

松弛涡旋累积法获取甲烷湍流通量的实验研究

葛红星^{1,2,†} 卫茁睿³ 张宏升³ 康凌⁴

1. 南京电子技术研究所, 南京 210039; 2. 中国电子科技集团公司智能感知技术重点实验室, 南京 210039;
3. 北京大学物理学院大气与海洋科学系气候与海-气实验室, 北京 100871; 4. 环境模拟与污染控制国家重点
联合实验室, 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: ge_star@163.com

摘要 基于2015年11月至2016年11月华东地区农田下垫面大气湍流和大气环境观测实验资料, 采用松弛涡旋累积法(REA)获取农田下垫面甲烷(CH₄)湍流通量, 并与涡动相关法(EC)获取的甲烷通量进行对比验证。观测期内, REA法获取的温度、水汽、二氧化碳和甲烷湍流通量的经验系数分别为0.59, 0.59, 0.59和0.58。经验系数 b 的中位数随归一化采样阈值 H_{REA} 的增大而减小, $H_{\text{REA}}=0.8$ 时各物理量的 b 值离散性最小。以温度 T 作为代理变量, 用REA法获取的CH₄湍流通量与EC法的结果具有较好的一致性, 说明REA法适用于获取CH₄湍流通量。

关键词 松弛涡旋累积法; 甲烷; 湍流通量; 代理变量

Experimental Research of Methane Flux Measurement by the Relaxed Eddy Accumulation Method

GE Hongxing^{1,2,†}, WEI Zhuorui³, ZHANG Hongsheng³, KANG Ling⁴

1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039; 2. Key Laboratory of IntelliSense Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039; 3. Laboratory for Climate and Oceanic-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;
4. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: ge_star@163.com

Abstract Based on the data collected at the Atmospheric Turbulence and Atmospheric Environment Experimental Station in east China from November 2015 to November 2016, the methane flux over farmland was estimated using the relaxed eddy accumulation (REA) method. During the experiment, the empirical coefficients b of various scalars including temperature, water vapor, carbon dioxide and methane for the REA method were 0.59, 0.59, 0.59 and 0.58, respectively. The median of b decreased with the increase of the normalized sampling threshold H_{REA} . The minimum dispersion of b for each scalar was reached with $H_{\text{REA}}=0.8$. The methane flux obtained by the REA method with T as the proxy scalar was highly consistent with the flux obtained by the EC method, showing that the REA method was suitable for measuring methane flux.

Key words relaxed eddy accumulation method; methane; turbulent flux; proxy scalar

甲烷(CH₄)是大气中最重要的温室气体之一。虽然大气中的CH₄浓度远低于CO₂, 但其在百年尺度上的温室效应潜势比CO₂高21倍^[1-2], 对全球气候变化有重要影响。水稻田是主要的CH₄人为排放源之一, 与其他CH₄排放源相比, 水稻田的人类管理程度更高。因此, 可以通过多种手段降低水稻田

的CH₄排放, 具有较大的减排潜力^[3]。

CH₄湍流通量获取方法主要有静态箱法、涡动相关法(eddy covariance, EC)和松弛涡旋累积法(relaxed eddy accumulation, REA)等。静态箱法是早期广泛用于CH₄通量观测的方法^[4-5], 只能定时定点地进行采样, 时间和空间分辨率较低, 仅适用于对

单株植物或小范围土壤进行气体排放观测,难以满足长时间连续观测的需求^[6]。EC法弥补了静态箱法在时间和空间分辨率上的不足,其结果对被观测的区域有更好的代表性^[7],近年来用于水稻田^[8-10]、小麦田^[11]等农田下垫面的CH₄通量观测研究。由于涡动相关观测系统较为复杂,价格昂贵,目前采用EC法获取CH₄通量的覆盖范围十分有限。另外,由于大气中CH₄本底浓度较低,在非源区或非生长季,受快速响应分析仪精度限制,CH₄通量获取的精度仍然存在问题。

REA法基于条件采样,使用采样时段内平均浓度来计算通量,可以有效地降低仪器噪声的影响,提高信噪比,从而获得较为可信的通量数据^[12-13]。与EC法相比,REA法不需要快速响应仪器,计算湍流通量时也不需要进行复杂的仪器学修正,后期数据处理过程简单^[14],在获取CH₄通量方面有重要的应用价值。目前,REA法已广泛用于大气中各种物质通量的获取,如CO₂^[15-16]、CH₄^[17-19]、N₂O^[20]、氨^[21]、气溶胶^[22]、挥发性有机物^[23]和细颗粒物^[24]等。前人对REA法中经验系数 b 的研究集中在温度(T)、水汽(H₂O)和CO₂等方面,基于实测CH₄通量数据的REA法适用性研究较少,对适用于CH₄的经验系数 b 值及变化规律缺乏实验验证。

本文利用2015年11月至2016年11月华东地区农田下垫面大气湍流和大气环境观测实验资料,用条件采样方法,分析 T 、H₂O、CO₂和CH₄等物理量的REA法经验系数 b 及其变化规律。以温度 T 为代理变量,用REA法获取H₂O、CO₂和CH₄的湍流通量,并与EC法获取的湍流通量进行对比,验证REA法获取CH₄湍流通量的适用性。

1 数据获取与处理

1.1 观测站点

观测点位于江苏省盐城市大丰区刘庄镇境内,为一片平坦的小麦-水稻轮作的家庭农场,地理坐标为33°12'21.93"N, 120°16'37.70"E,距黄海海滨约50 km,海拔高度约为1 m。根据1984—2013年的气象记录,当地年降水量为1060±258 mm,年平均气温为15.1±0.61℃。观测平台为一座高10 m的气象塔,位置如图1中红圆点所示。村庄分布在农田边缘,多为低矮平房,无高大建筑物遮挡,最近的村庄离气象塔约300 m。图1给出典型的源区分布,其中等值线从里往外分别代表30%、50%、70%和

90%的源区。

1.2 数据获取

本研究观测时段为2015年11月至2016年11月,涉及一套安装在气象塔伸出的支臂上的涡动相关湍流观测系统,支臂远端距塔体约1.5 m。

如图2所示,涡动相关观测系统架设在6.3 m高度(超声探头高度)处,包括一台一体式超声风温仪和开路式H₂O/CO₂红外分析仪(IRGASON, Campbell Scientific, Inc., 美国)和一台开路式CH₄分析仪(LI-7700, LI-COR Biosciences, Inc., 美国)。超声风温仪探头指向北偏东30°方向。涡动相关系统的采样频率为10 Hz,湍流观测数据由一台数据采集器(CR3000, Campbell Scientific, Inc., 美国)进行采集和存储。

1.3 数据处理

本研究使用EddyPro (Advanced mode, Version 6.0.0, LI-COR Bioscience Inc., 美国)软件处理湍流数据,并计算湍流通量以及特征统计量,数据平均时段为30 min,数据处理过程中进行野点剔除^[25]、二次坐标旋转^[26]、Webb-Pearman-Leuning (WPL)修正^[27]和频率损失修正^[28]等。除输出湍流通量、方差和协方差等统计量外,通过EddyPro软件中Advanced模式的高级设置,还输出经过上述修正后的10 Hz高频数据,用于模拟条件采样。EddyPro软件同时对湍流数据进行质量控制和评价,包括湍流平稳性、通量代表性和异常值比例等,并以数字0、1和2的形式给出各物理量湍流通量的质量码(quality flag)。其中,0代表湍流通量数据质量高;1代表湍流通量数据质量中等,可用于一般的通量分析;2代表湍流通量数据质量差,在本研究中被剔除。

除EddyPro软件提供的质量控制手段外,LI-7700分析仪还给出CH₄通量获取质量的诊断值,即接收信号强度指示(received signal strength indicator, RSSI)。RSSI代表LI-7700光路中接收端获得的信号强度,受仪器中上下镜面的洁净程度影响较大。当仪器镜面有灰尘等杂物时,信号在镜面间的传输会受到较大的影响,从而导致观测结果不准确。测试结果表明,当RSSI<10%时,CH₄通量观测值出现异常离散,数据可信度低。为了保证可信度,本文剔除RSSI<10%的CH₄通量数据。

经过数据处理和质量控制后,得到30分钟平均的 T 、H₂O、CO₂以及CH₄通量样本数分别为9960、9552、11920和4335组。由于CH₄观测仪器镜面易



图 1 观测区域卫星图像(来自谷歌地图)

Fig. 1 Satellite image of the study area (from Google Earth)



图 2 涡动相关的观测系统

Fig. 2 Eddy covariance observation system

受灰尘影响, RSSI<10%的 CH₄ 通量样本数量较多, 在质量控制中被剔除, 造成 CH₄ 通量样本数量明显低于其他标量。

2 理论与计算方法

REA 法是一种基于条件采样的气体通量获取方法, 是涡旋累积法(eddy accumulation, EA)的采样条件放宽后的简化方法。REA 法基于对垂直风速 w 的观测进行条件采样, 对于 $w>0$ 和 $w<0$ 两种情况, 分别将气体采入不同的采样罐中, 从而获取一定时段内待测气体的平均浓度 $\overline{C^+}$ 和 $\overline{C^-}$ 。待测气体的通量^[29]可表示为

$$F_C = b\sigma_w(\overline{C^+} - \overline{C^-}), \quad (1)$$

其中, F_C 为待测气体通量, σ_w 为垂直风速 w 的标准差, b 为经验系数。

经验系数 b 的取值对 REA 法获取气体通量的准确性有重要影响, 因此前人对此做了较多的理论推导和实验研究。从理论上讲, 当垂直风速与待测气体浓度之间的联合概率密度分布满足理想的二维正态分布关系时, $b = \sqrt{2\pi}/4 \approx 0.627$ ^[15,30-31]。在实验研究中, 前人将 EC 法或其他方法获取的湍流通量 F_{EC} 作为参考, 通过式(1)的变体来确定 b 值:

$$b = \frac{F_{EC}}{\sigma_w \cdot (\overline{C^+} - \overline{C^-})}. \quad (2)$$

一些研究使用实际的条件采样仪器来获取式(2)中待测气体浓度差 $(\overline{C^+} - \overline{C^-})$ ^[15-16]。后来更多的研究中, 在没有进行实际条件采样的情况下, 利用垂直风速 w 和气体浓度 C 的高频观测数据来模拟条件采样, 获取气体浓度差^[18,32-33]。本文没有进行实际的条件采样, 因此也采取用高频观测数据模拟条件采样的方法。

某些情况下, 条件采样获得的气体平均浓度差很小, 甚至小于气体分析仪的精度, 容易造成较大的气体通量误差。在条件采样过程中引入一定的采样阈值 w_d , 可以有效地增大获取的平均浓度差, 提高通量获取精度^[34-35]。当 $w>w_d$ 和 $w<-w_d$ 时, 分别进行向上和向下的采样; 当 $|w|\leq w_d$ 时, 则不进行采样操作。为使采样阈值在不同平均时段间具有可比性, 通常引入归一化采样阈值, 定义为

$$H_{REA} = w_d / \sigma_w. \quad (3)$$

从理论上讲, H_{REA} 越大, 条件采样后的气体浓度差 $(\overline{C^+} - \overline{C^-})$ 也越大, 浓度差的测量就越准确。但是, 如果 H_{REA} 取值过大, 在采样过程中被忽略的低

风速样本过多, 条件采样对实际情况的代表性就会降低, 导致 REA 法获取的通量出现较大的误差。因此, 选择合适的归一化采样阈值 H_{REA} 尤为重要。

在一些使用 REA 法获取气体通量的研究中, 直接使用前人在类似下垫面给出的 b 值来计算待测气体通量。由于不同观测现场条件有差异, 不同地区和下垫面适用的 b 值可能不同, 使用经验值可能导致 REA 法获取的通量存在系统性误差。基于 REA 法中物理量之间的相似性, 可采用“代理变量法”获取经验系数 b 。通常以高频观测较成熟的 T , H_2O 和 CO_2 等作为代理变量, 将代理变量的 EC 通量和条件采样浓度差 $(\overline{C^+} - \overline{C^-})$ 带入式(2), 计算适用于当地的经验系数 b 。最后, 将代理变量的 b 值和待测气体的条件采样浓度差 $(\overline{C^+} - \overline{C^-})$ 带入式(1), 计算待测气体通量。

3 结果与讨论

3.1 经验系数 b 值及季节变化

根据式(2), 通过模拟条件采样和 EC 法获取的气体通量, 分别计算 T , H_2O , CO_2 和 CH_4 的经验系数 b , 并分析 b 值的离散性和季节变化规律。

图 3 中, 箱体中间实线代表中位数; 上下两端分别代表第三四分位点 Q_3 (75%) 和第一四分位点 Q_1 (25%), Q_3 与 Q_1 之间的差值 $\text{IQR} = Q_3 - Q_1$ (即箱体高度) 定义为四分位距, 可以反映数值分布的离散性,

其值越大, 则数据离散性越强; 上下两端的横实线为数据的上下限, 分别定义为上限 $\text{MAX} = Q_3 + 1.5 \text{IQR}$, 下限 $\text{MIN} = Q_1 - 1.5 \text{IQR}$, 在数据满足标准的正态分布时, 上下限之间覆盖约 99.3% 的数据, 上下限以外的离群点未在图 3 中体现。IQR 和上下限范围可在一定程度上体现 b 值的分布情况。

T , H_2O 和 CO_2 经验系数 b 值的 IQR 和上下限范围均较小, 除个别月份外, IQR 不超过 0.1。图 3 中, T 的 b 值在 8 月较离散, 可能与水稻田持续淹水造成的感热通量降低有关。当感热通量较小时, 利用式(2)计算 b 值时出现小量相除的情况, 造成 b 值的离散性增大。 CH_4 的 b 值在各分组中的 IQR 和上下限范围均较大, 离散情况更严重, 可能与小麦生长期内 CH_4 通量低有关。不同物理量的 b 值中位数相差不大(集中在 0.58~0.6 之间), 也没有出现明显的季节变化, 与 Sakabe 等^[36]的研究结果基本上一致。

取采样阈值为 0 时, 本研究观测期内 T , H_2O , CO_2 和 CH_4 的经验系数 b 的中位数分别为 0.59, 0.59, 0.59 和 0.58。表 1 对比本研究获取的 b 值与前人研究结果, 可见前人通过实验获取的 b 值在 0.51~0.61 之间变动, 多数集中在 0.56~0.6 之间, 小于理想情况下的 0.627, 本文结果与之一致。

3.2 经验系数 b 随归一化采样阈值 H_{REA} 的变化

在 REA 法采样过程中引入采样阈值, 可以提高通量的获取精度, 同时降低对采样阈值的消耗, 确

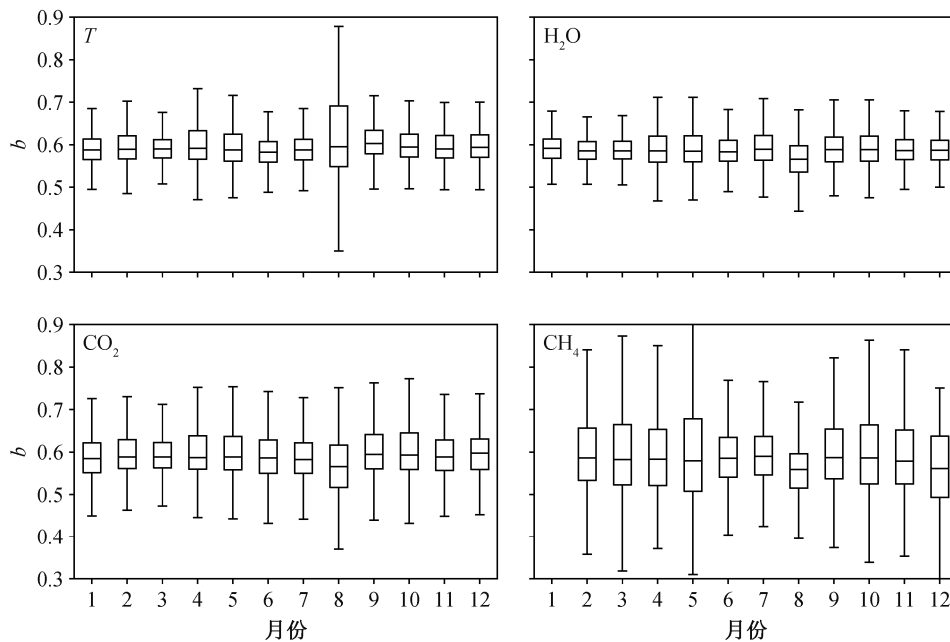


图 3 经验系数的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of the empirical coefficients

表 1 前人给出的不同下垫面下 REA 法经验系数 b 的取值
Table 1 Empirical coefficients b under different underlying surfaces by previous studies

下垫面	研究对象	b	文献
麦田	T, H_2O	0.60	[29]
大豆田	H_2O, CO_2	0.56	[15]
大豆田	CO_2	0.57	[16]
裸地	T, H_2O	0.57	[37]
森林	T, H_2O	0.51~0.61	[38]
草地	H_2O	0.59	[39]
玉米田和草地	T, H_2O, CO_2	0.56~0.58	[30]
森林	T	0.59	[18]
森林	T	0.53	[19]
森林	T	0.57	[14]
<hr/>			
水稻田和小麦田	T, H_2O, CO_2	0.59	本文
	CH_4	0.58	

保实验顺利进行。但是, 过大的采样阈值也会造成获取通量的误差。因此, 在 REA 法的实际应用中, 选择合适的采样阈值很重要。

为了用实测数据探究 CH_4 的 b 值与 H_{REA} 值的关系, 本文对观测数据加入 H_{REA} 值后进行模拟条件采样, 其中 H_{REA} 的测试范围为 0~2, 步长为 0.1, 共 21 组。图 4 显示, T, H_2O, CO_2 和 CH_4 的 b 值中位数随 H_{REA} 呈单调下降趋势, 随 H_{REA} 的增大, b 值的离

散性(IQR)呈现先减弱后增强的趋势。引入采样阈值后, 浓度差 ($\overline{C^+} - \overline{C^-}$) 增大, 需要降低 b 值进行补偿, 因此各物理量 b 值的中位数均随 H_{REA} 的增大而减小。但是, 当 H_{REA} 取值过大时, 采样过程中被忽略的低风速样本过多, 条件采样对实际情况的代表性就会降低, 反而增大气体通量的误差, 因此随着 H_{REA} 增大, b 值的 IQR 出现先减小后增大的趋势。 H_{REA} 在 0.6~0.9 范围内时, 各物理量的 IQR 均较小, 对应的 b 值离散性也较小。

从图 5 中可以更清楚地看到, 各物理量 b 值的 IQR 均随 H_{REA} 增加而先下降后上升, 且都在 $H_{REA}=0.8$ 时达到最小值, 与 Tsai 等^[33]以 b 值的标准差 σ_b 作为参考标准得到的结果一致。当 $H_{REA}=0.8$ 时, 既提高了条件采样的气体浓度差 ($\overline{C^+} - \overline{C^-}$), 又没有因忽略过多低风速样本而降低条件采样的代表性, 因此可在 REA 法获取气体通量的过程中加以应用。 T 和 H_2O 的 IQR 相对较小, CO_2 次之, CH_4 最大。因此, T 和 H_2O 的 b 值离散性较小, 比较适合作为 REA 法的代理变量。

3.3 CH_4 湍流通量获取与验证

在使用代理变量法获取 b 值的研究中, 一些研究者认为不同时段 b 值有差异, 因此应当直接用每个平均时段中代理变量的 b 值来计算对应时段的

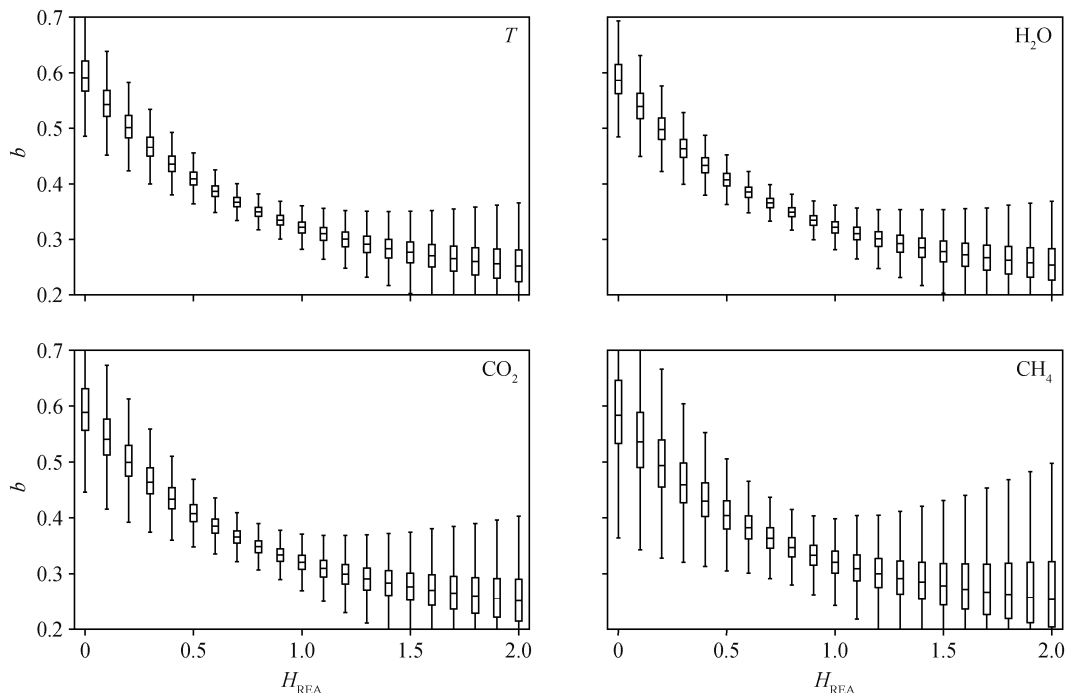


图 4 经验系数随归一化采样阈值 H_{REA} 的变化

Fig. 4 Relationship between the empirical coefficients and the normalized sampling threshold H_{REA}

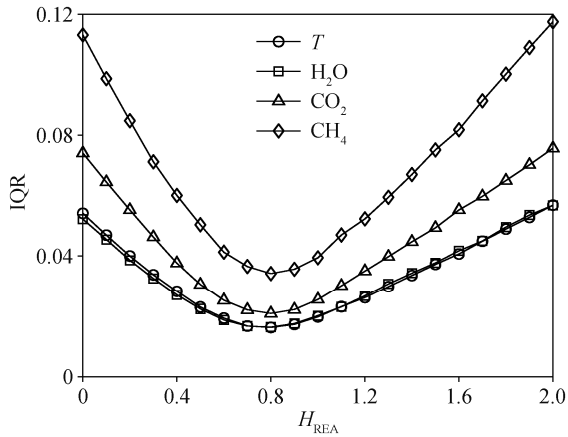


图5 经验系数 b 的 IQR 随归一化采样阈值 H_{REA} 的变化
Fig. 5 Relationship between the IQR of b and the normalized sampling threshold H_{REA}

待测气体通量^[35,38,40], 本文将这种方法称为“同步 b 值”; 另外一些研究者则认为 b 值随时间的变化不明显, 使用同步 b 值反而会引入 b 值离散造成的误差, 因此建议取代理变量 b 值时间序列的均值或中位数, 或对代理变量的 F_{EC} 和浓度差 ($\overline{C^+} - \overline{C^-}$) 进行线性回归, 用回归方程的斜率代表整个观测时段的 b 值^[15,18-19], 本文将这种方法称为“固定 b 值”; 基于 b 值与稳定度参数 z/L (z 为测量高度, L 为莫宁-奥布霍夫长度) 的关系, 还有一些研究者认为在使用代理变量法时, 需考虑大气层结状况对 b 值的影响, 用 z/L 对固定 b 值进行修正, 本文将这种方法称为“修正 b 值”。

Ammann 等^[32]将修正 b 值以及同步 b 值计算的 REA 通量与 EC 通量进行对比, 发现用修正 b 值计算获得 CO_2 的 REA 通量与 EC 通量符合度较高 ($R^2=0.98$), 明显优于用同步 b 值计算的结果 ($R^2=0.79$), 因此认为使用修正 b 值可有效地提高 REA 法获取通量的精度。由于使用经验公式给出的修正 b 值本质上是对固定 b 值进行稳定度补偿, 其离散性明显小于同步 b 值, 因此无法判断通量获取结果的改善是加入稳定度修正的效果, 还是离散性减小的效果。要确定使用修正 b 值的效果是否优于使用固定 b 值, 需进一步的对比研究。本次实验持续时间超过 1 年, 对物理量 T , H_2O , CO_2 和 CH_4 进行了长时间的连续观测, z/L 主要分布在 $-1\sim 1$ 之间。

选取 T 为代理变量, 分别使用 T 的同步 b 值、固定 b 值和修正 b 值, 用 REA 法计算 CH_4 的湍流通量, 并与 EC 法获取的湍流通量进行对比。采用同样的方法, 对 H_2O 和 CO_2 的湍流通量进行计算和对

比。REA 和 EC 两种方法获取的通量用下式进行线性拟合:

$$F_{\text{REA}} = kF_{\text{EC}} + d, \quad (4)$$

其中, F_{REA} 为 REA 法获取的通量, F_{EC} 为 EC 法获取的通量, k 为斜率, d 为截距。拟合结果见表 2。

图 6(a) 显示, 使用同步 b 值计算的 CH_4 的 REA 通量与 EC 通量之间有较好的一致性 ($R^2=0.88$), 但 EC 通量在 0 值附近出现一定程度的离散, 可能与同步 b 值获取过程中出现的误差有关。一方面, 在 CH_4 通量的量级较小时, EC 通量的相对误差可能较大; 另一方面, 使用式 (2) 计算 b 值时可能出现两个小量相除的情况, 从而造成较大的误差^[34]。图 6(b) 显示, 与同步 b 值相比, 使用固定 b 值计算的 CH_4 的 REA 通量与 EC 通量之间的符合程度较高, 0 值附近未出现明显离散, 拟合得到的相关系数 ($R^2=0.95$) 也较大。对比图 6(b) 与 (c) 可见, 使用固定 b 值和修正 b 值获取的 REA 通量与 EC 通量之间的符合度 (R^2 分别为 0.95 和 0.97) 均优于使用同步 b 值, 但两者之间无明显差异。

如图 7(a) 所示, 使用同步 b 值计算得到的 H_2O 的 REA 通量与 EC 通量有一定程度的一致性 ($R^2=0.76$), 但在 0 值附近出现明显的离散。对比图 7(b) 与 (c) 可见, 使用固定 b 值和修正 b 值获取的 REA 通量与 EC 通量之间的符合度 (R^2 分别为 0.97 和 0.97) 均优于同步 b 值, 但两者无明显差异。

如图 8(a) 所示, 使用同步 b 值计算的 CO_2 的 REA 通量与 EC 通量之间有较好的一致性 ($R^2=0.88$), 但在 0 值附近也出现一定程度的离散。对比图 8(b) 与 (c) 可见, 使用固定 b 值和修正 b 值获取的 REA 通量与 EC 通量之间的符合度 (R^2 分别为 0.95 和 0.94)

表 2 拟合结果

Table 2 Fitting results

物理量	系数	同步 b 值	固定 b 值	修正 b 值
H_2O	k	1.07	1.04	1.03
	d	-0.11	-0.03	-0.03
	R^2	0.76	0.97	0.97
CO_2	k	1.02	1.05	1.04
	d	0.00	0.00	0.00
	R^2	0.88	0.95	0.94
CH_4	k	0.98	1.03	1.01
	d	0.00	0.00	0.00
	R^2	0.88	0.95	0.97

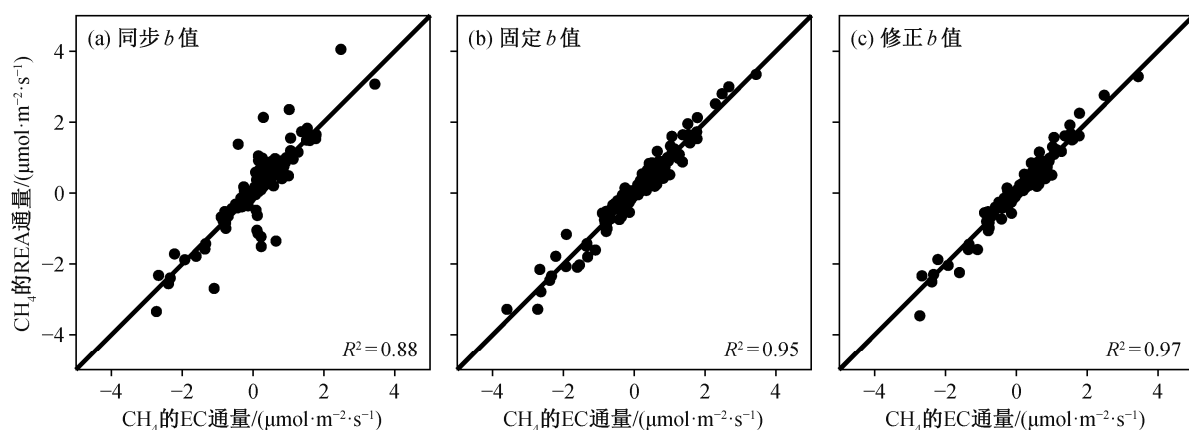


图 6 使用代理变量 T 计算得到的 CH₄ 的 REA 通量与 EC 通量的关系
 Fig. 6 Relationships of CH₄ flux obtained by REA method with proxy scalar T and EC method

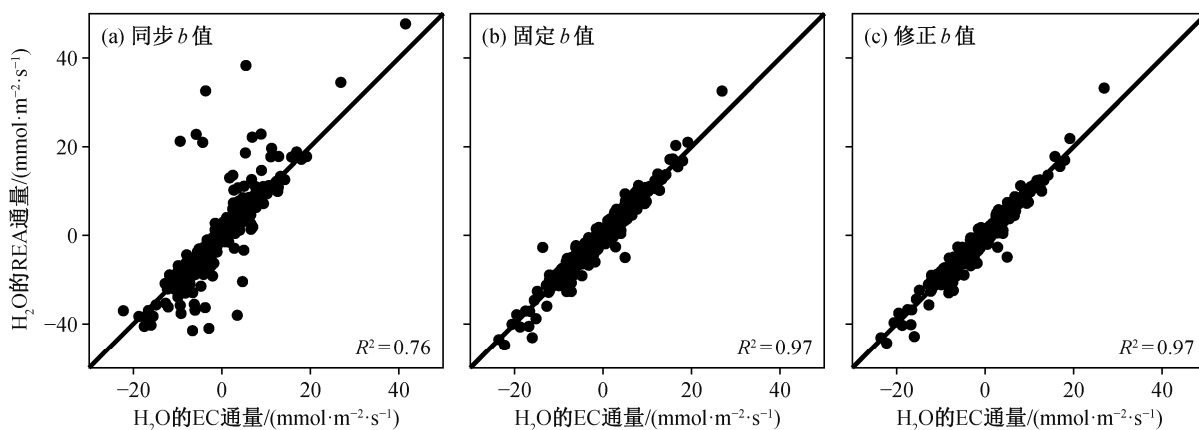


图 7 使用代理变量 T 计算得到的 H₂O 的 REA 通量与 EC 通量的关系
 Fig. 7 Relationships of H₂O flux obtained by REA method with proxy scalar T and EC method

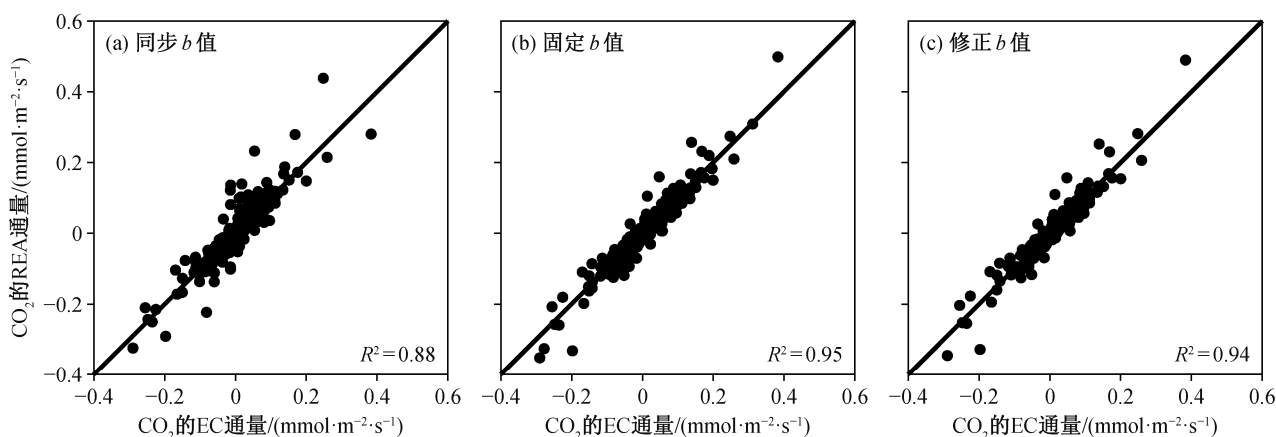


图 8 使用代理变量 T 计算得到的 CO₂ 的 REA 通量与 EC 通量的关系
 Fig. 8 Relationships of CO₂ flux obtained by REA method with proxy scalar T and EC method

均较高,但两者之间无明显差异。

综上所述,使用固定 b 值和修正 b 值计算 CH₄ 通量可避免引入同步 b 值获取过程中的误差,通量

获取的准确度也明显高于使用同步 b 值,但固定 b 值与同步 b 值之间的差异不大。H₂O 和 CO₂ 的结果与 CH₄ 基本上一致。可见在 30 分钟尺度,同步 b 值

的离散造成的误差对通量获取结果的影响较大,而大气层结状态对通量获取结果的影响较小。因此,在使用 REA 法获取物质通量的过程中,本文推荐使用固定 b 值或修正 b 值代替同步 b 值来计算 REA 通量。其中,固定 b 值的获取过程比较简单,在大气层结状况变化不大的情况下是更好的选择。

4 结论

本文利用 2015 年 11 月至 2016 年 11 月华东地区农田下垫面大气湍流和大气环境观测实验资料,采用 REA 法,以温度(T)为代理变量,获取农田下垫面甲烷湍流通量,并与 EC 法获取的甲烷通量进行对比,得到如下结论。

1) 观测期内, T , H_2O , CO_2 和 CH_4 的经验系数 b 的中位数分别为 0.59, 0.59, 0.59 和 0.58。各物理量的 b 值相差不大,也没有出现明显的季节变化。

2) 各物理量的 b 值中位数随归一化采样阈值 H_{REA} 的增大而减小, b 值的离散性(IQR)随 H_{REA} 先减后增。当 H_{REA} 值在 0.6~0.9 范围内时,各物理量的 IQR 较小,对应的 b 值离散性也较小。当 $H_{REA}=0.8$ 时,各物理量 b 值的离散性均达到最小值。

3) 以 T 为代理变量获取的 CH_4 通量与 EC 法获取的 CH_4 , H_2O 和 CO_2 通量有较高的一致性,表明用 REA 法获取 CH_4 通量具有较大的可行性。其中,使用固定 b 值和修正 b 值计算 REA 通量的准确度明显高于使用同步 b 值,但固定 b 值与同步 b 值两者之间的差异不大。考虑到固定 b 值的获取过程简单,在 REA 法中使用代理变量的固定 b 值来计算 CH_4 通量是更好的选择。

参考文献

- [1] Bridges E M, Batjes N H. Soil gaseous emissions and global climatic. *Geography*, 1996, 81(2): 155–165
- [2] Lelieveld J. Climate change: a nasty surprise in the greenhouse. *Nature*, 2006, 443: 405–406
- [3] Yagi K, Tsuruta H, Minami K. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1): 213–220
- [4] 王跃思, 纪宝明, 王艳芬, 等. 半干旱草原地—温室气体交换速率测定. *环境科学*, 2000, 21(3): 6–10
- [5] Yan X, Cai Z, Ohara T, et al. Methane emission from rice fields in mainland China: amount and seasonal and spatial distribution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D16): doi: 10.1029/2002JD003182
- [6] Singh J S, Singh S, Raghubanshi A S, et al. Effect of soil nitrogen, carbon and moisture on methane uptake by dry tropical forest soils. *Plant Soil*, 1997, 196: 115–121
- [7] Clement R J, Verma S B, Verry E S. Relating chamber measurements to eddy correlation measurements of methane flux. *J Geophys Res*, 1995, 100: 21047–21056
- [8] Alberto M C R, Wassmann R, Buresh R J, et al. Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. *Field Crops Research*, 2014, 160: 12–21
- [9] Ge H X, Zhang H S, Zhang H, et al. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 228–238
- [10] Kim Y, Talucder M S A, Kang M, et al. Interannual variations in methane emission from an irrigated rice paddy caused by rainfalls during the aeration period. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 67–75
- [11] 葛红星, 张宏升, 罗帆, 等. 华北地区冬小麦田水热、二氧化碳和甲烷湍流输送特征的实验研究. *地球物理学报*, 2016, 59(4): 1235–1248
- [12] Bowling D R, Delany A C, Turnipseed A A, et al. Modification of the relaxed eddy accumulation technique to maximize measured scalar mixing ratio differences in updrafts and downdrafts. *J Geophys Res*, 1999, 104: 9121–9133
- [13] Ruppert J, Thomas C, Foken T. Scalar similarity for relaxed eddy accumulation methods. *Boundary-Layer Meteorol*, 2006, 20: 39–63
- [14] Ueyama M, Takai Y, Takahashi Y, et al. High-precision measurements of the methane flux over a larch forest based on a hyperbolic relaxed eddy accumulation method using a laser spectrometer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178: 183–193
- [15] Baker J M, Norman J M, Bland W L. Field-scale application of flux measurement by conditional sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 62(1): 31–52
- [16] Pattey E, Desjardins R L, Rochette P. Accuracy of the relaxed eddy-accumulation technique, evaluated using CO_2 flux measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, 66(4): 341–355

- [17] Beverland I J, Moncrieff J B, Oneill D H, et al. Measurement of methane and carbon dioxide fluxes from peatland ecosystems by the conditional-sampling technique. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, 122: 819–838
- [18] Sakabe A, Hamotani K, Kosugi Y, et al. Measurement of methane flux over an evergreen coniferous forest canopy using a relaxed eddy accumulation system with tuneable diode laser spectroscopy detection. *Theoretical and applied climatology*, 2012, 109(1/2): 39–49
- [19] Ueyama M, Hamotani K, Nishimura W, et al. Continuous measurement of methane flux over a larch forest using a relaxed eddy accumulation method. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 109(3/4): 461–472
- [20] Denmead O T. Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. *Plant and Soil*, 2008, 309(1/2): 5–24
- [21] Nemitz E, Flynn M, Williams P I, et al. A relaxed eddy accumulation system for the automated measurement of atmospheric ammonia fluxes. *Water Air and Soil Pollution: Focus*, 2001, 1(5): 189–202
- [22] Held A, Patton E, Rizzo L, et al. Relaxed eddy accumulation simulations of aerosol number fluxes and potential proxy scalars. *Boundary-layer meteorology*, 2008, 129(3): 451–468
- [23] 高祥, 张宏升, 蔡旭晖, 等. 珠三角地区荔枝林挥发性有机化合物通量的观测研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(5): 916–922
- [24] 卫茁睿, 张宏昇, 葛红星, 等. 松弛涡旋累积法获取细颗粒物湍流通量的实验研究. *环境科学学报*, 2020, 40(7): 2400–2407
- [25] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 512–526
- [26] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127–150
- [27] Webb E K, Pearman G I, 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
- [28] Moncrieff J, Clement R, Finnigan J, et al. Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series // *Handbook of micrometeorology*. Dordrecht: Springer, 2004: 7–31
- [29] Businger J A, Oncley S P. Flux measurement with conditional sampling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7(2): 349–352
- [30] Katul G, Finkelstein P L, Clarke J F, et al. An investigation of the conditional sampling method used to estimate fluxes of active, reactive, and passive scalars. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35(10): 1835–1845
- [31] Wyngaard J C, Moeng C H. Parameterizing turbulent diffusion through the joint probability density. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 60(1/2): 1–13
- [32] Ammann C, Meixner F. Stability dependence of the relaxed eddy accumulation coefficient for various scalar quantities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D8): ACL7-1–ACL7-9
- [33] Tsai J L, Tsuang B J, Kuo P H, et al. Evaluation of the relaxed eddy accumulation coefficient at various wetland ecosystems. *Atmospheric Environment*, 2012, 60: 336–347
- [34] Bowling D R, Turnipseed A A, Delany A C, et al. The use of relaxed eddy accumulation to measure biosphere-atmosphere exchange of isoprene and other biological trace gases. *Oecologia*, 1998, 116(3): 306–315
- [35] Myles L T, Meyers T P, Robinson L. Relaxed eddy accumulation measurements of ammonia, nitric acid, sulfur dioxide and particulate sulfate dry deposition near Tampa, FL, USA. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(3): 034004
- [36] Sakabe A, Ueyama M, Kosugi Y, et al. Is the empirical coefficient b for the relaxed eddy accumulation method constant?. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2014, 71(1): 79–94
- [37] Katul G, Albertson J, Chu C R, et al. Sensible and latent heat flux predictions using conditional sampling methods. *Water Resources Research*, 1994, 30(11): 3053–3059
- [38] Gao W. The vertical change of coefficient b , used in the relaxed eddy accumulation method for flux measurement above and within a forest canopy. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(17): 2339–2347
- [39] Wesely M L, Hart R L. On eddy accumulation with limited conditional sampling to measure air-surface exchange [R]. Lemont: Argonne National Lab, 1994
- [40] Oncley S P, Delany A C, Horst T W, et al. Verification of flux measurement using relaxed eddy accumulation. *Atmospheric Environment: Part A. General Topics*, 1993, 27(15): 2417–2426