

线性和指数回归方法对土壤呼吸 CO₂ 扩散速率估算的影响

温学发¹ 孙晓敏¹ 刘允芬¹ 李晓波²

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101) (2 北京力高泰科技有限公司, 北京 100035)

摘要 理论上, 土壤呼吸通量的量值可以通过观测土壤呼吸 CO₂ 扩散速率($\partial c/\partial t$) 计算得到。但是为获得 $\partial c/\partial t$ 通常须允许土壤呼吸箱内 CO₂ 浓度升高, 因此, 如何估算外界大气 CO₂ 浓度条件下的 $\partial c/\partial t$ 是土壤呼吸观测技术的关键, 关系到观测结果的准确性。通常 $\partial c/\partial t$ 的估算会受土壤表层大气 CO₂ 扩散梯度(即土壤呼吸箱内 CO₂ 扩散梯度和大气 CO₂ 浓度昼夜变化) 的影响。目前, 线性回归方法是土壤呼吸观测中估算 $\partial c/\partial t$ 的基本方法。然而, 常用的线性回归方法会低估 $\partial c/\partial t$, 而指数回归方法则可以准确地估算 $\partial c/\partial t$ 。夜间 $\partial c/\partial t$ 的变化与大气 CO₂ 浓度之间存在非常明显的负相关关系。夜间土壤表层大气 CO₂ 扩散梯度的减小导致线性回归方法明显低估 $\partial c/\partial t$ 。 $\partial c/\partial t$ 的昼夜变化过程存在明显的非对称性现象, 而指数回归方法可以更好地描述 $\partial c/\partial t$ 昼夜变化的非对称性响应。

关键词 土壤呼吸 CO₂ 扩散梯度 CO₂ 扩散速率 线性回归 指数回归 日变化

EFFECTS OF LINEAR AND EXPONENTIAL FITTING ON THE INITIAL RATE OF CHANGE IN CO₂ CONCENTRATION ACROSS THE SOIL SURFACE

WEN Xue-Fa¹, SUN Xiao-Min¹, LIU Yun-Fen¹, and LI Xiao-Bo²

¹Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China, and ²Beijing Ecotek Technology Company Limited, Beijing 100035, China

Abstract *Aims* Soil CO₂ flux is driven primarily by the CO₂ diffusion gradient across the soil surface. Ideally, the soil CO₂ flux measurement should be made without affecting the diffusion gradient across the soil surface. With the closed chamber system, the soil CO₂ diffusion rate($\partial c/\partial t$) is required to estimate the soil CO₂ flux. To obtain the $\partial c/\partial t$, the chamber CO₂ concentration must be allowed to rise. Consequently, the $\partial c/\partial t$ will be affected by the CO₂ diffusion gradient across the soil surface because of the decreased CO₂ diffusion gradient in the soil chamber. Additionally, the $\partial c/\partial t$ will also be affected by the diurnal variation of the CO₂ concentration across the soil surface. Our objective was to compare linear and exponential fitting methods to estimate $\partial c/\partial t$.

Methods Currently, the $\partial c/\partial t$ is commonly estimated using linear fitting regression. Instead of using the linear fitting method, an exponential fitting method is used to fit the time series of chamber CO₂ concentration adopted in the LI-8100 automated soil CO₂ flux system.

Important findings The $\partial c/\partial t$ estimated from the linear slopes was consistently underestimated as compared to that from exponential initial slopes. Nighttime $\partial c/\partial t$ was significantly negatively correlated with soil surface CO₂ concentration, suggesting that the decreased CO₂ diffusion gradient across the soil surface strongly influences the $\partial c/\partial t$. For the closed-chamber method, linear curve fitting significantly underestimated the $\partial c/\partial t$ rate during the nighttime. These results demonstrated the importance of estimating the $\partial c/\partial t$ at ambient soil surface CO₂ concentration. The response of the $\partial c/\partial t$ to air temperature exhibited significant asymmetry characteristic, showing that it is a better way for exponential fitting to make long-term and continuous soil CO₂ flux measurement to elucidate the magnitudes and processes of soil CO₂ flux in the typical terrestrial ecosystem.

Key words soil respiration, CO₂ diffusion gradient, CO₂ diffusion rate, linear fit, exponential fit, diurnal variation

目前全球碳循环的研究工作主要是估算各碳库的储量和碳库间的交换通量。土壤碳库是陆地生态系统中除岩石圈以外的最大的碳库。Cox 等(2000)的模型预测,全球气候变暖正导致生态系统呼吸的增加,2050 年陆地生态系统将有可能成为碳源。生态系统呼吸是植物根系、叶片和茎自养呼吸以及土壤微生物呼吸的总和,而土壤呼吸则是土壤微生物和植物根系呼吸的总和。土壤呼吸的量级可高达生态系统呼吸的 75%(Goulden *et al.*, 1996; Law *et al.*, 2002)。生态系统植被冠层碳过程与土壤碳过程的耦合机制、植物根系自养呼吸和土壤微生物异养呼吸对环境要素的响应特征、土壤呼吸与地上部分碳过程和土壤中碳变化的耦合测定、地下部分碳过程对气候极端事件(如干旱胁迫)或脉冲性降水等的响应等,都已经成为全球气候变化研究的热点问题(Ryan & Law, 2005; Baldocchi, 2005)。迫切需要长期和连续的土壤呼吸过程的准确观测数据,以量化环境和生物要素对土壤呼吸过程的影响,为土壤呼吸过程模型的建立和验证提供科学依据,更精确地阐明土壤呼吸的量级和过程在全球碳循环和碳平衡中的作用(Grace & Rayment, 2000)。

关于土壤呼吸观测的研究始于 80 多年前(Gailey, 1919)。目前,国内土壤呼吸观测研究的主要方法有静态箱/碱液吸收法、静态箱/气象色谱法和静态箱或动态箱/红外气体分析仪(IRGA)法等(崔骁勇等 2001; 易志刚和蚁伟民, 2003; 冯秀梅等, 2004)。土壤呼吸量通常是直接测定从土壤表面释放的 CO₂ 浓度变化率(dCO_2/dt)来确定的。理想情况下土壤呼吸测定应该不影响近地表层大气 CO₂ 扩散梯度,在这个前提下,土壤呼吸通量的量值可以通过观测 dCO_2/dt 的初始斜率(土壤呼吸 CO₂ 扩散速率 $\partial c/\partial t$)计算得到。通常 $\partial c/\partial t$ 的估算会受土壤表层大气 CO₂ 扩散梯度(即土壤呼吸箱内 CO₂ 扩散梯度和大气 CO₂ 浓度昼夜变化)的影响。如何获得 dCO_2/dt 的斜率是土壤呼吸观测技术的关键,因为这关系到观测结果的准确与否。在实施观测过程中如果这个问题处理不当,将导致土壤呼吸测定受到近地表层大气 CO₂ 扩散梯度减小的影响。目前,大部分土壤呼吸观测并没有充分考虑到近地表层大气 CO₂ 扩散梯度降低对土壤呼吸 CO₂ 扩散速率的影响。为此我们初步探讨以下问题:1)土壤呼吸箱内 CO₂ 扩散梯度对土壤呼吸 CO₂ 扩散速率的影响;2)昼夜 CO₂ 扩散梯度变化对土壤呼吸 CO₂ 扩散速率的影响;3)土壤呼吸 CO₂ 扩散速率的昼夜变化特征,以

期为精确地阐明土壤呼吸的量级和过程等问题提供科学依据。

1 材料和方法

样地设在江西省泰和县中国科学院千烟洲试验站内(26°44'52" N, 115°03'47" E)的中亚热带人工针叶林通量站。采用美国 LICOR 公司的 LI-8100 全自动土壤碳通量测量系统(Model LI-8100, Licor Inc.; 北京力高泰科技有限公司提供)测定试验区内不同条件下的土壤呼吸 CO₂ 扩散速率。分 3 种处理:1)选取含地表凋落物土壤、去除地表凋落物土壤和土壤挖壕并去除凋落物土壤。每个处理重复 3 次,测定时间为 2 min。2)选取含地表凋落物土壤,土壤呼吸测定时间分别为 5、10、15、20、25 和 30 min。每个处理重复 3 次。3)选取林外裸地,连续 3 d 测定土壤呼吸 CO₂ 扩散速率日变化特征。测定时间为 2 min,每 30 min 测定 3 次。

土壤呼吸 CO₂ 扩散速率分别采用线性和指数回归方法进行估算。目前线性回归是大部分土壤呼吸测量估算土壤呼吸 CO₂ 扩散速率($\partial c/\partial t$)的基本方法,

$$d(t) = c + bt \quad (1)$$

式中, $d(t)$ 为土壤呼吸箱内 CO₂ 的浓度, c 为土壤呼吸箱关闭时大气 CO₂ 浓度, b 为土壤呼吸 CO₂ 扩散速率($\partial c/\partial t$)。

指数回归方法是美国 LICOR 公司 LI-8100 全自动碳通量测量系统估算土壤呼吸 CO₂ 扩散速率($\partial c/\partial t$)的主要方法(详见 LI8100 仪器说明书),

$$d(t) = c_x + (c_0 - c_x)e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (2)$$

式中, $d(t)$ 为土壤呼吸箱内 CO₂ 的浓度, c_x 为定义渐进线的参数, c_0 为土壤呼吸箱关闭时大气 CO₂ 的浓度。土壤呼吸 CO₂ 扩散速率即为指数回归方程(2)的初始斜率($\partial c/\partial t$):

$$\partial c/\partial t = \alpha(c_x - c_0) \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 土壤呼吸箱内 CO₂ 扩散梯度对土壤呼吸 CO₂ 扩散速率的影响

图 1a 描述了土壤呼吸箱内 CO₂ 浓度 120 s 内的变化过程。由图 1a 可见,随着观测时间的增加,土壤呼吸箱内 CO₂ 浓度逐渐增加并导致土壤呼吸箱内 CO₂ 扩散梯度减小,这将会抑制土壤 CO₂ 的释放并降低土壤呼吸 CO₂ 扩散速率。为此,准确估算 dCO_2/dt 的初始斜率获得土壤呼吸 CO₂ 扩散速率

($\partial c/\partial t$)是非常重要的,它关系到观测结果的准确与否。

目前,线性回归方法是土壤呼吸测量中估算 dCO_2/dt 的初始斜率的基本途径。而基于公式(2)和(3)的指数回归方法将是计算 dCO_2/dt 的初始斜率新的有效途径。由图 1a 可以看出,指数回归方法可以更加准确地拟合土壤呼吸箱内 CO_2 浓度的变化,从而准确地估算 $\partial c/\partial t$ 。图 1b 对比分析了指数和线性回归方法对不同土壤呼吸处理的土壤呼吸 CO_2 扩散速率估算的影响。由图 1b 可以看出,虽然线性回归与指数回归方法估算的 $\partial c/\partial t$ 具有很好的线性关系,但是线性回归获得的 $\partial c/\partial t$ 低于指数回归估算的 $\partial c/\partial t$ 的大约 11%,这将导致土壤呼吸量的显著低估。

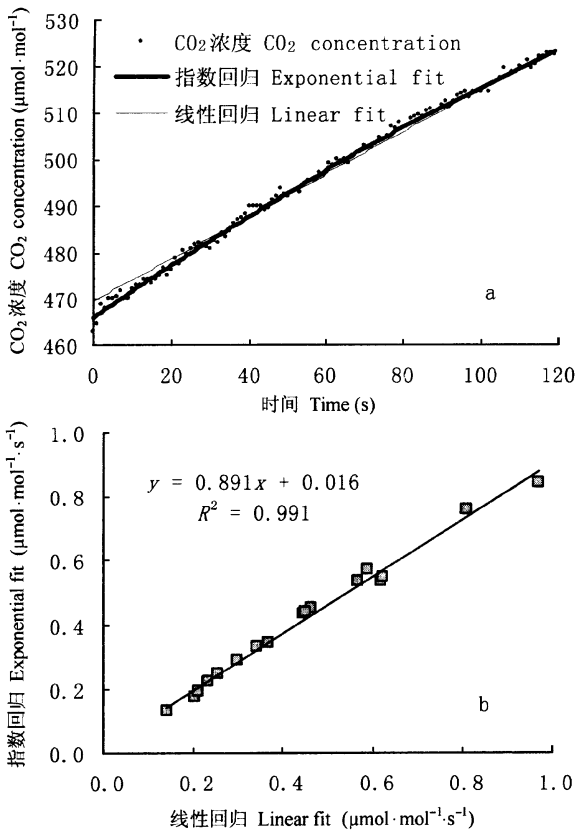


图 1 指数和线性回归方法对土壤呼吸 CO_2 扩散速率($\partial c/\partial t$)的影响
Fig. 1 Impacts of exponential and linear fit on the initial rate of change in the CO_2 concentration across the soil surface

a: 土壤呼吸箱内 CO_2 浓度的变化过程 Variations of CO_2 concentration in the soil respiration chamber b: 材料与方法中试验处理 1) Experiment 1) described in Material and Methods

图 2 对比分析了土壤呼吸测定时间分别为 5、10、15、20、25 和 30 min 条件下线性回归和指数回归方法对土壤呼吸 CO_2 扩散速率的影响。可以看出,

随着土壤呼吸测定时间的增加,由于土壤呼吸箱内 CO_2 扩散梯度的降低导致线性回归方法估算的 $\partial c/\partial t$ 呈现逐渐降低的趋势,而指数回归方法估算的 $\partial c/\partial t$ 仍然保持相对稳定。然而,目前大部分土壤呼吸观测并没有充分考虑到土壤呼吸箱内 CO_2 扩散梯度降低对土壤呼吸的影响,而是仅仅采用线性回归方法估算 $\partial c/\partial t$ 。指数回归方法可以解决土壤呼吸箱内 CO_2 扩散梯度减小对 $\partial c/\partial t$ 估算的影响。但是需要指出的是,如果观测时间过长还会导致温度等其它环境要素的改变,因此,观测时间应尽可能缩短。

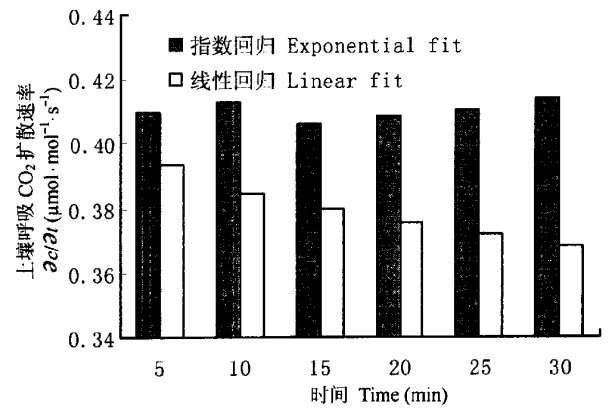


图 2 测量时间对土壤呼吸 CO_2 扩散速率($\partial c/\partial t$)的影响
Fig. 2 Impacts of different measuring periods on the initial rate of change in CO_2 concentration ($\partial c/\partial t$) across the soil surface

2.2 昼夜 CO_2 扩散梯度变化对土壤呼吸 CO_2 扩散速率的影响

图 3 描述了指数和线性回归估算的土壤呼吸 CO_2 扩散速率和大气 CO_2 浓度的日变化特征。由图 3 可见,大气 CO_2 浓度与指数和线性回归估算的 $\partial c/\partial t$ 都具有明显的日变化特征,但是具有相反的趋势。从图 3 也可看出,当夜间大气 CO_2 浓度较高时,即土壤表层大气 CO_2 扩散梯度较小时,指数回归与线性回归所获得的 $\partial c/\partial t$ 的差异非常明显,而白天大气 CO_2 浓度较低即土壤表层大气 CO_2 扩散梯度较大时,二者的差异较小。

根据太阳高度角的大小,可以将图 3 中指数和线性回归估算的土壤呼吸 CO_2 扩散速率和大气 CO_2 浓度的日变化数据分为白天与夜间两组进行分析。图 4 描述了白天和夜间土壤表层大气 CO_2 扩散梯度变化对土壤呼吸 CO_2 扩散速率的影响。从图 4a 可以看出,除了黎明时的数据外,白天 $\partial c/\partial t$ 与大气 CO_2 浓度关系的斜率较大,这可能主要是由于白天

温度变异较大而土壤表层大气 CO₂ 浓度相对保持稳定造成的。白天指数回归和线性回归估算的 $\partial c/\partial t$ 没有显著差异 如图 4c 所示只差 2.4% 左右。夜间

土壤呼吸释放的 CO₂ 在近地层积累导致大气 CO₂ 浓度升高,而较高的土壤表层大气 CO₂ 浓度抑制了土壤 CO₂ 的释放。夜间 $\partial c/\partial t$ 与土壤表层大气

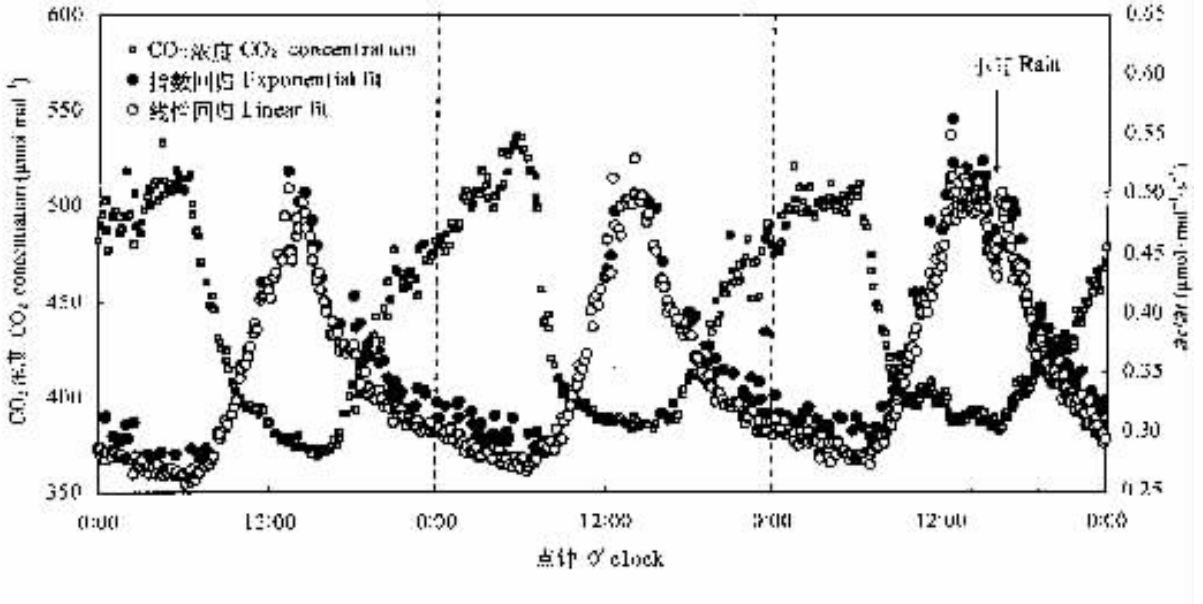


图3 指数和线性回归估算的土壤呼吸 CO₂ 扩散速率($\partial c/\partial t$)和大气 CO₂ 浓度的日变化特征

Fig.3 Diurnal variation of CO₂ concentration and the initial rate of change in the CO₂ concentration ($\partial c/\partial t$) by the exponential and linear fit across the soil surface

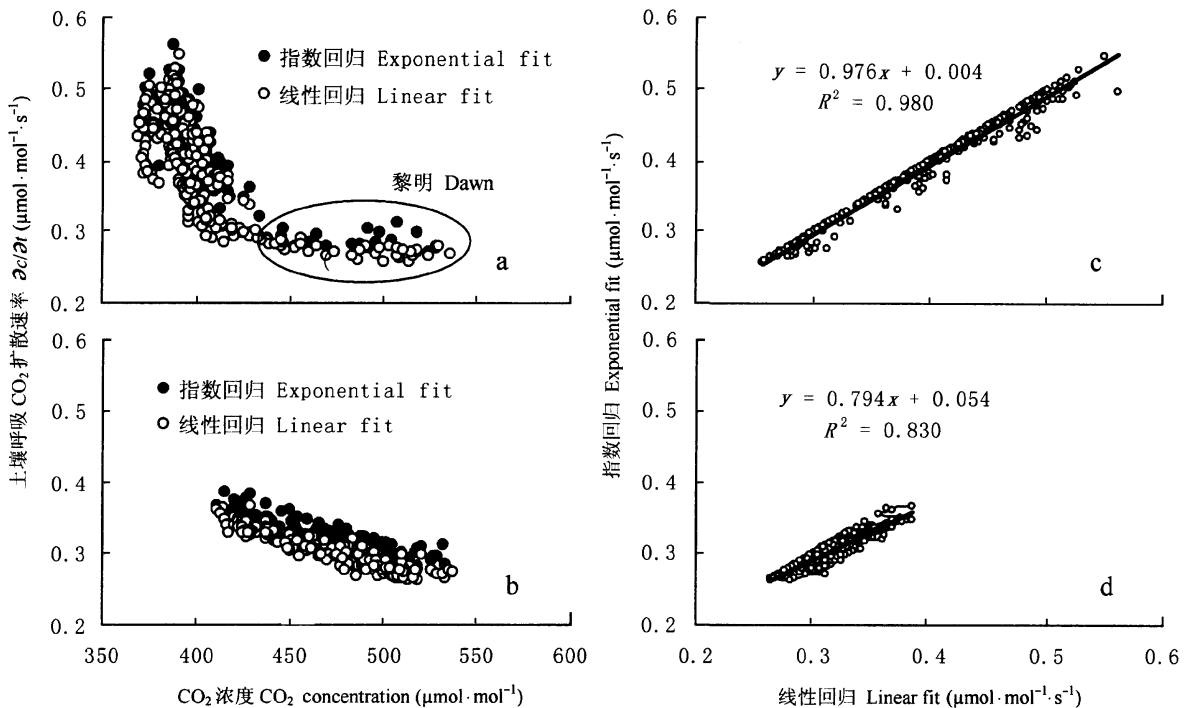


图4 昼夜 CO₂ 扩散梯度变化对土壤呼吸 CO₂ 扩散速率($\partial c/\partial t$)的影响

Fig.4 Impact of the diurnal CO₂ diffusion gradient on the initial rate of change in CO₂ concentration ($\partial c/\partial t$) across the soil surface
a 和 c 指白天数据 a and c refer to daytime data b 和 d 指夜间数据 b and d refer to nighttime data

CO₂ 浓度之间存在非常明显的负相关关系(图 4b)。夜间指数回归和线性回归估算的 $\partial c/\partial t$ 之间差异可高达 20.6%(图 4d), 这表明线性回归估算 $\partial c/\partial t$ 将会导致夜间土壤呼吸量的低估。指数回归方法是解决估算外界土壤表层大气 CO₂ 扩散梯度时的 $\partial c/\partial t$ 的重要方法之一, 可以最大限度地避免昼夜 CO₂ 扩散梯度变化对准确估算 $\partial c/\partial t$ 的影响。

2.3 土壤呼吸 CO₂ 扩散速率昼夜变化的非对称性现象

图 5 描述了土壤呼吸 CO₂ 扩散速率对温度昼夜变化响应的非对称响应特征。从图 5 可以看出, 上午与下午的温度变化对 $\partial c/\partial t$ 的影响明显不同, 表现出 $\partial c/\partial t$ 的昼夜变化存在明显的非对称性现象, 指数回归方法可以更好地描述 $\partial c/\partial t$ 昼夜变化的非

对称性响应特征。对比图 5a、5b 与 5c 可以发现, 图 5c 中 $\partial c/\partial t$ 对温度昼夜变化响应的非对称性响应特征有所变化, 这主要是由于图 5c 的日变化的下午数据受到小雨的影响, 导致 $\partial c/\partial t$ 迅速上升(图 3)。降水对土壤呼吸的影响因时因地而异。脉冲性降水事件会强烈地激发土壤 CO₂ 的释放(图 3)。

目前, 大部分土壤呼吸观测通常是用 9:00 和 12:00 之间的测定值代表日呼吸量的平均值(Davidson *et al.*, 1998; Yan *et al.*, 2006)。但是这些观测无法很好地描述土壤呼吸的非对称性响应过程, 必然会对土壤呼吸过程模型的建立和验证带来一定的影响与选择性系统误差。总之, 为精确地阐明土壤呼吸的量级和过程在全球碳循环和碳平衡中的作用, 非常必要进行长期和连续的准确的土壤呼吸观测。

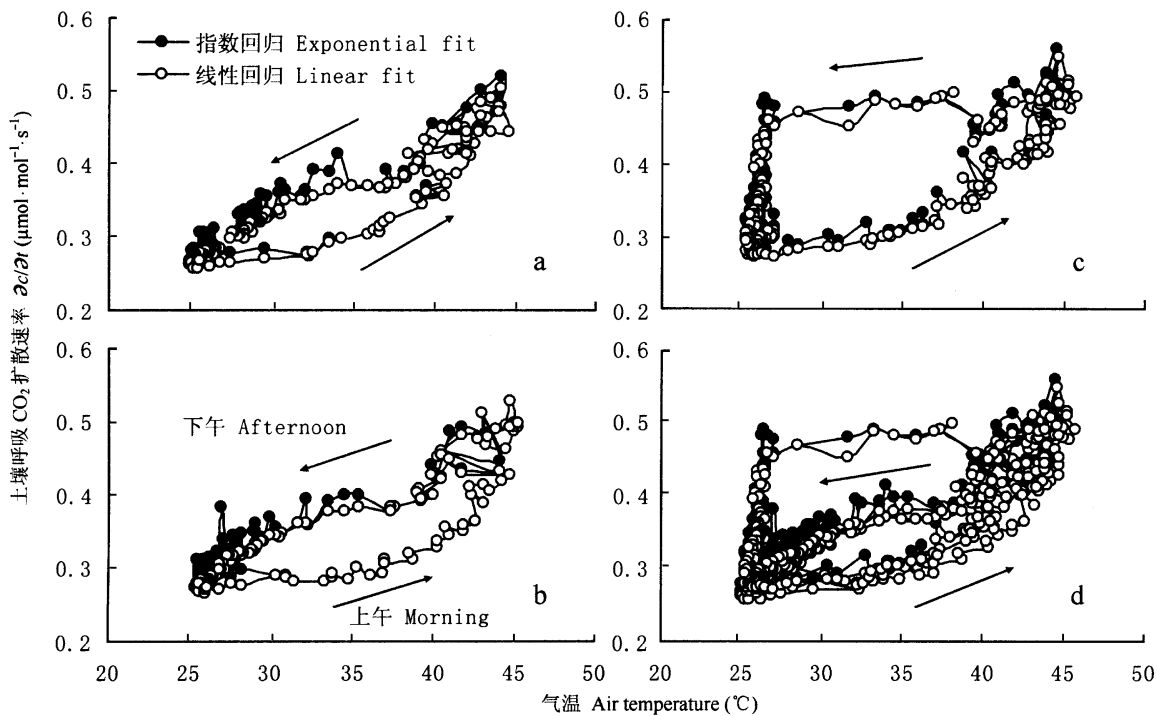


图 5 土壤呼吸 CO₂ 扩散速率($\partial c/\partial t$)对温度昼夜变化响应的非对称性响应特征

Fig. 5 Diurnal asymmetry of the initial rate of change in CO₂ concentration ($\partial c/\partial t$) in response to air temperature across the soil surface
a, b 和 c 分别代表图 3 中第一天、第二天和第三天的日变化数据 a, b and c refer to the data on the 1st, 2nd and 3rd day, respectively, in Fig. 3
d 代表图 3 中所有的日变化数据 d refers to all data in Fig. 3

3 结论

理想情况下, 土壤呼吸测定应该不影响土壤 CO₂ 扩散梯度, 在这个前提下, 土壤呼吸通量的量值可以通过观测 dCO_2/dt 的初始斜率(土壤呼吸 CO₂ 扩散速率)计算得到。通常土壤呼吸 CO₂ 扩散速率

的估算会受到土壤表层大气 CO₂ 扩散梯度(即土壤呼吸箱内 CO₂ 扩散梯度和大气 CO₂ 浓度昼夜变化)的影响。为获得 dCO_2/dt 的初始斜率, 须允许土壤呼吸箱内 CO₂ 浓度升高, 但土壤呼吸箱内的 CO₂ 浓度逐渐增加会导致土壤呼吸箱内 CO₂ 扩散梯度减小。线性回归方法获得的土壤呼吸 CO₂ 扩散速率低

于指数回归的估算值,而指数回归方法可以更加准确地估算土壤呼吸 CO₂ 扩散速率。夜间土壤呼吸 CO₂ 扩散速率与土壤表层大气 CO₂ 浓度之间存在非常明显的负相关关系,表明夜间土壤表层大气 CO₂ 扩散梯度的降低显著抑制土壤呼吸 CO₂ 扩散速率的增加。土壤呼吸 CO₂ 扩散速率昼夜变化具有明显的非对称性现象,指数回归方法可以更好地描述土壤呼吸 CO₂ 扩散速率昼夜变化的非对称性响应特征。为阐明土壤呼吸的量级和过程在全球碳循环和碳平衡中的作用,进行长期和连续的准确的土壤呼吸观测是非常必要的。

参 考 文 献

- Baldocchi D (2005). The carbon cycle under stress. *Nature*, 437, 483 – 484.
- Cox PM, Betts RA, Jones CD, Spall SA, Totterdell IJ (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184 – 187.
- Cui XY (崔晓勇), Chen ZZ (陈佐忠), Chen SQ (陈四清) (2001). Progress in research on soil respiration of grasslands. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 21, 315 – 325. (in Chinese with English abstract)
- Davidson EA, Belk E, Boone RD (1998). Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 4, 217 – 227.
- Gainey PL (1919). Parallel formation of carbon dioxide, ammonia and nitrate in soil. *Soil Science*, 7, 293 – 311.
- Goulden ML, Munger JW, Fan SM, Daube BC, Wofsy SC (1996). Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 2, 169 – 182.
- Grace J, Rayment M (2000). Respiration in the balance. *Nature*, 404, 819 – 820.
- Law BE, Falge E, Gu L, Baldocchi D (2002). Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 97 – 120.
- Ma XM (马秀梅), Zhu B (朱波), Han GX (韩广轩), Chen YC (陈玉成), Gao MR (高美荣), Zhang ZJ (张中杰) (2004). The advance in research of soil respiration. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 19, 491 – 495. (in Chinese with English abstract)
- Ryan MG, Law BE (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73, 3 – 27.
- Yan JH, Wang YP, Zhou GY, Zhang DQ (2006). Estimates of soil respiration and net primary production of three forests at different succession stages in South China. *Global Change Biology*, 12, 810 – 821.
- Yi ZG (易志刚), Yi WM (蚁伟民) (2003). Proceeding of studies on soil respiration of forest ecosystem. *Ecology and Environment* (生态环境), 12, 361 – 365. (in Chinese with English abstract)

责任编辑:周广胜 责任编辑:姜联合 王 葳