosphorus (AP) by microorganisms. (2) The average well color development (AWCD) of soil microorganisms in the growing season of the forest gaps was significantly higher than that in the non-growing season in the middle and late cultivation periods. The soil microorganisms of the forest gaps mainly used carboxylic acid, polymer, and amino acid carbon sources in the growing season, and mainly used the carbon sources as amino acid and carboxylic acid carbon sources in the non-growing season. (3) In soil microbial functional diversity indexes of forest gaps, Shannon-Wiener and Pielou indices in the growing season of the forest gaps were significantly higher than those in the non-growing season, and the Simpson index was significantly lower than in the non-growing season. Gap size had no significant effect on the functional diversity index of microbial community during the growing season. The Simpson index of the soil microbial community in the non-growing small forest window was the highest. The Shannon-Wiener index and Pielou index of the medium gaps were the highest. (4) Generalized linear model (GLM) analysis showed that increasing soil temperature (ST) and soil available potassium (AK) in the growing season of the forest gaps were conducive to increasing the dominance of common soil microorganism species. The reduction of soil alkaline nitrogen (HN) content and the increase of available potassium (AK) content in non-growing seasons were conducive to the increase of microbial diversity and uniformity. [Conclusion] Functional diversity of soil microbial community of the forest gaps during the growing season is maintained at a high level, and the soil nutrient cycling efficiency is high. The soil environment of non-gaps during the non-growing season is conducive to the growth and metabolism of soil microorganisms and maintains the function of the soil ecosystem. Heterogeneity of soil temperature and available nutrient content caused by the formation of forest gaps is the main factor affecting the metabolic characteristics and functional diversity of soil microbial communities.

**Key words:** forest gap; soil microorganisms; functional diversity; Biolog microplate method; *Castanopsis kawakamii*

林窗作为森林小尺度干扰,是土壤养分循环的重要驱动力<sup>[1]</sup>。林窗面积作为重要的林窗特征,对森林土壤养分循环与微生物群落有显著影响<sup>[2]</sup>,同时林窗内微环境异质性也是影响森林土壤生态环境与系统功能的主要因素<sup>[3-4]</sup>。Muscolo等<sup>[5]</sup>研究表明,较中林窗(855 m<sup>2</sup>)和大林窗(1 520 m<sup>2</sup>),小林窗(380 m<sup>2</sup>)土壤腐殖质含量和微生物生物量最高,有利于保持良好的土壤生态功能。而随后研究表明林窗面积(27~590 m<sup>2</sup>)与土壤微生物生物量呈负相关,大林窗(590 m<sup>2</sup>)内土壤养分循环效率低<sup>[2]</sup>。中林窗(200 m<sup>2</sup>)可有效提高土壤微生物量,促进了土壤碳氮循环<sup>[3]</sup>。小林窗(40~50 m<sup>2</sup>)有利于土壤微生物群落结构发展<sup>[6]</sup>,可见不同林窗面积内土壤养分循环和微生物群落特征存在差异。土壤微生物作为土壤中最活跃和

最易变化的组分<sup>[7]</sup>,是土壤养分转化、循环的主要驱动力<sup>[8]</sup>,在森林生态系统具有重要作用<sup>[9]</sup>,因此明确林窗面积对土壤养分循环与土壤微生物群落的影响尤为必要。

在森林林窗群落中,季节变化通过改变林窗内光照、温度和水分等环境条件,进而影响土壤理化性质、物质的分解与矿化过程<sup>[10]</sup>,导致林窗微环境异质性,进而影响土壤微生物群落的组成与多样性<sup>[10-11]</sup>。林窗季节动态变化改变了光照分配格局<sup>[11]</sup>。林窗生长季(夏季)土壤养分循环效率与有机质含量较高,土壤微生物生物量碳含量为夏高春低,微生物生物量氮含量为夏高冬低,森林土壤微生物生物量随季节动态变化存在差异<sup>[12-13]</sup>。可见季节变化改变了林窗土壤物质循环和转化,驱动着土壤微生物群落的

动态变化。然而,在不同季节下林窗面积对土壤微生物群落的影响机制尚不明确,限制了土壤微生物对林窗响应过程的理解。

格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)是分布于我国中亚热带地区南缘的第三季孑遗植物<sup>[14]</sup>,仅零星分布于南亚热带和中亚热带南缘区域,包括福建、江西、广东、广西、台湾等地。而在福建三明格氏栲自然保护区有 700 hm<sup>2</sup> 以格氏栲为群落优势种的天然林<sup>[15]</sup>,引起了广泛关注<sup>[15-17]</sup>。由于种群已过熟,加之激烈的种间竞争和人为干扰,林窗数量增多<sup>[14]</sup>。林窗干扰改善了格氏栲群落物种多样性,促进了土壤微生物群落结构改变,对土壤生态环境和系统功能有重要影响<sup>[18-19]</sup>。目前有关格氏栲天然林不同季节下林窗面积对土壤微生物群落的影响尚未见报道。明确格氏栲林窗土壤养分和微生物群落对林窗面积的季节动态响应机制,揭示不同季节林窗内土壤微生物功能多样性影响因子,有助于揭示土壤微生物对林窗响应过程。为此,以格氏栲天然林为研究对象,研究林窗大小和季节内土壤理化性质和微生物代谢功能,明确林窗面积和季节对土壤养分有效性与微生物群落功能多样性的影响,揭示生长季与非生长季土壤微生物群落功能多样性的主要影响因子。研究旨在揭示格氏栲天然林土壤微生物动态变化的影响机制,为格氏栲天然林保护提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

格氏栲自然保护区位于福建省三明市郊西南部(26°07' ~ 26°10' N, 117°24' ~ 117°27' E),面积近 700 hm<sup>2</sup>,为低山、谷地、丘陵地带,属武夷山东延支脉,海拔 180 ~ 604 m。亚热带季风型气候,年平均温度为 19.4 °C,无霜期 300 d。年降雨量 1 500 mm,3—8 月降雨量占全年 75%,年平均相对湿度 79%。年平均风速 1.6 m/s。土壤主要类型为暗红壤。植被包括亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、灌丛等。乔木层主要树种有格氏栲、米楮(*Castanopsis carlesii*)和马尾松(*Pinus massoniana*)等<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 样地设置

以三明格氏栲自然保护区为研究区,在研究区内随机选取不同大小的林窗,在每个林窗中心点距离地面 1 m 处,使用数码相机(NIKON D7200, NIKON, Tokyo, Japan)搭配鱼镜头(AF DX Fisheye Nikkor ED 10.5 mm F2.8G, NIKON, Tokyo, Japan)拍摄林冠半球形照片。根据半球面影像法<sup>[20]</sup>确定林窗面积,选取小(SG)、中(MG)、大(LG)林窗各 3 个<sup>[21]</sup>,另外,在邻近林窗样地,郁闭度约 0.80 的林分中,设置

3 个面积 10 m × 10 m 非林窗样地作为对照(NG),平均冠层高度为 15 m,乔木层平均胸径为 30 cm,平均树龄为 120 ~ 150 年生。样地概况见表 1。

表 1 林窗研究样地概况

Tab. 1 General situation of the research plots of the forest gaps

林窗 Forest gap	GS/m <sup>2</sup>	SHC/%
LG	206.17 ± 4.53	0.85
MG	73.15 ± 1.93	0.67
SG	33.49 ± 2.48	0.50
NG	100 ± 0	0.77

注: LG 为大林窗; MG 为中林窗; SG 为小林窗; NG 为对照; GS 为林窗面积; SHC 为灌草覆盖度。数据为均值 ± 标准差,  $n = 3$ , 下同。Notes: LG, large gap; MG, medium gap; SG, small gap; NG, control; GS, forest gap size; SHC, shrub and herb coverage. The data are mean ± standard deviation,  $n = 3$ . The same below.

### 1.3 土壤样品采集

根据福建省森林生态系统生长季(4—11 月)与非生长季(12—次年 3 月)设定<sup>[22]</sup>,分别于 2019 年 1 月(非生长季)与 8 月(生长季),在福建省三明格氏栲自然保护区进行采样。依次在设立的每个林窗与对照样地中,于东、南、西、北 4 个方向与样地中心点设置 5 个土壤取样点,利用五点取样法,避开树干和林窗边缘,去除森林凋落物,采集 0 ~ 10 cm 土层土样进行混合<sup>[6]</sup>。样品采集后装入塑料袋并置于保鲜箱中,立即运回实验室,过 2 mm 筛后置冰箱中 -20 °C 保存。所有收集土壤样品均单独处理。

### 1.4 土壤理化性质测定

土壤环境因子选取可直接影响微生物群落的常用理化指标<sup>[23]</sup>。土壤理化性质测定包括:土壤含水量(SWC)采用烘干法;土壤 pH 值采用电位法;使用温度记录器(DS1922L-F50 iButton, MAXIM, USA)测定土壤温度,每 4 h 监测 1 次;有机碳测定使用元素分析仪(VARIO MAX, ELEMENTAR, GER);碱解氮含量测定使用碱解扩散法;速效磷含量测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾含量测定采用火焰光度法<sup>[24]</sup>。

### 1.5 土壤微生物群落代谢功能测定

土壤微生物群落代谢功能采用 Biolog 微平板法测定<sup>[25]</sup>。称取 5 g 鲜土于高压灭菌的三角瓶中,加入 100 mL 含有 0.85% 的 NaCl 无菌水,封口,120 r/min 震荡 30 min,冰浴静置 2 min,取上清液 5 mL 于灭菌过的 100 mL 三角瓶中,加入 45 mL 无菌水,重复稀释 3 次,制得 1:1 000 的提取液,立即用于 ELSIA 反应。将 Biolog 微平板预热到 25 °C,用移液枪吸取 150 mL 提取液于各个孔中,28 °C 恒温

培养 192 h, 每 24 h 用酶标仪读取 590 nm 的吸光度值。

### 1.6 数据统计分析

土壤微生物群落对碳源利用的整体能力用平均颜色变化率(average well color development, AWCD)测定。具体计算公式<sup>[25]</sup>:

$$AWCD = \sum (C_i - R) / 31 \quad (1)$$

式中:  $C_i$  为每孔的吸光度;  $R$  为对照孔的吸光值。

培养 144 h 后微孔吸光值趋于稳定, 因此对培养 144 h 的数据进行 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 指数分析, 分别用以评估微生物群落常见种优势度、物种丰富度和物种均匀度<sup>[25-26]</sup>。

采用 SPSS 22.0 中双因素方差分析和 Duncan 法进行方差分析和多重比较( $\alpha = 0.05$ ), 分析不同季节与不同林窗面积间土壤理化性质、微生物群落功能多样性指数差异性。采用广义线性模型(GLM)中基于正态分布的 Gaussian 模型探讨影响微生物功能

多样性的环境因子, 依据 AIC 准则采用逐步回归法优化模型。GLM 分析使用 R 3.6.1 的 broom、glm2 包实现<sup>[27]</sup>, 相关图标制作在 Excel 2010 中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同季节林窗面积对土壤特性的影响

林窗土壤特性的双因素分析结果表明(表 2), 林窗内不同生长季节间土壤温度、pH 值、速效钾和速效磷含量存在极显著差异( $P < 0.001$ )。由表 3 可知, 林窗生长季土壤温度、速效钾含量显著高于非生长季, pH 值和速效磷含量显著低于非生长季。林窗面积显著影响土壤 pH 值、速效钾和速效磷含量( $P < 0.01$ )。林窗生长季土壤 pH 值(3.21 ~ 3.4)整体小于非生长季(3.37 ~ 3.54), 大林窗中土壤 pH 值均显著高于其他林窗( $P < 0.05$ )。生长季大林窗中速效钾含量最高。土壤速效磷含量受林窗面积与生长季节交互作用的显著影响( $P < 0.01$ ), 生长季速效磷含量显著低于非生长季, 随林窗面积增大速效磷含量显著

表 2 林窗土壤特性的双因素方差分析

Tab. 2 Two-way ANOVA analysis of soil characteristics in different growing seasons and gap size

环境因子 Environmental factor	因子 Factor	自由度 df	F	P
ST	季节 Season	1	2 707.332	< 0.001***
	林窗面积 Forest gap size	3	0.978	0.428
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	0.325	0.807
SWC	季节 Season	1	2.246	0.153
	林窗面积 Forest gap size	3	0.298	0.826
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	0.077	0.972
pH	季节 Season	1	45.334	< 0.001***
	林窗面积 Forest gap size	3	5.256	0.010**
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	2.132	0.136
HN	季节 Season	1	3.219	0.092
	林窗面积 Forest gap size	3	1.256	0.323
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	0.586	0.633
AK	季节 Season	1	84.533	< 0.001***
	林窗面积 Forest gap size	3	9.146	0.001**
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	0.733	0.548
AP	季节 Season	1	28.392	< 0.001***
	林窗面积 Forest gap size	3	18.916	< 0.001***
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	7.052	0.003**
SOC	季节 Season	1	1.439	0.248
	林窗面积 Forest gap size	3	2.032	0.150
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	1.521	0.247

注: ST为土壤温度; SWC为土壤含水量; HN为碱解氮; AK为速效钾; AP为速效磷; SOC为有机碳, 下同。\*代表差异显著( $P < 0.05$ ); \*\*代表差异极显著( $P < 0.01$ ); \*\*\*代表差异极显著( $P < 0.001$ ), 下同。Notes: ST, soil temperature; SWC, soil water content; HN, alkali-hydrolyzable nitrogen; AK, available potassium; AP, available phosphorus; SOC, soil organic carbon. \* represents significant difference ( $P < 0.05$ ); \*\* represents extremely significant difference ( $P < 0.01$ ); \*\*\* represents extremely significant difference ( $P < 0.001$ ). The same below.

表 3 不同面积林窗生长季与非生长季土壤特性

Tab. 3 Soil characteristics of forest gaps with different size in growing season and non-growing season

季节 Season	林窗 Forest gap	ST/°C	pH	HN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )
生长季 Growing season	LG	25.9 ± 0.65a	3.4 ± 0.08b	212.05 ± 34.94ab	120.89 ± 20.25a	5.89 ± 2.72d
	MG	25.7 ± 0.37a	3.25 ± 0.01cd	215.32 ± 7.09ab	86.51 ± 6.13ab	10.61 ± 0.30c
	SG	25.64 ± 0.14a	3.24 ± 0.08cd	182.57 ± 20.6b	93.56 ± 8.14b	12.57 ± 1.00abc
	NG	25.6 ± 0.59a	3.21 ± 0.03d	235.79 ± 12.76ab	94.85 ± 2.55b	12.64 ± 1.03abc
非生长季 Non-growing season	LG	12.94 ± 0.36b	3.54 ± 0.09a	222.69 ± 55.27ab	75.46 ± 12.31cd	12.01 ± 0.01bc
	MG	12.63 ± 0.33b	3.37 ± 0.1bc	231.7 ± 49.14ab	56.01 ± 2.88e	12.08 ± 0.27bc
	SG	12.63 ± 0.07b	3.45 ± 0.1ab	234.15 ± 15.6ab	61.2 ± 6.91de	13.2 ± 0.64ab
	NG	12.02 ± 1.38b	3.53 ± 0.01a	248.07 ± 11.26a	59.89 ± 0.36de	14.33 ± 0.59a

注: 同一列数据后不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。Notes: different letters in the same column indicate significant difference ( $P < 0.05$ ). The same below.

减少, 表明林窗面积增大限制了土壤速效磷的积累。

## 2.2 不同季节林窗面积对土壤微生物碳源利用动力学特征的影响

Biolog 微平板微孔中碳源利用情况采用平均颜色变化率(AWCD)表示, 可反映土壤微生物对碳源的利用能力与代谢活性<sup>[28]</sup>。表 4 中随培养时间变化, 土壤微生物群落代谢的 AWCD 值变化极显著 ( $P < 0.001$ ), 林窗内生长季节对土壤微生物碳源利用能力有极显著影响 ( $P < 0.001$ )。在培养中后期, 林窗内生长季微生物 AWCD 值显著高于非生长季(图 1), 说明生长季土壤微生物对碳源整体利用程度高, 土壤微生物活性高。非生长季土壤微生物 AWCD 值规律为 NG > SG > MG > LG, 表明对照的土壤微生物对碳源利用程度最高, 土壤微生物活性最高。

## 2.3 不同面积林窗内土壤微生物碳源利用程度

林窗生长季土壤微生物 144 h 对不同碳源的利用率均高于非生长季(图 2), 生长季土壤微生物对氨基酸类碳源利用程度最高, 不同面积林窗内土壤对不同碳源的利用程度无显著差异 ( $P > 0.05$ )。林窗非生长季土壤微生物对氨基酸类、羧酸类碳源利用程度最高, 大林窗土壤微生物对氨基酸类、多聚物类和糖类碳源的利用程度均显著低于其他面积的林窗 ( $P < 0.05$ ), 土壤微生物活性最低。

## 2.4 生长季与非生长季不同面积林窗内土壤微生物功能多样性

生物多样性指数描述了生物的类型数、丰富和均匀程度。由表 5 可知, 林窗内不同生长季节间土壤微生物功能多样性指数中 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数均具有显著差异 ( $P < 0.01$ ), 林窗生长季 Simpson 指数显著低于非生长季, Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数均显著高于非生长季, 说明林窗生长季土壤微生物常见种优势度低, 物种丰富度与均匀度高。生长季节、林窗面积和二者的交互作用均显著影响 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数, 表明生长季节与林窗面积共同作用于土壤微生物功能多样性。表 5 中生长季林窗面积对土壤微生物群落功能多样性指数无显著影响 ( $P > 0.05$ )。非生长季小林窗 Simpson 指数显著高于中林窗、非林窗, 表明土壤中微生物常见种优势度高; 中林窗 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数显著高于其他林窗和非林窗 ( $P < 0.05$ ), 表明非生长季中林窗的形成提高了土壤微生物群落的物种丰富度和物种均一性, 对土壤微生物群落起促进作用(表 6)。

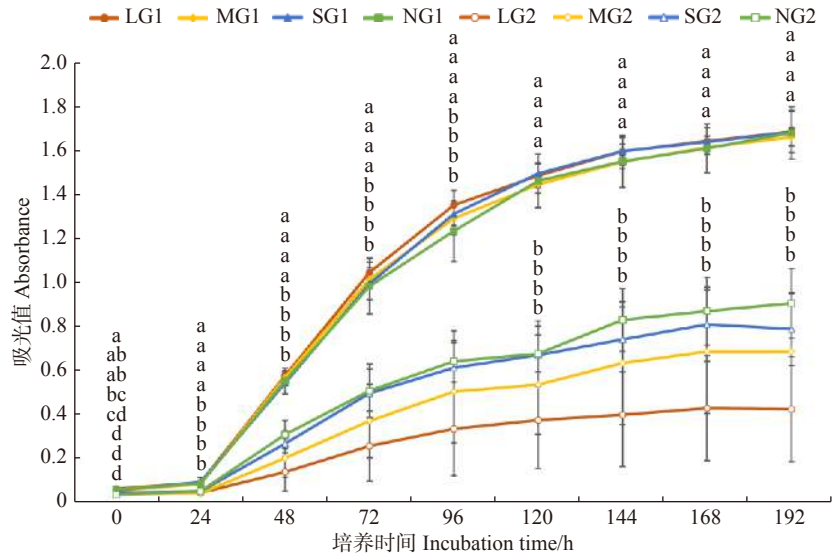
## 2.5 林窗内土壤微生物功能多样性影响因子

依据 AIC 准则采用逐步回归法优化模型(表 7), 通过 GLM 对土壤微生物功能多样性与环境因子之

表 4 林窗土壤平均颜色变化率值的双因素方差分析

Tab. 4 Two-way ANOVA on soil average well color development (AWCD) value of forest gaps

组间因子 Intergroup factor	df	F	P	组内因子 Intragroup factor	自由度 df	F	P
季节 Season	1	250.338	< 0.001***	时间 Time	8	989.012	< 0.001***
林窗面积 Forest gap size	3	0.455	0.717	时间 × 季节 Time × season	8	224.237	< 0.001***
季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	0.111	0.952	时间 × 林窗面积 Time × forest gap size	24	0.601	0.926
				时间 × 季节 × 林窗面积 Time × season × forest gap size	24	0.263	1.000



LG1 为生长季大林窗; MG1 为生长季中林窗; SG1 为生长季小林窗; NG1 为生长季对照; LG2 为非生长季大林窗; MG2 为非生长季中林窗; SG2 为非生长季小林窗; NG2 为非生长季对照。同一列数据上不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。LG1, large forest gap in growing season; MG1, medium forest gap in growing season; SG1, small forest gap in growing season; NG1, control in growing season; LG2, large forest gap in non-growing season; MG2, medium forest gap in non-growing season; SG2, small forest gap in non-growing season; NG2, control in non-growing season. Different letters above the same column data indicate significant differences ( $P < 0.05$ ). The same below.

图1 不同林窗内生长期与非生长季土壤微生物 AWCD 值

Fig. 1 Soil microbial AWCD values of different forest gaps in growing season and non-growing season

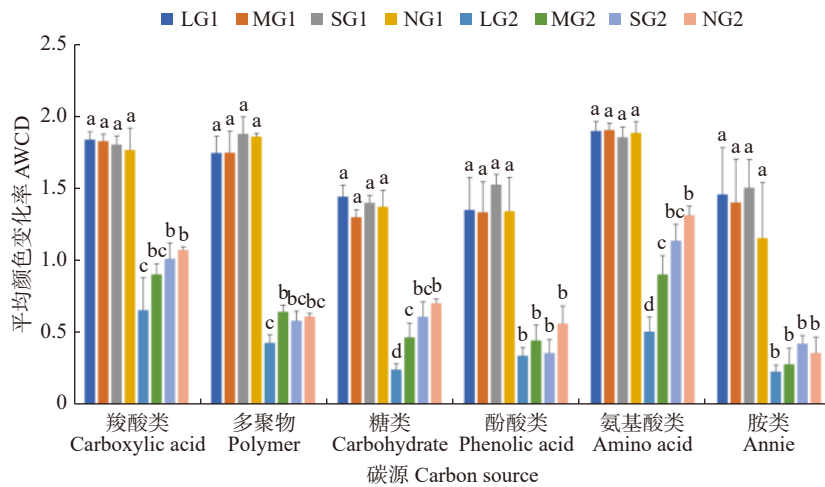


图2 不同林窗内生长期与非生长季土壤微生物碳源利用能力

Fig. 2 Utilization of carbon sources by soil microorganisms of different forest gaps in growing season and non-growing season

表5 不同生长季节与林窗面积的微生物功能多样性双因素分析结果

Tab. 5 Results of two-way ANOVA of functional diversity of microorganisms in different growing seasons and forest gap size

多样性指数 Diversity index	因子 Factor	df	F	P
Simpson 指数 Simpson index	季节 Season	1	8.773	0.009**
	林窗面积 Forest gap size	3	1.684	0.210
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	1.557	0.239
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	季节 Season	1	350.491	< 0.001***
	林窗面积 Forest gap size	3	4.298	0.021*
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	4.403	0.019*
Pielou 指数 Pielou index	季节 Season	1	350.665	< 0.001***
	林窗面积 Forest gap size	3	4.281	0.021*
	季节 × 林窗面积 Season × forest gap size	3	4.406	0.019*

表 6 不同面积林窗土壤微生物功能多样性

Tab. 6 Functional diversity of soil microorganisms of forest gaps in different size

季节 Season	林窗 Forest gap	Simpson指数 Simpson index	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	Pielou指数 Pielou index
生长季 Growing season	LG	0.984 4 ± 0.000 2b	4.88 ± 0.02a	0.985 7 ± 0.004 3a
	MG	0.984 2 ± 0.000 3b	4.86 ± 0.01a	0.980 6 ± 0.002 2a
	SG	0.984 8 ± 0.000 3b	4.9 ± 0.01a	0.988 3 ± 0.001 4a
	NG	0.983 9 ± 0.001 1b	4.84 ± 0.05a	0.977 8 ± 0.010 9a
非生长季 Non-growing season	LG	1.011 7 ± 0.006 7ab	4.49 ± 0.02c	0.906 5 ± 0.003 4c
	MG	0.996 7 ± 0.007b	4.63 ± 0.03b	0.935 3 ± 0.005 6b
	SG	1.031 0 ± 0.051 3a	4.54 ± 0.09c	0.917 1 ± 0.017 8c
	NG	0.987 0 ± 0.002b	4.48 ± 0.05c	0.904 0 ± 0.010 9c

间关系进行分析(表 8)。林窗生长季 Simpson 指数与土壤温度和速效钾含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ,  $B > 0$ ), 其中土壤温度与其呈极显著正相关( $P < 0.001$ ,  $B > 0$ ), 表明土壤温度是生长季土壤微生物群落功能多样性的主要影响因子。林窗非生长季 Simpson 指数与土壤温度、含水量和碱解氮呈显著正相关( $P < 0.05$ ,  $B > 0$ ), 与速效钾和有机碳含量呈显著负相关( $P < 0.05$ ,  $B < 0$ ), 其中碱解氮与速效钾含量与其呈极显著相关( $P < 0.001$ )。Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数与土壤含水量和林窗面积含量呈极显著负相关( $P < 0.01$ ,  $B < 0$ ), 与土壤速效钾含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ,  $B > 0$ ), 其中土壤含水量和林窗面积与其呈极显著相关( $P < 0.01$ ), 表明土壤含水量和林窗面积是非生长季土壤微生物群落功能多样性的主要影响因子。

## 3 讨 论

### 3.1 林窗面积与季节对土壤特性的影响

林窗形成后环境异质性增加, 影响土壤理化性质与凋落物分解<sup>[12]</sup>。林窗形成显著提高了土壤 pH 值, 大林窗土壤 pH 值最高, 林窗形成降低了土壤酸度, 在于林窗形成减少了凋落物输入, 凋落物分解产生的腐殖质酸减少, 土壤酸性降低, 与梁晶等<sup>[29]</sup>研究一致。对照土壤碱解氮和速效磷含量均高于林窗土壤, 林窗促进了土壤微生物和植物根系对碱解氮、速效磷的吸收, 提高了土壤养分利用率, 有利于土壤养分循环。其次凋落物积累与分解是影响土壤养分储存与循环的重要因素<sup>[30]</sup>, 非林窗地表凋落物积累较多, 凋落物分解增加了土壤养分含量, 保证了格氏栲群落的生长繁育。

在森林生态系统中, 林窗内土壤微环境呈季节动态变化<sup>[10]</sup>。林窗生长季速效钾含量显著高于非生长季, 可能是因为生长季土壤温度高, 降水增多, 土壤干湿交替会引起黏土矿物的收缩与膨胀, 影响速

效钾的固定与释放<sup>[31]</sup>。生长季土壤速效磷含量显著低于非生长季, 在于生长季植物根系与土壤微生物代谢旺盛, 对速效磷需求量增加, 与薛敬意等<sup>[32]</sup>研究一致。

### 3.2 林窗面积与季节对土壤微生物功能多样性的影响

林窗内生长季土壤微生物 AWCD 值高于非生长季(图 1), 生长季微生物功能多样性指数中 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数均高于非生长季(表 6), 表明生长季土壤微生物活性与功能多样性高, 呈现多物种共存趋势。土壤温度的季节变化是影响土壤微生物代谢和养分有效性的重要因素<sup>[33]</sup>, 生长季土壤温度高于非生长季(表 3), 促进了土壤微生物代谢能力与功能多样性升高, 更适于土壤微生物繁殖代谢。林窗非生长季土壤微生物的碳源代谢能力与林窗面积呈负相关, 表明非生长季林窗抑制了土壤微生物活性升高, 且随林窗面积增大, 抑制作用更为强烈, 土壤养分循环效率降低, 与 Schliemann 等研究一致<sup>[2]</sup>。

### 3.3 不同林窗面积与季节内土壤微生物对不同碳源的利用特征

不同面积林窗内非生长季土壤微生物对多聚物类、糖类和氨基酸类碳源的利用差异显著(图 2)。许振羽等<sup>[34]</sup>研究也发现了类似现象: 土壤微生物对不同碳源利用能力不同, 与植物根系分泌物等有关。植物根系代谢过程中会向土壤中分泌大量有机物, 包含糖类、酚类和氨基酸类等有机化合物<sup>[35]</sup>, 也为土壤中微生物生长繁殖提供了养料, 二者形成相互调节关系, 促进了土壤有机质循环, 增强了土壤系统的稳定性。

格氏栲林土壤微生物对氨基酸类碳源利用率最高, 微生物可有效利用氨基酸类碳源, 合成植物生长所需有机氮以促进植物生长<sup>[36]</sup>。王晶晶等<sup>[37]</sup>在常绿阔叶林研究结果显示, 土壤微生物对羧酸类碳源利

表7 土壤微生物功能多样性与环境因子间逐步回归结果

Tab. 7 Results of stepwise regression between functional diversity of soil microorganisms and environmental factors

季节 Season	多样性指数 Diversity index	环境因子 Environmental factor	AIC
生长季 Growing season	Simpson指数 Simpson index	ST + SWC + pH + HN + AK + AP + SOC + GA	-423.13
		ST + SWC + pH + AK + AP + SOC + GA	-424.92
		ST + pH + AK + AP + SOC + GA	-426.74
		ST + pH + AK + AP + SOC	-428.27
	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	ST + SWC + pH + HN + AK + AP + SOC + GA	-181.88
		ST + SWC + pH + HN + AK + AP + SOC	-183.66
		ST + SWC + pH + HN + AP + SOC	-185.52
		ST + SWC + pH + HN + SOC	-187.35
		ST + SWC + HN + SOC	-188.68
		ST + HN + SOC	-189.73
	Pielou指数 Pielou index	ST + SOC	-191.15
		ST + SWC + pH + HN + AK + AP + SOC + GA	-277.94
		ST + SWC + pH + HN + AK + AP + SOC	-279.72
		ST + SWC + pH + HN + AP + SOC	-281.57
ST + SWC + pH + HN + SOC		-283.41	
ST + SWC + HN + SOC		284.73	
非生长季 Non-growing season	Simpson指数 Simpson index	ST + HN + SOC	-285.79
		ST + SOC	-287.21
		ST + SWC + pH + HN + AK + AP + SOC + GA	-284.55
		ST + SWC + pH + HN + AK + SOC + GA	-286.52
	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	ST + SWC + pH + HN + AK + SOC	-288.46
		ST + SWC + HN + AK + SOC	-289.41
		ST + SWC + pH + HN + AK + AP + SOC + GA	-84.2
		SWC + pH + HN + AK + AP + SOC + GA	-86.11
		SWC + pH + HN + AK + AP + GA	-87.56
		ST + SWC + pH + HN + AK + AP + SOC + GA	-180.22
	Pielou指数 Pielou index	SWC + pH + HN + AK + AP + SOC + GA	-182.13
		SWC + pH + HN + AK + AP + GA	-183.58

注: AIC为赤池信息准则。下同。Notes: AIC, akaike information criterion. The same below.

用率最高。吴则焰等<sup>[38]</sup>对中亚热带各海拔植被带研究结果显示, 碳水化合物和羧酸类碳源是土壤微生物的主要碳源。与本研究结果不同, 这可能是由于森林群落组成不同, 森林群落结构决定了土壤中凋落物与根系分泌物的种类与质量, 影响着土壤微生物代谢功能<sup>[39]</sup>。

### 3.4 林窗内不同季节土壤微生物功能多样性影响因素

GLM分析表明林窗内不同生长季节间土壤微生物功能多样性影响因素不同。林窗生长季 Simpson 指数与土壤温度、速效钾含量呈正相关(表8), 其中与土壤温度呈极显著正相关, 与张红等<sup>[40]</sup>研究一

致, 表明林窗生长季土壤微生物群落起分异作用的环境因子是土壤温度。非生长季中土壤含水量、碱解氮和速效钾含量与微生物群落功能多样性有极显著影响。其中 Simpson 指数与碱解氮含量呈极显著正相关, 表明土壤碱解氮是微生物代谢的重要元素, 其含量升高有利于提高微生物常见种优势度<sup>[41]</sup>。非生长季土壤速效钾含量与 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数正相关, 同时非生长季土壤速效钾含量与微生物功能多样性均低于生长季, 表明土壤中速效钾含量降低限制了土壤微生物功能多样性升高, 存在供求矛盾, 不利于格氏栲幼苗生长及群落发展<sup>[42]</sup>。林窗面积与非生长季 Shannon-Wiener 指数和 Pielou



表 8 土壤微生物功能多样性与环境因子间 GLM 分析

Tab. 8 GLM analysis of the relationship between functional diversity of soil microorganisms and environmental factors

季节 Season	多样性指数 Diversity index	环境因子 Environmental factor	AIC	$\beta$	SE	$t$	$P$
生长季 Growing season	Simpson指数 Simpson index	ST	-428.27	$1.25 \times 10^{-3}$	$2.76 \times 10^{-4}$	4.525 0	0.000 9***
		AK		$3.12 \times 10^{-5}$	$1.36 \times 10^{-5}$	2.298 0	0.038 6*
	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	—	-191.15	—	—	—	—
	Pielou指数 Pielou index	—	-287.21	—	—	—	—
非生长季 Non-growing season		ST		$3.47 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^{-3}$	2.289 0	0.031 2*
		SWC		$2.46 \times 10^{-3}$	$8.92 \times 10^{-4}$	2.754 0	0.011 0*
	Simpson指数 Simpson index	HN	-289.41	$2.03 \times 10^{-4}$	$3.96 \times 10^{-5}$	5.134 0	<0.000 1***
		AK		$-7.74 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-4}$	-4.808 0	<0.000 1***
		SOC		$-1.44 \times 10^{-2}$	$4.16 \times 10^{-3}$	-3.471 0	0.002 0**
		SWC		-0.089 1	0.025 9	-3.455 0	0.002 2**
	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	AK	-87.56	0.016 4	0.005 9	2.784 0	0.010 6*
		GA		-0.002 8	0.000 9	-3.049 0	0.005 7**
		SWC		-0.018 0	0.005 2	-3.443 0	0.002 2**
	Pielou指数 Pielou index	AK	-183.58	0.003 3	0.001 2	2.784 0	0.010 6*
	GA		-0.000 6	0.000 2	-3.050 0	0.005 7**	

指数呈显著负相关(表 7), 表明林窗形成后土壤理化环境改变, 凋落物输入与植物根系分泌物减少导致供给微生物代谢的养料不足<sup>[43]</sup>, 抑制了土壤微生物的生长繁殖, 且随林窗面积增大抑制作用更明显。

## 4 结 论

生长季格氏栲林窗内微生物碳源利用能力与群落功能多样性显著高于非生长季。林窗内不同生长季节土壤微生物群落的变化格局存在差异, 主要影响因子不同, 生长季土壤微生物群落主要影响因子为土壤温度; 非生长季主要影响因子为土壤碱解氮、速效钾含量、土壤含水量和林窗面积。即生长季不同林窗面积下土壤微生物碳源利用能力与功能多样性保持较高水平, 有利于土壤养分循环。非生长季非林窗土壤环境有利于微生物生长代谢, 维持土壤生态系统功能, 保证格氏栲群落幼苗生长及群落发展。

通过 Biolog 微平板技术探究了不同林窗面积内土壤微生物群落代谢功能和功能多样性的季节动态变化, 明确了林窗面积对土壤微生物群落的动态影响机制, 为格氏栲林窗可持续发展提供了一定的科学依据。Biolog 技术是研究微生物结构和功能多样性的重要方法, 能有效解析土壤微生物群落结构特征, 但无法明确具体微生物群落组成和结构信息, 未来可采用变性梯度凝胶电泳技术(DGGE)和高通量测

序等技术, 进一步探讨格氏栲林窗内土壤微生物群落组成和结构。

## 参 考 文 献

- [1] Scharenbroch B C, Bockheim J G. Impacts of forest gaps on soil properties and processes in old growth northern hardwood-hemlock forests[J]. *Plant and Soil*, 2007, 294(1-2): 219-233.
- [2] Schliemann S A, Bockheim J G. Influence of gap size on carbon and nitrogen biogeochemical cycling in northern hardwood forests of the Upper Peninsula, Michigan[J]. *Plant and Soil*, 2014, 377(1-2): 323-335.
- [3] 费菲, 肖文娅, 刁娇娇, 等. 林窗尺度对侧柏人工林土壤微生物生物量碳氮的短期影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1087-1096. Fei F, Xiao W Y, Diao J J, et al. Short-term effects of forest gap size on soil microbial biomass carbon and nitrogen in the *Platycladus orientalis* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1087-1096.
- [4] Li D, Li X, Su Y, et al. Forest gaps influence fungal community assembly in a weeping cypress forest[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(7): 3215-3224.
- [5] Muscolo A, Sidari M, Mercurio R. Influence of gap size on organic matter decomposition, microbial biomass and nutrient cycle in Calabrian pine (*Pinus laricio*, Poiret) stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2): 412-418.
- [6] Yang Y, Geng Y, Zhou H, et al. Effects of gaps in the forest canopy on soil microbial communities and enzyme activity in a Chinese pine forest[J]. *Pedobiologia*, 2017, 61: 51-60.
- [7] Yanmao L I, Jiangchun H U, Wang S, et al. Function and

- application of soil microorganisms in forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1943–1946.
- [8] Morgan J A W, Bending G D, White P J. Biological costs and benefits to plant-microbe interactions in the rhizosphere[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56: 1729–1739.
- [9] Garbeva P, Van Veen J A, Van Elsas J D. Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2004, 42(1): 243–270.
- [10] 王朋, 管云云, 肖文娅, 等. 林窗对根际和非根际土壤化学性质季节变化的影响[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(5): 88–97.  
Wang P, Guan Y Y, Xiao W Y, et al. Effects of canopy gaps on the physical and chemical properties of rhizosphere and bulk soil with seasonal changes[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2017, 37(5): 88–97.
- [11] Saner P, Lim R, Burla B, et al. Reduced soil respiration in gaps in logged lowland dipterocarp forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(9): 2007–2012.
- [12] 欧江, 张捷, 崔宁洁, 等. 采伐林窗对马尾松人工林土壤微生物生物量的初期影响[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2036–2047.  
Ou J, Zhang J, Cui N J, et al. The early effects of forest gap harvesting on soil microbial biomass in *Pinus massoniana* plantations[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2036–2047.
- [13] 周义贵, 郝凯婕, 李贤伟, 等. 林窗对米亚罗林区云杉低效林土壤有机碳和微生物生物量碳季节动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2469–2476.  
Zhou Y G, Hao K J, Li X W, et al. Effects of forest gap on seasonal dynamics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in *Picea asperata* forest in Miyaluo of western Sichuan, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(9): 2469–2476.
- [14] He Z, Wang L, Jiang L, et al. Effect of microenvironment on species distribution patterns in the regeneration layer of forest gaps and non-gaps in a subtropical natural forest, China[J/OL]. *Forests*, 2019, 10:90(2019-02-24)[2019-06-17]. <https://doi.org/10.3390/f10020090>.
- [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.  
Liu J F, Su S J, He Z S, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil organic carbon in mid-subtropical *Castanopsis kawakamii* natural forest[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(6): 641–648.
- [16] 刘金福, 何中声, 洪伟, 等. 濒危植物格氏栲保护生态学研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 136–143.  
Liu J F, He Z S, Hong W, et al. Conservation ecology of endangered plant *Castanopsis kawakamii*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(5): 136–143.
- [17] He Z, Liu J, Wu C, et al. Effects of forest gaps on some microclimate variables in *Castanopsis kawakamii* natural forest[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(5): 706–714.
- [18] 马瑞丰, 刘金福, 吴则焰, 等. 格氏栲林土壤微生物结构的多样性特征研究[J]. *西南林业大学学报*, 2014, 34(4): 14–19.  
Ma R F, Liu J F, Wu Z Y, et al. Soil microbial community structure diversity in *Castanopsis kawakamii* forest[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2014, 34(4): 14–19.
- [19] 马瑞丰, 刘金福, 张广帅, 等. 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[J]. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(1): 19–27.  
Ma R F, Liu J F, Zhang G S, et al. Soil ecological stoichiometric and microbial community characteristics of *Castanopsis kawakamii* forest and their relevance analysis[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2015, 24(1): 19–27.
- [20] Hu L, Gong Z, Li J, et al. Estimation of canopy gap size and gap shape using a hemispherical photograph[J]. *Trees*, 2009, 23(5): 1101–1108.
- [21] 卢尧舜, 何中声, 罗丽洁, 等. 基于无人机影像探讨格氏栲天然林林窗数量分布及其影响因素 [J/OL]. *广西植物*, 2020(2020-01-10)[2020-01-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20200110.1338.006.html>.
- [22] 卢 Y S, He Z S, Luo L J, et al. Using UAV images to explore the quantitative characteristics and influencing factors of forest gaps in *Castanopsis kawakamii* natural forest[J/OL]. *Guihaia*, 2020(2020-01-10)[2020-01-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20200110.1338.006.html>.
- [22] 徐凯健, 曾宏达, 张仲德, 等. 亚热带福建省森林生长季与气温、降水相关性的遥感分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(10): 1249–1259.
- [23] Xu K J, Zeng H D, Zhang Z D, et al. Relating forest phenology to temperature and precipitation in the subtropical region of Fujian based on time-series MODIS-NDVI[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(10): 1249–1259.
- [23] 宋贤冲, 王会利, 秦文弟, 等. 退化人工林不同恢复类型对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 841–848.  
Song X C, Wang H L, Qin W D, et al. Effects of stand type of artificial forests on soil microbial functional diversity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 841–848.
- [24] Zheng J, Li J, Lan Y, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on *Kandelia candel* rhizospheric bacterial community as determined by high-throughput sequencing analysis[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2019, 19(1): 332–344.
- [25] 邓娇娇, 朱文旭, 周永斌, 等. 不同土地利用模式对辽东山区土壤微生物群落多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2269–2276.

- Deng J J, Zhu W X, Zhou Y B, et al. Effects of different land use patterns on the soil microbial community diversity in montane region of eastern Liaoning Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2269–2276.
- [26] 刘辉, 吴小芹, 任嘉红, 等. 荧光假单胞菌与红绒盖牛肝菌共接种对杨树根际土壤酶活性及微生物多样性的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(1): 22–30.
- Liu H, Wu X Q, Ren J H, et al. Effect of co-inoculation with *Pseudomonas fluorescens* and *Xerocomus chrysenteron* on the soil enzyme activity and microbial diversity in poplar rhizosphere[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(1): 22–30.
- [27] 李波, 张曼, 赵璐玲, 等. 汶川地震滑坡体自然植被恢复及影响因子: 以龙溪-虹口自然保护区为例[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(3): 468–473.
- Li B, Zhang M, Zhao L L, et al. Vegetation recovery on landslides of the Wenchuan earthquake and its influencing factors: a case study in Longxi-Hongkou Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014, 20(3): 468–473.
- [28] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵区不同植被恢复阶段土壤微生物群落多样性的变化[J]. 林业科学, 2016, 52(8): 146–156.
- Yang N, Zou D S, Yang M Y, et al. Variations of soil microbial community diversity in purple soils at different re-vegetation stages on sloping-land in Hengyang, Hunan Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(8): 146–156.
- [29] 梁晶, 王庆成, 许丽娟, 等. 抚育对长白山两种林分凋落物分解及土壤的影响[J]. 植物研究, 2015, 35(2): 297–303.
- Liang J, Wang Q C, Xu L J, et al. Effect of thinning on litter decomposition and soil of two stands in Changbai Mountain[J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(2): 297–303.
- [30] 陈立新, 姜一, 段文标, 等. 红松混交林凋落物氮储量及分解释放对土壤氮的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 114–121.
- Chen L X, Jiang Y, Duan W B, et al. Effect of litter nitrogen storage and nitrogen release of litter decomposition on soil nitrogen in *Pinus koraiensis* mixed forests[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(1): 114–121.
- [31] 孙鹏跃, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松人工林地土壤养分与土壤酶的季节变化及关系[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(6): 944–952.
- Sun P Y, Xu F L, Wang W L, et al. Seasonal dynamics of soil nutrients and soil enzyme activities in *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2016, 33(6): 944–952.
- [32] 薛敬意, 唐建维, 沙丽清, 等. 西双版纳望天树林土壤养分含量及其季节变化[J]. 植物生态学报, 2003, 27(3): 373–379.
- Xue J Y, Tang J W, Sha L Q, et al. Soil nutrient contents and their characteristics of seasonal changes under *Shorea chinensis* forest of Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003, 27(3): 373–379.
- [33] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna[J]. Nature, 1989, 338: 499–500.
- [34] 许振羽, 李学鹏, 杜宇, 等. 桑树根际土壤微生物对间作和施氮的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1983–1992.
- Xu Z Y, Li X P, Du Y, et al. Responses of soil microbial communities in mulberry rhizosphere to intercropping and nitrogen application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(6): 1983–1992.
- [35] 蒋铮, 于倩楠, 乔明锋, 等. 云杉幼树根系分泌物对2种草本植物种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(6): 160–166.
- Jiang Z, Yu Q N, Qiao M F, et al. Effects of root exudates from *Picea asperata* seedlings on the seed germination and seedling growth of two herb species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(6): 160–166.
- [36] 曹小闯, 吴良欢, 马庆旭, 等. 高等植物对氨基酸态氮的吸收与利用研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 919–929.
- Cao X C, Wu L H, Ma Q X, et al. Advances in studies of absorption and utilization of amino acids by plants: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 919–929.
- [37] 王晶晶, 樊伟, 崔珺, 等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8361–8373.
- Wang J J, Fan W, Cui J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community characteristics in a subtropical evergreen broadleaved forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8361–8373.
- [38] 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.
- Wu Z Y, Lin W X, Chen Z F, et al. Variations of soil microbial community diversity along an elevational gradient in mid-subtropical forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(5): 397–406.
- [39] 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7211–7220.
- Liu B R, Zhang X Z, Hu T H, et al. Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7211–7220.
- [40] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 743–752.
- Zhang H, Lü J L, Cao Y F, et al. Decomposition characteristics of different plant straws and soil microbial functional diversity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 743–752.
- [41] 裴振, 孔强, 郭笃发. 盐生植被演替对土壤微生物碳源代谢活性的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(1): 373–380.
- Pei Z, Kong Q, Guo D F. Effect of succession of halophytic vegetation on soil microbial carbon metabolic activity[J]. China

Environmental Science, 2017, 37(1): 373–380.

- [42] 孙雪, 韩冬雪, 刘岩, 等. 原始红松林土壤理化及微生物碳代谢特征对生长季动态的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 18–26.

Sun X, Han D X, Liu Y, et al. Responses of soil physicochemical properties and soil microorganism characteristics regarding as carbon metabolism in original Korean pine forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(5): 18–26.

- [43] 张明锦, 陈良华, 张健, 等. 马尾松人工林林窗内土壤动物对凋

落物微生物生物量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(1): 35–42.

Zhang M J, Chen L H, Zhang J, et al. Effects of soil fauna on microbial biomass in decomposing litter under artificial masson pine (*Pinus massoniana*) forest gap[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(1): 35–42.

(责任编辑 赵 勃  
责任编辑 臧润国)