

文章编码: 1000-2022(1999) 01-0088-07

西峰市冬小麦耗水规律及其对产量的影响

申双和¹, 高维英²

(1. 南京气象学院环境科学系, 南京 210044; 2. 陕西省气象科学研究所, 西安 710015)

李秉柏

(江苏省农业科学院, 南京 210014)

摘要: 利用甘肃省西峰市的气象、土壤湿度、作物发育期和产量资料, 通过水量平衡方程计算冬小麦在各生育阶段的耗水量, 揭示了该地区冬小麦的耗水规律、土壤湿度变化规律和水分亏缺状况。通过回归模拟建立产量-耗水量模型, 确定影响产量的水分关键期。

关键词: 冬小麦; 水分消耗; 产量-耗水量模型

中图分类号: S162 **文献标识码:** A

干旱是我国主要的气象灾害之一, 尤其在华北、西北地区, 水分不足是限制农业发展的重要因素。这迫使我们不得不关注作物耗水量及其对产量的影响研究。

在大田条件下, 水分供应往往不够充分, 作物生长发育等生理过程和土壤蒸发所耗去的水分要低于水分不受限制条件下的水分总消耗量, 即实际农田蒸散小于潜在蒸散。尤其在干旱地区的非灌溉地段, 农田实际耗水量要远远低于潜在蒸散。地处西北干旱地区的甘肃西峰, 属于暖温带大陆性干旱气候区, 全年降水量在 170 mm ~ 410 mm 之间, 且集中在 7、8、9 三个月。在该地区, 冬小麦一般在 9 月下旬播种, 第 2 年 7 月上旬收获。因此, 该地区的冬小麦在全生育期常处于水分亏缺状态^[1]。

关于农田蒸散方面的研究已经很多, 但大部分只是关于农田蒸散的计算方法^[2]、农田蒸散与水分的有效利用等^[3], 而且多利用具体的某一次试验, 在人工控制灌溉条件下进行的, 而对大田条件下作物耗水量的时间变化规律、耗水量与作物产量之间的关系却缺乏研究。本文旨在充分利用西峰地区常年土壤水分测定资料, 通过适当方法推算出冬小麦各主要发育期的耗水量, 研究冬小麦水分亏缺特征, 进一步分析农田蒸散对产量的影响, 找出小麦生育的水分关键期, 通过建立产量-耗水模型, 为制定相应的农田水分管理措施, 提高作物产量提供依据。

1 研究方法

1.1 作物耗水量估算

由于缺乏实测耗水量资料, 这里利用简化的土壤水分平衡方程进行作物耗水量的估算,

收稿日期: 1998-07-17; 改回日期: 1998-11-16

基金项目: 江苏省“青蓝工程”和中国气象局青年气象基金资助项目

第一作者简介: 申双和, 男, 1957 年 10 月生, 博士生, 副教授

即:

$$W_2 - W_1 = R - ET - D \quad (1)$$

式中 W_1 、 W_2 分别是所考虑时段的初、末期含水量, R 为同期降水量, ET 为作物耗水量, D 为根区排水量, 它取决于根区土壤水分含量高低, 可用下式计算^[4]

$$D = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^e \quad (2)$$

这里 K_s 是土壤饱和导水率 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), e 是土壤孔隙连通指数, θ 是根层饱和容积含水量, θ_s 是期内平均容积含水量。

由(1)可得到作物耗水量的估算公式:

$$ET = R - (W_2 - W_1) - D \quad (3)$$

上式忽略了地表径流和地下水向上补给, 由于西峰农试站内地段平坦, 地下水位较深, 因此, 这种近似处理是合理的。

1.2 耗水量对作物产量的影响

为了分析耗水量的多寡与小麦产量的关系, 本文引用如下模型^[5]

$$\frac{Y}{Y_m} = K \prod_{i=0}^n \left(\frac{ET_i}{ET_{pi}} \right)^{\lambda_i} \quad (4)$$

式中 Y 是小麦实际产量, Y_m 是理想产量, 是对小麦产量形成有重要影响的气象条件处于最适状态下应获得的产量, K 是反应系数, λ_i 是敏感指数, $\frac{ET_i}{ET_{pi}}$ 是实际蒸散与潜在蒸散之比, i 代表 n 个生育阶段中的序号, 在实际计算中, $n=6$ 。

ET_{pi} 由伊万诺夫公式^[6] 计算后再乘以小麦作物系数^[7] 获得。实际计算时, 先根据产量时间序列估算趋势产量, 从而估计历年理想产量

$$Y_m = Y_t + Y \quad (5)$$

Y 应是一个常数, 可以用试取法来得到, 具体步骤是:

(1) 根据实际产量与趋势产量, 找出两者之差中的最大值 Y_{\max} , 令 $Y = Y_{\max}$, 代入(5)求得 Y_m , 再代入(4), 进行回归分析, 得到相应复相关系数。

(2) 令 $Y = Y_{\max} + S$, 重复(1), S 为步长, 实际取 30。

(3) 由此类推, 最后根据最大复相关系数, 同时又考虑各系数的合理性, 确定出 Y 。

2 资料分析

本文采用的资料包括土壤湿度、作物发育期和产量、逐日气象资料。土壤湿度资料为土钻法逐旬测定的各层含水量, 层次从 5 cm 直到 100 cm, 降水前后各加测一次。通过实际测得的土壤容重换算为容积含水量和绝对含水量。

冬小麦的发育期按照《农业气象观测规范》应该有 11 个, 但有的相邻两发育期之间间隔日数太少, 加之缺少相应的土壤湿度观测值, 故我们将冬小麦的发育阶段分为 6 个时段, 即: 出苗 - 分蘖、分蘖 - 越冬、越冬 - 返青、返青 - 拔节、拔节 - 开花、开花 - 成熟。

气象资料取自该站常规观测, 包括: 日平均气温、降水、相对湿度。

3 结果分析

3.1 作物耗水量

3.1.1 平均耗水状况

表 1 给出该地区冬小麦各生育阶段的平均耗水量、潜在蒸散和相对蒸散。

表 1 西峰地区冬小麦生长期内多年平均耗水特征

Table 1 Average water consumption for winter wheat in different developmental stages in Xifeng area

生育期	出苗-分蘖	分蘖-越冬	越冬-返青	返青-拔节	拔节-开花	开花-成熟	全生长期
耗水量(mm)	27.7	37.5	14.3	65.2	87.0	108.3	340.0
耗水强度(mm/d)	1.5	1.0	0.1	1.5	2.9	2.8	1.6
潜在蒸散量(mm)	37.3	74.1	161.3	124.9	104.4	145.9	647.9
潜在蒸散速率(mm/d)	2.6	2.0	1.4	2.8	4.8	4.5	3.0
相对蒸散(%)	0.6	0.5	0.1	0.5	0.6	0.6	0.6

注: 相对蒸散= 耗水强度/潜在蒸散速率

由上表可看出: 西峰地区冬小麦一生中的耗水量多年平均为 340 mm, 耗水强度 1.6 mm/d, 而潜在蒸散量为 648 mm, 强度为 3.0 mm/d, 耗水量只占潜在蒸散 60%, 这说明, 在一般年份, 冬小麦的需水量得不到满足, 需灌水 300 mm 左右。冬小麦耗水量和耗水强度在不同发育阶段表现不同。越冬期, 由于气温较低, 表土冻结, 小麦处于休眠状态, 故耗水量非常小, 仅占同期潜在蒸散 10% 左右, 但这也说明存在冬旱问题。拔节至开花、以及开花到成熟期间是耗水高峰期, 耗水量达 2.8 mm/d ~ 2.9 mm/d, 占潜在蒸散量的 60% 左右, 这段时间若降水较少, 又得不到灌溉, 则不利于产量形成。图 1 为冬小麦生长期内耗水强度的时间变化。

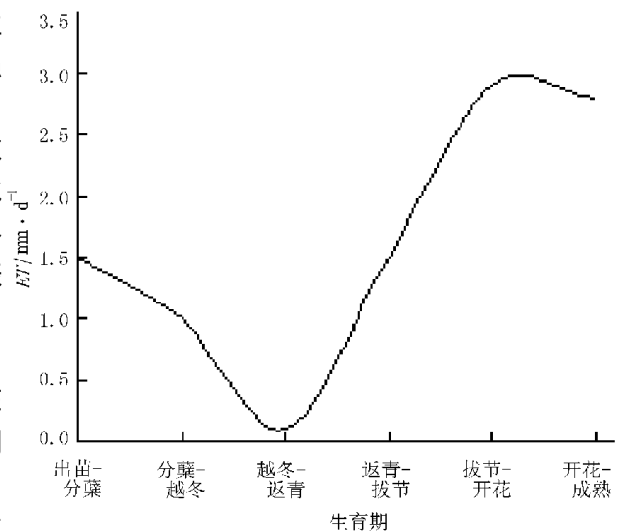


图 1 冬小麦在各生育期内耗水强度变化曲线

Fig. 1 Variation in water consumption intensity in different stages of winter wheat

3. 1. 2 不同年型耗水状况比较

将所研究年份的冬小麦生长期降水量低于 250 mm 定为干旱年, 高于 350 mm 定为偏湿年, 讨论在干、湿年型下冬小麦耗水情况(见表 2)。

表 2 不同年型冬小麦耗水状况比较

Table 2 Comparison of water consumption between dry/wet year types for winter wheat

生育期	出苗-分蘖	分蘖-越冬	越冬-返青	返青-拔节	拔节-开花	开花-成熟	全生长期
干旱年 降水量(mm)	26.1	24.9	17.4	41.7	26.8	35.6	162.5
干旱年 耗水量(mm)	24.7	30.0	16.5	60.8	67.5	94.6	294.1
干旱年 相对蒸散	0.59	0.39	0.09	0.43	0.54	0.62	0.44
湿润年 降水量(mm)	27.6	44.5	9.3	56.9	120.8	25.4	285.0
湿润年 耗水量(mm)	28.1	75.2	18.9	68.2	97.4	114.6	402.4
湿润年 相对蒸散	0.70	0.72	0.12	0.68	0.72	0.71	0.71

由表 2 可见, 干旱年型, 小麦生育期降水量比偏湿年型少 120 mm 以上, 各发育阶段的相对蒸散量最高仅为 62%。大多低于 55%, 全生长期平均为 44%, 而偏湿年份的相对蒸散最高可达 72%, 平均达 71%, 基本满足作物生长发育的需要。

3.2 土壤温度变化

表 3 是历年冬小麦各生育阶段土壤湿度变化情况, 从中可以看出以下几个特点:

(1) 在冬小麦生长期, 土壤湿度明显改变, 且随生育进程的发展土壤湿度有不同程度的降低趋势。这说明冬小麦生长期间土壤为失墒期, 自然不能满足作物需要, 必须通过消耗土壤水分来保证作物的正常生长发育。

(2) 就各发育期比较, 冬前和越冬期由于冬小麦植株较小, 土壤水分降低速率不高, 少数年份甚至出现土壤水分增加的趋势。但是自返青开始, 气温升高, 作物迅速生长, 植株体和叶面积迅速发展, 作物耗水量急剧增加, 在抽穗前后达到高峰, 这时降水季节尚未来临。因此, 作物蒸腾失水的主要途径是消耗土壤中的储存水, 造成土壤湿度急剧降低, 失墒最严重的是拔节- 开花期。1982~1983 年返青- 开花期间降雨量较多, 土壤反而得到大幅度增加。

表 3 各年不同生育阶段的土壤湿度变化

Table 3 Change in soil moisture in different stages for all concerned years mm

年 份	出苗- 分蘖	分蘖- 越冬	越冬- 返青	返青- 拔节	拔节- 开花	开花- 成熟	全生长期
1981~1982	- 1.3	- 20.3	- 6.5	- 32.7	- 60.6	- 25.6	- 146.4
1982~1983	- 2.3	- 18.9	- 18.6	15.4	43.2	- 28.6	- 9.8
1983~1984	8.6	- 43.5	- 7.5	- 45.3	- 33.7	- 17.1	- 138.5
1984~1985	- 48.9	- 9.0	- 4.5	- 49.5	- 13.1	16.5	- 108.5
1985~1986	16.5	- 26.1	- 0.5	- 30.3	- 59.0	- 16.9	- 116.3
1986~1987	- 8.1	- 3.3	0.9	- 5.8	- 31.5	2.1	- 45.7
1987~1988	- 20.4	57.4	21.4	- 51.2	- 22.8	- 12.3	- 27.9
1988~1989	19.1	- 37.8	5.4	- 4.3	- 81.5	- 36.5	- 135.6
1989~1990	18.9	18.0	- 5.2	- 23.3	- 21.3	- 31.0	- 43.9
1990~1991	- 20.7	- 15.9	- 9.7	- 27.9	- 15.3	43.9	- 45.6
1991~1992	12.2	- 23.8	8.2	- 20.7	- 30.1	- 7.7	- 61.9
平 均	- 3.5	- 11.2	- 1.5	- 25.1	- 29.6	- 10.2	- 80.0

3.3 土壤水分渗漏

表 4 是土壤水分渗漏情况。这里的渗漏是指 100 cm 土层向下的根区排水量。由下表可知: 根区排水量较低。全生育期排水量 1983 年~1984 年最大, 达 17 mm, 而有些年份几乎可略而不计。说明 100 cm 土层土壤湿度较低, 因而渗漏一项在农田土壤水分平衡中所占的份额较小, 经常可以不予考虑。土壤水分渗漏量有明显的时间变化, 一般而言, 生长初期到越冬期较大, 返青以后逐渐减小。这是因为返青后小麦生长旺盛, 农田耗水量较大, 降水常常满足不了作物蒸腾需要, 根系通过吸收大量土壤水分供叶片蒸腾。因此土壤湿度水平降低, 根区排水量几乎可以忽略不计。

表 4 各年各生育阶段土壤水分渗漏量

Table 4 Soil water percolation in different stages for all concerned years mm

年 份	出苗- 分蘖	分蘖- 越冬	越冬- 返青	返青- 拔节	拔节- 开花	开花- 成熟	全生长期
1981~1982	1.49	1.87	3.55	1.49	1.00	0.00	9.40
1982~1983	0.26	0.35	0.42	0.24	0.48	0.69	2.44
1983~1984	6.00	4.30	5.36	0.89	0.06	0.03	16.91
1984~1985	1.17	0.57	8.50	0.33	0.04	0.08	4.69
1985~1986	2.45	1.74	5.40	1.26	0.16	0.22	11.03
1986~1987	0.02	0.03	0.05	0.41	0.00	0.00	0.51
1987~1988	0.00	0.03	0.72	0.23	0.03	0.01	1.02
1988~1989	0.83	1.17	0.95	0.36	0.02	0.00	3.33
1989~1990	0.11	0.08	1.05	0.17	0.09	0.02	1.52
1990~1991	2.35	4.41	3.41	1.57	0.13	0.42	12.29
1991~1992	0.09	0.15	0.32	0.18	0.02	0.01	0.77
平 均	1.34	1.34	2.16	0.65	0.18	0.12	5.81

3.4 各层土壤水分利用

农作物对土壤水分的利用情况相对比较稳定。为简便起见,这里仅列出 1990 年冬小麦旺盛生长阶段(返青-成熟)对土壤水分的利用情况(见表 5)。

表 5 1990 年冬小麦返青-成熟期间对土壤水分的利用能力

Table 5 Soil water use capacity for winter wheat during green returning to maturity in 1990

土壤深度 (cm)	最大有效含水量 (mm)	初含水量 (mm)	初有效水 (mm)	未含水量 (mm)	未有效水 (mm)	用水量 (mm)	用水能力 (%)
0~20	35.53	45.90	27.25	19.10	0.45	26.80	75
20~50	60.78	42.80	9.94	25.20	0.00	9.90	47
50~100	87.49	73.50	22.30	53.10	1.90	20.40	23

注:有效水=土壤含水-调萎湿度,用水能力=用水量/最大有效含水

由表 5 看出,冬小麦对 0 cm~20 cm 表层水的用水能力最大,达到 75%,20 cm~50 cm 其次,为 47%。因此 0 cm~50 cm 的土壤含水是作物耗水的主要来源。鉴于此,在生产实践中使用灌溉时应勤灌、少灌,以免造成水资源浪费。

4 作物耗水量与产量关系

4.1 作物产量、耗水量与水分利用率

表 6 为干旱年、偏湿年产量、耗水量与水分利用率。由表可见,干旱年份产量比偏湿年份平均低 1 450 kg/hm²,减少 40%,比正常年份低 1 036 kg/hm²,减少 30%左右。因此,水分不

表 6 产量、耗水量与水分利用率

Table 6 Yield, water consumption and water use efficiency

年型	产量(kg/hm ²)	土壤供水量(mm)	降水量(mm)	耗水量(mm)	水分利用效率
干旱年份	2 240	84.6	152.5	294.1	0.51
偏湿年份	3 690	33.1	284.5	402.4	0.61
平均年份	3 276	90.0	207.2	340.0	0.64

足是限制当地冬小麦生产的主要气象因素。分析水分生产效率可以发现, 干旱年份最低, 湿润年份次之, 其他年份则较高。从这一点上来看, 可能有两个原因, 一是偏湿年份雨水的季节分配与作物的需要并非同步, 使部分降水未被充分利用; 另一是由于作物产量高低除受降水以外, 还受其他环境因素影响, 而这种影响往往非常复杂, 无法与水分影响分离。

4.2 作物产量-耗水量模型

由于西峰地区冬小麦产量的主要限制因子是水分不足, 因此就有可能通过建立作物产量与耗水量的关系模型, 来研究各发育期作物的水分需求。找出影响冬小麦的水分关键期, 以便在农业生产实践中更科学合理地进行农田水分管理, 从而达到高产节水的目的。

从产量序列资料通过必要的趋势处理后建立了冬小麦产量-耗水模型(式(4))。

得到的参数 $\Delta Y = 2\ 100\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $K = 0.90$, 产量拟合复相关系数 $r = 0.958$, 其他各参数见表 7。

表 7 冬小麦产量-耗水量模型中的 λ 参数值

Table 7 Parameters' value in winter wheat yield- water consumption model

λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
0.11	0.27	0.05	0.35	0.48	0.56

从表 7 可知, $K = 0.9$ 说明作物产量对耗水量的反应较强, 即耗水量在产量形成中的影响较大, λ_i 表示各生育期耗水量与相应潜在蒸散的比值大小对作物产量的贡献, 或称产量对比值的敏感指数, λ_i 越大说明这一发育期的水分消耗越重要, 对作物产量的贡献越大。表中数据表明: 拔节以后是当地冬小麦水分关键期, 这一时期内缺水对产量形成造成的危害极大。因此, 必须要给予重视, 一是要密切监测土壤湿度水平, 二是要科学制定灌溉方案, 保证冬小麦能够在关键期内得到适宜的水分供应, 为夺取高产提供水分保障。

表 8 实际产量与模拟产量比较*

Table 8 Comparison between actual and modeled yield for winter wheat kg/hm^2

	1982 年	1983 年	1984 年	1985 年	1986 年	1987 年	1988 年	1989 年	1990 年	1991 年	1992 年
实际产量	2 814	2 906	2 997	3 087	3 179	3 270	3 360	3 450	3 543	3 633	3 725
模拟产量	2 865	2 918	2 972	3 024	3 078	3 131	3 183	3 236	3 290	3 342	3 396

* 品种为阿勃。

由表 8 看出, 模拟产量与实际产量之间的最大误差在 1992 年, 为 $329\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 整个结果表明, 该模型提供了较好的产量模拟效果, 若结合其他环境因素, 可更好地用于作物产量预报。

5 结束语

本文根据我国旱地农业生产的需要, 通过研究甘肃西峰市大田条件下冬小麦农田土壤水分平衡的变化状况, 揭示了土壤水分利用特征和作物耗水规律, 建立了冬小麦产量-耗水量模型, 为研究干旱、半干旱地区农田水分管理措施, 提高干旱地区的农业生产潜力提供了依据。但本文使用的资料年份还不够长, 有些结果尚不够充分合理, 有待于今后进一步收集详细资料进行较为深入的研究。

参考文献

- [1] 周英, 申双和. 陕西泾阳冬小麦农田蒸散[J]. 中国农业气象, 1992, 13(3): 6-9
- [2] 程维新, 胡朝炳, 张兴权. 农田蒸发与作物耗水量研究[M]. 北京: 气象出版社, 1994. 161-180
- [3] “华北平原作物水分胁迫与干旱研究”课题组. 作物水分胁迫与干旱研究[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1990: 16-30
- [4] EAGLESON P S. Climate, soil and vegetation 5, a derived distribution of storm surface runoff[J]. Water resource research, 1987, 14(5): 741-748
- [5] JENSEN E M. Water consumption by agricultural plants[C]. in: Kozłowski T T ed. Water deficits in plant growth. Orlando: Academic, 1968. 1-28
- [6] 欧阳海, 郑步忠, 王雪娥等. 农业气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 202-209
- [7] 王道龙. 农作物需水系数及其影响因子初探[J]. 北京农业大学学报, 1986, 12(2): 211-218

WATER CONSUMPTION AND ITS IMPACT ON YIELD OF WINTER WHEAT IN XIFENG

SHEN Shuang-he

(Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing 210044)

GAO Wei-ying

(Shaanxi Institute of Meteorological Sciences, Xi'an 710015)

LI Bing-bo

(Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

Abstract: In this paper, water consumption was estimated for winter wheat based on water-balance equation. Data used for the estimation are meteorological elements, soil moisture, phenological dates and yield, coming from Xifeng Agrometeorological Experimental Station, Gansu Province. Regular patterns both of the water consumption for winter wheat and of soil moisture change were brought to light and water deficiency was analyzed with respect to its amount and temporal distribution. A yield-water consumption model was established for winter wheat through regression modelling and the critical water period of its yield formation was defined for the area.

Keywords: winter wheat; water consumption; yield-water consumption model