

热带雨林土壤呼吸测定代表性时段研究

姚玉刚^{1,2}, 张一平^{1*}, 于贵瑞³, 沙丽清¹, 邓云¹, 谭正洪^{1,2}

(1. 中国科学院热带森林生态学重点实验室 西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院研究生院 北京 100039; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘要: 选取适当时段测定土壤呼吸以代表日平均值, 可使短期土壤呼吸观测数据有效应用于土壤呼吸年总量的估算。笔者在西双版纳热带季节雨林使用土壤呼吸自动观测系统在不同月份(1月、4月、7月和10月)进行土壤呼吸连续日变化观测, 评估了土壤呼吸代表性时段的有效性。结果表明: 在4月、7月和10月使用9:00—11:00作为土壤呼吸代表性时段, 与24 h日平均土壤呼吸值相对差异可控制在10%以内; 不同月份9:00—11:00土壤呼吸平均值均与24 h日平均值存在偏差, 10月相对差异最小, 7月最大; 选择9:00—11:00时段在多日尺度上可以代表日平均土壤呼吸值, 所测算出的 Q_{10} 值相对接近。

关键词: 热带雨林; 土壤呼吸; 代表性时段; 西双版纳

中图分类号: S718

文献标志码: A

文章编号: 1000-2006(2011)04-0074-05

Representative time selection analysis on daily average value of soil respiration in a tropical rain forest

YAO Yugang^{1,2}, ZHANG Yiping^{1*}, YU Guirui³, SHA Liqing¹, DENG Yun¹, TAN Zhenghong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Institute of Geographical Science and Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Data of soil respiration taken at the proper time that can represent the daily average value was widely used in annual soil efflux evaluation. In this study, we used an automatic measuring system to observe and collect the data of Xishuangbanna tropical seasonal rain forest soil respiration in January, April, July and October, 2009. The representative time period for soil respiration observation was estimated. Results showed that the errors of the mean values during 9:00—11:00 comparing with the daily average values in April, July and October were all less than 10% under control, indicating that the values during the period could reasonably represent the daily average value. The errors could vary with months, were the lowest in October and the highest in July. Mean value of soil respiration and Q_{10} during 9:00—11:00, which was tested at multiple-day scale, could well fit the daily average value.

Key words: tropical forest; soil respiration; time scale representation; Xishuangbanna

全球森林土壤碳库是森林植被碳库的2倍多^[1], 森林土壤呼吸占森林生态系统呼吸总量的50%~95%^[2-5]。在热带森林研究土壤呼吸状况测定多采用LI-6400光合仪^[6-7]、涡度相关法^[8]、

碱液吸收法^[9-10]和箱法^[11-12]等方法。国内土壤呼吸观测多采用箱法观测^[13], 野外采样完全依赖人工观测, 多在上午时段进行采样(9:00—11:00), 采样频率为1周1次, 所得数据相对离散,

收稿日期: 2010-07-16

修回日期: 2010-12-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB833501); 国家自然科学基金项目(30670395); 中国科学院重要方向性项目(KZCX1-SW-01-01A, KJCX2-YW-432-1)

作者简介: 姚玉刚(1983—), 博士生。* 张一平(通信作者), 研究员。E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn。

引文格式: 姚玉刚, 张一平, 于贵瑞, 等. 热带雨林土壤呼吸测定代表性时段研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 74-78.

这样就面临土壤呼吸测定代表性时段的选取问题。森林土壤呼吸速率的最大值一般出现在 12:00—16:00,最小值出现在 5:00—9:00^[4,41]。郑循华等^[15]在苏州水稻田对 CH₄ 和 N₂O 的变化进行自动观测,王迎红^[13]测得每天有两个最佳采样时段分别为 8:30—10:30 和 18:00—20:30,这与李晶等^[16]在稻田 CH₄ 观测中根据气温选择的采样时段选取法基本一致。但是这些研究没有针对 CO₂,且研究对象均为农田,针对森林土壤呼吸所排放 CO₂ 的代表性时段的研究相对较少。笔者对地形和森林植被相对特殊的热带季节雨林的土壤呼吸测定代表性时段开展研究,使用土壤呼吸自动观测系统的实测数据,评价土壤呼吸测定不同时段的代表性,验证 9:00—11:00 时段是否适用于热带森林土壤呼吸观测,并针对日尺度观测资料扩展到多日尺度上可能存在的偏差开展讨论,以期为客观评价热带季节雨林土壤呼吸提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 样地概况

研究地为位于云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇的中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站的热带季节雨林长期定位样地(101°16'E, 21°56'N),海拔 720 m。年均气温为 21.5 °C,年均降雨量为 1 558 mm,年均相对湿度 86%。其中雨季(5—10月)为 1 355 mm,占全年的 87%,干季(11月至翌年 4月)为 203 mm,仅占全年降雨量的 13%。土壤为由白垩系黄色砂岩发育而成的砖红壤,枯枝落叶层厚 2~5 cm,腐殖质层厚 1~3 cm,0~20 cm 土层的有机质含量约为 20 g/kg。热带季节雨林样地位于国家自然保护区内^[17-18],优势种为番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、云南肉豆蔻(*Myristica yunnanensis*)、滇南风吹楠(*Horsfieldia tetratrapala*)等,冠层高度 30~35 m。

1.2 仪器设备

土壤呼吸自动观测系统(Automatic system of soil respiration, Japan)主体由红外气体分析仪、圆柱形不锈钢采样箱体、气泵和数据采集器构成。观测前 24 h 将底座置于土壤表层(不除凋落物),箱体高度为 30 cm,底座为 PVC 材料(直径 25 cm),箱体与底座间采用湿润细河沙密封。箱内设有风扇,促进气体混合均匀。箱体设有两个重复,通过程序控制液压阀的伸缩控制箱盖开闭。观测时箱盖关闭,观测完成后打开,每次观测时间为 4

min。1 h 测定 1 次,24 h 连续测定。测量 CO₂ 浓度精度为 ±0.1 μmol/mol(LI-820 IRGA, LI-COR, USA),采样频率为 5 s。同期观测的气象因子有:5 cm 地温(T_s)、气温(T_a)、土壤含水量(C_{sw})等。使用热电偶测量 5 cm 地温(105T, Campbell, USA),采用温湿自记测定气温(HMP45C, Vaisala, Netherlands),使用 TDR 测定地表 10 cm 土壤含水量(CS616, Campbell, USA)。1 h 测定 1 次,所有观测数据均传输至数据采集器中(CR1000, Campbell, USA)。使用电脑通过 USB232 通信线连接数据采集器并下载数据。

分别在 2009 年 1 月(雾凉季)、4 月(干热季)、7 月(雨季前期)和 10 月(雨季后期)利用土壤呼吸自动观测系统进行土壤呼吸连续观测,共获得 40 d 完整的土壤呼吸日变化连续观测数据。观测日数分布如下:1 月(7 d)、4 月(6 d)、7 月(16 d)和 10 月(11 d)。

1.3 指标测算

土壤呼吸(R_s)速率计算式为:

$$R_s = \frac{1\ 000PT_0}{22.4P_0T} \times \frac{V}{S} \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: R_s 为土壤呼吸速率,μmol/(m²·s); P_0 为标准状态下大气压强 1 013.25 hPa; T_0 为标准状态下绝对零度 273.15 K; T 为气室内空气温度, K; P 为实际气压, hPa; V 为气室体积, m³; S 为气室覆盖的地表面积, m²; dc/dt 为单位时间内 CO₂ 浓度变化率。

相对差异百分率计算方法如下:

$$P' = \frac{R_{s-real} - R_{s-mean}}{R_{s-mean}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P' 为相对差异百分率, R_{s-real} 为选定时刻土壤呼吸实测值(9:00—11:00 平均值), R_{s-mean} 为 24 h 日平均土壤呼吸值(0:00—23:00 时平均值)。

采用指数模型拟合土壤呼吸与 5 cm 地温的关系:

$$R_s = a \cdot e^{bT_s} \quad (3)$$

式中: R_s 为土壤呼吸速率, μmol/(m²·s), T_s 为 5 cm 地温, °C, a 、 b 为模型参数。用 Q_{10} 值表示土壤呼吸的温度敏感性($Q_{10} = e^{10b}$)^[19]。

数据采用 Excel 2003 处理,采用 SPSS 13.0 软件进行相关统计检验。

2 结果与分析

2.1 不同月份土壤呼吸、气温、地温的日变化特征及土壤呼吸代表性时段分析

经观测,1 月土壤呼吸速率变幅为 4.4~6.1

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 4月为 $5.0\sim 7.0\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 7月为 $7.1\sim 8.4\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,10月为 $6.4\sim 8.0\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (图1a)。按土壤呼吸速率从强至弱

不同月份排序为:7月、10月、4月、1月,与各月气温和地温的表现具有一致性(图1b、1c)。

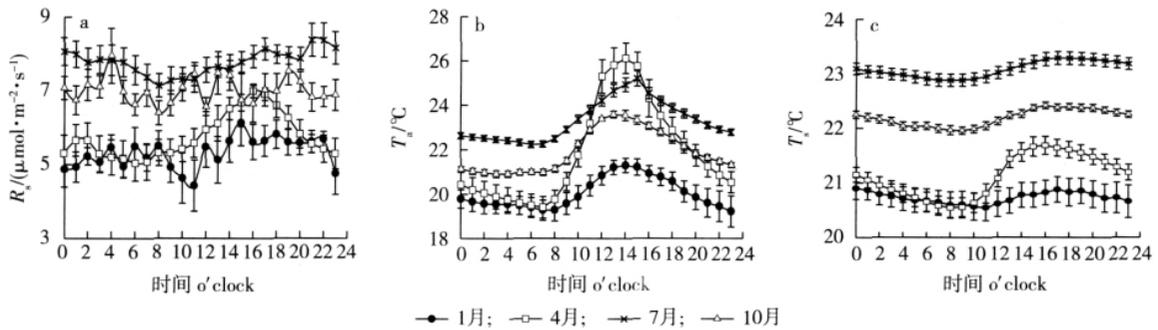


图1 不同月份土壤呼吸、气温、地温日变化

Fig. 1 Diurnal variation of soil respiration, air temperature and soil temperature

1月土壤呼吸相对差异在8:00和11:00分别出现正向($>10\%$)和负向($<10\%$)最大差异,而在1:00—9:00,13:00—14:00,16:00—22:00这三个时段差异均在 $\pm 10\%$ 以内(图2)。4月土壤呼吸相对差异在16:00和7:00分别出现正向($>20\%$)和负向($<10\%$)的最大差异,而在0:00—5:00,10:00—13:00和19:00—23:00这三个时段相对差异均在 $\pm 10\%$ 以内。7月土壤呼吸相对差异在全天变幅较小,均位于 $\pm 10\%$ 附近。10月在4:00达到最大相对差异($>10\%$),其余时段相对差异均在 $\pm 10\%$ 以内。具体到各月来看,4月、7月和10月使用9:00—11:00作为土壤呼吸代表性时段,可以将相对差异控制在 $\pm 10\%$ 以内,而在1月选取该时段差异可能超过 $\pm 10\%$ 。

极显著水平($p < 0.01$) (图3)。具体到各月来看,4月9:00—11:00的土壤呼吸平均值与24h土壤呼吸日平均值拟合线,在数值较小时偏离1:1线较大,位于其下方,说明9:00—11:00土壤呼吸平均值比24h土壤呼吸日平均值偏高,存在高估;7月9:00—11:00的土壤呼吸平均值与24h土壤呼吸日平均值拟合线,在数值较大时偏离1:1线较大,同样存在高估;1月和10月拟合线基本位于1:1线上,拟合效果较好。

通过求算不同月份土壤呼吸9:00—11:00的平均值与24h日平均值的相对差异后发现,各月土壤呼吸9:00—11:00平均值与24h日平均值均存在偏差。数值差异上在7月达到最大,为 $0.5\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,平均差异相对百分率最大值出现在7月(-6.2%),10月差别达到最小(0.4%)。总体而言,9:00—11:00平均值与日平均值差别不大,数值平均差异在 $\pm 0.5\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以内,相对差异百分率处于 $\pm 7\%$ 以内。

计算土壤呼吸年总量需要将日尺度土壤呼吸数据换算到年尺度,在这一换算中是否存在误差,是需要慎重考虑的问题。以多日平均数据为例,拓展到多日尺度进行分析。分析土壤呼吸测定代表性时段与日平均值的拟合结果来看,9:00—11:00平均土壤呼吸与日平均值相关系数 R^2 为0.796,相关性检验达到极显著水平($p < 0.01$),拟合效果较好。经测定,多日尺度土壤呼吸24h日平均值及9:00—11:00平均值均与5cm地温均存在指数拟合关系($p < 0.01$)。根据公式4计算出 Q_{10} 分别为3.95和3.51,所得 Q_{10} 结果量级相当,数值接近。

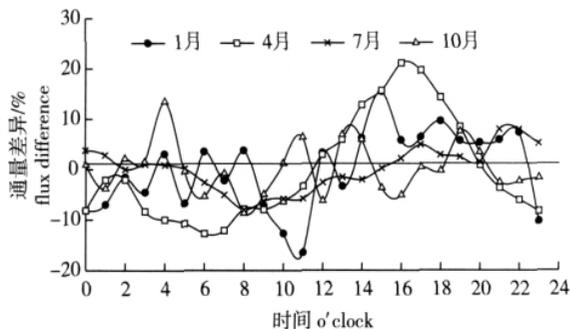


图2 不同采样时段下土壤呼吸日平均值相对差异

Fig. 2 Difference percent between real value of each hour and daily average value

2.2 不同月份土壤呼吸代表性时段与日平均值差异比较及在多日平均上的差异分析

经观测,9:00—11:00土壤呼吸平均值与24h土壤呼吸日平均值均呈正相关,相关性检验均达到

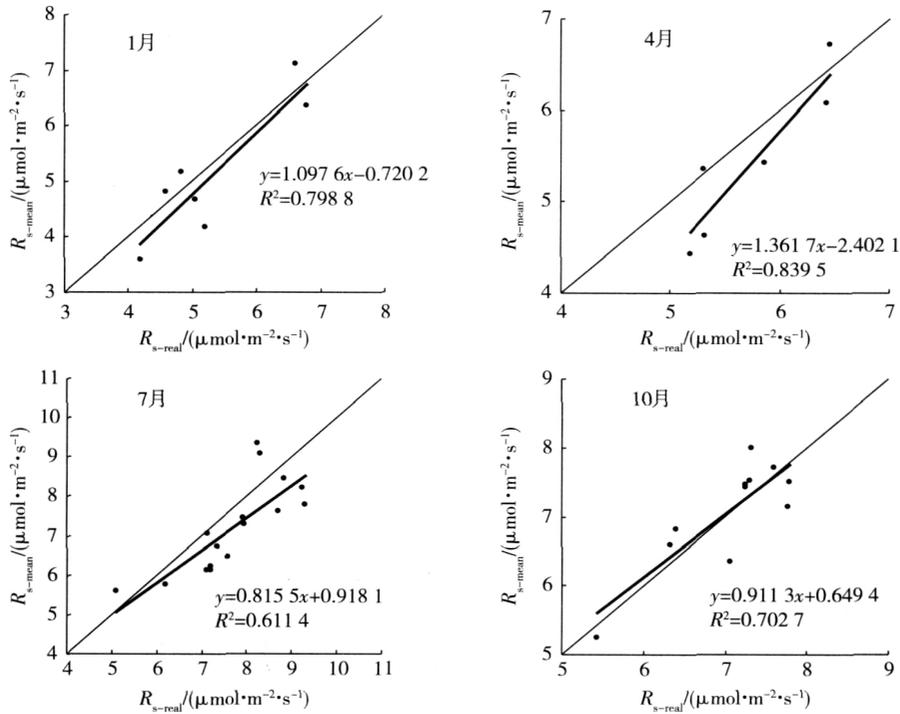


图 3 不同月份土壤呼吸 9:00—11:00 平均值与日平均值拟合特征

Fig. 3 Linear regression between 9:00 – 11:00 mean value and daily average value

3 讨论

西双版纳热带季节雨林土壤呼吸速率测定结果与江西千烟洲生态站的杉木林和柑橘林土壤呼吸速率在 7 月最高、1 月最低结论相同^[20],与西双版纳橡胶林土壤呼吸速率在 5—10 月最高、1—2 月最低的结论类似^[21],与张增信等^[22]在北亚热带次生栎林和人工林土壤呼吸速率最高值出现在 6 月的研究结果相近。此次研究发现 4 月、7 月和 10 月的 9:00—11:00 时段平均土壤呼吸值可以较好代表日平均土壤呼吸数值,而 1 月 9:00—11:00 时段的测定值可能高于 ±10% 的差异。4 月和 7 月选择 9:00—11:00 时段相比日均值存在高估,1 月和 10 月差别较小。9:00—11:00 土壤呼吸测定值与日平均土壤呼吸值线性拟合曲线基本位于 1:1 线上。这表明虽然在日尺度上存在一定的相对差异,但经测定,在多日平均尺度上,差异相互抵消,9:00—11:00 的平均值与 24 h 日平均值的 R² 为 0.796 相关性检验达到极显著水平 (p < 0.01)。

总之,西双版纳热带季节雨林受西南季风和地理位置的影响,形成了独特的地方气候,导致植物生理、土壤环境特征都与其他研究区域相比存在差异。研究表明 4 月、7 月和 10 月 9:00—11:00 时

段平均土壤呼吸测定值与日平均土壤呼吸值差异范围在 ±10% 以内,可以较好的代表日平均土壤呼吸数值,与日平均气温出现时段一致。而 1 月使用该时段可能会超过 ±10% 的差异。5 cm 地温指示代表性时段能力较弱;不同月份 9:00—11:00 时段测定值与日平均土壤呼吸值之间的差异也有所不同,其中 10 月差异最小 (0.4%),7 月最大 (-6.2%);选择 9:00—11:00 作为西双版纳热带季节雨林土壤呼吸测定代表性时段,在多日尺度上可以很好的代表日平均土壤呼吸值,所得 Q₁₀ 值相对接近。

致谢: 赵俊斌、游广永、张鹏超和李麟辉等同学在试验中给予帮助,日本国立环境研究所梁乃申老师提出宝贵意见与技术支持!

参考文献:

[1] Dixon R K, Brown S, Houghton K A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263 (5144): 185 - 190.

[2] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem [J]. Global Change Biology, 1999, 5 (2): 169 - 182.

[3] Janssens L A, Lankreijer H, Matteucci G, et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests [J]. Global Change Biology 2001, 7 (3):

- 269-278.
- [4] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest [J]. *Global Biogeochemical Cycles* 2001, 15 (3): 687-696.
- [5] Yuste J C, Nagy M, Janseens I A et al. Soil respiration in a mixed temperate forest and its contribution to total ecosystem respiration [J]. *Tree Physiology* 2005, 25: 609-619.
- [6] Liang N S, Nakadai T, Hirano T et al. In situ comparison of four approaches to estimating soil CO_2 efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123 (1-2): 97-117.
- [7] Katayama A, Kume T, Komatsu H et al. Effect of forest structure on the spatial variation in soil respiration in a Bornean tropical rainforest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149: 1666-1673.
- [8] Law B E, Baldocchi D D, Anthoni P M. Below-canopy and soil CO_2 fluxes in a ponderosa pine forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94 (3-4): 171-188.
- [9] 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO_2 排放量的初步研究 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 416-423.
- [10] Raich J W. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rain forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 107 (1-3): 309-318.
- [11] 沙丽清, 郝征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34 (S2): 167-174.
- [12] 张德强, 孙晓敏, 周国逸, 等. 南亚热带森林土壤 CO_2 排放的季节动态及其环境变化响应 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36 (S1): 130-138.
- [13] 王迎红. 陆地生态系统温室气体排放观测方法研究、应用及结果比对分析 [D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [14] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32 (11-12): 1625-1635.
- [15] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放 [J]. *大气科学*, 1997, 21 (2): 231-237.
- [16] 李晶, 王明星, 陈德章. 稻田甲烷排放非连续测量中采样时间的选择 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 1998, 15 (1): 24-29.
- [17] Zhang J, Cao M. Tropical forest vegetation of Xishuangbanna, SW China and its secondary changes, with special reference to some problems in local nature conservation [J]. *Biological Conservation*, 1995, 73 (3): 229-238.
- [18] 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究 [J]. *植物生态学报*, 1999, 23(5): 418-425.
- [19] 唐燕飞, 王国兵, 阮宏华. 土壤呼吸对温度的敏感性研究综述 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(1): 124-128.
- [20] 周志田, 成升魁, 刘允芬, 等. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤 CO_2 排放规律初探 [J]. *资源科学*, 2002, 24(2): 83-87.
- [21] 周文君, 沙丽清, 沈守良, 等. 西双版纳橡胶林土壤呼吸季节变化及其影响因子 [J]. *山地学报*, 2008, 26(3): 317-325.
- [22] 张增信, 施政, 何容, 等. 北亚热带次生栎林和人工松林土壤呼吸日变化 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(1): 19-23.

(责任编辑 王国栋)

征订启事

欢迎订阅 2012 年《南京林业大学学报(人文社会科学版)》

《南京林业大学学报(人文社会科学版)》是由南京林业大学主办的人文社会科学类综合性学术期刊。主要报道哲学、文学、经济学、法学、管理学、园林艺术等学科的研究成果,着重体现环境与发展领域的研究特色,特色栏目为环境伦理学研究。

该刊为季刊,大 16 开本,逢季末月出版,国内外发行。定价:24 元/年。

可通过全国非邮发中心联合征订服务部办理订阅手续:300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号,也可直接向该刊编辑部订阅。

通信地址:210037 南京市龙蟠路 159 号 南京林业大学内

电话:025-85427018 E-mail: wkxb@njfu.edu.cn