

华北平原冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合状况分析*

刘渡^{1,3}, 李俊^{1**}, 同小娟², 于强¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:对华北平原冬小麦/夏玉米轮作田连续 3a(2003-11—2006-10) 涡度相关观测的能量闭合状况进行综合分析, 并探讨下垫面对能量闭合程度的影响。结果表明, 能量平衡比率 (EBR) 日变化规律明显, 以昼夜交替时波动最大, 下午略高于上午, 白天能量闭合状况明显优于夜间。将湍流能的相位提前 0.5h, 湍流通量和有效能的匹配度及能量闭合程度均得到提高。白天 EBR 呈秋冬高 (分别为 0.98 和 0.94)、春夏低 (分别为 0.85 和 0.70) 的季节变化特征, EBR 的波动幅度依次为: 夏 > 秋 > 冬 > 春。下垫面状况对地表能量闭合程度影响显著, 裸地阶段、小麦季和玉米季的年均白天 EBR 分别为 1.11、0.94 和 0.74, 小麦季的能量闭合状况优于玉米季; EBR 波动幅度依次为: 裸地阶段 > 玉米季 > 小麦季。观测期间, 白天 EBR 年均值范围在 0.82 ~ 0.97, 平均 0.89, 较好地满足了农田通量观测对数据质量的要求。

关键词: 涡度相关法; 能量平衡比率; 冬小麦季; 夏玉米季

中图分类号: S162.4

文献标识码: A

Analysis of the Energy Balance Closure in a Winter Wheat/Summer Maize Double Cropping System in the North China Plain

LIU Du^{1,3}, LI Jun¹, TONG Xiao-juan², YU Qiang¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources

Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In this paper, the energy balance closure of eddy covariance measurements and the effects of land surface conditions on it were analyzed in a winter wheat/summer maize double cropping system in the North China Plain from November 2003 to October 2006. The results showed that energy balance ratios (EBR) varied diurnally and the fluctuation was great in the turn of day and night. EBR in the afternoon was slightly higher than that in the morning. The energy balance closure was obviously better in the daytime than that in the nighttime. The energy balance closure was improved by shifting the phase of the turbulent fluxes (LE + H) half-hourly ahead. Daytime EBR varied seasonally. It was higher in autumn and winter (0.98 and 0.94, respectively) but lower in the spring and summer (0.85 and 0.70, respectively). The seasonal variability of daytime EBR was in the order of summer > autumn > winter > spring. Land surface status had significant impacts on EBR. EBR was 1.11, 0.94 and 0.74 for the periods of bare soil, winter wheat and summer maize respectively. Energy balance closure was better in the winter wheat field than that in summer maize field. The variability of EBR was in the order of bare soil > maize > wheat. Annual mean daytime EBR varied from 0.82 to 0.97 with an average of 0.89, indicating a satisfied data quality in the eddy covariance measurements in the farmland.

Key words: Eddy covariance; Energy balance ratio; Winter wheat period; Summer maize period

* 收稿日期: 2012-02-17 ** 通讯作者。E-mail: lijun@igsrr.ac.cn

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB428404); 国家自然科学基金(31100322)

作者简介: 刘渡(1987-), 女, 湖北武汉人, 硕士生, 主要从事农田微气象研究。E-mail: liud.09s@igsrr.ac.cn

涡度相关技术经过长期的理论发展与技术进步, 目前已成为直接测定地表与大气间物质传输与能量交换的标准方法^[1]。全球各地已有超过 500 个涡度相关通量测定站点对各类生态系统的 CO₂、H₂O 和能量通量进行长期观测, 为全球气候变化研究提供了大量基础数据。与此同时, 如何评价涡度相关观测数据的可信度和质量成为通量研究中的重要课题。评价通量观测数据质量的方法主要有: 原始数据分析、稳态测试、谱分析、大气湍流统计特性和能量闭合等^[2]。其中, 能量闭合程度的评价是数据质量评价的重要参照方法之一。

国内外关于能量闭合问题已开展了大量研究, 主要集中在三个方面: 一是对研究区的能量闭合状况进行评价。在各类生态系统均发现涡度相关观测存在能量不闭合现象, FLUXNET 和 ChinaFLUX 站点的平均能量不闭合程度分别为 20%^[3] 和 27%^[4]。一般白天的能量闭合状况优于夜间^[3-5], 冬季能量平衡状况好于夏季^[6]。二是分析影响能量闭合的因素。如通量源面积的不匹配^[7]、高低频湍流通量的损失^[8]、平流的影响^[9]、地形的影响^[6]、测量仪器可能产生的系统偏差、其它能量吸收项的忽略^[10] 和湍流交换弱^[4] 等。三是寻找使能量达到闭合的方法。研究的重点包括提高仪器测量精度、订正其它能量吸收项^[11]、探讨低频大尺度涡旋问题^[12] 等。

对于研究区能量闭合状况的分析与评价, 目前研究工作大多针对一年观测数据进行, 对研究区多年能

量闭合状况的综合评价并不多见。另一方面, 虽已有研究发现下垫面状况对地表能量闭合程度有影响^[5,13-14], 但有关下垫面状况对能量闭合程度的影响的探讨并不常见^[5]。本文拟以华北平原冬小麦/夏玉米轮作田为研究对象, 以 EBR 为能量闭合程度的评价指标, 分析连续 3a (2003 - 11—2006 - 10) 涡度相关观测数据的能量闭合状况变化特征, 通过比较不同时间尺度和不同下垫面条件下的 EBR, 探讨下垫面状况对能量闭合程度的影响, 为客观评价华北平原典型农田涡度相关观测数据质量和确定数据分析方法提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究地点概况

实验在中国科学院禹城农业综合试验站进行 (36°57'N, 116°38'E, 22.0m)。该站属暖温带大陆季风气候, 近 40a 年平均气温 13.2℃, 1 月和 7 月平均气温分别为 -2.4℃ 和 26.9℃, 年平均总辐射量 5242MJ·m⁻², 年平均降水量 585mm。降水季节分配不均, 冬春干旱少雨, 6 - 8 月降水量约占全年的 70%。土壤母质为黄河冲积物, 土壤有机质含量约 1.21%, pH 为 7.9 ~ 8.0。作物种植制度为冬小麦/夏玉米轮作一年两熟制。从自然条件和种植制度来看, 该站在华北平原具有典型性。观测期间的具体田间管理措施见表 1。在本研究区, 小麦收获后到夏玉米播种之前以及玉米收获后冬小麦播种之前, 农田地表裸露。

表 1 冬小麦、夏玉米田间管理

Table 1 The management of winter wheat and summer maize fields

年份 Year	作物 Crop	品种 Variety	播种时间 Sowing date	漫灌水量 Irrigation (mm)	收获时间 Harvest date
2004	冬小麦 Wheat	科禹 13 Keyu13	2003 - 10 - 23	228.8	2004 - 06 - 13
	夏玉米 Maize	鲁单 981 Ludan981	2004 - 06 - 20	0	2004 - 09 - 25
2005	冬小麦 Wheat	科禹 13 Keyu13	2004 - 10 - 18	225.0	2005 - 06 - 10
	夏玉米 Maize	丹玉 86 Danyu86	2005 - 06 - 18	0	2005 - 10 - 15
2006	冬小麦 Wheat	科禹 13 Keyu13	2005 - 10 - 28	225.0	2006 - 06 - 08
	夏玉米 Maize	鲁单 9002 Ludan9002	2006 - 06 - 18	60.0	2006 - 09 - 19

1.2 涡度相关与小气候梯度观测

2003 年 11 月 - 2006 年 10 月, 采用开路涡度相关系统及小气候梯度进行农田水/热通量和微气象要素的观测。涡度相关系统主要由 CSAT3 型三维超声风速仪 (Campbell Sci. Inc., USA) 和快速响应的 LI - 7500 型开路红外 CO₂/H₂O 分析仪 (Li - Cor Inc., USA) 组成。上述仪器与 CR5000 型数据采集器 (Campbell Sci. Inc., USA) 相连, 昼夜连续自动采集,

原始数据采样频率为 10Hz, 每 30min 输出一组平均值。小气候梯度观测系统包括 2 层 AR - 100 型三杯风速计 (Vector Instruments, UK) 和 2 层 HMP - 45C 型温湿度传感器 (Vaisala, Finland)。温湿度传感器平均高度为 2.2m 和 3.4m, 超声风速温度计平均高度为 2.8m, 随作物高度变化有所调整。观测期间, 风浪区的长度在 200m 以上, 满足微气象梯度观测的要求。在观测架附近株间和行间土表下 2cm 处各埋一块

HFP01SC 型土壤热流板 (Hukseflux, Netherland) 测定土壤热通量。此外还测定了净辐射 (Model CNR - 1, Kipp and Zonen) 和降水量 (Model 52203, RM Young, Inc) 等。上述仪器均与 CR23x 型数据采集器 (Campbell Sci., USA) 相连, 每 30min 输出一组平均值。在作物生长旺季, 每周用 Li - Cor 3100 (Li - Cor Inc., USA) 测定叶面积。

1.3 通量数据处理

焐度相关法是通过计算物理量的脉动与风速脉动的协方差求算湍流通量的方法。显热和潜热在垂直方向上的湍流通量分别为

$$H = C_p \overline{\rho w' \theta'} \quad (1)$$

$$LE = L \overline{\rho w' q'} \quad (2)$$

式中, H 为显热通量 ($W \cdot m^{-2}$), LE 为潜热通量 ($W \cdot m^{-2}$), C_p 为空气的定压比热 ($1012 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), ρ 为空气平均质量密度 ($kg \cdot m^{-3}$), w 为垂直风速 ($m \cdot s^{-1}$), θ 为平均位温 (K), L 为汽化潜热 ($J \cdot g^{-1}$), q 为比湿 ($g \cdot kg^{-1}$), w' , θ' 和 q' 为脉动量。

对焐度相关测定的 10Hz 原始数据进行平均, 再经 WPL 校正^[15] 和两次坐标轴旋转^[16] 得到 30min 水热平均通量。对雨天或清晨有露水时采集的通量数据和其它超出正常范围的异常数据予以剔除。对以上经初步筛选的数据计算月均值和方差, 与平均值相差超过 3 倍方差的数据也要剔除。<2h 的缺失数据用线性内插法插补; >2h 的缺失数据采用平均日变化法 (MDV) 插补^[17]。

1.4 能量闭合状况的评价标准

根据热力学第一定律, 地表能量平衡方程可描述为

$$LE + H = R_n - G - S - Q \quad (3)$$

式中, R_n 为净辐射通量 ($W \cdot m^{-2}$), G 为土壤热通量 ($W \cdot m^{-2}$), S 为冠层热储量 ($W \cdot m^{-2}$), Q 为附加能量源汇的总和 ($W \cdot m^{-2}$)。

对于裸地或植被低矮的生态系统, S 和 Q 一般可忽略, 能量平衡方程可简化为^[18]

$$LE + H = R_n - G \quad (4)$$

当湍流能 ($LE + H$) 与有效能 ($R_n - G$) 相同时, 称为能量闭合, 否则称为能量不闭合。

评价能量闭合状况的常见方法一般有最小二乘法 (OLS) 线性回归、简化主轴法 (RMA) 线性回归、能量平衡比率 (EBR) 和能量平衡相对残差 (δ) 频率等^[4,19]。其中, 能量平衡比率 (EBR) 是最常采用的方法之一^[4,5,10,13,19]。EBR 是指在一定的观测期间内, 由焐度相关仪器直接观测的湍流能量与有效能量的

比值, 即

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

EBR 越接近 1, 表明能量闭合状况越好。

2 结果与分析

2.1 能量闭合程度的日变化

根据每天的日出与日落时间, 将研究区连续 3a (2003 - 11—2006 - 10) 观测的 0.5h 数据划分到白天与黑夜时段, 计算年均值和相应的 EBR, 结果见表 2。由表 2 可知, 白天与夜间的能量闭合程度存在很大差别。白天 EBR 年均值与全天数据所求的 EBR 年均值结果较接近, 且均明显大于夜间 EBR 年均值。2004 - 2006 年农田白天、夜间和全天的 EBR 年均值范围分别为 0.82 ~ 1.00、0.46 ~ 0.63 和 0.84 ~ 1.12, 年际差异明显 (表 2)。从 EBR 值及其波动情况来看, 观测的 3a 中白天的能量闭合状况均最好 (能量闭合程度较高且波动较小), 全天的次之 (能量闭合程度较高但波动明显), 夜间的最差 (能量闭合程度低且波动剧烈)。

表 2 白天、夜间和全天能量平衡比率 (EBR) 的年均值 (\pm 标准差)

年度 Growing year	白天 Daytime	夜间 Night	全天 Whole day
2003/2004	1.00 \pm 0.43	0.52 \pm 1.45	1.12 \pm 1.11
2004/2005	0.93 \pm 0.48	0.46 \pm 1.19	0.93 \pm 1.03
2005/2006	0.82 \pm 0.40	0.63 \pm 1.30	0.84 \pm 2.37

注: 年度指 11 月 - 翌年 10 月。下同。

Note: The growing year for the rotation of winter wheat/summer maize is from November to next October. The same as below.

以典型晴天为例, 分析农田地表能量闭合程度的日变化特征。图 1a 给出了 EBR 的日变化趋势, 图 1b 为同期的湍流通量 ($LE + H$) 和有效能 ($R_n - G$) 的日变化规律。从图中可以看出, 清晨和傍晚 (昼夜交替) 时段 ($R_n - G$) 值接近零, EBR 值变化剧烈, 有时还会出现负值。日出至 12:00, EBR 值不断增大, 并逐渐趋于稳定, 湍流能 ($LE + H$) 低于有效能 ($R_n - G$); 12:00 至日落则不同, 湍流能 ($LE + H$) 高于有效能 ($R_n - G$), EBR 值 > 1。

还以典型晴天 (2005 - 04 - 14) 为例, 将湍流能 ($LE + H$) 的相位提前 0.5h 与有效能 ($R_n - G$) 一起进行分析, 得到图 1d 和图 1c。由图可见, 相位调整使湍流通量和有效能数据的匹配度更高 (图 1d); EBR 值更接近 1, 波动也更为平缓 (图 1c), 即相位提前后提高了能量的闭合程度。

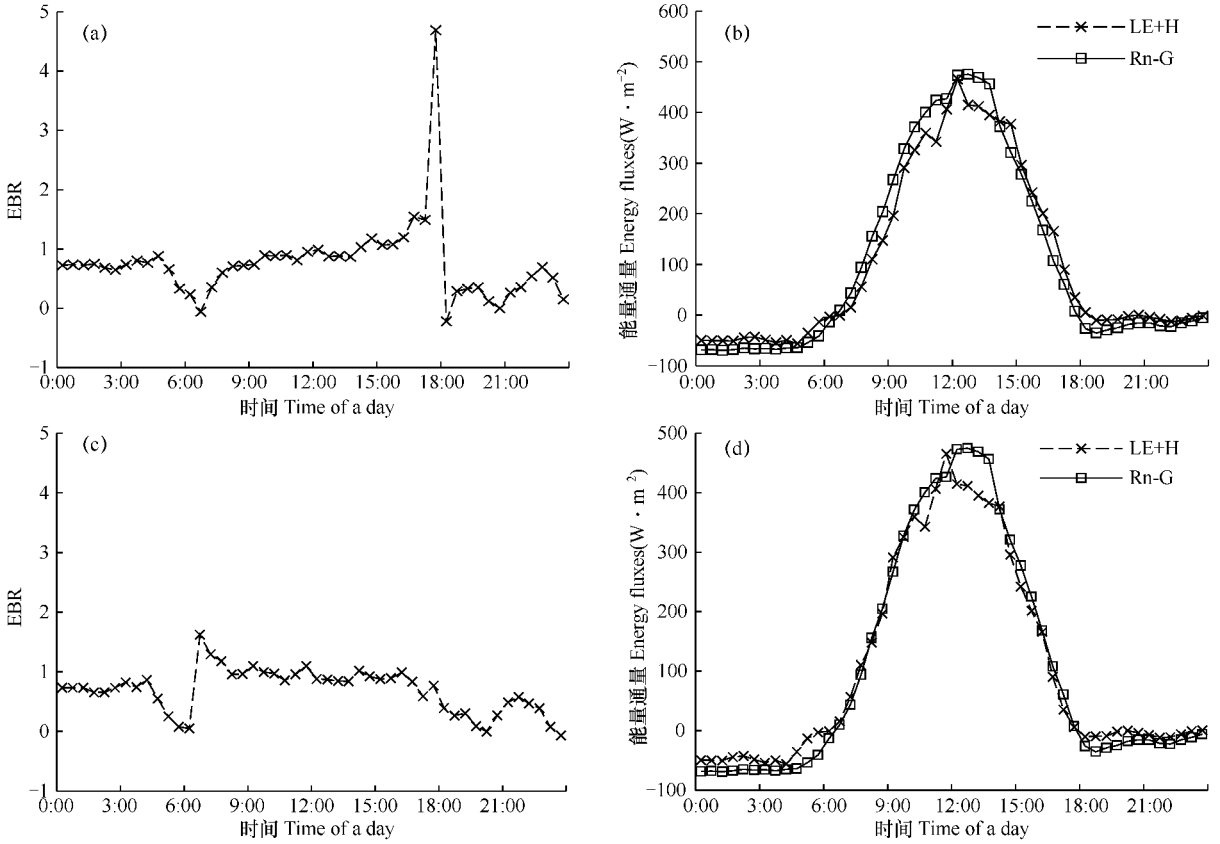


图 1 相位调整前后的能量平衡比率 (EBR) (a 和 c) 与能量分量 (b 和 d) 日变化 (2005-04-14)
 Fig. 1 Diurnal variation of original and adjusted EBR (a and c, respectively) and energy components (b and d, respectively) (Apr. 14, 2005)

注: LE + H 为湍流能; R_n - G 为有效能
 Note: LE + H is turbulent energy, R_n - G is available energy

2.2 能量闭合程度的季节变化

选取观测期间 EBR 值相对稳定时期的数据 (每天白天时段剔除首尾 2h 后的数据) 求日、月和季节平均值并进行分析, 结果见表 3、图 2 和图 3。由表 3 可知, EBR 存在明显的季节变化特征: 秋冬 (9 - 11 月, 12 - 翌年 2 月) 较高, 夏季 (6 - 8 月) 较低, 春季 (3 - 5 月) 居中。农田冬季 EBR 值整体较大是因为: 冬季农田部分地面裸露, 有时有积雪覆盖, 地面反射率比有植被覆盖时明显增大, R_n 值减小, 引起 EBR 值增大^[4]。此外, 冬季太阳辐射较弱, 天气条件对能量各分量的影响较大, 故 EBR 值存在一定波动。春季农田能量闭合状况较好, 与冬小麦返青后进入旺盛生长阶段有关。夏季农田 EBR 值较小 (往往不到 0.8) 且波动剧烈 (EBR 变异系数大), 可能与该时期的频繁降雨导致到达地表的能量骤减^[14,20] 有关。秋季 EBR 值呈现回升趋势且波动剧烈, 主要是由于降水减少、夏玉米成熟并收获 (一般在 9 月下旬 - 10 月上旬),

冬小麦播种过程中田间管理操作频繁, 农田下垫面状况变化显著。

表 3 不同年度白天能量平衡比率 (EBR) 的季节平均值 (± 标准差)

Table 3 The seasonal mean daytime EBR (±SD) in different growing year

年度 Growing year	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
2003/2004	1.05 ± 0.27	0.86 ± 0.19	0.82 ± 0.29	0.95 ± 0.35
2004/2005	1.02 ± 0.34	0.83 ± 0.26	0.68 ± 0.32	0.96 ± 0.33
2005/2006	0.76 ± 0.21	0.86 ± 0.35	0.61 ± 0.23	1.04 ± 0.40

从月平均值 (图 3) 看, 11 月 - 翌年 1 月, EBR 月均值整体较大且存在一定波动; 2 月以后, EBR 月均值不断降低。其中, 4 - 5 月能量闭合程度较好且相对稳定, 月均 EBR 范围在 0.8 ~ 1.0; 7 - 8 月 EBR 处于全年的低谷; 9 月以后, EBR 值迅速增大, 最大 EBR 月均值通常出现在 10 月。研究期间, 2006 年冬季

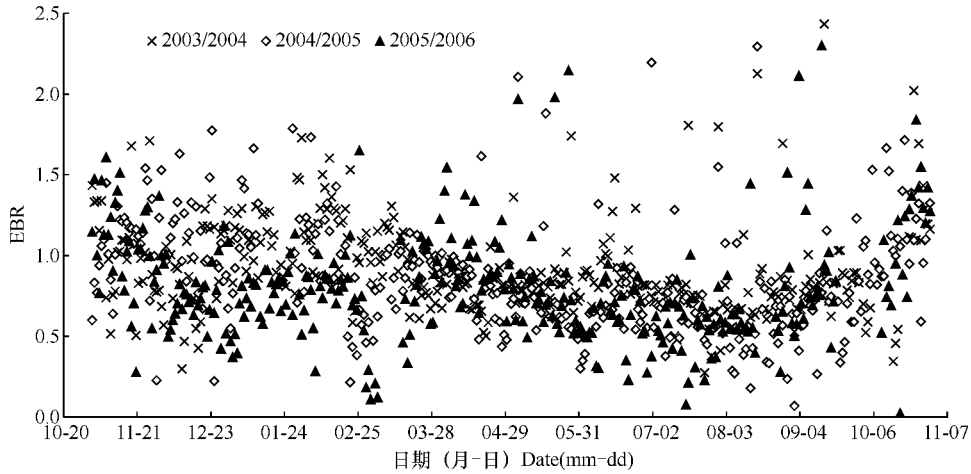


图2 历年白天能量平衡比率(EBR)日均值的变化过程

Fig. 2 Variation of daily daytime mean EBR (2003 - 11 - 2006 - 10)

EBR 值整体较小且波动平缓(表3和图3),可能与该年冬季阴天和多云天气较多,到达地表的辐射较少,以及降水少、地面干燥,反射率高有关。

间,与麦季 EBR 值更接近。裸地阶段 EBR 值最大且波动最大,与地表无植被覆盖、能量交换强烈、且受天气状况影响显著有关。下垫面均匀程度和忽略冠层热储量的影响是造成同一地块上玉米季能量闭合度明显低于小麦季的原因之一。

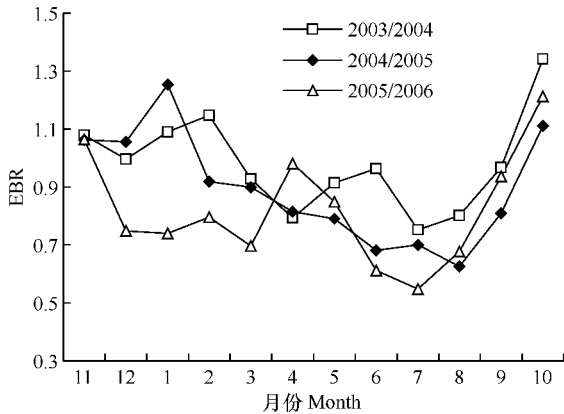


图3 白天能量平衡比率(EBR)月平均值变化 (2003 - 11 - 2006 - 10)

Fig. 3 Seasonal variation of monthly mean daytime EBR (2003 - 11 - 2006 - 10)

2.3 下垫面对能量闭合程度的影响

根据观测期间各年度地表有无作物及作物的不同种类,将下垫面分成小麦田、玉米田和裸地(前茬作物收获-后茬作物播种,主要在6月中旬和10月上中旬)3类,分3个时段进行统计,研究下垫面状况对能量闭合程度的影响。

由表4可见,不同下垫面类型的能量闭合程度不同,年均EBR值从大到小依次为:裸地阶段 > 小麦季 > 玉米季(年均EBR范围分别为0.99 ~ 1.26、0.84 ~ 1.00和0.68 ~ 0.80);EBR波动剧烈程度依次为:裸地阶段 > 玉米季 > 小麦季。全年白天EBR平均值范围在0.82 ~ 0.97,平均0.89,介于小麦季和玉米季之

表4 不同下垫面类型白天能量平衡比率(EBR)的阶段平均值(±标准差)

Table 4 Period mean daytime EBR (±SD) over different cropland types

年度 Growing year	小麦季 Wheat period	玉米季 Maize period	裸地阶段 Bare land period	年平均 Annual mean
2003/2004	1.00 ± 0.37	0.80 ± 0.33	1.26 ± 1.26	0.97 ± 0.52
2004/2005	0.97 ± 0.54	0.75 ± 0.45	1.07 ± 0.27	0.88 ± 0.39
2005/2006	0.84 ± 0.31	0.68 ± 0.36	0.99 ± 0.63	0.82 ± 0.38

3 结论与讨论

(1) 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田在2003 - 11 - 2006 - 10均以白天的能量闭合状况最好,全天的居中,夜间的最差。李正泉等^[4]在ChinaFLUX的8个观测站点和田红等^[5]在稻麦轮作田均发现了类似现象。夜间能量不闭合程度及其波动幅度与湍流混合较弱有很强的相关关系^[4,5]。观测的3a中,农田白天、夜间和全天的能量平衡比率(EBR)年均值范围分别在0.82 ~ 1.00、0.46 ~ 0.63和0.84 ~ 1.12,年际差异明显,与李正泉等^[4]此前在本站所得结果(0.95、0.54和1.00)接近。全天的EBR年均值高于Lei等^[21]对同类农田的观测结果(0.74 ~ 0.76)、贾志军等^[14,22]对水稻田的研究结果(分别为0.65和0.78 ~ 1.07)、倪攀等^[23]对草原的观测结果(0.83)。

典型晴天地表的EBR日变化规律明显,以傍晚

昼夜交替时波动最为剧烈,EBR 值下午高于上午,与相关研究结果一致^[3-6]。这可能与下午的太阳辐射较强、温度较高、湍流交换较强有关。

将湍流能(LE+H)的相位提前 0.5h 后,其与有效能(R_n-G)的匹配度及能量闭合程度均得到提高。与郭建侠等^[24]在玉米田的研究结果一致。Agam 等^[25]认为,涡度相关仪感应的潜热和显热变化需经过湍流运动传输到传感器,这个过程需要一定时间来完成。另外,能量的转化和传输都存在时间消耗,同步测量计算的湍流能量可能是对前一时段接收到的净辐射的响应^[24]。

(2)华北平原冬小麦/夏玉米轮作田 EBR 存在明显的季节变化特征,秋冬高、春夏低:春、夏、秋、冬的白天平均 EBR 分别为 0.85、0.70、0.98 和 0.94,EBR 波动幅度依次为:夏>秋>冬>春。本研究中,冬季 EBR 值整体较大,与李正泉等^[4]对草地和农田生态系统的研究结果类似。春季能量闭合状况较好,与 Wilson 等^[3-4]认为的植物生长季能量闭合状况普遍好于非生长季的观点相符。

从全年来看,华北平原农田 3-5 月能量闭合状况最好。与田红等^[5]对麦稻轮作田、童应祥等^[13]对冬小麦田的研究结果类似。朱咏莉等^[19]研究发现,6-8 月亚热带稻田的能量闭合程度较高且 EBR 逐日变化稳定。李正泉等^[4]发现 ChinaFLUX 各站点的能量闭合程度从冬季到夏季不断提高,夏季能量闭合程度较好。但王春林等^[6]研究指出鼎湖山森林冬季的能量闭合状况好于夏季。不同地区下垫面状况和气候环境条件的差别可能是导致上述差异的主要原因。

(3)观测期间,下垫面状况对地表能量闭合程度影响显著。裸地阶段、小麦季和玉米季的年均白天 EBR 分别为 1.11、0.94 和 0.74,麦季的能量闭合程度优于玉米季;EBR 波动幅度依次为:裸地阶段>玉米季>小麦季。本研究中,农田休闲季比作物生长季的 EBR 高,与田红等^[5,19]在稻田的研究结果一致。冬小麦种植密度大,地表覆盖率高,全生育期内下垫面都较均匀,故小麦季能量闭合程度较高且相对稳定。与小麦不同的是,夏玉米种植密度小,株间距较大,且株高在整个生长阶段变化较大,使下垫面状况在作物生长过程中不断发生变化,引起空气动力表面粗糙度、大气稳定度的变化^[24],导致潜热和感热测定的源区超过试验区边界,于是造成潜热和感热通量测定值偏小^[26],故玉米季能量闭合程度较低且波动较大。娄善伟等^[27]对棉田的研究发现种植密度对农田小气候

具有一定影响。此外,忽略冠层热储量也是造成能量不闭合的原因之一^[5,10,24]。小麦植株低矮,玉米植株高,忽略冠层热储存对小麦季能量平衡的影响小,但对玉米季能量平衡影响较大^[10,24]。

(4)本研究中,白天小麦季 EBR 年均值(0.84~1.00)与童应祥等^[13]对麦田的测定结果(0.91)接近,白天玉米季 EBR 年均值(0.68~0.80)低于李炜君等^[10,24]对玉米田的测定结果(0.76~0.85)。这说明即使在作物种类相同且下垫面都较平坦的农田,因气候、土壤等因子的不同,各站点的能量不闭合程度也存在一定差异。

观测期间,白天 EBR 年均值范围在 0.82~0.97,平均 0.89。目前,FLUXNET 和 ChinaFLUX 站点的平均能量闭合程度分别为 0.8^[3]和 0.73^[4],考虑到各能量项的观测误差,EBR 在 0.9 以上则认为数据质量很高。以 EBR=1±0.1 为标准,本研究中第一年能量闭合很好(年均 EBR 为 0.97),后两年稍低(年均 EBR 分别为 0.88 和 0.82),但均高于 FLUXNET 和 ChinaFLUX 站点的平均水平,较好地满足了农田通量观测对数据质量的要求。

参考文献:

- [1] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, et al. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [2] 温学发,于贵瑞,孙晓敏,等.复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析[J].*中国科学 D 辑(地球科学)*, 2004, 34(增 II): 57-66.
- [3] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 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(地球科学)*, 2004, 34(增 II): 46-56.
- [5] 田红,伍琼,童应祥.安徽省寿县农田能量平衡评价[J].*应用气象学报*, 2011, 22(3): 356-361.
- [6] 王春林,周国逸,王旭,等.鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析[J].*热带气象学报*, 2007, 23(6): 643-651.
- [7] Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, et al. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96(1-2): 257-291.
- [8] Massman W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104(3): 185-198.

- [9] Paw U K T, Baldocchi D D, Meyers T P, et al. Correction of eddy covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97(3):487-511.
- [10] 李炜君, 许振柱, 王云龙, 等. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(6):1132-1144.
- [11] Meyers T P, Hollinger S E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(1-2):105-115.
- [12] 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] 童应祥, 田红. 寿县地区麦田能量平衡闭合状况[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(18):384-387.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1):127-150.
- [17] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1):43-69.
- [18] Sauer T J, Hatfield J L, Prueger J H, et al. Surface energy balance of a corn residue-covered field [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89(3-4):155-168.
- [19] 朱咏莉, 吴金水, 胡晶亮, 等. 亚热带稻田能量平衡闭合状况分析[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(8):536-539.
- [20] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 奈曼沙地春小麦蒸散量及其分析[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(增):66-69.
- [21] Lei H M, Yang D W. Interannual and seasonal variability in evapotranspiration and energy partitioning over an irrigated cropland in the North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4):581-589.
- [22] 冯敏玉, 甘传辉, 胡逢喜, 等. 农田生态系统能量平衡闭合状况及能量平衡特征分析[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(增2):217-220.
- [23] 倪攀, 金昌杰, 王安志, 等. 半干旱风沙草原区草地潜热通量的特征[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(4):427-431.
- [24] 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(地球科学)*, 2008, 38(9):1103-1111.
- [25] Agam N, Berliner P R, Zangvil A, et al. Soil water evaporation during the dry season in an arid zone [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2004, 109(D16). Doi: 10.1029/2004JD004802.
- [26] Ding R S, Kang S Z, Li F S, et al. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1):87-95.
- [27] 娄善伟, 饶翠婷, 赵强, 等. 不同种植密度下的棉田小气候特点[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(2):255-260.