

# 涡度相关法和静态箱 / 气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较\*

郑泽梅<sup>1,2</sup> 于贵瑞<sup>1\*\*</sup> 孙晓敏<sup>1</sup> 曹广民<sup>3</sup> 王跃思<sup>4</sup> 杜明远<sup>5</sup> 李俊<sup>1</sup> 李英年<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 CERN 综合研究中心, 北京 100101; <sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039; <sup>3</sup>中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; <sup>4</sup>中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; <sup>5</sup>日本农林环境技术研究所, 日本筑波 3058604)

**摘要** 基于涡度相关法和静态箱 / 气相色谱法 (箱式法) 的碳通量观测数据, 对比分析了两种方法在评价禹城冬小麦-夏玉米复种农田生态系统和海北高寒矮嵩草草甸生态系统呼吸中的差异。结果表明: 在保证涡度相关法和箱式法观测数据质量的条件下, 两种方法实时观测的夜间通量结果具有较好的一致性, 相关系数达 0.95 ~ 0.98; 箱式法白天的观测结果与涡度相关法估算的白天生态系统呼吸值有较好的一致性, 但前者普遍大于后者; 两种方法测定生态系统呼吸日平均值的差异达极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 但二者的季节变化趋势较一致。在整个观测期内, 冬小麦-夏玉米复种农田观测箱内外平均温差为 1.8 ℃, 涡度相关法较箱式法测定的生态系统呼吸日平均值偏低 30.3%; 高寒矮嵩草草甸观测箱内外平均温差为 1.9 ℃, 涡度相关法较箱式法测定的生态系统呼吸日平均值偏低 31.4%。两种方法对生态系统生长季呼吸日平均值测定结果的偏差高于非生长季。

**关键词** 静态箱 / 气相色谱 涡度相关 生态系统呼吸

**文章编号** 1001-9332(2008)02-0290-09 **中图分类号** Q148 **文献标识码** A

**Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration.** ZHENG Ze-mei<sup>1,2</sup>, YU Gui-rui<sup>1</sup>, SUN Xiao-min<sup>1</sup>, CAO Guang-min<sup>3</sup>, WANG Yue-si<sup>4</sup>, DU Ming-yuan<sup>5</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, LI Ying-nian<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; <sup>3</sup>Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; <sup>4</sup>Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; <sup>5</sup>National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba 3058604, Japan). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2008, 19(2): 290-298.

**Abstract:** Based on the measurement of carbon flux by the methods of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram, a comparison was made between the two methods in evaluating ecosystem respiration over winter wheat (*Triticum aestivum*) - summer maize (*Zea mays*) double crop land and *Kobresia humilis* alpine meadow. The results showed that under the conditions of obtained data having good quality, nighttime ecosystem respiration from eddy covariance measurement was significantly agreed with that from static chamber/gas chromatogram measurement, with the correlation coefficients ranging from 0.95 to 0.98, and the daytime ecosystem respiration from these two measurements also had a good consistency though the static chamber/gas chromatogram measurement often produced higher values. The daily mean value of ecosystem respiration was significantly different between these two measurements, but the seasonal pattern was similar. For winter wheat-summer maize double crop land, the difference of mean air temperature inside and outside the chamber was 1.8 ℃, and the daily mean value of ecosystem respiration across the whole study period was 30.3% lower in eddy covariance measurement than in static chamber/gas chromatogram measurement; while

\*中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-01A, KZCX1-SW-01-01B) 和国家重点基础研究发展规划资助项目 (G2002CB412501)。

\*\* 通讯作者。E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

2007-03-29收稿, 2007-12-17接受。

for alpine meadow, the difference of the mean air temperature was 1.9 °C, and the daily mean value of ecosystem respiration was 31.4% lower in eddy covariance measurement than in static chamber/gas chromatogram measurement. The variance between the daily mean values of ecosystem respiration obtained from the two measurements was higher in growing season than in dormant season.

**Key words:** static chamber/gas chromatogram; eddy covariance; ecosystem respiration

陆地生态系统呼吸 ( $R_{eco}$ ) 是全球碳循环中最重要碳通量组分之一<sup>[1-4]</sup>, 对特定生态系统的净碳收支起着决定作用<sup>[5]</sup>. 精确测定陆地生态系统呼吸能减小碳收支评价的不确定性. 涡度相关法 (eddy covariance, EC) 和静态箱/气相色谱法 (箱式法) 是生态系统呼吸研究中比较常用的两种观测手段. 涡度相关法可连续、直接地测定生态系统尺度上植被与大气之间的净  $CO_2$  交换量 ( $F_{NEE}$ ), 但白天涡度相关法的观测结果不能被直接区分为生态系统光合 ( $F_{GEP}$ ) 和生态系统呼吸, 难以为理解和预测生态系统碳吸收过程提供足够信息<sup>[5]</sup>. 如果要获取白天的生态系统呼吸, 往往通过建立夜间  $CO_2$  通量和环境因子的关系来外推白天的生态系统呼吸, 而在夜间大气湍流较弱时, 涡度相关法对于生态系统呼吸的观测结果本身就存在误差, 这会对白天生态系统呼吸的估算和生态系统碳收支的确定产生影响. 作为一种简单、快捷、经济的观测手段, 箱式法能够对低矮植被的生态系统呼吸进行直接观测, 并且可弥补夜间弱湍流交换情况下涡度相关法通量观测的不足和白天通量组分难以区分的问题, 还可以通过多点观测来评价生态系统呼吸的空间变异程度<sup>[6]</sup>. 但箱式法也受到很多因素的限制, 如箱内外温差、箱内气压状况和箱内气体混合程度等<sup>[7]</sup>. 作为陆地生态系统碳收支研究中常用的两种碳通量观测手段, 其自身都存在不足之处, 均会带来碳收支评价的不确定

性, 所以有必要对这两种方法的碳通量观测结果进行比较.

目前, 国际上已有很多观测站点同时使用涡度相关法和箱式法进行碳通量的观测研究, 并对两种方法观测结果的差异进行了比较<sup>[8-11]</sup>. 在我国, 已有一些结合涡度相关法和静态箱/气相色谱法开展的生态系统碳通量观测研究<sup>[12]</sup>, 但有关两种方法观测结果差异比较的报道较少<sup>[13-15]</sup>. 为此, 本研究通过比较涡度相关法和静态箱/气相色谱法在复种农田和高寒草甸生态系统呼吸观测中的结果, 量化了二者结果差异的大小, 并客观评价了差异产生的原因, 以期减少涡度相关法和箱式法在碳收支评价中的不确定性提供可借鉴的实践经验, 并为建立更完备的生态系统碳收支综合观测体系提供理论依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区自然概况

观测实验分别在中国科学院禹城综合实验站冬小麦 (*Triticum aestivum*) 夏玉米 (*Zea mays*) 复种农田生态系统和中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站高寒矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸生态系统同时进行. 研究站点概况如表 1 所示, 详细情况可参考 Qing 等<sup>[16]</sup> 和赵亮等<sup>[17]</sup> 关于相关研究站点的报道.

表 1 研究站点的基本概况

Tab 1 Summary of the studied stations

站点 Station	生态系统类型 Ecosystem type	地理位置 Location	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Soil type	年均气温 Mean annual temperature (°C)	年均降水量 Mean annual precipitation (mm)	观测时间段 Measurement period	观测方法 Eddy covariance method / 静态箱/气相色谱法 Static/Gas chromatogram chamber method
禹城站 Yucheng	冬小麦-夏玉米 复种农田 Winter wheat-summer maize double cropland	36°57'N, 116°38'E	50	潮土、盐化潮土 Alluvial, salted soil	13.1	528	2002-11-01— 2004-07-31	2002-11-13— 2004-07-28*
海北站 Haibei	高寒矮嵩草草甸 Alpine <i>K. humilis</i> meadow	37°36'N, 101°20'E	3250	草毡-冷冻-维形土 Mat cryo-sod soil	-1.7	600	2004-03-10— 2004-12-31	2004-03-16— 2004-12-16

\*夏玉米生长中后期 (2003年 8月至 10月中旬), 由于植株过高, 静态箱/气相色谱法观测停止. Chamber measurement was stopped during the late growth period of summer maize (from August to middle October, 2003) due to the over-height of canopy.

## 1.2 观测方法

**1.2.1 常规气象和土壤要素的观测** 常规气象系统进行两层温湿度 (Model HMP45C, Vaisala Inc., Helsinki, Finland)、两层风速 (Model AR-100, Vector Instruments, UK)的测定,禹城站传感器的安置高度分别为 2.2 和 3.4 m,海北站传感器的安置高度分别为 1.2 和 2.2 m. 进行一层净辐射 (Model CNR-1, Kipp & Zonen)和光合有效辐射 (LI90SB, Li-Cor Inc., NE, USA)的测定,禹城站和海北站传感器的安置高度分别为 1.8 和 1.4 m. 使用温度计 (107-L, Campbell Scientific, USA)进行多层土壤温度的观测 (禹城站分为 0、0.05、0.2 和 0.4 m 共 4 层,海北站分为 0.05、0.1、0.2、0.4 和 0.8 m 共 5 层). 使用 TDR 探针 (Model CS615-L, Campbell Scientific)进行多层土壤含水量的测定 (禹城站分为 0.1 和 0.2 m 共 2 层,海北站分为 0.05、0.2 和 0.5 m 共 3 层). 以上常规气象数据由数据采集器 (Model CR23XID, Campbell Scientific, USA)按 30 min 步长计算其平均值并存储. 降雨量使用雨量桶 (Model 52203, RM Young Inc., Traverse City, MI, USA)测定,数据记录频率为每 1 h 1 次.

**1.2.2 基于涡度相关法的通量观测** 禹城站和海北站均使用开放式涡度相关系统测定  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和能量通量. 采用三维超声风速仪 (Model CSA T3, Campbell Scientific, Logan, UT, USA)和红外气体分析仪 (Model LI7500, Li-Cor Inc., NE, USA)分别测定三维风速和水汽密度. 海北站传感器的高度为地面以上 2.2 m;禹城站传感器的高度因作物高度有所调整,在冬小麦生育期和夏玉米生长前期为 2.1 m 左右,在夏玉米生长旺期到收获为 2.8 m 左右. 原始数据的采样频率为 10 Hz,由数据采集器 CR5000 (Model CR5000, Campbell Scientific, Logan, UT, USA)记录并存储,系统同时记录并存储平均周期为 30 min 的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、潜热、显热和动量通量数据.

**1.2.3 基于静态箱/气相色谱法的通量观测** 采用箱式法<sup>[18]</sup>在冬小麦-夏玉米复种农田和高寒矮草草甸进行生态系统  $\text{CO}_2$  排放量的测定. 为了尽量使箱式法测定的样点面积能达到涡度相关法代表的面积并捕捉通量空间变异性方面的信息,其采样地点设在涡度相关系统的通量贡献区内,在通量塔周围采用“品”字形设置 3 个重复对照样地. 采样箱由箱体和箱底座组成,均采用不锈钢板制成. 箱体大小为 0.5 m  $\times$  0.5 m  $\times$  0.5 m,箱内装有采样管、测温口和 2 个轴流混气扇,箱体外罩隔热棉被. 底座大小 0.5

m  $\times$  0.5 m,带有水封槽,埋入土壤 0.2 m. 7~10 d 在 9:00—11:00 观测 1 次. 观测时将箱体扣于底座上,并保证底座内的植株都在箱体内,用水密封箱体和底座间缝隙. 扣箱后每隔 10 min 用 0.1 L 注射器抽取箱内空气,保证 0.5 h 内完成 4 次抽气采样. 每月进行 1 次日变化的观测,白天每 2 h 测 1 次,夜间每 3 h 测 1 次. 同步测定箱内外气温以及 0、0.05 m 深的土壤温度和土壤水分含量 (测墒仪测定). 采用 Agilent 公司生产的 4890D 型气相色谱仪进行气样分析. 禹城站夏玉米生长中后期 (2003 年 8 月至 10 月中旬)由于植株过高,箱式法观测停止.

## 1.3 数据处理

**1.3.1 涡度相关系统通量数据的校正与筛选** 对于涡度相关的通量数据,需进行 3 次坐标旋转以消除地面不平整对通量观测的影响<sup>[19]</sup>;同时对涡度相关数据进行 WPL 校正,以消除水热传输造成  $\text{CO}_2$  通量变化的密度效应<sup>[20]</sup>.

在无效通量数据的剔除过程中,首先剔除雨天数据和明显的异常数据 (本研究中禹城站  $|F_{\text{NEE}}| > 3 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、海北站  $|F_{\text{NEE}}| > 1 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的数据为明显的异常数据),以减小数据分析的不确定性. 然后使用夜间的摩擦风速临界值方法剔除夜间 (太阳高度角  $< 0^\circ$ ) 稳定大气状况下的无效数据. 使用平均值检验法 (average values test, AVT) 得到夜间摩擦风速的临界值<sup>[21]</sup>. 本研究中,禹城站分 3 个阶段使用了不同的摩擦风速临界值,3—5 月为  $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,6—9 月为  $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,10 月—次年 2 月为  $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;海北站使用的摩擦风速临界值为  $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 由于  $\text{CO}_2$  通量储存项相对  $F_{\text{NEE}}$  较小,并且其日累积值趋于零,所以本研究中没有考虑储存项对  $\text{CO}_2$  通量的影响.

**1.3.2 涡度相关系统夜间通量数据的插补和白天生态系统呼吸的估算** 使用 Lolyd & Taylor 方程 (式 1) 进行夜间  $F_{\text{NEE}}$  (即夜间的生态系统呼吸速率 ( $R_{\text{eco}}$ )) 缺失数据的插补和白天  $R_{\text{eco}}$  的估算<sup>[22]</sup>.

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{ref}} \exp \left[ E_0 \left[ \frac{1}{T_{\text{ref}} - T_{\text{zer0}}} - \frac{1}{T - T_{\text{zer0}}} \right] \right] \quad (1)$$

式中:  $R_{\text{ref}}$  为参考温度 ( $T_{\text{ref}}$ ) 下的呼吸速率 ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $E_0$  为活化能 ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ); 参考温度  $T_{\text{ref}}$  取为 10 ;  $T_{\text{zer0}}$  为温度试验常数,取 -46.02<sup>[22]</sup>;  $T$  为空气温度 ( );  $R_{\text{eco}}$  为生态系统呼吸速率 ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

### 1.3.3 箱式法通量数据的计算

$$R_{eco} = \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{dC_t}{dt} \cdot h \cdot \frac{1}{360000} \quad (2)$$

式中:  $M$  为  $CO_2$  的摩尔质量 ( $g \cdot mol^{-1}$ );  $V_0$  为标准状态下 ( $0^\circ C, 1013 hPa$ ) 气体的摩尔体积, 为  $22.41 \times 10^{-3} m^3 \cdot mol^{-1}$ ;  $T_0$  和  $P_0$  分别为标准状态下空气的绝对温度 ( $^\circ K$ ) 和气压 ( $hPa$ );  $T$  和  $P$  分别为采样时箱内的实际气温 ( $^\circ K$ ) 和实际气压 ( $hPa$ );  $dC_t/dt$  为观测时间内箱内  $CO_2$  浓度随时间变化的回归直线斜率,  $C_t$  为  $t$  时刻箱内被测气体的体积混合比浓度 ( $mg \cdot L^{-1}$ ),  $t$  为时间 ( $min$ );  $h$  为采样箱高度 ( $m$ ).

涡度相关系统通量数据的计算利用 MATLAB 软件及程序完成. 箱式法数据为 3 个重复的平均值, 用平均值 ± 标准差表示. 数据统计采用 SPSS 软件完成, 文中所有图形采用 Microsoft Excel 2003 绘制.

## 2 结果与分析

### 2.1 两种方法测定的夜间生态系统呼吸比较

涡度相关系统观测的夜间  $CO_2$  通量即为生态系统呼吸, 可与箱式法相同时段的测定结果直接进行比较. 由于涡度相关系统测得的  $CO_2$  通量为记录时刻前半小时的平均值, 因此, 本文采用箱式法数据记录时刻 (该时刻为第一次抽气取样时间, 30 min 内完成 4 次抽气采样) 之后半小时的涡度相关数据与箱式法数据进行比较.

从图 1a 可以看出, 在保证数据质量的情况下, 两种方法观测结果的一致性较好. 在弱的湍流交换条件下, 涡度相关法常常会明显地低估夜间  $CO_2$  通量<sup>[23-24]</sup>. 剔除低于摩擦风速临界值的涡度相关数据后, 涡度相关法与箱式法观测结果具有更好的一致性 (图 1b). 在冬小麦-夏玉米复种农田和高寒矮嵩草草甸中, 涡度相关法与箱式法观测结果的差异均不显著 ( $P > 0.05$ ), 两种方法在冬小麦-夏玉米复种农田和高寒矮嵩草草甸中观测结果的相关系数分别为 0.97 和 0.95.

一般认为, 箱式法观测结果的不确定性主要来源于观测期间箱内微气象环境的变化, 特别是箱内气温、湿度、压力和箱内空气混合程度的变化<sup>[25]</sup>. 本研究中, 箱式法数据测定时箱内外的温差 ( $\Delta T$ ) 较小, 其平均值为  $0.1^\circ C$ 、最大值为  $1.3^\circ C$ 、最小值为  $-1.5^\circ C$ , 表明本文中箱式法观测时受箱内微气象环境的影响较小, 可以保证本研究结果的正确性.

### 2.2 两种方法观测的白天生态系统呼吸比较

涡度相关法白天的通量观测结果为净  $CO_2$  交

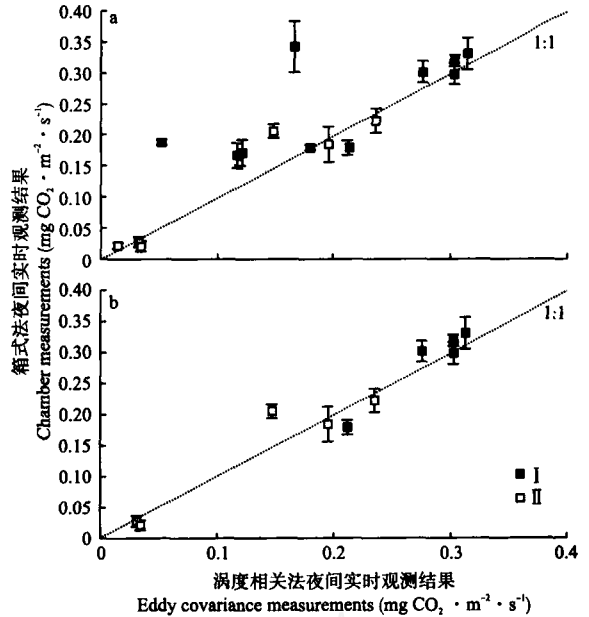


图 1 两种方法测定的夜间生态系统呼吸比较  
 Fig. 1 Comparison of nighttime ecosystem respiration measured with the two methods  
 : 冬小麦-夏玉米复种农田 Winter wheat-summer maize double crop land; : 高寒矮嵩草草甸 Alpine *K. humilis* meadow. 下同 The same below. a) 涡度相关法的数据经过了坐标旋转、WPL 校正和异常值剔除等质量控制处理, 误差线表示箱式法 3 个重复观测的标准差 Data from eddy covariance measurements were processed with coordinate rotation correction, WPL correction and spike rejection, and error bar represented the standard error of chamber measurements; b) 涡度相关法的数据在图 1a 的基础上进行了摩擦风速阈值的剔除, 误差线表示箱式法 3 个重复观测的标准差 The  $u^*$  threshold correction was applied to the data from eddy covariance in Fig. 1a and error bar represented the standard error of chamber measurements

换量, 而箱式法为暗箱观测, 测定的通量为生态系统呼吸, 所以必须将涡度相关法白天的通量观测结果拆分为生态系统呼吸和光合组分后才能与箱式法进行白天生态系统呼吸测定结果的比较. 本研究通过夜间  $CO_2$  通量和温度的关系外推得到涡度相关法白天的生态系统呼吸速率. 在冬小麦-夏玉米复种农田, 根据作物的不同生长阶段 (冬小麦拔节期、冬小麦乳熟期, 夏玉米出苗期、夏玉米拔节期) 各选取 1 d 的涡度相关法和箱式法测定结果, 对白天生态系统呼吸测定结果进行比较 (图 2). 根据矮嵩草的长势和植被各个物候期的时间长短不同, 在矮嵩草非生长季选取 1 d, 返青期和草盛期各选取 2 d 的涡度相关法和箱式法测定数据, 进行白天生态系统呼吸测定结果的比较 (图 3).

除夏玉米出苗期外, 涡度相关法和箱式法对冬小麦拔节期、冬小麦乳熟期和夏玉米拔节期白天不同时刻的生态系统呼吸测定结果都表现出先升高后下降的趋势 (图 2). 在高寒矮嵩草草甸的不同生长阶段, 涡度相关法和箱式法在白天不同时刻的生态

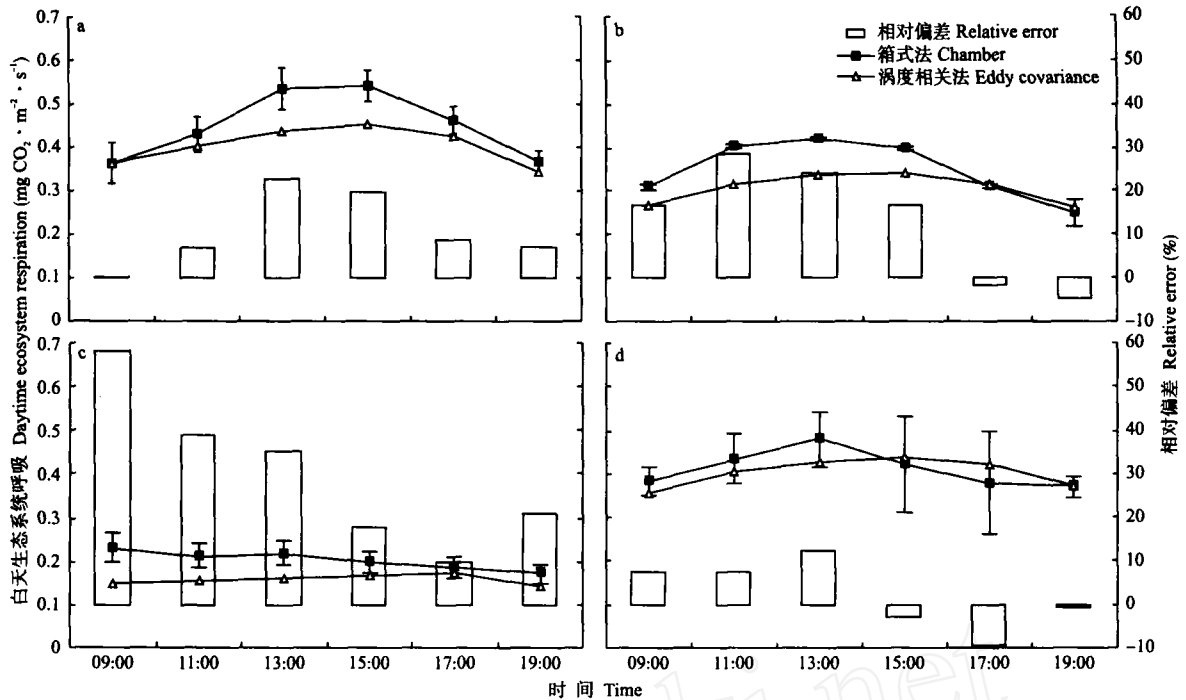


图 2 两种方法测定的冬小麦 夏玉米复种农田白天生态系统呼吸比较

Fig 2 Comparison of daytime ecosystem respiration at winter wheat-summer maize double cropland measured with the two methods a) 冬小麦拔节期 Winter wheat shoot stage (2003-04-27); b) 冬小麦乳熟期 Winter wheat mature stage (2003-05-20); c) 夏玉米出苗期 Summer maize budding stage (2003-06-21); d) 夏玉米拔节期 Summer maize shoot stage (2003-07-29).

系统呼吸测定结果基本上表现出先增大后减小的变化趋势(图 3)。矮嵩草返青期和草盛期时间跨度都在 2 个月左右,因植被生长和气温升高引起的植被呼吸和土壤异养呼吸的增加,即使在同一物候期,不同观测日的生态系统呼吸速率也存在较大的差异。

从图 2、图 3 可以看出,涡度相关法与箱式法测定结果的相对偏差(相对偏差 = (箱式法测定结果 / 涡度相关法测定结果  $\times$  100%) 多为正值,说明在白天,箱式法的测定结果普遍大于涡度相关法中生态系统呼吸的估算值。在禹城站冬小麦 夏玉米复种农田,两种方法测定结果的相对偏差最大值往往出现在 11:00—13:00;在海北站高寒矮嵩草草甸,相对偏差最大值往往出现在 15:00 前后的 1~2 h 内,其原因在于白天的多次观测中,相对偏差最大值出现时段的太阳光照射最为强烈,箱内外温差最大(冬小麦 夏玉米复种农田为 2.6 ~ 4.7,高寒矮嵩草草甸为 4.7 ~ 4.9),箱内温度的升高导致箱内植被及土壤呼吸速率的增加,从而引起了更多的生态系统  $\text{CO}_2$  排放。

### 2.3 两种方法测定的生态系统呼吸日平均值比较

研究表明,9:00—11:00 的呼吸速率可代表一天呼吸速率的平均值<sup>[26-28]</sup>。因此,本研究将箱式法 9:00—11:00 测定的呼吸速率 ( $R_{\text{daytime}}$ ) 与当天所有

测定值的平均值 ( $R_{\text{daily}}$ ) 进行了对比,结果表明:在冬小麦 夏玉米复种农田中,  $R_{\text{daily}}$  与  $R_{\text{daytime}}$  的相关系数为 0.99,线性回归分析的斜率为 0.98,相对偏差 [ $(R_{\text{daytime}}/R_{\text{daily}} - 1) \times 100\%$ ] 的平均值为 -2.5%;高寒矮嵩草草甸中  $R_{\text{daily}}$  与  $R_{\text{daytime}}$  的相关系数为 0.99,线性回归分析的斜率为 0.91,相对偏差的平均值为 6%。这说明本研究中箱式法 9:00—11:00 测定的呼吸速率基本上能够代表昼夜呼吸速率的平均值。因此,将箱式法 9:00—11:00 测定的生态系统呼吸作为一天的平均值与该日涡度相关法估算的生态系统呼吸全天平均值进行比较和回归分析。

从图 4 可以看出,无论是冬小麦 夏玉米复种农田,还是高寒矮嵩草草甸,两种方法对其生态系统呼吸日平均值的测定结果都表现出相似的季节变化趋势,即在作物或植被生长旺盛期均具有较大的日平均呼吸速率,回归分析也显示两种方法测定的结果有较好的一致性。在冬小麦 夏玉米复种农田和高寒矮嵩草草甸中,对两种方法测定结果进行回归的决定系数分别为 0.77 和 0.83,回归斜率分别为 0.623 和 0.655。两个站点涡度相关法的测定结果均普遍低于箱式法,且两种方法的观测结果差异极显著 ( $P < 0.01$ ),在 2003 年夏玉米生长初期和 2004 年冬小麦生长旺期以及高寒矮嵩草草甸生长旺期尤为明显。

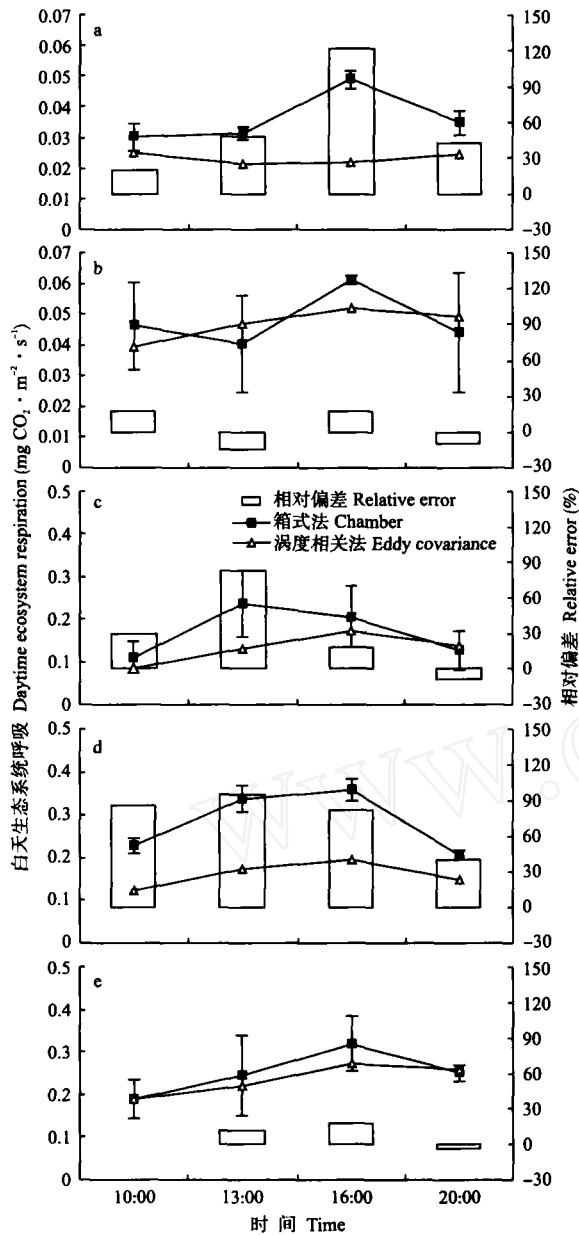


图3 两种方法测定的高寒矮嵩草草甸白天生态系统呼吸比较

Fig 3 Comparison of daytime ecosystem respiration of the alpine *K. humilis* meadow measured with the two methods  
 a) 非生长期 Dormancy stage (2004-04-15); b) 返青期 Regreening stage (2004-05-15); c) 返青期 Regreening stage (2004-06-15); d) 草盛期 Grass exuberance stage (2004-07-13); e) 草盛期 Grass exuberance stage (2004-08-12).

分别对冬小麦-夏玉米复种农田和高寒矮嵩草草甸中的箱式法数据和涡度相关数据进行平均,得到整个观测期两种方法测定的冬小麦-夏玉米复种农田和高寒矮嵩草草甸生态系统呼吸日平均值分别为  $0.217, 0.166 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.127, 0.096 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 涡度相关法较箱式法的测定结果分别低 30.3% 和 31.4%。这与以往在森林<sup>[8,29]</sup>、高山草甸<sup>[11]</sup>和水稻田<sup>[15]</sup>等生态系统开展的相关研

究结果(涡度相关法较箱式法的测定结果偏低 23%~37%)基本一致。

#### 2.4 作物-植被不同生长阶段对两种方法测定结果间差异的影响

在作物的不同生长阶段,涡度相关法与箱式法测定结果的差异有所不同(图4)。本研究中东小麦的非生长季为返青(大约为2月末)之前,夏玉米的非生长季为出苗(大约为6月末)之前;高寒矮嵩草草甸的生长季为5—9月,非生长季为10月—次年4月。

在冬小麦的非生长季,两种方法观测结果之间的差异不显著( $P > 0.05$ ),而生长季的差异则达极显著水平( $P < 0.01$ );在冬小麦的非生长季和生长季,涡度相关法较箱式法的测定结果分别偏低 2.9% 和 36.1%;在夏玉米的生长季,两种方法观测结果之间的差异显著( $P < 0.05$ ),涡度相关法较箱式法的测定结果偏低 22.2%。对于高寒矮嵩草草甸,在非生长季和生长季,两种方法的观测结果之间的差异均达极显著水平( $P < 0.01$ ),涡度相关法较箱式法的测定结果偏低 21.5% 和 32.3% (表2)。

在生长季,涡度相关法与箱式法测定结果的差异大于在非生长季测定结果的差异。其原因可能是: 1) 生长季气温较高,箱内外的温差往往较非生长季的箱内外温差大,使得生长季箱式法观测结果的偏高程度大于非生长季,从而导致与涡度相关法测定结果的差异增大; 2) 在生长季,作物-植被冠层间的缝隙变小,植被和土壤呼吸排放的  $\text{CO}_2$  可能累积在冠层下方,箱内气体如果混合不均匀会带来气体取样的误差,从而降低了生长季箱式法和涡度相关法测定结果的相关性; 3) 涡度相关法和箱式法所测通量的空间代表性的差异程度可能影响两种方法观测结果的差异: 虽然在涡度相关系统周围采用“品”字形布置了3个重复观测点进行箱式法的观测,在一定程度上克服了生态系统呼吸的空间变异性问题,但在生长季,观测区域地表的均匀程度低于非生长季,涡度相关观测通量贡献区在稳定大气状况下可达 200 m 左右<sup>[30]</sup>,而箱式法的3个重复采样点仅覆盖了3个  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  的地表面积,这与涡度相关法的  $\text{CO}_2$  通量信息来源还是有差异的,因此箱式法的3次重复采样点可能还不足以平均化生态系统呼吸的空间变异性; 4) 在高寒矮嵩草草甸的涡度相关通量观测中,  $\text{CO}_2$  通量的储存项通常在生长季比非生长季大<sup>[31]</sup>,由于本研究中没有考虑  $\text{CO}_2$  通量的储存项效应,这可能也是涡度相关法和箱式法在生长季和非生长季的测定结果存在差异的原因之一。

表 2 作物 植被不同生长阶段涡度相关法和箱式法观测的生态系统呼吸

**Tah 2 Ecosystem respiration from eddy covariance and chamber measurements during different growth periods**

植被类型 Vegetation type	作物 Crop	时间段 Period	生态系统呼吸 Ecosystem respiration (mg CO <sub>2</sub> · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )		n
			箱式法 Chamber	涡度相关法 Eddy covariance	
复种农田 Double crop land	冬小麦 Winter wheat	非生长季 Non-growing season	0.027 ±0.014	0.026 ±0.011 (2.9%)	19
		生长季 Growing season	0.288 ±0.134	0.212 ±0.085 (36.1% **)	37
	夏玉米 Summer maize	非生长季 Non-growing season	-	-	-
		生长季 Growing season	0.271 ±0.101	0.222 ±0.083 (22.2% *)	19
		整个观测期 Whole measurement period	0.217 ±0.155	0.166 ±0.109 (30.3% **)	75
高寒矮蒿草甸 Alpine <i>K. humilis</i> meadow	非生长季 Non-growing season	0.036 ±0.025	0.030 ±0.021 (21.5% **)	13	
	生长季 Growing season	0.160 ±0.073	0.121 ±0.051 (32.3% **)	35	
	整个观测期 Whole measurement period	0.127 ±0.084	0.096 ±0.061 (31.4% **)	48	

\* P < 0.05; \*\* P < 0.01. 下同 The same below. 括号内数据为涡度相关法相对箱式法测定结果的偏低值 Data in bracket were the relative error of ecosystem respiration from eddy covariance measurements comparing with ecosystem respiration from chamber measurements - 表示该时间段没有箱式法观测数据 - meant there was no data available from chamber measurements

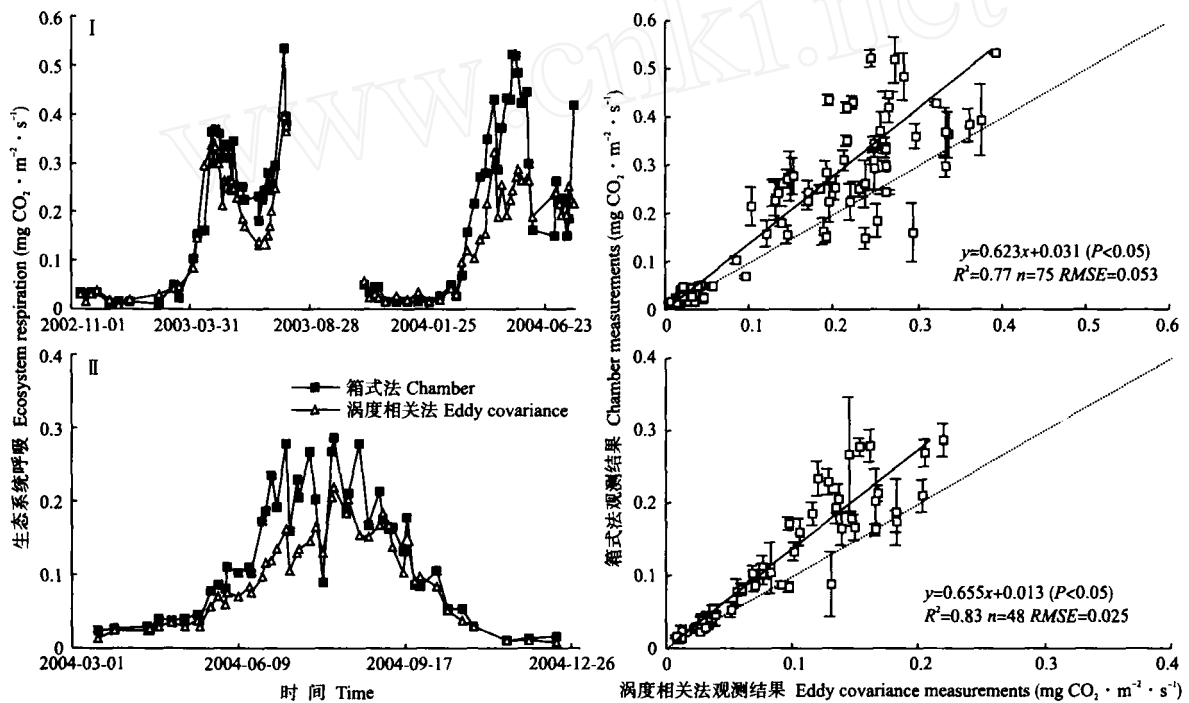


图 4 两种方法测定的生态系统呼吸日平均值比较

Fig 4 Comparison of daily ecosystem respiration measured with the two methods

2.5 箱内外温差对两种方法测定结果间差异的影响

从表 3 可以看出,对于高寒矮蒿草甸,当箱内外温差 (t) 的平均值为 0.1、1.9 和 3.8 时,涡度相关法较箱式法的测定结果分别偏低 16.7% (P < 0.05)、26.5% (P < 0.01) 和 31.5% (P < 0.05),随着箱内外温差的增大,涡度相关法与箱式法测定结果间的差异逐渐增大,二者回归直线的决定系数也

逐渐降低.对于冬小麦 夏玉米复种农田, t 在 3/1 ~ 1 范围内,两种方法观测结果间的差异不显著 (P > 0.05),而当 1 < t < 3 和 3 < t < 5 时,其差异分别达显著 (P < 0.05) 和极显著水平 (P < 0.01);当箱内外温差的平均值为 0.3 和 1.8 时,涡度相关法较箱式法的测定结果约偏低 25.2% 和 31.7%,随着箱内外温差的增大,涡度相关法与箱式法测定结果间的差异有增大趋势,而当箱内外

表 3 按箱内外温差分段后两种方法测定的生态系统呼吸日平均值

Tab 3 Daily ecosystem respiration from eddy covariance and chamber measurements according to the difference of air temperature between inside and outside the chamber

箱内外温差 ( $t$ ) Difference of air temperature ( $^{\circ}$ )	冬小麦夏玉米复种农田 Winter wheat/summer maize double cropland				高寒矮嵩草甸 Alpine meadow ( <i>K. humilis</i> )			
	$t$ 平均值 Mean value of $t$ ( $^{\circ}$ )	回归方程 Regression function	$R^2$	$n$	$t$ 平均值 Mean value of $t$ ( $^{\circ}$ )	回归方程 Regression function	$R^2$	$n$
-1 $t < 1$	0.3	$y = 0.748x$	0.82	19	0.1	$y = 0.833x^*$	0.98	15
1 $t < 3$	1.8	$y = 0.683x^*$	0.92	40	1.9	$y = 0.735x^{**}$	0.96	17
3 $t < 5$	3.4	$y = 0.871x^{***}$	0.99	11	3.8	$y = 0.685x^*$	0.63	12

$x, y$ 分别为箱式法和涡度相关法测定生态系统呼吸的日平均值  $x$  and  $y$  in the function were daily ecosystem respiration from eddy covariance and chamber measurements, respectively.

温差平均值增大为 3.4  $^{\circ}$  时, 涡度相关法较箱式法测定结果的偏低值反而降为 12.9%, 这里不排除在观测时存在采样误差, 同时也可能与统计样本数 ( $n$ ) 有关。因此, 箱内外温差对两种观测结果的差异是否有直接的影响以及影响程度有多大, 需要更多的实验和数据来检验。但是可以肯定地说, 在进行箱式法观测时, 如何控制观测时箱内外的温差, 以减小对箱内微气象环境的改变是一个非常重要的技术性问题。

### 3 结 论

1) 在保证涡度相关法和箱式法观测数据质量的条件下, 两种方法夜间通量实时观测的冬小麦-夏玉米复种农田和高寒矮嵩草甸生态系统呼吸速率均具有较好的一致性。箱式法白天的观测结果与涡度相关法估算的白天生态系统呼吸值也具有较好的一致性, 但前者普遍大于后者。

2) 涡度相关法与箱式法对生态系统呼吸日平均值测定结果的差异非常显著, 但其季节变化趋势比较一致。在生长季中, 两种方法对生态系统呼吸日平均值测定结果的偏差高于非生长季。

3) 箱式法可以弥补涡度相关法在夜间弱湍流交换情况下对碳通量的低估及白天碳通量组分不能直接区分等问题。但观测时箱内外温差以及对箱内气体均匀程度的控制是非常重要的技术性问题, 这些都有可能对箱式法的测定误差。

由于涡度相关法和箱式法的观测结果在评价生态系统碳收支中都存在不确定性, 所以在使用这两种观测方法进行碳通量观测时, 应该加强对其测定结果不确定性及误差来源的分析, 同时应对两种方法的测定结果进行比较研究, 以确保在使用这两种观测方法的结果进行碳收支评价时具有可比性和统一性。

致谢 感谢中国科学院禹城综合实验站和中国科学院海北

高寒草甸生态系统定位研究站的大力支持和帮助! 感谢日本环境省地球环境推进费 S1(青海草原的碳素收支研究)的部分支持!

### 参考文献

- [1] Houghton RA, Davidson EA, Woodwell GM. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, **12**: 25-34
- [2] Cox PM, Betts RA, Jones CD, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, **408**: 184-187
- [3] Davidson EA, Janssens IA, Luo YQ. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond  $Q_{10}$ . *Global Change Biology*, 2006, **12**: 154-164
- [4] Savage KE, Davidson EA. Interannual variation in soil respiration in two New England forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**: 337-350
- [5] Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, **404**: 861-865
- [6] Law BE, Ryan MG, Anthoni PM. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 169-182
- [7] Liang NS, 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **123**: 97-117
- [8] Griffis TJ, Black TA, Gaumont-Guay D, et al. Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **125**: 207-223
- [9] Janssens IA, Kowalski AS, Longdoz B, et al. Assessing forest soil  $CO_2$  efflux: An in situ comparison of four techniques. *Tree Physiology*, 2000, **20**: 23-32
- [10] Reth S, Göckede M, Falge E.  $CO_2$  efflux from agricultural soils in Eastern Germany: Comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, **80**: 105-120
- [11] Wohlfahrt G, Anfang C, Bahn M, et al. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modeling. *Agricultural and*



- Forest Meteorology*, 2005, **128**: 141-162
- [12] Yu GR, Fu YL, Sun XM, *et al* Recent progress and future directions of China FLUX. *Science in China (Series D)*, 2006, **49**(supp. ): 1-23
- [13] Wang M, Guan DX, Wang YS, *et al* Estimate of productivity in ecosystem of the broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains. *Science in China (Series D)*, 2006, **49**(supp. ID): 74-88
- [14] Wu JB, Guan DX, Wang M, *et al* Year-round soil and ecosystem respiration in a temperate broad-leaved Korean pine forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, **223**: 35-44
- [15] Hao Q-J (郝庆菊). Effect of land-use change on greenhouse gases emissions in freshwater marshes in the Sanjiang Plain. Ph.D. Thesis Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005 (in Chinese)
- [16] Qing Z, Yu Q, Xu SH, *et al* Water, heat fluxes and water use efficiency measurement and modeling above a farmland in the North China Plain. *Science in China (Series D)*, 2005, **48**(supp. ): 207-217
- [17] Zhao L (赵亮), Xu S-X (徐世晓), Li Y-N (李英年), *et al* Relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of *Kobresia humilis* meadows and *Potentilla fruticosa* meadows. *Acta Botanica Boreali-Orientalia Sinica* (西北植物学报), 2006, **26**(1): 133-142 (in Chinese)
- [18] Chen S-Y (陈述悦), Li J (李俊), Lu P-L (陆佩玲), *et al* Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(9): 1552-1560 (in Chinese)
- [19] Wilczak JM, Oncley SP, Stage SA. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, **99**: 127-150
- [20] Webb EK, Peaman GL, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, **106**: 85-100
- [21] Zhu ZL, Sun XM, Wen XF, *et al* Study on the processing method of nighttime CO<sub>2</sub> eddy covariance flux data in ChinaFLUX. *Science in China (Series D)*, 2006, **49**(supp. ): 36-46
- [22] Reichstein MS, Falge E, Baldocchi D, *et al* On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improve algorithm. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1424-1439
- [23] Goulden ML, Munger JW, Fan SM, *et al* Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, **2**: 169-182
- [24] Janssens A, Andrew S, Kowalski AS, *et al* Forest floor CO<sub>2</sub> fluxes estimated by eddy covariance and chamber based-model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **106**: 61-69
- [25] Dore S, Hymus GJ, Johnson DP, *et al* Cross validation of open-top chamber and eddy covariance measurements of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a Florida scrub-oak ecosystem. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 84-95
- [26] Dugas WA, Heuer ML, Mayeux HS. Carbon dioxide fluxes over Bermuda grass, native prairie and sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **93**: 121-139
- [27] Larionova AA, Rozanova LN, Samoilov TI. Dynamics of gas exchange in the profile of a gray forest soil. *Soviet Soil Science*, 1989, **3**: 104-110
- [28] Mielnick PC, Dugas WA. Soil CO<sub>2</sub> flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biogeochemistry*, 2000, **32**: 221-228
- [29] Lavigne MB, Ryan MG, Anderson DE. Comparing nocturnal eddy covariance measurements to estimates of ecosystem respiration made by scaling chamber measurements at six coniferous boreal sites. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 28977-28985
- [30] Mi N, Yu GR, Wang PX, *et al* A preliminary study for spatial representiveness of flux observation at China-FLUX sites. *Science in China (Series D)*, 2006, **49**(supp. ): 24-35
- [31] Fu Y-L (伏玉玲). Environmental controls on carbon budgets in typical grassland ecosystems on Chinese Grassland Transect. Ph.D. Thesis Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese)

作者简介 郑泽梅,女,1982年生,博士研究生.主要从事区域碳通量观测与尺度扩展研究,发表论文1篇. Email: zhengzm.05b@igsnr.ac.cn

责任编辑 杨弘