

封丘地区土壤水分平衡研究*

IV. 雨养条件下三个不同湿度麦季的小麦 耗水量与水分利用率

陈 志 雄

(中国科学院南京土壤研究所, 210008)

Vauclin Michel

(法国科研中心 Grenoble 力学研究所)

摘 要

根据水量平衡方程式计算,雨养麦田三个试验麦季的耗水量分别为 435.5、326 和 293.8 mm, 它们可代表该区过湿、一般和干旱年分的小麦耗水量。小麦地上部分生物量(茎秆+籽实)与其耗水量成正比,以第一麦季为 100, 第二、第三麦季分别为 85 和 70; 但籽实产量的反应与地上部生物量的反应并不一致,它们分别为 100、102、70, 以第二麦季最高。由于该麦季的耗水量相对较少,故有很高的水分利用率($1.73 \times 10^{-3} \text{kg/l}$)为华北地区所罕见。在耗水量中,土壤储水的贡献约占 50%。在降雨少而土壤储水丰足的年份,其贡献高达 60%,是小麦水分的重要来源。在充分施肥条件下,小麦的水分利用率 $\geq 1.26 \times 10^{-3} \text{kg/l}$,它是建立预测小麦产量的经验模型的重要参数。

在土壤水分平衡基本方程式中^[2],蒸散(蒸发+蒸腾)量是人们最感兴趣的分量,它代表农田作物耗水量,有重要的应用价值。蒸散取决于大气的蒸发要求,同时也取决于土壤湿度和植物因素。从作物生产角度看,蒸散量是构成产量的一个因素。一般说来,当土壤湿度能满足大气蒸发要求时,作物能获得高产;灌溉则是提高土壤湿度的有效手段。但在水资源亏缺的中国北方地区,全面地充分灌溉实际上很难办到,故如何协调蒸散与土壤湿度之间的关系,以取得较高的产量,便成为该地区农业生产上的一个关键问题。所以,取得农田的实际蒸散量的资料并分析它与各种水分来源的关系,对解决这个问题是有实际意义的。

农田蒸散量很难具体测定,它通常用水量平衡基本方程式中其他分量的实测值(通过减差法求得本文的 I、II、III),报道中已经讨论过这些分量的监测方法及其精度问题。本报道是根据连续三个麦季的监测结果计算其蒸散量。这些结果足以反映本区雨养(非灌溉)条件下的生产(小麦)潜力。这三个麦季各具不同的湿度条件:第一个麦季气候湿润,

* 参加工作的尚有杨苑璋、汪仁贞、阮立山、周凌云,特此致谢。

土壤水分丰足;第二个麦季气候干燥,但土壤水分丰足;第三个麦季不仅气候干燥,而且水分亏缺。因此,它们所达到的产量水平,可以供当地农业生产和水资源的管理参考。

一、原 理

从实际条件出发。我们推导计算农田蒸散量的方程式如下:

对种植作物的土壤,其水分质量守恒方程式为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} - S(z, t) \quad (1)$$

式中 θ 为土壤容积含水率, t 为时间, z 为以地面为参考面向下为正的垂直坐标, q 为水流量, $S(z, t)$ 为每单位容积土壤根的吸水速率。假定植物本身水分的增加和释放可以忽略, 它便等于蒸腾速率 (ATR):

$$\int_0^{z_R} s(z, t) dz = ATR \quad (2)$$

对(1)式自地面至根层边界积分得

$$\frac{\partial S_0^{zR}}{\partial t} = q_0 - q_{zR} - \int_0^{zR} s(z, t) dz \quad (3)$$

式中 $S_0^{zR} = \int_0^{zR} \theta dz$ 为地面至根层边界的土壤贮水量, q_0 和 q_{zR} 分别为通过地面和根层边界的水流量。

通过地面的水流为:

$$q_0 = Ref - AEV \quad (4)$$

式中 Ref 为通过地面进入土壤的有效水流, AEV 为脱离土面的水流, 它等于实际蒸发速率。

传统上, Ref 为:

$$Ref = P - RNF \quad (5)$$

式中 P 为降雨强度, RNF 为径流速率, 它在大于土壤的入渗能力时发生。

将(2)、(4)和(5)式代入(3)式得:

$$\frac{\partial S_0^{zR}}{\partial t} = P - RNF - AET - q_{zR} \quad (6)$$

式中 $AET = ATR + AEV$ 为农田实际蒸散量。

实际上, 我们已取得现场降水量, 土壤含水率和根层边界水分通量的资料, 如果 RNF 可以忽略, 便可由 6 式解 AET 。

在设计本试验时, 我们考察了本区多年的降雨资料, 在麦季期间内(10 月至 5 月)绝大多数年分降雨强度很小, 故认为 RNF 可以忽略。尽管如此, 我们仍然对 AET 施加约束, 即认为它不应大于最大可能蒸散量 (MET), 一旦称出 $AET > MET$ 时, 使用后者代替前者。

MET 可估算为:

$$MET = K_c PET \quad (7)$$

式中 PET 为 Penman 蒸发量, K_c 为作物系数。

Penman 蒸发量取决于气象条件, 可用下式计算:

$$PET = K[W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u)(ea - ed)] \quad (8)^{[3]}$$

式中 W 为与温度有关的系数, R_n 为净辐射, $f(u)$ 为风速函数, $(ea - ed)$ 为日平均气温的饱和湿度差, K 为因昼夜气象因素不同的补偿系数。

(7) 式中的 K_c 值是因作物种类和发育阶段不同的校正系数,因本区尚无这类资料,故本文用 (7) 式时没有对 PET 校正。

二、试验方法

在作者的 I、II、III 篇报道中,已说明土壤含水量和根层边界水分通量的监测方法。这里需要补充说明的是,(6)式的降水量 (P) 数据是用设在现场的雨量筒称测的;(8)式的气象参数,则采自离现场 9 公里的封丘气象站。

第一个麦季施 N $28.5\text{g}/\text{m}^2$, P_2O_5 $11.0\text{g}/\text{m}^2$ 小麦品种为保丰 7228, 1984 年 10 月 22 日播种, 1985 年 6 月 10 日收割。第二个麦季施 N $19.5\text{g}/\text{m}^2$, P_2O_5 $11.3\text{g}/\text{m}^2$, 小麦品种为保丰 7228, 1985 年 10 月 18 日播种, 1986 年 6 月 2 日收割。第三个麦季施 N $11.5\text{g}/\text{m}^2$, P_2O_5 $11.3\text{g}/\text{m}^2$, 小麦品种为徐州 211, 1986 年 10 月 9 日播种, 1987 年 5 月 31 日收割。设计的施肥水平是为了满足对小麦“充分供肥”的要求这一条件,后两年 N 量略减是因为它们的前作为大豆之故。

收割时,在 $66 \times 100\text{m}^2$ 的试验地¹⁾中分网格取 66 个 4m^2 的样方按籽实与茎秆分别测产。统计分析表明,三年的结果均呈正态分布,这里以第一个麦季的籽实产量结果为例示于图 1。

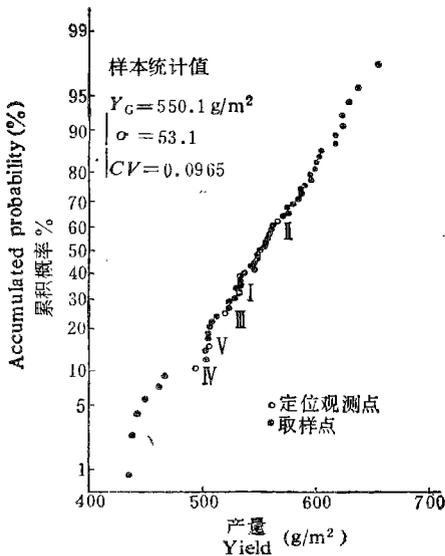


图 1 第一个麦季籽实产量的累积概率分布
Fig. 1 Accumulated Probability of grain yield in the first experimental season

降雨量与历年平均水平相近,但地下水位深 ($\geq 3.4\text{m}$),所以初期土壤有效贮水量很少。这三个麦季的水分条件大致可概括本区可能遇到的情况,故它们的产量水平以及水分利用率(表 4)可以作为充分施肥的雨养小麦可能获得的产量的参考。

2. 随着水分条件下降,小麦的实际耗水量 (AET) 亦下降,其结果,小麦的地上部干物质(茎秆+籽实)产量下降(表 4)。以第一个麦季总的干物质产量为参比(100%),则第二个麦季为 85%,第三个麦季为 70%。但是,小麦籽实产量的反应与地上部干物质产量

三、结果与讨论

我们将三个麦季各时段的水分平衡要素分别列于表 1、2、3,并分别将它们综合起来连同各年的产量列于表 4。根据这些结果,可作如下分析。

1. 三个麦季的水分条件不同。第一个麦季属湿润类型,它的降雨量比历年同期平均水平¹⁾(155mm)高,大气蒸发要求 (PET) 比历年同期平均水平(720mm)低,初期地下水位较浅,土壤有效贮水量丰足(表 1)。第二个麦季属半干旱类型,降雨量低于历年平均水平但 PET 亦低于历年平均水平,初期地下水位较浅,土壤有效贮水量丰足(表 2)。第三个麦季属干旱类型,

1) 1965—1982 年的平均值。

表 1 第一麦季 (1984—1985) 的水分平衡量

Table 1 Components of water balance in the first experimental season (1984—1985)

日期 Date (年份·月·日)	播种后 的天数 Days after sowing	地下水位 Ground water table (cm)	土壤贮 水量 S_0^{60} (mm)	贮水量 差值 ΔS_0 (mm)	降水量 P (mm)	根层边 界通量 Q (mm)	实际蒸散量 AET		Penman 蒸发量 PET		AET PET
							(mm)	(mm/ 天)	(mm)	(mm/ 天)	
1984.10.22	0	—	688	—10	0	0	10	0.55	52.5	2.91	0.19
1984.11.9	28	98.5	678	-54	59	0	113	0.87	198	1.55	0.56
1985.3.18	147	149	624	-14	6	0	20	1.82	34.5	3.13	0.58
1985.3.29	158	171	610	-59	0	0	59	4.9	54.2	4.51	1.08
1985.4.10	170	206	551	-38	2.5	0	40.5	5.1	41.1	5.13	1.0
1985.4.18	178	252	513	+2	103.5	-14	115.5	5.25	123	5.60	0.94
1985.5.10	200	245	515	+63	55.5	-42	34.5	4.31	32.7	4.08	1.06
1985.5.18	208	205	578	-32	2	0	34	3.4	52.5	5.25	0.64
1985.5.28	218	190	546	-9	0	0	9	1.0	42.2	4.7	0.21
1985.6.6	227	200	537								
总计				-151	228.5	-56	435.5		630.7		

表 2 第二个麦季 (1985—1986) 的水分平衡量

Table 2 Components of water balance in the second experimental season (1985—1986)

日期 Date (年份·月·日)	播种后 的天数 Days after sowing	地下水位 Ground water table (cm)	土壤贮 水量 S_0^{60} (mm)	贮水量 差值 ΔS_0 (mm)	降水量 P (mm)	根层边 界通量 Q (mm)	实际蒸散量 AET		Penman 蒸发量 PET		AET PET
							(mm)	(mm/ 天)	(mm)	(mm/ 天)	
1985.10.18	0	143	600	+14	50	0	36	1.38	52.4	1.87	0.68
1985.11.7	20	126	614	-7	12	0	19	0.56	70.9	2.08	0.27
1985.12.11	54	156	607	-14	6.8	0	20.8	0.55	55.2	1.45	0.37
1986.1.18	92	168	593	-21	0	0	21	0.70	68.1	2.27	0.31
1986.2.17	122	190	572	-37	0	20	17	0.89	46.9	2.46	0.36
1986.3.8	144	402	535	-34	26	20	40	1.74	47.7	2.07	0.84
1986.3.31	167	282	501	-18	0	0	18	1.80	53	5.3	0.34
1986.4.10	177	289	483	-28	0	3	25	2.50	54	5.4	0.46
1986.4.20	187	295	455	-31	2.2	3	30.2	3.02	41	4.1	0.74
1986.4.30	197	293	424	-56	0	-4	60	4.00	89	5.9	0.67
1986.5.15	212	360	368	+10	35.3	-14	39.3	2.62	91	6.1	0.43
1986.6.2	227	340	378								
总计				-222	132.3	+46/-18	326.3		669.2		

表 3 第三麦季 (1986—1987) 的水分平衡量

Table 3 Components of water balance in the third experimental season (1986—1987)

日期 Date (年份·月·日)	播种后 Days after sowing	地下水位 Ground water table (cm)	土壤贮 水量* S_0^{200} (mm)	贮水量 差值 ΔS_0^{200} (mm)	降水量 P (mm)	根层边 界通量 Q^{**} (mm)	实际蒸散量 AET		Penman 蒸发量 PET		AET PET
							(mm)	(mm/天)	(mm)	(mm/天)	
1986.10.9	0	362	392								
1987.1.12	95	343	408.5	+16.5	73.8	—	57.3	0.60	199	2.09	0.28
1987.3.8	150	475	386	-22.5	14.7	—	37.2	0.68	113	2.06	0.33
1987.3.25	167	382	385	-1	23.8	—	24.8	1.46	27.2	1.6	0.91
1987.4.21	194	352	360.7	-24.3	24.6	—	48.9	1.81	108.5	4.02	0.45
1987.5.4	207	356	317.5	-43.2	1.3	—	44.5	3.42	67.7	5.21	0.66
1987.5.30	233	475	245.8	-71.7	9.4	—	81.1	3.00	144.5	5.35	0.56
总计				-146.2	147.6	—	293.8		660		

* 该麦季土壤干旱,肉眼观察根的最大深度为 190cm,故取其根层边界为 200cm。

** 整个麦季根层边界的净通量很小,故忽略不计。

表 4 三个麦季麦田的耗水量与水分利用率

Table 4 Water consumption and water use efficiency in three experimental seasons

项 目 Item	第一个麦季 1 st experimental season (1984—1985)	第二个麦季 2 nd experimental season (1985—1986)	第三个麦季 3 rd experimental season (1986—1987)
水分因素 (mm) 降水量	228.5	132.3	147.6
Penman 蒸发量	631	669	660
根层土壤贮水量差值	-151	-222	-146.2
深层渗漏量	0	46	—
毛管上升量	-56	-18	—
实际蒸发量	435.5	326	293.8
产量 (g/m ²)			
茎干物质	1245±115	1062±154	855±171
籽 实	550±53	563±64	387±103
茎 秆	695±75	499±104	468±84
水的利用率 (kg/l)			
总干物质	2.86×10^{-3}	3.25×10^{-3}	2.91×10^{-3}
籽 实	1.26×10^{-3}	1.72×10^{-3}	1.31×10^{-3}

的反应并不一致,如以第一个麦季的籽实产量为参比(100%),则第二个麦季为102%,第三个麦季为70%。这表明,第二个麦季的总干物质产量虽然减少了,但籽实产量并没有下降。换言之,它的水分得到有效利用。结果证明,籽实的水分利用率高达 $1.73 \times 10^{-3} \text{kg/l}$,这在华北地区实属罕见¹⁾。同时,隐含地表明,土壤水丰足,有利于提高小麦对水分的利用效率。这一点亦可为第三个麦季的结果佐证,该季的气候条件与第二个麦季相似,但其土壤水亏缺,因此,它的水分利用率没有第二个麦季那样的“超常”反应。

3. 在雨养条件下,小麦播种前土壤有效水的起始贮量对其产量确有举足轻重的作用。前面已经指出,第二个麦季的气候条件与第三个麦季是相似的,但土壤水分条件截然不同:前者丰足,后者亏缺。从图2可见,第三个麦季始期(1986.10.9)的土壤湿度甚至低于第二个麦季末期(1986.5.30)的湿度,而到了第三个麦季末期(1987.5.31),上层的土壤湿度已达到凋萎湿度范围²⁾,土壤有效水已濒于涸竭。在这种湿度条件下,小麦必须伸长根系以吸取更深层的水分。我们在作者的第III篇报道中提到,第二个麦季肉眼观察到根的最大深度为1.3m,而第三个麦季为1.9m。根的增长可能会降低植物的地上部与地下部的比值,因从深层吸水要消耗更多的能量,则不利于地上部干物质的积累。我们把通过根层边界的毛管上升水量归入土壤提供小麦利用的水量,而把越出其边界的深层渗漏量扣除,这样算出三个麦季的土壤供水量(表5)。表中同时给出各个麦季的土壤供水量占小麦耗水量的比重。不难看出,在这三个麦季中,第二个麦季的土壤供水比重最大,原因是该麦季的降雨量少而土壤贮水量丰足。第三个麦季则由于土壤有效贮水量少,小麦吸水困难,故其比重下降。第一个麦季虽然贮水丰富,但麦季期内降雨量多,致使其对总耗水量的贡献反而最小。综合起来,土壤水对本区雨养小麦耗水量的比重约占一半左右,在土壤水分丰足而降雨量少的年份,其比重可达到60%,由此可见,土壤水对本区小麦供水的意义是很大的。

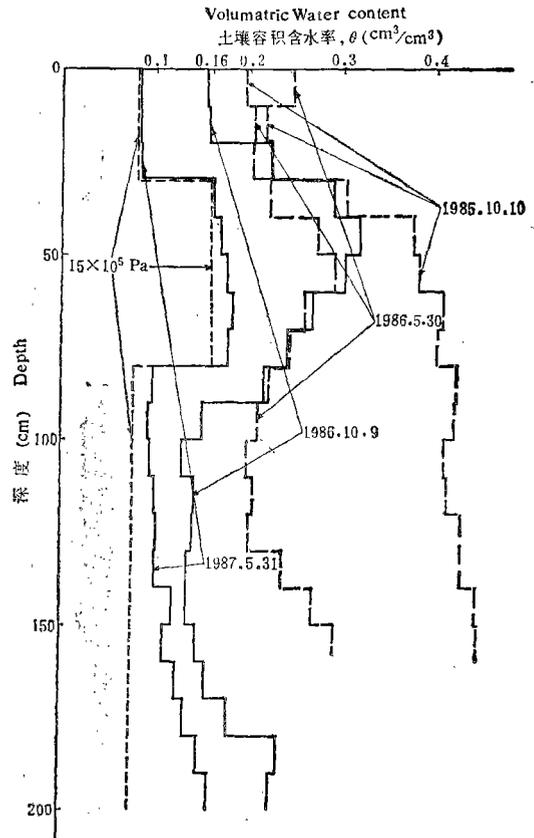


图2 第二个麦季始末期与第三个麦季始末期的土壤湿度状态

Fig. 2 Soil moisture regimes at the beginning and at the end of second and third experimental

1) 陈志雄等, 1989: 黄淮海平原节水农业, 《土壤》21卷4期。华北平原小麦水分利用率公认为 $1 \times 10^{-3} - 1.2 \times 10^{-3} \text{kg/l}$ 。

2) 为 $15 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

表 5 土壤水对雨养小麦耗水的贡献

Table 5 Contributions of water stored in soil to the water consumption of rainfed wheat field

项 目 Item	第一个麦季 1 st experimental season (1984—1985)	第二个麦季 2 nd experimental season (1985—1986)	第三个麦季 3 rd experimental season (1986—1987)
实际耗水量 (mm)	435	326	294
土壤供水量 (mm)	210	194	146
$\frac{\text{土壤供水量}}{\text{实际耗水量}}$	0.48	0.60	0.50

4. 综合三个麦季的试验结果, 可以得出本区充分施肥的雨养小麦(籽实)水分利用率 $\geq 1.26 \times 10^{-3} \text{kg/l}$ 。以此为基础, 可以建立其产量预测的经验模型, 即根据播前的土壤贮水量和中期天气预报来预测小麦产量。

应当指出, 这三个麦季仅仅是本项研究的长期试验中的一个短暂部分。预计在后续试验中还可能遇到不同的水分年份, 这个初步结论将得到验证或者需要进一步修正。就这三个麦季而言, 后两个麦季可以代表少雨年份, 但它们的大气蒸发要求(PET)仍比历年同期平均水平低, 故上述结论不一定能代表蒸发要求高的年份。虽然如此, 由于 AET/PET 可抹平 PET 的年度差别, 故用它可表征各麦季的干旱程度。结果, 这三个麦季的 AET/PET 分别为 0.69、0.5 和 0.44, 表明第一个麦季最湿, 第二个麦季次之, 第三个麦季最干。结合它们的产量加以分析可以认为, 只有 AET/PET ≥ 0.5 , 本区充分施肥的小麦才有可能达到中上产量水平(550 克/m²)。这样, 我们便有可能制订相应的麦田水分管理措施, 以期使小麦达到这样的产量水平。笔者^[1]曾经指出, 在华北地区, 4、5 月份大气蒸发要求极高, 即使实行灌溉, 亦难充分满足小麦的需水要求, 只能谋求在有限的水分条件下取得合理的较高产量。因此, 本文提出的初步结论, 对解决这个问题可能是有帮助的。

参 考 文 献

- [1] 陈志雄, 1986: 黄淮海平原的几个土壤水分问题。土壤, 第 18 卷 6 期, 281—288 页。
 [2] 陈志雄、Vauclin M., 1989: 封丘地区土壤水分平衡研究 I. 田间土壤湿度的空间变异。土壤学报, 第 26 卷, 309—315 页。
 [3] Doorenbos J. et al., 1977: Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. pp. 15—29. FAO Irrigation and Drainage Paper 24.

RESEARCH ON SOIL WATER BALANCE IN FENGQIU REGION

IV. WATER CONSUMPTION AND WATER USE EFFICIENCY OF RAINFED WHEAT FIELD UNDER DIFFERENT HYDROLOGICAL CONDITIONS IN THREE EXPERIMENTAL SEASONS

Chen Zhixiong

(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing, 210008)

Vauclin Michel

(Institute de Mecanique de Grenoble CNRS)

Summary

In accordance with the calculation of water balance equation, the amounts of water consumed in a rainfed wheat field in three experimental seasons were 435.5, 326.0 and 293.8 mm respectively. These results can represent the water consumption under the hydrological condition in excessive, moderate and defective levels respectively in this region. The biomass yield (grain + straw) of the wheat was proportional to the water consumption. To take the biomass of the first experimental season as the index of 100, the biomass yields of the second and of the third were 85 and 70 respectively. But the response of the grain yield was not identical to the that of the biomass. They were 100, 102 and 70 respectively in which the highest one was found in the second experimental season. Because the amount of water consumed in this season was relatively low that the water use efficiency was very high ($1.73 \times 10^{-3} \text{ kg/l}$) which was excellent in North China. About 50% of the total amount of water consumed came from the water stored in soil before sowing. In the year less in rain fall during the growing season but abundant in water stored in soil, this percentage would be up to 60% showing that soil water is an important water source for wheat growth. Under optimum fertilizing conditions, the water use efficiency of wheat was more than $1.26 \times 10^{-3} \text{ kg/l}$ which was an important parameter for the development of empirical model used to predict wheat yield.