

利用蒸发计估测参考作物蒸发蒸腾量的试验研究

张晓涛¹ 康绍忠² 编译

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室 陕西 杨凌 712100 ;

2. 中国农业大学农业水问题研究中心 北京 100083)

摘要 根据联合国粮农组织推荐的方法估算参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)需要具备一定的气象资料, 而使用另一种方法, 即蒸发计估测 ET_0 , 可以减少基于作物蒸发蒸腾量制定灌溉制度的工作量, 并且降低其复杂度。在叙述蒸发计构造及使用方法的基础上, 介绍了一些研究者在不同气候条件下对蒸发计估测 ET_0 准确度的试验研究。试验表明, 在缺乏标准气象资料时, 可以利用蒸发计来可靠地估测农场或更广阔领域的 ET_0 。

关键词 蒸发计 灌溉 蒸发蒸腾量

中图分类号 : P332.2

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-764X(2007)01-0091-04

Experimental study on application of evapotranspirometers to reference crop evapotranspiration estimates //ZHANG Xiaotao¹, KANG Shaozhong² (1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Center for Agricultural Water Research, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract : Reference crop evapotranspiration (ET_0) estimates on the basis of FAO recommended methodology require some meteorological data; however another approach, i.e. the use of evapotranspirometers for ET_0 estimates, can reduce the work load and decrease the complexity associated with ET_0 -based irrigation scheduling. Based on analysis of the structure and utilization method of evapotranspirometers, an introduction was given to some experimental studies on the reliability of ET_0 estimates by use of evapotranspirometers under different meteorological conditions. The result shows that evapotranspirometers can be used for reliable estimates of ET_0 of farmland and even wide ranges when normal meteorological data are not available.

Key words : evapotranspirometer; irrigation; evapotranspiration

测量或者估算得出 ET_0 (参考作物蒸发蒸腾量) 是灌溉制度制定和农业水管理的重要组成部分。一般地, 农田蒸发蒸腾量的确定是按照所谓的“两步骤”方法^[1]。第一步, 按照当时当地的气象资料 (如太阳辐射、空气温度、风速和相对湿度等) 估算标准参考作物的蒸发蒸腾量; 第二步, 利用半经验系数 (即作物系数 k_c) 来考虑不同作物和环境的影响因素, 因而, ET_c 的计算公式为 $ET_c = k_c ET_0$ 。最近, FAO^[2]重新规定了依据 Penman-Monteith (PM) 公式计算参考作物蒸发蒸腾量的步骤。虽然, 近来一些研究者报道, 在一些气候条件下, 按照 PM 公式计算得到的 ET_0 值偏低, 但此方法目前仍为计算参考作物蒸发蒸腾量的最好方法^[1]。然而, 对于并不熟悉这些复杂公式的种植者和农技师来说, 上述方法操作起来会很困难; 另外, 由于 PM 公式在计算时必须已知一些气象和环境参数, 因此需在草地上建立并维

护标准气象站以便于数据采集, 这又增加了 PM 公式在实际应用中的复杂度。

估算 ET_0 的另一种方法是使用蒸发蒸腾测量仪或一些物理模拟仪, 仪器所测参数单一且容易得到, 与上面所提的公式法比起来, 这种方法减少了工作量并降低了复杂性。各种不同类型的蒸发蒸腾仪 (如蒸发皿式、湿纸或湿布式、多孔陶杯式) 用于估算 E_0 (水面蒸发量) 及 ET_0 已有 150 多年的历史^[3]。多孔陶杯式蒸发计由 John Leslie 于 1813 年首次提出, 此后, Bellani, Babinet, Livingston 等对其进行了改良, 成型了现在标准的蒸发计。这种蒸发计是一类植物蒸腾的物理模拟仪^[3]。这种仪器的主要作用是提供其所设置地的任何给定作物的蒸发蒸腾量。用户可从安放在仪器标尺前的测压管读得数据。读测压管与读雨量计一样方便, 因此, 利用蒸发计, 种植者或农技师便可以定量获得作物需水量随天气条件改变

而变化的情况。由于仪器可以提供可靠的 ET (作物蒸发蒸腾量) 因而它更适用于附近无气象站或气象资料难以获得的区域。因为蒸发量是连续显示的, 所以该仪器可以提供不同时间段的 ET , 这就使它可以应用于灌溉制度的制定中估算 $ET_0^{[1]}$ 。

A 型蒸发皿应用相似的原理设计, 与之相比, 多孔陶杯式蒸发计的优势在于^[3-4]: ①具有测压管, 测值更为精确; ②起风的时候, 蒸发皿的水面会形成涟漪或波浪, 这一变化很普遍并且无法控制, 用其进行精确观测比较困难, 而蒸发计的水面完全不受风的影响; ③开放式蒸发皿的水面还会受到动物(如鸟类)的侵袭, 蒸发计不存在这一问题; ④开放式蒸发皿必须定期维护, 如为避免水浑浊, 要对其中的水适时更换, 而蒸发计不需要; ⑤蒸发计比蒸发皿运行时间长, 其累计蒸发量可达 300 mm; ⑥蒸发计比蒸发皿更为经济(1 台蒸发计大约为 300 美元, 而 1 台 A 型蒸发皿约为 2000~3000 美元)。这些均使多孔陶杯式蒸发计更具应用价值。

1 蒸发计的构造

经恰当安置的蒸发计如同 1 个微型气象站, 可提供 ET_0 值, 其运行费用合理, 工作量小。仪器安置简便, 也无需太多维护。蒸发计^[1, 3-5]的主要组成部分是 1 个置于圆柱形储水容器上的湿陶杯 (Bellani 多孔陶杯) (见图 1)。陶杯上覆有绿色纤维织物以模拟作物冠层。容器可储水高度为 300 mm, 其中充满蒸馏水, 水受蒸发拉力, 并经过一直延伸到容器底部的吸管, 从陶杯顶部蒸发出去。仪器使用蒸馏水是为了防止一些固体溶解物在陶杯的孔隙及表面沉积而影响蒸发速率。在纤维织物的下方, 陶杯上还覆盖一层特殊的膜以防止雨水入渗。容器上设有 1 个进气孔以保持容器内外气压平衡, 接有直径

约 1.0 cm 的透明塑料管以指示水位。蒸发消耗的水深可以通过前后 2 次从塑料管读取的水位值的差确定。储水容器通过玻璃或塑料吸管给 Bellani 陶杯充水。吸管通过密封性能好的橡皮塞与陶杯的颈部相连, 在底部设有止回阀。止回阀用来使水向上流入陶杯, 而防止水倒流入储水容器。

蒸发计用 Bellani 多孔陶杯上覆盖的绿色帆布织物模拟植物叶片。理论上, 绿色织物产生的扩散阻力与生长旺盛、灌水良好的植物叶片气孔阻力相似, 因而可以控制蒸发速率。从物理角度分析, 液态的水流入多孔陶杯, 而后以水汽形式从绿色帆布织物散发进入大气。由水量守恒, 流入多孔陶杯的液态水量应等于从绿色覆盖物蒸散出去的水汽量。通过测量 Bellani 陶杯的水力传导度及应用达西定律分析表明, 绿色织物覆盖下杯中普遍的湿度状况与植物叶肉中的相似, 并且, 陶杯和织物中的含水量与植物叶片的饱和含水量基本相同。研究者们还指出, 蒸发计储水容器中的水位高度对蒸发速率影响不大。绿色织物对绿色光波的反射范围与天然绿色植被相同。由于绿色织物覆盖下的杯中有很高的水汽含量以及陶杯自身孔隙中含有水, 因而可以模拟植物叶片对红外波段的吸收。这样, 便可以很好地模拟植物的反射率。另外, 可以通过改变绿色织物的类型来模拟不同植物(如紫花苜蓿、青草、各种农作物)的蒸发蒸腾速率。

对蒸发计的织物表面温度和灌水良好的叶片温度测量表明, 二者最大差值为 1℃。由于蒸发是一个冷却过程, 且上述二者的表面蒸腾均很活跃, 因而温度将会近似相同。

由上所述, 蒸发计和田间作物的蒸发表面具有等量的感热通量和潜热通量。

2 蒸发计的使用

一般地, 将蒸发计置于灌溉农田附近的木头支架上(见图 2), 所选站点应尽可能代表田地和作物的普遍情况^[1]。陶杯上表面应高于地面 1 m 左右, 以使其不被较高的树木或作物遮挡。仪器的观测管上有 2 根可移动的红色指针, 位于上方的指针用来标记仪器的初始水位高度。参考作物的蒸发蒸腾量可以通过一段时间内水位的下降值来估算。Bellani 陶杯在安装前需在蒸馏水中充分浸润, 以避免在蒸发计工作过程中因陶杯自身吸水而造成水位下降。帆布织物必须与陶杯的顶部紧密衔接, 二者之间不能出现气穴, 否则会使日测值减少 0.3~0.5 mm^[3]。如果仪器无人监测, 可采用电子蒸发计^[1]。读数可以自动获取或者通过置于储水容器侧面的玻璃测管

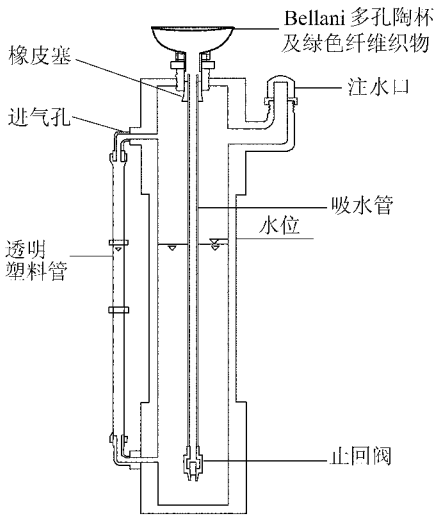


图 1 蒸发计结构示意图^[1]



图2 蒸发计的使用^[1]

目视读取。人工目视读数可以精确到 1 mm(仪器以公制划分刻度,最小刻度为毫米)因此,在失水率很低时,每日读数误差会很大,建议以周为时间间隔读数。电子蒸发计有数字输出端,每 0.254 mm 的蒸发变化量相应地传输 1 个脉冲。通过校准后的玻璃测管量测蒸发量误差小于 1%。玻璃测管上的电容性液体传感器指示测管内水的空或满。如果玻璃管内水满,则三向阀通过吸水管将玻璃管连接于蒸发表面,如果玻璃管内水空,则三向阀便将玻璃管与储水容器相连以充水。每当玻璃管内水空,便会有脉冲传入数据自动记录器中。此种脉冲输出的形式如同倾桶式雨量计,可以用普通的数据自动记录器记录。

3 蒸发计在不同气候区的试验研究

蒸发计以其简便实用的性能正逐渐被广大灌溉者和农技师所接受。为验证蒸发计在不同气候环境中的工作性能,并给用户提供指导灌溉实践的建议,研究者在各种不同的环境中对蒸发计进行了测试。

3.1 地中海气候区的试验

区域性的大气平流和特殊的气象条件(如夏季高温、低湿,大多数农田气象参数值的昼夜大幅温差)形成独特的地中海气候,这些都可能影响蒸发计的工作性能。如,两种截然不同的天气状况的频繁剧烈变化便会降低其工作性能,因为这会影响仪器的反应时间,进而导致测值的滞后性。因而有必要开展试验证明在地中海气候条件下灌溉中应用蒸发计的可行性^[1]。

试验在意大利的坎帕尼亚区和普利亚区 2 个行政区进行,分别代表意大利南部灌溉平原的 2 种不同的气候环境。通过分析多年(20 年或更长时间)气象资料可知,试验地为典型的地中海岸环境,夏季少雨或无雨,而秋季雨水充沛。7 月末和 8 月初日

平均最高气温达 30 ℃。与东海岸相比,西海岸春、秋季降水量多,夏季蒸发量大。

研究者在东、西沿海的 5 个试验点,包括普利亚区的 Foggia 和 Rutigliano 试验站(Lolium perenne 草地)坎帕尼亚区的 Vitulazio 试验站(草地)、Torre Lama 试验站(烟草地)及位于该站以南 20 km 的民用农场(紫花苜蓿地),用多种仪器进行测试,并建立了蒸发计所测 ET_0 与蒸渗仪、A 型蒸发皿测值及 PM 计算值间的回归模型。试验在 5 个灌溉季节进行,各种植被均实施充分灌水。

试验结果表明,在地中海气候条件下,使用蒸发计估测 ET_0 可以得到满意的结果,且测值与 PM 公式计算值符合较好。在干旱气候条件下的东部沿海试验站点,蒸发计测值比 PM 公式的计算值要偏大,此结论与 Rana 等和 Steduto 等的研究结果,即在干旱的地中海气候条件下 PM 公式计算所得 ET_0 结果偏小相符。Broner 和 Law 在属于干旱区的美国科罗拉多州为期 30 d 的试验中发现,蒸发计所测 ET_0 比修正后的 PM 公式计算值大 2%。研究者认为,差值由试验期间周边干旱所带来的平流造成。

蒸发计测得的 ET_0 与 A 型蒸发皿测得的结果同样准确或者比后者更为准确,且二者相比,蒸发计在可靠性和方便使用方面更具优势。蒸发计估测得的 ET_0 与高灵敏度称重式蒸渗仪测定的草地 ET 也十分接近,统计分析表明,二者的回归直线斜率接近 1:1。

3.2 湿润气候区的试验

为验证在湿润气候条件下蒸发计估测 ET_0 的准确度,Imak 等^[3]于 1996~2002 年在美国佛罗里达州中北部的 Gainesville(位于北纬 29°38',西经 82°22',海拔 29.3 m)和 Citra(位于北纬 29°24',西经 82°10',海拔 35 m,在 Gainesville 以南约 50 km)分别设站点开展了田间试验。研究区年均降水量约为 1400 mm,其中 50%~60% 发生在 5 月到 9 月下旬。夏季日最低和最高气温分别为 18 ℃和 35 ℃,冬季为 4 ℃和 22 ℃,两季的日最低相对湿度分别为 60% 和 34%,年均相对湿度为 51%。一年中,通常 3 月风速最大,6 月下旬到 9 月下旬风速最小。

研究者在每个站点均设置 3 台同一类型的蒸发计,将其沿南北向并排放置在灌水充分的草地上,相邻 2 台蒸发计的间距为 2 m。试验读数取 3 台仪器的平均值,尽量将精度保持在 0.2 mm。在 Gainesville 站点的试验分两个时段进行,分别为 1996 年 10 月 21 日至 1997 年 8 月 12 日和 2001 年 3 月 7 日至 12 月 30 日,试验期间每天上午 7:30 读取数据。Citra 站点的试验时段为 2002 年 7 月 29 日至 12

月 29 日,上午 7 30~8 00 进行读数,时间间隔为 1~3 d,该站的日 ET 值取读数与对应间隔天数的比值。

将 PM 公式计算得到的 ET_0 作为蒸发计测值准确度的评价标准,对 2 个站点所测的日 ET 值及每 3 d 和 7 d 的日平均 ET 值与相应的 ET_0 值通过计算二者的平方根误差、相关系数及比值进行比较,并区分雨天和无雨天比较日 ET 值和 ET_0 值。结果表明:①在各站点,蒸发计所测日 ET 值大多低于 PM 公式计算得到的 ET_0 值,二者间的相关关系较好;②在取每 3 d 或 7 d 的日平均 ET 值与相应的 ET_0 值进行比较时,相关系数大大改善,因而,利用每 3 d 或 7 d 的日平均 ET 值可以进行较为准确的灌溉预报;③蒸发计的工作性能受降雨量的影响较大,一般来说,在雨天,蒸发计所测 ET 值大大低于 ET_0 值。因而,需引入恰当的修正因子以调整蒸发计所测 ET 值。在雨天,该因子随降雨量的变化而发生较大的改变,是一个关于降雨量的函数。

研究者指出,尽管蒸发计是一种简便易行的装置,但是在湿润和多雨的气候条件下,需要对雨天的测值进行认真分析后谨慎使用;在多雨的气候条件下,并且缺乏 PM 公式所需的气象资料时,仪器的测值要在经过恰当的回归分析和修正因子调整后方能估算得出 ET_0 ,进而用于指导灌溉实践。另外,为方便用户,在缺乏实测降水资料并且应用于与试验区相似的气候环境中时,可取修正因子为 0.84($ET/0.84 = ET_0$,其中 ET_0 为 PM 公式计算值)。

3.3 其他试验研究

除此之外,在其他多种环境条件下,许多研究结果表明,蒸发计测得的 ET 与 PM 类公式法计算得的 ET_0 之间也具有很好的相关关系^[3,6]。

Broner 和 Law 对 Bellani 陶杯式蒸发计研究表明,蒸发计所测得的 ET 对气象因子的响应与从 Penman 公式推得的结论相似,他们建议将蒸发计应用于灌溉制度的制定中。Wilcox 研究表明,54 号织物覆盖的蒸发计所测得的紫花苜蓿的 ET 与蒸渗仪的测值间有较好的相关关系。Feldhake 和 Boyer 发现,黑色的 Bellani 陶杯蒸发计测得的 ET 与由公式法估算得的 ET_0 的相关关系比白色陶杯蒸发计测得的 ET 与蒸发皿测值的相关关系要好。他们指出,黑色的 Bellani 陶杯蒸发计测值比白色的测值高 57%。Holmes 和 Robertson 对几种不同类型的蒸发计进行对比研究后发现,Bellani 陶杯蒸发计估测 ET_0 最可靠。Qian 等在属于湿润气候区的美国堪萨斯州东部的草皮地进行试验后指出,蒸发计所测 ET_0 与 A 型蒸发皿测值及 PM 公式计算值间均有很

好的相关关系。相关系数分别为 0.67 和 0.60。在该试验条件下,蒸发计和 A 型蒸发皿测得的草皮地 ET 比 PM 公式计算得的结果要好。其他研究表明,蒸发计所测 ET 与 ET_0 及 ET_c (紫花苜蓿潜在蒸发蒸腾量)均有很好的相关关系。将蒸发计应用于灌溉制度制定中的最好实例之一是 Altenhofen 在美国科罗拉多州北部水资源保护区所做的农田 ET 实时监测,该试验对 Bellani 陶杯蒸发计进行了改进,并将改进后的蒸发计在农户中成功推广。

4 结 论

研究者仍在对蒸发计不断地进行改进和完善^[3]。例如,Alam 和 Trooien 等提出,在绿色帆布织物和陶土杯的蒸发表面之间隔一层白色的聚四氟乙烯(PTFE)薄膜,可以代替早期模型中的止回阀来防止雨水浸入。将陶土杯的水平蒸发面改为一种微凸的球面以利于雨水快速排流,避免频繁的小雨削弱 ET 速率;同时,这种凸起的曲面可以使织物的衬设更为容易,使织物与陶杯衔接更为紧密。

使用蒸发计适于实现灌溉管理自动化,它的出现为作物需水量的确定提出又一可行方案。上述研究表明^[1,3-6],在没有标准气象数据的农田,或其他更广泛的领域的灌溉制度制定中,可以使用蒸发计估测 ET_0 。

参考文献:

- [1] MAGLIULO V, ANDRIA R, d', RANA G. Use of the modified atmometer to estimate reference evapotranspiration in Mediterranean environments[J]. Agricultural Water Management, 2003, 63(1):1-14.
- [2] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[EB/OL]. [2005-03-16]. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>.
- [3] IRMAK S, DUKES M D, JACOBS J M. Using modified bellani plate evapotranspiration gauges to estimate short canopy reference evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(2):164-175.
- [4] LIVINGSTON B E. A simple atmometer[J]. Science, 1908, 28: 319-320.
- [5] LIVINGSTON B E. A modification of the Bellani porous plate atmometer[J]. Science, 1915, 41: 872-874.
- [6] QIAN Y L, FRY J D, WIEST S C, et al. Estimating turfgrass evapotranspiration using atmometers and the penman-monteith mode[J]. Crop Science, 1996, 36: 699-704.

(收稿日期:2005-09-16 编辑:熊水斌)