

DOI: 10.5846/stxb201201220123

刘渡,李俊,于强,同小娟,欧阳竹. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5309–5317.

Liu D, Li J, Yu Q, Tong X J, Ouyang Z. Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(17): 5309–5317.

涡度相关观测的能量闭合状况及其对 农田蒸散测定的影响

刘 渡^{1,2,4} 李 俊^{1,2,*} 于 强^{1,2} 同小娟³ 欧阳竹¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
3. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 涡度相关法被认为是测定农田蒸散量的标准方法。然而, 能量不闭合现象在涡度相关测量中普遍存在。分析能量不闭合对涡度相关观测的影响, 对于提高涡度相关观测精度具有重要意义。以蒸渗仪法为参照, 探讨涡度相关观测的能量闭合状况对农田蒸散测定的影响, 在导致涡度相关观测能量不闭合的诸多因素中, 寻找对蒸散测定有影响的因素。结果表明: 涡度相关观测的白天能量平衡比率(*EBR*) 呈秋冬高、春夏低的变化特征, 麦季日均 *EBR* 范围在 0.26—2.84 之间, 平均 1.15; 玉米季日均 *EBR* 范围在 0.19—2.59 之间, 平均 0.78。无论麦季或玉米季, 涡度相关法测定的平均蒸散量 (ET_{ec}) 均明显低于蒸渗仪法观测值 (ET_L), 但两者显著相关 ($P < 0.01$), 并有相似的季节变化。平均蒸散比 (ET_{ec}/ET_L) 麦季约为 0.61, 玉米季约为 0.50。在冬小麦田和夏玉米田 ET_{ec}/ET_L 均与 *EBR* 显著相关 ($P < 0.01$)。麦田种植密度大, 下垫面较均匀, 蒸散比与 *EBR* 成正比 ($P < 0.01$), 且不受叶面积指数 (*LAI*) 大小影响; 反之, 玉米田种植密度小, 只有当 $LAI > 1$, 下垫面变得较均匀后, 蒸散比与 *EBR* 的关系才变得显著 ($P < 0.01$)。风速小时 ET_{ec}/ET_L 与 *EBR* 显著相关, 风速增加时二者相关性减弱。尤其在玉米田, 当摩擦风速 (u^*) 大于 0.3 m/s 时 ET_{ec}/ET_L 与 *EBR* 的相关性不再显著。风速小时, 大气湍流微弱, 湍流的涡旋较大。在有限的观测时段 (0.5h) 内, 涡度相关仪的传感器难以捕捉足够的湍流能量, 所测湍流能量偏低, 导致能量不闭合。以上结果为应用能量平衡比率校正农田蒸散提供了可能途径。

关键词: 能量平衡比率; 蒸散量; 涡度相关法; 蒸渗仪法; 农田

Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland

LIU Du^{1,2,4}, LI Jun^{1,2,*}, YU Qiang^{1,2}, TONG Xiaojuan³, OUYANG Zhu¹

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The eddy covariance (EC) technique is generally regarded as a standard method for crop evapotranspiration measurements. However, the imbalance of energy closure prevails in the EC observations. Evaluating the effect of energy balance closure on EC measurement is critical for improving the accuracy of this method. In this paper, a weighting method (the Lysimeter method) was used as reference to evaluate the effect of energy balance ratio (*EBR*) on EC evapotranspiration. The results revealed that daytime *EBR* varied seasonally in the field, where wheat and maize were

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

收稿日期: 2012-01-22; 修订日期: 2012-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijun@igsrr.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

rotated in the winter and summer, respectively. The *EBR* was higher in autumn and winter but lower in the spring and summer. For the wheat field, mean daytime *EBR* varied from 0.26 to 2.84 with an average of 1.15. As for the maize field, *EBR* varied from 0.19 to 2.59 with a mean value of 0.78. The evapotranspiration (*ET*) using EC (ET_{ec}) was clearly lower than derived by Lysimeter (ET_L). The mean ratio of ET_{ec} to ET_L (ET_{ec}/ET_L) was 0.61 and 0.50 during the wheat growing season and the maize season, respectively. The *ET* observed with these two approaches significantly correlated with each other ($P < 0.01$), with their characteristics of seasonal variation performing in a similar manner. The ET_{ec}/ET_L was found to be proportional to *EBR* ($P < 0.01$) in both the winter wheat field and the summer maize field. Furthermore, the effect of the leaf area index (*LAI*) on the relationship between *ET* ratios and *EBR* was significant in the even crop field during the entire growing season of winter wheat and the maize growing stage when the *LAI* was higher than 1. However, the effect was insignificant in the uneven maize field when the *LAI* was less than 1. On the other hand, friction velocity (u^*) exerted a strong impact on *EBR* and its relationship with *ET* ratios. *EBR* was observed to be proportional to u^* in both the winter wheat field and the summer maize field. *ET* ratios were proportional to *EBR* when u^* was small. Nonetheless, the correlation between these two parameters showed recession while u^* increasing, especially in summer maize field, ET_{ec}/ET_L was not significantly correlated with *EBR* when u^* was bigger than 0.3 m/s. Due to the weak turbulent intensity and the large eddy under the condition of low friction velocity, the EC sensor could not catch enough turbulent energy in a limited observation period (30 minutes), which caused lower measured turbulent fluxes and imbalanced energy closure. The results offer a possible way to correct the underestimated ET_{ec} using *EBR*.

Key Words: energy balance ratio; evapotranspiration; eddy covariance; lysimeter; cropland

蒸散作为植被水热平衡中的重要组成部分,是反映植被水分状况的重要指标,是影响区域和全球气候的重要因素。准确测算地表蒸散,对作物产量模拟、农业节水研究、全球气候变化研究等方面具有重要意义。目前测定蒸散的方法主要有:水量平衡法、蒸渗仪法、波文比法、梯度法、涡度相关法和闪烁通量仪法等。其中,蒸渗仪法是直接测定生态系统蒸散量最经典的方法,曾被广泛用作校准其他方法的标准^[1-2];涡度相关法作为直接测定地表与大气间水汽通量的标准方法在全球水循环研究中得到了广泛应用^[3]。但涡度相关技术本身还有许多理论和技术性问题未得到很好解决,如根据热力学第一定律和涡度相关技术的基本假设,观测的能量闭合状况可作为评价数据可靠性的方法之一,可是现在大多数观测站点的能量都不闭合。对 FLUXNET 和 ChinaFLUX 的分析结果表明,站点的平均能量不闭合度分别为 20%^[4]和 27%^[5]。还有部分学者的研究结果超出普遍报道的 10%—30% 的不闭合范围^[6]。关于能量闭合程度的季节变化特征, Li 等^[5]发现,从冬季到夏季各站点的能量闭合程度不断提高。但南方通量站情况与北方相反,如鼎湖山针阔混交林的冬季能量平衡状况好于夏季^[6]。

针对涡度相关观测能量不闭合这一难题,学者们进行了大量研究,主要集中在两方面:一是分析导致能量不闭合的因素有哪些;二是寻找使能量达到闭合的方法。对于第一个问题的回答可归结为:通量源面积的不匹配^[7]、高频和低频湍流通量的损失^[8]、平流的影响^[9]、地形的影响^[6,10]、测量仪器可能产生的系统偏差^[11]、其他能量吸收项的忽略和湍流交换弱^[5]等。对于第二个问题,研究的重点从早期的提高仪器测量的精度和订正其他能量吸收项^[12-13]逐渐转移到对地气间的交换过程和低频大尺度涡旋等问题的探讨。近年来,针对单点涡度相关系统难以观测到的低频大尺度涡旋的通量贡献问题,学者们从延长通量计算的平均时间^[14]、应用大涡模拟技术^[15]、采用地面观测网的“面积平均”方法^[15-16]、应用大口径闪烁仪^[17]等方面来寻找能量不闭合的解决途径,但该问题至今仍未完全解决。

谱分析表明,涡度相关仪器不是湍流通量测定的限制性因素。若所有观测仪器均经过严格标定,可不考虑测量仪器可能产生的系统偏差^[18]。若研究区地势平坦,则可以不考虑地形起伏造成的影响。在农田,冠层热储量和附加能量源汇的总和的数值通常较小,一般可忽略^[19]。余下的导致能量不闭合的因素包括仪器所

测通量源面积的不匹配、高低频通量成分的损失、平流的影响和湍流交换强度四方面。但影响能量闭合程度的因素不一定会影响湍流通量的测定。本研究关注的焦点不在于使涡度相关观测的能量达到闭合,而在于探讨能量不闭合对湍流通量的测定是否有影响;如果有影响,影响有多大;如何进行校正。

为探讨涡度相关观测的能量闭合状况对蒸散测定的影响,需要寻找其它蒸散测定方法作为参考标准。蒸渗仪法是直接称重获取蒸散量的,若代表性好,理当成为首选。本研究以华北平原冬小麦/夏玉米轮作田为例,以大型蒸渗仪所测蒸散量为参照,探讨能量闭合状况与涡度相关蒸散测定的关系及其影响因子,在导致涡度相关观测能量不闭合的诸多因素中找出对蒸散测定有影响的因素,对完善涡度相关技术具有重要的理论和应用价值。

1 研究地点和方法

1.1 研究地点概况

试验在中国科学院禹城农业综合试验站(36°57'N, 116°38'E, 22.0 m)进行,试验站综合观测场地面积约 15 hm²。该站地处黄河中下游冲积平原,地势低平,属暖温带大陆性季风气候。该站近 40 a 平均气温 13.2 °C,1 月和 7 月平均气温分别为 -2.4 °C 和 26.9 °C;年平均总辐射量 5242 MJ/m²;年平均降水量 585 mm。降水季节分配不均,冬春干旱少雨,6—8 月降水量占全年的 70% 左右。土壤母质为黄河冲积物,土壤有机质含量约 1.21%,pH 值 7.9—8.0。作物种植制度为冬小麦/夏玉米轮作一年两熟制。本研究中,冬小麦和夏玉米品种分别为科禹 13 和丹玉 86。

1.2 实验观测

1.2.1 涡度相关与微气象梯度观测

开路涡度相关系统(OPEC)及小气候梯度观测系统位于大片均匀农田的中心。OPEC 主要由 CSAT3 型三维超声风速仪(Campbell Sci. Inc., USA)和 LI-7500 型开路红外 CO₂/H₂O 分析仪(Li-Cor Inc., USA)组成。上述仪器均与 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 10 Hz,每 30 min 输出一组平均值。

小气候梯度观测系统包括 2 层 AR-100 型 3 杯风速计(Vector Instruments, UK)和 2 层 HMP-45C 型温湿度传感器(Vaisala, Finland)。实验中温湿度传感器平均高度为 2.2 m 和 3.4 m,超声风速温度仪平均高度为 2.8 m,随作物高度变化有所调整。观测期间,风浪区长度在 200 m 以上,满足微气象梯度的观测要求。在观测架附近株间和行间土表下 2 cm 处各埋一块 HFP01 型土壤热流板(Hukseflux, the Netherlands)测定土壤热通量。其它观测项目还包括净辐射(Model CNR-1, Kipp and Zonen)、气压(CS105, Vaisala Inc.)和降水(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 30 min 输出一组平均值。在作物生长旺季每周测定叶面积(Li-Cor 3100, USA)。所有仪器均经过严格标定,以确保数据的可靠性。

1.2.2 大型蒸渗仪观测

中国科学院禹城农业综合试验站的大型原状土自动称重蒸发渗漏仪(Lysimeter)始建于 1985 年,1989 年扩建,是国内最早,也是迄今为止最大的蒸发渗漏仪。其特点是:有良好的称重系统和高分辨率及精度,在称重总量达 30 t 的情况下,系统的感量小于 60 g,可灵敏地反映出 0.02 mm 水分通量的变化;仪器内土体为原状土,使器内土壤特性与大田保持一致;土柱内地下水位与大田同步变化;土柱内种植面积 3 m²、深 5 m,可保证土柱内作物根系的正常生长;且完全置于田间环境内,管理措施与大田同步,保证土柱内作物与大田长势一致,使观测数据有良好的代表性。蒸渗仪的观测时间为每日 8:00 和 20:00,8:00—20:00 和 20:00—8:00 的土体重量变化分别代表白天和夜间的水汽通量。

1.3 涡度相关数据处理

首先对涡度相关测定的 10 Hz 原始数据进行平均,经 WPL 校正^[20]和两次坐标旋转^[21]得到水热的 30 min 平均通量。对雨天或清晨有露水时采集的数据和其他超出正常范围($\pm 3\sigma$)的异常数据予以剔除。对被剔除

的数据和由于仪器故障、停电等原因丢失的数据采用下列方法进行插补: 小于 2h 的缺失数据用线性内插法插补; 大于 2h 的缺失数据用平均日变化法 (MDV) 进行插补^[22]。

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用下式描述:

$$\lambda E + H = R_n - G - S - Q \quad (1)$$

式中 λE 为潜热通量, H 为显热通量, R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, S 为冠层热储量, Q 为附加能量源汇的总和。

对裸地或植被低矮的生态系统, S 和 Q 的数值通常很小, 能量平衡方程可简化为^[19]:

$$\lambda E + H = R_n - G \quad (2)$$

当湍流能量 ($\lambda E + H$) 与有效能量 ($R_n - G$) 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有: 一般最小二乘法线性回归、简化主轴法线性回归、能量平衡比率 (EBR) 和能量平衡相对残差频率等^[5]。其中, 能量平衡比率 (EBR) 是学者们最常采用的分析能量闭合程度的方法之一^[5, 23-24]。EBR 是指在一定的观测期间内, 由涡度相关仪器直接观测的湍流能量与有效能量的比值, 即:

$$EBR = \frac{\sum (\lambda E + H)}{\sum (R_n - G)} \quad (3)$$

由于涡度相关技术主要考虑白天强对流条件下对通量测定的要求, 使其在夜间的应用受到一定程度的限制。当夜间风速较低时, 所测湍流通量偏低。大型蒸渗仪的观测时间为 8:00 和 20:00, 本研究仅对两种方法白天 (8:00—20:00) 的观测数据进行分析。

2 结果分析

2.1 涡度相关观测的能量闭合状况

分析白天 (8:00—20:00) 涡度相关观测的能量闭合状况, 发现能量平衡比率 (EBR) 存在明显的季节变化 (图 1, 表 1): 10 月—翌年 3 月 EBR 较大, 且波动明显, 月均 EBR 大于 1。其中 3 月份 EBR 接近 1, 能量闭合程度最高。4—9 月 EBR 较小, 月均 EBR 范围在 0.6—0.8 左右, 其中 6—9 月 EBR 处于全年的低谷, 除 7 月外, 月均 EBR < 0.7。全年白天平均 EBR 为 0.98。其中麦季日均 EBR 范围在 0.26—2.84 之间, 平均为 1.15; 玉米季日均 EBR 范围在 0.19—2.59 之间, 平均为 0.78。

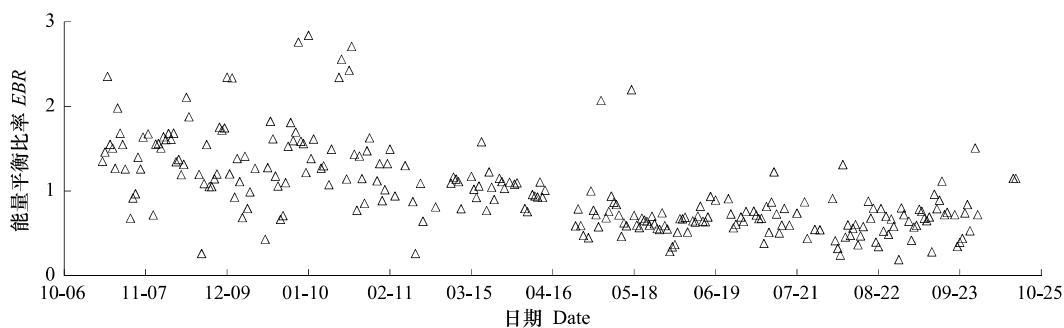


图 1 冬小麦/夏玉米轮作田白天日平均能量平衡比率 (EBR) 季节变化 (2004-11—2005-10)

Fig. 1 Seasonal variation of daily mean daytime energy balance ratio (EBR)

2.2 两种方法测定的蒸散量状况

分析涡度相关法和蒸渗仪法所测白天 (8:00—20:00) 蒸散量 (ET) 状况, 结果表明: 两种方法所测蒸散量季节变化吻合较好: 11 月—翌年 2 月 ET 较小且相对稳定; 3 月以后气温升高, 小麦起身、拔节, 随着叶面积指数 (LAI) 的增加, ET 迅速增大, 至 5 月中旬达到最大; 6 月初麦收至玉米出苗, 农田裸露, ET 骤减; 玉米拔节至灌浆 (7 月下旬—9 月初), ET 值维持在一个较高的水平; 灌浆后期 (9 月下旬), ET 值再次迅速降低 (表 1)。

表 1 冬小麦/夏玉米轮作田各月及全年白天 EBR、蒸散量(ET)和叶面积指数(LAI)状况(2004.11—2005.10)

Table 1 The monthly and annual mean daytime EBR, evapotranspiration (ET) and leaf area index (LAI) (Nov., 2004—Oct., 2005)

月份 Month	能量平衡 比率 EBR	涡度相关法 所测蒸散量 ET_{ec} /(mm/h)	蒸渗仪法所测 蒸散量 ET_L /(mm/h)	叶面积指数 LAI	月份 Month	能量平衡 比率 EBR	涡度相关法 所测蒸散量 ET_{ec} /(mm/h)	蒸渗仪法所测 蒸散量 ET_L /(mm/h)	叶面积指数 LAI
11	1.34	0.051	0.070	ND	5	0.79	0.292	0.529	4.61
12	1.28	0.034	0.047	ND	6	0.67	0.117	0.268	ND
1	1.67	0.019	0.023	0.53	7	0.81	0.145	0.248	1.42
2	1.17	0.030	0.048	0.46	8	0.67	0.168	0.375	4.01
3	1.06	0.088	0.138	1.07	9	0.70	0.148	0.263	3.92
4	0.84	0.246	0.440	4.49	10	1.17	0.097	0.146	1.88
全年 Annual	0.98	0.121	0.217	ND					

从作物生长季平均看,无论是麦季、玉米季还是全年,均是涡度相关法所测蒸散量小于蒸渗仪法测定结果。在麦季和玉米季,涡度相关法所得蒸散分别仅相当于蒸渗仪法结果的 61% 和 50% (表 2)。将两种方法所测白天蒸散量进行回归分析,发现它们具有显著的线性相关关系 ($P < 0.01$) (图 2)。

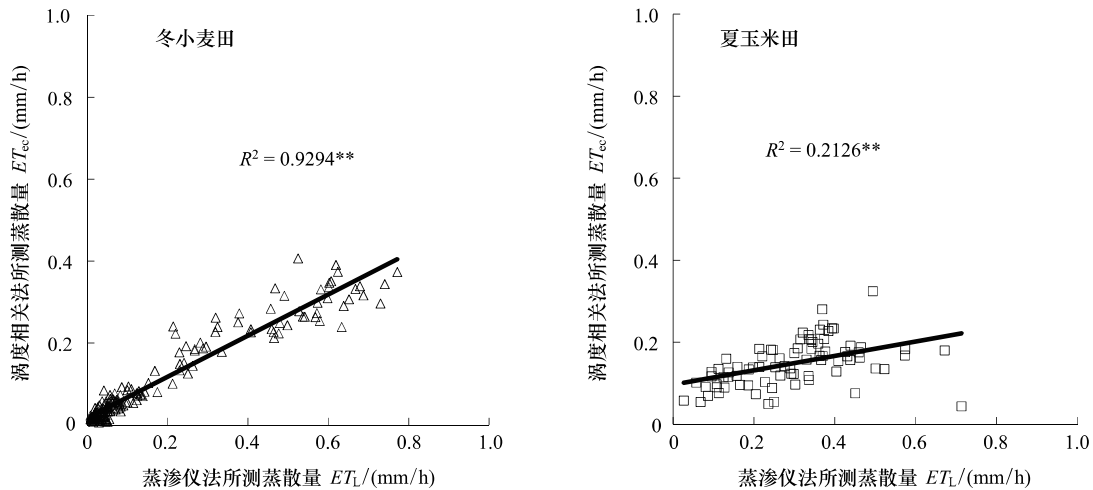


图 2 冬小麦田和夏玉米田涡度相关法和蒸渗仪法所测蒸散量(ET_{ec} 和 ET_L)的相关关系

Fig. 2 Relationship between ET measured by EC and Lysimeter methods(ET_{ec} and ET_L) in winter wheat and summer maize fields

** : $P < 0.01$

表 2 涡度相关法和蒸渗仪法测定的麦季、玉米季和全年白天日 ET 比较

Table 2 Seasonal and annual mean ET measured by EC and Lysimeter methods in the field of winter wheat / summer maize for a rotation

观测时期 Period	涡度相关法所测蒸散量 ET_{ec} /(mm/h)	蒸渗仪法所测蒸散量 ET_L /(mm/h)	两种方法所测蒸散量之比 ET_{ec}/ET_L
麦季 Wheat growing stage	0.110±0.111	0.184±0.214	0.61
玉米季 Maize growing stage	0.149±0.055	0.297±0.144	0.50
全年 Annual	0.121±0.098	0.217±0.199	0.55

2.3 蒸散比与 EBR 的关系及其影响因子

2.3.1 蒸散比与 EBR 的关系

研究发现,无论麦季还是玉米季,涡度相关法和蒸渗仪法测定的蒸散量之比(ET_{ec}/ET_L)均与 EBR 存在显著的线性相关关系 ($P < 0.01$) (图 3),说明能量闭合程度对涡度相关蒸散测定结果有显著影响。

2.3.2 LAI 对蒸散比与 EBR 关系的影响

LAI 是反映作物生长和下垫面状况的重要参数之一。本文以 LAI 为指标,研究下垫面状况对涡度相关能量闭合程度与蒸散比关系的影响。结果表明:在冬小麦田,无论 LAI 大小如何,白天 ET_{ec}/ET_L 与 EBR 均存在极显著的线性相关关系 ($P < 0.01$);但在夏玉米田,当 $LAI < 1$ 时,白天 ET_{ec}/ET_L 与 EBR 的关系不显著,当 $LAI > 1$ 时,两者的关系变为极显著 ($P < 0.01$) (表 3)。即 LAI 变化对冬小麦田的 EBR 与蒸散比关系影响不大,但对夏玉米田的 EBR 与蒸散比关系有明显影响。

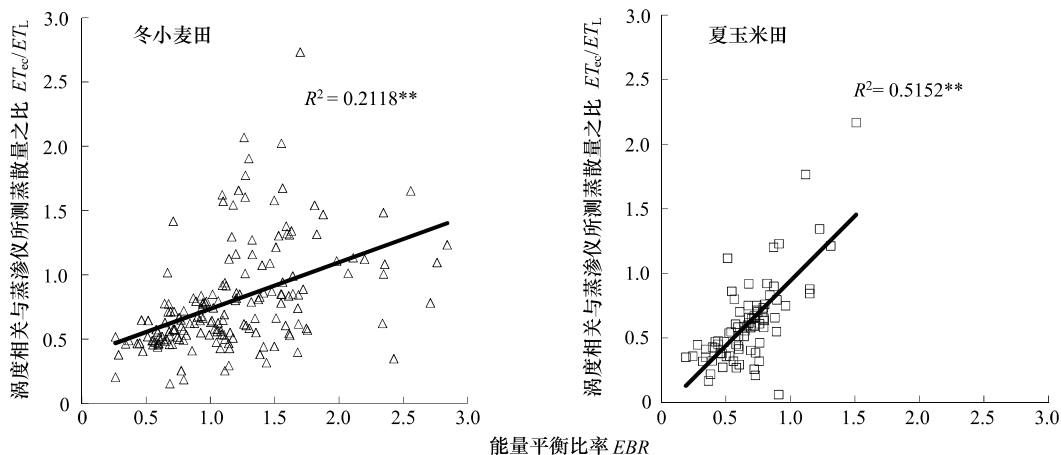


图 3 冬小麦田和夏玉米田日蒸散比 (ET_{ec}/ET_L) 与 EBR 的相关关系 (** $P < 0.01$)

Fig. 3 Relationship between ET ratio (ET_{ec}/ET_L) and EBR in winter wheat and summer maize fields

2.3.3 湍流交换对 EBR 及其与蒸散比关系的影响

湍流交换的强弱可由摩擦风速 (friction velocity, u^*) 来度量。本文以 u^* 为指标,研究白天湍流交换强度对涡度相关能量闭合程度及其与蒸散比关系的影响。结果表明:在麦季,白天 u^* 平均为 0.32 m/s, EBR 与 u^* 存在显著的相关关系 ($R=0.198$, $n=148$, $P < 0.05$);在玉米季,白天 u^* 平均为 0.22 m/s, EBR 与 u^* 也有显著相关关系 ($R=0.274$, $n=62$, $P < 0.05$)。说明不同季节、不同下垫面湍流交换强弱均对涡度相关观测的能量闭合程度有显著影响。

分析白天湍流交换强度对涡度相关能量闭合程度与蒸散比关系的影响,结果表明:摩擦风速较小时(麦田 $u^* < 0.4$ m/s、玉米田 $u^* < 0.3$ m/s) ET_{ec}/ET_L 与 EBR 显著相关;风速增加时,两者相关性减弱。尤其在夏玉米田,当 $u^* > 0.3$ m/s 时 ET_{ec}/ET_L 与 EBR 的相关性不再显著(表 3)。

表 3 冬小麦/夏玉米轮作田 ET_{ec}/ET_L 与 EBR 的相关性及叶面积指数 (LAI) 和摩擦风速 (u^*) 的影响

Table 3 Relationship between ET ratio (ET_{ec}/ET_L) and EBR, and the effects of leaf area index (LAI) and friction velocity (u^*) on them

农田 Crop field	叶面积指数 LAI	相关系数 $R_{ec,L}$	摩擦风速/(m/s) u^*	相关系数 $R_{ec,L}$
冬小麦田 Winter wheat field	$LAI < 1$	0.3119**	$u^* < 0.4$	0.5458**
	$LAI > 1$	0.7030**	$u^* > 0.4$	0.3913*
夏玉米田 Summer maize field	$LAI < 1$	0.3817	$u^* < 0.3$	0.5832**
	$LAI > 1$	0.8136**	$u^* > 0.3$	0.3857

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

3 讨论

3.1 涡度相关观测的能量闭合状况

观测显示,EBR 冬季偏高,夏季偏低,春、秋居中(表 1,图 1)。冬季部分地面裸露,有时有积雪覆盖,地面反射率比暖季有植被覆盖时明显增大,净辐射减小^[5],EBR 随之增大。Wilson 等^[4]和 Li 等^[5]认为植被生长

季能量闭合状况好于非生长季。本研究发现了类似的结果。非生长季地表裸露,反射率较高,所测净辐射较小,EBR 值较大;在主要生长季,地表完全被植被覆盖,反射率较小,所测净辐射较大,EBR 值较小。本研究中 3 月份麦/玉米轮作田的能量闭合状况最好(表 1)。相比之下,稻/麦轮作田的能量闭合状况以 5 月份最优^[25]。

本实验中,白天 EBR 麦季平均为 1.15,玉米季平均为 0.78。前者高于董应祥和田红^[24]对麦田的测定结果(0.91),后者介于 Guo 等^[18]和李祎君等^[23]对玉米田的测定结果(0.76—0.85)之间。麦季的能量闭合程度高于玉米季,除上述原因外,还可能因为小麦植株低矮,玉米植株高,忽略冠层热储存对麦田能量平衡影响小,但对玉米田能量平衡影响较大^[18,23]。不过从全年看,本实验中冬小麦/夏玉米轮作田的能量闭合程度较好,白天 EBR 的年均值(0.98)与 Li 等^[5]之前在同一地点的观测结果(0.95)接近,高于 Lei 等^[26]对同类农田的观测结果(0.74)。

3.2 两种方法测定的蒸散量状况

本实验中,夏玉米生长季涡度相关法测定的蒸散量比蒸渗仪法观测值偏低 50%(表 2),偏低程度大于 Ding 等^[27]对春玉米田的测定结果(偏低 22%)。在年尺度上,涡度相关法测定的麦/玉米轮作田蒸散量比蒸渗仪法观测值偏低 55%(表 2),偏低程度大于戚培同等^[28]对草地生态系统的研究结果(偏低 19%)。尽管偏低的程度有所不同,不同学者在涡度相关法测定的蒸散量偏低这一观点上是一致的。

3.3 能量闭合状况对蒸散测定的影响

本研究中,蒸散比(ET_{ec}/ET_L)与 EBR 存在极显著的相关关系(图 3),与 Li 等^[29]对干旱荒漠地区葡萄园的研究结果类似,说明涡度相关观测的能量不闭合对蒸散测定确有影响。研究区的蒸散和能量闭合状况在一定程度上取决于下垫面的性质^[24]。在冬小麦田和夏玉米田 LAI 对蒸散比与 EBR 关系的影响程度不同(表 3)。其原因在于:冬小麦种植密度大,长势齐整, LAI 大小对下垫面均匀程度影响不大。故无论 LAI 大小,EBR 与蒸散比的相关性都很好。夏玉米种植密度小,苗期玉米植株高参差不齐,冠层稀疏不平,下垫面不均匀,故夏玉米 LAI 较小时,蒸散比与 EBR 之间关系不明显。玉米拔节后,随着 LAI 的增加,作物快速生长,株高趋于一致,下垫面变得均匀,故玉米 LAI 较大时,蒸散比与 EBR 呈显著相关。

采用涡度相关法测定湍流通量时,湍流交换过于微弱会影响所测通量的准确性,从而对能量闭合状况和所测湍流通量产生影响^[29]。本实验中,麦季和玉米季的 EBR 日均值与下垫面 u^* 之间具有显著的相关关系,与 Blanken 等^[12]的研究结果类似。 u^* 较小时,下垫面湍流交换较弱,湍流涡旋较大。在有限的观测时间(半小时)内,涡度相关仪的传感器难以捕捉足够的湍流能量,所测湍流通量偏低^[14],导致能量不闭合,在此情况下 EBR 对蒸散测定有显著影响。随着 u^* 增大,下垫面湍流交换逐渐加强。当 u^* 超过某一阈值时,湍流混合均匀,涡度相关观测的效果较好,能量闭合度也较高,EBR 对蒸散测定已无显著影响。本研究中麦季的 u^* 阈值高于玉米季。 u^* 阈值的大小与研究区的下垫面状况和气象条件有关。

3.4 蒸散比与 EBR 关系的其他可能影响因子

在平坦均一的农田,地形起伏的影响已被排除。在导致涡度相关能量不闭合的诸多因素中,对蒸散测定有影响的因素除 LAI 和湍流交换强度外,还有平流和高低频通量成分损失。采用涡度相关技术测量地表水、热通量时,理论上要求避免在水平和垂直方向上形成平流,但自然环境中,即便下垫面均匀且地势平坦(如农田),仍有可能发生平流现象。田间灌溉会产生绿洲效应,促进周围地表的感热向灌溉地块作平流运动。有研究表明,在小麦快速生长期,感热平流对月蒸散量的促进作用可占总蒸散量的 27%^[26]。平流对蒸散比与 EBR 关系的影响还有待进一步研究。对于高低频通量成分的损失,也可理解为涡度相关仪器本身的物理限制导致的不确定性。虽然目前已有一些途径来评价和校正这些存在信息损失的原始湍流通量,如 Massman^[30]提出的解析法,但这些方法仍存在一定缺陷。此外,由于农田植被较低,频率衰减往往不大,故频率衰减对农田蒸散比与 EBR 关系的影响不太大。如何对频率衰减造成的误差进行校正和评价,还有待进一步研究。

4 结论

在冬小麦/夏玉米轮作田, 涡度相关观测的白天能量平衡比率(EBR) 呈秋冬高、春夏低的变化特征, 麦季日均 EBR 范围在 0.26—2.84 之间, 平均 1.15; 玉米季日均 EBR 范围在 0.19—2.59 之间, 平均 0.78。无论麦季或玉米季, 涡度相关法测定的平均蒸散量(ET_{ec}) 均明显低于蒸渗仪法观测值(ET_L), 但两者显著相关($P < 0.01$), 并有相似的季节变化。涡度相关法和蒸渗仪法测定的蒸散量之比(ET_{ec}/ET_L) 麦季平均为 0.61, 玉米季平均为 0.50。

在冬小麦田和夏玉米田 ET_{ec}/ET_L 均与 EBR 显著相关($P < 0.01$)。麦田种植密度大, 下垫面较均匀, 蒸散比与 EBR 成正比, 且不受 LAI 大小影响; 反之, 玉米田种植密度小, 只有当 $LAI > 1$, 下垫面变得较均匀后, 蒸散比与 EBR 的关系才变得显著($P < 0.01$)。风速小时 ET_{ec}/ET_L 与 EBR 显著相关, 风速增加时两者相关性减弱。尤其在玉米田, 当摩擦风速(u^*) 大于 0.3 m/s 时, ET_{ec}/ET_L 与 EBR 的相关性不再显著。风速小时, 大气湍流微弱, 湍流涡旋较大。在有限的观测时段(半小时)内, 涡度相关仪的传感器难以捕捉足够的湍流能量, 所测湍流能量偏低, 导致能量不闭合。以上结果为应用能量平衡比率校正涡度相关法所测农田蒸散提供了可能途径。

References:

- [1] Xie X Q. Experimental study for determining evapotranspiration of the field. *Geographical Research*, 1990, 9(4): 94–103.
- [2] Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(2/3): 125–153.
- [3] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X H, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw U K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415–2434.
- [4] Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law B E, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223–243.
- [5] Li Z Q, Yu G R, Wen X F, Zhang L M, Ren C Y, Fu Y L. Energy balance closure at ChinaFLUX sites. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(Suppl): 51–62.
- [6] Wang C L, Zhou G Y, Wang X, Zhou C Y, Yu G R. Energy balance analysis of the coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Dinghushan. *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, 23(6): 643–651.
- [7] Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, Paw U K T, Falge E. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96(1/2): 257–291.
- [8] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37(1/2): 17–35.
- [9] Paw U K T, Baldocchi D D, Meyers T P, Wilson K B. Correction of eddy covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97(3): 487–511.
- [10] Belcher S E, Finnigan J J, Harman I N. Flows through forest canopies in complex terrain. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1436–1453.
- [11] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, Rannik Ü, Moncrieff J, Foken T, Kowalski A S, Martin P H, Berbigier P, Bernhofer C, Clement R, Elbers J, Granier A, Grünwald T, Morgenstern K, Pilegaard K, Rebmann C, Snijders W, Valentini R, Vesala T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 113–175.
- [12] Blanken P D, Black T A, Yang P C, Neumann H H, Ncsic Z, Staebler R, den Hartog G, Novak M D, Lee X. Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: Partitioning overstory and understory components. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 28915–28927.
- [13] Meyers T P, Hollinger S E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(1/2): 105–115.
- [14] Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, Leuning R, Cleugh H A. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: Averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107(1): 1–48.
- [15] Steinfeld G, Letzel M O, Raasch S, Kanda M, Inagaki A. Inagaki Spatial representativeness of single tower measurements and the imbalance

- problem with eddy covariance fluxes: Results of a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 77-98.
- [16] Mauder M, Desjardins R L, Patti E, Gao Z, Haarlem V R. Measurement of the sensible eddy heat flux based on spatial averaging of continuous ground-based observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 128(1): 151-172.
- [17] Wang J M, Wang W Z, Liu S M, Ma M G, Li X. The problems of surface energy balance closure: an overview and case study. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 705-713.
- [18] Guo J X, Bian L G, Dai Y J. Multiple time scale evaluation of the energy balance during the maize growing season, and a new reason for energy imbalance. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(1): 108-117.
- [19] Sauer T J, Hatfield J L, Prueger J H, Norman J M. Surface energy balance of a corn residue-covered field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89(3/4): 155-168.
- [20] Webb E K, Pearman G, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [21] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [22] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [23] Li Y J, Xu Z Z, Wang Y L, Zhou L, Zhou G S. Latent and sensible heat fluxes and energy balance in a maize agroecosystem. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1132-1144.
- [24] Tong Y X, Tian H. Analysis of energy balance closure of Shouxian wheat field. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(18): 384-387.
- [25] Tian H, Wu Q, Tong Y X. Evaluation on energy balance of farmland in Shouxian County of Anhui Province. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(3): 356-361.
- [26] Lei H, Yang D. Interannual and seasonal variability in evapotranspiration and energy partitioning over an irrigated cropland in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 581-589.
- [27] Ding R S, Kang S Z, Li F S, Zhang Y Q, Tong L, Sun Q Y. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 87-95.
- [28] Qi P T, Gu S, Tang Y H, Du M Y, Wu L B, Zhao L. Comparison of three methods for measurement of evapotranspiration in an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 202-211.
- [29] Li S E, Kang S Z, Zhang L, Li F S, Zhu Z L, Zhang B Z. A comparison of three methods for determining vineyard evapotranspiration in the arid desert regions of northwest China. *Hydrological Processes*, 2008, 22(23): 4554-4564.
- [30] Massman W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104(3): 185-198.

参考文献:

- [1] 谢贤群. 测定农田蒸发的试验研究. *地理研究*, 1990, 9(4): 94-103.
- [6] 王春林, 周国逸, 王旭, 周传艳, 于贵瑞. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析. *热带气象学报*, 2007, 23(6): 643-651.
- [17] 王介民, 王维真, 刘绍民, 马明国, 李新. 近地层能量平衡闭合问题: 综述及个例分析. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 705-713.
- [23] 李祎君, 许振柱, 王云龙, 周莉, 周广胜. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1132-1144.
- [24] 童应祥, 田红. 寿县地区麦田能量平衡闭合状况. *中国农学通报*, 2009, 25(18): 384-387.
- [25] 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.
- [28] 戚培同, 古松, 唐艳鸿, 杜明远, 吴力博, 赵亮. 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较. *生态学报*, 2008, 28(1): 202-211.