

文章编号: 100020240(2010)0120070208

# 春末黄土高原半干旱区地表能量闭合的观测研究

肖霞<sup>1</sup>, 左洪超<sup>1</sup>, 刘辉志<sup>2</sup>, 符淙斌<sup>2</sup>, 黄建平<sup>1</sup>, 胡隐樵<sup>1,3</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 利用兰州大学半干旱气候与环境监测站的连续观测数据, 分析了该站的数据质量情况和黄土高原半干旱区的近地层湍流通量特征及地表能量平衡能量闭合状况. 结果表明: 兰州大学半干旱气候与环境监测站(SACOL)湍流通量的平均时间取 30 min 为宜. 该站利用 EdiRe 获得的湍流通量较 TK2 和 CR 5000 数据自动记录器输出的湍流通量结果要好. 黄土高原半干旱区近地层湍流能量与地表含水量状况明显相关, 地表干燥时感热通量处于主导地位, 接近于干旱区的特征; 地表湿润时感热通量和潜热通量则相当, 接近于湿润地区的特征. 地表能量平衡分析表明, 兰州大学黄土高原半干旱环境监测站观测的地表能量闭合度高达 85%, 与已有的观测相比, 能量闭合情况属于较好水平.

**关键词:** 数据质量控制; 近地层湍流通量; 地表能量闭合

**中图分类号:** P421.1 **文献标识码:** A

## 0 引言

为了加强地气相互作用研究, / 全球协同加强观测期(CEOP)0计划应运而生. CEOP 主要通过在全球陆地不同区域, 尤其是季风区设立的地面观测基准站, 结合卫星资料, 研究陆地不同区域水分和能量通量及碳循环, 以及陆地在全球气候系统中的作用, 加深对地气相互作用的了解. 在国家重点基础研究发展计划(973 计划) 项目/ 北方干旱化0研究支持下, 中国科学院大气物理研究所在东北半干旱区吉林通榆建立了地面综合观测站. 它是 CEOP 计划在国内建立的一个由我国自己设计、投资并独立承担的地面观测基准站. 2006 年在 973 计划项目 / 北方干旱化0研究支持下, 兰州大学在西北半干旱区黄土高原上甘肃省榆中建立了地面综合观测站. 它是 CEOP 计划在国内建立的又一个由我国自己设计、投资并独立承担的地面观测基准站. 吉林通榆观测站和黄土高原半干旱环境监测站在东北和西北遥相呼应, 为监测和研究我国北部半干旱区的气候和环境变化起着重要的作用.

在地球系统中, 地气相互作用占有极其重要的

地位. 地气之间的物质能量交换特征, 深刻地影响着全球大气环流和气候的基本特征. 我国从 20 世纪就地气相互作用研究进行大量的野外观测, 获得了很多宝贵的资料, 并得出了许多有意义的结论. 胡隐樵<sup>[1]</sup> 在 1994 年通过黑河实验得出了黑河地区的能量平衡特征; 刘辉志等<sup>[2]</sup> 利用通榆观测站资料, 分析得出了半干旱地区农田和退化草地近地层湍流通量的日变化、季变化和年变化特征; 马耀明等<sup>[3]</sup> 利用 GAME/ Tibet 和 CAMP/ Tibet 试验长达 9 a 的观测资料, 得出了局地能量分布特征和很多其他重要的结果; 胡非等<sup>[4]</sup> 利用白洋淀的/ 地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究0项目资料, 分析了白洋淀近地面层微气象特征, 进行了一些关于湍流理论的研究; 姜纪峰等<sup>[5]</sup> 也利用通榆观测站资料对二氧化碳、水和热通量变化进行了模拟比较.

黄土高原位于我国北方的中部, 属于黄河中游流域. 范围东起太行山, 西至青海日月山(114°~101°E), 南界秦岭, 北抵长城(34°~40°N), 面积约 40 余万平方公里, 包括山西、宁夏、陕西、甘肃省区的大部分和青海、河南的小部分. 以前在甘肃

收稿日期: 200906229; 修订日期: 200909202

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB400501); 国家自然科学基金项目(40775017)资助

作者简介: 肖霞(1983), 女, 江西崇义人, 2005 年毕业于南京信息工程大学, 现为兰州大学博士研究生, 主要从事大气边界层方面的研究. E2mail: xiaox07@lzu. cn

西部黑河进行的野外观测试验站, 张掖, 临泽都处在黄土高原的干旱区, 有关在黄土高原的半干旱区的野外观测试验相对较少。基于此, 本文欲利用兰州大学黄土高原半干旱区环境监测站观测的资料, 分析黄土高原半干旱区近地层湍流通量特征, 分析地表能量闭合状况, 为进一步研究该地区的地气相互作用和陆面过程参数化服务, 进而为理解黄土高原气候形成和变化提供帮助。

## 1 观测仪器和资料介绍

兰州大学半干旱气候与环境监测站(SACOL: Sem2Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University)位于兰州大学榆中校区西面的塬顶上(35°57'46"N, 104°08'13"E), 海拔1965.8 m, 距离兰州市区约48 km。观测场占地约810 hm<sup>2</sup>(120 亩)。观测场下垫面属于典型的黄土高原地貌, 塬面梁峁基本为原生植被。属温带半干旱气候, 年平均气温 6.7 °C, 1 月平均气温 - 8 °C, 7 月平均气温 19 °C。年平均降雨量 381.8 mm, 相对湿度 63%。山顶全年盛行西北和东南风, 年平均风速约为 11.6 m s<sup>-1</sup>。全年日照时数 2607.2 h 左右。站内架设了梯度观测塔、超声探测仪、脉动温湿仪、红外辐射温度计、雨量计和各种辐射仪等观测仪器。观测项目包括平均场和湍流场两部分, 主要观测近地面层基本气象要素、土壤温湿度以及近地面层的物质和能量通量。

兰州大学半干旱气候与环境监测站从 2006 年 4 月份仪器安装调试成功后, 开始获取了大量观测的资料, 为综合分析研究黄土高原边界层特征提供了可能。其中, 有由微气象塔站观测的风、温、湿、辐射、地温、地湿及降水量资料。该梯度塔上装了 7 层(1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 12 m, 16 m 和 32 m)风速(014A2L, Met One), 温度和相对湿度(HMP45C2L, Vaisalla), 8 m 处风向传感器(034B2L, Met One), 具有每 30 min 记录 1 次的自动记录器(CR23X, Campbell); 辐射观测包括由向上和向下的太阳辐射计(CM21; Kipp&Zonen), 及向上和向下的长波辐射计(CG4; Kipp&Zonen); 湍流通量资料由三维超声风速仪(CSAT 3; Campbell)和 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 开路气体分析仪(L27500, LI2COR), 利用 CR5000 数据自动记录器记录 30 min 的平均值, 每 30 min 输出 1 次; 湍流脉动资料的观测频率为 10 Hz; 土壤热通量由热流板(HFP01SC2L, Hukseflux)观测得到。

本文选取 2006 年 05 月 21), 31 日 11 d 的观测

数据, 用以分析说明兰州大学半干旱气候与环境监测站的数据质量情况和春末黄土高原半干旱区地表能量闭合特征。

## 2 观测数据资料质量控制和处理方法

涡旋相关法虽然已被认为是观测湍流通量的最优方法, 但是也有其局限性, 加之下垫面非均匀的作用, 使得实际测量地气能量和物质交换时会产生一些问题。所以, 在利用涡旋相关技术测定湍流通量的时候需要对数据进行质量分析与控制(QC/QA), 这样才能合理有效的评价当地的湍流特征及能量平衡状况。

能量的不闭合问题是用涡旋相关法观测地气能量和物质交换时最突出的问题, 许多野外试验观测研究表明, 地表能量不闭合度范围大约在 10%~30%, 个别观测结果不闭合量甚至更高。许多不同的假定已经解释了地表能量的不平衡性<sup>[6]</sup>: 1) 造成能量平衡的不闭合是与测量过程中的系统误差相联系的, 包括涡旋相关技术局限性造成的误差和仪器自身的偏差造成的误差; 2) 不同的尺度对测量地表能量平衡各分量也有影响, 这包括通量贡献(footprint)的影响和土壤与植被能量储存的影响; 3) 低频或者高频对湍流谱的贡献的缺失或失真也会影响地表能量平衡的闭合程度。王介民等<sup>[7]</sup>结合国际上几个较典型的通量站和国内祁连山大野口等通量站特点, 简要介绍了复杂条件下湍流通量的观测与分析; 陈家宜等<sup>[8]</sup>针对野外实验发现的不同观测法测定地表能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, 分析了涡旋相关法测定湍流通量偏低的问题; 高志球<sup>[9]</sup>则认为土壤热通量的低估是地表能量不平衡的一个重要因素。

在湍流通量的计算中, 通常 30 min 时间平均是一个普遍运用的平均时间。总体来看, 低频通量成分对 CO<sub>2</sub> 通量影响较大, 而对潜热和显热通量影响较小。目前 FLUXNET 的大部分观测站在白天所采取的采样周期通常为 30~60 min, 但在夜间大气稳定层结条件下, 存在间歇性湍流运动时, 可能需要更长的采样周期<sup>[5]</sup>。低频湍流运动对通量输送有显著的影响, 而要观测到低频湍流运动, 就需要有足够长的采样周期, 相反采样周期太长又会造成通量昼夜变化信息的部分丢失。因此, 在进行通量计算时需要确定合适的采样周期<sup>[10]</sup>。Moncrieff 等<sup>[11]</sup>指出, 随着测量高度的增加, 需要有更长的平均时间来捕获所有的涡旋通量, 其中 30 m 处需要

30 min, 122 m 处需要 60 min, 而 396 m 处则要 120 min 才足够. Sun Xiaomin 等<sup>[12]</sup>分别用/全时段平均0和/Ogive0函数两种方法评价了大气湍流低频成分对中国通量网中的3个地点的湍流通量的贡献, 植被为小麦的要比植被为森林的所需要的平均时间要短. 由于一个新的时间序列里面包括一些非稳态的条件, 因此, 应该对每个时间序列进行条件测试, 因为这严重影响到数据的质量<sup>[5]</sup>. Moncrieff 等<sup>[11]</sup>推荐使用 Ogive 作为确定任一站点平均时间的最理想的方法.

### 2.1 湍流计算的平均时间

本文利用 Ogive 函数来确定湍流通量所需要的平均时间, Ogive 函数是协谱从高频向低频的累积. 通过观察 Ogive 曲线是否达到渐近线能够确定是否有足够长的样本来捕获所有的频率. 即:

$$\text{Og}_{wx}(f) = \int_{f_{\text{high}}}^f \text{Co}_{wx}(f) df \quad (1)$$

式中:  $f_{\text{high}}$  为 Nyquist 频率;  $f$  为比最低分辨率  $f_{\text{low}} = (2T)^{-1}$  大的频率;  $T$  为时间序列的长度.

选择 2006 年 05 月 24 日的数据进行分析, 图中 1(a) 和图 1(b) 分别为 11:00) 15:00 经过归一化的潜热通量和感热通量的 Ogive 图, 最长平均周期选择 240 min, 即 4 h. 从图 1 中可以很清楚的看出, 潜热通量在平均时间超过 30 min 以后潜热通量不再有明显的增加现象, Ogive 函数为一常数, 基本达到渐近线. 说明对于该观测资料, 在 > 30 min 平均时间基本能捕获全部的低频信息, 而没有明显的低频损失. 同样, 感热通量在 30 min 平均周

期以后 Ogive 函数也为一定值, 该时间段的平均时间可以获得全部低频信息而没有明显的低频损失. 平均周期取值太小, 低频能量损失很大. 因此, 该站资料取 30 min 作为湍流通量计算的平均周期是合理的.

### 2.2 三种湍流通量值输出方式的比较

涡动相关技术进行能量通量观测, 通过直接测定大气中湍流运动所产生的位温脉动、水汽比湿脉动和风速脉动求算显热( $H_s$ ) 和潜热( $LE$ ) 通量, 计算公式为:

$$\begin{aligned} H_s &= \overline{C_p w \text{TC}} \\ LE &= \overline{K w c q} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为空气密度;  $C_p$  为空气的定压比热;  $w$  为垂直湍流速度脉动;  $T_c$  为气温脉动;  $K$  为水的汽化潜热;  $q$  为比湿脉动, 上横线表示协方差. 即使如此, 在很多细节上的处理也会使得最终的通量输出结果有所不同. 本文介绍 3 种通量输出方式, 对 3 种通量输出方式的结果进行比较, 通过误差分析, 利用误差最小的输出方式进行黄土高原半干旱区的地表能量闭合状况的分析. 这 3 种方法分别是 CR5000 数据自动记录器, TK2 软件包和 EdiRe 软件包对湍流通量的输出. 虽然这 3 种输出方式都是建立在涡旋相关法的基础上的, 但是由于其对变量调整的程度不同, 输出结果有一定的差异.

CR5000 法, 即由观测直接输出湍流通量各通量, 平均时间为 30 min. 德国拜罗伊特大学发展的 TK2 (TurbulenceKnight2) 和英国爱丁堡大学发展

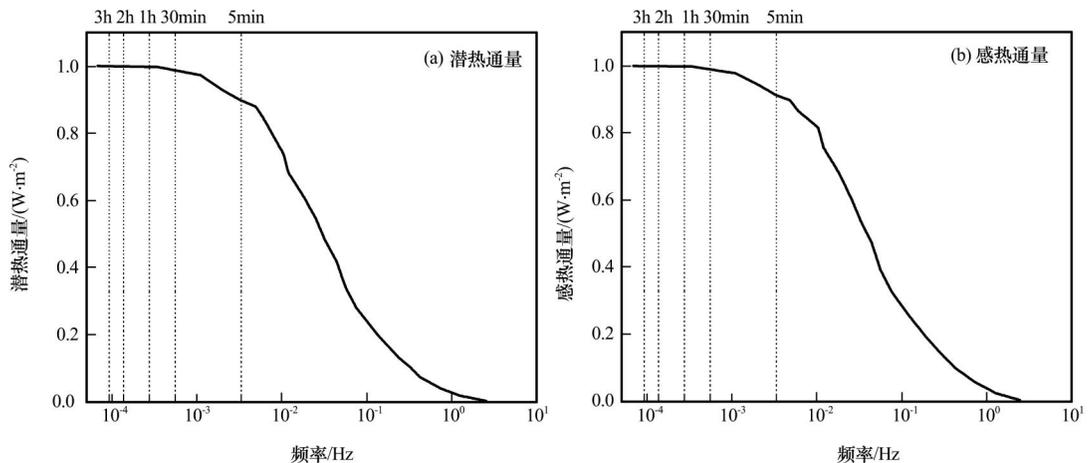


图 1 2006 年 05 月 24 日标准化的潜热通量和感热通量的 Ogive 曲线  
(实线为 11:00) 15:00 之间的 Ogives 曲线)

Fig. 1 Normalized ogives of latent heat flux (a) and sensible heat flux (b) on May 24th, 2006. Solid lines correspond to ogives computed between 11:00 to 15:00; Vertical dashed lines correspond the times

of 5 min, 30 min, 1 hour, 2 hours and 3 hours

的 EdiRe (Eddy Reprocessing) 两个软件包是目前已有的较为适用的涡旋相关仪数据处理软件. 但由于每个软件计算和修正的程序不同, 而使得对于同一时间序列得出的湍流通量结果有差异, 且不同的软件对于不同的下垫面所得出通量的精确度不一样<sup>[13]</sup>. 为了减小软件的使用而造成的误差, 找出一个适合 SACOL 资料的通量计算软件, 有必要比较不同的输出方式来减小误差. 这两个不同的软件包的差异描述如表 1 所示.

选择一晴好天气, 对比 3 种计算方法得结果, 以用来检验 3 种计算方法的适用性. 以 2006 年 5

月 24 日的数据来比较观测站 CR5000 数据自动记录器, TK2 和 EdiRe 输出结果的差异. 利用三者输出结果的平均值作为真值, 如图 2 是以 3 种方式输出的潜热和感热通量的平均值作为参照值的散点图, 图中显示了 3 种方式得出的感热和潜热通量值的比较. 表 2 所列的是不同输出方式的感热和潜热通量的回归分析结果. 如图 2 (a) 所示, TK2 得出的潜热通量值较平均值偏大 (斜率 = 11100), 而 EdiRe 得出的潜热通量值较平均值稍微偏小 (斜率 = 01856), 但是 EdiRe 得出的潜热通量值基本集中在 1B1 直线上 ( $R^2 = 01964$ ), 而 TK2 ( $R^2 = 01957$ )

表 1 TK2 和 EdiRe 两个软件处理步骤的比较

Table 1 A comparison between TK2 processing and EdiRe software processing

| 对比项目          | TK2 软件   | EdiRe 软件  |
|---------------|--|---|
| * 适用的数据样本     | CSAT3, USA21, HS, R2, R3, ATIK, NUW, Young; 6262, 7000, 7500, KH20, ADC OP22 | 任何数据  |
| * 数据预处理       | 可信度试验, 削峰处理; 阻塞平均; 可自行设置时间间隔   | 可信度试验, 削峰处理; 进行任意的线性拟合和滤波; 阻塞平均; 可自行设置时间间隔  |
| * 坐标旋转        | 平面拟合/二维坐标旋转; 源的修正  | 平面拟合/二维坐标旋转/三维坐标旋转  |
| * 浮力通量转化成感热通量 | Schotanus 等 <sup>[14]</sup> /Liu 等 <sup>[15]</sup>                           | Schotanus 等 <sup>[14]</sup> /Liu 等 <sup>[15]</sup>  |
| * 氧校正湿度计      | Tanner 等 <sup>[16]</sup>   | )   |
| * 高频缺失        | Moore <sup>[17]</sup>  | Moore <sup>[17]</sup> /Eugster and Senn <sup>[18]</sup>                                       |
| * WPL 修正      | Webb 等 <sup>[19]</sup>   | Webb 等 <sup>[19]</sup>  |
| * 是否进行反复修正    | 是  | 是   |
| * 常用参量修正      | $K(T)$ ; $C_p(c_p, dry_q)$ ; $Q(T, p)$                                       | $K(T)$ ; $C_p(c_p, dry_q)$ ; $Q(T, p)$  |
| * 质量控制        | 平稳性测试, 总体湍流特征测试: Foken and Wichura <sup>[20]</sup>                           | 平稳性测试, 总体湍流特征测试: Foken and Wichura <sup>[20]</sup> , Vickers and Mahrt <sup>[21]</sup> ; 通量贡献 |

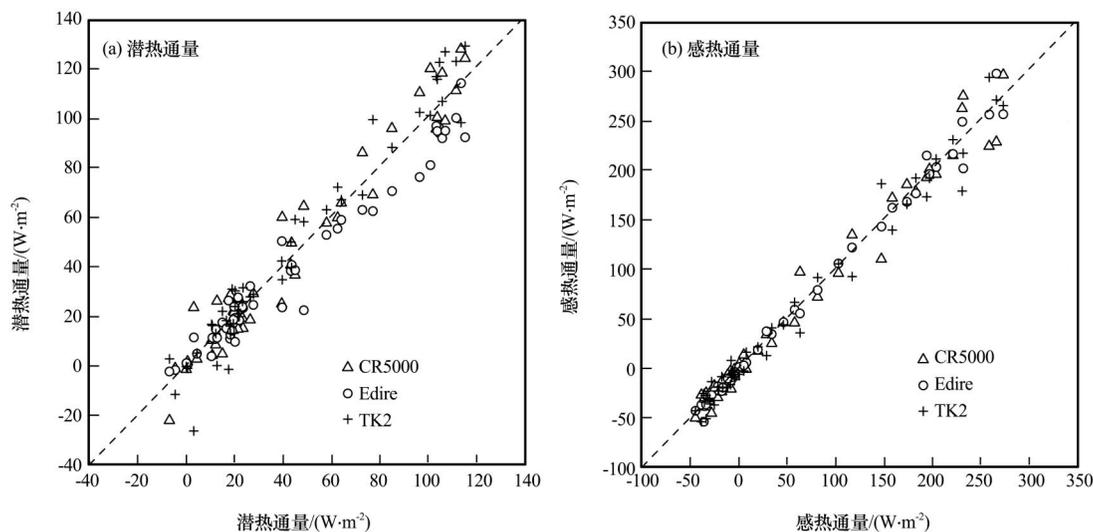


图 2 三种不同输出方式得到的湍流通量值

Fig. 2 Latent heat fluxes (a) and sensible heat fluxes (b) calculated from different output manners

表 2 不同输出方式计算得出的潜热和感热通量的回归分析

Table 2 Results of the regression analyses of the latent and sensible heat fluxes calculated from different output manners

| 湍流通量 | 输出方式   | 斜率    | 截距     | 决定系数(R <sup>2</sup> ) |
|------|--------|-------|--------|-----------------------|
| 潜热通量 | CR5000 | 1.044 | - 2.2  | 0.950                 |
|      | EdiRe  | 0.856 | 1.83   | 0.964                 |
|      | TK2    | 1.100 | - 1.61 | 0.957                 |
| 感热通量 | CR5000 | 1.002 | 0.78   | 0.978                 |
|      | EdiRe  | 1.006 | - 0.21 | 0.993                 |
|      | TK2    | 0.992 | - 0.56 | 0.979                 |

表 3 由平稳性和总体湍流特征检验标记得出的最终质量标记

Table 3 The final quality signs derived from the tests of stability and collective turbulence characters

|          |      |      |      |      |      |     |     |     |   |
|----------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|---|
| 平稳性检验    | 1    | 2    | 1~ 2 | 3~ 4 | 1~ 4 | 5   | [ 6 | [ 8 | 9 |
| 总体湍流特征检验 | 1~ 2 | 1~ 2 | 3~ 4 | 1~ 2 | 3~ 5 | [ 5 | [ 6 | [ 8 | 9 |
| 最终质量标记   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6   | 7   | 8   | 9 |

和 CR5000( $R^2 = 0.950$ )输出的结果却较为分散. 同样, 图 2(b)所示的感热通量的比较, 也显示 EdiRe 得出的值最为集中. 综合 3 种输出方式得出潜热通量和感热通量值的比较分析可知, 在 SACOL 观测站上 EdiRe 对于湍流通量的计算更为精确. 因此, 在接下来的分析中湍流通量将利用 EdiRe 的输出结果.

### 2.3 湍流通量的质量分析与控制

将 2006 年 05 月 21- 31 日的数据做 30 min 平均, 共得 528 个时次, 其中 18 个时次为数据缺测及物理上不合理的时次, 占总数据的 3.4%. 根据 Foken 等<sup>[20]</sup>进行平稳性检验(steady state test)和总体湍流特征检验(integral turbulence characteristics test), 如表 3 所示, 为质量标记的方式, 其中 1~ 3 标记高质量数据(high quality data: 用于基本研究用), 4~ 6 标记中等质量数据(moderate quality data: 用于一般通量的分析), 7~ 9 标记低质量数据(low data quality: 补缺和差值). 通过标记检验, 得出高质量数据有 159 时次, 占 30.1%; 中等质量数据有 231 时次, 占总数据的 43.8%; 低质量数据有 120 时次, 占 22.7%, 低质量数据基本产生于夜间, 即日出前和日落后(19:00-00:00-07:00).

### 2.4 土壤热流量的计算

地表向下的总热量不可能直接测量, 土壤热流量必须埋在土壤中一定的深度. 观测地设置了地表下 5 cm 和 10 cm 两块热流量板, 地表向下的总热量可用如下表达式计算:

$$G_0 = G_z + \int_z^{\infty} C_v(z) \frac{5T_s(z)}{5t} dz \quad (3)$$

式中:  $G_z$  为在地表以下  $z$  处观测的地热流量, 通常取  $z = 5$  cm.  $C_v$ 、 $T_s$  为土壤热容量和土壤温度, 它们都与土壤深度有关. 地表温度由向下和向上的长波辐射换算得到, 即:

$$T_0 = [(R_{lw}^x - (1 - \epsilon_g))R_{lw}^y / (\epsilon_g R)]^{1/4} \quad (4)$$

式中:  $0 < \epsilon_g \leq 1$ , 由观测者经验给定, 这里为了方便计算取地表发射率  $\epsilon_g = 1$ ; Stefan-Boltzmann 常数  $R = 51.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ , 则地表温度可表示为:

$$T_0 = \left[ \frac{R_{lw}^x}{R} \right]^{1/4} \quad (5)$$

由此可以计算出表面土壤热流量  $G_0$ .

## 3 黄土高原半干旱区地表能量闭合状况

在分析近地层能量平衡之前, 有必要先认识一下半干旱区的近地层湍流通量. 图 3 给出了黄土高原半干旱区 2006 年 05 月下旬逐日潜热通量(LE)、感热通量( $H_s$ ), 净辐射( $R_n$ )和地表土壤热通量( $G_0$ )的能量平衡的日变化, 其中 20) 21 日、25) 26 日和 30) 31 日有降水过程发生. 在比较干燥的 30 日, 感热通量白天为正, 最大值约  $310.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 感热通量晚上为负; 潜热通量白天为正, 数值较小, 只有  $78.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 潜热通量夜间为比较小的正值, 表明地表仍有较小的蒸发. 由于 30 日夜至 31 日晨之间有降水过程发生, 地表变得比较湿润, 白天地气之间能量交换, 感热变得较小, 潜热通量变得较大, 感热通量和潜热通量相当, 最大

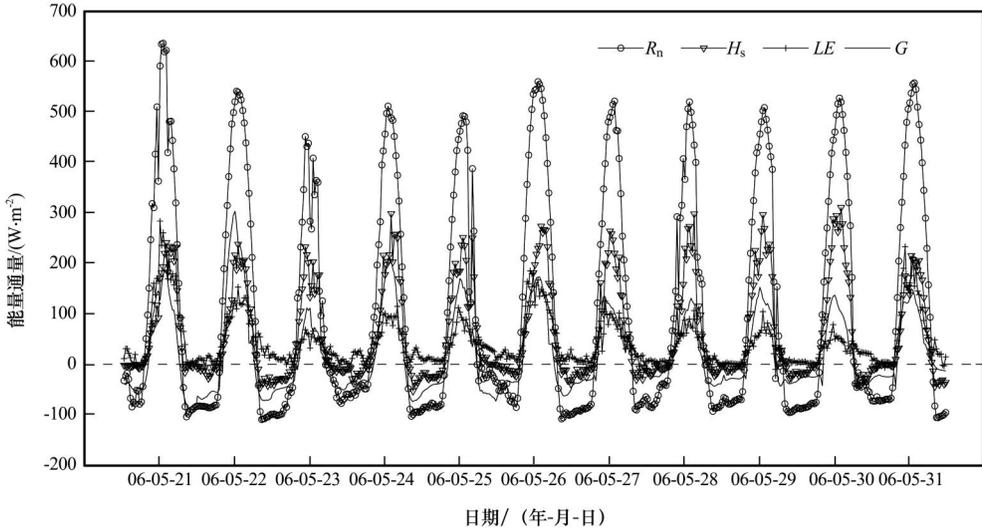


图 3 2006 年 05 月 21) 31 日地表能量分布

Fig. 3 Variations of energy fluxes from 21st to 31st May, 2006

都将近  $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  左右。由此可见，黄土高原半干旱区近地层湍流通量特征与地表的含水状况有明显的关系，这与左洪超等<sup>[22]</sup>分析的青藏高原安多地区干季和湿季的近地层能量传输日变化特征相似，但地表干燥时近地层能量传输主要以感热为主，潜热通量占很小一部分，蒸发很小；而湿润时，能量传输过程中感热和潜热所占比例相当。当发生降水时，地表变得比较湿润，地气之间能量传输特征明显的就从干燥时的能量传输特征向湿润时的能量传输特征转化。由于半干旱区有强大的蒸发能力，加之一般降水强度较低，这种湿润特征通常只能维持 1~ 2 d。

在运用涡度相关技术测定物质和能量通量系统中，能量平衡公式可表示为：

$$LE + H_s = R_n - G_0 - S - Q \quad (6)$$

式中：LE 为潜热通量； $H_s$  为感热通量； $R_n$  为净辐射； $G_0$  为土壤热通量；S 为冠层热储量；Q 为附加能量源汇的总和；Q 项很小一般被忽略<sup>[23]</sup>。McCaughy<sup>[24]</sup>和 Moore<sup>[17]</sup>研究表明，当冠层高度超过 8 m 时，冠层热储量对能量平衡闭合度的影响很大。本研究分析的站点的冠层是 15 cm 高左右的原生态草地，所以冠层热储量 S 的影响可以忽略。因此，地表能量平衡可表示为：

$$R_n - G_0 = H_s + LE \quad (7)$$

图 4 给出了由 EdiRe 计算得出的湍流通量(潜热通量和感热通量之和)和有效能量(冠层为草地是为净辐射与地表土壤热通量的和)的比较，可见湍流通量和有效能量之间有很好的线性关系，线性拟合方程为：

$$(LE + H_s) = 0.8453(R_n - G_0) + 22.693 \quad (8)$$

从中可知地表的能量闭合度(湍流通量与有效能量的线性拟合斜率)为 85% 左右，截距为 221.69，相关系数高达 0.96。与已有的观测相比，兰州大学黄土高原半干旱环境监测站观测的近地层能量平衡属于较好的水平<sup>[10, 25-27]</sup>。

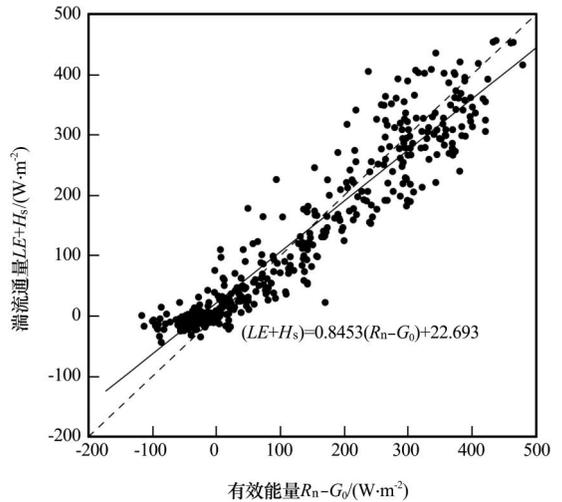


图 4 地表能量平衡的闭合率 (实线为  $LE + H_s$  与  $R_n - G_0$  的拟合直线，虚线为 1B1 直线)

Fig. 4 Relation between turbulent fluxes  $LE + H_s$  and efficient energy  $R_n - G_0$  with a linear line (solid) and a 1B1 line (dashed)

### 4 结论

本文对兰州大学半干旱气候与环境监测站的观测数据进行了一个初步的质量控制分析，利用该观测数据分析了黄土高原半干旱区近地层湍流通量特

征和能量闭合状况, 得出以下结论:

(1) 兰州大学半干旱气候与环境监测站 (SACOL) 观测得到的湍流通量原始数据通过 Ogive 分析得出该站上资料取 0.5~1 h 作为湍流通量计算的平均周期为最佳; 同时也验证了 CR5000 数据自动记录器记录 30 min 的湍流通量平均值是合适的。

(2) 利用 TK2 和 EdiRe 两个软件包对原始资料进行 30 min 平均周期的湍流通量输出, 与 CR5000 数据自动记录器输出的湍流通量值进行比较, 得出 EdiRe 输出的结果相对较好。

(3) 黄土高原半干旱区近地层湍流能量与地表含水量状况明显相关, 地表干燥时感热通量处于主导地位, 接近于干旱区的特征; 地表湿润时感热通量和潜热通量则相当, 接近于湿润地区的特征。当发生降水过程后, 地气之间能量传输特征迅速的从干燥时的能量传输特征向湿润时的能量传输特征转化, 但由于半干旱地区有较强的蒸发力, 加之一般降水强度较低, 这种特征一般只能维持 1~2 d。

(4) 黄土高原半干旱区的地表能量闭合度为 85% 左右, 与已有的观测相比, 兰州大学黄土高原半干旱环境监测站观测的近地层能量平衡属于较好的水平。

**致谢:** 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所王介民研究员, 在本文资料处理中给予了极其重要的帮助, 表示特别感谢。

#### 参考文献 (References):

[1] Hu Yinqiao. Research advance about the energy budget and transportation of water vapour in the HEIHE area [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1994, 9(7): 30-34. [胡隐樵. 黑河实验(HEIFE)能量平衡和水汽输送研究进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9(4): 30-34.]

[2] Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO<sub>2</sub> between the land surface and atmosphere in the semiarid area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(1): 109-118. [刘辉志, 涂钢, 董文杰, 等. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化[J]. 大气科学, 2006, 30(1): 109-118.]

[3] Ma Yaoming, Yao Tandong, Wang Jiemin, et al. The study on the land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan plateau [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2006, 21(12): 1215-1223. [马耀明, 姚檀栋, 王介民, 等. 青藏高原复杂地表能量通量研究[J]. 地球科学进展, 2006, 21(12): 1215-1223.]

[4] Hu Fei, Hong Zhongxiang, Chen Jiayi, et al. The field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area) introduction and preliminary data analysis [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,

2006, 30(5): 883-893. [胡非, 洪钟祥, 陈家宜, 等. 白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究)) 实验介绍及近地层微气象特征分析[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 883-893.]

[5] Jiang Jifeng, Yan Xiaodong, Huang Yao, et al. Simulation of CO<sub>2</sub> and sensible/latent heat fluxes exchange between land surface and atmosphere over cropland and grassland in semiarid region [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(3): 413-423. [姜纪峰, 延晓冬, 黄耀, 等. 半干旱区农田和草地与大气间二氧化碳和水热通量的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(3): 413-423.]

[6] Cava D, Contini D, Donato A, et al. Analysis of short-term closure of the surface energy balance above short vegetation [J]. *Agric. Forest Meteorol.*, 2008, 148: 82-93.

[7] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Ao Yinhuang, et al. Turbulence flux measurements under complicated conditions [J]. *Advance in Earth Sciences*, 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.]

[8] Chen Jiayi, Fan Shaohua, Zhao Chuanfeng, et al. The underestimation of the turbulent fluxes in eddy correlation techniques [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(3): 423-432. [陈家宜, 范邵华, 赵传峰, 等. 涡旋相关法测量湍流通量偏低的研究[J]. 大气科学, 2006, 30(3): 423-432.]

[9] Gao Zhiqiu. Determination of soil heat flux in a Tibetan short grass prairie [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2005, 114: 165-178.

[10] Yu Guirui, Fu Yuling, Sun Xiaomin, et al. Recent progress and future directions of ChinaFLUX [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(Suppl. 0): 1-23. [于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络的研究进展及其发展思路[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(增刊 0): 1-21.]

[11] John Moncrieff, Robert Clement, John Finnigan, et al. Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series [C]// *Handbook of Micrometeorology*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2005: 7-31.

[12] Sun Xiaomin, Zhu Zhilin, Wen Xuefa, et al. The impact of averaging period on eddy fluxes observed at China FLUX sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 188-193.

[13] Mauder M, Foken T, et al. Quality control of CarboEurope flux data Part 0: Intercomparison of eddy covariance software [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2007, 4: 4067-4099.

[14] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, DeBruin H A R. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluctuations [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1983, 26: 81-93.

[15] Liu H, Peters G, Foken T. New equations for sonic temperature variance and buoyancy heat flux with an omnidirectional sonic anemometer [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 100: 459-468.

[16] Tanner B D, Swiatek E, Greene J P. Density fluctuations and use of the krypton hygrometer in surface flux measurements [C]// *American Society of Civil Engineers*, New York, NY, 1993: 945-952.

[17] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1986, 37:

- 17- 35.
- [18] Eugster W, Senn W. A cospectral correction model for measurements of turbulent NO<sub>2</sub> flux [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1995, 74: 321- 340.
- [19] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of the flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1980, 106: 85- 100.
- [20] Foken T and Wichura B. Tools for quality assessment of surface based flux measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78: 83- 105.
- [21] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1997, 14: 512- 526.
- [22] Zuo Hongchao, Hu Yinqiao, L Shihua, et al. Seasonal transition and its boundary layer characteristics in Anduo area of Tibetan Plateau [J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15 (3): 239- 245. [左洪超, 胡隐樵, 吕世华, 等. 青藏高原安多地区干、湿季的转化及其边界层特征[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(5): 535- 540.]
- [23] Li Zhengquan, Yu Guirui, Wen Xuefa, et al. Energy balance closure at China FLUX sites [J]. *Science in China (Ser. D Earth Sciences)*, 2005, 48(Supp. N): 51- 62. [李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况评价. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(增刊0): 46- 56.]
- [24] McCaughey J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario) a case study [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1985, 31: 89- 101.
- [25] Foken T, Buck A L, Nye R A, Horn R D. A Lyman-alpha hygrometer with variable path length [J]. *Atmosph. Oceanic Technol.*, 1998, 15: 211- 214.
- [26] Beyrich F, Foken T, Herzog H J: Editorial. The LITFAS98 experiment [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2002, 73: 1- 2.
- [27] Liu Huihui, Hong Zhongxiang, Zhang Hongsheng, et al. The turbulent characteristics in the surface layer over dune at Naiman in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(3): 389- 398. [刘辉志, 洪钟祥, 张宏升, 等. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究[J]. *大气科学*, 2003, 27(3): 389- 398.]

## Observational Study of the Surface Energy Closure in the Semi-Arid Regions of Loess Plateau in Late Spring

XIAO Xia<sup>1</sup>, ZUO Hongchao<sup>1</sup>, LIU Huihui<sup>2</sup>, FU Congbin<sup>2</sup>, HUANG Jianping<sup>1</sup>, HU Yinqiao<sup>1,3</sup>  
 (1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** The characteristics of surface layer's turbulent flux, surface energy balance and energy closure in the semi-arid regions of Loess Plateau are analyzed, using the data observed from the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University. The observatory is about 48 km away from the center of Lanzhou city, situated at the southern bank of the Yellow River in Gansu province (35°15'N, 104°08'E). It is situated on the China Loess Plateau, about 1965.8 m above sea level. The topography around the observatory is characterized by the Loess Plateau consisting of plain, ridge and mound, etc, with the elevation ranging between 1714~2089 m. There is loess soil in the terrace, ridge and mound. The terrain where the measurements are carried out is flat and covered with short grass. The annual mean temperature is 6.7 °C, the January mean temperature is -8 °C and the July mean temperature is 19 °C. The annual mean precipitation is 381.8 mm, and

the relative humidity is 63%. In this article, using the 112-day observation (from May 21 to 31, 2006), the data quality and the characteristics of surface layer's turbulent fluxes, surface energy balance and energy closure in the semi-arid region of Loess Plateau are analyzed. The results display that: the average period of 30 min~1 h is the best time scale in the observatory. The output of turbulent fluxes is the best by using the software of EdiRe, as compared with using the soft TK2 and CR5000 automatic data recorder. Obviously, there is a correlation between the turbulent flux of surface layer and the surface moisture condition. In the dry period, the surface sensible heat flux is dominant, showing the characteristics of arid region; in the wet period, sensible heat flux is equal to latent heat flux, similar to the humid areas. The surface energy balance closure rate in the observatory is as high as 85%, which is better level as compared with other observations.

**Key words:** quality control of data; turbulent flux of near-surface layer; surface energy closure