

作物水分生产函数的研究与发展

4
17-20

彭世彰, 边立明, 朱成立

(河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098)

Q945.17
S274.1

摘要:介绍作物生产过程中产量和水量之间关系的数学表达——作物水分生产函数(CWPFS)的基本原理和一些典型模型, 并对其可行性分析及地区移用性研究加以探讨, 同时也分析了 CWPFS 在灌溉设计上的应用, 对作物水分生产函数今后的研究及发展方向作了探讨。

关键词:作物水分生产函数; 节约用水; 灌溉; CWPFS

中图分类号: Q945.17

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2000)01-0017-04

1 作物水分生产函数典型模型

直接影响农作物干物质产量(DM)的三个主要因素包括: ①作物品种和遗传特性; ②大气环境(太阳辐射、大气温度以及大气压差等); ③作物水分分配及蒸腾。在建立作物水分生产函数(CWPFS)过程中, 为避免诸多因素的影响, 国内外学者假设作物的土、肥、气、热等处于相同条件, 单独研究水和产量的关系。从50年代至今, 从不同角度建立并进一步发展了各种水分函数模型。

由于作物产量和用水量的不同表达, 有各种形式的 CWPFS。如作物产量可表示为经济产量 EY 和干物质产量 DM; 水量用作物蒸发蒸腾量 ET, 作物蒸腾量 T, 灌溉水量 IR 及可利用水量 AW(田间持水量与永久萎蔫点之间的土壤水量)等表达。各种产量与水量的组合关系如图1所示。

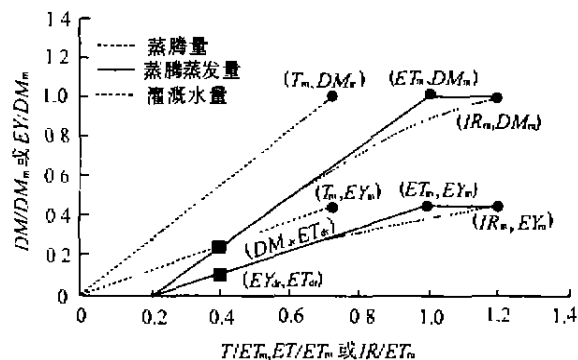


图1 作物干物质产量(DM)、经济产量(EY)与腾发量(ET)、蒸腾量(T)、灌溉水量(IR)的关系(其中下标m表示干旱条件)

图1中 $DM(EY) \sim T$ 关系曲线与 $DM(EY) \sim ET$ 关系曲线具有相同的斜率, 区别仅仅是横轴截距的不同, 两者具有一定程度的一致性, 由于测量和管理上的原因, 目前以应用 ET 为多。DM(EY) ~ IR 的非线性关系曲线是在 DM(EY) ~ ET 关系曲线的基础上得到的, 因此这种表达方式得到了广泛的应用。从大量实际应用中得到的 $Y \sim ET$ (Y 代表产量) 曲线常为一非线性关系, 分析其原因有: ①生长过程中环境因素的变化; ② EY 与 DM 之间非线性关系; ③盐分的变化影响 T; ④不规范灌溉导致观测值的差异^[1]。

以 $Y \sim ET$ 关系为基础的作物水分生产函数可以分为两类: 一类是产量与全生育期腾发量的关系; 一类是产量与全生育期各阶段腾发量之间的关系。

1.1 作物水分生产函数的绝对值模型

$$Y = a + bET + cET^2 \quad (1)$$

式中: a, b, c 为回归系数。

1.2 作物水分生产函数的相对值模型

1.2.1 全生育期生产函数

全生育期生产函数为

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = ky \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (2)$$

式中: ET_a 为作物实际蒸发蒸腾量; ET_m 为充分供水条件下最大蒸发蒸腾量; Y_a 为作物实际产量; Y_m 为充分供水条件下作物最高产量; ky 为作物的产量反应系数。

1.2.2 生长阶段函数

建立作物水分生产函数的目的, 一方面是预估

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目“节水农业技术研究与示范”专题内容之一(编号: 96-006-02-02)

作者简介: 彭世彰(1959—), 男, 教授, 从事农业节水灌溉研究。

各种灌溉水平下作物的产量,以水定产;另一方面是为了研究作物在缺水条件下的优化灌溉制度和为经济用水提供依据,即如何把有限的灌溉水量分配到最适宜的阶段,才能获得最大效益.由于不同生育阶段的生物量累积时水分亏缺的反应或敏感性不同,某一阶段缺水对作物以后的生长发育和干物质积累的后效性影响也不同.

图2表明在植物的中期和晚期缺水对生物量的累积影响最大,早期缺水对生物量的累积影响较小^[2].生长阶段函数就是用数量表示缺水对作物在不同生长时期的影响,其形式有相乘和相加两种.

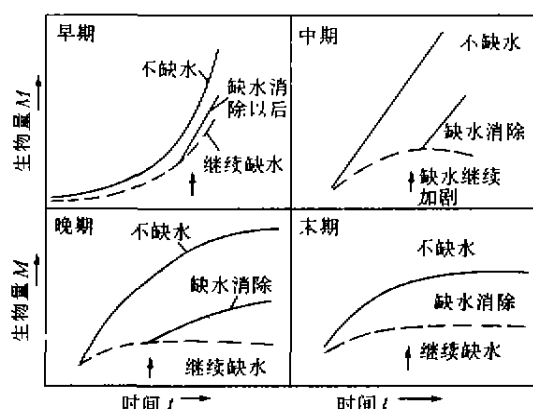


图2 不同阶段缺水对作物生物量累积的后效性影响

a. 相加模型.此模型由 Blank 在 1975 年提出.

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^n A_i \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_i \quad (3)$$

式中: i 为第 i 生育期; n 为作物生育阶段; A_i 为第 i 阶段的反应系数.

b. 相乘模型.此模型由 Jensen 在 1975 年提出.

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_i^{\lambda_i} \quad (4)$$

式中: λ_i 为作物对水分亏缺的敏感性因子.

在一定条件下人们通过大量试验分析,发现无论相加模型还是相乘模型,其预测产量与实际产量的相关系数都较高.有学者认为,相加或相乘模型没有重大区别^[3].

2 作物水分生产函数的应用研究

CWPFS 在农业生产和经济配水的规划与设计等方面有广泛应用.在初期发展过程中,随着田间条件的变化,各种函数也作了相应的调整.这包括:①由 $Y \sim ET$ 曲线关系得到满足根系活动层需要的有效灌溉水量;②充分考虑阶段性水分亏缺的影响及其在特殊生长阶段运用之间的关系,从中获得最优生产模型,即在水量有限条件下,在光合作用效果较小的生育阶段可以适当控制光合产量的积累,形成一定的水分胁迫,而在光合率较大阶段保证供水,提

高光合产物向经济产量及生产总量的转化;③盐分和肥料对生产函数的影响^[4].国内外学者近年来对作物水分生产函数作了大量的试验和理论研究.

2.1 对 Jensen 模型的研究

Jensen 模型中,阶段水分敏感指数 λ_i ,反应了第 i 阶段作物因缺水而影响产量的敏感程度.该指数愈大表示该阶段缺水作物减产愈大,反之愈小.该指数随不同作物及作物的不同生产阶段而变化.图3反映了几种作物的 λ_i 随时间的变化关系.

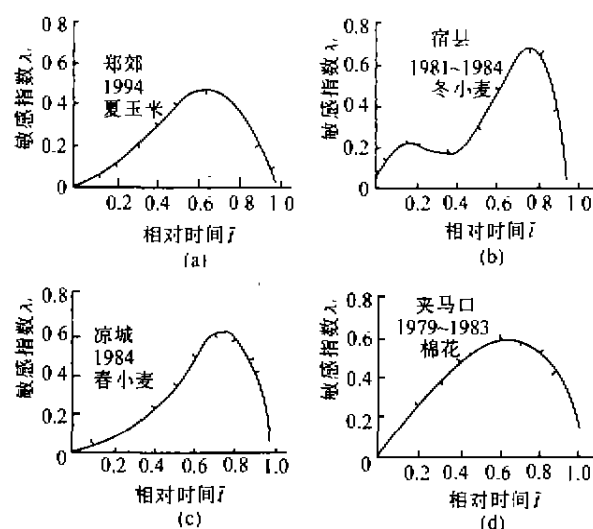


图3 几种作物的缺水敏感指数随时间的变化曲线

图3中数据反映了 λ_i 的特性.在实际应用中,历年的 λ_i 值并不稳定,常表现为干旱年的值大于湿润年的,因此某阶段的 λ_i 值与该阶段的土壤含水量、气温或降雨量、叶水势等因素有关.国内学者结合南方水稻生产函数的研究,综合多年的试验资料,利用回归方程得出了一些解决敏感指数随水文年分、气候条件的变化规律及其在年际间、地区间的移用问题^[5].另外还有一些学者对在生长阶段的划分上进行了拟合,认为计算时段划分越细,任何时段的水分亏缺就越能在产量上充分体现出来.在假设各时段敏感指数总和相等的基础上,对应的 λ_i 与该时段历时接近正比关系^[6].

2.2 作物水分生产函数的可行性分析和地区间的移用研究

CWPFS 的可行性分析是指对于某一作物品种,在固定的地域和一段时间范围内其产量的变化与 CWPFS 预报产量的偏差;地区间的移用研究是指某一特定的 CWPFS 是否能在不同地方准确地加以应用.国外一些专家在这方面做了大量的研究.在研究中他们发现:①某一地区得到的 CWPFS 模型在产量预报方面,能够比较准确的反映作物产量的变化.具体方法是对于线性模型,简单地比较斜率($\partial Y / \partial ET$)

即可;对于非线性模型,当两种模型在具有相似斜率的范围内,其产量预报也具有一致的变化:②在不同地区应用某一作物的水分生产函数模型仅产生较小的偏差,其主要影响因素为土壤和气候条件^[4]。印度学者 Rajput 经过多年试验研究得出应用于全生育期的生产函数模型^[7]:

$$k_s = 12.12 \left[\frac{(e_s - e_a)^4 (T_s - T_{27})}{e T_s (CS)^2} \right]^{0.196} \quad (5)$$

式中: k_s 为作物的产量反应系数; e_s 为平均饱和水汽压; e_a 为平均实际水汽压; T_s 为作物生长天数; T_{27} 为作物生长期最高气温低于 27℃ 的天数; CS 为作物根层粘土百分比。

2.3 作物水分生产函数在灌溉设计上的应用研究

a. 1984 年, Martine 通过确定蒸发蒸腾量 ET 与灌溉水量 IR 之间的数值联系, 在产量 Y 与 ET 关系的基础上, 得出确定 Y 与 IR 关系的方法^[1]。具体措施是利用非线性方程模拟典型灌溉方式的 IR 与 ET 之间关系(见图 4)。这种方法适用于全生育期作物水分生产函数模型。它反应出很好的灌溉效益 ($\frac{\partial ET}{\partial IR}$, $ET \sim IR$ 曲线的斜率), 但是该方法需要一些经验数据, 如 ET_0 (干旱情况下的 ET) 和 IR_m (产生最大产量灌溉水量)。

这种方法是假设在 $IR = 0$ 时 $\frac{\partial ET}{\partial IR} = 1.0$ 。在如图 4 所示的几种灌溉方式中, 喷灌与畦灌的最大产量灌溉效益达到 0.8, 而沟灌由于约 20% ~ 30% 尾水的流失导致其最大产量灌溉效益接近零。针对图 4 所出现的随 IR 的增加灌溉效益逐渐减少的情况, 分析认为是由于一部分灌溉水量并没有用于 ET 上, 而是储存于土层或是深层渗漏和流失掉了。

b. 在第 12 届国际灌排会议上, 保加利亚学者提出用三项积和式建立产量增值与阶段供水的函数关系^[8]:

$$\frac{\Delta Y}{\Delta Y_m} = \sum_{i=1}^n \left[1 - \left(\frac{IR_{mi} - IR_i}{IR_{mi}} \right)^{2k} \right] \cdot \left(\frac{IR_i}{IR_{mi}} \right)^{2k} \cdot \varphi_i \quad (6)$$

式中: n 为生育阶段; ΔY_m 为每一阶段充分供水 IR_{mi} 下, 单位面积平均最大增产; ΔY 为每一阶段非充分供水 IR_i 下, 单位面积平均增产; IR_{mi} 为第 i 阶段所需的最大灌水量; IR_i 为第 i 阶段灌水定额的多年平均值; k 为作物指数, 0.6 ~ 1.0 之间; φ_i 为总增产中, 某一生育阶段平均灌溉增产的分摊比例 ($\sum \varphi_i = 1.0$)。若资料不足, 可按阶段供水定额的比例决定。此式的优点是用灌溉定额来反映供水的

充分程度, 它比用腾发量要容易, 便于应用, 但没有得到充分的验证。

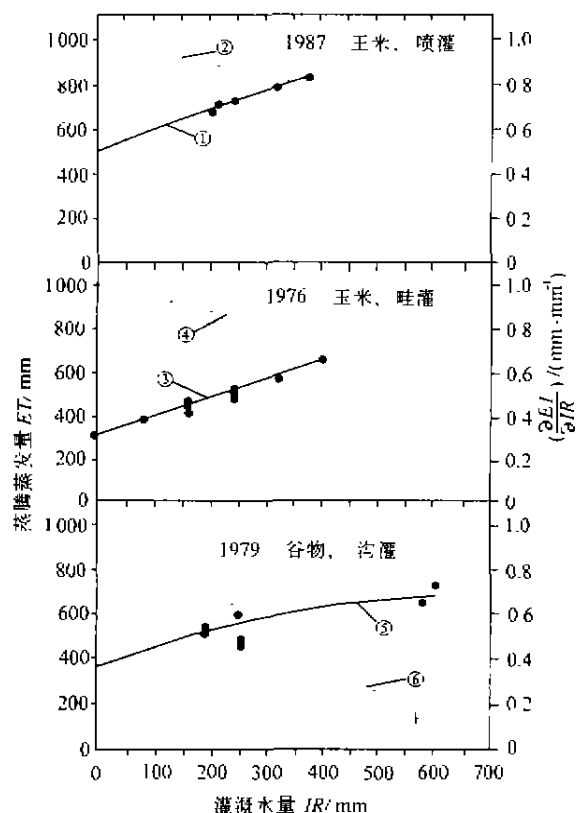


图 4 喷灌、畦灌、沟灌 $ET \sim IR$ 关系曲线^[1]

$$1-ET = 500 + 338[2.96 \times 10^{-3} IR - 7.95 \times 10^{-7} (IR)^2]$$

$$2-\frac{\partial ET}{\partial IR} = 1.0 - 5.38 \times 10^{-4} IR$$

$$3-ET = 317 + 350[2.26 \times 10^{-3} IR - 8.93 \times 10^{-7} (IR)^2]$$

$$4-\frac{\partial ET}{\partial IR} = 1.0 - 6.25 \times 10^{-4} IR$$

$$5-ET = 363 + 329[3.04 \times 10^{-3} IR - 2.28 \times 10^{-7} (IR)^2]$$

$$6-\frac{\partial ET}{\partial IR} = 1.0 - 1.50 \times 10^{-3} IR$$

3 需要进一步研究的问题

作物水分生产函数在使用中尚有一些问题需解决, 这些问题都与应用 CWPFS 的不确定性有关, 表现在许多未知因素影响作物的真实产量同 CWPFS 预报产量之间的偏差上, 它们改变了 CWPFS 的表现形式。影响因素有: ①灌溉频率; ②作物生长中灌溉时间的选择; ③土壤质地和肥力; ④水质情况; ⑤灌溉方式; ⑥使用水的规范程度; ⑦种植密度和时间; ⑧气候因子; ⑨病虫害管理; ⑩田间排水, 等等。利用保守的管理方式可以降低使用 CWPFS 的风险, 但同时也带来了资金和资源的浪费, 因此需要更多的地区性经验, 使 CWPFS 更加符合本地区情况。利用地区最高产量等数据调整 CWPFS 是一种减少不确定性的现行方法。Hill 指出, 利用几个地区平均所得出的 CWPFS 在其他地区应用时, 其可信度大大降低。

对作物缺水敏感指数 λ_i 的研究中,出现了 λ_i 为负值的现象.建立 Jensen 模型的前提在于假设作物各生长阶段保持充分的水分供应,即 ET_m 为各阶段水分供应的最佳状态下,作物获得最高产量,此时 $\lambda_i > 0$; $\lambda_i \approx 0$ 则表示此阶段缺水与否对作物产量不发生影响或影响很小; $\lambda_i < 0$ 表示此阶段适度缺水(即 $ET_i < ET_m$)具有增产效应.这可以从作物生理和栽培促控机制上得到解释.还有人认为,这是由于试验精度不够,特别是与处理充分供水和基本不发生水分胁迫是否妥当有极大的关系.陈亚新根据多项实验结果分析,认为 λ_i 出现负值重要原因之一是最小二乘法拟合时多元回归数学分配的约束关系造成的^[9].这些问题也限制 CWPFS 的进一步应用.另外,由于作物生长的连续性,相邻两阶段受旱与不受旱界限很难严格控制,不受旱的水分控制标准也是困扰人们的一个问题.

CWPFS 的研究需要植物学、农学、土壤学、水利工程学和经济学等多学科联合进行.尽管对此研究已达半个多世纪,但是仍需进行大量的基础性和应用性研究工作.至今在作物产量与灌溉水量之间仍没有系统的方法确定其内在特殊联系,并且由于地区自然条件的局限性,在其他情况下的延伸性使用还没有显示出更大的价值.利用趋于完善的数学工具形成具有一定可行性和地区移用性 CWPFS,还有很多工作要做.例如:

a. 类似于农作物需水量等值线图的研究,对各地的自然气候、土壤、农业措施、水源、降水等影响 CWPFS 的因素制定统一的衡量标准.

b. 利用土壤含水率、作物水分生理指标(如叶水势、气孔阻力、细胞液浓度等)、冠层温度等指标,结合气象学、光谱和微波技术对农作物各生育阶段的生长状况作出最佳判断.

c. 建立能够准确反映作物产量与降水量、灌溉水量之间关系的“作物灌溉生产函数”,并对其作可行性分析和地区移用性研究.

d. 作物水分生产函数中敏感指数 λ_i 还有待进一步深入研究.具体方法可以结合作物各生育阶段的冠层指标,如冠层叶面积指数、冠层平均叶倾角、冠层干物重等指标对 λ_i 加以数量分析,得到准确的 λ_i 值.这样可以使 CWPFS 在作物灌溉制度的设计中得到更广泛的应用.

参考文献:

- [1] Hoffom G J, Hwell T A, Solomn K H. Managment of farm irrigation system[M]. The American Society of Agricultural Engineer, USA, 1990: 93 ~ 112.
- [2] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 184 ~ 215.
- [3] 郭元裕, 李寿声. 灌排工程最优规划与管理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 263 ~ 290.
- [4] Clumpner G, Solomn K. Accuracy and geographic transferability of crop water production functions [A]. In: James I G, English M J eds. Irrigation Systems for the 21st Century [C]. New York: ASCE, 1987. 285 ~ 292.
- [5] 郭智, 崔远来, 李新建. 我国南方水稻生产函数的研究[J]. 水利学报, 1994(9): 27 ~ 32.
- [6] 郭群善, 雷志栋. 冬小麦水分生产函数 Jensen 敏感指数研究[J]. 水科学进展, 1996(3): 20 ~ 26.
- [7] Rajput G S, Singh J. Water production functions for wheat under different environmental conditions[J]. Agricultural Water Management, 1986(11): 319 ~ 332.
- [8] 刘肇纬, 雷声隆. 灌排工程新技术[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1993. 23 ~ 45.
- [9] 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996. 201 ~ 241.

(收稿日期: 1998-11-19 编辑: 马敬峰)

·简讯·

我国首台 400 MW 自循环蒸发冷却机组投产发电

黄河李家峡水电站 4 号机组(我国首台 400 MW 自循环蒸发冷却机组)于 1999 年 12 月 3 日开始经过 72h 试运行, 12 月 6 日投产发电, 12 月 10 日通过启动验收专家委员会的验收正式并网. 至此, 由中国水利水电第四工程局承担全部安装任务的李家峡水电站一期工程 4 台机组——1 600 MW 水轮发电机组全部投产发电.

李家峡水电站 4 号机组是国家“九五”重点科技攻关项目和我国首台 400 MW 自循环蒸发冷却机组, 也是目前世界上最大的蒸发冷却机组. 项目由中国科学院电工所、东方电机股份有限公司和中国水利水电第四工程局联合进行攻关, 此项技术的关键是空芯线棒内通冷却介质——氟碳化合物, 冷却介质在密闭的循环系统中由于热力学原理而形成自循环. 由于冷却介质具有高的绝缘性能和防火灭弧性能, 它克服了水内冷技术的缺点, 又继承了水内冷技术优点, 具有很高的可靠性. 经几年来的科技攻关和一系列试验, 顺利进入试运行, 经专家严格的检测, 结果表明: 机组运行良好, 各项技术指标达到国家技术规范要求.

该机组的稳定运行标志着我国的大型发电机设计、制造、安装、调试以及关键技术水平上了一个新的台阶, 为长江三峡工程大型机组研究和应用提供了可靠的理论依据和安装经验.

(张光敏供稿)