

次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸的季节变异及其主要影响因子

王国兵, 唐燕飞, 阮宏华*, 施政, 何容, 王莹, 蔺菲, 苏广鑫

(南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏省林业生态工程重点实验室 南京, 210037)

摘要: 土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分。随着全球气候变暖趋势逐渐明显, 土壤呼吸的时空变异及其对温度变化的响应已成为生态学研究的重要内容之一。利用 LI-6400-09 土壤碳通量观测仪, 在江苏省南京林业大学下蜀实验基地, 采用随机区组实验设计方法, 连续两年测定了北亚热带次生栎林和火炬松人工林土壤呼吸的季节动态变化, 结果表明: (1) 两种林分内土壤呼吸速率均具有明显的季节波动, 表现为: 在最冷的 1 月份, 土壤呼吸速率最低, 随着土壤温度的升高, 土壤呼吸速率也逐渐上升, 在 7、8 月份达到最大值, 随后又逐渐下降; (2) 次生栎林月平均土壤呼吸速率在 $0.271 \sim 3.22 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 年变异幅度为 11.88; 火炬松人工林月平均土壤呼吸速率在 $0.336 \sim 3.06 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 年变异幅度为 9.11; (3) 次生栎林土壤呼吸的 Q_{10} 值在 2.19 至 2.27 之间, 火炬松人工林土壤呼吸的 Q_{10} 值在 2.02 至 2.15 之间, 次生栎林土壤呼吸对温度的敏感性大于火炬松人工林; (4) 土壤呼吸速率与不同深度层次土壤温度之间均呈显著性正相关, 与土壤微生物生物量之间呈显著性负相关, 而与土壤含水率、凋落物输入量之间相关不显著。研究结果初步阐明了江淮流域北亚热带典型森林植被土壤呼吸的季节动态特征及主要影响因子, 为进一步揭示该区域森林土壤碳循环特点提供了理论基础。

关键词: 土壤呼吸; 季节变异; 次生栎林; 火炬松人工林; 温度敏感性

文章编号: 1000-0933(2009)02-0966-10 中图分类号: Q143, Q945, Q948, S718.5 文献标识码: A

Seasonal variation of soil respiration and its main regulating factors in a secondary oak forest and a pine plantation in north-subtropical area in China

WANG Guo-Bing, TANG Yan-Fei, RUAN Hong-Hua*, SHI Zheng, HE Rong, WANG Ying, LIN Fei, SU Guang-Xin

The Faculty of Forest Resources and the Environmental Science, Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing, 210037, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0966 ~ 0975.

Abstract: Soil respiration is an important component in carbon cycle of the terrestrial ecosystem. With global warming, the temporal and spatial variability of soil respiration and its sensitivity to temperature has been a central interest to ecologist in global change field. The seasonal variation of soil respiration was measured monthly by LI-6400-09 in a secondary oak forest and a pine plantation in an experiment with randomized block design from October, 2003 to September, 2005 in Xiashu Forest Experimental Site of Nanjing Forestry University, Jiangsu Province, Southeastern China. The results showed that: (1) There were significant seasonal variation of soil respiration both in oak forest and pine plantation, which were lowest in January with lowest soil temperature, and with the soil temperature increasing from January to July, soil respiration increased correspondingly and peaked in July or August, and then decreased progressively. (2) The monthly mean of soil respiration ranged from 0.271 to $3.22 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in oak forest and ranged from 0.336 to $3.06 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in pine plantation, respectively. (3) The Q_{10} value of soil respiration ranged from 2.19 to 2.27 in oak forest and ranged from

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370256, 30670313); 中国森林生态系统服务功能定位观测与评估技术研究(200704005)

收稿日期: 2007-09-10; 修订日期: 2008-04-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hruan1690@yahoo.com

2.02 to 2.15 in pine plantation, respectively. Moreover, the Q_{10} value in oak forest was higher than in pine plantation. (4) The soil respiration were significantly positively correlated with soil temperature, and significantly negatively correlated with soil microbial biomass, but no correlation with soil moisture or plant litterfall. Our results suggested that there were significant seasonal variation of soil respiration in sub-tropical area in Southeastern China and soil temperature was the main regulating factors.

Key Words: soil respiration; seasonal variation; oak forest; pine plantation; sensitivity to temperature

土壤是陆地生态系统最大的碳库,含有约 1500 Pg C^[1]。土壤碳库的微小变化足以引起大气 CO₂ 浓度的显著变化,从而对全球气候产生较大影响^[1,2]。土壤呼吸作为土壤碳库的主要输出途径和大气 CO₂ 的重要来源,其精确测定已成为全球变化研究中的关键问题之一。土壤呼吸是一个受生物和非生物因素控制的非常复杂的过程,具有很大的空间和时间变异性^[3~5]。那么,调控土壤呼吸时间和空间变化的主要因子是什么?目前还存在相当多的争论^[6,7]。因此,随着全球气候变暖趋势逐渐明显,研究土壤呼吸的时空变异规律及调控机理已成为生态学研究的重要内容之一。

最近几年,随着中国陆地生态系统 CO₂ 通量观测研究网络的建立,在土壤呼吸研究方面取得了大量的观测数据和研究成果,为阐明我国森林土壤呼吸特点及其在全球碳循环中的地位与作用做出了重要贡献,但涉及森林土壤呼吸季节动态变化及其变异机理的研究报道很少,而有关北亚热带地区森林土壤呼吸及其季节动态变化的研究,目前还鲜见报道。本研究以北亚热带江淮流域典型的次生落叶阔叶栎林和火炬松人工林生态系统为研究对象,采用定位连续观测的方法测定土壤呼吸,研究了土壤呼吸的季节变异规律及其主要影响因子,为深入研究该区域森林土壤碳循环的特征以及为准确预测未来全球气候变化的趋势提供部分依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于江苏省句容市境内的南京林业大学下蜀森林生态定位研究站(31°59'N, 119°14'E)。该区属北亚热带季风气候区,干湿寒暑分明,光照充足。年平均气温 15.3 °C,平均无霜期 233 d,年平均相对湿度 79.3%,年平均降水量 1 055.6 mm,年平均蒸发量 1 309.1 mm。土壤以黄棕壤和山地黄棕壤为主,土层厚度一般在 50 cm 以上,是我国沿海地区棕壤和黄壤的过渡类型,也是北亚热带湿润森林下的地带性土壤。

实验区分别设在空青山次生栎林和火炬松人工林内:

(1) 次生栎林 海拔 170 m,坡度约 15°,土层厚度 30~50 cm;优势树种为栓皮栎(*Quercus variabilis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)和枫香(*Liquidambar formosana*),组成比约 10:10:1,平均树龄 55a,平均树高 17.4 m,平均胸径 32.5 cm,林分密度为 453 株/hm²,郁闭度 90%;林下植被稀少,灌木主要有六月雪(*Serissa foetida*)、牛鼻栓(*Fortunearia sinensis*)和山胡椒(*Lindera glauca*)等,草本植物主要有麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、沿阶草(*Ophiopogon japonicus*)、络石(*Trachelospermum jasminoides*)和野韭(*Allium ramosum*)等;枯枝落叶层厚度平均约 2cm。

(2) 火炬松人工林 位于次生栎林的东部偏下位置,其前身是次生栎林;海拔 120 m,坡度约 8°,土层厚度 35~60 cm;优势树种为火炬松(*Pinus taeda*),平均树龄 25a,平均树高 11.2 m,平均胸径 21.3 cm,林分密度为 640 株/hm²,郁闭度 70%;林下灌木主要有篾竹(*Phyllostachys nidularia*),另有少量君迁子(*Diospyros lotus*)等植物;草本植物稀少,主要有茅莓(*Rubus parvifolius*)等;枯枝落叶层厚度平均约 2.5cm。两林分的主要土壤理化性质见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本研究采用随机区组的实验设计方法(randomized block design)^[9],分别在空青山栓皮栎林和火炬松人工

林内各随机设置 4 个区组,每个区组设置两个不同处理的 2m × 2m 的样地,其中一个作凋落物清除处理(litter exclusion),另一个作为对照处理(control)。凋落物清除处理方法:在样地上搭设一金属架(2m 长 × 2m 宽 × 1.5m 高);将架内林地上的凋落物清除干净;架子顶部用尼龙网遮住(网眼 1mm × 1mm),形成网兜状,以便收集凋落物。

表 1 次生栎林与火炬松人工林主要土壤理化性质

Table 1 Major soil properties in secondary oak forest and pine plantation (mg·g⁻¹)

项目 Item	C	N	Ca	Mg	S	P	Pb	Zn	pH
次生栎林 Secondary oak forest	27.198	4.753	2.242	2.951	0.380	0.151	0.030	0.076	3.92
火炬松人工林 Pine plantation	12.381	3.736	1.388	2.924	0.219	0.059	0.025	0.062	3.99

1.2.2 土壤呼吸速率的测定

利用美国 Licor 公司生产的 LI-6400 便携式光合作用测量系统配备 LI-09 土壤呼吸室测定土壤呼吸速率。在每个样地中各放置 1 个用于土壤呼吸速率测定的土壤隔离圈(直径 10 cm,高 4 cm),2 种林分 4 个区组 2 个不同处理一共放置 16 个土壤隔离圈。每月月末(20 ~ 30 日期间)选择天气状况比较好的日期,在 9:00 ~ 11:00 期间进行土壤呼吸测定,并且在每个土壤隔离圈上测定时记录 3 次观测数据。为了减小安放土壤隔离圈对土壤呼吸速率的影响,提前 1 周将土壤隔离圈埋入土壤大约 2 cm,以后每个月的测定在固定土壤圈上进行,并且在每次测定前一天,将测定点土壤隔离圈内的地表植被自土壤表层彻底剪除,尽量不破坏土壤,以减少土壤扰动及根系损伤对测量结果的影响。从 2003 年 10 月开始,到 2005 年 9 月结束。

1.2.3 土壤微生物生物量的测定

用取样头长 10cm、断面直径 2cm 的土钻分别在每个样地内随机钻取 0 ~ 10cm 深度的土壤约 200g,分别装入自封袋中并做好标记,每月 2 种林分 2 个不同处理 4 个重复样地共 16 个土壤样品。每月收集的土壤样品要及时带回实验室进行简单处理,挑除其中的石块、根系、小动物等杂物,然后采用氯仿熏蒸-培养法测定土壤微生物生物量^[8]。从 2003 年 10 月开始,到 2005 年 9 月结束。

1.2.4 凋落物输入量的测定

将尼龙网兜内收集到的凋落物分别按叶、枝、果和有机碎屑等分类烘干称重,每个月月底收集 1 次,从 2003 年 11 月开始,到 2005 年 9 月结束。

1.2.5 土壤温度和土壤含水率的测定

每个样地的土壤温度采用 Li-6400 附带的温度探针测定,同时测定 5、10 cm 和 15 cm 3 个层次的土壤温度。土壤含水率的测定方法是:将新鲜土样取 10g 放入烘箱中在 105℃ 的温度条件下烘干至恒重。土壤温度的测定与土壤呼吸测定同步,土壤含水率的测定与土壤微生物量测定同步。从 2003 年 10 月开始,到 2005 年 9 月结束。

1.2.6 数据分析

所有数据均利用 SAS 统计软件(SAS institute,2000)进行分析。因为在同一土壤圈上对土壤呼吸(R_s)进行了重复测定,因此采用重复测量双因素方差分析方法分析了不同处理对土壤呼吸的影响和土壤呼吸在不同月份间的变异^[9]。采用指数回归模型:分析土壤呼吸与土壤温度的相关关系^[10];采用一般线性模型分析土壤呼吸与土壤含水率、土壤微生物量、林地凋落物输入量的相关关系。

2 研究结果

2.1 次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸速率的季节变异

从图 1 中可以看出,不论是次生栎林还是火炬松人工林,不论是凋落物去除处理样地,还是对对照样地,土壤呼吸速率均表现出明显的季节变异,土壤呼吸速率在不同月份间具有显著性差异(表 2)。在最冷的 1 月份,土壤呼吸速率最低,随着土壤温度的升高,土壤呼吸速率也逐渐上升,在 7、8 月份达到最大值,随后又逐渐下降。次生栎林月平均土壤呼吸速率在 0.271 ~ 3.22 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,变异幅度(月平均土壤呼吸最大

值/最小值)达 11.88;火炬松人工林月平均土壤呼吸速率在 $0.336 \sim 3.06 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,变异幅度达 9.11。

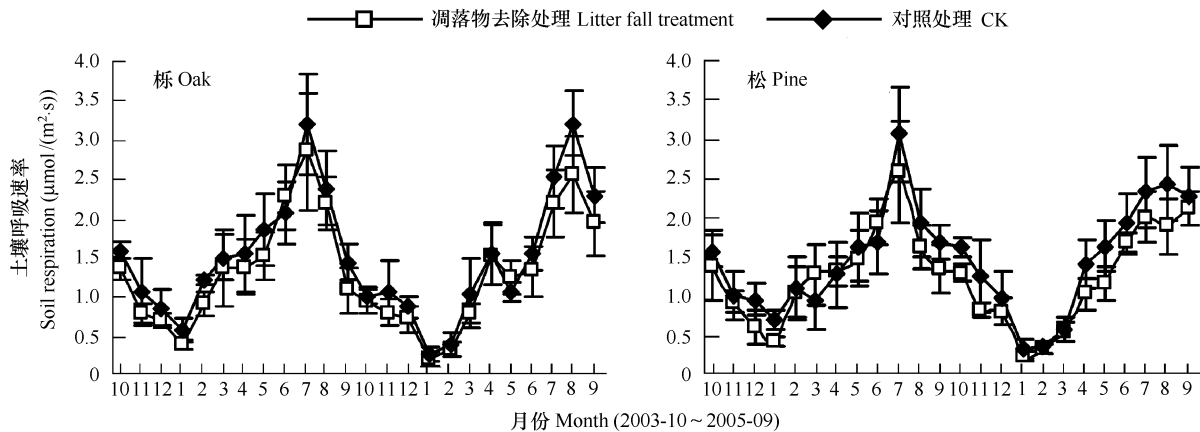


图 1 次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸的季节变异(平均值 \pm 标准误)

Fig. 1 Seasonal variation of soil respiration in secondary oak forest and pine plantation (mean \pm SE)

不论是次生栎林还是火炬松人工林,地表凋落物去除处理样地与对照样地相比,土壤呼吸速率显著降低(表 2),然而,二者土壤呼吸速率的季节性变异却具有高度一致性(图 1),这说明虽然地表凋落物层的 CO_2 释放在整个土壤呼吸中占有不可忽视的比例,但清除地表凋落物后并没有对样地的土壤呼吸速率的季节变异产生显著影响。次生栎林凋落物去除处理样地的 2a 的平均土壤呼吸速率为 $1.316 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而对照样地为 $1.512 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。火炬松人工林凋落物去除处理样地的两年的平均土壤呼吸速率为 $1.253 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而对照样地为 $1.452 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可粗略估算出,次生栎林地表凋落物层对土壤呼吸的贡献率约 12.92%,火炬松人工林约 13.66%。

表 2 不同处理对次生栎林和火炬松人工林土壤呼吸影响的重复测量方差分析

Table 2 Repeated Measures ANOVA statistics for soil respiration in a secondary oak forest and a pine plantation

项目 Item	DF	MS	F	P
次生栎林 Secondary oak forest				
Treatment	1	5.0029482	21.44	<0.0001
Month	23	4.4978548	19.28	<0.0001
Treatment \times Month	23	0.1709219	0.73	0.8059
火炬松人工林 Pine plantation				
Treatment	1	2.6894801	11.13	0.0011
Month	23	3.4286307	14.19	<0.0001
Treatment \times Month	23	0.1150084	0.48	0.9799

自变量因素为处理(凋落物去除处理与对照处理)和月份(2003 年 10 月至 2005 年 9 月) Independent variables are treatment (control versus litter-exclusion) and month (October, 2003 – September, 2005)

2.2 土壤温度、土壤含水率的季节动态变化及其与土壤呼吸的关系

2.2.1 土壤温度、土壤含水率的季节动态变化

从图 2 中可以看出,不论是次生栎林还是火炬松人工林,不论是凋落物去除处理样地,还是对照样地,土壤温度均表现出明显的季节动态变化,并且具有一致的变化趋势,具体表现为:土壤温度在 1 月份最低,随后逐渐升高,在 7、8 月份达到最大值,而后又逐渐降低。凋落物去除处理样地的土壤温度与对照样地之间差异很小,说明凋落物去除后,对样地的土壤温度没有产生显著影响。

从图 3 中可以看出,虽然次生栎林与火炬松人工林的土壤含水率在不同月份间有较大变异,但是土壤含

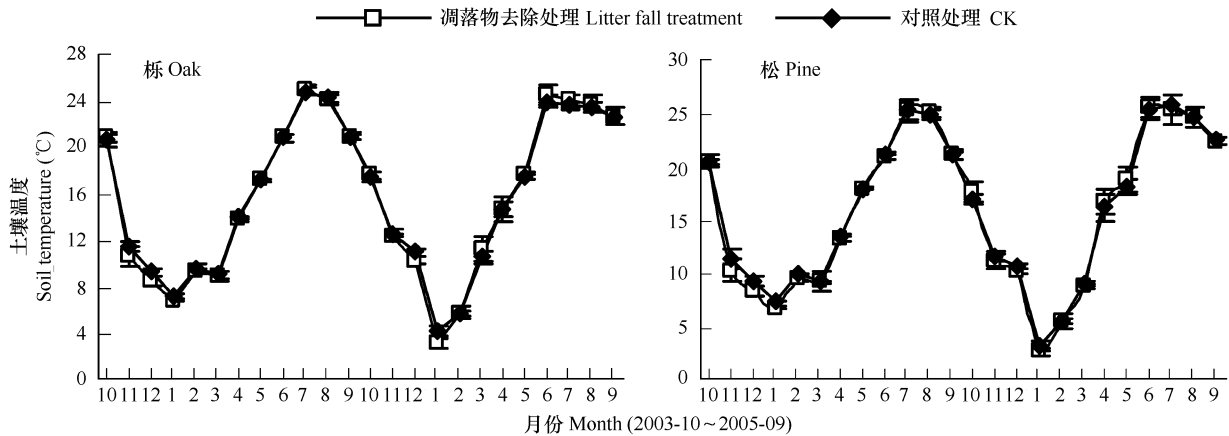


图2 次生栎林与火炬松人工林土壤温度的季节动态变化(平均值 \pm 标准误)

Fig. 2 Seasonal variation of soil temperature in secondary oak forest and pine plantation (mean \pm SE)

水率集中在 25% ~ 35% 之间波动,并且通过两年的数据对比发现,土壤含水率在不同月份间的波动没有明显规律。这是由于土壤含水率受降水强度和蒸发强度以及土壤的持水能力的影响较大,并且在降水之后土壤含水率迅速上升,而在短短几天内又稳定在降水之前的水平。受气候影响,不同月份的降水量具有较大的随机性,并且其年际变化也往往具有较大差异,从而导致土壤含水率在一年中的动态变化具有较大的不确定性。凋落物去除后,样地的土壤含水率在不同月份间与对照样地相比均略有降低,说明地表凋落物层对土壤水分的保持具有一定的贡献。

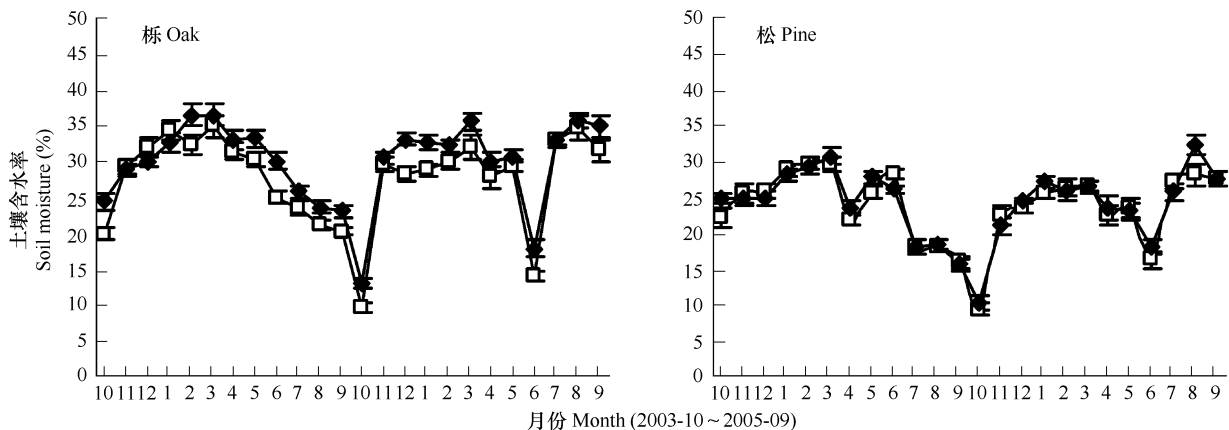


图3 次生栎林与火炬松人工林土壤含水率的季节动态(平均值 \pm 标准误)

Fig. 3 Seasonal variation of soil moisture in secondary oak forest and pine plantation (mean \pm SE)

2.2.2 土壤温度、土壤含水率与土壤呼吸的关系及 Q_{10} 值

不论是次生栎林还是火炬松人工林,土壤呼吸速率与不同深度层次的土壤温度均呈显著正相关 ($P < 0.01$),土壤呼吸速率随土壤温度的增加而呈指数增高(图4)。次生栎林土壤呼吸速率与 10cm 深土壤温度的相关性最好,与 5cm 深的相关性次之,与 15cm 深的相关性稍差;火炬松人工林土壤呼吸速率与 15cm 深土壤温度的相关性最好,与 10cm 深的相关性次之,与 5cm 深的相关性稍差。对于次生栎林,土壤温度可以解释 72.6% ~ 72.9% 的土壤呼吸变化;对于火炬松人工林,土壤温度可以解释 79.6% ~ 81.1% 的土壤呼吸变化。此次研究中,土壤呼吸速率与土壤含水率之间无显著相关关系 ($P > 0.05$)。

根据 Q_{10} 值的计算公式 $Q_{10} = e^{10 \times \beta_1}$,计算土壤呼吸的 Q_{10} 值,其中 β_1 是土壤呼吸速率的温度指数曲线方程中 $y = \beta_0 e^{\beta_1 T}$ 的温度反应系数^[10]。以 5cm 深土壤温度为计算依据,次生栎林的 Q_{10} 值为 2.19,火炬松人工林为 2.02;以 10cm 深土壤温度为计算依据,次生栎林的 Q_{10} 值为 2.23,火炬松人工林为 2.09;以 15cm 深土壤温度

为计算依据,次生栎林的 Q_{10} 值为 2.27,火炬松人工林为 2.15。次生栎林土壤呼吸对温度的敏感性(Q_{10} 值)显著大于火炬松人工林($P < 0.05$)。

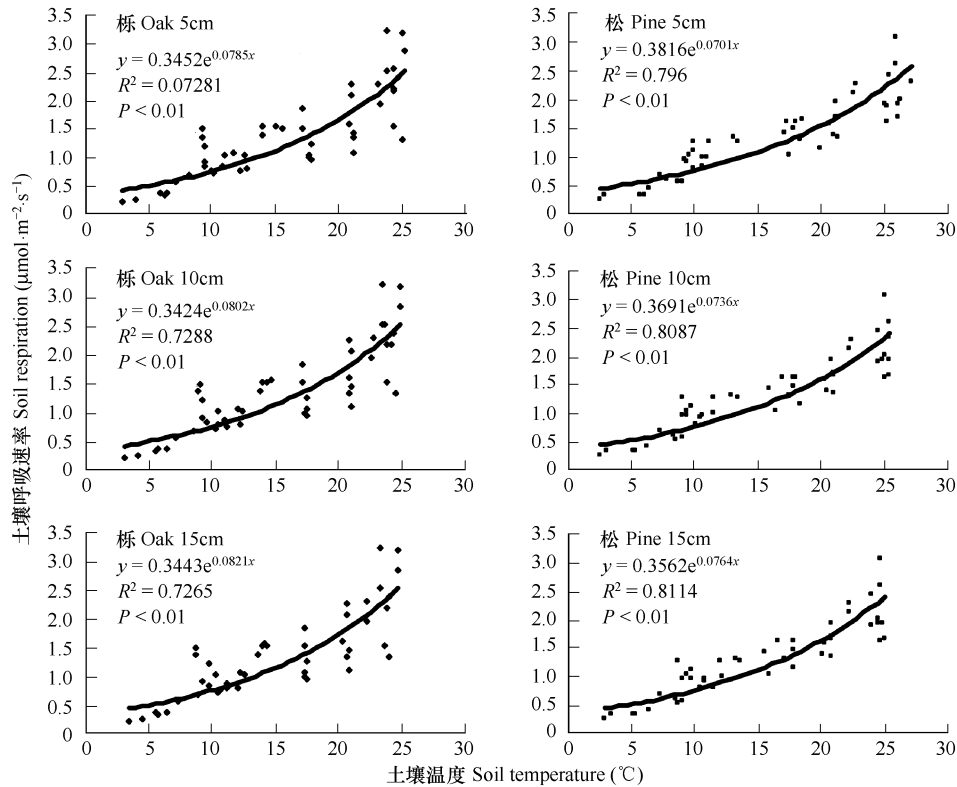


图4 土壤呼吸速率与不同深度层次土壤温度的指数相关关系

Fig. 4 The exponential relationship between soil respiration and soil temperature of different depth

2.3 土壤微生物生物量、地表凋落物输入量的季节动态变化及其与土壤呼吸的关系

2.3.1 土壤微生物生物量、地表凋落物输入量的季节动态变化

由图5可以看出,次生栎林和火炬松人工林的土壤微生物生物量碳含量均具有显著的季节动态变化,且其变化趋势一致。2003年10月~2004年2月,林内土壤微生物生物量碳持续上升,并维持在较高水平;而2004年3月~2004年7月,土壤微生物生物量碳持续下降,2004年8月小幅回升,在9、10月份又持续下降;2004年10月~2005年9月,其变化总体上与上一年相似,都表现为在林木生长旺季土壤微生物生物量碳维

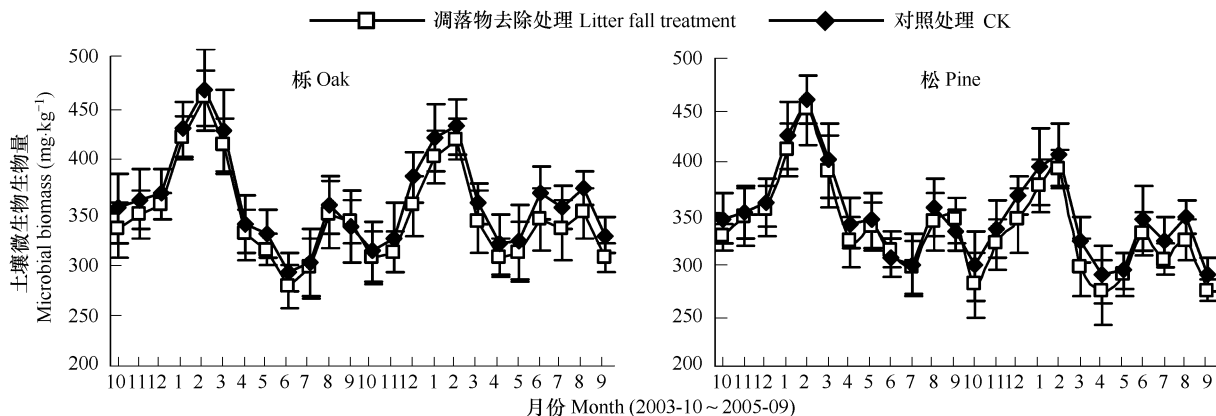


图5 次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量的季节动态(平均值 \pm 标准误)

Fig.5 Seasonal variation of soil microbial biomass in secondary oak forest and pine plantation(mean \pm SE)

持在较低水平,而在林木休眠季节,土壤微生物生物量碳维持在较高水平。

由图 6 可知,次生栎林与火炬松人工林地表凋落物输入量在不同月份间有明显差异。次生栎林全年总凋落量为 $742.52 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,叶、枝条和果实的凋落量分别占 60.1%、19.2% 和 10.8%,花的凋落主要在每年的 4 月份,约占全年总凋落量的 4%;11 月和 12 月期间是栎林凋落物的集中凋落时间,约占全年凋落物总量的 46.9%。火炬松人工林全年总凋落量为 $533.92 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,叶、枝条和果实的凋落量分别占 91.8%、6.5% 和 1.8%;火炬松人工林 2003 年 11 月和 2004 年 10 月凋落量最大,分别约占全年凋落物输入总量的 30.9% 和 22.8%。

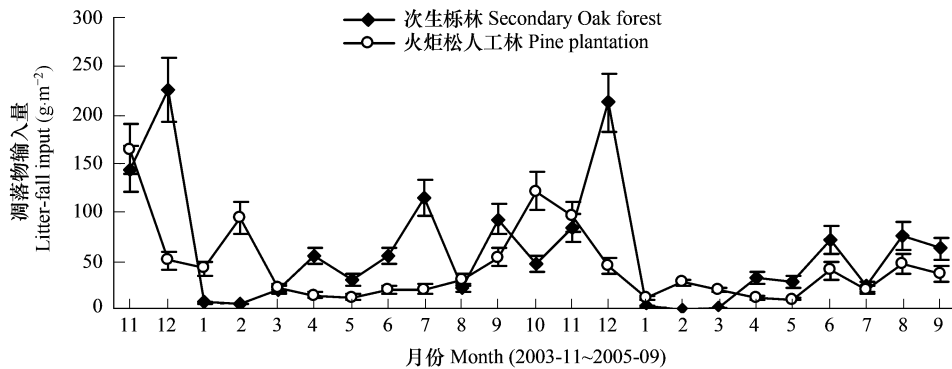


图 6 次生栎林与火炬松人工林地表凋落物输入量的季节动态(平均值 \pm 标准误)

Fig. 6 Seasonal variation of litter-fall input in secondary oak forest and pine plantation (mean \pm SE)

2.3.2 土壤微生物生物量、地表凋落物输入量与土壤呼吸的关系

利用两年内每个月测定数据的平均值,分析了土壤呼吸速率与土壤微生物生物量、地表凋落物输入量之间的相关关系。由于凋落物为凋落物去除处理样地上方的网兜状帐篷内所收集,分析其与凋落物去除处理样地土壤呼吸速率之间的关系没有实际意义,因此只对对照处理样地土壤呼吸与林地凋落物输入量间的相关关系作了分析,从 2003 年 11 月开始收集凋落物数据,到 2005 年 9 月结束,共有 23 个凋落物月平均值数据。结果表明,土壤呼吸速率与土壤微生物生物量之间呈负线性相关关系,并且达到了显著性水平 ($P < 0.05$) (图 7),而与凋落物输入量之间没有显著性相关关系 ($P > 0.05$)。

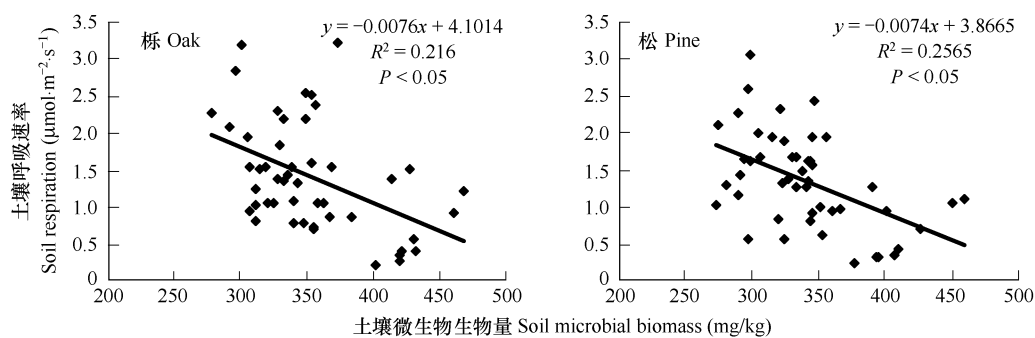


图 7 土壤呼吸速率与土壤微生物生物量的相关关系

Fig. 7 The relationship between soil respiration and soil microbial biomass

3 讨论

3.1 次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸速率的季节性变异

许多研究表明,土壤呼吸具有明显的季节性变化^[11-17]。研究表明,在北亚热带地区,次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸具有明显的季节性变异,并且与土壤温度的变化趋势一致,均表现为土壤呼吸速率夏季最高,冬季最低,这与其他人的研究结果一致^[11-13,16-19]。这是由于土壤呼吸是一个受生物和非生物因素控制的非

常复杂的过程,而这些生物因素和非生物因素可能会随着季节的变化而发生变化,从而导致土壤呼吸具有明显的季节性变异。

3.2 土壤温度、土壤含水率对土壤呼吸季节变异的影响

土壤温度是影响土壤呼吸的一个非常重要的因子,土壤水分是影响土壤呼吸的另一个重要因子,仅次于土壤温度^[20,21]。土壤呼吸速率与土壤含水率之间没有显著性相关关系。这是由于在湿润的北亚热带季风气候区,土壤水分充足,土壤含水率集中在 25% ~ 35% 之间波动,而土壤含水率在特定范围或较小范围内变化,不足以影响植物根系与土壤微生物的活动,因此难以甄别出土壤湿度对土壤呼吸的影响^[22]。此外,实验中观测到的土壤湿度变化范围如果太小,土壤呼吸受土壤湿度变化的影响也可能被其它因子的影响或系统误差所掩盖^[23]。总之,土壤湿度对土壤呼吸的影响较为复杂,取决于其与土壤温度和其它环境因子的共同配置状况。黄承才等^[24]指出,在湿润的亚热带季风气候区,土壤含水率不是土壤呼吸的限制性因子,其对土壤呼吸的综合影响和直接效应相对较小,土壤温度是制约中亚热带地区的青冈常绿阔叶林(*Quercus glauca*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)林和茶园(*Camellia sinensis*)土壤呼吸的主导因子。

土壤呼吸的季节动态变化受气候条件变化的控制,其中土壤温度和土壤湿度通常是最主要的影响因子^[17]。一些研究表明,土壤呼吸的季节变化主要归因于土壤温度的变化^[25-28],而其它一些研究表明,土壤呼吸呈现明显的季节变化与土壤温度和土壤含水率的共同变化有关^[29-31]。土壤呼吸的季节变化与土壤温度的季节变化一致,并且土壤温度可以解释 72.6% ~ 72.9% 的次生栎林土壤呼吸的季节变化,可以解释 79.6% ~ 81.1% 的火炬松人工林土壤呼吸的季节变化,而土壤含水率与土壤呼吸无显著相关,表明在北亚热带地区土壤温度是调控土壤呼吸季节波动的主导因子。

3.3 土壤微生物生物量、凋落物输入对土壤呼吸季节变异的影响

在这次研究中,土壤呼吸速率与土壤微生物生物量呈显著性负相关关系。这是由于土壤微生物的活动受土壤温度、土壤养分状况以及植物根系与土壤微生物对土壤养分的竞争状况等有关,导致土壤微生物生物量的季节波动与土壤呼吸的季节变化趋势相反,在林木生长旺季维持在较低水平,而在林木休眠季节维持在较高水平。土壤呼吸速率与土壤微生物生物量呈显著负相关,也说明土壤微生物生物量不是影响土壤呼吸季节变异的主要因子。

此次研究中,虽然地表凋落物去除处理样地的土壤呼吸速率显著低于对照样地,但是凋落物去除处理并没有改变土壤呼吸速率的季节性变异规律,而土壤呼吸速率与凋落物输入量之间也没有显著性相关关系,表明凋落物输入只是增加了有机碳向土壤有机质层或更深土壤层次的输入,但是对土壤呼吸的季节性变异没有显著影响。

3.4 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸对温度的敏感性

土壤呼吸对温度的敏感性常用 Q_{10} 值来表示, Q_{10} 值表示温度每升高 10℃ 土壤呼吸的变化比率。由于受温度、水分、生物、土壤理化性质等因素的影响,土壤呼吸对温度的敏感性在时间和空间上都存在着较大的差异^[1-2,32]。陆地生态系统土壤呼吸的 Q_{10} 值变化在 1.3 ~ 5.6 之间,一般在高纬度地区 Q_{10} 值比较大,在低纬度地区 Q_{10} 值比较小^[1,33]。次生栎林土壤呼吸的 Q_{10} 值在 2.19 至 2.27 之间,与北亚热带-暖温带过渡区锐齿栎林土壤呼吸 Q_{10} 值($Q_{10} = 2.13$)接近^[34];火炬松人工林土壤呼吸的 Q_{10} 值在 2.02 至 2.15 之间,明显高于中亚热带马尾松人工林土壤呼吸 Q_{10} 值($Q_{10} = 1.39$)^[15]。此外,土壤呼吸的 Q_{10} 值随着土壤深度的增加而增加,这与 Fierer 的研究结果一致^[35],这主要是由于随着土壤深度的增加土壤温度的变化幅度减少而造成的。以不同深度层次的土壤温度为计算依据,得出的 Q_{10} 值可能有显著差别,所以在比较和评价土壤呼吸对温度的敏感性时,需要注意在同一土壤深度层次下进行。

总之,通过连续两年土壤呼吸的定位测定,结果表明在北亚热带区域,次生栎林与火炬松人工林的土壤呼吸均具有趋势一致的显著的季节变化,两种林分土壤呼吸的季节性变异主要受土壤温度的控制。次生栎林土壤呼吸对温度的敏感性显著大于火炬松人工林,表明在未来全球气候变暖的背景下,次生栎林可能较火炬松

人工林向大气释放更多的 CO₂。

References:

- [1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation. *Tellus B*, 1992, 44: 81—99.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7—20.
- [3] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant Soil*, 1998, 205: 135—146.
- [4] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 1625—1635.
- [5] Xu M, Ye Q. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determine by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical*, 2001, 15: 687—696.
- [6] Gough C M, Weiler J R. The influence of environmental, soil carbon, root and stand characteristics on soil CO₂ efflux in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations located on the South Carolina Coastal Plain. *Forest Ecology and Management*, 2004, 191: 353—363.
- [7] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, *et al.* Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 418—425.
- [8] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8: 189—202.
- [9] Ruan H H, Zou X M, Scatena F N, *et al.* Asynchronous fluctuation of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest. *Plant and Soil*, 2004, 260: 147—154.
- [10] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396: 570—572.
- [11] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 35—45.
- [12] Xu M, Ye Q. Soil surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variation in a young *ponderosa* pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7: 667—677.
- [13] Widen B. Seasonal variation in forest floor CO₂ exchange in a Swedish coniferous forest. *Agric For Meteorol*, 2002, 111: 283—297.
- [14] Epron D, Nouvellon Y, Roupsard O, *et al.* Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. *For Ecol Manage*, 2004, 202: 149—160.
- [15] Wei H D, Ma X Q. Dynamics of soil respiration in three major plantations in mid-subtropical zone. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*, 2006, 35(3): 272—277.
- [16] Chu J X, Zhang X Q. Dynamic and fractionalization of soil respiration under three different land use covers in the subalpine region of western Sichuan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1693—1700.
- [17] Myroslava Khomik, Altaf Arain M, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixed wood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 244—256.
- [18] Subke J A, Reichstein M, Tenhunen J D. Explaining temporal variation in soil CO₂ efflux in a mature spruce forest in Southern Germany. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35: 1467—1483.
- [19] Wang C K, Yang J Y, Zhang Q Z. Soil respiration in six temperate forests in China. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1—12.
- [20] Yang P, Du B H. Research dynamics on overseas soil CO₂ emission. *Agricultural Meteorology*, 1996, 17(1): 48—50.
- [21] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622—625.
- [22] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology & Biochemistry*, 1983, 22: 153—160.
- [23] Yang Y S, Chen G S, Dong B, *et al.* Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953—958.
- [24] Huang C C, Ge Y, Chang J, Lu R, Xu Q S. Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 324—328.
- [25] Longdoz B, Yernaux M, Aubinet M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biol*, 2000, 6: 907—917.
- [26] Drewitt G B, Black TA, Nesic Z, *et al.* Measuring forest floor CO₂ fluxes in a Douglas-fir forest. *Agric For Meteorol*, 2002, 110: 299—317.
- [27] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, *et al.* Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Biology &*

- Biochemistry, 2004, 36: 237 – 243.
- [28] Liang N S, Nakadai T, Hirano T, *et al.* In situ comparison of four approach approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest Agric For Meteorol, 2004, 123: 97 – 117.
- [29] Vincent G, *et al.* Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38: 2527 – 2535.
- [30] Luan J W, Xiang C H, Luo Z S, Gong Y B. Research advances in forest soil respiration. Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(12): 2451 – 2456.
- [31] Yoshiko Kosugi, *et al.* Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. Agricultural and Forest Meteorology, 2007.
- [32] Fung I Y, Tucker C J, Prentice K C. Application of advanced very high resolution vegetation index to study atmosphere-biosphere exchange of CO₂. Geophys Res, 1987, 92: 2999 – 3015.
- [33] Chen H, Harmon M E, Tian H Q. Effects of global change on litter decomposition in terrestrial ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21: 1549 – 1563.
- [34] Chang J G, Liu S R, Shi Z M, *et al.* Response of soil respiration to soil temperature and moisture regimes in the natural forest of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(12): 21 – 27.
- [35] Fierer N, Allen A S, Schimel J P, *et al.* Controls on microbial CO₂ production; A comparison of surface and subsurface soil horizons. Global Change Biology, 2003, 9: 1322 – 1332.

参考文献:

- [15] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带 3 种主要人工林的土壤呼吸动态. 福建农林大学学报(自然科学版), 2006, 35(3): 272 ~ 277.
- [16] 褚金翔, 张小全. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分. 生态学报, 2006, 26(6): 1693 ~ 1700.
- [20] 杨平, 杜宝华. 国外土壤二氧化碳释放问题的研究动态. 中国农业气象, 1996, 17(1): 48 ~ 50.
- [23] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. 生态学报, 2004, 24(5): 953 ~ 958.
- [24] 黄承才, 葛滢, 常杰, 卢蓉, 徐青山. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. 生态学报, 1999, 19(3): 324 ~ 328.
- [30] 栾军伟, 向成华, 骆宗诗, 宫渊波. 森林土壤呼吸研究进展. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2451 ~ 2456.
- [33] 陈华, Mark E Harmon, 田汉勤. 全球变化对陆地生态系统枯落物分解的影响. 生态学报, 2001, 21: 1549 ~ 1563.
- [34] 常建国, 刘世荣, 史作民, 康冰, 陈宝玉. 锐齿栎林土壤呼吸对土壤水热变化的响应. 林业科学, 2006, 42(12): 21 ~ 27.