

# 福建天宝岩不同长苞铁杉林土壤微生物 生物量碳含量的比较及其与土壤含水量的关系

黄雄俊<sup>1</sup>, 刘君成<sup>1</sup>, 温鑫鸿<sup>1</sup>, 游巍斌<sup>1</sup>, 巫丽芸<sup>1</sup>, 刘进山<sup>2</sup>, 蔡昌棠<sup>2</sup>, 何东进<sup>1,3,①</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建天宝岩国家级自然保护区, 福建 永安 366032;

3. 福建农业职业技术学院, 福建 福州 350119)

**摘要:**以福建天宝岩国家级自然保护区内长苞铁杉[*Nothotsuga longibracteata* (W. C. Cheng) Hu ex C. N. Page]纯林、长苞铁杉-青冈(*Quercus glauca* Thunb.)混交林、长苞铁杉-猴头杜鹃(*Rhododendron simiarum* Hance)混交林和长苞铁杉-毛竹[*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau]混交林为研究对象,分析了不同林型林窗内的土壤微生物生物量碳(MBC)含量差异及其与土壤含水量的相关性。结果显示:4种长苞铁杉林林窗和非林窗内的土壤MBC含量的季节差异总体达到了显著水平,季节动态变化特征总体表现为春季和冬季高于夏季和秋季;林窗的形成可明显提高土壤MBC含量,林窗与非林窗间的土壤MBC含量差异总体达到了显著水平,大部分林窗内的土壤MBC含量高于非林窗,而林窗间的土壤MBC含量总体差异不显著。各林窗内土壤MBC含量在不同林型间存在显著差异;与长苞铁杉纯林相比,长苞铁杉-青冈混交林春季和秋季的大、中林窗内土壤MBC含量较高,长苞铁杉-猴头杜鹃混交林春季和夏季的大、小林窗内土壤MBC含量较高。总体上看,长苞铁杉-青冈混交林和长苞铁杉-猴头杜鹃混交林林窗内的土壤含水量明显高于长苞铁杉纯林和长苞铁杉-毛竹混交林。相关性分析结果显示:长苞铁杉-猴头杜鹃混交林和长苞铁杉-毛竹混交林林窗内的土壤MBC含量与土壤含水量分别呈极显著和显著负相关,相关系数分别为-0.788和-0.638。综上所述,相较于长苞铁杉纯林和长苞铁杉-毛竹混交林,长苞铁杉-青冈混交林和长苞铁杉-猴头杜鹃混交林林窗内的土壤MBC含量和土壤含水量较高,这2种混交林以及林窗的形成均能较好地改善林内小气候,增强土壤肥力,促进保护区内长苞铁杉林的土壤碳循环过程。

**关键词:**长苞铁杉林; 林窗; 土壤微生物生物量碳; 天宝岩国家级自然保护区; 土壤含水量

中图分类号: Q948.113; Q948.15; S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2022)05-0001-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2022.05.01

**Comparison on contents of soil microbial biomass carbon of different *Nothotsuga longibracteata* forests in Tianbaoyan of Fujian and its relationship with soil water content** HUANG Xiongjun<sup>1</sup>, LIU Juncheng<sup>1</sup>, WEN Xinhong<sup>1</sup>, YOU Weibin<sup>1</sup>, WU Liyun<sup>1</sup>, LIU Jinshan<sup>2</sup>, CAI Changtang<sup>2</sup>, HE Dongjin<sup>1,3,①</sup> (1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian, Yong'an 366032, China; 3. Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350119, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2022, 31(5): 1-8

**Abstract:** Taking *Nothotsuga longibracteata* (W. C. Cheng) Hu ex C. N. Page pure forest, *N. longibracteata-Quercus glauca* Thunb. mixed forest, *N. longibracteata-Rhododendron simiarum* Hance mixed forest, and *N. longibracteata-Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau mixed forest as research objects, the differences in soil microbial biomass carbon (MBC) content of gaps of different forest types and its correlation with soil water content were analyzed. The results show that the seasonal differences in

收稿日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31370624); 福建农林大学科技创新项目(KFA20036A; K5315008A)

作者简介: 黄雄俊(1999—),男,福建三明人,硕士研究生,主要从事森林可持续发展方面的研究。

①通信作者 E-mail: fjhj1009@126.com

引用格式: 黄雄俊, 刘君成, 温鑫鸿, 等. 福建天宝岩不同长苞铁杉林土壤微生物生物量碳含量的比较及其与土壤含水量的关系[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(5): 1-8.

soil MBC content of gaps and non-gaps of four *N. longibracteata* forests reach significant level in general, and the seasonal dynamic variations are generally higher in spring and winter than in summer and autumn; the formation of gaps can elevate the soil MBC content evidently, the differences in soil MBC content between gaps and non-gaps reach significant level in general, soil MBC contents in most gaps are higher than those in non-gaps, while the differences in soil MBC content among gaps are not significant in general. There are significant differences in soil MBC content of each gap among different forest types; compared with *N. longibracteata* pure forest, soil MBC contents in large and medium gaps in spring and autumn of *N. longibracteata*-*C. glauca* mixed forest are relatively high, and soil MBC contents in large and small gaps in spring and summer of *N. longibracteata*-*R. simiarum* mixed forest are relatively high. Overall, soil water contents in gaps of *N. longibracteata*-*C. glauca* mixed forest and *N. longibracteata*-*R. simiarum* mixed forest are obviously higher than those of *N. longibracteata* pure forest and *N. longibracteata*-*P. edulis* mixed forest. The correlation analysis result shows that soil MBC contents show extremely significant and significant negative correlations with soil water contents in gaps of *N. longibracteata*-*R. simiarum* mixed forest and *N. longibracteata*-*P. edulis* mixed forest, respectively, their correlation coefficient are  $-0.788$  and  $-0.638$ , respectively. In conclusion, compared with *N. longibracteata* pure forest and *N. longibracteata*-*P. edulis* mixed forest, soil MBC contents and soil water contents in gaps of *N. longibracteata*-*C. glauca* mixed forest and *N. longibracteata*-*R. simiarum* mixed forest are relatively high, the formation of these two mixed forests and gaps can evidently improve forest microclimate, enhance soil fertility, and promote the soil carbon cycling process in *N. longibracteata* forests of the nature reserve.

**Key words:** *Nothotsuga longibracteata* (W. C. Cheng) Hu ex C. N. Page forest; gap; soil microbial biomass carbon; Tianbaoyan National Nature Reserve; soil water content

森林土壤碳库对维持土壤生态系统的碳循环具有重要作用<sup>[1]</sup>,其中土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)作为土壤生态系统中最为活跃的有机质组分之一,其对林下微环境的变化十分敏感,既是森林植被在土壤中有效养分的重要储备库和来源<sup>[2,3]</sup>,也是土壤有机质分解和养分转化过程的调控者<sup>[4]</sup>。因此,研究土壤微生物生物量碳的动态特征,不仅能了解土壤碳含量的季节变化,分析土壤健康状况,还能准确反映不同经营措施对土壤自然肥力和林分潜在生产力的提升程度<sup>[5,6]</sup>。

在森林植物群落中,优势树种由于一些自然或偶然原因死亡后,在树冠层中形成了空窗,即林窗<sup>[7]</sup>,这是森林中普遍发生的自然现象,也是一种小规模的干扰形式。林窗会通过改变林内的光照、空气及土壤的温度、水分含量等环境条件,增大森林在空间分布上的不均匀性和复杂性,进而影响幼苗期植被的生长和更新速度以及土壤的养分物质循环<sup>[8-11]</sup>。李苏闽等<sup>[12]</sup>发现,在以长苞铁杉[*Nothotsuga longibracteata* (W. C. Cheng) Hu ex C. N. Page]为建群种的针叶林中,与非林窗区相比,林窗区的微环境因子变化幅度较小,且较之土壤温度和湿度变幅剧烈的大林窗,小林窗内微环境因子更为稳定,改善林窗内小气候的强度更高。费菲等<sup>[13]</sup>指出,在侧柏[*Platycladus*

*orientalis* (Linn.) Franco]人工林中,相较于大林窗(450 m<sup>2</sup>)和小林窗(50 m<sup>2</sup>),中林窗(200 m<sup>2</sup>)对提高土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮含量的作用更为明显,且能显著提升夏季林窗内土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮含量,从而改善森林植被在生长季的生长状况。土壤中碳和氮的数量与土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮的浓度密切相关,在不同林型中,因群落结构、生境条件、凋落物组分及分解难易程度等存在差异,土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮含量及其动态特征也存在差异<sup>[14,15]</sup>;不同林型形成的林窗在形状、面积、形成木及形成原因等变量间具有一定差异性,会引起林窗内光照、气温、土壤含水量及pH值等微环境条件的改变,进而影响土壤微生物群落的种类、数量及活性等,最终影响土壤微生物生物量碳的浓度及其动态变化<sup>[16,17]</sup>,其中,土壤含水量是导致土壤微生物生物量碳含量差异的主要因子<sup>[18]</sup>。

长苞铁杉林是天宝岩国家级自然保护区森林的主体<sup>[19]</sup>,拥有维持区域生态系统平衡、涵养水源和保持水土等重要生态作用<sup>[20]</sup>。长苞铁杉作为生长缓慢的喜阳树种,其幼苗在生长过程中难以与针阔叶树种竞争,且由于保护区内的长苞铁杉多为成熟或过熟林,立地条件相对贫瘠,长苞铁杉林正处于衰退状态,

森林生态系统的服务功能难以正常发挥<sup>[21,22]</sup>,如何以科学合理的途径来恢复其天然更新、增强其生态效应与生物多样性的保护功能成为亟待解决的问题。基于以上研究,综合考虑林型和林窗大小,本文对福建天宝岩国家级自然保护区4种典型长苞铁杉林的土壤微生物生物量碳含量及其与土壤含水量的相关性进行了分析,从土壤微生物生物量的角度探讨长苞铁杉不同林型和林窗大小对土壤养分循环过程的影响,以期为天宝岩国家级自然保护区长苞铁杉林的保护与合理经营提供科学依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

天宝岩国家级自然保护区位于福建省永安市东部,地跨青水、上坪和西洋3个乡(镇),具体地理坐标为东经117°28'03"~117°35'28"、北纬25°50'51"~26°01'20",最高海拔1604.8 m,最低海拔580 m,属中亚热带海洋性季风气候,年平均气温为15℃,7月平均气温为23℃,1月平均气温为5℃,无霜期约290 d,年平均降水量为2039 mm,主要集中在夏、秋两季。保护区的占地面积达11015.38 hm<sup>2</sup>,其中林地总面积为10663.33 hm<sup>2</sup>,大面积分布的天然林构建了闽江地区重要的水源涵养林和生态屏障。保护区内植物种类丰富、结构复杂,主要的乔木树种有长苞铁杉、青冈(*Quercus glauca* Thunb.)、马尾松(*Pinus*

*massoniana* Lamb.)和毛竹[*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau]等;主要的灌木树种有猴头杜鹃(*Rhododendron simiarum* Hance)和柃木(*Eurya japonica* Thunb.)等。森林类型分别以长苞铁杉和猴头杜鹃(冠幅大、树高较高,视为小乔木<sup>[23]</sup>)为建群种的针叶林及山地苔藓矮曲林为主,二者构成的大面积原始森林群落皆是天宝岩国家级自然保护区内最具代表性的保护对象,尤其是珍稀濒危植物长苞铁杉林在保护区内的分布面积达186.7 hm<sup>2</sup>,是全国范围内面积最大的长苞铁杉纯林,极具保护和研究价值。

### 1.2 研究方法

在前期调查的基础上<sup>[22]</sup>,于天宝岩国家级自然保护区海拔1200~1600 m范围内分散选取4种典型的长苞铁杉林(长苞铁杉纯林、长苞铁杉-青冈混交林、长苞铁杉-猴头杜鹃混交林和长苞铁杉-毛竹混交林),采取特定样方调查法,在同一长苞铁杉林分中各取海拔高度相对一致、其他立地条件相似的大、中、小3种林窗(将长苞铁杉纯林中的3种林窗视为对照组),各林窗的基本特征见表1。

由于保护区内不同长苞铁杉林的树种组成复杂,优势树种高度与冠幅相差较大,且所处环境多为坡度较大的山地,导致在林冠层形成的林窗大小不一,因此,依据前期实地调查数据,将林窗按照面积(*S*)分为大( $S > 200 \text{ m}^2$ )、中( $100 \text{ m}^2 < S \leq 200 \text{ m}^2$ )、小( $S \leq 100 \text{ m}^2$ )3种类型。将每个林窗的形状近似为椭圆形,以林窗边缘相隔最远的2株乔木的间距为椭圆的

表1 福建天宝岩国家级自然保护区内不同长苞铁杉林12个林窗的基本特征

Table 1 Basic characteristics of 12 gaps of different *Nothotsuga longibracteata* (W. C. Cheng) Hu ex C. N. Page forests in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

林型 Forest type	林窗 Gap	面积/m <sup>2</sup> Area	坡度/(°) Slope	平均株高/m <sup>1)</sup> Mean height <sup>1)</sup>	平均胸径/cm <sup>1)</sup> Mean diameter at breast height <sup>1)</sup>
长苞铁杉纯林 <i>N. longibracteata</i> pure forest	大 Large	222.8	18	25.8	34.7
	中 Medium	102.4	18	26.2	33.6
	小 Small	64.3	18	24.3	42.1
长苞铁杉-青冈混交林 <i>N. longibracteata-Quercus glauca</i> mixed forest	大 Large	210.1	21	21.8	45.2
	中 Medium	127.2	21	18.7	32.5
	小 Small	93.9	21	20.6	22.7
长苞铁杉-猴头杜鹃混交林 <i>N. longibracteata-Rhododendron simiarum</i> mixed forest	大 Large	218.9	20	23.0	28.8
	中 Medium	151.3	20	18.8	32.5
	小 Small	72.5	20	20.0	25.3
长苞铁杉-毛竹混交林 <i>N. longibracteata-Phyllostachys edulis</i> mixed forest	大 Large	212.4	19	24.7	43.2
	中 Medium	157.2	19	20.5	24.2
	小 Small	61.8	19	27.4	29.0

<sup>1)</sup> 林窗边缘乔木的平均值 The means of trees at the edge of the gap.

长轴,与其垂直的2株乔木的间距为短轴,采用椭圆形法<sup>[24]</sup>计算扩展林窗和实际林窗的面积大小;对林窗形成木和林窗边缘乔木进行每木调查,记录各种类的数量,并采用HG18CGQ-1直读式测高器(北京中西华大科技有限公司,精度0.1 m)和卷尺(精度0.1 cm)分别测量林窗边缘乔木的株高和胸径。

参照段文标等<sup>[15]</sup>的研究方法,在12个林窗的中心区域使用罗盘仪确定正东、正西、正南、正北4个方向后用测绳连接至林窗边缘处(测绳区域为扩展林窗区),并从林窗边缘延长至非林窗区域。在中心区域设置1个面积2 m×2 m小样方,在扩展林窗区和延长线上的非林窗区内分别每隔1 m设置4个面积2 m×2 m和4个面积10 m×10 m的小样方,在每个林窗样地的9个样方中各随机设置1个取样点并标记1、2、3、4、5、6、7、8、9号,其中,1至5号取样点为林窗区,6至9号取样点为非林窗区。采样时小心移去取样点表层未分解的自然凋落物,用土钻取0~10 cm土层的土壤样品,其中1至5号取样点的样品混合为1个样品,6至9号取样点的样品混合为1个样品,分别装入自封袋并标记后带回实验室。共采样4次,分别为2019年5月、7月、9月、11月的中旬(即在春季、夏季、秋季和冬季分别采样)。

根据文献<sup>[15]</sup>中的方法测定土壤微生物生物量碳含量;采用烘干法<sup>[25]</sup>测定土壤含水量。

### 1.3 数据处理

使用EXCEL 2021软件对实验数据进行整理和绘图;使用SPSS 21.0软件对实验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用最小显著差异法(LSD)分析土壤微生物生物量碳在不同林型、林窗与非林窗及季节间的差异;采用Pearson相关性分析法分析土壤含水量与土壤微生物生物量碳间的相关性。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同长苞铁杉林土壤微生物生物量碳含量的比较

2.1.1 土壤微生物生物量碳含量的季节动态变化结果(表2)显示:福建天宝岩国家级自然保护区4种长苞铁杉林林窗和非林窗内的土壤微生物生物量碳含量的季节差异总体达到了显著( $P<0.05$ )水平,土壤微生物生物量碳含量的季节动态变化特征总体表现为春季和冬季高于夏季和秋季;相同季节同一林型

大、中、小林窗与非林窗间的土壤微生物生物量碳含量差异总体达到了显著水平,与非林窗相比,大部分林窗内的土壤微生物生物量碳含量较高。

在长苞铁杉纯林中,各林窗内的土壤微生物生物量碳含量总体从高到低依次为冬季、春季、夏季、秋季,各林窗内的土壤微生物生物量碳含量在春季的差异最小。中、小林窗的非林窗内土壤微生物生物量碳含量的最小值均出现在秋季,分别为90.6和118.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。方差分析结果表明:长苞铁杉纯林林窗大小对土壤微生物生物量碳含量的影响不显著( $P=0.35$ )。

在长苞铁杉-青冈混交林中,大、中、小林窗内的土壤微生物生物量碳含量的最大值均出现在春季,分别为397.2、396.4和273.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;最小值均出现在夏季,分别为134.3、167.5和102.2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各林窗内的土壤微生物生物量碳含量在秋季的差异最小。中、小林窗的非林窗内土壤微生物生物量碳含量的最小值均出现在秋季,分别为128.7和91.1  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;大、小林窗的非林窗内土壤微生物生物量碳含量的最大值均出现在春季,分别为243.3和191.7  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。方差分析结果表明:长苞铁杉-青冈混交林林窗大小对土壤微生物生物量碳含量的影响不显著( $P=0.46$ )。

在长苞铁杉-猴头杜鹃混交林中,大、中、小林窗内的土壤微生物生物量碳含量的最大值均出现在春季,分别为341.5、272.0和461.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;大、小林窗内的土壤微生物生物量碳含量的最小值均出现在秋季,分别为121.5和159.7  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各林窗内的土壤微生物生物量碳含量在秋季的差异最小。大、中林窗的非林窗内土壤微生物生物量碳含量的最大值均出现在冬季,分别为218.0和203.3  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。方差分析结果表明:长苞铁杉-猴头杜鹃混交林林窗大小对土壤微生物生物量碳含量的影响不显著( $P=0.26$ )。

在长苞铁杉-毛竹混交林中,小林窗的非林窗内土壤微生物生物量碳含量从高到低依次为冬季、春季、夏季、秋季,其他大、中、小林窗及其非林窗内的土壤微生物生物量碳含量从高到低依次为春季、夏季、冬季、秋季。各林窗内的土壤微生物生物量碳含量在冬季的差异最小。方差分析表明:长苞铁杉-毛竹混交林林窗大小对土壤微生物生物量碳含量的影响不显著( $P=0.59$ )。

2.1.2 土壤微生物生物量碳含量在不同林型间的比较 结果(表2)显示:在福建天宝岩国家级自然保护区,各林窗内土壤微生物生物量碳含量在不同林型间存在显著( $P<0.05$ )差异。与长苞铁杉纯林相比,长苞铁杉-青冈混交林春季和秋季的大、中林窗内的土壤微生物生物量碳含量较高,长苞铁杉-猴头杜鹃混交林春季和夏季的大、小林窗内的土壤微生物生物量碳含量较高;长苞铁杉-青冈混交林秋季中林窗

( $229.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )内的土壤微生物生物量碳含量显著增加,长苞铁杉-猴头杜鹃混交林的春季小林窗( $461.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、夏季大林窗( $319.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和秋季中林窗( $171.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )内的土壤微生物生物量碳含量显著增加,长苞铁杉-毛竹混交林冬季小林窗( $174.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )内的土壤微生物生物量碳含量显著降低,其他林型各林窗内土壤微生物生物量碳含量与长苞铁杉纯林无显著差异。

表2 福建天宝岩国家级自然保护区不同长苞铁杉林土壤微生物生物量碳含量的比较( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison on contents of soil microbial biomass carbon of different *Nothotsuga longibracteata* (W. C. Cheng) Hu ex C. N. Page forests in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

季节 Season	林窗 Gap	MBC <sub>NL</sub> /(mg · kg <sup>-1</sup> )		MBC <sub>NO</sub> /(mg · kg <sup>-1</sup> )		MBC <sub>NR</sub> /(mg · kg <sup>-1</sup> )		MBC <sub>NP</sub> /(mg · kg <sup>-1</sup> )	
		林窗 Gap	非林窗 Non-gap	林窗 Gap	非林窗 Non-gap	林窗 Gap	非林窗 Non-gap	林窗 Gap	非林窗 Non-gap
春季 Spring	大 Large	305.6±6.7aB	183.2±5.8bA	397.2±7.6aA	243.3±6.2bA	341.5±6.7aA	179.0±5.1bAB	171.1±3.8bA	274.9±5.9aA
	中 Medium	299.3±5.5aB	118.0±5.4bAB	396.4±7.4aA	160.1±9.2bBC	272.0±5.2aA	183.2±5.4bB	230.6±4.6bA	312.8±5.7aA
	小 Small	355.8±4.7aB	270.7±3.2bA	273.8±4.5aA	191.7±4.3bA	461.8±8.7aA *	163.2±3.3bA	338.1±6.5aA	163.2±4.3bB
夏季 Summer	大 Large	139.2±3.3bC	172.7±5.2aA	134.3±4.3aD	117.4±6.8aD	319.4±6.8aB *	138.5±7.7bC	149.2±3.4bB	218.0±6.1aB
	中 Medium	239.1±4.5aC	146.4±3.8bA	167.5±3.7aD	170.1±3.8aB	160.5±3.2aB	154.3±4.6aC	170.8±3.6bB	220.1±6.5aB
	小 Small	260.6±4.9aC	140.4±5.4bC	102.2±2.3bC	188.5±2.6aA	317.7±5.9aC	146.4±6.2bB	253.3±5.2aB	142.4±5.9bB
秋季 Autumn	大 Large	140.7±3.4bC	184.6±4.4aA	238.6±4.4aC	214.8±3.5bB	121.5±3.1bD	148.0±2.7aC	129.0±3.3aD	61.3±6.8bD
	中 Medium	92.9±3.1aD	90.6±5.7abB	229.8±4.5aB *	128.7±2.1bC	171.9±3.4aB *	103.2±2.4bD	79.2±3.7bD	161.4±7.4aD
	小 Small	236.5±5.8aD	118.5±3.9bD	219.5±4.2aBC	91.1±5.2bC	159.7±3.3aD	130.9±4.5bBC	141.1±3.3aD	106.6±8.4bC
冬季 Winter	大 Large	363.5±7.4aA	98.0±6.5bB	367.5±7.7aB	190.1±6.3bC	281.2±5.7aC	218.0±5.5bA	132.6±5.5bC	153.8±6.2aC
	中 Medium	413.0±7.6aA	142.4±6.8bA	180.9±4.3bC	280.9±4.4aA	158.4±3.8bB	203.3±4.7aA	161.7±4.6bC	180.9±4.5aC
	小 Small	533.1±8.7aA	189.6±7.9bB	239.9±4.6aB	168.8±3.9bB	444.1±8.5aB	88.7±7.8bD	174.7±4.4aC *	185.6±5.3aA

<sup>1)</sup> MBC<sub>NL</sub>, MBC<sub>NO</sub>, MBC<sub>NR</sub>, MBC<sub>NP</sub>: 分别为长苞铁杉纯林、长苞铁杉-青冈混交林、长苞铁杉-猴头杜鹃混交林和长苞铁杉-毛竹混交林的土壤微生物生物量碳含量 Contents of soil microbial biomass carbon of *N. longibracteata* pure forest, *N. longibracteata-Quercus glauca* mixed forest, *N. longibracteata-Rhododendron simiarum* mixed forest and *N. longibracteata-Phyllostachys edulis* mixed forest, respectively. 同行中不同小写字母表示同一林型林窗与非林窗间差异显著( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference between gap and non-gap of the same forest type; 同列中不同大写字母表示同一林窗(非林窗)在不同季节间差异显著( $P<0.05$ ) Different uppercases in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference among different seasons of the same gap (non-gap); \*: 表示相同季节同一林窗在混交林与纯林间差异显著( $P<0.05$ ) Indicating the significant ( $P<0.05$ ) difference of the same gap of the same season between mixed forest and pure forest.

## 2.2 不同长苞铁杉林林窗内土壤含水量的比较

结果(表3)显示:总体上看,福建天宝岩国家级自然保护区相同季节同一林窗内的土壤含水量在不同林型间差异显著( $P<0.05$ ),长苞铁杉-青冈混交林和长苞铁杉-猴头杜鹃混交林林窗内的土壤含水量明显高于长苞铁杉纯林和长苞铁杉-毛竹混交林。

相同季节同一林型的土壤含水量在不同林窗间总体差异显著,春季和秋季中林窗内的土壤含水量明显高于大、小林窗,夏季大林窗内的土壤含水量明显高于中、小林窗,冬季长苞铁杉纯林和长苞铁杉-猴头杜鹃混交林大林窗以及长苞铁杉-青冈混交林和长苞铁杉-毛竹混交林中林窗内的土壤含水量较高。

## 2.3 不同长苞铁杉林土壤微生物生物量碳含量与土壤含水量的相关性

对福建天宝岩国家级自然保护区不同长苞铁杉林土壤微生物生物量碳与土壤含水量进行相关性分析,结果显示:长苞铁杉纯林和长苞铁杉-青冈混交林林窗内的土壤微生物生物量碳含量与土壤含水量间均无显著相关性,相关系数分别为0.329和0.521;长苞铁杉-猴头杜鹃混交林和长苞铁杉-毛竹混交林林窗内的土壤微生物生物量碳含量与土壤含水量分别呈极显著( $P<0.01$ )和显著( $P<0.05$ )负相关,相关系数分别为-0.788和-0.638。表明在长苞铁杉-猴头杜鹃混交林和长苞铁杉-毛竹混交林的林窗内,土

表3 福建天宝岩国家级自然保护区内不同长苞铁杉林林窗的土壤含水量比较( $\bar{X}\pm SE$ )Table 3 Comparison of soil water content in gaps of different *Nothotsuga longibracteata* (W. C. Cheng) Hu ex C. N. Page forests in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian ( $\bar{X}\pm SE$ )

季节 Season	林窗 Gap	土壤含水量/% <sup>1)</sup> Soil water content <sup>1)</sup>			
		长苞铁杉纯林 <i>N. longibracteata</i> pure forest	长苞铁杉-青冈混交林 <i>N. longibracteata</i> - <i>Quercus glauca</i> mixed forest	长苞铁杉-猴头杜鹃混交林 <i>N. longibracteata</i> - <i>Rhododendron simiarum</i> mixed forest	长苞铁杉-毛竹混交林 <i>N. longibracteata</i> - <i>Phyllostachys edulis</i> mixed forest
春季 Spring	大 Large	58.81±6.71aAB	59.65±6.45cA	59.31±6.31bA	57.97±7.64bcAB
	中 Medium	56.56±3.46abD	69.45±3.62aA	62.80±3.50aB	59.64±6.67aC
	小 Small	54.24±3.43bBC	63.36±3.33bA	59.73±3.03bB	56.04±5.44cAB
夏季 Summer	大 Large	49.81±6.81aA	50.32±6.76aA	49.86±6.55aA	45.98±6.67aA
	中 Medium	40.20±6.26cB	49.24±4.59abA	46.36±4.62cA	42.89±6.26bB
	小 Small	45.83±5.67bAB	47.87±3.83bAB	48.57±4.60bA	36.17±5.13cBC
秋季 Autumn	大 Large	43.46±9.33aAB	43.95±4.31abA	43.69±5.44abA	29.26±9.96bC
	中 Medium	44.95±4.85aA	45.72±3.89aA	45.12±2.98aA	34.01±7.57aB
	小 Small	42.43±1.95aAB	43.05±3.81abA	42.80±1.03bAB	27.60±1.73bB
冬季 Winter	大 Large	45.02±7.43aA	45.24±7.09abA	46.39±5.82aA	25.89±7.00bB
	中 Medium	36.73±4.13cB	45.61±6.31aA	36.75±3.37cB	31.94±6.26aB
	小 Small	41.87±3.89bAB	43.88±4.03bA	43.34±3.09abA	26.51±4.61bB

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示同一季节不同林窗间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) differences among different gaps of the same season; 同行中不同大写字母表示同一林窗在不同林型间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P<0.05$ ) differences of the same gap among different forest types.

壤微生物生物量碳含量与土壤含水量密切相关,土壤含水量的变化能够影响土壤微生物生物量碳含量。

### 3 讨论和结论

土壤微生物生物量碳的季节动态变化较为复杂且存在不确定性,受林内植被类型、干扰类型和程度、空气和土壤的温度、水分含量以及 pH 值等多种环境因子的影响<sup>[26-28]</sup>。因此,在不同林型中,土壤微生物生物量碳的季节动态变化有所不同,且在同一林型中,即使环境因子相同,不同植被类型下土壤微生物生物量碳的季节动态变化也可能存在差异<sup>[29]</sup>。周义贵等<sup>[30]</sup>发现,在米亚罗林区云杉 (*Picea asperata* Mast.) 低效林中,表层(0~15 cm)和亚表层(15~30 cm)的土壤微生物生物量碳含量均在植物生长季末期达到峰值,而在植物生长旺季最小,由高至低依次为秋季、冬季、春季、夏季。本研究中,4种长苞铁杉林林窗与非林窗内的土壤微生物生物量碳含量的季节差异总体达到了显著水平,土壤微生物生物量碳含量的季节动态变化特征总体表现为春季和冬季高于夏季和秋季(“夏低冬高”<sup>[5]</sup>)。在福建天宝岩国家级自然保护区内,春季适宜的水热条件为土壤微生物提供良好的生长环境,增强了微生物的生物活性并加快

其物质和能量代谢,使土壤微生物生物量碳含量增加;夏季和早秋土壤微生物生物量碳含量较少可能是由于高温、高湿的环境条件加快了植物的生长发育,导致植物对土壤中碳、氮等养分的需求增大,且立地条件和资源受限也影响了土壤微生物的大量繁殖,进而影响土壤的微生物生物量<sup>[5,30]</sup>,还可能是由于进入雨季后,降水量增大的同时也增强了雨水的淋溶作用,有效养分的流失使土壤微生物生物量减少;冬季植物进入生长季末期或休眠期,生长速度减缓,根系吸收的养分含量降低<sup>[3]</sup>,土壤微生物生物量碳在土壤中得以积存。

林窗的形成改变了林内光照的空间分布格局,对土壤中微生物的周转速率及其代谢活性产生影响,而微生物又通过分解过程在碳素循环中作用于土壤生态系统<sup>[31]</sup>。在费菲等<sup>[13]</sup>的研究中,侧柏人工林中林窗(200 m<sup>2</sup>)内的土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮明显高于大林窗(450 m<sup>2</sup>)和小林窗(50 m<sup>2</sup>);肖建强等<sup>[32]</sup>指出,在辽东山区次生林处于发育后期的林窗中,大(670 m<sup>2</sup>)、中(290 m<sup>2</sup>)、小(90 m<sup>2</sup>)3种林窗间的土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮和微生物生物量磷均无显著差异。本研究结果表明:与非林窗相比,大部分林窗内的土壤微生物生物量碳含量较高,且总体达到显著水平,而大、中、小林窗间的土壤

微生物生物量碳含量总体差异不显著。说明林窗的形成对提升土壤微生物生物量碳含量有一定的显著影响,但林窗大小对土壤微生物生物量碳含量的影响并不显著。相关研究结果表明:由于在林窗对土壤微生物生物量碳的影响过程中受土壤理化性质<sup>[33]</sup>、植物种类<sup>[29]</sup>、底物有效性<sup>[30]</sup>、枯倒木剩余生物量<sup>[34]</sup>等因子的综合影响,在林窗形成初期,空气和土壤中的温度、水分含量发生的有效性变化会显著影响土壤微生物生物量碳含量,但随着林窗年龄的增加以及林内天然更新形成幼林,林窗区与非林窗区的生境条件逐渐趋于一致,林窗内的土壤养分状况也逐渐恢复至郁闭林分水平<sup>[35]</sup>,这可能是导致本研究不同林窗间无显著差异的主要原因。相关性分析结果表明:在长苞铁杉-猴头杜鹃混交林和长苞铁杉-毛竹混交林的林窗内,土壤微生物生物量碳含量与土壤含水量分别呈极显著和显著负相关,表明林窗中较高的土壤含水量会在一定程度上限制土壤微生物生物量碳含量的增加,该结果与前人研究结论<sup>[16,30]</sup>基本一致;而在长苞铁杉纯林和长苞铁杉-青冈混交林的林窗内土壤微生物生物量碳含量和土壤含水量间均无显著相关性,这可能是由于不同林型土壤微生物生物量碳含量增加的主要限制因子不同<sup>[13,35]</sup>。

本研究中,相较于长苞铁杉纯林,长苞铁杉-青冈混交林春季和秋季的大、中林窗内的土壤微生物生物量碳含量较高,长苞铁杉-猴头杜鹃混交林春季和夏季的大、小林窗内的土壤微生物生物量碳含量较高,且这2种长苞铁杉混交林林窗内的土壤含水量也较高,表明在福建天宝岩国家级自然保护区植物生长旺季,以长苞铁杉为优势树种分别形成的长苞铁杉-青冈混交林和长苞铁杉-猴头杜鹃混交林对林窗内土壤微生物生物量碳含量的提高效果较为明显,这可能是由于较之纯林,混交林林内光照梯度变化明显、物种构成复杂以及适宜水热条件形成良好的林内小气候,促进了土壤微生物的能耗和新陈代谢,提高了土壤微生物生物量碳含量<sup>[36-38]</sup>;而长苞铁杉-毛竹混交林各林窗内的土壤微生物生物量碳含量总体较低,这主要是由于与竹针混交林相比,长苞铁杉-青冈混交林和长苞铁杉-猴头杜鹃混交林林下调落物总量及其组分类型丰富,腐殖质层厚且水分含量高<sup>[39,40]</sup>,有利于森林植被的更新生长,为土壤微生物提供了适宜的成长环境,加快凋落物的分解速度,从而增加了土壤微生物生物量碳含量。

本文仅探究了福建天宝岩国家级自然保护区不同长苞铁杉林窗内表层(0~15 cm)土壤的微生物生物量碳含量及其与土壤含水量的关系,对于土壤微生物活性、更深层的土壤微生物生物量碳含量及其他土壤微生物生物量(氮、磷等)等问题缺乏必要的研究,难以全面评价林窗对土壤微生物生物量碳含量的影响。在今后的研究中还应考虑将土壤微生物群落、土壤表层和亚表层(15~30 cm)等对微生物生物量的影响进行综合比较和分析,进一步完善林窗对地上和地下养分循环影响的研究。

综上所述,福建天宝岩国家级自然保护区4种长苞铁杉林窗和非林窗内的土壤微生物生物量碳含量的季节差异总体达到了显著水平,林窗与非林窗间的土壤微生物生物量碳含量差异也总体达到了显著水平,与非林窗区相比,大部分林窗内的土壤微生物生物量碳含量较高,而大、中、小林窗内的土壤微生物生物量碳含量总体差异不显著。相较于长苞铁杉纯林和长苞铁杉-毛竹混交林,长苞铁杉-青冈混交林和长苞铁杉-猴头杜鹃混交林林窗内的土壤微生物生物量碳含量和土壤含水量较高。因此,长苞铁杉-青冈混交林和长苞铁杉-猴头杜鹃混交林以及林窗的形成均能较好地改善林内小气候,为长苞铁杉群落和土壤微生物提供更适宜的生境条件,从而提高长苞铁杉林生态系统的生产力和稳定性,并促进保护区内长苞铁杉林的土壤碳循环过程。

#### 参考文献:

- [1] 黄梓敬,徐侠,张惠光,等.根系输入对森林土壤碳库及碳循环的影响研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(1):25-32.
- [2] WANG Z Q, ZHAO M Y, YAN Z B, et al. Global patterns and predictors of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in terrestrial ecosystems [J]. *Catena*, 2022, 211: 106037.
- [3] 李龙,辛贵民,杜彦梅,等.季节性冻融对2种温带森林土壤微生物量碳和氮的影响[J].土壤通报,2019,50(3):625-631.
- [4] 王珍,陈爱玲,曹光球,等.不同凋落物配比对杉木土壤微生物量碳氮的影响[J].南方农业学报,2017,48(10):1849-1857.
- [5] 王国兵,阮宏华,唐燕飞,等.森林土壤微生物生物量动态变化研究进展[J].安徽农业大学学报,2009,36(1):100-104.
- [6] XUE H L, LAN X, LIANG H G, et al. Characteristics and environmental factors of stoichiometric homeostasis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in China [J]. *Sustainability*, 2019, 11: 2804.

- [7] 李羽翎, 张广奇. 林窗定义及林窗特征测定方法研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34(5): 58-63.
- [8] YU X, YING L, FEI S X, et al. Effect of soil layer and plant-soil interaction on soil microbial diversity and function after canopy gap disturbance[J]. Forests, 2018, 9: 680.
- [9] 韦晴雯, 马月伟, 肖玖金, 等. 林窗改造对马尾松人工林土壤有效氮的影响[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(2): 124-131.
- [10] HAN M G, TANG M, SHI B K, et al. Effect of canopy gap size on soil respiration in a mixed broadleaved-Korean pine forest: evidence from biotic and abiotic factors[J]. European Journal of Soil Biology, 2020, 99: 103194.
- [11] JANKOVSKA I, BRŮMELIS G, NIKODEMUS O, et al. Tree species establishment in urban forest in relation to vegetation composition, tree canopy gap area and soil factors[J]. Forests, 2015, 6: 4451-4461.
- [12] 李苏闽, 游巍斌, 肖石红, 等. 天宝岩长苞铁杉林林窗的微环境特征[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 343-350.
- [13] 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.
- [14] WARDLE D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil[J]. Biological Reviews, 1992, 67: 321-358.
- [15] 段文标, 龚建美, 周美珩, 等. 不同林型天然红松混交林林窗大小和枯叶分解对土壤微生物碳的影响[J]. 林业科学研究, 2017, 30(2): 268-275.
- [16] 程勇, 张珉, 陈明皋, 等. 林窗面积对连香树幼苗生长及生物量分配的影响[J]. 湖南生态科学学报, 2022, 9(1): 44-49.
- [17] 冯雪萍, 刘金福, BUJAN S, 等. 福建三明格氏栲天然林林窗凋落物-土壤的生态化学计量特征[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(4): 18-24.
- [18] 涂志华, 尉永键, 范志平, 等. 太子河源流域不同类型水源涵养林土壤微生物生物量碳、氮的季节动态[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2139-2147.
- [19] YOU H M, HE D J, YOU W B, et al. Effect of environmental gradients on the quantity and quality of fallen logs in *Tsuga longibracteata* forest in Tianbaoyan National Nature Reserve, Fujian Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(6): 1118-1124.
- [20] XIAO S H, YOU H M, YOU W B, et al. Rhizosphere and bulk soil enzyme activities in a *Nothotsuga longibracteata* forest in the Tianbaoyan National Nature Reserve, Fujian Province, China[J]. Journal of Forestry Research, 2017, 28(3): 521-528.
- [21] 何东进, 游惠明, 肖石红, 等. 天宝岩长苞铁杉林倒木接触处土壤酶活性变化及其环境效应[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 118-126.
- [22] 李苏闽, 何东进, 覃德华, 等. 福建天宝岩国家级自然保护区长苞铁杉林林窗的物种构成和边缘效应分析[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(4): 89-96.
- [23] 穆振北, 潘辉, 温鑫鸿, 等. 腐烂等级和径级对天宝岩长苞铁杉林木质残体理化性质的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(2): 246-255.
- [24] 周东, 刘国彬. 林窗对子午岭天然辽东栎群落林下植物多样性的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 91-98.
- [25] 孙满利, 付菲, 沈云霞. 土的含水率测定方法综述[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 219-229.
- [26] 赵双梅, 刘宪斌, 李红梅, 等. 云南哀牢山湿性常绿阔叶林土壤碳分布特征[J]. 中国农学通报, 2022, 38(8): 88-95.
- [27] 王聪, 和武宇恒, 翟淑涵, 等. 周山森林公园土壤及土壤微生物碳、氮、磷生态化学计量关系[J]. 陕西林业科技, 2020, 48(3): 1-6.
- [28] 全飞, 李君, 兰国玉, 等. 西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳与生物功能研究[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6): 133-140, 155.
- [29] 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 东寨港不同植物群落土壤微生物量碳氮及养分特征[J]. 林业资源管理, 2021(6): 97-104.
- [30] 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.
- [31] 管云云, 叶钰倩, 钟远标, 等. 林窗尺度对侧柏人工林土壤微生物量和功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 698-710.
- [32] 肖建强, 张维维, 于立忠, 等. 辽东山区次生林林窗大小对土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3043-3048.
- [33] LIU L, GUNDERSEN P, ZHANG T, et al. Effect of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44: 31-38.
- [34] 张明锦, 陈良华, 张健, 等. 马尾松人工林林窗内凋落叶微生物生物量碳和氮的动态变化[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 672-680.
- [35] 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.
- [36] 丁涛, 宁世江, 唐润琴. 广西元宝山中山针阔叶混交林的群落特征[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(1): 8-13.
- [37] 刘凯, 陈乾, 王希贤, 等. 不同林龄福建栎混交林与纯林土壤养分的动态变化[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(2): 185-194.
- [38] 李伟成, 盛海燕, 金孝锋, 等. 浙江铜铃山国家森林公园次生常绿阔叶林和针阔混交林乔木群落特征研究[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(3): 66-77.
- [39] 郑凌峰. 天然猴头杜鹃生长特性研究[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(3): 425-427.
- [40] 刘广路, 范少辉, 漆良华, 等. 闽西北不同类型毛竹林养分分布及生物循环特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2155-2161.

(责任编辑: 郭严冬)