

作物产量与水

作者：联合国粮农组织 j.doorenbos、a.h.Kassam 等

译者：武汉水利电力学院农水教研室黎庆淮等

《湖北水利》编辑部编辑

湖北省水利科技情报中心站发行

一九八五年九月

译 者 的 话

作物与水的关系是十分密切的，而且是多方面的。本书着重从作物产量对水的反应方面进行了比较深刻和定量的论述。原书名为《yield response to water》，直译应为《产量对水的反应》。

本书是联合国粮农组织的灌溉排水丛书之一，并作为联合国举办的灌溉排水学习班的教材进行教学。全书分为《产量与水》和《作物与水》两部分。在《产量与水》中，介绍了作物最高产量、最大腾发量、实际腾发量、实际产量等的理论及其计算方法，它们在灌溉工程规划设计和运行管理中的应用，以及适应性试验研究等。在《作物与水》中，对世界上二十六种重要灌溉作物的生物学特性及其对环境条件的要求、需水量、供水量与产量、水分的吸收、灌溉制度、灌水方法以及产量和质量等，作了简明扼要的介绍和论述。

本书内容较先进，编有大量图表及算例，实用性强，既适于农田水利工程专业的学生和从事农田水利工作的科技人员阅读，也适于作物栽培专业的学生、科技人员和各种作物生产的专业户学习参考。

本书由黎庆淮（译第一部分和第二部分的小麦、花生、苜蓿、菜豆、豌豆、甘蓝、洋葱、香蕉、柑桔、葡萄、橄榄等）、石秀兰（水稻、高粱、大豆、甜菜、菠萝）、张明炷（玉米、甘蔗）、董文楚（棉花、向日葵、红花、烟草、土豆、蕃茄、西瓜、辣椒）译，茆智、雷声隆、陈学敏、刘肇祯等分别校阅了其中的部分内容。最后由黎庆淮统稿整编。由于译者水平有限，难免有翻译欠准确甚至错误之处，恳希读者批评指正。 一

译者 一九八五年二月

于武汉水利电力学院

前言

水是作物生产所必需的。有效水的最优利用必须促进高效率的作物生产和提高作物产量。这就需要适当了解在各种栽培条件下水（降水和/或灌溉水）对作物生长和产量的影响。

关于水与作物生长关系方面的资料已经发表了很多，而且，通过建立作物生长模型以了解作物对水的反应的试验也已获得成功。然而，为了实际上的应用，需要一个测定产量对供水量反应的方法。这个方法应该是简单的，只要有一般可用的气候、水、土壤和作物的资料，就能以满意的精确度广泛应用。并容易通过适应性的试验研究进行检验。为此目的，联合国粮农组织土地和水开发署着手研究和概括了对26种重要灌溉作物的产量和用水量的关系。在研究过程中，由有关科学家慷慨地提供了相当可贵的研究成果（附录Ⅲ），更多的资料是从一些文献（附录Ⅳ）中获得的。此外，还得到国际土地垦殖和改良研究所（ILRI）维基尼金（Wageningen荷兰人）等人的宝贵支持，他们通过收集和分析资料以及所进行的各种水与作物产量的模型试验，将研究出的方法列成了公式。在本书中对由ILRI研究的成果作了进一步的简化，并力图将其成果发展成容易使用的形式。

本书提出了通过总计分量以定量表示产量对水的反应的一套方法。这种方法既可以在充分供水条件下，也可在有限供水条件下用来估计作物的产量。该方法在第一部分中提出，同时利用与相对减产量和相对腾发量差额有关的产量反应系数，计算最高产量和受水分亏缺影响的实际作物产量。第二部分论述了26种作物与水有关的作物产量和质量等方面的知识。本书可为读者（用户）提供以下用途：

1. 指导在各种栽培条件下灌溉作物的选择；

2. 估算各种供水状况下的作物产量；

3. 以提高作物总产量为原则，在工程之间和工程内部有重点地分配有限水给作物；

4. 指导农田合理用水，以获得最佳的作物产量和水的利用效率。

本书提出了一些包括按作物生产需要进行管水的重要原则。但是对于具体的特殊条件，需要根据理论原则结合实际作适当的改变，并有必要通过适应性研究进行验证。

应予以指出：

作物产量的上限是就一定的气候条件和作物的遗传潜能而言，这个上限可能达到的程度，往往取决于供水工程的供水与作物生产中生物学需水相协调的情况如何。因此，在作物生产中，只有当供配水系统的规划、设计和管理在数量上和时间上（包括缺水时期）都能满足作物最佳生长和高产所需水分时，才能达到水的高效率的利用。

目 录

前言	-----	I
第一部分 产量与水		
绪言	-----	1
第一章 最高产量 (Y_m)	-----	3
一、维基尼金法	-----	45
二、农业生态分区法	-----	22
第二章 最大腾发量 (ET_m)	-----	27
一、参考腾发量 (ET_0)	-----	30
二、作物系数 (k_c)	-----	35
三、最大腾发量 (ET_m)	-----	36
第三章 实际腾发量 (ET_a)	-----	55
一、土壤水分充足条件下的实际腾发量	-----	56
二、土壤水分不足条件下的实际腾发量	-----	58
第四章 实际产量 (Y_a)	-----	73
第五章 产量反应系数 (k_y)	-----	76
第六章 在灌溉工程规划设计和运行管理中的应用	-----	81
一、充分供水条件下的应用	-----	83
二、有限供水条件下的应用	-----	91
三、其它有关的应用	-----	101
第七章 适应性试验研究	-----	105
一、场地选择	-----	106
二、灌水处理	-----	106
三、试验设计	-----	110

四	资料收集	111
---	------	-----

五	成果的评价与说明	116
---	----------	-----

第二部分 作物与水

水稻	117
小麦	124
玉米	134
高粱	140
棉花	144
大豆	151
花生	156
向日葵	161
红花	165
甘蔗	169
甜菜	175
烟草	180
苜蓿	185
菜豆	189
豌豆	193
土豆	197
甘蓝	201
蕃茄	204
辣椒	208
洋葱	213
西瓜	216
香蕉	220
柑桔	225
葡萄	232

菠萝 ----- 238

橄榄 ----- 242

附录 I 实际腾发量 (E_{Ta}) 的计算 ----- 246

附录 II 术语汇编 ----- 248

附录 III 咨询人员和研究所 (略)

附录 IV 主要参考文献 (略)

第一部分 产量与水

绪 言

作物与气候、水分和土壤之间的关系是复杂的，其中包括很多生物、生理、物理和化学的过程。现在已经取得了这些过程与水分关系的大量研究资料。但是，要实际应用这些资料，还必须将上述复杂关系简化为几个主要分量，以便分析和掌握作物对田间水分状况的反应。

在灌溉系统的规划、设计和运行管理工作中，可以分析供水量对作物产量的影响。当作物需水量和作物缺水量以及最高产量和实际产量能定量表示时，作物产量和供水量之间的关系就可以确定下来。作物水分亏缺对作物腾发量和产量的影响，可根据实际腾发量 (ET_a) 与最大腾发量 (ET_m) 的关系定量表示。当供水能充分满足作物需水时， $ET_a = ET_m$ ；当供水不足时， $ET_a < ET_m$ 。在各种气候条件下，对大多数作物来说， ET_m 和 ET_a 都能定量表示。

当作物所需水量不能充分满足时，产生作物体内水分亏缺，发展到某一点时就会抑制作物生长而减产。水分不足对作物生长和产量影响的大小，随作物种类和作物生育阶段而不同。研究结果表明，只要有各种供水状况下的实际产量 (Y_a) 和最高产量 (Y_m) 的可靠资料，就可以通过相对腾发量 (ET_a/ET_m) 来推估作物水分亏缺对减产的影响，并确定相对减产量。在经济条件不限制生产而且无不良环境条件的地方，当作物全部需水量能满足时，则 $Y_a = Y_m$ ；当全部需水量不能由有效水满足时，则 $Y_a < Y_m$ 。

为了定量表示水分亏缺对作物的影响，需用由试验得到的产量反应系数 (K_y) 导出相对减产量和相对腾发量差额 (相对缺水量) 之间

的关系式，即

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

式中 Y_a —实际产量；

Y_m —最高产量；

k_y —产量反应系数；

ET_a —实际腾发量；

ET_m —最大腾发量。

不同作物的 k_y 值是通过文献发表的大量研究成果（包括了广大范围的作物栽培条件）的推算而取得的。这个关系式还被引用于了解作物产量对土壤含盐量、地下水埋深和栽培管理技术等因素的反应。根据试验结果建立了各种作物全生育期和各个生育阶段产量对水分反应的关系。如果不考虑作物种类和作物的不同生育阶段的影响，仅根据气候、最大腾发量数值和土壤等来确定作物对水分反应的关系，则不能提高计算的精确度。

由于除水分外，该关系式还受作物品种、肥料、土壤盐碱、病虫害和农业措施等的影响，这里所提出的关系式，适用于高产品种、环境优良、农业和灌溉技术最优（包括除水以外的其它条件都很优越）的大田作物。

在灌溉系统的规划、设计和管理中，可以应用上述关系式估算不同水分状况对作物产量的影响。

计 算 步 骤

假定其它因素（例如水、肥、病虫害等）不是限制因素，针对不同的气候条件确定相应品种的最高产量（ Y_m ）。

2. 计算有效水 供应充分，作物需水量得以满足条件下的腾发量，即最大腾发量 (E_{Tm})。

3. 根据对作物有效供水有关的因素，确定作物的实际腾发量 (E_{Ta})。

4. 通过计算，求出供水量、作物需水量与实际产量 (Y_a) 之间的相关系数。

5. 选定产量反应系数 (k_y)，用以计算相对减产量与相对腾发量差额的关系，即 $(1 - Y_a/Y_m) = k_y(1 - E_{Ta}/E_{Tm})$ ，进而求得实际产量。

第一章 最高产量 (Y_m)

作物的最高产量 (Y_m) 水平，主要取决于它的遗传特性及其对主要环境条件适应的程度。对作物生长和产量最有利的气候、土壤和水分等环境条件，随作物种类和品种的不同而异。在一定的环境条件下，精心选择其最适合的作物和品种，对获得作物高产是很重要的。

作物的最高产量 (Y_m)，是指在水分、养分和病虫害等不限制作物生长的情况下，从播种到成熟均能良好地适应一定环境条件的高产品种作物的产量。各种产量资料表明，最高产量是在具有高水平的栽培技术和用水管理条件下获得的 (表 1)。

决定 Y_m 的气候因素是温度、阳光 (太阳辐射)、生长季节以及作物发育所需特定温度和日照时数。一般来说，温度决定生长速度，从而影响全生育期长短，生育期长短又影响产量。例如，某一玉米品种在日平均温度为 $25\sim 35^{\circ}\text{C}$ 时，只需 100 天就达到成熟；而在 20°C 时可能需要 150 天；在 15°C 时，则可能需要 250 天。

有些作物，在某一阶段要有特定的温度或日照，才能开始进行其

生长发育。例如马铃薯开始形成块茎时，通常要求夜间温度低于 15°C ，某些品种的高粱的开花对短日照很敏感；而冬小麦开花要求低温和长日照。某些作物产品的质量受温度的影响。例如菠萝果实的含糖量取决于产量形成期的温度。此外，许多作物在产量形成期、成熟期和收割期都要求适当的气候条件。

作物生长和产量与全生育期所接受的总辐射量有关。在一定的辐射和温度条件下，不同作物所吸收的总辐射能转化为产量的多少是不同的。这种差异对作物有效地利用水分以形成产品的情况有重大影响。因此，选择作物时除了考虑当地温度和日照时数外，还应考虑作物对辐射的要求与反应。例如，从某地区的气候条件来看，玉米和花生都适于在该地区生产，但良种玉米能使所吸收的辐射量转化 $1-2\%$ 进入产物中，而花生的转化量要少一半。

作物的种类很多，它们对气候的一般要求和特殊要求以及从播种到收获的全生育期长短都有所不同。这就使得气候条件和生长季节长短不同的各种地区都有适宜栽种的作物。表2列出了各种作物的全生育期天数以及对温度、日照时数和其它特殊的要求，可作为选择作物的依据。每种作物对土壤和养分的要求也包括在表2中。

适宜的种植时期除了取决于气候条件外，还取决于能保证提供优质灌溉水的持续时间。必须考虑有效供水和作物需水的配合，可拟定出作物需水量与有效供水量情况（例如河流流量和水库放水量的变化）相协调的日程表。对某些作物来说，可以通过调节水分的措施来控制作物的生长发育，以获得最高产量。例如，在棉花营养生长期减少供水，可促进开花和结铃，并促进它在要求的时间成熟。对其它某些作物，其形成产量所需时间的长短，也取决于个别生育阶段的供水情况。例如，对柑桔树适当减少供水，会有助于控制过多的营养生长，并促进花芽形成。在第二章中，将介绍根据最高产量（ Y_m ）计算作物

表 1 在灌溉供水充足, 农业投资水平高的灌区, 高产品种作物在相应的气候条件下的高产量 (吨/公顷)

作物	气候状况			
	气 候		状 况	
	热带 1/	亚热带 2/	温带 3/	
	< 20°C	> 20°C	< 20°C	> 20°C
苜蓿	4~60	25	10	
香蕉	6~8	30~40	6~8	
菜豆	1.5~2.5		1.5~2.5	
甘蓝	40~60		40~60	
柑桔类				
葡萄	35~50	40~60		
柠檬	25~30	30~45		
橙	20~35	25~40		
棉花	3~4	3~4.5		
葡萄	5~10	15~30	15~25	
花生	3~4	3.5~4.5	15~2	
玉米	6~8	7~9	4~6	
橄榄	7~9	7~10		
洋葱	35~45	35~45	35~45	

豌豆	鲜豆荚	2~3	0.6~0.8	15~20	75~90	15~20	2~3	0.6~0.8	15~25	65~75	30~40	4~6	2~3	0.6~0.8	15~20
鲜辣椒	果实	15~20			3~8		25~35								
菠萝	果实														
马铃薯	块茎														
水稻	稻谷														
红花	种子														
高粱	籽粒	3~4		3~5		3~4									
大豆	籽粒		2.5~3.5												
甜菜	糖萝卜														
甘蔗	茎秆			110~150											
向日葵	籽粒		2.5~3.5												
烟草	叶				2~2.5										
蕃茄	果实		45~65												
西瓜	果实			25~35											
小麦	籽粒	4~6				4~6									

1/ 只是半干旱和干旱地区

2/ 夏季和冬季降雨地区

3/ 海洋和内陆地区

4/ 平均温度

表 2 作物对气候、土壤和

作物	全生育期 (天数)	生长要求的 温度范围 ^① (°C)	开花要 求的日照 长度	对特殊气候的要求和反 应	对土
水稻	90~150	20-30 (18-35)	中	对霜冻敏感, 低温引起穗 不孕, 要求昼夜温差不太 大	喜渗漏 O。不 F
小麦	春 100~130 冬 180~250	15-20 (10-25)	中-长	春小麦怕霜冻。冬小麦越 冬期耐霜冻 ($> -18^{\circ}\text{C}$), 早期需经低温才能开花, 成熟期均要求干燥天气。	喜欢中 地下水 PH
玉米	100~140 ⁺	24-30 (15-35)	中-短	对霜冻敏感, 发芽温度 $>$ 10°C , 低温引起成熟困 难	排水 深。 最适
高粱	100~140 ⁺	24-30 (15-35)	短-中	对霜冻敏感, 发芽温度 $>$ 10°C ; 低温引起穗不结 实	轻至中 积水;
棉花	150~180	20-30 (15-35)	短-中	对霜冻敏感, 不抗强风冷 风, 结铃要求 $27-32^{\circ}\text{C}$ (18-38) 成熟期要求气 候干燥	中-重 PH=5 最适P
大豆	100~130	20-25 (15-30)	短-中	对霜冻敏感, 有些品种花 期要求 $> 24^{\circ}\text{C}$	除砂土 好的土 F

壤和水等的要求

对土壤的要求	对盐分的敏感性	对N、P、K的要求 (公斤/公顷/全生育期)	需水量 (毫米/全生育期)	对供水的敏感性 (ky)②	单位水收获量 By(公斤/米 ³) (水分%)
喜渗漏小的重壤土, 对缺O ₂ 不敏感; PH=5.5-6.0	中等	100-150 20-40 80-120	350~ 700	高	0.7-1.1 稻谷: (15-20%)
喜欢中壤, 能忍耐稍高的地下水位; PH=6-8	中等耐盐	100-150 35-45 25-50	450~ 650	中偏高(春1.15, 冬1.0)	0.8-1.0 籽粒 (12-15%)
排水通气良好, 地下水位深, 不滞水的土壤; 最适 PH=5.0-7.0	中等敏感	100-200 50-80 60-100	500~ 800	高 (1.25)	0.8-1.6 籽粒(10-13%)
轻至中, 重壤土, 较能忍耐积水; PH=6-8	中等耐盐	100-180 20-45 35-80	450~ 650	中偏低 (0.9)	0.6-1.0 籽粒(12-15%)
中-重壤, 土层厚; PH=5.5-8.0 最适PH=7.0-8.0	不敏感	100-180 20-60 50-80	700~ 1300	中偏低 (0.85)	0.4-0.6 籽棉(10%)
除砂土外, 适于广泛排水良好的土壤; PH=6-6.5	中等耐盐	10-20 15-30 25-60	450~ 700	中偏低 (0.85)	0.4-0.7 籽粒(6-10%)

续表

花生	90-140	22-28 (18-33)	中	对霜冻敏感, 发芽要求 温度 $>20^{\circ}\text{C}$	排水良 的中等 PH
向日葵	90-130	18-25 (15-30)	短-中	对霜冻敏感	相当深厚 PH
红花	春: 120-160 秋: 200-230	前期生长: 15-20 后期生长: 20-30(10-35)		抗霜冻, 出苗和前期生 长要求凉爽	相当深厚 最好中壤 PH:
甘蔗	270-365	22-30 (15-35)	短-中	对霜冻敏感, 成熟期要 求低温($10-20^{\circ}\text{C}$), 干 燥、阳光充足的天气	深厚, 通 深于1.5 高地下水 5-8.5,
甜菜	160-200	18-22 (10-30)	长	耐轻霜, 临近收获期日 平均温度 $<10^{\circ}\text{C}$ 时含糖 量高	中到轻粘 PH=6-7
烟草	90-120 (苗床期: 40-60)	20-30 (15-35)	短-中	对霜冻敏感	烟叶质量 PH=5-6
苜蓿	100-365	24-26 (10-30)	中	对霜冻敏感; 刈割间隔 期与温度有关; 温暖气 候下要求低的相对湿度	深厚、中 PH=6.5-
菜豆	鲜: 65-100 干: 90-120	15-20 (10-27)	短-中	对霜冻敏感, 忌雨水过 多和炎热气候	疏松深厚 壤; 最适P

水良好。易碎，表土疏松 中等 质地土壤 PH=5.5-7.0	中等敏感	100-200 15-40 25-40	500- 700	低 (0.7)	0.6-0.8 带壳干果 (15%)
当深厚的壤土 PH=6-7.5	中等耐盐	50-100 20-45 60-125	600- 1000	中偏低 (0.95)	0.3-0.5 种子 (6-10%)
当深厚排水良好的土壤， 好中壤 PH=6-8	中等耐盐	60-110 15-30 25-40	600- 1200	低 (0.8)	0.2-0.5 种子 (8-10%)
厚，通气良好，地下水位 于1.5-2米，但相当耐 地下水位和缺O ₂ ；PH= 8.5，最优。PH=6.5	中等敏感	100-200 20-90 125-160	1500- 2500	高 (1.2)	甘蔗： 5-8(80%) 糖： 0.6-1.0 (0%)
轻粘土通气排水良好； =6-7	不敏感	150 50-70 100-160	550- 750	低-中 偏高 (0.7-1.1)	糖萝卜： 6-9(80- 85%)糖： 0.9-1.4(0%)
土质取决于土壤质地； =5-6.5	敏感	40-80 30-90 50-110	400- 600	中偏低 (0.9)	0.4-0.6 加工叶 (5-10%)
厚、中等质地排水良好； =6.5-7.5	中等敏感	0-40 55-65 75-100	800- 1600	低-中 偏高 (0.7-1.1)	1.2-2.0 干草 (10-15%)
深厚排水通气良好的土 最适PH=5.5-6.0	敏感	20-40 40-60 50-120	300- 500	中偏高 (1.15)	鲜：1.5-2(80- 90%) 干：(0.3- 0.6(10%))