

小型地中式称重蒸渗仪系统的研制

谢永玉¹, 陈冰², 徐俊增^{1,2}, 李萍³, 方铭琛², 陈曦⁴, 魏含津², 刘笑吟²

(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 农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 3. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210049; 4. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为进一步提高称重蒸渗仪的分辨率和准确度, 通过配备高精度称重传感器和用于消除环境因素对称重影响的参考桶, 研制了小型地中式称重蒸渗仪系统, 并应用于水稻蒸发蒸腾量(ET)和棵间蒸发量(E)的观测中。结果表明: 该称重蒸渗仪系统对 ET 和 E 的分辨率可达0.005和0.003 mm, 对应的高峰 ET 和 E 观测时段可以实现1 min以内(ET 和 E 可分别达到10和20 s)的水分消耗的识别, 低通量阶段也可达到3~5 min/次; 参考桶的配备将蒸渗仪系统的15 min、小时和日尺度的 ET 观测准确度分别提高了3.51%、2.17%和0.77%, E 观测准确度分别提高了18.52%、11.81%和2.95%。研究结果表明该套蒸渗仪系统具有分辨率高、准确度好、数据可靠等优势, 可用于农业、水文等领域的研究, 特别适用于短时蒸发蒸腾和旱地生态系统空气凝结水等微小水量变化的测定。

关键词: 称重式蒸渗仪; 蒸发蒸腾量; 棵间蒸发量; 分辨率; 准确度

中图分类号: P414.8; S161.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2022)06-0204-09

Development of a small-scale local weighing lysimeter system

XIE Yongyu¹, CHEN Bing², XU Junzeng^{1,2}, LI Ping³, FANG Mingchen²,
CHEN Xi⁴, WEI Hanjin², LIU Xiaoyin²

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co. Ltd., Nanjing 210049, China; 4. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To further improve the resolution and accuracy of weighing lysimeters, a small-scale local weighing lysimeter system equipped with high-precision weighing sensors and reference buckets which can eliminate the influence of environmental factors on the weighing was developed and then applied to observe rice evapotranspiration (ET) and inter-plant evaporation (E). The results showed that the resolution of ET and E measured by this system can reach 0.005 mm and 0.003 mm, respectively, and the corresponding observation time of peak ET and E are less than a minute (10 s and 20 s for ET and E , respectively) for the identification of the water consumption; moreover, it can still manage 3–5 minutes in the low-throughput phase. The observation accuracy of ET on 15 min, hourly and daily scale by this lysimeter system were improved by 3.51%, 2.17% and 0.77%, and those of E were improved by 18.52%, 11.81% and 2.95%, respectively. It shows that the lysimeter system can produce accurate, stable and reliable data with high resolution, it is applicable to the research of agriculture, hydrology and other related fields, especially for the measurement of small water changes such as short-term evapotranspiration and atmosphere condensed water of ecosystem in arid regions.

Key words: weighing lysimeter; evapotranspiration (ET); evaporation (E); resolution; accuracy

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809075); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200205027)

作者简介: 谢永玉(1976-), 女, 福建武平人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水利工程。

通讯作者: 徐俊增(1980-), 男, 山东聊城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论及其农田生态效应研究。

1 研究背景

蒸发蒸腾是水循环过程中的重要环节之一,也是地球生态系统消耗水分的主要方式^[1],控制着陆地生态系统和大气之间的物质和能量交换,对农业用水、水资源评价、区域干湿状况^[2]等均有影响。因此,准确地测定蒸发蒸腾量,对于制定合理的灌溉制度和排水标准,提高农田水分利用率,发展节水农业具有重要意义。

蒸渗仪作为蒸发蒸腾量地面观测的主要方式,早在19世纪就开始用于农田水分变化的监测^[3],经过百年多的发展,蒸渗仪现已成为农田水利测定蒸发蒸腾的标准仪器^[4],除了用于作物蒸发蒸腾和作物系数的测定外,还用于微气象仪器如涡度相关系统^[5]、基于遥感的作物蒸发蒸腾测量方法^[6]和土壤水量平衡模型^[7]等的检验,随着科研工作的深入开展,蒸渗仪更被广泛应用于水文^[8-9]、环境^[10]、林业^[11]等领域。

称重式蒸渗仪由于能够通过重量测定感知测桶内短时间内的土壤水分变化,因此目前在国内外应用较多,按照其结构与测桶尺寸,可分为大型和小型两种。大型称重式蒸渗仪的测桶表面积大,桶内种植的作物在数量、生理生态特征以及作物冠层结构等方面与大田相似,代表性好^[12],已被用于水稻、小麦等^[13-16]作物的不同时间尺度需耗水规律及作物系数等相关研究,以及山区林地^[17]、膜下滴灌^[18]凝结水的测定。但上述大型称重式蒸渗仪普遍存在基础质量大、建造费用高、安装维护及管理工艺复杂、使用环节较难对不同处理设置多个重复等问题,因此不适合于大范围推广应用^[12]。小型称重式蒸渗仪结构简单、安装方便、造价低、可实现多个蒸渗仪连续观测,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,前期多以测定裸露土壤蒸发或作物冠层及以下土壤蒸发为主^[19-20],Dugas等^[21]率先将小型蒸渗仪应用于作物蒸发蒸腾量的测定,结果表明其在测量高粱和冬小麦全生育期蒸发蒸腾总量上与大型蒸渗仪测量结果无显著差异;Ruth等^[22]将土壤水分状况保持与周围环境一致的小型蒸渗仪与大型蒸渗仪进行对比,结果表明小型蒸渗仪的蒸发蒸腾量测量结果不会因其较小的尺寸而受到影响;刘笑吟等^[23]利用小型蒸渗仪测定了水稻不同时间尺度的蒸发蒸腾量,结果表明其测量结果与涡度相关系统测定结果之间具有较高的相关性。

随着农田作物蒸发蒸腾量研究时间尺度的进一

步缩小^[24],以及蒸渗仪被用于旱地生态系统空气凝结水^[25]、露珠、雾和雾凇的测定^[26]等更精细化的研究工作的开展,研究人员对蒸渗仪的测量分辨率要求也随之提高。同时,传感器作为称重式蒸渗仪的主要元件,具有因温度的改变而产生温度漂移的固有属性^[27],而在实际测量工作中,传感器往往并非在恒温条件下工作,这将会影响传感器的准确度,从而造成称重蒸渗仪出现不可避免的系统误差。目前已知的称重式蒸渗仪最高分辨率为 0.01 mm ^[20,28-30],且没有通过改进蒸渗仪系统结构来修正温度等环境因素干扰的相关研究,因此,有必要研制一种结构简单、造价低、分辨率更高且不易受温度等外部因素干扰的称重蒸渗仪系统,以提升称重蒸渗仪的适用性。在充分吸取国内外有关称重式蒸渗仪特点的基础上,本研究研制了小型地中式称重蒸渗仪系统,该系统通过高精度称重传感器的使用以及合理的尺寸设计提高了对水分变化的分辨率,并通过配备与蒸渗仪测桶相同尺寸和负载的密闭参考桶作为对照,来量化外部环境因素带给称重系统的偏差并进行修正,以提高称重蒸渗仪系统识别水分变化的准确度。

2 小型地中式称重蒸渗仪的工作原理及研制

2.1 测量原理

小型地中式称重蒸渗仪的测量原理是通过称重传感器感应不同时刻蒸渗仪测桶内土体的重量,并根据水量平衡方程计算被测时间段内作物的蒸发蒸腾量或者棵间蒸发量,水量平衡方程如下^[12]:

$$ET(\text{或 } E) = I + P \pm Q \pm \Delta R - \Delta W \quad (1)$$

式中: ET 为时段 Δt 内作物蒸发蒸腾量,mm; E 为时段 Δt 内棵间蒸发量,mm; I 为时段 Δt 内灌溉量,mm; P 为时段 Δt 内降雨量,mm; Q 为时段 Δt 内地地下水交换量,mm,发生地下水补给时为正,发生渗漏水时为负; ΔR 为时段 Δt 内的地表径流量,mm,地表径流向蒸渗仪内部补水时为正,反之取负值; ΔW 为时段始末蒸渗仪的质量差,mm。

设计制造蒸渗仪时,盛土容器边缘均高于地面,以防止降雨产生的地表积水溢出或外部水倒灌,因此在降雨量较小不发生溢出时 $\Delta R = 0$;如果发生溢出,可以通过重新选择开始时刻进行推算。灌溉量 I 和降雨量 P 由灌溉水表和雨量计直接测得,也可根据灌溉和降雨发生时刻测桶重量增加值来进行估算, ΔW 由蒸渗仪的高精度称重传感器测得。在大部分地中式蒸渗仪设计时,底部是密封的,而本研制中

设置了专门的地下补水或者渗漏排出装置,地下水交换量 Q 可由专门设计的补水排水装置准确测定。

2.2 结构及组成

本研究设计的小型地中式称重蒸渗仪系统由测桶、参考桶、补水排水装置、称重系统、集线井、砝码、连接管构成。

测桶作为盛土容器,包括内桶和外桶,均为圆形柱状桶体,材质为2 mm厚不锈钢,内桶顶部一周焊有外倾防雨檐、覆盖内外桶之间的空隙,防止雨水灌入内、外桶之间的空隙而危及底部传感器。内桶回填原状土并根据需求选择种植作物(测 ET) 或保持土表裸露(测 E)。外桶预埋于田间、保持底部水平,内部放置称台。测桶按测量需求分为 ET 测桶与 E 测桶,两者结构相似,尺寸稍有不同。测桶结构如图1所示。

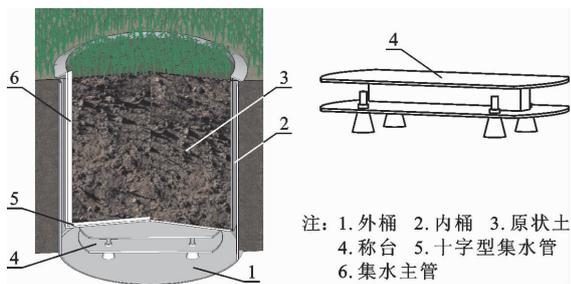


图1 小型地中式称重蒸渗仪测桶结构示意图

参考桶用于仪器校正和修正。参考桶为圆形柱状桶体,尺寸分别与 ET 测桶外桶和 E 测桶外桶一致,材质为不锈钢,根据填土重量,选择与之相近重量的标准砝码替代测桶内桶置于称台上,并盖上不锈钢盖子,用于校准蒸渗仪受到外部环境因素综合影响产生的测量误差,以提高测量准确度。

补水排水装置由十字形集水管和集水主管组成,十字形集水管包裹土工布,安装于测量桶内桶底部并由集水主管竖直连接至土表,便于人为控制地下水位,使桶内土壤状况最大限度接近大田土壤状况。

称重系统由称台和称重变送器组成。称台为订做,由4个支脚、安装底座、梁式称重传感器和承重板组成,材质均为不锈钢,称重传感器选用中航电测仪器股份有限公司生产的L6E-C3型高精度称重传感器。称台线缆从外桶侧壁靠近底部所开的5 cm孔洞通过一PVC硬管与集线井连通,并将线缆终端连接至称重变送器,称重传感器测得的数据经称重变送器采集、存储和显示,数据采集频率可根据研究需要进行设置。

2.3 田间安装与校验

(1) 田间系统安装。本研究布设两套小型地中

式称重蒸渗仪系统,A套为3个 ET 测桶+2个 E 测桶+1个 E 参考桶,B套为2个 ET 测桶+3个 E 测桶+1个 ET 参考桶,具体安装如图2所示。多测桶的配置既可用于同一试验条件下的重复处理以减小随机误差,又可对各测桶进行不同水肥管理以进行对照试验,提高了称重蒸渗仪的适用性。本测试设定的 ET 测桶的内桶内径为500 mm,高度为560 mm;外桶内径为540 mm,高度为610 mm。 E 测桶的内桶内径为200 mm,高度为560 mm;外桶内径为240 mm,高度为600 mm。 ET 测桶及参考桶的称重传感器量程为300 kg,标识精度为0.02%; E 测桶及参考桶量程为50 kg,标识精度为0.02%。根据测桶尺寸和土体密度,本测试 ET 测桶的标准参照物取175 kg, E 测桶取30 kg。



图2 两套称重蒸渗仪系统的安装现场

(2) 标定与校验。称重蒸渗仪在使用前需要进行标定和校验,标定是在变送器中建立不同重量下称重传感器输出信号与实际重量的关系,而校验则是在标定后,通过加载与卸载砝码,验证称重系统的测量精度与分辨率。选择在无风无雨的天气下进行标定,启动系统预热,待变送器上显示的数值稳定后,操作变送器的人机交互界面开始标定。称台上放置空桶,标定为零点,再根据传感器量程或可能的最大承载重量选择1个或多个重量点进行标定;校验时,采取逐级加载、卸载砝码的方式,模拟真实使用环境下的重量变化,以检验其精度与分辨率。

本试验对两组 ET 测桶分别标定了0、150、175和180 kg,并在175 kg的基础上分别依次加载和卸载500、200、100、50、20、10、5、2 g和11个1 g标准砝码,记录下理论重量变化分别对应的加载和卸载过程中的两组实测重量变化; E 测桶标定了0、10、20和30 kg,并在30 kg的基础上分别依次加载和卸载500、200、100、50、20、10、5、2、1 g和10个0.1 g标准砝码,记录下理论重量变化分别对应的加载和卸载过程中的两组实测重量变化。所得的重量变化校验数据见表1。

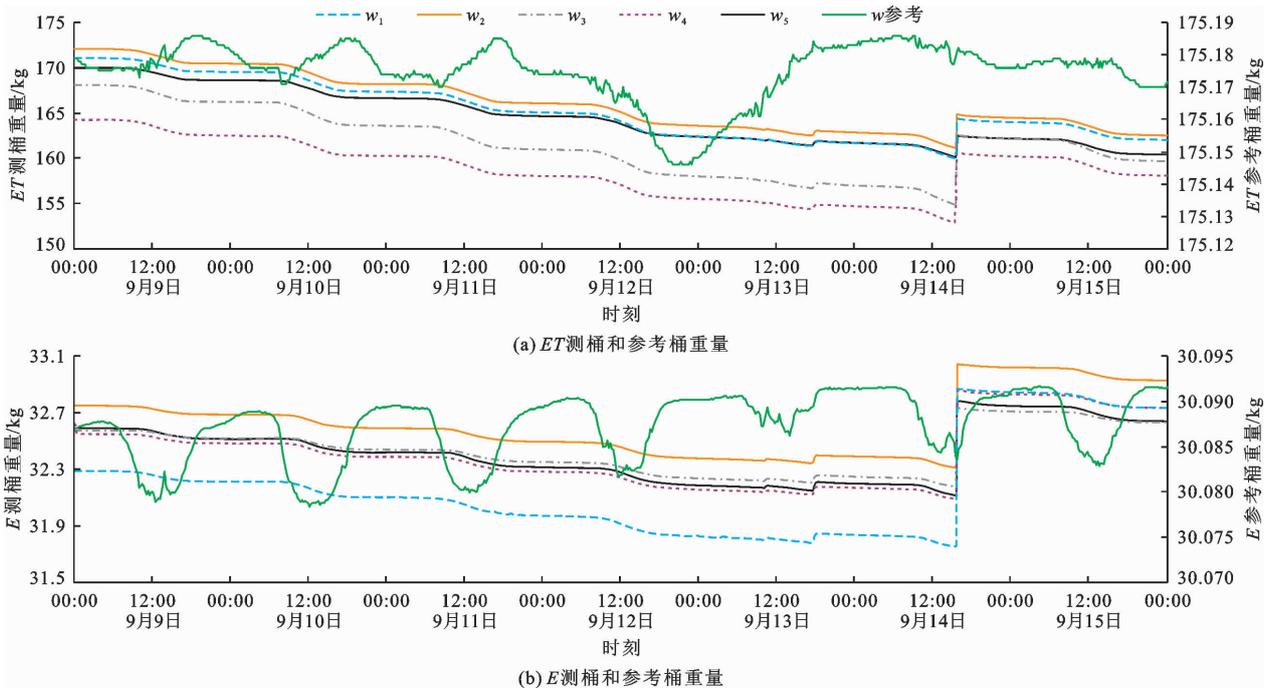


图3 蒸渗仪 ET 和 E 测桶、参考桶重量观测数据随时间变化情况(2021年9月9日-9月15日)

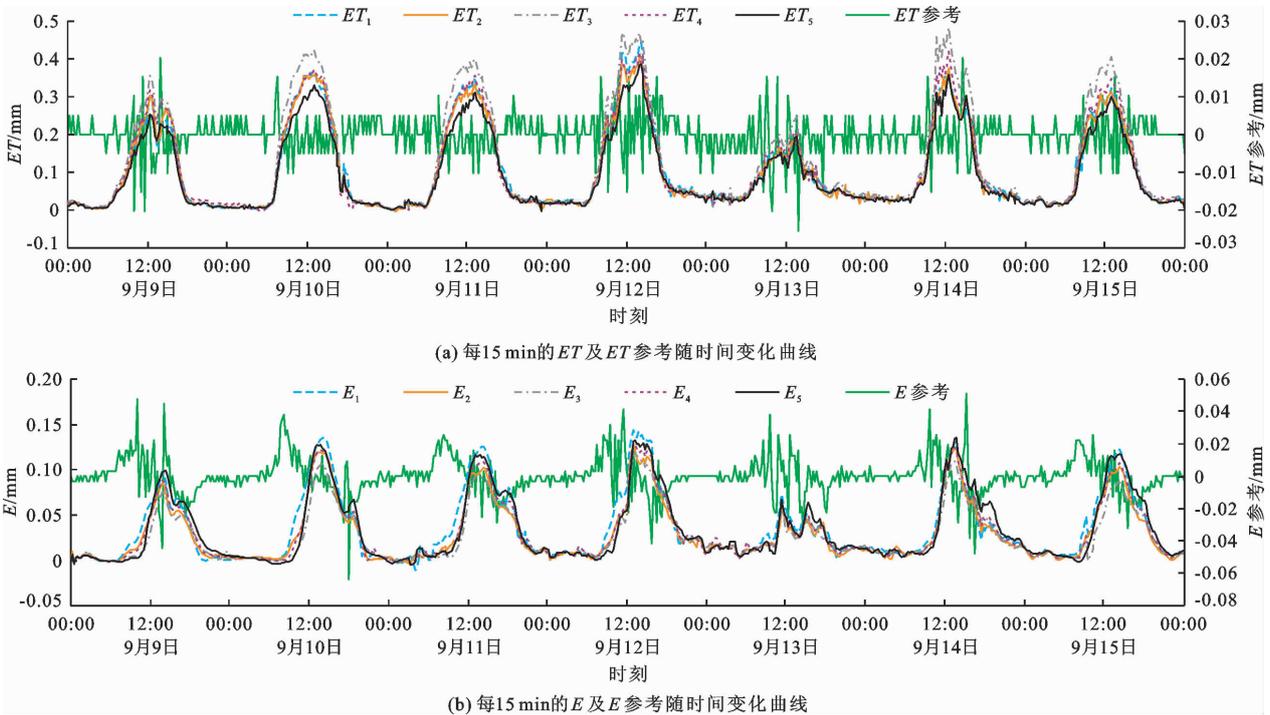


图4 试验田间水稻每15 min的ET和E及其参考值随时间变化情况(2021年9月9日-9月15日)

图5、6给出了各测桶ET观测值与ET平均值、E观测值与E平均值的散点图及线性关系,由图5、6可知,各散点图均紧沿1:1线分布,各ET值与ET平均值的散点图线性斜率维持在0.8719~1.1748范围内, R^2 均大于0.99;各E值与E平均值的散点图线性斜率维持在0.8546~1.1008范围内, R^2 均大于0.95。其中 ET_3 和 ET_5 比ET平均值分别存在偏大

和偏小的现象,这可能是由于各ET测桶内水稻长势有所差异,而9月上旬正处于水稻拔节孕穗期,蒸发蒸腾量大,从而导致各测桶的水稻蒸发蒸腾量存在差异;此外,与E平均值相比, E_1 和 E_3 值也出现了不同程度的差异,这可能是由于E测桶埋设于水稻棵间,而水稻因长势不均匀导致了各测桶裸露在外的蒸发面积不同,从而导致了各蒸发量的差异。整体而

言,不同测桶测得的 ET 、 E 随时间的变化趋势以及 各 ET 值与 E 值之间均具有较高的一致性。

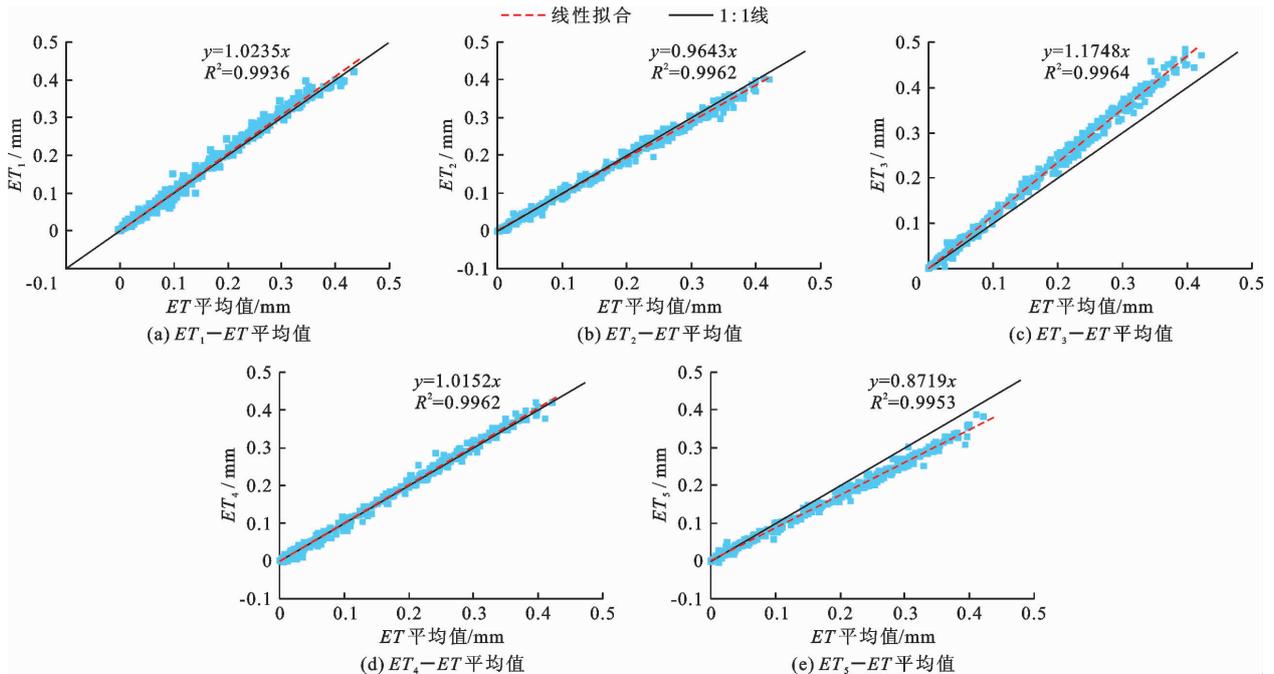


图 5 各测桶 ET 值与 ET 平均值的散点图及线性关系

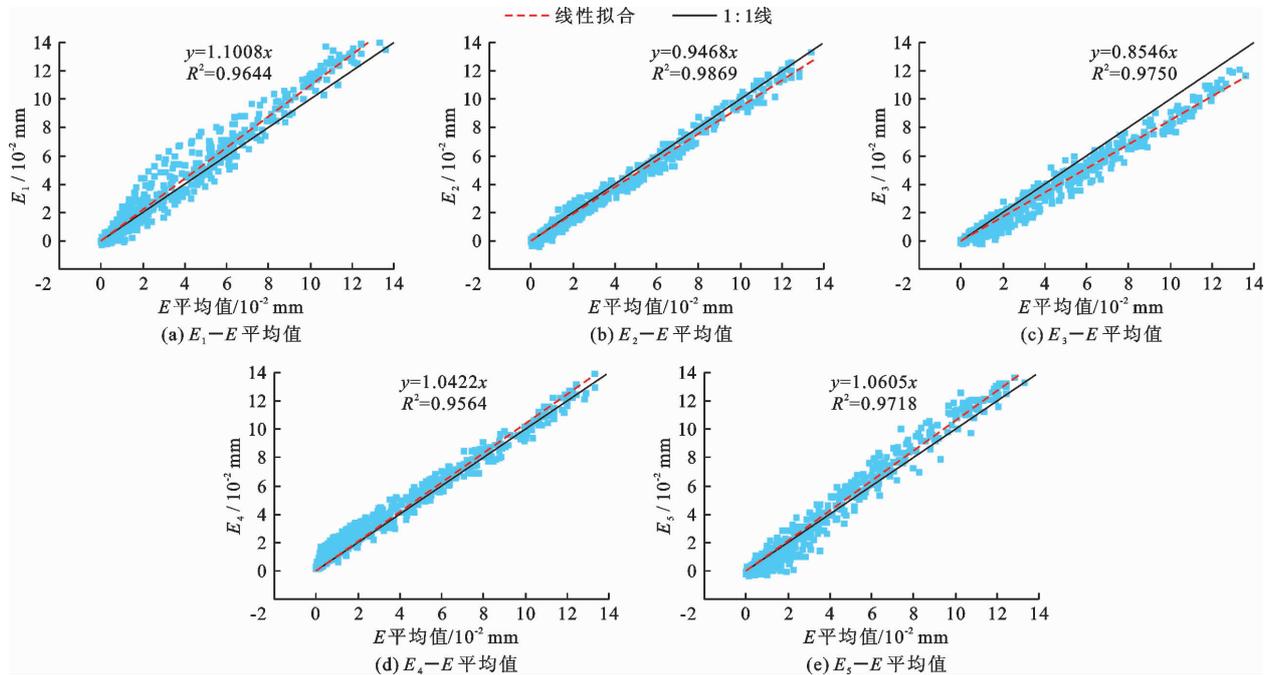


图 6 各测桶 E 值与 E 平均值的散点图及线性关系

3.3 准确度提升

将参考桶的重量变化换算成蒸渗仪面积对应的水深,以下称为蒸渗仪的系统偏差量(mm),其随时间变化情况见图 4。由图 4 可以看出, ET 和 E 系统偏差量分别在每天 8:00 - 20:00 和 6:00 - 18:00 时段内的变化幅度较大。其中,每 15 min、小时和日尺度的 ET 系统偏差量变化幅度分别为 $-0.025 \sim 0.020$ mm、 $-0.031 \sim 0.035$ mm 和 $-0.178 \sim 0.132$

mm;每 15 min、小时和日尺度的 E 系统偏差量变化幅度分别为 $-0.032 \sim 0.035$ mm、 $-0.094 \sim 0.109$ mm 和 $-0.090 \sim 0.118$ mm。

进一步分析不同时间尺度下参考桶对 ET 和 E 准确度的提升(提升准确度 = ET (或 E) 系统偏差量 / 修正后的 ET (或 E) 值 $\times 100\%$)可知,每 15 min、小时和日尺度的 ET 准确度分别提升了 3.51%、2.17%、0.77%,每 15 min、小时和日尺度

的 E 准确度分别提升了 18.52%、11.81%、2.95% (因作物蒸发蒸腾和蒸发主要发生在白天,故此统计的是参考桶对 8:00–20:00 ET 值和 E 值的提升精度)。上述结果表明,随着观测时间尺度的增加, ET 和 E 参考桶对测量结果准确度的提升幅度逐渐减小,产生这一现象的主要原因是 ET 和 E 随着观测时间尺度的增加而大幅增加,而系统偏差量有正有负,随时间累积增幅不大,故两者比值相对减小。

由之前的计算结果已知每 15 min ET 最高可达 0.484 mm,通过本文中 2.4 节的田间验证试验已知 ET 测桶的分辨率为 1 g,对应 ET 测桶内径 500 mm、高度 560 mm 的分辨率为 0.005 mm,由此可以推算出该蒸渗仪系统 ET 测桶在高峰 ET 观测时段的数据采集频率可以实现 1 min 以内(甚至达到 10 s 测定 1 次)。类似地,可以推算出该蒸渗仪系统 E 测桶在高峰 ET 观测时段的数据采集频率可以实现 1 min 以内(甚至达到 20 s 测定 1 次)。而针对低通量阶段,每 15 min 尺度的 ET 和 E 分别在 0.025 和 0.01 mm 左右,则数据采集频率可以达到 3~5 min 测定 1 次。该称重蒸渗仪系统可以实现对蒸发蒸腾的高频高分辨率测定,满足短时蒸发蒸腾观测的要求。

4 讨论

尽管小型蒸渗仪在测量蒸发蒸腾方面被认为存在一定的局限性,但以往多数关于其可靠性方面的研究认为,小型称重式蒸渗仪因其造价低、结构简单、易于安装等优势已成为测量蒸发蒸腾量的有效方法^[21–25]。巴西巴伊亚联邦大学研制的用于测量烟草需水量的小型半封闭箱体结构称重式蒸渗仪,其分辨率达 0.06 mm^[28];德国 UMS 公司研发生产的 SFL-600 小型称重式蒸渗仪,直径为 0.3 m,深度为 0.6 m,分辨率为 0.014 mm^[20];王富庆等^[29]研制的自动地下轨道称重式蒸渗仪测控系统的自动化程度高,蒸渗仪直径为 0.68 m,高度为 1.2 m,分辨率可达 0.028 mm;南京南林电子科技有限公司设计的型号为 NLZS-10-01 的小型蒸渗仪对应分辨率达 0.01 mm^[30]。本研究所设计的小型地中式称重蒸渗仪系统 ET 测桶直径为 0.50 m,深度为 0.56 m,分辨率达到 0.005 mm; E 测桶直径为 0.20 m,深度为 0.56 m,分辨率达到 0.003 mm,其分辨率较以往系统有大幅提高,充分满足了短时段内对作物蒸发蒸腾量、裸土(裸间)蒸发量、旱地生态系统空气凝结水等更微小水量变化观测的需求。

称重蒸渗仪系统的工作环境一般在户外,其称

重数据易受到外部环境因素的影响,已有研究表明,作为称重蒸渗仪核心元件的称重传感器,其输出因材料和电桥结构特性会随温度变化而改变,即产生温度漂移^[27]。而传感器一般不在恒温下工作,这将会影响传感器的准确度和性能,并最终影响蒸渗仪的测定准确度。通常情况下,解决传感器温度漂移的主要方法是对称重传感器进行温度补偿^[32],可在一定程度上减小温度漂移的影响。本研究设计的蒸渗仪系统所用称重传感器已经经过厂家温度补偿,并专门配备了与测桶尺寸、负载相同的密闭参考桶,用于量化外部环境对蒸渗仪测量结果造成的影响。研究表明,本应保持恒定的参考桶质量随时间呈明显的周期性变化,造成蒸渗仪称重系统的系统偏差,将偏差量换算为蒸渗仪面积所对应的水深,得到每 15 min、每小时和每日的 ET 参考桶系统偏差量最大分别可达 0.020、0.035 和 0.132 mm, E 参考桶系统偏差量最大分别可达 0.035、0.109 和 0.118 mm,通过修正各测桶的系统偏差将水稻每 15 min、每小时和每日 ET 的准确度分别提升了 3.51%、2.17%、0.77%,每 15 min、每小时和每日 E 的准确度分别提升了 18.52%、11.81%、2.95%。另有研究表明西北干旱地区日凝结水结果观测为 0.055~0.5 mm^[20–21],而该蒸渗仪称重系统的日系统偏差量占到了日凝结水观测量的 26%~240%,可见称重蒸渗仪系统中参考桶的配备对研究凝结水等微小水量变化的观测精度至关重要。

为探究影响蒸渗仪称重输出的外部环境因素,将 2021 年水稻季观测到的参考桶重量与同时期该区域气象站监测到的空气温度、湿度进行画图分析,结果表明三者之间有明显的相关关系。考虑到称重蒸渗仪系统内部温湿度与大气温湿度存在一定差异,于 2021 年水稻季后的 11 月 19 日将温湿度传感器放置于参考桶内称台旁,对蒸渗仪系统内部温湿度进行为期 1 周的实时观测,并同步高频采集参考桶的称重数据,得到 ET 、 E 参考桶重量与各自桶内温度、湿度的变化关系,如图 7、8 所示。由图 7、8 可知, ET 参考桶的重量与桶内温度、湿度均有较明显的相关关系,分析计算其相关系数分别为 0.84 和 0.97;而 E 参考桶的重量与桶内温度、湿度相关关系不明显。两参考桶重量与温湿度相关关系存在差异的原因可能是两参考桶的尺寸不同、所用传感器量程不同,两桶内部温度、湿度也存在一定差异。但温度、湿度各自对称重蒸渗仪系统的影响规律及所占比重尚不明确,需要进一步试验再做深入研究。

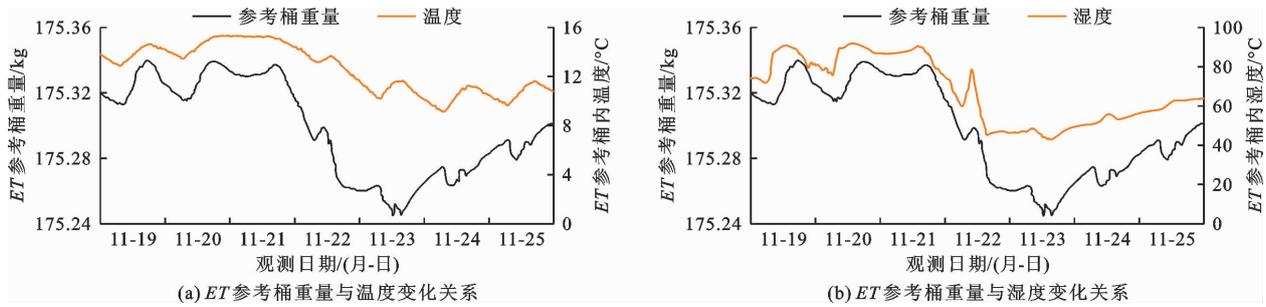


图7 ET参考桶重量与桶内温度、湿度的变化关系

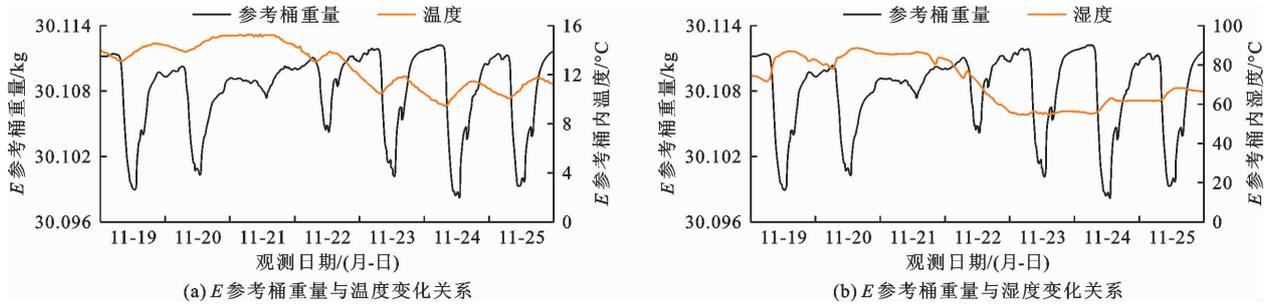


图8 E参考桶重量与桶内温度、湿度的变化关系

5 结论

为进一步提高称重蒸渗仪的适用性,研制了小型地中式称重蒸渗仪系统,并分析了该称重蒸渗仪系统在水稻生育期的观测结果,得出的主要结论如下:

(1)该称重蒸渗仪系统对蒸发蒸腾量(ET)和蒸发量(E)的分辨率可达 0.005 mm 和 0.003 mm ,高峰 ET 和 E 观测时段的数据采集频率可以实现 1 min 以内,低通量阶段可以达到 $3\sim 5\text{ min}$ 一次测定,该系统高频高分辨率的数据监测可以很好地满足水稻短时蒸发蒸腾量和棵间蒸发量的观测需求。

(2)测量数据经参考桶修正后,每 15 min 、每小时、每日 ET 观测准确度分别提升了 3.51% 、 2.17% 、 0.77% ,每 15 min 、每小时、每日 E 观测准确度分别提升了 18.52% 、 11.81% 、 2.95% ,这一结果表明参考桶的配备有效减小了称重蒸渗仪因受温度等外部环境因素的影响而导致的测量误差,进一步提升了称重蒸渗仪的测量准确度。

本研究设计的小型地中式称重蒸渗仪系统的分辨率高,准确度好,适用性强,可应用于农业、水文等不同领域的研究。然而,本研究虽用参考桶数据对测量结果进行了修正,但导致参考桶称重数据变化的各环境因素对称重数据影响的规律尚不明晰,所占比重尚不明确,未来还需进一步研究。

参考文献:

[1] 韦振锋,陈思源,黄毅. 1981~2010年陕西潜在蒸散量时空特征及其对气候因子的响应[J]. 地理科学,2015,

35(8):1033-1041.

- [2] 韩文霆,邵国敏,马代健,等. 大田玉米作物系数无人机多光谱遥感估算方法[J]. 农业机械学报,2018,49(7):134-143.
- [3] KOHNKE H, DREIBELBIS F R, DAVIDSON J M. A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance [J]. Miscellaneous Publication (United States Department of Agriculture), 1940.
- [4] 葛帆,王钊. 蒸渗仪及其应用现状[J]. 节水灌溉,2004(2):30-32+35.
- [5] 王伟娜,张翔,张立锋,等. 蒸渗仪法和涡度相关法测定蒸散的比较[J]. 生态学杂志,2019,38(11):3551-3559.
- [6] 金楷仑,郝璐. 基于遥感数据与SEBAL模型的江浙沪地区地表蒸散反演[J]. 国土资源遥感,2020,32(2):204-212.
- [7] SOLDEVILLA - MARTINEZ M, QUEMADA M, LÓPEZ-URREA R, et al. Soil water balance: Comparing two simulation models of different levels of complexity with lysimeter observations [J]. Agricultural Water Management, 2014, 139: 53-63.
- [8] 齐子萱,周金龙,季彦桢,等. 基于长系列观测资料的干旱区降水入渗补给规律研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):124-133.
- [9] 张志山,李新荣,赵洋,等. 沙坡头生态水文学研究进展及水量平衡自动模拟监测系统[J]. 中国沙漠,2018,38(6):1119-1135.
- [10] AHMED R. 华北菜地硝酸盐淋失调控研究[D]. 北京:中国农业科学院,2018.
- [11] 魏宁宁,母艳梅,姜晓燕,等. 毛乌素沙地油蒿-杨柴灌

- 从生态系统蒸散组分分配及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2407 - 2414.
- [12] 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, 36(8): 228 - 231 + 236.
- [13] 高磊, 申双和, 邵立瑛, 等. 水稻蒸散特征及日尺度作物系数估算[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 158 - 165.
- [14] 敬峰, 段爱旺, 张莹莹, 等. 基于大型蒸渗仪的冬小麦蒸散规律及其模拟[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 17 - 26.
- [15] 吴辰, 王国庆, 郝振纯, 等. 长武塬区实际蒸散发变化及驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 37 - 42.
- [16] WILLIAMS L E, FIDELIBUS M W. Measured and estimated water use and crop coefficients of grapevines trained to overhead trellis systems in California's San Joaquin Valley[J]. Irrigation Science, 2016, 34(6): 431 - 441.
- [17] 刘文娜, 贾剑波, 涂志华, 等. 北京山区林地凝结水特征研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 298 - 302.
- [18] 马瑞莎, 乔长录, 葛瑞晨. 膜下滴灌棉田凝结水量研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 93 - 99.
- [19] BANIMAH D S A, KHALILI D, KAMGAR - HAGHIGHI A A, et al. Evaluation of groundwater potential recharge models considering estimated bare soil evaporation, in a semi-arid foothill region[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(1): 162 - 172.
- [20] 雷涛, 郭向红, 孙西欢, 等. 不同灌溉方式下果园棵间蒸发特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(Z1): 179 - 184.
- [21] DUGAS W A, BLAND W L. The accuracy of evaporation measurements from small lysimeters[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 46(1 - 2): 119 - 129.
- [22] RUTH C E, MICHEL D, HIRSCHI M, et al. Comparative study of a long-established large weighing lysimeter and a state-of-the-art mini-lysimeter[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1 - 10.
- [23] 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 + 170.
- [24] 李亚威, 刘笑吟, 徐哲威, 等. 不同蒸散量时间尺度提升法用于节水灌溉稻田的对比分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 90 - 99.
- [25] 郭晓楠, 查天山, 贾昕, 等. 典型沙生灌木生态系统凝结水量估算[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 80 - 87.
- [26] MEISSNER R, SEEGER J, RUPP H, et al. Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170(3): 335 - 344.
- [27] 刘九卿. 称重传感器电路补偿机理及补偿电阻计算[J]. 衡器, 2014, 43(1): 23 - 29.
- [28] SCHMIDT C D S, PEREIRA F A C, OLIVEIRA A S D, et al. Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies[J]. Water Resources & Irrigation Management, 2013, 2(2): 77 - 85.
- [29] 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.
- [30] 余映军, 齐学斌, 韩洋, 等. 蒸渗仪在农业科研上的应用现状及发展趋势[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20): 127 - 135.
- [31] 季辰, 朱忠礼, 徐自为. 高精度称量式蒸渗仪数据处理方法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 628 - 634.
- [32] 卓成市. 称重传感器测试与数字补偿系统的设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.

(上接第 203 页)

- [25] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, LIU Mingliang, et al. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895 - 2007[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(7): 1311 - 1327.
- [26] 史晓亮, 吴梦月, 张娜. 中国典型陆地生态系统水分利用效率及其对气候的响应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 152 - 159.
- [27] 常娟, 张增信, 田佳西, 等. 西北地区草地水分利用效率时空特征及其对气候变化的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 119 - 125.
- [28] 常晓格, 王志慧, 肖培青, 等. 黄土高原生态系统水分利用效率演变及驱动因素空间分异规律[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 244 - 252.
- [29] WANG Haibo, LI Xin, XIAO Jingfeng, et al. Evapotranspiration components and water use efficiency from desert to alpine ecosystems in drylands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 298 - 299: 108283.
- [30] 聂冲, 杨军, 黄从红. 北京城区地表水体对城市热环境的调节作用分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(6): 1258 - 68.
- [31] 邹杰, 丁建丽, 秦艳, 等. 遥感分析中亚地区生态系统水分利用效率对干旱的响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 145 - 152 + 313 - 314.
- [32] 王金杰, 赵安周, 胡小枫. 京津冀植被净初级生产力时空分布及自然驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1158 - 1167.
- [33] YUAN Wenping, ZHENG Yi, PIAO Shilong, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. Science Advances, 2019, 5(8): 1396 - 1407.