

冬季强风条件下森林冠层/大气界面开路 涡动相关 CO₂ 净交换通量的 UU_* 修正*

张军辉^{①**} 韩士杰^① 孙晓敏^② 唐凤德^{①③}

(① 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ② 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

③ 辽宁大学环境与生命科学学院, 沈阳 110036)

摘要 冬季夜间负净 CO₂ 通量的发生机制及合理处置的研究对于准确估算北方森林碳代谢状态具有重要影响. 通过对长白山阔叶红松林 2002 年 11 月~2003 年 4 月开路涡动相关系统获得的 CO₂ 净交换通量及相应交换过程的分析, 发现(i)夜间负 CO₂ 通量主要发生在强风速条件下; (ii) 强风速条件下的压力脉动及平流过程是夜间负净 CO₂ 通量主要原因, 鉴于对压力脉动及平流过程与 CO₂ 净交换同步实时监测的困难, 提出了可操作的强风条件下 CO₂ 净交换通量的上界摩擦风速(UU_*)修正方法, 长白山阔叶红松林的 $UU_* = 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这个修正也适用于白天; (iii) UU_* 修正解决了长白山阔叶红松林冬季夜间净交换负总量问题.

关键词 冬季夜间 负 CO₂ 交换通量 涡动相关 压力脉动 UU_* 修正

北方地区冬季时间漫长, 气温较低而积雪覆被较厚, 生态系统是净的碳源. 虽然与生长季节相比其 CO₂ 交换速率很小, 但在整个冬季生态系统呼吸可以消耗生长季节碳固定量的 5%~40%^[1,2], 因此冬季的碳代谢对与全年的总量碳平衡估算具有重要意义.

近年来涡动相关技术已经逐渐成为生态系统碳代谢研究的主导观测方法^[3-5]. 它较其他方法有相当的优势: 可以直接测定生态系统尺度 CO₂ 净交换, 而不会对生态系统产生干扰^[3,4]; 观测的空间代表尺度可以达到数百米至数公里^[6]; 可以连续观测, 得到从

半小时至数年尺度的生态系统碳代谢状态^[4,7]. 与其他方法一样, 涡动相关技术长期监测依然存在很多不确定性, 近些年各国学者对此做了很多探讨^[4,8], 但这些研究都是在代谢旺盛的生长季节进行, 非生长季节的问题并未引起关注. Baldocchi 等报道在冬季夜间经常可以观察到负的 CO₂ 交换通量^[9], Anthoni 等^[10], Zhang 等^[11]也发现了相同的现象, 这些报道都是基于开路涡动相关系统观测得到的. 这种现象可能意味着目前基于开路涡动相关系统的研究高估了生态系统的碳截获能力, 可是到目前为止并没有关于

2004-07-14 收稿, 2004-10-12 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2002CB412501)和中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)及国家自然科学基金项目(批准号: 30170167)共同资助

** E-mail: Jh Zhang@iae.ac.cn

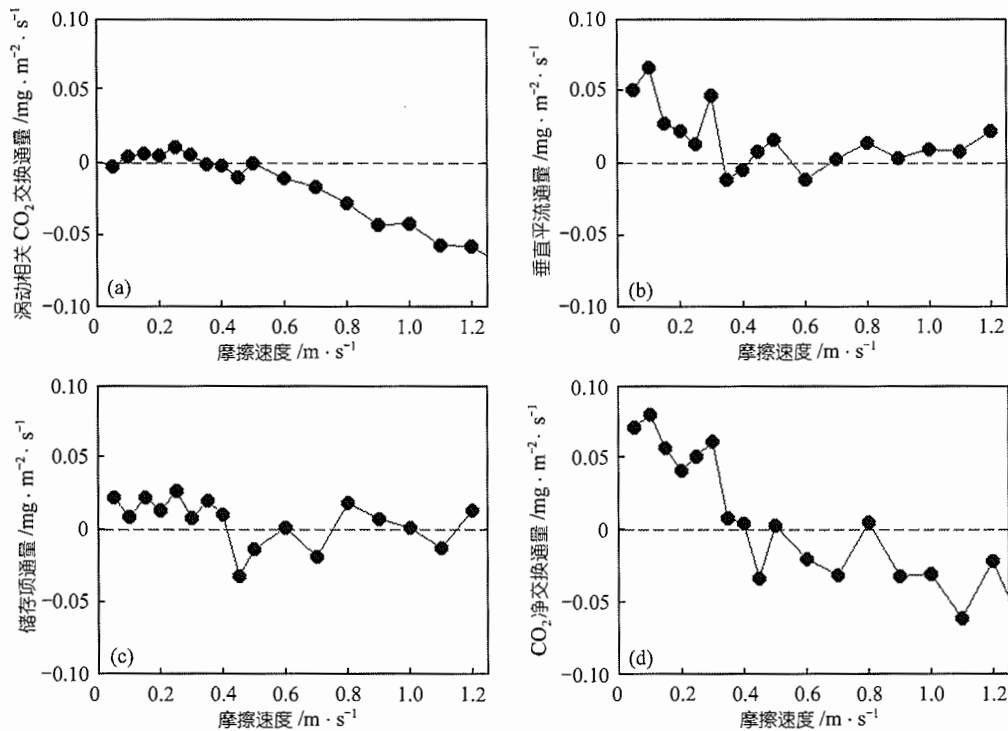


图 3 冬季夜间 NEE 收支涡动相关通量(a), 垂直平流通量(b), 储存项(c)及各项之和(d)随风速的变化

0.05, $u_* > 0.5$ 时, 间隔距离 0.1, 以保证每个间隔段内的数据量基本相等, 图 4 ~ 6 同此处理)的涡动相关 CO_2 通量 F_c 及储存项 F_s 、垂直平流项 F_{va} 的平均值随 u_* 的变化. 从图 3(a)中可以看出, 低风速条件下 F_c 随着风速的增大而逐渐增大, 这与其他报道是一致的^[8], 此时的湍流交换微弱, 冠层上下交换过程失耦, 土壤及生物体呼吸释放的 CO_2 不能完全到达涡动相关系统所在高度^[8]. 图 3(a)与其他报道不同的是当 $u_* > 0.4$ 以后随着风速的增大, F_c 表现为逐渐减小乃至为负值.

储存项(图 3(b))与垂直平流项(图 3(c))基本上都是随着风速的增大而减小的, 当 $u_* > 0.4$ 后二者出现了部分负值点, 这可能是 CO_2 浓度廓线的原因, 有些时候冠上的 CO_2 浓度要高于林内的浓度值, 这与 Baldocchi 等的报道^[9]是一致的, 其原因需要进一步的研究.

考虑了储存项 F_s 与垂直平流项 F_{va} 的冬季夜间生态系统/大气之间的 CO_2 净交换通量($F_s + F_{va} + F_c$)在

$u_* > 0.4$ 情况下依然为负值, 其绝对值随着风速的增大而增大(图 3(d)). 这表明忽略了水平平流和压力脉动影响的常规 NEE 收支方程无法有效解决这种在强风条件下出现的冬季夜间‘负’ CO_2 交换通量问题.

由于测量困难, 关于水平平流通量的报道并不多见, 仅有的几篇报道是关于生长季节风速很小的情况下的结果, 强风条件下气流尺度较大, 测量起来更加困难, 本研究将采用余项法来分析水平平流通量随风速的变化.

假定在冠层上涡动相关通量的辐合/辐散都必将为平流通量的辐合/辐散所平衡^[15], 则下式成立,

$$\overline{\rho_a} \left[u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right] = -\overline{\rho_a} \left[\frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} \right], \quad (4)$$

实验与模拟证明 $\partial \overline{w'c'}/\partial z \gg \partial \overline{u'c'}/\partial x$ ^[16]. 由于缺少冠层以上高度多层 CO_2 涡动相关通量同步观测, 本研究采用 1999 年 11 月在同一场地获得的多层感热通量及温度、风速数据来对水平平流通量的量级进行粗略估算, 结果见图 4.

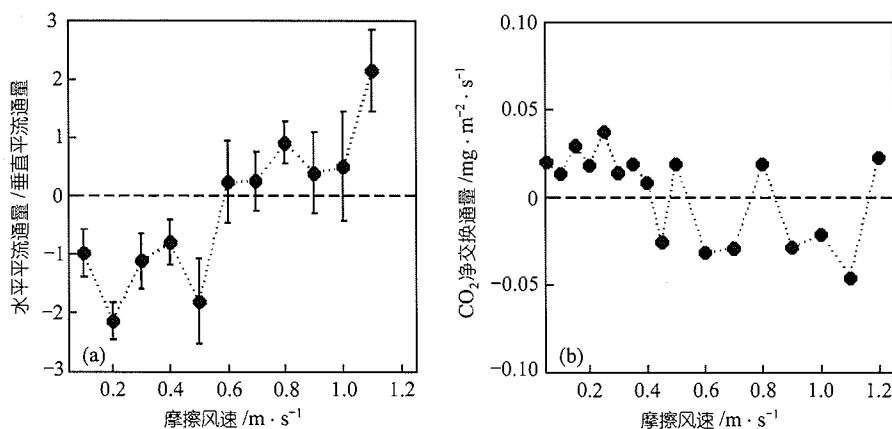


图4 冬季夜间水平平流与垂直平流比值(a), 考虑储存项 F_s , 垂直平流通量 F_{va} , 水平平流通量 F_{ha} 的生态系统-大气 CO₂ 交换通量随(b)摩擦速度 u_* 的变化

从图 4(a)可以看出, 在低风速条件下水平平流通量与垂直平流通量量级大致相等符号相反, 这与文献[17]的报道是一致的, 在强风条件下垂直平流通量与水平平流通量是大致相等的。根据这个估算我们给出考虑水平平流通量 F_{ha} , 垂直平流通量 F_{va} , 储存项通量 F_s 及涡动相关通量 F_c 的冬季夜间森林-大气界面 CO₂ 通量随风速的变化(图 4(b)). 可以看出, 这个考虑依然没有改变强风条件下 CO₂ 通量 < 0 的事实。

相干结构是一种有组织的大规模猝发现象, 是冠层-大气生态界面物质能量交换的主要过程之一, 其主要触发机制是冠层风速切变^[18], 其猝发频率随风速增大而增大^[19]。在相干结构的跃变阶段会伴有很大的压力脉动^[20], 独立观测也显示压力脉动方差随风速的增强而线性增加^[21-23]。实验表明压力脉动对于湍流动能与切变应力的收支影响非常显著^[24,25], 这意味着强风条件下压力脉动可能会对 CO₂ 交换通量产生很大影响。我们定义压力脉动通量的重要性因子 γ 为,

$$\gamma = \left| -\bar{c}(1 + \bar{\chi}_v) \left(\frac{\overline{w'p'_a}}{p_a} \right) / \overline{w'c'} \right|, \quad (5)$$

由于大多数通量站并未配备压力脉动观测装置, 压力脉动通量不能实时测定。实验表明粗糙下垫面中性或近中性条件下 $-\overline{w'p'_a} / \rho_a u_*^3 \approx 2$ ^[8], 而当 $u_* > 0.4$ 时大气层结可以近似为中性^[19], 式(5)可以参数化为

$$\gamma = \left| 2\rho_a \bar{c} u_*^3 (1 + \bar{\chi}_v) / (\overline{p_a w'c'}) \right|, \quad u_* > 0.4. \quad (6)$$

图 5(a)表明, 当 $u_* > 0.4$ 时压力脉动通量确实对冬季夜间森林-大气界面 CO₂ 交换起到了非常重要的作用, 仅考虑压力脉动通量, CO₂ 交换通量随风速减小的过零点摩擦速度已经由原来的 0.4 增大到 0.8, 但当 $u_* > 0.8$ 时压力脉动通量也无法单独改变 CO₂ 交换通量 < 0 的事实(图 5(b)). 当完全考虑公式(2)右侧所有通量项目时, 随风速增大交换通量减小的趋势与负交换通量基本可以得到修正(图 6)。

上述分析表明冬季夜间森林-大气界面夜间负 CO₂ 通量主要发生在强风速条件下; 强风条件下压力脉动及平流过程是夜间净 CO₂ 通量小于零的主要原因, 其中压力脉动的影响占主导地位。

2.2 强风条件下 CO₂ 净交换通量的上界摩擦风速修正(UU_* 修正)及其影响

从上面论述知道强风条件下的压力脉动及平流过程是夜间净 CO₂ 通量小于零的主要原因。由于测量上的困难, 实际计算压力脉动通量及水平平流通量目前还很困难, 从便于操作的角度出发, 参考低风速 u_* 修正方法, 可以假定生态系统的碳代谢速率与摩擦风速无关, 我们可以将某一摩擦风速以上的资料弃而不用作为数据缺失处理以减小强风的影响, 我们称这种修正方法为上界 u_* 修正(UU_* 修正)。

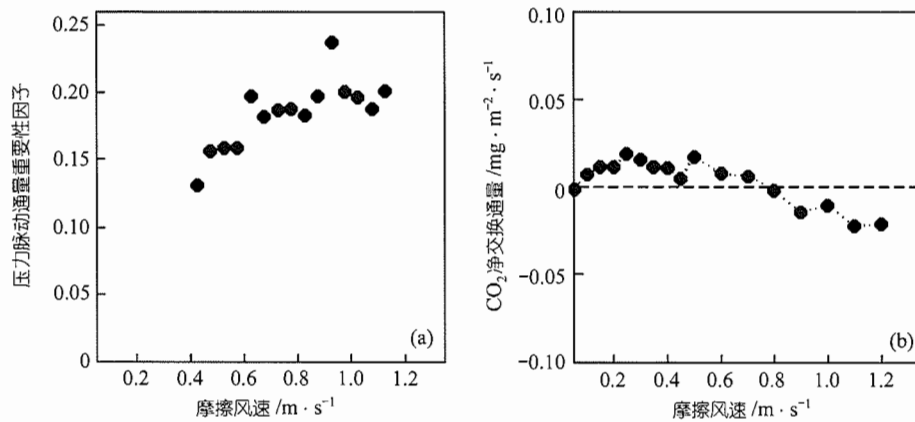


图 5 压力脉动通量的重要性因子(a),考虑了压力脉动通量的冬季夜间森林-大气界面 CO_2 交换通量(b)随摩擦风速的变化

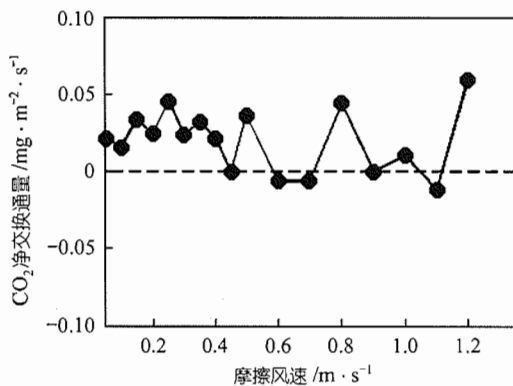


图 6 考虑了公式(2)右侧所有通量项的冬季夜间随 CO_2 交换通量随风速的变化

由于 $\overline{w'p'_a} \leq 0$ [8,22], 压力脉动通量始终大于零, 如果不进行 UU_* 修正, 风速较大情况下的夜间生态系统呼吸就有可能被低估, 而白天的光合作用强度被高估, 冬季生态系统的碳代谢状态会被错断。

我们从图 3(a),3(d)得到长白山阔叶红松林冬季夜间 $UU_* = 0.4$, 鉴于压力脉动项的重要程度, 我们也对白天的 CO_2 交换通量进行了 UU_* 修正。图 7 给出了 2002 年 12 月 UU_* 修正后前后的 CO_2 交换通量, 可以看出 UU_* 修正显著改善了净交换结果, 这种变化在夜间特别显著。12 月份 CO_2 交换通量平均日进程表现出明显的日变化特征, 白天的净交换通量小于零意味着白天光合作用的存在。景观尺度的模拟表明, 冬季长白山阔叶红松林依然进行光合生产, 尽管其 NPP

累积远小于其他季节^[26]。冬季表层土壤湿度很低, 生态系统呼吸的量级远低于其他季节, 尽管二者数量的比较需要进一步的工作, 但依然存在光合作用大于呼吸作用的可能。 UU_* 修正使基于开路涡动相关系统测定的冬季生态系统碳代谢状态在生态学意义上趋于合理。

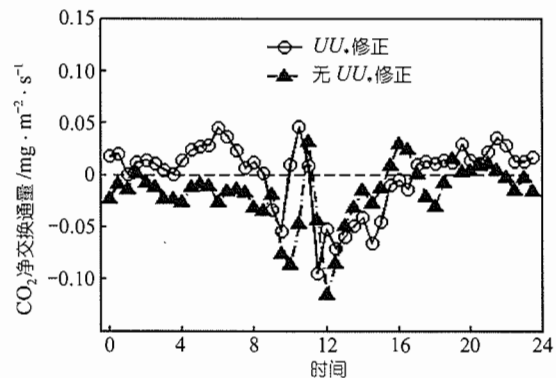


图 7 2002 年 12 月 CO_2 交换通量平均日进程

3 结论

冬季夜间负净 CO_2 通量的发生机制及合理处置对于准确估算北方森林碳代谢状态具有重要影响。通过对长白山阔叶红松林 2002 年 11 月 ~ 2003 年 4 月开路涡动相关系统获得的 CO_2 净交换通量及相应交换过程的分析得到如下结果。

(1) 夜间负 CO_2 通量主要发生在强风速条件下;

(2) 强风条件下的压力脉动及平流过程是夜间负净 CO₂ 通量的主要原因, 鉴于对压力脉动及平流过程与 CO₂ 净交换同步实时监测的困难, 提出了可操作的强风条件下 CO₂ 净交换通量的摩擦风速修正方法 (UU*), 长白山阔叶红松林的 $UU^* = 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这个修正也适用于白天; UU* 修正解决了长白山阔叶红松林冬季夜间净交换总量小于零的问题;

(3) 水平平流通量与压力脉动的实际测量目前还很困难, 间接方法的应用也受到限制, UU* 修正的引入虽然可以有效解决问题, 但有效数据的大幅减小, 可能会引入新的不确定性, 其结果的准确性需要结合模型模拟与其他方法的测定予以验证。

参 考 文 献

- Aubinet M, Heinesch B, Longdoz B. Estimation of the carbon sequestration by a heterogeneous forest: night flux corrections, heterogeneity of the site and inter-annual variability. *Global Change Biology*, 2002, 8: 1053~1071
- Charlotte L R, Nigel T R. Seasonal contribution of CO₂ fluxes in the annual C budget of a northern bog. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17:1029, doi: 10.1029/2002GB001889
- Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 1988, 69: 1331~1340
- Baldocchi D D. Assessing ecosystem carbon balance: problems and prospects of the eddy covariance technique. *Global change biology*, 2003, 9: 478~492
- Canadell J G, Mooney H A, Baldocchi D D, et al. Carbon Metabolism of the Terrestrial Biosphere: A Multitechnique Approach for Improved Understanding. *Ecosystems*, 2000, 3: 115~130
- Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 159~183
- Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. Net exchange on CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260: 1314~1317
- Massman W J, Lee X H. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 121~144
- Baldocchi D D, Finnigan J, Wilson K, et al. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96: 257~291
- Anthoni P M, Unsworth M H, Law B E, et al. Seasonal differences in carbon and water vapor exchange in young and old-growth ponderosa pine ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 203~222
- Zhang J H, Han S J, Yu G R. Seasonal variation in Carbon dioxide exchange over a 200 years old Chinese broad-leaved Korean pine mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, submitted
- Paw U K T, Baldocchi D D, Meyers T P, et al. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97: 487~511
- 林丽莎. 长白山阔叶红松林土壤/大气界面碳通量研究. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2004
- Massman W J, Sommerfeld R A, Mosier A R, et al. A model investigation of turbulence-driven pressure-pumping effects on the rate of diffusion of CO₂, N₂O and CH₄ through Layered snow-packs. *Journal of Geophysical Research (D)*, 1997, 102: 18851~18863
- Bink N J. The structure of the atmospheric surface layer subject to local advection, Ph.D. Thesis. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 1996
- Raupach M R, Weng W S, Carruthers D J, et al. Temperature and humidity fields and fluxes over hills, *Quart. J Roy Meteorol Soc*, 1992, 118: 191~225
- Aubinet M, Heinesch B, Yernaux M. Horizontal and vertical CO₂ advection in a sloping forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 108: 397~417
- Raupach M R, Finnigan J J, Brunet Y. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-Layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 78: 351~382
- 张军辉. 长白山阔叶红松林林冠/大气、土壤/大气生态界面结构及主要交换过程. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2002
- Zhuang Y, Amiro B D. Pressure fluctuations during coherent motions and their effects on the budgets of turbulent kinetic energy and momentum flux within a forest canopy. *Journal Of Applied Meteorology*, 1994, 33: 704~711
- Shaw R H, Zhang X J. Evidence of pressure-forced turbulent flow in a forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 58:273~288
- Maitani T, Seo T. Estimates of Velocity-pressure and velocity-pressure gradient interactions in the surface layer over plant canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 33:51~60
- Schols J L J, Wartena L. A dynamical description of turbulent structures in the near neutral atmospheric surface layer: the Role of static pressure fluctuations. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 34: 1~15
- McBean G A, Elliott J A. The vertical transports of kinetic energy by turbulence and pressure in Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32: 753~765.
- Wilczak J M, Edson J B, Högstrup J, et al. The budget of turbulent kinetic energy in the marine atmospheric surface layer. In: Geernaert G L, Ed. *Air-Sea Exchange: Physics, Chemistry, and Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1999. 153~173
- 张娜, 于贵瑞, 于振良, 等. 基于遥感和地面数据的景观尺度生态系统生产力的模拟. *应用生态学报*, 2003, 14: 643~652