中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 5 期: 989 ~ 1001
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

数据填补及能量闭合对半干旱区生态系统年净碳交换的影响

杜群[①②], 刘辉志[①*], 冯健武[①], 王雷[①]

① 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;
② 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049
* 联系人, E-mail: huizhil@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2013-02-21; 接受日期: 2013-09-24; 网络版发表日期: 2014-04-16
国家自然科学基金面上项目(批准号: 41275023)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(批准号: 41021004)和中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA05110102)资助

摘要 基于半干旱区 2 种不同下垫面(草地和旱作农田)2005 和 2008 年涡动相关法取得的通量资料, 分析了数据填补、能量收支闭合率以及摩擦风速(u^*)阈值等对生态系统年净碳交换的影响. 通过加入 4 种不同长度的人工空缺(空缺长度从 0.5 h~12 d), 比较了平均日变化法(MDV)、边缘分布抽样法(MDS)和非线性回归法等 6 种填补方法的填补效果. 结果表明, MDS 的整体表现最好, 特别是对长空缺的填补效果优于其他方法, 估算的年 NEE 偏差在 5 g C m^{-2} a^{-1} 以内. 非线性回归法估算的夜间 NEE 具有较大的正偏差, 表明非线性回归法估算的夜间生态系统呼吸偏高. 4 种非线性回归法估算的年 NEE 偏差在 8.0~30.8 g C m^{-2} a^{-1}. 由于在半干旱区土壤含水量是生态系统碳交换的重要限制因子, 非线性回归法中综合考虑土壤温度和土壤含水量影响的 Non_linear3 和 Non_linear4 表现较好. MDV 对白天 NEE 空缺的填补优于夜间, 估算的年 NEE 偏差在−2.6~−13.4 g C m^{-2} a^{-1}. 总体上, 数据填补的精确度受下垫面类型、空缺长度以及空缺出现时间(白天、晚上)影响. 2 个观测站点的能量收支闭合率在 80%左右. 能量收支闭合率受湍流强度影响显著; 当夜间摩擦风速较低时, 湍流混合不充分, 能量收支闭合率也较低. 生态系统在某个风向的累积通量印痕较大时, 有效能量和湍流通量源区的不匹配造成这一风向上的能量收支闭合率也较低. 通过假设能量收支不闭合全部由感热通量和潜热通量的低估引起, 评估了能量闭合订正对生态系统 CO_2 通量的影响. 结果表明经过订正后的草地、农田的年净碳交换量平均增加近 10 g C m^{-2} a^{-1}. 此外当 u^*阈值从 0.1 增加到 0.2 m s^{-1}, 年净碳交换平均增加 37.5 g C m^{-2} a^{-1}, 这表明 u^*阈值的设定对生态系统的年净碳交换影响较大.

关键词
半干旱区
碳交换
涡动相关法
数据填补
能量收支闭合率

生态系统净碳交换(net ecosystem exchange, NEE)是全球碳循环的重要组成部分(Hui 等, 2004). 20 世纪 90 年代起, 涡动相关法开始广泛应用于全球陆地生态系统植被与大气间的 CO_2、水汽及能量通量的直接

中文引用格式: 杜群, 刘辉志, 冯健武, 等. 2014. 数据填补及能量闭合对半干旱区生态系统年净碳交换的影响. 中国科学: 地球科学, 44: 989–1001
英文引用格式: Du Q, Liu H Z, Feng J W, et al. 2014. Effects of different gap filling methods and land surface energy balance closure on annual net ecosystem exchange in a semiarid area of China. Science China: Earth Sciences, 57: 1340−1351, doi: 10.1007/s11430-013-4756-5

观测(Wofsy 等, 1993; Baldocchi, 2008). 目前涡动相关法已成为生态系统大气间 CO_2 和水汽、热通量观测的标准方法之一, 所测定的数据用于验证各种陆面模型模拟结果或估算生态系统的碳年交换总量(Baldocchi, 1996).

由于地球表面地形起伏等影响, 有些通量观测站点无法满足近地面常通量层条件(Foken 等, 2006), 在非均匀下垫面条件下测定的涡动通量存在多种系统偏差(Goulden 等, 1996a), 影响观测资料的精确度. 由于仪器的物理限制, 所有涡动相关系统在足够高或低的频率处都将衰减真实的湍流信号(Moore, 1986; Massman, 2000), 低频余谱能量损失是长期通量和能量通量观测中的重要误差来源之一(Sakai 等, 2001). Massman等(2002)分析了涡动相关法的误差来源及其订正方法. 湍流原始资料一般经过坐标轴旋转、频率衰减订正以及密度脉动修正(WPL)(Webb 等, 1980)等处理后, 这些问题大部分可以解决(Papale 等, 2006). 目前已有一些在网上公开的湍流资料处理软件(Edire, Eddypro 和 EddyArt)可以用来对原始快响应资料进行后处理. 处理后的 CO_2 通量资料还需进行包括野点去除、摩擦风速(u^*)订正以及数据填补等质量控制步骤. 而质量控制标准在不同的观测站点并非一样, 因此有必要对质量控制引起的 CO_2 通量的不确定性进行评估.

由于仪器故障及维护, 恶劣天气以及数据的质量控制等因素, 往往会造成观测资料的缺失, 有时缺失数据能占到年度总数据的 30%~40%(Falge 等, 2001). 为研究生态系统长期的碳交换和模式模型的验证需要, 通常需要对缺失数据进行填补. 目前常用的数据填补方法有平均日变化法、查表法、非线性回归法、多重填补法(multiple imputation)以及神经网络法(neural networks)等(Ooba 等, 2006). Moffat 等(2007)利用欧洲森林观测站的通量资料分析了 15 种填补方法的不确定性, 指出非线性回归法、查表法、和边缘分布抽样法(marginal distribution sampling)等填补效果较好. 刘敏等(2010)分析了两种非线性回归法对 Chinaflux 中 4 个站点的填补效果. 但这些结果或者结论并不能够完全推广到其他站点.

能量收支闭合常作为通量观测数据质量评估的衡量标准之一(Wilson 等, 2002). 不同站点的研究表明, 涡动相关法测得的能量收支可能被低估 10%~30%(Twine 等, 2000; Foken 等, 2006). 需要注意的是即使能量收支不闭合也不代表 CO_2 通量观测不可靠(Baldocchi, 2008). 造成能量收支不闭合的原因很多, 其中涡动相关法测得的感热通量(H)和潜热通量(LE)偏低可能是造成系统不闭合的原因之一(Kidston 等, 2010). 目前评估能量收支不闭合对 CO_2 通量影响的方法通常是在进行土壤和植被热储存修正等后, 假设不闭合全部由 H 和 LE 的低估引起, 进而按照波文比增加 H 和 LE 以达到强迫收支平衡(Twine 等, 2000). 尽管这个方法有一定争议性, 但讨论能量闭合对年 NEE 的影响还是有一定意义的.

此外在夜间大气层结稳定的情况下, 由于湍流发展不充分及地形起伏造成冷泄流发生等可能原因(Massman 和 Lee, 2002), 更易造成 CO_2 通量被低估(Black 等, 1996; Lindroth 等, 1998). 通常, 采用 u^*阈值来剔除夜间湍流混合不充分时的夜间 CO_2 通量观测值. u^*阈值范围一般取在 0.1~0.3 m s^{-1}(Baldocchi, 2008); 但其受地形和冠层高度影响(Aubinet 等, 2000), 且可能因站点不同; 由之造成的年 CO_2 通量估算的不确定性也需进一步明确.

目前国内对于半干旱区年 NEE 不确定性的研究开展得较少. 本文利用半干旱区农田和草地 2 个不同下垫面类型的通量观测资料, 通过加入人工空缺, 比较 6 种不同填补方法对 CO_2 通量资料空缺的填补效果; 分析不同数据填补方法、不同 u^*阈值对年 NEE 的影响, 同时也讨论了能量收支不闭合的可能原因及能量闭合订正对 CO_2 通量的影响等. 本研究对于定量评估生态系统 NEE 的不确定性有一定的借鉴作用.

1 资料与数据处理方法

1.1 数据来源

本文选取了位于吉林通榆(44°25′N, 122°52′E)半干旱区农田和草地 2 个不同下垫面 2005 和 2008 年的通量观测资料, 农田和草地 2 种不同下垫面空间相距为 5 km 左右. 该地区多年年平均气温 5.1 ℃(1961~2009), 属于中温带大陆性气候. 多年平均总降水量为 377.6 mm(1961~2009), 其中 80%集中在生长季(5~9 月). 年潜在蒸发量 1762.9 mm, 相对湿度 58%. 盛行风向西南风(SSW), 年平均风速 4.2 m s^{-1}. 2005 年降水量 334.3 mm, 属于降水偏少年份; 2008 年降水量 420.6 mm, 属于偏湿年份. 退化草地上的草在夏季高度一般在 10 cm 以下, 冬春季在 5 cm 以

下. 农作物生长季为每年 5~9 月, 夏季作物高度可达 2 m 左右, 到 9 月底 10 月初作物收获后农田为裸土覆盖. 下垫面土壤类型主要为沙土、草甸土和淡黑钙土.

观测项目包括近地面层涡动相关湍流通量、气象要素梯度、长短波辐射、土壤温度以及土壤湿度等观测. 气象要素包括温度、湿度、风速及风向; 辐射观测包括向上、向下太阳辐射及向上、向下长波辐射. 湍流通量观测仪器由超声风速温度仪(Campbell Scientific, CSAT3)、湿度和 CO_2 脉动仪(LI-COR, CS7500) 组成. 有关仪器设备和实验观测的更详细的描述请见参考文献(Liu 和 Feng, 2012).

10 Hz 湍流原始资料后处理采用 EddyPro4.0 软件(Li-cor Inc), 分别进行野点去除、二维坐标轴旋转、高频损失订正和密度脉动订正等, 并经过湍流平稳性检验和湍流发展的充分性检验等. 处理后的 CO_2 通量观测按照 Papale 等(2006)提出的标准订正方法对资料进行质量控制.

1.2 数据填补

1.2.1 人工空缺的产生

所选取的农田和草地 2005, 2008 年等 4 组数据序列中, 白天、夜间的空缺分别占白天和夜间资料的 9% 和 36%左右, 平均空缺为 23%. 为评估不同填补方法的准确性, 在原始数据序列中加入不同长度的人工空缺, 以便比较填补结果与真实资料之间的差异.

为比较不同填补方法对于不同空缺长度的填补效果, 共产生 4 种(0.5 h~12 d)不同长度的空缺类型(表 1). 将 4 种长度人工空缺分别加入原始资料, 共产生 16 组数据, 人工空缺为随机产生. 2005 年和 2008 年数据序列长度分别为 17520 和 17568, 每个长度的人工空缺约占全年 CO_2 通量资料的 10%左右.

1.2.2 填补方法

本文共选取 6 种常用的填补方法, 包括 4 种非线性回归法以及日平均变化法(Mean diurnal average, MDV)和边缘分布抽样法(Marginal distribution sampling, MDS).

表 1 4 种不同长度的人工空缺

空缺类型	半小时空缺数	产生次数	总的空缺数
较短(0.5 h)	1	1752	1752
短(4 h)	8	219	1752
中(~1.5 d)	64	27	1728
长(12 d)	576	3	1728

MDS 是一种改进的查表法(Reichstein 等, 2005), 数据空缺用相似气象条件下的观测值替代, 并根据气象条件的相似程度和时间步长的差异对填补结果进行分类. MDV 是利用空缺值相邻天数相同时刻观测值的平均值填补的方法(Falge 等, 2001).

非线性回归法(Non_linear)是利用夜间 NEE(即生态系统呼吸)与光合有效辐射、土壤温度和土壤水含量等气象要素间的半经验公式进行拟合的方法. 温度响应函数常用来描述生态系统呼吸与土壤温度间的相互关系, 常用的温度响应函数有 Lloyd & Taylor 模型、Arrhenius 模型和指数模型等(Lloyd 和 Taylor,, 1994). 土壤含水量也是影响生态系统呼吸的重要因素(Rey 等, 2002), Huang 等(2008)和 Guan 等(2009)均发现土壤湿度是半干旱地区影响地表通量的重要因子. 描述土壤水分、土壤温度与生态系统呼吸的模型有线性模型、复合模型等. 图 1 为 2005 年农田和草地生长季半小时 NEE 与土壤温度和土壤含水量关系的散点图. 从图 1 中可以看出在土壤含水量较高时, NEE 会随土壤温度升高而呈指数增加趋势; 当土壤含水量较低时, 即使土壤温度升高, NEE 仍保持较低的水平.

本文最终选取 4 种非线性模型:

指数模型(Non_linear1)

$$R_{\mathrm{eco}} = a\cdot \mathrm{e}^{(b\cdot T)}. \tag{1}$$

Arrhenius 模型(Non_linear2)

$$R_{\mathrm{eco}} = R_{10}\mathrm{e}^{E_0\left(\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}-T_0}-\frac{1}{T-T_0}\right)}. \tag{2}$$

连乘模型(Non_linear3)

$$R_{\mathrm{eco}} = a\cdot \mathrm{e}^{(b\cdot T)}\cdot \mathrm{SWC}^{c}. \tag{3}$$

复合模型(Non_linear4)

$$R_{\mathrm{eco}} = R_{10}\mathrm{e}^{E_0\left(\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}-T_0}-\frac{1}{T-T_0}\right)}\mathrm{e}^{\left(c\cdot \mathrm{SWC}+d\cdot \mathrm{SWC}^2\right)}. \tag{4}$$

式中, R_{eco} 是生态系统呼吸; R_{10} 为参考温度下(10℃)的生态系统呼吸速率; E_0 为活化能, 又称温度敏感系数; R 为气体常数; T_{ref} 为参考温度(10℃); T 为气温或土壤温度; T_0 为生态系统呼吸为 0 时对应的温度; SWC 为土壤体积含水量; a~d 均为拟合参数.

利用夜间 NEE 与气象要素的拟合关系估算白天的生态系统呼吸. 利用白天观测的 NEE, 根据 NEE=

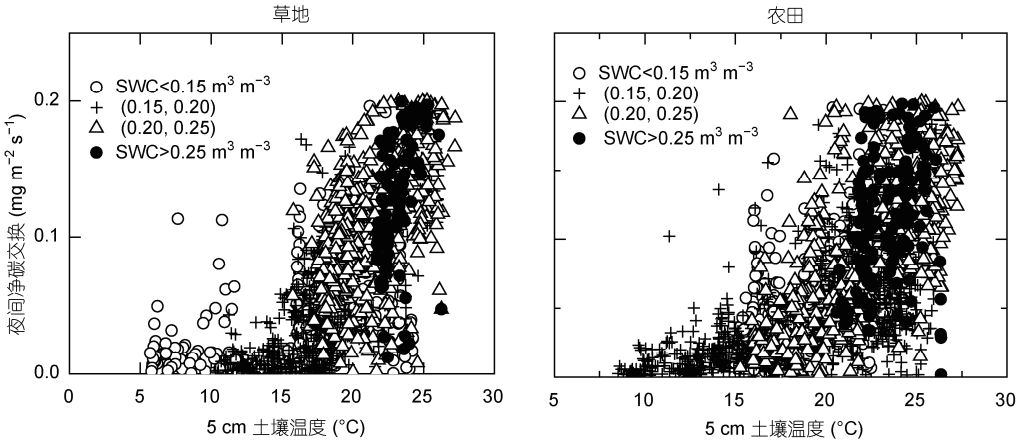

图 1　2005 年 5~9 月农田和草地生长季半小时 NEE 与土壤温度和土壤含水量关系的散点图

−(GPP−R_{eco}), 得到生态系统总初级生产力(GPP). GPP 与光合有效辐射(PAR)之间存在直角双曲线关系(Michaelis-Menten)(Michaelis 和 Menten, 1913; Falge 等, 2001). 利用光合响应曲线估算白天 NEE 的空缺值, 表达式为

$$\mathrm{GPP}=\frac{\alpha\cdot\mathrm{PAR}\cdot P_{\max}}{\alpha\cdot\mathrm{PAR}+P_{\max}}. \tag{5}$$

式中, α 是表观量子效率(也就是曲线的初始效率), $P_{\max}$ 是最大光合效率. 考虑到拟合参数的时间变化, 4 种非线性回归法均以月为时间窗口进行拟合.

1.2.3　统计分析

为评估不同填补方法的效果, 选取决定系数(determination coefficient, R^2)、相对均方根误差(Relative RMSE, R_RMSE)和偏差(bias error, BE)等 3 种统计指标对观测值与预测值进行统计分析.

$$R^2=\frac{\left\{\sum(P_i-\overline{P})(O_i-\overline{O})\right\}^2}{\sum(P_i-\overline{P})^2\sum(O_i-\overline{O})^2}, \tag{6}$$

$$\mathrm{RelativeRMSE}=\sqrt{\frac{\sum(P_i-O_i)^2}{\sum(O_i)^2}}, \tag{7}$$

$$BE=\frac{1}{N}\sum(P_i-O_i). \tag{8}$$

式中, P_i 为预测值, O_i 为观测值, $\overline{P}$ 和 $\overline{O}$ 为预测值和观测值的平均值. 16 组数据均进行统计分析, 并进行平均查看整体表现.

为评估不同填补方法对于年 NEE 的影响, 我们将 NEE 年总和的偏差定义为

$$\mathrm{Asum}=BE\left(NEE_{hh}\right)N_{hh}\cdot\Delta t_{hh}. \tag{9}$$

式中, $BE\left(NEE_{hh}\right)$ 为半小时 NEE 的偏差, N_{hh} 为填补的空缺数, Δt_{hh} 为时间长度(1800 s).

1.3　能量闭合订正

为评估能量收支不闭合对 NEE 的影响, 这里假设能量不闭合全部由涡动相关法观测的感热通量和潜热通量偏低造成. 将能量收支不闭合的剩余能量按照波文比分配为感热通量和潜热通量(Blanken 等, 1997); 强迫能量收支达到闭合后, 重新对 CO_2 通量进行密度脉动修正(WPL), 并与未进行订正的 CO_2 通量进行对比分析, 来确定能量收支不闭合对年 NEE 的影响. 近地层能量平衡的表达式为

$$R_n-G-G_s=H+LE, \tag{10}$$

$$\mathrm{EBR}=\frac{H+LE}{R_n-G-G_s}, \tag{11}$$

$$\beta=\frac{H}{LE}, \tag{12}$$

$$G_s=C_v\frac{\Delta T_s}{\Delta t}z_r. \tag{13}$$

式(10)中, 左边为有效能量, R_n 为净辐射, G 为地热通量, G_s 为热通量储存项, 根据土壤的体积热容量及土壤温度的垂直分布随时间变化计算得到;等式 10 右边为湍流热量通量, H 为感热通量, LE 为潜热通量; EBR 为能量收支闭合率, β 为波文比; C_v 为土壤体积热容量, $\Delta T_s/\Delta t$ 为该层土壤温度随时间的变化率, z_r 为该层土壤的厚度(热流板的观测深度).

2　讨论与结果

2.1　不同填补方法比较

图 2 显示了填补方法在不同下垫面的表现. 白天数据填补在不同下垫面的差异比夜间大, 总体上数据填补在草地的表现比农田好. 这可能是由于农田的净碳交换速率较高, 在一定程度上增加了填补的复杂性. 白天数据填补的 R^2 比较高, 且 R_RMSE 较低, 而夜间统计指标的离散程度较大. 夜间 BE 偏大且夜间 BE 的平均值均>0, 这说明夜间数据填补的预测值可能更多的高于观测值.

为评估数据填补与空缺长度的关系, 将相同空缺长度的数据进行平均. 由图 3 可以看出, 6 种填补方法对长空缺(12 d)的填补效果最差, 对中等和短的空缺填补效果较好, 而对于夜间较短空缺的填补效果也较差. Moffat 等(2007)的研究结果中, 各填补方法的 R_RMSE 随着空缺长度的增加而增加. 本研究结果不一致的原因可能与人工空缺的生成及不同观测站点不完全一样等有关. 较短空缺是完全随机产生的, 可能包含一些观测质量较低的点, 例如在夜间

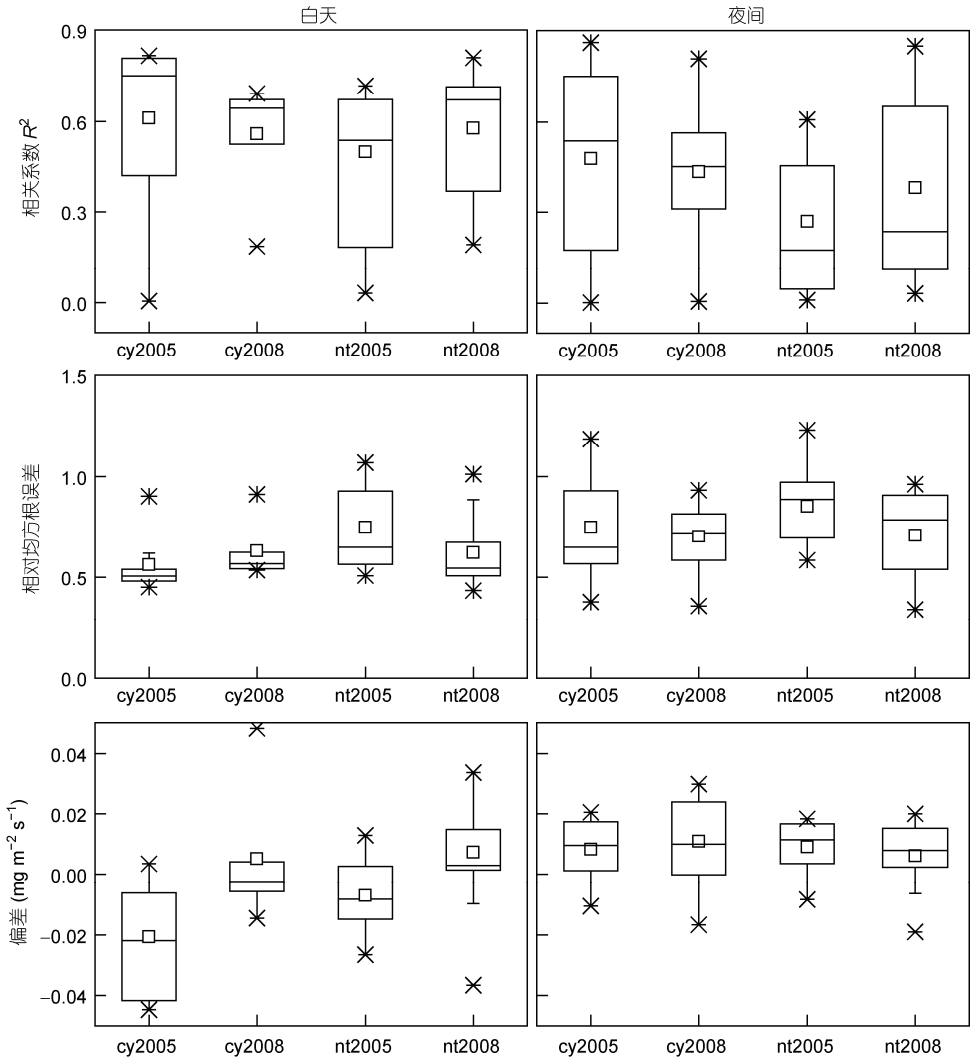

图 2　数据填补在不同站点的整体表现

各统计指标为所有数据序列的平均值. 箱线图的上、下边界和中线分别代表 75%位数(最大值与中位数之间的中位数)、15%位数(最小值与中位数之间的中位数)和中位数, 上下短横线为去除奇异值、极值后的最大值、最小值界限, *号代表奇异值, □代表平均值. cy2005, cy2008 分别代表草地 2005, 2008 年; nt2005, nt2008 分别代表农田 2005, 2008 年

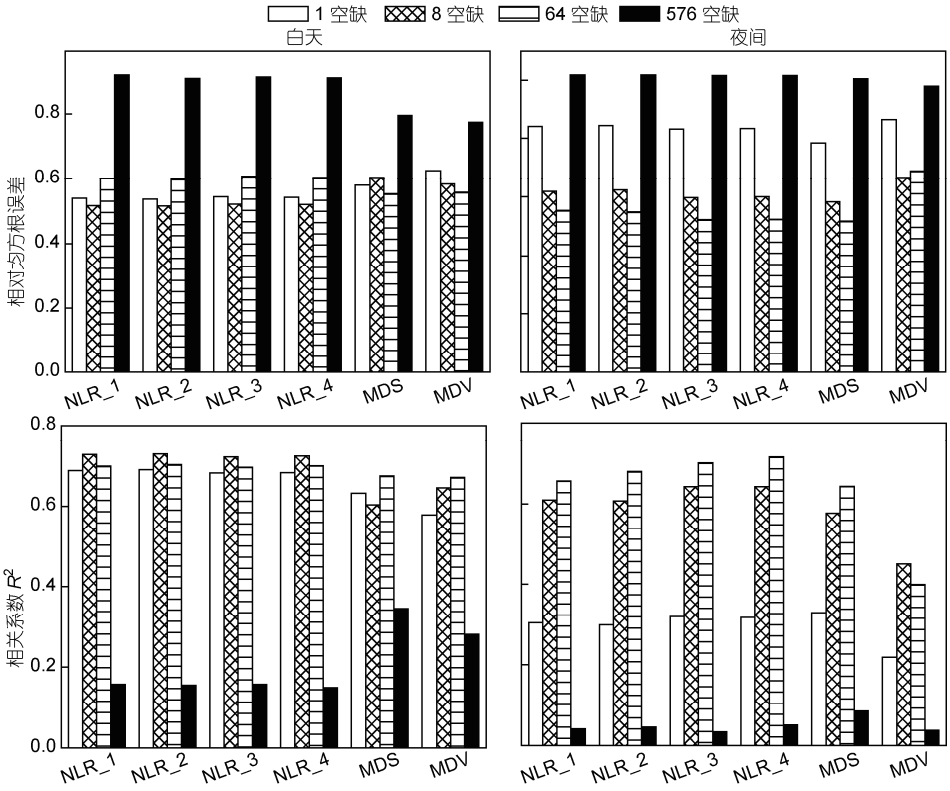

图 3　填补方法对不同长度空缺的填补表现

低湍流状态下的. 对于较长长度的空缺虽然也是随机生成, 但空缺的长度决定了都是连续的观测点, 观测资料的质量相对较好. MDS 对长空缺的填补效果在白天和夜间均优于其他方法. 4 种非线性回归法对于短空缺和中等空缺在夜间的填补效果均较好.

由于 4 种非线性回归方法的表现接近, 选择 Non_linear3 与 MDS, MDV 等进一步查看分析不同方法对长空缺的填补. 如图 4 所示为 3 种填补方法对 cy2008, nt2008 长空缺其中 5 d 的填补效果. 非线性回归法估算的夜间 NEE 几乎无变化, 这主要由于夜间气象要素(土壤温度、土壤水含量)的变化较小引起的, 而估算的白天 NEE 比观测值偏小, 说明白天可能低估生态系统的净碳吸收. MDS 估算的 NEE 变化趋势与观测值较为一致, 能反映 NEE 的时间变化, 对 NEE 最大值的估算也比较接近. MDV 估算的 NEE 具有明显的日变化规律, 但同一个时间窗口内的日变化规律相同, 不能反映 NEE 的时间变异性.

为评估不同填补方法的整体表现, 将数据系列按填补方法进行平均, 对于中、长空缺同时计算数据填补对 NEE 日总和的估算效果. 选择 R^2 作为不同填补方法的评估指标, 将填补方法划分为“优”(R^2> 0.5)、“良”(0.4≤R^2≤0.5)、“中”(0.3≤R^2≤0.4) 和“差”(R^2≤0.3) (表 2). MDS 的整体表现较好, R^2 均较高, 且 R_RMSE 较低. 4 种非线性回归法对白天 NEE 半小时的填补较好, 4 种方法的差异较小, 其中综合考虑土壤温度和土壤含水量影响的 Non_linear3 和 Non_linear4 填补效果优于另两种非线性回归法.

对 NEE 年总量的偏差估计是评估不同填补方法的重要指标(Moffat 等, 2007). NEE 年总量的偏差可以根据半小时观测值的偏差计算得到. 根据 Moffat 等(2007)和 Goulden 等(1996b)对填补方法造成的 NEE 年总和不确定性的研究, 将偏差在±25 g C m^{-2} a^{-1} 以内的填补方法视为较可靠的方法. 表 3 中显示了不同填补方法对年 NEE 的偏差估计. 从表 3 中可以看出, 4 种非线性回归法估计的夜间 NEE 偏差较大, 且偏差均为正值, 表明非线性回归法估计的夜间生态系统呼吸偏高. MDS 估计的 NEE 偏差基本在−5 g C m^{-2} a^{-1} 以内, 表示 MDS 是较可靠的方法. MDV 和非线性回归法估计的夜间 NEE 偏差均大于白天, 表明夜间 NEE 的填补难度更大.

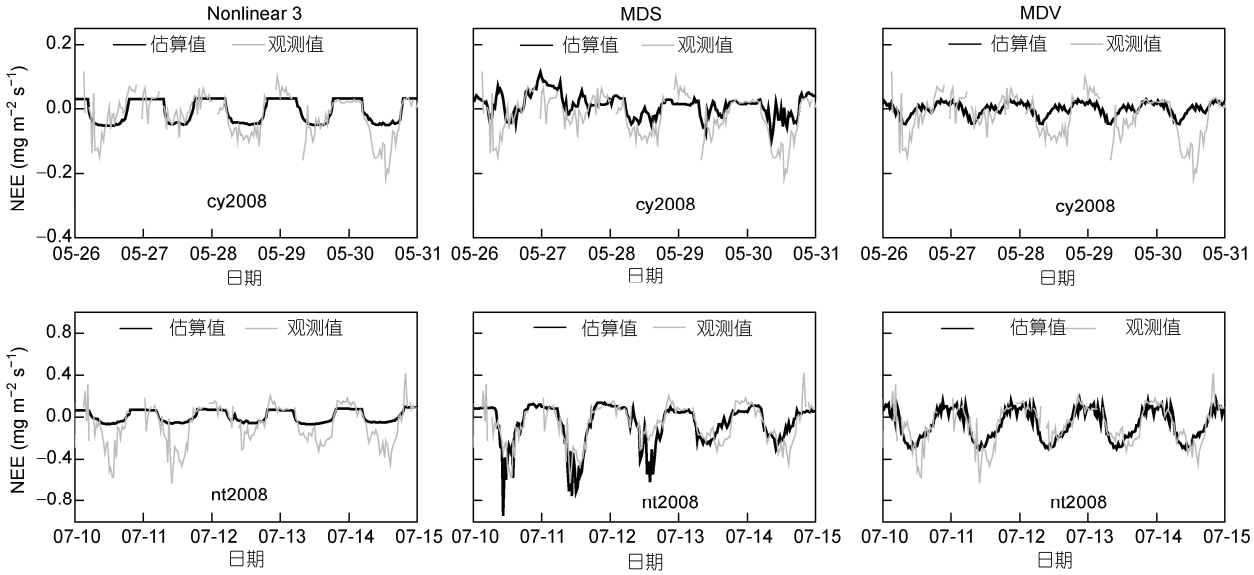

图 4　不同填补方法对于长空缺的填补效果

表 2　不同填补方法的总体评估

填补方法		Non_linear1	Non_linear2	Non_linear3	Non_linear4	MDS	MDV
半小时	白天	优	优	优	优	优	优
	夜间	良	良	良	良	良	差
日总和	白天	差	差	中	中	优	中
	夜间	良	良	良	良	优	优

表 3　不同填补方法对年 NEE 的偏差估计(g C m^{-2} a^{-1})

数据系列	时间	数据个数	空缺值	Non_linear1	Non_linear2	Non_linear3	Non_linear4	MDS	MDV
cy2005	白天	8302	1150	−17.2	−16.0	−17.5	−16.2	−2.1	−1.4
	夜间	9218	3830	**26.3**	**25.5**	**25.6**	**26.2**	0.9	−12.1
	全部	17520	4980	9.1	9.5	8.0	9.9	−1.2	−13.4
nt2005	白天	8271	902	−3.3	−3.5	−3.4	−3.5	−3.5	−1.8
	夜间	9249	3283	21.9	21.5	21.6	22.0	1.6	−0.8
	全部	17520	4185	18.6	18.0	18.1	18.5	−1.9	−2.6
cy2008	白天	8306	441	1.0	1.1	0.9	1.1	−0.5	3.0
	夜间	9262	3306	**28.6**	**28.4**	**29.9**	**29.7**	1.2	−12.8
	全部	17568	3747	**29.6**	**29.4**	**30.8**	**30.8**	0.7	−9.8
nt2008	白天	8295	428	1.8	1.9	1.5	1.7	0.2	1.9
	夜间	9273	3046	17.3	18.1	14.7	16.8	−5.6	−7.5
	全部	17568	3474	19.1	20.0	16.2	18.5	−5.3	−5.6

2.2　近地层能量收支

2.2.1　能量收支闭合率的影响因素

两个生态系统两年的近地面层能量收支闭合率在 78%~83%. Wilson 等(2002)对 Fluxnet 通量网中 22 个站点的研究发现, 涡动相关观测的 EBR 的变化范围在 0.53~0.99. 已有很多学者探讨了能量收支不闭合的可能原因(Cava 等, 2008), 这里主要分析了 u^*以及风向等对 EBR 的影响.

以草地和农田 2005 年和 2008 年 8 月份半小时的

观测资料为例, 分析能量通量和 EBR 的平均日变化(图 5). 由图 5(a)可以看出, 从 4:00 左右开始, 有效能量(R_n G G_s)开始高于湍流通量(H+LE), 能量平衡剩余量 Res(R_n G G_s H LE)变为正值, 且逐渐增加; 在 12:00 左右 Res 达到最大值, 约为 120 W m^{-2}; 此后迅速减小, 在 16:00 左右下降为 0, 夜间 Res 保持为较小的负值. Wang 等(2010)对西北半干旱地区的研究表明, 涡动相关法测得剩余能量在−40~60 W m^{-2}. 研究表明, 从图 5(b)可以看出, EBR 在 10:00~16:00 相对较高, 保持在 0.7~1.0. 在 4:00 之前 EBR 相对较低, 在 5:00 和 18:00 左右, EBR 会出现快速下降. Sanchez 等(2010)和 Oliphant 等(2004)的研究结果也发现, 当净辐射(R_n)在夜间变为正值或在傍晚变为负值时, EBR 会迅速下降, 而白天 EBR 保持相对较高的水平.

摩擦风速(u*)反映了湍流的发展情况. 在较低的摩擦风速条件下, 湍流混合不充分; 涡动相关系统会低估真实的大气交换, 造成 EBR 的下降(Sanchez 等, 2010). 图 6 反映了 EBR 与 u*的关系. 当 u*低于 0.3 m s^{-1} 时, EBR 随着 u*的增加而迅速增加, 此后 EBR 继续缓慢增加, 保持在 0.6 以上. 以草地 2008 年为例, 当 u*接近 1 m s^{-1} 时, EBR 接近 100%. Blanken 等(1997)研究表明, 当夜间摩擦风速很低时, 湍流混合不充分, 有效能量和湍流通量之间会出现很大差异. 其他学者(Oliphant 等, 2004; Barr 等, 2006)的报道也表明, 能量收支闭合会随着湍流强度的增加而提高. EBR 与 u*的关系也在一定程度上解释了 EBR 的日变化规律, 即在白天正午, 湍流作用充分时, EBR 较高, 而夜间则相反.

涡动相关法观测的湍流通量代表一定区域内下垫面与大气间的湍流通量净交换, 对通量来源有贡献的源区又称通量印痕(flux footprint). 净辐射以及土壤热通量的源区相对固定且较小, 而湍流通量的印痕大小受风向影响较大, 在某个风向的通量印痕可能比净辐射大 2 个数量级(Sanchez 等, 2010). 图 7(a)显示了草地和农田 2005 年 70%累积通量印痕在不同风向的分布. 2 个生态系统不同风向的累积通量印痕在 150~500 m. 有效能量和湍流通量的源区不匹配对能量平衡的影响可以通过能量收支闭合在各风向的分布上查看(图 7(b)). 草地、农田 2005 年在 60°~120°风向范围内的通量印痕均较大, 而在这一风向范围内的 EBR 也相对较低. Sanchez 等(2010)研究表明当观测塔周围的环境异质性较高时, 在特定风向的能量收支闭合率下降多达 30%.

2.2.2 能量闭合订正对 NEE 的影响

图 8 显示了将能量平衡剩余能量按波文比分配后感热通量, 潜热通量以及 NEE 的日变化. 图 8 中以生长季高峰期的湍流热量通量日变化为例, 能量闭合订正后潜热通量, 感热通量增加的最大值分别为 75 和

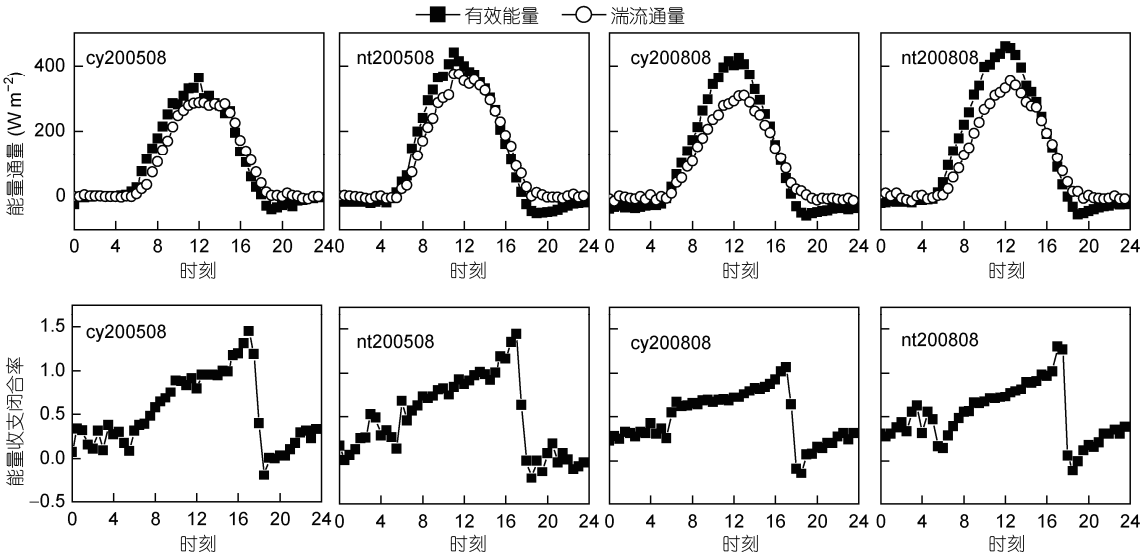

图 5 能量通量以及能量平衡闭合率的平均日变化

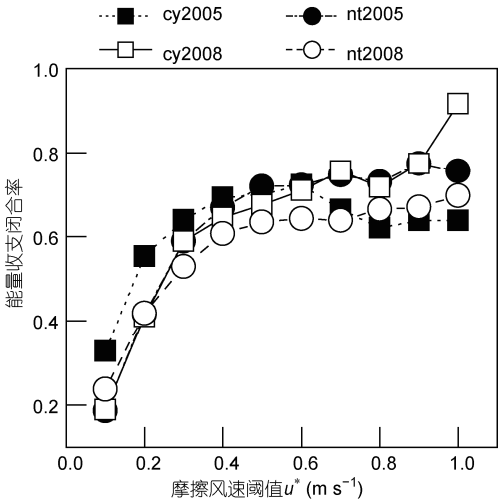

图 6　能量平衡闭合率与 *u的关系**

30 W m^{-2}, 比订正前约增加 20%左右. 订正后潜热通量, 感热通量增加最多的时刻分布在白天的正午前后. 这与 EBR 的日变化不太一致, EBR 在白天相对较高, 而夜间较低. 这主要是由潜热通量和感热通量的日变化规律决定的, 潜热通量和感热通量的最大值出现在正午左右, 而夜间接近于 0, 虽然此时 EBR 较低, 但剩余能量也较小, 而正午能量平衡的剩余能量达到最大值. 能量闭合订正后的最大净碳交换速率有所下降, NEE 最多下降 15%左右, 订正后变幅最大的点出现在正午左右.

草地在 2005 和 2008 年均表现为碳源, 农田则均为碳汇, 能量闭合订正后草地、农田的 NEE 分别平均增加 9 和 10 g C m^{-2} a^{-1}, 说明当能量收支不闭合全部由感热通量和潜热通量的低估引起时, 能量闭合订正会使生态

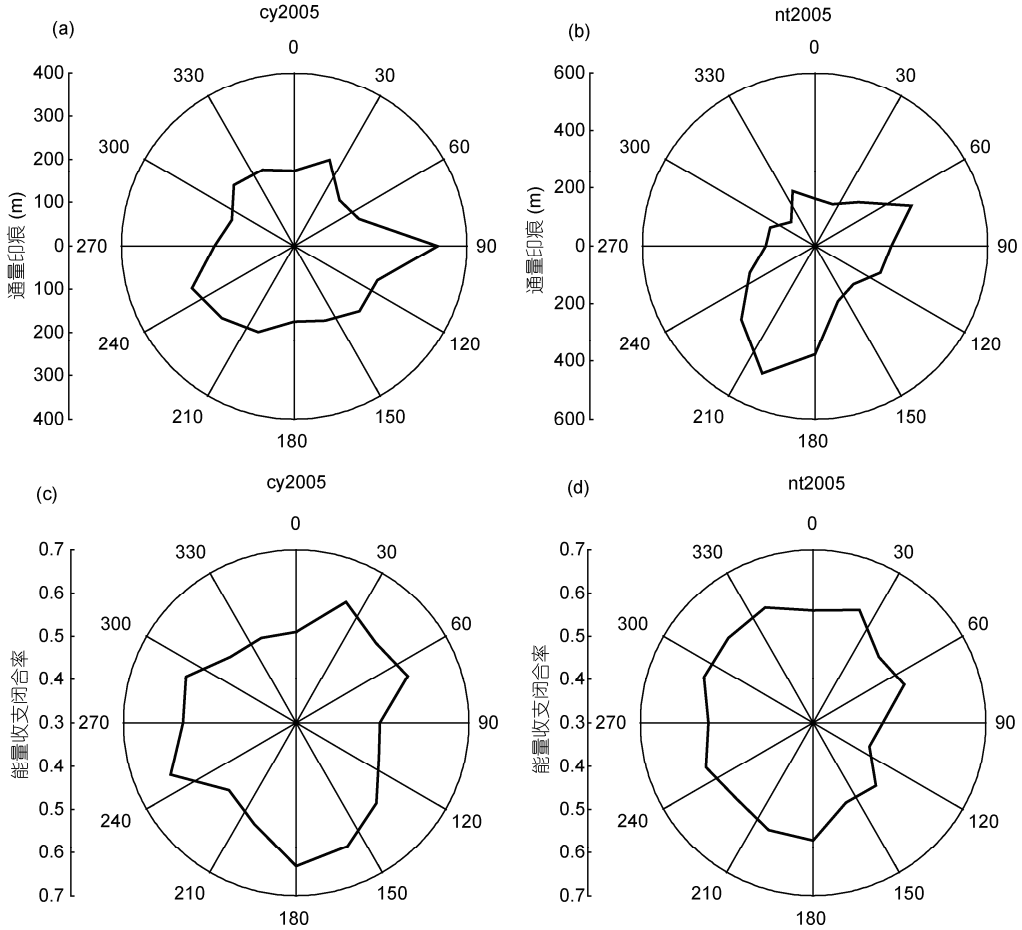

图 7　草地、农田 2005 年通量印痕以及能量平衡闭合率与风向的关系

每个角度范围显示的为平均值

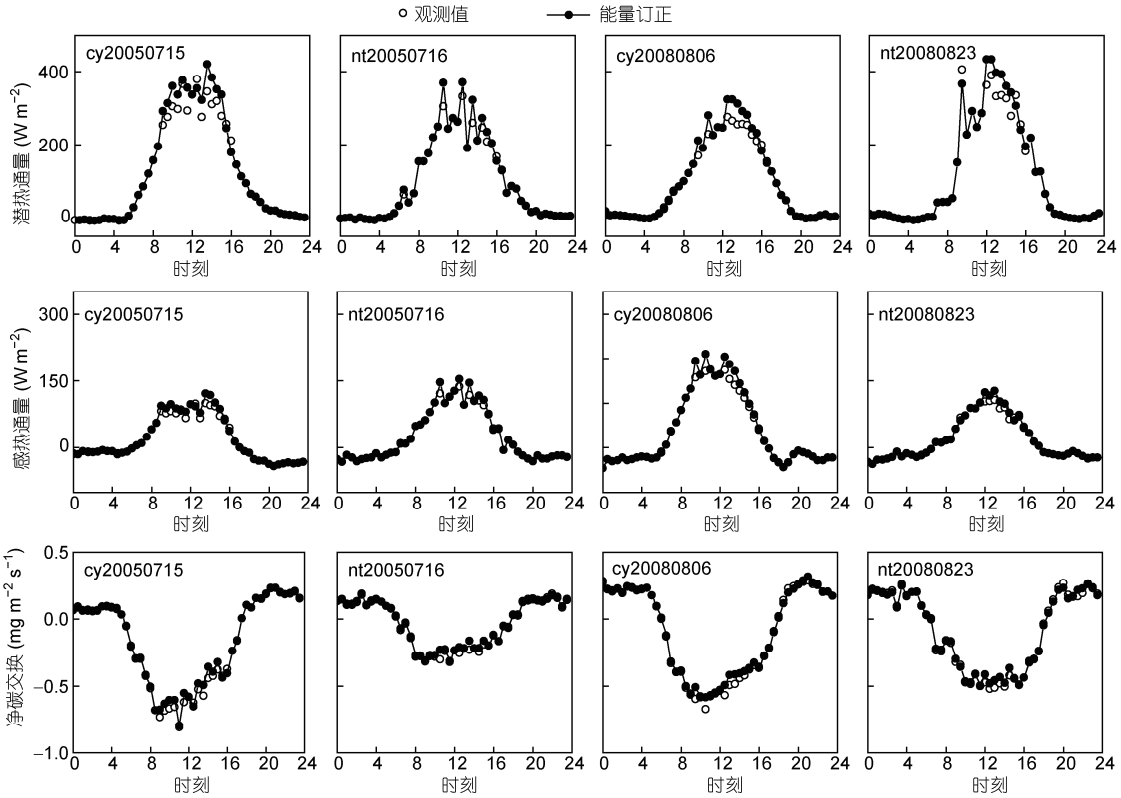

图 8　能量平衡闭合订正对生长季 NEE 的影响

系统的净碳释放增大. Barr 等(2006)研究结果表明, NEE 与能量收支闭合率在日变化、与 u^*以及大气稳定度的关系等方面具有相似的规律, 这间接证明了能量闭合订正对感热通量, 潜热通量和 NEE 的合理性. 然而 Twine 等(2000)指出感热通量和潜热通量的低估并不足以解释全部的能量收支不闭合.

2.3　u^*订正对 NEE 的影响

在夜间稳定大气层条件下, 当摩擦风速下降到一定程度后, 涡动相关法测得的 CO_2 通量偏差增大(Goulden 等, 1996b). 对 CO_2 通量资料进行质量控制时, 通常根据 u^*的阈值范围剔除夜间低湍流状态下的观测资料. 两个生态系统生长季高峰期的夜间 NEE 与 u^*关系的散点图如图 9 所示. 当 u^*较大时, 净碳交换速率保持一个相对稳定的水平, 而 u^*<0.1 m s^{-1} 时, 净碳交换速率显著下降或为负值, 表明在低摩擦风速条件下, 夜间生态系统呼吸被低估或偏差增大. 夜间 CO_2 通量被低估的原因尚没有定论, 在夜间湍流的运动更加高频且具有间歇性, 而仪器对于高频信号的较差响应可能是造成通量损失的原因之一(Massman, 2000). 泄流也是造成通量在稳定的层结条件下总是偏低的可能原因. 夜间因切变产生的重力行波被限制在地表的稳定大气层结内, 使常通量层的假设失灵(Massman 和 Lee, 2002).

图 10 显示的是不同 u^*阈值范围估算的年 NEE. u^*阈值越高, 估算的生态系统净碳释放越大. 当 u^*阈值从 0.1 m s^{-1} 增加到 0.2 m s^{-1}, 年累积碳通量平均增加 37.5 g C m^{-2} a^{-1}. 其他的相关报道指出当设定 u^*阈值范围后, 生态系统的年净碳交换平均增加 50 g C m^{-2} a^{-1}(Goulden 等, 1996b). u^*阈值对年累积碳通量的影响较大, 一方面是由于估算的夜间生态系统呼吸增加, 另一方面是由于 u^*阈值的提高增加了观测资料的空缺值, 空缺值的增加也增大了年 NEE 的不确定性. u^*阈值为 0.1 和 0.2 m s^{-1} 时, 空缺值分别占年观测资料的 24%和 37%.

3　结论

为研究生态系统的长期碳交换特征或进行不同站点间的比较, 需要明确湍流资料的后处理过程(数

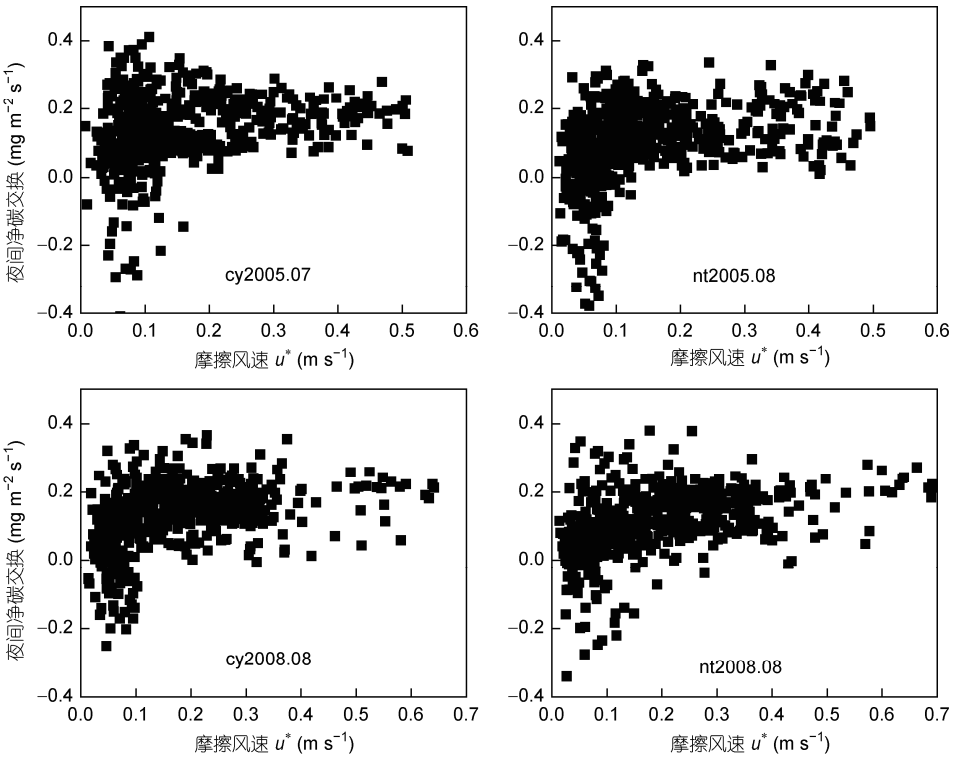

图 9　草地和农田 2005, 2008 年夜间 NEE 与 *u的关系**

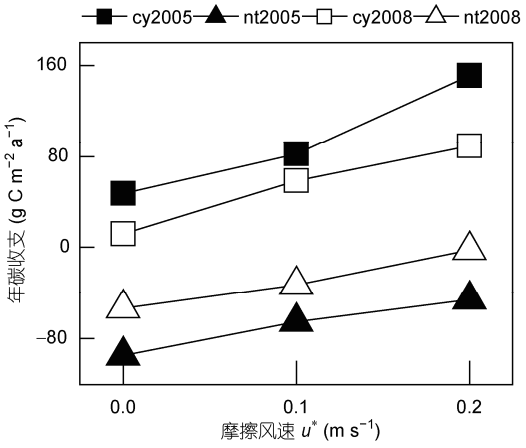

图 10　草地和农田 2005, 2008 年净碳交换与 *u的关系**

据填补、*u**阈值等)引起的年 NEE 的不确定性. 由于仪器故障或者数据质量控制常造成数据缺失, 为确定生态系统的碳源/碳汇功能需要对缺失数据进行填补. 本文通过引入人工空缺和统计分析评估了 MDV、非线性回归法和 MDS 等数据填补方法. 总体上, 这些数据填补方法造成的年 NEE 的偏差在 30 g C m^{-2} a^{-1} 以内, 数据填补方法的精确度受下垫面类型、空缺长度以及空缺出现在白天或夜间影响. 如非线性回归法对草地缺失数据的填补表现比农田好, 这可能是由于农田受人类活动影响较大, 土壤水分状况除受降水影响外在特别干旱的年份, 播种期还有少量的灌溉等, 生态系统净碳交换过程受自然环境和人工管理共同影响. 数据填补方法对短空缺的填补较差, 可能是由于本文中除 MDS 外, MDV 和非线性回归法的时间窗口均以月为步长, 在一定程度上降低了填补精确度, 同时很多报道也指出对于较短空缺的填补用简单的插值法效果会更好. 数据填补方法对白天空缺的填补表现均优于夜间. 其中非线性回归法的估算的夜间 NEE 具有较大的正偏差, 且几乎无变化, 不能及时反映 NEE 的时间变化. 4 种非线性回归法的表现接近, 但由于在半干旱区, 生态系统的净碳交换过程易受到土壤水分状况的限制, 因此综合考虑土壤温度和土壤含水量变化的非线性回归法更适用于该地区 NEE 缺失数据的填补. MDV 估算的 NEE 的特点是在相同时间窗口具有相同的日变化规律, 不能反映 NEE 受气象条件或生物因子变化的规律. MDS 实际

是查表法的一种, 但由于综合考虑了温度、辐射、湿度等环境变量的影响, 且对不同长度的空缺采用不同步长的时间窗口, 对缺失数据的填补效果整体较好, 是一种较为可靠的填补方法.

草地和农田 2 种不同下垫面的能量收支不闭合率在 20%左右, 与其他站点接近. 研究结果表明能量收支闭合率呈明显的日变化规律, 白天的能量收支闭合率高于夜间, 这与其他的研究报道一致. 能量收支闭合率与 u^*的关系表明湍流强度越小, 能量收支闭合率越低, 这可能是由于低湍流状态下湍流通量的空间异质性增强, 导致观测误差增大. 能量收支闭合率与通量印痕在不同风向上的分布有关, 草地、农田在某个风向的累积通量印痕较大时, 这一风向上的能量收支闭合也较低. 当空气出现稳定的层结时, 通量印痕的分布会迅速扩大, 并且延伸到超出被研究的植被覆盖范围, 这也间接证明了能量收支闭合率受湍流强度的影响. 假设能量收支不闭合全部由感热通量和潜热通量被低估引起, 结果表明此种情况下 CO_2 通量会被低估. 但实际情况中, 能量收支不闭合可能由感热通量, 潜热通量的低估引起, 也可能由净辐射高估引起, 因此并不能得出 CO_2 通量一定会被低估的结论. u^*阈值对生态系统的年 NEE 影响较大, 随着 u^*阈值的增大, 估算的生态系统净碳释放也增大.

数据质量控制受站点和人为影响较大, 明确数据质量控制对半干旱区年 NEE 的不确定性, 将有助于研究生态系统的长期碳交换特征和进行不同生态系统类型间的对比, 对研究全球碳收支有重要意义.

参考文献

刘敏, 何洪林, 于贵瑞, 等. 2010. 数据处理方法不确定性对 CO_2 通量组分估算的影响. 应用生态学报, 21: 2389–2396

Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. Adv Ecol Res, 30: 113–175

Baldocchi D. 1996. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapor fluxes over terrestrial ecosystems. Glob Change Biol, 2: 159–168

Baldocchi D. 2008. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. Aust J Bot, 56: 1–26

Barr A G, Morgenstern K, Black T A, et al. 2006. Surface energy balance closure by the eddy-covariance method above three boreal forest stands and implications for the measurement of the CO_2 flux. Agric For Meteorol, 140: 322–337

Black T A, DenHartog G, Neumann H H, et al. 1996. Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. Glob Change Biol, 2: 219–229

Blanken P D, Black T A, Yang P C, et al. 1997. Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: Partitioning overstory and understory components. J Geophys Res, 102: 28915–28927

Cava D, Contini D, Donateo A, et al. 2008. Analysis of short-term closure of the surface energy balance above short vegetation. Agric For Meteorol, 148: 82–93

Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agric For Meteorol, 107: 43–69

Foken T, Wimmer F, Mauder M, et al. 2006. Some aspects of the energy balance closure problem. Atmos Chem Phys, 6: 4395–4402

Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. 1996a. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: Response to interannual climate variability. Science, 271: 1576–1578

Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. 1996b. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. Glob Change Biol, 2: 169–182

Guan X D, Huang J P, Guo N, et al. 2009. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau. Adv Atmos Sci, 26: 692–700

Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. 2008. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau. Adv Atmos Sci, 25: 906–921

Hui D, Wan S, Su B, et al. 2004. Gap-filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (MI) for annual estimations. Agric For Meteorol, 121: 93–111

Kidston J, Bruemmer C, Black T A, et al. 2010. Energy balance closure using eddy covariance above two different land surfaces and implications

for CO_2 flux measurements. Bound-Layer Meteor, 136: 193–218
Lindroth A, Grelle A, Moren A S. 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. Glob Change Biol, 4: 443–450
Liu H Z, Feng J W. 2012. Seasonal and interannual variations of evapotranspiration and energy exchange over different land surfaces in a semi-arid area of China. J Appl Meteorol Clim, 51: 1875–1888
Lloyd J, Taylor J A. 1994. On the temperature-dependence of soil respiration. Funct Ecol, 8: 315–323
Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. 2002. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. Glob Change Biol, 8: 851–866
Massman W J. 2000. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. Agric For Meteorol, 104: 185–198
Massman W J, Lee X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. Agric For Meteorol, 113: 121–144
Michaelis L, Menten M L. 1913. Die Kinetik der invertinwirkung. Biochemische Zeitschrift, 49: 333
Moffat A M, Papale D, Reichstein M, et al. 2007. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. Agric For Meteorol, 147: 209–232
Moore C J. 1986. Frequency-response corrections for eddy-correlation systems. Bound-Layer Meteor, 37: 17–35
Oliphant A J, Grimmond C S B, Zutter H N, et al. 2004. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest. Agric For Meteorol, 126: 185–201
Ooba M, Hirano T, Mogami J I, et al. 2006. Comparisons of gap-filling methods for carbon flux dataset: A combination of a genetic algorithm and an artificial neural network. Ecol Model, 198: 473–486
Papale D, Reichstein M, Aubinet M, et al. 2006. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. Biogeosciences, 3: 571–583
Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. Glob Change Biol, 11: 1424–1439
Sakai R K, Fitzjarrald D R, Moore K E. 2001. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces. J Appl Meteorol, 40: 2178–2192
Sanchez J M, Caselles V, Rubio E M. 2010. Analysis of the energy balance closure over a FLUXNET boreal forest in Finland. Hydrol Earth Syst Sci, 14: 1487–1497
Twine T E, Kustas W P, Norman J M, et al. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. Agric For Meteorol, 103: 279–300
Wang G, Huang J, Guo W, et al. 2010. Observation analysis of land-atmosphere interactions over the Loess Plateau of northwest China. J Geophys Res, 115
Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water-vapor transfer. Q J Roy Meteor Soc, 106: 85–100
Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. Agric For Meteorol, 113: 223–243
Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. 1993. Net exchange of CO_2 in midlatitude forest. Science, 260: 1314–1317