

文章编号:1001-8166(2009)07-0705-09

近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析^{*}

王介民^{1,2}, 王维真¹, 刘绍民², 马明国¹, 李 新¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要:近地层能量闭合问题,即测量到的感热和潜热通量之和一般总小于近地层可利用能量(净辐射与土壤热通量之差),是近20年来困扰地气相互作用实验研究的主要难点之一。对国内外有关研究现状做了综述,与解决此问题日益迫切的要求相适应,问题的实质及解决途径近年来已逐渐明朗。“涡动相关方法”应用在复杂的大气湍流通量观测中的局限,特别是对低频较大尺度湍流通量的低估,仍是关键所在。在理论分析的基础上,结合2008年部分“黑河综合实验”资料对有关计算结果做了具体介绍。以阿柔站6天连续资料为例,仔细计算土壤浅层热储存,在涡动相关资料再处理中加上高低频损失修正等,再参考该站大口径闪烁仪(LAS)观测对感热通量的提高,能量闭合率可达到99%,当然这只是个例。许多复杂情况下,较大尺度的涡旋或湍流有组织结构(TOS)会有更明显影响。近地层能量闭合问题的根本解决必须考虑后者的贡献,提高通量观测的时空代表性。

关 键 词:能量平衡;湍流通量;涡动相关方法;大尺度涡旋;黑河综合实验

中图分类号:P422.4;P334 **文献标志码:**A

1 引 言

最近10~15年来,不同类型地表与大气间能量、水分和CO₂等交换过程的研究得到空前发展。以研究生态系统交换为主的国际通量网(FLUX-NET),到2009年3月底,在全球不同地区已有576个通量站(<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet>)。国内有关通量观测研究的发展速度更快,包括中国通量网(ChinaFlux)在内由不同项目在全国各地建立的长期通量观测研究站点已超过100个。这些站点,除包括风湿温梯度、辐射、土壤温湿及热流等观测外,普遍使用涡动相关通量观测系统进行近地层水、热、CO₂等通量的直测。涡动相关方法(或涡动协方差方法,简称EC),经过近50年的发展,无疑仍

是当前地气交换研究中最先进和首选的通量观测方法。然而,分析有关通量时出现的能量平衡闭合问题,却对EC方法的精度和可靠性带来诸多怀疑。

几乎所有地气交换模式都基于能量和物质平衡基本原理。近地面可利用能量,即净辐射(R_n)与土壤热通量(G)之差(有时还考虑植被冠层热储存 S 等),应当与所分配的感热通量(H)和潜热通量(λE , E 为蒸散量, λ 为蒸发潜热)之和相等。然而,EC方法观测到的热通量($H + \lambda E$)却常常比可利用能量($R_n - G - S$)小10%~30%左右。这一系统误差在20世纪80年代中一些实验中已经发现^[1];真正引起重视却是在90年代中更多的陆面过程观测实验开始之后。国内在对1998年青藏高原加强观测(GAME-Tibet计划)资料的研究中,对此问题的严

^{*} 收稿日期:2009-05-11;修回日期:2009-06-05.

^{*} 基金项目:中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09-03);国家自然科学基金项目“复杂条件下湍流通量的观测与分析研究”(编号:40875006);国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(编号:2007CB714401)资助。

作者简介:王介民(1937-),男,山西万荣人,研究员,主要从事大气边界层物理、大气遥感和陆面过程研究. E-mail: jmwang@lzb.ac.cn

重性首次给出了定量分析结果^[2]。从90年代后期起,有关能量平衡闭合问题的文章大量见诸于国内外杂志,比较有代表性的如 Lee^[3],Twine 等^[4], Sakai 等^[5], Wilson 等^[6], Culf 等^[7]的研究。许多文章都有对各种下垫面通量观测中能量不平衡程度的统计。如 Wilson 等^[6]对 FLUXNET 22 个站(1~4 年)通量资料的分析:如以 $(H + \lambda E)$ 和 $(R_n - G - S)$ 散点资料线性拟合的斜率判断闭合程度,则闭合率在 0.53~0.99 之间,平均值为 0.79;如以一个较长时段(如 1 年)热通量之和与可利用能量之和的比值作为能量闭合率(EBR):

$$EBR = \sum (H + \lambda E) / \sum (R_n - G - S) \quad (1)$$

则 EBR 在 0.34~1.69 之间,平均值为 0.84。

10 多年来,随着大量通量站的建立和资料积累,解决此问题的要求日益迫切。例如:

(1) 模式发展。超过 10% 的能量闭合观测误差,对大气模式特别是陆面过程模式的检验和发展是不能接受的。地面通量观测中较好的能量闭合对数值模式陆气交换参数化的改进至关重要。

(2) 与热通量观测相似,涡动相关方法也存在对 CO₂ 通量的低估,并由此带来对 CO₂ 源汇区分析的不确定性^[8],进而影响温室气体收支计算及气候变暖预报。改进能量闭合的方法将同时用于提高 CO₂ 通量的观测精度。

(3) 许多应用性研究,如近年发展较快的遥感 ET(蒸发蒸腾量)模式及其在水资源管理中的应用等,要求对模式产品有较可靠的地面验证;观测对湍流通量的低估,将影响遥感 ET 的可信度以至一些实际项目的执行^[9]。

本文主要讨论广为关注的能量平衡闭合问题及可能的解决方法,重点介绍最近 2 年一些开创性的工作。最后结合“黑河综合实验”几个通量站的数据,检查部分处理方法的效果。

2 能量不平衡的缘由及解决途径

早期对能量不平衡问题的分析,主要着重于辐射及通量仪器观测精度和土壤浅层热存储订正等,而且有因认识模糊而发生的争论及对各种可能原因的主次不清的罗列。近年来, Kanda 等^[10]、陈家宜等^[11]对低频大尺度涡旋贡献的理论探讨, Oncley 等^[12]对能量平衡实验 EBEX-2000 资料的综合分析,特别是 Foken 研究组^[13,14]对地气间通量交换的系列性研究,能量平衡不闭合的主要原因及解

决途径已经比较清楚了。

以下大致分两部分对此问题进行讨论。2.1~2.2 节着重已有的常规单点观测及有关资料的更细致的处理;2.3 节涉及湍流输送的一些更本质问题,分析最终解决能量不闭合问题的途径。

2.1 仪器观测精度检验

发现通量站观测结果的能量收支不能闭合,首先怀疑的就是仪器观测精度:或者可利用能量 $(R_n - G - S)$ 被高估,或者湍流热通量 $(H + \lambda E)$ 被低估。观测精度问题永远都不可忽视;但需要对以上能量收支各项逐个仔细分析,以得出实施改进的指导性意见。

净辐射(R_n)。近 10~15 年来,在全球地表辐射基准站网(BSRN)的推动下,辐射观测精度有了很大提高。以 Eppley(美国)和 Kipp & Zonen(荷兰)产品为例,短波辐射观测精度已达到 1%~2%,长波辐射精度约为 5~10 W/m²(2%~5%);国内常用的四分量净辐射仪(CNR1, Kipp & Zonen)的精度约为 5%(白天最大误差 25 W/m²)^[15]。净辐射观测误差一般也是随机的;有的净辐射仪如 Q7(REBS,美国)在白天的观测值反而偏低 20~40 W/m²,夜间则偏高 10~20 W/m²^[15]。在正常的台站维护下,净辐射的观测精度是各能量收支分量中最可信的。

土壤热通量(G)及热存储(S)。土壤热通量一般用埋在地表以下数厘米的土壤热流板观测,或用土壤温度和含水量梯度资料加上已知的土壤热参数计算。土壤热流板的观测精度一般较低(20%~50%);误差主要由热流板与实际土壤的导热率不同(不同土壤导热率差异很大,且随土壤含水量等变化)以及安装时热流板与环境土壤接触的密切程度不同等引起。新型的有自校正功能的热通量板(HFP01SC, 荷兰 Hukseflux)有明显改进,其热通量测量精度在实验室检验可达到 5%^[16]。但影响近地层可利用能量可能偏高的原因,主要并非由热流板的观测误差(一般是随机的)引起。计算可利用能量的“ G ”实际上指“地表”土壤热通量;而浅层土壤的垂直热通量梯度一般都很大,必须对热流板埋深到地表这一层的土壤热存储做仔细考虑;其方法将在 2.2 节详述。计算可利用能量时提到的热存储(S),指地表至通量观测高度之间包括植被冠层、空气等的热存储,有时还需考虑植被层光合作用的耗能。但除非浓密的森林冠层,植被层的热存储一般小于 10 W/m²;光合作用的耗能及空气的热存储则

更小^[12]。

湍流热通量($H + \lambda E$)。湍流热通量(多数情况下还包括 CO_2 通量等)用涡动相关方法观测。一般取采样频率为 10 ~ 20 Hz,取平均时间为 30 min。常用的超声风速仪有 CSAT3 (Campbell, 美国) 和 Solent R3 (Gill, 英国) 等,水汽(及 CO_2) 测量仪有 LI-7500 (LI-COR, 美国) 和 KH20 (Campbell, 美国) 等。根据 LITFASS-2003 实验对不同类型传感器的观测结果检验^[17],上述几种仪器的一致性很好;进而判断通量的观测精度,国内常用开路涡动相关系统 (CSAT3 + LI-7500) 的感热和潜热观测精度约分别为 5% ~ 10% 和 10% ~ 15%。这样高的精度应当可以满足湍流通量观测的需要。但是:

(1) 最终的实际通量观测精度与湍流资料的处理过程及质量控制等密切相关。涡动相关通量计算需要一系列修正^[18],主要如坐标旋转(倾斜修正,采用平面拟合法或二次旋转);感热通量的超声虚温(水汽影响)修正;由传感器结构(一定的声/光程长度及安装时必要的超声仪与水汽/ CO_2 探头间距)等造成的高频损失和由取平均时间不够长等造成的低频损失修正;水汽和 CO_2 通量的 WPL 修正(空气密度脉动修正)等。这些修正,特别是频率损失和 WPL 修正等的正确应用,常可使潜热通量等提高 10% 左右^[12]。此外,从湍流原始数据到通量产品生成的整个过程,质量控制/质量保证必不可少,如对原始数据的异常值(野点)剔除,水汽/ CO_2 数值采集相对于垂直风速的时间滞后订正,湍流量的统计特征(如偏度、峰度、方差、频率谱等)检验,观测时段的湍流平稳(定常)性和发展性检验,以及观测结果的代表性主要是通量贡献源区(footprint)的检验等^[18]。

(2) 即便这样,包括在平坦均匀下垫面、大气状态平稳等理想条件下,能量不闭合问题仍然不能完全解决;地形起伏和非均匀下垫面、夜间偏稳定等困难条件下,不闭合问题还更加突出。这涉及到湍流通量输送的另一个根本问题,即常用的单点涡动相关系统难以观测到的低频大尺度涡旋的通量贡献问题,将在下面 2.3 节详述。

2.2 土壤浅层热储存的计算

以上指出,需要仔细考虑从热流板埋深到地表这一层的土壤热储存,以得到地表的土壤热通量。常用的计算方法有如下 3 种:

(1) 结合土壤热通量观测的温度积分法或仅用土壤温度梯度观测的微分—积分法^[19]。如 z_r 深度热

流板观测的土壤热通量为 G_{z_r} ,则地表土壤热通量:

$$G = G_{z_r} + \int_0^{z_r} c_v \frac{\partial T_s}{\partial t} dz \quad (2)$$

其中 T_s 为 z_r 由到地表的各层土壤温度(地表土壤温度可由向上长波辐射推算), t 为时间, c_v 为土壤的体积热容量。没有热流板观测时,可用下式计算(λ_s 为土壤热传导率):

$$G = -\lambda_s(z_r) \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z_r} + \int_0^{z_r} c_v \frac{\partial T_s}{\partial t} dz \quad (3)$$

(2) 谐波分析法^[20]。假设土壤热参数 c_v 和 λ_s 在垂直方向的变化可忽略,地表温度随时间的变化可表示为 M 个谐波的叠加,则可由简化的土壤热扩散方程 $\partial T / \partial t = \kappa (\partial^2 T / \partial z^2)$ 求解得到:

$$T(z, t) = T_0 + \sum_{n=1}^M A_{0n} \exp(-Bz) \times \sin(n\omega t + \Phi_{0n} - Bz) \quad (4)$$

其中: $B = \sqrt{n\omega / 2\kappa}$, $\kappa = \lambda_s / c_v$ 为热扩散系数, $\omega = 2\pi / N$ 为圆频率, N 为总样本数, $M = N/2$ 为最大谐波波数, n 是波数, A_0 和 Φ_0 是对应的振幅和位相。进而,由 $G = -\lambda_s (\partial T / \partial z)$ 求得:

$$G(z, t) = \frac{\rho_s c_s}{\kappa} \sum_{n=1}^M \left[A_{0n} \sqrt{\frac{n\omega}{\kappa}} \exp(-Bz) \times \sin\left(n\omega t + \Phi_{0n} + \frac{\pi}{4} - Bz\right) \right] \quad (5)$$

结合地表土壤温度观测,利用(4)式拟合即可确定土壤热扩散系数 κ ;利用(5)式,即可计算出任意深度 z 处的土壤热通量。此方法简称谐波法。Heusinkveld 等^[21]用之计算了以色列沙漠地区的地表土壤热通量,大大提高了有关实验的能量闭合率。

(3) TDEC 法^[22]。由积分—维热传导方程 $(\partial c_v T / \partial t = -\partial G / \partial z)$ 可得:

$$G(z) = G(z_r) + \int_{z_r}^z \frac{\partial c_v T(z)}{\partial t} dz \quad (6)$$

其中, $G(z_r)$ 为参考层 z_r 处的土壤热通量。若已知温度廓线为 $T(z_i)$,则(6)式的离散形式为:

$$G(z, t) = G(z_r, t) + \frac{1}{\Delta t} \sum_{z_r}^z [c_v(z_i, t + \Delta t) \times T(z_i, t + \Delta t) - c_v(z_i, t) T(z_i, t)] \Delta z \quad (7)$$

如果参考位置取到足够深,可使得 $G(z_r)$ 相对于地表热通量来说忽略不计($G(z_r) \approx 0$)。因此,根据(7)式计算土壤热通量的关键是如何从有限的温度观测资料插值得到合理的温度廓线。阳坤等^[22]提供了一种新的插值方法:先假设土壤热传导系数为一常数(如 $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),通过土壤热扩散方

程构造土壤温度的基本廓线 T_{TDEC} ; 然后, 利用实测土壤温度廓线来修正 T_{TDEC} 。最后, 根据(7)式积分温度廓线得到各层的土壤热通量。这种方法称为“热扩散方程+修正”法, 简称 TDEC。该方法不需要如谐波法要求的土壤垂直均匀的假设, 也不需要事先给定不易准确测量或推算的热传导(或热扩散)系数值。

2.3 低频大尺度涡旋影响及通量的面积平均

实验表明, 在地形起伏和非均匀下垫面, 在夜间偏稳定条件下, 或白天对流较强时, 能量不闭合问题会更加突出。这些环境条件会诱发较大尺度的湍流, 而常用的单点涡动相关方法对较大尺度湍流输送观测能力的不足, 正是造成湍流通量低估的主要原因。Foken 等^[14]强调“能量不闭合问题是一个尺度问题”, 其含义正在于此。

(1) 取平均时间问题。根据 LITFASS-2003 实验资料的湍流协谱累积频率分布(Ogive)分析^[23], 大约有 85% 的时次, 常用的 30 min 取为平均时间是合适的。其它情况, 由于取平均时间不足引起的通量低估可能占热通量的 5% ~ 10%。Finnigan 等^[24]提出, 根据站点特征, 必要时可将取平均时间延长到数小时以使能量平衡。但是, 通过延长取平均时间来增加观测到的热通量, 由于日变化等非平稳因素的影响, 对许多过程研究来说并不适用。而且, 如果造成低频大涡通量贡献的对流结构是定常的, 则不论取平均时间如何长, 单点观测仍做不到能量收支的完全平衡^[25]。

(2) 湍流有组织结构。近年许多大涡模拟(LES)研究^[10]已经对大气边界层下部由于地表热力非均匀等诱发的湍流有组织结构(TOS)给出了一个更清晰的图像。其水平截面是斑块状(或称肋条状), 有多条较窄的网状热线(或热泡, 上升活动强)和由热线网包围的较大区块(热力活动较弱, 以下沉气流为主)。这种大气湍流结构即便在常见的平坦均匀下垫面也会存在; 其输送热流的强度与背景风、大气对流类型及距地面高度等有关。利用 LES 模式可以模拟一个小区域有多点观测时湍流通量的空间变化情况。包含了时空尺度较大的 TOS 贡献, 做通量的空间平均, 就可能实现能量平衡^[10, 25]。

比上述 TOS 时空尺度更大的有组织结构, 较常见的是由地表热力不均匀诱发的泡状或辊筒状对流结构, 其尺度可与大气边界层尺度相当。这种对流结构可能是准定常的; 单点通量观测往往只能触及及其局部特征。还有由地形或热力作用引发的局地环

流; 它造成的水平平流, 会对单点通量观测带来更大的不确定性。

(3) 通量观测的面积平均。单个通量塔站采用的是所谓“时间平均”方法。鉴于此方法在观测较大尺度涡旋通量贡献中的上述困难, 在模拟研究和一些野外多点湍流观测特别是飞机观测的基础上, 近年开始讨论采用地面观测网的“面积平均”的必要性^[25, 26]。这是一种时间—空间平均方法, 使取平均的空间足够大, 以包括各种结构对垂直输送的贡献。由于在一个不大的研究对象区设置多个湍流观测点, 实现起来还有诸多困难, Steinfield 等^[25]提出了一种利用较高精度的面积平均的气温资料对单点湍流时间序列做高频滤波的新方法。Mauder 等^[26]采用对温度连续性方程的时间平均和面积平均的不同表示, 经推导, 得到所谓“空间 EC 法”的感热通量计算公式:

$$H \approx \bar{w}(\bar{T} - [T]) + \overline{w'T'} \quad (8)$$

其中 \bar{w} 和 \bar{T} 分别为涡动相关(EC)系统观测到的垂直风速分量和温度的平均值, w' 和 T' 为相应的脉动量, $[T]$ 为温度的空间(面积)—时间平均。与常规 EC 法不同的是式右的第一项。由于较大尺度湍流有组织结构特别如辊筒状对流结构的存在, 一般 $\bar{w} \neq 0$, 且 \bar{w} 和 $(\bar{T} - [T])$ 可能同为正或负; 从而, 附加通量为正。根据这个理论, 设计并进行了一个观测实验, 在约 3.5 km × 3.5 km 的区域布设了一个 EC 塔(中心)及 25 个均匀分布的测温点, 进行了 2 个多月的观测。结果表明^[26], 在 8 个典型天, \bar{w} 持续为负(向下), 附加通量约为 50 ~ 100 W/m²。这是一项非常有开创意义的工作。

当前, 已有一些台站采用光程达数公里的大口径闪烁仪(LAS)进行感热通量的观测; 利用微波闪烁仪(MWS)观测潜热通量也正在发展中。LAS 测得的感热通量常比单点涡动相关仪的大, 类似于包含了一个较大面积的平均。

3 “黑河综合观测实验”个例分析

“黑河流域遥感—地面观测同步试验”(简称“黑河综合实验”)在黑河上中游地区不同下垫面上建立了多个自动气象站和涡动相关仪及大口径闪烁仪通量观测站。关于站点详细情况及实验资料的初步综合分析请参看本专辑其它文章(如王维真等^[27]); 这里只结合阿柔冻融观测站(以下简称阿柔站)和盈科灌区绿洲站(以下简称盈科站)2 个站的典型资料分析, 讨论有关能量平衡检验及提高闭合

率的几种方法。阿柔站在海拔 3 033 m 的一块高原草甸上。草甸宽 2 ~ 3 km, 长约 20 km (该段黑河河谷平地长约 50 km), 开阔平坦, 下垫面较均匀。盈科站在张掖绿洲中心, 地形虽然平坦, 但植被斑块分布较复杂。本研究选择 2008 年 7 ~ 8 月两段 (各 6 ~ 10 天) 天气状况较平稳的资料做重点分析, 以对影响能量闭合的主要问题有更清楚的认识。以下做简单介绍。

3.1 近地面可利用能量分析 (着重土壤浅层热存储计算)

阿柔和盈科两站的 2 层土壤热流板埋深都是 5 cm 和 15 cm。利用实测净辐射、5 cm 土壤热流和涡动相关仪 (Campbell, 美国) 热通量直接输出, 按 $(H + \lambda E)$ 和 $(Rn - G)$ 线性拟合并计算 (下同), 能量闭合率一般仅 65% ~ 80% 左右。

按以上 2.2 节所述“谐波分析法” (HM) [21] 和 TDEC 法 [22] 分别计算土壤浅层的热量储存, 修正后的能量闭合率都可提高约 6% ~ 8%。HM 法和 TDEC 法的修正结果, 一致性非常好; 但后者比前者略高 1% ~ 2%。由于 TDEC 法没有“土壤垂直均匀”的约束性假设, 又不需要预先提供土壤热传导率的准确资料 [22], 故作为以后计算的优选方法。应用效果例见表 1: 对 8 月 1 ~ 6 日, 盈科站的闭合率由原来的约 67% 提高到 74%, 阿柔站则提高到 91%。

3.2 取平均时间的影响

涡动相关通量计算的取平均时间一般为 30 min。其对湍流低频涡旋贡献的截断影响, 一般通过协谱 (cospectrum) 分析或协谱的累积频率 (Ogive) 分析判断。Ogive 分析按下式计算垂直风速 w 与温度 T (或其它被测标量如水汽、CO₂ 浓度) 的协谱 $Co_{wT}(f)$ 的频率分布累积 [28]:

$$Og_{wT}(f) = \int_{f_{\text{high}}}^{f_{\text{low}}} Co_{wT}(f) df \quad (9)$$

注意是由高频端 f_{high} (由采样频率决定) 向低频端 f_{low} (由取平均时间决定) 积分, 最终结果应与有关协方差相等。

图 1 给出阿柔站 2008 年 8 月 1 ~ 6 日对感热通量的 Ogive 分析示例。因注重检查低频影响, 将最长取平均时间取为 180 min, 每日 8 次。每日图上较高的 3 条线为白天 9:00 ~ 17:00 感热通量较大的情况; 夜间感热通量大多为负, 曲线变幅也小。图中 4 条竖直线, 由右向左分别标示 30 min、60 min、120 min 和 180 min 的相应频率。由图 1 可见, 大部分曲

线在 30 min 之前已趋近最大, 即 30 min 的取平均时间内已包含全部对通量有贡献的湍流谱。但是, 也有不收敛情况 (约占 10% ~ 15%)。特别在取平均时间长于 80 ~ 120 min 之后, 部分曲线上翘; 几乎每个早晚稳定度转化时段都如此。这显然是大气定常性较差的影响, 其中也包含附近山体诱发的大尺度涡旋 (TOS) 的作用。由协谱分布图也可看到类似情况: 低频端谱点有时离散非常大。将白天各时次的曲线渐进特性与大气稳定度 (z/L 值, L 为奥布霍夫长度) 比较, 尚未发现明显关系。

分析中也直接按取平均时间 30 ~ 180 min 的 4 种情况分别计算了各通量在 8 月 1 ~ 6 日的逐时次变化; 没有看到取平均时间大于 30 min 时感热、潜热等通量有明显增大, 即对能量闭合率有明显改善的情况。取平均时间为 180 min 时, 感热通量比 30 min 时约增加了 10%; 但如上所述, 它是大气定常性差造成的, 并不可取。

注意, Ogive 分析并不能涵盖 2.3 节所述 TOS 的影响问题。特别在 TOS 的时空结构较稳定时, 单点的涡动相关测量实际上测不到这种结构的贡献。不再赘述。

3.3 涡动相关通量计算中频率订正等的影响

新的湍流资料后处理程序中, 除必要的坐标旋转 (平面拟合) 和 WPL 修正等外, 加了时间滞后修正和频率影响修正等。对开路涡动相关系统, 水汽和 CO₂ 信号相对于超声风速的时间滞后一般仅 0.1 ~ 0.2 s, 其修正只有微弱影响; 但高低频端通量损失的修正, 却有明显效果。

频率影响修正方法常用的如 Moore [29] 和 Massman 等 [30] 的方法, 主要是计算由传感器声程 (超声仪) 或光程 (如 LI-7500 红外分析仪), 以及实际安装中不可避免的超声仪和红外分析仪两种传感器的间距等造成的高频损失, 以及取平均时间不够长等引起的低频损失; 同时, 借助湍流通量某个“标准”协谱 [29], 得到对动量、感热、潜热和 CO₂ 通量的不同传输系数, 进而修正各通量值。

对阿柔和盈科两站资料的分析都表明, 上述频率影响修正, 主要是对高频损失的修正。由上述 Ogive 分析已看到, 30 min 取平均时间已基本上包含了各种较大涡旋的贡献。对感热通量的修正系数, 白天基本上在 1.03 ~ 1.05 之间, 夜间略大些。对潜热 (及 CO₂) 通量的修正系数则较大, 白天在 1.08 ~ 1.10 之间, 夜间则高达 1.6 ~ 1.8; 但夜间潜热很小, 后者对日总量的影响并不明显。Oncley 等 [12] 对

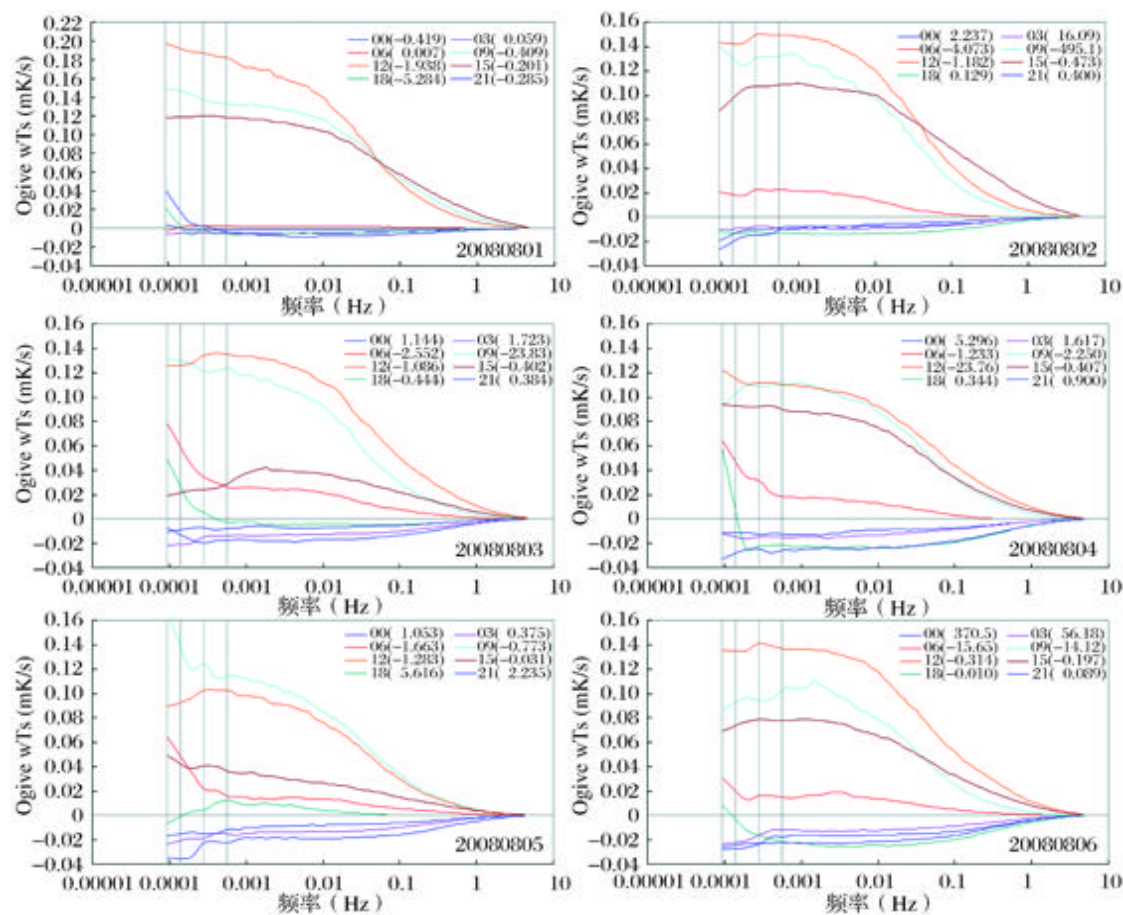


图1 阿柔站2008年8月1~6日取平均时间为180 m in 时感热通量的每日8次Ogive分析

Fig.1 Ogives for daily kinematic sensible heat flux at Arou station, 1~6, August 2008

图例中给出各Ogive线对应的起始时间,括号中为该时段的稳定度(z/L)。图中各竖线由右向左依次标示30 min, 60 min, 120 min和180 min的相应点。
The average time was 180 min. The start-time for each period is given, with stability z/L in the parentheses.
The vertical lines, from right to left, correspond to 30, 60, 120, and 180 min respectively.

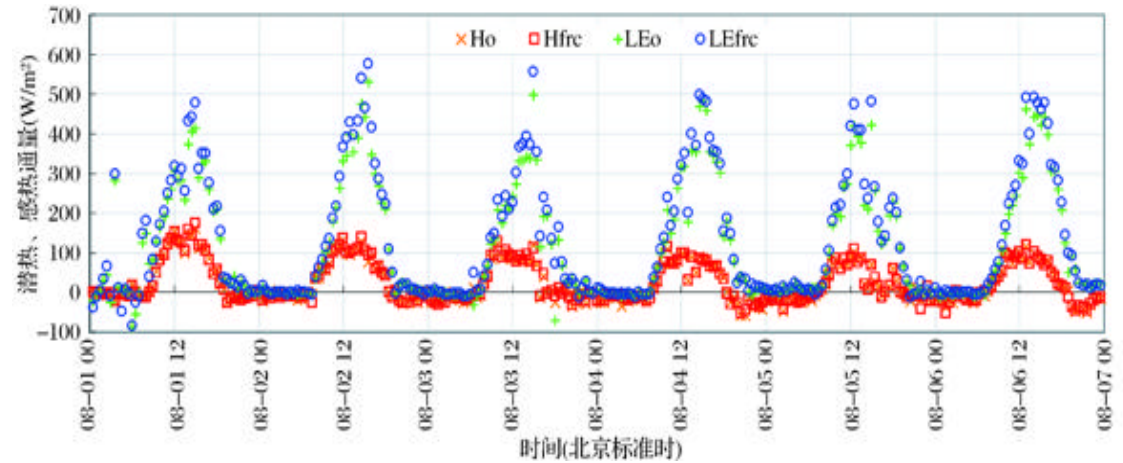


图2 阿柔站2008年8月1~6日潜热量(未加频率影响修正为+加上之后为)和感热量(未加频率影响修正为×加上之后为)的日变化比较

Fig.2 A comparison of fluxes calculated with (latent heat, sensible heat) and without (+latent heat, ×sensible heat) high-and low-frequency lose corrections, at Arou station, 1~6, August 2008

EBEX-2000 资料分析指出,传感器间距引起的白天潜热通量减小可达 7%,与本分析结果一致。

图 2 给出阿柔站 2008 年 8 月 1~6 日感热通量和潜热通量日变化在频率影响修正加上之前和之后的比较。由图 2 可见,加上频率影响修正后,潜热通量在白天明显增大。

3.4 LAS 与 EC 所测感热通量结果比较

阿柔站同时安装有一套 LAS^[27],其发射塔与接收塔之间的距离为 2 390 m,有效距地高度 9.5 m,用以测量一个较大尺度上的感热通量。以 2008 年 8 月 1~6 日的全部数据为例,比较 LAS 所测感热通量(H_{LAS})与其光程中心附近的涡动相关仪相应结果(H_{EC}),如图 3 所示。对这 6 天而言,前者比后者的偏大将近 10%。这是一个并非意外的结果。如 2.3 节对大尺度涡旋影响的分析,LAS 观测的通量有天然的面积平均效果;尽管其源区(footprint)还只是一个较长的纺锤状区域,但比起涡动相关仪的源区已扩大了约 10 倍或更多^[27]。

如用 LAS 所测感热代替 EC 有关值做能量闭合分析,闭合率也会提高(表 1)。

3.5 个例分析小结

表 1 给出以上几种处理对能量闭合的影响。虽

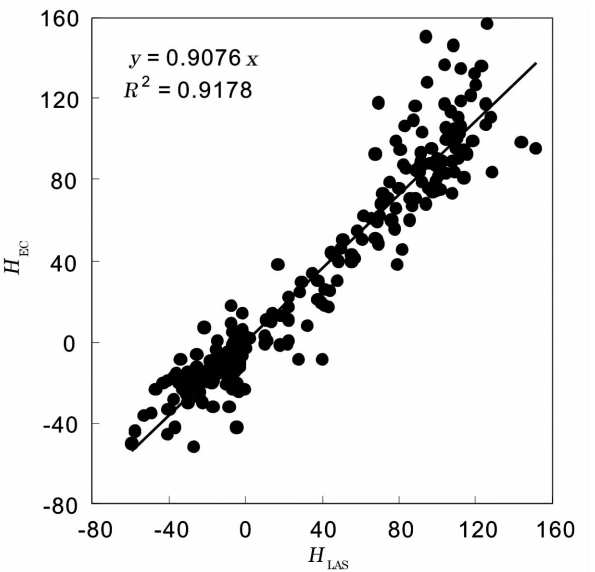


图 3 LAS 所测感热通量(H_{LAS})与 EC 相应值(H_{EC}) 的比较(图中包括 2008 年 8 月 1~6 日全部数据点;
 H_{LAS} 比 H_{EC} 偏大约 10%)

Fig. 3 A comparison of sensible heat fluxes measured by LAS (H_{LAS}) and eddy covariance (H_{EC}) systems, at Arou station, 1~6, August 2008 (H_{LAS} is about 10% larger than H_{EC})

表 1 两种简单处理及应用 LAS 对能量闭合率的改进效果(资料:2008 年 8 月 1~6 日;表中数字为闭合率,%)
Table 1 Energy balance closure improvements by different treatments, for stations Arou and Yingke, 1~6, August, 2008

	修正前的闭合率	加土壤浅层热 存储修正	湍流资料后处理 加频率影响修正后	用 LAS 所测感热 取代 EC 有关值后
阿柔站	(土壤热流板 观测有误)	89(HM 法)	96	97
		91(TDEC 法)	98	99
盈科站	67	74(TDEC 法)	82	(该站无 LAS)

然方法并不复杂,效果还是清楚的:能量闭合率从最初的 70% 左右可提高 15% 甚至更高。盈科站的闭合率较低,可能主要是 8 月份站点附近作物(以玉米为主)冠层热储存的影响。因缺乏冠层生物量和温度等观测,暂未作进一步分析。此外,还可能有作物光合作用耗能(约数 W/m^2)的影响。这些都将参照有关方法^[12]在今后深入研究。

应用 LAS 所测感热代替 EC 有关值,对阿柔站 8 月 1~6 日,能量闭合率达到了 99%。

4 结 论

近地层能量闭合问题,是近 20 年来困扰微气象学及地气相互作用实验研究的主要问题之一。最近几年,对问题实质的认识已经有了突破性的进展,解

决方法也已逐渐明朗。文中对此做了综述。“涡动相关方法”仍然是当前地气系统通量观测研究中不可取代的优选方法,但其对低频较大尺度湍流通量的低估,特别是企图以单点观测代表复杂空间分布,仍然是不可逾越的局限。这是造成能量平衡不闭合问题的根本所在。但是,在较简单情况下(下垫面较平坦均匀,大气状况较平稳),对热量存储的仔细估算,加上对湍流原始资料的精细处理,仍可得到较满意的结果。以上结合 2008 年部分“黑河综合实验”资料,对此做了具体介绍。

对阿柔站连续 6 天资料的精细处理,总的能量闭合率可达到 98%~99%。这只是个例。在许多复杂情况下,如地形起伏、下垫面非均匀,以及夜间偏稳定层结下等,能量闭合率常较差;可能主要是较

大尺度涡旋(或湍流有组织结构)及平流输送的影响,需要有更深入的研究,特别是,在掌握较多资料情况下对具体问题做具体分析。上述涡动相关处理中对频率损失的订正,所用“标准”协谱模式,在地形起伏下垫面较复杂情况下,其低频部分也常常失去代表意义。

近年几个研究提出的通量“面积平均”概念和简化处理方法,具有较大的指导意义。大涡模拟(LES)在具体应用到较低层大气输送研究时,仍有很大局限。如何通过实际观测及对有限观测资料的新的处理方法的开发,从而得到通量的面积平均或更有空间代表性的结果,可能是最终解决近地层能量闭合问题的根本途径。

致谢:胡泽勇、高洪春、谷良雷等参加了野外观测数据采集;徐自为等参加了资料分析。在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] Kanemasu E T, Verma S B, Smith E A, *et al.* Surface flux measurements in FIFE: An overview[J]. *Journal Geophysical Research*, 1992, 97: 18 547-18 555.
- [2] Wang J, Kim J, Liou Y, *et al.* Energy balance analysis and one-dimensional simulation of land surface processes in a short-grass site of central Tibetan Plateau[C]//Proceeding of the 1st international Workshop on GAME-Tibet, Xi'an, China. 1999:73-76.
- [3] Lee X. On Micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 39-49.
- [4] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, *et al.* Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103:279-300.
- [5] Sakai R, Fitzjarrald D, Moore K E. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces[J]. *Journal Applied Meteorology*, 2001, 40:2 178-2 192.
- [6] Wilson K B, Goldstein A, Falge E, *et al.* Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113:223-234.
- [7] Culf A D, Foken T, Gash J H C. The energy balance closure problem[M]//Kabat P, Claussen M, Dirmeyer P A, *et al.*, ed. *Vegetation, Water Humans and the Climate. A New Perspective on An Interactive System*. Berlin: Springer, Heidelberg, 2004: 159-166.
- [8] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, *et al.* Measurements of carbon sequestration by longterm eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy[J]. *Global Change Biology*, 1996, 2:169-182.
- [9] Wang Jiemin, Liu Shaomin, Sun Minzhang, *et al.* Monitoring ET with remote sensing and the management of water resources on a basin scale[J]. *Arid Meteorology*, 2005, 23(2):1-7. [王介民,刘绍民,孙敏章,等. ET的遥感监测与流域尺度水资源管理[J]. 干旱气象, 2005, 23(2):1-7.]
- [10] Kanda M, Inagaki A, Letzel M O, *et al.* LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 110:381-404.
- [11] Chen Jiayi, Fan Shaohua, Zhao Chuanfeng, *et al.* The underestimation in eddy covariance flux measurements [J]. *Atmospheric Sciences*, 2006, 30: 423-432. [陈家宜,范邵华,赵传峰,等. 涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究[J]. 大气科学, 2006, 30: 423-432.]
- [12] Oncley S P, Foken T, Vogt R, *et al.* The energy balance experiment EBEX-2000, Part I: Overview and energy balance[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123:1-28.
- [13] Foken T. *Micrometeorology*[M]. Berlin: Springer, Heidelberg, 2008.
- [14] Foken T. The energy balance closure problem—An overview[J]. *Ecological Application*, 2008, 18(6): 1 351-1 367.
- [15] Kohsiek W, Liebethal C, Foken T, *et al.* The energy balance experiment EBEX-2000. Part III: Behavior and quality of radiation measurements[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123: 55-75.
- [16] van Loon W K P, Bastings H M H, Moors E J. Calibration of soil heat flux sensors[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92:1-8.
- [17] Mauder M, Liebethal C, Gockede M, *et al.* Processing and quality control of flux data during LITFASS-2003[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 121:67-88.
- [18] Lee X, Massman W J, Law B, eds. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*[M]. The Netherlands: Kluwer, Dordrecht, 2004.
- [19] Liebethal C, Huwe B, Foken T. Sensitivity analysis for two ground heat flux calculation approaches[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132: 253-262.
- [20] Horton R, Wierenga P J, Nielsen D R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface[J]. *Soil Science Society American Journal*, 1983, 47: 25-32.
- [21] Heusinkveld B G, Jacobs A F G, Holtslag A A M, *et al.* Surface energy balance closure in an arid region: Role of soil heat flux [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122: 21-37.
- [22] Yang Kun, Wang Jiemin. A temperature prediction-correction method for estimating surface soil heat flux from soil temperature and moisture data[J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(2):243-250. [阳坤,王介民. 一种基于土壤温湿资料计算地表土壤热通量的温度预报校正法[J]. 中国科学:D辑, 2008, 38(2): 243-250.]
- [23] Foken T, Wimmer F, Mauder M, *et al.* Some aspects of the energy balance closure problem[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6: 4 395-4 402.
- [24] Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, *et al.* A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: Averaging and

- coordinate rotation[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107: 1-48.
- [25] Steinfeld G, Letzel M O, Raasch S, *et al.* Inagaki Spatial representativeness of single tower measurements and the imbalance problem with eddy covariance fluxes: Results of a large-eddy simulation study[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123: 77-98.
- [26] Mauder M, Desjardins R L, Patty E, *et al.* Measurement of the sensible eddy heat flux based on spatial averaging of continuous ground-based observations [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 128: 151-172.
- [27] Wang Weizhen, Xu Ziwei, Liu Shaomin, *et al.* The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe river basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 714-724. [王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 714-724.]
- [28] 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]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1989, 47: 55-69.
- [29] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37: 17-35.
- [30] Massman W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104: 185-198.

The Problems of Surface Energy Balance Closure —An Overview and Case Study

WANG Jiemin^{1,2}, WANG Weizhen¹, LIU Shaomin², MA Mingguo¹, LI Xin¹

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: The surface energy balance closure has been one of the major difficulties in the study of surface exchange processes in the last 20 years. Findings from experiments and modeling in recent years have given a much clear understanding of the substantial causes and solving strategies of this issue. Some inabilities of the eddy covariance system in measuring turbulent fluxes, especially in the underestimation of the contribution from larger eddies in difficult conditions such as inhomogeneous surface and complex terrain, are still the essence. After a brief review of recent progress, as a case study, data from two stations of the comprehensive observation in the Heihe River basin (Project WATER) have been analyzed. One of the unique results for station Arou (on highland pasture), for observations from 1 ~ 6, August 2008, showed that the surface energy balance could be closed almost perfectly. Surely this is only one case. Major efforts still need to be made for a better understanding of the contribution of turbulence organized structures (TOS), and for a better way to obtain an area averaged fluxes.

Key words: Surface energy balance; Turbulent fluxes; Eddy-covariance method; Larger scale eddies; WATER.