

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.013

不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析

刘笑吟^{1,2} 王冠依² 杨士红^{1,2} 徐俊增^{1,2} 王乙江³

(1. 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; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 3. 昆山市水利工程质量安全监督和水利技术推广站, 昆山 215300)

摘要: 利用自制小型蒸渗仪系统在江苏省昆山市试验研究基地测定了2015年水稻生育期稻田蒸散量和土壤蒸发量,分析了节水灌溉稻田蒸散量、水稻蒸腾量和土壤蒸发量在水稻生育各期的日变化规律和稻季逐日变化趋势及分配特征,分别讨论了不同时间尺度上蒸腾量和蒸发量与净辐射(R_n)、叶面积指数(LAI)、饱和水汽压差(D)、空气温度(T_a)、风速(V)和表层土壤含水率(W)的相关关系。结果表明,节水灌溉稻田蒸散量(ET)与水稻蒸腾量(T)均呈明显的倒“U”型单峰变化趋势,变化规律也基本保持一致。土壤蒸发量(E)在水稻生育前期也呈倒“U”型单峰变化,之后没有明显的日变化特征。夜间蒸腾量正负波动,水汽凝结对蒸渗仪的测量产生了不可忽视的影响。水稻生育期的 T 与 ET 逐日变化趋势及波动状况也都基本一致,总体上为先增加后减小,高峰期出现在分蘖后期。以分蘖后期为界,之前稻田蒸散以蒸发为主,之后以蒸腾为主。从水稻移栽到乳熟, E/ET 从接近1逐渐减小至0.19,黄熟期略有增加。在小时和日时间尺度上,影响节水灌溉稻田蒸腾量与蒸发量的主要因素不完全相同,影响程度也不相同。 R_n 和LAI分别是小时和日尺度上水稻蒸腾量最主要的影响因素,而LAI和 D 则分别是两尺度上土壤蒸发量最主要的影响因素。在所有因素中,LAI对两时间尺度蒸腾量和蒸发量均有显著影响($\alpha < 0.001$)。尺度差异的分析对田间水分管理及水转化研究都有重要的现实意义。

关键词: 节水灌溉稻田; 蒸腾量; 蒸发量; 小型蒸渗仪; 时间尺度

中图分类号: S271 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)08-0091-10

Influence Factors and Characteristics of Transpiration and Evaporation in Water-saving Irrigation Paddy Field under Different Temporal Scales

Liu Xiaoyin^{1,2} Wang Guanyi² Yang Shihong^{1,2} Xu Junzeng^{1,2} Wang Yijiang³(1. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
3. Kunshan Water Conservancy Engineering Quality and Safety Supervision and Water Technology Popularization Station, Kunshan 215300, China)

Abstract: Rice evapotranspiration and soil evaporation were measured by using canopy mini-lysimeter system in rice growth period in 2015 with water saving irrigation in the South China Plain. The characteristics of diurnal variation in typical days and daily variation during the whole growth period for evapotranspiration (ET), transpiration (T) and evaporation (E) were analyzed. The ratio of E to ET was also discussed. In addition, the correlations between T , as well as E , and related factors at hourly and daily scales were studied based on multiple linear regression method. The results illustrated that the diurnal variations of ET and T were basically consistent, which presented as the singlet trend of inverted “U” shape obviously. At the stage of tillering, E was also varied diurnally in unimodel shape, while

收稿日期: 2016-01-15 修回日期: 2016-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209066, 51579070)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015B34514, 2014B17114)、国家重点实验室创新青年学者项目(20145027912)和河海大学国家级大学生创新训练计划项目(201510294012)

作者简介: 刘笑吟(1989—),女,博士生,主要从事节水灌溉农田水热通量研究, E-mail: liu_xyin@sina.com

通信作者: 杨士红(1983—),男,副教授,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究, E-mail: ysh7731@hhu.edu.cn

there was no obviously diurnal variation after tillering stage. Positive and negative fluctuations of ET at night indicated that the influence of water vapor condensation on measurement of mini-lysimeter cannot be ignored. The daily variation trend of T was also similar to ET , and the two values were increased firstly and then decreased, with peak value occurred at late tillering stage. Moreover, rice evapotranspiration was soil evaporation primarily before late tillering stage, and later transpiration was dominant. The ratio of E to ET was varied from 1 to 0.19 with the growth of rice, and it was increased slightly in the ripening stage with value of 0.23. The main factors that affected transpiration and evaporation of water saving irrigation paddy fields were not identical at hourly and daily temporal scales. Net radiation (R_n) and leaf area index (LAI) were the main influence factors for rice transpiration at hourly and daily scales, respectively, while LAI and vapor pressure difference (D) were the main influence factors for soil evaporation at the two scales, respectively. LAI had significant effect on transpiration and evaporation at both temporal scales ($\alpha < 0.001$), albeit in varying degrees. The analysis of scale difference had important and practical significance to the research of water management and water transformation in the field.

Key words: water-saving irrigation paddy field; transpiration; evaporation; mini-lysimeter; temporal scale

引言

农田蒸发蒸腾量是陆地表层水热循环中最大、最难估算的分量之一,是一个发生在相当复杂体系内的连续过程,具有明显的时空尺度特征和空间变异性。棵间蒸发在农田水量平衡和能量平衡计算中占有十分重要的地位,是农田水循环的重要环节之一^[1]。当作物叶面积指数较小,灌溉或降雨后,棵间蒸发便会明显增大^[2-3],这导致农田灌溉管理、作物产量估计及土壤水分预报等许多问题都与农田蒸散量和土壤蒸发量紧密相关^[4]。在当前结构性缺水、水质性缺水和资源性缺水的大环境下,节水灌溉稻田的发展与普及势在必行^[5]。只有明确了节水灌溉条件下稻田蒸发蒸腾规律、比例关系及影响因素,才能准确地估算农田土壤水分动态,减少无效的水分散失,制定合理的灌溉制度,这对发展节水农业具有重要的现实意义。

蒸渗仪法是直接测定生态系统蒸散量最经典的方法,早在19世纪后期就已经用于研究植物水分状况,现在蒸渗仪已成为测定冠层尺度蒸腾蒸发的标准仪器^[6-7]。但大型蒸渗仪建造价格昂贵,且安装维护需要耗费大量的时间,以至其适用性较低。目前,另一种价格便宜、灵敏度高、简单实用的测量农田蒸发蒸腾的方法是小型蒸渗仪法。综合大型蒸渗仪和棵间蒸发器的原理,小型蒸渗仪的结构与布置可根据不同的现场条件和试验要求进行适当的改变,既可用于测定裸土土面蒸发^[8-9],也可用于测定作物冠层下的土壤蒸发^[10],改进后还可用于测定冠层蒸散量^[11]。

分析国内外已有研究成果可以看出,目前农田蒸散研究多集中在小麦、玉米等旱作植物上,针对水稻的不多,相关研究也是在淹水灌溉条件下进行。同时,稻田冠层尺度蒸发蒸腾量的直接测定少有成果,如何将土壤蒸发与叶面蒸腾合理区分也一直是研究难题,并且也没有分别对蒸腾量和蒸发量影响因素的讨论。因此,本研究选择控制灌溉稻田为研究对象,利用自制小型蒸渗仪测定冠层蒸散量和土壤蒸发量,分析蒸发蒸腾量的日内变化规律以及逐日变化趋势,明确蒸发量在水稻生育期蒸散量中的比例变化,并探究不同时间尺度上影响蒸发量和蒸腾量的相关因素,旨在实现以较低的投入准确获得节水灌溉条件下冠层尺度蒸腾量和蒸发量变化特征和比例关系,明确其不同时间尺度下的影响因素,指导农田灌溉。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于河海大学国家重点实验室昆山试验研究基地(31°15'15" N, 120°57'43" E),地处太湖流域水网区低洼平原,属亚热带南部季风气候区。年总降水量1 097.1 mm,年总蒸发量1 365.9 mm,年平均气压1 016.3 hPa,年日照时数2 085.9 h,年平均气温15.5℃,水稻生育期平均气温24.8℃,年平均相对湿度83%,稻季平均相对湿度79.2%。试区土壤为潜育型黄泥土,耕层土壤为重壤土。试验区常年盛行东南风,观测场所监测下垫面为控制灌溉的稻田,控制灌溉处理在返青期田面保留5~25 mm薄水层,以后的各个生育期灌溉后稻田不建立水层,

以根层土壤含水率占饱和含水率 60% ~ 80% 的组合为灌水控制指标,各生育期具体土壤水分调控指标与文献[12]相同,2015 年稻田控制灌溉具体灌水日期和灌水量见表 1。

表 1 2015 年控制灌溉稻田的灌水日期和灌水量

Tab. 1 Irrigation date and amount of paddy field under controlled irrigation in 2015 mm

灌水日期	泡田	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
06-23	07-05	07-25	08-09	09-03	09-07
118.0	30.4	70.2	48.1	38.6	46.3
					43.2

1.2 观测仪器与观测内容

1.2.1 自制小型蒸渗仪系统

本研究设计的蒸渗仪系统由测量部分(3 个冠层小型蒸渗仪、3 个棵间蒸发器和一个观测井)、数据传输部分和终端显示部分构成。冠层小型蒸渗仪(CML)和棵间蒸发器(ML)均埋置于田间,以模拟大田生长环境,分别用来确定冠层尺度作物蒸发蒸腾量(ET)和有冠层覆盖条件下的土壤蒸发量(E)。

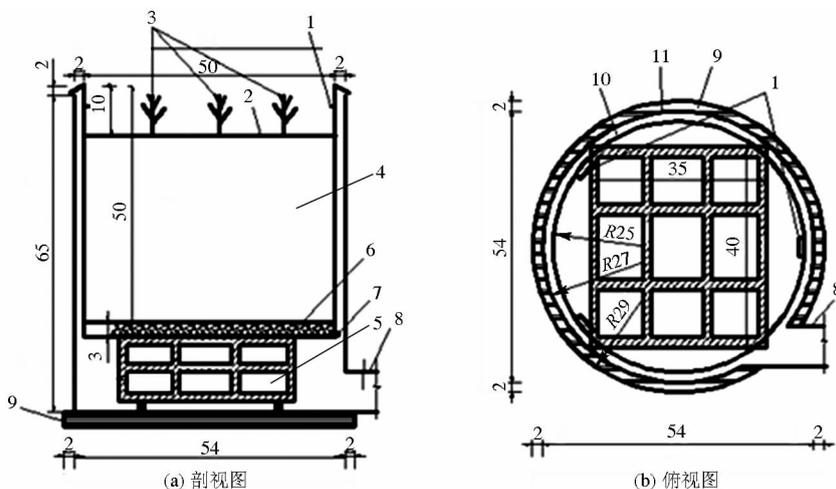


图 1 冠层小型蒸渗仪结构图(单位:cm)

Fig. 1 Configuration of canopy mini-lysimeter (unit: cm)

1. 起吊把手 2. 田面 3. 水稻(4 株) 4. 耕作土 5. 称量系统(含称量传感器) 6. 反滤层 7. 内筒排水接口 8. PVC 连接管 9. 水平基地 10. 内筒 11. 外筒

试验中,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 内种植密度等在整个生育期内均需与大田耕作条件保持一致。蒸渗仪系统排水仅在规定的时间内进行,避免排水时扰动称量传感器的精确测量。传感器每 0.5 h 自动采集一次数据,根据前后两次数据之差计算时间段内蒸发蒸腾量(测量精度 0.05 mm)和棵间蒸发量(测量精度 0.03 mm)。

1.2.2 其他观测内容

试验区水稻于 2015 年 6 月 27 日移栽,10 月 25 日成熟,水稻种植行距 0.16 m,株距 0.23 m。生育期内每 5 d 观测 1 次叶面积指数(采用长、宽乘法

计算),每次选取植株 5 株(定株观测),2 次观测间采用线性插值计算叶面积指数。
CML 由内筒、外筒、称量系统(量程 500 kg,精度 0.01 kg)和排水装置等组成。外筒内径 540 mm,高 630 mm,壁厚 30 mm,由聚氯乙烯(PVC)材料制成;内筒由不锈钢制作,内径 500 mm,高 500 mm,壁厚 4 mm。3 个 CML 中,2 个称量传感器上水平放置内筒,以其所测平均值计算冠层蒸散量,具体结构见图 1。另 1 个 CML 用于仪器的校准,即用相同质量的标准砝码替代内筒置于称量传感器上,以防止金属蠕变等设备原因产生的误差影响测量精度。3 个 ML 的布设和结构均与 CML 相同,仅缩小尺寸(内筒内径 200 mm,高 300 mm)。所有蒸渗仪通过 100 mm 的 PVC 管与观测井相连,以便将内筒排水管与传感器信号线接到观测井中。观测井(长 0.8 m,宽 0.8 m,高 1.1 m)埋置于多个蒸渗仪中间(图 2),以便于控制排水以及仪器的检验。所有容器口均高于田面 0.1 m,以防止地表水进入。最终,传感器信号通过前端放大器放大,经 RS485 线传输,再由数据转换模块处理后显示在终端计算机上。

计算),每次选取植株 5 株(定株观测),2 次观测间采用线性插值计算叶面积指数。

试验基地设有 2 套气象数据观测系统,即自记式气象站(WS-STD1, DELTA-T, 英国)和涡度相关系统(Open path eddy covariance, OPEC),可自动监测太阳辐射、日照时数、风速和风向、气温、地温(10、20、40 cm)、降雨量和空气相对湿度等,采样时间间隔为 0.5 h。气象站和涡度相关仪所监测数据可相互补充和验证,以保证气象资料的质量与完整性。

本研究用 TDR (Trase system 1, Soil moisture equipment, 美国)观测试区土壤含水率以及小型蒸

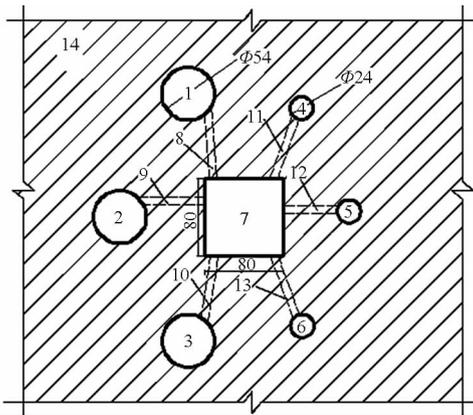


图2 蒸渗仪系统田间布置示意图(单位:cm)

Fig.2 Sketch map of lysimeter system in farmland (unit: cm)

1. 校准蒸渗仪 2,3. 冠层小型蒸渗仪(CML) 4. 校准蒸发器
5,6. 棵间蒸发器(ML) 7. 观测井 8~13. PVC连接管 14. 节水灌溉稻田

渗仪内土壤含水率,测管埋于试区多个观测点,每个观测点(包括蒸渗仪)埋设2根,观测时间为每天08:00,测量后取平均值。随着水稻生长测定深度分别为20、30、40 cm,测定结果用烘干法率定。

1.3 数据处理方法

根据水量平衡,冠层尺度蒸散量和蒸发量可由该时段内小型蒸渗仪的质量变化直接计算^[13]。在一般情况下,土壤水分平衡方程^[14-15]可以表示为

$$\Delta E = I + P - W - Q - \Delta M \quad (1)$$

式中 ΔE ——蒸散量或蒸发量,mm

I ——灌溉量,蒸渗仪灌水日期、灌水量与大田一致,mm

P ——降雨量,mm Q ——排水量,mm

W ——稻田渗漏量,蒸渗仪渗漏量根据试验区已有排水式蒸渗仪每日所测大田渗漏量控制,mm

ΔM ——在整个给定时段内土壤含水率的变化量,mm

一般情况下,试验区水稻生育期地下水位较高,地下水埋深小于0.3 m,故 W 可忽略不计。 ΔE 中实际还包含了汽态凝结水量(多发生于夜间)。

观测结果采用SPSS 22.0进行数据统计分析,采用Microsoft Excel 2003进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 蒸发蒸腾量的典型日变化特征

本研究针对2015年水稻各生育期典型日进行蒸发蒸腾量的日变化特征分析。由图3可见,节水灌溉稻田蒸散量(ET)与水稻蒸腾量(T)均呈明显的倒“U”型单峰变化趋势,变化规律也基本保持一致。土壤蒸发量(E)在分蘖前、中、后期也呈倒“U”

型单峰变化,但在其他生育期内日变化幅度不大。分蘖前期(7月9日)和中期(7月15日),水稻叶面积指数小, E 大于 T ,土壤蒸发是稻田蒸散的重要组成部分。分蘖后期(8月2日), ET 随着太阳辐射的增强而增大,日峰值约为1.18 mm/h,峰值出现时间为12:00左右。 E 和 T 也较大,最大值分别为0.46、0.72 mm/h。之后,随着水稻的生长(8月29日、9月8日、9月26日和10月18日),土壤蒸发量变小,且没有明显的日变化特征,水稻蒸腾量也逐渐减小,但日变化特征明显,并决定着稻田蒸散的大小和变化规律。从图中还可看出,稻田夜间蒸散量小,但波动相对较大,与旱作物夜间蒸散小且变化平缓不同^[16-17],特别是在水稻生长的旺盛阶段,由于季风气候明显,稻田湿度较大,冠层覆盖度较高,夜间温度降低,使水汽凝结于水稻叶片,对小型蒸渗仪的重量变化产生了不可忽视的影响,导致 ET 和 T 在夜间呈明显的正负交替波动。

2.2 蒸发蒸腾量的逐日变化及分配特征

2015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,蒸散量(ET)、蒸腾量(T)和蒸发量(E)的逐日变化如图4所示。从图中可以看出, T 与 ET 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 逐日变化趋势也较为接近,但波动大小没有 ET 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,土壤蒸发量较大,且大于作物蒸腾量。分蘖中后期,随着叶面积指数的增加,作物蒸腾量增加较快,与土壤蒸发量相近。分蘖后期, ET 、 T 和 E 均达到最大,最大值分别为10.63、7.30、5.89 mm/d,随后作物蒸腾量均大于土壤蒸发量。在拔节孕穗期,由于影响蒸发的太阳辐射和空气温度等重要因素逐渐减小, ET 和 E 也随之减小, T 与 ET 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 和 T 随气候变化波动,无明显增减趋势。黄熟期,太阳辐射和空气温度继续下降,降雨量少且无灌水量,所以土壤蒸发量小,平均约为0.67 mm/d, ET 和 T 也呈下降趋势,最小值分别为2.28、1.72 mm/d。从图4还能看出,随着水稻生长, E/ET 呈逐渐减小趋势,黄熟期略有回升。返青期,由于叶面积指数很小, E/ET 接近1,随后该比值迅速减小。分蘖前、中、后期以及拔节孕穗、抽穗开花和乳熟期, E/ET 平均分别为0.76、0.49、0.47、0.26、0.25、0.19。黄熟期,由于冠层覆盖度降低,土壤蒸发占蒸散量的比例稍有增加,平均值约为0.23。许多研究也发现了 E/ET 存在作物生育前期较大,后期较小但末期有所回升的规

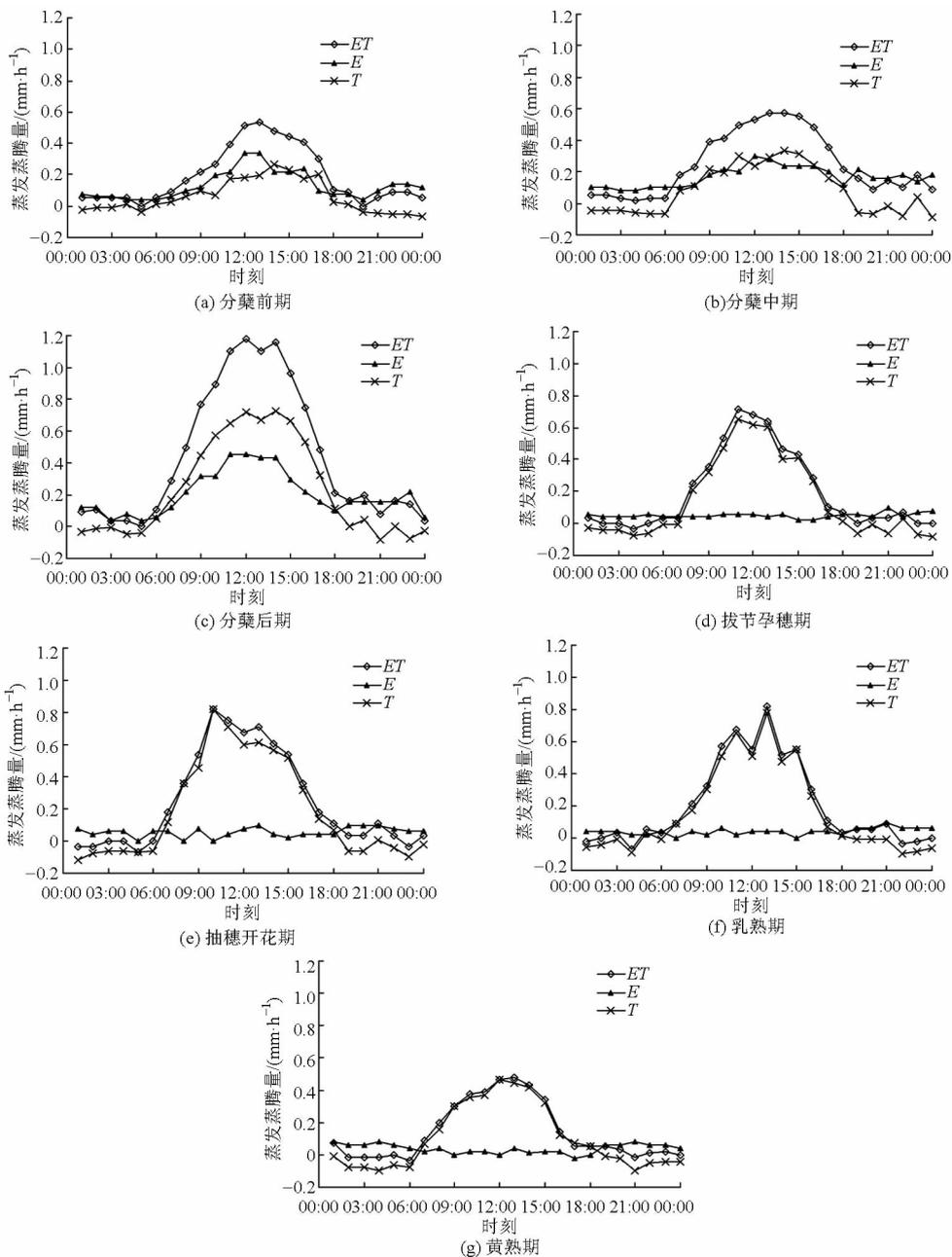


图 3 水稻各生育期典型日蒸发蒸腾量日变化

Fig. 3 Diurnal variation of evapotranspiration, transpiration and evaporation at different paddy growth stages in 2015

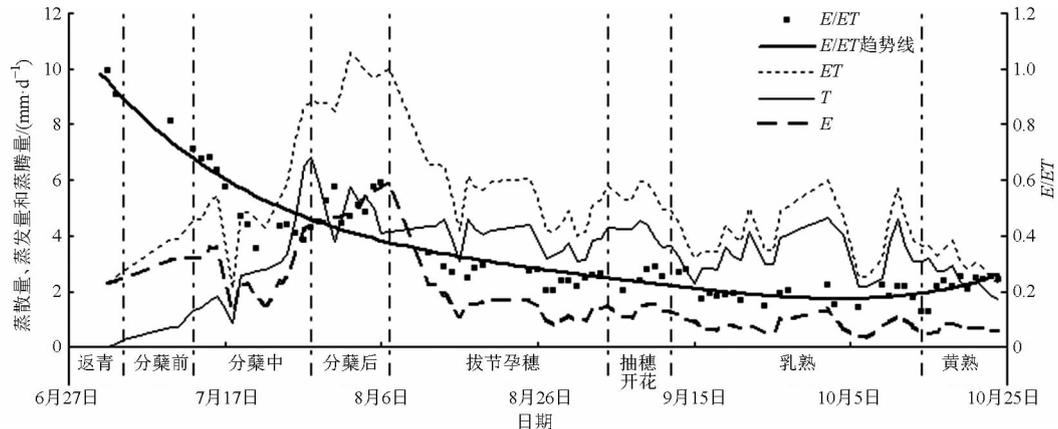


图 4 水稻生育期蒸散量、蒸腾量、蒸发量和棵间蒸发占蒸散量比例(E/ET)的逐日变化

Fig. 4 Daily variations of evapotranspiration, transpiration, evaporation and ratio of evaporation to evapotranspiration for paddy field in growth stages in 2015

律^[17-21]。但不同的是,LIU等^[18]在夏玉米的研究中发现,整个生育期 E/ET 约30%,只有在幼苗期 E/ET 大于 T/ET ,成熟后 E/ET 约为26%,大于相同时期稻田蒸发所占比例。SAUER等^[19]对大豆田的水汽通量进行研究,发现当冠层郁闭度最高时(LAI 大于5),日尺度上 E/ET 仅约0.08。HU等^[20]发现,草地生育期 E/ET 也有类似的规律,但变化范围较大(0.12~1),并指出 LAI 是影响该比例变化的最关键因素。吉喜斌等^[21]发现,春小麦该比例变化更大,从拔节期到乳熟期, E/ET 减小到趋近0,且较稳定,小麦成熟后, E/ET 迅速增加且波动剧烈,加权平均计算 E/ET 大于0.6。差异可能由于小麦叶面积变化较水稻大,特别生育后期,春小麦叶面积指数(LAI)仅生育旺盛时的1/3,同时空气湿度较小,导致成熟期土壤蒸发所占比例超过0.6。

2.3 蒸腾蒸发量与相关影响因素的关系分析

影响作物蒸腾、蒸发的因素有很多,归纳起来可分为3类:气象条件、叶面积指数和表层土壤含水量^[22]。在农田生态系统中,上述因子之间发生着错综复杂的变化,共同作用影响着系统的水汽收支。作物蒸腾是农田水分的必要消耗,但裸间蒸发不参与植物生长过程,一般认为是农田水分的无效散失^[23]。仅分析对农田蒸散总量的影响因素又或仅

分析其中单个因素的影响规律都不能完全弄清蒸腾量和蒸发量的控制机制。因此,本文就小时尺度和日时间尺度,通过多元线性回归方法,分别将蒸腾量和蒸发量与叶面积指数(LAI)、净辐射(R_n)、饱和水汽压差(D)、空气温度(T_a)、风速(V)和表层土壤含水率(W)等建立相关关系,分析影响蒸腾量和蒸发量的主要因素,为不同时间尺度上的农田水分管理提供了必要依据。

2.3.1 小时尺度上的相关关系分析

表2反映了水稻蒸腾量和土壤蒸发量在小时尺度上和影响因素的回归关系。通过分析可知,方程整体拟合度分别为0.874和0.657, F 统计值分别为854.781和199.500,置信度均达到 $\alpha < 0.001$ 水平。在小时尺度上,显著影响蒸腾量的相关因子主要是 LAI 、 R_n 和 W ,而显著影响土壤蒸发量的相关因子是 LAI 、 R_n 、 D 、 T_a 和 W 。进一步,对其进行逐步线性回归分析可知(表3),两回归方程的复相关系数 R 、 F 统计值均满足 $\alpha < 0.001$ 的要求,方程具有极为显著性。 LAI 、 R_n 和 W 是节水灌溉稻田小时尺度蒸腾量和蒸发量共同的主要影响因子,但影响程度不同。在蒸腾量与各变量的回归检验中, R_n 影响程度最大,偏相关系数高达0.872。在蒸发量与各因素的回归检验中, LAI 是最主要的影响因子(偏相关系数

表2 小时尺度蒸腾量和蒸发量与相关影响因素的回归关系检验

Tab.2 Tests on regression relationship between transpiration and evaporation of paddy field and influence factors at hourly scale in 2015

因变量	回归关系	相关系数 R	F 统计	回归方程 置信度	回归系数检验: $\alpha \leq 0.05$ 的自变量
T	$T = 0.025LAI + 0.001R_n + 0.005D + 0.001T_a - 0.232W + 0.010V + 0.008$	0.874	854.781	<0.001	LAI 、 R_n 、 W
E	$E = -0.021LAI + 0.0001R_n + 0.018D + 0.002T_a + 0.452W + 0.0004V - 0.125$	0.657	199.500	<0.001	LAI 、 R_n 、 D 、 T_a 、 W 、常数项

表3 小时尺度蒸腾量和蒸发量与各相关因子的逐步回归分析

Tab.3 Multiple stepwise regression analysis between transpiration and evaporation of paddy fields and their relevant factors at hourly scale in 2015

因变量	自变量	回归系数	标准误差	t 分布	回归系数 置信度	偏相关 系数	F 分布	回归方程 置信度	复相关系数 R
T	(常数)	0.014	0.043	0.333	0.739				
	LAI	0.022	0.002	10.970	<0.001	0.266	1 696.292	<0.001	0.873
	R_n	0.001	0.000	70.974	<0.001	0.872			
	W	-0.136	0.088	-1.535	0.025	-0.039			
(常数)	-0.125	0.028	-4.504	<0.001					
E	LAI	-0.021	0.001	-14.708	<0.001	-0.347	239.549	<0.001	0.657
	R_n	0.0001	0	11.277	<0.001	0.273			
	D	0.018	0.004	4.278	<0.001	0.107			
	T_a	0.002	0.001	2.665	0.008	0.067			
	W	0.452	0.068	6.622	<0.001	0.164			

为 -0.347), 其次依次为 R_n 、 W 、 D 和 T_a 。

2.3.2 日尺度上的相关关系分析

表 4 为日尺度上水稻蒸腾量和土壤蒸发量与相关因素的回归检验。回归方程的复相关系数分别高达 0.751 和 0.966 , 方程具有极为显著性 ($\alpha < 0.001$)。其中, LAI 、 R_n 和 D 是蒸腾量的显著影响因子, LAI 、 D 、 T_a 和 V 是蒸发量的显著影响因子。再分别对其进行逐步线性回归可知(表 5), LAI 成

为对蒸腾量贡献最大的因素, 偏相关系数为 0.527 , 其次为 D (偏相关系数为 0.427)。与小时尺度相比, R_n (偏相关系数为 0.318) 不再是最主要的影响因子, W 影响也不显著。日尺度上显著影响土壤蒸发量的因子依次是 D 、 LAI 、 V 和 T_a , D 成为最主要的影响因子, 偏相关系数高达 0.829 。 R_n 和 W 对蒸发量影响不显著, 而 V 影响显著, 偏相关系数为 0.391 。

表 4 日尺度蒸腾量和蒸发量与相关影响因素的回归关系检验

Tab. 4 Tests on regression relationship between transpiration and evaporation of paddy fields and influence factors at daily scale in 2015

因变量	回归关系	复相关系数 R	F 统计	回归方程 置信度	回归系数检验: $\alpha \leq 0.05$ 的自变量
T	$T = 0.407LAI + 0.008R_n + 1.650D - 0.038T_a + 2.657W + 0.201V - 1.215$	0.751	13.167	<0.001	LAI 、 R_n 、 D
E	$E = -0.406LAI - 0.002R_n + 2.751D + 0.053T_a + 3.543W + 0.820V - 2.204$	0.966	142.731	<0.001	LAI 、 D 、 T_a 、 V 、常数项

表 5 日尺度蒸腾量和蒸发量与各相关因子的逐步回归分析

Tab. 5 Multiple stepwise regression analysis between transpiration and evaporation of paddy fields and their relevant factors at daily scale in 2015

因变量	自变量	回归系数	标准误差	t 分布	回归系数 置信度	偏相关 系数	F 分布	回归方程 置信度	复相关系数 R
T	(常数)	-0.637	0.552	-1.153	0.253				
	LAI	0.418	0.084	4.955	<0.001	0.527	26.615	<0.001	0.745
	R_n	0.008	0.003	2.684	0.009	0.318			
	D	1.463	0.387	3.775	<0.001	0.427			
(常数)	-1.072	0.476	-2.254	0.028					
E	LAI	-0.370	0.054	-6.860	<0.001	-0.654	211.727	<0.001	0.965
	D	2.639	0.224	11.756	<0.001	0.829			
	T_a	0.062	0.019	3.319	0.002	0.386			
	V	0.824	0.244	3.376	0.001	0.391			

前人对不同空间尺度作物蒸散的影响因素及原因分析也展开了大量的研究, 普遍认为 LAI 是最重要的连接参数^[18,24-25]。LIU 等^[18]指出, W 也是影响旱作物蒸散量的重要限制性因素。蔡甲冰等^[25]进一步研究发现, LAI 和 D 是实现冬小麦蒸散量尺度转换的关键参量。在单株蒸腾向冠层尺度上推时, LAI 是重要的联结参数; 在冠层尺度到田间尺度水分通量的转换中, D 是重要的联结参数。但未见有区分时间尺度进行影响因素的探讨。综上可见(表 2~5), 影响节水灌溉稻田蒸腾量与蒸发量的主要因素及其影响程度都不完全相同, 且存在明显的时间尺度差异, 与彭世彰等^[26]对节水灌溉稻田蒸散量的主要影响因子的分析也有所差异。 R_n 和 V 是节水灌溉稻田蒸散量的主要影响因子^[26], 但区分不同时间尺度分别研究蒸腾量和蒸发量时发现, LAI 、 R_n 和 W 是小时尺度蒸腾和蒸发量共同的重要影响

因素, LAI 和 R_n 也是两尺度水稻蒸腾量共同的重要影响因素, 但相对贡献量大小不同。 LAI 、 D 和 T_a 是两尺度土壤蒸发量共同的重要影响因素, LAI 和 D 又是日尺度蒸腾和蒸发量共同的重要影响因素, 但相对贡献量大小也不同。 LAI 对节水灌溉稻田不同时间尺度蒸腾量和蒸发量均有显著影响, 而 V 仅仅影响日尺度土壤蒸发量。

3 讨论

蒸散的实测方法很多, 归纳起来可分为以下几类: 水文学方法(水量平衡法、蒸渗仪法)、微气象方法(梯度法、涡度相关法、波文比能量平衡法)、植物生理学方法(示踪法、蒸腾室法、气孔计法、植株液流法)和遥感遥测法等^[27]。由于大型蒸渗仪测定结果有较高的精度^[28-29], 蒸渗仪法已成为可以校正和检验其他蒸散测定和模拟方法的标准^[13,30-31]。大

型蒸渗仪基本能保证仪器内外土壤边界条件和植株的一致性,但其基础质量大、造价高,且安装、维修、管理工艺复杂,总体数量相对不足,较难进行不同处理的重复试验,且对田间土壤破坏较大,不适于大面积推广应用^[32]。针对大型蒸渗仪的不足,很多科学家进行了小型蒸渗仪的应用研究。Micro-Lysimeter 由 BOAST 等^[33]首次使用并进行了评价,以后国内外许多学者相继使用小型蒸渗仪开展了水分试验研究,但多以测定裸露土壤或作物冠层及其下的土壤蒸发的研究为主^[34-35]。国外已有研究表明,小型蒸渗仪在测量高粱和冬小麦全生育期蒸散总量上与大型蒸渗仪测量结果无显著差异^[11],且其成本低廉、安装方便,可实现多个蒸渗仪连续观测。目前国内尚未开展小尺寸蒸渗仪替代大尺寸蒸渗仪的可行性研究。因此,本研究综合考虑了原有大型蒸渗仪和棵间蒸发器的优势,自制了适用于南方稻田的冠层小型蒸渗仪(CML),既可控制土壤水分变化,模拟

大田生长环境,又能在不破坏周围土壤结构的情况下实现低成本的连续观测。

CML 的使用,测量准确性是关键。本文以涡度相关法所测蒸散量作为标准,对比分析了 CML 的测量精度。涡度相关技术作为蒸散发观测的另一可靠方法^[36-38],若其具有较好的能量闭合状况,则其数据质量和可靠性就能得到保障^[37,39]。本研究对试验区 2014、2015 年稻季通量数据分析结果表明,能量平衡比率(EBR)大多在 0.8~1.0 之间小幅度波动,稻季平均能量闭合度分别为 87% 和 86%,高于国际通量网(FLUXNET)约 80% 的平均能量闭合度^[37,40],表明本观测获得的通量数据质量与可信度高,能代表观测区域通量大小与变化特征。

对比 2014、2015 年涡度相关系统所测蒸散量(ET_{EC})与自制小型蒸渗仪所测蒸散量(ET_{CML})的相关关系可知(图 5),虽然 2014 因蒸渗仪故障缺失了部分时段,但两年的回归关系相似。2014 年和 2015

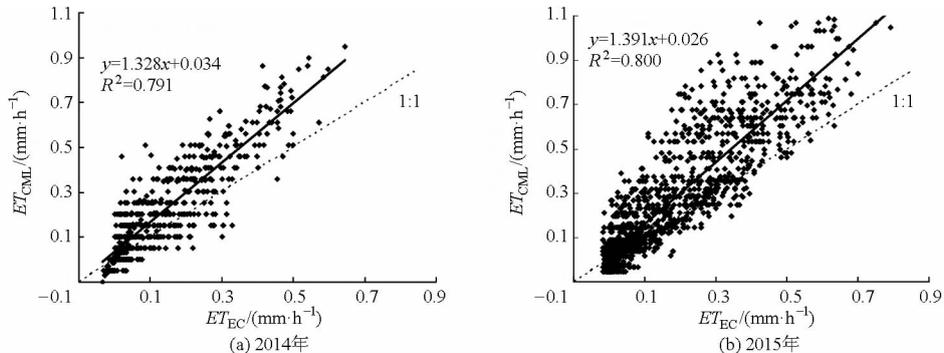


图 5 2014 和 2015 年涡度相关系统与自制小型蒸渗仪所测蒸散量的相关关系

Fig. 5 Relationships between evapotranspiration measured by eddy covariance (ET_{EC}) and canopy mini-lysimeter (ET_{CML}) in 2014 and 2015

年 ET_{CML} 和 ET_{EC} 回归方程的斜率分别为 1.328 和 1.391, R^2 分别为 0.791 和 0.800, 一致性系数(IOA)较高,均为 0.897,说明虽然涡度相关系统与自制小型蒸渗仪所测蒸散量存在差异,但两者相关关系稳定,一致性较好。与前人研究相同, ET_{CML} 较 ET_{EC} 大,原因可能为:①空间尺度效应^[15,41]。小型蒸渗仪测量的为冠层尺度蒸散量,而涡度相关系统所测代表田间尺度蒸散量,田间尺度下垫面较复杂,包含了稻田、裸露土地、田间道路等,整体蒸散量较冠层尺度小。②边界效应^[42-44]。虽然小型蒸渗仪埋置于大田中,也尽量使蒸渗仪内土壤、水分状况与大田一致,但由于蒸渗仪尺寸较小,还是存在一定的边界效应,使得蒸渗仪所测蒸散量偏大。③涡度系统对潜热通量的低估^[45-47]。受环境条件的影响以及涡度相关仪本身的限制,湍流通量的低估一直是水热研究中存在的普遍问题。所以,本研究所设计的冠层小型蒸渗仪系统所测蒸散量能较好的代表节水灌

溉稻田冠层尺度蒸发蒸腾规律。该方法成本低,操作简单,易于维护,还能明确在作物各生育阶段土壤蒸发与作物蒸腾的比例关系,指导农田灌溉,提高农业用水利用效率。同时,冠层尺度作为蒸散测定的中间尺度,是农田水热尺度效应研究的重要组成部分,冠层小型蒸渗仪测量值的规律分析,对今后实现节水灌溉稻田蒸散量空间尺度转换也起到了关键作用。

4 结论

(1) 节水灌溉稻田水稻各生育期,小型蒸渗仪所测冠层蒸散量(ET)与水稻蒸腾量(T)日变化规律基本一致,均呈倒“U”型单峰变化。土壤蒸发量(E)在分蘖各期是稻田蒸散的重要影响因素,也呈倒“U”型单峰变化。分蘖期后, T 决定了 ET 的大小和规律, E 没有明显的日变化特征。夜间 ET 和 T 正负交替波动,稻田夜晚水汽凝结对小型蒸渗仪的测

量值有不可忽视的影响。

(2) 水稻生育期 T 与 ET 逐日变化趋势及波动状况基本一致, 总体上先增加后减小, 高峰期出现在分蘖后期。以分蘖后期为界, 之前稻田蒸散以蒸发为主, 之后以蒸腾为主。从水稻移栽到乳熟, E/ET 从接近 1 逐渐减小至 0.19, 黄熟期略有增加, 平均约为 0.23。

(3) 在小时和日时间尺度上, 影响节水灌溉稻

田蒸腾量与蒸发量的主要因素不完全相同, 影响程度也不相同, 且存在明显的时间尺度差异。 R_n 和 LAI 分别是小时和日尺度上水稻蒸腾量最主要的影响因素, 而 LAI 和 D 则分别是两尺度上土壤蒸发量最主要的影响因素。在所有因素中, LAI 对两时间尺度蒸腾量和蒸发量均有显著影响 ($\alpha < 0.001$)。而 V 仅影响日尺度土壤蒸发量。

参 考 文 献

- 1 王健, 蔡焕杰, 陈凤, 等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 108-113.
WANG Jian, CAI Huanjie, CHEN Feng, et al. Experimental study on evapotranspiration and soil evaporation in summer maize field[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 108-113. (in Chinese)
- 2 樊引琴, 蔡焕杰. 冬小麦田棵间蒸发的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2000, 19(4): 1-4.
FAN Yinqin, CAI Huanjie. Experiment of soil evaporation from winter wheat field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2000, 19(4): 1-4. (in Chinese)
- 3 陈凤, 蔡焕杰, 王健, 等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 191-193.
CHEN Feng, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of winter wheat and summer maize in Yangling Zone[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 191-193. (in Chinese)
- 4 刘浩, 段爱旺. 冬小麦棵间蒸发变化规律及估算模型研究[C]//2005年中国农业工程学会学术年会论文集, 2005: 18-22.
- 5 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)
- 6 YOUNG M H, WIERENGA P J, MANCINO C F. Monitoring near-surface soil water storage in turfgrass using time domain reflectometry and weighing lysimetry[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(4): 1138-1146.
- 7 PRUEGER J H, HATFIELD J L, AASE J K, et al. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration[J]. Agronomy Journal, 1997, 89(5): 730-736.
- 8 汪明霞, 陈晓飞, 王铁梁, 等. 控制性隔沟交替灌溉条件下土壤蒸发的预测研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(3): 130-133.
WANG Mingxia, CHEN Xiaofei, WANG Tieliang, et al. Study on prediction of soil evaporation under controlled alternative irrigation technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(3): 130-133. (in Chinese)
- 9 孙宏勇, 刘昌明, 张永强, 等. 微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(8): 114-118.
SUN Hongyong, LIU Changming, ZHANG Yongqiang, et al. Study on soil evaporation by using micro-lysimeter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(8): 114-118. (in Chinese)
- 10 WALKER G K. Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1983, 63(1): 137-141.
- 11 DUGAS W A, BLAND W L. The accuracy of evaporation measurements from small lysimeters[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 46(2): 119-129.
- 12 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]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 83-92.
LIU Xiaoyin, YANG Shihong, LI Jiwen, et al. Characteristics and law analysis of energy flux in southern water-saving irrigation paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 83-92. (in Chinese)
- 13 EVETT S R, SCHWARTZ R C, HOWELL T A, et al. Can weighing lysimeter ET represent surrounding field ET well enough to test flux station measurements of daily and sub-daily ET? [J]. Advances in Water Resources, 2012, 50(6): 79-90.
- 14 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- 15 DING R, KANG S, LI F, 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.
- 16 DING R S, KANG S Z, ZHANG Y Q, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching[J]. Agricultural Water Management, 2013, 127: 85-96.
- 17 李璐, 李俊, 同小娟, 等. 不同冠层阻力公式在玉米田蒸散模拟中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 1026-1034.
LI Lu, LI Jun, TONG Xiaojuan, et al. Application of different canopy resistance models in summer maize evapotranspiration simulation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(8): 1026-1034. (in Chinese)
- 18 LIU C M, ZHANG X Y, ZHANG Y Z. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 109-120.

- 19 SAUER T J, SINGER J W, PRUEGER J H, et al. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145 (3-4): 206-214.
- 20 HU Z M, YU G R, ZHOU Y L, et al. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: application of a two-source model [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1410-1420.
- 21 吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 等. 黑河流域山前绿洲灌溉农田蒸散发模拟研究 [J]. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 713-719.
JI Xibin, KANG Er'si, ZHAO Wenzhi, et al. Simulation of the evapotranspiration from irrigational farmlands in the oases of the Heihe River Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 713-719. (in Chinese)
- 22 孙仕军, 樊玉苗, 刘彦平, 等. 土壤裸间蒸发的测定及其影响因素 [J]. *节水灌溉*, 2014(4): 79-82.
SUN Shijun, FAN Yumiao, LIU Yanping, et al. Measurement and influencing factors of soil evaporation between plants [J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(4): 79-82. (in Chinese)
- 23 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型裸间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究 [J]. *水利学报*, 1998, 29(10): 36-39.
LIU Changming, ZHANG Xiying, YOU Maozheng. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large scale weighing lysimeter and micro-lysimeter [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 29(10): 36-39. (in Chinese)
- 24 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.
- 25 蔡甲冰, 许迪, 刘钰, 等. 冬小麦返青后作物腾发量的尺度效应及其转换研究 [J]. *水利学报*, 2010, 41(7): 862-869.
CAI Jiabing, XU Di, LIU Yu, et al. Scaling effects and transformation of crop evapotranspiration for winter wheat after reviving [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(7): 862-869. (in Chinese)
- 26 彭世彰, 刘明, 杨士红, 等. 田块和小区尺度下节水灌溉稻田腾发量差异分析 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 87-95.
PENG Shizhang, LIU Ming, YANG Shihong, et al. Analysis on evapotranspiration difference of paddy field under water-saving irrigation on field and plot scales [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(14): 87-95. (in Chinese)
- 27 屈艳萍, 康绍忠, 张晓涛, 等. 植物蒸发蒸腾量测定方法述评 [J]. *水利水电科技进展*, 2006, 26(3): 72-77.
QU Yanping, KANG Shaozhong, ZHANG Xiaotao, et al. A review of methods for measurement of evapotranspiration from plants [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(3): 72-77. (in Chinese)
- 28 樊引琴. 作物蒸发蒸腾量的测定与作物需水量计算方法的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
FAN Yinqin. Study on the methods of calculating crop water requirement and measuring crop evapotranspiration [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2001. (in Chinese)
- 29 强小曼, 蔡焕杰, 王健. 波文比仪与蒸渗仪测定作物蒸发蒸腾量对比 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 12-17.
QIANG Xiaoman, CAI Huanjie, WANG Jian. Comparative study of crop evapotranspiration measured by Bowen ratio and lysimeter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2): 12-17. (in Chinese)
- 30 GIRONA J, DEL CAMPO J, MATA M, et al. A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters [J]. *Irrigation Science*, 2011, 29(1): 55-63.
- 31 ALFIERI J G, KUSTAS W P, PRUEGER J H, et al. On the discrepancy between eddy covariance and lysimetry-based surface flux measurements under strongly advective conditions [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 50(6): 62-78.
- 32 刘翠红, 戴红武, 胡艳清, 等. 蒸渗仪的研究与应用现状 [J]. *农机化研究*, 2014(8): 228-236.
LIU Cuihong, DAI Hongwu, HU Yanqing, et al. Research and application of the status of lysimeter [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014(8): 228-236. (in Chinese)
- 33 BOAST C W, ROBERTSON T M. A "Micro-Lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(4): 689-696.
- 34 ALLEN S J. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 49(4): 291-309.
- 35 PLAUBORG F. Evaporation from bare soil in a temperate humid climate-measurement using micro-lysimeters and time domain reflectometry [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 76(1): 1-17.
- 36 李思恩, 康绍忠, 朱治林, 等. 应用涡度相关技术监测地表蒸发蒸腾量的研究进展 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41(9): 2720-2726.
LI Si'en, KANG Shaozhong, ZHU Zhilin, et al. Research progress of measurement of land surface evapotranspiration based on eddy covariance technology [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2720-2726. (in Chinese)
- 37 WILSON K, GOLDSTEIN A, FALGE E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 223-243.
- 38 MAUDER M, ONCLEY S P, VOGT R, et al. The energy balance experiment EBEX-2000. Part II: Intercomparison of eddy-covariance sensors and post-field data processing methods [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 29-54.
- 39 LI Zhengquan, YU Guirui, WEN Xuefa, et al. Energy balance closure of ChinaFLUX sites [J]. *Science China Earth Sciences*, 2005, 48(Supp.): 51-62.

- 14 陈智,郭旺,宣传忠,等.热膜式无线风速廓线仪[J].农业机械学报,2012,43(9):99-102,110.
CHEN Zhi, GUO Wang, XUAN Chuanzhong, et al. Wireless hot-film wind speed profiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9):99-102,110. (in Chinese)
- 15 赵满全,王金莲,刘汉涛,等.集沙仪结构参数对集沙效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(3):140-145.
ZHAO Manquan, WANG Jinlian, LIU Hantao, et al. Effects of configuration parameters of sand sampler on sand collection efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3):140-145. (in Chinese)
- 16 黄炎,赵满全.基于数值模拟与风洞试验的旋风分离式集沙仪优化设计[J].农业工程学报,2015,31(16):50-56.
HUANG Yan, ZHAO Manquan. Optimization design of performance test of cyclone separator sand sampler based on numerical simulation and wind erosion tunnel experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16):50-56. (in Chinese)
- 17 赵永来,麻硕士,陈智,等.残茬覆盖地表空气动力学粗糙度变化规律[J].农业机械学报,2013,44(4):118-122.
ZHAO Yonglai, MA Shuoshi, CHEN Zhi, et al. Variational rule of aerodynamic roughness under crop stubble coverage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):118-122. (in Chinese)
- 18 邹春霞,申向东,李彰俊.阴山北麓农牧交错带裸露耕地土壤风蚀物垂直分布规律[J].农业工程学报,2010,26(1):123-128.
ZOU Chunxia, SHEN Xiangdong, LI Zhangjun. Topsoil sediment distribution along height above bare tillage land in agro-pastoral ecotone of northern foot of Yinshan mountain[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1):123-128. (in Chinese)
- 19 王岩,张立峰,刘玉华,等.地表覆被因子对华北寒旱区土壤抗风蚀力的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):65-70.
WANG Yan, ZHANG Lifeng, LIU Yuhua, et al. Effect of farmland surface cover factors on the ability of soil anti-erosion in cold and arid region of north China[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2013, 27(1):65-70. (in Chinese)
- 20 王仁德,肖登攀,常春平,等.改进粒度对比法估算单次农田风蚀量[J].农业工程学报,2014,30(21):278-285.
WANG Rende, XIAO Dengpan, CHANG Chunping, et al. Estimation on farmland soil loss by single wind erosion using improved particle-size distribution comparison method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21):278-285. (in Chinese)
- 21 周海燕,王瑛珏,樊恒文,等.宁夏中部干旱带砂田抗风蚀性能研究[J].土壤学报,2013,50(1):41-49.
ZHOU Haiyan, WANG Yingjue, FAN Hengwen, et al. Wind tunnel test of wind erosion resistance of gravelly farmland in the arid zone of central Ningxia[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1):41-49. (in Chinese)
- 22 HONG S W, LEE I B, SEO I H, et al. Measurement and prediction of soil erosion in dry field using portable wind erosion tunnel [J]. Biosystems Engineering, 2014, 118(1):68-82.
- 23 宋涛,陈智,麻乾,等.分流对冲式集沙仪设计与性能试验[J].农业机械学报,2015,46(9):173-177,197.
SONG Tao, CHEN Zhi, MA Qian, et al. Design and performance experiment of shunt-hedging sand sampler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):173-177,197. (in Chinese)
- 24 王萍,王燕.民勤荒漠-绿洲过渡带不同下垫面条件的土壤风蚀特征[J].农业工程学报,2012,28(11):138-145.
WANG Ping, WANG Yan. Characteristics of aeolian sediment under different underlying surfaces in oasis-desert transitional region of Minqin[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11):138-145. (in Chinese)
- 25 LÜ Ping, DONG Zhibao. The status of research on the development and characteristics of mass-flux-density profiles above wind-eroded sediments: a literature review[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 71(12):5183-5194.

(上接第 100 页)

- 40 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.
- 41 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.
- 42 EVETT S, WARRICK A, MATTHIAS A. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(2):329-336.
- 43 TODD R, EVETT S, HOWELL T, et al. Soil temperature and water evaporation of small steel and plastic lysimeters replaced daily[J]. Soil Science, 2000, 165(11):890-895.
- 44 刘国水,刘钰,蔡甲冰,等.农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J].水利学报,2011,42(3):284-289.
LIU Guoshui, LIU Yu, CAI Jiabing, et al. Study on scale effect of farmland evapotranspiration and relationship with meteorological factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3):284-289. (in Chinese)
- 45 AUBINET M, GRELLE A, IBROM A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology[J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30(1):113-175.
- 46 BLANKEN P D. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1998, 89(1):109-140.
- 47 LEE X, HU X. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 103(2):277-301.