玉米农田水热通量动态与能量闭合分析

李 君^{1 2} 许振柱¹ 王云龙¹ 周 莉¹ 周广胜^{1 *}

(1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室 北京 100093)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 基于锦州农田生态系统野外观测站玉米农田涡度相关系统近 2 年的水热通量观测数据,分析了玉米农田水热通量的日际、年际变化特征及其能量平衡状况。结果表明:1)玉米农田水热通量日变化与年变化均呈单峰型二次曲线,峰值出现在 12:00 ~ 13:00 左右,与净辐射的日变化、年变化同步,潜热通量最大可达到 $655 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (出现在 2004 年 7 月 8 日 13:00),显热通量最大值大约为 $369 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (出现在 2004 年 5 月 31 日 13:00)。2)玉米农田水热通量强度与局地的环境条件密切相关:显热通量与大气压的年变化呈负相关,潜热通量与气温年变化呈正相关。水热通量受降水的影响较大,对降水的反应较敏感。其中,潜热通量(LE)不仅与降水的强度有关,而且随着降水的季节分布的不同而出现不同的响应,即使同样量级的降水在夜间与白天对 LE 的影响也是不同的。3)玉米农田通量观测呈现能量不闭合现象,主要原因可能是未包含 0 ~ 5 cm 土壤热储量与冠层热储量,造成大约 15.5% 的能量损失。

关键词 玉米农田 潜热通量 显热通量 日变化 年变化

LATENT AND SENSIBLE HEAT FLUXES AND ENERGY BALANCE IN A MAIZE AGROECOSYSTEM

LI Yi-Jun^{1 2}, XU Zhen-Zhu¹, WANG Yun-Long¹, ZHOU Li¹, and ZHOU Guang-Sheng^{1 *}

¹Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China, and

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract *Aims* Agroecosystems are influenced strongly by human activity and climate change. In order to scientifically manage agroecosystems under climate change, it is important to understand water exchange and energy transfer between agroecosystems and the atmosphere. We analyze latent and sensible heat fluxes of a maize agroecosystem as a case study.

Methods Latent and sensible heat fluxes were measured in a maize agroecosystem using a 3.5 m eddy covariance tower from June 2004 to December 2005 at the Jinzhou maize agricultural ecosystem field observation station (Liaoning Province, China). Meteorological factors were recorded using sensors at 2.3 and 4.1 m using a micrometeorological tower.

Important findings Diurnal and annual variations of latent heat fluxes and sensible heat fluxes had the same characteristics as net radiation and could be expressed as hyperbola curves. Their peak values appeared at 12:00 – 13:00. The maximum latent heat flux was about $655 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (at 13:00 July 8, 2004), and the maximum sensible heat flux was $369 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (at 13:00 May 31, 2004). The intensities of latent heat fluxes and sensible heat fluxes had close relationships with environmental factors. Latent heat flux was negatively correlated with atmospheric pressure, and sensible heat flux was positively correlated with air temperature. Fluxes of latent and sensible heat were very sensitive to precipitation. Latent heat flux was greatly affected by the intensity and timing of precipitation, regardless of seasonal and daily changes. Energy of the maize agroecosystem was unbalanced with the loss of about 15.5%, possibly because of lack of knowledge of 0 – 5 cm soil heat reserve and canopy heat reserve. The energy balance had obvious differences between cloudy and rainy days, with the loss of energy much less on rainy than cloudy days, especially with a surplus of energy on rainy days in August.

Key words maize farmland, latent flux, sensible heat flux, diurnal variation, annual variation

收稿日期:2006-11-01 接受日期:2007-02-05

基金项目:中国气象局科技项目“我国中高纬地区典型下垫面陆-气通量观测系统建设”、“东北地区干旱化和生态系统相互作用的观测与模拟”和国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB400502)资助

感谢锦州生态气象实验站史奎桥、刘景利、高伟、杨扬和梁涛等同志对观测实验的大力配合与协助

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

地表的水热通量作为下垫面热量平衡方程的主要分量,不仅是气象学、边界层气象学和大气物理学的研究重点,而且越来越受到生态学和植物生理学以及水文学界的关注。清楚地认识水汽和能量在边界层内的输送过程,对于理解区域气候及水分循环是极为重要的。农田生态系统 CO_2 和水热通量的长期观测研究一直是国际上关注的热点问题,也是气候变化和区域可持续发展研究的核心之一。农田蒸散是发生在土壤-植被-大气系统的连续过程,与植物生理过程、生态过程和气候特征密切相关,是了解植物光合作用和水分利用效率的关键(郭家选等, 2003)。到目前为止,计算观测水热通量的方法很多,既有单点观测又有区域甚至全球模拟模型,如波文比能量平衡法、梯度法和涡度相关法等。涡度相关技术是对大气与森林、草地或农田间进行非破坏性的 CO_2 、 H_2O 和热量通量测定的一种微气象技术。经过长期的理论发展和技术进步,近年来,涡度相关技术已经成为直接测定陆地生态系统与大气间 CO_2 和水热通量的重要方法,由于它对生态系统的扰动小,且具有全天候自动采集数据的强大功能,已经成为国际上公认的通量观测方法。

涡度相关法始于 20 世纪 50 年代初期,是 Swinbank(1951)于 1951 年提出并进行验证的。20 世纪 70 年代末以来,涡度相关法取得了快速发展(Webb *et al.*, 1980),80 年代初期涡度相关法首次用于植被-大气间的 CO_2 通量测定(Valentini *et al.*, 1996),90 年代,涡度相关法进入了长期观测阶段,并首次以涡度相关系统观测数据开展非均匀下垫面(真实地形)陆地生态系统与大气间的通量交换研究(Lee & Hu, 2002)。据不完全统计,目前建成并已投入使用的长期通量观测点已达 400 多个,主要分布在欧洲、美国和日本。其中,美洲及欧洲的通量连续观测已经超过 5 年,一些地面观测站已经连续观测 10 年以上。国内从 20 世纪 90 年代起应用涡度相关法计算水热通量,虽然起步较晚,但已有一定的试验和知识储备。王介民等(1990)、祁永强等(1996)、刘辉志和洪钟祥(2000)、李家伦等(2000)、马耀明等(2000)曾应用涡度相关法观测资料分析了水热通量特征(沈艳等, 2005)。但是,利用涡度相关法进行长期定位连续观测则主要始于 2002 年(张永强等, 2002;朱治林等, 2001, 2003;王靖等, 2003;秦钟等, 2004)。

本研究试图基于 2004 年 5 月以来的锦州玉米农田生态系统涡度相关系统定位连续观测资料,研究玉米农田水热通量的动态特征,分析影响玉米农

田生态系统水热通量的主导影响因子及其能量平衡特征,以增进对研究玉米农田生态系统各种生理生态过程、水分利用效率等的理解,为建立玉米农田生态系统过程模型提供参数。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于辽宁省锦州市中国气象局沈阳大气环境研究所锦州农田生态系统野外观测站($121^\circ 12' \text{E}$, $41^\circ 49' \text{N}$, 海拔 17.0 m)。该地区属温带季风型大陆性气候,四季分明,常年温差较大,最高气温 35°C ,最低气温 -29.9°C ,全年平均气温 $7.8 \sim 11.0^\circ \text{C}$,年平均降水量为 550 ~ 630 mm,年蒸发量 1 000 ~ 1 186 mm。无霜期约 180 d,主要农作物为玉米。

涡度相关系统安装在玉米农田观测场内,围栏面积为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 。样地内以及周围地势平坦开阔,无任何高大建筑物遮蔽,生长季种植作物均为玉米,因而构成了大范围均一的下垫面,满足了试验要求盛行风向的风浪区长度。在非生长季农田下垫面无作物,地表为裸土覆盖,生长季主要作物为玉米,最高可达 3 m 左右。涡度相关仪安装于距地 3.5 m 处,不再随作物生长调节安装高度。自 2004 年 6 月开始自动观测至今。

1.2 涡度相关通量观测与数据处理

通量数据采集使用开路涡度相关通量观测系统。该系统由 CR5000 数据采集器、CSAT3 超声风速仪(Campbell 公司)、Li-7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪(Li-Cor 公司)和 1 个 1G 的 PC 卡组成。CR5000 数据采集器主要是控制测量、运算及数据存储;CSAT3 超声风速仪用以测量三维风速和超声虚温;Li-7500 测量 CO_2 绝对密度、 H_2O 绝对密度和大气压力。整个系统安装于距地面 3.5 m 高度处。仪器采样频率为 10 Hz,由数据采集器自动存储 10 Hz 原始数据。CR5000 数据采集器有 2M 内存,可以保存一段时间的观测数据。系统工作时由涡度相关原理计算在线通量,并存储 30 min 的 CO_2 通量(F_c)、潜热通量(LE)与显热通量(H_s)和时间系列数据,系统同时对在线通量自动进行虚温订正与空气密度变化订正。

观测数据由于受到天气因素、地形条件以及仪器的物理限制等影响,需要先进行数据质量分析与控制,才能用于研究分析。数据质量控制以涡度相关法通量观测原理以及涡度相关仪器本身局限性为依据,对 30 min 数据进行剔除。参照通量资料剔除

的普适标准(郭家选等 2004),具体剔除标准为:

- 1)异常数据:当某一时刻通量观测数据与前5个时刻通量观测数据平均值差的绝对值大于5个观测时刻通量观测数据方差的5倍时,视为异常值;
- 2)降水影响:由于降水影响,使得潜热通量在正午出现负值等;
- 3)超过合理范围:查阅相关文献玉米农田夜间凝结放热最大量值一般不会超过 $100 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$,夜间数据低于 $-100 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ 予以剔除。

经资料剔除处理后的数据约占 30 min 通量数据的 83%。

对由于降水、断电等因素造成的数据缺失以及剔除异常数据之后的数据序列,采用不同的方法进行插补,形成完整的 30 min 通量序列。具体方法如下:

- 1)小于 2 h 的数据缺失,采用线性内插的方法予以插补;
- 2)大于 2 h 的数据,分为生长季与非生长季,分别与环境因子建立关系进行插补。

1.3 常规气象数据

观测样地同时安装有小气候梯度仪,观测高度分别为 2.4 m 和 4.1 m。梯度仪由 1 台 CR23X 数据采集器、1 个 AM16/32 扩展板、2 个 HMP45C 温度/相对湿度传感器、1 个 014A 风速传感器、1 个 034B 风速/风向传感器、1 个 CNR1 净辐射仪、1 个 LI190SB 光子传感器、6 个 107 热敏电阻温度探头、1 个 TCAV 平均温度传感器、1 个 CS616 土壤水反射计、2 个 HFP01 热通量板及支持部分等(SM4M 存储模块、SC532A 通讯模块、电池及充电控制器、MSX20 太阳能板、ENC16/18 机箱)组成。另外,还配备有 52203

雨量筒和 EasyAG 土壤水分传感器各 1 个。本研究主要使用小气候梯度仪观测的净辐射、土壤热通量以及温湿度数据。梯度仪是每 30 min 输出一组平均值,并相应输出各种观测变量的日平均值。

2 结果与分析

2.1 玉米农田水热通量动态

2.1.1 水热通量日变化

玉米农田 LE 日动态表现为单峰型二次曲线(图 1),早晚较小且接近于 0,中午较大,存在日最大值。最大值一般出现在正午 12:00~13:00 左右,最大可达到 $655 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ (出现在 2004 年 7 月 8 日 13:00)。夜晚 LE 变化较小,当夜晚气温较低时,水汽凝结, LE 会出现负值。 H_s 的日变化特征与 LE 相似,最大值大约为 $369 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ (出现在 2004 年 5 月 31 日 13:00),比 LE 的最大值小将近一倍。

2.1.2 水热通量年变化

LE 的年动态与日动态相类似,也是呈单峰型二次曲线。 LE 的年最大值出现在当地最热的 7 月份,最小值出现在当地最冷的 1 月份。 H_s 的日最大值出现在 3 月份,最小值出现在 7 月份。 H_s 动态特征与净辐射、 LE 的年动态、月平均日变化特征的差异可能与降水的影响有关。

除了 4 月份 LE 有较大波动外,其它各月,特别是 1 月、2 月与 12 月的 LE 曲线均较为平缓,说明冬季 LE 各日间的变化很小。这是因为冬季玉米农田的 LE 主要来自土壤蒸发,而影响土壤蒸发量的气象因子较为单一,且气温较低,土壤蒸发量本身就小,波动幅度也就不会很大。同时,1 月、2 月和 12 月的降水量相对较少,且是以固体形态(雪)降落地

图 1 水热通量日动态特征(LE 2005-01-11; H_s 2004-05-26)
Fig.1 Diurnal variations of water vapor and heat fluxes (LE 2005-01-11; H_s 2004-05-26)
 LE : Latent heat flux H_s : Sensible heat flux

图2 水热通量年动态特征(2005 年)
Fig.2 Annual variations of water vapor and heat fluxes in 2005

图3 2005 年各月水热通量日动态特征
Fig.3 Diurnal variations of water vapor and heat fluxes every month in 2005

面 相对降雨而言 ,降雪融化需要时间 ,也有一定的温度要求 ,对土壤蒸发量的影响也就相应减小 ,因而也导致 LE 各日的差异较小。由于受到降水的影响 ,玉米农田 LE 波动较大 ,将在后文中分析。

2.2 玉米农田水热通量与环境因子关系分析

2.2.1 常规气象变量

通常 ,水热通量受到大气压、空气温度和饱和水汽压差的影响。大气压与 LE 的变化相反(图 4),夏季气压低 ,冬季气压高。空气温度的年变化与 LE 的变化较一致。1 月份为全年最冷月 ,7 月份为全年最热月 ,全年的极端最低气温与最高气温也是分别在这两个月出现。饱和水汽压差 (VPD) 的变化没有

大气压与空气温度变化有规律 ,但总体而言 , VPD 与 LE 的年变化规律较一致 ,夏季值大 ,冬季值小 ,存在明显的干湿分布。

不同年份间水热通量的日变化、年变化特征是相似的 ,但是也存在一些差异。2004 年的水热通量不论是最大值还是总量都要比 2005 年的大。从温度来看 ,除 2005 年 2 月份偏冷外 ,其它各月基本相似 ,2004 年平均温度高于 2005 年(表 1,图 5)。2004 年的年降水量为 734.5 mm ,比 2005 年的年降水量多 78.5 mm。从降水的分布来看 ,6、7 和 8 月是降水较多的 3 个月(图 5)。2005 年和 2004 年相比 ,降水分布更为集中 ,6、7 和 8 月 3 个月的降水总量占

图 4 2005 年大气压强 (P)、空气温度 (T) 和饱和水汽压差 (VPD) 的季节变化特征
Fig. 4 Meteorological variables atmospheric pressure (P), air temperature (T) and relative moisture (VPD) in 2005

表 1 年最大降水量与日照时数
Table 1 Annual maximal precipitation and sunlight (T means air temperature)

年份 Year	月平均最高气温 Max- T	月平均最低气温 Mean- T	年平均温度 Annual T	降水量 Rainfall (mm)	日照时数 Sunlight (h)	生长季降水比例 Ratio of precipitation
2004	24.4℃	- 6.5℃	10.9℃	734.5	2607.7	84.6%
2005	25.3℃	- 7.7℃	9.9℃	656	2482.2	90.2%

全年降水量的 82.4% ,而 11 和 12 月降水量均为 0 ,说明 2005 年冬季十分干燥。从日照时数看(图 5) ,作物生长季(生长季定义为 5~9 月)由于降水增多 ,降水天气一般云量较多 ,日照时数反而出现下降 ,特别是降水量最多的 7 月份 ,日照时数是全年各月日照时数中最少的。2004 年与 2005 年的日照变化特征基本一致 ,但 2004 年大部分月份的日照时数均长于 2005 年。总的来说 ,2004 年的水热状况较 2005 年为好 ,从而使得 2004 年的水热通量大于 2005 年。

2.2.2 土壤水分

土壤蒸发在 LE 中占有很重要的份额 ,特别是在农田休闲期 ,几乎全部的 LE 都由土壤蒸发贡献 (邱国玉等 ,2006) 。2005 年 5 月底开始增加了雨量与土壤水分的观测。基于 2005 年 5 月 31 日~2005 年 12 月 31 日的观测资料分析表明 ,4 层土壤水分 (0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm)变化趋势基本一致 (图 6) ,变化较为平缓。20~30 cm 土壤水分含量最高 ,0~10 cm 土壤水分含量最低 ,0~10 cm 土壤层水分含量对地表影响的反应较其它 3 层敏感 ,因而波动亦较大。4 层土壤水分都有一个极为明显的拐点 ,表现为土壤水分的突然快速下降。但是 ,各深度的土壤水分突变并不是同时发生的 ,而是随着土壤深度的增加 ,出现时间是依次延后的。0~10、

10~20、20~30 和 30~40 cm 土壤水分拐点分别出现在 11 月底、12 月 1 日左右、12 月 5 日左右及 12 月 15 日左右。进入 11 月后 ,将近 2 个多月没有降水 ,土壤水分亏缺 ,各深度土壤水分含量下降。土壤水分含量对外界水分补给以及自身水分亏缺的响应都随着深度的增加有一定时间滞后。

对于雨养农业 ,降水的多寡是土壤水分变化的主要原因。土壤水分对降水的反应很敏感。5 月 31 日至次日凌晨 ,发生一次连续降水过程 ,降水总量为 47.4 mm。土壤水分出现一增长峰 (图 6) 。在降水初期 ,10 cm 深度土壤含水量开始微弱上升 ,而其它深度的土壤含水量变化不明显 ,随着降水的连续增加 ,10 cm 深度土壤最先表现出一个增加的趋势 ,其它深度土壤水分含量亦随着降水量的增加而增加 ,增加幅度、响应时间随着土壤深度的增加而递减 (图 7a) 。图 7b 是 30 min 内出现最大降水量时 ,土壤水分含量的变化情况。当降水量达到 30 min 最大之后 ,各层土壤水分含量随之增加 ,10 和 20 cm 土壤相对含水量在 1 h 后达到最大值。而当降水逐渐减少时 ,10 cm 土壤相对含水量很快就开始下降 ,20 cm 土壤相对含水量也开始下降 ,但是下降幅度要比 10 cm 小 ,而 40 cm 土壤相对含水量仍处于一个稳中有升的增加过程。土壤深度较浅的 10 cm 土壤相对含

水量在降水后的下降,是由于表层土壤的蒸发失水造成的。也就是说在降水后,由于降水使得土壤相对含水量增加,土壤蒸发部分也会相应增加,这也是降水后 LE 增加的主要原因。

2.2.3 降水量

一般较大的降雨过程都会造成数据的异常,而且数据缺失大部分也是降水引起的。从 2004~2005 年两年年降水量差异来看,降水量较多的年份, LE 亦随之增大。2004 年的降水分布没有 2005 年分布

集中,日降水量的最大值为 98.8 mm,比 2005 年的 62.4 mm 多 36.6 mm。在降水相对集中连续的 2005 年 8 月, LE 没有随着降水量的增加而增加,反而明显减少,在曲线上出现一段下凹(图 8 中椭圆圈定区域)。2004 年此时段降水量相对较少,也没出现较长时间的连续降水,即未受到因连阴雨寡日照带来的蒸发抑制,因而 2004 年 8 月的 LE 值高于 2005 年。由此可见,夏季随着气温升高、降水增多, LE 有一段时间是逐渐增大的,但是随着降水的连续发生,

图 5 2004 年与 2005 年气温、降水和日照
Fig.5 Air temperature, precipitation and sunlight in 2004 and 2005

图 6 不同深度土壤水分含量的季节变化特征
Fig.6 Seasonal variations of different depths of soil moisture
图中横坐标为 30 min 间隔的时间坐标系 Abscissa is 30 min's temporal series

图 7 不同深度土壤水分含量对降水的响应

Fig.7 Relationship between precipitation and different depths of soil moisture

a : 5月31日 3:30~6月1日 4:30 3:30 (May 31)~4:30 (June 1) b : 7月9日 1:30~7:00 1:30~7:00 (July 9)

图 8 2004 年与 2005 年潜热通量 LE 和降水的日变化特征

Fig.8 Relationship between latent heat fluxes LE and precipitation in 2004 and 2005

特别是长时间的连阴雨,则会抑制 LE 的增加,使其不增反减。在冬季,一般不会出现连续长时间的降水过程,因而冬季只要有降水, LE 就会相应出现一个小峰值(图 8 中矩形圈定区域),在夏季这种情况并不是这么明显。对于 H_s ,从其月平均日变化(图 3)看,随着夏季雨季的到来, H_s 明显减少,与 LE 的变化趋势正好相反。在月降水量最大的 7 月份, H_s 白天的值是全年中最小的。从 H_s 年变化上看,7 月和 8 月 H_s 随着降水的增加而减少(图 9)。因此,水热通量随降水季节分布的不同而变化。

LE 随着降水的发生,起初是逐渐增大的,但是随着降水的不断连续,反而出现下降(图 10a)。降水后或者降水间歇 LE 值会有增加,白天增幅大于夜间增幅,但是降水过程中 LE 未必都是增大的趋势。只要白天有降水发生, H_s 值就会减少,支克广等(2002)研究盐碱地显热通量时也得出类似的规律。降水量越大、连续时间越长, H_s 减少越多,而降水间歇或者降水后又有所上升。当正午出现降水时, H_s 显然要比无降水正午的值小得多;当夜间或是凌晨出现降水时, H_s 的值反而要比无降水时的值

图 9 2004 年与 2005 年显热通量与降水的日变化特征
Fig.9 Relationship between sensible heat fluxes H_s and precipitation in 2004 and 2005

大,这可能与夜间或者凌晨降水时,云层较厚,对地面的保温效应引起的(图 10b)。LE 与 H_s 对降水的响应如图 10c。

2.3 能量平衡

根据能量守恒与转换定律,地表能量平衡方程为：

$$R_n = LE + H_s + G + \Delta S$$

式中, R_n 为地表净辐射通量。通常当地面获得能量时, R_n 取正号,而当能量由地面放出时, R_n 取负号。LE 为潜热通量,指下垫面与大气间水分交换,包括土壤蒸发或植被蒸腾、蒸发的能量也称为蒸散。 H_s 为显热通量,表征下垫面与大气间通过湍流形式的热交换。 G 为土壤热通量,指下垫面土壤内部的热交换。 ΔS 为下垫面热能储存,指大气层内植物或障碍物储存的热通量,这部分能量很小,也较难测量,常忽略不计。

2.3.1 净辐射 R_n

净辐射 R_n 是 LE 的主要驱动能源,其值的大小以及变化直接决定着 LE 的大小与变化趋势。晴朗无云的天气条件下,净辐射日变化呈一条十分规则平滑的二次曲线(图 11)。净辐射 R_n 的最大值出现在 7 月份,为 $844 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (2004 年 7 月 8 日 12:00),最大值出现的时间段是 12:00 ~ 13:00,与 LE 以及 H_s 一致。

2.3.2 土壤热通量 G

土壤热通量 G ,与能量平衡方程中的其它几个能量项比较而言值很小,而且就一个长的时间段来看(1 年)基本上是收支平衡的。因而在农田 LE 的

计算方法研究中,许多方法都是将土壤热通量项忽略不计的,采用简化的能量平衡计算公式反推 LE。土壤热通量数据来自埋置于大约 5 cm 处的 2 块热通量板,对于 0 ~ 5 cm 这段土层厚度的土壤热储量并未计算在内,所得的观测值要比实际值偏小,这也是造成能量方程不闭合的一个主要原因。

土壤储存能量来源于太阳,因此 G 的动态变化(图 12)与净辐射的相似,但在时间上有一定的滞后,一般最大值出现在 13:00 ~ 15:00,最大可达到 $131.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (2005 年 6 月)。土壤热通量与土壤含水量在整个研究时段(2005 年 5 月 29 日 ~ 12 月 31 日)的变化都比较平缓(图 13)。在土壤含水量突然快速下降的时段,土壤热通量也出现了一个低值区(图 13 中矩形圈定区域),与深度较浅的土壤水分下降同步发生。当土壤含水量停止快速下降,并表现出平缓变化时,土壤热通量有所增加,但是比土壤水分含量下降前的值要小。土壤热通量对土壤含水量快速的较大的波动有明显的响应,但是对于较小的波动,基本上没有较明显的变化。因此,土壤水分的较大变化对农田能量平衡的影响也是不可忽视的。

H_s 、LE 与 G 和 R_n 都是单峰型二次曲线(图 14)。各通量项日最大值都是出现在 12:00 ~ 13:00。 G 相对于净辐射有时间滞后,其最大值出现在 15:00 左右。1、2 和 3 月 H_s 大于 LE,3 月 H_s 达到一年中月平均的最大值,正午时段 LE 与 H_s 之差达到约 $140 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从 4 月开始 H_s 与 LE 数值几乎没什么大的差异,之后 H_s 逐渐降低而 LE 逐渐增大。7 月

图 10 水热通量与降水关系

Fig. 10 Relationship between latent and sensible heat fluxes and precipitation

a : 2005-09-15 ~ 2005-09-16 b : 2005-06-15 c : 2005-06-17

LE 和净辐射 R_n 都达到了一年中月平均的最大值,此时正午时刻 LE 与 H_s 的差异达到了 $200\text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从 7 月之后, LE 逐渐减少而 H_s 逐渐增大,与上半年的变化趋势正好相反,一直到 11 月份之后 H_s 大于 LE ,如此周而复始。

2.3.3 能量平衡

利用涡度相关仪系统测定的 LE 和 H_s 结合 R_n 和 G 进行玉米农田生态系统能量平衡闭合分析。结果表明, $LE + H_s$ 小于 $R_n - G$,表明涡度相关技术测定的 LE 与 H_s 之和小于可供能量, $(LE + H_s)$ 占可供能量 $(R_n - G)$ 的比值平均为 84.5%,存在明显的能量不闭合现象(图 15)。不同月的能量闭合情况也不尽相同(表 2),11 和 12 月能量闭合情况较差。分析阴雨天的能量闭合情况,分两种情况讨论:一种是雨天但仍有日照,另一种日照为 0。分别计算后发现,日照时数为 0 的阴雨天能量闭合要比晴天的闭合情况要好,2005 年 6 月所有日照时数为 0 阴雨天能量闭合竟达到 99.8%,其它各月日照时数为 0 的阴雨天能量闭合也在 90% 左右。而雨天仍有日照的情况能量闭合相对较差,没有晴天的闭合好。又发现 8 月日照时数为 0 时, LE 与 H_s 之和大于可供能量,2004 年与 2005 年均是如此。

造成能量不闭合的原因可能有:1)土壤热通量板被埋放在地下 5 cm 处,测量的是 5 cm 以下深度的土壤热通量,忽略了埋放深度以上 0~5 cm 的土壤热能储存;2)在能量平衡方程中还有下垫面热能储存 ΔS 项, ΔS 很小且较难测量,常忽略不计,即忽略了下垫面植被的热量变化和光合作用所消耗的能量。在农田休闲期无作物生长,能量平衡方程中的冠层热储量项即为 0。经分析发现,作物生长期与休闲期,能量闭合情况几乎没有差异,并没有因为冠层热储量为 0,能量闭合有所改善;3)涡度相关系统测量的水热通量理论上要求下垫面均匀且地势平坦,以避免在水平和垂直方向上形成平流,然而在自然环境中这种理想状况几乎不存在,即忽略了平流的影响。为了说明平流对能量平衡闭合性的影响程度,本文分析了能量平衡闭合程度与风向变化之间的关系,发现二者之间不相关说明本研究在风浪区内不存在平流现象,但引起能量不平衡的原因还有多个方面。例如,能量平衡各分量测定时由于仪器造成的误差,各分量测定方法所代表的空间尺度不同以及其它气象因素,例如风速较低等原因。

尽管涡度相关技术测定水热通量的精度高,但很多研究发现,涡度相关技术测定的 LE 和 H_s 都有

图 11 净辐射 R_n 的日、年变化特征(2004-05-24 ; 2005)
Fig.11 Diurnal and annual variations of solar net radiation (2004-05-24 ; 2005)

图 12 土壤热通量动态(2004-05-28 ; 2005)
Fig.12 Diurnal and annual variations of soil heat flux (2004-05-28 ; 2005)

图 13 土壤热通量与土壤相对含水量
Fig.13 Relationship between soil heat flux and soil moisture

图 14 各月能量平衡方程中各项的日变化
Fig. 14 Diurnal variation of energy balance
a: 2005 年 3 月 March 2005 b: 2005 年 4 月 April 2005 c: 2005 年 7 月 July 2005 d: 2005 年 10 月 October 2005

图 15 2005 年玉米农田能量闭合情况以及各分量的季节动态
Fig. 15 Energy balance and seasonal variation of different energy variables in 2005
 R_n : Net radiation G : Soil heat flux

表 2 各月能量闭合情况
Table 2 Energy balance for every month

年份 Year	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.
2004						77.9%
2005	82.2%	85.2%	82.0%	76.2%	98.8%	85.5%
年份 Year	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sept.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.
2004	82.2%	75.7%	85.1%	83.2%	59.8%	63.4%
2005	74.5%	85.9%	89.1%	88.4%	66.2%	75.9%

不同程度的低估,能量平衡闭合程度在 60% ~ 90%。Wilson 等(2002)对全球通量网 50 站的观测数据分析表明,各观测站普遍存在着 10% ~ 30% 的能量不闭合现象。研究得出玉米农田的 LE 和 H_s 之和占可供能量的 84.5% ,而在农田生态系统测定的最低能量平衡闭合程度为 47.13%(张永强等, 2002)。说明涡度相关系统测的数据是合理有效的。Morr(1986)和 Villalobos(1997)认为,水汽传感器与超声风速仪的分离是造成涡度相关技术测定的 LE 和 H_s 之和低的主要原因,但 Sauer 等(1998)认为,涡度相关系统测定玉米留茬农田的 LE 和 H_s 偏低,造成能量不平衡的原因是系统测量误差和玉米留茬后冻融交替及土壤表层对 LE 的影响。在农田能量平衡各分量观测过程中,从地表到冠层顶部空间范围内植被和空气总的能量存储部分(ΔS),包括冠层内空气水汽潜能、空气内能变化、植被茎叶储热以及光合作用能量消耗常不被观测。对于高秆植被(玉米)短时间,例如 30 min 的能量平衡分析时,这部分存储能量的忽略计算将造成近 10% 的误差(Oliphant *et al.*, 2004 ;郭家选等 2003)。地表土壤热通量应包括土壤热通量板测定值、地表与土壤热通量板之间土层热量存储率两部分,而对于后者能量观测的忽略同样可造成 2% ~ 5% 的误差(Blanken *et al.*, 1997)。Meyers 和 Hollingen(2004)计算玉米地的能量闭合情况表明,在未计算 ΔS 与热通量板之上的土壤热储量前,玉米地的能量闭合程度为 84% ,而加上这些热储量后,闭合程度提高到 94% 。

3 结 论

本研究基于 2004 年与 2005 年连续两年的涡度相关系统观测数据,分析了玉米农田水热通量的日变化、年变化特征以及其与环境因子之间的关系,并分析了玉米农田的能量闭合。结果表明,玉米农田水热通量年变化与日变化均呈现单峰型二次曲线,峰值出现在正午 12:00 ~ 13:00 左右,与净辐射的日变化、年变化同步,峰值出现时间也较一致。土壤热

通量的日、年变化也呈单峰型二次曲线,其数值较其它通量要小得多,且峰值出现时间有一定时间滞后,这与土壤本身的物理属性有关。研究也表明,玉米农田水热通量与局地的环境条件密切相关,与大气压的年变化相反,与气温年变化呈正相关。 LE 受降水的影响较大,对降水的反应较敏感。 LE 不仅与降水的强度有关,而且随着降水的季节分布的不同而出现不同的响应,即使同样量级的降水在夜间与白天对 LE 的影响也是不同的。

利用涡度相关系统观测的水热通量数据与小气候仪观测的净辐射、土壤热通量数据对玉米农田的能量平衡分析表明,玉米农田通量观测呈现能量平衡不闭合现象。但能量平衡闭合程度与风向的关系极不显著,说明能量平衡基本上不受平流影响。引起玉米农田能量不闭合现象的主要原因是由于未考虑 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引起的,大约造成 18% 的能量损失。

参 考 文 献

Blanken PD, Black TA, Yang PC (1997). Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: partitioning over story and understory components. *Journal of Geophysical Research*, 102(D24), 28915 – 28927.

Guo JX (郭家选), Mei XR (梅旭荣), Lin Q (林琪), Zhao QS (赵全胜), Lu ZG (卢志光) (2003). Diurnal variation of water and heat flux under transient water stress in a winter wheat field. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 26, 130 – 137. (in Chinese with English abstract)

Guo JX (郭家选), Mei XR (梅旭荣), Zhao QS (赵全胜), Lu ZG (卢志光) (2004). Field evapotranspiration measurement based on eddy covariance technology. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 37, 1172 – 1176. (in Chinese with English abstract)

Lee XH, Hu XZ (2002). Forest air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain. *Boundary Layer Meteorology*, 103, 277 – 301.

Liu HZ (刘辉志), Hong ZX (洪钟祥) (2000). Turbulent characteristics in the surface layer over Gerze area in the Tibetan

- plateau. *Scientia Atmospherica Sinica* (大气科学), 24, 289 – 299. (in Chinese with English abstract)
- Li JL (李家伦), Hong ZX (洪钟祥), Sun SF (孙菽芬) (2000). An observational experiment on the atmospheric boundary layer in Geize area of the Tibetan Plateau. *Scientia Atmospherica Sinica* (大气科学), 24, 301 – 312. (in Chinese with English abstract)
- Ma YM (马耀明), Osamu Tsukamoto (本修), Wu XM (吴晓鸣), Tamagawa I (玉川一郎), Wang JM (王介民), Ishikawa H (石川裕彦), Hu ZY (胡泽勇), Gao HC (高洪春) (2000). Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area. *Scientia Atmospherica Sinica* (大气科学), 24, 715 – 722. (in Chinese with English abstract)
- Meyers TP, Hollinger SE (2004). An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125, 105 – 115.
- Morre CJ (1986). Frequency response correction for eddy correlation systems. *Boundary Layer Meteorology*, 37, 17 – 35.
- Oliphant AJ, Grimmond CSB, Zutter HN (2004). Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 185 – 201.
- Qi YQ (祁永强), Wang JM (王介民), Jia L (贾立), Liu W (刘威), Ma YM (马晓明), Ren YX (任艳霞) (1996). A study of turbulent transfer characteristics in Wudaoling area of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (高原气象), 15, 172 – 177. (in Chinese with English abstract)
- Qin Z (秦钟), Yu Q (于强), Xu SH (许守华), Hu BM (胡秉民), Sun XM (孙晓敏), Liu EM (刘恩民), Wang JS (王吉顺), Yu GR (于贵瑞), Zhu ZL (朱治林) (2004). Simulation water and heat fluxes and WUE of characters from a farmland in the North China Plain. *Science in China Ser. D: Earth Sciences* (中国科学 D 辑: 地球科学), 34, 183 – 192.
- Qiu GY (邱国玉), Wang S (王帅), Wu X (吴晓) (2006). Three temperature model—a method to estimate evapotranspiration and evaluate environmental quality. *Journal of Plant Ecology* (Chinese Version) (formerly *Acta Phytocologica Sinica*) (植物生态学报), 30, 231 – 238. (in Chinese with English abstract)
- Swin bank WC (1951). The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddy in the lower atmosphere. *Meteorology*, 8, 135 – 145.
- Shen Y (沈艳), Liu YF (刘允芬), Wang Y (王艳) (2005). Advances in applying the eddy covariance technique to calculate heat, moisture and CO₂ flux. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (南京气象学报), 28, 559 – 566. (in Chinese with English abstract)
- Sauer TJ, Hatfield JL, Prueger JH (1998). Surface energy balance of a corn residue 2 covered field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89, 155 – 168.
- Valentini RP, de Angelis MG, Monaco R (1996). Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. *Globe Change Biology*, 2, 199 – 208.
- Villalobos FJ (1997). Correction of eddy covariance water vapor flux using additional measurement softtemperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88, 77 – 83.
- Wang JM (王介民), Liu XH (刘晓虎), Qi YQ (祁永强) (1990). A preliminary study of turbulence transfer characteristics in Gobi area with an eddy correlation technique. *Plateau Meteorology* (高原气象), 9, 120 – 129. (in Chinese with English abstract)
- Wang J (王靖), Li XG (李湘阁), Yu Q (于强), Liu EM (刘恩民) (2003). The relationship between relative evapotranspiration and leaf area index and surface soil water content in winter wheat field of North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国农业生态学报), 11 (2), 32 – 34. (in Chinese with English abstract)
- Webb EK, Pearman GI, Leuning R (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 106, 85 – 106.
- Wilson K, Goldstein A, Falge E (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223 – 243.
- Zhang YQ (张永强), Shen YJ (沈彦俊), Liu CM (刘昌明), Yu Q (于强), Sun HY (孙宏勇), Jia JS (贾金生), Tang CY (唐常源), Kondoh A (2002). Measurement and analysis of water, heat and CO₂ flux from a farmland in the North China Plain. *Acta Geographical Sinica* (地理学报), 57, 333 – 342. (in Chinese with English abstract)
- Zhi KG (支克广), Tu G (涂钢), Lian Y (廉毅), Sui CY (隋朝阳) (2002). Measuring sensible heat fluxes over saline-alkali land area in Qianan. *Acta Metecologica Sinica* (气象学报), 60, 780 – 785. (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZL (朱治林), Sun XM (孙晓敏), Zhang RH (张仁华) (2001). The observation and analysis of sensible and latent heat fluxes of typical surface in Huaihe River Basin. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境), 6, 214 – 220. (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZL (朱治林), Sun XM (孙晓敏), Zhang RH (张仁华) (2003). Statistical analysis and comparative study of energy balance components estimated using micrometeorological techniques during HUBEX/IOP 1998/99. *Advances in Atmospheric Sciences* (大气科学), 20, 285 – 291. (in Chinese with English abstract)