

重庆市缙云山 3 种森林类型的土壤呼吸特征研究

冯华敏¹, 王玉杰¹, 王云琦¹, 雷声坤¹, 刘春霞¹, 周彬²

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 重庆缙云山国家级自然保护区管理局, 重庆 400700)

摘要: 2010 年 7—12 月, 采用 LI-COR 公司生产的 LI-8100 土壤碳通量测量系统及土壤温度、湿度传感器对重庆市缙云山自然保护区内的毛竹林、针阔混交林、针叶林的土壤呼吸速率以及地表下 5 cm 处的土壤温度和体积含水量进行测定, 最后对 3 种林地土壤呼吸的时间变化特征及其与土壤温湿度和森林凋落物的关系进行了分析。结果表明: (1) 3 种林地土壤呼吸速率日内变化特征不明显, 白天总体呼吸速率大于夜间。(2) 月际变化明显, 表现为从 7—8 月土壤呼吸速率增大, 8—12 月逐渐减小。3 种林分 7—12 月总体平均土壤呼吸速率表现为毛竹林 > 针阔混交林 > 针叶林。(3) 毛竹林、针阔混交林、针叶林的土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度均存在极显著的指数相关关系 ($p < 0.01$), 温度每升高 10 °C, 土壤呼吸的变化比率 Q_{10} 值分别为 2.67, 2.19, 2.13。(4) 土壤呼吸特征与 5 cm 土壤含水量之间没有明显的相关关系。(5) 各林地无凋落物的土壤呼吸速率均小于对应林地有凋落物土壤呼吸速率, 各林地无凋落物的 Q_{10} 值均大于对应林地有凋落物的 Q_{10} 值。

关键词: 三峡库区; 土壤呼吸速率; 土壤温度; 土壤湿度; 凋落物

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0038-07

中图分类号: S154.1

Soil Respiration Characteristics of Three Forests in Jinyun Mount of Chongqing City

FENG Hua-min¹, WANG Yu-jie¹, WANG Yun-qi¹, LEI Sheng-kun¹, LIU Chun-xia¹, ZHOU Bin²

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of

Education, College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Jinyun Mountain National Nature Protection Region Management Bureau of Chongqing City, Chongqing 400700, China)

Abstract: A field study was conducted in Jinyun Mountain Nature Reserve, Chongqing City from July to December in 2010. A LI-8100 soil carbon flux measurement system (LI-COR) was employed to measure soil respiration rates (SRRs) in bamboo, mixed wood and coniferous forests. In addition, soil temperature and volumetric water contents were measured at 5 cm below ground. By analyzing temporal change characteristic of SRR and its relationship with soil temperature, moisture and litter, the results indicate that no obvious diurnal variation of SRR was found in all the three forests. SRRs during day time were greater than those at night. SRR changed significantly monthly; it gradually increased from July to August and decreased from August to December. The average SSRs during experiment period in the three forests exhibited a decreasing order as bamboo > mixed wood > coniferous. The SRRs of the three forests were closely correlated with soil temperature ($p < 0.01$), with Q_{10} values (the ratio of soil respiration change whenever the temperature increase 10 °C) 2.67, 2.19 and 2.13 respectively. Conversely, the SRRs were not significantly correlated with soil water contents. In addition, the SRRs of all forests without litter cover were smaller than those with litter, indicated by the greater Q_{10} values found in the forests without litter.

Keywords: Three Gorges reservoir area; soil respiration rate; soil temperature; soil moisture; litter

土壤呼吸是指土壤向大气排放 CO₂ 的过程, 是 土壤有机碳输出的主要途径及全球碳循环的主要方

收稿日期: 2011-04-13

修回日期: 2011-05-26

资助项目: 林业公益性行业科研专项“森林生态系统碳氮水耦合观测、模拟与应用技术”(201104009-03); 林业公益性行业科研专项“长江三峡库区典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005-01)

作者简介: 冯华敏(1984—), 男(汉族), 山西省长治市人, 硕士生, 研究方向山地灾害防治工程。E-mail: huamin_166@126.com。

通信作者: 王玉杰(1960—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀、林业生态工程研究。E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn。

式^[1],从严格意义上讲是指未受扰动的土壤中产生CO₂的所有代谢作用。土壤呼吸包括3个生物学过程(植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(土壤中含碳物质化学氧化过程)^[2]。森林生态系统是陆地生物圈的主体,其碳储量约为1 146 PgC(1 Pg=10⁹ t),占全球陆地总碳储量的46%^[3],而森林土壤及其有机层储存了森林生态系统39%的碳^[4],因此森林林地通过土壤呼吸会释放出大量CO₂。森林土壤呼吸主要受土壤温度与水分的影响^[5],凋落物、植被类型、土壤C、N含量等对土壤呼吸的影响也很显著^[6],土壤环境因子的改变可导致土壤呼吸发生明显的昼夜和月际动态变化。综上分析,全面了解森林土壤呼吸特征以及其与环境因子的相关关系,对准确估算林地碳排放,理解和预测未来全球气候变化以及积极应对气候变异带来的影响具有重要意义。

近年来一些学者对我国不同地区森林生态系统的土壤呼吸进行了研究,并取得了一定进展,但有关三峡库区典型森林类型的土壤呼吸研究还鲜见报道。因此,本研究采用LI-8100土壤碳通量测量系统对地处三峡库区的缙云山森林林地的土壤呼吸速率及土壤温度和土壤含水量进行观测,旨在探讨主要环境因子的动态变化及林地凋落物对土壤呼吸的影响,以期深入了解土壤呼吸作用的变化过程及变化机理,从而为长江三峡库区的森林生态系统碳循环研究提供基

础数据,同时也为该区天然林保护等林业生态工程建设的生态效益评估提供理论依据。

1 研究区概况

本研究区位于三峡工程库区尾端,重庆市北碚区境内嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区,地理坐标为106°22'E,9°49'N,是华莹山复式背斜山脉分支的一段,面积7 600 hm²,海拔350~951.5 m,具有亚热带季风湿润性气候特征,年均气温13.6℃,年均降水量1 611.8 mm,年均蒸发量777.1 mm,年均日照1 293.9 h,年均相对湿度85%以上。缙云山的土壤以酸性(pH值4.0~4.5)黄壤及水稻土为主。缙云山保护区内植物资源非常丰富,植被类型较多,森林覆盖率达到96.6%,主要植被类型为常绿阔叶林、针叶林、竹林、常绿阔叶灌丛,另外还有亚热带灌草丛和水生植被。主要优势树种有:马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、四川杨桐(*Adinandru bockiana*)、樟(*Cinnamomum camphora*)、栲(*Castanopsis fargesii*)、四川大头茶(*Gordona acuminata*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)和四川山矾(*Symplocos setchuensis*)等。

本研究选取了该自然保护区内3种具有代表性的林分类型:毛竹林、针阔混交林、针叶林,并对3种林地的土壤呼吸特征进行了研究分析。林分基本情况见表1。

表1 典型林分基本情况

林分类型	海拔/ m	坡向	坡度/ (°)	起源	龄级	郁闭度	凋落物量/ (t·hm ⁻²)	主要树种
毛竹林	800	NW	11	天然	V	0.85	29.11	毛竹(<i>Phyllostachys pubescens</i>)
针阔混交林	810	NW	17	天然	VI	0.90	30.16	马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)、杉木(<i>Cunninghamia lanceolata</i>)、四川山矾(<i>Symplocos setchuensis</i>)、四川杨桐(<i>Adinandru bockiana</i>)
针叶林	815	NW	15	天然	VI	0.90	31.57	马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)、杉木(<i>Cunninghamia lanceolata</i>)

2 研究方法

本研究首先分别在保护区内具有代表性的毛竹林、针阔混交林、针叶林3种林地内设立标准样方(20 m×20 m),然后在每个样方内均匀布置6个PVC土壤环。其中3个土壤环直接插入土壤表面,不扰动地表凋落物,用于测定林地自然状态下的土壤呼吸速率;另外3个则插入除去表层凋落物的土壤中,并保持土壤环周围1.5 m²内无凋落物,用于对比凋落物对土壤呼吸的影响。土壤环的内径20 cm,高11 cm,

露出地面部分为2~3 cm,3块样地共设置18个土壤环测点。首次测量在土壤环安放24 h之后开始,并保持土壤环在整个测定期间位置不变。

本研究于2010年7—12月期间采用LI-COR公司生产的LI-8100土壤碳通量测量系统对3种林分的土壤呼吸速率R进行定点测定,在每月上、中、下旬各选择3日晴朗天气,若无晴天则选阴天,分别对3种林分进行24 h连续测量,将测得的数据文件利用配套软件FV 8100打开,在进行数据浏览、重新计算与校正后,取中旬的数据分析日变化,每种林地上、

中、下旬的 3 组数据通过算术平均代表该林地的月平均土壤呼吸速率,同时分别采用 LI-8100 自带的土壤温度、湿度传感器测定了地表下 5 cm 处的土壤温度 T 以及土壤体积含水量 W 。

本文采用 SPSS 16.0 对数据进行统计分析,并通过 Microsoft Excel 2007 进行最后成图。

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸的日变化规律

为分析毛竹林、针阔混交林、针叶林土壤呼吸速

率的昼夜变化情况,选取处于主要生长季的 8 月份和非主要生长季的 11 月份为代表对 3 种林地土壤呼吸速率的昼夜变化曲线进行分析(图 1)。由图 1 可以看出,8 月份和 11 月份 3 种林地的土壤呼吸速率日内变化特征均不明显,但总体上看白天的土壤呼吸速率要高于夜间,最大值多出现在 14:00—17:00 时,最小值则多出现在深夜或清晨。这主要是由于白天的林内气温和土壤温度均高于夜间,林内土壤生物尤其是微生物活动较为活跃,从而使得土壤呼吸速率白天高夜间低。

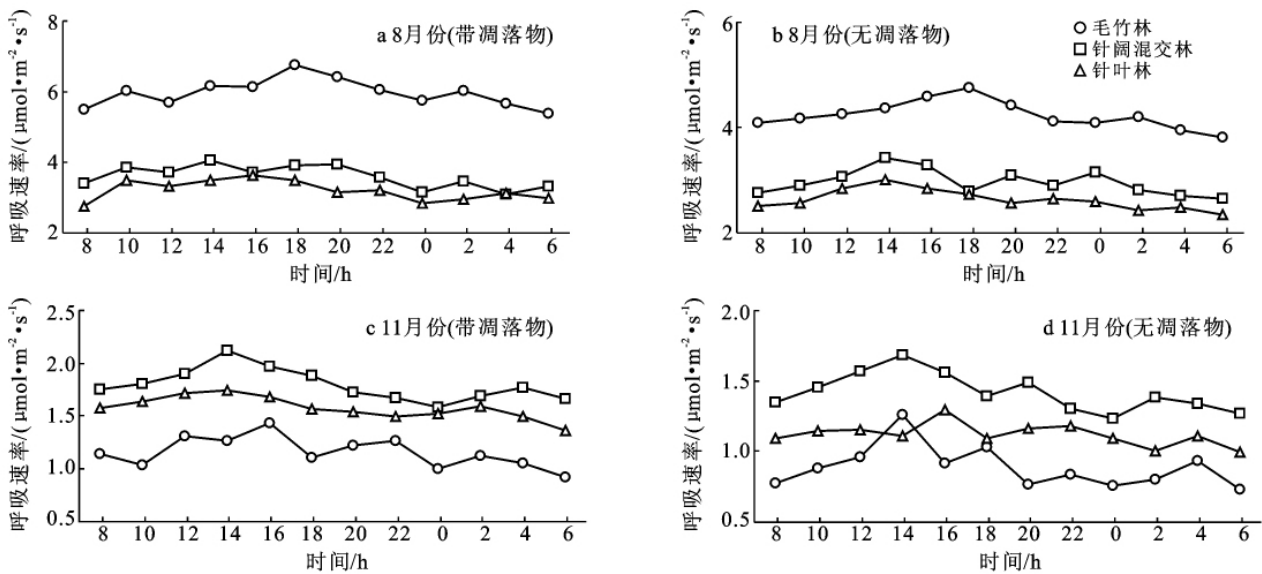


图 1 3 种林地土壤呼吸速率日变化曲线

另外,8 月份有凋落物和无凋落物的土壤呼吸速率日平均变化幅度分别为:毛竹林 $1.37, 0.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;针阔混交林 $0.96, 0.76 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;针叶林 $0.87, 0.67 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。11 月份有凋落物和无凋落物各林地土壤呼吸速率日变化幅度分别为:毛竹林 $0.66, 0.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;针阔混交林 $0.54, 0.45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;针叶林 $0.38, 0.30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。可见 3 种林地土壤呼吸速率日变化幅度由大到小依次为毛竹林、针阔混交林、针叶林。另外 8 月份各林地土壤呼吸速率的日变化幅度要大于 11 月份相应各林地的日变化幅度。这种现象主要是由于 8 月份该地区大气温度、土壤温度的日变化幅度要大于 11 月份的日变化幅度导致。

3.2 土壤呼吸的月际变化规律

分别将各林地上、中、下旬所测的 3 组数据的算术平均值代表各自林地该月平均土壤呼吸速率,用于分析 3 种林地的月际土壤呼吸速率变化特征(图 2)。由图 2 可以看出,毛竹林、针阔混交林、针叶林的土壤

呼吸速率呈现明显的月际变化规律,表现为 7—8 月土壤呼吸速率增大,8—12 月则逐渐减小。这与 7—12 月林地 5 cm 处的土壤温度变化相一致,8 月林地土壤温度处于全年最高值,土壤呼吸速率也最大。有凋落物的毛竹林、针阔混交林、针叶林的土壤呼吸速率月平均值分别为 $5.96, 3.61, 3.21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,无凋落物的土壤呼吸速率月平均值分别为 $4.23, 2.95, 2.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;在 12 月份土壤呼吸速率值最小,有凋落物的毛竹林、针阔混交林、针叶林的土壤呼吸速率平均值分别为 $0.83, 1.38, 1.13 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,无凋落物的土壤呼吸速率平均值分别仅为 $0.69, 1.03, 0.90 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

3 种林地土壤呼吸速率在主要生长季 7—10 月均维持在相对较高水平,非主要生长季的 11—12 月则相对较低,这主要是因为该地区在 7—10 月水热条件较好,植物生长旺盛,光合产物量大,同时土壤微生物和根系的活性也较高,从而使得微生物和植物根系呼吸作用加强,因此土壤总呼吸速率也较高;而 11—

12月土壤温度低,限制了微生物和植物根系的活性,植物生长和光合作用受到抑制,土壤呼吸速率降低。总体上看7—10月3种林分是否有凋落物的土壤呼吸速率值差别较大,而11—12月则差别较小,说明在7—10月水热条件在利于土壤微生物活动的同时,也有利于凋落物和土壤有机质的分解,土壤排放 CO_2 速率加快。

在7—10月,无论是否存在凋落物,毛竹林的土壤呼吸速率均明显高于针阔混交林和针叶林,这是因

为在生长季,毛竹的生长速度远大于这2种林分树木的生长速度,因此毛竹林的呼吸强度也远大于另外2种林分的呼吸强度,加上毛竹林的凋落物易于分解,凋落物的C/N比高,最终导致毛竹林的土壤呼吸速率遥遥领先于其它林分。而处于非生长季的11—12月的毛竹林土壤呼吸速率较另外2种林分要低,说明低温强烈抑制毛竹生长。试验期间,毛竹林的土壤呼吸速率变化幅度最大,针阔混交林次之,针叶林变化幅度最小。

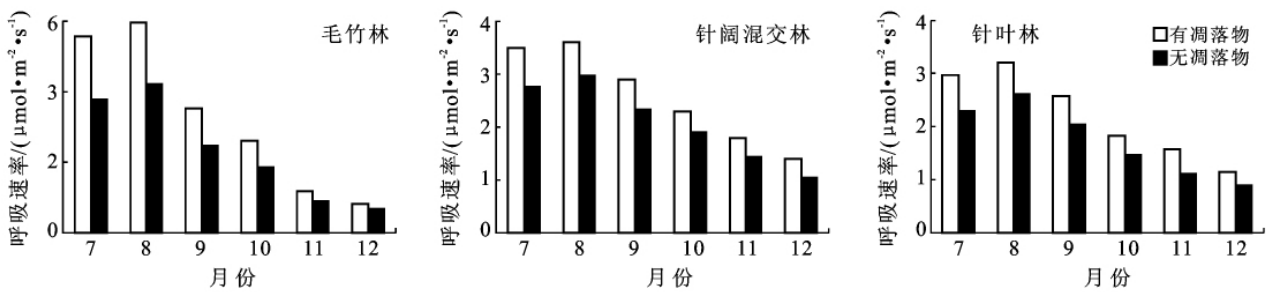


图2 3种林地土壤呼吸速率月份变化直方图线

由图2还可以看出,试验期间3种林分有凋落物时的土壤呼吸速率均大于无凋落物时的土壤呼吸速率。本试验中毛竹林、针阔混交林、针叶林去除凋落物土壤呼吸速率比有凋落物平均降低27.4%,21.1%和20.6%,这就说明是否有凋落物对土壤呼吸有着显著的影响。凋落物对毛竹林林地土壤呼吸的贡献最大,针阔混交林次之,针叶林贡献最小。随着时间推移,是否有凋落物对土壤呼吸速率的影响逐渐减小,这是由于本试验随着时间推移温度降低,枯落物分解速率降低,土壤中的微生物和植物根系的活性变弱,从而导致是否有枯落物差异减小。

3.3 土壤呼吸和环境因子的关系

3.3.1 土壤呼吸与土壤温度的关系 很多学者研究表明,土壤呼吸与土壤温度,特别是与土壤5 cm处温度具有良好的相关性^[7-9]。

土壤温度升高对植物根系的呼吸作用、土壤微生物活动、凋落物和土壤中有机质分解都有促进和加速作用,因此土壤呼吸速率随着温度的升高而增大。不同林分类型土壤呼吸速率的昼夜变化和月份变化都与土壤温度具有相同的变化趋势,土壤温度是影响土壤呼吸速率的关键因子,并在3个林地中有相应的表现形式(图3)。

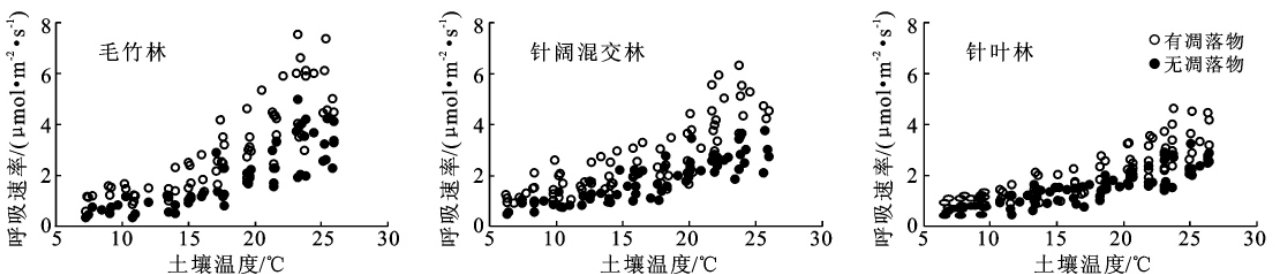


图3 土壤呼吸速率和土壤温度的关系散点

由图3可以看出,无论林地是否有凋落物覆盖,土壤温度较低时,点比较密集,说明土壤呼吸的变化幅度较小,随着土壤温度逐渐升高,点也越来越分散,说明土壤呼吸的变化幅度也在增大。这一结果与其它学者的研究结果相一致^[10-11]。土壤温度 T 对土壤呼吸 R 的影响通常用指数模型 $R = ae^{bT}$ 来表示^[12](其

中 a, b 为待定参数; a 是温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的土壤呼吸速率; b 是温度反应系数)。对3种林地土壤呼吸速率与土壤5 cm温度进行回归分析,发现均明显呈指数相关(表2)。有凋落物的毛竹林、针阔混交林、针叶林的5 cm土壤温度分别能够单独解释土壤呼吸速率在这半年中77.0%,73.8%,79.8%的变化,无凋落物

时土壤温度分别能解释其 79%, 78%, 76% 的变化。

长期以来,多数研究者习惯采用 Q_{10} 值来表征土壤呼吸的温度敏感性^[13-15]。 Q_{10} 值表示温度每升高 10 °C 土壤呼吸的变化比率,公式为: $Q_{10} = (RT+10)/RT$ 或 $Q_{10} = e^{10b}$ 。通过计算得到 3 种林地测量期的土壤呼吸 Q_{10} 值(表 2)。毛竹林 Q_{10} 值最大,针阔混交林次之,针叶林最小,这表明毛竹林的土壤呼吸对土壤温度敏感程度比另外 2 种林分的要高,这可能是因为

毛竹林的郁闭度较另外 2 种林分小,以及毛竹特殊的生理生态功能造成的。

由表 2 还可以看出,3 种林分无凋落物的温度敏感性指数 Q_{10} 值均比有凋落物的 Q_{10} 值高,这可能是因为无凋落物覆盖的情况下,土壤可以更直接受到外界热量的影响,因此在相同的太阳辐射下无凋落物覆盖的土壤比有凋落物覆盖的土壤升温快,从而影响到 Q_{10} 值的变化,但具体机理还有待进一步研究。

表 2 土壤呼吸速率与土壤温度之间的关系方程及 Q_{10} 值

样地类型	有凋落物			无凋落物		
	关系方程	R^2	Q_{10}	关系方程	R^2	Q_{10}
毛竹林	$R=0.4479e^{0.0981T}$	0.7702	2.67	$R=0.2015e^{0.1129T}$	0.7899	3.09
针阔混交林	$R=0.6399e^{0.0786T}$	0.7377	2.19	$R=0.3871e^{0.0832T}$	0.7804	2.30
针叶林	$R=0.4927e^{0.0755T}$	0.7978	2.13	$R=0.3557e^{0.0771T}$	0.7598	2.16

3.3.2 土壤呼吸与土壤湿度的关系 土壤湿度是影响土壤呼吸的另一重要因子。土壤水分对土壤呼吸的影响比较复杂,主要是通过影响根系生长、根系呼吸、土壤微生物群落构成、微生物活力以及土壤代谢活力而影响土壤呼吸。在干旱或半干旱地区当土壤水分成为胁迫因子时,可能取代温度而成为土壤呼吸的主要控制因子^[16]。

由图 4 可以看出,3 种林分土壤湿度较低时,土壤呼吸速率变化幅度均较小,随着土壤含水量的增加变化幅度逐渐加大,带凋落物的毛竹林、针阔混交林、针叶林的土壤呼吸速率分别在土壤含水量为 25%, 40%, 40% 左右变化幅度最大,无凋落物的毛竹林、针阔混交林、针叶林的土壤呼吸速率分别在土壤含水量

为 22%, 30%, 30% 左右变化幅度最大;然后随着土壤含水量的进一步增加,变化幅度又逐渐减小,其中毛竹林减小的最为明显,说明土壤高湿度能明显抑制竹林的呼吸。

3 种林地土壤呼吸速率与土壤含水量之间用二次曲线拟合的最好(表 3),与土壤呼吸与温度的关系相比,土壤呼吸与土壤含水量的相关性较弱。各林地土壤呼吸速率与土壤水分关系方程的 R^2 值明显低于土壤呼吸速率与土壤温度关系方程的 R^2 值,这可能是由于缙云山地区具有亚热带季风湿润性气候特征,降水比较丰富,林分郁闭度大,林地蓄水持水能力较强,导致水分不是限制土壤呼吸的关键因子,土壤水分对呼吸作用的影响远小于土壤温度对其的影响。

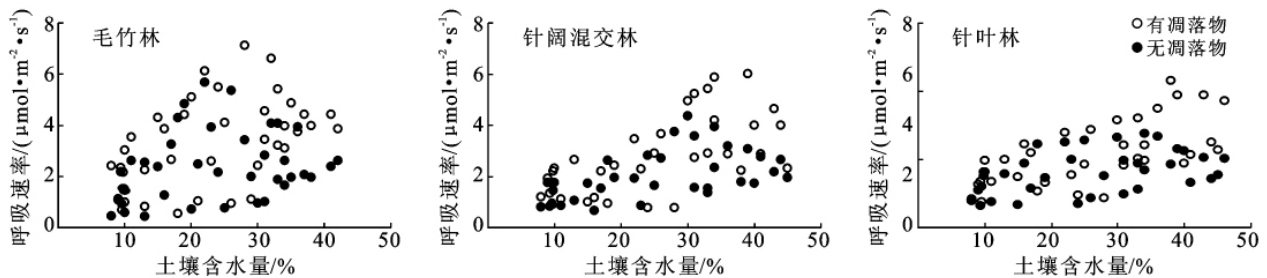


图 4 土壤呼吸速率和土壤湿度的关系散点

表 3 土壤呼吸速率与土壤水分之间的关系方程

样地类型	有凋落物		无凋落物	
	关系方程	R^2	关系方程	R^2
毛竹林	$R=-0.031W^2+0.2250W+0.1079$	0.2509	$R=0.0054W^2+0.2909W-0.8748$	0.1914
针阔混交林	$R=-0.0015W^2+0.1590W-0.0412$	0.4030	$R=-0.0025W^2+0.1703W-0.3209$	0.3609
针叶林	$R=0.0002W^2+0.0398W+0.9505$	0.4313	$R=-0.0013W^2+0.0878W+0.3919$	0.2431

4 结论

本研究发现地处重庆缙云山的毛竹林、针阔混交林、针叶林的土壤呼吸速率日内变化特征均不明显,但其土壤呼吸速率最大值均发生在下午 14:00—17:00,最小值则多出现在深夜或清晨,总体上看白天土壤呼吸速率要大于夜间。关于亚热带地区森林土壤呼吸速率日变化规律的研究,闫俊华等^[17]认为无明显规律,范少辉等^[18-19]研究得出的是单峰曲线。土壤呼吸月际变化特征显著,表现为从 7—8 月土壤呼吸速率增大,8—12 月逐渐减小,与土壤温度变化趋势相一致;处于主要生长季的 7—10 月间土壤呼吸速率表现为:毛竹林>针阔混交林>针叶林,而非生长季的 11—12 月则是:针阔混交林>针叶林>毛竹林。土壤温度与土壤湿度是影响森林土壤呼吸最主要的 2 个因素。

Raich 等^[20]指出不同陆地生态系统的土壤呼吸变化主要的驱动因子是土壤温度。谭炯锐等^[21]通过对杨树林土壤呼吸研究,得出土壤温度是影响土壤呼吸速率的主要因素。崔骁勇等^[22],王旭^[23]等得到林分的土壤呼吸与地下 5 cm 土温之间具有显著指数正相关。水分对土壤呼吸影响相当复杂,在某个地区或时期二者可能不相关或相关性较差,而在另一个地区或另一个时期则可能出现极显著的相关性^[24],所以很难在水分和土壤呼吸之间建立一个高普适性的定量化模型。

本研究得出,毛竹林、针阔混交林、针叶林 3 种林地的土壤呼吸与 5 cm 处土壤温度间均呈极显著($p < 0.01$)指数相关关系,5 cm 土壤温度分别能够单独解释土壤呼吸速率在这半年中 77.0%,73.8%,79.8% 的变化。与 5 cm 土壤含水量之间没有明显的相关关系,这可能是由于缙云山降水比较丰富,土壤长期保持较高的含水量,水分不是限制土壤呼吸的关键因子,水分对土壤呼吸作用的影响往往被温度的影响所遮盖。

Q_{10} 值表征土壤呼吸的温度敏感性,本研究得到的 Q_{10} 值较接近于全球各种生态系统土壤呼吸 Q_{10} 值的中位值 2.4^[25],3 种林分的 Q_{10} 值由大到小依次为毛竹林、针阔混交林、针叶林,其值分别为 2.67, 2.19, 2.13。

凋落物能够通过分解作用排放 CO_2 影响土壤呼吸,因此无凋落物的各林地土壤呼吸速率均小于有凋落物的各林地土壤呼吸速率,本试验中毛竹林、针阔混交林、针叶林去除凋落物土壤呼吸速率比有凋落物平均降低 27.4%,21.1% 和 20.6%。凋落物还

可以通过影响土壤温度和湿度间接影响土壤呼吸,对土温的影响表现在,大气处于低温时,凋落物分解及其缓慢,但是有凋落物覆盖的土壤呼吸速率与无凋落物覆盖到土壤呼吸速率差值仍较为明显。这可能是因为凋落物覆盖的林地土温要高于无凋落物覆盖的林地土温,进而有凋落物覆盖的林地土壤呼吸速率要高于无凋落物覆盖的林地土壤呼吸速率。凋落物对土壤湿度的影响主要在于凋落物具有很好的蓄水保水能力,从而在干旱的情况下有凋落物覆盖的林地土壤含水量要大于无凋落物覆盖的林地,进而为土壤呼吸提供适宜的条件。另外凋落物对温度敏感性指数 Q_{10} 值也有影响,各林地无凋落物的 Q_{10} 值均大于对应林地有凋落物的 Q_{10} 值,这与王光军等^[26]的研究相一致。

由于本研究只有半年的试验数据,得出的结论具有一定的局限性,今后仍然需要对相关森林生态系统进行长期定位监测,为准确预测未来森林生态系统土壤碳库的动态变化提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 张宪权,王文杰,祖元刚,等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性[J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(2):24-26.
- [2] Tang J W, Baldocchi D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale[J]. Global Change Biology, 2005, 11: 1298-1304.
- [3] IPCC (Inter Governmental Panel on Climate Change). Land use, land-use change, and forestry: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge: Cambridge University Press, U K, 2000.
- [4] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263:185-190.
- [5] 杨玉盛,董彬,谢锦升,等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(3):583-591.
- [6] Jia B, Zhou G, Wang Y, et al. Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 26(1): 60-67.
- [7] 刘绍辉,方精云,清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 1998, 22(2):119-126.
- [8] 刘颖,韩士杰,李雪峰,等. 高浓度 CO_2 下红松幼苗根系对土壤呼吸的贡献[J]. 林业研究:英文版, 2004, 15(3): 187-192.
- [9] Lin G, Ehleringer J R, Rygielwicz P T, et al. Elevated CO_2 and temperature impacts on different components of

- soil CO₂ efflux in *Douglas-fir terracosms* [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(2): 157-168.
- [10] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6366-6376.
- [11] Cufiel Y J, Janssens I A, Carrara A, et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest[J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(18): 1263-1270.
- [12] Fang C, Moncrief J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [13] 唐燕飞. 下蜀次生栎林和人工火炬松林土壤呼吸动态变化研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [14] Liu H S, Li L H, Han X G, et al. Respiratory substrate availability plays a crucial role in the response of soil respiration to environmental factors[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32: 284-292.
- [15] Fernandez I J, Son Y, Kraske C R, et al. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest [J]. *Soil Science Society America journal*, 1993, 57(4): 1115-1121.
- [16] Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(1): 119-127.
- [17] Yan J H, Zhang D Q, Zhou G Y, et al. Soil respiration associated with forest succession in subtropical forests in Dinghushan biosphere reserve[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 991-999.
- [18] 范少辉, 肖复明, 汪思龙, 等. 湖南会同林区毛竹林地的土壤呼吸[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 5972-5977.
- [19] 黄辉, 杨玉盛, 高人, 等. 杉木林与楠木林土壤呼吸昼夜变化及与土温变化的关系[J]. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 25(2): 114-117.
- [20] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, 44(2): 81-99.
- [21] 谭炯锐, 查同刚, 张志强, 等. 土壤温湿度对北京大兴杨树人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 2308-2315.
- [22] 崔骁勇, 陈佐忠, 杜占池. 半干旱草原主要植物光能和水利用特征的研究[J]. *草地学报*, 1999, 7: 245-250.
- [23] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 山杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 348-354.
- [24] Davidson E A, Verchot L V, Cattânio J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biochemistry*, 2000, 48: 53-69.
- [25] Raich J W, Schlesinger W H. The influences of regional atmospheric in soil respiration and its relationship to vegetation and precipitation characteristics and its elements inputs on the climate [J]. *Tellus*, 1992, 44B(1): 81-99.
- [26] 王光军, 田大伦, 阎文德, 等. 去除和添加凋落物对枫香 (*Liquidambar formosana*) 和樟树 (*Cinnamomum camphora*) 林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 643-652.