doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.036

地膜覆盖对旱作玉米田水热通量传输的影响研究

冯　禹[1,2]　郝卫平[1,2]　高丽丽[1,2]　李昊儒[1,2]　龚道枝[1,2]

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;2.农业农村部旱作节水农业重点实验室,北京 100081)

摘要:为探明旱作农田生态系统生态水文过程、提升农田水分利用效率,选取黄土高原东部旱作春玉米田为研究对象,设置露地(CK)和地膜覆盖(PM)两种处理,利用涡度相关系统对两种处理条件下玉米田水热通量进行了连续观测,基于观测结果对两种处理下玉米田水热通量的日、季节变化特征和能量分割进行了分析。结果表明:两个处理各能量通量均存在显著的日、季节变化特征。在快速生长期(拔节期),降水后 CK 和 PM 处理潜热通量(λET)均明显增大,而显热通量(H)和土壤热通量(G)均减小;但在后期(成熟期),降水对各能量通量变化过程的影响没有快速生长期明显,表明玉米生育期内降水的分布能够显著影响旱作玉米田的能量平衡。玉米生育期内,净辐射(R_n)主要以 λET 为主,而休闲期 R_n 主要以 H 为主。R_n 是玉米田 λET 的最主要影响因子,其次是平均气温和饱和水汽压差,风速和相对湿度对 λET 的影响相对较小。

关键词:黄土高原;旱作农田;玉米;地膜覆盖;水热通量;涡度相关系统

中图分类号:S271　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)12-0300-14

Effects of Plastic Mulch on Water and Heat Flux Transfer in Rainfed Maize Fields

FENG Yu[1,2]　HAO Weiping[1,2]　GAO Lili[1,2]　LI Haoru[1,2]　GONG Daozhi[1,2]

(1. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*

2. *Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Aiming to understand eco-hydrological processes and boost water use efficiency in rainfed agroecosystem, a field experiment was conducted in non-mulched (CK) and mulched (PM) maize fields of eastern Loess Plateau to continuously monitor water and energy flux in the maize fields under CK and PM. Based on the monitoring results, diurnal and seasonal variations of water and energy flux as well as energy partitioning were investigated. The results indicated that energy fluxes presented typical diurnal and seasonal variations during the entire growing seasons. Net radiation (R_n) was dominated by latent heat flux (λET) during maize growing seasons while sensible heat flux (H) was the predominant component of R_n during non-growing seasons. Compared with the energy flux before rainfall, λET was increased significantly while H and soil heat flux (G) was decreased after rainfall in development stage, however, in late stage, the changes in soil water content resulted by rainfall did not increase λET significantly for the both treatments, which indicated seasonal distribution of rainfall had significant influence on energy budget of maize fields. R_n was the primary factor affecting λET, followed by average air temperature and vapor pressure deficit, wind speed and relative humidity had relatively minor influence on λET.

Key words: Loess Plateau; rainfed croplands; maize; plastic mulch; water and energy flux; eddy covariance system

收稿日期:2018-09-12　修回日期:2018-10-08

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101-003)、国家自然科学基金项目(51679243)和中国农业科学院"华北节水保粮协同创新行动"项目(CAAS-XTCX2016019)

作者简介:冯禹(1993—),男,博士生,主要从事农业水资源研究,E-mail:fengyu272@163.com

通信作者:龚道枝(1976—),男,研究员,博士,主要从事农业水资源研究,E-mail:gongdaozhi@caas.cn

0　引言

陆地生态系统物质和能量循环是一个极其复杂的过程，能够显著影响全球气候变化[1-2]，而陆地和大气间的能量-水分循环过程驱动着生态系统的植物光合和蒸散过程[3-5]。对于农田生态系统，分析水热通量平衡和分割对农田水分平衡和作物生产模型建立具有重要意义，对于研究变化环境下农田水循环和提高农业水管理极为重要[6]。

净辐射(R_n)、土壤热通量(G)、潜热通量(λET，即农田蒸散量)和显热通量(H)是农田生态系统能量平衡的 4 个基本分量[7]，其中 λET 是确定作物需水量的重要参数[2]。许多研究者对农田水热通量传输过程和机理进行了分析，基于观测值分析了各通量的日、季节和年际变化特征，并分析环境因子和农艺管理等对通量传输的影响。STEDUTO 等[8-11]详细分析了美国加州地区两种水分处理情况下的玉米田水-热-碳通量和冠层导度的差异及其形成机制。LEI 等[12]对华北平原小麦-玉米轮作田的蒸散(ET)和能量平衡进行了分析，发现 ET 的季节和年际变化主要由平衡蒸发的变化引起，年尺度上能量通量的主要成分是潜热通量。TIAN 等[13]发现新疆棉田中，在棉花快速生长时期 H 会减小到一个非常小的值，主要是由于 λET 增大以及棉花叶面积增大导致地表温度减小。丁日升等[6]对西北干旱内陆区水分充分和亏缺年份玉米田水热通量过程进行了分析，发现 λET 是玉米田能量的主要消耗项，其季节变化与叶面积指数同步，但干旱感热平流会增大水分充分年份中期的 λET。

对农田生态系统的能量平衡和分割已有大量的报道，如玉米[2]、棉花[13]、水稻[14]和小麦[12]等，但鲜有研究分析旱作农田的能量交换和平衡，特别是对比地膜覆盖和露地两种情况下旱作农田的能量平衡。地膜覆盖能够改善土壤水热状态，进而提高作物出苗，促进作物生长和干物质积累，最终提升作物产量[15]。GONG 等[16]研究表明，地膜覆盖能够改变农田和大气间的水-热-碳交换过程，进而达到节水固碳的功效；白色透明塑料薄膜会增大地表反照率，进而影响地表能量的平衡。FAN 等[7]发现，地膜覆盖降低了 R_n，增大了 G，进而减小了有效能。本文选取黄土高原东部旱作春玉米田为研究对象，设置露地(CK)和地膜覆盖(PM)两种处理，利用涡度相关系统对两种处理条件下玉米田水热通量进行连续观测，基于观测结果分析地膜覆盖对旱作玉米田水热通量传输过程的影响，以期为探明旱作农田生态系统生态水文过程和提升农田水分利用效率提供科学指导。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2015—2016 年在山西省寿阳县农业部农业环境与作物高效用水科学观测实验站进行。该站位于黄土高原东部(37°44′58″N，113°12′9″E，海拔 1 202 m)，属晋东豫西典型半湿润偏旱区。该地区降雨年际变化较大，集中在春玉米生育期内(6—9 月)，多年平均降雨量和气温分别为 481 mm 和 7.4℃[17]。该地区为旱作农业区，种植模式为一年一熟制，主要种植作物为春玉米。关于试验区具体情况可参见文献[18]。

1.2　试验设计

试验设置露地(CK)和地膜覆盖(PM)两个处理，均平作种植春玉米。由于试验所需观测仪器(涡度相关系统)较为昂贵，因此每个处理设置 1 个小区(300 m × 150 m)，无重复。PM 处理覆盖率为 80%，使用地膜尺寸为宽 80 cm、厚 0.04 mm。两个处理玉米行距和株距分别为 50 cm 和 30 cm。每个处理收获时秸秆粉碎还田，播种时按当地种植习惯以复合肥为底肥，以 N、P_2O_5 和 K_2O 计每公顷施用量分别为 276、144、60 kg，无追肥。玉米出苗后根据出苗情况进行补苗。分别于每年 5 月初播种，于当年9 月底收获。

1.3　观测指标与测定方法

1.3.1　玉米生长指标和生育期观测

每个小区内随机选 7 株玉米植株测定株高和叶面积，从 6 月初至 9 月底每 10 d 左右测定 1 次。采用卷尺测量所有绿叶片(未完全枯萎的叶片)的有效长度和宽度，计算单叶面积，并将所有叶片的面积相加，得到单株叶面积，最终计算每个处理的绿叶面积指数(GLAI)。计算公式为[16]

$$G_{\mathrm{LAI}} = 0.74\frac{\sum_{i=1}^{n} L_i W_i}{D_{\mathrm{row}} S_{\mathrm{plant}}} \tag{1}$$

式中　G_{LAI}——绿叶面积指数，m^2/m^2

L_i——第 i 叶片的长度，m

W_i——第 i 叶片的宽度，m

D_{row}——行距，m

S_{plant}——株距，m

式(1)中的 0.74 为经验系数[16,19]。玉米全生育期逐日 GLAI 数据通过抛物线方程拟合 GLAI 测定值与种植后天数(DAS)得到[16]。根据玉米植株生长情况，记录 CK 和 PM 处理玉米生育期。

1.3.2 水热通量和气象因子

在每个处理小区中央安装一套涡度相关系统(Campbell 公司,美国)分别测量 CK 和 PM 处理玉米水热通量和微气象要素(风速 u、气温 T_a、相对湿度 R_h(RH)、净辐射 R_n、饱和水汽压差 D_{VPD}(VPD)和土壤热通量 G 等)。涡度相关系统的 CSAT3 型超声风速仪和 LI-7500 型红外分析仪安装高度随着作物冠层高度而调整,与冠层保持 1 m 左右的距离。在主风方向上风浪区约为 150 m,满足观测所需的风浪区要求。涡度相关系统采样频率为 10 Hz,并同时把 30 min 和 24 h 的平均值记录在 CR5000 数据采集器中。数据校正方法、取舍标准参考文献[20-21]。λET 和 H 由涡度相关系统测定的温度、湿度、风速的脉动值计算,计算式为[22]

$$\lambda_{ET} = \lambda\rho\,\overline{w'q'} \tag{2}$$

$$H = C_p\rho\,\overline{w'\theta'} \tag{3}$$

式中 λ_{ET}——潜热通量(λET),W/m^2

q'——比湿脉动值,g/g

λ——水的汽化潜热,J/kg

ρ——空气密度,kg/m^3

w'——垂直风速脉动值,m/s

C_p——空气定压比热容,J/(kg·K)

θ'——虚温脉动值,K

$\overline{w'q'}$——垂直风速与比湿脉动的协方差

$\overline{w'\theta'}$——垂直风速与虚温的协方差

2 结果与分析

2.1 能量闭合

图 1 为涡度相关系统观测的 30 min 尺度通量数据能量平衡闭合情况。由图 1 可知,2015 年 CK 和 PM 拟合斜率分别为 0.75 和 0.72,2016 年分别为 0.77 和 0.71。两年数据 CK 和 PM 处理平均能量闭合度(EBC)分别为 0.76 和 0.72。日尺度数据能量闭合度(EBC)2015 年 CK 和 PM 分别为 0.79 和 0.76,2016 年分别为 0.76 和 0.73(图 2)。日尺度 CK 和 PM 平均 EBC 分别为 0.78 和 0.75,高于 30 min尺度 EBC,主要可能是日尺度数据是从 30 min 数据平均得到,而在求和过程中 30 min 数据的负值和正值相互抵消,因此使得日尺度 EBC 高于 30 min EBC。

2.2 水热通量变化

2.2.1 日变化

图 3 和图 4 分别为 2015 年和 2016 年 CK 和 PM 处理玉米各生育期通量平均值日变化曲线。由图可知,各能量通量在各时期均呈现典型单峰曲线的日变化特征。R_n在夜间为负值,自早晨日出后逐渐增大到正值,至中午时达到最大,然后逐渐减小,至傍晚降到 0 左右。G、λ_{ET}和 H 的日变化和 R_n较为相似,但与 R_n相比,G、λ_{ET}和 H 变化相对滞后。

2.2.2 季节变化

图 5(图中 β 为波文比)为 2015 年和 2016 年

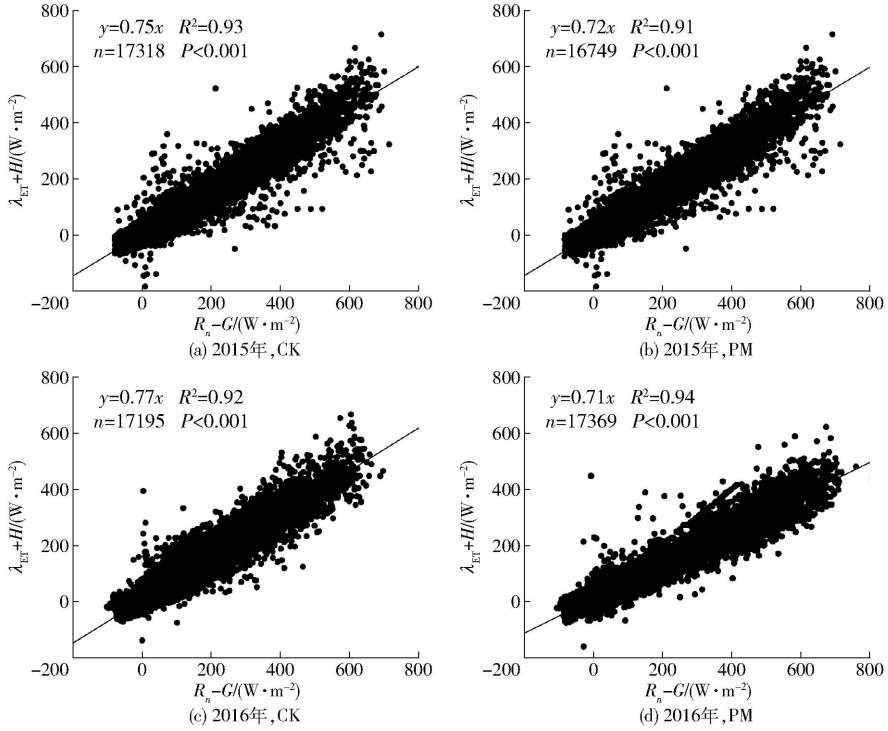

图 1 2015—2016 年 CK 和 PM 处理 30 min 数据能量平衡闭合情况

Fig. 1 Energy balance closure for CK and PM during 2015—2016 at half-hourly interval

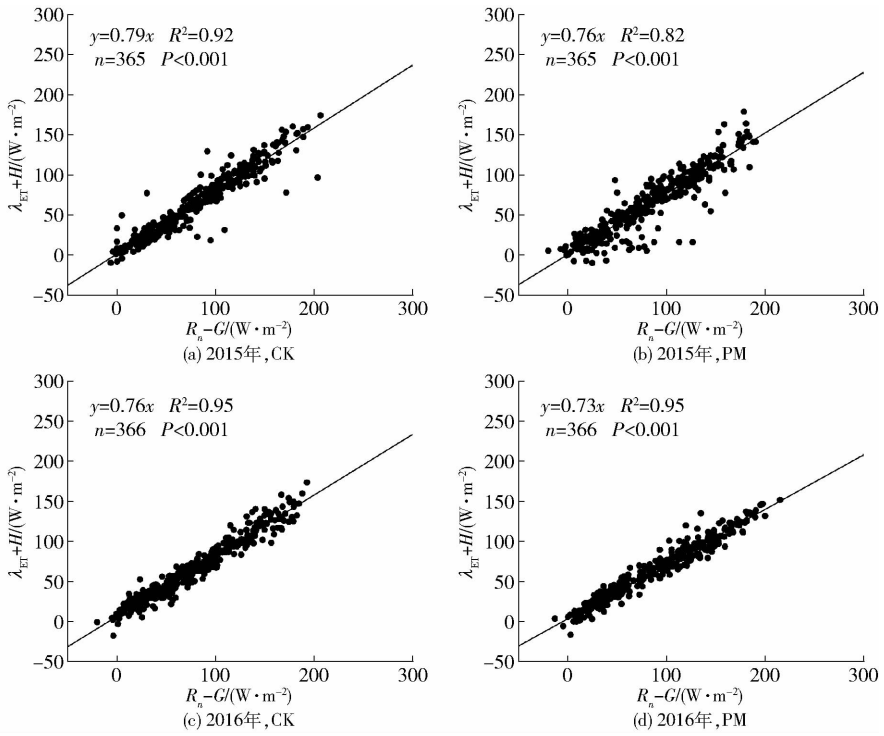

图 2　2015—2016 年 CK 和 PM 处理日尺度数据能量平衡闭合情况

Fig. 2　Energy balance closure for CK and PM during 2015—2016 at daily interval

CK 和 PM 处理各通量季节变化散点图。可知，在一年中 H 呈现出双峰变化，1—4 月底逐渐增大，5 月（玉米播种后）开始又逐渐减小，在 8 月底 9 月初又开始逐渐增大，至 10 月初玉米收获后逐渐减小。λET 在一年中呈现典型的单峰型季节变化特征，在 1—8 月底逐渐增大，之后逐渐减小。G 在一年中也呈现单峰型季节变化，但其峰值出现在每年的播种前后，即在 1—4 月逐渐增大，之后逐渐减小。R_n 在一年中也呈现典型的单峰曲线变化特征，在 1—8 月逐渐增大，之后逐渐减小。

2.3　水热通量分割

图 6 为 2015 年和 2016 年 CK 和 PM 处理各通量分割季节变化以及其与 GLAI 对比图。可知，H/R_n 在一年中呈现先减小，在 8 月底后逐渐增大。具体在玉米生育期内（5—9 月），H/R_n 与 GLAI 呈现相反的变化趋势，可以看出在一年中玉米的非生育期（10 月—次年 4 月），R_n 主要以 H 为主，但在玉米生育期内，H/R_n 所占比例相对较小。λ_{ET}/R_n 在一年中先逐渐增大，在 8 月底后开始逐渐减小。在玉米生育期内，λ_{ET}/R_n 和 GLAI 具有相似的变化趋势。可以看出在玉米生育期内，R_n 主要以 λET 为主，特别是在玉米生长较为旺盛的时期（7—8 月）。G/R_n 在一年中先逐渐增大，在 4 月底开始逐渐减小，至 9 月有微弱的上升，之后又逐渐减小。在玉米生育期内，G/R_n 和 GLAI 变化趋势相反。

由以上分析可以看出，在玉米生育期内，GLAI 与 λ_{ET}/R_n 变化趋势相似，与 H/R_n 和 G/R_n 变化趋势相反，说明玉米生长明显影响了能量的分割。由于 H 和 λET 在玉米生育期内具有相反的变化趋势，因此 β 也和 GLAI 变化趋势相反，特别是在玉米快速生长期时（6 月后），β 较小，表明此时期湍流通量主要以 λET 为主。

图 7 为 CK 和 PM 处理通量分割与 GLAI 关系对比情况。由拟合图可以看出，H/R_n 和 GLAI 存在极显著的负相关关系（$P<0.001$），而 λ_{ET}/R_n 存在极显著的正相关（$P<0.001$），G/R_n 与 GLAI 间没有明显的相关关系，而波文比（$\beta=H/\lambda_{ET}$）与 GLAI 间存在极显著的负相关（$P<0.001$）。由拟合关系图同样可以看出，GLAI 变化对能量通量的分割，特别是对 H 和 λET 的分配影响较大。而实际中，玉米初期耗水量（ET）并不大，因此湍流通量主要以 H 为主，到玉米快速生长时，强烈的光合作用会增大玉米蒸腾量，进而使得玉米 λET 较大，H 较小。同时可以看出，与 H 和 λET 相比，玉米生长对 G 的影响相对较小。

表 1 为 2015—2016 年不同生育期与休闲期能量通量和能量分割比例。可知，在苗期和拔节期，CK 处理 H、λET 和 R_n 均略高于 PM 处理，而 G 低于 PM 处理。由于此时玉米蒸腾相对较小，λET 主要以土壤蒸发为主。CK 处理未覆盖地膜，导致土壤裸露，蒸发较大，因而 CK 处理 λET 较大。而地膜覆盖增大了地表反照率，进而降低了 R_n，但地膜覆盖改

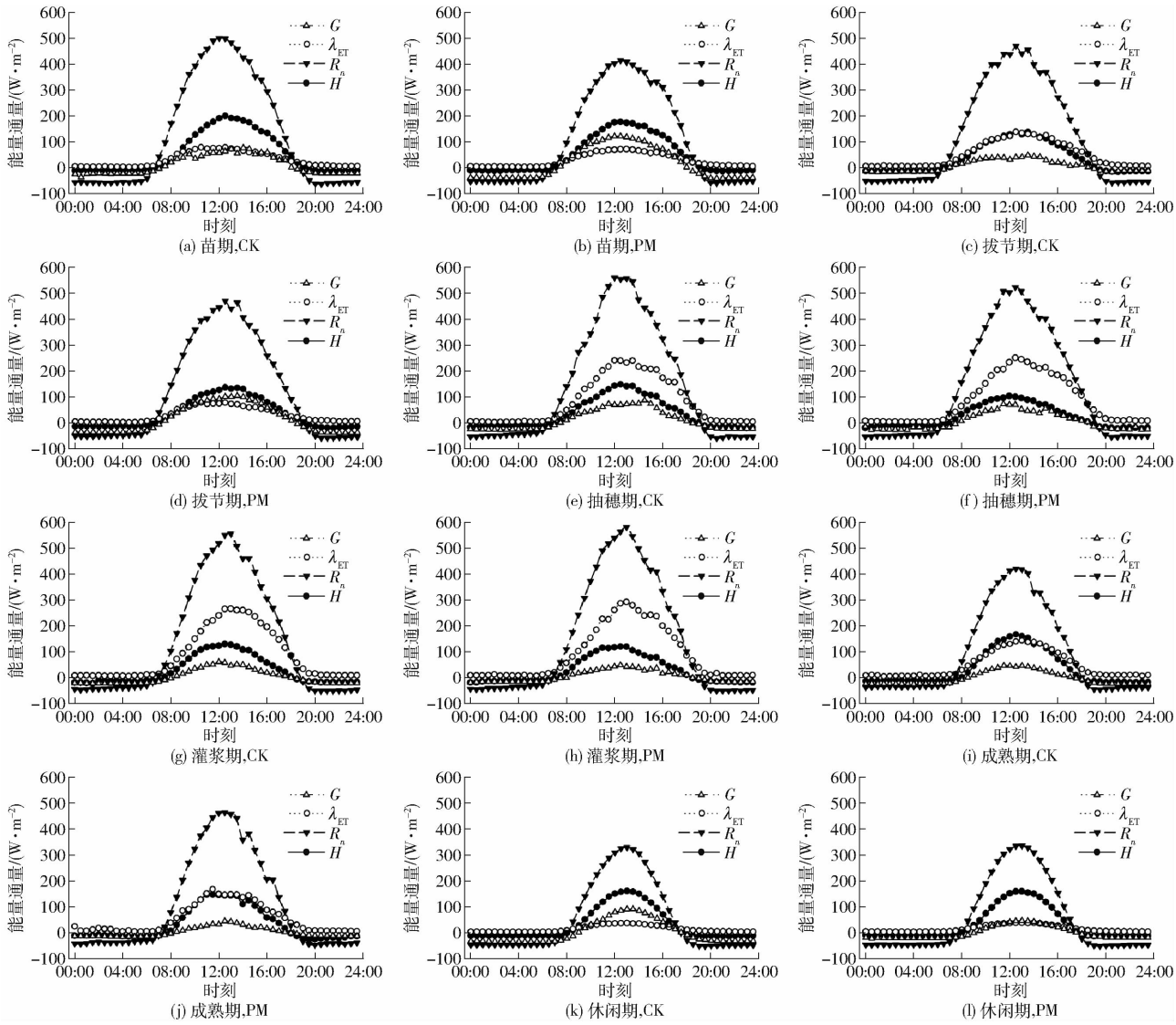

图 3 2015 年 CK 和 PM 处理玉米各生育期通量日变化曲线

Fig. 3 Diurnal variation curves of energy fluxes in maize field at different growth stages for CK and PM in 2015

变了土壤水热状态,增大了 G。而随着玉米生长,地表覆盖度增加,土壤蒸发减小,此时(抽穗期、灌浆期)λET 主要由玉米蒸腾为主,而 PM 处理玉米生长更为旺盛,蒸腾较大。因此,此时期 PM 处理 λET 要高于 CK 处理。从两年试验数据可以看出,全生育期 CK 处理 H、λET、G 和 R_n 分别为 34.2、62.0、6.6、127.9 W/m^2,PM 处理分别为 30.7、61.4、10.4、126.6 W/m^2。CK 处理 H、λET 和 G 分别占 R_n 的 26.8%、48.5% 和 5.2%,PM 处理分别占 24.3%、48.5% 和 8.2%。休闲期 CK 处理 H、λET、G 和 R_n 分别为 30.9、13.6、1.5、54.9 W/m^2,PM 处理为 31.9、13.7、1.0、60.8 W/m^2。CK 处理 H、λET 和 G 分别占 R_n 的 56.3%、24.7% 和 2.3%,PM 处理分别占 52.5%、22.6% 和 0.9%。可以看出,玉米生育期内,R_n 主要以 λET 为主,而休闲期 R_n 主要以 H 为主,说明作物生长能够控制农田能量分割。此外,对比休闲期各能量通量可以看出,CK 和 PM 处理间 λET 基本无差异。由于玉米收获时秸秆还田,CK 和 PM 处理地表基本覆盖玉米秸秆,此时覆膜对 λET 基本无影响。

降水是旱作农田土壤水分的唯一来源,因此旱作农田生态系统能量平衡对降水变化较为敏感[23]。为探明降水对旱作玉米田能量平衡的影响,分析了 2015—2016 年 CK 和 PM 处理降雨前后典型晴天各能量通量在玉米快速生长期(图 8)和玉米后期(图 9)的日变化过程。由图可知,在快速生长期,降雨后 CK 和 PM 处理 λET 均显著增大,而 H 和 G 均减小。但在后期,降雨对各能量通量的变化过程没有快速生长期明显。说明玉米生育期内降水的分布能够显著影响旱作玉米田的能量平衡。

在玉米快速生长期,玉米冠层覆盖度相对较低。因此在干旱时,较低的土壤水分会增加作物根系吸水难度,促进作物产生脱落酸(ABA),而 ABA 会降低叶片气孔开度,最终限制了作物蒸腾[24-25]。许多

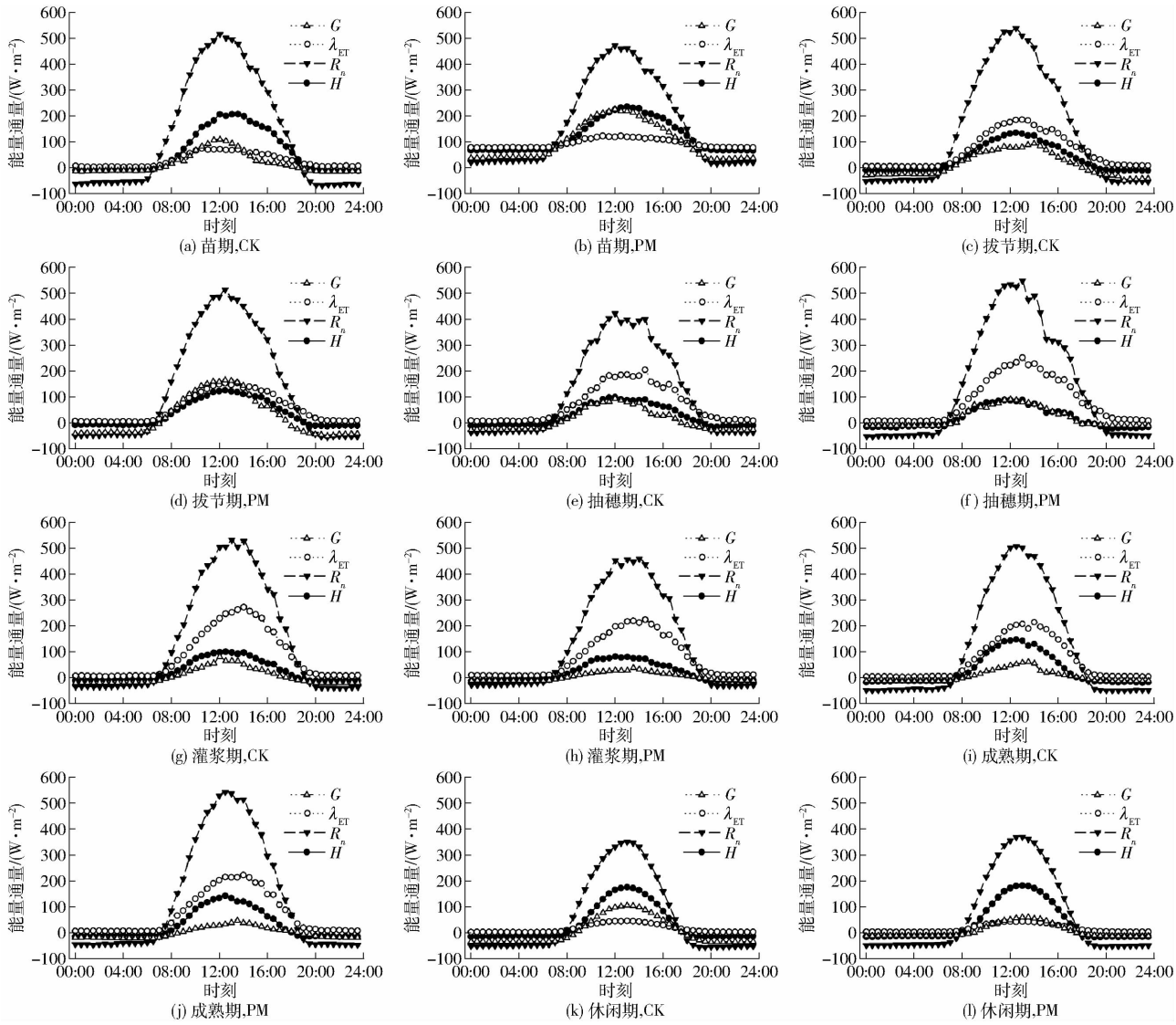

图 4　2016 年 CK 和 PM 处理玉米各生育期通量日变化曲线

Fig. 4　Diurnal variation curves of energy fluxes in maize field at different growth stages for CK and PM in 2016

研究也表明较低的土壤水分会降低作物蒸腾[26-27]。此外,由于土壤水分较低,因而土壤中可供以蒸发的水分有限,进而降低了土壤蒸发[28]。因此,此时较低的土壤水分直接降低了 λET。降雨过后,较高的土壤水分能够增大土壤蒸发,特别是此时地表未完全覆盖,裸露土壤蒸发强烈,干旱后复水也引发了作物生长和蒸腾的"补偿效应"[26,29],因此使得 λET 较大。但在玉米生长后期,较高的 GLAI 导致地表冠层覆盖度较大,此时土壤水分变化对土壤蒸发影响较小,而土壤蒸发主要由能量控制。同时在后期玉米植株也开始衰老,蒸腾较弱,因此,土壤水分变化对蒸发蒸腾没有显著影响。

2.4　潜热通量对环境因子的响应

图 10 为 2015—2016 年 CK 和 PM 处理逐日 λET 与各气象因子的关系。由图可知,随着 R_n 的增大,λET 也逐渐增大,二者间具有极显著的正相关关系($P<0.001$),CK 和 PM 处理相关系数(R)分别达到了 0.81 和 0.86。T_a 与 λET 间也分别呈极显著的正相关关系($P<0.001$),R 分别达到了 0.77 和 0.81。VPD 的增大也导致 λET 的增大,二者间也呈极显著正相关关系($P<0.001$),R 分别达到了 0.49 和 0.50。较高的 RH 使得空气中水汽压变大,进而导致玉米蒸腾和土壤蒸发减弱,最终使得 λET 较小。从图 10g、10h 可以看出,RH 与 λET 呈一定程度的负相关关系,R 分别达到了 0.39($P<0.001$)和 0.36($P<0.001$)。λET 对风速的响应较为复杂,其变化规律并不明显,R 分别达到了 0.40($P<0.001$)和 0.39($P<0.001$)。

总的来说,R_n 是玉米田 λET 最主要的影响因子,其次为 T_a 和 VPD,u 和 RH 对 λET 的影响相对较小。

3　讨论

3.1　地膜覆盖对能量闭合的影响

本研究发现 CK 和 PM 处理 30 min 尺度数据平

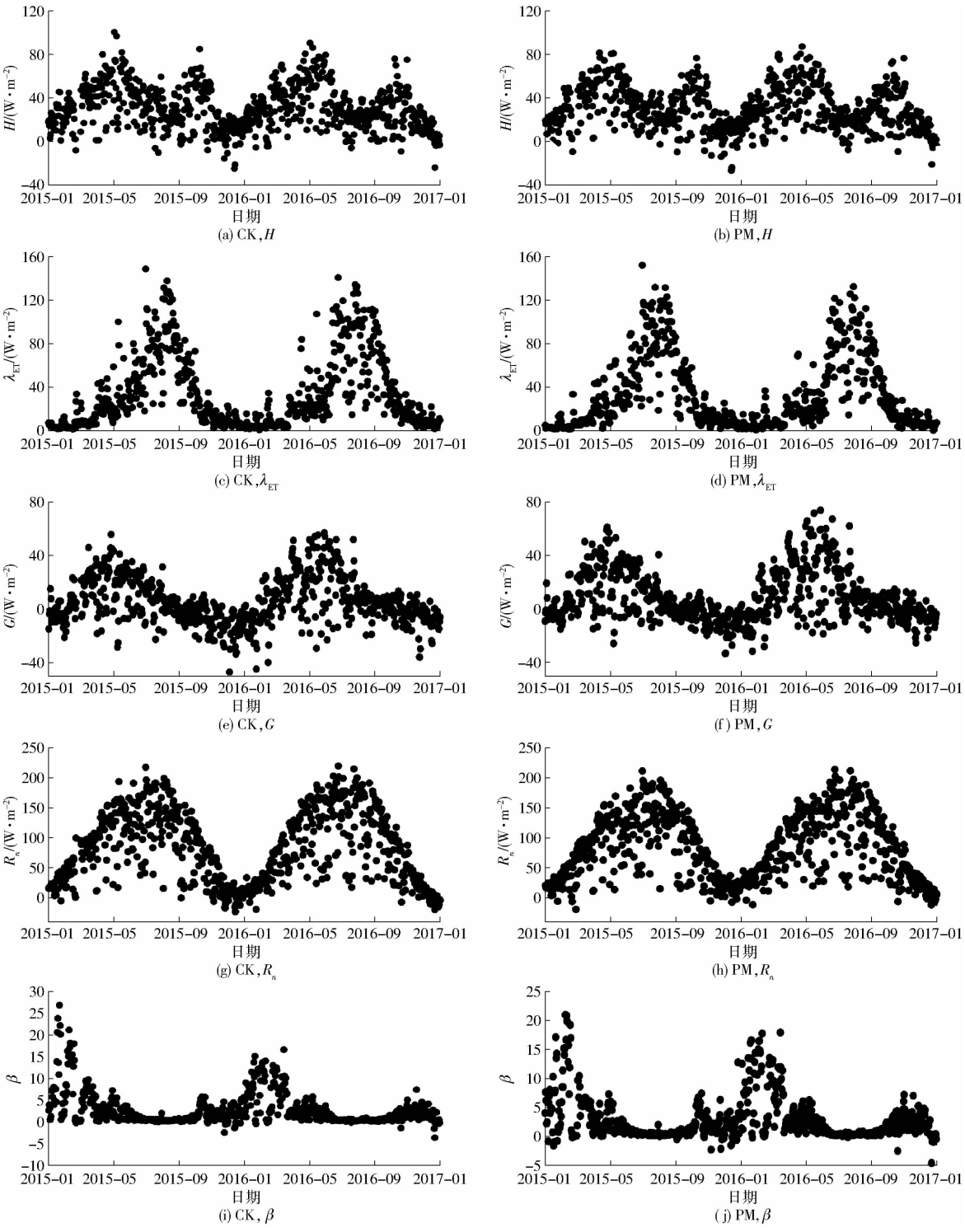

图 5 2015 年和 2016 年 CK 和 PM 处理各通量季节变化散点图

Fig. 5 Seasonal variation plots of energy fluxes for CK and PM during 2015—2016

均 EBC 分别为 0.76 和 0.72,与文献[30]中报道的结果相似。与其他研究一样[31-33],本研究中涡度相关系统仍然存在能量不闭合的情况。涡度相关系统能量不闭合最主要的原因之一是在数据采集和校正过程中存在的误差导致了涡度相关系统对湍流通量低估[34]。此外,特别是夜间较弱的湍流也会导致涡度相关系统对通量低估[35],能量平衡方程中忽略了冠层热存储等其他能量收支项同样也导致了能量的不闭合。LI 等[33]对 China FLUX 各通量站点的能量闭合情况进行了分析,发现各站点能量平衡都没有完全闭合,平均不闭合度为 0.27,在夜间不闭合的程度比白天更加明显。同时总结了能量不闭合主要由观测中的采样误差、仪器观测中可能产生的系统偏差、对其他能量吸收项的忽略(如冠层储热和光合耗能等)、高频与低频湍流通量损失和平流影响等造成。TIAN 等[13]表明在大田中覆膜和行作物对

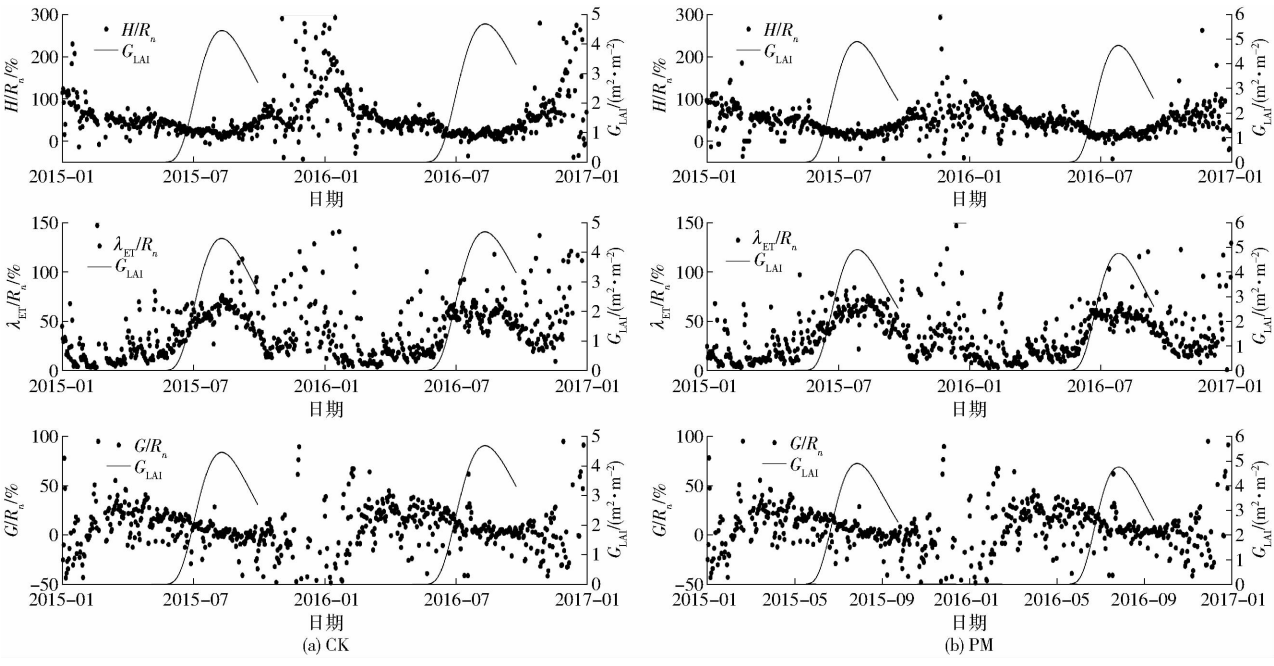

图 6　2015 年和 2016 年 CK 和 PM 处理各通量分割季节变化以及其与 GLAI 对比图

Fig. 6　Seasonal variation of energy partitioning and their comparison with green leaf area index (GLAI) for CK and PM during 2015—2016

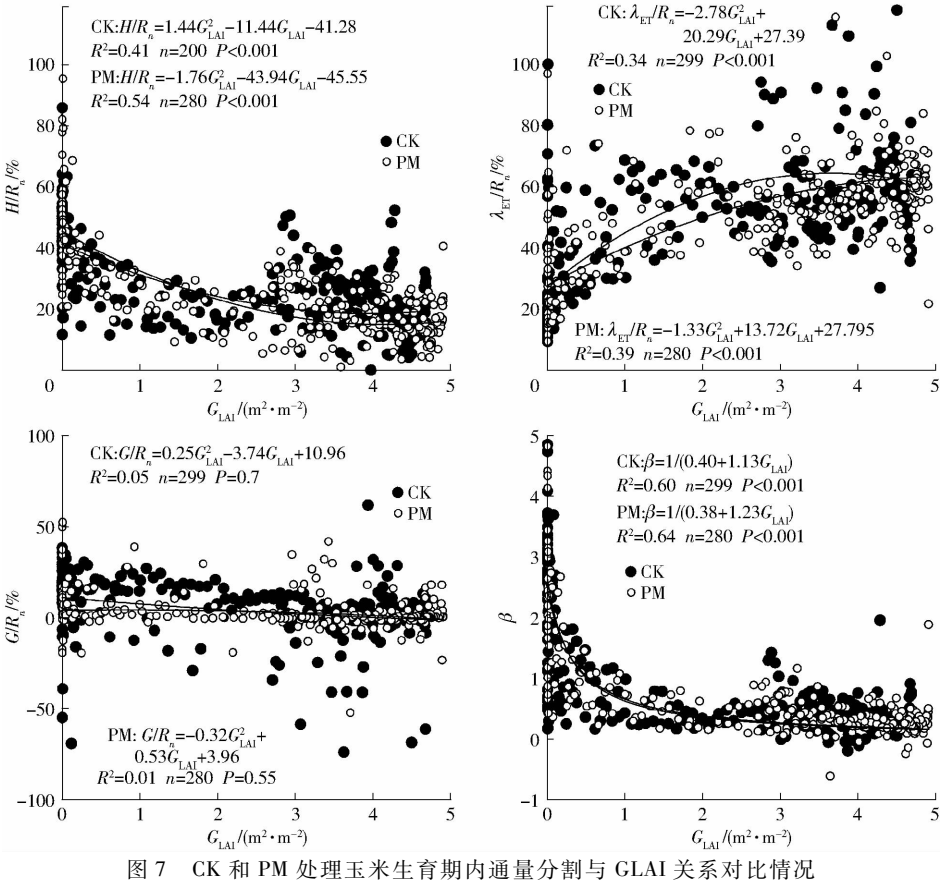

图 7　CK 和 PM 处理玉米生育期内通量分割与 GLAI 关系对比情况

Fig. 7　Comparisons between energy partitioning and GLAI for CK and PM during maize growing seasons

能量的截获会导致能量不闭合的情况，而本研究中大田玉米为行作物，这在一定程度上导致了能量的不闭合。此外，PM 处理覆盖的地膜也会增大能量的不闭合，因而导致本研究中 PM 处理 EBC 略低于 CK 处理。PM 处理会改善土壤的水热状态，进而改变 G。同时 PM 处理促进了作物生长，使得下垫面的冠层反照率和玉米冠层中储存的能量发生改变，而最终导致 CK 和 PM 处理 EBC 的差异。白色地膜

表 1 2015—2016 年不同生育期与休闲期能量通量和能量分割比例

Tab.1 Energy budget and partitioning at different growth stages during 2015—2016

年份	处理	生育期	H/(W·m^{-2})	λ_{ET}/(W·m^{-2})	G/(W·m^{-2})	R_n/(W·m^{-2})	H/R_n/%	λ_{ET}/R_n/%	G/R_n/%
2015	CK	苗期	53.4	30.7	10.3	127.0	42.0	24.2	8.1
		拔节期	36.2	51.1	7.5	122.9	29.4	41.6	6.1
		抽穗期	34.0	80.4	10.2	144.0	23.6	55.8	7.1
		灌浆期	25.6	85.6	1.7	135.8	18.8	63.0	1.3
		成熟期	32.7	47.7	-3.1	91.4	35.8	52.2	-3.4
		全生育期	35.4	60.8	5.0	125.0	28.4	48.7	4.0
		休闲期	28.9	12.1	-1.2	50.6	57.1	24.0	-2.4
	PM	苗期	49.3	28.8	16.5	107.4	45.9	26.8	15.3
		拔节期	34.4	47.1	14.0	121.2	28.4	38.9	11.6
		抽穗期	21.8	83.8	5.8	136.8	15.9	61.3	4.2
		灌浆期	25.8	90.9	3.4	144.5	17.8	62.9	2.4
		成熟期	30.1	52.3	1.1	106.1	28.3	49.3	1.1
		全生育期	31.8	62.3	7.8	124.2	25.6	50.2	6.3
		休闲期	28.9	12.9	-3.2	54.9	52.7	23.5	-5.9
2016	CK	苗期	58.1	27.6	16.5	128.0	45.4	21.5	12.9
		拔节期	35.4	64.9	10.8	141.7	25.0	45.8	7.6
		抽穗期	25.2	69.0	8.5	118.1	21.3	58.4	7.2
		灌浆期	22.5	82.9	4.2	142.1	15.8	58.3	2.9
		成熟期	26.7	62.3	3.5	114.0	23.4	54.7	3.1
		全生育期	33.0	63.2	8.3	130.9	25.2	48.2	6.3
		休闲期	32.8	15.0	4.1	59.2	55.5	25.3	6.9
	PM	苗期	50.7	19.9	27.4	108.5	46.7	18.3	25.3
		拔节期	35.2	56.7	24.2	135.4	26.0	41.9	17.9
		抽穗期	17.5	82.8	18.9	143.3	12.2	57.8	13.2
		灌浆期	18.6	73.9	2.2	130.8	14.3	56.5	1.7
		成熟期	27.1	69.5	-2.2	129.9	20.9	53.5	-1.7
		全生育期	29.6	60.5	12.9	129.1	22.9	46.9	10.0
		休闲期	34.8	14.4	5.1	66.6	52.2	21.6	7.7

也会改变长波和短波辐射的传输,进而改变能量在有效能和湍流通量间的分配[36]。

3.2 能量通量变化

R_n主要由纬度、云层、作物生长状态和下垫面等决定[22],因此不同的天气情况和生育时期会导致R_n量值的差异,CK 和 PM 处理间 R_n差异主要由地表覆盖造成。地膜覆盖会增大地表反照率,降低净短波辐射,最终使得 R_n相对较小。随着作物生长,冠层覆盖度增大,比表反照率减小,R_n逐渐增大。本研究中发现,与 R_n相比,H、G 和 λET 的日变化相对滞后,这主要因为 H、G 和 λET 来源于 R_n,因此其变化滞后于 R_n。此外,ZHANG 等[22]指出,λET 滞后于 R_n还可能是由于玉米植株的自身调整造成。FAN 等[7]对西北灌溉玉米田能量平衡进行了分析,发现 G 的日变化滞后 R_n 0.5 ~ 2 h,地膜覆盖降低了 R_n,增大了 G,进而减小了有效能,因此地膜覆盖减小了作物耗水。

本研究发现,玉米生育期内,R_n主要以 λET 为主,而休闲期 R_n主要以 H 为主,说明作物生长能够影响农田能量分割。LEI 等[12]、TIAN 等[13]、ZHANG 等[22]和 FANG 等[37]研究均表明在农田生态系统作物生长对农田能量平衡影响明显,λET 是 R_n最主要的部分。λET 与 GLAI 呈现相似的变化趋势,表明玉米生长过程中蒸腾主导了 λET 的变化。许多研究也表明,在农田生态系统中,λET 主要由作物蒸腾组成[38-39]。因此,玉米生长支配了 λET 的变化,进而影响农田能量平衡。G 在玉米生育期内与 GLAI 变化趋势相反。根据 Beer 法则,GLAI 增大导致土壤表面接收的太阳辐射减小[36],因此在玉米生育初期,太阳辐射直接照射于土壤表面使得 G 较大,而随着玉米生长,玉米冠层截获了更多的辐射,最终使得 G 较小。β 与 GLAI 也呈现相反的变化趋势,与 LEI 等[12]在华北平原小麦-玉米轮作生态系统中的发现一致。

尽管 CK 和 PM 处理各能量通量在两年中均呈现相似的变化趋势,但作物生长和环境因子不同导

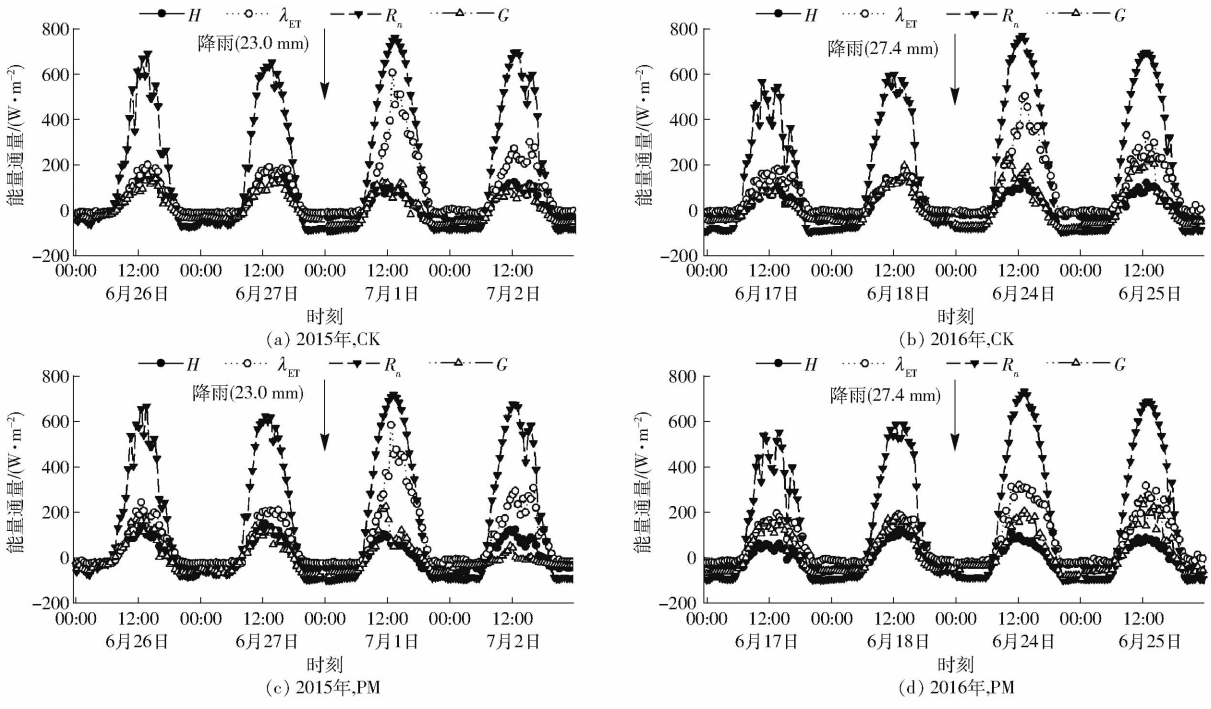

图 8　2015—2016 年 CK 和 PM 处理玉米快速生长期降雨前后晴天能量通量日变化过程曲线

Fig. 8　Diurnal variation curves of energy fluxes in typical sunny days before and after rainfall at development stage for CK and PM during 2015—2016

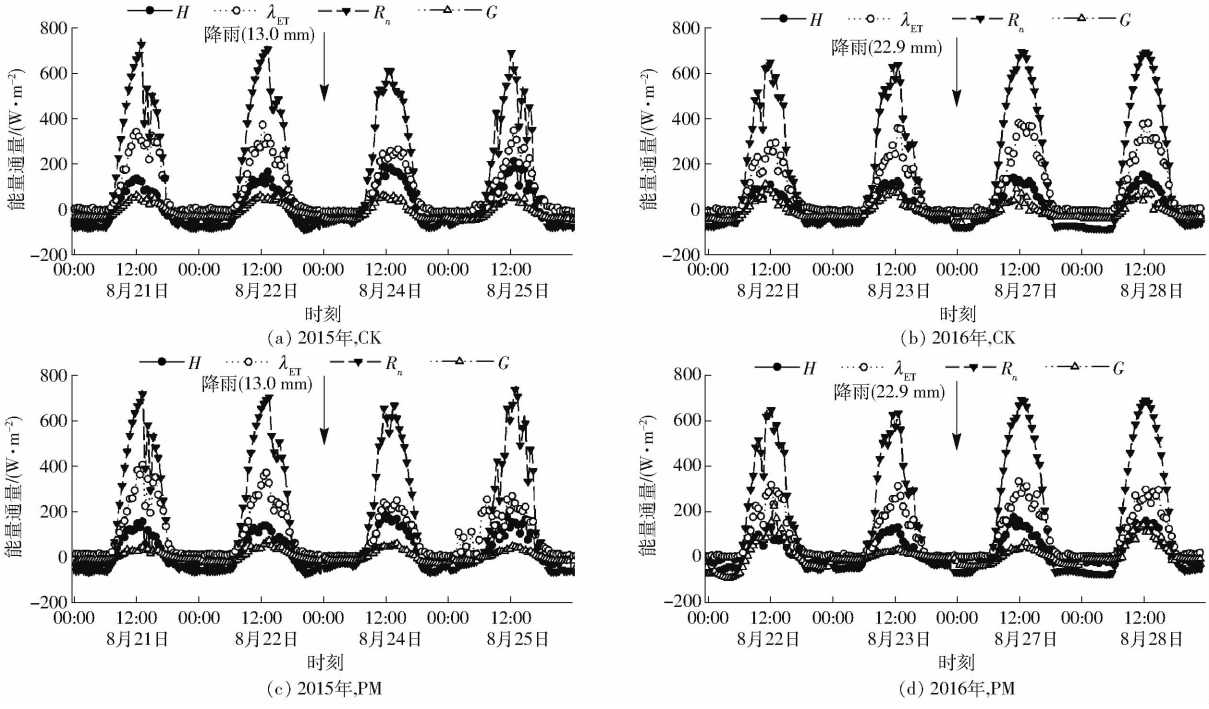

图 9　2015 和 2016 年 CK 和 PM 处理玉米后期降雨前后晴天能量通量日变化过程曲线

Fig. 9　Diurnal variation curves of energy fluxes in typical sunny days before and after rainfall at late stage for CK and PM during 2015—2016

致了其仍然存在一定差异[22]。年际间降水差异和年内降水分布差异会影响生物和环境因子改变，因此影响地表能量平衡[40-41]。CHEN 等[23]发现，在黄土高原旱作区，降水季节分布在年际间具有很大差异，这导致了不同年和季节土壤水分变化，最终影响了地表能量平衡。与灌溉农田不同，自然降水是旱作农田水分最主要的来源，因此旱作农田土壤水分主要受降水控制，进而降水间接控制了旱作农田能量平衡，但在玉米生长后期，降水对能量平衡的影响相对较小，说明降水的分布能够明显影响旱作玉米田能量平衡。LEI 等[12]也发现，在非湿润地区，λET 主要受降水变化控制，灌区中农田灌溉也会增

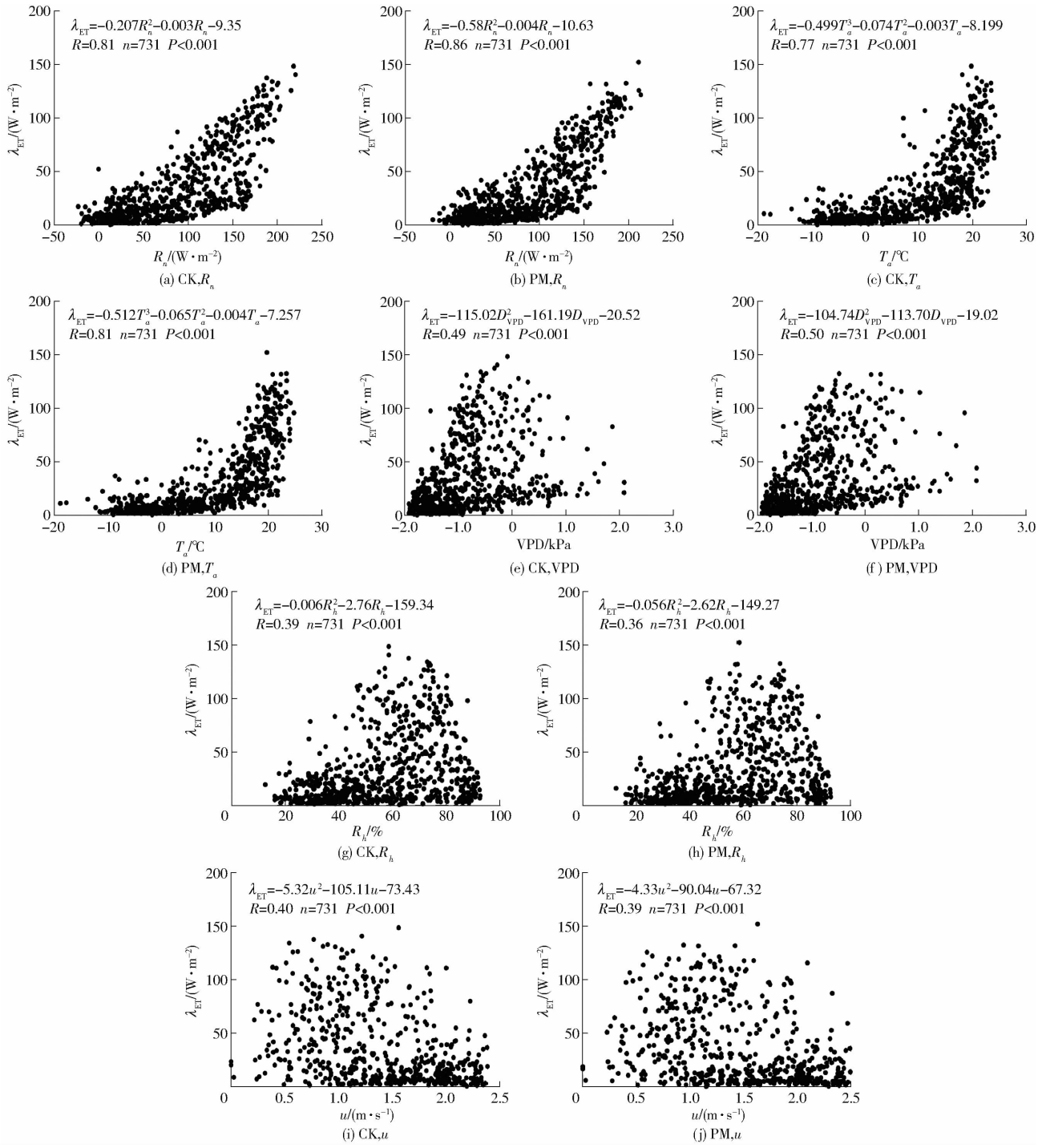

图 10 2015—2016 年 CK 和 PM 处理日潜热通量与气象因子关系

Fig. 10 Relationships between latent heat flux and meteorological variables for CK and PM during 2015—2016

大 λET 进而影响区域能量平衡。在旱作区,降水的分布是地表能量平衡的主要影响因子,土壤水分变化会改变有效能的主要成分,进而决定了区域气候和边界层的变化[23]。本文研究结果与这些研究结果一致。

3.3 潜热通量影响因子

蒸发蒸腾过程实质上是液态水变为汽态水的过程,这一过程受气象参数驱动,受土壤和植被参数协调,受可蒸发水量的限制[42]。蒸发蒸腾速率主要受能量、水量和进入空气中的难度等 3 个因子影响[39,43-44]。研究发现,玉米田 λET 对 R_n 的响应最为明显,由于 R_n 是水汽化过程中最主要的能量来源,因此 R_n 的变化直接影响了蒸发蒸腾速率。此外,R_n 也能诱导植物叶片气孔的开闭,一般情况,较强的 R_n 能够增大叶片气孔导度,进而使得叶片蒸腾加强。此外,较高的 R_n 还直接增大了空气温度,进而使得叶片内外和土壤内外的水汽压差增大,最终加强了蒸发和蒸腾过程[45]。其次,玉米田 λET 受 T_a 影响较大,由于 T_a 升高能够加速水分子的运动,且气温升高能够促进作物的蒸腾作用,同时增大叶

片内外和土壤内外的水汽压差，最终使得蒸发蒸腾作用加强。λET 对 VPD 的响应也较为明显，VPD 的增大，减小了水蒸气进入大气的难度，进而促进了蒸发蒸腾作用。较高的 RH 能够增大空气中的水气压，使得叶片内外和土壤内外的水气压梯度减小，进而减小了水汽化的速率，最终减小了蒸发蒸腾速率。在本文中，RH 对 λET 的影响相对较小。u 的增大能够带走更多的水汽，减小了水汽扩散的空气动力学阻力，进而减小了水汽进入空气中的难度，最终能够促进蒸发蒸腾作用。但在本文中，u 对 λET 的影响也较小，而且从 u 与 λET 间的散点图可以看出，二者间的关系较为复杂。这主要是因为该地区非生育期（10 月—次年 4 月）风速较大，而此时期 λET 较小，生育期（5—9 月）风速较小，λET 较大，二者间呈现相反的趋势。此外，也有研究表明，风速较小时，λET 增强，但当风速很大时，高速气流会加快蒸腾，植物防止细胞失水过多，致使叶片气孔关闭，减弱了蒸腾作用，进而减小 λET[46]。

本研究中，各气象因子对 λET 的影响从大到小顺序为 R_n、T_a、VPD、u、RH。ZHANG 等[22]采用通径分析对华北平原灌溉玉米田 λET 的主控因子进行了分析，发现 R_n 是玉米田 λET 最主要的影响因子，其次为 VPD 和 T_a，u 对 λET 的影响最小。TIAN 等[13]对新疆覆膜棉田 λET 的主控因子进行了分析，发现覆膜棉田主控因子依次为 R_n、VPD、T_a、u。ALBERTO 等[47]也表明，旱直播水稻田和喷灌玉米田 λET 主要受 R_n 影响。这些研究均表明农田 λET 最主要的控制因子为 R_n，但 VPD 和 T_a 的影响与本研究具有一定差异。由于 VPD 受 T_a 和 RH 控制，因此研究间的差异可能是 T_a 与 RH 对 λET 影响差异引起的。此外，许多研究表明 VPD 是蒸腾的主控因子[29]，因此这些差异还可能与 VPD 和 T_a 对蒸腾影响差异有关。本文采用相关系数对各影响因子的影响程度进行了定性分析，但各影响因子间还存在间接和直接作用，后续研究需采用更加科学的方法，定量分析生理和环境因子对 λET 的直接和间接作用。

4　结论

（1）CK 和 PM 处理下，涡度相关系统测定的 30 min 数据平均 EBC 分别为 0.76 和 0.72，日尺度数据 EBC 分别为 0.78 和 0.75，这表明虽然旱作玉米田能量存在不平衡现象，但观测数据能够满足能量平衡分析要求。覆膜在一定程度上增大了玉米田能量的不平衡。

（2）能量通量存在显著的日、季节变化特征，即呈单峰曲线变化，与 R_n 相比，G、λET 和 H 变化相对滞后。在玉米生育期内，GLAI 与 λ_{ET}/R_n 变化趋势相似，与 H/R_n、G/R_n 和 β 变化趋势相反，说明玉米生长明显影响了能量的分割。两年试验数据表明，全生育期 CK 处理 H、λET 和 G 分别占 R_n 的 26.8%、48.5% 和 5.2%，PM 处理分别占 24.3%、48.5% 和 8.2%。休闲期 CK 处理 H、λET 和 G 分别占 R_n 的 56.3%、24.7% 和 2.3%，PM 处理分别占 52.5%、22.6% 和 0.9%。玉米生育期内，R_n 主要以 λET 为主，而休闲期 R_n 主要以 H 为主。在快速生长期，降水后 CK 和 PM 处理 λET 均显著增大，而 H 和 G 均减小。但在后期，降水对各能量通量变化过程的影响没有快速生长期明显。说明玉米生育期内降水的分布能够显著影响旱作玉米田的能量平衡。

参　考　文　献

1　BALDOCCHI D, FALGE E, GU L, 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　JIAO L, DING R, KANG S, et al. A comparison of energy partitioning and evapotranspiration over closed maize and sparse grapevine canopies in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 203: 251 – 260.

3　MCCAUGHEY J H, LAFLEUR P M, JOINER D W, et al. Magnitudes and seasonal patterns of energy, water, and carbon exchanges at a boreal young jack pine forest in the BOREAS northern study area[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D24): 28997 – 29007.

4　BALDOCCHI D, KELLIHER F M, BLACK T A, et al. Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange[J]. Global Change Biology, 2000, 6(S1): 69 – 83.

5　GU S, TANG Y, CUI X, et al. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai – Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 129(3 – 4): 175 – 185.

6　丁日升，康绍忠，张彦群，等. 干旱内陆区玉米田水热通量特征及主控因子研究[J]. 水利学报，2014，45(3)：312 – 319.
DING Risheng, KANG Shaozhong, ZHANG Yanqun, et al. Characteristics of water vapor and heat fluxes and the ontrolling factors over an maize field in the arid inland region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3): 312 — 319. (in Chinese)

7　FAN Y Q, DING R S, KANG S Z, et al. Plastic mulch decreases available energy and evapotranspiration and improves yield and water use efficiency in an irrigated maize cropland[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 122 – 131.

8　STEDUTO P, HSIAO T C. Maize canopies under two soil water regimes. Ⅰ. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide

flux, and canopy conductance[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89(3 - 4): 169 - 184.

9 STEDUTO P, HSIAO T C. Maize canopies under two soil water regimes. Ⅱ. Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89(3 - 4): 185 - 200.

10 STEDUTO P, HSIAO T C. Maize canopies under two soil water regimes. Ⅲ. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89(3 - 4): 201 - 213.

11 STEDUTO P, HSIAO T C. Maize canopies under two soil water regimes. Ⅳ. Validity of Bowen ratio energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89(3 - 4): 215 - 228.

12 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.

13 TIAN F, YANG P, HU H, et al. Energy balance and canopy conductance for a cotton field under film mulched drip irrigation in an arid region of northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 110 - 121.

14 刘笑吟,杨士红,李霁雯,等. 南方节水灌溉稻田能量通量特征及其规律分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):83 - 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150513&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.013.
LIU Xiaoyin, YANG Shihong, LI Jiwen, et al. Characteristics and law analysis of energy flux in southern water-saving irrigation paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 83 - 92. (in Chinese)

15 王罕博,龚道枝,梅旭荣,等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. 农业工程学报,2012,28(22):88 - 94.
WANG Hanbo, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 88 - 94. (in Chinese)

16 GONG D Z, HAO W P, MEI X R, et al. Warmer and wetter soil stimulates assimilation more than respiration in rainfed agricultural ecosystem on the China Loess Plateau: the role of partial plastic film mulching tillage[J]. PLoS ONE, 2015, 10(8): e0136578. DOI:10.1371/journal.pone.0136578.

17 FENG Y, GONG D Z, MEI X R, et al. Estimation of maize evapotranspiration using extreme learning machine and generalized regression neural network on the China Loess Plateau[J]. Hydrology Research, 2017, 48(4): 1156 - 1168.

18 冯禹,崔宁博,龚道枝,等. 基于叶面积指数改进双作物系数法估算旱作玉米蒸散[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9):90 - 98.
FENG Yu, CUI Ningbo, GONG Daozhi, et al. Estimating rainfed spring maize evapotranspiration using modified dual crop coefficient approach based on leaf area index[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 90 - 98. (in Chinese)

19 LI S E, KANG S Z, LI F S, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95, 1214 - 1222.

20 MASSMAN W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104: 185 - 198.

21 LEUNING R. Measurements of trace gas fluxes in the atmosphere using eddy covariance: WPL corrections revisited[M]// LEE X, MASSMAN W J, LAW B E. Handbook of micrometeorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2004, 119 - 132.

22 ZHANG B Z, LIU Y, XU D, et al. Multi-scale evapotranspiration of summer maize and the controlling meteorological factors in north China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 216, 1 - 12.

23 CHEN X, YU Y, CHEN J, et al. Seasonal and interannual variation of radiation and energy fluxes over a rain-fed cropland in the semi-arid area of Loess Plateau, northwestern China[J]. Atmospheric Research, 2016, 176: 240 - 253.

24 ZHANG J H, SCHURR U, DAVIES W J. Control of stomatal behaviour by abscisic acid which apparently originates in the roots[J]. Journal of Experimental Botany, 1987, 38(7): 1174 - 1181.

25 GONG D Z, KANG S Z, YAO L M, et al. Estimation of evapotranspiration and its components from an apple orchard in northwest China using sap flow and water balance methods[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(7): 931 - 938.

26 CUI N B, DU T S, LI F S, et al. Response of vegetative growth and fruit development to regulated deficit irrigation at different growth stages of pear-jujube tree[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(8): 1237 - 1246.

27 DU T S, KANG S Z, ZHANG J H, et al. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(8): 2253 - 2269.

28 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guideline for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome: FAO, 1998: 15 - 64.

29 FENG Y, CUI N B, DU T S, et al. Response of sap flux and evapotranspiration to deficit irrigation of greenhouse pear-jujube trees in semi-arid northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 194: 1 - 12.

30 ALLEN R G, PEREIRA L S, HOWELL T A, et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 899 - 920.

31 WILSON K B, GOLDSTEIN A H, FALGE E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113: 223 - 243.

32 WOLF A, SALIENDRA N, AKSHALOV K, et al. Effects of different eddy covariance correction schemes on energy balance closure and comparisons with the modified Bowen ratio system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148:942 - 952.

33 LI Z Q, YU G R, WEN X F, et al. Energy balance closure at China FLUX sites[J]. Science in China Ser D, 2005, 48(S1): 51 - 62.

34 PARDO N, SANCHEZ M L, PEREZ I A, et al. Energy balance and partitioning over a rotating rapeseed crop[J]. Agricultural Water Management, 2015, 161: 31 – 40.
35 WILSON K B, BALDOCCHI D D, AUBINET M, et al. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12), DOI: 10.1029/2001WR000989.
36 GONG D Z, MEI X R, HAO W P, et al. Comparison of ET partitioning and crop coefficients between partial plastic mulched and non-mulched maize fields[J]. Agricultural Water Management, 2017, 181: 23 – 34.
37 FANG Q X, MA L, FLERCHINGER G N, et al. Modeling evapotranspiration and energy balance in a wheat-maize cropping system using the revised RZ – SHAW model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 194: 218 – 229.
38 KANG S Z, GU B J, DU T S, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(3): 239 – 254.
39 KOOL D, AGAM N, LAZAROVITCH N, et al. A review of approaches for evapotranspiration partitioning[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 56 – 70.
40 YOSHIFUJI N, KUMAGAI T, TANAKA K, et al. Inter-annual variation in growing season length of a tropical seasonal forest in northern Thailand[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 229(1 – 3): 333 – 339.
41 TANAKA N, KUME T, YOSHIFUJI N, et al. A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(5): 807 – 819.
42 MCCARTHY J J. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge University Press, 2001.
43 HILLEL D. Environmental soil physics[M]. London/San Diego: Academic Press, 1998.
44 BRUTSAERT W. Hydrology—an introduction[M]. New-York: Cambridge University Press, 2005.
45 张宝忠. 农田 ET 时空变异及尺度转换模式研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2011.
ZHANG Baozhong. Study on spatiotemporal variation and scale transformation of ET in farmland[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011. (in Chinese)
46 刘健. 常用园林植物蒸腾耗水特性及生态效应研究[D]. 保定:河北农业大学,2007.
LIU Jian. Study on characteristic of transpiration and ecological function of familiar landscape plants[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2007. (in Chinese)
47 ALBERTO M C R, QUILTY J R, BURESH R J, et al. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with oveRHead sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 1 – 12.

(上接第 225 页)

12 CHEN S Y, XUE Z C, LI M, et al. Variable sets method for urban flood vulnerability assessment [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(12): 3129 – 3136.
13 CHEN S Y, XUE Z C, LI M. Variable sets principle and method for flood classification [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(9): 2343 – 2348.
14 DIAO Y F, WANG B D. Scheme optimum selection for dynamic control of reservoir limited water level [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(10): 2605 – 2610.
15 柯丽娜,王权明,孙新国,等. 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价[J]. 生态学报,2013,33(6):1889 – 1899.
KE Li'na, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al. The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6):1889 – 1899. (in Chinese)
16 邱林,王文川,陈守煜. 农业旱灾脆弱性定量评估的可变模糊分析法[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊 2):61 – 65.
QIU Lin, WANG Wenchuan, CHEN Shouyu. Quantitative estimation for vulnerability of agricultural drought disaster using variable fuzzy analysis method[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp. 2):61 – 65. (in Chinese)
17 陈守煜,薛志春,李敏,等. 基于可变集的年径流预测方法[J]. 水利学报,2014,45(8):912 – 920.
CHEN Shouyu, XUE Zhichun, LI Min, et al. Annual runoff prediction method based on the variable sets [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8):912 – 920. (in Chinese)
18 陈守煜,祝雪萍,薛志春. 基于可变集辩证法数学定理的库群防洪优化调度方法[J]. 水力发电学报,2014,33(6):46 – 52.
CHEN Shouyu, ZHU Xueping, XUE Zhichun. Scheduling optimization of flood control systems based on the dialectics mathematical theorem of variable sets [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6): 46 – 52. (in Chinese)
19 金维刚,李勇,印永华,等. 不确定环境下特高压远距离风电专用通道落点方案决策的灵敏度分析[J]. 电网技术,2016,40(3): 889 – 896.
JIN Weigang, LI Yong, YIN Yonghua, et al. Sensitivity analysis for decision-making of UHV long distance power transmission site selection under uncertainty based on cloud model [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 889 – 896. (in Chinese)
20 王贞琴. 浙北引水工程方案选优综合评价[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
WANG Zhenqin. Comprehensive evaluation on project of water diversion to northern Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)