

# 澳大利亚亚热带不同森林土壤有机质 及呼吸特性研究

鲁顺保<sup>1 2 3</sup> 陈成榕<sup>3\*</sup> 徐志红<sup>3</sup> 郭晓敏<sup>1\*</sup>

(1. 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西师范大学 生命科学学院, 江西 南昌 330022; 3. Environmental Futures Centre and School of Biomolecular and Physical Sciences, Griffith University, Nathan, Brisbane, Queensland 4111, Australia)

**摘要:** 土壤呼吸是陆地生态系统和大气生态系统之间碳转移的主要途径之一。以澳大利亚南昆士兰州典型森林类型湿地松、南洋杉和贝壳杉林为对象, 开展土壤可溶性有机碳和氮(SOC和SON)以及土壤呼吸特性研究。结果表明: 不同森林土壤SOC、SON含量分别在64.4~166.5 mg/kg和6.04~14.2 mg/kg, 且贝壳杉和南洋杉的SON含量显著高于湿地松( $P < 0.05$ )。经过21 d室内培养, 以贝壳杉林地土壤呼吸程度最强, 21 d潜在有机碳矿化(potential mineralizable organic carbon,  $C_m$ )  $CO_2-C$ 为214.96 g/kg, 其次南洋杉林 $CO_2-C$ 为182.22 g/kg, 均显著强于湿地松林 $CO_2-C$  166.14 g/kg ( $P < 0.05$ )。贝壳杉林地土壤潜在最大有机碳矿化(maximum potential mineralizable organic carbon,  $C_0$ )最高, 为1117.8; 其次为南洋杉,  $C_0$ 为1082.1, 湿地松林土壤 $C_0$ 最低, 为783.0。土壤呼吸速率格局与土壤呼吸一致。相关分析表明 $C_0$ 与 $C_m$ 、 $C:N_{Micro}$ 和pH之间,  $C_m$ 与pH之间差异显著相关( $P < 0.01$ ), 土壤pH、TC和含水量是土壤呼吸的调控因子。

**关键词:** 森林类型; 可溶性有机质; 土壤呼吸

中图分类号: S714.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2011)04-0749-07

## Soil Organic Matter and Respiration of Different Subtropical Forests in Australia

LU Shun-bao<sup>1 2 3</sup>, CHEN Cheng-rong<sup>3\*</sup>, XU Zhi-hong<sup>3</sup>, GUO Xiao-min<sup>1\*</sup>

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. College of Life Sciences Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 3. Environmental Futures Centre and School of Biomolecular and Physical Sciences, Griffith University, Nathan Queensland 4111, Australia)

**Abstract:** Soil respiration is one of the main way for carbon transfer between terrestrial and atmosphere ecosystems. Soil samples under the slash pine (*Pinus elliottii* Engelm. var. elliottii), hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) and kauri pine (*Agathis australis*) populations in southern Queensland Australia were collected to investigate the effects of forest types on soil soluble organic carbon (SOC), nitrogen (SON) as well as soil respiration. The results showed that the SOC and SON contents of soil were 64.4~166.5 mg/kg, and 6.04~14.2 mg/kg, respectively. In addition, soil SON contents under the hoop pine and kauri pine were significantly higher than under the slash pine ( $P < 0.05$ ). After 21 d incubation, the soil respiration was the strongest under kauri pine, the potential mineralizable organic carbon ( $C_m$ ) was 214.96 g  $CO_2-C$  kg. The second

收稿日期: 2011-03-19 修回日期: 2011-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(30860226)和江西省优秀博士论文培养计划项目(YBP08A05)

作者简介: 鲁顺保(1976—), 男, 讲师, 博士生, 主要从事土壤生态学研究; \* 通讯作者: 陈成榕 教授, 博士生导师; 郭晓敏 教授, 博士生导师 E-mail: gxmjxau@163.com。

was 182.22 g CO<sub>2</sub> - C kg in hoop pine. Their contents were significantly higher than that in slash pine, which was 166.14 g CO<sub>2</sub> - C kg ( $P < 0.05$ ). The order of maximum potential carbon mineralization ( $C_0$ ) was 1 117.8 in kauri pine, the second was 1 082.1 in hoop pine, and the lowest was 783.0 in slash pine. The soil respiration was similar to soil respiration rate. Correlation analysis showed that difference was significantly correlated between  $C_0$  and  $C_m$ ,  $C:N_{\text{Micro}}$  and pH, and between  $C_m$  and pH ( $P < 0.01$ ). pH, TC and moisture were factors in the control of soil respiration.

**Key words:** forest types; soluble organic matter; soil respiration

土壤呼吸是陆地生态系统土壤和大气之间 CO<sub>2</sub> 交换的重要组成部分。全球气候变化引起气温升高加速了土壤有机碳在微生物和动物的矿化作用,其产物通过土壤呼吸作用以 CO<sub>2</sub> 形式释放反馈回大气圈,进一步加剧全球变暖,因此,土壤呼吸是气候变化的一个重要调控因子<sup>[1-2]</sup>。在温室气体的所有排放源中,土壤呼吸是主要的排放源<sup>[3]</sup>。土壤呼吸作为一个复杂的生物学过程,受到土壤水热条件、质地和可溶性氮等多种环境因素的影响<sup>[4-6]</sup>。此外,土壤呼吸还受到植被类型以及诸如土地利用等人为干扰多种因素的影响<sup>[7]</sup>。森林土壤温室气体的排放过程是土壤 C、N 的主要输出途径,所以土壤碳库的微小变化都会影响大气中 CO<sub>2</sub> 的含量。然而,有关森林土壤温室气体排放的研究还不是很多,而且有些研究结果还有待于进一步证实<sup>[8]</sup>。因此有必要开展森林土壤呼吸的相关研究,以便提高对土壤生态学过程的理解,更好地评价和预测气候变化对森林碳循环的影响。昆士兰州属于典型的亚热带地域单元,是澳大利亚森林比较集中分布区,对气候变化十分敏感,在澳洲气候乃至全球气候变化中扮演重要角色。湿地松(*Pinus elliotii* Engelm. var. *elliotii*)、南洋杉(*Araucaria cunninghamii* Aiton ex A. Cunn) 和贝壳杉(*Agathis australis*) 是昆士兰州最主要的 3 种森林树种,本文以这 3 种森林类型为研究对象,利用盐浸提法和碱液吸收法对其土壤可溶性有机碳氮以及土壤呼吸进行研究,其结果将对丰富森林生态系统固碳减排具有重要意义。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地始建于 1921 年,位于澳大利亚昆士兰州东南部阳光海岸(26°9'38.8"S, 153°038'E)起伏的丘陵和山地,属于亚热带季风气候,冬季湿冷夏季干热,七月(冬季)平均气温为 12.5 °C,一月(夏季)平均气温为 31.2 °C,年均降水量为 1 600 mm,海拔 500 m 左右,土壤是由红壤到黄壤,富含铁铝等矿质的沙壤土,主要来源于中生代地质组成(沙岩、粉砂岩、页岩等聚结铁矿岩石)<sup>[9-10]</sup>,土壤贫瘠,质地疏松,酸性较强,阳离子交换很低,但是土壤内外通气性能较好,适合松科植物生长。主要植被为湿地松、南洋杉、贝壳杉、桉树(*Acacia leiocalyx* and *Acacia disparrima*) 以及相思树(*Acacia confusa*) 等,样方内均为纯林,树高均在 8 m 以上,林木郁闭度较小,坡度在 15°以内,坡向为南坡或东南坡向,林下植被主要是马鞭草(*Verbena officinalis*) 等草本植物。样地土壤基本情况见表 1。湿地松林地土壤 pH 为 4.5,均比南洋杉和贝壳杉林地土壤 pH 值低,说明样地土壤呈现酸性。质粒主要是沙粒,沙粒含量均在 95% 以上,因此,土壤持水性能较差,均在 5% 以下。

表 1 实验地不同森林类型土壤的基本性质

Tab. 1 Soil basic properties under different forest types

森林类型 Forest type	全碳/(mg ·g <sup>-1</sup> ) TC	全氮/(mg ·g <sup>-1</sup> ) TN	全磷/(μg ·g <sup>-1</sup> ) TP	碳氮比 C:N	pH	含水量/% Moisture	黏土/% Clay	壤土/% Silt	沙土/% Sand	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> ) BD
湿地松 <i>Pinus elliotii</i> Engelm. var. <i>elliotii</i>	19.35	0.54	28.2	35.9	4.5	4.9	3.74	0.6	95.7	1.04
南洋杉 <i>Araucaria cunninghamii</i>	12.55	0.57	32.4	21.9	6.0	2.6	2.92	1.4	95.7	1.16
贝壳杉 <i>Agathis australis</i>	10.76	0.52	29.9	20.8	6.2	3.4	2.00	2.03	96	1.16

### 1.2 样品采集

2009 年 1 月,分别在湿地松、南洋杉和贝壳杉 3 种不同森林类型,每个森林类型均设置 4 个 20 m × 20 m 的样方,在每个样方用直径为 7.5 cm 的土钻以 S 形分别采集 5 个土壤(0~10 cm)进行混合,装入

封口袋并放入装有冰块的保温箱。带回实验室,土样过 2 mm 筛后,放入 4 °C 冰箱,用于测定土壤呼吸以及土壤可溶性有机碳、氮。

1.3 测定方法

采用元素分析仪( Isoprime - EuroEA3000 ,意大利) 测定土壤全碳、全氮含量 ,SOC、SON 含量采用 2 mol/LKCl 浸提<sup>[11]</sup> ,然后用 SHIMADZU TOC - VCPH/CPN( 日本) analyzer ( fitted with TN unit) 通过高温催化氧化法( high temperature catalytic oxidation ( HTCO) ) 测定 SOC 和可溶性总氮( total soluble N , TSN) 利用流动注射分析仪( LACHAT QuikChem Automated Ion Analyser ,QuikChem Method 10 - 107 - 06 - 4 - D & 12 - 107 - 04 - 1 - B ,英国) 测定  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  ,  $\text{SON} = \text{TSN} - (\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})$  ;土壤粒级分析使用土壤比重计法<sup>[12]</sup> ,土壤容重测定采用环刀法 ,土壤呼吸测定方法参照 Chen<sup>[13]</sup> ,调节其含水量至田间最大持水量的 60% ,并对土壤呼吸进行模拟潜在最高碳排放 ,模拟方程  $C_m = C_o * (1 - \exp^{-kt})$  <sup>[14]</sup>。

1.4 数据处理

应用 SPSS 17.0 软件对数据进行方差分析( one - way ANOVA) ,并用 LSD 法进行差异显著性检验 ,利用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系 ,应用 Canoco 4.5 软件对土壤生物代谢指标和理化性质进行冗余分析( RDA) ,显著性水平为  $\alpha = 0.05$ 。

表 2 不同森林类型土壤 SOC 和 SON 的含量

Tab.2 Soil soluble organic carbon (SOC) and nitrogen (SON) under different types(Mean ± S. E.)

森林类型 Forest types	可溶性无机氮 SIN/(mg · kg <sup>-1</sup> )		可溶性有机氮 SON /(mg · kg <sup>-1</sup> )	有机全氮 TSN/%	全氮 TN/%	可溶性有机碳 SOC /(mg · kg <sup>-1</sup> )	C: N
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$					
湿地松 <i>Pinus elliotii</i> Engelm. var. <i>elliottii</i>	18.1 ± 1.6b	0.02 ± 0.00a	8.05 ± 0.92a	30.72 ± 1.41a	0.15 ± 0.01a	95.2 ± 11.3a	11.98 ± 1.38a
南洋杉 <i>Araucaria cunninghamii</i>	27.1 ± 6.3a	1.80 ± 1.32ab	10.46 ± 1.18a	27.80 ± 3.25a	0.19 ± 0.02a	146.6 ± 26.0a	14.17 ± 2.24a
贝壳杉 <i>Agathis australis</i>	18.6 ± 3.4b	7.64 ± 3.01b	11.26 ± 1.62a	29.90 ± 3.61a	0.22 ± 0.03b	141.7 ± 11.2a	13.19 ± 1.54a

2 结果与分析

2.1 不同森林类型土壤有效碳氮特征

不同森林类型土壤 SOC、SON 含量分别为 64.35 ~ 211.06 mg/kg ,6.04 ~ 14.20 mg/kg。从表 2 可以看出 ,不同森林类型土壤 SOC 含量大小依次为南洋杉、贝壳杉、湿地松 ,与可溶性无机氮规律相似。SON 占有有机全氮( TSN) 的 24.6% ~ 33.5% ,占全氮( TN) 的 0.14% ~ 0.25%。在湿地松林地 ,SON 含量

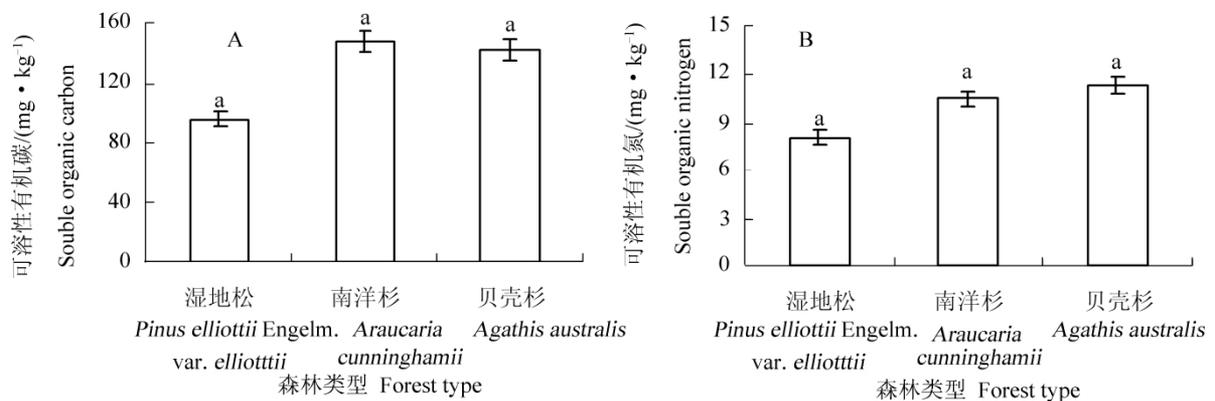


图 1 不同森林类型土壤可溶性碳、氮含量

Fig.1 Contents of soil soluble organic C and N under different forests type ( mean ± S. E.)

占 TSN 含量最高 ,为 29.3% ~ 32.1% ,但占 TN 含量最低 ,为 0.14% ~ 0.16% ,说明湿地松林地的 TSN 含量偏低。可溶性无机氮( SIN) 与可溶性有机氮不同 ,而  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  主要来自于无机态氮库 ,其含量大小依次为南洋杉、贝壳杉、湿地松林 ,并且南洋杉与其他两种森林土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量之间的差异达显著 ( $P < 0.05$ ) ,而各森林土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量大小顺序依次为贝壳杉、南洋杉、湿地松 ,均低于 7.7 mg/kg( 表 2) ,

并且湿地松林地的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量很低,为  $0.02 \text{ mg/kg}$  尽管 Burton<sup>[15]</sup> 对土壤热水抽出物进行  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分析时也得出相似的结论,但其原因尚不清楚,结果还有待深入研究。SOC 和 C:N 有相同的变化趋势,从图 1A、图 1B 可以看出,不同森林类型土壤 SOC 和 SON 含量之间的差异均未达差异显著。

## 2.2 不同森林类型土壤呼吸比较

从图 2 可以看出,培养 3 d 内,土壤呼吸排放的  $\text{CO}_2$  量迅速增加,由于本研究是将土壤含水量调节到最大田间持水量的 60%,因此,土壤微生物活性更加活跃,对土壤有机质的分解速度加快,培养 7 d 后 3 种森林土壤碳排放量均缓慢增加。在 21 d 的室内培养实验中,贝壳杉林地土壤呼吸一直处于最强状态,土壤呼吸潜在碳排放量  $\text{CO}_2 - \text{C}$  累积为  $214.96 \text{ g/kg}$ ,南洋杉林  $\text{CO}_2 - \text{C}$  为  $182.22 \text{ g/kg}$ ,湿地松林土壤呼吸最弱,碳排放累积  $\text{CO}_2 - \text{C}$  为  $166.14 \text{ g/kg}$  ( $P < 0.05$ , 图 2),方差分析表明,在 21 d 碳排放总量中,湿地松与南洋杉和贝壳杉林土壤呼吸差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 不同森林类型土壤呼吸速率差异

土壤呼吸速率表征了土壤释放  $\text{CO}_2$  能力的强弱(图 3)。总体上 3 种树种林地的土壤呼吸速率曲线格局相似,大致呈现单峰型,最高峰出现在培养第 3 天的时候。培养的第 1 天,南洋杉林地土壤呼吸最弱,贝壳杉最强,可能是土壤刚刚从冷库取出,微生物还没有被激活。在培养到第 3 天,贝壳杉林地土壤呼吸速率显著达到最高,  $\text{CO}_2 - \text{C}$  为  $0.99 \text{ mg/g soil C/h}$ ,而后 3 种林地土壤呼吸速率均降低,而且贝壳杉林地土壤降速最快。培养 14 d 后各土壤呼吸速率基本保持一定的水平线上,在 21 d 的培养过程中,贝壳杉的呼吸速率一直保持最强,第 21 天的呼吸速率为  $0.43 \text{ mg CO}_2 - \text{C g soil C/h}$ ,湿地松为  $0.33 \text{ mg CO}_2 - \text{C g soil C/h}$ ,南洋杉为  $0.36 \text{ mg CO}_2 - \text{C g soil C/h}$ ,呼吸速率均表现为贝壳杉林、南洋杉林、湿地松林。

## 2.4 不同森林类型土壤呼吸最大模拟排放量

土壤呼吸是大气  $\text{CO}_2$  的主要来源,诸如气候、森林类型、土壤水热条件等多种因素对土壤呼吸均有影响<sup>[16]</sup>。由于土壤呼吸在没有外界干扰的情况下,土壤呼吸在长时间培养后终将达到平衡,最终达到一个极大值。对 3 种林地土壤呼吸在 21 d 的室内培养实验通过方程  $C_m = C_0 * (1 - \exp^{-kt})$  对土壤呼吸潜在碳排放进行模拟,得出不同森林类型土壤潜在最大碳排放量(maximum potential mineralizable organic carbon,  $C_0$ ) 结果见表 3 相关系数均在 0.99 以上,说明拟合效果很好。贝壳杉最大潜在碳排放  $\text{CO}_2 - \text{C}$  为  $1117.8 \text{ g/kg}$ ,其次为南洋杉林土壤,最大潜在碳排放  $\text{CO}_2 - \text{C}$  为  $1082.1 \text{ g/kg}$ ,而湿地松林土壤最低,最大潜在碳排放  $\text{CO}_2 - \text{C}$  为  $783.0 \text{ g/kg}$ (表 6) 并且湿地松与其他两种森林土壤最大潜在碳排放差异显著 ( $P < 0.05$ )。

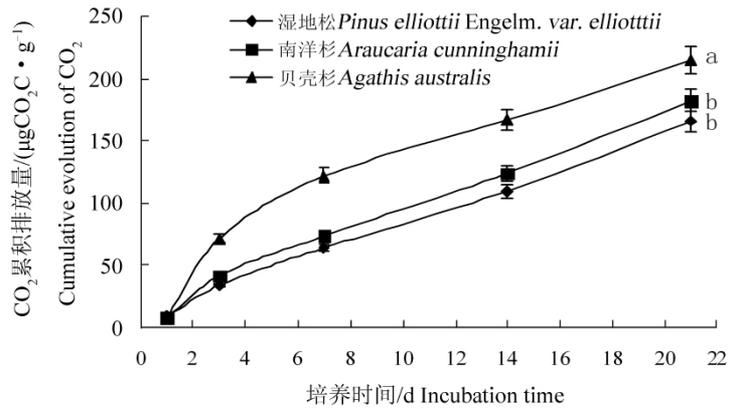


图 2 不同森林类型土壤潜在有机碳矿化累积排放量

Fig. 2 Potential organic C mineralization under different forest soil

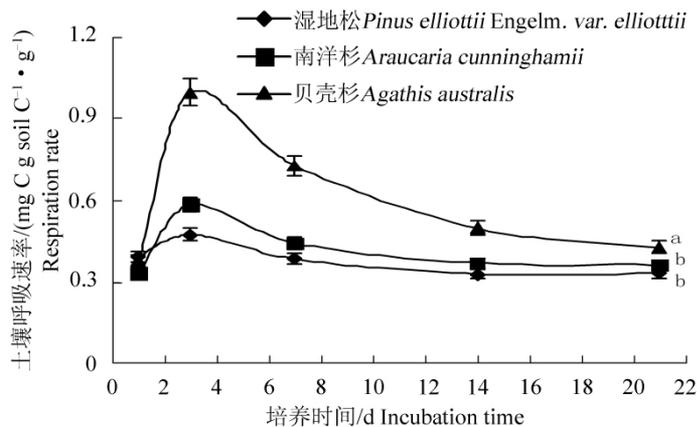


图 3 不同森林类型土壤在 21 d 培养的时间内土壤呼吸速率的变化

Fig. 3 Changes in the rate of respiration incubation 21 days in different forest types soils

表3 土壤潜在碳矿化最大排放量及参数

Tab.3 Comparison of calculated potentially mineralizable organic C pools ( $C_0$ ) and first order rate constants ( $k$ ) in soils

森林类型 Forest types	潜在碳排放量 $I/(g \cdot kg^{-1}) C_0$	系数 $K$	相关系数 $R$
湿地松 <i>Pinus elliottii</i> Engelm. var. <i>elliottii</i>	783.0b	0.007 5b	0.998
南洋杉 <i>Araucaria cunninghamii</i>	1 082.1a	0.001 2ab	0.990
贝壳杉 <i>Agathis australis</i>	1 117.8a	0.016 4a	0.997

同一列字母不同为差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different letters within columns showed significantly different at  $P < 0.05$ .

### 2.5 土壤呼吸与土壤养分的相关性分析

对土壤碳呼吸以及土壤养分子进行相关性分析,  $C_0$  与  $C_m$ 、 $C:N_{\text{Micro}}$  和 pH 关系显著,  $C_m$  与 pH 之间差异显著相关 (表4  $P < 0.01$ )。TC 与  $C_m$  和  $C_0$  均呈现出负显著相关 ( $P < 0.01$ )。SOC 与  $C_0$  和  $C_m$  之间成正相关, 但并不显著。对各森林土壤微生物代谢特性进行冗余分析 (RDA) [17], 其结果见图4, TC 和 TN 以及 SON 对  $C_0$  的影响是负相关的, 含水量对  $C_0$  和  $C_m$  关系基本上是相反的, 说明土壤 TC 含量、酸碱度、含水量是土壤呼吸的调控因子。

表4 土壤呼吸与土壤养分的相关性分析结果

Tab.4 Correlation between soil respiration and soil nutrition profiles

	$C_0$	$C_m$	SOC	SON	$C:N_{\text{Micro}}$	TP	TC	TN	$C:N_{\text{total}}$	moisture
$C_m$	0.611*									
SOC	0.375	0.308								
SON	-0.098	0.309	0.616*							
$C:N_{\text{Micro}}$	0.641*	0.102	0.561	-0.283						
TP	0.394	-0.125	0.668*	0.053	0.805**					
TC	-0.696*	-0.741**	-0.147	-0.184	-0.054	0.106				
TN	-0.185	-0.285	0.592*	0.36	0.317	0.669*	0.534			
$C:N_{\text{total}}$	-0.712**	-0.701*	-0.507	-0.449	-0.218	-0.256	0.857**	0.039		
moisture	-0.696*	-0.259	-0.078	0.058	-0.247	-0.287	0.756**	0.279	0.719**	
pH	0.683*	0.661*	0.548	0.477	0.215	0.292	-0.802**	0.014	-0.968**	-0.693*

$C_0$ : 最大潜在碳矿化;  $C_m$ : 培养 21 d 碳矿化;  $C:N_{\text{Micro}}$ : 微生物碳氮比; 全碳氮比; \* 和 \*\* 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著;  $n = 12$ 。

$C_0$ : maximum potential mineralizable organic carbon;  $C_m$ : potential mineralizable organic carbon after 21d;  $C:N_{\text{Micro}}$ : SOC: SON;  $C:N_{\text{total}}$ : TC: TN; \* and \*\* indicated significance at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  respectively;  $n = 12$ .

## 3 结论与讨论

可溶性有机质是能溶于水的有机化合物的统称, 是陆地生态系统中的一种重要且活跃的化学组分, 其含量的高低对土壤一系列的理化和生物学特性有着重要的影响。SOC 和 SON 主要来源于林木下的枯落物、腐殖质的分解、微生物生物量和根系分泌物等均与地上植被类型密切相关 [18-19]。本研究中, 尽管不同森林类型土壤 SOC 含量之间无显著差异, 但相对来说贝壳杉和南洋杉林地 SOC 含量比湿地松林要高。王清奎等 [20] 对杉木林进行过研究得出凋落物的增加会显著提高土壤有机碳氮结论, 所以通过凋落物形成的有机质就相对要高, 因此可以推测其南洋杉和贝壳杉针叶与湿地松树种所形成的凋落物分解速率不同所致。各林地 SON 含量跟 SOC 含量变化规律基本一致, 表现为南洋杉和贝壳杉均高于湿地松林, 保持了土壤碳氮的耦合关系 [21]。从图 1 看出, 南洋杉林地土壤的 SOC 和 SON 含量的变化出现了微小的变化, 很可能是在土壤微生物的作用下, SOC 被淋溶流失引起, 也有可能是土壤碳更多来自表层的枯落物, 而这些枯落物并没有被微生物分解 [22]。

在森林生态系统中,土壤呼吸是土壤碳库主要输出途径,在一定程度上反映了土壤生物活性和土壤物质代谢的强度。目前,土壤呼吸作为土壤生物活性和土壤肥力乃至透气性的指标而受到高度重视<sup>[23]</sup>。本文采用静态碱吸收法来测定土壤呼吸的大小,具有精度高,可控性强等优点<sup>[24]</sup>。从图2可以看出,土壤呼吸可以分为2个过程,首先是在培养3 d时间内,土壤呼吸排放的CO<sub>2</sub>量迅速增加,由于对土壤的含水量进行调节到最大田间持水量的60%,这样土壤微生物活性增加,对土壤有机质的分解速度加快。然后是在培养7 d后,3种林地土壤碳排放量均缓慢增加。在21 d的室内培养实验中,贝壳杉林地土壤呼吸一直处于最强状态,湿地松林土壤呼吸最弱,方差分析表明,与湿地松和南洋杉林土壤呼吸差异显著( $P < 0.05$ )。本研究是在22℃室内环境下进行培养,并且对其进行含水量干扰,将土壤含水量调节到田间最大持水量的60%,但出现高含水量的土壤呼吸强度不是最强,很可能是由于植物类型、微生物和土壤水分的共同影响。土壤含水量对土壤呼吸速率有一定的影响,但是在植物生长达到旺盛期时,林地土壤含水量的变幅很小,对土壤呼吸速率的影响也比较小<sup>[25]</sup>,这是对本结果的最好解释,因此可以说含水量并不是限制本研究森林土壤呼吸的主要因子<sup>[26]</sup>。

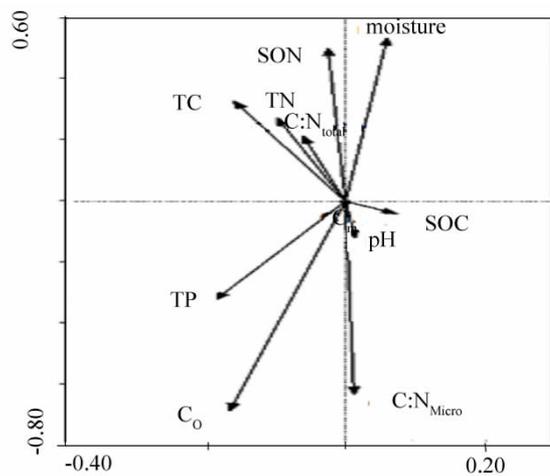
3种森林类型土壤呼吸速率曲线格局均为单峰型,最高峰出现在培养3 d的时候,贝壳杉林地土壤呼吸速率显著达到最高,CO<sub>2</sub>-C为0.99 mg/g soil C/h。Kraal等<sup>[27]</sup>外加单宁酸对土壤进行处理,呼吸速率峰值出现在第2天,其变化格局和土壤呼吸保持一致。第3天以后,3种林地土壤呼吸速率均降低,而且贝壳杉林地土壤降速最快。培养14 d后各土壤呼吸速率基本保持一定的水平线上,培养到21 d后,贝壳杉的呼吸速率仍最强,在整个培养过程中,呼吸速率均表现为贝壳杉林 > 南洋杉林 > 湿地松林。由于土壤呼吸在没有外界干扰的情况下,土壤呼吸在长时间培养后终将达到平衡,通过方程 $C_m = C_0 * (1 - \exp^{-kt})$ 对土壤呼吸潜在碳排放进行模拟,最终达到一个极大值C<sub>0</sub>,模拟的方程相关系数均在0.99以上,说明拟合效果很好。所得的模拟结果是贝壳杉C<sub>0</sub>为1117.8 g/kg,南洋杉林C<sub>0</sub>为1082.1 g/kg,湿地松林C<sub>0</sub>为783.0 g/kg,并且湿地松与其他两种森林土壤最大潜在碳排放差异显著。

对C<sub>0</sub>和C<sub>m</sub>进行相关分析,结果表明C<sub>0</sub>与C<sub>m</sub>、C:N<sub>Micro</sub>和pH关系显著,C<sub>m</sub>与pH之间差异显著相关( $P < 0.01$ )。TC与C<sub>0</sub>和C<sub>m</sub>均呈现出负显著相关,其原因可能是土壤碳更多来自表层的枯落物,而这些枯落物并没有被微生物分解。SOC与C<sub>0</sub>和C<sub>m</sub>之间成正相关,但并不显著。RDA分析能独立保持各个变量(土壤生物代谢指标)对森林类型的贡献率,在不同的变量组合下进行单个变量的统计学特征描述,进而决定变量的优劣<sup>[28]</sup>,本文对土壤微生物代谢特性进行冗余分析(RDA)结果表明pH与C<sub>0</sub>和C<sub>m</sub>方向基本上是同向,而TC和含水量与C<sub>0</sub>和C<sub>m</sub>方向基本上相反的,说明土壤pH、TC和含水量是土壤呼吸的调控因子。

参考文献:

#### 参考文献:

- [1]Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry 2000 48(1):7-20.
- [2]Zerva A, Mencuccini M. Short-term effects of clear felling on soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O fluxes in a *Sitka spruce* plantation [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005 37: 2025-2036.
- [3]Schlesinger W H. Biogeochemistry: An analysis of global change[M]. Academic Press, New York, 1997.



箭头方向及其长度表示各生物因子之间的关系程度。  
direction and length of arrows indicate relation levels among soil biochemical properties.

图4 土壤微生物代谢特性冗余分析(RDA)排序

Fig.4 Biplot of redundancy analysis (RDA) of the relationships among microbial metabolic profiles

- [4]杨阔,王传宽,焦振. 东北东部5种温带森林的春季土壤呼吸[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3155-3162.
- [5]Wang Y S, Xue M, Zheng X H, et al. Effects of environmental factors on N<sub>2</sub>O emission from and CH<sub>4</sub> uptake by the typical grasslands in the Inner Mongolia[J]. Chemosphere, 2005, 58: 205-215.
- [6]Maljanen M, Nykänen H, Moilanen M, et al. Greenhouse gas fluxes of coniferous forest floors as affected by wood ash addition[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 237: 143-149.
- [7]Yashiro Y, Kadir W R, Okuda T, et al. The effects of logging on soil greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148: 799-806.
- [8]Concilio A, Ma S, Li Q, et al. Soil respiration to prescribed burning and thinning in mixed - conifer and hardwood forests [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35: 1581-1591.
- [9]Isbell R F, The Australian soil classification [M]. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, 1996.
- [10]John S, David O. Performance of seven hardwood species underplanted to *Pinus elliottii* in south - east Queensland [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233: 303-308.
- [11]Chen C R, Xu Z H, Keay P, et al. Total soluble nitrogen in forest soils as determined by persulfate oxidation and by high temperature catalytic oxidation [J]. Australian Journal of Soil Research, 2005, 43: 515-523.
- [12]Rayment G E, Higginson F R. Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods [M]. Melbourne, Australia: Inkata Press, 1992.
- [13]Chen C R, Xu Z H, Mathers N J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68: 282-291.
- [14]Smith J L, Schobel R R, McNeal B L, et al. Potential errors in the first - order model for estimating soil nitrogen mineralization potentials [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 996-1000.
- [15]Burton J, Chen C R, Xu Z H, et al. Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39: 2723-2734.
- [16]周非飞,林波,刘庆. 青藏高原东缘亚高山针叶林人工恢复过程中的土壤呼吸特征 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1783-1790.
- [17]Kennedy N, Brodie E, Connolly J, et al. Impact of lime, nitrogen and plant species on bacterial community structure in grassland microcosms [J]. Environ. Microbiol, 2004, 6: 1070-1080.
- [18]Smolander A, Kitunen V. Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34: 651-660.
- [19]Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review [J]. Soil Science, 2000, 165: 277-304.
- [20]王清奎,汪思龙,于小军,等. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [21]Knops J M H, Bradley K L, Wedlin D A. Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling [J]. Ecology Letters, 2002, 5: 454-466.
- [22]Hannam K D, Prescott C E. Soluble organic nitrogen in forests and adjacent clearcuts in British Columbia, Canada [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33: 1709-1718.
- [23]Macfadyen A. Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1970(2): 9-18.
- [24]张金池,孔雨光,王因花,等. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸组分分离 [J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3144-3154.
- [25]Fang C J, Moncrieff B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33: 155-165.
- [26]刘源月,江洪,邱忠平. 亚热带典型森林生态系统土壤呼吸 [J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(4): 590-594.
- [27]Kraal P, Nierop K G J, Kaal J, et al. Carbon respiration and nitrogen dynamics in Corsican pine litter amended with aluminium and tannins [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41: 2318-2327.
- [28]ter Braak C J F, Smilaver P. CANOCO reference manual and user's guide to canoco for windows (version 4.5) [M/CD]. New York: Centre for Biometry Wageningen, 2002.