

三江平原农田夜间呼吸的涡度相关法和箱法观测比对

宋涛^{1,2}, 王跃思^{2*}, 赵晓松², 宋长春³, 石立庆², 王盘兴¹, 黄耀²

(1. 南京信息工程大学应用气象学系, 南京 210044; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要: 2004 年和 2005 年作物生长季, 分别在三江平原水田和旱田, 利用涡度相关法(EC)和暗箱-气相色谱法(DC-GC)开展了夜间生态系统呼吸比对实验. 结果表明, 湍流交换充分时 2 种方法观测数据没有显著性差异, 并在选取更高摩擦风速下 EC 数据后, 二者数据一致性得到进一步提高; EC 观测的夜间呼吸与箱法模型的结果差异显著($p < 0.001$), 并因为 EC 数据本身巨大的变异性而与箱法模型结果的线性相关很弱(水稻田: $R^2 = 0.06$; 大豆地: $R^2 = 0.23$), 但在较长时间域内合计数据则可以明显地提高两者的线性相关(水稻田: $R^2 = 0.16$; 大豆地: $R^2 = 0.75$). 无论是与 DC-GC 观测数据比较, 还是与其模型结果比较, EC 观测的夜间呼吸都比 DC-GC 法低 4% ~ 30%, 并且低估程度随季节变化而变化, 在生长初期和晚期低估程度最小, 而在生长旺期低估程度最大.

关键词: 夜间生态系统呼吸; 涡度相关; 箱法

中图分类号: X830.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)08-1854-07

Comparison of Nocturnal Ecosystem Respiration Measured with Eddy Covariance and Chamber System at Two Agricultural Sites in Sanjiang Plain

SONG Tao^{1,2}, WANG Yue-si², ZHAO Xiao-song², SONG Chang-chun³, SHI Li-qing², WANG Pan-xing¹, HUANG Yao²

(1. Department of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: Measurements of nocturnal ecosystem respiration were conducted in a rice paddy of Sanjiang from July to September in 2004 and in a soybean field from June to September in 2005, using eddy covariance (EC) and dark chamber-gas chromatography (DC-GC). The differences of simultaneous data measured by two methods were not significant when night turbulent mixing was well. The correlations between two methods can be improved under more large friction velocity. EC measurements were poorly correlated to night ecosystem respiration estimated by chamber models for the variability inherent to EC measurements ($R^2 = 0.06, 0.23$ for rice and soybean, respectively). However, this correlation can be improved by aggregating measurements over longer time period ($R^2 = 0.16, 0.75$ for rice and soybean field, respectively). In general, whatever comparison with simultaneous chamber measurements or modeled results, eddy covariance measurements were consistently lower 4% ~ 30% than chambers, and this bias varied with crop growing stage, which were maximum in middle and minimum in early and late growing stage.

Key words: nocturnal ecosystem respiration; eddy covariance; chamber

土壤和植株的夜间呼吸是碳平衡的一个重要组成部分, 正确估计夜间呼吸通量对理解和预测生态系统碳收支动态变化十分必要. 涡度相关系统和箱法作为 2 种基于不同观测原理的 CO_2 通量测定方法, 广泛应用于夜间生态系统呼吸排放评价^[1~5]. 但是由于夜间大气边界层经常处于弱湍流交换, 使得涡度相关系统观测结果不可靠^[3]. 与之相比, 箱法对夜间微气象条件没有很严格要求, 但同时也因其采样空间代表性差, 并受制于箱效应而经常受到批评^[6]. 尽管这 2 种不同观测技术都有了很大的发展并且有了很长的应用历史, 但是到目前为止并没有哪一个方法被认为是观测陆地生态系统 CO_2 排放的标准方法^[7,8]. 因此, 利用涡度相关和箱法结果的

比对和相互校正, 有助于更好地估算夜间生态系统呼吸和解释净的生态系统碳通量. 目前大多数比对研究都是涡度相关的观测结果与箱法的尺度扩展结果(如外推箱法测定的土壤、茎、叶排放通量)的比较^[9~12], 2 种方法观测结果直接比较只有 Dore 等^[13]在美国 Florida 东海岸的常绿橡树林开展的实验. 中国系统的涡度相关观测 CO_2 通量起步较晚, 2002 年才开始利用涡度相关技术联网观测生态系

收稿日期: 2006-10-09; 修订日期: 2007-01-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40431001); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-432-4); 中国科学院知识创新重大项目(KZCX31-SW-01-01B)

作者简介: 宋涛(1978~)男, 博士研究生, 主要研究方向为大气边界层 CO_2 与水汽交换.

* 通讯联系人, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

统 CO₂ 交换通量^[14]，目前还鲜有这 2 种方法的对比报道。本实验以三江平原水田(稻田)和旱田(大豆)生态系统为研究平台，比较 2 种方法观测夜间生态系统 CO₂ 排放的结果，试图更加准确地估算夜间弱湍流交换条件下的生态系统呼吸量，并从方法上探讨是否可用箱法的夜间观测结果对 EC 观测的呼吸通量进行订正。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

水田观测地点位于三江平原浓江河与别拉洪河间地带，实验布置在中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站以南约 2 km 处 1 块已垦殖 25a、面积为(500 × 900) m² 的水稻田内。水稻于 2004-05-15 插秧，09-23 收割，品种为空育 131；耕地时一次性施入复合肥 3 × 10⁴ kg/hm² (N:P:K = 16:12:12)。水管理按当地常规自水稻移栽之后一直淹水，直到 9 月上旬稻田排水。旱田实验布置在实验站以东大约 1 km 的 1 处垦殖 20a、面积为(400 × 400) m² 的大豆田。大豆于 2005-05-23 播种，09-28 收获，品种为合丰 47，播种时一次施入复合肥 3.8 × 10⁴ kg/hm² (N:P:K = 16:12:12)。根据微气象理论，当观测区域坡度小于 8°~15°时，获得的湍流通量数据多数可靠^[15]。本研究所选的研究区域地势十分平坦，坡度分别小于 1°和 3°。水稻田和大豆地 EC 观测塔的最小风浪区(fetch)是朝北 200 m 左右，而在其它所有方向 fetch 的长度由几百 m 增加到将近 1 km 左右，观测期间盛行西南风。更加详细观测点信息参见文献[16]。

1.2 涡度相关观测系统

从 2004-07 ~ 2004-09, 2005-06 ~ 2005-09 利用涡度相关技术分别对水稻田和大豆地的 CO₂ 净交换通量进行了连续观测，并利用以下公式计算稻田 CO₂ 通量：

$$F_c = \overline{w'c'} = \frac{1}{t} \int_0^t w'c' dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w'c' \quad (1)$$

式中，F_c 为生态系统 CO₂ 通量，w' 为瞬时垂直风速脉动量，用三维超声风速仪 (Model CSAT-3, Campbell, USA) 测定，c' 为空气 CO₂ 的脉动量，用开路快速响应红外水汽-CO₂ 分析仪 (IRGA, Li7500, Li-Cor Inc, USA)，上横线表示时间平均，计算时 t 取 30 min。设备安装在离地面 2.5 m 的塔上，仪器探头距离塔身约 50 cm 并且朝向盛行风向。所有的 CO₂ 通量数据在下一步使用前都根据 Webb 等^[17] 提出的方

法对水热传输引起的密度效应进行了校正。与涡度通量同时观测的气象和土壤要素，以及夜间呼吸通量数据质量控制方法在文献[18]中已作说明。

1.3 箱式法观测系统

2004-07 ~ 2004-09 应用暗箱/气相色谱法 (DC-GC)^[19] 对夜间水稻田生态系统呼吸通量进行了观测。以 EC 观测点为圆心，在距圆心 60 m 处设置 3 组互成 120° 的 DC 采样点。保证了 2 个采样点始终位于盛行风向上游，1 个位于下游，每个点设置 2 组重复 (图 1)。为了保证作物的代表性和操作的方便性，在距田埂 6 行水稻处搭设木桥，2 组重复分别位于木桥的两侧。每个观测点底座内有 6 穴水稻，为了保护植株不受扣箱等造成的机械性损伤，在底座内外设置铁丝网，将底座内外植株隔离开。在大豆地的观测设置与水稻田相似，箱内外植株密度相同。

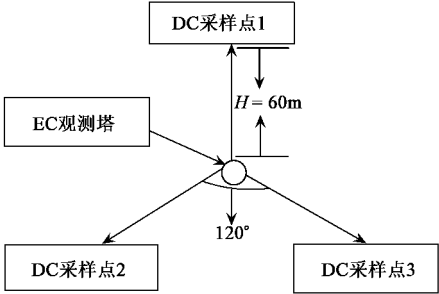


图 1 箱法与涡度相关法对比实验采样点示意
Fig.1 Sketch of sites of EC and chamber measurements

(1)水稻田观测 2004 年进行每周选择 2 个夜晚连续进行 DC-GC 观测，每晚 2 次 (19:00 和 23:00 各观测 1 次)，为避免与涡度相关数据时间平均的不一致而导致潜在误差^[20]，箱法采样时间长度取为 30 min，与涡度相关数据所代表的时间平均一致。气体样品采集的同时测定箱内温度和土壤表层水层厚度。

(2)大豆地观测 2005 年使用 DC-GC 法对大豆田进行了与 EC 法的同步对比观测。考虑到前 1 a 箱法观测时，夜间边界层常处于弱湍流交换状态，造成大量对应时刻的涡度相关通量数据被拒绝使用 (30 次箱法观测中，12 次对应时刻的涡度相关数据不符合质控要求)，因此在 2005 年的大豆田 DC-GC 法观测中，加强了观测频率，每周选取 4 个夜晚进行观测。此外，每周测定 1 次生物量、叶面积指数和植株氮含量。

2 结果与讨论

2.1 涡度相关与箱法即时数据比较

由于 DC 采样箱距离 EC 观测点只有 60 m, 接近最大通量贡献区. 在此区域内的人为活动会干扰 EC 观测, 对 DC 观测时刻的 EC 数据可能会有很大的不确定性, 因此用其前后 30 min 的平均来代替. 这是基于独立的箱法试验(数据未给出), 表明生态系统短期内(1 d)的 CO_2 呼吸通量主要受温度控制, 而夜间在 1.5 h 内温度变化不大, 此外取前后 0.5 h 数据的平均值可以平滑温度变化引起的观测差异. 大豆地和水稻田生长季 2 种方法观测 CO_2 交换通量的比较结果显示, 不管是所有 EC 数据, 还是剔除了低于摩擦风速(u^*)阈值的 EC 数据, 与 DC 观测结果混合较好, 对于所有 EC 数据而言, 2 种方法观测的 CO_2 交换通量差异显著(t 检验, 水稻田: $p \leq 0.01$; 大豆地: $p \leq 0.001$). 整体上, EC 方法观测的结果分别较 DC 偏低 37% 和 39% (水稻田: $F_{\text{EC}} = 0.63 F_{\text{chamber}}$, $R^2 = 0.19$; 大豆地: $F_{\text{EC}} = 0.61 F_{\text{chamber}}$, $R^2 = 0.50$, F_{EC} 和 F_{chamber} 分别表示为涡度相关和箱法夜间呼吸通量). 将夜间低 u^* 下(水稻: $u^* < 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 大豆: $u^* < 0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的涡度相关数据剔除后重新比较 2 种方法观测的 CO_2 交换通量发现, 尽管仍然有个别 EC 数据高于 DC 观测结果, 但统计分析表明 2 种方法观测结果差异并不显著(t 检验, 水稻田: $p = 0.13$; 大豆地: $p = 0.12$). 水稻田和大豆地 EC 数据较 DC 分别低 12% 和 15% (水稻田: $F_{\text{EC}} = 0.88 F_{\text{chamber}}$, $R^2 = 0.48$, 大豆地: $F_{\text{EC}} = 0.85 F_{\text{chamber}}$, $R^2 = 0.91$), 与未剔除低于 u^* 阈值数值相比, 2 种方法的一致性有了明显提高, 对于大豆田, 有高达 91% 的 EC 结果可以用 DC 法解释, 说明 2 种方法观测结果可比. 如果选取更高的 u^* 阈值以上的涡度相关数据与箱法比较, 2 种方法的一致性有了进一步的提高. 以大豆地为例, u^* 阈值分别取为 0.15、0.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, F_{EC} 分别为 0.90、0.95, F_{chamber} 、 R^2 分别为 0.94、0.96.

相对于 DC 法观测的结果, EC 法低估夜间 CO_2 交换通量被广泛报道^[3, 9, 10, 12, 14, 21]. 与本研究的結果相似, 尽管 EC 低估不是很大, 但是这种一致性的差异可能反映了 2 种原理方法不同的观测过程之间存在系统差异^[21]. 箱法观测准确度主要受观测期间箱内微气候环境变化影响, 特别是箱内气温、湿度、压力以及箱内空气混合的变化^[14]. 夜间无太阳辐射情况下, 箱内气温和湿度的变化通常较小并且可以通过缩短罩箱时间进一步降低^[14]. 本实验中, 尽管箱法有较长的罩箱时间(30 min), 但是箱效应对空气

温度的影响不大. 采样期间大豆地和水稻田箱内外的温度差较小, 分别为 $(0.91 \pm 0.14)^\circ\text{C}$ 和 $(0.98 \pm 0.15)^\circ\text{C}$, 同时发现箱内外温度差与 2 种方法观测结果的差异并没有相关性. 箱内空气压力过大通常会抑制土壤呼吸^[22], 但可以通过安装在箱体上的平衡管使箱内外空气达到平衡. 为获得代表性气体样品, 有必要对箱内空气进行混合, 以避免箱内底层空气 CO_2 的积聚. 但如果箱内空气混合强度过大, 可能会改变真实的土壤 CO_2 扩散梯度而造成土壤呼吸速率的过高估计^[23]. 对于本实验而言, 混气扇的使用可能使箱内空气混合强度过大, 增加箱内土壤扩散梯度, 加剧了土壤排放从而高估箱法观测的 CO_2 交换通量外, 箱效应并不是导致 2 种方法观测结果差异的主要原因. 涡度相关方法在植株生长旺期对夜间呼吸的低估可能是导致观测结果差异的一个原因. 以大豆地为例, 在时间序列上观察发现, 植物生长初期和后期 2 种方法结果一致性最高, 而在生长旺期涡度相关结果明显低于箱法(图略), 这可能由于植物生长初期和后期冠层间缝隙较大, 同时观测期间近地层湍流交换剧烈(普遍的 $u^* > 0.20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 植株和土壤呼吸排放的 CO_2 能被湍流完全的输送至探测器高度检测到, 而在生长旺期冠层间缝隙很小, 并且观测期间湍流交换相对较小($u^* < 0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 因此仍然有一部分排放的 CO_2 存储在冠层下方而不能被湍流输送至探测器高度. 2 种方法空间代表性的不同可能是导致 2 种观测结果差异的另一个原因. 涡度相关方法代表来流方向一个较大区域整体的 CO_2 交换通量的信息(涡度相关通量贡献区至少在几百 m^2), 而 DC 法 6 个分散的重复点仅覆盖了 1.5 m^2 ($6 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$) 的地表面积. 分析数据发现, 生长季夜间水稻田和大豆地 DC 法重复间平均变异系数均为 12%, 2 种生态系统采样点之间的空间变异性相对较小, 但是最大变异系数(CV)却分别达到 56% 和 55%, 对应的最大和最小通量相差 2.35 和 2 倍, 这说明在某些观测时段 CO_2 交换通量存在着较大的空间变异性. 但原因有待进一步研究.

2.2 箱法模型和涡度相关数据比较

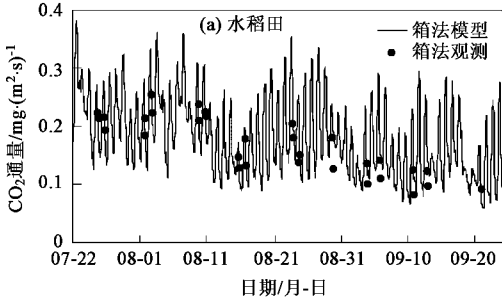
由于进行 DC 观测时操作者的存在会不可避免地干扰 EC 测量, 因此利用基于 DC 法观测结果建立的经验模型与 EC 比较是一个实用合理的选择, 此外 DC 模型结果可以与 EC 在更长时间和更高时间分辨率上相互比较.

2.2.1 箱法经验模型

根据所取得水稻田和大豆地 DC 法观测的数据,选取不同的经验方程比较不同模型的拟合结果.首先,用只考虑温度对呼吸速率响应的简单方程 $R_{eco} = R_{15} Q_{10}^{(T-15)/10}$ 拟合 EC 数据,其中 R_{eco} 为生态系统总呼吸, R_{15} 为在 15℃ 下的呼吸速率, Q_{10} 表示温度每改变 10℃ 呼吸速率的变化率,是一个无量纲参数.使用温度作为因变量的呼吸模型列于表 1. 2 种生态系统的 R_{eco} 与空气温度、5、10 cm 土壤温度均呈现显著的指数相关($p < 0.01$),其中与箱内空气温度相关方程的 R^2 最高,稻田和大豆地分别为 0.79 和 0.55.水稻田 Q_{10} 较大豆地高,分别为 2.05 和 1.83.与大豆地相比,稻田呼吸模型具有较高的 R^2 值,这可能是由于稻田箱法实验从 2004-07-25(灌浆期)开始到 2004-09-20(成熟期)结束,这时稻田植株呼吸以维持性呼吸为主,呼吸强度主要受温度影响而受植株生长状态影响较小,这一点可以从引入了生长期这个新变量的 DC 呼吸模型中得到支持,新模型并没有使 R^2 明显增加.大豆地箱法实验从 2005-06-29 开始(开花期)到 2005-09-15(成熟期)结束,这期间包括了植株呼吸明显受生物量变化的时期,因此,由于植株生长和土壤微生物活动状态的变化,使得简单的温度响应模型 R^2 不会太高.为了使 DC 数据能够更好地模拟大豆地生态系统呼吸,使用 Wohlfahrt 等^[24]提出的模型来重新拟合,在这个模型中将生态系统呼吸分成地下部分土壤呼吸 R_s 和地上部分植株呼吸 R_p :

$$R_{eco} = R_s + R_p = R_{sTref} \exp[E_s/RT_{ref}(1-T_{ref}/T_s)] + L R_{pTref} \exp[E_p RT_{ref}(1-T_{ref}/T_p)] \quad (2)$$

其中参数 R_{xTref} 和 E_x 分别是土壤($x = s$)和植株($x = p$)在参考温度(283.16 K)下的呼吸速率



$[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 和活化能($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), R 为气体常数 $[8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}]$. $T_s(\text{K})$ 选取表层土壤温度,这是因为与 5、10、15、20 cm 的拟合结果相比,土壤表层温度拟合结果的相关系数最高.对于植株呼吸,用空气温度 T_{air} 来代替植株温度 T_p , L 为叶面积指数.拟合后的模型参数列于表 2.可以看出考虑表征植物生长状态的叶面积指数后,拟合效果有了明显的提高($R^2 = 0.83$).在后面的分析中,水稻田使用只考虑温度响应的模型,大豆地选用 Wohlfahrt 模型.

表 1 箱法数据拟合的生态系统呼吸夜间呼吸模型¹⁾

观测地点	$R_{eco}/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	R^2
水稻田(2004)	$0.14(2.05^{(T-15)/10})$	0.79
大豆地(2005)	$0.23(1.83^{(T-15)/10})$	0.55

1) R_{eco} 为生态系统呼吸, T 为空气温度

表 2 大豆地箱法数据拟合的 Wohlfahrt 模型参数¹⁾

Table 2 Parameters of Wohlfahrt model fitted with chamber data at soybean fields					
R_{eco}^*	R_{sTref}	E_s	R_{pTref}	E_p	R^2
1.72	1.11	76 167	0.61	43670	0.83

1) R_{eco}^* 为 10℃ 下生态系统呼吸 $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$, R_{sTref} 和 R_{pTref} 为参考温度(10℃)下的土壤和植株呼吸速率 $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$, E_s 和 E_p 为活化能($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

植物生长期,生态系统总呼吸具有明显的季节变化,并且与温度和植物生长状况关系密切. Wohlfahrt 模型对大豆地箱法观测初期(6 月下旬)和最大排放期(7 月下旬)的呼吸变化情况模拟不够准确[图 2(a)],但整体上,模型结果与箱法观测结果具有很好的一致性(图 2).

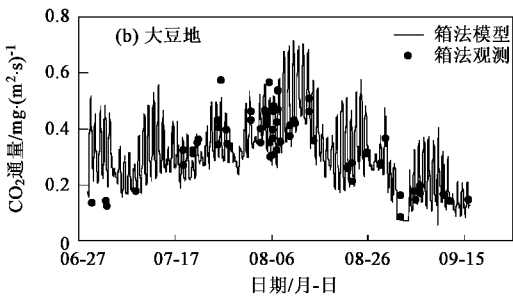


图 2 箱法模拟的结果与观测结果比较

Fig.2 Comparison of chamber measurement and model output for rice fields

2.2.2 涡度相关法夜间观测

研究者通常通过剔除不适当边界层条件下 EC

数据来研究夜间生态系统的 CO_2 呼吸排放^[2~4]. 此处理大幅减少了夜间观测数据数量,本研究中根据

u^* 阈值剔除的数据约占夜间总数据的 25%。剔除弱湍流交换下的数据后,夜间 EC 观测数据仍然表现出巨大变异,2004-07-25 ~ 2004-09-20,稻田夜间平均呼吸速率为 $0.10 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (标准偏差为 0.13),观测结果在 $-0.61 \sim 0.67 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; 2005-06-29 ~ 2005-09-15,大豆地夜间平均呼吸速率为 $0.22 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (标准偏差为 0.27),观测结果在 $-0.96 \sim 1.8 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。其它生态系统夜间呼吸通量的这种不可预测性也经常被报道^[25]。即使提高 u^* 阈值筛选数据也没有明显改观。EC 观测的夜间呼吸不可预测性可能是数据剔除过程中没有完全去除那些不符合大气稳态条件的数据造成。例如,在平均湍流交换高于 u^* 阈值的很多观测间隔,湍流交换呈现间歇状态。此外,可能还有许多正确反映生态系统呼吸的观测值,仅仅因为观测期间平均 u^* 低于阈值而被不适当地剔除^[9]。

涡度相关夜间通量在不同风向间没有表现出大的空间变异性。水稻田 CO_2 通量没有随温度变化而有明显的变化,并且呈现巨大的离散性。改用夜间平均 CO_2 交换通量,也没有明显改善两者相关性。

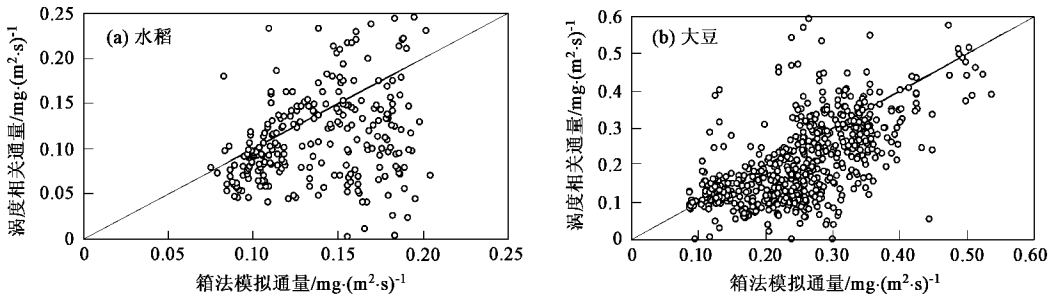


图3 夜间箱法模拟生态系统呼吸与摩擦风速大于阈值时涡度相关观测的生态系统呼吸比较(实线为 1:1 线)

Fig.3 Comparison of chamber estimates of nocturnal ecosystem respiration to nocturnal EC measurements when friction velocity was more than threshold (solid line represents the 1:1 line)

表 3 夜间涡度相关观测生态系统呼吸 与箱法模拟生态系统呼吸比较的回归统计 ¹⁾		
Table 3 Regression statistics of the comparison between EC measurements of nocturnal ecosystem respiration (F_{EC}) and chamber estimates of ecosystem respiration ($F_{chamber}$)		
观测地点	回归系数 b	R^2
水稻田	0.91 ± 0.022	0.06
大豆地	0.89 ± 0.022	0.23

1) 回归关系式为 $F_{EC} = b \times F_{chamber}$, F_{EC} 和 $F_{chamber}$ 分别表示涡度相关和箱法结果,下同

大量研究表明,不同生态系统夜间 EC 观测结果普遍地较 DC 模型结果低 20% ~ 35%^[3,9,10,12,14,21],

Baldocchi 等^[26]、Hollinger 等^[27]和 Goulden 等^[3]也报道了这种涡度相关观测的夜间呼吸与温度弱的相关性,他们认为这主要是因为涡度相关的观测本身有着巨大的时间变异性。但大豆地通量数据与温度存在着简单的指数关系,其相关性达到了显著水平 ($R^2 = 0.55, p < 0.001$)。

2.2.3 夜间涡度相关通量与箱法模型比较

在湍流交换充分的条件下(水稻田 $> 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 大豆地 $> 0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),2 个观测点夜间涡度相关比箱法低 9% 到 12%(表 3),回归系数 b 都小于 1.0, F_{EC} 和 $F_{chamber}$ 的成对 t 检验也显示两者之间差异极显著 ($p < 0.001$),由于 F_{EC} 本身巨大的变异性(图 3),使得两者的相关关系很弱(表 3)。本研究检验了将数据在较长的时间域内合计是否能显著提高两者相关关系。观测期间,大豆地和水稻田分别有 17 和 23 个夜晚 u^* 连续 5 h 超过阈值,这时夜间平均的 F_{EC} 和 $F_{chamber}$ 回归方程的 R^2 分别为 0.75 和 0.16,这表明合计数据在较大程度上减少了 F_{EC} 的变异性,从而提高了与 $F_{chamber}$ 的相关。

这种情况提出了哪种观测能提供更加可靠结果的问题。Lavigne 等^[9]在 6 个北方松树林的实验中指出,如果生物量和呼吸速率被高估,会导致箱法可能高估实际的生态系统呼吸,并且认为这种可能性不能被忽视。气象条件对夜间观测的影响和冷空气泄流造成的平流损失有可能使 EC 低估夜间生态系统呼吸。平流损失在森林生态系统 EC 法观测中经常遇到,但在农田这种低矮植被生态系统中是否存在还有待研究。

从表 4 可以看出, $F_{chamber}$ 和 F_{EC} 的差异在大豆不同生长阶段基本一致,这意味着 DC 法模拟结果捕捉到了夜间生态系统呼吸的季节变化趋势,与 EC

结果的差异主要是由于 EC 低估.表 4 还显示出在开花期-结荚期 EC 低估程度最高,可能的原因是此时植株处于生长旺期,冠层间缝隙很小,一部分植株和土壤呼吸排放的 CO₂ 积累在冠层之下而难以被上方的探测器(2.5 m 处)检测到.后期大豆植株叶片凋落,冠层间缝隙变大,涡度相关的低估也随之减小.

表 4 不同生长阶段涡度相关观测生态系统呼吸与箱法模拟生态系统呼吸的比较

Table 4 Comparison of the relationships between EC and chamber estimates of ecosystem respiration for different growing seasons			
项目	开花期-结荚期	结荚期-鼓粒期	鼓粒期-成熟期
回归系数 <i>b</i>	0.69	0.95	0.96
<i>R</i> ²	0.08	0.20	0.13

3 结论

(1)夜间水田和旱地生态系统的呼吸与交换通量相同,“箱效应”影响被降到最低,同时在湍流交换充分条件下获取的 EC 数据与 DC 数据差异不显著,两者具有较好的一致性.对于低风速、弱湍流交换夜晚,DC 观测数据可能提供了一种 EC 观测数据的插补方法.

(2)整个观测期间 EC 测定的夜间生态系统呼吸速率本身具有很大变异性,使得与 DC 法为基础建立的模型计算结果相关性低,使用较长时间域内合计的数据比对,则明显提高了两者的一致性.

(3)无论是即时数据比较还是 EC 数据与 DC 模型结果比较,夜间 EC 观测都比 DC 法低估 4% ~ 30%.这种一致性的差异源于两种原理方法不同的观测过程,差异随着植物生长阶段的不同而变化.

(4)对于低矮植被,涡度相关法与静态箱法夜间观测的生态系统呼吸排放通量数据可比,但存在一定差异,尤其存在一个系统偏差,而引起差异的原因来自于多个方面.

致谢:感谢中国科学院大气物理所刘辉志研究员和刘广仁高工给与的理论和技术指导;感谢 CERN 三江站全体工作人员在仪器架设和运行期间给予的大力帮助.

参考文献:

[1] Ruimy A, Jarvis P G, Baldocchi D D, *et al.* CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation: a review [J]. *Advances in Ecological Research*, 1995, **26**: 1 ~ 68.

[2] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest [J]. *Science*, 1993, **260**: 1314 ~ 1317.

[3] Goulden M L, Munger J W, Fan S M. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy [J]. *Global Change Biology*, 1996, **2**: 169 ~ 182.

[4] Baldocchi D D, Vogel C A, Hall B. Seasonal variations of energy and water vapour exchange rates above and below a boreal jack pine forest canopy [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 28939 ~ 28951.

[5] Drake B G, Muehe M S, Peresta G, *et al.* Acclimation of photosynthesis, respiration and ecosystem carbon flux of a wetland on Chesapeake Bay, Maryland, to elevated atmospheric CO₂ concentration [J]. *Plant and Soil*, 1996, **187**: 111 ~ 118.

[6] Mosier A R. Gas flux measurement techniques with special reference to techniques suitable for measurements over large ecologically uniform areas [A]. In: Bouwman A F (Ed.), *Soils and the Greenhouse Effect* [C]. Wiley, Chichester, 1990. 289 ~ 301.

[7] Norman J M, Garcia R, Verma S B. Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of a grassland [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**: 18845 ~ 18853.

[8] Rayment M B, Jarvis P G. An improved open chamber system for measuring soil CO₂ effluxes in the field [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 28779 ~ 28784.

[9] Lavigne M B, Ryan M G, Andersson D E, *et al.* Comparing nocturnal eddy covariance measurement to estimate of ecosystem respiration made by scaling chamber measurements at six coniferous boreal sites [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 28977 ~ 28985.

[10] Law B E, Ryan M G, Anthoni M. Seasonal and annual respiration of ponderosa pine ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 169 ~ 182.

[11] Law B E, Kelliher F M, Baldocchi D D, *et al.* Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forest during a summer drought [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **110**: 27 ~ 43.

[12] Granier A, Ceschia E, Damesin C, *et al.* The carbon balance of a young Beech forest [J]. *Funct Ecol*, 2000, **14**: 312 ~ 325.

[13] Dore S, Hymus G J, Johnson D P, *et al.* Cross validation of open-top chamber and eddy covariance measurements of ecosystem CO₂ exchange in a Florida scrub-oak ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 84 ~ 95.

[14] 于贵瑞,张雷明,孙晓敏,等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展 [J]. *中国科学 D 辑*, 2005, **34**(增刊): 15 ~ 29.

[15] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micrometeorological methods [J]. *Ecology*, 1988, **69**: 1331 ~ 1340.

[16] Hao Qingju, Wang Yuesi, Song Changchun, *et al.* Contribution of winter to annual CH₄, CO₂ and N₂O emission from freshwater marsh in Sanjiang Plain [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18** (2): 270 ~ 275.

[17] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1980, **106**: 85 ~ 100.

[18] 宋涛,王跃思,宋长春,等. 三江平原稻田 CO₂ 通量及其环境相应特征 [J]. 中国环境科学 2006, **26**(6): 657 ~ 661.

[19] 王跃思, 郑循华, 王明星, 等. 静态箱法气相色谱法自动检测农田 N₂O 排放 [J]. 分析测试技术与仪器, 1997, **3**(1): 10 ~ 14.

[20] Oechel W C, Vourlitis G L, Brooks S. Intercomparison among chamber, tower and aircraft net CO₂ and energy fluxes measured during the Arctic System Science Land-Atmosphere-Ice Interactions (ARCSS-LAII) Flux Study [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, **103**: 28993 ~ 29003.

[21] Kabwe L K, Farrell R E, Carey S K, *et al.* Characterizing spatial and temporal variation in CO₂ flux from ground surface using three complimentary measurement techniques [J]. Journal of Hydrology, 2005, **311**: 80 ~ 90.

[22] Lund C P, Riley W J, Pierce L L. The effects of chamber pressurisation on soil -surface CO₂ fluxe and the implications for NEE measurements under elevated CO₂[J]. Global Change Boilogy, 1999, **5**: 269 ~ 281.

[23] Le Dantec V, Epron D, Dufrêne E. Soil CO₂ afflux in a beech forest: comparison of two closed dynamic system [J]. Plant Soil, 1999, **214**: 125 ~ 132.

[24] Wohlfahrt G, Anfang C, Bahn M, *et al.* Quantifying nighttime ecosystem respiration of meadows using eddy covariance, chambers and modeling [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, **128**: 141 ~ 162.

[25] Greco S, Baldocchi D D. Seasonal variation of CO₂ and water vapor exchange at the moss surface of a black spruce forest [J]. Global Change Biology, 1996, **2**: 183 ~ 197.

[26] Baldocchi D D, Meyers T P. Trace gas exchange above the floor of a deciduous forest. 1, Evaporation and CO₂ efflux [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, **96**: 7271 ~ 7285.

[27] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, *et al.* Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere [J]. Ecology, 1994, **75**: 134 ~ 150.