

# 旱作物利用地下水的实验研究

洪 宝 鑫

(南通农水试验站)

**提 要:** 本文依据南通农水试验站的实验资料, 统计分析旱作物(小麦、棉花)利用地下潜水量的规律, 阐述在发展节水灌溉农业中, 应考虑旱作物利用地下水量的问题。

**主题词:** 旱作物 地下水

在平原河网与低洼地区, 浅层地下水不断补给包气带土壤水分, 影响着农田腾发量, 涉及到农田灌溉与排水工程措施和效益。例如在半湿润的黄淮平原低洼区, 若能考虑到地下潜水利用量, 将会减少旱作物的灌水次数和定额; 在湿润的江淮平原河网化地区, 降低地下水位、排涝治渍为农田水利工程的主要目的但也不可忽视在少雨的干旱年份和季节由于地下水的补给, 旱作物基本免于人工灌溉的作用。为此, 开展对地下水利用量的实验研究, 将对发展节水灌溉农业、探讨四水转换规律, 具有实际和理论意义。

地处长江口北岸、江苏省南通市东郊的南通农水试验站, 土壤质地上层为轻壤土, 下层为砂壤土, 通透性好; 当地雨水充沛, 地下潜水位较高。在 1983—1990 年设计了地面以下 2m 间的 6 种地下水埋深处理, 对冬小麦、移栽棉花利用地下水量进行实验研究。

## 1 试验方法与旱作物利用地下水量和腾发量计算

旱作物腾发量和利用地下水量的试验, 是采用水量平衡法, 在 6 个  $15\text{m}^2$  和 12 个  $1.5\text{m}^2$  蒸渗器系列中进行的。蒸渗器土层深 2m, 内装原层次、灌水自然沉实; 下底设有过滤层, 系黄砂、棕皮、中间埋有塑料滤水管, 以利供、排地下水。各蒸渗器并排在地下观测室两侧。设计控制地下水埋深为 0.3m、0.6m、0.9m、1.2m、1.5m、和 1.8m。自动控供地下水系统,  $15\text{m}^2$  蒸渗器采用水位控制器—电磁阀自记水位计测记供水过程;  $1.5\text{m}^2$  蒸渗器应用马利奥特装置, 以 8 时为分界线, 测读一日供水量。蒸渗器内的地表径流和地下渗流运用翻斗流量计自动测记。地下水利用量、地表径流和地下渗流量的测读精度为 0.05mm。在生育期分界日站土取样, 测定从地表至地下水水面以上分层的土壤含水量。对于供试品种的夏熟小麦和秋熟棉花进行作物生态观测和计产考种等。

地面气象场内观测大气降水、水面蒸发、气温、湿度、日照、风速等。实测旱作物利用地下水量是在蒸渗器内控制地下水位不变的条件下, 供水箱或马利奥特瓶向其土使补给的水量, 即为具有作物植被情况的潜水蒸发量。作物腾发量按水量平衡方程式计算:

$$ET = Wu + Pu + I \pm W \quad (1)$$

$$Pu = P - R_1 - R_2 \quad (2)$$

$$W = W_1 - W_2 \quad (3)$$

式中:  $ET$ ——旱作物腾发量 (mm),  $ET = E_L + E_s$  ( $E_L$ 为叶面蒸腾,  $E_s$ 为棵间土壤蒸发);  $Wu$ ——旱作物利用地下水量 (mm);  $Pu$ ——旱作物利用雨水量 (有效雨量) (mm);  $P$ ——阵水量 (mm);  $R_1$ ——地表径流量 (mm);  $R_2$ ——地下渗流量 (mm);  $I$ ——灌溉水量 (mm);  $W$ ——计算土层内土壤水分储量的变化值 (mm),  $W_1$ 和 $W_2$ 分别为计算时段的土壤水分储量。

## 2 旱作物利用地下水量实测结果及分析

### 2.1 实测结果

根据南通站历年试验资料,按生育期和月份统计不同地下水埋深条件下,冬小麦、移栽棉花利用地下水量和腾发量、降水量、水面蒸发量等。表1为冬小麦1983—1986年、1987—1990年6个试验年度(2个中等干旱年、2个平水年、1个湿润年和1个特湿年)利用地下水量、腾发量、降水量、水面蒸发量、及其产量的平均值;表2为移栽棉花1983—1990年8个试验年度(2个中等干旱年、3个平水年、3个湿润年)利用地下水量等各项平均值。

### 2.2 旱作物利用地下水量分析

影响旱作物利用地下水的因素大致可归纳为:气候条件,土壤性质,地下水埋深,作物状况等。

#### 2.2.1 作物及其腾发量与利用地下水量的关系

各旱作物的腾发耗水不同,其利用地下水量也不一样,并随生育期而变化。由表1、2得知,在地下水埋深为1.8—0.3m时,冬小麦利用地下水量为77.5—267.2mm,平均162.4mm;移栽棉花利用地下水量为166.1—429.6mm,平均304.9mm,秋熟棉花利用地下水量为夏熟小麦的2倍左右。

在相同土质和地下水埋深的条件下,同一作物利用地下水量主要决定于气候因素(如气温、湿度、风速等)和作物生长发育状况,作物腾发量是这两种因素综合作用的结果。通常作物利用地下水量随腾发量的增强而加大。表1显示,小麦腾发量和地下水利用量在越冬期的2月份为最低值,随着气温回升,植株增大,腾发耗水越来越大,根系对地下水的吸收亦随之增加,在拔节—抽穗的4月份需水高峰期内,利用地下水量达最大值,为2月份的7—10倍。棉花利用地下水量随生育期的变化,同样与其腾发量存在着同步关系,均是从现蕾起逐渐增大,花铃期的8月份达最高值,吐絮后又随之下降,8月份的地下水利用量为10月份的4—7倍(表2)。

#### 2.2.2 地下水埋深对旱作物利用地下水量的影响

在其他条件一致的情况下,地下水位的高低决定着土壤供水状态,影响着旱作物的生长发育及其腾发量、利用地下水量的变化。由表1、表2和按此绘制的地下水埋深与腾发量、地下水利用的关系图(图1、图2)分析看来,旱作物利用地下水量随地下水埋深的变浅而

表 1 多年平均冬小麦利用地下水量(mm)  
Annual average groundwater utilization amount of winter wheat(mm)

埋 深	生育期	苗期		越 冬		返 青		拔 节		抽穗灌浆		全 期	亩单产 (kg)
	月 份												
	项 目	11	12	1	2	3	4	5					
0.3m	Wu	21.5	20.9	15.3	9.4	42.4	85.3	72.4	267.2	306.6			
	ET	32.4	27.2	27.6	25.3	68.1	123.6	112.7	416.6				
	Wu/ET (%)	66.4	76.8	55.4	37.2	62.3	69.0	64.2	64.0				
0.6m	Wu	20.0	21.2	13.3	9.4	29.6	62.4	60.5	216.4	348.8			
	ET	33.7	28.6	28.9	26.6	71.0	129.8	117.6	436.3				
	Wu/ET (%)	59.3	74.1	46.0	35.3	41.7	48.0	51.4	49.6				
0.9m	Wu	13.2	14.2	9.5	5.6	23.2	58.0	47.8	171.5	355.6			
	ET	27.5	22.7	25.2	24.6	62.3	121.8	112.7	396.8				
	Wu/ET (%)	48.0	62.6	37.7	22.8	37.2	47.6	42.4	43.2				
1.2m	Wu	10.6	12.5	8.1	5.2	16.9	44.0	39.9	138.0	361.3			
	ET	26.4	21.9	24.4	23.7	60.2	117.5	109.1	383.2				
	Wu/ET (%)	40.2	57.1	33.2	21.8	28.1	38.1	36.6	36.0				
1.5m	Wu	8.1	11.0	6.8	4.1	13.2	29.7	31.1	104.0	371.3			
	ET	26.0	20.7	22.5	22.2	57.3	107.6	100.3	356.6				
	Wu/ET (%)	31.1	53.1	30.2	18.5	23.0	27.6	31.0	29.2				
1.8m	Wu	6.4	7.2	4.9	2.7	9.0	19.9	27.4	77.5	367.4			
	ET	24.7	19.4	22.2	22.0	57.9	98.8	99.6	344.6				
	Wu/ET (%)	25.9	37.1	22.1	12.3	15.5	20.1	27.5	22.5				
平 均	Wu	13.3	14.5	9.6	6.1	22.4	50.0	46.5	162.4	351.8			
	ET	28.5	23.4	25.1	24.1	62.8	116.5	108.7	389.1				
	Wu/ET (%)	46.7	62.0	38.2	25.3	35.7	42.9	42.8	41.7				
降水量P		40.7	21.8	30.3	61.7	70.6	65.3	110.0	400.4	—			
水面蒸发 E601		58.4	41.8	30.4	31.3	61.1	67.8	92.7	383.5	—			

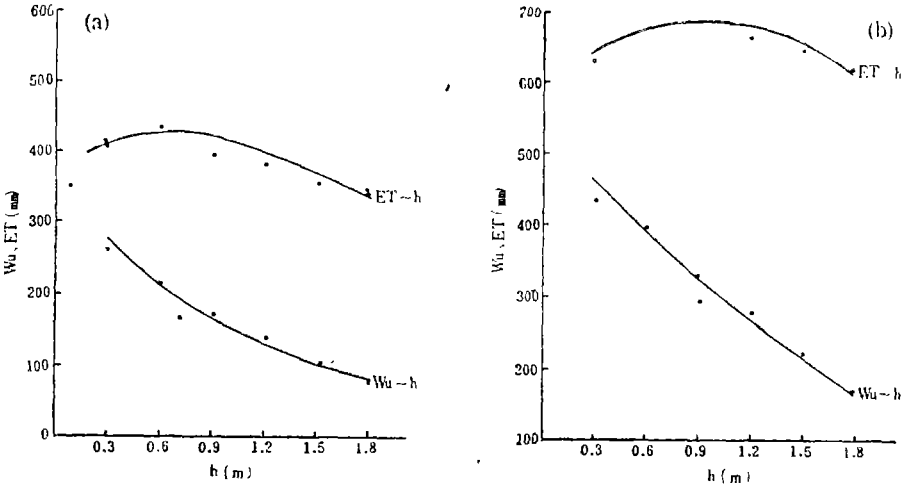


图 1 冬小麦 (a) , 移栽棉花 (b) 利用地下水量  $W_u$ 、腾发量  $ET$  与地下水埋深  $h$  的关系图。

Relationship between depth of groundwater and groundwater utilization amount ( $W_u$ ), evapotranspiration amount ( $ET$ ) of winter wheat (a), transplanted cotton (b),

表 2 多年平均移栽棉花利用地下水量 (mm)

Annual average groundwater utilization amount of transplanted cotton(mm)								
埋 深 m	生 育 期	苗 期	蕾 期	花 铃 期		吐 絮 期		亩单产 (kg)
	期 间	6	7	8	9	10	全 期	
	日							
0.3m	W <sub>u</sub>	42.9	118.4	167.0	70.1	31.2	429.6	71.8
	ET	66.5	177.3	236.0	106.8	43.7	630.3	
	W <sub>u</sub> /ET (%)	64.5	66.8	70.8	65.6	71.4	68.2	
0.6m	W <sub>u</sub>	26.9	103.0	172.5	64.7	28.2	395.3	87.0
	ET	70.9	193.6	262.5	116.6	46.6	689.3	
	W <sub>u</sub> /ET (%)	38.4	53.2	65.7	55.5	60.5	57.3	
0.9m	W <sub>u</sub>	18.9	79.9	159.7	60.9	23.4	342.8	99.5
	ET	69.1	207.3	266.7	110.5	41.4	695.0	
	W <sub>u</sub> /ET (%)	27.4	38.5	59.8	55.1	56.5	49.3	
1.2m	W <sub>u</sub>	12.7	57.5	135.2	53.6	21.6	280.6	94.1
	ET	68.2	197.9	251.5	105.1	42.3	665.0	
	W <sub>u</sub> /ET (%)	18.6	29.1	53.8	51.0	51.1	42.2	
1.5m	W <sub>u</sub>	9.6	41.8	95.8	49.8	18.0	215.0	95.5
	ET	70.5	187.3	240.9	105.2	40.7	644.6	
	W <sub>u</sub> /ET (%)	13.6	22.3	31.8	47.3	44.2	33.4	
1.8m	W <sub>u</sub>	8.5	31.2	72.3	37.7	16.4	166.1	93.6
	ET	75.2	184.9	213.8	101.7	40.7	616.3	
	W <sub>u</sub> /ET (%)	11.3	16.9	33.8	37.1	40.3	27.0	
平 均	W <sub>u</sub>	19.9	72.0	133.8	56.1	23.1	304.9	90.2
	ET	69.9	191.4	245.2	107.7	42.6	656.8	
	W <sub>u</sub> /ET (%)	28.5	37.6	54.6	52.1	54.2	46.4	
降水量P		161.4	207.5	143.8	127.8	65.7	700.2	—
水方蒸发E601		95.2	113.0	120.4	87.6	72.4	488.0	—

增大，且呈指数曲线关系：

小麦 
$$W_u = \frac{352.5}{e^{0.012h}} \quad r = 0.99 > (r)(0.92) \tag{4}$$

棉花 
$$W_u = \frac{10^3}{1.08 + 0.8e^h} \quad r = 0.99 > (r)(0.92) \tag{5}$$

式中：W<sub>u</sub>——旱作物（小麦、棉花）利用地下水量（mm）；h——地下水埋深（m）；  
e——自然对数底（e=2.7183）；γ——相关系数。

看出，随地下水埋深的变浅，小麦、棉花腾发量由小变大，且在一定的埋深下（大致在0.9m左右），腾发量达最大值；其后，地下水埋深再继续变浅，腾发量则又随之变小。这与裸露土壤蒸发量随地下水位高低呈同步变化规律有所不同。因此，当地下水位过高时，作物生长层土壤过湿，形成渍害，有损旱作物根系发育和吸水能力，以致减弱其蒸腾作用；当作物蒸腾量的减小数大于裸间土壤蒸发量的增加数时，腾发量呈下降趋势。旱作物腾发量（ET）与地下水埋深（h）的相关关系为：

$$\text{小麦} \quad ET = 372.9 + 156.9h - 111.7h^2 \quad \gamma = 0.95 > [\gamma] (0.92) \quad (6)$$

$$\text{棉花} \quad ET = 590.0 + 302.1h - 107.3h^2 \quad \gamma = 0.92 = [\gamma] (0.92) \quad (7)$$

由此可见,旱作物利用水量与同期腾发量之比;即地下水利用系数( $W_u/ET$ ),同样受地下水埋深的影响,并随埋深的变浅而增大。表1、表2均反映出,地下水埋深由1.8m变浅为0.3m时,地下水利用系数小麦从22%增大到64%;棉花从27%增大为68%。

### 2.2.3 土壤含水量与地下水位的关系

旱作物到用地下水是通过包气带土壤水分来实现的。地下水埋藏的深浅直接影响着包气带土壤含水量的变化,从而影响了旱作物利用地下水量的多寡。表3、4为南通站1986年在小麦返青期的3月7日和棉花花铃期8月25日测定的土壤含水量。很显然,包气带土壤各层含水量随地下水埋深变浅而增加;在同一层次的土壤含水量,地下水埋深浅的高,反之则低。故形成旱作物利用地下水量有随地下水埋深变浅而增大的规律。

表3 冬小麦返青期及棉花花铃期土层含水量(%)

Soil moisture in returning green period of winter wheat and cotton boll (%)

土层 (cm) 埋深 (m)	冬 小 麦						棉 花					
	0—10	0—30	0—60	0—90	0—120	0—150	0—10	0—30	0—60	0—90	0—120	0—150
0.3	74.5	85.9					68.2	88.3				
0.6	67.2	84.1	90.5				33.1	64.3	86.6			
0.9	65.9	81.6	86.9	93.6			31.2	54.8	75.8	87.0		
1.2	49.7	65.7	77.3	84.5	89.8		28.0	47.0	68.4	78.8	86.6	
1.5	45.2	63.6	72.1	80.2	88.7	96.1	24.8	37.8	84.7	60.0	73.3	78.8
1.8	40.1	62.5	72.8	79.9	84.7	88.0	19.1	36.0	47.2	54.3	63.2	69.1

注:1. 表中的土层,平均含水量值为占田间持水量的百分比;

2. 小麦取土日期为1986年3月7日,前期(30天)降水量为12.7mm。

棉花取土日期为1986年8月25日,前期(30天)降雨量为25.1mm。

### 2.2.4 土壤质地对旱作物利用地下水量的影响

在不同质地的土壤中,毛管水上升高度和运动阻力各有差异,能供应被作物根系吸收的有效水分也不一样,势必影响作物利用地下水量的大小,中国农业科学院灌溉研究所在河南商丘对小麦利用地下水量进行的试验表明,在地下水埋深相同的情况下,小麦地下水利用量粉砂壤土的大于粘壤土的;且地下水埋藏越深其差量越大,反之则小。试验表明,在地下水埋深为2.5m时,粉砂壤土上的小麦地下水利用量为粘壤土的1.8倍;当地下水埋深变浅到1.5m时,则仅是粘壤土的1.1倍。

上述试验结果表明,在浅层地下水地区,旱作物利用地下水量是灌溉农业中不可忽视的补给水量,影响着节水灌溉和农业高产。在平原河网化的轻质壤土地区,当地下水埋深处在

表 5 商丘站1989年度冬小麦利用地下水量(mm)

Groundwater utilization amount of winter wheat in 1989 at shangqiu experimental Station(mm)

土 质	月 份 埋 深	11	12	1	2	3	4	5	6	全 期
粉砂壤土	1.5m	56.5	30.4	9.6	16.0	50.5	57.9	62.5	9.2	293.2
	2.0m	29.8	29.5	5.2	2.7	34.3	49.8	60.0	7.7	219.0
	2.5m	12.1	18.1	0.0	0.8	9.6	43.2	48.1	4.9	136.8
粘壤土	1.5m	16.6	21.4	1.6	5.3	10.3	90.4	107.4	14.9	267.9
	2.0m	4.5	9.7	3.0	0.5	2.8	58.4	82.5	13.3	174.7
	2.5m	3.7	5.7	2.7	0.9	1.6	20.7	32.4	8.5	76.2

0.9m左右时,旱作物利用地下水量约占小麦、棉花同期腾发耗水量的50%—30%。

地下水埋藏的深浅,决定着地下水通过毛细管补给包气带土壤水分的多寡,既影响旱作物根系发育状况,也影响旱作物腾发耗水和利用地下水之多少。随地下水埋深的变浅,旱作物利用地下水量大致依指数曲线递增;其腾发量则呈2次抛物线关系变化。地下水埋深浅于1.5m时,土壤质地于对旱作物利用量的影响较明显。

## AN EXPERIMENTAL RESEARCH ON GROUND WATER UTILIZATION OF RAIN-FED CROP

Hong BaoXing

(NanTong Irrigation and water Conservancy Experimental Station, Department of  
Hydrology, Institute of Geography, Academia Sinica)

**Subject terms:** rainfed crop, ground water, utilization amount

### Abstract

By water balance method and a series of large lysimeters we measured and studied the ground water utilization amount of rainfed crop and its rule of change at different ground water levels which are controlled automatically. Along with the rise of ground water level, the used ground water amount increased progressively according to a minus power exponential curve approximately. when the depth of ground water is between 0.9 and 1.5 meter, the ground water utilization amount of rain-fed crop accounts for 30%-50% of the evapotranspiration of the winter wheat and transplanted cotton during the same period. In shallow ground water areas, the ground water used by rain-fed crop plays an important role in irrigation agriculture.

### 《地理科学导论》年内出版

在人口、资源、环境和发展协调问题 (PRED问题) 的推动下, 地理学呈现了现代综合趋势。为了适应社会需求和学术潮流, 国家教委地理学教材指导委员会委托王铮同志主编完成了约30万字的地理学通论著作《地理科学导论》。该书是国内最先出版的地理学通论教材, 评审委员会认为该书的出版标志我国在综合地理学体系建立方面有了突破。中国地理学会名誉理事长, 学部委员黄秉维为其作序。

《地理科学导论》一书共6章, 分别是: 1. 地球系统, 2. 地理过程, 3. 基本地理规律, 4. 环境, 5. 区域, 6. 发展与规划。内容深入浅出, 详细地阐述了地理学的基本概念与基本理论。既是一本学术专著, 又是一本现代地理学的入门教材, 适合于科研人员、教师、专业干部、大学生参考或阅读。

据悉该书将在1993年年底由高教出版社出版, 各地新华书店发行。