

落叶松人工林生长季节土壤呼吸通量各组分的变化*

孟春¹ 罗京¹ 庞凤艳^{2**}¹东北林业大学工程技术学院, 哈尔滨 150040; ²哈尔滨市林业科学研究院, 哈尔滨 150029)

摘要 2010年采用挖壕法,利用 Li-8150 土壤碳通量全自动观测仪对东北林业大学哈尔滨实验林场落叶松人工林土壤各组分呼吸通量进行昼夜观测,研究土壤呼吸通量的昼夜和月变化特征,以及对土壤温度的敏感性.结果表明:各月份落叶松的枯枝落叶、根和矿质土壤呼吸通量昼夜变化均呈现单峰形态.5—10月各组分土壤呼吸通量昼夜变化幅度分别在 3.1%~12.4%、1.9%~8.7%和 10.9%~67.2%;枯枝落叶和根呼吸的平均值分别占土壤呼吸总量的 21.2%、11.1%、13.4%、12.0%、14.2%和 10.3%、8.8%、11.6%、10.0%、12.5%,昼夜波动幅度较小,月平均值分别为 14.3%和 10.6%.矿质土壤呼吸平均值分别占土壤呼吸总量的 68.5%、80.2%、75.1%、78.1%和 73.3%,昼夜波动幅度较小,月平均值为 71.5%.枯枝落叶和矿质土壤呼吸通量对地表下 10 cm 的温度敏感性(Q_{10})显著高于地表,且矿质土壤呼吸通量 Q_{10} 值高于枯枝落叶呼吸通量.根呼吸通量对地表下 10 cm 处和地表 Q_{10} 值无显著差异.枯枝落叶和根呼吸 Q_{10} 值的月变化为低温时较高、高温时较低,而矿质土壤呼吸 Q_{10} 值则夏季较低、春秋季节较高.

关键词 枯枝落叶层 根系 矿质土壤 呼吸通量 温度敏感性 落叶松人工林

文章编号 1001-9332(2013)08-2135-06 **中图分类号** S76 **文献标识码** A

Variations of soil respiration flux components in a *Larix gmelinii* plantation during growth season. MENG Chun¹, LUO Jing¹, PANG Feng-yan² (¹College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²Harbin Research Institute of Forestry Science, Harbin 150029, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(8): 2135-2140.

Abstract: By using trenching-box method and Li-8150, an observation on the diurnal and monthly variations of soil respiration flux components in a *Larix gmelinii* plantation in the Harbin Experimental Forest Farm of Northeast Forestry University was conducted in 2010, with the temperature sensitivity of the flux components analyzed. The diurnal variations of the respiration flux of litter, root and mineral soil presented a single peak pattern. From May to October, the diurnal variation amplitudes of the respiration flux of litter, root and mineral soil were 3.1%–12.4%, 1.9%–8.7%, and 10.9%–67.2%, respectively. The mean values of the respiration flux of litter and root occupied 21.2%, 11.1%, 13.4%, 12.0% and 14.2%, and 10.3%, 8.8%, 11.6%, 10.0% and 12.5% of the total, with a small diurnal fluctuation and the mean monthly value being 14.3% and 10.6%, respectively. The mean value of the respiration flux of mineral soil was 68.5%, 80.2%, 75.1%, 78.1% and 73.3%, also with a small diurnal fluctuation and the mean monthly value being 71.5%. The sensitivity of the respiration flux of litter and mineral soil to the temperature at 10 cm soil depth was significantly higher than that to the temperature at soil surface, and the Q_{10} value of the respiration flux of mineral soil was higher than that of the respiration flux of litter. No significant difference was observed in the sensitivity of the respiration flux of root to the temperature at soil surface and at 10 cm soil depth. The monthly variation of the Q_{10} for the respiration flux of litter and root was higher at low temperature and lower at high temperature. On the contrary, the monthly variation of the Q_{10} for the respiration flux of mineral soil was lower in summer and higher in spring and autumn.

* 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11553035)资助.

** 通讯作者. E-mail: hrblinkeyuan@126.com

2012-10-29 收稿, 2013-06-23 接受.

Key words: litter layer; root system; mineral soil; respiration flux; temperature sensitivity; *Larix gmelinii* plantation.

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的主要环节,是大气 CO₂ 体积分数升高的关键生态学过程^[1]. 土壤呼吸主要由微生物和土壤动物的异养呼吸及根系的自养呼吸组成. 估算生态系统的净初级生产力和净生态系统生产力需要量化异氧呼吸和自养呼吸. 异氧呼吸和自养呼吸对环境变量(如土壤温度)的响应不同,在全球变化条件下可能形成不同的碳通量变化格局. 所以,土壤呼吸及其组分的分离和量化已经成为当今全球气候变化模拟、碳循环研究等诸多学科研究中的一个重要议题^[2].

分离量化土壤呼吸各组分通常采用成分综合法、生物量外推法、根去除法、同位素标记法等,由于野外观测条件复杂,每种观测方法各有优缺点^[3]. 在林地土壤呼吸的观测中,根去除法中的挖沟隔离法是较常用的方法之一^[4-7].

林地土壤呼吸受土壤微生物活性、有机质含量、pH、温度、水分^[8-9],以及植被凋落物、植物光合作用^[10]、叶面积指数和初级生产力^[11-12]、近期光合作用产物对根的分配方式^[13]、植物的物候特性^[14]等诸多因素的影响. 这些影响因素在不同时间尺度上的变化特性不同,例如,植被凋落物、植物物候等的季节变化显著而日变化较小,土壤温度和湿度、植物根系活动等除了具有季节变化以外,还具有明显的日变化特征^[15],因此,要准确地分离量化土壤呼吸各组分,在观测上必须有一个延续的时间尺度. 多数研究以一昼夜作为时间尺度来研究土壤表面呼吸^[16-18],而对于土壤呼吸各组分的昼夜观测研究则较少. 本文以一昼夜为时间尺度,分离量化生长季落叶松人工林枯枝落叶、根和矿质土壤呼吸,讨论各组分呼吸日变化和月变化特征,以及其对土壤温度的敏感性,旨在为准确掌握林地 CO₂ 排放通量及制定有效降低林地 CO₂ 排放通量措施提供数据支持.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

东北林业大学哈尔滨实验林场位于哈尔滨市区内马家沟河西岸(45°15' N, 128°37' E),地形平缓,水分条件良好. 该地区属于温带季风性气候,年平均气温 3.5 °C,最高气温 22.8 °C,最低气温 -20.4 °C,≥10 °C 年积温 2757 °C,年均降水量 534 mm,降雨集中在 6—8 月. 土壤为地带性黑土.

本研究选取该林场内落叶松(*Larix gmelinii*)人工林为研究样地,样地面积约 1000 m². 该林地于 1959 年春季造林,初植苗木密度 0.5 m×1 m. 前 3 年按常规方法进行抚育,1963 年后隔一行去一行. 目前,活立木密度为 864 株·hm⁻²,平均树高 22 m,平均胸径 18 cm,活立木蓄积 58.86 m³,下草盖度 20%,枯枝落叶层厚度 1~2 cm.

1.2 观测方法

2010 年 10 月 20 日,在观测样地中心、边缘及中心与边缘 1/2 处选取 3 个点,以选定点为中心分别选取 1 条长 2 m 的线段,在每条线段的两个端点和中点各设置 3 个处理. 处理 1:保留枯枝落叶和根系;处理 2:去除枯枝落叶、保留根系;处理 3:去除枯枝落叶、切断根系. 在每个处理中,布置 1 个内径 20 cm、高 15 cm 的 PVC 土壤环. 土壤环的一端削尖后压入土中,地面上保留约 7 cm 高度,且在整个观测过程中保持位置不变.

为排除降雨对土壤呼吸通量的短期影响,每次观测均选择在天气持续晴朗 6~7 d 后进行. 根据具体天气情况,分别于 2011 年 5 月 20 日、6 月 21 日、8 月 15 日、9 月 19 日和 10 月 9 日对 9 个观测点应用 Li-8150 土壤碳通量全自动观测仪(美国 LI-COR 公司)16 通道中的 9 个通道进行了 24 h 昼夜观测.

观测时,将土壤碳通量全自动观测仪的气室置于 PVC 环上,同时,将该系统配备的土壤温度和湿度传感器从 PVC 管外侧斜向下插入地表下约 10 cm 深处,用于观测地表下 10 cm 的土壤温度和湿度. 观测参数设定为:测量时间 5 min,间隔 25 min,相隔 30 min 记录一次土壤呼吸速率、地表温度、地表下 10 cm 处的土壤温度. 每个观测点产生 48 个观测数据. 观测完毕后,应用 Li-8150 软件系统将观测数据导出.

1.3 数据处理

分析发现,观测数据有 2 个特点:各观测点呼吸通量观测值离散性较大;同一次观测中土壤温度昼夜变化较大而各观测点间差异很小、土壤湿度昼夜变幅≤2%,但各观测点间差异较大. 为使观测数据具有可比性,对同一处理各观测点采用线性回归方法建立土壤呼吸通量与土壤湿度和地表下 10 cm 处温度的相关模型,结果表明,同一处理各观测点的土

表 1 土壤呼吸通量与土壤湿度 (w) 和地表下 10 cm 处温度 (t) 的相关性

Table 1 Correlation between soil respiration flux and soil moisture, soil temperature at 10 cm depth

处理 Treatment	模型 Model	R^2
1	$y=0.149t-0.426w$	0.91
2	$y=0.145t-2.239w$	0.95
3	$y=0.146t-4.327w$	0.96

壤呼吸通量 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 与土壤湿度 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) 和地表下 10 cm 处温度 ($^{\circ}\text{C}$) 显著相关 ($R^2 > 0.91$) (表 1)。

运用表 1 中的相关模型, 对同一次观测的 3 个处理分别以湿度平均值和处理 1 中地表下 10 cm 处温度昼夜观测值为变量, 计算不同处理各观测点呼吸通量的拟合值 ($R_{N,i}$), 然后计算枯枝落叶 (R_l)、根 (R_r) 和矿质 (R_m) 土壤呼吸通量, 算式如下:

$$R_l = R_{N,1} - R_{N,2} \quad (1)$$

$$R_r = R_{N,2} - R_{N,3} \quad (2)$$

$$R_m = R_{N,3} \quad (3)$$

式中: $R_{N,1}$ 为处理 1 拟合值; $R_{N,2}$ 为处理 2 拟合值; $R_{N,3}$ 为处理 3 拟合值。

然后对枯枝落叶、根和矿质土壤呼吸通量拟合值进行昼夜和月变化, 以及温度敏感性分析。

采用单因素方差分析各组分呼吸通量均值及其占土壤呼吸通量百分比, 以及其对地表和地表下 10 cm 处温度敏感性的差异性检验, 差异显著性采用 T 检验, 显著性水平设定为 $\alpha=0.05$, 利用 SPSS 11.5 软件进行统计分析。表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 各组分土壤呼吸通量的日变化特征

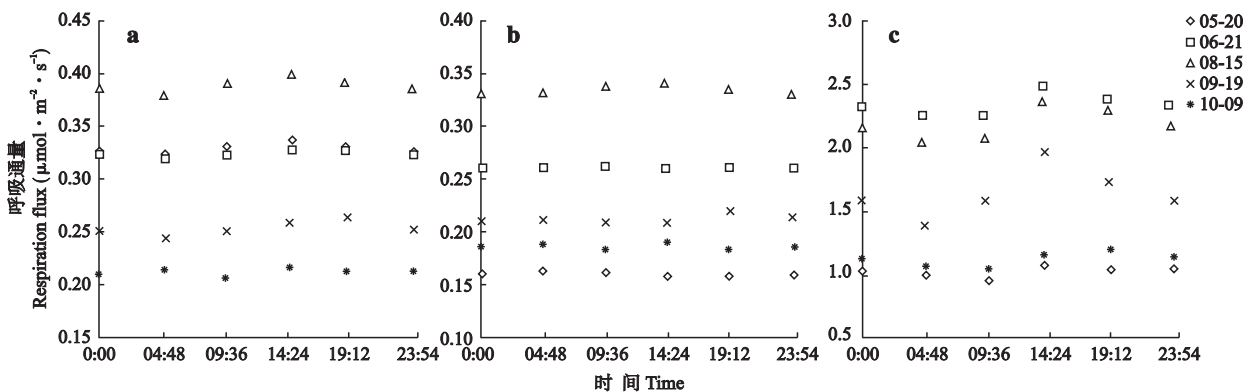


图 1 呼吸通量的昼夜变化

Fig. 1 Diurnal changes of respiration flux.

a) 枯枝落叶 Litter; b) 根 Root; c) 矿质土壤 Mineral soil.

2.1.1 枯枝落叶呼吸通量的昼夜变化 由图 1 可以看出, 各月份枯枝落叶呼吸通量的昼夜变化呈现出春季变化幅度小、夏秋季变化幅度略大的特点。5—10 月观测的模拟值分别为 0.32 ~ 0.33、0.31 ~ 0.32、0.38 ~ 0.40、0.24 ~ 0.27 和 0.20 ~ 0.21 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 昼夜变化幅度分别为 5.0%、3.1%、6.8%、12.4% 和 6.3%, 5—10 月各观测模拟峰值出现的时间差异较大, 且与地表及地表下 10 cm 处温度峰值没有相关性; 枯枝落叶呼吸通量昼夜谷值均出现在地表温度谷值附近或之后。

5—10 月枯枝落叶呼吸通量的平均值分别占土壤呼吸总通量的 21.2%、11.1%、13.4%、12.0% 和 14.2%。

2.1.2 根呼吸通量的昼夜变化 5—10 月各次观测的模拟值分别为 0.15 ~ 0.16、0.25 ~ 0.26、0.33 ~ 0.34、0.20 ~ 0.22 和 0.18 ~ 0.19 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 昼夜变化幅度分别为 1.9%、2.3%、5.1%、8.7% 和 7.7% (图 1b)。各月份根呼吸通量的昼夜变化呈现出春季变化幅度小、夏秋两季变化幅度略大的特点。各月份根呼吸通量昼夜变化均呈现单峰曲线, 且昼夜峰值出现的时间差异较大, 各月峰值出现的时间与地表及地表下 10 cm 处土壤温度峰值出现的时间没有相关性。各月份根呼吸通量昼夜变化谷值出现的时间不同, 且非主要生长季和主要生长季有显著差别。

5—10 月根呼吸通量占土壤呼吸总通量的比例分别为 10.3%、8.8%、11.6%、10.0% 和 12.5%。

2.1.3 矿质土壤呼吸通量昼夜变化 5—10 月各次观测的模拟值分别为 0.83 ~ 1.39、2.23 ~ 2.48、2.01 ~ 2.37、1.37 ~ 1.97 和 0.99 ~ 1.20 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 昼夜变化幅度分别为 67.2%、10.9%、17.4%、43.3%

表2 各组分土壤呼吸通量
Table 2 Respiration fluxes of soil components

组分 Component	类别 Category	日期 Date				
		05-20	06-21	08-15	09-19	10-09
枯枝落叶 Litter layer	R %	0.32±0.01 20.9±2.2	0.32±0.01 11.0±0.2	0.39±0.01 13.3±0.4	0.25±0.01 12.1±0.8	0.21±0.01 14.1±0.6
根 Root	R %	0.15±0.01 10.2±1.3	0.26±0.01 8.9±0.2	0.33±0.01 11.5±0.4	0.21±0.01 10.1±0.9	0.18±0.01 12.3±0.7
矿质土壤 Mineral soil	R %	1.10±0.18 68.9±3.5	2.34±0.07 80.1±0.4	2.21±0.12 75.2±0.8	1.64±0.18 77.7±1.6	1.12±0.09 73.6±1.4

R:呼吸通量 Respiration flux ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

和21.4% (图1). 各月份矿质土壤呼吸通量昼夜变化呈单峰变化形态. 各月份矿质土壤呼吸通量昼夜峰值出现的时间均滞后于地表温度峰值出现的时间,而与地表下10 cm处土壤温度峰值出现的时间相同. 各月份矿质土壤呼吸通量昼夜谷值出现的时间均在地表温度谷值出现之后,且与地表下10 cm处温度谷值出现的时间相吻合.

5—10月矿质土壤呼吸通量占土壤呼吸总通量的比例分别为68.5%、80.2%、75.1%、78.1%和73.3%.

2.2 各组分呼吸通量的月变化

5—10月枯枝落叶、根和矿质土壤呼吸通量的平均值分别为0.21~0.39、0.15~0.33和1.10~2.34 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 各组分间呼吸通量的月变化差异显著(表2). 主要生长季节呼吸通量均值达到最大,非主要生长季呼吸通量均值较低.

5—10月份枯枝落叶、根和矿质土壤呼吸通量占土壤总呼吸通量百分比的平均值分别为14.3%、10.6%和75.1%,其月际变化特征显著. 枯枝落叶和根呼吸的月际变化趋势相同,矿质土壤呼吸通量则与矿质土壤和根相反.

2.3 各组分呼吸通量对温度的敏感性

由表3可以看出,枯枝落叶层和矿质土壤呼吸通量对地表和地表下10 cm处的土壤温度敏感性

表3 各组分呼吸通量 Q_{10} 值
Table 3 Q_{10} of respiration flux in each soil component

组分 Component	位置 Position	日期 Date				
		05-20	06-21	08-15	09-19	10-09
枯枝落叶 Litter layer	A B	1.02 1.11	1.02 1.16	1.05 1.23	1.06 1.26	1.02 1.23
根 Root	A B	0.99 0.92	1.01 1.01	1.04 1.13	0.99 1.05	1.02 0.87
矿质土壤 Mineral soil	A B	1.31 3.81	1.08 1.83	1.15 1.86	1.24 2.36	1.02 3.86

A:地表 Soil surface; B:地表下10 cm 10 cm depth.

(Q_{10})平均值分别为1.03、1.19和1.16、2.74,其中地表下10 cm处的 Q_{10} 值略高于地表,差异显著. 而根呼吸通量对地表下10 cm处的 Q_{10} 值与地表之间无显著差异.

从各组分呼吸通量 Q_{10} 值的月变化来看,枯枝落叶和根呼吸通量对地表及地表下10 cm处的 Q_{10} 值均为春秋两季较小、夏季较大,而矿质土壤则相反.

3 讨论

3.1 各组分呼吸的昼夜变化

有研究表明,土壤表面呼吸通量受土壤温度的影响较大,其昼夜变化与土壤表面或者地表下10 cm处温度的昼夜变化相关^[19-20]. 这与矿质土壤呼吸通量昼夜变化的观测结果相同,但与枯枝落叶呼吸通量昼夜变化的观测结果有所差异,且各月份呼吸通量昼夜变化峰值出现的时间与地表及地表下10 cm处温度峰值出现的时间不具有相关性. 其原因可能是:观测林地各月份枯枝落叶层呼吸通量的昼夜变化幅度很小,而枯枝落叶层地处土壤表面,CO₂的产生和排放过程受地表因素(如土-气界面温差、气流速度的变化等)的影响较大. 由于清晨地表气流较稳定,各月份枯枝落叶层呼吸强度昼夜变化的谷值均出现在地表温度谷值附近或之后. 受树冠遮蔽^[21]以及昼夜温差的影响,矿质土壤呼吸通量昼夜变化幅度较大,且各月间差异明显. 其峰值(谷值)出现的时间均滞后于地表温度峰值而与地表下10 cm处温度峰值(谷值)出现的时间相吻合.

有研究认为,近期光合作用产物对根的分配将对根呼吸的昼夜变化具有决定意义^[22],因此每天的午后,滞后于光合作用峰值若干小时后^[23-24],根呼吸会出现一个高峰值^[25]. 本研究结果与之有相似之处. 各月份根呼吸通量的昼夜变化均呈现单峰形态,且春季变化幅度小、夏秋两季略大,表明根呼吸通量与光合作用有一定的相关性. 根呼吸通量昼夜峰值

出现的时间差异性较大,可能与光合作用峰值出现的时间^[26-27]以及光合作用产物传导速度的不同相关。根呼吸通量昼夜谷值出现的时间与峰值相比滞后若干小时,滞后时间的长短与光合作用特点有关。如5月光合作用昼夜变化较平滑,所以谷值与峰值相比滞后的时间较短,而8月光合作用呈双峰形态,光合作用峰值持续时间较长,导致根呼吸通量谷值较峰值滞后时间较长。

3.2 各组分呼吸占土壤呼吸总量的比例

由于呼吸作用的昼夜变化使得土壤各组分呼吸占土壤呼吸总量的比例在昼夜间发生波动,并且各月之间存在变化。由于观测林地枯枝落叶层较薄,枯枝落叶呼吸占土壤呼吸总量的比例较低,所以昼夜波动幅度较小。受土壤温度及其他2个组分呼吸通量季节变化的影响,枯枝落叶呼吸通量占土壤呼吸总通量的比例表现出5月20日、8月15日和10月9日较高,6月21日和9月19日较低的月际变化特点。5—10月根呼吸通量占土壤呼吸总通量的比例与光合作用强度的月变化相关。有研究表明,森林生态系统土壤呼吸中根系呼吸贡献率为45.0%~50.0%^[28]。本研究结果低于该值,除与林分类型、林龄差别有关外,还可能与试验方法有关。挖壕法在切断植物根系的同时,增加了挖壕小样方内的分解底物,无疑会增加土壤异养呼吸在土壤呼吸中所占的比例^[2]。

矿质土壤呼吸是土壤呼吸的主体,所占比例最高,高于一般研究结论^[29-31],原因如前所述。

3.3 各组分 Q_{10} 值

枯枝落叶和矿质土壤呼吸通量对地表下10 cm处的温度敏感性普遍高于对地表温度的敏感性,且差异显著^[32],表明地表下10 cm处温度对枯枝落叶和矿质土壤呼吸的影响具有重要意义。同时,矿质土壤呼吸对土壤温度的敏感性高于枯枝落叶呼吸对土壤温度的敏感性,表明作为土壤呼吸主体的矿质土壤对环境温度的敏感性更强,对温室气体排放的影响也更大。由于根呼吸受光合作用的影响,其呼吸通量对地表下10 cm处和地表温度敏感性之间无显著差异,且 Q_{10} 值较小。

枯枝落叶和根呼吸 Q_{10} 值的月变化表现出低温较大、高温较小的特点,与大区域内的研究结果相似^[33]。矿质土壤呼吸 Q_{10} 值则表现出相反的变化趋势。这可能是在小区域内 Q_{10} 值的变化可能与微环境的差异关系更大,如春秋两季林地遮蔽较小而夏季遮蔽较大。

参考文献

- [1] Chen B-Y (陈宝玉), Wang H-J (王洪君), Yang J (杨建), et al. Separation of soil respiration components and method for measuring soil respiration. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2009, **37**(1): 96-99 (in Chinese)
- [2] Yang J-Y (杨金艳), Wang C-K (王传宽). Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(6): 1640-1647 (in Chinese)
- [3] Cheng S-Y (程慎玉), Zhang X-Z (张宪洲). A review on differential methods for root and soil microbial contributions to total soil respiration. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 2003, **18**(4): 587-602 (in Chinese)
- [4] Zhang X-Q (张宪权), Wang W-J (王文杰), Zu Y-G (祖元刚), et al. The difference between different components of soil respiration in several types of forests in northeastern China. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2005, **33**(2): 46-73 (in Chinese)
- [5] Chang J-G (常建国), Liu S-R (刘世荣), Shi Z-M (史作民), et al. Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(5): 1791-1802 (in Chinese)
- [6] Luan J-W (栾军伟), Xiang C-H (向成华), Luo Z-S (骆宗诗), et al. Research advances in forest soil respiration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(12): 2451-2456
- [7] Meng C (孟春), Wang L-H (王立海), Shen W (沈微). Effect of selective cutting on soil respiration in conifer/broad-leaved mixed forests in Xiaoxing'anling. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(4): 729-734
- [8] Ryan MG, Law BE. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 2005, **73**: 3-27
- [9] Laik R, Kumar K, Das DK, et al. Labile soil organic matter pools in a calcioriented after 18 years of afforestation by different plantations. *Applied Soil Ecology*, 2009, **42**: 71-78
- [10] Tang J, Baldocchi DD, Xu L. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1298-1304
- [11] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 851-866
- [12] Yi Z, Fu S, Yi W, et al. Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China. *Forest Ecology and Management*, 2007, **243**: 178-186
- [13] Bhupinderpal S, Nordgren A, LöVenius MO, et al. Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: Extending obser-

- vations beyond the first year. *Plant, Cell & Environment*, 2003, **26**: 1287–1296
- [14] Fu S, Cheng W, Susfalk R. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: A greenhouse pot experiment. *Plant and Soil*, 2002, **239**: 133–140
- [15] Feng W-T (冯文婷), Zou X-M (邹晓明), Sha L-Q (沙丽清), *et al.* Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(1): 31–39 (in Chinese)
- [16] Wei H-D (尉海东), Ma X-Q (马祥庆). Dynamics of soil respiration in three major plantations in mid-subtropical zone. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University* (福建农林大学学报), 2006, **35**(3): 271–277 (in Chinese)
- [17] Wang X (王旭), Zhou G-S (周广胜), Jiang Y-L (蒋延玲). Soil respiration in natural mixed (*Betula platyphylla* and *Populus davidiana*) secondary forest and primary broad-leaved Korean pine forest. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(3): 348–354 (in Chinese)
- [18] Wang X (王旭), Zhou G-S (周广胜), Jiang Y-L (蒋延玲). Soil respiration in a clear-cut broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(3): 355–362 (in Chinese)
- [19] Meng C (孟春), Wang J (王俭), Di H-T (迪海廷). Soil CO₂ flux in *Betula platyphylla* and *Larix gmelini* plantation and its main influence factors during growing season. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2011, **39**(4): 57–61 (in Chinese)
- [20] Zhou H-X (周海霞), Zhang Y-D (张彦东), Sun H-L (孙海龙), *et al.* Soil respiration in temperate secondary forest and *Larix gmelinii* plantation in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(12): 2668–2674
- [21] Wang X-X (王修信), Liu X (刘馨), Zhu Q-J (朱启疆). Effects of seasonal LAI change on surface water and heat fluxes over urban forest. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2012, **26**(3): 48–51 (in Chinese)
- [22] Tang JW, Misson L, Gershenson A, *et al.* Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **132**: 212–227
- [23] Tang J, Baldocchi DD, Xum L. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1298–1304
- [24] Gaumont GD, Black TA, Barr AG, *et al.* Biophysical controls on rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in a boreal black spruce stand. *Tree Physiology*, 2008, **28**: 161–171
- [25] Ekblad A, Bjorn B, Holm A, *et al.* Forest soil respiration rate and $\delta^{13}\text{C}$ is regulated by recent above ground weather conditions. *Oecologia*, 2005, **143**: 136–142
- [26] Feng Y-L (冯玉龙), Ao H (敖红), Wang W-Z (王文章), *et al.* Diurnal variations of net photosynthetic rate and respiration rate in *Larix olgensis* Henry and effect of season and position. *Journal of Hebei University* (河北大学学报), 1998, **18**(2): 183–188 (in Chinese)
- [27] Wang W-Z (王文章), Chen J (陈杰), Zhang B-Y (张宝有), *et al.* Study on the photosynthetic characteristics and the primary productivity of *Larix olgensis*. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 1994, **22**(4): 15–21 (in Chinese)
- [28] Hanson PJ, Edwards NT, Garten CT, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 115–146
- [29] Nakane K, Kolmo T, Horikoshi T. Root respiration rate before and just after clear-felling in a mature, deciduous, broad-leaved forest. *Ecological Research*, 1996, **11**: 111–119
- [30] Lin G, Ehleringer JR, Rygielwicz PT, *et al.* Elevated CO₂ and temperature impacts on different components of soil CO₂ efflux in Douglas-fir terracosms. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 157–168
- [31] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 1625–1635
- [32] Meng C (孟春), Wang L-H (王立海), Wang J (王俭). Diurnal change in soil respiration rate in five types of plantations during non-growing. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2009, **37**(11): 77–79 (in Chinese)
- [33] Yang Q-P (杨庆朋), Xu M (徐明), Liu H-S (刘洪升), *et al.* Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(8): 2301–2311 (in Chinese)

作者简介 孟春,男,1964年生,博士,副教授。主要从事森林作业与环境方面的研究。E-mail: 504973901@qq.com

责任编辑 李凤琴
