

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.08

节水灌溉稻田蒸散时空尺度特征及影响因素

刘笑吟^{1,2}, 徐俊增^{1,2}, 杨士红^{1,2}, 李亚威^{1,2}, 王乙江³, 张剑刚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, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 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, 江苏 昆山 215300)

摘要:为研究节水灌溉稻田蒸散规律和尺度特征及其影响因素的尺度依赖性,用小型蒸渗仪和涡度相关仪分别测量了节水灌溉稻田冠层蒸散量(ET_{CML})和田间尺度蒸散量(ET_{EC}),分析了 ET_{CML} 和 ET_{EC} 的典型日和逐日变化规律,以及在小时和日时间尺度上的影响因素。结果表明:节水灌溉稻田 ET_{CML} 和 ET_{EC} 变化规律基本一致,但白天 ET_{CML} 均大于 ET_{EC} ,且上午两尺度蒸散量大小和相位差均明显大于下午,夜晚 ET_{CML} 和 ET_{EC} 接近0,但 ET_{CML} 呈正负交替波动。两尺度蒸散量的逐日变化总体上呈先增加后减小,高峰期出现在分蘖后期,抽穗开花期较小。 ET_{CML} 日均值大于 ET_{EC} ,比值平均为1.50。净辐射和饱和水汽压差是不同时空尺度蒸散量的显著影响因素,但叶面积指数、空气温度、风速和土壤含水率对不同时空尺度蒸散量的影响不同,具有明显的时空尺度效应。

关键词:节水灌溉;稻田;蒸散量;时空尺度;涡度相关法;小型蒸渗仪

中图分类号:S271 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2018)01-0042-10

Characteristics and influencing factors of evapotranspiration in water-saving irrigation paddy field on different space-time scales

LIU Xiaoyin^{1,2}, XU Junzeng^{1,2}, YANG Shihong^{1,2}, LI Yawei^{1,2}, WANG Yijiang³, ZHANG Jiangang³

(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: In order to study the characteristics and influencing factors of evapotranspiration in water-saving irrigation paddy field on different space-time scales, the mini-lysimeter and eddy covariance were used to measure the canopy-scale evapotranspiration (ET_{CML}) and field-scale evapotranspiration (ET_{EC}). The typical day and daily variation of ET_{CML} and ET_{EC} and influencing factors of ET_{CML} and ET_{EC} on hour and day time scales were analyzed. The results show that the change rules of ET_{CML} and ET_{EC} are consistent. But in the daytime, ET_{CML} is greater than ET_{EC} on both hour and day time scales, and the values and phase differences of ET_{CML} and ET_{EC} are greater before noon. In the night, ET_{CML} and ET_{EC} are close to 0, and ET_{CML} is alternating positive and negative. Daily variation

基金项目:国家自然科学基金(51579070);中央高校基本科研业务费专项资金(2014B17114);国家重点实验室创新青年学者资助项目(20145027912);江苏省水利科技项目(2015088);国家重点研发计划(2016YFC0400103)

作者简介:刘笑吟(1989—),女,博士研究生,主要从事节水灌溉与农田环境效应研究。E-mail:lxysin1819@hhu.edu.cn

通信作者:徐俊增,教授。E-mail:xjz481@hhu.edu.cn

of evapotranspiration on both scales increases first and then decreases. The peak period of evapotranspiration appears at the late tillering stage and the evapotranspiration is low at the heading and flowering stages. The daily mean value of ET_{CML} is greater than ET_{EC} , and the ratio of ET_{CML} and ET_{EC} is 1.50. Net radiation and saturated vapor pressure are significant factors affecting the evapotranspiration on different space-time scales. Leaf area index, air temperature, wind speed, and soil moisture content have different influences on the evapotranspiration according to different space-time scales.

Key words: water-saving irrigation; paddy field; evapotranspiration; space-time scales; eddy covariance; mini-lysimeter

农田是受人类活动影响最大、与人类生存关系最为密切的陆地生态系统,蒸散是发生在该系统中的复杂过程,具有明显的时空尺度特征和空间变异性^[1-3],也是气象学、地理学、土壤学、水文学、生态学、植物学等学科多尺度水热过程研究的关键和难点^[4-11]。蒸散量研究的空间尺度一般划分为叶片、冠层 ($< 3\text{ m}^2$)、田间 ($100 \sim 1\,000\text{ m}^2$) 和景观 ($> 1\,000\text{ m}^2$) 尺度。目前,对不同尺度蒸散差异的研究大多集中在森林、河流域等较大的生态系统^[14-17],对农田生态系统(主要针对旱作物)的相关研究也已陆续展开^[3,14-17]。刘国水等^[11]用蒸渗仪和涡度相关法测定了不同尺度夏玉米蒸散量及其变化规律,发现蒸渗仪所测小尺度值较涡度相关仪大,夏玉米蒸散量具有明显的尺度效应。蔡甲冰等^[15]运用多元回归方法研究了冬小麦腾发量的空间尺度效应,并得到了从小尺度到大尺度腾发量的转换关系。Gentine 等^[16]在对麦田的研究发现,蒸散量存在明显的时间尺度效应,且冠层覆盖度和土壤含水率是蒸发比(潜热通量与净辐射减土壤热通量之差的比值)日内变化的主要影响因素。郭映等^[17]的研究也表明,不同时间尺度上影响玉米蒸散量的主要因素不同。水稻作为我国的主要粮食作物,种植面积约占粮食作物总面积的 30%,水稻用水占农业用水的 65%。虽然节水工程和技术措施可以有效减少水资源损失,蓄丰补缺,提高水的利用率;但是,只有进一步减少水稻生长本身的需水量,明确稻田水量循环规律,才能从根本上减少稻田耗水。为保证我国粮食安全与水资源安全,水稻节水灌溉技术已在我国大面积推广应用^[18]。水稻节水灌溉技术的应用改变了稻田蒸散过程,然而针对节水环境下稻田蒸散特征的研究较少^[19],更少有区分不同时空尺度蒸散特征与转换的研究。因此,本文以节水灌溉稻田为

研究对象,用小型称重式蒸渗仪和涡度相关仪两种较为准确且具有空间代表性的方法^[20-21],分别测量了稻田冠层(0.196 m^2)和农田(约 200 m^2)尺度蒸散量,对比分析了两空间尺度蒸散量在不同时间尺度上的变化特征及差异,并探讨了各时空尺度蒸散变化所依赖的影响因素,以期明确节水灌溉稻田蒸散变化的时空尺度特征和尺度效应以及各尺度蒸散变化的主控因素。其相关研究对于了解生态系统水热循环过程、有效减少田间水分无效损失、保障农业生产具有重大意义,研究成果可为今后构建节水环境下稻田蒸散量模拟与空间尺度转换模型奠定基础。

1 试验区域与观测方法

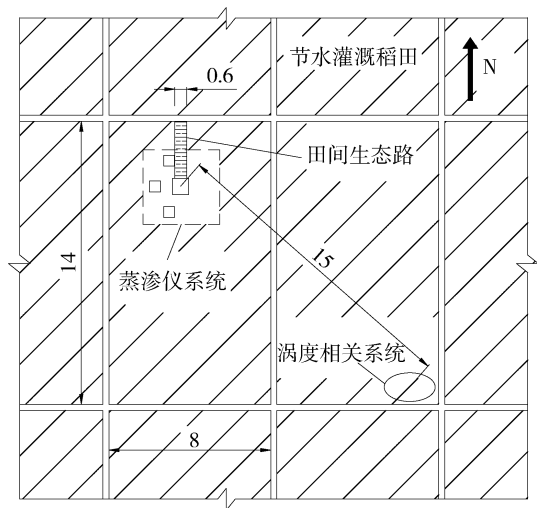
1.1 试验区概况

试验区(河海大学国家重点试验室昆山试验研究基地)地处太湖流域水网区低洼平原($31^{\circ}15'15''\text{ N}$, $120^{\circ}57'43''\text{ E}$),属亚热带南部季风气候区。年总降水量 $1\,097.1\text{ mm}$,总蒸发量 $1\,365.9\text{ mm}$,日照时数 $2\,085.9\text{ h}$,年平均气温 15.5°C ,平均相对湿度 83%,平均气压 $1\,016.3\text{ hPa}$ 。水稻(晚稻)生育期平均气温 24.8°C ,平均相对湿度 79.2%。试验区常年盛行东南风,土壤为渌育型黄泥土,耕层土壤为重壤土。观测场所监测下垫面为控制灌溉稻田,2015 年水稻于 6 月 27 日移栽,10 月 25 日收割,种植行距 0.16 m ,株距 0.23 m 。试验区面积约为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$,主风向为东南风,稻季所监测下垫面全为控制灌溉稻田。控制灌溉处理仅在水稻返青期田面保留薄水层,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。2015 年水稻各生育期土壤水分调控指标与文献[22]相同,控制灌溉具体灌水日期和灌水量见表 1。涡度相关系统和冠层小型蒸渗仪系

表 1 2015 年控制灌溉稻田的灌水日期和灌水量

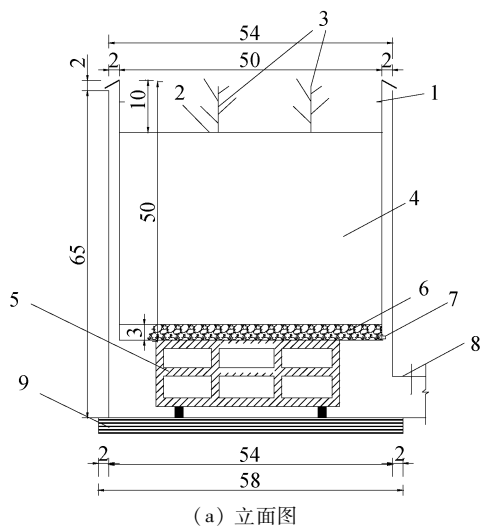
灌水日期	泡田	返青期		拔节孕穗期		抽穗开花期	乳熟期
	6 月 23 日	7 月 5 日	7 月 25 日	8 月 9 日	9 月 3 日	9 月 7 日	9 月 16 日
灌水量 /mm	118.0	30.4	70.2	48.1	38.6	46.3	43.2

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)埋置于多个蒸渗仪之间, 为了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, 以防止稻田田面偶尔的薄水层或降雨产生的积水进入装置。数据采集器通过数据线 与压力传感器连接, 每 0.5 h 自动采集一次数据, 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。

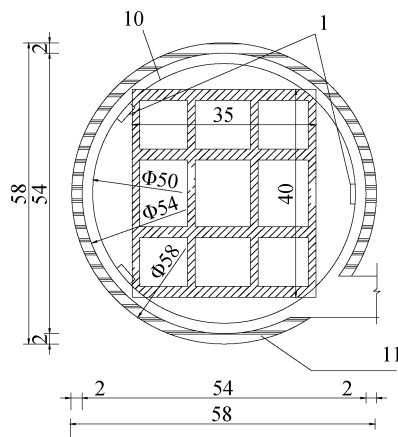


1.2 观测仪器与观测内容

综合考虑原有大型蒸渗仪和棵间蒸发器的优势,自制了适用于稻田冠层尺度蒸散量测量的小型蒸渗仪(canopy micro-lysimeter, CML),CML既可通过灌溉排水控制土壤水分变化,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测量。CML由内筒(内径500 mm,高500 mm,壁厚4 mm)、外筒(内径540 mm,高630 mm,壁厚30 mm)、称量系统(量程300 kg,精度0.01 kg)和排水装置等组成,具体结构见图2。内、外筒分别由不锈钢和聚氯乙烯(PVC)材料制成。本实验布置3个CML,其中2个CML的称重传感器上水平放置内筒,以其所测平均值计算冠层蒸散量。CML内回填土与大田土壤状况保持一致,且种植密度、灌溉制度在整个生育期内均与大田耕作条件一致。CML内土壤水分状况与大田土壤水分同时测量,有水层时测量水层深,无水层时用域反射仪监测根层土壤体积含水率。测量得到的控制灌溉条件下土壤水分的干湿交替变化如图3所示。另一CML用于仪器的校准,在试验开始前,先称量两个CML的重量,根据它们的平均重量,在校准CML内放置相同重量的标准砝码(本试验为143 kg),用于记录实验所用的相同批次的称重传感器由于金属蠕变产生的零点漂移,以防止金属蠕变等设备原因产生的误差影响测量精度。从校准CML可知,整个试验阶段金属蠕变主要发生在前期,蠕变量约15 g,后期蠕变量较小,约3 g,蠕变量小于装置总重量的0.2‰。3个CML通过的PVC管与观测井相连,以便将内筒排



(a) 立面图



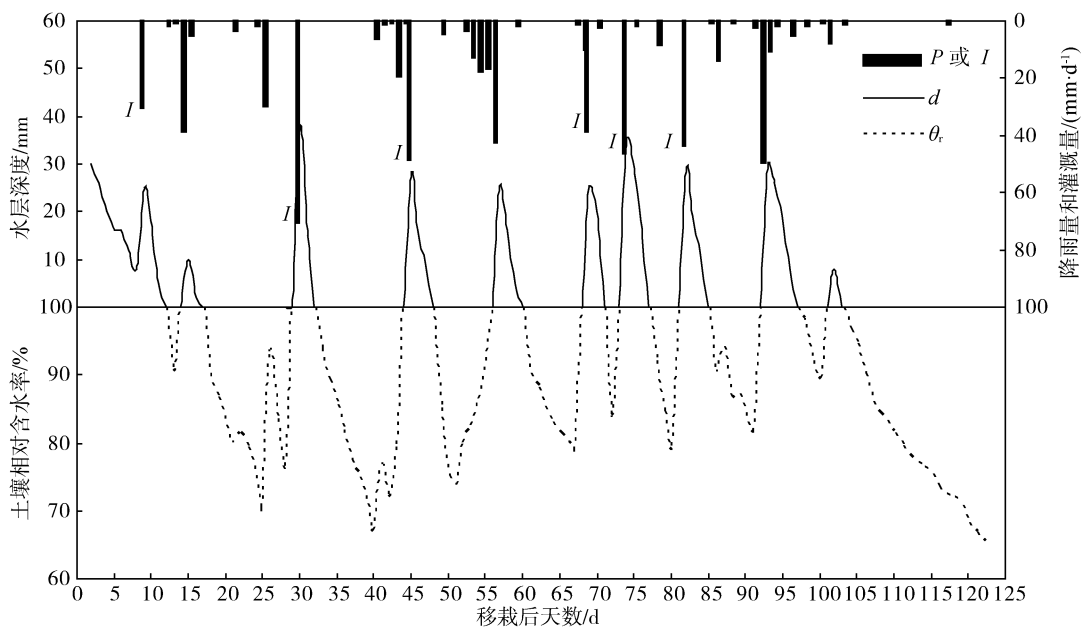
(b) 俯视图

1. 起吊把手 2. 田面 3. 水稻(4株) 4. 耕作土 5. 称重系统
(含称重传感器) 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

图2 冠层小型蒸渗仪结构(单位:cm)

涡度相关系统自动观测仪器(open path eddy covariance, OPEC)安装在实验区下风向,并位于冠层小型蒸渗仪上风向(东南方),以减少对涡度测量的影响。采集的通量数据主要包括净辐射 R_n 、潜热 L_E 、感热 H_s 、土壤热通量 G_s 等,同时能自动采集频率为半小时的气象数据。

太阳辐射、日照时数、风速和风向、气温、地温(10、20 和 40 cm)、降雨量和空气相对湿度等气象数据由自记式气象站(Ws-STD1, DELTA-T, UK)自动监测,采样频率 30 min。涡度相关系统所测气象数据可与其相互补充和验证,以保证气象资料的质



注: θ_e 和 d 分别为土壤相对含水率和土壤表面水层深度; P 和 I 分别为降雨和灌溉量, 图中柱状图标明“ I ”的为灌溉量, 没有标明“ I ”的为降雨量。

图3 考虑降雨和灌溉影响下2015年试验区节水灌溉稻田土壤水分状况逐日变化

量与完整性。

本研究用 TDR (Trase system 1, soil moisture equipment, USA) 观测试区土壤含水量, 测管埋于试验区中 5 个典型观测小区, 每个观测小区埋两根, 两个小型蒸渗仪内也同样埋两根, 观测时间为每天上午 8:00, 测量后取平均值。随着水稻生长测定深度分别为 20 cm、30 cm 和 40 cm, 测定结果用烘干法率定。

水稻生育期内每 5 d 观测一次叶面积指数 (采用长、宽乘法计算), 每次选取植株 5 株 (定株观测), 两次观测间采用线性插值计算叶面积指数。

1.3 数据处理方法

冠层尺度蒸散量根据土壤水分平衡方程^[23], 由给定时段内 (30 min) 小型蒸渗仪的质量变化直接计算^[24], 测量精度为 0.05 mm。田间尺度蒸散量由涡度所测通量数据, 用 EdiRe 软件后期处理并修正 (二次坐标旋转、超声虚温 and 空气密度脉动订正) 后得到 30 min 的平均数据^[25]。本研究剔除或缺失的数据量约占数据总量 (5808) 的 17%, 通量数据的剔除插补同刘笑吟等^[22]研究。通量数据质量控制采用能量平衡闭合分析^[26]。本研究用评价能量闭合程度常用方法之一的能量平衡比率, 即涡度相关仪观测到的湍流通量 ($H_s + L_E$) 与有效能量 ($R_n - G_0$) 日累计量之间的比值, 来反映试验区的能量平衡闭合状况^[27]。地表土壤热通量 (G_0) 为土壤热通量板测量的热通量 (G_s) 与土壤热通量板到地表的土壤热储存 (Q) 之和^[22]。计算可知, 试验区 2015 年稻季能量平衡比率平均为 86%, 高于国际通量网

(FLUXNET) 约 80% 的平均能量闭合度^[26], 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^[28]。

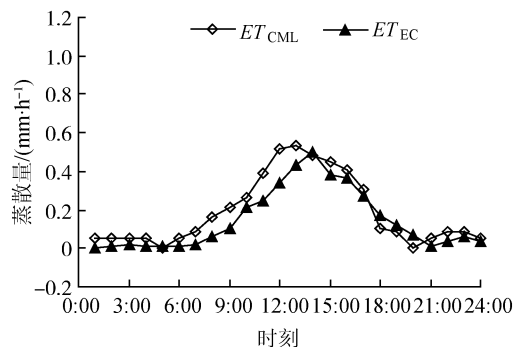
本试验所用小型蒸渗仪系统于 2014 年稻季投入使用, 其测量数据的准确性是研究的关键。刘笑吟等^[29]在涡度通量数据能得到可靠保障的基础上 (即较高的能量平衡闭合度), 用 2014、2015 年稻季涡度相关仪测量的农田尺度蒸散量与小型蒸渗仪测量的冠层尺度蒸散量进行了比较, 发现虽然两年的测量结果均存在明显的差异, 但差异量相似且一致性较好 (一致性指数均为 0.897)。所以认为本研究所用小型蒸渗仪所测蒸散量虽然与涡度相关测量蒸散量存在尺度差异, 但能较好的代表节水灌溉条件下稻田冠层尺度蒸散规律。

试验观测结果采用 SPSS 22 进行数据统计分析, 采用 Microsoft Excel 2003 进行图表绘制。

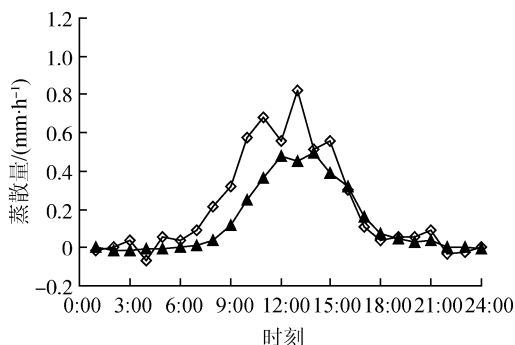
2 结果与分析

2.1 典型日冠层和田间尺度蒸散量的日变化特征

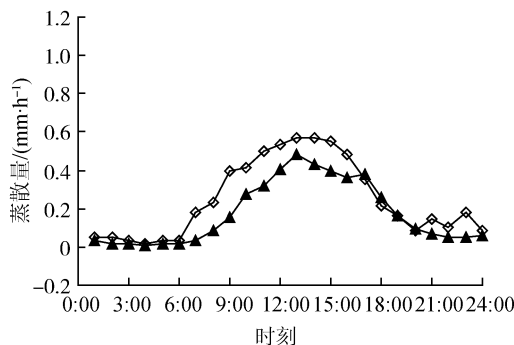
本研究对比分析了 2015 年水稻各生育期典型晴天冠层和田间尺度蒸散量的日变化特征。由图 4 可见, 节水灌溉稻田冠层蒸散量 (ET_{CML}) 和田间尺度蒸散量 (ET_{EC}) 日内变化趋势基本一致, 均呈倒“U”型单峰曲线。各生育期 ET_{CML} 都较 ET_{EC} 大, 且随水稻生长, 两尺度蒸散量和蒸散量差值均先逐渐增加, 到分蘖后期达到最大, 之后逐渐减小, 各典型日累计 ET_{CML} 依次为 4.57、5.95、10.04、5.74、5.68、



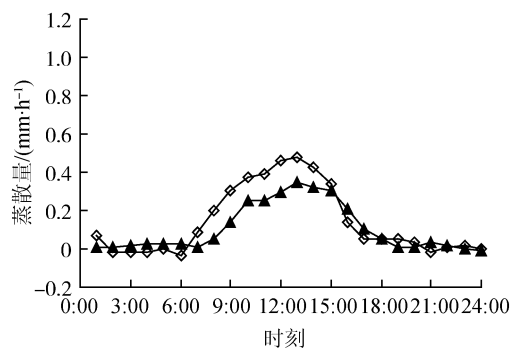
(a) 分蘖前期(7月10日)



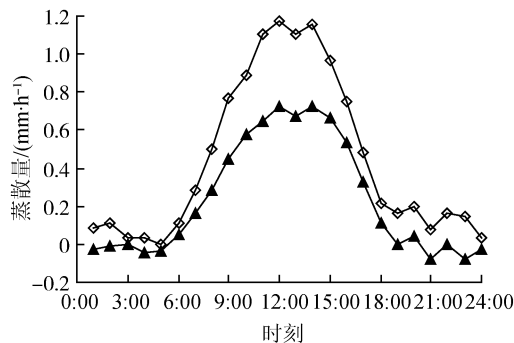
(f) 乳熟期(9月26日)



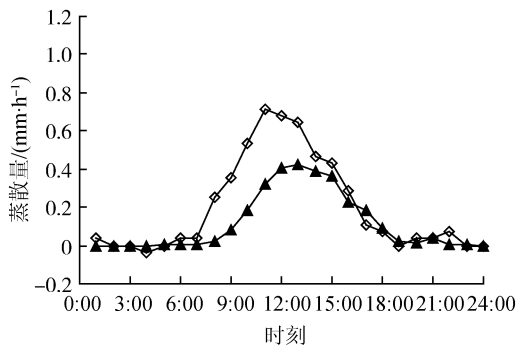
(b) 分蘖中期(7月15日)



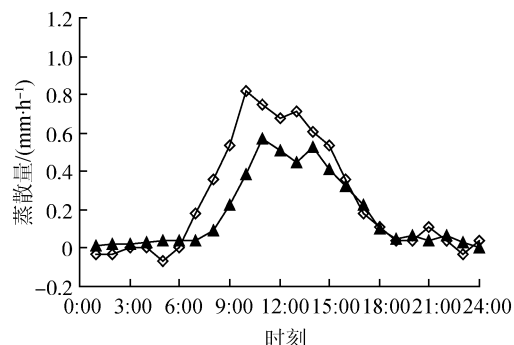
(g) 黄熟期(10月18日)



(c) 分蘖后期(8月2日)



(d) 拔节孕穗期(8月29日)



(e) 抽穗开花期(9月8日)

图4 2015年试验区水稻各生育期典型晴日冠层和田间尺度蒸散量日变化

4.93和3.40 mm/d, ET_{EC} 依次为3.50、4.06、5.16、3.87、3.98、3.22和2.51 mm/d。蒸散量日峰值均在12:00左右,分蘖后期(8月2日)最大,冠层尺度达到1.18 mm/h,较田间尺度蒸散量日峰值(0.72 mm/h)大63.9%。 ET_{CML} 相对 ET_{EC} 日变化曲线波动较大,因为CML监测尺度较小,其量变化受环境因素影响较大,降雨、大风天气以及稻田生物活动等均对 ET_{CML} 有不可忽视的影响。 ET_{CML} 夜间波动更明显,因为试验区季风气候明显,夜间稻田空气湿度较大(相对湿度大于90%),而土壤含水率较低。同时,冠层温度低于大气露点温度,使水汽凝结于土壤表面和水稻叶片^[30],对小型蒸渗仪的重量变化产生了不可忽视的影响,导致 ET_{CML} 在夜间呈明显的正负交替波动。从图4还可看出,上午两尺度蒸散量差值和蒸散变化相位差均明显大于下午。产生这种现象,是因为上午随着太阳辐射的增加,空气温度和土壤温度经历了一个持续加热的过程,各气象因子变化速率较大,能量损失大,涡度相关法低估了湍流通量。午后温度较高,各气象因子变化也相对平稳,能量平衡处于稳定的较高状态,因此涡度相关系统能更准确捕捉到湍流通量^[22]。同时,蒸渗仪尺寸较小,边界效应使得蒸渗仪内土壤增温更快, ET_{CML} 增大,对尺度差异产生了不可忽略的影响。另一方面,能量转化和传输以及仪器响应都存在着时间消耗^[31],涡度相关法同步计算的潜热通量并不是对同

一时段同一水平界面净辐射能的响应,这就造成了涡度相关系统所测蒸散量较蒸渗仪所测蒸散量有一定程度的滞后。

2.2 冠层、田间尺度蒸散量的逐日变化

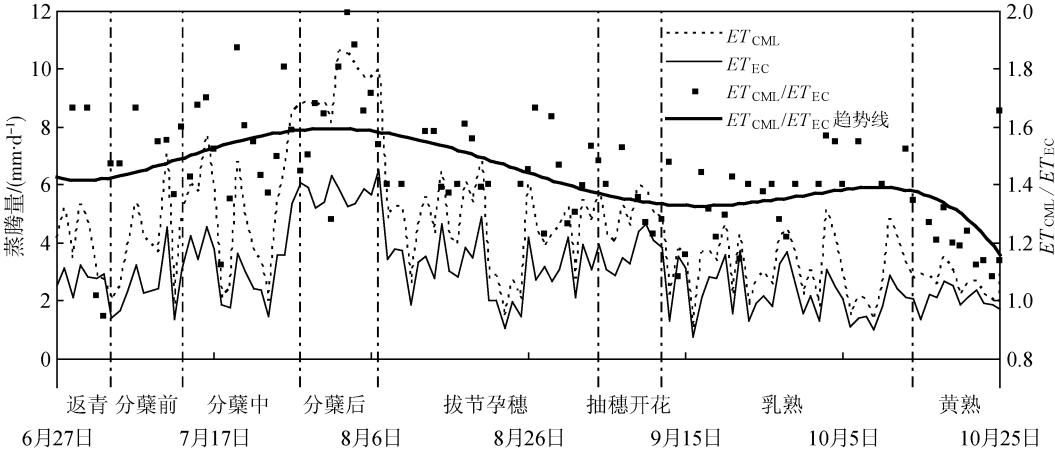
2015 年水稻全生育期 ET_{CML} 和 ET_{EC} 的逐日变化如图 5。从图 5 中可以看出, ET_{CML} 与 ET_{EC} 逐日变化趋势及波动状况都基本一致, 总体上为先增加后减小, 分蘖后期蒸散量达到最大, 日平均值分别为 9.58 mm/d 和 5.42 mm/d。全生育期 ET_{CML} 和 ET_{EC} 日平均蒸散量分别为 4.68 mm/d 和 3.13 mm/d, 两尺度蒸散量之比 (ET_{CML}/ET_{EC}) 均大于 1, 从返青期到分蘖后期比值迅速增大, 分蘖后期到抽穗开花期迅速减小, 乳熟期该比值又有所增加, 黄熟期减小。水稻生育期两尺度蒸散量比值变化趋势基本与蒸散量变化趋势一致, 但抽穗开花期比值较小, 可能由于该生育期叶面积指数最大, 下垫面较为均一平坦, 涡度相关法的适用性较好, 一般认为涡度低估潜热通量的现象有所改善。同时较高的覆盖度减弱了土壤增温, 使小型蒸渗仪边界效应也有所减弱。分蘖前、中、后期以及拔节孕穗、抽穗开花、乳熟和黄熟期, ET_{CML}/ET_{EC} 值分别为 1.23, 1.62, 1.78, 1.58, 1.39, 1.44 和 1.26, 最大值为 2.03, 最小值为 1.17, 平均为 1.50。由此可知, 节水灌溉稻田冠层、田间尺度蒸散量存在明显的尺度差异, 这与国内外学者针对不同气候和下垫面条件关于冠层和田间尺度蒸散量的研究结果相似。刘国水等^[32]用大型蒸渗仪和涡度相关仪测量夏玉米日蒸散量平均值分别为 4.08 mm/d 和 2.87 mm/d; 2009 年 Chávez 等^[33]发现, 涡度和蒸渗仪所测棉花地蒸散量存在较大差异; Ding 等^[23]在玉米田研究发现, 与大型蒸渗仪所测蒸散量相比, 涡度所测蒸散量在白天和夜间分别有 21.8% 和 30.2% 的低估。

此外, 与非节水灌溉稻田相比, 节水灌溉稻田水稻生育期的蒸散强度较小。刘斌等^[34]在我国南方亚热带季风气候区研究发现, 用涡度相关系统和大型蒸渗仪所测常规淹灌稻田的蒸散强度分别为 3.6 mm/d 和 7.2 mm/d。Hilmi 等^[35]在马来西亚水稻灌溉工程的研究中发现, 相应生育期稻田蒸散强度为 4.04 ~ 6.54 mm/d。节水灌溉稻田各生育期的日蒸散强度变化规律也有所不同, Abdullahi 等^[36]研究表明, 稻田蒸散强度从返青到抽穗期逐渐增加, 抽穗期达到最大, 随后逐渐减小。Lage 等^[37]研究发现, 营养生长、生殖生长和成熟期, 稻田蒸散强度逐渐减小, 分别为 8.0、7.2、5.5 mm/d。所以, 节水灌溉技术改变了稻田土壤水分状况, 减少了稻田耗水量, 有效提高了灌溉水利用率, 研究节水灌溉条件下稻田不同尺度蒸散量变化过程和特征具有重要意义。

2.3 小时尺度冠层、田间蒸散量的影响因素分析

作物蒸散受农田生态系统中气象、作物和土壤等多种因子的相互作用^[38], 存在明显的时空变异性。仅分析其中单因素或某类因素的影响规律都不能完全明确对蒸散发的控制机理。因此, 本文先就小时尺度, 通过多元逐步线性回归, 分别将冠层和田间尺度蒸散量与叶面积指数 I_{LA} 、净辐射 R_n 、饱和水汽压差 D 、空气温度 T_a 、风速 u 和土壤表层含水率 W 等建立相关关系, 分析影响不同时空尺度蒸散量的主要因素, 为不同时空尺度上的农田水分管理提供必要依据。

表 3 为小时尺度上冠层与田间尺度蒸散量与上述多因子的逐步线性回归分析结果。冠层尺度回归方程置信度达到 $\alpha < 0.001$ 水平, 相关系数较高 ($R = 0.910$)。其中 R_n 、 D 、 T_a 和 W 是显著影响冠层尺度蒸散量的因素 ($\alpha < 0.05$), 偏相关系数分别为



注: ET_{CML} 和 ET_{EC} 分别为冠层尺度和田间尺度蒸散量;

图 5 2015 年试验区水稻生育期 ET_{CML} 、 ET_{EC} 及 ET_{CML}/ET_{EC} 的逐日变化

0. 830、0. 106、0. 071 和 0. 058,说明净辐射是冠层尺度对小时蒸散量影响最大的因素。在小时尺度上田间蒸散量和相关影响因素的回归方程在 $\alpha < 0. 001$ 显著性水平上的相关关系很好,相关系数为 0. 977,且所考虑的 6 个相关因子都显著影响田间尺度蒸散量($\alpha < 0. 001$)。其中, R_n 是对田间尺度小时蒸散量影响最大的因素,偏相关系数高达 0. 928,其次为 D ,偏相关系数为 0. 638。 R_n 、 D 、 T_a 和 W 是冠层和田间尺度蒸散量在小时尺度上共同的显著影响因子, R_n 是共同的最主要影响因素。

2.4 日尺度冠层、田间蒸散量的影响因素分析

为了解日尺度上影响蒸散量的相关因子,为蒸散量时间尺度上转换关系的建立奠定基础,将 I_{LA} 、 R_n 、 D 、 T_a 、 u 和 W 进行日平均统计,与冠层和田间尺度蒸散量进行逐步线性回归,分别建立相关关系。冠层尺度日蒸散量与相关影响因素的逐步回归结果如表 4 所示,回归方程的相关系数 R 、 F 统计值均满足 $\alpha < 0. 001$ 的要求,方程具有极为显著性。 R_n 、 D 和 u 是冠层尺度蒸散量的显著影响因子,影响程度依次为 D 、 R_n 、 u ,其中 D 达到 $\alpha < 0. 001$ 显著性水平, R_n 和 u 为 $\alpha < 0. 05$ 显著性水平。分析基于日平均数据的田间尺度蒸散量的逐步线性回归检验可知(表 4),回归方程的复相关系数分别高达 0. 970,方

程具有极为显著性($\alpha < 0. 001$),其中, I_{LA} 、 R_n 、 D 和 u 是其显著影响因子,显著性水平均达到 $\alpha < 0. 001$ 。 D 和 R_n 对田间尺度蒸散量影响程度较大,偏相关系数分别为 0. 795 和 0. 740, I_{LA} 和 u 影响程度相对较小。 D 、 R_n 、 u 是冠层和田间尺度日蒸散量共同的显著影响因素,且 D 影响程度最大。

再对比分析表 3 和表 4 发现,只有 D 和 R_n 是蒸散量在两时间尺度和两空间尺度共同的显著影响因素,但影响程度不同。对于冠层和田间尺度, R_n 和 D 均分别是小时和日尺度蒸散量最主要的影响因素。 I_{LA} 、 T_a 、 u 和 W 对蒸散量的影响在不同时空尺度表现不同。前人研究蒸散量的影响因素多没有区分时间尺度或空间尺度效应,强小嫚等^[39]采用蒸渗仪研究作物蒸散则表明, R_n 、 u 和 T_a 是冬小麦蒸散量最主要的影响因素。彭世彰等^[19]研究了稻田不同空间尺度日蒸散量的影响因素,结果表明 R_n 和 u 是小区和田间尺度蒸散量共同的主要影响因素。Baldocchi 等^[40]区分时间尺度研究了各相关因素对森林下垫面蒸散量的影响,结果表明 R_n 和 T_a 是其主要影响因素。郭映等^[17]对不同时间尺度的研究发现, D 对日内小时尺度玉米蒸散量的影响明显,而与日蒸散量的相关关系较小。本研究与前人研究结果均发现 R_n 是蒸散变化的主要影响因素^[17,19,32,39-41],但与前

表 3 小时尺度冠层和田间尺度蒸散量与相关影响因素的逐步线性回归分析结果

因变量	自变量	回归系数	标准误差	t 统计值	回归系数置信度	偏相关系数	F 统计值	样本量	回归方程置信度	相关系数
ET_{CML}	(常数)	-0. 095	0. 041	-2. 345	0. 019					
	R_n	0. 001	0. 000	59. 583	<0. 001	0. 830				
	D	0. 027	0. 006	4. 278	<0. 001	0. 106	1 923. 584	2410	<0. 001	0. 910
	T_a	0. 003	0. 001	2. 847	0. 004	0. 071				
	W	0. 236	0. 103	2. 304	0. 021	0. 058				
ET_{EC}	(常数)	-0. 091	0. 013	-6. 931	<0. 001					
	I_{LA}	0. 003	0. 001	4. 121	<0. 001	0. 101				
	R	0. 000	0. 000	101. 068	<0. 001	0. 928				
	D	0. 073	0. 002	33. 657	<0. 001	0. 638	5 880. 996	2410	<0. 001	0. 977
	T_a	-0. 001	0. 000	-3. 964	<0. 001	-0. 097				
	u	0. 014	0. 002	6. 885	<0. 001	0. 167				
	W	0. 231	0. 033	7. 017	<0. 001	0. 170				

表 4 日尺度冠层和田间尺度蒸散量与相关影响因素的逐步线性回归分析结果

因变量	自变量	回归系数	标准误差	t 统计值	回归系数置信度	偏相关系数	F 统计值	样本量	回归方程置信度	相关系数
ET_{CML}	(常数)	-0. 619	0. 337	-1. 835	0. 071					
	R_n	0. 010	0. 004	2. 588	0. 012	0. 308				
	D	4. 393	0. 476	9. 233	<0. 001	0. 756	128. 175	89	<0. 001	0. 926
	u	1. 003	0. 471	2. 131	0. 037	0. 257				
ET_{EC}	(常数)	-1. 493	0. 277	-5. 397	<0. 001					
	I_{LA}	0. 207	0. 040	5. 165	<0. 001	0. 545				
	R_n	0. 012	0. 001	8. 727	<0. 001	0. 740	248. 386	89	<0. 001	0. 970
	D	1. 785	0. 171	10. 415	<0. 001	0. 795				
	u	0. 917	0. 183	5. 015	<0. 001	0. 534				

人研究结果不同的是对于节水灌溉稻田 D 是另一影响其蒸散变化的重要因素。影响因素的差异是由于本研究区下垫面为水稻田, 试验区又盛行较强烈的东南季风, 所以空气湿度的影响较其他研究地区大。 I_{LA} 虽然是土壤蒸发和作物蒸腾的重要影响因素^[15,42], 但本研究表明其对冠层尺度蒸散量没有显著影响, 对田间尺度稻田蒸散量影响显著, 但影响程度也较其他显著影响因素小。原因可能因为 I_{LA} 对干湿交替土壤水分变化条件下的稻田土壤蒸发的负影响与水稻蒸腾的正影响程度相当。在水稻各生育期, 随着 I_{LA} 的增加或减小, 小型蒸渗仪测量得到的水稻蒸腾量的增加或减小, 与 I_{LA} 变化所导致冠层覆盖度变化进而使土壤蒸发减小或增加的量相当, 所以, I_{LA} 对冠层尺度蒸散量的影响不显著。此外, 由于蒸渗仪和涡度相关仪所测量的空间尺度不同, 各种尺度差异原因(源区面积不同、边界效应不同、测量界面不同以及仪器误差等), 导致了各因素对两尺度蒸散量的影响程度不同, 所以 I_{LA} 对冠层和田间尺度蒸散量的影响不同。另外, 试验区水稻生长季节空气温度均较高, 减弱了温度变化对蒸散量的影响。风的作用使空气湿度梯度增大, 加快了蒸发速率, 所以风速和空气湿度对涡度所测田间尺度蒸散量(近地面潜热通量)的影响大于蒸渗仪称重原理测量的冠层尺度蒸散量。风速在日尺度对蒸散量的影响大于小时尺度, 这与刘国水等^[32] 研究结果不同, 可能与研究区域所属气候类型有关。由此可见, 影响节水灌溉稻田不同时间和不同空间尺度蒸散量的主要因素及其影响程度都不尽相同, 与其他气候和下垫面条件的蒸散特征也不相同, 节水灌溉稻田蒸散变化存在明显的时空尺度差异。

3 结 论

- a. 节水灌溉稻田 ET_{CML} 和 ET_{EC} 日内变化趋势均呈倒“U”型单峰曲线, 蒸散量日峰值均在 12:00 左右。各生育期典型日, 白天 $ET_{CML} > ET_{EC}$, 且上午两尺度蒸散量差值和蒸散变化相位差均明显大于下午; 夜晚 ET_{CML} 和 ET_{EC} 接近 0, 但 ET_{CML} 波动较大且会出现负值, 因为小型蒸渗仪监测范围小, 测量时受周围环境因素影响较大, 使 ET_{CML} 波动明显, 且夜间水汽凝结于土壤表面和水稻叶片, 使 ET_{CML} 出现负值。
- b. ET_{CML} 和 ET_{EC} 逐日变化趋势及波动状况基本一致, 总体上为先增加后减小, 高峰期出现在分蘖后期。生育期 ET_{CML} 和 ET_{EC} 日平均蒸散量分别为 4.68 mm/d 和 3.13 mm/d, ET_{CML} 始终大于 ET_{EC} , 蒸散量差

异最大值发生在分蘖后期, 两尺度蒸散量之比 (ET_{CML}/ET_{EC}) 平均为 1.50。与常规稻田相比, 节水灌溉稻田蒸散强度较小, 蒸散变化规律也不同。节水灌溉技术改变了稻田土壤水分状况, 减少了稻田耗水量, 有效提高了灌溉水利用率。

c. 节水灌溉稻田与其他生态系统的蒸散量影响因素不同, 不同时空尺度条件下蒸散量的主要影响因素及其影响程度也不尽相同。净辐射和饱和水汽压差是节水灌溉稻田蒸散量在冠层和田间空间尺度以及小时和日时间尺度共同的重要影响因素。其中净辐射是两空间尺度小时蒸散量最主要的影响因素, 而饱和水汽压差是两空间尺度日蒸散量最主要的影响因素。叶面积指数、空气温度、风速和土壤水分对蒸散量的影响受节水灌溉稻田这一特定下垫面条件的影响, 在不同空间以及不同时间尺度表现不同。节水灌溉稻田蒸散变化存在明显的时空尺度差异。

参考文献:

[1] 陈晗, 黄津辉. 中国南方农田蒸散量实测及其影响因素分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 79-86. (CHEN Han, HUANG Jinhui. Study on in-situ evapotranspiration measurement and its influential factors in farmland in Southern China[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 79-86. (in Chinese))

[2] 许迪. 灌溉水文学尺度转换问题研究综述[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 141-149. (XU Di. Review on scaling study in irrigation hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2): 141-149. (in Chinese))

[3] CAMMALLERI C, ANDERSON M C, GAO F, et al. A data fusion approach for mapping daily evapotranspiration at field scale[J]. Water Resources Research, 2013, 49(8): 4672-4686.

[4] USSIRI D A N, LAL R, JARECKI M K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(2): 247-255.

[5] 荣艳淑, 余锦华, 屠其璞. 华北地区动力和热力蒸发量特征研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 614-617. (RONG Yanshu, YU Jinhua, TU Qipu. Characteristics of dynamic evaporation and thermal evaporation in North China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(6): 614-617. (in Chinese))

[6] ERSHADI A, MCCABE M F, EVANS J P, et al. Impact of model structure and parameterization on penman-monteith type evaporation models[J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 521-535.

- [7] 岳天祥,刘纪远.生态地理建模中的多尺度问题[J].第四纪研究,2003,23(3):256-261. (YUE Tianxiang, LIU Jiyuan. Issues on multi-scales in ecogeographical modeling [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(3): 256-261. (in Chinese))
- [8] 杨大文,李翀,倪广恒,等.分布式水文模型在黄河流域的应用[J].地理学报,2004,59(1):143-154. (YANG Dawen, LI Chong, NI Guangheng, et al. Application of a distributed hydrological model to the Yellow River Basin [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 59(1): 143-154. (in Chinese))
- [9] 张永生,陈喜,高满,等.不同气候区潜在蒸散发全局敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):137-144. (ZHANG Yongsheng, CHEN Xi, GAO Man, et al. Global sensitivity analysis of potential evapotranspiration indifferent climatic regions [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(2): 137-144. (in Chinese))
- [10] 童瑞,杨肖丽,任立良,等.黄河流域1961—2012年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J].水资源保护,2015,31(3):16-21. (TONG Rui, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961—2012 and analysis of its influence factors [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 16-21. (in Chinese))
- [11] 陈晓菲,任立良,江善虎,等.赣江上游流域蒸散发量影响因素的遥感分析[J].水资源保护,2014,30(2):33-37. (CHEN Xiaofei, REN Liliang, JIANG Shanhu, et al. RS-based analysis of factors influencing evapotranspiration in upstream region of Ganjiang Basin [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 33-37. (in Chinese))
- [12] 任传友,于贵瑞,王秋凤,等.冠层尺度的生态系统光合-蒸腾耦合模型研究[J].中国科学,2004(增刊2):141-151. (REN Chuanyou, YU Guirui, WANG Qiufeng, et al. Study on photosynthetic-transpiration coupling model of canopy scale ecosystem [J]. Chinese Science, 2004 (sup2): 141-151. (in Chinese))
- [13] 李炜,司建华,苗政.林分耗水的尺度扩展研究进展[J].生态学杂志,2012,31(3):714-723. (LI Wei, SI Jianhua, MIAO Zheng. Advance in the application of upscaling methods to stand evapotranspiration [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(3): 714-723. (in Chinese))
- [14] 刘国水,许迪,刘钰.空间观测尺度差异对蒸散量时间尺度扩展方法估值的影响[J].水利学报,2012,43(8):999-1003. (LIU Guoshui, XU Di, LIU Yu. Influence of spatial scale variation on ET temporal upscaling methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 999-1003. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] GENTINE P, ENTEKHABI D, CHEHBOUNI A, et al. Analysis of evaporative fraction diurnal behaviour [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(1/2): 13-29.
- [17] 郭映,董阳,党慧慧,等.基于不同时间尺度玉米蒸散蒸腾量及其影响因素[J].资源科学,2014,36(7):1501-1508. (GUO Ying, DONG Yang, DANG Huihui, et al. Evapotranspiration and transpiration of maize in two time scales and the environmental effects [J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1501-1508. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 12-17. (in Chinese))
- [20] 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.
- [21] GIRONA J, CAMPO J D, 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.
- [22] 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))
- [23] DING R, KANG G 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.
- [24] 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.
- [25] 王介民. 涡动相关通量观测指导手册[EB/OL][2012-02-12]. <http://westdc.westgis.ac.cn/water/surveystd>. 2012.
- [6] WILSON K B, GOLDSTEIN A H, FALGE E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/2/3/4):223-243.
- [27] 刘渡, 李俊, 同小娟, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合状况分析[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(4):493-499. (LIU Du, LI Jun, TONG Xiaojuan, et al. Analysis of the energy balance closure in a winter wheat / summer maize double cropping system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4):493-499. (in Chinese))
- [28] MASSERONI D, CORBARI C, MANCINI M. Limitations and improvements of the energy balance closure with reference to experimental data measured over a maize field [J]. *Atmosfera*, 2014, 27(4):335-352.
- [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]. *农业机械学报*, 2016, 47(8):91-100. (LIU Xiaoyin, WANG Guanyi, YANG Shihong, et al. The influential factors and characteristics of transpiration and evaporation in water-saving irrigation paddy field under different temporal scales [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machiner*, 2016, 47(8):91-100. (in Chinese))
- [30] GRAG A, KUTTLER W, WEMER J. Mulching as a means of exploiting dew for arid agriculture? [J]. *Atmospheric Research*, 2008, 87(3):369-376.
- [31] POBLETE-ECHEVERRIA C, SEPULVEDA-REYES D, ORTEGA-FARIAS S. Effect of height and time lag on the estimation of sensible heat flux over a drip-irrigated vineyard using the surface renewal (SR) method across distinct phenological stages [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 141:74-83.
- [32] 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))
- [33] 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.
- [34] 刘斌, 胡继超, 张雪松, 等. 稻田逐时蒸散量的测定及其模拟方法的比较[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4/5):369-373. (LIU Bin, HU Jichao, ZHANG Xuesong, et al. Measurement simulation of hourly evapotranspiration in paddy field with different methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(4/5):369-373. (in Chinese))
- [35] HILMI M, SAAD H. Estimation of rice evapotranspiration in paddy fields using remote sensing and field measurements [D]. Malaysia:Universiti Putra Malaysia, 2005.
- [36] 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]. *Aust. J. Crop Sci.*, 2013, 7(5):650-658.
- [37] 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.
- [38] 孙仕军, 樊玉苗, 刘彦平, 等. 土壤裸地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))
- [39] 强小嫚, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(2):12-17. (in Chinese))
- [40] BALDOCCHI D D, WILSON K B. Modelling CO₂ and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales [J]. *Ecological Modelling*, 2001, 142(1/2):155-184.
- [41] RUIZ-PENALVER L, VERA-REPULLO J, Jiménez-Buendía M, et al. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations [J]. *Agricultural water management*, 2015, 151:103-113.
- [42] 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.

(收稿日期:2017-07-23 编辑:徐 娟)