

吕少宁, 文军, 张宇, 等. 不同平均时间对 LOPEX10 资料涡动相关湍流量计算结果影响的探讨[J]. 高原气象, 2012, 31 (6): 1530—1538.

不同平均时间对 LOPEX10 资料涡动相关湍流 通量计算结果影响的探讨

吕少宁, 文军, 张宇, 王少影,
张堂堂, 田辉, 刘蓉

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过处理涡动相关系统观测的近地层湍流脉动量可以获取地—气间感热和潜热通量, 然而选择不同平均时间对通量计算的结果有较大影响。采用黄土高原陆面过程野外观测试验(LOPEX10)期间获得的涡动相关系统观测资料, 分析了不同平均时间对湍流通量计算的影响, 并采用雷诺平均和分解方法推导了平均时间引起的通量差值的数学表达式(Flux Compensation, FC)。结果表明: (1) FC 公式可以说明采用不同平均时间数据之间的关系, 也可以直接计算低频涡旋对湍流通量的贡献。FC 公式计算的结果与直接计算的不同平均时间通量计算之差的相关系数在 0.95 以上, 并可以确定计算湍流通量的最佳平均时间。(2) 通过采用 Ogive 函数确定了计算 LOPEX10 期间通量的最佳平均时间长度为 30 min, 印证了利用雷诺平均和分解方法计算湍流通量补偿的准确性。(3) 通过进一步的数学变换, 证明了平均时间对湍流通量计算的影响直接与湍流低频变化相关, FC 公式可以用来确定涡动相关观测数据的最佳平均时间, 并且在获得较高时间分辨率的湍流通量数据的同时, 补偿因平均时间过短而遗漏的低频信息。

关键词: 涡动相关; 平均时间; 黄土高原; 湍流通量

文章编号: 1000-0534(2012)06-1530-09 中图分类号: P404 文献标志码: A

1 引言

陆—气间水分和碳循环是陆地表层系统物质与能量循环的核心, 是气象学研究的重点之一^[1-2]。1875 年雷诺便提出了著名的雷诺分解理论^[3], 目前陆—气相互作用观测中普遍使用的涡动相关系统便是建立在该理论上。涡动相关观测系统的数据采样频率可以达到 20 Hz 以上, 能够捕捉到气体浓度、风速、气温和气压等变量的脉动变化, 进而计算某一时段内陆—气间的能量和物质交换通量^[4-5]。近年来, 随着“中国生态系统研究网络”的建成, 涡动相关系统在我国生态和农业气象等科研部门的陆—气相互作用研究中得到广泛应用^[6-7]。

在湍流通量计算中, 需要将涡动相关系统采样变量的高频脉动数据信号分解为平均值与脉动值两项^[8]。平均时间的选择直接关系到湍流通量数据的

质量控制^[9]。由雷诺分解理论可知, 涡动相关系统并不能测量全部尺度涡旋的湍流信号: 若湍流的特征时间尺度小于仪器的采样间隔, 则更小尺度的湍流信号是不能被观测到的; 在数据的后期处理中, 湍流谱和平均时间对最终的计算结果也有很大影响^[10]。若时间平均过短, 一般认为高通滤波效应将被进一步放大, 将大尺度慢响应的低频湍流信号滤掉; 如果时间平均太长, 一方面不能反映湍流通量的日变化和昼夜交替时的变化情况, 所得湍流通量的时间分辨率将大大下降, 不利于对陆—气间能量水分交换物理过程的分析^[11]; 另一方面则将非湍流运动的贡献包含到通量计算结果中, 并且在过长的时间段内, 大气运动的非平稳性也较低, 对通量计算本身造成困难。

因此, 确定最佳的平均时间是涡动相关系统数据处理中的关键步骤。对于不同的观测环境, 受到

收稿日期: 2011-07-08; 定稿日期: 2011-11-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB421402); 国家自然科学基金项目(40905006)共同资助

作者简介: 吕少宁(1985—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士生, 主要从事气候变化与卫星遥感研究。E-mail: snlv@lzb.ac.cn

下垫面、高度、地形和湍流特征等影响, 最佳平均时间的确定需要单独进行计算^[12]。已有的研究表明^[13-14], 该值的确定是由经验判断的, 并在一定观测期内保持不变, 且受人为主观因素影响较大。

因此, 本文首先通过对黄土高原陆面过程野外观测试验(LOPEX10)期间涡动相关系统采集的湍流脉动数据进行 WPL(Webb-Pearman-Leuning correction)、水汽含量校正、倾斜校正及坐标轴旋转等处理, 建立涡动相关系统观测资料处理的最佳平均时间确定方法。然后, 以 2010 年 9 月 1-30 日的试验数据为例, 通过分析平均时间对于通量计算结果的影响, 用雷诺平均和分解方法给出平均时间对湍流计算影响的 FC(Flux Compensation)公式, 并得到 LOPEX10 期间的涡动相关系统观测资料处理的最佳平均时间。最后, 利用 Ogive 函数印证获得的最佳平均时间。

2 资料选取和质量控制

2.1 资料选取

黄土高原面积广大, 海拔从几百米到 2 000 m 之间变化, 区域内地形地貌复杂, 包括黄土台地、低地、沟壑、丘陵、黄土垄、连续小丘、峡谷、平地、黄土梯田和其他土地类型^[15]。由于该地区特殊的地貌环境, 所以研究该地区陆面过程对理解陆表能量平衡特征、陆表物理量的参数化、水分循环和水土保持都具有重要意义^[16]。从 2004 年至今,

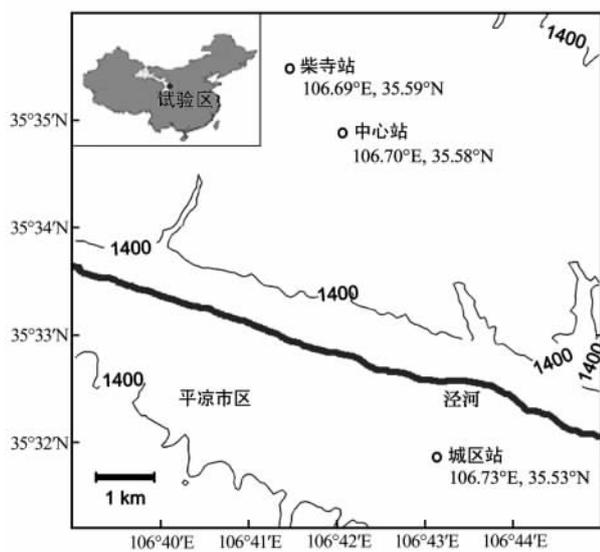


图 1 LOPEX10 研究区域地形和中心站涡动相关系统观测位置

Fig. 1 Geography information of the LOPEX10 study area

以黄土高原地区陆气相互作用为研究目标的黄土高原陆面过程野外观测试验(LOPEXs)已经在甘肃省平凉市白庙塬地区(图 1)开展了 9 年观测, 取得了珍贵的黄土高原陆面过程观测资料^[15, 17]。在 2010 年野外试验中, 除原有的 25 m 高边界层气象塔的多层常规气象数据外, 还增加了一套涡动相关系统进行同步观测。该设备包括 Campbell 公司生产的 LI-7500 气体分析仪, 可以获得二氧化碳和水汽浓度的高频脉动变化信息, 还有超声风温仪以及配套的 HMP45C 气压、气温观测设备。文中使用 LOPEX10 试验中 2010 年 9 月 1-30 日的涡动相关系统采样频率为 10 Hz 的观测数据。试验期间, 正是夏季耕作结束、冬小麦出苗期。

2.2 质量控制

涡动相关系统采集到的原始数据只是各种气象变量的脉动值, 需要经过一系列质量控制和统计分析处理才能获得湍流通量信息^[18-19]。按照 LOPEXs 试验数据处理的标准方法, 数据使用前进行了如下处理: 不同数据平均时间设置、平面拟合坐标旋转、对气体分析仪和超声风速仪间滞后时间的设置、线性去除变化趋势、数据质量控制和大气稳定度计算以及 WPL 校正。进一步处理后可以得到校正后的感热、潜热和 CO₂ 等湍流通量。

3 计算方法和结果分析

通常用雷诺平均和分解方法计算的湍流通量, 即任意一个物理量都可以分解为平均量和脉动量之和。假设水平均匀, 只考虑垂直方向上的脉动, 垂直风速为 w , 物理量 c 可代表空气温度、水平风速、CO₂ 或水汽密度的脉动值。按照雷诺平均和分解方法, 二者可以表示为 $w = \bar{w} + w'$ 和 $c = \bar{c} + c'$, 则湍流通量可表示为

$$\begin{aligned} w \cdot c &= (\bar{w} + w') \cdot (\bar{c} + c') \\ &= \bar{w} \cdot \bar{c} + \bar{w} \cdot c' + \bar{w}' \cdot \bar{c} + w' \cdot c' \end{aligned} \quad (1)$$

对式(1)取平均, 得:

$$\begin{aligned} \overline{w \cdot c} &= (\bar{w} + \overline{w'}) \cdot (\bar{c} + \overline{c'}) \\ &= \bar{w} \cdot \bar{c} + 0 + 0 + \overline{w' \cdot c'} \\ &= \bar{w} \cdot \bar{c} + \overline{w' \cdot c'} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\overline{w' \cdot c'}$ 是计算湍流项的数学基础。要正确地模拟湍流就必须保持上述非线性项, 这是与许多线性理论明显不同之处。对于线性理论, 非线性项通常作为一阶近似被忽略。不同平均时间直接影响 \bar{w} 和 \bar{c} 值, 进而影响 w' 和 c' 以及 $\overline{w' \cdot c'}$ 的值, 即湍流通

量的计算。因此,平均时间对湍流通量结果的影响是显而易见的,下面利用数学分析方法求解和评估这种影响。

3.1 采用指定的平均时间

平均时间在实际操作中往往采用 1 min 的整数倍,比如 5, 10, 15 和 20 min。在 LOPEXs 试验中以 10 min 和 20 min 为平均时间对资料进行处理是较为常见的。在同一次采样过程中平均时间作为仪器数据采集器中预先设定的参数,是一个常数。当设定平均时间为 10 min 时,如果仍需要计算平均时间为 20 min 时的湍流通量,就必须重新计算。因此,本文估算时分别采用 10 min 和 20 min 作为平均时间计算湍流通量的差异,并在 10 min 平均时间计算结果的基础上再采用算数平均得到 20 min,这样可以使之与直接采用 20 min 为平均时间的计算结果一一对应,从而分析这样两组数据的差异对评估数据质量具有一定的参考价值。首先以 20 min 为例,说明平均时间对湍流通量计算的影响。将上述待试验的两变量 w, c 的数据序列以某时刻为节点分为长度前后相等的两子段,即两个子序列的组合:

$$w = [w_1; w_2], \quad (3)$$

$$c = [c_1; c_2], \quad (4)$$

其中: w_1 和 w_2 分别是变量序列 w 在某时刻截断的前后两子序列。例如, w 表示一段 20 min 的垂直风速 10 Hz 数据,则 $w_1(w_2)$ 表示该序列前(后) 10 min 数据组成的新序列。按照雷诺平均和分解方法,同样可以把分开后的序列分为平均部分和扰动部分, c 也进行同样的表示,即:

$$w = [w_1; w_2] = [\bar{w}_1 + w'_1; \bar{w}_2 + w'_2], \quad (5)$$

$$c = [c_1; c_2] = [\bar{c}_1 + c'_1; \bar{c}_2 + c'_2]. \quad (6)$$

由平均算子和脉动项计算的定义可知,对于整个序列的平均值为

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_1 + \bar{w}_2}{2}, \quad (7)$$

$$\bar{c} = \frac{\bar{c}_1 + \bar{c}_2}{2}, \quad (8)$$

对于脉动项则有:

$$w' = [\bar{w}_1 - \bar{w} + w'_1; \bar{w}_2 - \bar{w} + w'_2], \quad (9)$$

$$c' = [\bar{c}_1 - \bar{c} + c'_1; \bar{c}_2 - \bar{c} + c'_2], \quad (10)$$

在此基础上计算 w 和 c 的乘积,即:

$$\begin{aligned} w \cdot c &= [w_1; w_2] \cdot [c_1; c_2] \\ &= [\bar{w}_1 + w'_1; \bar{w}_2 + w'_2] \\ &\quad \cdot [\bar{c}_1 + c'_1; \bar{c}_2 + c'_2]. \end{aligned} \quad (11)$$

计算代表湍流输送的非线性脉动项 $w'c'$ 时,代入式(9)、(10)可得:

$$w'c' = [\bar{w}_1 - \bar{w} + w'_1; \bar{w}_2 - \bar{w} + w'_2] \cdot [\bar{c}_1 - \bar{c} + c'_1; \bar{c}_2 - \bar{c} + c'_2], \quad (12)$$

将式(7)、(8)代入式(12),可整理为

$$\begin{aligned} w'c' &= \frac{1}{2}(c_1 - c_2) \cdot (\bar{w}_1 - \bar{w}_2) \\ &\quad + \frac{1}{2}(c'_1 - c'_2)(\bar{w}_1 - \bar{w}_2) \\ &\quad + \frac{1}{2}(w'_1 - w'_2)(c_1 - c_2) \\ &\quad + (w'_1c'_1 + w'_2c'_2). \end{aligned} \quad (13)$$

对式(13)取非线性项 $w'c'$ 的平均项,因为将原序列分成了长度相等的两个子序列,因而在取平均时,应乘以 1/2,得:

$$\begin{aligned} w'c' &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2}(c_1 - c_2)(\bar{w}_1 - \bar{w}_2) + 0 + 0 \right. \\ &\quad \left. + (\bar{w}'_1c'_1 + \bar{w}'_2c'_2) \right\} \\ &= \frac{1}{4}(c_1 - c_2) \cdot (\bar{w}_1 - \bar{w}_2) \\ &\quad + \frac{1}{2}(\bar{w}'_1c'_1 + \bar{w}'_2c'_2). \end{aligned} \quad (14)$$

将平均时间缩短之后,式(14)中的 $\frac{1}{2}(\bar{w}'_1c'_1 + \bar{w}'_2c'_2)$ 就是在较短平均时间时计算得到的非线性项。与较长平均时间所计算得到的平均项相比,多了一项 $\frac{1}{4}(c_1 - c_2) \cdot (\bar{w}_1 - \bar{w}_2)$, 该项表示当平均时间为 t 与平均时间为 $2t$ 时,湍流通量计算的差异,即:

$$FC_{2t-t} = \frac{1}{4}(c_1 - c_2) \cdot (\bar{w}_1 - \bar{w}_2), \quad (15)$$

其中: FC_{2t-t} 表示任意物理变量分别采用 $t=10$ min 和 $2t=20$ min 作为平均时间进行通量计算的差异即: $FC_{20\text{min}-10\text{min}}$ 。本文中 FC 公式的下角标表示计算的平均时间。根据平均时间的定义,分别采用 10 min 和 20 min 为平均时间计算得到两组数据。其中 10 min 的数据再采用算数平均到 20 min,其结果与之前直接设定平均时间为 20 min 的计算结果相减,得到平均时间 10 min 和 20 min 时通量计算结果的差异 $\text{flux}_{20\text{min}} - \text{flux}_{10\text{min}}$ 。图 2 给出了采用算术平均和 FC 公式计算得到的通量结果对比。

由于采用了 10 min 和 20 min 两个平均时间分别对数据进行计算,得到的两组通量的差别相当

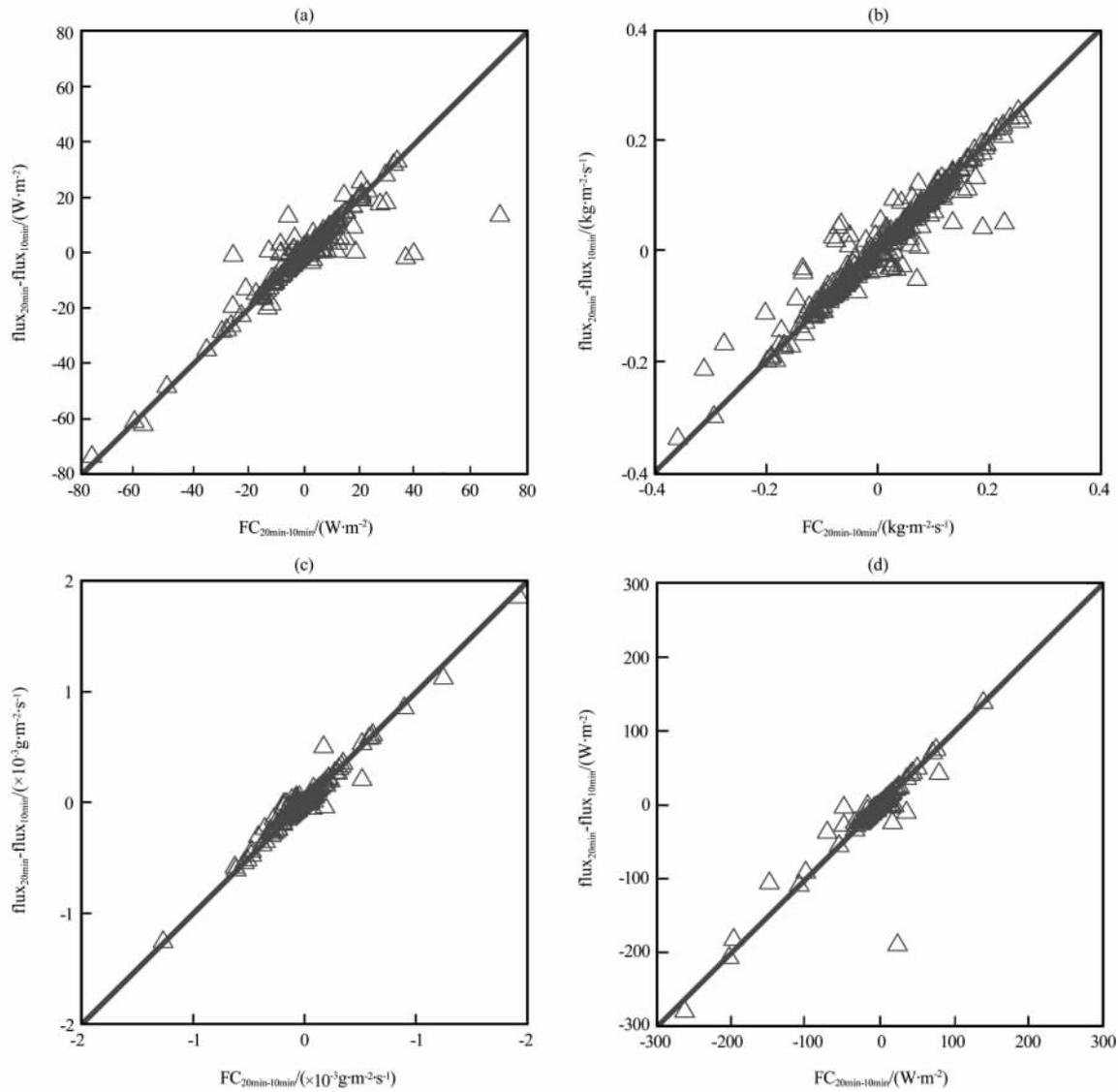


图 2 两种算法计算 20 min 和 10 min 时间平均长度的通量差值比较

(a) 感热通量, (b) 动量通量, (c) CO₂ 通量, (d) 潜热通量

Fig. 2 Comparison of the flux difference between 10 min and 20 min interval from two computation methods. (a) sensible heat flux, (b) momentum flux, (c) CO₂ flux, (d) latent heat flux

大。其中,感热通量差平均在 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 最大达到 $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, 平均占感热通量总量的 10% 左右。对于潜热通量、CO₂ 通量和动量通量, 由平均时间的不同引起的数值变化也非常明显(图 2)。两组数据之间的通量结果差异基本符合正态分布, 这不仅表明平均时间对通量计算结果的影响普遍存在, 同时也说明平均时间的延长(或缩短)可能引起通量计算结果的增大(或减少)。而 $\text{FC}_{20\text{min}-10\text{min}}$ 公式不需要 10 Hz 的原始数据, 仅采用 10 min 和 20 min 两个平均时间处理后数据的平均值就可以准确地描述这一差异。

上述分析表明, 对于感热通量、动量通量、

CO₂ 通量和潜热通量, $\text{FC}_{20\text{min}-10\text{min}}$ 都可以较好地描述当平均时间放大一倍(或者缩小一半)时通量计算结果的变化。两组序列能够较好的吻合, 相关系数达 0.95 以上, 符合统计检验假设。但是图 2 中仍有部分点偏离 1:1 线, 表明 $\text{FC}_{20\text{min}-10\text{min}}$ 还不能完全解释计算结果之间的差异。这可能是计算精度和 高频信号中的无效数据所导致的, 也可能与通量修正方法有关, 具体原因还需要进一步分析。

3.2 任意平均时间

前面讨论了当平均时间采用 10 min 和 20 min 情况时, 二者通量计算结果的差异。实际工作中数据的处理情况可能较为复杂, 但是按照雷诺分解的

一般规律和上一节推导特殊平均时间通量计算差异的思路,仍然可以获得一般情况下(即任意平均时间时)的通量变化。

当计算任意长度时间序列与其任意长度子序列间的通量差异时,仍然可以采用雷诺平均和分解方法推导。假设 w 和 c 时间序列的总长度为 m , 将变量 w 和 c 分解为任意长度的若干段时间子序列,每段的长度分别为 m_1, m_2, \dots, m_n , 则 w 和 c 可表示为

$$w = [w_1; w_2; \dots; w_n] \\ = [\bar{w}_1 + w'_1; \bar{w}_2 + w'_2; \dots; \bar{w}_n + w'_n], \quad (16)$$

$$c = [c_1; c_2; \dots; c_n] \\ = [\bar{c}_1 + c'_1; \bar{c}_2 + c'_2; \dots; \bar{c}_n + c'_n]. \quad (17)$$

由平均算子和脉动项计算的定义可知,对于整

个序列的平均值有:

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n m_i \bar{w}_i / \sum_{i=1}^n m_i, \quad (18)$$

$$\bar{c} = \sum_{i=1}^n m_i \bar{c}_i / \sum_{i=1}^n m_i, \quad (19)$$

对于脉动项则有:

$$w' = [\bar{w}_1 - \bar{w} + w'_1; \bar{w}_2 - \bar{w} + w'_2; \dots; \\ \bar{w}_n - \bar{w} + w'_n], \quad (20)$$

$$c' = [\bar{c}_1 - \bar{c} + c'_1; \bar{c}_2 - \bar{c} + c'_2; \dots; \\ \bar{c}_n - \bar{c} + c'_n], \quad (21)$$

计算代表湍流输送的非线性脉动项 $w'c'$ 时,代入式(9)、(10),并对其取平均,按照子序列的长度增加权重系数 $\frac{m_i}{m}$, 其中 i 代表第 i 段子序列, m_i 代表第 i 段子序列的长度,可表示为

$$\overline{w'c'} = \left\{ \begin{array}{l} [\bar{w}_1 - \bar{w} + w'_1; \bar{w}_2 - \bar{w} + w'_2; \dots; \bar{w}_n - \bar{w} + w'_n] \\ \cdot [\bar{c}_1 - \bar{c} + c'_1; \bar{c}_2 - \bar{c} + c'_2; \dots; \bar{c}_n - \bar{c} + c'_n] \end{array} \right\} \\ = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} \begin{vmatrix} \overline{w_i c_i} & -\overline{w_i c} & \overline{w'_i c_i} \\ -\overline{w_i c} & \overline{w c} & -\overline{w'_i c} \\ \overline{w_i c'_i} & -\overline{w c'_i} & \overline{w'_i c'_i} \end{vmatrix}. \quad (22)$$

由式(22)可知,与子区间平均计算的湍流通量

$\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} \overline{w'_i c'_i}$ 相比,多余项的一般形式为 $\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} (\overline{w_i c_i} - \overline{w_i c} - \overline{w c} + \overline{w c})$, 即通量补偿 FC 表示为

$$FC_{t_2-t_1} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} (\overline{w_i c_i} - \overline{w_i c} - \overline{w c} + \overline{w c}), \quad (23)$$

其中: \bar{w} (或 \bar{c}) 表示 t_2 时段的变量平均值; \bar{w}_i (或 \bar{c}_i) 表示 t_i 时段的变量平均值。 $FC_{t_2-t_1}$ 表征了不同平均时间对湍流通量计算结果影响的一般形式,即分别采用平均时间 t_1 和 t_2 计算湍流通量之差,这一项可以通过平均时间 t_1 和 t_2 内变量的平均值计算,该平均值甚至可以由常规气象站的观测获取。一般情况下 t_2 是 t_1 的整数倍,即 $t_2 = nt_1$ 。由此可见,式(15)为式(23)的特殊情况,即 $t_2 = 2t_1$ 时的计算式。利用式(23)在低频数据或高频数据平均值的基础上计算低频涡旋对湍流通量的贡献,从而对采用任意平均时间的通量进行订正。这样,既保证了数据的时间分辨率,便于分析和比较,又对低频涡旋的贡献有较好的估计。

为了验证 $FC_{t_2-t_1}$ 对低频涡旋在湍流通量贡献的计算能力,本文将 2011 年 9 月 11 日 11:00—15:00(北京时,下同)的 10 Hz 数据分别采用 1, 2,

3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, 60 min 平均进行计算,计算结果见图 3 中黑色柱。

从图 3 中可看到,当 t 较小时,对各通量的计算结果普遍低估。随着 t 的增加,低频尺度湍流信号也被包含在结果内,与 $t=60$ min 的计算结果更加接近。采用 $FC_{t_2-t_1}$ 可以有效地对不同平均时间下通量计算结果的差异进行估计。图 3 中灰色柱表示该式对 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30 min 通量计算结果上进行修正后的结果,修正后的数据更加接近于 $t=60$ min 的计算结果,对通量估计有较大改善。热量通量经过修正后, $t \geq 10$ min 与 $t=60$ min 的计算结果几乎完全一样。因此,在计算时可采用平均时间为 10 min, 最大限度的提高数据的时间分辨率,而将大于 10 min 的低频湍流通量采用 $FC_{t_2-t_1}$ 另行计算。定义采用 $FC_{t_2-t_1}$ 修正后首次与 60 min 计算结果相吻合的时间为最小平均时间。对动量通量、 CO_2 通量和潜热通量,最小平均时间分别出现在 $t=30, 20$ 和 10 min。值得注意的是,在感热通量和 CO_2 通量的计算中,当平均时间大于某一数值时,通量反而有所下降。而对于动量通量,以 $t=10$ min 为界,通量计算结果符号完全不同。由此可见,低频信号(或称平均时间)对计算

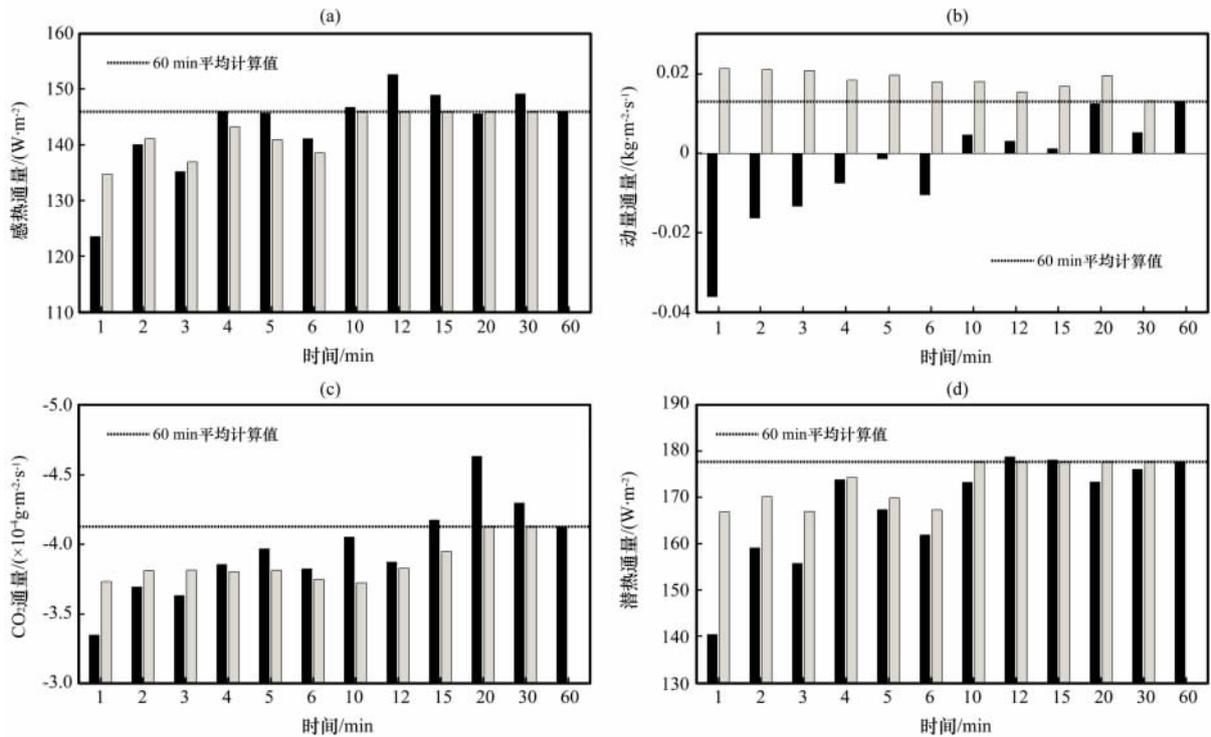


图 3 2010 年 9 月 11 日 11:00—15:00 采用不同平均时间计算的通量值(黑色柱)和采用 $FC_{t_2-t_1}$ 修正后计算的通量值(灰色柱)比较
(a) 感热通量, (b) 动量通量, (c) CO_2 通量, (d) 潜热通量

Fig. 3 Comparison of the fluxes computed with averaging temporal period at different time (black bar) and the fluxes after the corrected $FC_{t_2-t_1}$ formula (gray bar) during 11:00—15:00 on 11 September 2010. (a) sensible heat flux, (b) momentum flux, (c) CO_2 flux, (d) latent heat flux

结果的影响。

4 最佳平均时间

Desjardins et al^[21] 和 Oncley et al^[22] 最先将 Ogive 函数引入了湍流通量的研究中, 该函数是表示不同尺度的湍流对于整体通量计算的影响, 或者说检测是否所有的低频信号都被涡动相关系统所测量到。Ogive 函数是从高频到低频两个变量之间协谱的积分, 其数学表达式为

$$Og_{w,x}(f_0) = \int_{f_0}^{\infty} Co_{w,x}(f) df, \quad (24)$$

其中: $Co_{w,x}$ 表示变量 w 和 x 的协谱; w 表示垂直速度分量; x 可以是水汽密度、 CO_2 浓度、水平速度分量或者温度; f 表示频率。协谱表示不同频率相对贡献的大小, $Og_{w,x}(f_0)$ 函数则表示了协谱由高频到低频的累积计算结果。使用 9 月 11 日 11:00—15:00 的数据计算了 Ogive 函数值(图 4)。由于大气稳定条件对湍流谱特征影响较大^[23], 且湍流信号本身存在着明显的日变化, 因此包含昼夜交替时间段的数据并不适合做 Ogive 函数计算。同时该

函数本身要求使用没有经过插补的原始数据, 这种连续的、没有遗漏的数据在实际观测中不是很多。对数据连续性的要求, 使得 Ogive 函数的使用受到影响。文中采用的数据段中共计 144 000 组数据, 没有进行过差补或者其他处理。

从图 4 中可看出, Ogive 函数在积分到 5 min 时迅速增大, 这表明对于该数据而言, <5 min 的涡旋对通量计算的贡献较大。在 5 min 后, Ogive 函数逐渐上升, 并在 30 min 达到最大值, 此后逐渐减小并趋于无变化。显然, 采用平均时间为 30 min 对于该组序列是较为合适的。若平均时间 <30 min, 则低频涡旋湍流输送会被低估; 若平均时间 >30 min, 则对湍流通量的计算也会产生影响。从图 4 中还看到, 当平均时间 >30 min 后, Ogive 函数逐渐下降, 表明大尺度的涡旋对于通量可能有负值, 这与图 3 中得出的感热通量的计算结果一致。在图 3 中感热通量未经修正的原始计算值中(黑色柱), 当平均时间 <20 min 时, 通量随着平均时间的增加而增加, 并在 20 min 达到最大值。在 20~

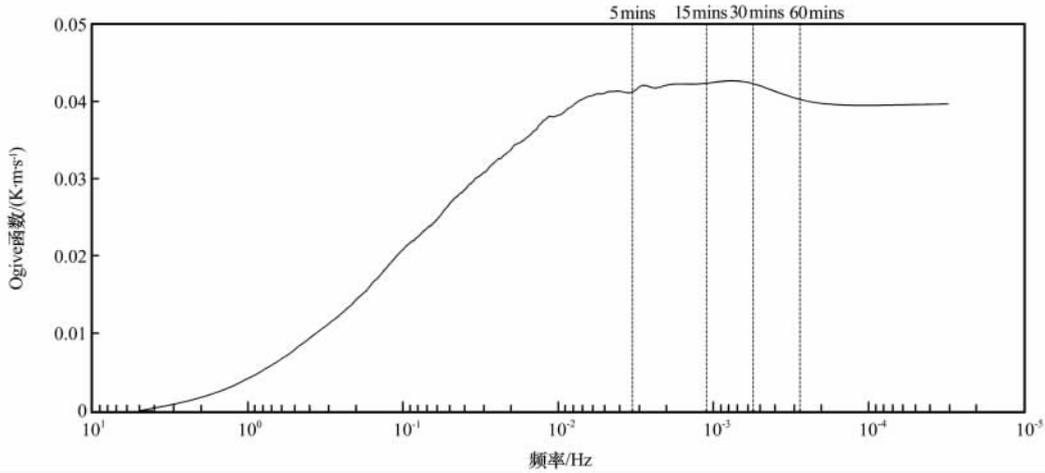


图 4 2010 年 9 月 11 日 11:00—15:00 LOPEX10 湍流观测数据计算的 Ogive 函数值变化

Fig. 4 Variation of the Ogive function calculated LOPEX10 data from 11:00 to 15:00 on 11 September 2011

60 min 之间通量计算值有所减小。

由此可见,通过 $FC_{t_2-t_1}$ 可有效地修正低频涡旋对于湍流通量计算的影响,并使 20 min 平均的计算结果与 60 min 平均的计算结果相同。Ogive 函数和 $FC_{t_2-t_1}$ 之间的计算结果可以相互印证。正如图 3 和图 4 中对于感热通量贡献的分析,Ogive 函数和 $FC_{t_2-t_1}$ 都表明大于 30 min 的低频湍流通量具有负的贡献,即 $Og_{w,x}(f_0)$ 的降低和 $FC_{t_2-t_1}$ 为负值。

正因为 Ogive 函数的使用对数据有着严格的要求,因而在考虑长时间序列中,平均时间对湍流通量计算结果的影响时,该函数的应用范围非常有限。受季节、地点甚至大气稳定度影响的湍流谱随时都在变化。相应的最佳平均时间在较长的时间段,比如 1 天之内也会产生相应的变化。Ogive 函数没有能力获得动态的低频湍流贡献,而 FC 公式则可以简单的将低频湍流贡献从信号中分离,同时

考虑在不同环境和时间的数据特征,进而得到最佳平均时间长度。

湍流的发展与大气稳定度密切相关,正午过后是湍流发展的旺盛时期,而大尺度低频涡旋的发展并不完全符合这一规律^[24]。为证明在一个日循环过程中不同平均时间对湍流通量的影响,同样,以 2010 年 9 月 11 日的湍流观测数据为例,采用 1 h 为平均时间,计算感热通量的日变化过程和不同平均时间结果贡献(图 5)。

分别以 1 min 和 60 min 为平均时间计算感热通量,并在 1 min 计算通量的基础上采用 FC 公式计算了 $FC_{10min-1min}$ 、 $FC_{30min-1min}$ 和 $FC_{60min-1min}$ 三个时段的修正量。若采用 10 min 为平均时间,那么图 5 中白色柱所代表的通量值为每 1 min 时段内计算的平均值加湍流通量补偿值;同样,灰色(黑色)柱所代表的通量为每 1 min 的计算值再加相应时间段的

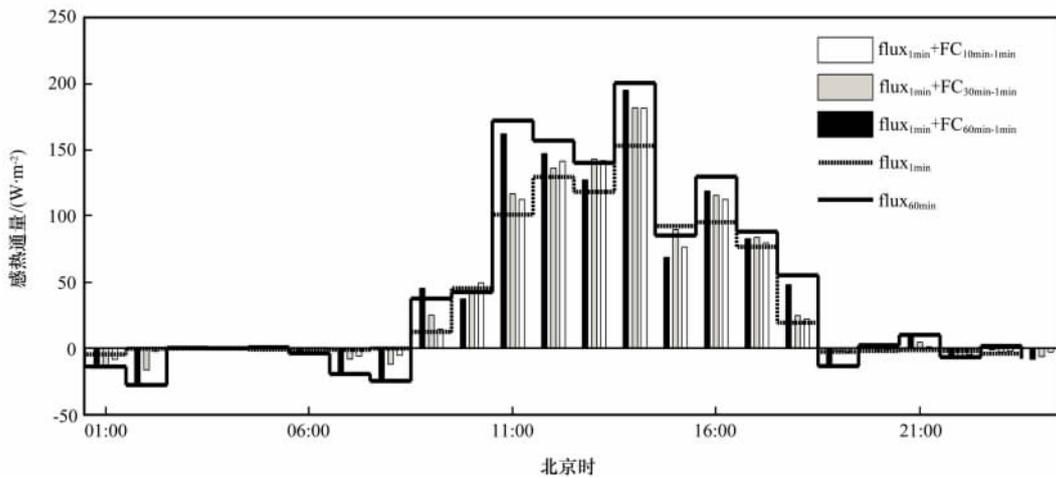


图 5 2010 年 9 月 11 日不同时间平均计算的湍流通量的日变化

Fig. 5 Diurnal change of the turbulent flux calculated from the different averaged time on 11 September 2010

湍流通量补偿值。2010 年 9 月 11 日无降水, 无天气系统过境, 是通量观测比较理想的天气条件。09:00—18:00 是全天湍流强度较大的时段, 这期间的通量贡献占当天通量总量的绝大部分。这一时段虽然有低频涡旋活动, 然而, 从通量的计算结果(图 5)可看出, 高频部分(虚线)在任意时刻都占到总通量(实线)的 60% 以上, 表明这一时段的低频贡献较小。若不考虑 11:00 的计算结果, 则低频涡旋在白天时段的贡献更小。其中, 在 1 min 计算通量基础上采用 $FC_{60\text{min}-1\text{min}}$ 修正的结果显然更接近于直接采用 60 min 为平均时间长度的通量计算结果。采用 $FC_{30\text{min}-1\text{min}}$ 修正后的结果较以 1 min 为平均时间计算的通量也有较大提高, 与 $FC_{60\text{min}-1\text{min}}$ 修正后的结果差别不大。因而, 在既要提高数据时间分辨率, 又要保证包括尽可能多的通量信息的要求下, 采用 30 min 作为平均时间长度是较为合适的。这与 Ogive 函数的计算结果相同, 即 09:00—18:00 之间采用 30 min 平均计算湍流通量是合适的。09:00 之前和 18:00 之后, 大气稳定度较高, 小尺度湍流对湍流贡献很小, 60 min 平均计算湍流通量基本可以完全解释这一时段的通量变化。

因此, 从图 5 中可看到, 在日出前和日落后, 平均时间必须在 60 min 甚至更长才能正确计算湍流通量。然而, 夜间湍流发展较微弱, 如采用过长的平均时间, 湍流计算结果中包含的平流、膨胀和其他非湍流运动的贡献较大, 使计算结果产生较大误差。仅从 $FC_{t_2-t_1}$ 公式采用考虑白天最佳平均时间的思路是不能够判断夜间情况的, 这是该方法的局限性之一, 即只能用于选择湍流充分发展时的平均时间。由此可见, 最佳平均时间不仅随着下垫面、高度和地形的变化而改变, 湍流特征的日变化主要是湍流谱随时间的变化, 对于选择平均时间有着重要的影响。

5 讨论

平均时间是影响湍流通量计算的重要参数之一, 大尺度的低频涡旋可能导致通量计算结果的符号发生改变。本文通过分析 LOPEX10 期间的湍流脉动观测资料, 研究了采用不同平均时间 t_1 和 t_2 时计算湍流通量之差异, 发展了通过不同平均时间 t_1 和 t_2 内变量平均值的计算湍流通量的方法, 可以在低频数据或高频数据平均值的基础上计算低频涡旋对于湍流通量的贡献, 从而对采用任意平均时间的通量进行订正。由于不同时段湍流通量之差可以

通过变量在不同时间段平均值计算, 这样, 既保证了计算结果的时间分辨率, 便于分析和比较, 又对低频涡旋的贡献有较好的估计。

6 结论

通过上述分析, 得到以下主要结论:

(1) 利用雷诺平均和分解方法可以准确地计算较长平均时间与较短平均时间计算湍流通量的差额, 客观描述低频信号对于通量计算结果的影响。这部分差额通常认为是由低频涡旋造成的。因此, 通过对低频涡旋计算的结果进行补充, 拓展低频涡旋对于湍流计算影响的认识。

(2) 在湍流充分发展的情况下, 本研究发展的 FC 公式算法可以将低频信号对于湍流的贡献与高频信号分离, 尽可能采用较短的平均时间, 提高数据时间分辨率的同时, 有效估计低频信号的贡献。

(3) 在湍流发展的日出前和日落后, FC 公式算法不能有效的确定平均时间。

(4) Ogive 函数和本研究发展的公式算法可以确定不同环境下涡动相关系统计算湍流通量的简化方法。采用该函数可以计算出处理 LOPEX10 湍流观测数据时, 晴天白天的平均时间应采用 30 min 为宜, 而夜间的最佳平均时间需要考虑其他因素综合判断。

参考文献

- [1] Su Z, Wen J, Wagner W. Preface advances in land surface hydrological processes-field observations, modeling and data assimilation[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(2): 365-367.
- [2] 仲雷, 马耀明, 苏中波, 等. 雨季前后珠峰地区近地层气象要素、辐射及能量平衡分量变化特征[J]. *高原气象*, 2007, 26(6): 1269-1275.
- [3] Jackson D, Launder B. Osborne Reynolds and the publication of his papers on turbulent flow[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2007, 39: 19-35.
- [4] Liu R, Wen J, Wang X, et al. Actual daily evapotranspiration estimated from MERIS and AATSR data over the Chinese Loess Plateau[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(1): 47-58.
- [5] 宫丽娟, 刘绍民, 双喜, 等. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性[J]. *高原气象*, 2009, 28(2): 246-257.
- [6] 张宏升, 刘新建, 朱好, 等. 北京北郊冬季大风过程湍流通量演变特征的分析研究[J]. *大气科学*, 2010, 34(3): 661-668.
- [7] 李锁锁, 吕世华, 柳媛普, 等. 黄河上游玛曲地区空气动力学参数的确定及其在陆面过程模式中的应用[J]. *高原气象*, 2010, 29(6): 1408-1413.

- [8] Mcnaughton K G, Laubach J. Power spectra and cospectra for wind and scalars in a disturbed surface layer at the base of an advective inversion[J]. *Bound-Layer Meteorol*, 2000, 96: 143–185.
- [9] Wolf A, Laca E A. Cospectral analysis of high frequency signal loss in eddy covariance measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2007, 7: 13151–13173.
- [10] Sakai R K, Fitzjarrald D R, Moore K E. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces[J]. *J Appl Meteorol*, 2001, 40(12): 2178–2192.
- [11] Berger B W, Davis K J, Yi C X, et al. Long-term carbon dioxide fluxes from a very tall tower in a northern forest: Flux measurement methodology[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2001, 18(4): 529–542.
- [12] Moncrieff J, Clement R, Finnigan J, et al. Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series [Z]. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*, 2004, 29: 7–31.
- [13] 涂钢, 刘辉志, 董文杰. 半干旱区不同下垫面近地层湍流通量特征分析[J]. *大气科学*, 2009, 33(4): 719–725.
- [14] 王少影, 张宇, 吕世华, 等. 应用通量方差估算戈壁绿洲下垫面湍流通量的研究[J]. *大气科学*, 2010, 34(6): 1214–1222.
- [15] Wen J, Wang L, Wei Z G. An overview of the LOess Plateau mesa region land surface process field EXperiment series (LOPEXs)[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(6): 945–951.
- [16] 李宏宇, 张强, 赵建华, 等. 陇中黄土高原地表能量不平衡特征及其影响机制研究[J]. *高原气象*, 2010, 29(5): 1153–1162.
- [17] 刘远永, 文军, 韦志刚, 等. 黄土高原塬区地表辐射和热量平衡观测与分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(5): 928–937.
- [18] Zhang Y, Liu H, Foken T, et al. Coherent structures and flux contribution over an inhomogeneously irrigated cotton field[J]. *Theor Appl Climatol*, 2010, 103(1–2): 119–131.
- [19] Foken T. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory[J]. *Bound-Layer Meteorol*, 2006, 119(3): 431–447.
- [20] Zhang Y, Liu H, Foken T, et al. Turbulence spectra and cospectra under the influence of large eddies in the Energy Balance EXperiment (EBEX) [J]. *Bound-Layer Meteorol*, 2010, 136(2): 235–251.
- [21] Desjardins R L, Macpherson J I, Schuepp P H, et al. An evaluation of aircraft flux measurements of CO₂, water-vapor and sensible heat[J]. *Bound-Layer Meteorol*, 1989, 47(1–4): 55–69.
- [22] Oncley S P, Businger J A, Friehe C A, et al. Surface-layer profiles and turbulence measurements over uniform land under near-neutral conditions[J]. *Ninth Symposium on Turbulence and Diffusion*, 1990: 237–240.
- [23] 倪攀, 金昌杰, 王安志, 等. 科尔沁草地不同大气稳定度下湍流特征谱分析[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(12): 2495–2502.
- [24] Foken T, Wimmer F, Mauder M, et al. Some aspects of the energy balance closure problem [J]. *Atmos Chemis Phys*, 2006, 6: 4395–4402.

Influence of the Different Averaging Period on Computing the Turbulent Fluxes Using LOPEX10 Data

LÜ Shao-ning, WEN Jun, ZHANG Yu, WANG Shao-ying,
ZHANG Tang-tang, TIAN Hui, LIU Rong

(Key Laboratory for Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Region, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The latent heat and sensible heat exchange between land surface and atmosphere can be obtained by processing the eddy covariance system observation data. However, the averaging period has essential influence on computing turbulent flux. The datasets collected from the LOess Plateau mesa region land surface process field EXperiment series (LOPEXs) have been analyzed to assess this influence. A formula named Flux Compensation (FC) has been derived for calculating the flux difference among the specified averaging periods. It shows that this formula could be applied to compensate flux loss due to shorter averaging periods and analyze the contribution from low-frequency eddies with a correlation coefficient around 0.95 compared to that directly calculated from the eddy covariance system observation data. After carefully calculations and analyses, it is concluded that the optimum averaging period for LOPEXs proved to be 30 min, and FC could also be applied to any other in-site data. It is the low-frequency eddies that cause the difference in flux with the different averaging periods. FC could be a technique in identifying optimum averaging periods and compensates the flux consumed by low-frequency eddies while keeping its high temporal resolution.

Key words: Eddy covariance; Averaging period; Loess Plateau; Turbulent flux