西北林学院学报 2019,34(6):16-21
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.06.03

丝栗栲林土壤微生物 PLFA 群落结构的时空变化特征

赵梦赛[1],栾亚宁[1],戴　伟[1*],王　兵[2],乔红雍[1]

(1.北京林业大学 林学院,北京 100083;2.中国林业科学院 森林生态环境与保护研究所,北京 100091)

摘　要:以江西大岗山丝栗栲林为研究对象,采用磷脂脂肪酸(PLFA)法并结合主成分分析等方法,研究土壤微生物 PLFA 群落结构和多样性随时间和土壤深度的变化特征。结果表明,丝栗栲林地土壤共有 40 种 PLFA 存在,其中 16∶0、5,9,13Me14∶0 和 10Me16∶0 在各时期各土层中均有分布,并占有绝对含量优势;土壤微生物有明显的表聚现象($P<0.05$),0~20 cm 土层中土壤微生物的丰富度指数、Pielou 均匀度、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数都显著优于下层土壤,但同层土壤随时间变化不明显;主成分分析(PCA)表明,18∶0、18∶1w11t、18∶1w9t、cy17∶0、a14∶0 是影响丝栗栲林地土壤微生物的主要 PLFA;相关性分析表明,土壤 PLFA 含量与降雨量和凋落物量都呈极显著正相关($P<0.01$)。

关键词:丝栗栲;PLFA;土壤微生物群落;时空变化

中图分类号:S714.5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)06-0016-06

Spatial and Temporal Variation Characteristics of Soil Microbial PLFA Community in *Castanopsis fargesii*

ZHAO Meng-sai[1], LUAN Ya-ning[1], DAI Wei[1*], WANG Bing[2], QIAO Hong-yong[1]

(1. *College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*;
2. *Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing* 100091, *China*)

Abstract: Taking the *Castanopsis fargesii* forests occurring in Dagangshan of Jiangxi Province as research objects, the method of measuring phospholipid fatty acid (PLFA) was adopted to explore the temporal characteristics of soil microorganism PLFA community with the soil depth. Principal component analysis method was used. The results showed that there were 40 kinds of PLFA in soil under *C. fargesii* forests, including 16∶0, 5, 9, 13 Me14∶0, and 10Me16∶0, which were distributed in different soil layers with dominant contents. Soil microorganism had obvious surface accumulation ($P<0.05$), and the soil microorganism richness index, Pielou evenness, Simpson diversity index and Shannon-wiener diversity index in the 0—20 cm soil layer were significantly superior to those in deeper soil layers, but the temporal changes between the same soil layer were not significant. Principal component analysis (PCA) indicated that 18∶0, 18∶1w11t, 18∶1w9t, cy17∶0, and a14∶0 were the main PLFA affecting the soil microorganisms. Correlation analysis showed that both precipitation and litters were significantly and positively correlated with soil PLFA content ($P<0.01$).

Key words: *Castanopsis fargesii*; PLFA; soil microbial community; temporal and spatial variation

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,是土壤养分循环和有机碳代谢的主要驱动力[1-3]。磷脂脂肪酸法(phospholipid fatty acids, PLFA)通过提取并测定土壤中活体微生物细胞膜的磷脂脂肪

收稿日期:2019-01-21　**修回日期**:2019-03-10
基金项目:中央高校基本科研业务费(2017ZY03);科技部科技基础性工作专项(2014FY120700)。
作者简介:赵梦赛,女,硕士在读,研究方向:森林健康与修复。E-mail:1261279760@qq.com
*通信作者:戴　伟,男,副教授,研究方向:森林土壤。E-mail:daiwei1@bjfu.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

酸来鉴定微生物的种类、识别微生物的类群并提供微生物生物量等信息,是研究土壤微生物群落结构信息、群落多样性的重要手段。很多学者利用该方法研究植被[4-6]、海拔[7]、降水[8-10]以及施肥[11-13]等因子对土壤微生物的影响。

季节变化不仅对植物生长有重要影响,同时季节性的水热差异还会导致土壤微生物发生变化。研究认为季节对土壤微生物的影响是通过土壤温度、湿度、植物生长状况等因素的综合作用形成的[14-15],微生物的组成与多样性主要取决于土壤的湿度和温度[16],黄艺等[17]研究发现干旱和半干旱地区土壤微生物的生物量及多样性会随土壤含水率的增加而增加,同时植被也会影响土壤微生物的多样性[18-19],不同植被类型下土壤微生物群落组成有显著差异[20-21],A. P. Merila 等[22]通过研究阔叶林与针叶林下土壤微生物群落组成和功能的差异,发现不同树种的凋落物和根系分泌物的有机质组分不同,土壤微生物群落组成也不同。但不同地区气候以及不同林下土壤环境间的差异,致使不同森林土壤微生物的季节变化不尽相同[23-26]。丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)是中国亚热带地区常绿阔叶林中十分重要的树种,分布广泛且有很高的生态和经济效益[27-28]。但迄今,针对其林下土壤开展的研究很少[29-30],特别是有关土壤微生物群落的研究仍未见报道。为了探究丝栗栲林地土壤微生物的种类与群落特征,以江西大岗山丝栗栲林下土壤为研究对象,利用 PLFA 法探讨不同时期土壤微生物群落结构和多样性的时间和层间变化特征,以期为丝栗栲林生态系统的保护、合理利用和管理提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区及样地基本概况

研究区位于江西大岗山国家级森林生态站,地理坐标为 114°30′—114°45′E,27°30′—27°50′N,属亚热带季风湿润气候。全年日照平均 1 657 h,年均温 16.8℃;年均雨量为 1 590.9 mm,主要集中在 4—6月,无霜期为 296 d。土壤属高岭弱发育湿润老成土,母质为花岗岩残积母质。

研究样地中主要乔木种类为丝栗栲,并混有黄樟(*Cinnamomum porrectum*)、绒楠(*Machilus velutina*)和赤楠(*Syzygium buxifolium*)等。林下植被包括:鼠刺(*Itea chinensis*)、荚蒾(*Viburnum dilatatum*)、大青叶(*Wrightia laevis*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)和苔草(*Vittaria flexuosa*)、肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)等。

1.2　样品采集及野外调查

在试验区内随机设置 5 块 20 m×20 m 具有代表性的样地,每块样地的坡度相近、坡向和海拔相同,分别为 30～34°、东向、480 m。每块样地中按“S”型布设 5 个采样点并进行标识,每次采样以各点为中心,分别在 2016 年的 4、8、10 月和 12 月利用土钻采集距中心点 0.5 m 处的不同层次土壤(0～20、20～40、40～60 cm 和 60～100 cm),将 5 点同层土壤进行混合(图 1)得到混合土样。采集的样品装袋带回实验室,置于−80℃超低温下保存,用于磷脂脂肪酸测定。

土壤温度:利用 U22-001 自动测温仪测定 2016 年 4、8、10、12 月不同层次土壤温度(表 1)。

凋落物量:2016 年每月在样地对角线 4 个角和中心位置放置 1 m×1 m 尼龙网凋落物收集器(框口离地面 1 m),收集凋落物,同时从分宜县气象局处获得每月降雨量数据(图 2)。

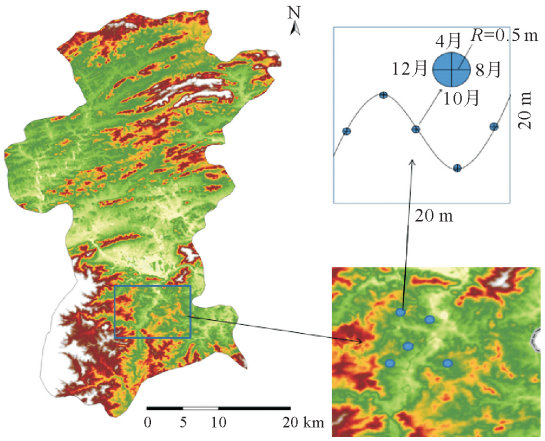
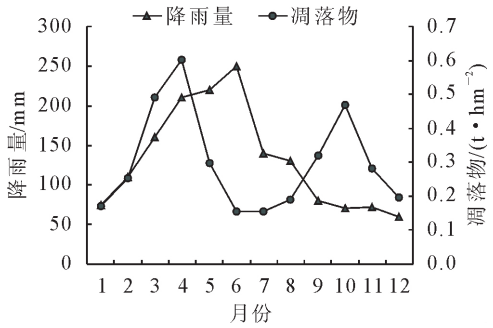


图 1　采样点位置及采样方法示意图

Fig. 1　Sampling point location and sampling method



注:降雨量数据来自分宜县气象局。

图 2　不同时期凋落物量和降雨量

Fig. 2　Litter production and rainfall in different periods

1.3　PLFA 的测定方法

采用修正的 Bligh-Dyer 方法,以甲酯 19:0 做内标,用 Aligent 6890 气相色谱仪测定,用 MIDI Sherlock 微生物鉴定系统(Version6.1,MIDI,Inc.,

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Newark,DE)分析 PLFA 图谱从而对脂肪酸成分进行鉴定。命名采用 Frostegard 方法命名(Frotegard A,et al.,1993)。

表 1 不同时期不同土层平均温度

Table 1 Average temperature of different soil layers in different periods (mean±SE,n=5)

土层/cm	土壤温度/℃			
	4 月	8 月	10 月	12 月
0～20	16.72±0.12a	25.14±0.10a	18.95±0.18c	10.17±0.12b
20～40	16.43±0.18b	24.49±0.13c	19.48±0.31a	10.45±0.14a
40～60	16.47±0.07b	24.89±0.07b	19.14±0.22b	10.45±0.15a
60～100	16.44±0.05b	24.91±0.03b	19.13±0.05b	10.45±0.16a

注:a、b、c 表示同一土层不同月份差异水平(P<0.05)。

1.4 土壤微生物多样性指数计算和数据处理

Shannon-Wiener 多样性指数(H)=$-\sum P_i \cdot \ln P_i$;丰富度指数(S)=群落中的脂肪酸总种类数量;Pielou 均匀度指数(J)=$-\sum P_i \cdot \ln P_i/\ln S=H/\ln S$;Simpson 多样性指数($D$)=$1-\sum P_i^2$。式中,$P_i=n_i/N$,$n_i$ 为 i 类脂肪酸含量,N 为总脂肪酸含量。

用 Excel2007、SPSS 21.0 和 Canoco5.0 对 PLFAs 含量及微生物群落数据进行相关分析、方差分析(ANOVA)和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 林地土壤的 PLFA 时间变化特征

4、8、10 月和 12 月各土层土壤共检测出 40 种 PLFA,其中,16∶0、5,9,13Me14∶0 和 10Me 16∶0 在每个时间和土层单元均有存在,三者含量之和分别占各时期 PLFA 总量的 52.5%、34.9%、34.3%和 36.7%,16∶0 的含量占比最高,是最主要的组成(图 3)。

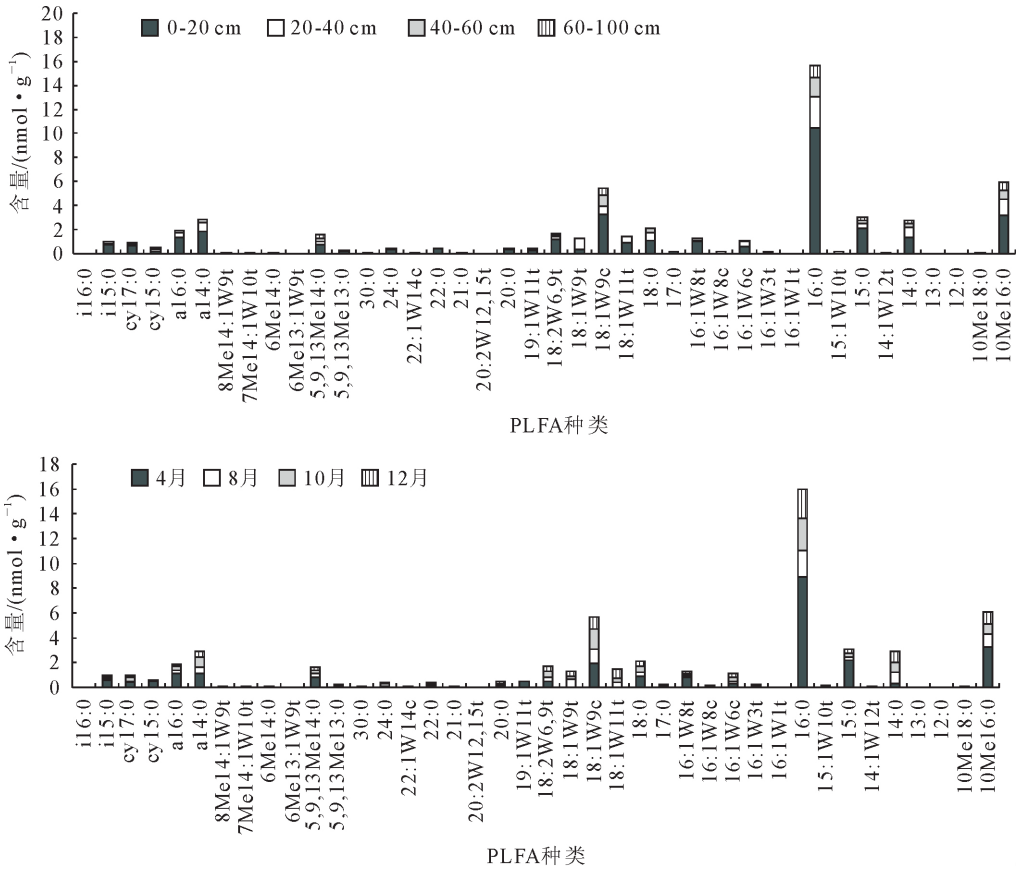


图 3 不同时期不同土层 PLFA 组成

Fig. 3 Composition of PLFA in different periods and soil layers

在 0～100 cm 深度范围内,4、8、10 月和 12 月分别测出 PLFA 27、30、29 种和 26 种。a14∶0、14∶0、5,9,13Me14∶0、i15∶0、cy15∶0、15∶0、a16∶0、16∶1ω6c、16∶1ω8t、16∶0、10Me16∶0、cy17∶0、17∶0、18∶1ω9c、18∶2ω6,9t、18∶0、20∶0、22∶0、24∶0 在各时期均有分布,属于完全分布,含量之和占总 PLFA 的比例分别为 96.9%、81.7%、92.8%和 85.6%(图 3)。

2.2 林地土壤 PLFA 的剖面变化特征

4 个时期 0～20 cm 土壤 PLFA 含量分别占该时期总量的 65.8%、54.5%、54.9%和 55.9%,有明显的表聚现象,表现出随土层加深而降低的变化特征。4 月和 12 月 0～20 cm 土层与下层差异明显,但 20～100 cm 变化较小,而 8 月和 10 月则表现为 0～20、20～40 cm 和 40～100 cm 间差异显著的变化特点(表 2)。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　PLFA 总含量

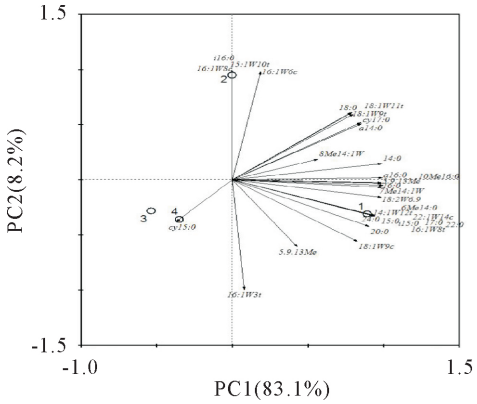
Table 2　Total contents of PLFA　(nmol · g^{-1})

土层/cm	4 月	8 月	10 月	12 月	合计
0～20	16.33Aa	5.31Ab	6.03Ab	5.33Ab	33.00
20～40	3.41Ba	2.73Ba	2.78Ba	2.52Ba	11.43
40～60	3.63Ba	0.60Ca	1.09Ca	0.56Ba	5.88
60～100	1.46Ba	1.11BCa	1.08Ca	1.12Ba	4.77
合计	24.83	9.74	10.98	9.53	55.08

注：A、B、C 表示同一月份不同土层 PLFA 总含量差异水平，a、b、c、d 表示同一土层不同月份 PLFA 总含量差异水平（$P<0.05$）。下同。

2.3　土壤微生物群落的主成分分析

为确定影响丝栗栲林地土壤微生物群落的主要 PLFA，做了不同月份土壤微生物 PLFA 的主成分分析。结果表明，与土壤微生物 PLFA 相关的 2 个主成分的贡献率分别为 83.1%和 8.2%，累计贡献率为 91.3%，可以反映研究区域土壤微生物群落特征。对第 1 主成分起主要作用的为 10Me16：0、14：0、16：0、a16：0、7Me14：1ω10t、6Me14：0、14：1ω12t、18：0、18：1w11t、18：1w9t、cy17：0、a14：0、15：0、22：0、24：0、i15：0、17：0、16：1ω8t、22：1ω14c 和 18：2ω6，9t，对第 2 主成分起主要作用的是 16：1ω6c、i16：0、15：1ω10t 、18：0、18：1w11t、18：1w9t、cy17：0、a14：0、16：1ω8c 和 16：1ω3t。其中 18：0、18：1w11t、18：1w9t、cy17：0、a14：0 与 PC1 和 PC2 都成正相关，由此可见，18：0、18：1w11t、18：1w9t、cy17：0、a14：0 是影响丝栗栲林地土壤微生物的主要 PLFA。4 月分布在 PC1 的正端和 PC2 的负端，8 月分布在 PC1 的中间、PC2 的正端，说明土壤微生物群落结构存在一定的差异，主要 PLFA 种类可能不同。而 10 月和 12 月分布类似，都位于 PC1 和 PC2 的负端，说明 10 月和 12 月的土壤微生物群落结构没有明显差异（图 4）。



注：1、2、3、4 分别表示 4 月、8 月、10 月、12 月。

图 4　不同月份土壤微生物 PLFA 的主成分分析

Fig. 4　Principal component analysis of soil microbial PLFAs in different months

2.4　微生物群落多样性

0～20 cm 土层 Shannon-Wiener 多样性指数时间变化不明显，但 20～100 cm 土层变化较强烈。0～20、20～40 cm 和 40～100 cm 间表现出一定的随深度的增加而降低的剖面特点（表 3）。Pielou 均匀度指数没有明显的时空变化，全年具有很高的一致性。Simpson 多样性指数值具有一定的剖面垂直变化。除 0～20 cm 土层外，下层土壤表现出比较强烈的时间变化，但规律性不明显（表 3）。

表 3　微生物群落多样性指数

Table 3　Diversity indexes of microbial community in soils

多样性指数	土层/cm	4 月	8 月	10 月	12 月
Shannon-Wiener 多样性指数（H）	0～20	2.06 Aa	2.18 Aa	2.21Aa	2.17 Aa
	20～40	1.96 Ab	2.13 Ba	2.18 Aa	1.98 Bb
	40～60	1.84 Ba	1.35 Cb	1.73 Ba	1.41 Cb
	60～100	1.56 Cb	1.86 Ba	1.92 Ba	1.93 Ba
Pielou 均匀度指数（J）	0～20	0.82 Aa	0.86 Aa	0.86 Aa	0.86 Aa
	20～40	0.83 Aa	0.86 Aa	0.85 Aa	0.83 Ba
	40～60	0.83 Aa	0.79 Bc	0.85 Aa	0.91 Aa
	60～100	0.82 Aa	0.89 Aa	0.87 Aa	0.89 Aa
Simpson 多样性指数（D）	0～20	0.82 Aa	0.86 Aa	0.85 Aa	0.85 Aa
	20～40	0.80 Bb	0.85 Aa	0.85 Aa	0.81 Bb
	40～60	0.79 Ba	0.82 Ba	0.77 Cb	0.73 Cb
	60～100	0.73 Cb	0.82 Ba	0.82 Ba	0.82 Ba

2.5　PLFA 含量与环境因子的相关性

鉴于凋落物、降雨量和土壤温度对土壤湿度、有机质分解转化速率可能存在的强烈影响，本研究进一步分析 PLFA 含量和对应月份的凋落物、降雨量和土壤温度之间的相关性。结果显示，土壤 PLFA 总量和 16：0、5，9，13Me14：0、10Me16：0 3 种主要组成 PLFA 的含量与凋落物量和降雨量呈极显著正相关（$P<0.01$），但与土壤温度没有明显相关性（表 4）。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表4 土壤PLFA含量与环境因子的相关性

Table 4 Pearson's correlation coefficients among soil PLFA and environmental factors

比较的因子	PLFA总含量	5,9,13Me14：0	16：00	10Me16：0	土壤温度	凋落物	降雨量
PLFA总含量	1						
5,9,13Me14：0含量	0.871**	1					
16：0含量	0.977**	0.879**	1				
10Me16：0含量	0.962**	0.935**	0.971**	1			
土壤温度	−0.042	−0.038	−0.066	−0.065	1		
凋落物	0.896**	0.701**	0.846**	0.788**	−0.008	1	
降雨量	0.918**	0.787**	0.881**	0.853**	0.078	0.896**	1

注：**表示相关性在0.01水平上显著。

3 结论与讨论

4个生长时期均能检测出26种及以上PLFA，但不同时期林下土壤PLFA的组成不尽相同。其中，16：0、5,9,13Me14：0和10Me16：0在4个时期的各层土壤中都有存在，且含量占比高，分别达到占各时期PLFA总量的52.5%、34.9%、34.3%和36.7%(图3)，与PLFA总量成极显著正相关(表4)，是丝栗栲林下土壤PLFA的绝对优势种，强烈影响土壤PLFA含量的变化。

温度和降雨量对土壤微生物生物量变化的影响存在不同的研究结果，曹成有等[31]、王宁等[32]和吴华清等[10]认为，温度和降雨量是影响土壤微生物生物量的重要因素，但也有研究认为降雨量对土壤微生物并没有明显影响[33-34]。本项研究表明，亚热带丝栗栲林土壤温度和土壤PLFA含量不相关，而降雨量和凋落物量与PLFA含量呈现出极显著正相关(表4)，是影响土壤PLFA的重要因子。研究认为：土壤经历长时间的干旱后，降雨使土壤微生物产生“Birch”效应，诱发土壤微生物量激增[35-36]。在经历了数月低降雨时期后，研究区在4月份降雨量达到210 mm，进入梅雨季，同时，凋落物量经过秋冬季的累积，在4月达到全年的相对较高值，两者共同作用促进了土壤微生物的活动和繁殖，PLFA含量达到全年最高值，分别是8、10月和12月的1.39、2.34倍和3倍。8月是植物生长旺期，植物对土壤养分的强烈需求与土壤微生物的生长和繁殖形成竞争关系[37]，导致微生物可获得的营养物质减少，同时降雨量急剧减少，仅为130 mm，也抑制了微生物的生长与繁殖，PLFA含量出现显著降低。10月出现凋落物全年第2峰值(图2)，新的碳源输入，促进了土壤微生物生物量的增加，但另一方面该时期低降雨量的制约作用，使0～60 cm土壤PLFA含量表现出微弱的增加趋势。此后土壤PLFA含量持续降低，在12月达到全年最低值(表2)。

不同时期丝栗栲林土壤都表现出显著的表聚现象(表3)，主要是由于凋落物和根系分泌物提供了大量有机碳[22]。有研究表明，丝栗栲林0～20 cm层的土壤有机质含量显著高于20～100 cm土层[29]，丰富的养分含量和良好的水分条件十分利于土壤微生物的生长繁殖，使该层土壤集中了55.9%以上的PLFA。

Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson多样性指数是描述物种群落多样性的重要指标，分别反映物种群落数量的分布均匀性、群落中各类群的均一性和优势物种的多度变化。0～20 cm土壤2种多样性指数都高于下层土壤，具有相对更复杂的土壤微生物群落结构和明显的优势种群。由于表层土壤可用碳源和养分资源充分，水分和通气状况良好，十分适合微生物生长[38]，但随着土层深度增加，养分减少，微生物活动明显降低。全年不同月份0～20 cm土层各项指数没有显著的时间变化差异，表现出土壤微生物种群多样性高且稳定的特征(表3)。但其下各层土壤微生物由于碳源数量少，养分状况差[30]，微生物间竞争激烈加之不同时期降雨量差异明显，导致微生物多样性指数随时间变化明显。土壤微生物Pielou均匀度指数没有明显时空变化，全剖面土壤物种分布均一，说明该土壤生态系统中微生物物种较稳定，没有受到外来因素的明显影响。

参考文献：

[1] GRANDY A S,STRICKLAND M S,LAUBER C L,*et al*. The influence of microbial communities,management,and soil texture on soil organic matter chemistry[J]. Geoderma,2009,150(3/4):278-286.

[2] 牛小云,孙晓梅,陈东升,等.辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J].应用生态学报,2015,26(9):2663-2672.
NIU X Y,SUN X M,CHEN D S,*et al*. Soil microorganisms,nutrients and enzyme activity of *Larixkaempferi* plantation under different ages in mountainous region of eastern Liaoning Province,China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(9):2663-2672. (in Chinese)

[3] 翟辉,张海,张超,等.黄土峁状丘陵区不同类型林分土壤微生物功能多样性[J].林业科学,2016,52(12):84-91.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ZHAI H, ZHANG H, ZHANG C, *et al*. Soil microbial functional diversity in different types of stands in the hilly-gully regions of Loess Plateau [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52 (12): 84-91. (in Chinese)

[4] THOM 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 & Biochemistry, 2010, 42(9): 1558-1565.

[5] BREULMANN M, SCHULZ E, WEIßHUHN K, *et al*. Impact of the plant community composition on labile soil organic carbon, soil microbial activity and community structure in semi-natural grassland ecosystems of different productivity[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1-2): 253-265.

[6] YAO X, ZHANG N, ZENG H, *et al*. Effects of soil depth and plant-soil interaction on microbial community in temperate grasslands of Northern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630: 96-102.

[7] SHEN C C, XIONG J B, ZHANG H Y, *et al*. Soil pH drives the spatial distribution of bacterial communities along elevation on Changbai Mountain[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57(00): 204-211.

[8] CHEN D M, JIA M, CHU P F, *et al*. Patterns and drivers of soil microbial communities along a precipitation gradient on the Mongolian Plateau[J]. Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1669-1682.

[9] NIELSEN U N, BALL B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems[J]. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1407-1421.

[10] **吴华清, 陈小梅, 林媚珍, 等. 降水处理对南亚热带季风林土壤微生物群落结构的影响**[J]. **生态环境学报**, 2016, 25(4): 583-590.
WU H Q, CHEN X M, LIN M Z, *et al*. Effects of the soil microbial community structure to changes in precipitation in the south subtropical monsoon forest[J]. Ecology Environment, 2016, 25(4): 583-590. (in Chinese)

[11] **时鹏, 高强, 王淑平, 等. 玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响**[J]. **生态学报**, 2010, 30(22): 6173-6182.
SHI P, GAO Q, WANG S P, *et al*. Effects of continuous cropping of corn and fertilization on soil microbial community functional diversity [J]. Acta Ecology Sinica, 2010, 30(22): 6173-6182. (in Chinese)

[12] **张莉, 党军, 刘伟, 等. 高寒草甸连续围封与施肥对土壤微生物群落结构的影响**[J]. **应用生态学报**, 2012, 23(11): 3072-3078.
ZHANG L, DANG J, LIU W, *et al*. Effects of continuous enclosure and fertilization on soil microbial community structure in alpine meadow [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 3072-3078. (in Chinese)

[13] LI S X, SHEN Q R, ZHENG X Q, *et al*. Effect of organic microbe fertilizer application on watermelon growth and soil microorganisms under continuous mono-cropping [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(2): 169-174.

[14] SCHUTTER M, SANDENO J, DICK R. Seasonal, soil type, and alternative management influences on microbial communities of vegetable cropping systems [J]. Biology and Fertility of Soils, 2001, 34(6): 397-410.

[15] **胡婵娟, 刘国华, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面上土壤微生物生物量碳、氮的季节变化**[J]. **生态学杂志**, 2011, 30(10): 2227-2232.
HU C J, LIU G H, CHEN L D, *et al*. Seasonal variations of soil microbial biomass carbon and nitrogen on the hill slope in hilly areas of Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2227-2232. (in Chinese)

[16] REN C J, ZHANG W, ZHONG Z K, *et al*. Differential responses of soil microbial biomass, diversity, and compositions to altitudinal gradients depend on plant and soil characteristics [J]. Science of the Total Environment, 2018: 610-611.

[17] **黄艺, 黄木柯, 柴立伟, 等. 干旱半干旱区土壤微生物空间分布格局的成因**[J]. **生态环境学报**, 2018, 27(1): 191-198.
HUANG Y, HUANG M K, CHAI L W, *et al*. Drivers of the spatial patterns of soil microbial communities in arid and semi-arid regions[J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, 27 (1): 191-198. (in Chinese)

[18] **陈悦, 吕光辉, 李岩. 独山子区优势草本植物根际与非根际土壤微生物功能多样性**[J]. **生态学报**, 2018, 38(9): 122-129.
CHEN Y, LV G H, LI Y. Soil microbial functional diversity of rhizosphere and non-rhizosphere of three dominant herbaceous plants in the Dushanzi district [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 122-129. (in Chinese)

[19] **程建国, 纪昌海, 罗燕, 等. 四川九龙山自然保护区林麝栖息地典型植被土壤微生物群落特征**[J]. **西北林学院学报**, 2017, 32 (2): 205-211.
CHENG J G, JI C H, LUO Y, *et al*. Microbial community characteristics of typical vegetation soil at forest musk deer habitats in Sichuan Jiulong Mountain Nature Reserve [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 205-211. (in Chinese)

[20] **王淼, 曲来叶, 马克明, 等. 罕山土壤微生物群落组成对植被类型的响应**[J]. **生态学报**, 2014, 34(22): 6640-6654.
WANG M, QU L Y, MA K M, *et al*. Response of soil microbial community composition to vegetation types[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6640-6654. (in Chinese)

[21] **陈莉, 兰国玉, 谭正洪, 等. 橡胶树与其他乡土树种混交对土壤微生物生物量碳的影响**[J]. **西北林学院学报**, 2018, 33(6): 26-30.
CHEN L, LAN G Y, TAN Z H, *et al*. Effects of the mixed cultivation of rubber trees with other indigenous tree species on soil microbial biomass carbon of rubber plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 26-30. (in Chinese)

[22] MERILA P, MALMIVAARA-LAMSA M, SPETZ P, *et al*. Soil organic matter quality as a link between microbial community structure and vegetation composition along a successional gradient in a boreal forest[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(2): 259-267.

[23] LI N J, ZENG Q P, HE B H, *et al*. Seasonal variations of soil microbial PLFAs and soil enzyme activity under the citrus plantation in Mt. Jinyun, Chongqing [J]. Environment Science, 2017, 38(1): 309-317.

(下转第 73 页)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[8] 郝明旭,霍莉莉,吴珊珊. 人工湿地植物水体净化效能研究进展[J]. 环境工程,2017,35(8):5-10.

[9] 赵永军,田云飞,黄德英,等. 四种不同植物湿地对不同 C/N 比生活污水的净化效果与季节动态[J]. 环境科学学报,2016,36(1):193-200.

[10] 朱静平,程凯,孙丽. 水培植物净化系统不同氮磷去除作用的贡献[J]. 环境科学与技术,2011,34(5):175-178.

[11] 时应征,王晓,强艳艳,等. 人工湿地植物的选择驯化研究综述[J]. 技术与创新管理,2008,29(1):90-94.

[12] 张雨葵,杨杨,刘涛. 人工湿地植物的选择及湿地植物对污染河水的净化能力[J]. 农业环境科学学报,2006,25(5):1318-1323.

[13] 盛菊江,范德江,杨东方,等. 长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价[J]. 环境科学,2008,29(9):2405-2412.

[14] 赵钰,李多松,栾晓丽,等. 3 种挺水植物对生活污水主要污染物净化能力的研究[J]. 水土保持学报,2008,22(6):75-77.
ZHAO Y,LI D S,LUAN X L,*et al*. Study on purified efficiency of main pollutants from domestic wastewater by three macrophytes[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2008,22(6):75-77. (in Chinese)

[15] 王庆海,段留生,武菊英,等. 北京地区人工湿地植物活力及污染物去除能力[J]. 应用生态学报,2008,19(5):1131-1137.
WANG Q H,DUAN L S,WU J Y,*et al*. Growth vitality and pollutants-removal ability of plants in constructed wetland in Beijing region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(5):1131-1137. (in Chinese)

[16] 李莎莎,田昆,刘云根,等. 不同空间配置的湿地植物群落对生活污水的净化作用研究[J]. 生态环境学报,2010,19(8):1951-1955.

[17] 陈永华,吴晓芙,蒋丽鹃,等. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J]. 环境科学学报,2008,28(8):1549-1554.

[18] 张志勇,冯明雷,杨林章. 浮床植物净化生活污水中 N、P 的效果及 N_2O 的排放[J]. 生态学报,2007,27(10):391-399.
ZHANG Z Y,FENG M L,YANG L Z. Nitrogen and phosphorus removal and N_2O emission from domestic sewage in floating-bed plant systems[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(10):391-399. (in Chinese)

(上接第 21 页)

[24] 扈花,刘泽彬,樊亚鹏,等. 森林土壤微生物生态学研究进展[J]. 世界林业研究,2016,29(3):24-29.

[25] YAN H,HUANG Y M,JIANG Y L,*et al*. Seasonal variation of PLFA during soil mineralization under two kinds of shrub lands in mountainous area of southern Ningxia, Northwest China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2014,34(8):2111-2120.

[26] SPEDDING T A,HAMEL C,MEHUYS G R,*et al*. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems[J]. Soil Biology& Biochemistry,2004,36:499-512.

[27] 俞欣妍. 天然丝栗栲生长规律研究[J]. 中国农学通报,2013,29(31):1-7.

[28] 林捷,叶功富,何建源,等. 武夷山丝栗栲天然林群落的物种多样性研究[J]. 江西农业大学学报,2005,27(3):340-344.
LIN J,YE G F,HE J Y,*et al*. A study on species diversity in *Castanopsis fargesii* natural forest community in Wuyishan Mountains [J]. Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis,2005,27(3):340-344. (in Chinese)

[29] 巩晟萱,王丹,戴伟,等. 不同生长时期丝栗栲林下土壤有机碳含量及矿化特征[J]. 水土保持通报,2015,35(5):59-63.

[30] 戴奥娜,刘肖肖,王兵,等. 丝栗栲林下土壤有机碳及其组分的时空年变化特征[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(3):405-411.
DAI A N,LIU X X,WANG B,*et al*. Annual spatial and temporal variations of soil organic carbon and its components in *Castanopsis fargesii* forest [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2018,35(3):405-411. (in Chinese)

[31] 曹成有,陈家模,邵建飞,等. 科尔沁沙地四种固沙植物群落土壤微生物生物量及酶活性的季节动态[J]. 生态学杂志,2011,30(2):227-233.
CAO C Y,CHEN J M,SHAO J F,*et al*. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities in four sand-fixation plantations on Horqin sandy land [J]. Chinese Journal of Ecology,2011,30(2):227-233. (in Chinese)

[32] 王宁,王美菊,李世兰,等. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物生物量生长季动态的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(5):1297-1305.
WANG N,WANG M J,LI S L,*et al*. Effects of precipitation variation on growing seasonal dynamics of soil microbial biomass in broadleaved Korean pine mixed forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(5):1297-1305. (in Chinese)

[33] LANDESMAN W J,DIGHTON J. Response of soil microbial communities and the production of plant-available nitrogen to a two-year rainfall manipulation in the New Jersey Pinelands [J]. Soil Biology & Biochemistry,2010,42(10):1751-1758.

[34] GORDON H,HAYGARTH P M,BARDGETT R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching[J]. Soil Biology & Biochemistry,2008,40(2):302-311.

[35] RYANA S. Precipitation pulses and soil CO_2 flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. Global Change Biology,2007,13(2):426-436.

[36] 苏慧敏,李叙勇,欧阳扬. 土壤微生物量和土壤呼吸对降雨的响应[J]. 生态环境学报,2011,20(10):1399-1402.

[37] POTILA H,SARJALA T. Seasonal fluctuation in microbial biomass and activity along a natural nitrogen gradient in a drained peatland[J]. Soil Biology& Biochemistry,2004,36(7):1047-1055.

[38] 王强,韩欢,耿增超,等. 秦岭辛家山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):35-42.
WANG Q,HAN H,GENG Z C,*et al*. Distribution characteristics of active soil organic carbon under typical vegetation types in Xinjiashan forest in Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(2):35-42. (in Chinese)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net