

测算方式对土壤呼吸通量的影响

徐劲剑

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

土壤呼吸作为全球碳循环的重要组成部分,它变异性的复杂过程会受到陆地生态系统中多种因素的调控。而对于全球碳循环周期的研究,科研人员经常会运用到一些经验模型来模拟。与基于过程的模型相比,这些模型更方便简单,需要的特定于现场的变量也更少。本研究选择了三种常用于测算土壤呼吸通量的方法对蒙古栎林土壤呼吸通量进行数据模拟分析。尝试探讨三种方法的优缺点,以期对相关领域的研究提供一定的参考价值。

关键词

蒙古栎, 土壤呼吸, Q_{10} 模型, Grammar模型, 线性内插法

Effect of Measuring Methods on Soil Respiration Fluxes

Jinjian Xu

College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: Mar. 24th, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

As an important part of the global carbon cycle, the complex process of soil respiration variability is regulated by many factors in the terrestrial ecosystem. For the study of the global carbon cycle, researchers often use some empirical models to simulate. Compared with process-based models, these models are more convenient and simpler, and require fewer field-specific variables. In this study, three methods commonly used to measure soil respiration fluxes were selected to simulate and analyze the soil respiration fluxes of *Quercus mongolica* forest. The paper tries to explore the advantages and disadvantages of the three methods, in order to provide some reference value for the research in related fields.

Keywords

Quercus mongolica, Soil Respiration, Q_{10} Model, Grammar Model, Linear Interpolation Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

森林生态系统在全球碳循环中发挥着重要的作用[1], 其提供的生态系统服务功能具有不可替代的作用[2] [3]。土壤表面二氧化碳通量(土壤呼吸, R_s)约占森林生态系统呼吸总量的 69%, 是陆地生态系统第二大碳通量[4]。土壤呼吸(F)是陆地生态系统第二大碳通量[5], 温带森林土壤呼吸总量占生态系统呼吸总量的近 70%, 对于维持局域和全球碳平衡具有举足轻重的作用。准确量化土壤呼吸对于估算净生态系统 CO_2 交换量(NEE)和校验涡动协方差技术测量结果不可获缺[6]。

不同的土壤呼吸速率(R_s)测算方式会对 F 的计算结果造成影响[7], 不同的计算方式所考虑的影响因素不同, 所建模型也不同, 各自对每周乃至全年生长季 F 的影响大小都不同, 本次实验利用三种测算方式对 F 结果进行交互验证, 帮助我们加深理解不同模型各自的优缺点, 为 F 的准确评测提供科学依据。

本研究采用动态密闭箱 - 红外气体分析仪法, 连续监测林龄为 25 年(平均树龄)的蒙古栎林生态系统土壤呼吸速率(每次测量的时间间隔为 1 周), 样地阴、阳坡各 3 次重复, 样方 9 次重复, 共测量 29 次, 同步测定土壤温湿度 T_5 、 W_5 , 主要解决以下科学问题: 1)建立蒙古栎林土壤呼吸速率(R_s)与土壤温湿度关系经验模型; 2) 基于线性内插法理论, 分析不同模型推算土壤呼吸速率(R_s)和通量(F)的差异。

2. 研究方法

2.1. 研究区域概况

研究样地位于吉林省东南部, 通化市境内(E125°59'20", N41°44'3")。该区域位于长白山脉的西南部, 属中温带湿润气候区, 年平均气温 5.5℃, 一月份平均气温最低, 常年平均在零下 14℃左右, 极端最低气温达-33℃; 七月份平均气温最高, 在 22℃左右, 极端最高气温 36℃。通化地区多年平均降水量有 870 mm, 主要集中在夏季, 6~8 月三个月的降水量占年总降水量的 60%以上, 年日照时数高达 2200 小时。该区域地带性土壤为暗棕壤, 植被为砍伐后形成的天然次生林, 主要包括蒙古栎林、落叶松林及红松人工林。

研究区域为蒙古栎天然次生林, 林龄 25 年(平均树龄, 生长锥法测定)。蒙古栎的胸高断面积比例超过 90%, 伴生树种有紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)和色木槭(*Acer mono* Maxim.), 乔木密度为 1333 株/hm², 胸高断面积 22.30 m²/hm², 胸径 14.34 ± 0.31 cm, 树高 8.21 ± 0.49 m。

2.2. 土壤呼吸速率的测定

分别在蒙古栎林阳坡(SU, 西偏南 21°, 坡度 22°)和阴坡(SH, 东偏北 21°, 坡度 31°)设置 3 块样地(20 m × 30 m), 阴阳坡样地最小直线距离小于 50 m。每个样地随机布置土壤环 3 个, 环高 5 cm, 内径 19.5 cm, 土壤环一端处理成楔形以便压入土壤并减少对土壤的镇压作用。每个土壤环露出地面 3 cm, 在整个生长季测定过程中土壤环的位置固定。利用挖壕法在每个样地边缘随机设置异养呼吸(RH, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

样方 3 个(1 m × 1 m), 观测期间去除样方内所有活体植物。利用 LGR 便携式温室气体分析仪(915-0011, Los Gatos Research Inc., San Jose, USA)配备土壤呼吸气室(PS3000, Lica United, Beijing, China)观测土壤呼吸速率($RS, \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 通过差减法($RS-RH$)计算根际呼吸($RR, \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。通过该仪器自带温湿度探头就近同步测量土壤环周围 5 cm 深度土壤温度($T_s, ^\circ\text{C}$)和土壤体积含水量($W_5, \text{RH}\%$)。测量自 2017 年 4 月 12 日开始, 10 月 28 日结束, 测量时间步长为一周, 共观测 29 次。实验样地外 500 米左右设置自动气象站(CR1000, CSI Campbell, USA), 用于自动观测空气和土壤温、湿度、太阳辐射和降水等环境因子。

2.3. 数据分析

对于单次观测结果而言, 阳坡和阴坡土壤呼吸速率和土壤温湿度数据为同一天的观测结果(两个坡向观测间隔 < 3 h), 假设以上 3 个指标在观测期间无明显的时间动态[8], 通过配对数据 T-test 检验两个坡向温度、水分和土壤呼吸速率的差异, 利用 Person 相关系数描述两个坡向土壤温度、水分和土壤呼吸速率的变化趋势的一致性。

下面是 Q_{10} 模型和 Gammar 模型的原始方程:

$$\textcircled{1} \text{ } Q_{10} \text{ 模型: } \ln R_s = a + b \times T + c \times W + d \times T \times W$$

$$\textcircled{2} \text{ Gammar 模型: } \ln R_s = a + b \times \ln T + c \times W \times \ln T + d \times W + e \times T + f \times W \times T$$

蒙古栎林分布的土壤环境比较干旱、贫瘠, 考虑到土壤温度与土壤湿度的交互作用可能对土壤呼吸速率产生一定的影响。上式中 T 为 T_s , W 为土壤 5 cm 处土壤体积含水量 W_5 (RH%)或月降水量 P (mm), a 、 b 、 c 、 d 为方程系数。建模前进行对数转换以满足线性和方差齐性, 建模时选择向后剔除法, 先建立全模型再根据设定的判定依据剔除不符合判据的变量, 直到回归方程中不再含有不符合判据的自变量为止。

通过每月观测的土壤呼吸瞬时速率的平均值(\bar{R} , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和当月的天数(D)估算土壤呼吸当月的排放通量(F , g C m^{-2}), 生长季总通量为月通量的累加值, 具体计算方式如下:

$$F = \frac{\bar{R} \times 12 \times 3600 \times 24 \times D}{1000000}$$

3. 研究结果

3.1. SPSS 求得的阴阳坡各自的 Q_{10} 和 Gammar 模型方程

我们以一年所观测得到的实验数据进行模型推算分析, 最终得到蒙古栎林阳坡和阴坡的 R_s 与 W 、 T 之间的 Q_{10} 和 Gammar 模型方程如下:

1) 阳坡:

$$\textcircled{1} \text{ } Q_{10}: \ln R_s = -0.109 \times W + 0.008 \times T \times W$$

$$\textcircled{2} \text{ Gammar: } \ln R_s = 0.01 \times T \times W - 0.137 \times W \times \ln T$$

2) 阴坡:

$$\textcircled{1} \text{ } Q_{10}: \ln R_s = -1.563 + 0.069 \times T + 0.003 \times T \times W$$

$$\textcircled{2} \text{ Gammar: } \ln R_s = -27.922 + 6.782 \times \ln T + 0.013 \times W \times \ln T$$

3.2. 三种模型推算的 F 分析

我们运用上述计算得到的两种模型以及线性内插法三种方法去推算阳坡(图 1)、阴坡(图 2)的 F 值。发现同一批数据, 通过三种计算方式推导, 最终得到的 F 值之间存在一定的差异。其中, 阳坡用两模型

求得的每周 F 值均呈单峰曲线形式，而用线性内插法求得的则是双峰曲线形式；阴坡三种方法求得的 F 均呈双峰曲线形式。两种模型所求得的每周阴阳坡 F 趋势相同，且 Q_{10} 模型所求得的值都比 Gammar 模型求得的值大。无论是阴坡还是阳坡，前期三种模型求得的 F 趋势基本一致，中期差异较大，后期相对较吻合。此外，我们通过两模型所求得的 F 峰值均出现在第 17 周，而线性内插法求得的峰值则出现在第 18 周。

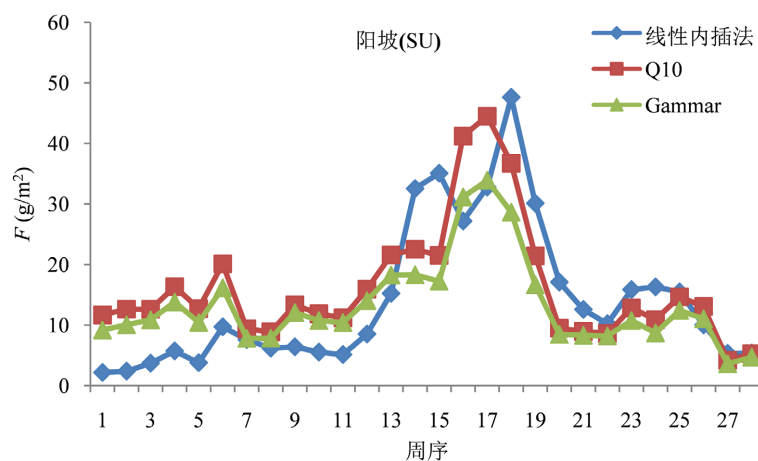


Figure 1. F value of sunny slope calculated by three models

图 1. 三种模型推算的阳坡 F 值

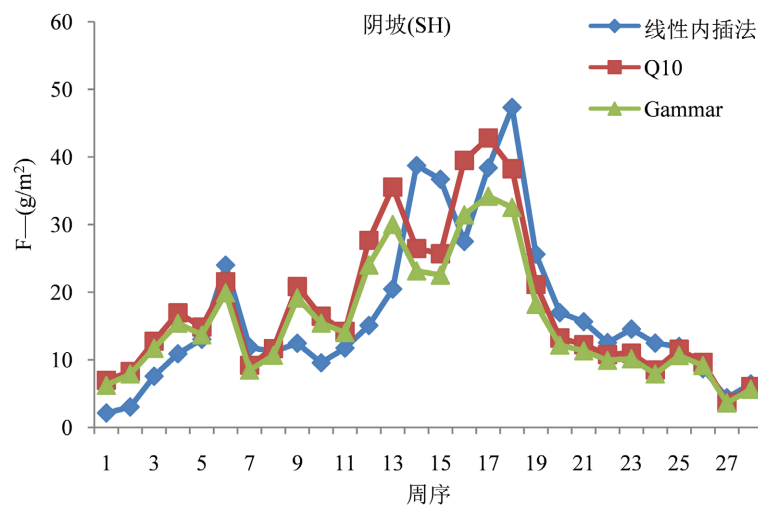


Figure 2. F value of shady slope calculated by three models

图 2. 三种模型推算的阴坡 F 值

3.3. 两两方法之间的数据比较分析

对线性内插法和 Gammar 模型求得的 F 值进行比较，我们发现，当线性内插法求得的 F 值小于 9.46 g/m^2 时，Gammar 模型求得的 F 值为高估，反之为低估(图 3)。

将线性内插法和 Q_{10} 模型求得的 F 值进行比较，得到当线性内插法求得的 F 小于 18.04 g/m^2 时， Q_{10} 模型求得的 F 值为高估，反之为低估(图 4)。

分析 Q_{10} 法和 Gammar 模型法求得的 F 值之间的关系，结果发现，两模型计算得到的 F 值拟合度很高，无论是阴坡还是阳坡数据， R^2 均达 0.99，而当 F 逐渐增大时，两模型所求得的 F 值差异增加(图 5)。

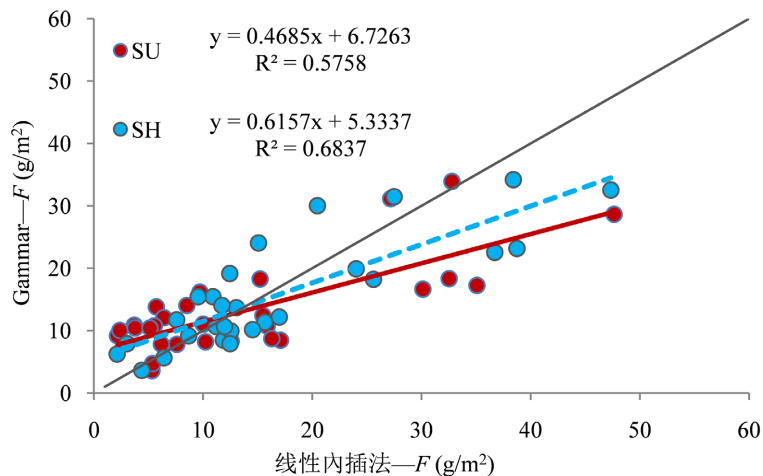


Figure 3. Comparison of F values obtained by linear interpolation method and Gammar model
图 3. 线性内插法与 Gammar 模型求得的 F 值比较

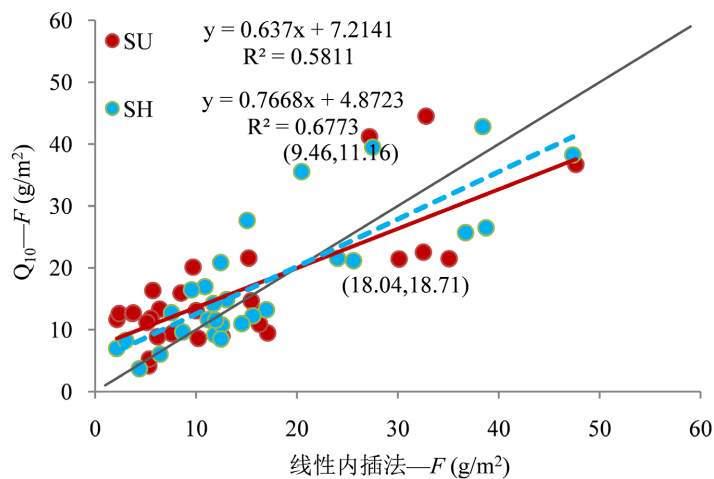


Figure 4. Comparison of F values obtained by linear interpolation method and Q_{10} model
图 4. 线性内插法与 Q_{10} 模型求得的 F 值比较

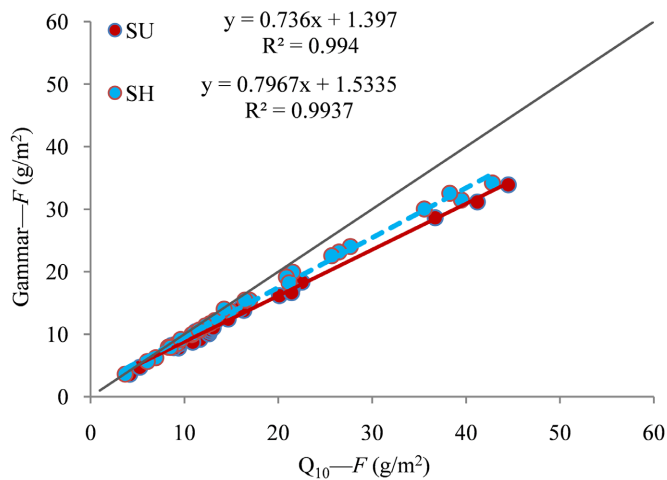


Figure 5. Comparison of F values obtained by Gammar model method and Q_{10} model
图 5. Gammar 模型法与 Q_{10} 模型求得的 F 值比较

3.4. 阴、阳坡每月土壤呼吸通量的比较

分析阳坡数据可以发现,在4月、6月、9月线性内插法与两模型求得 F 差异显著,但两模型各自之间差异不显著(图6)。对阴坡数据进行分析发现,仅9月三种方式求得的 F 值存在显著差异(图7)。另外,通过对阴、阳坡数据之间进行比较,发现通过三种方式求得的每月 F ,阳坡存在差异的月份明显较阴坡多,而在生长季中期求得的 F 值差异较生长季前后期小。

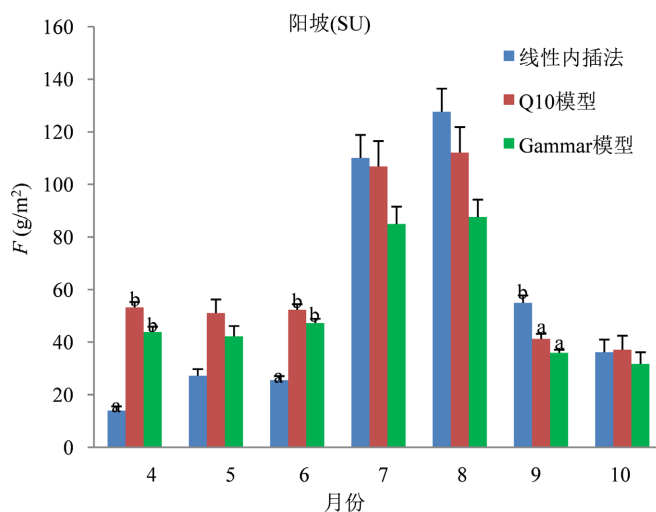


Figure 6. Comparison of F values obtained by three methods on sunny slope

图6. 阳坡三种方法求得的 F 值比较

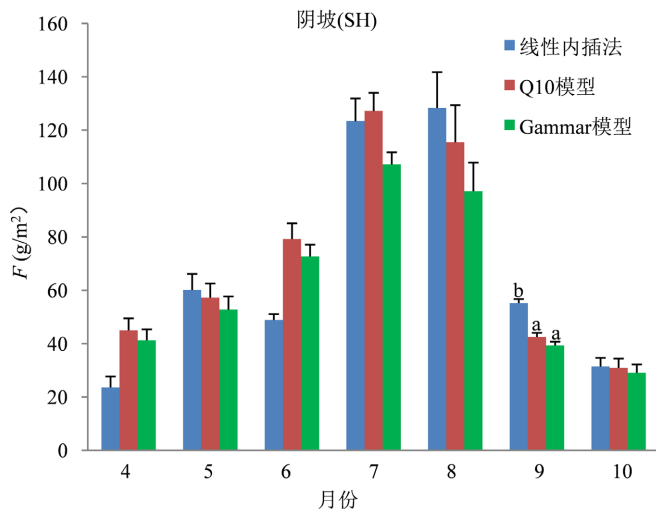


Figure 7. Comparison of F values obtained by three methods of shady slope

图7. 阴坡三种方法求得的 F 值比较

4. 研究结论

根据本研究的结果,我们发现蒙古栎林土壤呼吸速率(R_s)的主要影响环境因子为土壤温度和土壤湿度。无论最终计算运用哪个模型,在最终的回归方程中都会含有交互作用项。

首先,阴坡、阳坡两个坡向蒙古栎林土壤呼吸值对应的主要影响因子不同,这会导致最终拟合的模型自变量和系数也相应地出现不同。其次,在对用两模型计算的 F 值进行比较的过程中发现, Q_{10} 模型和

Gammar 模型的拟合精确度较高。结合模型模拟的 F 结果, 生长季早期(4 月、6 月)和晚期(9 月)的精度均低于生长季中期(7 月、8 月)。对比阴坡和阳坡的数据发现, 用模型模拟得到的阴坡 F 值准确效果比阳坡好, 出现这一差异的原因极有可能是阴坡土壤水分高于阳坡, 即阴坡受土壤水分胁迫的程度较阳坡小导致的。综上, 我们可以得出, Q_{10} 模型和 Gammar 模型拟合出的 F 值在生长季的中期都低估了, 但 Q_{10} 模型低估程度(5.74%)比 Gammar 模型低估程度(23.12%)更小, 所以我们认为 Q_{10} 模型比 Gammar 模型更适于描述本地区蒙古栎林 R_s 与土壤温湿度之间的关系。

参考文献

- [1] Wang, C., Yang, J. and Zhang, Q. (2006) Soil Respiration in Six Temperate Forests in China. *Global Change Biology*, **12**, 2103-2114. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01234.x>
- [2] Xu, M. and Shang, H. (2016) Contribution of Soil Respiration to the Global Carbon Equation. *Journal of plant physiology*, **203**, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.08.007>
- [3] Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., et al. (2011) A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, **333**, 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- [4] Law, B.E., Ryan, M.G. and Anthoni, P.M. (1999) Seasonal and Annual Respiration of a Ponderosa Pine Ecosystem. *Global Change Biology*, **5**, 169-182. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00214.x>
- [5] Davidson, E.A. and Janssens, I.A. (2006) Temperature Sensitivity of Soil Carbon Decomposition and Feedbacks to Climate Change. *Nature*, **440**, 165-173. <https://doi.org/10.1038/nature04514>
- [6] Wang, C., Han, Y., Chen, J., et al. (2013) Seasonality of Soil CO_2 Efflux in a Temperate Forest: Biophysical Effects of Snowpack and Spring Freeze-Thaw Cycles. *Agricultural and Forest Meteorology*, **177**, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.008>
- [7] Khomik, M., Arain, M.A., Liaw, K.-L., et al. (2009) Debut of a Flexible Model for Simulating Soil Respiration-Soil Temperature Relationship: Gamma Model. *Journal of Geophysical Research*, **114**, 1-11. <https://doi.org/10.1029/2008JG000851>
- [8] Lee, M.S., Nakane, K., Nakatsubo, T., et al. (2002) Effects of Rainfall Events on Soil CO_2 Flux in a Cool Temperate Deciduous Broad-Leaved Forest. *Ecological Research*, **17**, 401-409. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2002.00498.x>