

节水灌溉稻田蒸发蒸腾过程及其比例变化特征研究

刘笑吟^{1,2} 王海明¹ 王 钊¹ 周心怡¹ 徐俊增^{1,2}

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为探究节水灌溉稻田蒸发蒸腾过程及其比例变化特征,建立能准确反映水稻蒸腾与棵间土壤蒸发分摊关系的计算公式,采用自制的微型蒸渗仪系统观测 2015 年和 2016 年水稻生育期稻田蒸散量(ET_{CML})和蒸发量(E),分析了典型天气和各生育期 ET_{CML} 、 E 和蒸腾量(T)的日/稻季变化特征及 E 与 T 的比例变化。结果表明:晴天 ET_{CML} 、 T 和 E 变化趋势相同,但 E 易受生长阶段与环境的影响;阴天 ET_{CML} 和 T 呈多峰变化;雨天测量值有明显误差,微型蒸渗仪会因降雨、灌水、强风、水汽凝结、边界效应、水稻生长等因素而影响数据的可靠性。节水灌溉稻田 T 决定了 ET_{CML} 的大小和变化规律, E 仅在初期呈倒“U”形。 ET_{CML} 和 T 逐日变化随净辐射(R_n)先增后减,在分蘖中后期达到峰值,存在明显的物候特征。蒸发量与蒸散量的比值(E/ET_{CML})由水稻生长初期的 0.95 逐渐减小,全生育期平均为 0.37。 E/ET_{CML} 可用其与水稻移栽时间和叶面积指数(LAI)的对数关系进行描述,决定系数均大于 0.88。研究蒸发蒸腾比例特征对田间水分管理及指导灌溉具有重要意义,可为双源蒸散模型的改进与拟合提供重要的数据支撑。

关键词: 稻田; 节水灌溉; 蒸发; 蒸腾; 蒸散量; 微型蒸渗仪

中图分类号: S275; S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)07-0271-12

OSID:



Characteristics of Rice Transpiration and Soil Evaporation and Their Proportion Variation in Water-saving Irrigated Paddy Field

LIU Xiaoyin^{1,2} WANG Haiming¹ WANG Yue¹ ZHOU Xinyi¹ XU Junzeng^{1,2}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Crop evapotranspiration (ET_{CML}) is usually divided into two processes: crop transpiration (T) and soil evaporation (E). The transpiration process, which is influenced by crop characteristics, meteorological and environmental factors and field management measures, is the key to study the change of crop water demand and water conversion in farmland. Soil evaporation is also an important part of the water cycle in farmland and plays a very important role in the calculation of water balance and energy balance of farmland, however, the research on evapotranspiration and its composition under the conditions of water-saving irrigation is very few. An experiment was carried out from 2015 to 2016 to explore the characteristics of water consumption under the conditions of water-saving irrigation, and to obtain a deeper understanding of the composition of evapotranspiration in water-saving irrigated rice fields. Daily/seasonal variation characteristics of evapotranspiration, evaporation and transpiration, and the change of the ratio of E or T to ET_{CML} during typical weather and each growth period were analyzed by using a micro-lysimeter system. The results illustrated that ET_{CML} , E and T indicated significant daily variation characteristics in different kinds of typical weather. On typical sunny days, changes of ET_{CML} and T showed basically the same trend and they both showed an inverted “U” curve, while E was mostly influenced by crop growth stage and environmental factors. In addition, because water vapor was

收稿日期: 2021-03-12 修回日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809075)、江苏省自然科学基金项目(BK20180506)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202097)和中国博士后科学基金项目(2019M651680)

作者简介: 刘笑吟(1989—),女,副教授,博士,主要从事节水灌溉农田水热通量研究,E-mail: lxyn1819@hhu.edu.cn

通信作者: 徐俊增(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事农业高效灌排及其农田生态效应研究,E-mail: xjz481@hhu.edu.cn

condensed on the surface of crops as well as soil, ET_{CML} showed positive and negative alternation at night. ET_{CML} and T on cloudy days were demonstrated as unstable trend with multi-peak variation, while E had no obvious daily variation characteristics. The micro-lysimeter was sensitive to the weight changes produced by rainfall, which caused inaccurate measurement data. In consequence, it was important to exclude the data when it was raining heavily. The daily variation of ET_{CML} and T stood out an inverted “U” curve in all rice growth stages, while E showed an inverted “U” only in the early stage, and the cumulative daily value of E was less than 1.00 mm/d at the end of the growth stage. After the middle tillering stage, T became the decisive factor of rice evapotranspiration and determined the magnitude and pattern of ET_{CML} . The seasonal variation of T and ET_{CML} was increased and then decreased with R_n , and reached the maximum at the middle or late tillering stage, with obvious phenological characteristics. The proportion of E and T to ET_{CML} was restricted by each other. The proportion of T to ET_{CML} was increased gradually with the growth of rice, reaching a maximum at the milk ripening stage and decreasing slightly at the yellow ripening stage. The proportion of E was decreased gradually from about 0.95 at the beginning of rice growth to an average of about 0.24 at the end of rice growth period, with the average of 0.37 in rice season. The proportion of E to ET_{CML} in paddy fields under irrigation conditions could be accurately expressed by its logarithmic relationship with rice transplanting days and leaf area index (LAI). The study of evapotranspiration process characteristics had important practical significance for both field water management and irrigation guidance.

Key words: paddy field; water-saving irrigation; evaporation; transpiration; evapotranspiration; micro-lysimeter

0 引言

蒸散量(ET)是地表水量平衡及能量平衡的重要组成部分,对深入研究农田蒸散发及农业水资源高效利用具有重要价值^[1-2]。农田蒸散通常分为作物蒸腾和棵间蒸发两个过程。蒸腾过程是土壤-植物-大气连续体中水分传输的重要环节,是研究作物需水变化以及农田水转化的关键,该过程因受作物特征、气象环境因素以及田间管理措施的影响而有所不同^[3-6]。棵间蒸发也是农田水循环的重要环节之一,受气候环境条件与作物生长等因素的影响,在农田水量平衡和能量平衡计算中占有十分重要的地位^[7]。对作物需水特征的分析模拟研究大多关注作物类型和气候因素,较少考虑作物从生长到成熟整个过程中蒸发蒸腾所占比例不同这一因素本身的调节分配作用。区分作物蒸腾与棵间蒸发可明确作物生长过程中的生理需水和生态耗水过程,从而分别研究蒸腾和蒸发的影响机理,为分析农田蒸散的组成特征、研究水转化过程本质、蒸发蒸腾模型率定以及制定节水高产的灌溉制度提供重要的基础数据。冠层尺度作为蒸散测定的中间尺度^[8],是区分作物蒸腾与棵间蒸发的关键尺度,也是农田水热尺度效应研究的重要组成部分。蒸渗仪法是根据蒸渗仪内土柱的质量变化计算水分收支的方法^[9],是直接测定蒸散量的精确方法之一^[10]。但大型蒸渗仪造价高,安装维护需要耗费大量的人力财力,适用性较差。冠层微型蒸渗仪可根据不同的现场条件和试验要求进行布置,并可改变尺寸,能准确测量农田蒸

发蒸腾量,对实现蒸散量空间尺度转换起到了关键作用。

水稻是我国最主要粮食作物,占我国禾谷类总产量的33.4%,其种植面积约占我国粮食种植面积30%^[11]。水稻也是灌溉用水量最大的作物^[12-13],其用水量占农业用水量的65%以上^[14-15]。在全球气候变暖、水资源短缺加剧的情况下,发展节水农业、提高水资源利用率是保证我国粮食安全与水资源安全的重要途径^[16-17]。因此,研究节水灌溉下稻田蒸发蒸腾过程及其比例变化特征对了解稻田生态系统的水分运动、减少水的损失、保障我国粮食生产具有重要的现实意义。

针对不同作物和不同气候特征对作物实际蒸散量和参考蒸散发的研究很多^[18-21]。袁宏伟等^[22]采用不同方法对玉米蒸发蒸腾量进行了估算,但是并未区分蒸发量与蒸腾量,或刻画其比例变化过程。孙宏勇等^[23]对小麦的蒸发和蒸腾变化进行了研究,发现 E/ET_{CML} (E 为蒸发量, ET_{CML} 为生育期稻田蒸散量)在生育期内先减小、后逐渐增大,全生长期内平均约为0.31, E/ET_{CML} 研究结果与常规稻田有明显差异。王宇等^[24]研究发现,水稻整个生长期内蒸发量(E)呈“U”形变化,而蒸腾量(T)先增大、后减小,全生育期内 E 、 T 与 ET_{CML} 比值各约0.50。翁升恒等^[25]分析了江淮流域稻麦轮作作物 ET 变化特征,并利用通径分析方法对水稻 ET 的影响因子进行辨识,但研究结果与节水灌溉条件下不同^[26]。贾志军等^[27]以涡度相关系统测量值为标准,对适于三江平原稻田实际蒸散量的估算方法进行探讨。

本研究选择控制灌溉稻田为研究对象,利用自制微型蒸渗仪测定冠层尺度 ET_{CML} 和 E ,旨在以较低的投入准确获得冠层尺度 E 、 T 和 ET_{CML} 变化特征和比例关系,明确节水灌溉条件下稻田需耗水特征,从而指导农田灌溉,为节水灌溉稻田蒸散发双源模型的率定与构建、大田需耗水量的模拟与预测及对蒸散发时空尺度进行扩展研究提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年和 2016 年稻季在河海大学国家重点实验室昆山试验研究基地进行,该基地地处太湖流域水网区低洼平原(31°15'15" N,120°57'43" E),属亚热带南部季风气候区。年总降水量 1 097.1 mm,总蒸发量 1 365.9 mm,日照时数 2 085.9 h,年平均气温 15.5 ℃,平均相对湿度 83%,平均气压 1 016.3 hPa。水稻(晚稻)生育期平均气温 24.8 ℃,平均相对湿度 79.2%。试验区常年盛行东南风,土壤为潴育型黄泥土,耕层土壤为重壤土。观测场所监测下垫面为控制灌溉稻田,仅在水稻返青期田面保留 5~25 mm 薄水层,以后的各个生育期灌水制度以根层土壤含水率占饱和含水率 60%~80% 的组合为标准,灌溉后稻田不建立水层,水稻各生育期土壤水分调控指标与文献[28]相同。2015 年水稻于 6 月 27 日移栽,10 月 25 日收割,2016 年水稻于 7 月 1 日移栽,11 月 3 日收割,种植行距 0.16 m,株距 0.23 m。

1.2 观测仪器与观测内容

本研究结合大型称重蒸渗仪和棵间蒸发器的优势,考虑稻田环境特征和实际要求,自制了适用于稻田冠层尺度 ET_{CML} 测量的微型蒸渗仪(CML)和用于测量冠层覆盖下 E 的微型蒸渗仪(ML)。蒸渗仪的结构、放置方式与文献[29]相同。试验中,蒸渗仪内种植 4 穴水稻(每穴 3 株),CML 与 ML 内回填土与大田土壤状况保持一致,且灌溉制度、土壤水分含

量以及 CML 内水稻种植密度等在整个生育期内均与大田耕作条件及节水灌溉制度保持一致。传感器每 30 min 自动采集一次数据,根据水量平衡,以前后两次数据之差计算时间段内 ET_{CML} (测量精度 0.03 mm)和 E (测量精度 0.02 mm)。采用 2015 年和 2016 年水稻生长季节的观测数据进行分析,并定期对 CML 和 ML 系统进行标定、检测和维护,以保证试验正常进行。数据采用 SPSS 22.0 进行统计分析,Microsoft Excel 2003 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 典型天气冠层尺度蒸散量、蒸发量和蒸腾量的日变化特征

在 2015 年和 2016 年分别选择典型晴天(2015 年 7 月 28 日、2016 年 9 月 20 日)、典型阴天(2015 年 10 月 6 日、2016 年 9 月 10 日)和典型雨天(2015 年 8 月 16 日和 2016 年 8 月 4 日、8 月 26 日)为典型天气的观测资料,探讨亚热带南部季风气候区节水灌溉稻田 ET_{CML} 、 E 和 T 在不同典型天气下的日变化特征。

2.1.1 典型晴天

从图 1 可以看出,2015 年和 2016 年典型晴天 ET_{CML} 和 T 均呈明显的倒“U”形单峰变化趋势。典型晴天,蒸渗仪所测 ET_{CML} 和 T 都呈现出白天变化速率大、夜间变化速率小的趋势,且白天变幅较大,夜间变幅较小(± 0.18 mm/h)。具体来看,日出前 ET_{CML} 接近 0 mm/h,呈正负交替波动。日出后 ET_{CML} 变为正值且随着净辐射 R_n 的增强而迅速增加,日峰值出现时间为 12:00 左右,分别为 1.33、1.04 mm/h,然后减少。日落时 ET_{CML} 接近 0 mm/h,之后又呈现出在 0 mm/h 附近小幅度正负交替变化的趋势。负值的出现主要是由于夜间水汽凝结在作物以及土壤表面造成的。 T 的变化规律与 ET_{CML} 相同。从图 1a 还可看出,2015 年典型晴天, E 与 ET_{CML} 的变化趋势也相同,呈明显的倒“U”形单峰变化,但 2016 年典

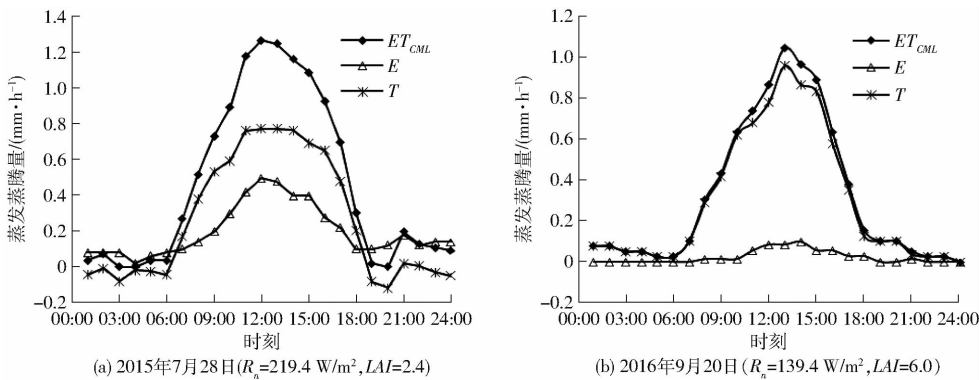


图 1 典型晴天水稻 ET_{CML} 、 E 和 T 日变化曲线

Fig. 1 Daily variation curves of evapotranspiration, transpiration and evaporation at typical sunny day

型晴天 E 的变化平缓,在正午时段稍大于零,这主要是由于选择的典型晴天所代表的生育期不同,不同生育期净辐射(R_n)等气象因素、土壤含水率(θ)等环境因素以及叶面积指数(LAI)等作物生长指标都不相同,2016 年 9 月 20 日,水稻刚进入乳熟期, LAI 相对最大,而 R_n 较 7、8 月弱,所以冠层覆盖条件下的 E 小,且占 ET_{CML} 比例小。2015 年 7 月 28 日,水稻处于分蘖中期, R_n 大而 LAI 相对乳熟期较小,所以, E 较大,正午时达到 0.5 mm/h 左右, E 与 ET_{CML} 的比值也大,约 0.45。

2.1.2 典型阴天

图 2 为典型阴天节水灌溉稻田 ET_{CML} 、 E 和 T 的日变化特征。典型阴天日照时数为零, ET_{CML} 和 T 变化相似,呈多峰变化趋势,变化速率不及晴天稳定。2015 年 10 月 6 日和 2016 年 9 月 10 日,日累计

ET_{CML} 分别为 2.64、2.39 mm/d,峰值分别为 0.34、0.28 mm/h,峰值出现时间不同,均小于相对应生育期晴天条件时,且变化曲线不如晴天条件下平滑,多为波动上升或波动下降。 E 没有明显的日变化特征,大多在 0~0.1 mm/h 之间波动,夜间有时小于 0 mm/h。并且所选择的两年典型阴天, ET_{CML} 、 E 和 T 的日变化曲线均有差异,这主要是由于所选择的典型阴天所处生育阶段不同,且阴天 R_n 小,受云层和云量干扰大而变化趋势不同,同时阴天蒸散量受风速等其他因素的影响较晴天时大,所以阴天白天 ET_{CML} 、 E 和 T 的变幅均不稳定,这与赵梦凡^[30]、李谦等^[31]在常规稻田的试验结果类似。但不同研究蒸散量峰值差异较大,这可能与区域气候差异和典型天气的选取有关,也与土壤水分状况密切相关^[32]。

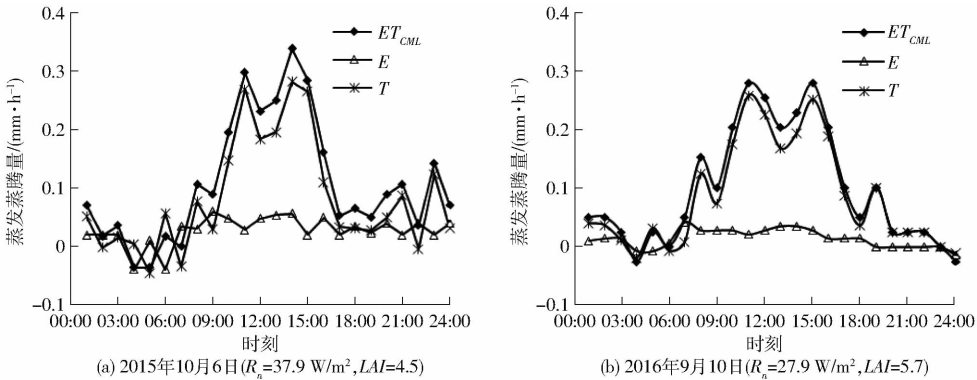


图 2 典型阴天水稻 ET_{CML} 、 E 和 T 日变化曲线
Fig.2 Daily variation curves of evapotranspiration, transpiration and evaporation at typical cloudy day

2.1.3 典型雨天

分别选择部分时段降雨(2015 年 8 月 16 日)和某时刻降小雨(2016 年 8 月 26 日)和某时刻降大雨(2016 年 8 月 4 日)3 种典型降雨日对蒸渗仪测量结果进行分析。从图 3 (图中 P 为降雨量)可以看出,蒸渗仪受降雨影响大,非降雨时刻蒸发蒸腾量和阴天时差别不大,但 ET_{CML} 、 E 和 T 的变化在降雨时刻以及降雨前后波动剧烈且测量不准确。2015 年 8 月 16 日 (图 3a), 01:00—11:00 有降雨,降雨量为

4.3 mm,降雨时 E 和 T 波动剧烈,无明显变化规律。 ET_{CML} 最大值出现在 12:00,约 0.4 mm/h,随后逐渐减小,夜间呈正负交替变化。降雨时,蒸渗仪测量值大幅度正负交替波动。2016 年 8 月 26 日 (图 3b) 10:00,降雨量为 0.4 mm, ET_{CML} 、 E 和 T 都明显降低。2016 年 8 月 4 日 (图 3c), 13:00—14:00 降雨量达到 19.4 mm, ET_{CML} 、 E 和 T 大幅度跌落。扣除降雨时增加的水量,蒸渗仪测得的蒸散量和蒸发量仍为负值。

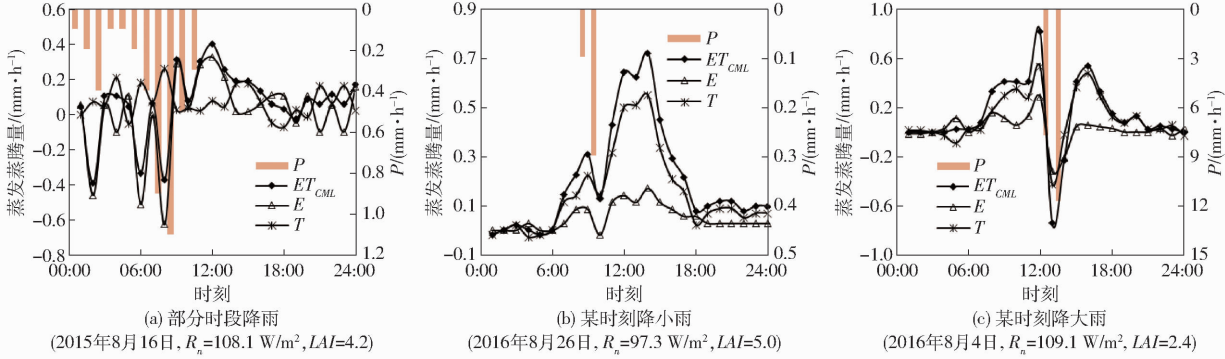


图 3 典型雨天水稻 ET_{CML} 、 E 和 T 日变化曲线
Fig.3 Daily variation curves of evapotranspiration, transpiration and evaporation at typical rainy day

研究普遍认为,降雨时特别雨量较大时蒸渗仪测量值有明显误差。宋克超等^[33]的研究也表明,在降雨影响下,微型蒸渗仪的观测结果即使经过修正,仍然不可靠。一方面是由于雨水降落对稻田产生了一定的冲击力,虽然用水量平衡法计算蒸散量时,考虑了降雨量对蒸渗仪质量变化的影响,但降雨特别是降雨强度较大时蒸渗仪对质量变化比较敏感,无法消除冲击力的影响,则会造成蒸散量计算结果的误差^[34]。另一方面,强降雨一般伴有大风,虽然风速不一定是影响蒸渗仪蒸散量测量值的显著影响因子^[35-37],但在强风条件下,风会对水稻冠层产生横向荷载,使蒸渗仪的负荷分布不均匀,蒸渗仪系统在偏载的情况下有一定的易变性,从而无法正确判断由蒸散损失导致的质量变化。所以,在强风天气下,蒸渗仪的测量值一般不能直接使用^[38]。除了瞬时影响,降雨过后的蒸渗仪测量值也需要一定的修正。因为水稻冠层对雨水有一定的截留作用,用蒸渗仪法计算蒸散量时没有考虑这部分截留水量对质量变化的影响,这也会对测量结果产生不可忽视的影响。同时,降雨后,蒸渗仪的边界阻止了蒸渗仪筒内积水的横向运动^[39],在第 2 天蒸渗仪排水前,蒸渗仪内

土壤含水率将高于大田土壤含水率,这也会导致所测蒸散量与大田环境不同。因此,计算蒸散蒸发量时,应尽量修正降雨后的测量数据,并剔除不合理的强降雨时段的测量值。

2.2 不同生育期蒸散量、蒸发量和蒸腾量的日变化特征

选取 2015 年和 2016 年水稻各生育期典型日进行蒸发蒸腾量的生育期日变化特征分析。由图 4、5 可知,节水灌溉稻田 ET_{CML} 与 T 均呈明显的倒“U”形单峰变化趋势,变化规律也基本保持一致。 E 在水稻生长初期也呈倒“U”形单峰变化,但在其他生育期内蒸发量较小,且日变化幅度不大。

由图 4 可知,分蘖前期(7 月 10 日)和中期(7 月 15 日), ET_{CML} 、 E 和 T 均呈明显的倒“U”形单峰变化。 ET_{CML} 日峰值分别为 0.87、0.57 mm/h,日累积值分别为 6.32、5.99 mm/d。 E 日峰值分别为 0.54、0.30 mm/h,日累积值分别为 4.55、4.00 mm/d。分蘖前中期水稻 LAI 小, E/ET_{CML} 分别为 0.72、0.67, E 较 T 占 ET_{CML} 的比例大,该生育阶段棵间蒸发是稻田蒸散的重要组成部分。分蘖后期(8 月 2 日), ET_{CML} 随着 R_n 的增强而增大,日峰值和日累积值分

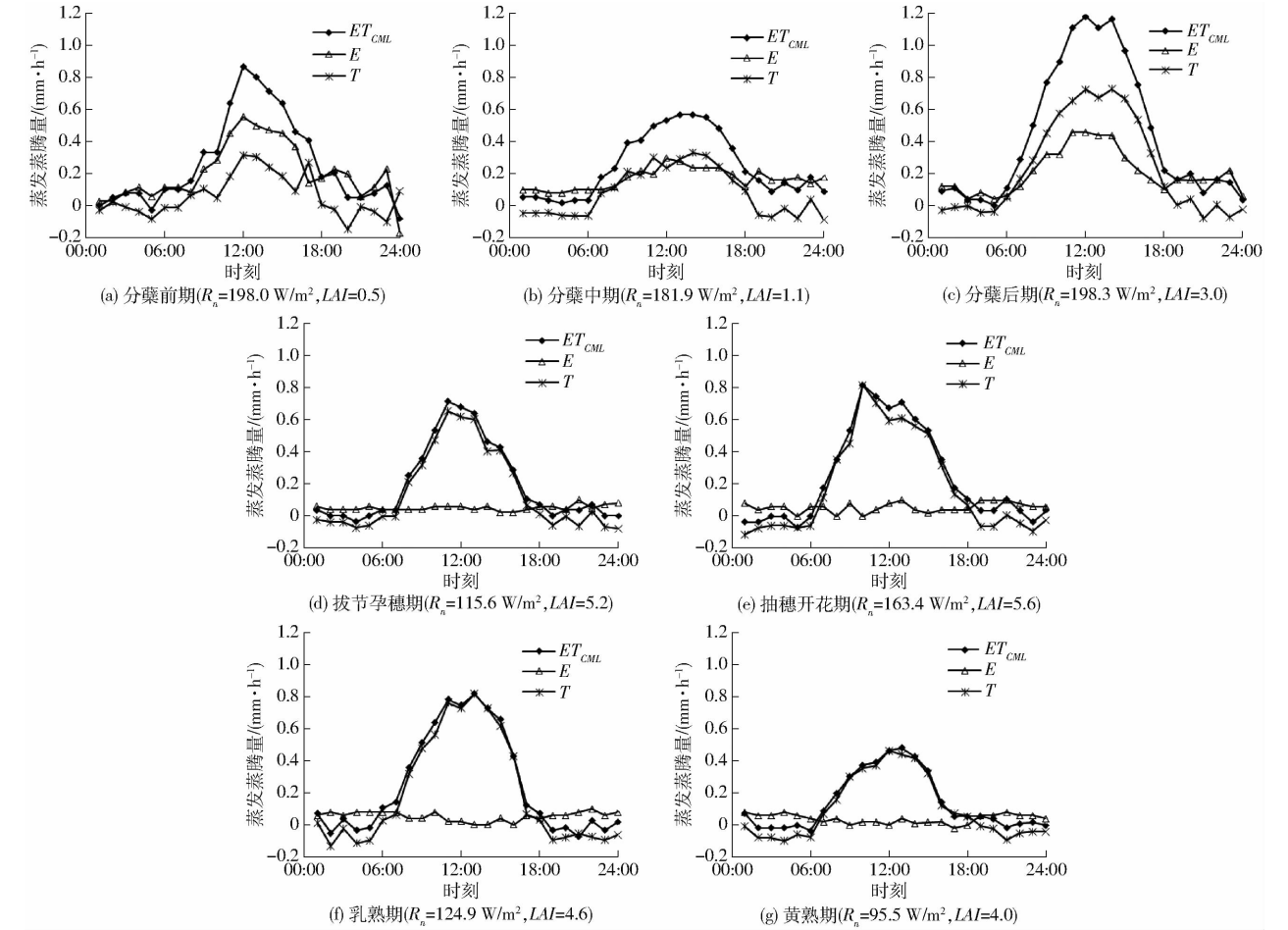


图 4 2015 年水稻各生育期典型日 ET_{CML} 、 E 和 T 日变化曲线

Fig. 4 Daily variation curves of evapotranspiration, evaporation and transpiration at different paddy growth stages in 2015

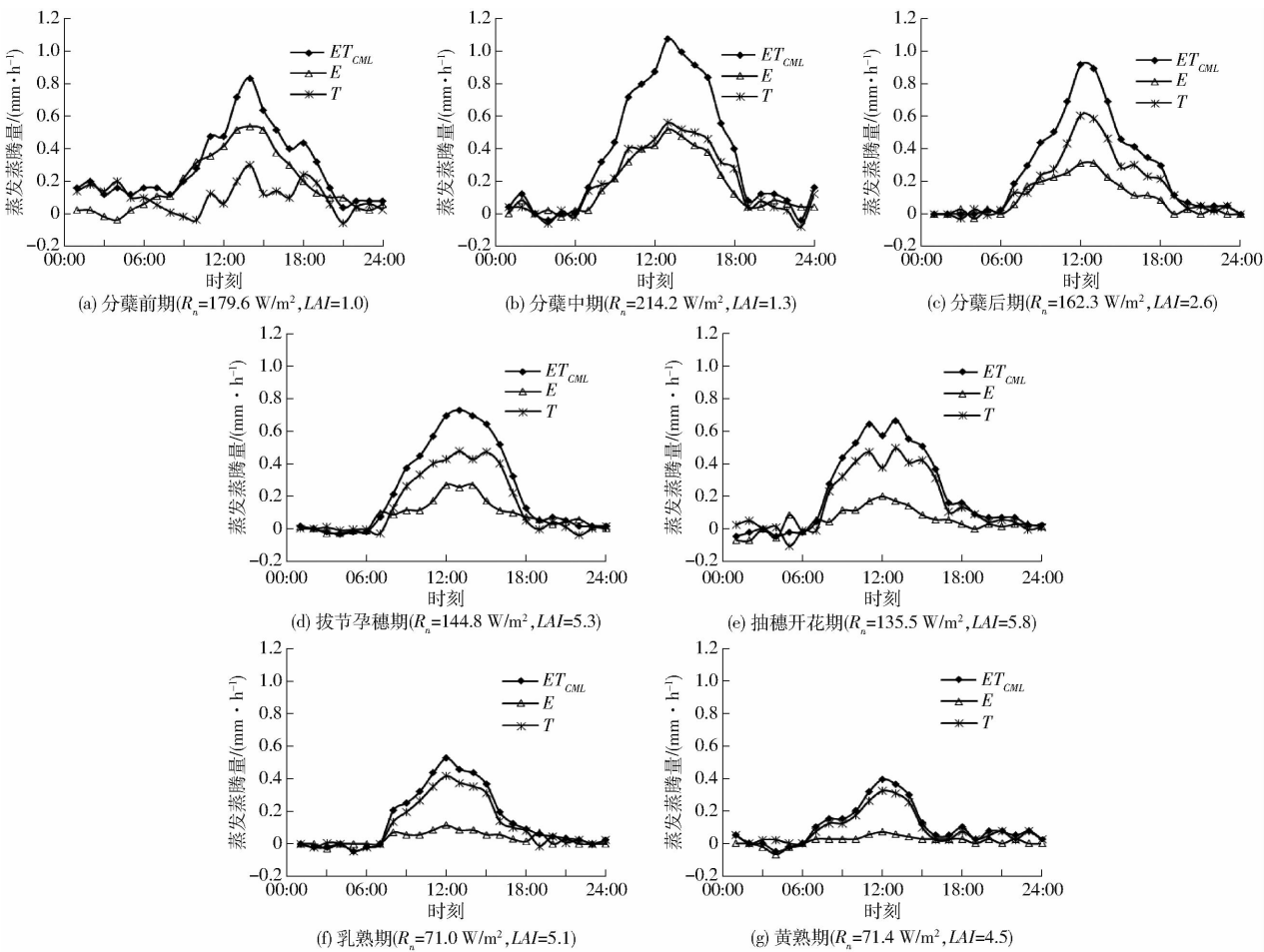


图 5 2016 年水稻各生育期典型日 ET_{CML} 、 E 和 T 日变化曲线

Fig. 5 Daily variation curves of evapotranspiration, evaporation and transpiration at different paddy growth stages in 2016

别为 1.18 mm/h、10.54 mm/d。峰现时间为 12:00 左右。 E 和 T 也较大,最大值分别为 0.46、0.72 mm/h,与 ET_{CML} 的比值分别为 0.46 和 0.54,水稻蒸腾量开始变为稻田蒸散量的主要部分。之后,随着水稻的生长(8 月 29 日、9 月 8 日、10 月 2 日和 10 月 18 日), E 变小,日累计值分别为 1.09、1.33、0.95、0.90 mm/d,且没有明显的日峰值和日变化特征。 T 也逐渐减小,日累计值分别为 3.44、4.56、3.99、2.50 mm/d,但日变化特征明显。 T/ET_{CML} 分别为 0.76、0.77、0.81、0.74, T 决定着稻田蒸散的大小和变化规律。

由图 5 可知, ET_{CML} 和 T 在各生育期典型日也均呈明显的倒“U”形单峰变化。分蘖前期(7 月 17 日), E 大于 T , ET_{CML} 、 E 和 T 日累积值分别为 6.92、4.46、2.45 mm/d。分蘖中期(7 月 23 日), ET_{CML} 、 E 和 T 均达到最大,日峰值分别为 1.07、0.52、0.56 mm/h,日累积值为 8.70、4.04、4.66 mm/d, T 稍大于 E 。分蘖中期以后, ET_{CML} 和 E 均逐渐减小,分蘖后期(8 月 5 日)、拔节孕穗期(9 月 1 日)、抽穗开花期(9 月 13 日)、乳熟期(10 月 10 日)和黄熟期(10 月 24 日), ET_{CML} 日累积值分别为 6.49、5.56、

5.09、3.49、2.64 mm/d, E 日累积值分别为 2.32、1.95、1.22、0.78、0.40 mm/d, T 日累积值分别为 4.17、3.61、3.87、2.71、2.24 mm/d,乳熟期和黄熟期, E 较小且无明显日变化特征。整个生育阶段, T 占 ET_{CML} 的比例逐渐增加,从分蘖前期到黄熟期, T/ET_{CML} 分别为 0.35、0.54、0.64、0.65、0.76、0.78 和 0.84, ET_{CML} 和 T 波动趋势相似, T 决定着稻田蒸散的日变化特征。

从图 4、5 中还可看出,受 R_n 和 LAI 等的影响,虽然 2015 年和 2016 年 ET_{CML} 最大的典型日分别出现在分蘖后期和分蘖中期,但总体变化趋势相同,均为先增加后减小,且 T 所占比例均从分蘖中期开始大于 E 。此外,从分蘖到黄熟的各个生育阶段,稻田夜间蒸散量小但波动相对较大,与旱地作物夜间蒸散小且变化平缓不同^[40-41],特别是在水稻生长的旺盛阶段, ET 和 T 在夜间呈明显的正负交替波动。

现实中,蒸散量是作物蒸腾量和棵间蒸发量的总和,一般情况下作物蒸腾量和棵间蒸发量都是正值,最小只能趋近于零。但本研究蒸渗仪所测的蒸散量和蒸发量均出现了负值,特别是在夜间 03:00—06:00,除了上述提到的降雨和风速等原因,还主要

受夜间水汽凝结的影响(图 1、2、4、5)。该试验区受季风气候和稻田下垫面的影响,空气湿度大,特别春秋季节晴朗天气的夜间,空气相对湿度一般在 90% 以上,夜间 03:00—06:00,空气相对湿度高达 95% 以上,且地表温度较低而露点温度较高,容易达到露形成条件^[42-43]。当冠层温度或土壤温度略低于大气露点温度,空气中的水汽便凝结成露^[44]。当凝结于叶片和土壤表面的水量大于蒸散量或蒸发量时,蒸渗仪测量值便表现为负值。同时,有水汽凝结时实际的蒸散量应包括凝结水量的蒸发,因此蒸渗仪测量的质量变化在有水汽凝结时比实际蒸散量小。另外,蒸渗仪的测量值在白天迅速增大和减小的过程中存在不平滑的起伏情况,以及夜间的正负交替波动,也是由于蒸渗仪仪器本身测量范围较小,灵敏度较高的性质所决定的。在今后的研究中,一方面应进一步探究相关外在因素对蒸渗仪测量值系统性、规律性的影响,如校正不同风速条件下蒸渗仪蒸散量测量值;另一方面应提高测量精度、完善测量方法,避免由于测量误差导致的数据不准确。

2.3 蒸散量、蒸发量和蒸腾量的逐日变化

2015 年和 2016 年水稻生长期间的气象条件属正常年份,水稻从移栽到成熟, ET_{CML} 、 T 和 E 的逐日变化如图 6(图中 Re、Et、Mt、Lt、Jb、Hf、Mi 和 Ye 分别表示返青期、分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期; I 表示灌水量)所示。从图 6a 可以看出,2015 年 T 与 ET_{CML} 逐日变化趋势及波动状况都基本一致,总体上为先增加后减小,高峰期出现在分蘖后期。 E 与 ET_{CML} 逐日变化趋势也较为接近,但波动没有 ET_{CML} 和 T 明显。从返青期到分蘖中期,由于太阳辐射较大,空气温度较高,冠层覆盖度较低, E 较大,且大于 T 。分蘖后期,随着 LAI 的增加, T 增加较快,与 E 相近。分蘖后期, ET_{CML} 、 E 和 T 均达到最大,最大值分别为 10.63、5.88、5.89 mm/d,平均值分别为 9.11、4.66、4.45 mm/d,随后 T 均大于 E 。在拔节孕穗期,由于影响蒸散的 R_n 和空气温度 T_a 等因素逐渐减小, ET_{CML} 和 E 也随之减小, T 与 ET_{CML} 波动趋势一致,但减小趋势不明显。抽穗开花期和乳熟期, E 缓慢减小, ET_{CML} 和 T 随 R_n 波动无明显增减趋势。黄熟期, R_n 和 T_a 继续下降, LAI 也逐渐下降,降雨量少且无灌水量,所以 E 小,平均值约为 0.57 mm/d, ET_{CML} 和 T 也呈下降趋势,平均值分别为 2.55、1.98 mm/d。全生育期 ET_{CML} 、 E 和 T 日均值分别为 4.68、1.78、2.90 mm/d。

2016 年, ET_{CML} 和 T 逐日变化波动起伏基本一致,且随 R_n 的增减均呈先增加后减小的趋势

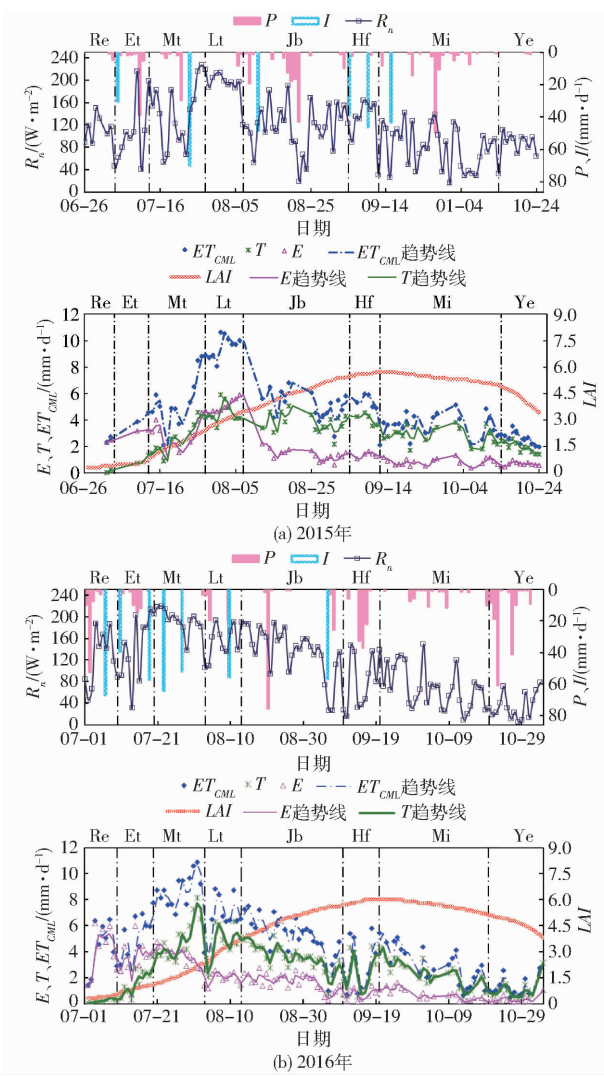


图 6 水稻全生育期 ET_{CML} 、 E 和 T 的逐日变化曲线

Fig. 6 Daily variation curves of evapotranspiration, evaporation and transpiration and ratio of evaporation to evapotranspiration for paddy field in growth stages

(图 6b)。 E 在水稻生育前期最大,随着水稻的生长逐渐减小。分蘖前期, E 大于 T ,分蘖中期以后, E 小于 T 。与 2015 年不同,2016 年 ET_{CML} 和 T 在分蘖中期达到最大,最大值分别为 10.88、8.15 mm/d, E 最大值出现在返青期(2015 年缺少返青期的蒸渗仪测量数据),为 6.18 mm/d。分蘖中期以后, ET_{CML} 、 E 和 T 均逐渐减小,从分蘖中期到黄熟期,各生育阶段 ET_{CML} 分别为 8.50、6.21、5.35、2.92、2.78、1.52 mm/d,平均为 4.39 mm/d, E 分别为 4.17、2.00、1.61、0.73、0.58、0.36 mm/d,平均为 1.65 mm/d, T 分别为 4.33、4.21、3.74、2.22、2.20、1.16 mm/d,平均为 2.74 mm/d,均逐渐减小。2015 年和 2016 年 ET_{CML} 、 E 和 T 日均值平均为 4.54、2.82、1.72 mm/d。

总体来看,2015 年和 2016 年冠层尺度蒸散量的生育期变化趋势大致相同,且均受环境因素影响,抽穗开花期虽然 LAI 达到最大,但受 R_n 、降雨等影

响, ET_{CML} 、 E 和 T 均低于分蘖期。水稻生长受气候条件及自身生长发育影响,存在明显的物候特征。本研究节水灌溉条件下 ET 变化特征与 LAGE 等^[45] 对相同生育阶段的晚稻研究结果一致,稻田蒸散量从水稻营养生长、生殖生长到成熟阶段逐渐减小。但与 ABDULLAHI 等^[46] 的结果略有不同,其研究表明稻田蒸散强度先增加后减小,但抽穗期达到最大。石建初等^[47] 也发现最大蒸腾耗水量在不同研究中存在明显差异,且存在明显的年际变化规律^[48]。但也有一些研究表明,尽管水稻生长环境不同,但 ET

一般在 LAI 最大的阶段达到最大。在巴西南部,水稻 ET 在 LAI 高峰期(开花期)达到最大值^[49],日本和加州研究者也报道了类似的现象^[50-51]。所以水稻 ET 变化特征是由气象条件和作物生长特性共同决定的。

2.4 棵间蒸发与水稻蒸腾的比例变化关系

表 1 为 2015 年和 2016 年水稻全生育期 E 和 T 的分配关系和比例变化。因为 ET_{CML} 和 E 为蒸渗仪系统测量值,而 T 为 ET_{CML} 与 E 相减计算得到,所以 E 与 T 占 ET_{CML} 的比例呈此消彼长的规律变化。

表 1 水稻全生育期蒸发蒸腾量与蒸散量的比例特征
Tab.1 Proportional characteristic values of evaporation and transpiration to evapotranspiration
at different paddy growth stages

年份	参数	返青期	分蘖前期	分蘖中期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	全生育期
2015	E/ET_{CML}	0.95	0.76	0.49	0.47	0.27	0.25	0.19	0.23	0.38
	T/ET_{CML}	0.05	0.24	0.51	0.53	0.73	0.75	0.81	0.77	0.62
	LAI	0.03	0.56	1.70	3.05	4.57	5.62	5.38	4.17	3.75
2016	E/ET_{CML}	0.95	0.70	0.49	0.34	0.30	0.25	0.21	0.24	0.35
	T/ET_{CML}	0.05	0.30	0.51	0.66	0.70	0.75	0.79	0.76	0.65
	LAI	0.03	0.84	1.62	3.01	4.86	5.88	5.70	4.68	4.00

对不同作物的农田下垫面,棵间蒸发均是灌溉用水的重要消耗途径,尤其是作物生育前期^[52-53]。本研究与前人研究结果相同,返青期,由于水稻冠层覆盖率最小, E 与 ET_{CML} 的比值最大,均约 0.95,田间耗水以棵间土面蒸发为主,特别是刚移栽后,棵间蒸发量接近时段耗水量,相应的该生育期 T 所占 ET_{CML} 比例最小。随着水稻的生长, E 占 ET_{CML} 的比例逐渐减小。分蘖期,水稻叶片数逐渐增加,叶片逐渐增大,且土壤表面含水率较低, E 占 ET_{CML} 的比例迅速下降。分蘖末期控制灌溉稻田土壤含水率控制下限最低, E 与 ET_{CML} 的比值 2015 年和 2016 年平均分别为 0.47 和 0.34。拔节孕穗和抽穗开花期,水稻转入旺盛的生殖生长阶段,需水强度大,且 LAI 继续增加,叶面蒸腾在阶段耗水中占据重要地位,棵间蒸发量占阶段耗水量的比例明显减小,所以 E 占 ET_{CML} 的比例继续下降,但下降速率有所减缓,2015 年和 2016 年拔节孕穗期 E 与 ET_{CML} 的比值分别为 0.26 和 0.30,抽穗开花期均为 0.25。乳熟期为水稻产量形成阶段, E 与 ET_{CML} 的比值达到最小,平均约为 0.19 和 0.21。之后水稻叶片变黄, LAI 有所减少,因此 E/ET_{CML} 黄熟期略有增加,2015 年和 2016 年平均分别为 0.23 和 0.24。 T 的变化规律与 E 相反,随着水稻的生长, T 占 ET_{CML} 的比例则逐渐增加,乳熟期达到最大,黄熟期略有减小。各生育期 E 和 T 占阶段耗水量的均值,以及 LAI 的均值如表 1 所示。2015 年和 2016 年水稻生育期 E/ET_{CML} 平均分

别为 0.38 和 0.35, LAI 平均分别为 3.75 和 4.00,同样表现为 LAI 越大, E 所占比例越小。从表 1 还可看出,节水灌溉稻田 E 和 T 贡献量相近时发生在分蘖中后期,2016 年较 2015 年稍有提前,可能因为 2016 年水稻移栽晚,水稻生育前期净辐射大,水稻生长快,使 T 增加的速率和 E 减小的速率较 2015 年大,所以蒸发量和蒸腾量相同发生在水稻分蘖中期。
 E 和 T 的水稻全生育期比例变化关系可以用随移栽时间变化的二次曲线来表示。2015 年和 2016 年, E 随移栽后时间变化的曲线方程分别为 $E/ET_{CML} = 9 \times 10^{-5} x^2 - 0.016x + 0.928$ 和 $E/ET_{CML} = 9 \times 10^{-5} x^2 - 0.015x + 0.871$, T 和 E 曲线方程的一次和二次项系数相同,但正负关系相反, T 随移栽后天数变化的曲线方程分别为 $T/ET_{CML} = -9 \times 10^{-5} x^2 + 0.016x + 0.061$ 和 $T/ET_{CML} = -9 \times 10^{-5} x^2 + 0.015x + 0.130$ 。2015 年和 2016 年 E 、 T 曲线变化趋势相似,决定系数均较高,分别为 0.897 和 0.875。

研究不同作物的棵间蒸发及其在作物总耗水量中所占的比例,可以明确减少农田棵间无效耗水的节水潜力,为节水农业的发展提供依据^[54]。研究发现,旱地作物蒸发量与蒸散量的比值普遍在 0.3 左右,淹灌稻田能达到 0.5^[54-55]。节水灌溉、薄膜覆盖、秸秆覆盖等措施均能有效减少无消耗水^[56]。本研究的节水灌溉制度能有效减少稻田土壤蒸发,建立的 T/ET_{CML} 和 E/ET_{CML} 生育期变化计算公式能准确地反映叶面蒸腾与棵间土壤蒸发的分摊关系,为双

源蒸散模型的改进与拟合提供了重要的数据支撑。

此外,普遍认为 LAI 不仅是影响蒸发蒸腾量比例的关键因素^[57],也是蒸散量空间尺度转换的关键变量^[58]。研究发现, E/ET_{CML} 可表示为 LAI 的对数、指数或二次等关系^[7,59-61]。节水灌溉条件下, E 占 ET_{CML} 的比例同样受 LAI 的影响,基本符合 LAI 增大, E/ET_{CML} 减小的变化规律。因此,本研究分别用 LAI 的对数、指数和二次关系来反映 E/ET_{CML} 的生育期变化规律(图 7),由图可知,2015 年和 2016 年 E/ET_{CML} 均与 LAI 的对数关系相关性最好, R^2 分别为 0.884 和 0.910,与 LAI 的指数关系相关性最差, R^2 分别为 0.803 和 0.761。因此,节水灌溉稻田水稻生育期棵间蒸发占稻田蒸散量的比例变化可以用 LAI 的对数曲线来表示,2015 年和 2016 年拟合曲线分别为 $E/ET_{CML} = -0.259\ln LAI + 0.658$ 和 $E/ET_{CML} = -0.241\ln LAI + 0.642$ 。 E/ET_{CML} 随 LAI 的增加而呈对数函数形式下降,当 $LAI < 1.5$ 时, E/ET_{CML} 随 LAI 的增加迅速减少,拟合曲线斜率较陡;当 $1.5 \leq LAI < 4.5$ 时, E/ET_{CML} 随 LAI 的增加而减小的速率变缓;当 $LAI \geq 4.5$,拟合曲线斜率平缓, E/ET_{CML} 对 LAI 的

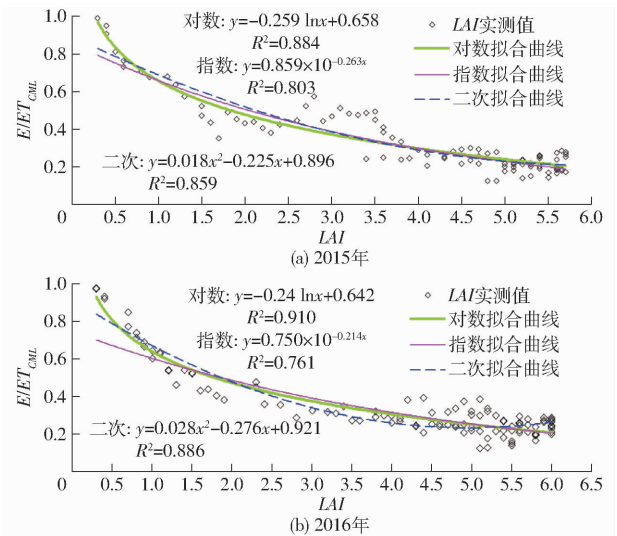


图 7 E/ET_{CML} 随 LAI 的变化曲线

Fig. 7 Relationship change curves of ratio of evaporation to evapotranspiration with leaf area index

增加反应较为不敏感。本研究明确了 E 和 T 的比例变化规律,得到了节水灌溉条件下稻田 E 占 ET_{CML} 的比例与水稻移栽时间和 LAI 的对数相关系数,该计算公式对今后蒸散模型的改进、稻田节水用水管理和水稻灌溉制度的优化具有重要的现实意义。

3 结论

(1)晴天 ET_{CML} 、 T 和 E 呈倒“U”形单峰变化;阴天 ET_{CML} 和 T 多峰,且变化速率不稳定, E 多在 0 ~ 0.10 mm/h 波动,无明显日变化特征;降雨特别是雨量较大时,蒸渗仪测量值有明显误差。微型蒸渗仪测量 ET_{CML} 和 E 会因降雨和灌水、强风、水汽凝结、边界效应、水稻生长等因素而影响数据可靠性。

(2)各生育期 ET_{CML} 和 T 的日变化均呈明显的倒“U”形单峰变化, E 仅在初期保持倒“U”形,后期无明显特征。在分蘖中期后, T 决定着稻田蒸散的大小和变化规律。 ET_{CML} 与 T 的逐日变化趋势基本一致,随 R_n 的变化先增加,在分蘖中后期达到峰值,在抽穗开花期虽然 LAI 达到最大,但受 R_n 、降雨等影响 ET_{CML} 、 E 和 T 均低于分蘖期。2015 年和 2016 年全生育期 ET_{CML} 、 T 和 E 日平均值分别为 4.54、2.82、1.72 mm/d。水稻生长受气候条件及自身生长发育影响,存在明显的物候特征。

(3)2015 年和 2016 年水稻生育期 E/ET_{CML} 平均分别为 0.38 和 0.35,返青期稻田 E 所占比例达到 0.95,随水稻生长占比逐渐减小, T 占 ET_{CML} 的比例逐渐增加,乳熟期达到最大,黄熟期略有减小。 E 和 T 的贡献量在分蘖中后期相近,随后 E 的贡献量迅速降低。节水灌溉制度能有效减少稻田土壤的蒸发, E 占 ET_{CML} 的比例可用其与水稻移栽时间和叶面积指数的对数关系进行准确描述,建立的 T/ET_{CML} 和 E/ET_{CML} 生育期变化计算公式能准确地反映水稻蒸腾与棵间土壤蒸发的分摊关系。本研究可在指导农田灌溉、提高农业用水利用效率方面发挥重要作用,也可为双源蒸散模型的构建提供关键的基础数据。

参 考 文 献

[1] 阳伏林, 张强, 王润元, 等. 黄土高原半干旱区农田生态系统蒸散与作物系数特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1209 - 1214.
YANG Fulin, ZHANG Qiang, WANG Runyuan, et al. Characteristics of evapotranspiration and crop coefficient of agroecosystems in semi-arid area of Loess Plateau, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1209 - 1214. (in Chinese)

[2] 吴友杰, 杜太生. 基于氧同位素的玉米农田蒸散估算和区分[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 127 - 134.
WU Youjie, DU Taisheng. Estimating and partitioning evapotranspiration of maize farmland based on stable oxygen isotope [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 127 - 134. (in Chinese)

[3] 刘战东, 秦安振, 宁东峰, 等. 降雨级别对农田蒸发和土壤水再分布的影响模拟[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 1 - 8.
LIU Zhandong, QIN Anzhen, NING Dongfeng, et al. Effective of simulated different rainfall intensities on soil evaporation and

- water redistribution in crop field [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(8): 1–8. (in Chinese)
- [4] 郝虹. 山西中部旱地农田蒸发与蒸腾量研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
HAO Hong. Study on the evaporation and transpiration in dry land in the middle of Shanxi[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- [5] 胡兵辉, 王维, 张红芳. 西南干热河谷休闲农田温度与蒸发量日变化规律及协同关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(5): 259–265.
HU Binghui, WANG Wei, ZHANG Hongfang. Daily variation rule and synergic relation of fallow farmland temperature with evaporation in southwest dry-hot valley[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 259–265. (in Chinese)
- [6] 刘海军, 康跃虎, 刘士平. 喷灌对冬小麦生长环境的调节及其对水分利用效率影响的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 46–51.
LIU Haijun, KANG Yuehu, LIU Shiping. Regulation of field environmental condition by sprinkler irrigation and its effect on water use efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(6): 46–51. (in Chinese)
- [7] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 等. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 17–22.
WANG Jian, CAI Huanjie, KANG Yanxia, et al. Ratio of soil evaporation to the evapotranspiration for summer maize field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(4): 17–22. (in Chinese)
- [8] 张宝忠, 许迪, 刘钰, 等. 多尺度蒸散发估测与时空尺度拓展方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 8–16.
ZHANG Baozhong, XU Di, LIU Yu, et al. Review of multi-scale evapotranspiration estimation and spatio-temporal scale expansion [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(6): 8–16. (in Chinese)
- [9] HOWELL T A, SCHNEIDER A D, DUSEK D A, et al. Calibration and scale performance of bushland weighing lysimeters[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(4): 1019–1024.
- [10] CHAVEZ 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.
- [11] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [12] 中华人民共和国水利部. 2018 年中国水资源公报[M]. 北京: 水利水电出版社, 2018.
- [13] 赵江辉. 湿润灌溉条件下水稻需水强度预测模型研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011.
ZHAO Jianghui. Study on rice water demand prediction models under the wetting irrigation [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011. (in Chinese)
- [14] 程建平. 水稻节水栽培生理生态基础及节水灌溉技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
CHENG Jianping. Study on foundation of physiocology and technique of water-saving irrigation for rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [15] BELDER P, BOUMAN B A M, CABANGON R, et al. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65(3): 193–210.
- [16] 杨春. 我国水资源保护现状及思考[J]. *资源节约与环保*, 2014(4): 88.
- [17] 姚林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1381–1387.
YAO Lin, ZHENG Huabin, LIU Jianxia, et al. Current situation and prospect of rice water-saving irrigation technology in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1381–1387. (in Chinese)
- [18] 韩焕豪, 崔远来, 王树鹏, 等. 云南省参考作物蒸发蒸腾量时空变化特征[J]. *节水灌溉*, 2016(8): 182–186.
HAN Huanhao, CUI Yuanlai, WANG Shupeng, et al. Temporal and spatial variations of reference crop evapotranspiration in Yunnan Province [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(8): 182–186. (in Chinese)
- [19] 王萌萌, 吕廷波, 何新林, 等. 玛河灌区参考作物蒸发蒸腾量时空分布特征与成因分析[J]. *节水灌溉*, 2017(12): 44–47.
WANG Mengmeng, LÜ Tingbo, HE Xinlin, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes of reference crop evapotranspiration in Manasi River Irrigated Area [J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(12): 44–47. (in Chinese)
- [20] ZHENG Z Y, LI X Y, LIU L J, et al. Influence of mulched drip irrigation on landscape scale evapotranspiration from farmland in an Arid Area [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 230: 105953.
- [21] HUSSAIN M Z, HAMILTON S K, BHARDWAJ A K, et al. Evapotranspiration and water use efficiency of continuous maize and maize and soybean in rotation in the Upper Midwest U. S. [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 92–98.
- [22] 袁宏伟, 崔毅, 蒋尚明, 等. 基于大型蒸渗仪和遗传算法的受旱玉米蒸发蒸腾量估算[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 326–335.
YUAN Hongwei, CUI Yi, JIANG Shangming, et al. Estimation of maize evapotranspiration under drought stress based on large-scale lysimeter and genetic algorithm [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 326–335. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181037&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.037. (in Chinese)
- [23] 孙宏勇, 刘昌明, 张喜英, 等. 华北平原冬小麦田间蒸散与棵间蒸发的变化规律研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3): 62–64.
SUN Hongyong, LIU Changming, ZHANG Xiyong, et al. The changing laws of the diurnal evapotranspiration and soil evaporation between plants in the winter wheat field of the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3): 62–64. (in Chinese)
- [24] 王宇, 周莉, 贾庆宇, 等. 基于 Shuttleworth–Wallace 模型的水稻蒸散组分模拟及其特征分析[J]. *中国农业气象*,

- 2017, 38(11): 709–719.
- WANG Yu, ZHOU Li, JIA Qingyu, et al. Characteristics of evapotranspiration and its components simulated using Shuttleworth–Wallace model in rice paddy field [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 38(11): 709–719. (in Chinese)
- [25] 翁升恒, 张方敏, 冯妍, 等. 江淮流域稻麦轮作蒸散特征及其影响因子[J]. 节水灌溉, 2020(8): 27–33, 39.
- WENG Shengheng, ZHANG Fangmin, FENG Yan, et al. Characteristics of evapotranspiration and its influencing factors in rice-wheat rotation in the Jianghuai River Basin [J]. Water Saving Irrigation, 2020(8): 27–33, 39. (in Chinese)
- [26] 刘笑吟, 徐俊增, 杨士红, 等. 节水灌溉稻田蒸散时空尺度特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 42–51.
- LIU Xiaoyin, XU Junzeng, YANG Shihong, et al. Characteristics and influencing factors of evapotranspiration in water-saving irrigation paddy field on different space-time scales [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 42–51. (in Chinese)
- [27] 贾志军, 姬兴杰. 三江平原稻田蒸散量模拟研究[J]. 中国农业气象, 2014, 35(4): 380–388.
- JIA Zhijun, JI Xingjie. Simulation study on evapotranspiration of rice paddy in the Sanjiang Plain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(4): 380–388. (in Chinese)
- [28] XU J Z, PENG S Z, YANG S H, et al. Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements [J]. Agricultural Water Management, 2011, 104: 184–192.
- [29] 刘笑吟, 王冠依, 杨士红, 等. 不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 91–100, 170.
- LIU Xiaoyin, WANG Guanyi, YANG Shihong, et al. Influence factors and characteristics of transpiration and evaporation in water-saving irrigation paddy field under different temporal scales [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 91–100, 170. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.013. (in Chinese)
- [30] 赵梦凡. 小流域和田块尺度稻田水热通量特征及灌溉影响分析[D]. 南京:南京信息工程大学, 2018.
- ZHAO Mengfan. Characteristics of water and heat fluxes and analysis of impacts of irrigation in small watershed and field scales in paddy fields [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2018. (in Chinese)
- [31] 李谦, 景元书, 马美娟, 等. 低丘红壤区稻田实际蒸散特征及其气象影响因素[J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 219–226.
- LI Qian, JING Yuanshu, MA Meijuan, et al. The characteristics of actual evapotranspiration and influencing factors of paddy field in low hilly red soil region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 219–226. (in Chinese)
- [32] 戴平, 李涵茂, 方丽, 等. 双季晚稻农田蒸散量估算研究[J]. 江西农业学报, 2015, 27(11): 73–75.
- DAI Ping, LI Hanmao, FANG Li, et al. Research on estimation of evapotranspiration of double-cropping late rice field [J]. Acta Agricultural Jiangxi, 2015, 27(11): 73–75. (in Chinese)
- [33] 宋克超, 康尔泗, 金博文, 等. 两种小型蒸渗仪在黑河流域山区植被带的应用研究[J]. 冰川冻土, 2004(5): 617–623.
- SONG Kechao, KANG Ersi, JIN Bowen, et al. Measurement of evapotranspiration by the microlysimeters in the mountain vegetation zone of the Hei River Basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004(5): 617–623. (in Chinese)
- [34] 康燕霞. 波文比和蒸渗仪测量作物蒸发蒸腾量的试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- KANG Yanxia. Study on the measuring method of lysimeter and bowen-ratio energy balance system of crop evapotranspiration by experiment [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese)
- [35] 唐婉莹. 夏玉米蒸散特征及参考作物蒸散模型优化[D]. 合肥:安徽农业大学, 2019.
- TANG Wanying. Evapotranspiration characteristics of summer maize and optimization of reference crop evapotranspiration model [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [36] 杨宜, 李银坤, 陶虹蓉, 等. 基于称重式蒸渗仪的温室秋茬礼品西瓜蒸散特征及影响因子[J]. 节水灌溉, 2018(12): 8–11.
- YANG Yi, LI Yinkun, TAO Hongrong, et al. Evapotranspiration characteristics and influence factors of autumn mini-watermelon in greenhouse on the basis of weighing lysimeter [J]. Water Saving Irrigation, 2018(12): 8–11. (in Chinese)
- [37] 杨光超, 朱忠礼, 谭磊, 等. 怀来地区蒸渗仪测定玉米田蒸散发分析[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 1095–1106.
- YANG Guangchao, ZHU Zhongli, TAN Lei, et al. Analysis on evapotranspiration of maize field measured by lysimeters in Huailai [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(4): 1095–1106. (in Chinese)
- [38] 王富庆, 许雅欣, 高士佩, 等. 自动地下轨道称重式蒸渗仪测控系统的研制[J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 36–39.
- WANG Fuqing, XU Yaxin, GAO Shipai, et al. Development of an automatic underground orbital weighing lysimeter system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(8): 36–39. (in Chinese)
- [39] DING R S, KANG S Z, LI F S, et al. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 87–95.
- [40] 杨晓光, 沈彦俊. 麦田水热传输的控制效应及非线性特征分析[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 101–104.
- YANG Xiaoguang, SHEN Yanjun. Controlling effects and nonlinear characteristics of water heat transport in wheat field [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(1): 101–104. (in Chinese)
- [41] 莫兴国, 刘苏峡. 麦田能量转化和水分传输特征[J]. 地理学报, 1997, 52(1): 37–44.
- MO Xingguo, LIU Suxia. Characteristics of energy partitioning and water transfer in winter wheat field [J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(1): 37–44. (in Chinese)
- [42] KALTHOFF N, FIEBIGWITTMACK M, MEISSNER C, et al. The energy balance, evapotranspiration and nocturnal dew

- deposition of an arid valley in the Andes [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(3): 420–443.
- [43] ZHANG Q, WANG S, YANG F L, et al. Characteristics of dew formation and distribution, and its contribution to the surface water budget in a semi-arid region in China [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 154(2): 317–331.
- [44] GRAF A, KUTTLER W, WERNER J. Mulching as a means of exploiting dew for arid agriculture [J]. *Atmospheric Research*, 2008, 87(3): 369–376.
- [45] LAGE M, BAMOUH A, KARROU M, et al. Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman – Monteith and Pan evaporation methods under Moroccan conditions [J]. *Agronomie*, 2003, 23(7): 625–631.
- [46] ABDULLAHI A S, SOOM M, AMIN M, et al. Characterization of rice (*Oryza sativa*) evapotranspiration using micro paddy lysimeter and class “A” pan in tropical environments[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2013, 7: 650–658.
- [47] 石建初, 金欣欣, 李森, 等. 覆膜旱作稻田水均衡及蒸腾耗水规律分析[J]. *水利学报*, 2016, 47(10): 1260–1268.
SHI Jianchu, JIN Xinxin, LI Sen, et al. Transpiration analysis based on water balance in a ground cover rice production system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(10): 1260–1268. (in Chinese)
- [48] 梁金博. 不同气候区参考作物蒸散量时间尺度特征分析及预测[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
LIANG Jinbo. Analysis and prediction of time scale characteristics of reference crop evapotranspiration in different climatic regions[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [49] TIMM A U, ROBERTI D R, STRECK N A, et al. Energy partitioning and evapotranspiration over a rice paddy in southern Brazil [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(5): 1975–1988.
- [50] TYAGI N K, SHARMA D K, LUTHRA S K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(1): 41–54.
- [51] HATALA J A, DETTO M, SONNENTAG O, et al. Greenhouse gas (CO_2 , CH_4 , H_2O) fluxes from drained and flooded agricultural peatlands in the Sacramento-San Joaquin Delta [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 150(6): 1–18.
- [52] LIU C, ZHANG X, ZHANG Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighting lysimeter and macro-lysimeter[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109–120.
- [53] YAN H, ZHANG C, OUE H, et al. Study of evapotranspiration and evaporation beneath the canopy in a buckwheat field [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 122(3): 721–728.
- [54] 裴冬, 张喜英, 李坤. 华北平原作物棵间蒸发占蒸散比例及减少棵间蒸发的措施[J]. *中国农业气象*, 2000, 21(4): 33–37.
PEI Dong, ZHANG Xiyong, LI Kun. The proportion of the evaporation to evapotranspiration and the measures to reduce the evaporation in North China Plain [J]. *Agricultural Meteorology*, 2000, 21(4): 33–37. (in Chinese)
- [55] 聂晓, 王毅勇, 刘兴土. 节水灌溉对三江平原寒地水稻生理生态需水和产量的影响[J]. *华北农学报*, 2011, 26(6): 168–173.
NIE Xiao, WANG Yiyong, LIU Xingtu. Effects of water-saving irrigation on ecological and physiological water requirement and yield of cold rice at Sanjiang Plain [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(6): 168–173. (in Chinese)
- [56] 蔡守华, 赵明华. 稻田节水潜力与节水策略[J]. *中国农村水利水电*, 2004(4): 7–9.
CAI Shouhua, ZHAO Minghua. Water-saving potential and strategies for paddy rice [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2004(4): 7–9. (in Chinese)
- [57] KATO T, KIMURA R, KAMICHIKA M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65(3): 173–191.
- [58] CAI JB, XU D, YU L, et al. Scaling effects and transformation of crop evapotranspiration for winter wheat after reviving [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(7): 862–869.
- [59] BRISSON N, SEGUIN B, BERTUZZI P. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1992, 59(3–4): 267–287.
- [60] 刘浩, 段爱旺, 高阳. 间作种植模式下冬小麦棵间蒸发变化规律及估算模型研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 34–38.
LIU Hao, DUAN Aiwang, GAO Yang. Soil evaporation variation and estimating model from winter wheat field in intercropping patterns[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12): 34–38. (in Chinese)
- [61] ZHANG C, YAN H, SHI H, et al. Study of crop coefficient and the ratio of soil evaporation to evapotranspiration in an irrigated maize field in an arid area of Yellow River Basin in China [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2013, 121(3): 207–214.