

冀北辽河源油松天然林土壤微生物碳代谢特征研究^①

立天宇, 康峰峰, 韩海荣*, 高晶, 宋小帅

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: 本文以冀北辽河源地区不同林龄油松天然林为研究对象, 研究其土壤微生物生物量碳、微生物呼吸及微生物代谢熵随油松林龄的变化趋势。结果表明: 随着油松天然林林龄的增加, 土壤微生物生物量碳逐渐增加; 而土壤微生物呼吸则呈现出先减小后增加的趋势; 微生物代谢熵表现为随油松林龄的增加而降低。相关性分析表明, 土壤微生物生物量碳、微生物呼吸分别与微生物代谢熵之间呈现高度的极显著线性负相关。微生物生物量碳与微生物呼吸呈极显著正相关, 但线性相关程度较弱。土壤微生物生物量碳和微生物呼吸与土壤温度和含水量均呈极显著正相关, 而土壤微生物代谢熵则与土壤温度、土壤含水量呈极显著负相关。上述结果表明, 在冀北辽河源地区, 土壤微生物生物量碳、微生物呼吸、微生物代谢熵与油松天然林林龄密切相关。随着油松天然林林龄的增加, 其土壤微生物活性增强, 碳代谢效率增加, 土壤质量及可持续利用潜力更高, 土壤生态体系更加成熟。

关键词: 油松天然林; 土壤微生物生物量碳; 土壤微生物呼吸; 土壤微生物代谢熵

中图分类号: Q148; S714.3; S718.8

土壤微生物是土壤中有有机物质的分解者和转化者, 在森林生态系统凋落物分解及养分循环的过程中占有重要地位^[1]。土壤微生物摄取土壤中的有机质, 一部分用于自身的物质合成, 另一部分则经过其自身的呼吸代谢矿化生成 CO₂。微生物作为土壤碳输入与输出的重要纽带, 其群落结构组成与生态功能、微生物生物量碳及呼吸特性都直接影响着森林生态系统土壤碳代谢的周转过程, 并决定土壤碳储量的大小。作为土壤微生物碳代谢特征的重要方面, 微生物生物量碳与微生物呼吸对环境变化敏感, 能够较早地指示生态系统功能的变化, 是公认的土壤生态系统的预警及灵敏指标^[2]。

油松(*Pinus tabulaeformis*)属于松科松属, 为我国特有树种。油松是暖温带湿润半湿润气候区的地带性植被, 广泛分布于我国辽宁、内蒙古、河北、山西等 14 个省, 因其适应性强、根系发达、抵御不利环境强的特点, 已成为华北地区山地植被的主要建群种^[3-5]。不同林龄油松凋落物无机养分含量、C/N 等存在显著差异^[6-7]。而凋落物质和量的差异很可能造成土壤中不同的 pH、有机质含量、土壤全氮和 C/N, 继而影响土壤微生物群落、微生物生物量碳氮

以及微生物呼吸^[8-9]。

目前, 关于我国油松林的研究主要集中于油松人工林土壤微生物群落结构^[10-12]及微生物生物量碳、氮方面^[10, 13]。然而, 关于土壤微生物生物量碳对不同林龄油松天然次生林的响应, 特别是微生物呼吸及微生物代谢熵对油松林龄响应的研究鲜有报道。本研究以冀北辽河源地区不同林龄油松天然林作为研究对象, 研究土壤微生物碳代谢特征随油松天然林林龄的变化特征, 旨在为温带油松天然林的微生物碳代谢动态提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于河北省平泉县大卧铺林场腹地的辽河源国家森林公园内(118°22'39" ~ 118°37'21"E, 41°01'30" ~ 41°21'15"N), 全境为七老图山东南段, 地处内蒙古高原和冀北山地的过渡地带。该区域最高海拔 1 738 m, 为主峰马孟山, 最低海拔 625 m, 平均海拔 1 180 m^[14]。该区域属于暖温带向中温带过渡, 半湿润半干旱大陆性凉温型山地气候。气候特点为: 四季分明、雨热同季、光照充足、雨量充沛、

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201204101)资助。

* 通讯作者(hanhr@bjfu.edu.cn)

作者简介: 立天宇(1989—), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态管理与规划。E-mail: lty122025@gmail.com

风沙较小、昼夜温差大。辽河源地区全年平均气温 7.3°C ， $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年积温 $3\,509.3^{\circ}\text{C}$ ， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 $3\,193.7^{\circ}\text{C}$ ，无霜期 120~130 天，冬季积雪 5 个月，最大冻土层 143 cm。年平均降水量 550 mm，主要集中在 7—9 月份，日最大降雨量为 170 mm，年平均蒸发量 1 800 mm。该区域土壤为棕壤、褐土、草甸土三大类型 8 个亚类，以山地棕壤和淋溶褐土为主。土层较厚，一般为 50~100 cm，土壤呈中性、微酸性反应，土壤水分条件较好^[15]。森林覆盖率达

81.2%，有各类植物 2 000 余种，是典型的蒙古植物区系和华北植物区系的交汇地带，是华北山地针阔混交夏绿林向蒙古草原和东北大兴安岭针叶林过渡的地区^[15-16]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2012 年 8 月底，分别选取 30 年、40 年和 60 年 3 个不同林龄油松天然林。在每个林地内布设 30 m × 20 m 的样地，在各样地内随机设置 3 个 3 m × 3 m 小样方，共计 9 个。样地概况见表 1。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic conditions of the sample plot

林龄 (a)	海拔 (m)	郁闭度	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	林下主要灌木组成
30	982	0.68	18.50 ± 5.20	15.77 ± 2.00	土庄绣线菊(<i>Spiraea pubescens Turcz.</i>)、西伯利亚杏(<i>Armeniaca sibirica (L.) Lam.</i>)、多花胡枝子(<i>Lespedeza floribunda Bunge</i>)等
40	1 007	0.6	23.17 ± 6.69	19.87 ± 3.79	土庄绣线菊(<i>Spiraea pubescens Turcz.</i>)、胡枝子(<i>Lespedeza bicolor Turcz.</i>)等
60	999	0.37	34.05 ± 9.10	19.80 ± 3.51	土庄绣线菊(<i>Spiraea pubescens Turcz.</i>)、胡枝子(<i>Lespedeza bicolor Turcz.</i>)、照山白(<i>Folium rhododendron Micranthi.</i>)等

1.2.2 样品采集 分别于 2013 年 5—10 月，在每个样方内按“S”形随机选取 5 个样点，并使用土钻采集 0~5、5~10、10~20 cm 深度的土壤各 1 份。将同一林地采集的同一土层土壤混合为 1 个土样，同时测定每个样地的土壤温度。每份土样使用 2 mm 孔径的土筛除去土壤当中的石砾和植物根系，用自封袋保存放入低温冷藏箱中，带回实验室，放入 4°C 冰箱内，用于测定土壤含水量、微生物生物量生物碳和微生物呼吸。

1.2.3 土壤样品分析 使用 LI-8100 配套的土壤温度传感器测定 0~5、5~10、10~20 cm 深度的土壤温度；采用烘干法测定各土层土壤含水量。

土壤微生物生物量碳(MBC)的测定采用氯仿熏蒸浸提法(FE)。称取新鲜土样 10 g 置于真空干燥器中，经氯仿熏蒸后，于 25°C 的黑暗条件下培养 24 h 后，用抽真空方法反复去除真空泵中残存的氯仿。熏蒸的同时，称取等量的新鲜土壤。然后，将熏蒸及未熏蒸的土壤样品用 40 ml 0.5 mol/L 的 K_2SO_4 溶液震荡浸提 30 min 后，使用定量滤纸过滤。浸提液中有有机碳含量的测定采用高温外热重铬酸钾氧化法。土壤微生物生物量碳(MBC)的计算公式： $B_C = E_C/K_{EC}$ ，式中： E_C 表示熏蒸与未熏蒸土样有机碳量的差值； K_{EC} 为转换系数，取值 0.38^[17-18]。

土壤微生物呼吸(MR)的测定采用静态碱液吸收法。称取相当于干土 15 g 的新鲜土样，调节到土壤最大持水量的 40%，将土样放入呼吸瓶中。将右边旋口打开通入空气，注入 10 ml 0.1 mol/L NaOH 溶液，

然后关闭旋口，塞上橡皮塞，于 25°C 黑暗条件下连续培养 6 天，此后每两天测一次。土壤微生物呼吸释放的 CO_2 由 10 ml 0.1 mol/L NaOH 吸收，吸收后的碱液再用 0.1 mol/L HCl 标准溶液滴定^[8-19]。

土壤微生物代谢熵($q\text{CO}_2$)为土壤呼吸与土壤微生物量碳的比值^[20]，其计算公式为： $q\text{CO}_2 = \text{MR}/\text{MBC}$ 。

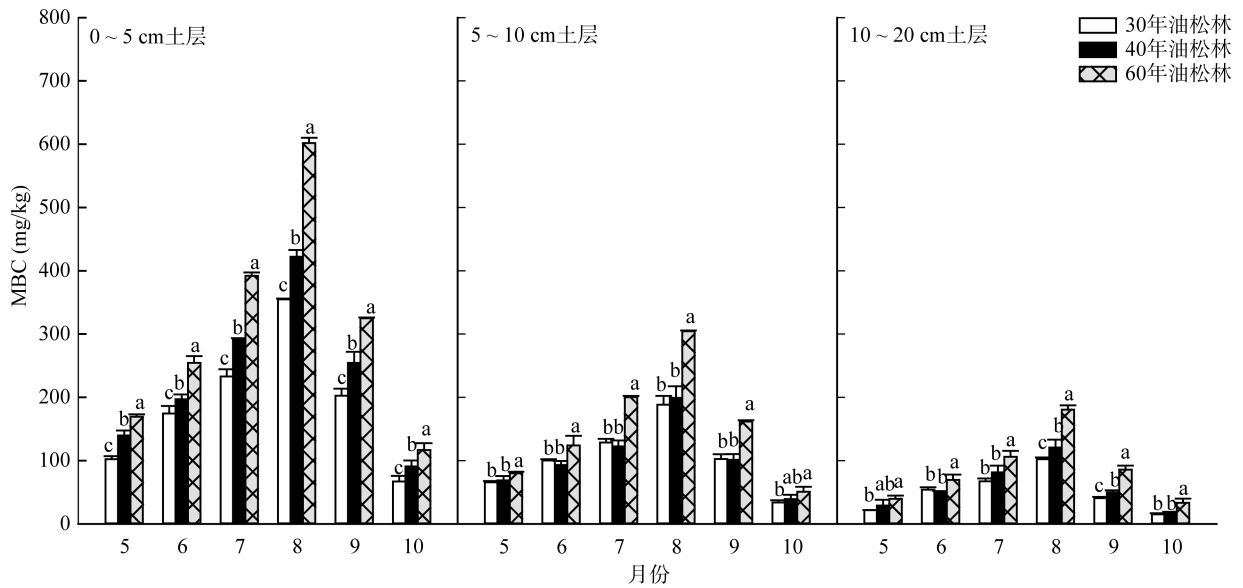
1.3 数据处理

采用 SPSS 22 软件对不同林龄油松天然林微生物生物量碳、微生物呼吸及代谢熵进行重复测量单因素方差分析(one-way ANOVA)，用 Duncan 多重比较进行差异显著性检验，显著性水平设定 $\alpha = 0.05$ ；利用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系，显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。利用 Sigmaplot 12.5 绘图软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄油松天然林土壤微生物生物量碳含量变化特征

从图 1 可以看出，30 年油松天然林土壤微生物生物量碳含量为 15.16~354.77 mg/kg，40 年油松林为 16.04~422.25 mg/kg，60 年油松林为 33.37~601.85 mg/kg。在整个生长季内，土壤微生物生物量碳含量呈现出随油松天然林林龄的增加而增加的趋势，仅在 6 月的 5~10 和 10~20 cm 土层、7 月的 5~10 cm 土层、9 月的 5~10 cm 土层表现为 30 年油松林土壤微生物生物量碳大于 40 年油松林。



(图中同一土层同一月份不同林龄间小写字母不同表示差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下图同)

图 1 不同林龄油松天然林土壤微生物生物量碳变化特征

Fig. 1 MBCs among different stand ages of *Pinus tabulaeformis* forests

多重比较结果表明, 0~5 cm 土层, 各林龄油松天然林土壤微生物生物量碳含量之间存在显著差异($P < 0.05$)。5~10 cm 土层, 60 年油松天然林与 30 年油松林相比, 微生物生物量碳含量存在显著差异($P < 0.05$), 60 年与 40 年油松林微生物生物量碳含量在 5—9 月差异显著($P < 0.05$)。10~20 cm 土层, 60 年与 30 年油松林土壤微生物生物量碳含量之间存在显著差异($P < 0.05$), 60 年与 40 年油松林微生物生物量碳含量在 6—10 月差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同林龄油松天然林土壤微生物呼吸变化特征

图 2 结果显示, 土壤微生物呼吸随油松天然林林龄的增大呈现先降低后增高的趋势。30 年油松天然林土壤微生物呼吸为 $0.16 \sim 1.37 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 40 年油松林为 $0.15 \sim 1.33 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 60 年油松林为 $0.28 \sim 1.42 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。

经过多重比较分析, 0~5 cm 土层各林龄油松林土壤微生物呼吸在整个生长季内无显著差异。5~

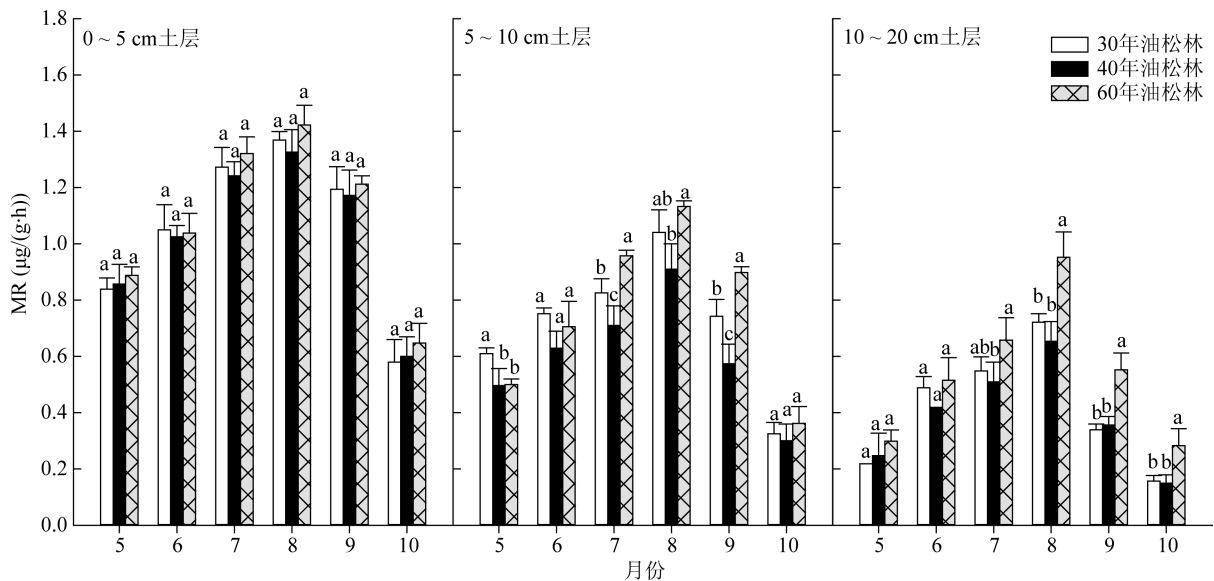


图 2 不同林龄油松天然林土壤微生物呼吸变化特征

Fig. 2 MRs among different stand ages of *Pinus tabulaeformis* forests

10 cm 土层, 5 月 40 年与 60 年油松林土壤微生物呼吸差异不显著, 6 月与 10 月各林龄油松林微生物呼吸差异不显著, 8 月 30 年与 40 年、60 年油松林差异不显著, 7 月与 9 月各林龄之间差异显著。10~20 cm 土层, 5—6 月各林龄之间微生物呼吸差异不显著, 7 月 30 年与 40 年、60 年油松林差异不显著, 8—10 月 30 年与 40 年油松林差异不显著。

2.3 不同林龄油松天然林土壤微生物代谢熵变化特征

由图 3 可知, 各土层土壤微生物代谢熵随油松

天然林林龄的增加表现出一定的规律性。30 年油松天然林土壤微生物代谢熵为 3.86~10.32 mg/(g·h), 40 年油松林为 3.14~9.29 mg/(g·h), 60 年油松林为 2.36~8.47 mg/(g·h), 表明土壤微生物代谢熵随油松天然林林龄的增加而降低。

0~5 cm 土层, 各林龄油松天然林土壤微生物代谢熵之间存在显著差异($P < 0.05$)。5~10 cm 土层, 40 年与 60 年油松林土壤微生物代谢熵在 9 月差异不显著。10~20 cm 土层, 40 年和 60 年油松林土壤微生物代谢熵在 7 月和 8 月差异不显著。

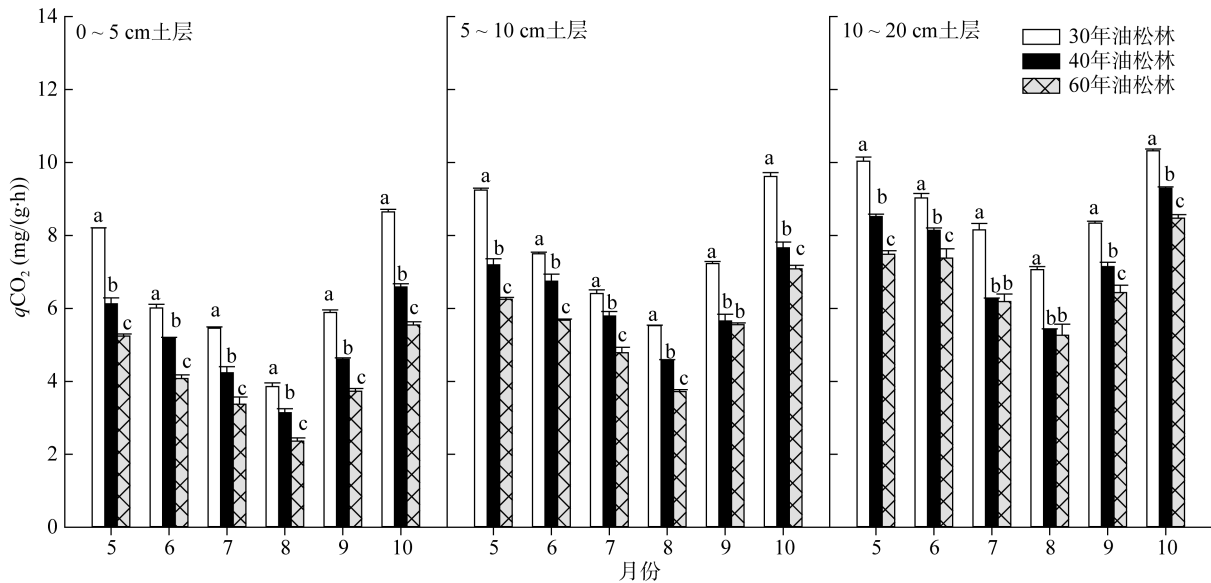


图 3 不同林龄油松天然林土壤微生物代谢熵变化特征

Fig. 3 qCO_2 among different stand ages of *Pinus tabulaeformis* forests

2.4 土壤微生物生物量碳、微生物呼吸、微生物代谢熵与土壤温度、含水量的相关性分析

土壤温度、含水量见表 2。经相关性分析可以看出(表 3), 土壤微生物生物量碳、微生物呼吸分别与微生物代谢熵之间呈极显著负相关($P < 0.01$), 微生物生物量碳与微生物呼吸呈极显著正相关($P < 0.01$)。但微生物生物量碳与微生物代谢熵线性相关程度较强($r = -0.871$, $P < 0.01$), 微生物呼吸与微生物代谢熵、微生物生物量碳与微生物呼吸之间的线性相关程度较弱($r = -0.650$, $P < 0.01$; $r = 0.743$, $P < 0.01$)。土壤微生物生物量碳和微生物呼吸分别与土壤温度和含水量呈极显著正相关($P < 0.01$), 而土壤微生物代谢熵则与土壤温度、土壤含水量呈极显著负相关($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 油松天然林土壤微生物生物量碳含量变化特征

土壤微生物生物量碳是指土壤中体积小于 $5 \times$

$10^3 \mu m^3$ 的微生物体内碳的总和^[21]。微生物生物量碳一般只占土壤有机碳总量的 1%~4%, 却是土壤活性有机碳库的重要组成部分以及土壤有机质转化和循环的动力^[2,22-23]。作为土壤微生物碳代谢特征的指标之一, 土壤微生物生物量碳具有极高的灵敏性, 不仅可以在土壤全碳变化之前反映出土壤微小的变化^[2, 24], 还可以用于指示土壤总有机质的状态和积累情况^[25]。

本研究表明, 冀北辽河源地区土壤微生物生物量碳含量在不同林龄油松天然林之间存在显著差异。油松天然林林龄增加, 其土壤维持微生物生物量碳的能力较高。王金成等^[26]对黄土高原子午岭不同林龄油松天然林的土壤微生物生物量碳进行了研究, 得到了与本研究相同的结果。土壤当中微生物的特性通常是由土壤特性(温度、含水量、结构等)及林地植被特性共同决定的, 三者共同构成一个功能微系统^[27]。林龄的增加使得林下凋落物逐年积累, 凋落物数量的增加为土壤提供了丰富的有机质, 以供土壤微生物利

表 2 供试土壤温度及含水量
Table 2 Temperature and water contents of tested soils

月份	土层 (cm)	30 年油松林		40 年油松林		60 年油松林	
		温度(°C)	土壤含水量(g/kg)	温度(°C)	土壤含水量(g/kg)	温度(°C)	土壤含水量(g/kg)
5	0~5	13.32	17.2	13.71	26.9	13.19	74.2
	5~10	11.80	21.9	12.03	21.9	12.36	60.0
	10~20	10.57	29.8	9.66	23.8	11.47	70.9
6	0~5	17.43	120.6	16.42	130.8	16.21	192.2
	5~10	17.17	89.6	15.85	84.0	15.37	137.4
	10~20	16.87	56.0	15.24	93.1	15.90	96.8
7	0~5	19.62	181.4	18.00	86.8	17.43	196.9
	5~10	19.33	96.9	17.95	66.8	17.16	136.6
	10~20	18.86	72.6	17.92	60.9	16.91	136.7
8	0~5	19.09	165.9	19.93	146.1	17.35	253.9
	5~10	19.06	106.3	19.27	92.5	16.93	208.6
	10~20	18.89	93.4	18.65	99.4	16.85	183.6
9	0~5	10.58	88.8	7.91	133.6	8.20	206.6
	5~10	10.99	69.9	9.90	88.0	8.26	186.5
	10~20	11.20	65.9	10.08	78.5	8.32	186.9
10	0~5	3.17	243.2	2.37	93.8	2.46	213.3
	5~10	3.30	130.2	2.97	55.6	2.48	152.8
	10~20	3.36	80.2	3.02	57.3	2.50	192.4

表 3 微生物生物量碳、微生物呼吸、微生物代谢熵与土壤温度、土壤含水量的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients among MBC, MR, qCO_2 , ST and SWC

项目	MBC	MR	qCO_2
SWC	0.571**	0.486**	-0.541**
ST	0.453**	0.552**	-0.478**
MBC		0.743**	-0.871**
MR			-0.650**

注：*表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平，** 表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平， $n=162$ 。

用。此外，有研究表明，随着林龄的增加，油松天然林的根系逐年增大。庞大的根系以及灌木和草本等林下植被丰富的多样性，也为土壤微生物的自身合成与代谢过程提供大量的碳源以及能量来源^[28]。土壤温湿度也是影响土壤微生物生物量碳的一个重要因素。然而，有关土壤温湿度与土壤微生物生物量碳的关系至今无确定性结论。杨凯等^[29]及谢涛等^[30]研究发现，土壤微生物生物量碳与土壤温度、水分无显著相关。也有学者认为，土壤温度和含水量会显著影响土壤微生物生物量碳^[21, 31-33]。土壤温度和含水量最高的时期，微生物活性最大，较高的土壤温度和含水量使得土壤微生物对养分的固化率也较高，从而导致土壤微生物生物量碳相应增大^[21]。在本研究中，通过相关性分析可知，土壤微生物生物量碳同土壤温度、土壤含水

量呈极显著正相关。这可能是由于随着油松天然林林龄的增加，自疏作用会使林冠郁闭度降低，导致林地光照、土壤温度以及土壤水分含量等得到改善，从而使土壤环境更加适宜微生物的生长与繁殖。因此，林下凋落物的积累、植物根系的增大以及自疏作用导致的土壤环境的改善都有可能引起土壤微生物生物量碳呈现出油松天然林林龄的增加而增大的趋势。

3.2 油松天然林土壤微生物呼吸变化特征

土壤微生物呼吸代表微生物对植物固定的碳的初级降解能力^[34]。其实质是微生物对土壤有机质的分解过程，即土壤有机质潜在的矿化速率^[35]。它不仅反映了土壤微生物的总体活性，还反映了土壤物质代谢强度和土壤碳素的周转情况，其变化与否以及变化方向表明了系统对胁迫的敏感程度和响应模式^[36]。

在本研究中，40 年油松天然林土壤微生物呼吸最低，其次为 30 年油松林，60 年油松天然林土壤微生物呼吸最高。表明随着油松天然林林分的发育，土壤有机碳矿化速率呈现出先降低后增高的趋势。相关性分析表明，土壤微生物呼吸与微生物生物量碳呈中等程度的线性相关($r=0.703$, $P<0.01$)，与土壤温度、土壤含水量呈极显著正相关，但线性相关程度较弱($r=0.552$, $P<0.01$; $r=0.486$, $P<0.01$)。毛璐等^[37]对不同林龄杨树农田防护林土壤微生物呼吸的研究也

得到了相似的结果。随着杨树农田防护林林龄的增加,土壤微生物呼吸呈现先降低后增加的趋势,且随着杨树防护林林分发育,土壤微生物生物量碳增加,土壤微生物呼吸速率增加。吴建国和艾丽^[38]、易志刚等^[39]及贾建伟等^[31]的研究也表明,土壤微生物生物呼吸同土壤微生物生物量碳有着密切的关系,表现为微生物呼吸随微生物生物量碳的增加而增加。但就目前的研究而言,土壤微生物生物量碳与微生物呼吸的关系尚不明确。本研究中,土壤微生物生物量碳随油松林龄的增加而增加,但微生物呼吸随油松林龄先降低后增加,且30年与40年之间差异不显著。究其原因,这是因为,随着油松林分的发育,林地郁闭度、林下植被的种类、盖度等的变化,会改变林地土壤养分、物理化学性质等,进而导致微生物群落的变化。这种变化不仅包括微生物生物量,同时也包括微生物的种类、群落及其功能的变化。而这一系列因素则会共同影响土壤微生物呼吸^[40],使土壤微生物呼吸随油松林龄的变化趋势与微生物生物量碳不完全一致。也有学者认为尽管土壤微生物呼吸与土壤微生物生物量碳的相关系数大,但土壤微生物呼吸的决定因素主要是基质的有效性,而非适宜温度、湿度下的微生物量的大小^[41-42]。

3.3 油松天然林土壤微生物代谢熵变化特征

呼吸熵($q\text{CO}_2$),又称代谢熵(Metabolic quotient),它将微生物整体活性与微生物生物量有机结合起来,反映了土壤微生物群落维持能量的大小及其对土壤有机成分的利用效率,是反映环境因素等变化对微生物碳库影响的一个敏感性指标^[1,43]。

周焱等^[41]认为,土壤微生物代谢熵小,意味着微生物呼吸所消耗的碳的比例小,而用于建造微生物细胞的碳的比例则相对增大,进而可以保证土壤有较高的代谢效率,同时又使土壤有充足的活性有机质,对维持土壤的优良性状和可持续利用潜力有益。研究结果表明,土壤微生物代谢熵随油松天然林林龄的增加而降低,表明其土壤当中微生物消耗较少用于生长和生产的能量就可用于维持自身的生存。此外,土壤微生物对基质的利用效率增加,使得土壤有机质和养分的周转速率加快,土壤质量得到提高。30年油松林植被生长旺盛,植物生长摄取了土壤中大量的碳,微生物可利用的基质相应减少,植物的摄取与微生物之间产生竞争^[44],导致30年油松天然林土壤微生物代谢熵较大,微生物对有机质的代谢效率较低。而随着林龄的增加,林内生态环境趋于稳定。林地积累的凋落物的增加使得土壤中含有充足的活性有机质,不仅能够满足植物生长所需,还为土壤微生物自身的

物质合成和代谢过程提供了充足的碳源。植物摄取与微生物需求之间矛盾的减弱,使土壤微生物能够更多地利用基质来进行自身的物质合成,从而保证土壤微生物有较高的代谢效率。由此可见,在冀北辽河源地区,随着油松天然林林龄的增大,土壤微生物代谢熵降低,土壤微生物碳利用效率增加,土壤质量更高,土壤生态系统趋于稳定。

参考文献:

- [1] Ananyeva ND, Susyan EA, Chernova OV, Wirth S. Microbial respiration activities of soil from different climatic regions of European Russia[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(2): 147-157
- [2] 张成霞,南志标. 土壤微生物生物量的研究进展[J]. *草业科学*, 2010, 27(6): 50-57
- [3] 林娜. 不同密度油松人工林针叶凋落物分解特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011
- [4] 赵伟红,康峰峰,韩海荣,赵金龙,高晶,于晓文,宋小帅,立天宇. 冀北辽河源地区不同林龄油松天然次生林土壤理化特征的研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(3): 1-8
- [5] 李国雷,刘勇,李瑞生,吕瑞恒,徐扬. 油松人工林土壤质量的演变[J]. *林业科学*, 2008, 44(9): 76-81
- [6] 吕瑞恒,李国雷,刘勇,金虎范,林娜. 不同林龄油松针叶凋落物初期分解特性比较[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 39-44
- [7] 刘勇,李国雷. 不同林龄油松人工林叶凋落物分解特性[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(4): 500-505
- [8] 涂玉,尤业明,孙建新. 油松-辽东栎混交林地凋落物与氮添加对土壤微生物生物量碳、氮及其活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2 325-2 331
- [9] Brandstätter C, Keiblinger K, Wanek W, Zechmeister-Boltenstern S. A closeup study of early beech litter decomposition: Potential drivers and microbial interactions on a changing substrate[J]. *Plant Soil*, 2013, 371(1-2): 139-154
- [10] 邵玉琴,赵吉,岳冰. 皇甫川流域人工油松林地土壤微生物的垂直分布[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(4): 500-505
- [11] 张社奇,王国栋,刘云鹏,刘建军,贾根良. 黄土高原人工油松林地土壤微生物的分布特征[J]. *激光生物学报*, 2005, 14(5): 353-358
- [12] 陈雪,马履一,贾忠奎,段劼,王伟,王凯. 影响油松人工林土壤质量的关键指标[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(8): 46-51
- [13] 刘占锋,刘国华,傅伯杰,胡会峰,郑晓翊,吴雅琼. 人工油松林(*Pinus tabulaeformis*)恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 的变化特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1 011-1 018
- [14] 张进献. 辽河源自然保护区森林群落生长潜能及影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010
- [15] 杨玉梅,谷建才,周奇,马旺,彭志杰,王冬至. 辽河源针叶树种生长与土壤因子的相关分析[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(5): 16-18

- [16] 陈平. 辽河源典型森林群落生物多样性与土壤理化性质研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2010
- [17] 周桦, 宇万太, 马强, 张璐. 氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物量碳的改进[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 154-157
- [18] Pandey CB, Singh GB, Singh SK, Singh RK. Soil nitrogen and microbial biomass carbon dynamics in native forest and derived agricultural land and uses in a humid tropical climate of India[J]. *Plant soil*, 2010, 333: 453-467
- [19] 姚槐应. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 180-181
- [20] Liu WX, Xu WH, Hong JP, Shi SQ. Interannual variability of soil microbial biomass and respiration in responses to topography, annual burning and N addition in a semiarid temperate steppe[J]. *Geoderma*, 2010, 158: 259-267
- [21] 黎荣彬. 土壤微生物生物量碳研究进展[J]. 广东林业科技, 2008, 24(6): 65-69
- [22] 黄辉, 陈光水, 谢锦升, 黄朝法. 土壤微生物生物量碳及其影响因子研究进展[J]. 湖北林业科技, 2008(4): 34-41
- [23] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应[J]. 南京农业大学学报, 1996, 19(4): 45-51
- [24] Da Silva DKA, de Oliveira-Freitas N, da Souza RG, de Souza RG, da Silva FSB, de Araujo ASF, Maia LC. Soil microbial biomass and activity under natural and regenerated forest and conventional sugarcane plantations in Brazil[J]. *Geoderma*, 2012, 189-190: 257-261
- [25] 黄懿梅, 安韶山, 薛虹. 黄土丘陵区草地土壤微生物 C、N 及呼吸熵对植被恢复的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2 811-2 818
- [26] 王金成, 李海燕, 梁健. 黄土高原子午岭不同林龄油松林土壤微生物组成研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 43-48
- [27] 刘银银, 孙庆业, 李峰, 谢永宏. 洞庭湖典型湿地植被群落土壤微生物特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1 233-1 237
- [28] 樊军, 郝明德. 长期轮作施肥对土壤微生物碳氮的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 85-87
- [29] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 闫巧玲. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5 500-5 507
- [30] 谢涛, 郑阿宝, 王国兵, 阮宏华, 徐亚明, 徐长柏, 葛之葳. 苏北不同林龄杨树林土壤活性碳的季节变化[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1 171-1 178
- [31] 贾建伟, 王磊, 唐玉妹, 李艳丽, 张文俊, 王红丽, 付小花, 乐毅全. 九段沙不同演替阶段湿地土壤微生物呼吸的差异性及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4 529-4 538
- [32] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3 135-3 143
- [33] Compton JE, Watruda LS, Porteous L, DeGroot S. Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 143-158
- [34] 贾淑霞. 落叶松和水曲柳人工林土壤、根系和土壤微生物呼吸研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009
- [35] Borken W, Muhs A, Beese F. Application of compost in spruce forests: Effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 159(1): 49-58
- [36] Espeleta J, Eissenstat DM. Responses of citrus fine roots to localized soil drying: A comparison of seedlings with adult fruiting trees[J]. *Tree Physiology*, 1998, 18(2): 113-119
- [37] 毛璐, 崔强, 赵琼, 艾桂艳, 李禄军, 曾德慧. 不同林龄杨树农田防护林土壤微生物生物量碳、氮和微生物活性[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2 079-2 084
- [38] 吴建国, 艾丽. 祁连山 3 种典型生态系统土壤微生物活性和生物量碳氮含量[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 465-476
- [39] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 周丽霞, 张德强, 丁明懋. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1 673-1 678
- [40] 鲁海燕. 秦岭西部油松和日本落叶松人工林土壤微生物多样性及其生态功能的变化特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2010
- [41] 周焱, 徐宪根, 王丰, 阮宏华, 汪家社, 方燕鸿, 吴焰玉, 徐自坤. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值(qMB, qCO₂) [J]. 生态学杂志, 2009, 28(2): 265-269
- [42] Traoré S, Thiombiano L, Millogo JR, Guinko S. Carbon and nitrogen enhancement in Cambisols and Vertisols by *Acacia* spp. in eastern Burkina Faso: Relation to soil respiration and microbial biomass[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(3): 660-669
- [43] Liu J, Xia HJ, Wang JZ, Zhang WL. Bioactive characteristics of soil microorganisms in different-aged orange (*Citrus reticulata*) plantations[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, 13(6): 1 277-1 281, 1 286
- [44] 薛蕙, 刘国彬, 戴全厚, 党小虎, 周萍. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 20-27

Characteristics of Microbial Carabolic Metabolism in Soils of *Pinus Tabulaeformis* in Liaohe River of Northern Hebei

LI Tian-yu, KANG Feng-feng, HAN Hai-rong^{*}, GAO Jing, SONG Xiao-shuai
(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking *Pinus tabulaeformis* with different ages in Liao River source region of northern Hebei as study objects, the variations of MBC, MR and qCO_2 were studied. The results showed that with the increase of forest age, MBC increased gradually, MR decreased first and then increased, soil microbial metabolic quotient decreased. Both MBC and MR had extremely significant negative linear correlation with qCO_2 , MBC and MR had an extremely significant positive correlation, while the linear correlation was weaker. Both MBC and MR had extremely significant positive correlation with soil temperature and water content, qCO_2 had extremely significant negative correlation with soil temperature and water content. These results demonstrated that MBC, MR and qCO_2 was closely related to forest age. With the increasing age of *Pinus tabulaeformis*, soil microbial activity was enhanced and the efficiency of carabolic metabolism increased, which give the soil a higher quality and a greater potential of sustainable use and a more stable ecosystem.

Key words: *Pinus tabulaeformis* forest; Soil microbial biomass carbon; Soil microbial respiration; Soil microbial metabolic quotient