

黄土塬区麦田能量平衡特征

苑旭¹, 朱元骏^{1,2}, 刘文兆^{1,2}, 韩晓阳²

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以黄土塬区冬小麦田为研究对象, 基于涡度相关数据分析麦田能量平衡的日变化、季节变化和能量分配特征及其主控因子。结果表明, 长武塬区麦田全年获得的净辐射 (R_n) 为 $2.56 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 涡度相关系统的能量闭合度达到 0.72。冬小麦生育期内, 越冬期和灌浆期麦田主要能量支配项为感热通量 (H), 最大值出现在 6 月, 为 $7.09 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 其他生育期和休闲期, 主要能量支配项为潜热通量 (LE), 最大值出现在 5 月, 为 $10.71 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。 Bowen 比 (β) 在生育期平均值为 0.57, 休闲期为 0.46。土壤热通量 (G) 年总量为 $-15.26 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 日总量最大值出现在 6 月, 为 $1.85 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 10 月至次年 1 月为负值, 表现土壤释放热量。

关键词: 冬小麦; 涡度相关法; 能量平衡; 潜热通量; 感热通量; 黄土高原

中图分类号: P422.4 文献标志码: A

Characteristics of energy balance in winter wheat field on the Loess Tableland

YUAN Xu¹, ZHU Yuan-jun^{1,2}, LIU Wen-zhao^{1,2}, HAN Xiao-yang²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In this paper, eddy covariance data from a winter wheat field on the Loess Tableland were used to investigate the temporal variation of energy components, as well as the characteristics of energy partitioning and its main controlling factors. Results showed that the total net radiation (R_n) throughout the year was $2.56 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the energy balance closure degree was 0.72. In the wintering and grain filling periods, the energy components were dominated by upward sensible heat flux (H), with a maximum value of $7.09 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ occurring in June. However, in other growing stages and the fallow period, the energy components were dominated by upward latent heat flux (LE), with a maximum value of $10.71 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ occurring in May. The average of Bowen ratio (β) was 0.57 in growing season and 0.46 in the fallow period. The annual total amount of soil heat flux (G) was $-15.26 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The daily total amount of soil heat flux (G) reached a maximum value of $1.85 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ in June, and it was negative from October to the next January, which showed the release of heat from soil.

Keywords: winter wheat; eddy covariance method; energy balance; latent heat flux; sensible heat flux; Loess Plateau

在农田生态系统中, 净辐射与农田蒸散、空气热交换、土壤热通量以及极少部分储存的光能相平衡。生态系统的能量平衡是系统水热耦合过程研究的基础, 也一直是农田生态、农业气象和自然地理等学科研究的热点问题。针对不同类型农田生态系统, 国内外学者对农田能量平衡特征进行了一系列研究。Baldocchi 等^[1]比较了小麦和玉米田冠层水热

通量变化特征, 发现玉米冠层的潜热通量比郁闭度相对较大的小麦冠层潜热通量低, 而感热通量比小麦高; Anderson 等^[2]利用涡度相关技术研究了大豆田地气之间潜热和感热通量的日变化特征; Hernandez-Ramirez 等^[3]研究了玉米和大豆田能量平衡特征, 发现农田能量平衡各项(包括净辐射、潜热通量、感热通量和土壤热通量)在不同时间尺度上的变化

和能量分配特征受到植被生长状况的影响;Suyker^[4]等比较了 3 种植植方法(灌溉玉米连作、灌溉玉米-大豆轮作和雨养玉米-大豆轮作)条件下农田地表生长季潜热通量的变化特征;李祎君等^[5]分析了玉米农田水热通量的日变化和年际变化特征及能量平衡状况,发现水热通量变化特征与净辐射的日变化、年际变化同步;贾志军等^[6]研究了大豆田水热通量的日季变化及能量分配特征,发现净辐射、降水量和植被发育是影响大豆田潜热和感热通量变化的主要因子;郭家选等^[7]探讨了冬小麦农田暂时水分胁迫状况下水热通量的日变化;Lei 等^[8]研究了冬小麦-夏玉米轮作灌溉农田蒸散的日季变化及能量分配规律,发现潜热通量是全年能量的主要支配项。

黄土塬区是黄土高原重要的粮食产区,冬小麦是该区的主要作物,区域太阳辐射资源丰富而水资源相对短缺。然而,关于黄土塬区农田能量平衡方面的研究报道还比较少。本文利用麦田涡度相关系统^[9-10]观测数据,并结合同步微气象资料进行系统分析,以期阐明麦田能量平衡分量的时间变化、分配特征及其主控因子,为进一步评价区域能量与水量平衡状况及特征奠定基础。

1 研究区概况

观测样地设在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站水热通量观测场,地处黄土高原南部陕甘交界处的陕西省长武县洪家镇王东村(北纬 35°14', 东经 107°41', 海拔 1 220 m)。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 584 mm,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,是黄土高原典型旱作农业区。观测场位于黄土塬上,土壤类型为黑垆土,质地均匀疏松。观测场内种植冬小麦,其生长季为每年 10 月至次年 6 月,地面平整,构成大范围均一的下垫面,满足实验要求盛行风向的风浪区长度^[11]。

2 材料与方法

2.1 观测方法

涡度相关系统安装于 1.86 m 高度的伸展臂上,由三维超声风速仪(1210R3, Gill Instruments Ltd., UK)和开路 CO₂/H₂O 分析仪(Li-7500, Li-Cor Ltd., USA)组成,原始采样频率为 10 Hz,数据传输由数据采集器(CR5000, Campbell Scientific Ltd., USA)进行存储。冬小麦冠层上方还采用净辐射传感器(CNR-1, Kipp & Zonen, Netherlands)测量净辐射,空气温湿度仪(HMP-45C, Vaisala, Finland)测量空气温、

湿梯度。将 2 个土壤热通量板(HFP01, Hukse Flux, Netherlands)安置于土壤深 5 cm 处用于测量土壤热通量,同时进行 5 层土壤温度(地面以下 2、10、20、40、80 cm, 105-T, Campbell Scientific Ltd., USA)和 5 层土壤湿度(地面以下 2、10、20、40、80 cm, CS616, Campbell Scientific Ltd., USA)的测定,这些要素均按 30 min 计算平均值进行存储。其他气象因素由常规气象观测系统测定。观测时间为 2008 年 6 月 1 日至 2009 年 5 月 31 日。

2.2 数据处理

2.2.1 涡度相关数据处理 近地面层是大气边界层的最底层,在该气层内空气运动符合湍流交换规律,可以利用涡度相关法测定近地层大气中热量和水汽的垂直输送通量。当下垫面均匀一致时,在近地层内潜热通量、感热通量计算公式如下^[12]:

$$LE = \lambda \overline{w' \rho'_v} \quad (1)$$

$$H = \rho_a c_p \overline{w' T'} \quad (2)$$

式中: LE 为潜热通量($W \cdot m^{-2}$); H 为感热通量($W \cdot m^{-2}$); w' , ρ'_v , T' 分别为垂直风速($m \cdot s^{-1}$)、水汽密度($kg \cdot m^{-3}$)和气温(K)的脉动值; λ 为汽化潜热($J \cdot kg^{-1}$); ρ_a 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$); c_p 为常压下空气比热($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)。上横线表示在一定时间间隔上的平均。 LE 和 H 的正值表示能量从地表向大气中传输,负值则相反。

采用 Edire 软件处理 10 Hz 的原始数据,剔除野点,对风速进行二次坐标旋转,计算 30 min 的水热通量均值,并对其进行频率响应校正、AOA(Angle of attack)校正^[13-14]、密度脉动和湿度校正^[15]。受仪器故障、天气等影响,涡度相关数据存在异常值或缺测^[16]。缺失数据时间间隔小于或等于 2 h 的采用线性内插;大于 2 h 的采用平均昼夜变化法^[17-18]。

2.2.2 能量闭合计算 能量闭合状况可以用来检验涡度相关系统观测结果的可靠性,即器测的湍流通量与可利用能量的平衡情况,方程为:

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

式中, R_n 为净辐射($W \cdot m^{-2}$), G 为土壤热通量($W \cdot m^{-2}$); S 为地表到涡度相关系统观测高度间的空气与作物冠层储热($W \cdot m^{-2}$); Q 为其他能量源和汇($W \cdot m^{-2}$)。对裸地或植被低矮的生态系统, S 和 Q 的数值通常很小,可忽略不计^[19-20]。土壤热通量 G 包括埋深 5 cm 的传感器所测热通量 G_0 ($W \cdot m^{-2}$) 和其上层土壤储热 G_s ($W \cdot m^{-2}$) 两部分,其中 G_s 采用的计算公式如下^[21-23]:

$$G_s = Z_p \times (\rho_w \theta C_w + \rho_s C_s) \times \quad (4)$$

$$\frac{T_1(t) - T_1(t - \Delta t) + 0.5[\Delta T(t - \Delta t) - \Delta T(t)]}{\Delta t}$$

式中, Z_p 是土壤热通量板安装深度(5 cm); ρ_w 是水的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); θ 是土壤体积含水率($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); C_w 是水的比热容($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); ρ_s 是土壤容重($1300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C_s 是干土比热容($1620 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T_1 是2 cm土壤温度(K); ΔT 是2 cm与 Z_p 的土壤温度差(K); Δt 是测定温度的时间间隔(30 min); 5 cm土壤温湿度由2 cm和10 cm土壤温湿度线性内插得到。

本文采用湍流通量($LE + H$)和有效能量($Rn - G$)^[24-25]的线性回归关系来评价能量闭合状况。理想情况下斜率为1,截距为0,但实际情况($LE + H$)往往比($Rn - G$)小^[19,24,26-27]。

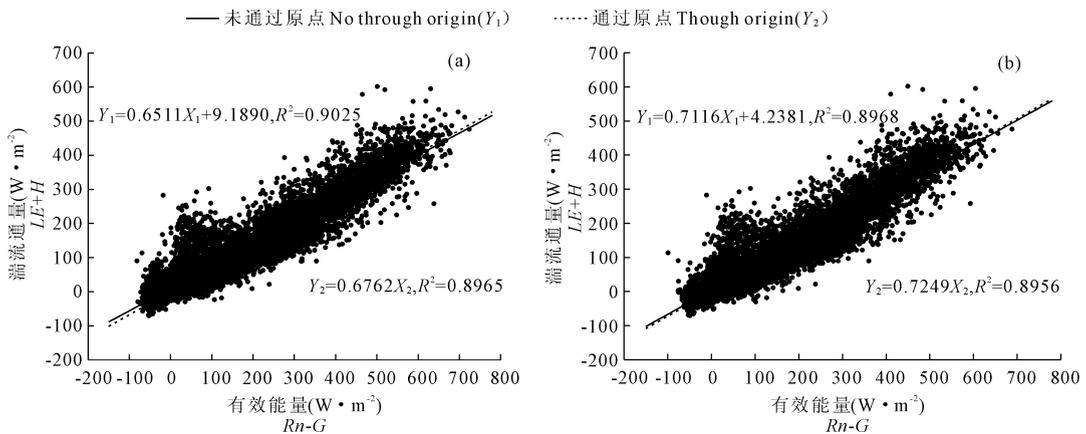
3 结果与分析

3.1 能量闭合度分析

对湍流通量与有效能量全年30 min平均值进行闭合度分析(图1a),回归直线斜率为0.65,截距是 $9.19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。如果强制通过原点,斜率增加到0.68。若考虑土壤热储量后再进行能量闭合分析(图1b),回归直线斜率提高到0.71,截距减小为 $4.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。与上一次强制通过原点相比,斜率变

为0.72,增加了7%,但与理想曲线(斜率为1)仍相差较大。Wilson等^[19]对全球通量网(FLUXNET, <http://fluxnet.ornl.gov/>)站点的观测数据分析表明斜率变化范围是0.53~0.99,平均值为0.79,截距变化范围是 $-32.9 \sim 36.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,平均值为 $3.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Li等^[26]对中国通量网(ChinaFLUX, <http://www.chinaflux.org/>)站点的观测数据分析指出斜率变化范围是0.49~0.81,平均值为0.67,截距变化范围是 $10.8 \sim 79.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,平均值为 $28.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。长武站通量观测场能量闭合度接近上述报道的平均值。

该试验所有设备都是定期进行校准与维护,通量数据采取规范化处理。同时,土壤热通量计算也考虑到土壤热储存部分。但本文忽略了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,包括冠层内水汽潜热、空气内能变化、植被茎叶储热以及光合作用能量消耗。李祎君等^[5]对玉米地能量平衡分析时,发现忽略这部分存储能量会造成近10%的误差。此外,该站能量不闭合原因还可能包括:净辐射仪、土壤热通量板与涡度相关传感器感应源区(Sourcearea)的不同导致空间取样误差^[24];涡度相关仪器系统对高频信号响应不足或周期长于通量平均化时间的低频信号损失^[28],以及平流损失^[24,29]等。



注: a. 未考虑土壤热储量的能量闭合; b. 考虑土壤热储量的能量闭合

Note: a. soil heat storage was not considered for energy balance closure; b. soil heat storage was considered for energy balance closure.

图1 麦田能量闭合状况

Fig. 1 Energy balance closure in winter wheat field

3.2 能量平衡分量的日变化

麦田能量平衡分量在大部分生育阶段均有显著的日变化趋势。以图2所示各生育阶段平均日变化为例,净辐射、潜热通量和感热通量都呈早晚低、中午高的“单峰型”曲线特征,日变化峰值出现的时间在不同生育阶段并无明显差异,均在14:00前后。其他地区农田研究^[5-6]也发现潜热通量、感热通量

和净辐射日变化趋势相似。净辐射在日出后由负值逐渐转为正值,即转变为农田能量的收入项,午间达到最大值,其中抽穗期日变化峰值最大,为 $494.70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而越冬期日变化峰值最小,为 $246.26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,日落前由正值逐渐转为负值。一天中剩余大部分时间表现为长波辐射能的损失。

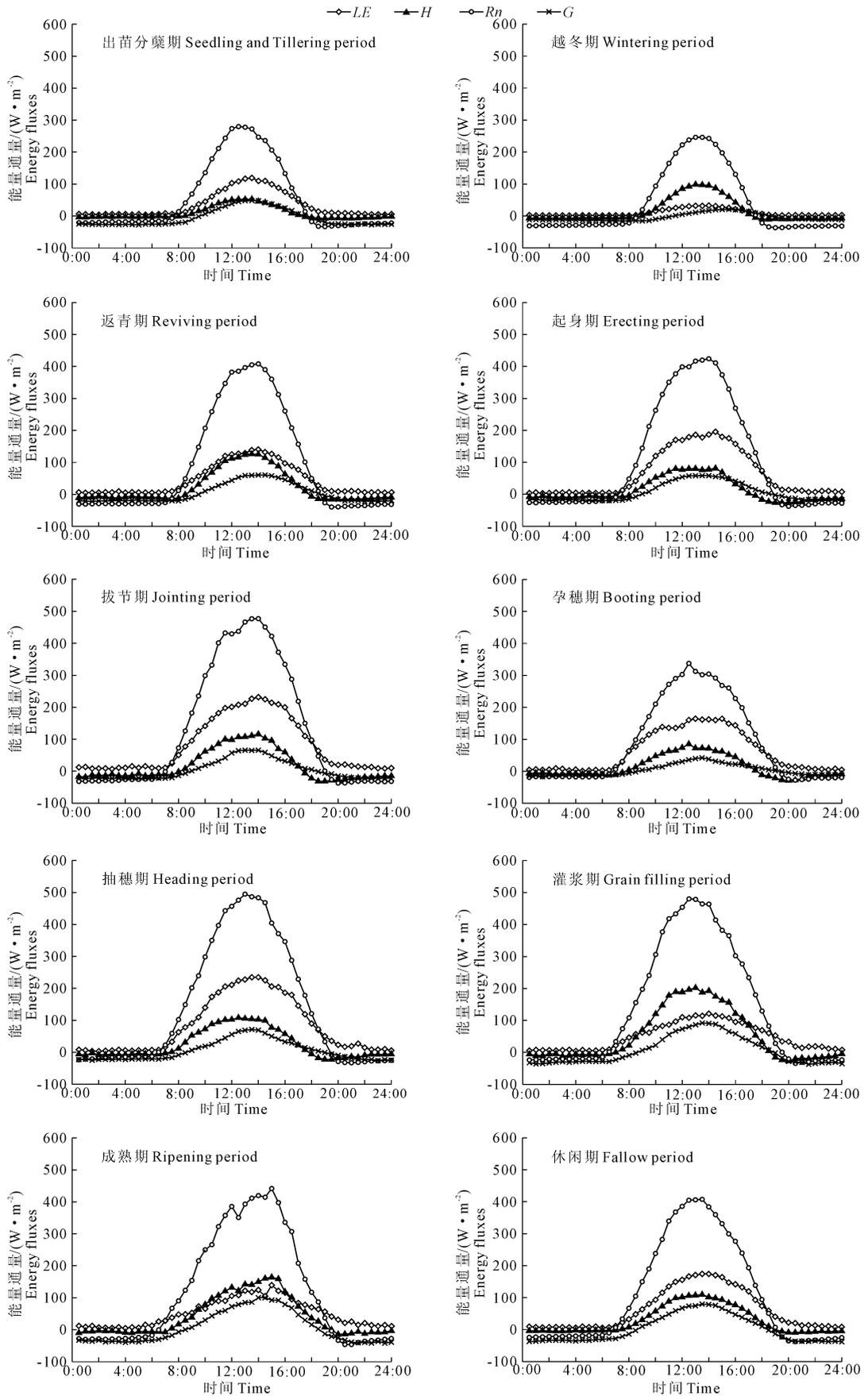


图 2 麦田能量平衡分量日变化

Fig. 2 Diurnal variation of the energy balance components in winter wheat field

潜热通量同样在抽穗期日变化峰值最大,为 $234.83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,而越冬期日变化峰值最小,为 $32.79 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在夜间空气湿度较高和风速较低的情况下,潜热通量有时会表现为负值^[30]。感热通量在灌浆期日变化峰值最大,为 $201.62 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,而出苗分蘖期日变化峰值最小,为 $52.58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。夜间出现逆温层可使感热通量为负值。白天潜热和感热通量远远大于夜间的潜热和感热通量,说明潜热和感热输送主要受到太阳辐射强度的制约,与贾志军等^[6]对三江平原大豆田水热通量的研究结论一致。

土壤热通量在越冬期日变化平缓,而在其他生育阶段都呈“单峰型”日变化。在白天,土壤热通量表现为向下传输,即吸热状态。在夜间,有数小时表现为向上传输,即放热状态。吸热与放热状态时间分配主要受到土壤温度和植被生长状况的影响。总之,农田气候季节变化和小麦生长状况是影响能量

平衡分量日变化的主要因素。

3.3 能量平衡分量的季节变化

3.3.1 不同月份能量平衡分量的变化特征 净辐射日总量在年内呈近似单峰变化(图3),其中雨季净辐射的日间差异较大。全年净辐射总量为 $2.56 \times 10^3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,日总量峰值出现在7月份,为 $18.59 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,但由于该月降水集中(降水天数17 d,降水量134.8 mm),月平均值($10.90 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)小于6月份($11.26 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。12月份平均值最小,为 $2.80 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,分别小于1月份的 $3.40 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 与11月份的 $3.36 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。土壤热通量年总量为 $-15.26 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,日总量最大值($1.85 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)出现在6月。从10月至次年1月,土壤热通量日总量始终为负值,即农田土壤释放能量。说明在该时段对整个系统而言,土壤是热源,能量通过土壤向大气传送。

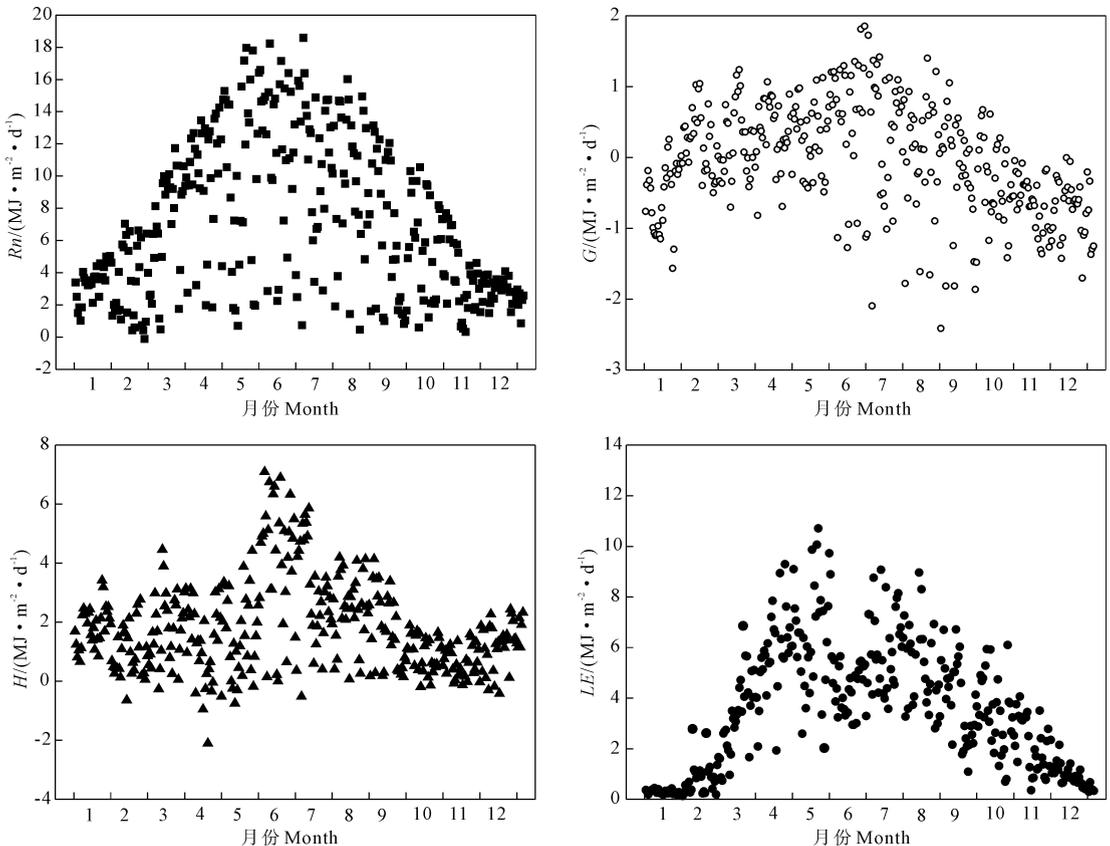


图3 麦田能量平衡分量季节变化

Fig.3 Seasonal variation of the energy balance components in winter wheat field

感热通量日总量从4月中旬开始随净辐射增加而增大,最大值($7.09 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)出现在净辐射最强的6月份,随后逐渐降低。11月又开始出现略微增加趋势,受净辐射持续降低的影响,最后趋于平稳。潜热通量日总量从2月开始明显增大,最大值($10.71 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)出现在小麦生长旺盛的5月

份,随着小麦生长后期生理活动减弱,呈显著降低趋势。6月中旬以后,潜热通量日总量又开始增大,至7月中旬达到第二个峰值,为 $9.08 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。许多农田研究^[5-6,31]中发现降水量是影响潜热通量的重要因子,大气降水是黄土塬区麦田水分的主要来源,降水增加导致土壤含水量升高,有助于作物根系

吸水并促进土壤蒸发。因此,7 月份麦田为裸地时潜热通量日总量较高可能与降水量(7 月份降水量比 6 月份增加 51.4 mm)增大、土壤含水量增高有关。

3 月中旬, LE/R_n 随着小麦生长开始明显增加(图 4),最大值出现在 5 月份,而 H/R_n 变化平稳。小麦进入到生长后期, H/R_n 超过 LE/R_n ,成为能量的主要支配项。随后 LE/R_n 和 H/R_n 都进入到平稳变化阶段,至 12 月中旬, H/R_n 超过 LE/R_n ,成为能量的主要支配项。从 2 月中旬到 9 月, G/R_n 一直呈平稳变化,随着土壤温度降低, G/R_n 开始迅速下降,在冬季土壤热通量大部分时间都是向系统释放热量。从全年来看,感热通量占净辐射 25.5%,而潜热通量占 51.3%,这一比例小于 Lei 等^[8]在华北平原冬小麦-玉米轮作灌溉农田的观测结果(59%)和 Suyker 等^[32]在美国中北部平原玉米-大豆轮作灌溉农田的观测结果(60%),原因主要在于前面说到的涡度相关系统能量不闭合的因素影响。

3.3.2 不同生育阶段能量平衡分量的变化特征

表 1 给出麦田各生育阶段能量平衡分量和主要环境因子的变化情况。一年中各生育阶段数值差异较大。在越冬期潜热值出现最低,平均值为 $0.84 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,大部分能量转化成感热,平均值为 $1.32 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,土壤热通量值也较小,平均值为 $-0.37 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。波文比($\beta = H/LE$,即感热通量 H 与潜热通量 LE 之比)在出苗分蘖期小于 1,潜

热通量成为能量的主要支配项,越冬期 β 值增大到 1.58,感热通量变成能量的主要支配项。进入返青期后,随着作物生长, β 值减小至 1 以下,潜热通量成为能量的主要支配项,直到抽穗期。灌浆期 β 值又增大至 1.05,感热通量超过潜热通量,这可能与小麦生长后期蒸腾作用下降,潜热通量相对减少有关。但成熟期后 β 值又开始小于 1,并逐渐减小。整个生育期内波文比平均值为 0.57,高于 Hernandez-Ramirez 等^[3]在美国中西部玉米田的观测结果(0.39)和大豆田的观测结果(0.30)。从表 1 中可以看出,除了受农田物候变化的影响,气候条件和土壤状况也是 β 值季节变化的重要影响因素。

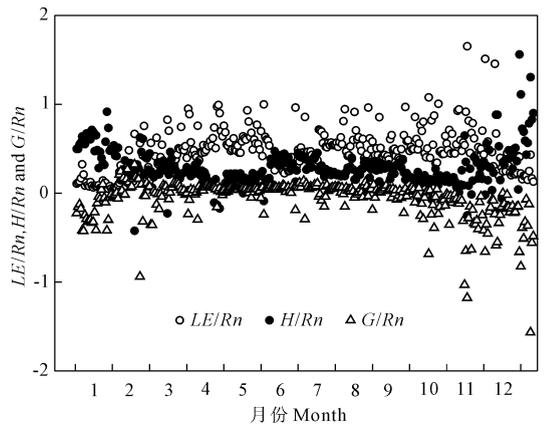


图 4 麦田能量分配比率季节变化

Fig.4 Seasonal variation of the ratio of energy partitioning in winter wheat field

表 1 不同生育阶段能量平衡分量与主要环境因子的平均值变化情况

Table 1 The daily average of the energy balance components and major environmental factors in each period

项目 Items	生长期 Growing period										全年 Annual
	出苗分蘖期 Seeding and Tillering 09-24- 11-19	越冬期 Wintering 11-20- 03-09	返青期 Reviving 03-10- 04-01	起身期 Erecting 04-02- 04-19	拔节期 Jointing 04-20- 05-02	孕穗期 Booting 05-03- 05-14	抽穗期 Heading 05-15- 06-01	灌浆期 Grain filling 06-02- 06-17	成熟期 Ripening 06-18- 06-30	休闲期 Fallow period 07-01- 09-23	
$LE/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	2.95	0.84	3.87	5.55	7.01	5.32	7.11	4.20	4.45	5.38	1313.88
$H/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	0.79	1.32	1.96	1.09	1.47	1.10	2.08	4.42	3.55	2.47	651.39
$R_n/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	4.77	3.30	8.02	9.46	10.96	7.74	12.05	11.86	10.25	9.34	2558.70
$G/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	-0.50	-0.37	0.26	0.49	0.22	0.30	0.40	0.51	0.52	0.12	-15.26
LE/R_n	0.62	0.25	0.48	0.59	0.64	0.69	0.59	0.35	0.43	0.58	0.51
H/R_n	0.17	0.40	0.24	0.12	0.13	0.14	0.17	0.37	0.35	0.26	0.25
G/R_n	-0.104	-0.111	0.032	0.052	0.020	0.039	0.033	0.043	0.051	0.013	-0.006
β	0.27	1.58	0.51	0.20	0.21	0.21	0.29	1.05	0.80	0.46	0.50
$T_s/^\circ\text{C}$	10.81	0.03	7.95	12.90	13.89	16.05	16.27	21.55	22.54	21.62	11.44
$\text{SWC}/\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	0.24	0.16	0.20	0.17	0.15	0.16	0.21	0.28	0.36	0.37	0.24
$T_a/^\circ\text{C}$	8.15	-0.94	8.00	13.31	12.79	15.75	14.90	18.94	20.84	19.19	9.90
$P/\text{mm}(\text{sum})$	116.60	21.20	19.40	9.40	6.20	30.80	28.60	78.60	4.80	248.00	563.60

注: T_s 为 5 cm 土壤温度; SWC 为 5 cm 土壤体积含水量; T_a 为空气温度; P 为降水量。

Note: T_s is soil temperature at 5 cm depth; SWC is soil water content at 5 cm depth; T_a is air temperature; P is precipitation.

4 结 论

1) 潜热通量和感热通量之和比较于净辐射和土壤热通量之差,所给出的长武站麦田涡度相关系统能量闭合度为 0.72。净辐射、潜热通量和感热通量在不同生育阶段日变化均呈“单峰型”,日变化峰值出现的时间在不同生育阶段并无明显差异。受到太阳辐射强度与作物生理活动变化的制约,白天潜热和感热通量远远大于夜间的潜热和感热通量。土壤热通量在越冬期日变化平缓,而在其他生育阶段日变化模式与其他分量基本相同。农田气候季节变化和冬小麦生长状况是影响能量平衡分量日变化的主要因素。

2) 麦田净辐射全年呈单峰变化,雨季净辐射的日间差异较大主要受降水的影响;感热通量和潜热通量季节变化主要受净辐射的影响,同时冬小麦生长状况和降水也是影响潜热通量季节变化的主要因素;土壤热通量从 10 月至次年 1 月主要表现为土壤释放热量,其他时间主要表现为吸收热量,其变化过程主要受土壤温度梯度及植被覆盖状况影响。

3) 麦田全年主要以潜热的形式进行能量交换。冬小麦生育期内, β 值在越冬期平均为 1.58,灌浆期略大于 1,感热通量为能量主要支配项;其他生育期和休闲期小于 1,潜热通量为能量主要支配项。除了受农田物候变化的影响,气候条件和土壤状况也是 β 值季节变化的重要影响因子。

致谢:本研究得到了中科院寒区旱区环境与工程研究所王介民研究员的指导,在此对王老师的帮助表示诚挚的感谢。

参 考 文 献:

[1] Baldocchi D. A comparative study of mass and energy exchange over a closed C₃(wheat) and an open C₄(corn) canopy: I. The partitioning of available energy into latent and sensible heat exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994,67(3):191-220.

[2] Anderson D E, Verma S B, Rosenberg N J. Eddy correlation measurements of CO₂, latent heat and sensible heat fluxes over a crop surface [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1984,29(3):263-272.

[3] Hernandez-Ramirez G, Hatfield J L, Prueger J H, et al. Energy balance and turbulent flux partitioning in a corn-soybean rotation in the Midwestern US[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010,100(1-2):79-92.

[4] Suyker A E, Verma S B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009,149(3-4):443-452.

[5] 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[J]. *植物生态学报*,2007,31(6):1132-1144.

[6] 贾志军,黄耀.三江平原大豆田湍流热通量研究[J]. *中国农业科学*,2012,45(7):1274-1284.

[7] 郭家选,梅旭荣,林琪,等.冬小麦农田暂时水分胁迫状况下水、热通量日变化[J]. *生态学报*,2006,26(1):130-137.

[8] 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.

[9] 郭家选,梅旭荣,卢志光,等.测定农田蒸散的涡度相关技术[J]. *中国农业科学*,2004,37(8):1172-1176.

[10] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013,487(9):24-38.

[11] 李双江,刘文兆,高桥厚裕,等.黄土塬区麦田 CO₂ 通量季节变化[J]. *生态学报*,2007,27(5):1987-1992.

[12] Baldocchi D D, Hincks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods[J]. *Ecology*, 1988,69(5):1331-1340.

[13] Nakai T, Shimoyama K. Ultrasonic anemometer angle of attack errors under turbulent conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012,162-163(3):14-26.

[14] Xu Z W, Liu S M, Li X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE[J]. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 2013,118(23):13140-13157.

[15] 徐自为,刘绍民,宫丽娟,等.涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究[J]. *地球科学进展*,2008,23(4):357-370.

[16] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996,78(1):83-105.

[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] 徐自为,刘绍民,徐同仁,等.涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较[J]. *地球科学进展*,2009,24(4):372-382.

[19] 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.

[20] Chávez J L, Howell T A, Copeland K S. Evaluating eddy covariance cotton ET measurements in an advective environment with large weighing lysimeters[J]. *Irrigation Science*, 2009,28(1):35-50.

[21] 阳坤,王介民.一种基于土壤温湿资料计算地表土壤热通量的温度预报校正法[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*,2008,38(2):243-250.

[22] Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The Energy Balance Experiment EBEX - 2000. Part I: overview and energy balance [J]. *Boundary - Layer Meteorology*, 2007,123(1):1-28.

[23] Liebethal C, Foken T. Evaluation of six parameterization approaches for the ground heat flux[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2007,88(1):43-56.

- Dynamics, 2008, 31(7-8):823-841.
- [8] Breaker L C, Ruzmaikin A. The 154-year record of sea level at San Francisco: extracting the long-term trend, recent changes, and other tidbits[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(3-4):545-559.
- [9] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(2):177-182.
- [10] 信忠保, 谢志仁. 宁夏气候变化对 ENSO 事件的响应[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(2):239-243.
- [11] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7):50-59.
- [12] 杜灵通, 田庆久, 黄彦, 等. 基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2):121-126.
- [13] 龚艳冰, 张继国, 刘高峰, 等. 基于 SPI 指数与 R/S 分析的曲靖市干旱特征研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(3):273-277.
- [14] Huang N E, Wu Z H. A review on Hilbert-Huang transform: method and its applications to geophysical studies[J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(2):2006.
- [15] 孙银凤, 陆宝宏. 基于 EEMD 的南京市降水特征分析[J]. *中国农村水利水电*, 2013, (3):5-9.
- [16] 薛春芳, 侯威, 赵俊虎, 等. 集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用[J]. *物理学报*, 2013, 62(10):504-511.
- [17] 李艳萍, 陈昌春, 张余庆, 等. 基于 EEMD 的明代北京地区干旱灾害特征分析[J]. *中国沙漠*, 2014, (3):835-840.
- [18] 孙阳, 陈元芳, 程龙, 等. 基于 EEMD 的枯季入库径流预报分析[J]. *中国农村水利水电*, 2012, (2):34-37.
- [19] 黄嘉佑. 气象中的谱分析[M]. 北京: 气象出版社, 1984.
- [20] Priestley M B. *Spectral Analysis and Time Series*[M]. New York: Academic Press Inc, 1981.
- [21] 黄忠恕. 波谱分析方法及其在水文气象中的应用[M]. 北京: 气象出版社, 1983.
- [22] 雷兆崇. 数值模式中的谱方法[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [23] 吴月祥, 董立红, 王丹. 基于功率谱的扎龙湿地降水周期分析[J]. *齐齐哈尔大学学报*, 2014, 30(3):79-82.
- [24] 覃邑龙, 应益荣. 重标极差方法下时变 Hurst 指数的构建和实证研究[J]. *系统管理学报*, 2011, 20(5):620-626.
- [25] 张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. *资源科学*, 2011, 33(11):2143-2149.
- [26] 杜灵通, 候静, 胡悦, 等. 基于遥感温度植被干旱指数的宁夏 2000—2010 年旱情变化特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14):209-216.

(上接第 233 页)

- [24] Foken T. The energy balance closure problem: an overview[J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(6):1351-1367.
- [25] 黄辉, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山地人工林蒸散的季节变化及环境影响要素[J]. *生态学报*, 2011, 31(13):3569-3580.
- [26] Li Z Q, Yu G R, Wen X F, et al. Energy balance closure at ChinaFLUX sites[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2005, 48(S1):51-62.
- [27] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(4):1291-1306.
- [28] Foken T, Mauder M, Liebethal C, et al. Energy balance closure for the LITFASS-2003 experiment[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(1):149-160.
- [29] Foken T, Aubinet M, Finnigan J J, et al. Results of a panel discussion about the energy balance closure correction for trace gases[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(4):ES13-ES18.
- [30] Liu W T. Moisture and latent heat flux variabilities in the tropical Pacific derived from satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(C6):6749-6760.
- [31] 阳伏林, 张强, 王文玉, 等. 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(9):2323-2328.
- [32] Suyker A E, Verma S B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(3):417-427.