

涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究

陈家宜^{1,2} 范邵华¹ 赵传峰² 肖 雪² 蔡旭辉² 刘辉志³

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

2 北京大学环境科学中心, 北京 100871

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 针对野外实验所发现的不同观测法测定地表能通量不平衡问题, 进行了均匀加热大气边界层的大涡模拟实验。用模拟的湍流风、温度和湿度涨落的时间序列证实, 对流边界层低频涡普遍存在, 并经常以一簇一簇热泡的形式出现。风速较小时, 有限时长的取样不足以捕捉低频涡的贡献, 可造成涡旋相关法测量的统计量异常偏低。仿照涡旋相关法的步骤进行数据处理发现, 经去除平均或趋势计算的温度和湿度通量偏低程度在边界层下部随观测高度的增高而显著, 其中尤以湿度通量为甚。其结果在一定程度上可以解释低风速条件下地表能通量测量的不闭合问题, 但是尚不能完全解释诸如青藏高原实验出现的严重不闭合。文中对此作了探讨性的讨论。

关键词 通量不平衡 涡旋相关法 低频涡旋 大涡模拟

文章编号 1006-9895(2006)03-0423-10

中图分类号 P425

文献标识码 A

The Underestimation of the Turbulent Fluxes in Eddy Correlation Techniques

CHEN Jia-Yi^{1,2}, FAN Shao-Hua¹, ZHAO Chuan-Feng²,
XIAO Xue², CAI Xu-Hui², and LIU Hui-Zhi³

1 *Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*

2 *College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871*

3 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract A series of large eddy simulations is performed for convective boundary layer (CBL) with homogeneously heated surface. The research aims at investigating the lack of energy budget closure on field energy flux measurements reported in recent years. Time series of simulated turbulent wind, temperature and humidity show the frequent occurrence of low-frequency eddies, which appear as the cluster-like thermals in the CBL. Following data processing procedures adopted in eddy correlation techniques, the covariances with linear tendency removal or mean removal only are calculated based upon the data produced from the large eddy simulation (LES). The results show that the failure to capture low-frequency eddies due to finite sampling length is responsible for the great loss of fluxes evaluated by eddy correlation techniques in low wind CBL. The underestimation of energy fluxes increases with increasing of the height and decreases with increasing of the wind speed. The results may enhance the understanding of the inadequate sampling problem in eddy correlation techniques.

Key words flux imbalance, eddy correlation, low-frequency eddy, large eddy simulation

收稿日期 2005-02-18, 2005-08-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 49790020、49975009, 国家重点基础研究发展规划项目 G200007790, 高等学校博士点专项科研基金 98000135, 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开放课题

作者简介 陈家宜, 男, 1936 年出生, 教授, 研究方向: 大气湍流, 大气边界层。E-mail: jychen@pku.edu.cn

1 引言

地表能量与物质通量是反映地表与大气相互作用的关键性参量,除了边界层气象学研究本身以外,各种尺度气象模式或生态系统-大气模式都直接或通过参数化方式将其作为重要的预报变量或诊断变量。基于快速响应探头的涡旋相关法已被广泛应用,并被认为是观测湍流通量的最优方法。近年来有大量关于涡旋相关法测定的感热通量与潜热通量之和小于地表有效能的报道,即所谓的通量不平衡问题或通量不闭合问题。

按照能量守恒原理,无相变过程大气边界层气柱的能量通量满足如下守恒方程^[1]:

$$R_n - G = H + \lambda E + S + A, \quad (1)$$

其中, R_n 和 G 分别是地表面的净辐射通量和土壤热通量; H 和 λE 分别是气柱顶的感热通量和潜热通量, S 统一表示气柱和植物冠层热储存(含光合作用能)或辐射通量散度, A 是水平方向热平流散度。高度不高且植被热储存可忽略时,若无系统性观测误差,则测量的湍流通量应与地表有效能量相等,

$$R_n - G = H + \lambda E. \quad (2)$$

所谓的通量不平衡,即(2)式右边涡旋相关法测得的 $H + \lambda E$ 不等于左边有效能的独立测值。通常能通量比 $r = (H + \lambda E) / (R_n - G)$ 小于 1, 因此,有时也称为涡旋相关法测量的通量丢失。国外的典型报道可参阅文献[1]和[2],前者综合近年来各种植被地面上的观测结果,后者还包括 FIFE 和 BOREAS 等实验的飞机通量观测。我国早先进行的黑河实验(HEIFE)就已指出通量不闭合的事实。中日合作进行的青藏高原大气科学试验(TIPEX)和 GAME/Tibet 气象实验的各边界层观测站得到的通量比 r 的日间值大多在 0.5~0.9 之间,有优良质量控制的当雄和安多等站仅在 0.5~0.6 上下^[3~5]。这样的不闭合程度与 Mahrt^[2]所给出的低风速条件下的若干野外观测结果相当。

上述的不平衡问题如果出在涡旋相关法,那么问题出在哪儿及如何改进和正确运用该方法成为边界层气象学的重要研究问题。近年来,涡旋相关法已普遍应用于陆地生态系统与大气二氧化碳交换的测量和长期净通量估算。注意到二氧化碳输送方向日夜相反,而其净通量为代数和的事实,观测中的小量系统偏差将导致结果值的严重歪曲^[6]。

本文用大涡模拟方法产生地面均匀加热对流边界层的风温湿湍流序列,考察通常涡旋相关法数据处理中去除平均量和线性趋势后给湍流热通量计算带来的误差,证实通常的取样长度不足以捕捉低频涡的贡献可造成通量低估,并且发现涡旋相关法测量的偏低程度随观测高度增高而显著,随风速增大而减弱。

2 湍流量时空序列的产生与统计

2.1 大涡模拟

采用北京大学开发的大涡模式产生地面均匀加热对流边界层的湍流风、温度和湿度的时空数据序列。模式的原理和操作运用可参见文献[7~9]。尽管本文模拟的参数与此前的研究不尽相同,但温湿风平均廓线及高阶矩湍流特征量等都与此前报道的结果有很好的可比性,这里不再赘述。

模拟的特征参数列于表 1,包括 5 种风速条件下的风、温度和湿度的模拟。模拟的初始条件为 0~900 m 的温度和湿度分别取 273 K 的等位温和 8 g/kg 的等湿度。900 m 以上为 2 K/100 m 的逆位温和 $-1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}/100 \text{ m}$ 的湿度递减,比湿小于 2 g/kg 以上气层设置成等比湿廓线。除地面风速为零外, x 方向(纵向)设置成表列背景风速的均匀风廓线, y 方向(侧向)和 z 方向(垂向)平均风速为零。

启动大涡模拟后,一般要经过特征时间 z_i/ω_* 的 5~10 倍时长的积分,对流边界层才能调整到与地面加热条件相适应的准定常态^[8]。这里, z_i 表示对流边界层高度, ω_* 表示对流速度,

$$\omega_* = [(g/T)z_i(\overline{wT'})_0]^{1/3} \quad (3)$$

其中, $(\overline{wT'})_0$ 是表征地面感热通量的温度通量。表 1 所列各组模拟的特征时间约 10 min,故本文只使用积分 60 min 以后的输出数据进行分析。

2.2 数据处理方法

为了考察涡旋相关法计算湍流通量可能存在的问题,对大涡模拟的原始数据进行不同方式处理,分别获得空间平均意义下(以下称空间统计法)和仿照涡旋相关法(以下称时间统计法)计算的平均量、涨落量和通量等。首先,从原始的时空数据计算各模拟量在垂向指定层面(高度)的空间平均值和涨落值,

表 1 大涡模拟的基本参数

Table 1 The parameters for the large eddy simulations

参数名称	数值
Parameter	Parameter value
空间大小	水平方向 6.4 km, 垂直方向 1.5 km
Space size	Horizontal direction: 6.4 km, vertical direction: 1.5 km
网格数	64 (x 方向) $\times$ 64 (y 方向) $\times$ 30 (z 方向)
Grid number	64 (x direction) $\times$ 64 (y direction) $\times$ 30 (z direction)
时间步长	3 s
Time step	
地表粗糙度	0.1 m
Surface roughness	
背景风速	0, 0.5, 1, 2, 4 m/s
Background wind speed	
地面加热率	$\langle w'T' \rangle_0 = 0.15 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Surface heated rate	
地面湿度通量	$\langle w'q' \rangle_0 = 0.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Surface humidity flux	

$$\langle w \rangle_{k,t} = \frac{\sum_{i,j} w(i,j,k,t)}{N}, \quad (4)$$

$$\langle s \rangle_{k,t} = \frac{\sum_{i,j} s(i,j,k,t)}{N}, \quad (5)$$

$$w'(i,j,k,t) = w(i,j,k,t) - \langle w \rangle_{k,t}, \quad (6)$$

$$s'(i,j,k,t) = s(i,j,k,t) - \langle s \rangle_{k,t}, \quad (7)$$

其中, w 和 s 分别是垂直速度和标量值(温度 T 或比湿 q), i, j, k 表示三个方向的格点位置, t 表示时刻。“ $\langle \rangle$ ”代表指定水平层面的空间平均, “ $'$ ”代表与空间平均的偏差。由于均匀加热边界层不存在热力驱动辐散辐合, 平均垂直速度应为零, 模拟数据的计算结果证明的确如此。(4)、(5)两式右边的分母 N 表示水平层面的总格点数。于是, k 高度、 t 时刻的标量通量可由下式给出,

$$\langle w's' \rangle_{k,t} = \left\{ \sum_{i,j} w'(i,j,k,t) \frac{1}{2} \left[s' \left(i,j,k + \frac{1}{2}, t \right) + s' \left(i,j,k - \frac{1}{2}, t \right) \right] \right\} / N. \quad (8)$$

由于模式在垂直方向对不同变量采用交错网格求解, 这里的温度和湿度涨落是上下各半格两点的平均。以上各式只计算大涡模拟可求解部分的湍流涨落和统计量, 在定量比较中再加入次网格的贡献。

由于参数化的误差和计算网格不够精细, 在次网格湍流起重要作用的近地面层和边界层顶仍有一定误差, 除此之外, 不致于影响大涡旋作用的分析 and 量的相对比较。

固定点涡旋相关法观测数据处理有多种方式, 最常用的有去除平均值和去除线性趋势两种。去除平均值方式获得平均量和湍流量的公式为

$$\bar{w}(i,j,k) = \frac{\sum_t w(i,j,k,t)}{\tau}, \quad (9)$$

$$\bar{s}(i,j,k) = \frac{\sum_t s(i,j,k,t)}{\tau}, \quad (10)$$

$$w'(i,j,k,t) = w(i,j,k,t) - \bar{w}(i,j,k), \quad (11)$$

$$s'(i,j,k,t) = s(i,j,k,t) - \bar{s}(i,j,k), \quad (12)$$

这里, $\bar{w}(i,j,k)$ 和 $\bar{s}(i,j,k)$ 表示该点的瞬时量在取样时间段 τ 内的平均值。标量通量的计算值为

$$\langle w's' \rangle_{i,j,k} = \left\{ \sum_t w'(i,j,k,t) \frac{1}{2} \left[s' \left(i,j,k + \frac{1}{2}, t \right) + s' \left(i,j,k - \frac{1}{2}, t \right) \right] \right\} / \tau. \quad (13)$$

去除线性趋势的方式是对时间序列 $w(i,j,k,t)$ 和 $s(i,j,k,t)$ 进行线性最小二乘拟合, 得到线性变化的数据系列 $w_t(i,j,k,t)$ 和 $s_t(i,j,k,t)$, 称为趋势系列。从原始数据逐一扣除趋势系列对应值后再计算湍流通量, 其表达式为

$$\overline{(w's')}_{i,j,k}^D = \left\{ \sum_t [w(i,j,k,t) - w_t(i,j,k,t)] \cdot \right.$$

$$\left. \left[s \left(i,j,k \pm \frac{1}{2}, t \right) - s_t \left(i,j,k \pm \frac{1}{2}, t \right) \right] \right\} / \tau, \quad (14)$$

上式左边上标 D 表示去除趋势; 为了书写简约, 右边标量 s 的写法表示已作过 $k+1/2$ 层和 $k-1/2$ 层平均。

(9)~(14)式的含义和顺序与涡旋相关法确定湍流量的数据操作步骤相仿。而去除平均值的统计是去除线性趋势的特例。

物理上, 垂直湍流速度与标量涨落乘积在水平面上的均值即是垂向湍流通量。为此, 我们将(8)式计算的空间平均值加相应的次网格通量, 再取一定时段的时间平均为通量的“真值”, 以此作为与涡旋相关法比较的基准。事实上, 若空间范围够大、时间够长, 湍流场接近各态历经, 那么空间统计法的结果可认为是系综平均值。从下文可知, 空间统计法得到的温度通量随高度接近理论上的线性变

化。

3 涡旋相关法低估通量的模拟事实

3.1 对流边界层的低频涡

涡旋相关法测定湍流通量的一个基本要求是取样时段够长、足以覆盖对通量有贡献的各种湍流涡旋。如果周期长于取样长度的湍涡对湍流通量有显著作用,就将导致通量测定值的亏缺。目前,近地面层或塔层观测通常以 30 min 上下的观测数据为样本。为此,对各组模拟产生的湍流量进行 30 min 长度(600 个数据点)的滑动平均,实现低通过滤。以水平网格中心位置 50 m 高度为例的原始涨落和过滤后的涨落示于图 1 和图 2,其中横坐标的数字表示步长为 3 s 间隔的时序, w' 是 50 m 高度值, T' 和 q' 分别是上下半网格点的平均值,三者都是(6)、(7)两式计算的瞬时值与同高度水平空间平均值的偏差。为了清楚起见,其中图 1a 和图 2a 左右纵坐标的零点有挪动。

由图 1 和图 2 可以看出,经 30 min 滑动平均后,各要素仍旧呈现随时间变化,并且湍流风与温度及湿度继续保持较高的相关。这种特点在低风速条件下非常显著,但随着风速增大较快减弱。经 60 min 长度的平滑过滤后同样有上述特征出现(图略),但变化幅度远不及 30 min 的情形,仅在零风速的时候比较显著。定性表明特征周期在 30~60 min 的湍涡还携带着较多的能量,同时对湍流输送通量有不可忽视的贡献。

3.2 取样长度对通量值的影响

本小节采用不同时间长度对模拟数据进行统计分析,考察取样长度的低频过滤作用对涨落方差和协方差计算值的影响。做法相当于涡旋相关法的去除平均值处理,即取 60~300 min 的模拟数据,按(9)~(12)式计算各取样长度的时间平均(分组平均)及偏差量,再从后者计算方差和协方差。图 3 是高度 50 m 背景风速 0、1 m/s、2 m/s 和 4 m/s 的结果。为了清楚起见,又将不同风速湿度通量 $\overline{w'q'}$ 单独示于图 4,图中各数据点都以 180 min 长度的计算的平均值归一化,并且都采用水平面上所有格点的平均值。定量结果表明:低风速时,短取样时间造成的统计量偏低可以很显著,随着风速的增大或取样时间加长低估程度趋向减弱。这是因为风速大或时间长的时候,观测样品可遍历较多的大涡

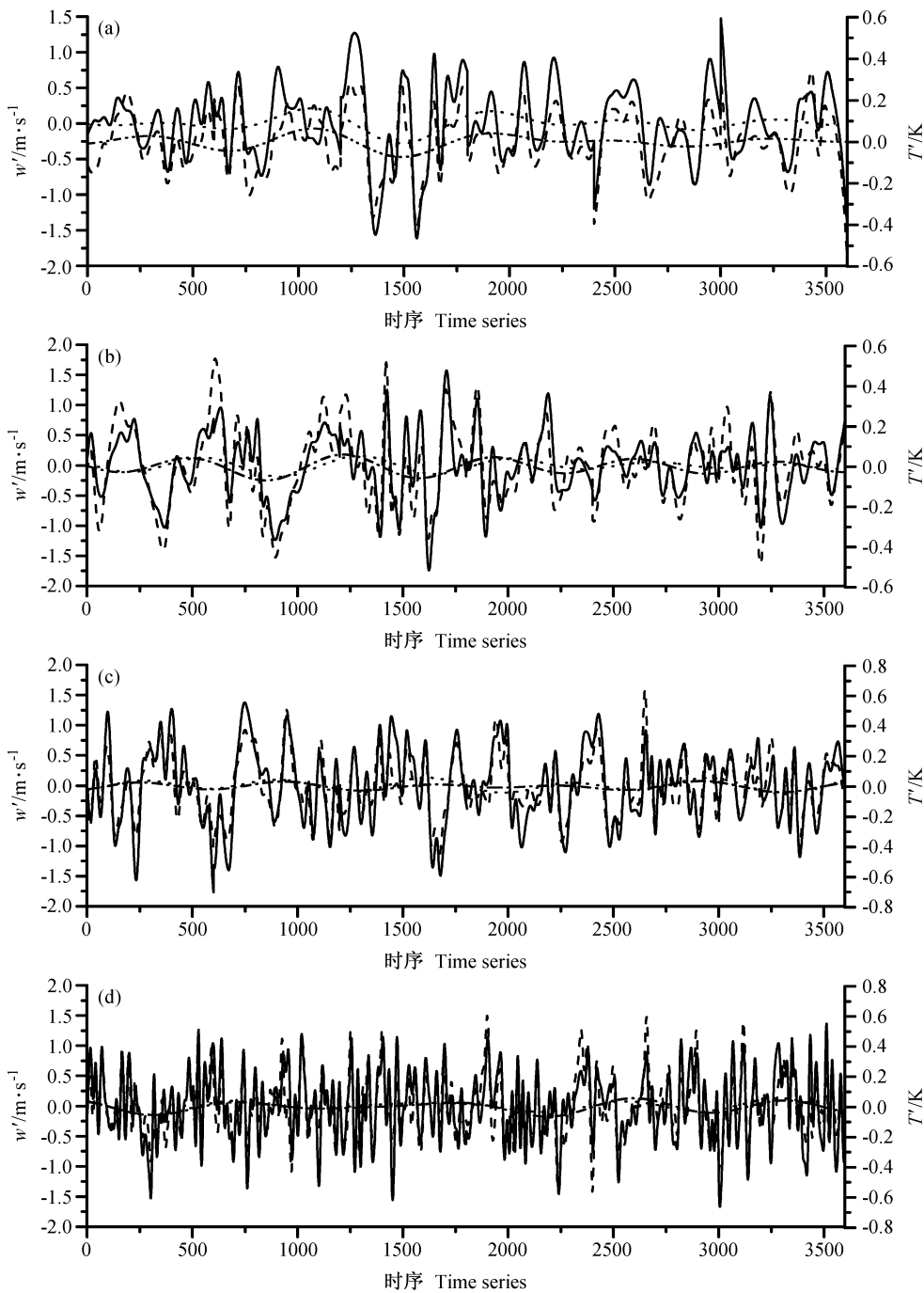
旋。同样条件下温度和湿度通量的低估程度相近。以零风速 50 m 高度的温度和湿度通量为例,如果取样长度 10 min,温度和湿度通量约只有 3 小时值的 70% 上下,取样 30 min 约 87%。在风速为 4 m/s 的时候,两种取样长度获得的通量份额分别可达 93% 和 98%。这些结果在定性上与 Sakai 等^[1]对森林植被野外资料的同类分析结论有良好的可比性。值得指出的是,作为归一化量的 3 h 时间平均值系统性地小于同时段的空间平均。就湿度通量而言,4 种风速(0、1、2、4 m/s)条件下的比例依次为 92.5%、95.0%、97.1%、98.7%,也就是说,即使在准稳态水平均匀的不稳定近地面层,固定点的长时间观测取样仍会不同程度地漏掉低频涡旋的通量份额。

从图 3 还可以看出,同样条件下各变量方差的低估程度大于温度和湿度通量。目前,对大气边界层湍流谱低频区的性质,特别是反映输送特性的通量协方差谱的认识还很不够。从这个事实可以推论,均匀准稳态不稳定边界层中标量属性的协谱(cospectrum)在低频区的降落快于方差谱(spectrum)。如果方差谱在低频区随频率增加按 +1 的坡度增长的话,那么通量谱的坡度应当大于 1。

3.3 涡旋相关法的通量低估

以下仿照涡旋相关法通常采用的两种数据处理方式,计算 30 min 取样长度情况下 w' 与 T' 和 q' 的协方差,目的是考察涡旋相关法的通量低估随高度的变化。所取数据是各组 120~150 min 的模拟结果。第一种处理只消去平均值,按照(13)式计算;第二种处理去除掉线性趋势后按照(14)式计算。为了获得稳定可比的结果,对同高度逐网格点计算的通量再进行空间平均,得到该高度涡旋相关法计算的通量值。供对比的“真值”是先以(8)式表示的空间统计法计算 120~150 min 每一个时步的通量,然后求该时段的平均。

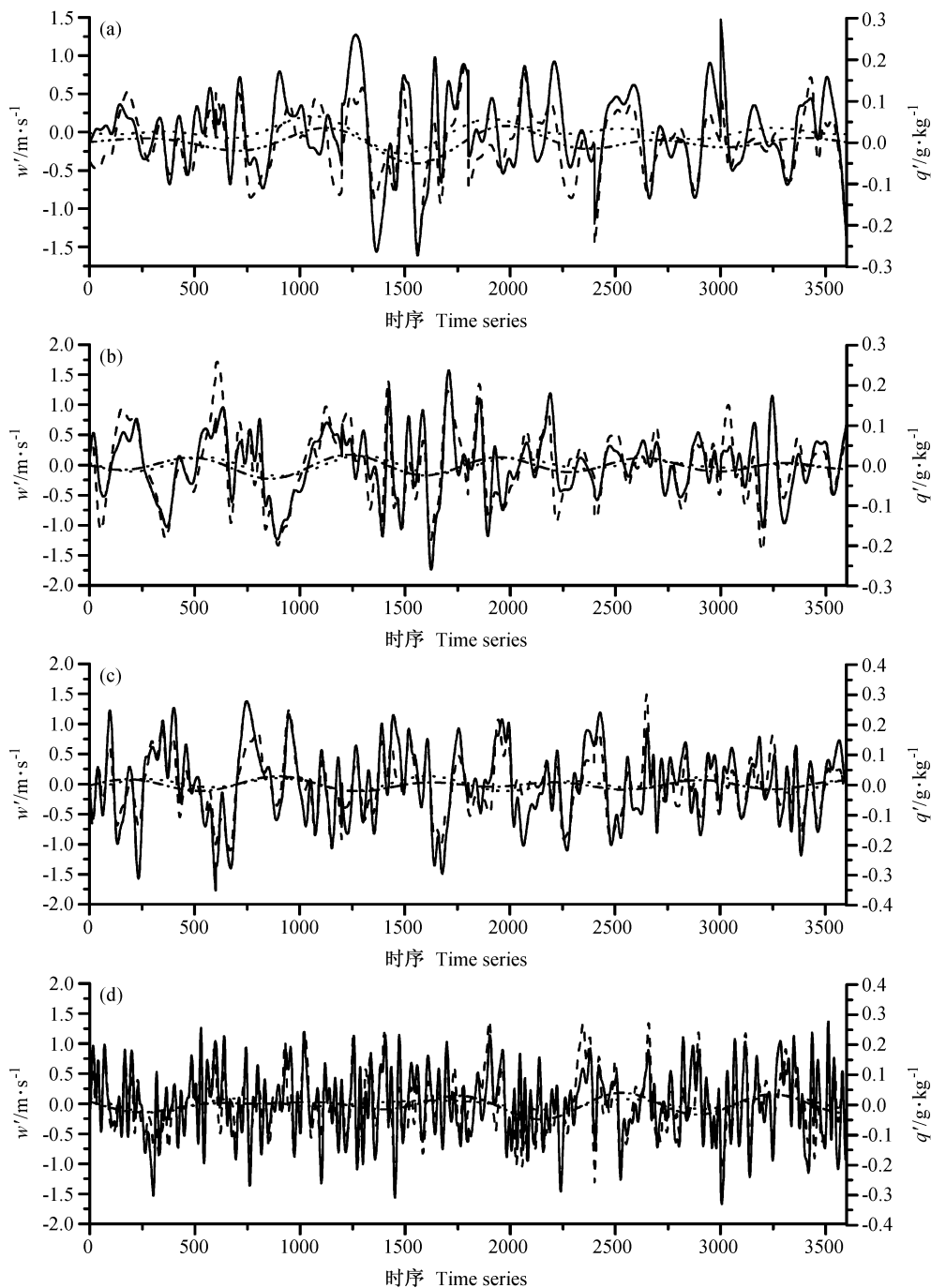
几种风速情况下的计算结果见图 5 和图 6。两组图显示出均匀对流边界层的中下部,涡旋相关法低估湍流通量的程度随高度增加迅速扩大的鲜明特征。消除线性趋势的结果偏低程度更加严重。以温度通量为例,在零背景风速时第一层 50 m 高度的温度通量的计算值为实际值的 70.1%(大涡模式在地面上只是次网格通量而无分析价值)。位于 $0.25z_i$



——: 原始的 w' Original w' : 过滤后的 w' Smoothed w' ----: 未过滤的 T' Original T' - · - ·: 过滤后的 T' Smoothed T'

图 1 大涡模拟的 50 m 上下气层 w' 和 T' 的原始值与滑动平均值: (a) 背景风速 0 m/s; (b) 背景风速 1 m/s; (c) 背景风速 2 m/s; (d) 背景风速 4 m/s。未过滤的涨落是模拟启动后 90~270 min 的数据, 过滤后的涨落是 75~285 min 数据 30 min 的滑动平均结果。横坐标的数字表示 3 s 间隔的时序

Fig. 1 Time series of the w' and T' produced from the large eddy simulation (LES) during 90~270 min and the smoothed average of 30 min interval during 75~285 min for 0 m/s background wind (a), 1 m/s background wind (b), 2 m/s background wind (c) and 4 m/s background wind (d)



—: 原始的 w' Original w' : 过滤后的 w' Smoothed w' ----: 未过滤的 T' Original T' -·-·-: 过滤后的 T' Smoothed T'

图2 大涡模拟的50 m上下气层 w' 和 q' 的原始值与滑动平均值:(a)背景风速0 m/s;(b)背景风速1 m/s;(c)背景风速2 m/s;(d)背景风速4 m/s。未过滤的涨落是模拟启动后90~270 min的数据,过滤后的涨落是75~285 min数据30 min的滑动平均结果。横坐标的数字表示3 s间隔的时序

Fig. 2 Time series of the w' and q' produced from the large eddy simulation (LES) during 90–270 min and the smoothed average of 30 min interval during 75–285 min for 0 m/s background wind (a), 1 m/s background wind (b), 2 m/s background wind (c) and 4 m/s background wind (d)

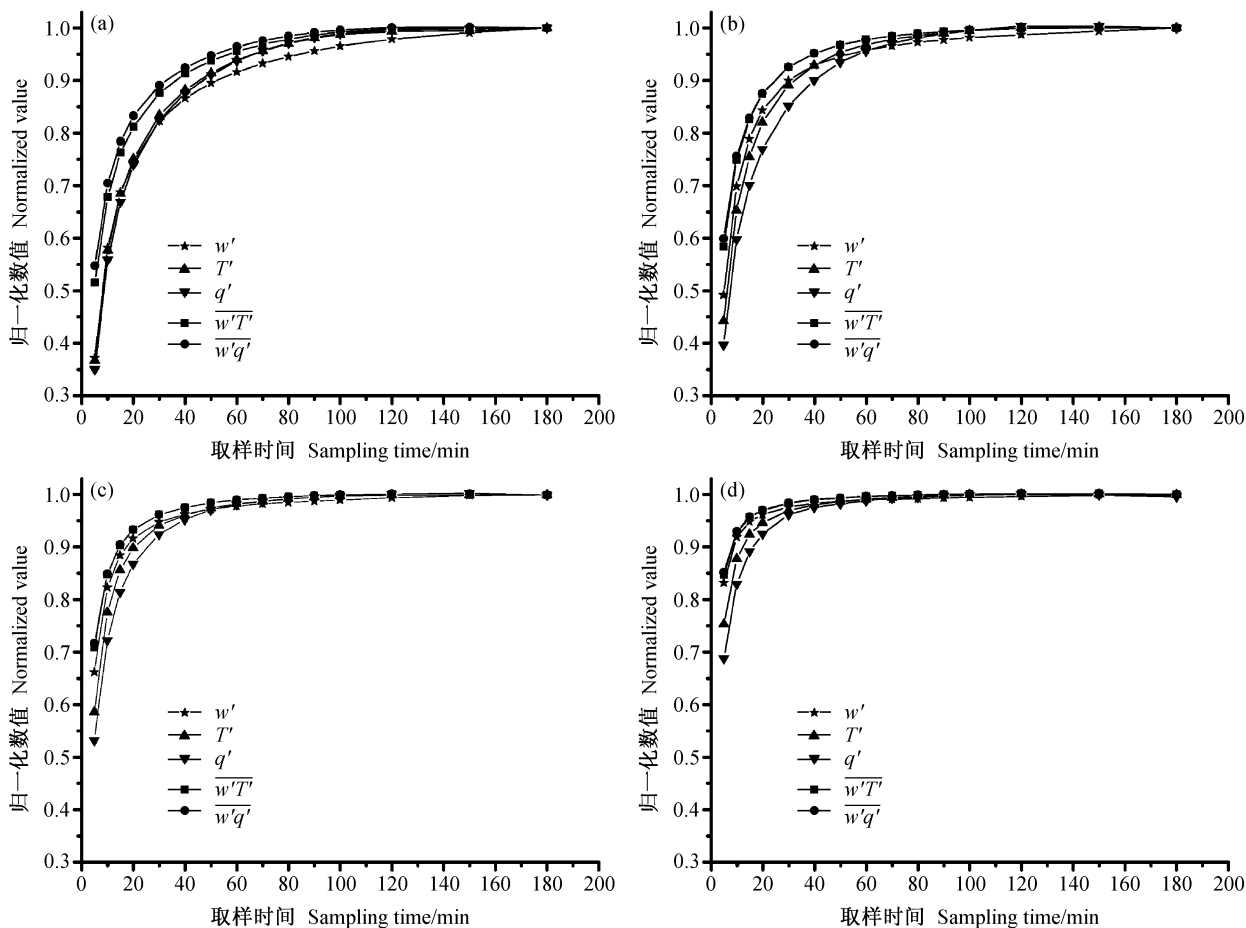


图3 不同取样长度计算的 w' 、 T' 和 q' 的方差、协方差与 180 min 值的比值: (a) 背景风速 0 m/s; (b) 背景风速 1 m/s; (c) 背景风速 2 m/s; (d) 背景风速 4 m/s

Fig. 3 Variance and covariance of w' , T' and q' , calculated from different sampling length, normalized by 180 min value: (a) Background wind speed 0 m/s; (b) background wind speed 1 m/s; (c) background wind speed 2 m/s; (d) background wind speed 4 m/s

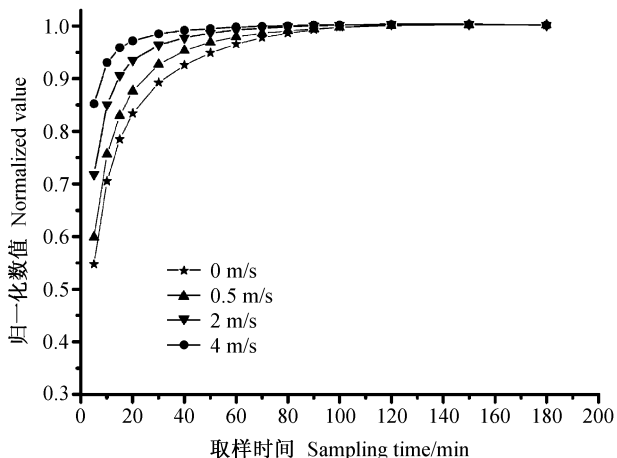


图4 不同取样长度计算的 $\overline{w'q'}$ 与 180 min 值的比值

Fig. 4 $\overline{w'q'}$ calculated from different sampling length, normalized by 180 min value

$\sim 0.5z_i$ 高度层比例最低, 只有 30%~40%。这些结果意味着, 低风速条件下, 即使位于均匀地面上的塔或系留气球的野外观测, 通常计算的湍流热通量总是偏低, 并且在边界层中下部偏低程度随高度增加。这种偏低或通量损失现象在均匀边界层情况下随风速增大很快减弱, 加长取样时间也可起到减少通量损失的效果(图略)。另一个事实是在同样条件下湿度通量的损失大于温度通量, 其原因有待于进一步阐明。

4 讨论

地面与大气边界层的物质和能量通量的观测法与精确度一直是微气象学关注的重要问题。关于取样长度对大气湍流量的影响方面, Wyngaard^[10]曾在 Lumley 和 Panofsky^[11] 开创性的研究基础上作

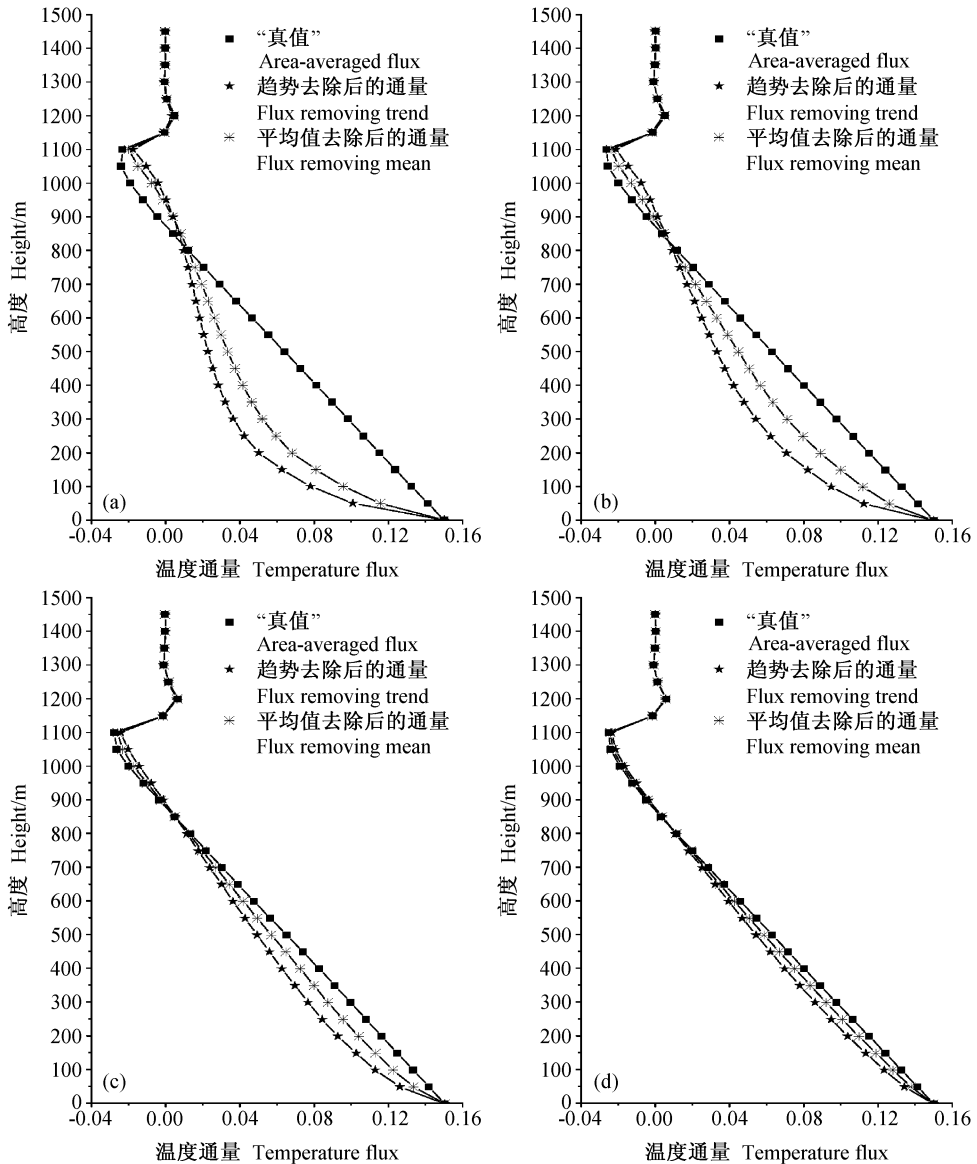


图5 经平均值去除和趋势去除处理的温度通量与面空间平均值的比较(第120~150 min的模拟计算结果): (a) 背景风速 0 m/s; (b) 背景风速 1 m/s; (c) 背景风速 2 m/s; (d) 背景风速 4 m/s

Fig. 5 Comparison between the temperature flux removing mean and trend and the area-averaged value (120 - 150 min simulated result): (a) Background wind speed 0 m/s; (b) background wind speed 1 m/s; (c) background wind speed 2 m/s; (d) background wind speed 4 m/s

过具体分析,并再一次指出要使湍流统计量接近系综平均值,要求足够的平均时间以保证样本近似各态历经。需要注意的是,他们是以对象数据本身没有误差为前提来估计系综平均值的随机偏差或应要求的平均时间。如果对象数据已存在歪曲,那么结果值与真值之间不但有随机误差,而且存在系统性偏差。在涡旋相关法的应用中为了克服超声风速仪的调直误差和系统漂移及避免非平稳性,计算湍流统计量之前必须经过坐标变换和去平均或趋势的预处理。以温度通量为例,经预处理后的 w' 、 T' 或

$w' T'$ 已不是系综平均意义上的涨落值,而是与采样时段时间平均值的偏差。因此除了随机误差之外,有限取样长度还能导致通量值的系统性低估。Finnigan 等^[6]从数学推导和野外观测资料对比分析角度探讨了有限时间平均长度情况下坐标旋转对通量计算值的影响,发现坐标旋转的确会导致热量和水汽通量计算值出现不可忽视的偏低。

已有研究表明,不稳定大气边界层特征尺度 z_i 的热泡扮演着含能涡的角色,无风时其周期与 z_i/w_* 同阶大,而有风时约为 z_i/u 大小。从上文指出

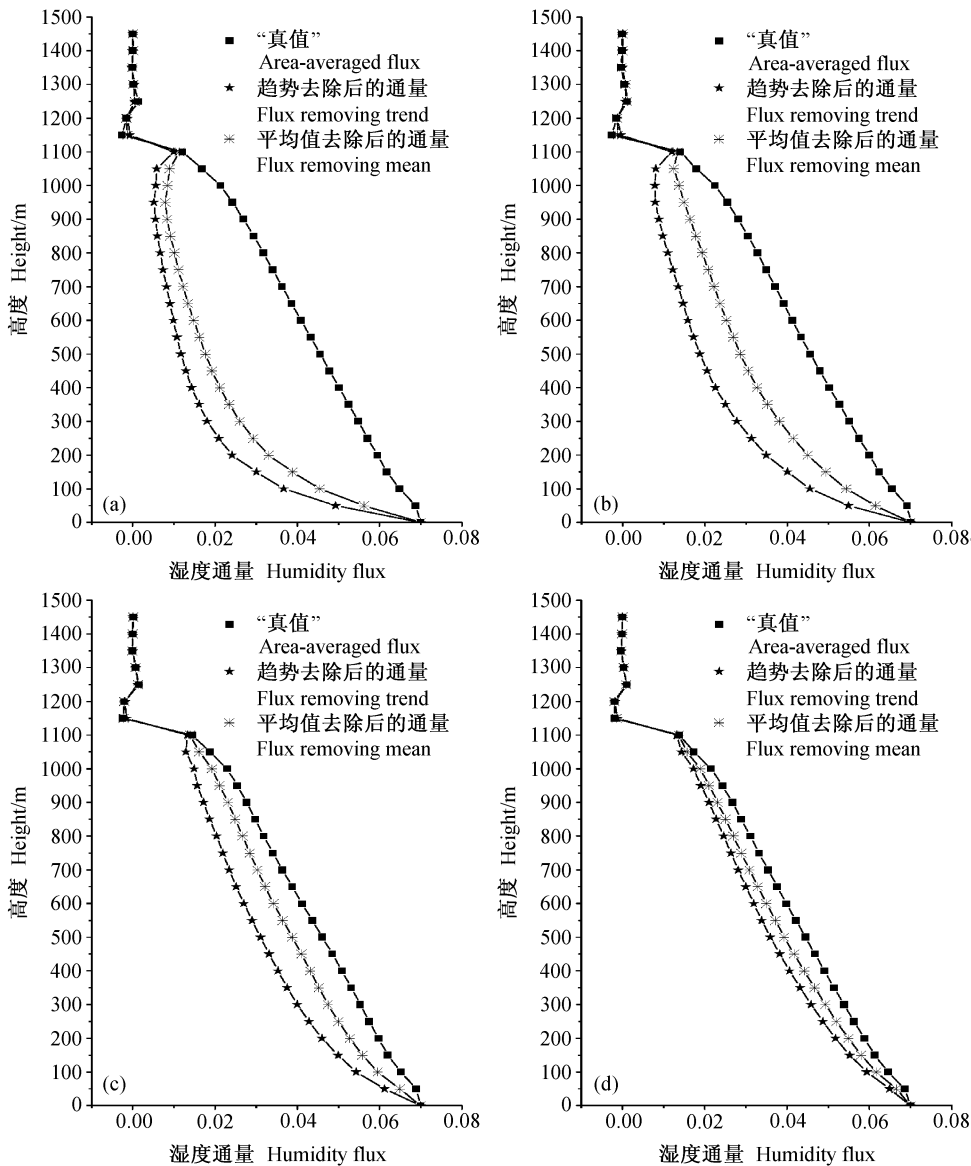


图6 同图5, 但为湿度通量与面空间平均值的比较

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for comparison of humidity flux and the area-averaged value

的事实和相似性概念可以推论, 有限平均时间计算的通量份额和相对误差可定性表示为

$$\frac{F_{\tau}}{F_E} = f_1\left(\frac{\tau}{z_i/w_*}, \frac{\tau}{z_i/u}, \frac{z}{z_i}\right),$$

$$\frac{\delta F}{F_E} = f_2\left(\frac{\tau}{z_i/w_*}, \frac{\tau}{z_i/u}, \frac{z}{z_i}\right),$$

这里, τ 是取样长度, F_{τ} 和 F_E 分别表示 τ 时段计算的通量和系综平均通量, δF 表示有限平均时间的测算值相对于系综平均值的标准差^[11, 13], 但是这里是经系统偏差修正后的标准差。以上两式表示随机误差和低估份额依赖于两个无量纲时间和观测高度。当然, 函数 f_1 和 f_2 的性质还与涡旋相关法的

数据预处理方式有关。不论如何, 水平均匀准稳态的不稳定大气边界层随着无量纲取样时间加长总有 F_{τ}/F_E 比值趋向 1、随机误差趋向零的性质。零风速的时候, 第二个无量纲时间消失, 为无风速的渐近相似性。风速大于 w_* 时, 观测点在 τ 时段可感受到较多的涡旋, 第一个无量纲时间消失, 为无 w_* 的渐近相似性。以上推论分析可为进一步分析提供相似性框架。

本研究以大涡模拟替代野外观测, 证实涡旋相关法数据处理可带来标量通量及其他湍流量的低估, 定性地说明了偏低程度与高度及风速的关系。但是尚未能解释诸如 TIPEX 这类地面通量严重不

闭合的事实。如前所述, TIPEX 和 GAME/Tibet 的当雄和安多等站的鲍温比能量平衡法与涡旋相关法野外观测均有优良的质量控制, 但涡旋相关法测量的湍流热通量与有效能的比值却低到 0.5~0.6。本文的模拟表明, 均匀边界层这样低的比值仅可能出现在低风速并且观测高度较高的情形, 而当雄和安多等地的观测高度在 5~10 m 之间, 相当部分的观测数据风速并不小, 因此须进一步探讨通量严重不闭合的其他可能机理。注意到文献[1, 2, 6]曾分别从观测或概念推断, 指出在复杂地形、非均匀地表或特定天气条件下地表能通量不闭合更为显著的事实。周明煜等^[3]对当雄声雷达探测资料进行的谱分析发现, 白天 100~200 m 高度的垂直速度谱能量较集中于约 1 小时的周期。这一现象说明复杂地形上空的不稳定边界层大涡旋对通量的贡献可能有更大作用, 从而引起涡旋相关法测量严重偏低。

5 结论

本文采用大涡模拟产生对流边界层的风、温度和湿度的脉动数据, 分析探讨通常涡旋相关法的观测数据的取样长度与处理方式可能导致的湍流通量低估。研究结果有:

对流边界层存在对湍流通量有不可忽略作用的低频大涡, 在有限长度观测取样数据中表现为趋势或时间平均值的涨落, 从而导致涡旋相关法测算通量的亏缺。这是造成地面边界层通量不闭合的原因之一。

不稳定条件下涡旋相关法测算通量的低估程度与风速和观测高度的关系是: 低风速条件下比较显著, 随风速增大而减弱; 低高度不很显著, 随观测高度增高而快速增强。

近地面层潜热通量与感热通量测算的低估份额相近, 但随着观测高度的增加潜热通量测算的低估可比感热通量严重。

研究结果尚不能完全解释诸如 TIPEX 等实验通量异常不平衡的观测结果。除加长取样长度的建议外, 还不能从本研究提出其他进一步改进涡旋相关法运用的好办法。这些都有待做更多的工作。

参考文献 (References)

- [1] Sakai R K, Fitzjarrald D R, Moore K E. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40**: 2178~2192
- [2] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1998, **15**: 416~429
- [3] Miyazaki S, Coauthors. The energy budget imbalances observed in Tibetan Plateau and Mongolian Plateau. In: The Second Session of International Workshop on TIPEX-GAME/TIBET (Preprint Volume), JCC with TIPEX-GAME/Tibet, Kunming, China, 1998, 1~3
- [4] Wang Jiemin. Surface flux measurements in GAME-Tibet. In: The Second Session of International Workshop on TIPEX-GAME/TIBET (Preprint Volume), JCC with TIPEX-GAME/Tibet, Kunming, China, 1998
- [5] 周明煜, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000. 125pp
Zhou Mingyu, et al. *Observation Analysis of Atmospheric Boundary Layer and Study of Dynamics over the Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 125pp
- [6] Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, et al. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: Averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, **107**: 1~48
- [7] 蔡旭辉, 陈家宜. 一个对流边界层大涡模式的建立与调试, 大气科学, 1995, **19**: 415~421
Cai Xuhui, Chen Jiayi. A large eddy simulation model for convective boundary layer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19**: 415~421
- [8] 蔡旭辉, 陈家宜. 平坦非均匀地面对流边界层的准定常态. 北京大学学报, 2000, **36** (3): 388~397
Cai Xuhui, Chen Jiayi. Quasi-stationary state of convective boundary layer over heterogeneous flat surfaces. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2000, **36** (3): 388~397
- [9] 蔡旭辉, 陈家宜. 非均匀对流边界层的地转强迫流动和动量输送. 大气科学, 2003, **27**: 381~388
Cai Xuhui, Chen Jiayi. Geostrophically forced flows and momentum transfer in heterogeneous convective boundary layers. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**: 381~388
- [10] Wyngaard J C. 论近地面层湍流. 见: D A 豪根主编. 微气象学. 李兴生等译. 北京: 科学出版社, 1984. 141
Wyngaard J C. On surface-layer turbulence. *Micrometeorology*, D. A. Haugen, Ed. Boston: American Meteorology Society, 1973. 392pp
- [11] Lumley J L, Panofsky H A. *The Structure of Atmospheric Turbulence*. New York: Wiley-Interscience, 1964
- [12] Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric Boundary Layer Flows*. New York: Oxford University Press, 1994

[1] Sakai R K, Fitzjarrald D R, Moore K E. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough