

秦岭火地塘林区油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林 休眠期的土壤呼吸

侯 琳^{1,2}, 雷瑞德^{1,2,*}, 刘建军^{1,2}, 尚廉斌^{1,2}

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西·杨凌 712100; 2 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学研究所, 陕西·杨凌 712100)

摘要: 林木休眠期林地土壤 CO₂ 释放是森林生态系统碳平衡关键组成部分之一。由于绝大多数森林生态系统林木休眠期土壤 CO₂ 释放过程测定困难, 国内有关林木休眠期 CO₂ 释放, 量化方面的研究开展较少。采用动态开路气室法对秦岭火地塘林区天然次生油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林土壤呼吸的日变化进行了测定, 分析了土壤呼吸速率 (mgCO₂ m⁻² h⁻¹) 与土壤温度和体积含水率的关系, 基于土壤日均呼吸速率和土壤日均温度指数方程与观测季的总天数, 估算了林木休眠期林地土壤 CO₂ 释放量。结果表明: (1) 研究区林地土壤呼吸速率存在较大的时空变异。不同观测部位土壤呼吸速率的峰值出现时间各异, 呼吸作用较弱的时段也不一致。同一观测部位不同观测月中, 土壤日均呼吸速率变异系数分别为 48.38%, 82.51% 和 81.88%; (2) 当土温 > 8.5 °C 时, 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层, 土壤日均温与土壤日均呼吸速率间存在极显著 ($p < 0.001$) 的指数关系, Q_{10} 分别为 1.297 和 1.323; (3) 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层, 土壤体积含水率与土壤呼吸速率间关系复杂; (4) 林木休眠期研究区林地土壤 CO₂ 释放量变化于 (977.37 ± 88.43) ~ (997.19 ± 80.73) gCm⁻² ($p = 0.005$) 间。

关键词: 休眠期; 土壤呼吸; Q_{10} 值; 四通道采样器; 油松林

文章编号: 1000-0933(2008)09-4070-08 中图分类号: Q143, Q945, Q948, S718.55 文献标识码: A

Soil respiration in *Pinus tabulaeformis* forest during dormant period at Huoditang forest zone in the Qinling Mountains

HOU Lin^{1,2}, LEI Rui-De^{1,2,*}, LIU Jian-Jun^{1,2}, SHANG Lian-Bin^{1,2}

1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4070 ~ 4077.

Abstract: Soil CO₂ efflux in forest ecosystems during dormant season is one of the key components of the forest ecosystem carbon balance. Little work has been done to quantify soil CO₂ effluxes in most forests in the special time in China because of the difficulty in taking measurements. Soil respiration in a natural secondary *Pinus tabulaeformis* forest at Huoditang in the Qinling Mountains was measured from October to December in 2006 by means of open-path dynamic chamber technique. Relationships between soil respiration rate (R_s) and soil mean temperature (SMT), R_s and soil mean volumetric moisture

基金项目: 西北农林科技大学研究生创新计划资助项目(05ych027); 中国森林生态质量状况评估与报告技术资助项目(2006BAD03A0702/wb04)

收稿日期: 2008-03-26; 修订日期: 2008-06-04

作者简介: 侯琳(1969 ~), 男, 陕西武功人, 博士生, 副研究员, 主要从事黄土高原退化森林生态系统恢复及森林碳平衡研究. E-mail: houlin1969@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rdlei@163.com

致谢: 感谢日本岐阜大学(Gifu University)提供的土壤呼吸观测系统和日本国立农业环境科学研究所莫文红博士的技术指导。

Foundation item: The project was financially supported by both postgraduate innovating item of Northwest A&F University (No. 05ych027) and item accessing and reporting techniques on ecological quality of China forest (No. 2006BAD03A0702/wb04)

Received date: 2008-03-26; **Accepted date:** 2008-06-04

Biography: HOU Lin, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in restoration of degraded forest ecosystem on the Loess Plateau and carbon balance of forest ecosystem. E-mail: houlin1969@163.com

content (SMVC) in different depth (0–5 cm, 5–10 cm) were examined in the current study. We found that (1) there were tremendous temporal and spatial variations in R_s with coefficients of variation of R_s at same observation site (upper-part, middle and under-part) of 48.38%, 82.51% and 81.88% in October, November and December respectively; (2) F_c (soil diurnal mean respiration rate) and SDMT (soil diurnal mean temperature) were significantly correlated with an exponent relationship when SDMT > 8.5 °C for both soil depths (0–5 cm and 5–10 cm) examined. The temperature sensitivity of soil respiration, known as the Q_{10} value, was 1.297 and 1.323 respectively in depth of 0–5 cm and 5–10 cm in soil; (3) relationship between R_s and SMVC was complex in depth of 0–5 cm and 5–10 cm in soil; (4) soil CO_2 effluxes from October to December in 2006 in the experimental area was $(977.37 \pm 88.43) - (997.19 \pm 80.73) \text{ gCm}^{-2}$ ($p = 0.005$).

Key Words: dormant period; soil respiration; Q_{10} value; 4-channel-sample; *Pinus tabulaeformis* forest

全球每年因土壤呼吸释放的 CO_2 量高达 50 ~ 75 GtC^[1], 土壤呼吸的微小增加会造成大气中 CO_2 浓度剧增并对全球气候变暖提供正反馈^[2]。林木主要生长季林地土壤释放的 CO_2 量仅占其年释放总量的 10 ~ 50%^[3~6], 而高于林木生长季吸收总量一半的 C, 则消耗于林木休眠期的呼吸过程中^[7,8]。Brooks 等认为若忽略林木休眠期土壤 CO_2 释放量, 针叶林和落叶林年 C 固定将分别被高估 111% 和 71%^[9]。目前国外对不同生态系统冬季土壤 CO_2 释放已有较多地研究^[2~13], 而国内有关森林生态系统 C 动态的研究大多集中于生长季^[14~21], 林木休眠期林地土壤 CO_2 释放的报道尚不多见^[22, 23], 致使此阶段土壤 C 释放量未得到有效估计。开展天然次生油松林休眠期土壤呼吸研究, 旨在为本区森林生态系统碳汇强度精确估计提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

试验地位于陕西秦岭森林生态系统国家野外科学研究所天然油次生松林(*Pinus tabulaeformis*)内, 该地处北亚热带北缘(33°18'N, 108°20'E), 海拔 1860 ~ 1910 m, 坡向为西南向, 平均坡长 52 m, 坡形多变, 坡度范围在 15 ~ 42°间。试验区年均气温 8 ~ 10 °C, 年均降雨量 900 ~ 1200 mm, 年均蒸发量 800 ~ 950 mm, 降雪始于当年 10 月初, 来年 5 月初冰雪融化。土壤主要为花岗岩和变质花岗岩母质上发育起来的山地棕壤, 土层厚 30 ~ 50 cm, 土壤中砾石含量较高, 机械组成差异较大。试验地内优势树种为 60 龄的天然次生油松, 主要伴生树种有: 锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*), 华山松(*Pinus armandi*), 红桦(*Betula albosinensis*), 漆树(*Toxicodendron vernicifluum*), 青榨槭(*Acer davidii*)等, 林分郁闭度较高, 草本和灌木镶嵌分布于林隙。

1.2 林地土壤 CO_2 释放测定

在评估土壤、林木和微生物呼吸对生态系统呼吸的贡献中, 箱法是最有效的观测方法^[20], 本研究中林地土壤呼吸的日变化采用动态开路箱-红外气体分析法测定(4-Channel-Sample)^[3]。土壤呼吸观测于 2006 年 10 月初 ~ 2006 年 12 月底(2007 年 1 ~ 4 月, 野外观测房内气温很低, 测试分析仪无法正常工作)进行。在试验地内沿坡向选择一条 30 m 宽的典型样带, 沿坡向由坡顶至坡脚每隔 15 m 于等高线上布设 4 个测点, 相邻测点水平间距 6 m, 共布设测点 12 个。呼吸箱用 PVC 管制成, 箱高 15 cm, 内径 19.5 cm。每次测定前用盖子将呼吸箱封死, 以防观测过程中漏气, 测定结束后立刻卸掉盖子; 箱侧部相对的 2 个面, 分别距箱底 8 cm 和 6 cm 处各开 2 个直径 1 cm 的圆形进、出气孔, 孔间距 3 cm。每 4 个呼吸箱通过锥状气嘴与箱外等长的进、出气管(管长 38 m)连接到采样器(4-Channel-Sample)。气体经干燥和流量控制后, 由 IRGA (Li-6252, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)测定进、出气口 CO_2 浓度差, 呼吸箱置入土壤 5 cm 深处。于观测期内每月 5, 15, 25 日开始土壤呼吸测定, 采样器每 10 s 采集气体 1 次, 流速控制为 $1.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, IRGA 输出的数据由数据采集器自动记录, 同一地形部位的 4 个测点每 25 min 循环测定 1 次, 连续测定 24 h 后, 移至下一测点, 林内气压值由生态站的气象站获得。

1.3 土壤温度、体积含水率

由于土壤呼吸速率与 0~10 cm 深度的土温和土壤含水率相关性最好^[21],在测定同一地形部位土壤呼吸的同时,采用 HOBO® Micro Station 在每个呼吸箱外部附近分别于 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤深处埋设土壤体积含水率和土壤温度测定探头,在观测土壤呼吸速率的同时,同步测定土壤温度与体积含水率。每 5min 采集两个土层土壤体积含水率和土壤温度数据 1 组,同一地形部位连续测定 24 h。

1.4 数据分析

土壤呼吸速率 R_s ($\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$)

$$R_s = (a \times 10^{-6} \times L \times \rho \times 10^3) \times 60 \div S \times [273.15 \div (273.15 + t_{\text{mean}})] \times (p_{\text{meat}} \div 1013)$$

式中, a 为 IRGA 测得的 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), L 为气体流速 ($1.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), S 为呼吸箱地面积 (m^2), ρ 为标准大气压下 CO_2 密度 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), t_{mean} 平均地温 ($^{\circ}\text{C}$), p_{mean} 观测地平均大气压 ($\text{h} \cdot \text{Pa}$)。

Q_{10} 和 F_c 分别为温度每升高 10°C 土壤呼吸速率增加的倍数和土壤日均呼吸速率 ($\text{gCm}^{-2}\text{day}^{-1}$)^[3],计算方法如下:

$$Q_{10} = e^{10k}$$

式中, Q_{10} 是指温度每升高 10°C 土壤呼吸速率增加的倍数, k 为土壤呼吸速率与温度间指数模型中的温度反应系数^[25]。

$$F_c = R_0 e^{kT_s}$$

式中, F_c 为土壤日均呼吸速率 ($\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$), R_0 为 0°C 时的土壤呼吸速率, k 意义同前, T_s 为某一土层深处土壤温度日均值 ($^{\circ}\text{C}$)。

采用 SPSS(13.0) 软件进行数据分析。

2 结果与讨论

2.1 林木休眠期土壤呼吸的日变化

林木休眠期土壤呼吸速率的日变化表现为单峰曲线,但不同观测部位土壤呼吸过程特征不同,土壤呼吸速率均值变化于 $(1483.93 \pm 22.58) \sim (1550.72 \pm 8.67) \text{ mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ($\alpha = 0.05$) (图 1)。试验地上部,土壤呼吸作用 13:00~21:00 较强,土壤呼吸速率的峰值出现于 14:00,5:00~9:00 呼吸作用较弱;试验地中部,12:00~21:00 呼吸作用较强,土壤呼吸速率的峰值出现于 15:00,5:00~10:00 呼吸作用较弱。试验地下部,13:00~19:00 呼吸作用较强,土壤呼吸速率的峰值出现于 16:00,3:00~10:00 呼吸作用较弱。不同观测部位土壤呼吸速率的变异,一方面是由于不同地形部位土壤质地和土壤有机碳含量不同,另一方面则因地形差异导致微气候条件各异致使土壤温度和土壤含水率变化不同步引起。

2.2 林木休眠期土壤呼吸的月变化

10~12 月份随时间推移 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤温度,分别由 10 月的 $(11.60 \pm 0.40)^{\circ}\text{C}$ 和 $(11.88 \pm 0.35)^{\circ}\text{C}$ 迅速下降至 12 月的 $(0.75 \pm 0.07)^{\circ}\text{C}$ 和 $(0.94 \pm 0.03)^{\circ}\text{C}$ ($\alpha = 0.05$) (图 2),试验地上、中、下部土壤呼吸速率的日均值也分别从 10 月的 $(36.47 \pm 0.52) \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, $(36.27 \pm 0.34) \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 和 $(36.62 \pm 0.62) \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 下降至 12 月的 $(1.68 \pm 0.28) \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, $(1.29 \pm 0.46) \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 和 $(1.40 \pm 0.52) \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ($\alpha = 0.05$) (图 3),同一观测部位不同月中土壤呼吸速率的日均值变异系数分别达 48.38%, 82.51% 和 81.88%。试验地上、下部地势平缓,土层较厚,降水易蓄积,在土温较高的情况下,微生物的分解活动和植物根系的呼吸作

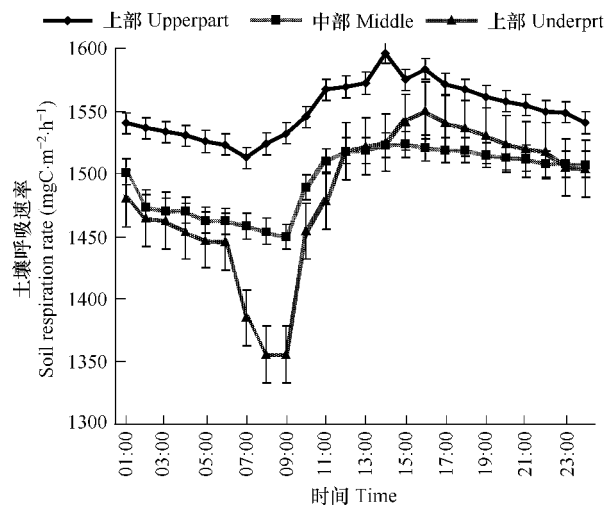


图 1 土壤呼吸速率日变化 ($\text{mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$)

Fig. 1 Diurnal variations of soil respiration rate

用较强,10月份和11月份土壤呼吸速率的日平均值较高,中部则因坡度较陡、土层薄、植被分布不均匀,土壤呼吸速率的日平均值较低;12月份随着气温和土温的进一步降低,各部位土壤呼吸强度骤减。试验地上部因受太阳照射时间较长,土温相对较高,土壤仍维持微弱的呼吸;试验地中、下部则因靠近河流,地下水位较高,土壤湿度大、温度低,表层土壤易冻结,影响了深层土壤呼吸释放的 CO_2 向上传输,土壤呼吸强度接近于零。

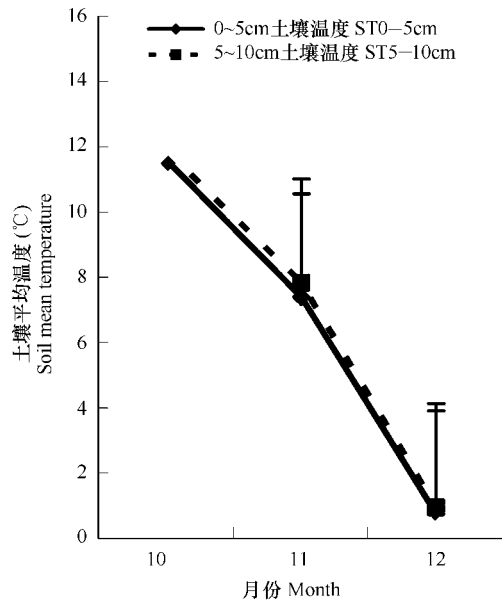


图2 土壤温度月变化

Fig. 2 Monthly variations of soil temperature

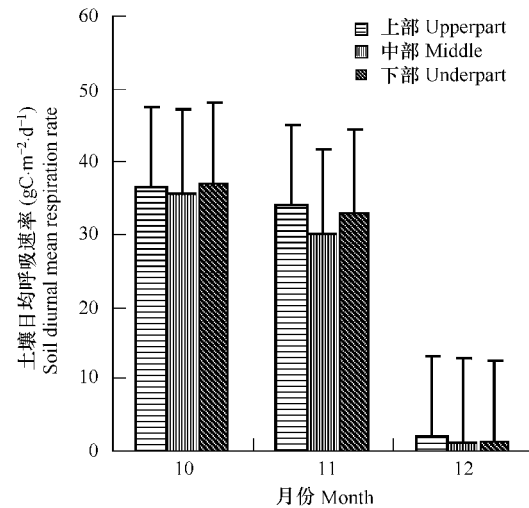


图3 土壤呼吸速率的月变化

Fig. 3 Monthly variations of soil respiration

2.3 土壤温度对土壤呼吸速率的影响

土壤温度是限制土壤微生物和植物根系活性、植物生长和光合作用的重要生态因子^[26,27],而土壤呼吸则与土壤微生物和植物根系活性以及植物生长密切相关,为了解土壤呼吸速率对土壤温度的敏感性,拟合土壤日均呼吸速率与土壤日均温的关系。当土壤温度 $>8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土壤日均呼吸速率与 $0\sim 5\text{ cm}$ 和 $5\sim 10\text{ cm}$ 土壤日均温度间均存在极显著($p < 0.001$)的指数关系(表1,图4), Q_{10} 分别为1.297和1.323,表明深层土壤温度变化对日均呼吸速率影响较大;而当土壤温度 $<8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土壤日均呼吸速率较低,植物根系和土壤微生物的呼吸作用较弱,土壤呼吸速率与土壤温度间的相关性不显著。

2.4 土壤水分对土壤呼吸速率的影响

10~11月份, $0\sim 5\text{ cm}$ 土层,土壤体积含水率分别在 $1.40\% \pm 0.51\%$, $2.30\% \pm 0.14\%$ 和 $10.78\% \pm 3.37\%$, $5\sim 10\text{ cm}$ 土层,土壤体积含水率分别在 $4.33\% \pm 0.47\%$, $5.05\% \pm 0.098\%$ 和 $11.00\% \pm 1.57\%$,土壤呼吸速率随土壤体积含水率增加而增大;而在前两个观测月中, $0\sim 5\text{ cm}$ 土层,土壤含水率分别在 $2.10\% \pm 0.22\%$ 和 $13.07\% \pm 2.02\%$, $5\sim 10\text{ cm}$ 土层土壤含水率分别在 $2.50\% \pm 2.05\%$, $3.20\% \pm 0.78\%$, $4.88\% \pm 0.16\%$, $10.20\% \pm 0.19\%$ 和 $13.15\% \pm 1.07\%$ 份时(图5),土壤呼吸速率随含水率增加而减小;12月份 $0\sim 5\text{ cm}$ 土层土壤呼吸速率随土壤体积含水率增大而减小, $5\sim 10\text{ cm}$ 土层土壤呼吸速率则随土壤体积含水率增大而增大(图5)。土壤溶液中可溶性有机C是土壤微生物活动的主要来源^[26,27],土壤含水率影响着土壤溶液

表1 土壤日均呼吸速率与土壤温度的关系

Table 1 Relationship between soil temperature and diurnal soil respiration rate

土层深度 Depth (cm)	R_0	k	Q_{10}	R^2	p
0 ~ 5	27.297	0.026	1.297	0.873	<0.001
5 ~ 10	26.149	0.028	1.323	0.878	<0.001

参数 R_0 , k , Q_{10} , R^2 和 p 分别为 0°C 时的土壤呼吸速率,温度反应系数,温度每升高 10°C 土壤呼吸速率增加的倍数,决定系数和显著性水平 Parameter of R_0 , k , Q_{10} , R^2 and p means the respiration rate at a reference temperature of 0°C , the coefficient related to sensitivity to temperature, the factor by which a reaction increases for an increase of 10°C , coefficient of determination and significant level, respectively

中可溶性有机 C 的扩散,土壤水分只有在最适范围内时,土壤水膜上可溶性有机 C 的扩散才不会受到妨碍,此时土壤中的细菌等微生物处于活跃状态^[27],这可能是在一定范围内,土壤呼吸速率随含水率增加而增大的主要原因; O_2 是植物根系和土壤微生物进行有氧呼吸的必要条件,当土壤含水量高出最适范围时,不仅土壤中 O_2 的扩散会限制,土壤处于嫌气状态^[28],而且会使土壤温度降低、通透性变差,从而降低土壤呼吸强度和土壤中 CO_2 向表层土壤传输的效率,因此土壤含水量较高时,土壤呼吸速率反而降低。土壤呼吸与土壤水分含量的变化间关系复杂,不同的研究者在各自特定条件下所得出的结果有着较大差异且缺乏普适性^[26],精确量化土壤水分变化对土壤呼吸的影响,尚需进一步深入研究。

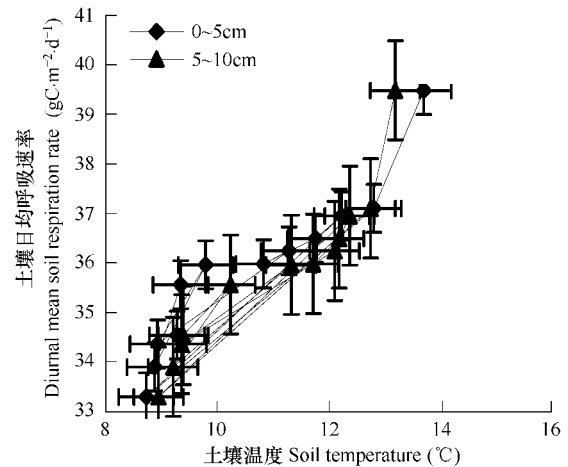


图4 不同深度土壤温度与日均呼吸速率

Fig. 4 Relationship between diurnal mean soil respiration rate and soil temperature in variant depth

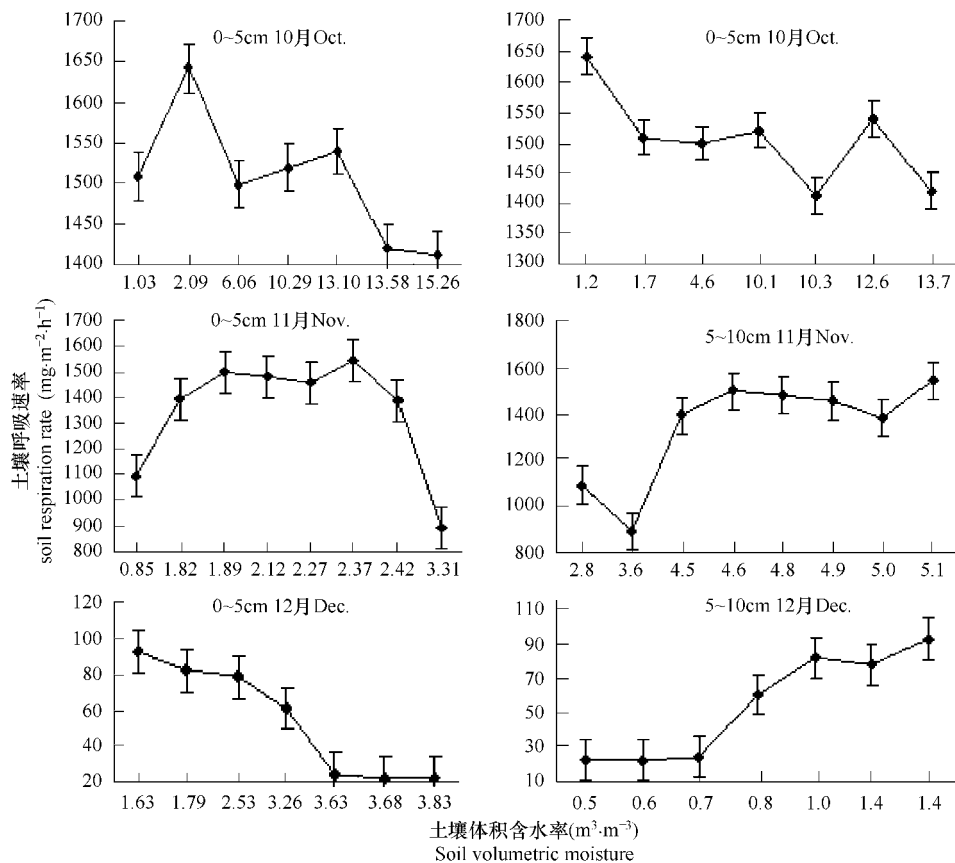


图5 土壤呼吸速率与土壤含水率

Fig. 5 Soil volumetric moisture and soil respiration rate

2.5 林木休眠期土壤 CO_2 释放量

Lee 等^[29]和 Borken 等^[30]认为,20 cm 以上土层包含了 90% 以上或更大比例的根系和土壤微生物生物量,此深度的土壤对土壤 C 释放通量的贡献远大于深层土壤。本研究利用已建立的 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤日均温与土壤日均呼吸速率的指数方程估算了观测月的日均呼吸速率,结合各月的总天数,研究区土壤林木休

眠期 CO_2 释放量分别为 $(997.19 \pm 80.73) \text{ gCm}^{-2}$ 和 $(977.37 \pm 88.43) \text{ gCm}^{-2}$ ($p = 0.05$), 本结果低于王小国等^[23]的测定值而高于其他已发表的森林生态系统冬季土壤呼吸的释放量(表 2)。

Nakadai 等^[31]研究表明无论是对实验室或是野外的实验数据分析均显示静态密闭气室法的气体通量测定结果均与动态法测量值有很大的差异。除王小国等的所处研究区纬度低于本研究区外,其他研究者所处的研究区纬度均高于本区,研究区域、研究对象和观测手段的差异是本研究结果高于绝大多数同类研究结果的根本原因。为使不同研究者的观测结果具有可比性,统一观测方法和标准是开展陆地生态系统土壤呼吸研究迫切需要解决的问题^[32]。

表 2 已发表的森林生态系统冬季土壤呼吸的释放量(gCm^{-2})
Table 2 Reported values of winter CO_2 efflux in forest ecosystem

观测地点 Location	生态系统类型 Ecosystem types	观测方法 Method	冬季 CO_2 释放量 Winter CO_2 efflux
日本福冈 Fukuoka, Japan (35°N, 135°E)	针叶林 Coniferous forest	便携式开路系统 Open-flow portable system	0.26 ± 0.02 $((1.65 \pm 0.13) \text{ mol m}^{-2} \text{ a}^{-1})^{[2]}$
日本中部 Central, Japan (36°08'N, 137°25'E)	阔叶林 Broad-leaved forest	开路箱 Open path dynamic chamber IRGA	$101.70 \pm 3.39^{[3]}$ (无雪期 Snow free)
加拿大安大略 Ontario, Canada (48.217°N, 82.156°W)	针叶林 Boreal forest	光合仪 Licor 6400-09 /6262	344.76 ± 68.95 $((0.5 \pm 0.1) \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{[10]}$
奥地利 Austrian (47°34'50"N, 11°38'21"E)	阔叶林 Broad-leaved	闭路动态箱 Closed dynamic chamber	$62.0^{[11]}$
挪威 Norway (74°28'N, 20°34'W)	灌丛 Shrub	光合仪 Licor-6400-09 /6262	$103 \sim 176^{[12]}$
美国爱达荷、俄勒冈 Idaho, Oregon, USA (44°16'N, 112°08'W, 43°35'22"N, 112°56'23"W,)	灌丛 Shrub	波文比 Bowen ratio	$((1.31 \pm 0.80), (1.23 \pm 1.19),$ $(0.68 \pm 0.56) \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1})^{[13]}$
华北 Northern China (35°01'N, 112°28')	针叶林 Coniferous	自动观测系统 Licor-8100	$(348.6 \pm 0.61) \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{[22]}$
中国四川 Sichuan, China (31°16'N, 105°27'E)	针叶林 Coniferous	闭路静态箱-色谱 closed chamber - chromatographic	$117 \sim 860 ((78.63 \sim 577.97) \text{ mgm}^{-2}$ $\text{h}^{-1})^{[23]}$ 2004 年 12 月)

$0.0063 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

3 结论

研究区林木休眠期林地土壤呼吸速率存在较大的时、空变异。试验地上、中、下部 13:00 ~ 21:00, 12:00 ~ 21:00 和 13:00 ~ 19:00 土壤呼吸较强,呼吸速率的峰值分别出现 14:00, 15:00 和 16:00, 而 5:00 ~ 9:00, 5:00 ~ 10:00 和 3:00 ~ 10:00 呼吸作用较弱。相邻观测部位土壤呼吸速率的峰值出现时间相差 1 ~ 2 h, 呼吸作用较弱的时段也不一致; 10 ~ 12 月份, 试验地上、中、下部, 土壤呼吸速率的日均值分别为 $(36.47 \pm 0.52) \text{ gCm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $(36.27 \pm 0.34) \text{ gCm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $(36.62 \pm 0.62) \text{ gCm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 下降至 12 月份的 $(1.68 \pm 0.28) \text{ gCm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $(1.29 \pm 0.46) \text{ gCm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $(1.40 \pm 0.52) \text{ gCm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 变异系数分别达 48.38%, 82.51% 和 81.88%。

0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层, > 8.5 °C 的土温与土壤日均呼吸速率间存在极显著 ($p < 0.001$) 的指数关系, Q_{10} 分别为 1.297 和 1.323, < 8.0 °C 的土温与土壤日均呼吸速率无明显关系。

土壤体积含水率与土壤呼吸速率间关系复杂。10 月和 11 月份, 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层, 土壤含水率分别在 $1.40\% \pm 0.51\%$, $2.30\% \pm 0.14\%$, $4.33\% \pm 0.47\%$, $5.05\% \pm 0.098\%$, $10.78\% \pm 3.37\%$ 和 $11.00\% \pm 1.57\%$ 间时, 土壤呼吸速率随含水率增加而增大; 土壤含水率分别在 $2.50\% \pm 2.05\%$, $3.20\% \pm 0.78\%$, $4.88\% \pm 0.16\%$, $10.20\% \pm 0.19\%$ 和 $13.15\% \pm 1.07\%$ 间时, 土壤呼吸速率随含水率增加而减小; 12 月 0 ~ 5 cm 土层土壤呼吸速率随土壤体积含水率增大而减小, 5 ~ 10 cm 土层土壤呼吸速率则随土壤体积含水率增大而增大。

研究区林木休眠期林地土壤 CO_2 释放量变化于 $(977.37 \pm 88.43) \sim (997.19 \pm 80.73) \text{ gCm}^{-2}$ 。

References:

- [1] Matthias Falk, Kyaw Tha Paw U, Sonia Wharton, et al. Is soil respiration a major contributor to the carbon budget within a Pacific Northwest old-

- growth forest? *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135: 269—283.
- [2] Mizue Ohashia, Koichiro Gyokusen. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 1130—1138.
- [3] Wenhong Mo, Mi-Sun Lee, Masaki Uchida, *et al.* Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 134: 81—94.
- [4] Mariko S, Nishimura N, Mo W, Matsui Y, *et al.* Winter CO₂ flux from soil and snow surfaces in a cool temperate deciduous forest, Japan. *Ecology Research*, 2000, 15, 363—372.
- [5] McDowell N G, Marshall J D, Hooker T D, *et al.* Estimating CO₂ flux from snowpacks at three sites in the Rocky Mountains. *Tree Physiology*, 2000, 20, 745—753.
- [6] Mast M A, Wickland K P, Striegl R T, *et al.* Winter fluxes of CO₂ and CH₄ from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1998, 12 (4), 607—620.
- [7] Hubbard R M, Ryan M G, Kelly E, *et al.* Seasonal patterns in soil surface CO₂ flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine forests. *Biogeochemistry*, 2005, 73, 93—107.
- [8] Monson R K, Lipson D L, Burns S P, *et al.* Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, 2006, 439 (7077), 711—714.
- [9] Brooks P D, McKnight D, Elder K. Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks: potential feedbacks between growing season and winter carbon fluxes. *Global Change Biology*, 2004, 11: 231—238.
- [10] Myroslava Khomik M, Altaf Arain J H, McCaughey. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 244—256.
- [11] Andreas Schindlbacher, Sophie Zechmeister-Boltenstern, Gerhard Glatzel, *et al.* Winter soil respiration from an Austrian mountain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146: 205—215.
- [12] Elberling B. Annual soil CO₂ effluxes in the high Arctic: The role of snow thickness and vegetation type. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 646—654.
- [13] Tagir G. Gilmanov, Douglas A. Johnson, Nicanor Z. Saliendra, *et al.* Winter CO₂ fluxes above sagebrush-steppe ecosystems in Idaho and Oregon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126: 73—88.
- [14] Wang X, Zhou G X, Jiang Y L, *et al.* Soil respiration in a clear-cut broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 355—362.
- [15] Zhou H X, Zhang Y D, Sun H L, *et al.* Soil respiration in temperate secondary forest and *Larix gmelinii* plantation in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2668—2674.
- [16] Liu H, Zang R G, Jiang X H, *et al.* Spatial and temporal variation in soil respiration of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural stand in the Tianshan mountains. *Journal of Natural Resources*, 2007, 24(4): 568—578.
- [17] Luo L F, Niu Y, Wang Y L, *et al.* Effect of temperature on soil respiration in *Picea crassifolia* forest of Qilian mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(10): 117—121.
- [18] Huang X, Li W H, Chen Y N, *et al.* Soil respiration of desert riparian forests in the lower reaches of Tarim river as affected by air temperature at 10 cm above the ground surface and soil water. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1951—1959.
- [19] Chang J G, Liu S H R, Shi Z M, *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*, 2007, 27(5): 1951—1959.
- [20] 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.
- [21] Yang J Y, Wang C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1641—1647.
- [22] Wang H S, Zhang J S, Meng P, *et al.* Soil respiration of the representative artificial forests during the minor growing season in the hilly region of north China. *Forest Research*, 2007, 20(6): 820—825.
- [23] Wang X G, Zhu B, Wang Y Q, *et al.* Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1960—1968.
- [24] Zhou C Y, Zhou G Y, Wang Y H, *et al.* Soil respiration of a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan Mountain, Guangdong Province. *Journal of Bei Jing Forestry University*, 2005, 27(4): 23—27.
- [25] Zhang L P, Chen Y N, Li W H, *et al.* Carbon dioxide emission of soil in the *Halostachys caspica* community and its affecting factors in the Junggar basin, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2007, 24(6): 854—860.

- [26] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acata Ecologica Sinica*, 2003, 23 (5): 972—978.
- [27] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and in tilled soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1984, 48: 1267—1272.
- [28] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217—227.
- [29] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo, *et al.* Seasonal changes in the contribution of root respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant Soil*, 2003. 255, 311—318.
- [30] Borken W, Xu Y J, Davison E A, *et al.* Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8, 1205—1216.
- [31] Nakadai T, Koizumi H, Usami Y, *et al.*, Examination of the method for measuring soil respiration in cultivated land effect of carbon-dioxide concentration on soil respiration. *Ecological Research*, 1993, 8(1): 65—71.
- [32] Hou L, Lei R D, Wang D X, *et al.* A review of soil respiration in forest ecosystem. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (3): 589—594.

参考文献:

- [14] 王旭,周广胜,蒋延玲,等. 长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 355~362.
- [15] 周海霞,张彦东,孙海龙,等. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2668~2674.
- [16] 刘华,臧润国,江晓珩,等. 天山云杉天然林分土壤呼吸速率的时空变化规律分析. *自然资源学报*, 2007, 24(4): 568~578.
- [17] 罗龙发,牛赞,王艺林,等. 祁连山青海云杉林温度变化对土壤呼吸的影响. *林业科学*, 2007, 43 (10): 117~121.
- [18] 黄湘,李卫红,陈亚宁,等. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2007, 27 (5): 1951~1959.
- [19] 常建国,刘世荣,史作民,等. 北亚热带-南温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离. *生态学报*, 2007, 27(5): 2875~2882.
- [20] 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.
- [21] 杨金艳,王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化. *生态学报*, 2006, 26(6): 1641~1647.
- [22] 王鹤松,张劲松,孟平,等. 华北山区非主要生长季典型人工林土壤呼吸变化特征. *林业科学研究*, 2007, 20(6): 820~825.
- [23] 王小国,朱波,王艳强,等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960~1968.
- [24] 周存宇,周国逸,王迎红,等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(4): 23~27.
- [25] 张丽萍,陈亚宁,李卫红,等. 准噶尔盆地盐穗木群落土壤 CO₂ 释放规律及其影响因子. *干旱区研究*, 2007, 24(6): 854~860.
- [26] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23 (5): 972~978.
- [32] 侯琳,雷瑞德,王得祥,等. 森林生态系统土壤呼吸研究进展. *土壤通报*, 2006, 37(3): 589~594.