

# 丘陵半干旱区作物需水规律的研究进展

房军, 方小宇, 吕东玉, 古今用

(1. 贵州省水利科学研究院, 贵州贵阳550002; 2. 贵州省智龙水利监理有限公司, 贵州贵阳550002)

**摘要** 对目前国内外丘陵半干旱区作物需水量的主要理论和方法, 包括水量平衡法、蒸渗仪法、波文比-能量平衡法、经验公式法和遥感方法进行了总结, 探讨了其使用中存在的问题, 预测了作物需水量在测定和估算研究方面的发展趋势。

**关键词** 作物需水量; 丘陵半干旱区

中图分类号 Q945.17 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2006)19-4847-03

## Study on the Crop Water Requirement in Hilly Semi-Arid Area

FANG Jun et al (Gizhou Academy of Hydraulic Sciences, Guiyang, Gizhou 550002)

**Abstract** In this paper the main theories and methods in the estimation and determination of crop water requirement, including water balance, using lysimeters method, EBBR energy balance, experience formulas and remote sensing method were summarized. The shortcomings in the application of these theories and methods were discussed. Furthermore, the future trends of the estimation and determination of crop water requirement in hilly semi-arid area were forecasted.

**Key words** Crop water requirement; Hilly semi-arid area

作物需水量是农业用水的主要组成部分,也是整个国民经济中消耗水分的最主要部分。它是水资源开发利用中必不可少的资料,是确定作物灌溉制度以及地区灌溉用水量的基础,也是流域规划、地区水利规划、灌排工程规划、设计、管理的基本依据。作物需水量的预测是灌溉预报的关键。为了较准确地确定灌水周期或估计非充分灌溉引起的减产率,必须预测未来一段时间内作物需水量及其变化过程<sup>[1]</sup>。作物需水量问题的研究,一直是农学、气象、水文、土壤以及自然地理等相关学科、领域共同关注的重要课题。全面了解作物需水规律,对于节水农业的发展、加强水资源的集约管理、水分利用效率的提高和生物产量的模拟预测,均具有重要意义和作用。随着人口剧增、全球气候变暖,丘陵半干旱区水资源紧缺尤为突出,加强丘陵半干旱区水资源的科学管理和合理利用,已势在必行。因此,丘陵半干旱区作物需水规律的研究工作必会得到人们的日益重视。

### 1 作物需水量的概念

作物需水量(Crop water requirement),系指生长在大面积上的无病虫害作物,土壤水分和肥力适宜时,在给定的生长环境中能取得高产潜力的条件下,为满足植株蒸腾、棵间蒸发、组成植株体的水量之和<sup>[2]</sup>。由于组成植株体的水量一般小于总蒸腾量的0.2%,并且其影响因素复杂,不易测定,因此,在生产实践中,人们就近似地认为作物需水量等于作物生长发育正常条件下的作物蒸发蒸腾量(Crop evapo-transpiration),即棵间蒸发量(Evaporation)和作物蒸腾(Transpiration)之和。气象学、水文学和地理学中称为“蒸散量”,也有人称作“腾发量”。

### 2 作物需水量的影响因素

作物需水量取决于作物生长发育和对水分需求的内部因子和外部因子。其中内部因子是指对需水规律有影响的生物学特性,与作物种类、品种以及生长阶段有关。气候条件(包括太阳辐射、气温、相对湿度、水面蒸发量、风速等)和土壤条件(包括土壤质地、含水量等)属于外部因子。同时,

农业技术措施也会对作物需水产生影响。考虑到作物需水量的影响因子,作物需水量计算式可以表达为<sup>[3]</sup>:

$$ET = f_1(A_0) \cdot f_2(P) \cdot f_3(S)$$

式中,  $ET$  为作物需水量,  $f_1(A_0)$ 、 $f_2(P)$ 、 $f_3(S)$  分别表示大气因素项、作物因素项和土壤因素项。对于气象因素项,主要通过太阳辐射和风动力的作用使近地面空气逐渐变干,加大蒸发面以上的湿度梯度,从而使蒸发加快。不同的作物,不同的生长阶段,对水分需求也不相同。对于同一种作物而言,作物生长状况的变化可用作物的群体指标表示。因此,  $f_2(P)$  主要是作物叶面积指数的函数。对于土壤因素项  $f_3(S)$ , 主要是土壤含水量、土壤质地、结构及地下水埋深等的函数,主要影响因素是土壤水分状况。

### 3 作物需水量的测定和估算方法

为实现农业可持续发展,需要在测定和估算田间作物腾发量基础上,严格建立起田间土壤水平衡关系和区域水域均衡模式,避免过量灌溉引起的水资源浪费和诸如土壤盐碱化、养分淋洗等环境问题。如何确定土壤蒸发量和作物群体散失的蒸腾量不仅是农学家颇感兴趣的问题,对气象学家、水文学家及灌溉工程管理者而言亦十分重要<sup>[4]</sup>。在以往30多年内,有关测定和估算田间作物腾发量的方法研究已经取得较大进展,在此对测定和估算田间作物腾发量的方法研究现状进行综述。

#### 3.1 作物需水量的测定方法(直接测定法) Ruit 和 Angus

早在1960年就提出,当土壤中零通量面位置低于观测剖面深度时,可利用中子水分仪监测土壤水分剖面计算得到一定时间间隔内的作物平均腾发量。Ritchie 和 Burnett 于1968年得出采用称重式蒸渗仪不仅能获得日蒸发值甚至可获得小时资料。上述2种方法虽具有直接明了的特点,但受到田间下垫面特性和土壤水分分布的时空变异性影响使得单点测量值所能代表的区域范围有限,且由于部分蒸渗仪缺乏相应的排水设备和其周围土壤易受到人为踩踏等缘故造成作物生长期中观测数据的失真,此外,蒸渗仪内种植的作物须与临近大田作物生长状况一致,才能确保有代表性。Grant 在1975年提出涡度相关法和基于土壤水分剖面的空气动力学

法,但这些方法实施操作过于复杂,且要求有灵敏度相当高的观测仪,故难以长期用在常规观测中。Reicosky(1985)建议在移动式测量中通过观测空气温度计算作物耗水量,然而该法仅局限于生理研究范围<sup>[5]</sup>。总之,简便易行长期的直接测量作物腾发量的方法仍有待进一步研究和开发。

**3.2 作物需水量的估算方法** 作物需水量的估算方法很多,概括起来主要有2类:一是直接计算法,另一类是通过参考作物需水量与作物系数计算的方法。直接计算作物需水量的方法均为经验公式,即采用主要气象因子与作物需水量的经验关系进行估算。

**3.2.1 水量平衡法。**采用水量平衡法研究作物需水耗水的历史可谓相当悠久,现在该法还常被采用。根据作物根区内水的质量守恒法,估算作物耗水量的方程如下<sup>[6]</sup>:

$$SW_c = SW_h + P + F_g + GW - RO - D_p - ET_c$$

式中, $SW_c$ 为时段结束时根区中的土壤储水量, $SW_h$ 为时段开始时根区中的土壤储水量, $P$ 为时段内的总降水量, $F_g$ 为时段内净灌水总量, $GW$ 为时段内地下水对作物耗水的补给量, $RO$ 为时段内测定区域的地面径流量, $D_p$ 为时段内根区的深层渗漏量, $ET_c$ 为时段内作物蒸发蒸腾量。

用田间水量平衡法测定的主要问题在于有几项测定在整个生长季中必须反复进行。由于测量精度所限,计算土壤水量平衡时的最短时间间隔通常为1周左右。土壤含水量直接测定主要有土钻法、中子仪、TDR法<sup>[7]</sup>等方法。国内外学者对3种方法进行了对比,TDR法精确性高,且稳定性好<sup>[8]</sup>,作为一种连续、准确地测量土壤含水量的方法目前在蒸散测定方面得到了应用。另外,如果深层渗漏或径流量较大,田间水量平衡法的使用也会受到限制。因此,针对上述问题,或在需要经常测定ET的地方,常把代表性的田间区域和周围隔离开来,蒸渗仪是隔离这类田间最常用的方法,蒸渗仪是完全封闭的容器,它可以精确地测定由灌溉、降雨和作物蒸发蒸腾所引起的土壤含水量变化<sup>[9]</sup>。

**3.2.2 蒸渗仪估测法。**各类蒸渗仪都可用来确定参照作物的腾发量,差别仅在于估值的时间精度上。一般排水式蒸渗仪只能得到腾发量的星期估值,而称重式蒸渗仪则可获得日估值。Allen(1994)通过对比试验后提出,要确保蒸渗仪内的作物生长状况与周围大田相同并最大限度减少在其周围由于人为踏踩产生的影响,否则将会给估值带来30%以上的误差<sup>[10]</sup>。尽管蒸渗仪设施在具有一定规模的试验站(场)已得到应用,但其总体数量的相对不足制约着使用该法获得数据的普遍性。尽管如此,它的观测结果却为率定和校验后2种方法提供了科学依据。

蒸渗仪法测定蒸散量的进展表现在2个方面:一是蒸渗仪测定精度提高,达0.01~0.02 mm,可每小时,甚至每间隔几分钟自动记录数据。二是大型蒸渗仪与微蒸渗仪(Micro lysimeter)的结合使用,国内外许多学者相继使用微蒸渗仪测定裸露土壤或作物冠层下土壤蒸发,以区分农田土壤蒸发和作物蒸腾<sup>[11,12]</sup>。

**3.2.3 经验公式法。**经验公式法中很重要的一项是Penman-Monteith公式法,Penman-Monteith公式法主要是计算出参考作物蒸发蒸腾量( $ET_0$ ), $ET_0$ 为一种假想的参考作物冠层的蒸

发蒸腾速率,假设作物高度为0.12 m,固定的叶面阻力为70 s/m,反射率为0.23,非常类似于表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的绿色草地的蒸发蒸腾速率。Penman-Monteith方法不需要专门的地区率定和风函数等,使用一般气象资料即可计算参考作物蒸发蒸腾的值,实际应用价值和精度都较高。标准化、统一化后的Penman-Monteith公式具体如下<sup>[13]</sup>。

$$ET_0 = \frac{0.408 (R_n - G) + \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{+ (1 + 0.34 u_2)}$$

式中, $ET_0$ 为参考作物蒸发蒸腾量(mm), $R_n$ 为作物表面的净辐射量[ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ], $G$ 为土壤热通量[ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ], $u_2$ 为2 m高处的日平均风速( $m/s$ ), $e_s$ 为饱和水汽压(kPa), $e_a$ 为实际水汽压(kPa), $\gamma$ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率( $kPa/^\circ C$ ), $\gamma_0$ 为干湿表常数( $kPa/^\circ C$ )。

计算出参考作物蒸发蒸腾量( $ET_0$ ),作物的需水量为参考作物蒸发蒸腾量( $ET_0$ )乘以作物系数 $K_c$ 。

**3.2.4 波文比-能量平衡法。**依据表面能量平衡方程,Bowen(1926)提出,在一给定表面,分配给显热的能量( $H$ )与分配给蒸发的( $E$ )能量的比值,相对是常数,波文比的定义是<sup>[14]</sup>:

$$= \frac{H}{E} = \frac{C_p}{K_w} \cdot \frac{K_H}{q} \left( \frac{\Delta}{Z} \right)$$

式中, $K_H$ 、 $K_w$ 分别为温度、湿度的湍流交换系数,其他符号意义同前。目前在估算波文比时,均假设 $K_H = K_w$ ,即将上式简化为:

$$= \frac{C_p}{q} \left( \frac{\Delta}{Z} \right)$$

**3.2.5 遥感方法。**遥感方法主要是根据热量平衡余项模式求取蒸散量。利用热红外遥感的多时信息获取不同时刻的表面温度,从而求得土壤热通量,以此表达土壤湿度状况,并结合净辐射资料,推算大面积潜热通量与蒸散值。Caselles<sup>[15]</sup>和裴浩等利用极轨气象卫星NOAA/AVHRR资料遥感监测土壤水土的表观热惯流量。Manuel等<sup>[16]</sup>以遥感获取的冠层温度为基础,利用空气动力学公式和波文比-能量平衡法对汽化潜热进行很好的估算。卫星遥感的应用,使得每天同步监测估算汽化潜热成为可能。Brown和Rosenberg(1985)根据能量平衡、作物阻抗原理建立的作物阻抗-蒸散模型,成为热红外遥感温度应用到作物蒸散模型的理论基础。谢贤群和张仁华等<sup>[17-19]</sup>在上述模型的基础上,对不同气象和空气层结条件下,空气动力阻抗的计算方法进行了修正。陈镜明<sup>[20]</sup>根据植被小气候原理,提出“剩余阻抗”概念对空气动力阻抗进行补充,提高了植被覆盖条件下的计算精度。近年来,应用高分辨率光谱辐射计研究植被光谱的动态变化、植被光谱与覆盖率及叶面指数的关系,为建立遥感农田蒸散模型提供了基本依据。

#### 4 存在的问题

水量平衡法虽然简单实用,但其精度不高。在深层渗漏或径流量较大时,田间水量平衡法的使用会受到很大限制。蒸渗仪测定法精度很高,但大型称重式蒸渗仪造价昂贵,其总体数量的相对不足制约着使用该法获得数据的普遍性。

尽管如此,它的观测结果却为率定和校验后2种方法提供了科学依据。

波文比-能量平衡法是应用比较广泛的估算农田蒸散方法,优点是所需实测参数少,计算方法简单,不需要知道有关蒸散面空气动力学特性方面的信息,并可以估算大面积(约1 000 m<sup>2</sup>)和小时间尺度(不足1 min)的潜热通量。如果观测资料准确,则精度较高。但  $K_H = K_W$  的假定是把方程的有效使用限于均质的表面,至少不应在没有预测所产生误差的数量级情况下,应用到有大规模非均质的表面。上述假定的要点是把输送限于垂直的方向上,即没有水平的梯度。在下垫面很湿润(通常有逆温层存在)的情形下,由于空气的温、湿铅直廓线的非相似性导致热量与水汽的湍流交换系数的非等同性,使得波文比法的结果偏低,精度下降。此外,在早晚时段或土壤干旱的条件下,或由于净辐射和土壤热通量的差值很小甚至是负值,或由于蒸散速率很小,波文比法的误差也较大。尤其在实测温、湿度差的差值小于或等于仪器精度差值时,常常出现较大的误差。因此,为提高波文比法的测量精度,必须研制和使用干湿球传感器,温、湿度仪器一般应高于110 kPa,同时要把观测点安置在水平均一的田块中,并注意仪器安装高度要有足够的风浪区长度。

FAO Penman 公式和 FAO Penman Monteith 公式是目前世界上应用最普遍的2个公式。FAO Penman 公式已经成为估算潜在蒸散值的标准方法,得到广泛的应用,并获得良好的效果。在这个模型中所需的参数在常规的天气观测中均可获得。此方法存在的缺点是,对同一种规定的参照作物在不同地区、气候条件下,其表面形态特征存在的差异会导致计算结果缺乏可比性<sup>[21]</sup>。尽管FAO Penman 公式具有坚实的物理基础,可它仍属于经验公式一类。因为其中的参数辐射项仍不能直接测量,又缺少土壤热通量项,对有植被覆盖或供水状况不充分时估算蒸散量,需要对该公式进行修正<sup>[22]</sup>。FAO Penman Monteith 公式是统一的标准的计算方法,无须进行地区校正和使用当地的风函数,同时也不用改变任何参数即可适用于世界各个地区,估值精度较高且具有良好的可比性<sup>[23]</sup>。FAO Penman Monteith 方法在推广使用中的主要障碍在于表面阻力的估算问题。FAO Penman Monteith 公式的基础理论假设要比FAO Penman 公式更趋合理,但实际应用中谁更切合实际还应参照当地具体情况而定。

## 5 研究展望

需要进一步在已有研究工作的基础上,对各测定方法加以改进,考虑气候、土壤水分状况、地形、植被、灌溉农业发展

及生产力水平的提高等因素对作物需水耗水的综合影响。由于制造技术的进步和传感技术的发展,作物需水量的测定在精度、广度上已有明显提高,并且尽可能做到方便、快速、省力。因各测定方法均有利弊,为保证作物需水量测定的可靠性,未来的发展趋势是根据研究需要将2种或2种以上方法集成起来或综合运用。

## 参考文献

- [1] 孙景生,刘玉民,康绍忠,等.夏玉米田作物蒸腾与棵间土壤蒸发模拟计算方法研究[J].玉米科学,1996(1):76-80.
- [2] 陕西省水利水土保持厅,西北农业大学.陕西省作物需水量及分区灌溉模式[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [3] 李长杰.保护地作物需水规律研究[D].武汉:武汉大学,2002.
- [4] 许迪,蔡林根.农业可持续发展的农田水土管理研究[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [5] CARZOLI K V. A simple greenhouse di nate model[J].Acta Horti c,1985,174:393-400.
- [6] 张永忠.用水量平衡法计算农田实际蒸发量[C]//左大康,谢贤群.农田蒸发研究.北京:气象出版社,1991.
- [7] 刘国治,张斌,张桃林,等.时域反射仪(TDR)土壤测定红壤含水量的精度[J].土壤,1998,30(1):48-50.
- [8] EVETT SR. Evapotranspiration by soil water balance using TDR and neutron scattering[C]// Management of Irrigation and Drainage Systems, Irrigation and Drainage Div/ASCE. Park City, Utah,1993:914-921.
- [9] 水利部国际合作司.美国国家灌溉工程手册[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [10] ALLEN R G, SMITH M, PERRIER A, et al. An update for the definition of reference evapotranspiration[J].ICID Bull,1994,43(2):1-34.
- [11] WANG X F, XU F, SHAN U. Evaporation from bare soil in extremely arid environment in southern Israel[J].Pedosphere,1996,6(2):139-146.
- [12] 刘昌明,张喜英,由懋正.大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J].水利学报,1998(10):36-39.
- [13] FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: FAO Food and Agriculture Organization, 1998.
- [14] CELLIER P, OLIOSO A. A simple system for automated long term Bowen ratio measurement[J].Agric For Meteor,1993,66:81-92.
- [15] CASELLES V, DELEGIDO J, SOBRINO J A, et al. Evaluation of the maximum evapotranspiration over the La Mancha region, Spain, using NOSS AVHRR data[J].Int J Remote Sens,1992,13:939.
- [16] MANUEL I, FRANCESC C. Simplifying daily evapotranspiration estimates over short full-crop crops[J].Agron J,2000,92:628-632.
- [17] 谢贤群.遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量[J].环境遥感,1991,6(4):253-259.
- [18] 张仁华.遥感蒸发模式的综合分析与实验[C]//左大康,谢贤群.农田蒸发研究.北京:气象出版社,1991.
- [19] 张仁华.利用作物光谱、冠层表面温度的总蒸发计算模式[C]//左大康,谢贤群.农田蒸发研究.北京:气象出版社,1991.
- [20] 陈镜明.现有遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进[J].科学通报,1988(6):454-457.
- [21] 史海滨,何京丽,郭克贞,等.参考作物腾发量计算方法及其适用性评价[J].灌溉排水,1997,16(2):50-55.
- [22] BATCHELOR C H. The accuracy of evapotranspiration estimated with the FAO modified penman equation[J].Imig Si,1984,5(4):223-223.
- [23] 许迪,刘钰.测定和估算田间作物腾发量方法研究综述[J].灌溉排水,1997,16(4):54-59.