

朱岩,左洪超,郭阳,等.黄土高原半干旱区异常能量闭合率特征分析[J].干旱气象,2014,32(5):719-726, [ZHU Yan, ZUO Hongchao, GUO Yang, et al. Characteristics of Abnormal Energy Balance Ratio in Semi-Arid Region of Loess Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(5):719-726], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-05-0719

黄土高原半干旱区异常能量闭合率特征分析

朱岩¹,左洪超¹,郭阳¹,武建军²

(1.兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000;2.中国人民解放军93801部队,陕西 武功 712200)

摘要:以兰州大学半干旱气候与环境观测站(简称SACOL站)4 a的陆面通量数据为基础,利用普通最小二乘法(OLS)和能量平衡比率(EBR)方法,对能量平衡的异常闭合特征及其与相对垂直湍流(RI_w)的关系进行了研究,并进行了能量滞后分析。结果表明,能量过闭合和负闭合现象分别主要发生在白天和夜间,大小遵从正态分布;较大异常闭合产生的原因主要是日出日落时净辐射与地表热通量接近以及降水影响造成湍流通量出现异常大值。一般来说,垂直湍流运动越强,异常闭合越少,闭合度越向1收敛,反之亦然。强湍流或极弱湍流都不利于产生异常闭合,过闭合、负闭合的最适相对垂直湍流 RI_w 约为0.11、0.14。另外,能量支出项的相对滞后也是造成包括负闭合在内的异常闭合的原因之一。剔除湍流较弱的点或将地表热通量 G_0 、感热 H 、潜热 LE 相位相对净辐射 R_n 提前30 min后,异常闭合所占比重减少;月平均EBR法过闭合度降低,OLS法闭合度提高。

关键词:半干旱区;异常能量闭合率;相对垂直湍流;能量滞后现象

文章编号:1006-7639(2014)-05-0719-08 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-05-0719

中图分类号:P404

文献标识码:A

引言

作为地气相互作用的发生层,近地层与气候、天气形成相互反馈机制,研究近地层物质和能量交换过程将有助于深入了解这些机制。其中能量交换和收支是地气相互作用的集中体现,能量守恒是其基本准则^[1]。近几十年来国内外针对不同地表、生态系统对陆面过程进行了大量的野外观测试验^[2-6],然而它们无一例外地揭示了地表能量平衡不闭合现象的普遍存在,并对不闭合现象的原因进行了大量研究^[7-11]。值得注意的是,能量不闭合并非在所有尺度上出现。Wilson^[3]、李正泉^[4]等分别对通量观测网(FIUXNET)和中国通量网(ChinaFLUX)能量平衡日变化的分析表明,下午某一时段的能量闭合率总会系统性地 >1 ,出现“过闭合”现象。尽管在较长时间尺度内,统计意义上能量支出小于能量收入,能量平衡是不闭合的,但也存在着相当数量的能量支出高于能量收入的“过闭合”现象,甚至两者反号使能量闭合率 <0 的“负闭合”现象^[5-6,12],理论上

讲,它们是违反能量守恒定律的。然而忽视这个问题,将对观测资料质量控制、微物理过程检验和陆面模式输出^[13]产生严重影响,并且它的系统性存在也不能单纯用仪器观测、计算的随机误差解释。郭建侠、岳平、张杰^[8-10]等将其归因为能量收支项的时间不同步,将支出项全部或部分地提前0.5~1 h后提高了能量闭合度。吴灏等^[12]认为白天能量闭合度大于夜间能量闭合度这一现象是由湍流交换强弱引起的,而刘强等^[14]分析塔克拉玛干沙漠腹地大气稳定度特征时发现午时热对流旺盛、湍流较强,夜间湍流较弱。另外,左洪超^[11]、肖霞^[15]等定义了相对垂直湍流表征大气湍流运动的强弱,并发现总体上近地层能量平衡闭合程度随湍流混合度增大而增加,在相对垂直湍流为0.16左右时能量闭合情况达到最佳并趋于稳定。本文基于兰州大学半干旱气候与环境观测站(简称SACOL站)2006年9月至2010年8月的地表辐射、涡动相关、土壤热通量及温湿资料,利用普通最小二乘法和能量平衡闭合率法首先分析了异常能量闭合率的基本特征,其次探讨了它

收稿日期:2014-02-28;改回日期:2014-07-09

基金项目:国家重大科学研究计划“973”项目(2012CB956200)及国家自然科学基金项目(41275019)共同资助

作者简介:朱岩(1990-),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事陆面过程研究. E-mail:zhuy12@lzu.cn

通讯作者:左洪超(1964-),男,河北邢台人,教授,博士,研究方向为大气物理学与大气环境. E-mail:zuohch@lzu.edu.cn

们与相对垂直湍强之间的关系,最后验证了稀疏短草下垫面能量滞后现象同样存在并导致异常闭合率的可能性。

1 数据观测及处理

1.1 研究区域和观测仪器

兰州大学半干旱气候与环境观测站(简称 SACOL 站)位于甘肃黄土高原榆中地区的一块塬上(35°57'N,104°08'E),海拔高度 1 966 m,处于夏季风边缘区和温带半干旱气候区,年降水量 381.8 mm,20 cm 蒸发皿蒸发量 1 528.5 mm,年平均气温 6.7 °C,观测场下垫面均匀平坦,植被为天然荒漠草地。

监测站内安装有观测近地层基本气象要素、物质和能量通量以及土壤湿度的全套仪器。其中地表辐射分量仪器包括向上和向下短波辐射计(CM21, KIPP&Zonen)、长波辐射计(CG4, Kipp&Zonen),均安装在 1.5 m 高度;6 层土壤温度观测仪器(STP01-L, Hukseflux),埋深 2、5、10、20、50、80 cm;5 层土壤湿度仪器(CS616-Campbell, 准确度 2.5%),埋深 5、10、20、40、80 cm;2 层土壤热通量由自校正热通量板(HFP01SC-L, Hukseflux, 准确度为 ±3%)测定,埋深 5、10 cm;一套三维超声风速仪(CAST3, Campbell),感应头高 3 m,CR5000 数采器记录 30 min 的平均值,每 30 min 输出一次,湍流资料观测频率为 10 Hz,24 h 连续观测、自动记录。观测仪器的主要技术指标已有文献^[16]做过详细说明。

1.2 数据处理

本文选取 2006 年 9 月 1 日至 2010 年 8 月 31 日资料,时段长、样本多,统计意义更具代表性。

(1)剔除野点:当 CSAT3 诊断值 diag_csat = 61503 时即为报错,需剔除;峰值检验:以 $\pm 4\sigma$ 对原始资料进行噪音剔除处理, $|x_i - \bar{x}| > 4\sigma$ 时需剔除。

(2)根据湍流通量昼夜变化特征, $R_n > 0$ 时, LE/H 范围控制在 $(-100, R_n)$ 以内, $R_n \leq 0$, 则为 $(R_n, 200)$ 。

(3)对 30 min 的通量数据进行坐标轴倾斜校正、超声虚温校正和 WPL 校正^[17],对于 1 h 内因去噪、断电、天气因素等缺失的数据根据相邻数据进行线性插补,1 h 以上缺失数据不予插补。

(4)剔除降水同期数据:由于天气状况、环境条件和仪器维护引起的缺测占理想时次 4.3%,经过数据预处理和质量控制后,最终用于分析的数据总量占实际观测数据的 68%^[15]。

1.3 计算方法

1.3.1 能量平衡方程各项的处理

水平、均匀下垫面和大气定常条件下,地表能量平衡方程通常表示为:

$$R_n - G = H + LE + S_g + S_c + S_p \quad (1)$$

式中 R_n 为净辐射, G 为浅层土壤热通量,取 5 cm 处热通量, H 、 LE 分别为涡动相关系统观测到的感热和潜热, S_g 为深 5 cm 处热通量板到地表之间的土壤热存储, S_c 为冠层热存储, S_p 为光合耗能,单位均为 W/m^2 。研究区域下垫面为稀疏短草,冠层高度远低于 8 m,根据 McCaughey^[18]、Moore^[19] 的研究, S_c 、 S_p 对能量平衡闭合度的影响可以忽略。将 G 与 S_g 合并,即计算地表处土壤热通量,可通过温度积分法^[20]将 HFP01SC 在深 5 cm 处的测量结果 G_5 校正到地表:

$$G_0 = G_5 + \frac{\rho_s c_s}{\Delta t z} \sum_{z=5 \text{ cm}}^{0 \text{ cm}} [T(z_i, t + \Delta t) - T(z_i, t)] \Delta z \quad (2)$$

其中 G_0 为校正到地表的土壤热通量(单位: W/m^2), $\rho_s c_s$ 是土壤的体积热容量(单位: $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$), ρ_s 、 c_s 分别为土壤密度和比热, $T(z_i, t)$ 分别为 0.2 和 5 cm 深度处的实测土壤温度。 $\rho_s c_s$ 通过下式计算:

$$\rho_s c_s = \rho_d c_d (1 - \theta_{sat}) + \rho_w c_w \theta \quad (3)$$

其中 θ 为土壤体积含水量, θ_{sat} 为土壤总孔隙度,实测 $\theta_{sat} = 0.53$, $\rho_w c_w = 4.19 \times 10^6 J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$, 为液态水体积热容量, $\rho_d c_d$ 为干土壤体积热容量(单位: $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$),根据土壤观测资料给定。

1.3.2 能量平衡闭合度的研究方法

用最小二乘法(Ordinary Least Square, OLS)、能量平衡比率法(Energy Balance Ratio, EBR)研究闭合度问题。

(1)将 $(H + LE)$ 与 $(R_n - G_0)$ 进行线性回归分析,斜率代表能量闭合程度。

(2)用湍流通量 $(H + LE)$ 与可利用能量 $(R_n - G_0)$ 的比值 EBR 评估地表能量闭合状况。

0.5 h 以内的能量闭合率:

$$EBR = (H + LE) / (R_n - G_0) \quad (4)$$

0.5 h 以上的能量闭合比率:

$$EBR = \frac{\sum(H + LE)}{\sum(R_n - G_0)} \quad (5)$$

1.3.3 相对垂直湍强

相对垂直湍强(Relative Vertical Turbulence Intensity, RI_w)是衡量大气湍流运动强弱的普适标准^[11,15],定义为:

$$RI_w = \frac{\sqrt{w^2}}{\sqrt{w^2 + \bar{U}}} \quad (6)$$

其中, $\sqrt{w^2}$ 是垂直风速标准差, \bar{U} 是水平平均风速, RI_w 无量纲。相对垂直湍流强大, 说明大气运动在垂直方向湍流充分发展, 湍流特征强, 相反湍流特征弱。

2 异常闭合的统计特征

2.1 异常闭合的基本特征

据最小二乘法结果(表1)显示, 该站能量闭合度总体为73%, 白天、夜间各为76%、38%, 在类似下垫面的研究结果中处于中等水平^[8,10]。最小二乘法适于中长期、天以上尺度的能量闭合研究, 且调和了过闭合和低闭合, 过滤了大气湍流运动扰动, 因此长期统计特征为不闭合; 小时尺度能量闭合宜用能量平衡比率法(EBR)进行研究, 但湍流通量受大气环境的瞬变影响明显, 叠加观测、计算误差后波动较大, 因此异常闭合大量出现。

表1 剔除异常30 min EBR 前后 OLS 闭合度变化情况

Tab.1 Variation of energy closure degree according to OLS method after and before removing abnormal half-hour EBR

| 对30 min EBR | 全体 | | 白天 | | 夜间 | |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 斜率 | 相关系数 | 斜率 | 相关系数 | 斜率 | 相关系数 |
| 无处理 | 0.73 | 0.91 | 0.76 | 0.81 | 0.38 | 0.33 |
| 剔除 EBR > 1 | 0.70 | 0.93 | 0.78 | 0.87 | 0.31 | 0.32 |
| 剔除 EBR < 0 | 0.73 | 0.91 | 0.76 | 0.81 | 0.40 | 0.41 |
| 剔除 EBR > 1, EBR < 0 | 0.70 | 0.94 | 0.78 | 0.87 | 0.30 | 0.50 |

设定 $R_n \leq 0$ 为白天, $R_n > 0$ 为夜间。由图1 30 min EBR 时间变化序列可见, 过闭合点和负闭合点都系统、大量地出现。白天过闭合点向1收敛, 负闭合点较少; 夜间异常闭合点明显多于白天, 且 EBR 分布更为发散, 其中一些点数值相当大(图中未显示), 这是叠加在系统误差上的随机误差。

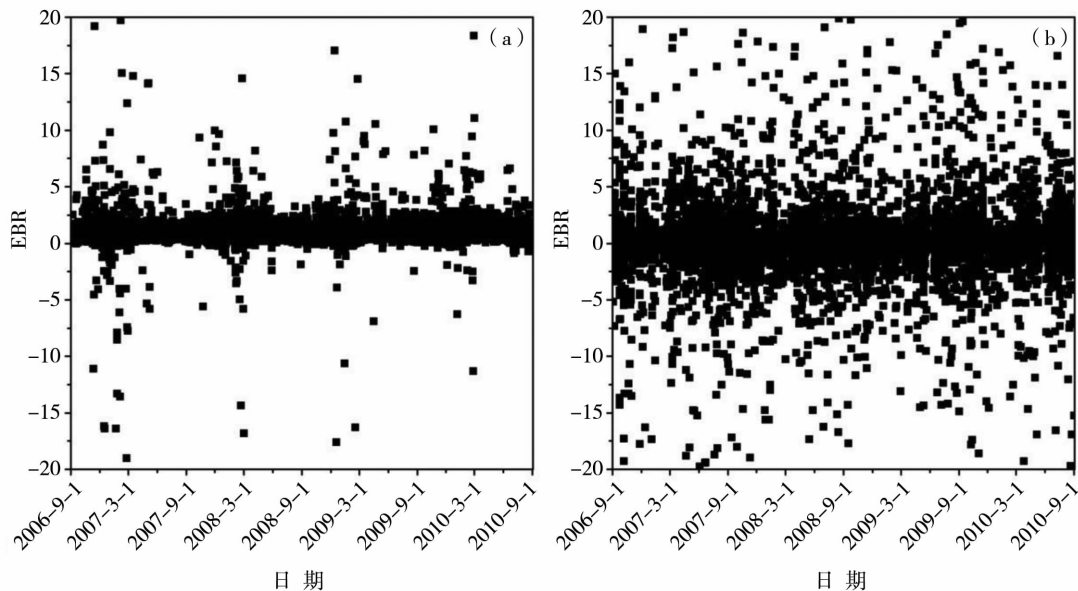


图1 白天(a)及夜间(b)30 min EBR 随时间变化序列

Fig.1 Time series of half hour EBR in daylight (a) and at night (b) from September 2006 to August 2010

这些异常的30 min EBR 闭合度对长期的 OLS 法闭合度会有怎样的影响? 结合表1 拟合结果, 仅剔除过闭合点($EBR > 1$)后, 全体和夜间的 OLS 法闭合度分别下降了3%、7%, 白天则上升了2%; 仅剔除负闭合点($EBR < 0$)后, 全体和白天的 OLS 法闭合度不变, 夜间则上升了2%; 剔除所有过闭合和负闭合点后, 全体和白天的 OLS 法闭合度变化情况

与仅剔除过闭合点相同, 其中夜间闭合度相比下降了1%。这说明过闭合虽然在理论上不正确, 但实际上提高了全体和夜间的 OLS 法闭合度, 降低了白天闭合度; 由于其对夜间闭合度的提高多于对白天闭合度的降低, 所以全体来看也提升了闭合度; 负闭合点则主要是降低了夜间 OLS 法闭合度, 对全体和白天的闭合度没有显著影响。

根据 30 min EBR 值域以 0.1 的间距划分区段, 在每个区段上进行了频数分布统计及其非线性拟合。结果显示, EBR 闭合度的出现频率满足正态分布(图略), $R^2 = 0.97, P < 0.01$, EBR 闭合度均值为 0.58。

图 2 是异常闭合在一天中各时次出现的概率。(1,10) 的过闭合呈不对称的双峰分布, 与图 3 中

EBR 和 RI_w 不对称的日变化形成较好对应。上午 09:00 ~ 10:00、傍晚 17:00 ~ 18:00 分别有 2 个峰值, 其中前者峰值明显高于后者, 对应 RI_w 值在 0.1 ~ 0.12 以内; 过闭合在中午稍低, 白天出现频率远高于夜间。负闭合分布以 (-10, 0) 为主, 日出日落时出现频率最高, 夜间次之, 上午至午后的白天最低, 午时几乎为 0。

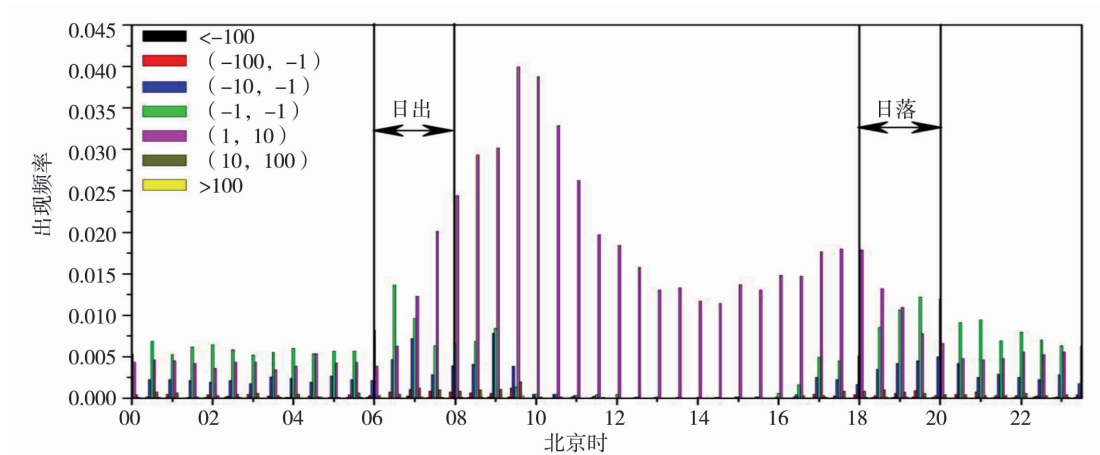


图 2 各区段异常 EBR 出现概率日分布

Fig. 2 Daily distribution of occurrence probability for different sections of abnormal EBRs

图 3 为 30 min EBR 的平均日变化, 可以看出白天在日出日落时 EBR 过闭合, 日出至日落, EBR < 1 并缓慢降低; 夜间 EBR 一直低于 0.5 且较平稳, 在日出日落时分降低为负。必须指出的是, 由于平均日变化消除了逐日差异, 所以只能反映 EBR 闭合度日变化的共同特征和一般趋势, 不能反映 EBR 在数量上的长期统计特征, 所以同概率分布图(图 2)所显示的一天中任何时段都可能出现异常闭合的情况并不矛盾。

2.2 较大异常闭合产生原因初探

一些过大的异常点并未在之前图表中显示, 下面根据 30 min EBR 正态分布的数值范围, 将异常闭合点按区段划分后, 对不同区段上的点探讨其产生的原因。

由图 4 所示 $R_n - G_0$ 、 $H + LE$ 随 EBR 的散点变化关系可见, 可利用能量 $R_n - G_0$ 随 EBR 变化较规则, 异常 EBR 在 (-10, 10) 以内时 $R_n - G_0$ 变化较大, 绝大多数非 0 值集中在此区间内, (-10, 10) 以外 $R_n - G_0$ 基本趋于 0, 说明较大的异常闭合产生原因主要是昼夜转换时 R_n 、 G_0 正负转换, R_n 与 G_0 相接近使分母近于 0, 这在一定程度上也解释了图 3 中较大的异常闭合更易在昼夜转换时出现的原因。湍流通量 $H + LE$ 随 EBR 分布特征同 $R_n - G_0$ 类似,

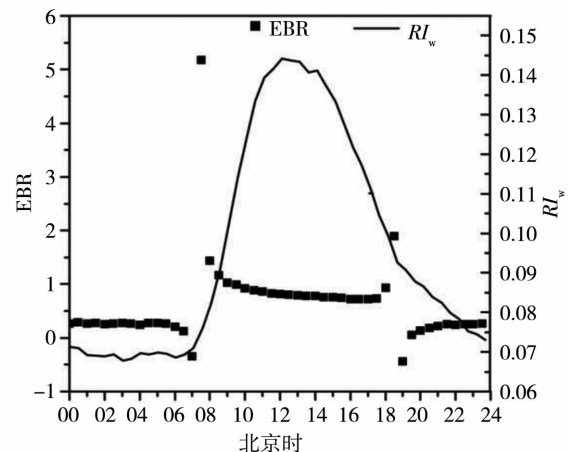


图 3 EBR 及 RI_w 平均日变化

Fig. 3 Averaged daily variation of EBR and RI_w

但分布较散乱, 且存在一些偏离 0 较远的点, 有必要再对这些偏大的湍流通量点的产生原因进行探讨。

根据对数据的研究, 将这些点的产生原因归为降水影响和观测误差 2 类。对于前者, 虽然在数据处理过程中已剔除了降水同期数据, 但降水开始前的不稳定大气以及降水停止后湿润的下垫面对湍流通量的影响并未即时消除。半干旱区蒸发力强, 且一般降水强度低, 降水影响通常只维持 1 ~ 2 d^[21]。

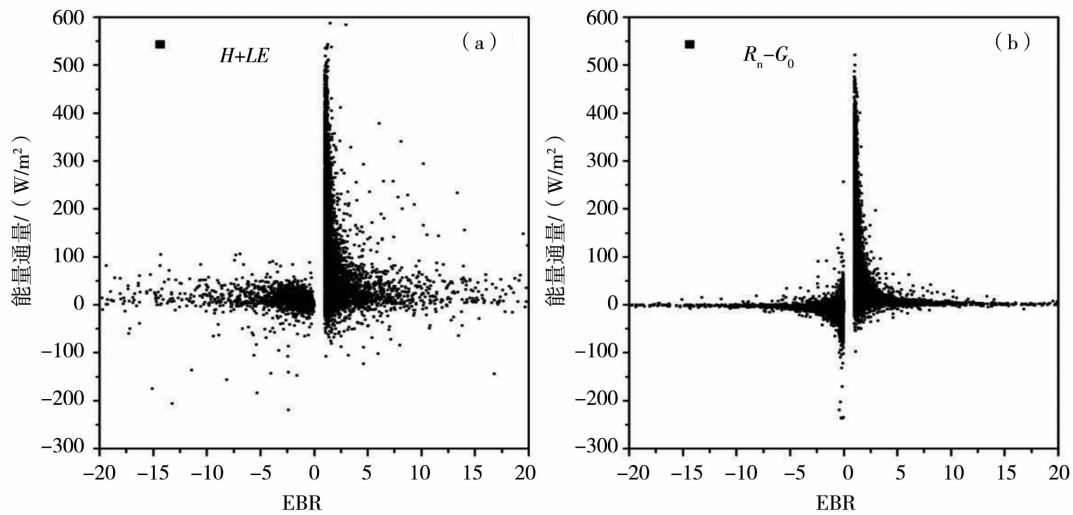


图4 $H + LE$ (a)和 $R_n - G_0$ (b)随 EBR 变化

Fig.4 Variation of $H + LE$ (a) and $R_n - G_0$ (b) with EBR

检查异常 $H + LE$ 值前 1 d 或其后紧邻时次是否有降水发生,如果有,记为降水影响。对于后者,夜间和日出日落时分的湍流变性^[15]可能使观测条件不稳定,造成较大的误差。在此借鉴了规定极端降水事件阈值的百分位法^[22],对每种异常闭合的 $|H + LE|$ 。分别从小到大排列,以第 95 个百分位的 $H + LE$ 值作为异常值,分为降水影响和观测误差,统计其样本量和占总样本的百分比。(1, 10)EBR 大量发生在白天,湍流量量级总体较大,点纵向密集分布,采用百分位法确定阈值已不具意义;(-1, 0) EBR 对应的湍流量几乎没有偏大点,故对这 2 种情况不进行百分位法划分。

如表 2 所示,总体上受降水影响的样本量比观

表 2 各异常闭合区段内不同原因引起的湍流量野点数统计表

Tab.2 Statistics of turbulent flux spike points caused by different reasons in different sections of abnormal EBRs

| EBR | | 降水影响 | 观测误差 |
|-------------|-------|--------|--------|
| < -100 | 样本数 | 2 | 1 |
| | 占总体比例 | 2.90% | 1.40% |
| (-100, -10) | 样本数 | 5 | 6 |
| | 占总体比例 | 7.20% | 8.70% |
| (-10, -1) | 样本数 | 21 | 19 |
| | 占总体比例 | 30.4% | 27.5% |
| (10, 100) | 样本数 | 11 | 2 |
| | 占总体比例 | 15.90% | 2.90% |
| > 100 | 样本数 | 2 | 0 |
| | 占总体比例 | 2.90% | 0% |
| 累计 | 样本数 | 41 | 28 |
| | 占总体比例 | 59.40% | 40.60% |

测误差样本量多。具体到各异常闭合,降水影响仍占主导,负闭合情况下观测误差所占比例与降水影响更接近,两者相当。这说明了数据处理过程中仅剔除降水同期数据并不能完全消除降水影响,仍需要进一步发展有效的处理方法;另外,观测误差更易导致过大的负闭合,这可能是由于夜间和昼夜转换时湍流较弱而无法达到仪器要求的观测条件,出现负的系统误差。

为消除这些野点的影响,对于表 2 中偏大的湍流量点直接予以剔除;对于导致较大异常闭合的 R_n 与 G_0 接近的情况,规定 $|(R_n - G_0)/R_n|$ 。在(0, 0.1)以内时为两者接近,予以剔除。剔除点占表 2 中异常闭合点总量的 45.5%。

3 30 min EBR 与相对垂直湍强的关系

由相对垂直湍强 RI_w 与 30 min EBR 闭合率的散点分布图(图 5a)可见, RI_w 趋于高值时,EBR 向 1 收敛;趋于低值时,EBR 向两侧发散; RI_w 极低(< 0.05)时,EBR 分布较少且收敛。

将 RI_w 从 0 ~ 1 按 0.05 区间等分 20 份,在每个区间里统计 EBR 方差、过闭合和负闭合出现频率并进行拟合。如图 5b 所示,剔除较大异常闭合后,EBR 方差涨落不规则,异常闭合出现频率随 RI_w 变化满足正态分布,过闭合、负闭合相关系数分别为 $R^2 = 0.95、0.99, P < 0.01$ 。在 $RI_w = 0.14$ 时,过闭合频率达到最大; $RI_w = 0.11$ 时负闭合频率达到最大; $RI_w > 0.3$ 时,异常闭合频率较为稳定并维持低值。

异常闭合率与 RI_w 关系并非单调,有必要根据图 5b 将 $RI_w < 0.3$ 的情况再细分为 $RI_w < 0.05$ 和

RI_w 在 0.05 ~ 0.3 之间的极弱湍流和较弱湍流加以讨论。强湍流运动主要发生在白天,湍涡尺度大,能量通量混合均匀,涡动系统观测误差小,异常闭合虽仍有发生,但概率很低。极弱湍流运动主要发生于夜间, $\sqrt{w'^2} \rightarrow 0$, $\sqrt{w'T'}$ 、 $\sqrt{w'q'} \rightarrow 0$,湍流通量很小,而 R_n 与 G_0 差异相对较大,此时异常 EBR 发生也较

少,另外在湍流太弱时涡动相关仪器测量误差和不确定性较大。较弱湍流运动在一天中任何时段都可能发生,白天相对较多。日落至夜间的过渡时段内,大气层结改变、非定常运动加强了各高度上湍流能量的交换和对流,对 H 、 LE 观测产生干扰,易发生异常闭合。

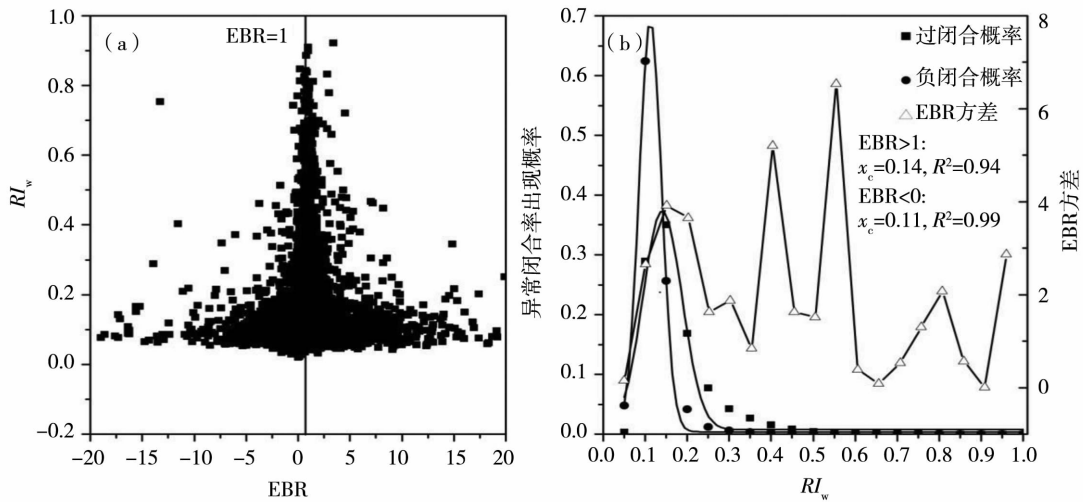


图 5 RI_w 随 EBR 分布(a)及异常闭合率的频率、方差随 RI_w 分布(b)
 Fig.5 The scatter chart of RI_w and EBR(a), the frequency and variance distribution of abnormal EBR with RI_w

剔除 $RI_w < 0.3$ 的点后(表 3), $EBR > 1$ 的过闭合点数量在白天、夜间分别下降了 6.9%、0.2%,白天降幅最大,过闭合减少效果最显著;负闭合点全体、白天、夜间分别下降 6.2%、0.2%、0.6%。

表 3 剔除 $RI_w < 0.3$ 或能量支出项位相前移 30 min 前后异常闭合点数量统计

Tab.3 Statistics of abnormal EBR proportion after removing $RI_w < 0.3$ or energy expenditure phase being displaced 30 min forward against net radiation

| | | EBR > 1 | | EBR < 0 | |
|----|-----------------|---------|--------|---------|--------|
| | | 样本数 | 占总体比例 | 样本数 | 占总体比例 |
| 全体 | 无处理 | 7 320 | 15.10% | 3 829 | 7.90% |
| | 剔除 $RI_w < 0.3$ | 226 | 15.10% | 25 | 1.70% |
| | 位相前移 30 min | 4 233 | 14.60% | 1 949 | 6.70% |
| 白天 | 无处理 | 5 207 | 22.60% | 181 | 0.80% |
| | 剔除 $RI_w < 0.3$ | 216 | 15.70% | 8 | 0.60% |
| | 位相前移 30 min | 3 288 | 20.30% | 141 | 0.80% |
| 夜间 | 无处理 | 2 114 | 8.30% | 3 649 | 14.40% |
| | 剔除 $RI_w < 0.3$ | 10 | 8.10% | 17 | 13.80% |
| | 位相前移 30 min | 945 | 7.40% | 1 808 | 14.10% |

另外,如图 6 所示,未剔除 $RI_w < 0.3$ 对应的点时, EBR 闭合率逐月变化表现出春夏不闭合,秋冬过闭合特征,剔除 $RI_w < 0.3$ 对应的点后,夏季闭合度变化不大,秋冬过闭合得到改善,过闭合数量减少了 87.5%;对于最小二乘法计算的逐月闭合度,未剔除 $RI_w < 0.3$ 对应的点前全部为不闭合,剔除后,闭合度整体提高了 52%,也取得了较好效果。

4 能量滞后分析

郭建侠等^[9]在华北农田玉米生育期内发现, H 、 LE 、 G_0 始终滞后于 R_n ,而 LE 位相整体滞后更多。玉米农田冠层高大,对能量传输形成较大阻抗,造成能量滞后。从表 4 可以看出,SACOL 站各能量分量的长期平均日变化起波、波峰和回复时刻彼此也并不完全一致, G_0 、 H 、 LE 起波时刻和回复时刻相对 R_n 大约有 30 min 的延迟,因此在半干旱区稀疏短草下垫面同样存在能量滞后现象,只是各能量支出项时延程度不等。在此将 G_0 、 H 、 LE 的日变化相位提前 30 min,使各能量分量起波时间一致后再进行能量闭合分析。

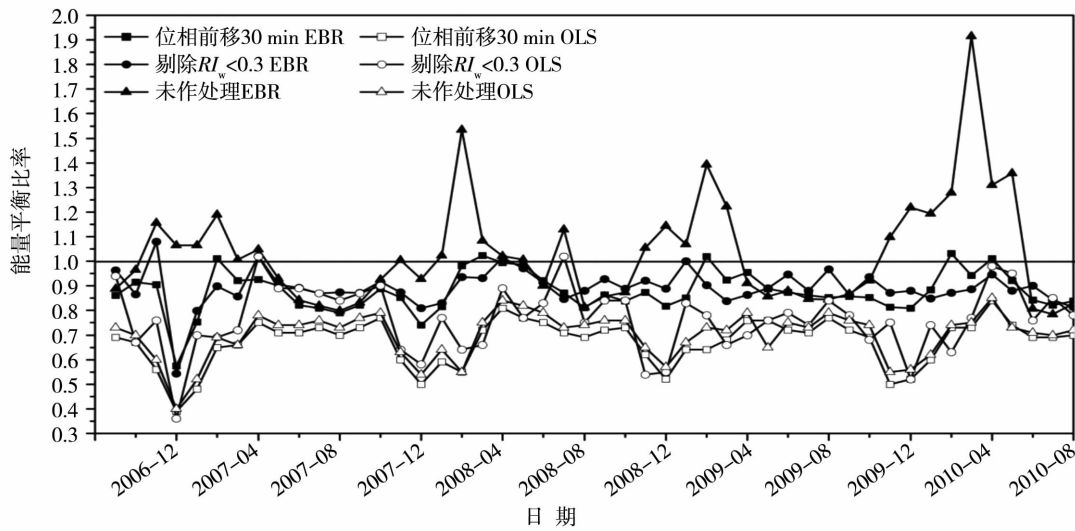


图 6 未作处理前和经过位相前移 30 min、 RI_w 剔除后的 EBR、OLS 法闭合度逐月变化

Fig. 6 Monthly variation of original EBR, OLS and after disposal of 30 min forward phase displacement and removing $RI_w < 0.3$

如表 3 所示,位相前移 30 min 后过闭合点数量占总体比例降低,全体、白天、夜间过闭合点比例分别降低了 0.5%、2.3%、0.9%;全体和夜间负闭合点比例降低了 1.2%、0.3%,白天不变。逐月闭合度变化情况如图 6 所示,经过位相前移 30 min 后,月平均 EBR 法的过闭合点数量减少了 80%,得到显著改善;OLS 法闭合度提高了 6%,且无过闭合发生。这些既验证了已有的能量支出项位相相对净辐射滞后导致过闭合的结论,而且说明夜间负闭合现象在一定程度上也归因于此。

表 4 各能量分量日间波动的起波、波峰和回复时刻(北京时)

Tab. 4 The wave inception, peak and restore time(BJT) of daily fluctuation of energy fluxes

| 能量分量 | 起波 | 波峰 | 回复 |
|-------|-------|-------|-------|
| R_n | 06:30 | 13:00 | 20:00 |
| G_0 | 07:00 | 13:00 | 20:00 |
| H | 07:00 | 13:00 | 20:30 |
| LE | 07:00 | 13:00 | 20:30 |

5 结 论

(1)从小时尺度统计结果看,30 min EBR 落在(0,1)以外的异常闭合率现象大量、系统地存在。过闭合主要发生在白天,负闭合主要发生在夜间,且都在昼夜转换时易出现高异常值。闭合

度大小满足正态分布。

(2)总的来说,湍流运动越强,30 min EBR 法的过闭合、负闭合数量越少,闭合度越向 1 收敛,反之亦然,但两者并不单调相关。较弱湍流时异常闭合发生较多,强湍流($RI_w > 0.3$)或极弱湍流($RI_w < 0.05$)环境下都不利于它们出现,其中过闭合的最适湍强($RI_w = 0.14$)稍大于负闭合的最适湍强($RI_w = 0.11$)。剔除较弱湍强的点后异常闭合率比重减少;月平均 EBR 法过闭合度降低,数量也减少,OLS 法闭合度提高。

(3)较大异常闭合点产生的原因主要是昼夜转换时 R_n 与 G_0 接近使 EBR 分母接近 0;另外,由降水影响或观测误差导致的湍流通量偏大也是其原因,其中降水影响更大,仅剔除降水同期数据不足以消除该影响。

(4)能量支出项相对净辐射的滞后响应不仅导致了过闭合,在一定程度上也是夜间负闭合现象发生的原因。将 G_0 、 H 、 LE 相位提前 30 min 后异常闭合率的变化情况同剔除较弱湍强点的情况类似。

致谢:SACOL 站为本文提供了宝贵的数据资料,在此致谢。

参考文献:

[1] 胡隐樵,高由禧. 黑河实验(HEIFE)一对干旱地区陆面过程的一些新认识[J]. 气象学报,1994,52(3):285-296.
 [2] 张强,黄荣辉,王胜,等. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(4):427-441.

- [3] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 223 - 243.
- [4] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价 [J]. *中国科学: D 辑*, 2005, 34(A02): 46 - 56.
- [5] 贾志军, 张稳, 黄耀. 三江平原稻田能量通量研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 820 - 826.
- [6] 刘渡, 李俊, 同小娟, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合状况分析 [J]. *中国农业气象*, 2012, 33(4): 493 - 499.
- [7] 赵建华, 金文岩, 刘宏谊, 等. 湍流低频贡献对半干旱区地表能量平衡的影响 [J]. *干旱气象*, 2013, 31(1): 1 - 9.
- [8] 岳平, 张强, 牛生杰, 等. 半干旱草原下垫面能量平衡特征及土壤热通量对能量闭合率的影响 [J]. *气象学报*, 2007, 70(1): 136 - 143.
- [9] 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 玉米生育期地表能量平衡的多时间尺度特征分析及不平衡原因的探索 [J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(9): 1103 - 1111.
- [10] 张杰, 刘洋, 张强. 能量转换滞后性导致能量平衡不闭合及其时空差异 [A]. 第 27 届中国气象学会年会干旱半干旱区地气相互作用分会场论文集 [C]. 北京, 2010.
- [11] 左洪超, 肖霞, 杨启东, 等. 论近地层大气运动特征与观测和计算能量不平衡的成因 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(9): 1370 - 1384.
- [12] 吴灏, 叶柏生, 吴锦奎, 等. 疏勒河上游高寒草甸下垫面湍流特征分析 [J]. *高原气象*, 2013, 32(2): 368 - 376.
- [13] 杨启东, 左洪超, 杨扬, 等. 近地层能量闭合度对陆面过程模式的影响 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(9): 2876 - 2888.
- [14] 刘强, 何兴, 杨兴华, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季大气稳定度垂直分布特征分析 [J]. *干旱气象*, 2009, 27(4): 308 - 313.
- [15] 肖霞. 黄土高原半干旱区荒草地湍流和湍流能量传输特征及能量平衡状况 [D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [16] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25: 906 - 921.
- [17] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1980, 106: 85 - 100.
- [18] 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.
- [19] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1986, 37: 17 - 35.
- [20] 左金清, 王介民, 黄建平, 等. 半干旱草地地表土壤热通量的计算及其对能量平衡的影响 [J]. *高原气象*, 2010, 29(4): 840 - 848.
- [21] 刘宏谊, 杨兴国, 张强, 等. 敦煌戈壁冬季地表辐射与能量平衡特征对比研究 [J]. *中国沙漠*, 2009, 29(3): 558 - 565.
- [22] 刘丽, 陶云. 云南省汛期极端强降水事件的气候特征 [J]. *干旱气象*, 2012, 30(1): 15 - 20.

Characteristics of Abnormal Energy Balance Ratio in Semi - Arid Region of Loess Plateau

ZHU Yan¹, ZUO Hongchao¹, GUO Yang¹, WU Jianjun²

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Unit of 93801 of the Chinese Peoples' Liberation Army, Wugong 712200, China)

Abstract: On the basis of 4 - year surface layer fluxes data of the Semi - Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL), the characteristics of abnormal energy balance ratio and its relationship with relative vertical turbulence intensity (RIW) were studied firstly by using ordinary least square (OLS) method and energy balance ratio (EBR) method. Then the phase lag phenomenon of surface energy was analyzed. The results show that abnormal EBRs ($EBR > 1$ and $EBR < 0$) mainly occurred in the daytime and at night, respectively. Great abnormal EBRs were mainly caused by the adjacence of net radiation R_n and surface heat flux G_0 around sunrise and sunset as well as the spike points of turbulence fluxes triggered by the influence of precipitation. In general, when the turbulence is stronger, the abnormal EBR is less likely to happen and energy balance ratio converges to 1, vice versa. Thus the most favorable turbulence intensity for the occurrence of abnormal EBR was neither too intense nor extremely weak. The optimum turbulence intensity for $EBR > 1$ and $EBR < 0$ was about 0.14 and 0.11, respectively. Moreover, the phase lag of surface heat flux G_0 , sensible heat H and latent heat LE against net radiation R_n was also the reason for abnormal EBRs including $EBR < 0$. After those $RIW < 0.3$ being removed or the phase of G_0 , H , LE being displaced half hour forward, the proportion of abnormal EBRs decreased. Monthly mean closure of $EBR > 1$ reduced and closure of OLS method increased.

Key words: semi - arid region; abnormal EBR; relative intensity of vertical turbulence; phase lag phenomenon of energy