

黑河综合遥感联合试验涡动相关通量数据处理及产品分析

张智慧¹, 王维真¹, 马明国¹, 徐自为², 吴月茹¹, 黄广辉¹, 谭俊磊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: 涡动相关通量数据的处理及质量控制是保证各涡动观测台站数据质量的重要步骤。“黑河综合遥感联合试验”(Watershed Allied Telemetry Experimental Research, WATER)从2007年底到现在连续观测积累了大量涡动相关通量观测资料。使用经过改进的EdiRe软件对盈科站、阿柔站和关滩站3个站点的原始涡动数据进行预处理和质量控制。通过异常值及野点剔除、倾斜修正、超声虚温修正、时间滞后校正、频率响应修正和空气密度效应修正(WPL修正)等基本处理生成Level-1数据产品;再通过大气状态平稳性检验、总体湍流特征检验以及湍流通量统计特征分析等初步质量控制,生成Level-2数据产品。本文以盈科绿洲站2009年7月份涡动相关数据为例,着重介绍涡动相关数据处理过程中各校正方法的重要性及不同校正方法对湍流通量计算的贡献。结果表明:超声虚温修正后感热通量比修正前减少约7.7%;时间滞后校正后潜热通量和CO₂通量分别增加了3.9%、2.7%;频率响应修正后感热通量、潜热通量及CO₂通量分别增加了2.7%、10.5%、11.6%;WPL修正后潜热通量增加了1.7%,CO₂通量减少了9.8%。最后将Campbell实时处理结果与Level-1产品及Level-2产品进行对比分析,并对黑河流域各涡动站做了总体数据精度评价,阿柔站数据质量最好,盈科站次之,关滩站较差。

关键词: 涡动相关法; WATER; 湍流通量; 数据处理; 质量控制

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2010)06-0788-09

1 引言

涡动相关方法(或涡动协方差方法,简称EC),是一种微气象学测量方法,它可以直接测量生物圈与大气圈之间的湍流交换通量,已成为当前地气交换研究中最先进和首选的通量观测方法。EC通过测量三维风速、温度、水汽和二氧化碳浓度等的快速变化,由计算水平风速分量或某一标量浓度与垂直风速的协方差得到湍流输送量。全球通量网(FLUXNET)已有的500多个塔站中,涡动相关仪器是最重要的通量观测系统。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

括风温湿梯度、辐射、土壤温湿及热流等常规观测外,也普遍使用了涡动相关通量观测系统进行近地层水、热、CO₂等通量的直接观测。

由于涡动相关方法涉及大气湍流输送的一些基本理论以及大气、水文、生物等各圈层间相互作用过程的复杂性,有关大量湍流数据的处理和质量保证/质量控制(QA/QC)方法,必需借鉴全球通量网(FLUXNET)有关共识或标准,建立较严格的规范^[1]。比如,涡动相关仪的理想条件是地表水平均一,湍流充分发展和大气状态平稳等,而实际下垫面常有地形及土地利用的非均匀性存在,也常有不利气象因子等的限制。如果数据处理过程不进行必要

收稿日期:2010-06-18;修订日期:2010-11-15

基金项目: 国家“973”计划项目“干旱区绿洲化、荒漠化过程及其对人类活动、气候变化的响应与调控”(2009CB421305);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”(40875006);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”(KZCX2-XB2-09);国家“973”计划项目“陆表生态环境要素主动遥感协同反演理论与方法”(2007CB714400)

作者简介: 张智慧(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向为水文气象学及地表通量观测研究。E-mail: zhihui_zhang@lzb.ac.cn.

通讯作者: 王维真(1967—),男,副研究员,主要从事土壤水文学和气象环境水文学研究。E-mail: weizhen@lzb.ac.cn.

的修正,或者某些修正模块的取舍或处理方式不同,都可能影响最终通量结果的可靠性。

为提高对寒区旱区水循环和生态过程的定量化认识水平,基础观测资料的积累至关重要^[2]。“黑河综合遥感联合试验”(WATER)项目在黑河上中游地区建立了多个包含涡动相关通量观测的地面站,包括草地、农田、森林等下垫面,开展了航空—卫星遥感与地面观测同步试验,为发展流域科学积累了大量基础数据。在合理有效地将这些基础数据整理归纳成数据产品的过程中,需要较完善的涡动相关通量观测技术及精细的数据处理工作,以保证各涡动观测站的通量数据质量,为实现资料的可比性和一致性奠定基础。依据 FLUXNET 有关标准或意见,王介民编写了《涡动相关通量观测指导手册》。本文以盈科灌区绿洲站为例,介绍涡动相关通量数据处理的校正方法,包括涡动数据处理中必需进行的校正项,建立起一套可靠精确的时间上连续的30 min涡动相关通量数据产品,并将 Campbell 公司自带软件实时处理的通量数据结果与经过一系列校正处理及初步质量控制后生成的数据产品 Level-1、Level-2 产品进行对比分析,并定量分析了黑河流域各涡动站的数据质量。

2 观测站点、仪器及数据介绍

“黑河综合遥感联合试验”在黑河流域建立的涡动相关通量站有阿柔冻融观测站、盈科灌区绿洲站和大野口关滩森林站,分别为草地、农田和森林下垫面。阿柔冻融观测站位于黑河上游支流八宝河南侧的河谷高地上的瓦王滩牧场,观测点的经纬度为 $100^{\circ}27'52.9''\text{E}$, $38^{\circ}02'39.8''\text{N}$,海拔高度为3 032.8 m,夏季牧草长势良好,植被高度为20~30 cm;盈科灌区绿洲站位于黑河中游盈科灌区农田内,经纬度为 $100^{\circ}24'37.2''\text{E}$, $38^{\circ}51'25.7''\text{N}$,海拔高度为1 519.1 m,主要作物为玉米;大野口关滩森林站位于黑河上游大野口子流域关滩阴坡的森林内,经纬度为 $100^{\circ}15'00.8''\text{E}$, $38^{\circ}32'01.3''\text{N}$,海拔高度为2 835.2 m,林内主要是高约15~20 m的青海云杉,地面覆盖有苔藓。

阿柔站和盈科站的试验场内分别立有一座10 m高的微气象观测塔,关滩森林站微气象塔高为24 m,在各塔层不同高度上分别布设了风、温、湿梯度传感器,气象要素观测项目具体请参见文献[3]。3个站点的涡动相关系统架高分别为3.15 m、2.81 m和20.25 m,采集频率均为10 Hz。

作为大气湍流特征与 CO_2 和水热通量的直接

测定系统,根据所使用红外气体分析仪的类型,其观测系统被划分为开路涡度相关系统和闭路涡度相关系统^[4]。目前国内应用较多的是开路涡动相关系统,一般使用 Campbell 公司的三维超声风速温度计(CSAT3)和 LI-COR 公司的开路红外气体分析仪(LI-7500)组合,以及相匹配的数据采集系统和预处理软件等。黑河流域观测站点所安装的涡动相关系统均为 Campbell 开放式涡动相关通量观测系统,附加了 HMP45C 温湿度传感器用于修正涡动相关系统所测定的空气温湿度。

阿柔站涡动数据观测时段从2008年6月至今,盈科站和关滩站都是从2007年底至今。在长时间的通量观测中,由于仪器运行条件的限制、恶劣的天气条件、太阳能板供电不足及人为维护等原因不可避免地会造成部分观测数据的缺失,如做较长时间序列分析时,应对缺失数据进行插补。

3 数据处理方法及初步质量控制

对涡动相关法观测得到的10 Hz原始湍流数据进行格式转换(TOB3-TOB1),然后采用英国爱丁堡大学开发的 EdiRe 软件(<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/>),加入一系列校正计算,包括异常值及野点剔除、倾斜修正、超声虚温修正、时间滞后校正、频率响应修正、空气密度效应修正(WPL修正)等基本处理,得到采样周期为30 min的通量数据产品,定为Level-1产品;再对Level-1产品通过大气状态平稳性检验、总体湍流特征检验以及湍流通量统计特征分析等初步质量控制,获得一个较精确的感热通量、潜热通量及 CO_2 通量数据产品,定为Level-2产品。数据处理流程图见图1。

另外在广泛采用开路涡动相关通量观测系统的许多台站,仍仅仅依赖仪器厂商(Campbell公司)提供的处理软件输出结果做通量分析^[1]。于是本文中 Campbell 公司自带软件实时处理后的通量数据进行拆分整理,与Level-1产品、Level-2产品做了对比分析。

为定量说明整个数据处理过程中各校正方法的重要性及其对湍流通量计算的贡献,下面以盈科站2009年7月1日~7月6日数据为例,对各种校正方法进行详细介绍,并比较各种校正方法处理前后所获得的通量数据差异。

3.1 异常值及野点剔除

首先需要对传感器异常值进行剔除。异常值主

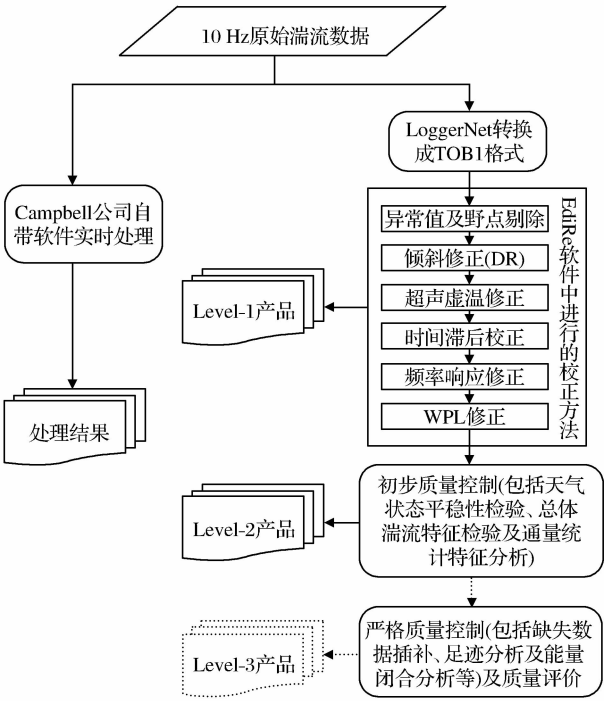
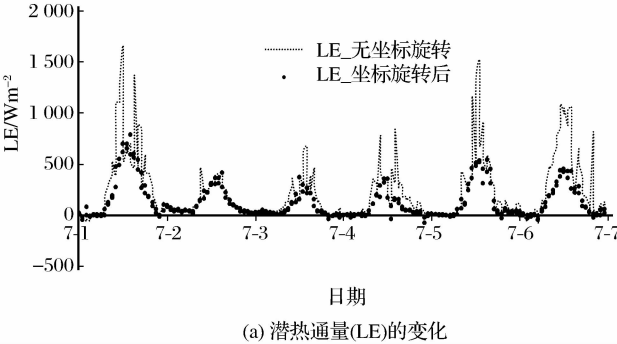


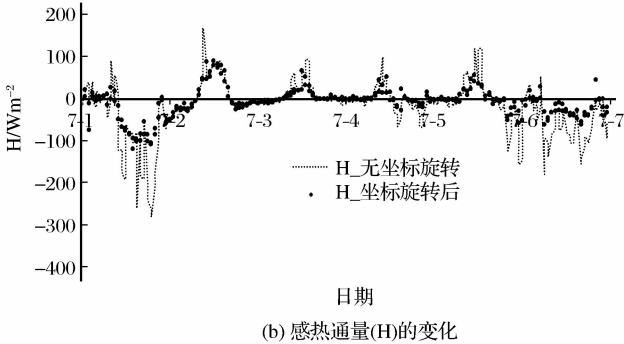
图 1 涡动相关数据处理流程图

Fig. 1 Data processing flow chart of eddy covariance observation

要由环境因子如雨雪等对传感器声光程的干扰造成,有时可持续较长时间,根据诊断值异常标志($diag \neq 0$),或超出二氧化碳浓度阈值($100 \sim 1\,000\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)、水汽浓度阈值($0 \sim 50\text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)等判据来剔除 10 Hz 原始湍流记录中存在的异常数据点。其次,依据标准差来剔除野点。野点通常由电子线路或电源不稳定等因素引起^[5],选用 4 倍标准差,由原



(a) 潜热通量(LE)的变化



(b) 感热通量(H)的变化

图 2 盈科站二次坐标旋转(DR)前后的湍流量变化

Fig. 2 Turbulent flux variations before and after double rotation

另外一种常用的倾斜修正方法是平面拟合法(Planar-fit)^[7]。与二次旋转不同,它不是逐时段(30 min)分别旋转坐标系,而是对一个较长时期(如一周),设定平均风场在一个与当地地形平行的平面,拟合该平面,然后将每一时次的 u 、 v 、 w 旋转到

始时间序列 x 求相邻点之差 Δx 的总体标准差($\sigma_{\Delta x}$)。逐点检查,如某点 $\Delta x \geq 4\sigma_{\Delta x}$,则为野点。若连续 6 点都符合以上判据,则不做“野点”处理。对 30 min 资料,一般野点数为 10~100,野点过多时,剔除该时段。

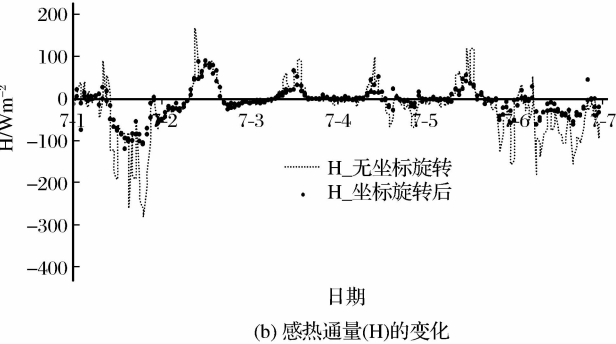
3.2 倾斜修正

实际观测时,涡动仪器的安置常常不能与地面绝对垂直,包括长时间野外连续观测仪器产生不同程度的倾斜等。倾斜修正,也就是通常所说的坐标旋转。

坐标旋转方法包括二次旋转(DR)、三次旋转(TR)及平面拟合(PF)等。朱治林^[6]等利用中国通量网(ChinaFLUX)4 种不同下垫面分析了这 3 种坐标转换方法的适用条件。本次数据处理中用到的方法是常用的二次旋转法。

二次旋转法分为两步:① 将 X-Y 平面绕 Z 轴旋转,使 X-Z 平面与实时风向一致,即侧向风的平均 $v=0$;② 将新的 X-Z 平面绕 Y 轴旋转使平均 $w=0$ 。经过两次旋转后,超声坐标系变换为微气象中常用的直角坐标系,X 轴朝向实时平均风向,新的 Z 轴垂直于地面。最终,一个时间段(30 min)内的平均垂直风速为零,即 $w=0$ 。

倾斜修正是涡动相关数据处理中必须进行的一种校正方法,图 2 显示了盈科站 7 月 1 日至 7 月 6 日坐标旋转前后的潜热通量和感热通量变化,这一校正避免了由于观测点的非均匀性产生的平流对测量结果的影响。



(b) 感热通量(H)的变化

图 2 盈科站二次坐标旋转(DR)前后的湍流量变化

Fig. 2 Turbulent flux variations before and after double rotation

此平面上。

3.3 超声虚温修正

三维超声风速温度计输出的是受湿度影响的“超声虚温” T_s ,我们需要计算出实际气温,进而修正感热通量结果。超声仪所测虚温与空气温度及湿

度有如下关系:

$$T_s = T \left(1 + 0.3192 \cdot \frac{e}{P} \right) \cong T (1 + 0.514 \cdot q) \quad (1)$$

其中: T_s 为超声虚温($^{\circ}\text{C}$), T 为空气温度($^{\circ}\text{C}$), e 为水汽压(Pa), P 为大气压(Pa), q 为比湿($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。通过下面的公式修正感热通量:

$$H = \left[H_s - \rho C_p \frac{0.514 \cdot R_d \cdot \bar{T}^2}{P} \frac{LE}{\lambda} \right] \cdot \frac{T}{T_s} \quad (2)$$

其中: H 为实际的感热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), H_s 为超声虚温计算得出的感热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C_p 为空气定压比热($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

$R_d=287.05$, LE 为实际的潜热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), λ 为蒸发潜热($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)。

从图 3 可以看出,7 月 1 日感热通量长时间呈现负值,推测这一天由于灌溉的影响,玉米农田下垫面水分多,夏季蒸腾量大,蒸腾带走的热量多,农田上边界层温度降低,而盈科绿洲站周围分布着大片的荒漠,沙漠与绿洲的相互作用使得农田上方热量由上向下传输,形成绿洲“冷岛效应”^[8-11]。图 3 和图 4 说明,由于空气湿度的影响,超声仪观测到的虚温略大于实际气温,进而造成感热通量的高估,修正后的感热通量比修正前减少约 7.7%。

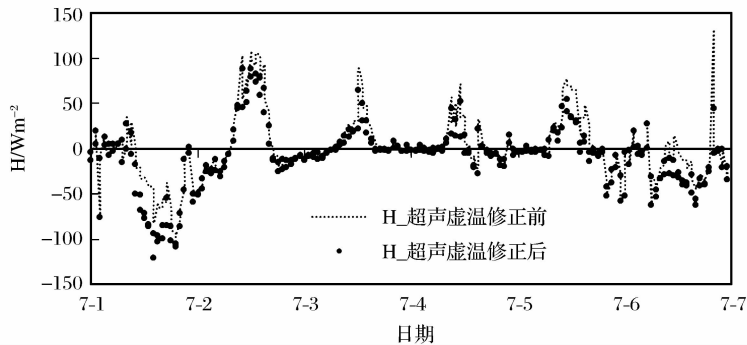


图 3 感热通量的超声虚温修正

Fig. 3 Sonic virtual temperature correction of sensible heat flux (H)

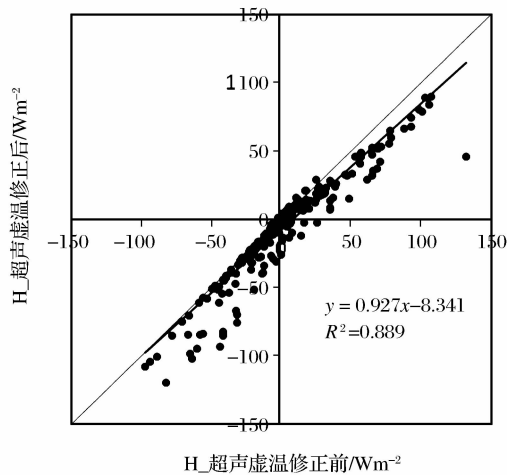


图 4 超声虚温修正前后的感热通量比较

Fig. 4 Comparison of sensible heat fluxes before and after sonic virtual temperature correction

3.4 时间滞后校正

红外气体分析仪 LI-7500 与三维超声风速计 CSAT3 并不同步,存在一定的时间滞后。为确保涡动相关技术准确地观测并计算通量,必须使所有观测项目的时间保持同步。因此,需要对 LI-7500 观测的水汽和二氧化碳浓度进行时间滞后校正。

EdiRe 中通过计算两个信号的交互相关($U_z, \text{H}_2\text{O}$)来校准滞后时间。

水汽及 CO_2 信号相对于超声风速的滞后时间一般仅为 $0.1 \text{ s} \sim 0.2 \text{ s}$ ^[12]。在进行时间滞后校正之前,可以通过时间滞后验证,得到所安装的红外气体分析仪与超声仪之间精确的滞后时间,从而考虑是否需要进行此校正。由图 5 可以看出,对于盈科绿洲站来说时间滞后校正的影响较小,校正后的潜热通量和 CO_2 通量分别约增加了 3.9% 和 2.7%。

3.5 频率响应修正

开路涡动相关系统观测通量时的频率损失,包括低频损失和高频损失两部分。前者主要是由取平均时间不够长及处理中有线性去趋势等引起;后者主要是由传感器声程或光程引起的‘路径平均’及安装时不可避免的超声仪和红外气体分析仪两种传感器之间的较大间距造成^[12]。本次处理中所用的频率响应修正主要是对高频损失的修正,如图 6,频率响应修正对感热通量的贡献为 2.7%,对潜热通量的贡献为 10.5%,对 CO_2 通量的贡献为 11.6%。

3.6 WPL 修正

空气温度和水汽密度的变化会引起空气密度的

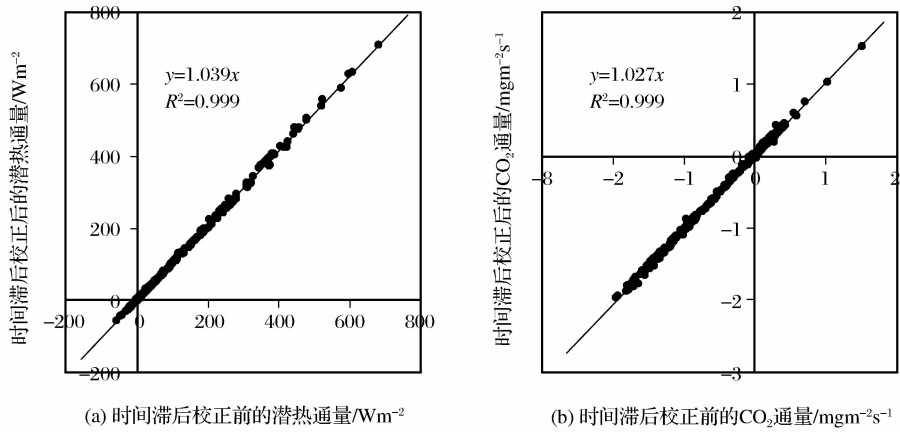


图 5 时间滞后校正前后的通量比较
Fig. 5 Fluxes comparison before and after time-lag correction

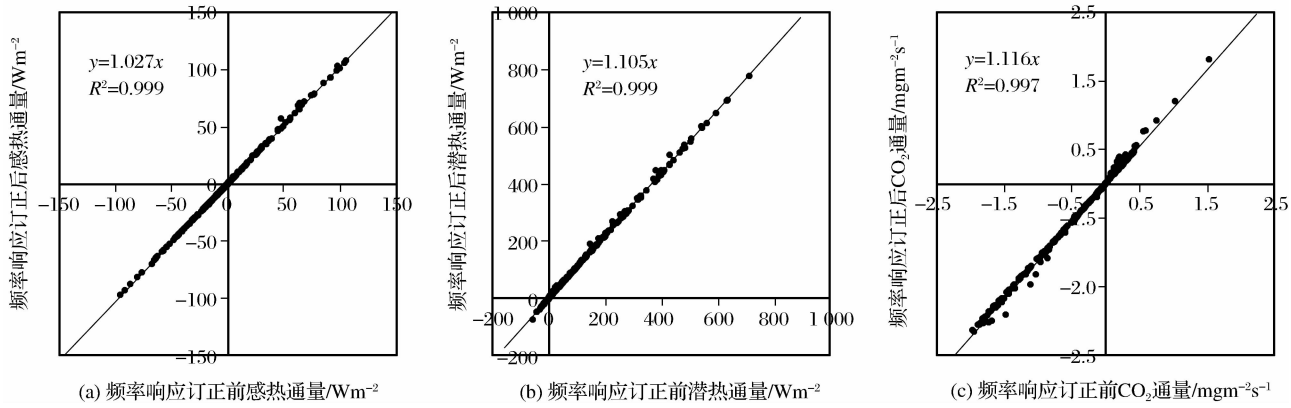


图 6 频率响应修正前后的湍流通量比较
Fig. 6 Comparison of turbulent fluxes before and after frequency response correction

脉动,进而影响物质通量的计算。涡动相关法通常假设 $\overline{w}=0$,即不考虑由垂直平均流动引起的垂向输送。在空气密度因温度及水汽浓度变化而变化的情况下,需要对潜热通量和 CO_2 通量进行空气密度效应修正(WPL 修正)^[13],用到的公式如下:

$$LE = \left(1 + \frac{e}{P_a}\right) \cdot \left[\overline{w'\rho_v'} + \frac{\overline{\rho_v}}{T} \cdot \overline{w'T'}\right] \quad (3)$$

$$Fc = \overline{w'\rho_c'} + \mu \cdot \frac{\overline{\rho_c}}{\rho_d} \cdot \overline{w'\rho_v'} + \left(1 + \frac{e}{P_a}\right) \cdot \frac{\overline{\rho_c}}{T} \cdot \overline{w'T'} \quad (4)$$

其中: e 为水汽压, P_a 为大气压, w 为垂直风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ρ_v 为水汽密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), T 为温度 (K), ρ_c 为 CO_2 密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), ρ_d 为干空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),撇号(')表示脉动值,即时值与平均值的偏差。

也就是说,直接算得的水汽通量需加上一个感热通量修正项;直接算得的 CO_2 通量需加上一个水汽通量修正项和一个感热通量修正项。

图 7(a) 中,潜热通量的修正项最大可达 $18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,同时期的潜热通量为 $400 \sim 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,图 8(a) 中经 WPL 修正后的潜热通量比修正前增加约 1.7%;图 7(b) 中 CO_2 通量的修正项最大值为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,与之相对应的 CO_2 通量最大值为 $-2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,由图 8(b) 经过 WPL 修正后的 CO_2 通量比修正前减少约 9.8%。所以空气湿度对于 CO_2 通量的影响不可忽略,WPL 修正非常必要。

3.7 初步质量控制

经过 EdiRe 中各项校正方法处理后,依据大气状态平稳性检验、总体湍流特征检验,再结合降雨数据及湍流通量统计特征对一些异常数据值进行剔除,得到一个稳定、可靠的 Level-2 数据产品。具体如下:

(1) U_x 、 U_y 、 U_z 、 CO_2 、 H_2O 的野点数均小于 Max_spk 时保留,否则剔除(Max_spk 一般取 200);

(2) CSAT、 CO_2 、 H_2O 的信号出错百分比小于

Max_err_pcnt 时保留,否则剔除(Max_err_pcnt 一般取[10,20,20]);

(3) 大气状态平稳性统计量及总体湍流特征统计

量均小于 fstat 时保留,否则剔除(fstat 一般取 2000);

(4) 依据湍流通量数据统计特征,包括感热通量、潜热通量和 CO₂ 通量的统计特征,剔除异常值。

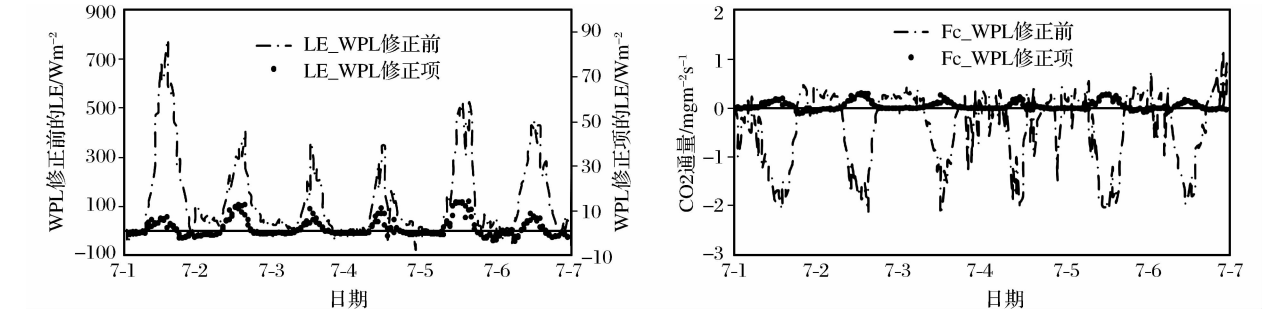


图 7 WPL 修正前湍流通量与 WPL 修正项的比较(a 中 LE 为潜热通量,b 中 Fc 为 CO₂ 通量)

Fig. 7 Comparison between turbulent fluxes before WPL correction and WPL correction terms

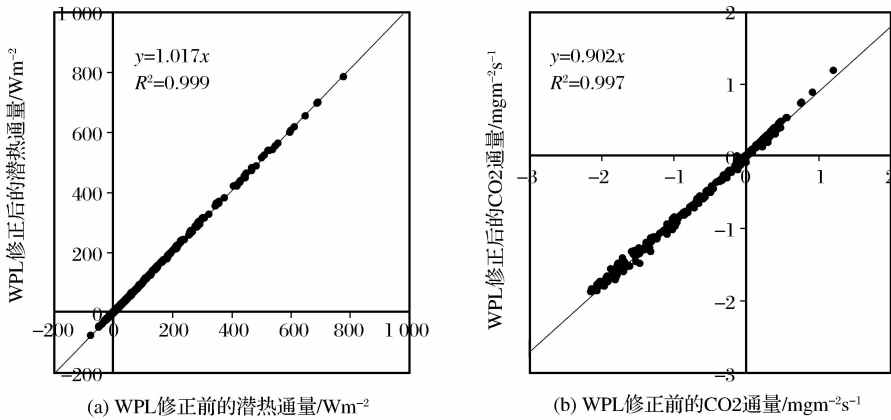


图 8 WPL 修正前后的潜热通量和 CO₂ 通量比较

Fig. 8 Comparison of latent heat flux and CO₂ flux before and after WPL correction

4 数据产品对比分析和总体精度评价

4.1 Campbell 实时处理结果与数据处理产品对比分析

本次数据处理中,生成的产品分为两级:Level-1 产品和 Level-2 产品。Level-1 产品为根据实际站点的仪器安装参数及下垫面状况,对 EdiRe 软件加入上述一系列校正方法后得到的 30 分钟通量数据,包括潜热通量、感热通量和二氧化碳通量;Level-2 产品为对 Level-1 产品再通过大气状态平稳性检验、总体湍流特征检验以及湍流通量统计特征分析进行初步质量控制得到的一个较精确的感热通量、潜热通量及 CO₂ 通量数据产品。数据产品均以.csv 格式存储。另外,对 Campbell 公司自带软件实时处理结果进行了整理,存储为.xls 格式,方便用户查阅及对比使用。

图 9 为盈科站 2009 年 7 月上旬的 Campbell 实时处理结果与 EdiRe 软件处理生成的 Level-1 产

品、Level-2 产品的质量对比图,可以看出,3 种结果差别很小,整体趋势一致,Level-2 产品与 Level-1 产品及 Campbell 实时处理结果相比质量有所提高,排除了大的野点及异常值的干扰,得到的通量数据产品更稳定、可靠。对于感热通量(图 9(a)),Campbell 处理结果总体要略大于 EdiRe 数据处理产品,差值幅度为-20~60 W·m⁻²;对于潜热通量(图 9(b))和 CO₂ 通量(图 9(c)),Campbell 处理结果总体要略小于 EdiRe 数据处理产品,差值幅度分别在-200~100 W·m⁻²之间和-1~0 mg·m⁻²s⁻¹之间。

4.2 总体数据精度评价

经过对 10 Hz 原始湍流数据的拆分、整理、EdiRe 软件运行处理、初步质量控制等操作后,得到可供普通用户使用的 Level-2 涡动相关通量数据产品。图 10 给出了黑河流域 3 个涡动站自运行以来观测得到的涡动相关通量数据的质量情况,以可用数据的百分比来说明。总体来说,阿柔草地站的数

据质量最好,平均可用数据占总数据的 93%以上;盈科绿洲站除 2008 年 2 月、6 月,2009 年 9 月,2010 年 1~4 月等几个特殊月,其余月份涡动通量数据质量较好,平均可用数据达 74%以上;关滩森林站的

数据质量较差,平均可用数据仅为 57%左右,数据缺失严重,据初步分析,造成关滩站涡动通量数据缺失的主要原因为太阳能板供电不足,夜间数据缺失较多。

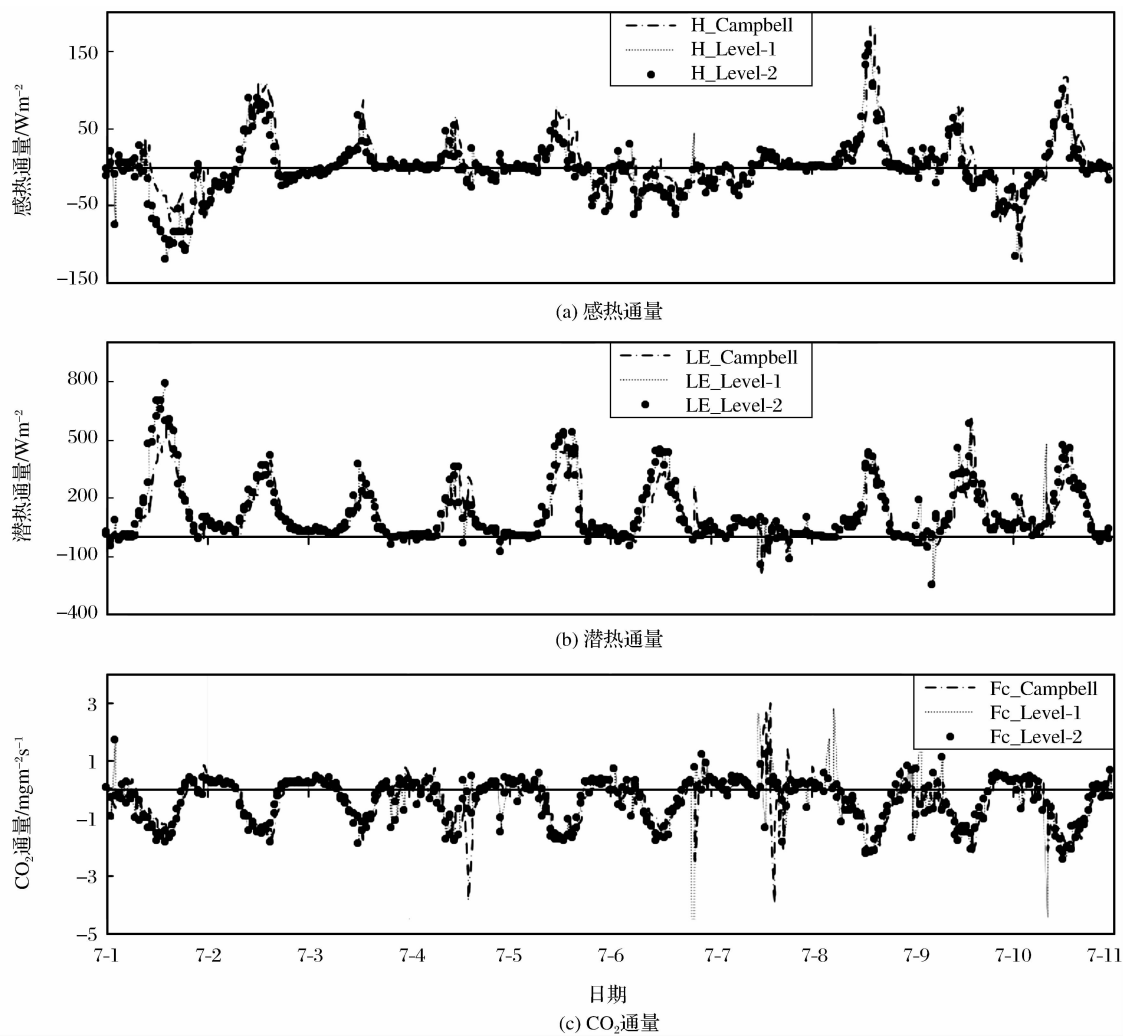


图 9 盈科站 2009 年 7 月上旬 Campbell 实时处理结果与数据处理产品 Level-1、Level-2 的质量对比
Fig. 9 Comparison of quality between Campbell real-time processing results and data processing products (Level-1, Level-2) at Yingke station in early July, 2009

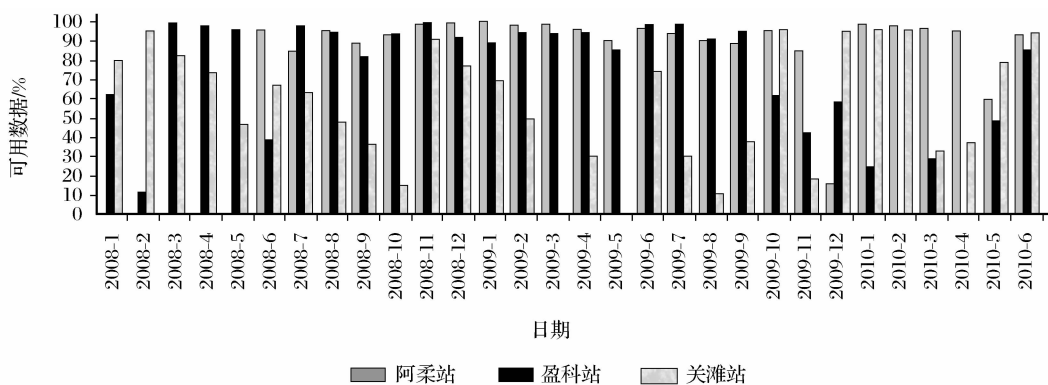


图 10 黑河流域三站点涡动相关通量观测可用数据百分比情况

Fig. 10 Percentage chart of available flux data observed by eddy covariance (EC) at three stations in Heihe River Basin

5 结 语

完善的涡动相关通量观测技术和数据处理工作可以保证黑河流域各涡动观测站的数据质量,为黑河流域的生态—水文研究提供基础数据保证。本文采用 EdiRe 软件,加入一系列校正计算,对黑河流域 3 个站点两年多的涡动观测数据进行处理及初步质量控制,形成了一套可供普通用户使用的数据产品。

本文定量说明涡动相关通量数据处理过程中各校正方法对湍流通量计算的贡献,得出如下结论:野点剔除及倾斜修正是涡动数据处理中不可缺少的步骤;超声虚温修正后感热通量比修正前减少约 7.7%;时间滞后校正后潜热通量和 CO_2 通量分别增加了 3.9%、2.7%;频率响应修正后感热通量、潜热通量及 CO_2 通量分别增加了 2.7%、10.5%、11.6%;WPL 修正后潜热通量增加了 1.7%, CO_2 通量减少了 9.8%。

与 Campbell 实时处理结果相比,数据处理产品(Level-2 产品)经过了一系列的校正和初步质量控制,特别是依据实际站点的仪器安装参数及真实下垫面状况,对 EdiRe 软件中各校正方法的参数确定,更具有可靠性,数据质量较高。多篇文献指出,在恶劣气象条件及仪器运行限制等状况下,主观能动分析比自动程序运算显得更加可靠^[14]。

在保证野外台站数据观测正常运行的同时,数据处理工作也仍需进一步完善。本研究没有对缺失数据进行插补,复杂下垫面的通量源区(Footprint)分析将另文进行。下阶段,在完善资料质量评价系统的同时,以 Level-2 数据产品为基础,对缺失数据及剔除数据进行插补,并依据足迹分析、能量闭合分析等,进行严格的数据质量等级划分,生成 Level-3 数据产品(见图 1),提供有质量保证的标准化的基础涡动相关通量数据,并满足资料共享的有关要求。

致谢:涡动相关数据的处理及本文的完成得到王介民教授的悉心指导。谨致谢意。

参考文献:

- [1] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Ao Yinhuan, *et al.* Turbulence Flux Measurements under Complicated Conditions[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(8): 791-797. [王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 791-797.]
- [2] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous Remote Sensing and Ground-based Experiment in the Heihe River Basin: Scientific Objectives and Experiment Design[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 897-914.]
- [3] Huang Guanghui, Ma Mingguo, Tan Junlei, *et al.* Data Quality Control Procedures and Products of Automatic Weather Stations from Watershed Allied Telemetry Experimental Research (WATER)[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, . [黄广辉, 马明国, 谭俊磊, 等. WATER 试验自动气象站数据质量控制与产品生成[J]. *遥感技术与应用*, 2010, .]
- [4] Yu Guirui, Sun Xiaomin. Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 229-231. [于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 229-231.]
- [5] Foken T. Micrometeorology[M]. Berlin: Springer, Heidelberg, 2008.
- [6] Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Yuan Guofu, *et al.* Eddy Covariance Flux Correction Method and Its Application in ChinaFLUX at Heterogeneous Underlying Surface[J]. *Science in China Ser. D: Earth Sciences*, 2004, 34(S2): 37-45. [朱治林, 孙晓敏, 袁国富, 等. 非平坦下垫面涡度相关通量的校正方法及其在 ChinaFLUX 中的应用[J]. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 37-45.]
- [7] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 127-150.
- [8] Wang Jiemin, Liu Xiaohu, Qi Yongqiang. A Preliminary Study of Turbulence Transfer Characteristics in Gobi Area with an Eddy Correlation Technique[J]. *Plateau Meteorology*, 1990, 9(2): 120-129. [王介民, 刘晓虎, 祁永强. 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究[J]. *高原气象*, 1990, 9(2): 120-129.]
- [9] Wang Jiemin, Liu Xiaohu, Ma Yaoming. Turbulent Structure and Transfer Characteristics in The Surface Layer of HEIFE Gobi Area[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, 51(3): 343-350. [王介民, 刘晓虎, 马耀明. HEIFE 戈壁地区近地层大气的湍流结构和输送特征[J]. *气象学报*, 1993, 51: 343-350.]
- [10] Gao Yanhong, Lv Shihua. Numerical Simulation of Local Climatic Effect of Heterogeneous Underlying Surface[J]. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(4): 354-361. [高艳红, 吕世华. 非均匀下垫面局地气候效应的数值模拟[J]. *高原气象*, 2001, 20(4): 354-361.]
- [11] Zhang Qiang, Hu Yingqiao. The Geographical Features and Climatic Effects of Oasis[J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(4): 477-486. [张强, 胡隐樵. 绿洲地理特征及其气候效应[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(4): 477-486.]
- [12] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Liu Shaomin, *et al.* The Problems of Surface Energy Balance Closure-An Overview and Case Study[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 705-713. [王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 近地层能量平衡闭合问

题—综述及个例分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 705-713.]

[13] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of Flux Measurements for Density Effects Due to Heat and water Vapour Transfer[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106(447): 85-100.

[14] Foken T, Gockede M, Mauder M, *et al.* Post-field Data Quality Control[C]//Lee X, Massman W J, Law B. Handbook of Micrometeorology: a Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 2004: 181-208.

Data Processing and Product Analysis of Eddy
Covariance Flux Data for WATER

ZHANG Zhi-hui¹, WANG Wei-zhen¹, MA Ming-guo¹, XU Zi-wei²,
WU Yue-ru¹, HUANG Guang-hui¹, TAN Jun-lei¹

(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: Eddy covariance (EC) flux data processing and quality control is an important procedure to ensure the data quality of each observation station. A large number of flux data measured by EC system have been accumulated based on the project of “Watershed Allied Telemetry Experimental Research” (WATER) since late 2007. Pre-processing and quality control were performed using improved EdiRe software developed by Edinburgh University to the original EC data at Yingke oasis station, Arou freeze-thaw observation station and Guantan forest station. The basic processing steps on the Level-1 data product including removal of outliers and spikes, tilt correction, sonic virtual temperature correction, time-lag correction, frequency response correction, and correction for density effects (WPL correction). Level-2 data product is generated with initial quality control steps based on Level-1 data product, including atmosphere state stationarity test, overall turbulence characteristics test and turbulent flux statistical characteristics analysis. In this paper, taking EC data of Yingke oasis station in July, 2008 as an example, the improvements of each correction steps during EC flux data processing and the contribution of different correction methods to the calculation of turbulent flux were analyzed in detail. The results show that: after sonic virtual temperature correction, sensible heat flux decreased about 7.7%; after time-lag correction, latent heat flux and carbon dioxide flux increased by 3.9% and 2.7% respectively; after frequency response correction, sensible heat flux, latent heat flux and carbon dioxide flux increased by 2.7%, 10.5% and 11.6% respectively; after WPL correction, latent heat flux increased by 1.7%, and carbon dioxide flux decreased by 9.8%. Finally, the Level-1 product and Level-2 product were compared with the Campbell real-time processing results, and an overall data accuracy evaluation on each eddy covariance station for these three stations was obtained. It is concluded that the data quality of the Arou freeze-thaw observation station is the best, and that of the Yingke oasis station is better, and that of the Guantan forest station is poor.

Key words: Eddy covariance; WATER; Turbulent flux; Data processing; Quality control