

# 施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤呼吸的影响

贾淑霞 王政权\* 梅莉 孙玥 全先奎 史建伟

于水强 孙海龙 谷加存

(东北林业大学林学院 哈尔滨 150040)

**摘要** 以落叶松 (*Larix gmelinii*) 和水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 人工林为研究对象, 采用动态气室法 (LI-6400-09 气室连接到 LI-6400 便携式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析系统) 对两种林分的土壤呼吸速率进行了观测, 探讨了细根生物量、根中氮含量与土壤呼吸速率的关系, 以及施肥对细根生物量、根中氮含量和土壤呼吸速率的影响。结果表明: 1) 施肥导致落叶松和水曲柳林分的活细根生物量降低 18.4% 和 27.4%, 死细根生物量分别降低了 34.8% 和 127.4%; 2) 施肥使落叶松和水曲柳林地土壤呼吸速率与对照相比分别减少了 34.9% 和 25.8%; 3) 施肥对根中氮含量没有显著影响; 4) 落叶松和水曲柳林地的土壤呼吸与土壤温度表现出相同的季节变化, 两种林分的土壤呼吸速率与地下 5 和 10 cm 处的温度表现出明显的指数关系, 其相关性  $R^2 = 0.93 \sim 0.98$ 。土壤呼吸温度系数  $Q_{10}$  的范围在 2.45 ~ 3.29。施肥处理对  $Q_{10}$  没有产生影响, 施肥处理导致细根生物量减少可能是引起林地土壤呼吸速率下降的主要原因。

**关键词** 施肥 细根生物量 细根氮含量 土壤呼吸 落叶松 水曲柳

## EFFECT OF NITROGEN FERTILIZATION ON SOIL RESPIRATION IN *LARIX GMELINII* AND *FRAXINUS MANDSHURICA* PLANTATIONS IN CHINA

JIA Shu-Xia, WANG Zheng-Quan\*, MEI Li, SUN Yue, QUAN Xian-Kui, SHI Jian-Wei, YU Shui-Qiang, SUN Hai-Long, and GU Jia-Cun

School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract Aims** Soil respiration is important in carbon flux and changes in carbon cycling in forest soil. Understanding belowground response to fertilization is critical in assessing soil carbon dynamics and atmospheric nitrogen deposition. The objectives of this study were to: 1) compare soil respiration rates between *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations in the same field site, 2) examine the effects of nitrogen fertilization on soil respiration rate in both plantations, and 3) analyze the relationships between soil respiration rate and soil temperature, fine root biomass and nitrogen contents.

**Methods** In May 2002, we established six plots in each plantation type at the Maershan Forest Research Station, and from 2003 to 2005 we fertilized three plots and left three unfertilized as the control. We placed ten soil chambers randomly in each plot in July 2004 and measured soil respiration rates using a soil chamber system from August 2004 to October 2005. At the same time, we estimated fine root standing biomass in each plot by sampling eight soil cores monthly, calculated dry mass and analyzed nitrogen content for each fine root sample.

**Important findings** Fine root standing biomass of *F. mandshurica* ( $229 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) was greater than that of *L. gmelinii* ( $158 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), and the average difference in soil respiration rates during the growing season was 19.8%. Nitrogen fertilization significantly decreased fine root standing biomass 27.4% in *F. mandshurica* and 18.4% in *L. gmelinii*; soil respiration rate was decreased 25.8% and 34.9% respectively. However, nitrogen fertilization did not change fine root nitrogen contents. In both plantation types, soil respiration rate exhibited significant exponential relationships with soil temperature ( $R^2 = 0.93 - 0.98$ ). The range of  $Q_{10}$  values was 2.45 - 2.62 for *F. mandshurica* and 3.02 - 3.29 for *L. gmelinii*. Nonetheless, nitrogen fertilization did not impact  $Q_{10}$  values in either plantation type; the difference of  $Q_{10}$  between fertilized and unfertilized was less 1%. Nitrogen fertilization in *L. gmelinii* and *F. mandshurica* did not alter nitrogen contents in fine roots or  $Q_{10}$  values, but decreased fine root standing biomass, which suggests that reduction of soil respiration rate in fertilized plantations was caused by the decreases of fine root standing biomass.

**Key words** nitrogen fertilization, fine root biomass, fine root nitrogen contents, soil respiration, *Larix gmelinii*, *Fraxinus mandshurica*

森林生态系统是陆地最大碳储存库,所拥有的碳占全球植物碳库的 86%,占全球土壤碳库的 73%(Dixon *et al.*, 1994; Post & Emanuel, 1982)。许多研究(Thierron & Laudelout, 1996; Ryan *et al.*, 1997; Raich & Tufekcioglu, 2000)表明,根系呼吸占土壤呼吸的 30%~90%左右,主要集中在 40%~60%范围内(Widén & Majdi, 2001; 杨玉盛等, 2004)。土壤呼吸主要包括根系呼吸、土壤微生物和土壤动物的呼吸,占年输入大气 CO<sub>2</sub> 的 20%~38%(Raich & Schlesinger, 1992; Raich & Potter, 1995),是土壤生物学和生物化学与环境综合作用的结果。土壤呼吸对环境变化反应最为敏感,因此,测定森林土壤呼吸成为全球变化研究陆地生态系统碳循环不可缺少的主要内容(Schlesinger & Andrews, 2000)。

虽然国内外近年来对森林土壤呼吸进行大量研究,但是准确估计土壤表面 CO<sub>2</sub> 通量仍然非常困难,主要是森林土壤呼吸受许多生物因子和环境因子的影响,如土壤温度和水分等(Schlesinger & Andrews, 2000; 杨玉盛等, 2004; 王传宽和杨金艳, 2005),但是,忽视了土壤氮有效性对呼吸作用的影响(Haynes & Gower, 1995; Fox, 2000)。Gallardo 和 Schlesinger (1994)在美国北卡罗来那州的实验林中发现,施氮肥能够增加土壤呼吸;Kane 等(2003)对美国奥林匹克国家公园北美黄杉(*Pseudotsuga menziesii*)林分研究表明,增施氮肥对土壤呼吸速率没有显著的影响;而 Haynes 和 Gower(1995)对北美脂松(*Pinus resinosa*)林施肥结果却显著降低土壤的呼吸速率。是什么原因导致施肥改变土壤呼吸速率目前还不清楚。从最近根系生理生态学研究发现,土壤氮有效性影响光合产物在地上和地下的分配格局(Eissenstat & Yanai, 1997; Norby & Jackson, 2000; 梅莉等, 2004),导致根系生物量增加(Pregitzer *et al.*, 1995; King *et al.*, 2002; Majdi, 2001)或减少(Haynes & Gower, 1995),施入氮肥可能会改变根组织中氮含量(Bloom *et al.*, 1992; Burton *et al.*, 2002),进而对土壤呼吸可能产生重要影响(Lee & Jose, 2003)。因此,本研究的目的是通过落叶松(*Larix gmelinii*)和水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)人工林施氮肥试验:1)比较相同立地条件下落叶松和水曲柳林分土壤呼吸的差异;2)分析施肥对落叶松和水曲柳林分土壤呼吸速率的影响;3)土壤呼吸速率与土壤温度、细根生物

量和细根氮含量关系。

## 1 研究方法

### 1.1 研究地点概况

研究地点位于东北林业大学帽儿山实验林场尖砬沟森林培育实验站(127°30'~127°34'E, 45°21'~45°25'N)。该地区属温带大陆性季风气候,年均气温 2.8℃,1月平均温度 -23℃,7月平均温度 20.9℃。年平均降水量 723 mm,年平均蒸发量 1 094 mm。无霜期 120~140 d,≥10℃的积温 2 526℃。土壤为典型暗棕壤,平均土层厚度在 40 cm 左右。属于长白山系张广才岭西北坡,小岭余脉,林分为 18 年生水曲柳和落叶松人工林,目前(2004 年调查)水曲柳平均树高 10.4 m,平均胸径 9.1 cm。落叶松平均树高 10.3 m,平均胸径 10.6 cm。

### 1.2 试验设计

2002 年 5 月,在同一个山坡中上部(海拔 480~500 m,坡向 10°NW,坡度 11°~15°左右)的水曲柳和落叶松人工林内分别设置 12 块样地(面积 20 m×30 m),每个树种 6 块样地(其中 3 块样地进行施肥处理,3 块样地作为对照),样地间的距离 15~20 m,立地条件和林分条件基本一致。2003~2005 年间,从 5~9 月,分别 5 次在处理样地内施氮肥(硝酸铵),连续 3 年,年施肥量为 10 g N·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。根据土壤温度的季节变化确定每月施肥量,其中 5 和 9 月施肥各占总量的 15.25%,6 和 8 月各占 21%,7 月为 27.5%。2004 年 7 月,在每块样地内随机安装 10 个(12 块样地共 120 个)PVC 土壤呼吸环(直径 8.08 cm,高 5 cm,埋入地下 3 cm),距树干距离 0.5~1.5 m 之间,安装后不再移动。

### 1.3 土壤呼吸的测定

采用动态气室法(LI-6400-09 叶室连接到 LI-6400 便携式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析系统(LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA))测定土壤呼吸。2004 年 7 月至 2005 年 10 月(冬季 11 和 12 月以及下一年的 1~4 月因土壤结冰,不进行观测),每月月初选择晴朗天气(不包括雨后)测定土壤呼吸速率,整个测定工作在 2 d 内完成(每个树种需要 1 d)。夏季每个样点测定大约需要 5 min,安装仪器稳定后,每隔 60~90 s 测定 1 次(春秋季节需要的时间长一些)循环 3~5 个循环的平均值为该样点的呼吸值。同时,进行土壤温度的

测定,LI-6400 红外气体分析仪自带温度探头,用来测定地下 10 cm 的温度,另外用一个温度数字记录仪测定地下 5 cm 处的温度,以便确定地下 5 和 10 cm 处温度与土壤呼吸的关系。为了消除日温度对土壤呼吸的影响,需要在尽可能短的时间内进行成对(施肥和对照)样地的测定。

#### 1.4 根系生物量测定

2004 年 4 月中旬开始,每月中旬在多样地内随机选取 8 个点,用内径为 60 mm 的土钻分 3 层(0~10、10~20、20~30 cm)钻取土芯样品,放入编号的塑料袋中。样品带回野外实验站后,用流水冲洗、除去泥土和杂物,然后将根系迅速放入塑料袋内,低温冷冻保存。样品带回实验室后,根据外形、颜色和弹性区别死根和活根,并按直径大小分级(<1、1~2、2~5 和 >5 mm),然后将各直径样品在 75 °C 下 24 h 烘干,测定生物量干重。采用半微量凯氏法测定各直径级别根系的全氮含量。

#### 1.5 数据分析

本论文主要对 2005 年 5~10 月采集的土壤呼吸数据进行分析。对所有数据经过 Microsoft Excel 处理,计算平均数、标准差和变异系数。采用方差分析方法分析水曲柳与落叶松林地之间土壤呼吸的差异、施肥处理与对照林地之间根系生物量和土壤呼吸的差异。采用回归分析方法(分别树种、处理和对照)建立土壤温度与土壤呼吸之间统计模型,根据该模型确定不同树种、处理和对照林地的  $Q_{10}$  值。由于两个树种的人工纯林生长在相同的立地上,气候因子对该林分土壤呼吸的影响是相同的,在分析每月测定数据时,可以不考虑气候因子的影响,但是,在季节性分析时,主要考虑土壤温度对土壤呼吸的作用。因为,温度对土壤呼吸的影响最显著(刘绍辉等,1998)。

## 2 实验结果

### 2.1 施肥对林地土壤呼吸、根系生物量和根系氮含量影响

施肥对水曲柳和落叶松林地土壤平均呼吸速率、根系活生物量、死生物量和根系中氮含量存在不同程度的影响。施肥导致两个树种林分土壤平均呼吸速率显著降低(图 1),与对照(不施肥)相比,水曲柳降低 25.8%( $p < 0.05$ ),落叶松降低 34.9%( $p < 0.05$ )。两树种土壤平均呼吸速率施肥和对照相差 27.4%。同时,施肥导致活细根生物量(水曲柳直径 <1 mm,落叶松直径 <1 和 1~2 mm)和死细根生物

量(直径 <2 mm)显著( $p < 0.05$ )减少(图 2,图 3)。水曲柳直径 <1 mm 活细根生物量由  $(142.6 \pm 10.9) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  减少到  $(111.9 \pm 16.9) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,降低 27.4%,落叶松直径 <2 mm 活细根生物量由  $(168 \pm 15.3) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  减少到  $(142.5 \pm 13.5) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,降低 18.4%(图 2)死细根生物量(直径 <2 mm)分别下降 127.4%(水曲柳)和 34.8%(落叶松)。但是,施肥对根系中氮含量(除水曲柳直径 >5 mm 根系外)没有显著影响( $p > 0.05$ ,图 4)。

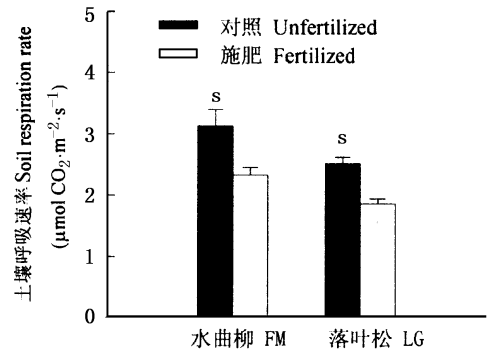


图 1 施肥和不施肥处理对水曲柳和落叶松林地土壤平均呼吸速率的影响

Fig. 1 The effects of fertilizer on soil respiration rate of *Fraxinus mandshurica* (FM) and *Larix gmelinii* (LG) plantation

图中字母“s”代表差异显著( $p < 0.05$ ) Letter “s” represents significant difference( $p < 0.05$ )

### 2.2 施肥对林地土壤呼吸季节动态的影响

水曲柳和落叶松林地土壤呼吸具有明显的季节变化,施肥处理的林地各月的土壤呼吸速率均低于对照林地,树种之间和施肥处理与对照之间具有相同动态格局(图 5)。春季(5 月)和秋季(10 月)土壤呼吸速率最低,施肥处理与对照之间绝对值差异较小(水曲柳  $0.30 \sim 0.37 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,落叶松  $0.18 \sim 0.29 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),而夏季(7 和 8 月)土壤呼吸速率最高,施肥处理与对照之间绝对值差异明显(水曲柳差值  $0.94 \sim 1.39 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,落叶松差值  $1.04 \sim 1.05 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。无论施肥处理还是对照林地,两个树种土壤呼吸速率的季节变化与土壤 5 和 10 cm 处温度的季节变化有显著( $p < 0.05$ )指数相关( $R^2 > 0.93$ ,表 1),施肥处理的土壤呼吸速率-温度回归曲线明显低于对照的曲线(图 6)。水曲柳林地土壤呼吸温度系数( $Q_{10}$ ) ( $2.45 \sim 2.62$ )明显低于落叶松  $Q_{10}$  ( $3.02 \sim 3.29$ ),但是,施肥处理并没有引起两个树种林分内土壤呼吸温度系数( $Q_{10}$ )的改变(表 1)。表明土壤呼吸速率季节变化(图 6)主要与土壤温度季节变化有关,施

肥导致细根生物量改变(图2,图3)可能是引起林地土壤呼吸速率降低的主要因素。

表1 水曲柳和落叶松林地土壤呼吸速率指数模型和  $Q_{10}$  值  
Table 1 Soil respiration rate Arrhenius models and  $Q_{10}$  in *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantations

树种 Species	处理 Treatment	土壤深度 Soil depth (cm)	$a$	$b$	$R^2$	$p$	$Q_{10}$
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	对照 Unfertilized	5	0.981 1	0.089 6	0.98	0.000 2	2.45
		10	1.037 3	0.095 6	0.93	0.001 8	2.60
	施肥 Fertilized	5	0.697 5	0.090 4	0.98	0.001 8	2.47
		10	0.739 0	0.096 4	0.93	0.001 8	2.62
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	对照 Unfertilized	5	0.600 7	0.111 5	0.97	0.000 5	3.05
		10	0.653 7	0.119 1	0.94	0.001 3	3.29
	施肥 Fertilized	5	0.453 7	0.110 5	0.97	0.000 4	3.02
		10	0.494 9	0.117 9	0.95	0.001 1	3.25

指数模型 Arrhenius models:  $R_s = ae^{bT}$   $R_s$ : 土壤呼吸速率 Soil respiration rate  $a$ 、 $b$ : 回归系数 Regression coefficient  $e$ : 常数 Constant (2.718281828)  $T$ : 土壤温度 Soil temperature

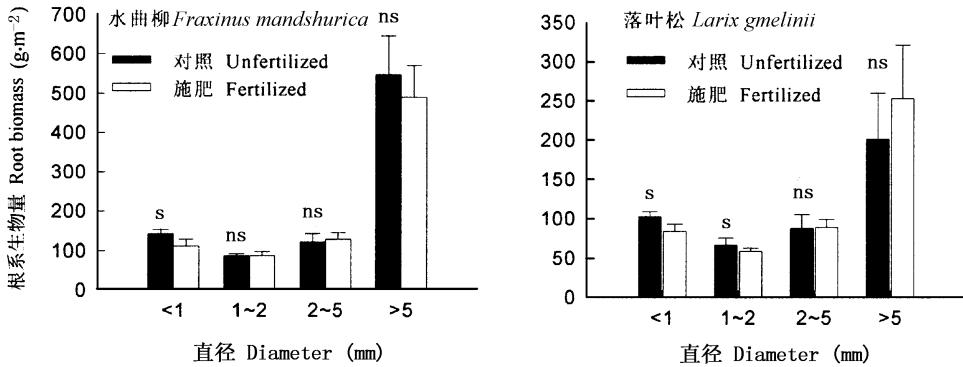


图2 施肥和不施肥处理对水曲柳和落叶松根系生物量的影响

Fig.2 The effects of fertilizer on fine root biomass of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantation

图中字母“s”代表差异显著 ( $p < 0.05$ ); “ns”代表差异不显著 Letter “s” represents significant difference ( $p < 0.05$ ), “ns” represents no significant difference

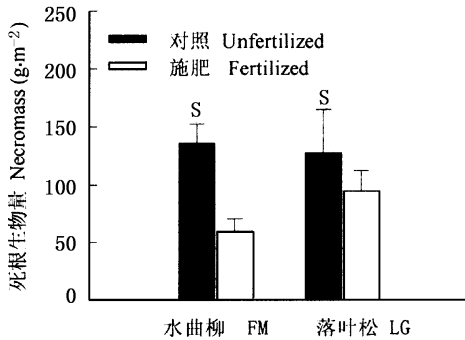


图3 施肥和不施肥处理对水曲柳和落叶松根系(直径 < 2 mm)死生物量影响

Fig.3 The effects of fertilizer on necromass (diameter < 2 mm) of *Fraxinus mandshurica* (FM) and *Larix gmelinii* (LG) plantation  
图注见图1 Notes see Fig. 1

### 3 讨论

#### 3.1 两种林分土壤呼吸速率的比较

森林土壤呼吸与森林类型(或树种)有密切关系(Raich & Tufekcioglu, 2000; 杨玉盛等, 2004),大量的观测数据表明,温带森林生态系统中针叶林土壤呼吸速率低于阔叶林(Raich & Schlesinger, 1992; Raich & Potter, 1995)。本研究表明,从5到10月整个生长季,水曲柳林分的土壤呼吸速率变化范围  $0.5 \sim 7.74 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (平均值为  $3.13 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 落叶松林分土壤呼吸速率变化范围  $0.43 \sim 6.27 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (平均值为  $2.51 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 在相同的立地条件下落叶松林分土壤平均呼吸速率比水曲柳林分低19.8%左右(图1)。

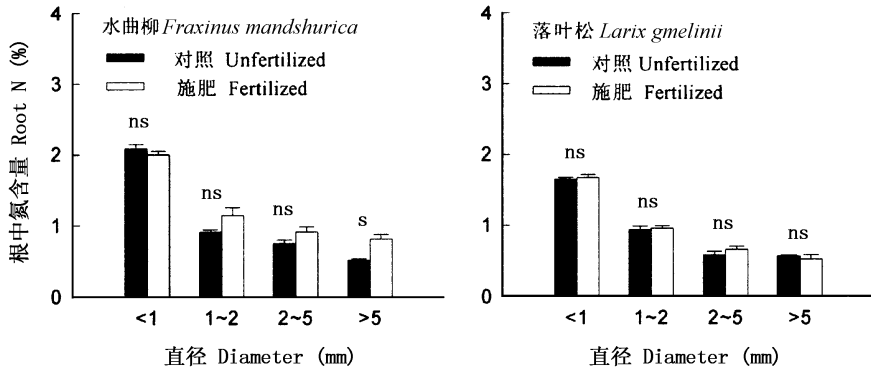


图 4 施肥处理对水曲柳和落叶松根系氮含量的影响

Fig. 4 The effects of fertilizer on the N content of root of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantation  
图注见图 2 Notes see Fig. 2

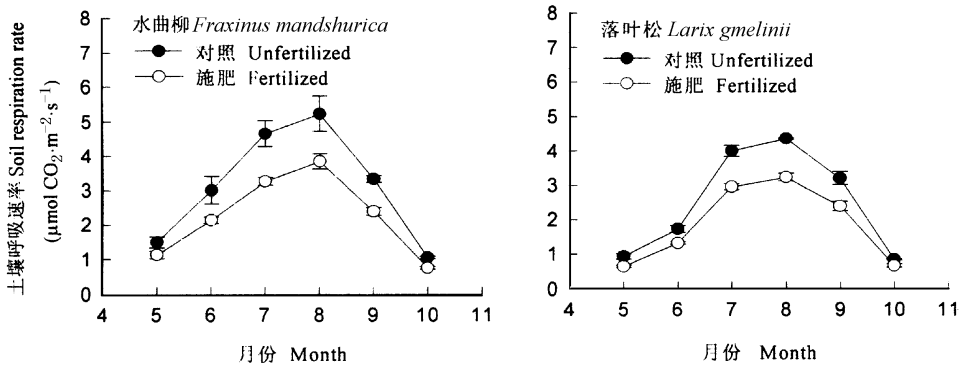


图 5 施肥和不施肥处理对水曲柳和落叶松林地土壤呼吸季节影响

Fig. 5 The effects of fertilizer on seasonal dynamics of soil respiration rate of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantation

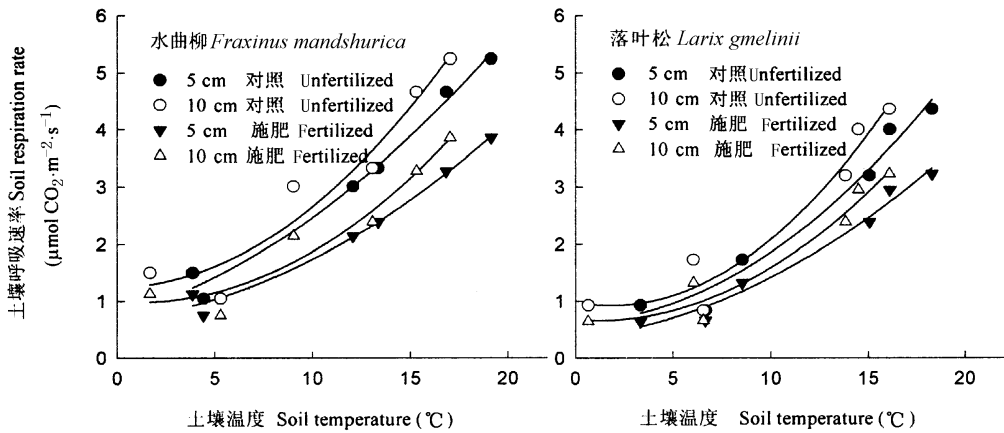


图 6 水曲柳和落叶松林地施肥和不施肥处理土壤呼吸速率与土壤 5 和 10 cm 温度关系

Fig. 6 The relationship of soil respiration rate and soil temperature at 5 and 10 cm in fertilized and unfertilized plot of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantation

Raich 和 Tufekcioglu( 2000 )在总结大量研究数据后得出相同立地条件下针叶林比阔叶林土壤呼吸一般减少 10% 左右,如火炬松( *Pinus taeda* )林分的土壤呼

吸速率比相同条件下的三角叶杨( *Populus deltoides* )林分减少 11% 左右( Lee & Jose , 2003 )。温带森林生态系统中针叶林活根呼吸占总土壤呼吸的 35% ~

62% ,阔叶林占 33% ~ 60%( Raich & Tufekcioglu , 2000 )。产生针阔叶林土壤呼吸差异的主要原因可能是针叶林根系呼吸明显低于阔叶林根系的呼吸 ,如 Burton 等( 2002 )通过对北美温带地区 5 个针叶树种和 6 个阔叶树种林分细根呼吸研究表明 ,两类林分细根呼吸相差 10% 左右 ,主要归结于针叶树细根中的氮含量明显低于阔叶树。另一个主要原因是细根生物量和细根年生产量多少引起林地土壤呼吸差异。落叶松总细根(直径 < 2 mm)生物量(( $158 \pm 15.3$ )  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )比水曲柳(( $229 \pm 16.2$ )  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )低 45% (图 2) ,火炬松细根(直径 < 2 mm)产量(( $144.2 \pm 23.4$ )  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )比三角叶杨(( $220.8 \pm 28.5$ )  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )低 35%( Lee & Jose , 2003 )。显然 ,细根氮含量、细根生物量和年产量的差异可能是导致针阔叶林分土壤呼吸差异的主要原因。

### 3.2 施肥对两种林分土壤呼吸速率的影响

森林土壤呼吸过程是根系生理生态活动最主要的特征( Raich & Tufekcioglu , 2000 ) ,该过程要消耗大量的光合产物。森林土壤资源有效性(如氮的有效性)的变化 ,将会导致光合产物地上部分和地下部分分配格局的改变( Gower *et al.* , 1992 ; Haynes & Gower , 1995 ; King *et al.* , 1996 ) ,如根系(主要是细根)生物量增加或下降 ,从而影响森林土壤呼吸过程。Bowden 等( 2004 )认为施氮肥可以提高、降低或不改变土壤呼吸速率。本研究表明 ,施肥导致两种林地的活细根(直径 < 2 mm)生物量分别下降 18.4%(落叶松)和 15.5%(水曲柳)(图 2) ,土壤平均呼吸速率下降 34.9%(落叶松)和 25.8%(水曲柳)(图 1) 。Gower 等( 1992 )在新墨西哥洲北美黄杉( *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* )林分中增加养分有效性(主要是氮)使得细根生物量下降 50% ,地下碳的分配与土壤资源有效性呈负相关。Lee 和 Jose( 2003 )对三角叶杨林分施肥(  $112 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  )处理 ,与对照相比土壤呼吸减少 18.3% 。另外 ,Olsson 等( 2005 )对北方挪威云杉( *Picea abies* )森林的研究得到施肥(  $106 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  )处理土壤呼吸速率要比对照低 40% ,分配到根系中的淀粉减少 18% 左右。对于这种碳-氮关系 ,Hendricks 等( 1993 )提出异化分配( Differential allocation )假说 ,即随着氮在系统中的有效性提高 ,分配到细根中碳的相对比例下降(梅莉等 , 2004 )。显然 ,异化分配假说是可以解释施肥导致落叶松和水曲柳细根减少和呼吸降低的原因之一。

为什么施肥会导致分配到细根中的碳减少 ? Burton 等( 2002 )对北美温带森林 5 个针叶树种和 6

个阔叶树种研究表明 ,随着细根组织氮浓度的增加 ,根系呼吸作用增强 ,存在显著正相关(  $R^2 = 0.81 \sim 0.92$  ,  $p < 0.001$  )。Eissenstat 等( 2000 )认为施氮肥可能导致根系氮浓度的增加 ,引起根系呼吸的提高。因为 ,根生理呼吸绝大部分用于氮的吸收和同化( Bloom *et al.* , 1992 ; Bowden *et al.* , 2004 )。但是 ,本研究对落叶松和水曲柳施肥结果显示 ,两个树种根系氮浓度并没有显著变化(图 4) 。这可能由于帽儿山地区森林土壤已经很肥沃( 0 ~ 20 cm 有机质含量 11.3% ,全氮含量 0.86% ) ,细根吸收和利用氮的能力处于平衡(或饱和)状态 ,施肥对细根组织中氮含量增加不起作用。这与 Burton 等( 2002 )对北美温带森林 5 个针叶树种和 6 个阔叶树种施肥(  $25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  )后测定根系氮含量和呼吸的结果一致。国外最近从土壤微生物方面研究表明 ,施肥导致微生物生物量明显减少( Lee & Jose , 2003 ; Frey *et al.* , 2004 ) , Bowden 等( 2004 )在室内对施肥的无根土壤培养发现异养呼吸下降 , Haynes 和 Gower( 1995 )及 Bowden 等( 2004 )认为施肥减少细根和微生物的生长或者呼吸或者两者都减少 ,主要原因是微生物群落改变导致酶含量和活性、分解效率降低引起呼吸下降。虽然 ,我们在落叶松和水曲柳林地上没有进行土壤微生物方面研究 ,但是显微镜下观察发现 ,施肥林地细根根尖的菌根侵染率与对照相比下降 10% ~ 20%(未发表数据) 。因此 ,施肥后土壤微生物数量、种类和功能下降可能是土壤呼吸降低的另一主要原因。但这需要我们进一步通过试验数据证实。

### 3.3 施肥对两树种林分 $Q_{10}$ 的影响

土壤呼吸速率随土壤温度的变化而变化 ,表现出明显的季节性(图 5) ,这与多数人的研究结果相同( Striegl & Wickland , 2001 ; King & Pregitzer , 2001 ; Borken & Xu , 2002 ; Widén & Majdi , 2001 ; Kieth *et al.* , 1997 ; Kang *et al.* , 2003 )。本研究得到的土壤呼吸速率与土壤温度之间的指数模型具有较高的相关性(  $R^2 = 0.93 \sim 0.98$  ) ,土壤 5 cm 深度的相关性(  $R^2 = 0.97 \sim 0.98$  )大于 10 cm 深度的相关性(  $R^2 = 0.93 \sim 0.95$  )(表 1) 。这也进一步的证明了地下 5 cm 的温度能较准确地反映温度对土壤呼吸的影响(刘绍辉等 , 1998 ; 王文杰等 , 2005 )。  $Q_{10}$  是反映土壤呼吸速率对温度变化的敏感系数( Pregitzer *et al.* , 2000 ) ,对两个林分林地土壤呼吸的温度系数  $Q_{10}$  估计显示 ,落叶松和水曲柳的  $Q_{10}$  值范围在 2.45 ~ 3.29 之间(表 1) ,属于温带森林生态系统  $Q_{10}$  值( 1.8 ~ 4.1 )范围内( Xu & Qi , 2001 ; Ohashi *et al.* ,

1999)。落叶松林分的土壤平均呼吸速率比水曲柳低19.8%,但是 $Q_{10}$ 值却高出24%(表1),表明落叶松比水曲柳对温度反映更敏感。施肥虽然明显地降低了林地土壤呼吸速率(图1),但是,施肥之后两树种土壤呼吸的 $Q_{10}$ 值没有发生变化(相差仅1%左右,表1)。主要原因可能是根系组织中施肥后氮的含量没有改变(图4)。实验室分析表明,85%呼吸消耗与细胞中蛋白质周转有关,细胞含氮量多将导致较高的细胞呼吸(Chapin *et al.*, 2002)。Burton等(2002)和Chapin等(2002)认为根细胞中维持蛋白质周转和溶质梯度所消耗的能量是占根系维持呼吸的绝大部分,如果组织中氮含量保持不变,根系呼吸也不会发生变化,因此,落叶松和水曲柳施肥林分与对照林分的 $Q_{10}$ 值(表1)应该一致。

#### 4 结 论

1) 落叶松和水曲柳地下细根(直径 $< 2$  mm)生物量具有明显差异,落叶松细根生物量比水曲柳低45%左右,土壤呼吸具有明显的季节性,与土壤温度具有紧密的指数关系,相同立地条件下两个林地土壤呼吸速率平均相差19.8%。

2) 施肥引起落叶松和水曲柳细根(直径 $< 2$  mm)生物量分别下降18.4%和15.5%,两个林分土壤平均呼吸速率分别下降34.9%和25.8%。对于帽儿山肥沃的土壤,施肥没有引起落叶松和水曲柳根组织中氮含量变化,土壤呼吸系数 $Q_{10}$ 值也没有改变。两个林分土壤呼吸速率的降低主要原因是施肥导致细根(直径 $< 2$  mm)生物量减少。

#### 参 考 文 献

- Bloom AJ, Sukrapanna SS, Warner RL(1992). Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology*, 99, 1294 – 1301.
- Borken W, Xu YJ(2002). Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 8, 1205 – 1216.
- Bowden RD, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P(2004). Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 196, 43 – 56.
- Burton AJ, Pregitzer KS, Ruess RW(2002). Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, 131, 559 – 568.
- Chapin FS III, Matson PA, Mooney HA (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag, New York, 136 – 137.
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J(1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185 – 190.
- Eissenstat DM, Yanai RD(1997). The ecology of root lifespan. *Advance in Ecological Research*, 27, 1 – 60.
- Eissenstat DM, Wells CE, Yanai RD, Whitbeck JL(2000). Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist*, 147, 33 – 42.
- Fox TR (2000). Sustained productivity in intensively managed forest plantation. *Forest Ecology and Management*, 138, 187 – 202.
- Frey SD, Knorr M, Parrent JL, Simpson RT(2004). Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. *Forest Ecology and Management*, 196, 159 – 171.
- Gallardo A, Schlesinger WH(1994). Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 26, 1409 – 1415.
- Gower ST, Vogt KA, Grier CC(1992). Carbon dynamics of Rocky Mountain douglas-fir: influence of water and nutrient availability. *Ecological Monographs*, 62, 43 – 65.
- Haynes BE, Gower ST(1995). Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin. *Tree Physiology*, 15, 317 – 325.
- Hendricks JJ, Nadelhoffer KJ, Aber JD(1993). Assessing the role of fine roots in carbon and nutrient cycling. *Trends of Ecology and Evolution*, 8, 174 – 178.
- Kane ES, Pregitzer KS, Burton AJ(2003). Soil respiration along environmental gradients in Olympic National Park. *Ecosystems*, 6, 326 – 335.
- Kang S, Doh S, Lee D (2003). Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology*, 9, 1427 – 1437.
- Kieth H, Jacobsen KL, Raison RJ(1997). Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant and Soil*, 190, 127 – 141.
- King JS, Albaugh TJ, Lee AH, Buford M, Strain BR, Dougherty P (2002). Belowground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytologist*, 154, 389 – 398.
- King JS, Pregitzer KS(2001). Fine-root biomass and fluxes of soil carbon in young stands of paper birch and trembling aspen as affected by elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and tropospheric O<sub>3</sub>. *Oecologia*, 128, 237 – 250.
- King JS, Thomas RB, Strain BR(1996). Growth and carbon accumulation in root systems of *Pinus taeda* and *Pinus ponderosa* seedlings as affected by varying CO<sub>2</sub>, temperature and nitrogen. *Tree Physiology*, 16, 635 – 642.
- Lee KH, Jose SB(2003). Soil respiration, fine root production and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. *Forest Ecology and Manage-*

- ment, 185, 263 – 273.
- Liu SH(刘绍辉), Fang JY(方精云), Kiyota M(1998). Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 22, 119 – 126. (in Chinese with English abstract)
- Majdi H(2001). Changes in fine root production and longevity in relation to water and nutrient availability in a Norway spruce stand in northern Sweden. *Tree Physiology*, 21, 1057 – 1061.
- Mei L(梅莉), Wang ZQ(王政权), Cheng YH(程云环), Guo DL(郭大立)(2004). A review: factors influencing fine root longevity in forest ecosystem. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 28, 704 – 710. (in Chinese with English abstract)
- Norby RJ, Jackson RB(2000). Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist*, 147, 3 – 12.
- Ohashi M, Gyokusen K, Saito A(1999). Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method. *Forest Ecology and Management*, 123, 105 – 114.
- Olsson P, Linder S, Giesler R, Högberg P(2005). Fertilization of boreal forest reduces both autotrophic and heterotrophic soil respiration. *Global Change Biology*, 11, 1745 – 1753.
- Post WM, Emanuel WR(1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298, 156 – 159.
- Pregitzer KS, King JS, Burton AJ(2000). Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytologist*, 147, 105 – 115.
- Pregitzer KS, Zak DR, Curtis PS(1995). Atmospheric CO<sub>2</sub> soil nitrogen and turnover of fine roots. *New Phytologist*, 129, 579 – 585.
- Raich JW, Schlesinger WH(1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B, 81 – 99.
- Raich JW, Tufekcioglu A(2000). Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48, 71 – 90.
- Raich JW, Potter CS(1995). Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 23 – 36.
- Ryan MG, Lavigne MG, Gower ST(1997). Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystem in relation to species and climate. *Journal of Geophysical Research*, 102, 28871 – 28883.
- Schlesinger WH, Andrews JA(2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48, 7 – 20.
- Striegl RG, Wickland KP(2001). Soil respiration and photosynthetic uptake of carbon dioxide by ground-cover plants in four ages of jack pine forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 1540 – 1550.
- Thierron V, Laudelout H(1996). Contribution of root respiration to total CO<sub>2</sub> efflux from the soil of a deciduous forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1142 – 1148.
- Wang CK(王传宽), Yang JY(杨金艳)(2005). Carbon dioxide fluxes from soil respiration and woody debris decomposition in boreal forests. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 633 – 638. (in Chinese with English abstract)
- Wang WJ(王文杰), Wang HM(王慧梅), Zu YG(祖元刚), Li XY(李雪莹), Koike T(2005). Characteristics of root, stem and soil respiration  $Q_{10}$  temperature coefficients in forest ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 29, 680 – 691. (in Chinese with English abstract)
- Widén B, Majdi H(2001). Soil CO<sub>2</sub> efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 786 – 796.
- Xu M, Qi Y(2001). Spatial and seasonal variations of  $Q_{10}$  determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada Forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 687 – 696.
- Yang YS(杨玉盛), Dong B(董彬), Xie JS(谢锦升), Chen GS(陈光水), Gao R(高人), Li L(李灵), Wang XG(王小国), Guo JF(郭剑芬)(2004). Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24, 583 – 591. (in Chinese with English abstract)