

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2019.02.001

## 亚高山暗针叶林的土壤呼吸

罗辑<sup>1</sup>,李伟<sup>1\*</sup>,贾国清<sup>2</sup>,杨丹荔<sup>1</sup>,何咏梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室,四川 成都 610041;

2. 贡嘎山自然保护区管理局,四川 康定 626000)

**摘要:**以贡嘎山国家级自然保护区中峨眉冷杉(*Abies fabri*)林为研究对象,采用LI-6400-09便携式土壤呼吸室对其土壤呼吸速率进行了连续定位观测。结果表明:(1)峨眉冷杉成熟林和中龄林的土壤呼吸速率和土壤温度在各个月份存在差异;(2)两种林分的土壤呼吸速率具有明显的季节变化特征,表现为夏季>秋季>春季>冬季;成熟林的月平均土壤呼吸速率在 $0.82 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \sim 5.88 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,季节变差系数为50.6%,中龄林的月平均土壤呼吸速率在 $0.52 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \sim 3.52 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,季节变差系数为48.5%;(3)两种林分的土壤呼吸速率季节变化与土壤5 cm温度呈显著性正相关;(4)峨眉冷杉成熟林和中龄林土壤CO<sub>2</sub>释放率的 $Q_{10}$ 值分别为3.2和2.6,峨眉冷杉成熟林土壤呼吸对温度的敏感性指数要大于中龄林。

**关键词:**峨眉冷杉;土壤呼吸;变差系数; $Q_{10}$ 值

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1003-5508(2019)02-0001-04

## Soil Respiration of Subalpine Dark Coniferous Forests

LUO Ji<sup>1</sup> LI Wei<sup>1\*</sup> JIA Guo-qing<sup>2</sup> YANG Dan-li<sup>1</sup> HE Yong-mei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain

Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Gongga Mountain National Nature Reserve Administration, Kangding 626000, China)

**Abstract:** Field experiments were carried out to examine the soil respiration rate by LI-6400-09 portable soil respiration chamber in an *Abies fabri* forest in Gongga Mountain National Nature Reserve. The results showed that (1) the soil respiration rate and soil temperature were different in *Abies fabri* mature and half-mature forests each month; (2) The soil respiration rate of the two stands had obvious seasonal variation characteristics, which were arranged as: summer > autumn > spring > winter; the average monthly soil respiration rate of mature forest was between  $0.82 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \sim 5.88 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , the coefficient of seasonal variation was 50.6%, and the average monthly soil respiration rate of half-mature aged forest was between  $0.52 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \sim 3.52 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , the coefficient of seasonal variation was 48.5%; (3) The seasonal variation of soil respiration rate was positively correlated with the soil temperature of 5 cm; (4) The  $Q_{10}$  values of soil CO<sub>2</sub> emission rates were 3.2 and 2.6 respectively in *A. fabri* mature and half-mature forest, the sensitivity index of soil respiration to temperature in mature *A. fabri* forest was higher than that in half-mature forest.

**Key words:** *Abies fabri* forest, Soil respiration, Coefficient of variation,  $Q_{10}$

收稿日期:2019-02-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504900;2016YFC0503305);国家自然科学基金(41771062)

作者简介:罗辑(1960-),男,研究员,主要从事生态与环境研究,e-mail:luoji@imde.ac.cn。

\*通讯作者:李伟,e-mail:liweil@imde.ac.cn。

在陆地生态系统中,土壤蓄积了大量的碳<sup>[1]</sup>,其中森林土壤的碳贮量约为全球土壤碳贮量的73%<sup>[2]</sup>。土壤释放的CO<sub>2</sub>量作为仅次于总初级生产力(GPP)的第二大碳通量<sup>[3]</sup>,是全球碳循环中一个关键的生态过程。因其巨大的通量,土壤CO<sub>2</sub>释放速率的微小变化都会对大气CO<sub>2</sub>浓度产生巨大影响<sup>[4]</sup>。全球气候变化现已成为全人类关注的热点问题,而土壤CO<sub>2</sub>作为土壤碳的主要输出方式和大气重要的“碳源”,对它进行精确、系统的测定已成为全球气候变化研究中的关键性问题之一。由于土壤本身的复杂性和利用的多样性,目前对林地土壤作为大气CO<sub>2</sub>源/汇的作用尚不能精确的定量,现有的理论多属于定性推理分析。在一些全球碳平衡估算中,不同作者利用各自不同的假设,有些假设和一些观测资料相矛盾,导致不同的作者估算出的数字相差很大。只有把森林土壤碳排放问题搞清楚后,才能准确估算全球的碳平衡。本节主要是对贡嘎山东坡峨眉冷杉林成熟林、中龄林内土壤碳释放进行定位观测,目的在于揭示不同林龄林地土壤CO<sub>2</sub>释放率及规律,为准确估算峨眉冷杉林生态系统碳平衡以及我国温室气体清单和森林碳平衡的估算提供基础数据。

## 1 研究区概况

中国西南山区是亚高山暗针叶林集中分布地区,是西南低纬度高海拔山地独具特色的植被类型,建群种主要是云杉属和冷杉属树种。亚高山暗针叶林属于寒温性针叶林,组成种类多,层次丰富,与寒温带地带性植被“泰加林”在群落组成和结构方面明显不同,林下土壤也没有强烈的灰化作用。冷杉属是松科中较原始的属,适应于冷湿的环境条件,对水分要求较高。冷杉属树种的垂直分布较大多数云杉属的树种高,并往往形成暗针叶林带的上半部的主要建群种,在青藏高原东缘通常是组成林线的主要树种。峨眉冷杉林是四川特有森林类型,主要沿盆地西缘山地分布。贡嘎山东坡峨眉冷杉林主要分布海拔2 800 m~3 600 m,该森林由于垂直分布幅度较大,随海拔升高林分中物种组成和树体结构等都有改变。实验在贡嘎山国家级自然保护区开展,选择海拔3 000 m附近的峨眉冷杉成熟林和中龄林进行对比研究,同步观测土壤呼吸及其影响因子。

## 2 研究方法

每块样地设置3个重复观测点,同时观测大气湿度、气温、近地表气温(距地表面30 cm的气温)、地表温度、5 cm深地温和10 cm深地温等相关气象因子,并取表层0~10 cm的土壤样品,测定土壤含水量和容重。并采用动态密闭气室红外CO<sub>2</sub>分析仪(Li-6400-9),在不同季节对土壤呼吸速率作平行测定。每年还用激光叶面积仪(CI-203)和植物冠层分析仪(CI-203)测定群落叶面积指数,测定群落的净光合速率和植物地上部分的呼吸速率,并调查群落的生物量和土壤成分。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤CO<sub>2</sub>释放率的季节变异

土壤中CO<sub>2</sub>主要来自地表凋落物、土壤微生物、植物根系、土壤动物等组分,而这些组分释放的CO<sub>2</sub>会随着土壤温度等外界因子的季节变化而有较强的季节变异。

由图1可以看出,峨眉冷杉成熟林和中龄林土壤CO<sub>2</sub>释放率均表现一定的季节变异规律,即土壤CO<sub>2</sub>释放率在生长季(5月—10月)较高,在非生长季(11月—4月)较低。成熟林土壤CO<sub>2</sub>释放率的季节变差系数(coefficient of variation) CV为50.6%,释放率最低月均值出现在12月,为0.82  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最高月均值出现在7月,为5.88  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ;中龄林土壤CO<sub>2</sub>释放率的季节变差系数为48.5%,最低月均值出现在1月,为0.52  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最高月均值出现在6月,为3.52  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

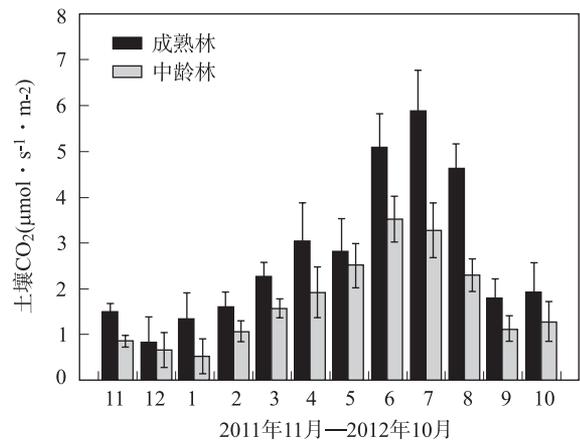


图1 土壤呼吸月均值( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ )

土壤温度的季节变异和土壤 CO<sub>2</sub> 的季节变异趋势相似(见图 2),成熟林土壤温度的季节变差系数为 56.0%,土壤温度最低月均值出现在 2 月,为 0.2℃,最高月均值出现在 6 月,为 12.3℃;中龄林土壤温度的季节变差系数为 49.1%,最低月均值出现在 1 月,为 -0.3℃,最高月均值出现在 6 月,为 13.3℃。

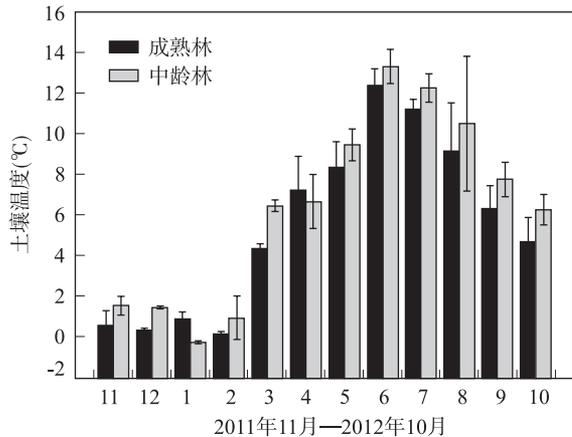


图 2 土壤温度月均值(°C)

### 3.2 土壤呼吸对温度的敏感性指数

影响土壤 CO<sub>2</sub> 释放的因素很多,既有土壤理化

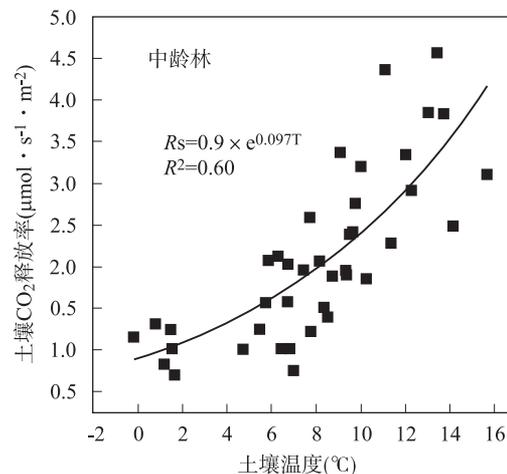
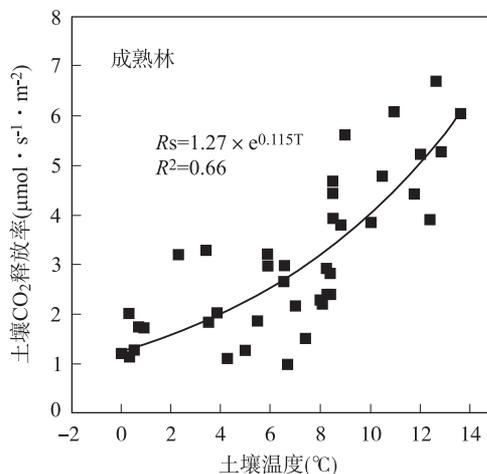


图 3 峨眉冷杉林土壤呼吸与土壤温度关系

另外, $Q_{10}$ 通常被用来描述土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率对温度的敏感性<sup>[8]</sup>:

$$Q_{10} = \exp(10\beta)$$

$Q_{10}$ 值表示温度每升高 10℃,土壤 CO<sub>2</sub> 释放率变化的程度。 $Q_{10}$ 值越大,土壤 CO<sub>2</sub> 释放对温度变化越敏感。经计算,贡嘎山东坡峨眉冷杉成熟林和中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 释放率的  $Q_{10}$  值分别为 3.2 和 2.6。这表示,当 5 cm 地温升高 10℃时,峨眉成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率要增加 320%,中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 释放

性质的影响,也有温度、降水等环境因子的影响,还有对土地的干扰、凋落物状况等等其他因素的影响,并且影响土壤 CO<sub>2</sub> 释放的因素可能会随着研究时间和地点的不同而发生变化<sup>[5]</sup>。很多研究表明,温度通常是影响土壤 CO<sub>2</sub> 释放的主要因子,特别是在气候湿润的地区<sup>[6]</sup>。土壤温度是限制土壤微生物和凋落物分解、植物根系活性、植物生长和光合作用重要生态因子<sup>[7]</sup>,而土壤 CO<sub>2</sub> 的释放则与土壤微生物和植物根系活性以及植物生长密切相关。土壤 CO<sub>2</sub> 释放率与土壤温度之间的关系多用如下指数方程来描述:

$$R_s = \alpha \exp(\beta T)$$

式中  $R_s$  表示土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率,  $T$  表示土壤温度,  $\alpha$  和  $\beta$  为系数。

由图 3 可以看出,成熟林和中龄林的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与 5cm 土壤温度均有极显著的正相关关系( $p < 0.001$ )。成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与 5 cm 土壤温度之间的关系为  $R_s = 1.27e^{0.115T}$ ;中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与 5 cm 土壤温度之间的关系为  $R_s = 0.9e^{0.097T}$ 。基于土壤温度的指数模型可以分别解释成熟林和中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率 66% 和 60% 的变异。

速率要增加 260%,成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 的释放对温度变化更敏感。

### 3.3 峨眉冷杉林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量

用每月中旬所测得的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的均值代表本月的平均土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率,个月的均值与时间相乘得到各月的土壤 CO<sub>2</sub> 排放量( $t C \cdot hm^{-2}$ ),最后将各月量累加求和,得到贡嘎山东坡峨眉冷杉林成熟林和中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 排放的年总量(见表 1)。

表1 土壤 CO<sub>2</sub> 排放量(t C · hm<sup>-2</sup>)

	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	总量
成熟林	0.46	0.27	0.43	0.48	0.73	0.94	0.90	1.58	1.89	1.49	0.56	0.61	10.33
中龄林	0.27	0.21	0.17	0.32	0.50	0.60	0.81	1.09	1.05	0.73	0.35	0.41	6.52

从表1可以看出,成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 全年排放量为 10.33 t C · hm<sup>-2</sup>,其中7月最高,为 1.89 t C · hm<sup>-2</sup>,占全年总排放量的 18.3%,其次是6月,排放量为 1.58 t C · hm<sup>-2</sup>,占全年的 15.3%,12月的土壤 CO<sub>2</sub> 排放量最小,仅占全年总排放量的 2.6%;中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 全年排放量为 6.52 t C · hm<sup>-2</sup>,其中6月最高,其次为7月,分别占全年总排放量的 10.6%和 10.2%,1月的排放量最小,仅占全年总量的 1.6%。峨眉冷杉成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 的年总排放量比中龄林的高出 58.6%。

#### 4 结论与讨论

成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 释放率的季节变差系数 CV 为 50.6%,释放率最低月均值出现在12月,为 0.82 μmol · s<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup>,最高月均值出现在7月,为 5.88 μmol · s<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup>;中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 释放率的季节变差系数为 48.5%,最低月均值出现在1月,为 0.52 μmol · s<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup>,最高月均值出现在6月,为 3.52 μmol · s<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup>。

成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与 5 cm 土壤温度之间的关系为  $R_s = 1.27e^{0.115}$ ;中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与 5 cm 土壤温度之间的关系为  $R_s = 0.9e^{0.097}$ 。基于土壤温度的指数模型,可以分别解释成熟林和中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率 66% 和 60% 的变异。贡嘎山东坡峨眉冷杉成熟林和中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 释放率的 Q<sub>10</sub> 值分别为 3.2 和 2.6。

成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 全年排放量为 10.33 t C · hm<sup>-2</sup>,其中7月最高,其次是6月,12月的土壤 CO<sub>2</sub> 排放量最小;中龄林土壤 CO<sub>2</sub> 全年排放量为 6.52 t C · hm<sup>-2</sup>,其中6月最高,其次为7月,1月的排放量最小。峨眉冷杉成熟林土壤 CO<sub>2</sub> 的年总排放量比中龄林的高出 58.6%。

群落的土壤呼吸速率具有明显的季节变化特征,表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。两种林

分土壤呼吸速率的季节变化与土壤 5 cm 温度有较强的指数正相关关系,成熟林的土壤呼吸对温度的敏感性指数(Q<sub>10</sub>值)显著高于中龄林。

准确测定不同林龄土壤呼吸的动态变化,可掌握植被恢复过程中碳动态变化,同时也是监测自然保护区和研究森林碳循环过程的重要内容<sup>[9]</sup>,对于估算亚高山暗针叶林温室气体排放及其对气候变化的响应也具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems [J]. Science, 1994, 263 (5144): 185 ~ 190.
- [2] Brown S, Lugo A E. The Storage and Production of Organic Matter in Tropical Forests and Their Role in the Global Carbon-Cycle [J]. Biotropica, 1982, 14(3): 161 ~ 177.
- [3] Raich J W, Schlesinger W H. The Global Carbon Dioxide flux in Soil Respiration and Its Relationship to Vegetation and Climate [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology 1992, 44: 81 ~ 99.
- [4] Rustad L, Huntington T, Boone R. Controls on Soil Respiration: Implications for Climate Change [J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 1 ~ 6.
- [5] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and Soil Respiration: Correlations and Controls [J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71 ~ 90.
- [6] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, et al. Temperature Sensitivity of Soil Respiration Is Affected by Prevailing Climatic Conditions and Soil Organic Carbon Content: A Trans-China Based Case Study [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(7): 1531 ~ 1540.
- [7] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性 with 土壤水分的关系 [J]. 生态学报, 2004, 24(4): 831 ~ 836.
- [8] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on Soil Respiration: Implications for Climate Change [J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 1 ~ 6.
- [9] Kristi P, Kajar K, Kalev J, et al. Impact of post-fire management on soil respiration, carbon and nitrogen content in a managed hemiboreal forest [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 233 (1): 371 ~ 377.