

田红,伍琼,童应祥. 安徽省寿县农田能量平衡评价. 应用气象学报, 2011, 22(3): 356-361.

安徽省寿县农田能量平衡评价

田红¹⁾²⁾* 伍琼³⁾ 童应祥³⁾

¹⁾(安徽省气候中心,合肥 230031) ²⁾(安徽省寿县国家气候观象台,寿县 232200)

³⁾(安徽省六安市气象局,六安 237011)

摘 要

为了评估安徽省寿县国家气候观象台新增的近地层通量观测系统业务运行状况,利用 2007 年 9 月—2008 年 8 月寿县近地层通量系统观测资料,分析了农田下垫面能量平衡情况。结果表明:全年能量平衡比率平均为 0.89,但不同条件下存在差异:白天明显大于夜间,春、夏、秋季明显大于冬季,裸地和麦、稻田明显大于雪地,晴、曇、阴、雨天气情况下差异不大。总体来说,能量不平衡是通量观测中较为普遍的现象,一般认为不平衡程度在 10%~30% 为合理范围,寿县国家气候观象台全年的能量不平衡程度(11%)恰好属于这个范围,并接近不平衡程度的下限,说明涡度相关法在淮河流域农田生态系统通量观测中可靠性较高。

关键词: 能量平衡; 通量; 涡度相关法; 农田; 安徽省寿县

引 言

在农田生态系统中,从外界获得的能量主要是净辐射能,用以支出消耗于农田蒸散、空气热交换、加热土壤以及极少部分储存为光合能。净辐射能在系统内部各项的分配比例及规律一直是现代农田生态学、农业气象学和水文学等学科研究的热点问题^[1]。经过近 50 年的发展,涡度相关方法(或涡动协方差方法,简称 EC)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,全球各地对各类生态系统的 CO₂, H₂O 和能量通量进行长期观测的涡度相关通量测定站点超过 500 个,积累了大量资料和相关研究成果^[2-6]。如何评价涡度相关观测数据的可信度则成为通量界共同关心的重要问题。根据热力学第一定律和涡度相关观测的基本假设,理论上能量平衡程度可以作为观测系统性能和数据质量评价的一个有效途径。因此,能量平衡程度作为评价涡度相关数据可靠性的方法已经被人们广泛接受^[7-8]。国内外关于能量平衡问题也有大量研究, Schmid^[9]较为细致地讨论了净辐射表、三维风速仪

和 CO₂/H₂O 红外分析仪三者之间测量面积的差异与能量平衡程度的关系; Mayocchi 等^[10]和 Verhoef 等^[11]研究了用土壤热通量板测量土壤热通量时可能产生的测量误差; Kanda 等^[12]、Oncley 等^[13]和 Foken 等^[14]研究组分别对低频大尺度涡旋贡献的理论进行探讨,分析能量不平衡的主要原因及解决途径; Wilson 等^[5]对 FLUXNET(全球通量观测网络)22 个站(1~4 年)通量资料的分析表明,湍流通量与有效能之和的比值即能量平衡比率(R_{EB}) 在 0.34~1.69 之间,平均值为 0.84。Li 等^[2]对中国通量网 8 个气象通量观测站资料进行分析,得到能量平衡比率范围为 0.58~1,并总结了能量不闭合的可能原因包括采样误差、仪器偏差、能量吸收项忽略、高频低频损失和平流的影响等。李祎君等^[15]对玉米农田能量平衡状况进行了分析,认为由于未考虑 0~5 cm 土层土壤热储量与忽略冠层储热以及涡度相关系统本身对水热通量的低估,大约造成 18% 的能量损失。近地层典型生态系统水热交换和能量平衡观测数据对数值模式陆-气交换参数化的发展和改进至关重要^[16-18]。

从 2006 年开始,中国气象局开展了国家气候观

2009-12-30 收到, 2011-01-29 收到再改稿。

资助项目: 2007 年淮河流域气象开放研究基金“淮河流域农田下垫面近地层综合观测研究”(HRM200710)

* E-mail: linda2383@163.com

象台试点建设工作,安徽省寿县以其气候代表性和区域代表性以及前期工作基础被中国气象局确定为全国5个试点站之一。寿县位于淮河南岸,为农业大县,台站及周围下垫面为平坦农田,属于CCOS(中国气候观测系统)确定的黄淮农业生态观测区。近20年来,除GAME-HUBEX(亚洲季风试验-淮河试验)在东亚副热带半湿润地区外,国内的大型陆面过程野外观测试验主要集中在我国干旱、半干旱及青藏高原地区,下垫面包括戈壁、绿洲、天然草原以及青藏高原的湿润河谷、半干旱过渡带和高寒荒漠等^[18-20]。而HUBEX项目仅在1998年5—8月和1999年6月底—7月底在寿县开展了与能量平衡有关的微气象观测,得到了该地区能量平衡及其各分量的基本特征^[21]。对于淮河流域而言,需要更长序列的观测资料,以及更全面系统的分析研究。

1 观测设备与方法

2007年6月寿县国家气候观象台(以下简称观象台)新增了近地层通量系统观测项目,用于测量地气交界面附近辐射通量、能量通量、物质通量、土壤热通量和气象要素分布梯度。通量塔位于观象台新

址,高32 m,下垫面为平坦、开阔、一致的农田,一年两熟,稻麦轮作,周边无污染源、无高层建筑。该系统由湍流观测分系统和梯度观测分系统组成,湍流观测分系统设置在4 m高度,包括三维超声风温仪和红外H₂O/CO₂分析仪。梯度观测分系统地上部分为5层,分别设置在2 m, 4 m, 10 m, 20 m, 30 m高度处,包括梯度塔上的5层温度、湿度、风速传感器,1层风向传感器、1.5 m处的大气压传感器,4 m处的四分量长、短波(向上、向下)辐射传感器、光合有效辐射传感器、红外地表温度传感器;地下部分1层3点土壤热通量传感器设置在地下5 cm深度处,5层土壤温度设置在5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 40 cm深度处,5层土壤水分设置在10 cm, 20 cm, 50 cm, 100 cm, 180 cm深度处。主要仪器的基本技术性能见表1。观测方法为涡度相关法和垂直梯度法。

本文选取2007年9月—2008年8月1年(基本覆盖了冬小麦和一季中稻的生育期)近地层通量系统观测资料,进行农田下垫面能量收支平衡情况分析,检验近地层观测系统的可靠性,并分析能量不平衡的可能原因。

表1 寿县通量观测系统主要观测仪器的基本技术性能^[22]

Table 1 Basic technical characteristics of primary observation instruments of boundary layer in Shouxian^[22]

观测仪器	准确度	分辨率	平均时间	自动采样频率
190SB 光合有效辐射传感器	5%	1 W/m ²	1 min	60次/min
CNR1 净辐射传感器	15%~20%	1 W/m ²	1 min	60次/min
CSAT3 三维超声风温仪	风速水平分量: 4.0 cm/s; 风速垂直分量: 2.0 cm/s	风速水平分量 1 mm/s; 风速垂直分量 0.5 mm/s; 虚温 0.025 C	30 min	10 Hz
LI-7500 红外 H ₂ O/CO ₂ 分析仪	0.3 mg/kg (CO ₂); 0.15 mmol/mol (H ₂ O)	0.1 mg/kg (CO ₂); 0.1 mmol/mol (H ₂ O)	30 min	10 Hz
HFP01 土壤热通量仪	±20%	1 W/m ²	30 min	1次/min

2 资料的质量控制

由于热量和水汽的传输会引起空气体积发生变化,从而使测量的标量密度中包含了一部分体积变化产生的影响,这部分变化并不代表真实的物质增加或减少,因此需要对潜热和CO₂通量进行修正^[23]。在所有的修正方法中,最经典且目前仍一直被广泛使用的就是Webb等^[23]在干空气质量守恒前提下提出的修正方法(WPL)。本文对潜热和CO₂通量进行了WPL修正。

湍流观测是每30 min 1条记录,1天共有48条

记录。为除去由于外界干扰、仪器噪声产生的虚假观测值,对观测数据按以下原则进行剔除:①参考中国气象局下发的《通量观测规范》中第5章数据质量控制“特殊要素、常规要素的数量范围界限值”,剔除超出界限值的数据;②根据方差检验,剔除个别峰值和奇异值记录,剔除判据为 $|X_i - X| > 4\sigma$,其中 X_i 为测量值(风速、温度、水汽密度、CO₂等), X 是半小时均值, σ 是标准差;③剔除部分降水期间的不合理数据;④向下短波辐射夜间为零,故剔除夜间反射率数据。

对地气交换的长期通量观测站,数据插补是必要的。目前在通量界较常用的数据插补方法有:平

均昼夜变化(MDV)、半经验方法(查表法和非线性回归法)、人工神经网络3种^[24]。参考EuroFlux和AmeriFlux的数据研究结果^[25],本文对缺失的梯度数据用相邻的数据进行线性内插填补,对缺失的涡度数据采用MDV方法进行插补,夜间和日间分别用7d和14d的窗口进行插补。观测数据在1天内缺测50%以上的不作填补。经检验涡度数据不符合正态分布规律,因此对插补前后涡度数据在显著性水平上进行非参数Z检验,结果显示:潜热、感热通量插补前后数据的分布差异不显著;CO₂通量分正值区域和负值区域分别进行检验,负值区差异不显著,正值区差异显著。

单项观测资料在记录不缺失的情况下应有17568个数据,但由于仪器故障、检修,或者因为天气影响等原因,原始观测数据或多或少存在间断。经质量控制后,CO₂通量可用资料占全部资料的80%以上,其余各项可用资料均占全部资料的95%以上。

3 能量平衡评价方法

所谓的能量平衡是指利用涡度相关仪器直接观测的潜热和感热通量之和与净辐射通量、土壤热通量、冠层热储量等之和的之间的平衡。根据热力学第一定律,涡度相关和净辐射平衡观测系统所获得的生态系统各能量分量的平衡方程可表示为

$$E_L + H = R_n - G - S - Q. \quad (1)$$

式(1)中, E_L 为潜热通量, H 为感热通量,两者之和可以简称为湍流通量; R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, S 为冠层热储量, Q 为附加能量汇源的总和(因 Q 值很小常常被忽略), $R_n - G - S - Q$ 可以简称为有效能。当湍流通量与有效能相同时,称为能量平衡,否则称为能量不平衡。有研究表明:当冠层高度超过8m时,冠层热储量 S 对能量平衡程度的影响很大^[26-27]。

这里下垫面为农田,作物高度较矮,生物量较低,因此热存储通常很小,可以忽略不计,故 S 近似取为0。

因此,能量平衡比率

$$R_{EB} = \frac{\sum(E_L + H)}{\sum(R_n - G)}. \quad (2)$$

从理论上讲,能量平衡是绝对的,但实际的能量平衡往往受环境条件的影响。本文通过比较不同时段(白天和夜间)、不同季节、不同下垫面、不同天气条件下的能量平衡比率,深入研究寿县农田下垫面的地表能量平衡特征,分析能量平衡程度及其影响因素,并讨论能量不平衡的可能原因。

4 结果分析

计算了各种环境条件下能量平衡比率的平均值,结果见表2。

表2 不同条件下能量平衡比率的比较

Table 2 Energy balance ratios in different conditions

条件	分类	样本数	R_{EB}
不同时段	全天,白天,夜间	17568, 8333, 9235	0.89, 0.78, 0.24
不同季节	秋,冬,春,夏	4368, 4368, 4416, 4416	0.91, 0.77, 0.92, 0.90
不同下垫面	裸地,雪地,小麦,水稻	5856, 1488, 5328, 4896	0.92, 0.50, 0.90, 0.87
不同天气	晴,曇,阴,雨	3600, 5568, 1968, 6432	0.85, 0.88, 0.89, 0.91

4.1 白天和夜间的能量平衡比较

由表2可见,全天的能量平衡程度最好,为0.89(该值也是全年平均);只考虑白天时有效能偏大,能量平衡比率小于全天(总辐射值大于 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),为0.78;夜间(总辐射值小于等于 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)最差,只有0.24。白天能量平衡比率明显优于夜间,与湍流混合的强度有很大关系。一般来说,白天湍流强,有利于能量闭合;夜间湍流减弱,能量平衡比率下

降。为了更细致地考察这一点,图1给出了湍流通量($E_L + H$)、有效能($R_n - G$)和能量平衡比率(R_{EB})的日变化,其中时间均为北京时。图1中可见,三者都呈现出白天大、夜间小的特点,其中能量平衡程度在下午最高,此时湍流运动较强,其能量输送和有效能也最接近。早晨日出和傍晚日落这段时间内由于 $R_n - G$ 值接近于零,导致 R_{EB} 值变化非常剧烈。

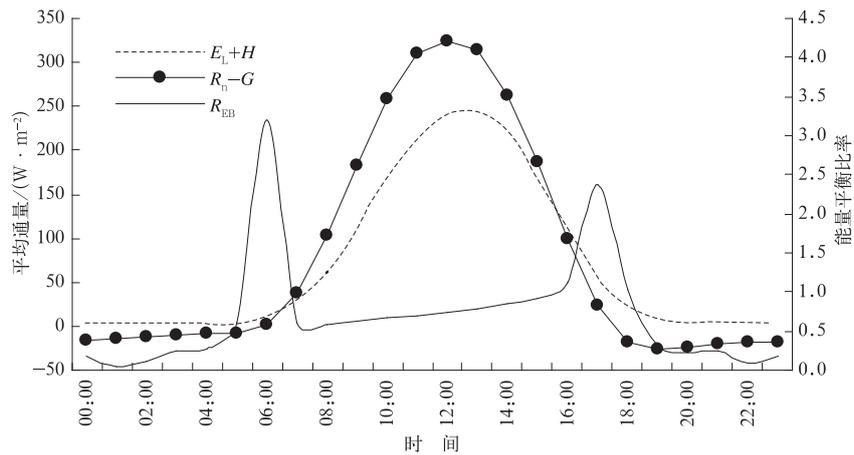


图 1 湍流通量($E_L + H$)、有效能($R_n - G$)和能量平衡比率(R_{EB})的日变化

Fig. 1 Diurnal variations of ($E_L + H$), ($R_n - G$) and R_{EB}

4.2 不同季节的能量平衡比较

图 2 是湍流通量、有效能量和能量平衡比率的逐月变化,季节平均值见表 2。由表 2 可知,秋、春、夏季 R_{EB} 接近,都在 0.9 以上;冬季最低,只有 0.77,这与冬季湍流较弱有关。图 2 中, R_{EB} 从秋季到冬季呈下降趋势,到 2 月最低,然后持续回升,至 6 月一

直维持在较高水平,但夏季 7—8 月有所下降,究其原因,虽然夏季湍流运动较强,但此时由于太阳辐射最强导致有效能 ($R_n - G$) 明显大于湍流通量,因而能量平衡比率下降。这种变化除了与季节有关外,也与下垫面的不同有关。

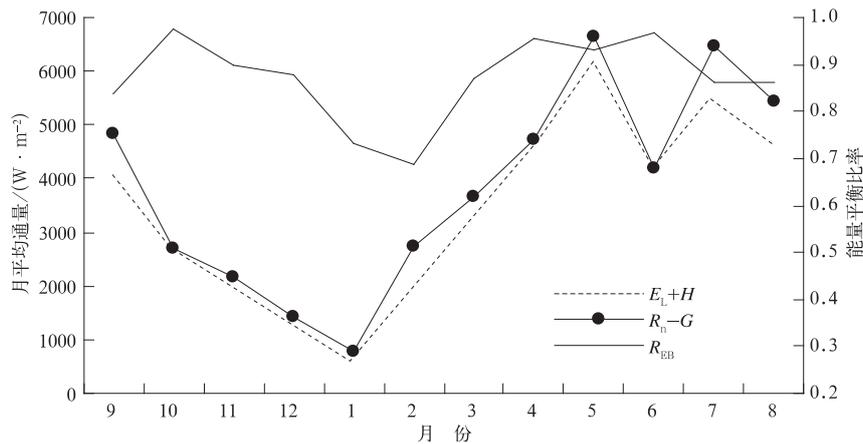


图 2 湍流通量($E_L + H$)、有效能($R_n - G$)和能量平衡比率(R_{EB})的月变化

Fig. 2 Monthly variations of ($E_L + H$), ($R_n - G$) and R_{EB}

4.3 不同下垫面的能量平衡比较

由于下垫面状况会影响能量平衡程度,因此,计算了各种下垫面的 R_{EB} 平均值(见表 2)。表 3 是观测地点不同下垫面对应的的时间。其中,2008 年初安徽出现罕见大雪,有近 1 个月的时间地表被积雪覆盖。

由表 2 可见,不同下垫面能量平衡比率从大到小排列:裸地,麦地,稻田,雪地,其中前三者非常接近,裸地闭合率可达 0.92,而雪地只有 0.50,这可能

表 3 不同下垫面观测的对应时段

Table 3 Periods corresponding to different underlying surface

下垫面	对应时段
裸地(半裸地)	2007 年 10 月—2008 年 1 月上旬和 6 月上、中旬
雪地	2008 年 1 月中旬—2 月上旬
麦地	2008 年 2 月中旬—5 月
稻田	2008 年 6 月下旬—9 月

是因为冻结、融解、升华等气象过程中会伴随着能量的转化,而在本文中这几个能量吸收项都未加以考虑,因此会给有效能量的估算带来一些误差。另外,

裸地比麦地、稻田的 R_{EB} 略高,说明尽管作物冠层在 1 m 以内,但仍有少许冠层热储量 S ,而在计算 R_{EB} 时略去了 S ,可能导致麦地、稻田的 R_{EB} 值下降。

4.4 不同天气条件下的能量平衡比较

根据云量和降水观测数据,将不同天气分为晴、阴、雨 4 种类型,计算各种天气条件下的 R_{EB} 平均值(见表 2)。由表 2 可知,各种天气下的 R_{EB} 值差异不大,雨天最大(为 0.91),晴天最小(为 0.85),多云(阴)与阴天 R_{EB} 值接近。晴天时太阳辐射最强, R_{EB} 值最小,可能与有效能较大有关。

5 小 结

1) 安徽省寿县农田全年能量平衡比率平均为 0.89,但不同条件下 R_{EB} 值存在差异:白天明显大于夜间,春、夏、秋季明显大于冬季,裸地和麦、稻田明显大于雪地,晴、阴、雨天气下 R_{EB} 值差异不大。

2) 通过比较分析可知,影响能量平衡程度的因素包括:时段越长,能量平衡比率相对越高;湍流越强,能量平衡比率越高。其他能量吸收项的忽略,如在冻结、溶解、升华等过程中伴随的能量转化,以及农田冠层中植被的热储量等等,都会降低 R_{EB} 值。由此可见,涡度相关法观测在平坦、裸地条件下适用性最好,白天适用性好于夜间,有低矮植被时适用性好于有冰雪覆盖的下垫面。全年能量平衡比率小于 1,也存在湍流通量被低估的可能。另外,0~5 cm 土层土壤热储量也是导致能量不平衡的原因之一。

3) 总体来说,能量不平衡是通量观测中较为普遍的现象,一般认为不平衡程度在 10%~30% 为合理范围。安徽省寿县国家气候观象台全年的能量不平衡程度为 11%,恰好属于这个范围并接近不平衡程度的下限,说明涡度相关法在寿县农田生态系统通量观测中具有很大的可靠性。

到目前为止,仍没有人能够对能量不平衡现象的存在给予充分的解释。根据前人研究,除了本文讨论的因素外,其他影响原因可以归结为仪器测量的系统偏差、采样误差、高频和低频通量成分的损失、平流效应^[2]以及日常观测中仪器维护不到位造成的偏差等。农田能量不平衡的原因很复杂,还有待于今后从上述方面做进一步分析。

参 考 文 献

- [1] 杨晓光,沈彦俊,张录达. 麦田水热传输的控制效应及非线性特征分析. 中国农业大学学报, 2000(1):18.
- [2] Li Zhengquan, Yu Guirui, Wen Xuefa, et al. Energy balance closure at ChinaFlux sites. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Supple D):51-62.
- [3] Wen Xuefa, Yu Guirui, Sun Xiaomin, et al. Turbulence Flux Measurement above the overstory of a subtropical Pinus plantation over the hilly region in southeastern China. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Supple D):63-73.
- [4] Lee X. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flatterrain. *Bound-Layer Meteorol*, 2002, 103:277-301.
- [5] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric For Meteorol*, 2002, 113:223-243.
- [6] 高志球,卞林根,陆龙骅,等. 水稻不同生长期稻田能量收支、CO₂ 通量模拟研究. 应用气象学报, 2004, 15(2):129-140.
- [7] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *J Atmos Ocean Technol*, 1998, 15:416-429.
- [8] Verma A B, Baldocchi D D, Anderson D E, et al. Eddy fluxes of CO₂, water vapor, and sensible heat over a deciduous forest. *Bound-Layer Meteorol*, 1986, 36:71-91.
- [9] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes. *Agric For Meteorol*, 1997, 87:179-200.
- [10] Mayocchi C L, Bristow K L. Soil surface heat flux: Some general questions and comments on measurements. *Agric For Meteorol*, 1995, 75:43-50.
- [11] Verhoef A, Hurk B J M, Adrie F G, et al. Thermal properties for vineyard (EFEDA-I) and savanna (HAPEX-Sahel) sites. *Agric For Meteorol*, 1996, 78:1-8.
- [12] Kanda M, Inagaki A, Letzel M O, et al. LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. *Bound-Layer Meteorol*, 2004, 110:381-404.
- [13] Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The energy balance experiment EBEX-2000, Part I: Overview and energy balance. *Bound-Layer Meteorol*, 2007, 123:1-28.
- [14] Foken T. The energy balance closure problem—An overview. *Ecological Application*, 2008, 18(6):1351-1367.
- [15] 李祎君,许振柱,王云龙,等. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析植物生态学报. 植物生态学报, 2007, 31(6):1132-1144.
- [16] 朱蓉,徐大海. 大气边界层热量输送的非局地多尺度湍流理论及试验研究. 应用气象学报, 2005, 16(3):273-282.
- [17] 胡小明,刘树华. 山岭地形的陆面过程及边界层特征的模拟. 应用气象学报, 2005, 16(1):13-23.
- [18] 牛国跃,洪钟祥,孙菽芬. 陆面过程研究的现状与发展趋势. 地球科学进展, 1997, 12(1):20-25.
- [19] 卞林根,陆龙骅,程彦杰,等. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究. 应用气象学报, 2001, 12(1):1-13.
- [20] 徐祥德,陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展. 应用气象学报, 2006, 17(6):1-13.
- [21] 朱治林,孙晓敏,张仁华. 用微气象方法估算淮河流域能量

[1] 杨晓光,沈彦俊,张录达. 麦田水热传输的控制效应及非线性

- 平衡(HUBEX/IOP1998/99)的统计分析和比较研究. 大气科学, 2003, 20(2):285-291.
- [22] 中国气象局监测网络司. 近地层通量观测规范. 北京:气象出版社, 2007: 1-66.
- [23] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart J Roy Meteor*, 1980, 106:85-100.
- [24] 于贵瑞, 李正泉, 孙晓敏, 等. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京:高等教育出版社, 2006:391-392.
- [25] Eva Falge, Dennis Baldocchi, Richard Olson, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agric For Meteor*, 2001, 107:71-77.
- [26] Mc Caughey J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa Ontario-a case study. *Bound-Layer Meteor*, 1985, 31:89-101.
- [27] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Bound-Layer Meteor*, 1986, 37:17-35.

Evaluation on Energy Balance of Farmland in Shouxian County of Anhui Province

Tian Hong¹⁾²⁾ Wu Qiong³⁾ Tong Yingxiang³⁾

¹⁾ (Anhui Provincial Climate Center, Hefei 230031)

²⁾ (Shouxian National Climate Observatory of Anhui Province, Shouxian 232200)

³⁾ (Lu'an Meteorological Bureau of Anhui Province, Lu'an 237011)

Abstract

Energy balance means the balance between the sum of latent heat, sensible heat flux observed by Eddy Covariance (EC) technique and the variance of net radiation flux, soil heat, canopy heat. According to the first law of thermodynamics and basic assumption of EC observation, the ratio of energy balance can be used as an effective evidence to evaluate data quality and system performance of an observation system theoretically. Energy balance ratio of the field has been investigated based on the data of flux observation system on near surface layer observed at the representative station of Huaihe River Basin, Shouxian National Climate Observatory from September 2007 to August 2008 in order to assess operation status of this new system. The results show that the annual average energy balance ratio is 0.89 during the period, and it is higher in the day than that in the night, higher in spring, summer, autumn than that in winter, higher over the bare surface than that over the cropland surface, while different weather conditions make little differences. The largest energy balance ratio is 0.92 over the bare surface, and smaller ratio is 0.9 over wheat field and paddy field, while it's only 0.50 over snow surface. It also shows that energy balance is influenced by the negligence of heat reserve during exuberant growing period to some extent and absorption tem, such as thaw, freeze and sublimation. During the observation period, the observed turbulent fluxes are always less than available energy, indicating that turbulent fluxes might be underestimated. The energy balance during daytime seems better than that at night because of stronger turbulence. It can be concluded that the applicability of EC method is best in flat, bare field, better in the day than that in the night, better on the underlying surface with low vegetation than that covered with snow. All in all, the phenomenon of energy imbalance is fairly common in flux observation and it often reaches 10% to 30%. The annual energy balance ratio (0.89) of Shouxian National Climate Observatory is close to the lower limit of ranges, so the EC method of flux observation over farmland ecosystem in Huaihe River Basin is reliable.

Key words: energy balance; flux; Eddy Covariance method; farmland; Shouxian County of Anhui Province