

冬小麦主要生育阶段水分 指标的生态分析*

朱自玺 牛现增**

(河南省气象局农业气象试验站)

提 要

作物水分指标是进行干旱气候分析的基础,也是农业上合理用水的依据。本文从试验资料出发,对水分-生理生态关系进行了模拟,运用数学方法和最优分割理论确定了冬小麦主要生育阶段适宜的水分指标和干旱指标。在此基础上,就相对蒸散与叶面积系数和土壤湿度的关系进行了分析,并用Penman公式加以生态订正,确定出冬小麦耗水量指标。

一、引 言

在土壤-植物-大气系统中,水分是一个十分重要的因子。干旱作为一种灾害,既有其气候属性,又以对国民经济特别是农业带来危害为其特征。目前,世界上评价干旱的指标不下几十种,多由气候要素(降水、气温、蒸发……)统计得出。它们虽在一定程度上可以反映气候的干旱,但不能说明作物水分的盈亏。从农业意义上讲,干旱作为一个累积过程,是因土壤有效水分不能满足蒸腾需要而造成生理失调^[1],从而产生危害的。作物作为一个有机体,对环境条件有一定的适应范围;在此范围内生命过程进行得比较顺利,越出它则生理生态特征会发生某种突变。从这些变化来确定水分指标,是符合生物学规律的,也是具有生产意义的。

二、试验设计和手段

为了研究冬小麦在不同水分状况下生长、发育和产量形成的规律,我们在人为控制水分的条件下进行了试验。试验场设在河南巩县丘陵区,地下水位37米,表层为轻壤土,深层为中壤土。场内设有活动式防雨棚,可以防止自然降水对土壤湿度的影响;小区周围均设有地下隔离层,以防止土壤水分在水平方向上的运动。试验共分四个不同水分处理,分别占田间持水量的 $<40\%$ 、 $40-50\%$ 、 $55-80\%$ 和 $>80\%$,另设自然降水区作为

* 本文于1986年2月1日收到,1986年5月29日收到修改稿。

** 参加此项工作的还有本站傅湘军、李冰和巩县气象站白振杰同志。

对照。每个处理设有三个重复。为研究不同发育阶段水分对小麦生长发育的影响,上述处理共有两套,分别在拔节—抽穗和抽穗—成熟时进行测定。冬小麦供试品种为小偃六号和百农3217。

测定项目为每10天进行一次土壤湿度测定,所用仪器为土钻和中子仪(503 DR Hydroprobe Moisture Depth Gauge),测定深度为1.3米,另用水力式蒸发器测定实际蒸散。同时,还进行作物生长发育状况和生理生态测定,如干物重、叶面积(仪器为LI-3100 Area Meter)、光合强度(仪器为红外线CO₂分析仪)、气孔阻力(仪器为LI-1600 Steady State Porometer)、蒸腾强度(仪器同气孔阻力)和灌浆速度等;附近有气象观测场,可进行平行观测。

三、冬小麦主要生育阶段水分指标分析

在作物-水分关系研究中,重要的问题在于揭示水分对生命现象和过程的影响^[2]。下面从气孔阻力、光合强度、灌浆速度、水分利用效率和产量形成要素等方面进行分析。

1. 气孔阻力与土壤水分的关系

水分在土壤-植物-大气系统中运动的最后阶段为蒸腾,它是通过气孔开放来实现的。小麦叶片的两面均有气孔,上表面气孔密度为50个/毫米²,下表面为40个/毫米²^[3]。气孔面积约占总面积的0.63%^{[4][5]},但其蒸腾量却占同面积水面蒸发的50—60%。气孔关闭时蒸腾量则大大减小。气孔除作为水汽的通道外,还是植物与大气进行CO₂交换的主要途径,对光合作用影响甚大。

气孔阻力除受太阳辐射和温度的影响而呈周期性变化之外,还受土壤湿度、空气饱和差和风的影响,其中最主要的是土壤湿度的影响。土壤湿度大,气孔开张,阻力减小;反之,气孔关闭,阻力增大。根据1983—1985年小麦抽穗—成熟期对气孔阻力测定的结果,二者呈指数关系。当土壤湿度很小时,阻力很大,随着土壤湿度的增大,阻力急剧减小;当土壤湿度增大到一定程度时,气孔完全开放,阻力稳定在一定数值上(图1)。

其拟合方程为:

$$r_s = 626.64927e^{-0.836009W+0.03079W^2} \quad (1)$$

式中 r_s 为气孔阻力,单位为秒/厘米; W 为土壤湿度百分率,取其分子,则:

$$\frac{dr_s}{dW} = (-523.88443 + 38.58906W)e^{-0.836009W+0.03079W^2} \quad (2)$$

令 $dr_s/dW = 0$,可得 $W_{\min} = 13.6$,即达到该土壤湿度时,气孔完全开放,阻力最小,且随土壤湿度变化甚微。此湿度值可作为灌浆期适宜的土壤湿度指标,大约相当于田间持水量的62.7%,1.3米深土层的有效水分为145.1毫米。

从图1可以看出,在不同湿度情况下,气孔阻力随土壤湿度的变化很不相同,而且明显地存在一个突变点 M 。在 M 点右方,气孔阻力小而稳定,有利于气体交换和光合作用。而在 M 点左方,则变化急剧,影响正常的生理功能,可以此作为干旱指标。如何确

定 M 点的位置, 这里用最优分割聚类法, 对斜率 $\left| \frac{dr_s}{dW} \right|$ 在各湿度点的取值总体进行分割, 将其分为两个子群, 则组间差为:

$$B(k, n) = \frac{n \cdot k}{n - k} (\bar{Y}_{(k)} - \bar{Y})^2, \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3)$$

式中 $B(k, n)$ 为组间差, n 为总体样本数, k 为分割点序号, \bar{Y} 为斜率总体平均值, $\bar{Y}_{(k)}$ 为第一子群斜率平均值。欲得到最优分割点 M , 则组间差必须达到最大, 即

$$B(k, n) = \max\{B(k, n), k = 1, 2, \dots, n-1\} \quad (4)$$

然后, 对最优分割点进行 F 检验,

$$F = \frac{B^*(k, n)}{T - B^*(k, n)} \cdot \frac{n - G}{G - 1} \quad (5)$$

式中 T 为斜率总体方差, G 为子群数。如果 $F > F_{0.05}$, 则分割显著, 可定 M 点为最优分割点。

根据上述方法, 对斜率总体进行最优分割聚类, 则最优分割点 M 的土壤湿度值为 8.3%, 占田间持水量的 38.3%, 有效水分为 48.6 毫米 (1.3 米土层平均凋萎湿度为 5.63%)。

2. 光合强度与土壤水分的关系

作物在发生水分短缺时, 光合作用下降。一般认为这是由于气孔关闭, CO_2 进入受阻所引起^[4]。因此, 光合作用和气孔阻力在对于土壤湿度的关系上呈现出相反的趋势。根据灌浆期对两套处理、两个品种测定结果的综合分析, 光合强度随土壤湿度的变化情况如图 2 所示。可以看出, 在不同土壤湿度范围内, 光合强度的变化有很大的差异。在土壤湿度比较小时, 光合强度随土壤湿度的增加急剧上升, 而在达到一定数值后, 则随土壤湿度变化甚微, 其拟合方程为:

$$A = \ln(-25501.33129 - 2399.976891W + 738.7740655W^2) \dots \quad (6)$$

$$\text{斜率为} \frac{dA}{dW} = \frac{-2399.976891 + 1477.548133W}{-25501.33129 - 2399.976891W + 738.7740655W^2} \dots \quad (7)$$

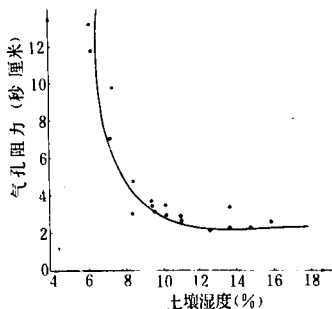


图 1 气孔阻力与土壤湿度(1.3米深)的关系

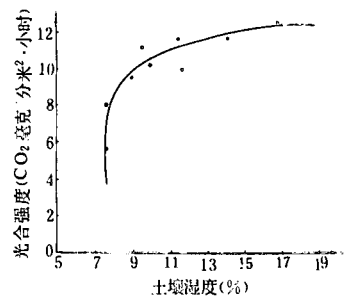


图 2 光合强度与土壤湿度的关系

取各湿度点的斜率总体 (绝对值) 进行最优分割, 分割点的湿度值为 $W = 8.2\%$, 与气孔阻力的分割点基本相合。可见在该湿度情况下, 气孔阻力剧增, 而光合强度则剧降, 可

以此作为灌浆期干旱指标。该曲线不存在极值点,但在土壤湿度大于14.5%的情况下,光合强度变化不大,基本上稳定在较高的数值上,可以此作为适宜的水分指标,占田间持水量的66.8%,1.3米土层内的有效水分为161.3毫米。

3. 灌浆速度与土壤湿度的关系

灌浆速度一般随土壤湿度的增大而增大,但在湿度比较小时,增大极为迅速,当土壤湿度增大到一定程度后,灌浆速度增大十分缓慢,曲线变得比较平缓,如图3。

其拟合方程为:

$$M = -3.049211107 + 2.958757827 \ln W - 0.5541187918 \ln^2 W \quad (8)$$

$$\text{则} \quad \frac{dM}{dW} = \frac{1}{W} (2.958757827 - 1.108237584 \ln W) \quad (9)$$

$$W_{\max} = e^{2.66979} = 14.4$$

即在土壤湿度 $W = 14.4\%$ 的情况下,灌浆速度出现极大值,可以此作为灌浆期适宜的水分指标,相当于田间持水量的66.4%,有效水分为159.6毫米。

对(9)式在各湿度处的绝对值进行分割,则最优分割点为 $W = 8.3\%$ 。以此作为干旱指标,相当于田间持水量的38.3%,有效水分为48.6毫米。

4. 生长率CGR与土壤湿度的关系

单位土地面积上、在单位时间内所生产的干物质的多少,称为生长率(CGR),是生产能力的反映。CGR与土壤湿度的关系呈抛物线型,其方程为:

$$CGR = -19.789 + 6.519W - 0.22376W^2 \quad (10)$$

可求出极值点 $W = 14.6\%$,占田间持水量的67.3%,1.3米土层内有效水分为163.3毫米。

5. 产量与土壤湿度的关系

在其它因子不成为限制因子的情况下,产量与土壤湿度的关系呈抛物线形式^[6]。根据1983—1985年试验资料,取各年不同水分处理的产量与当年对照地段产量的比值作为相对产量,建立相对产量与灌浆期土壤湿度的关系曲线,如图4。

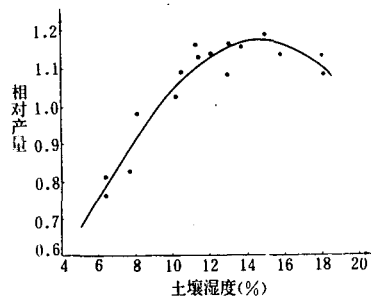
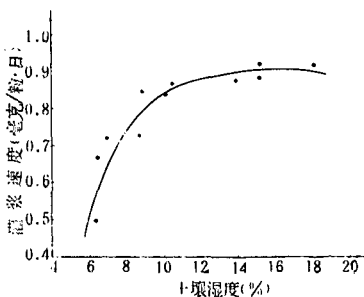


图3 灌浆速度与土壤湿度的关系(品种:百农3217) 图4 相对产量与灌浆期土壤湿度的关系

其方程为:

$$Y_r = 1.1734e^{-0.0063(W-14.260)^2} \quad (11)$$

式中 Y_r 为相对产量, W 为土壤湿度。

$$\text{则 } \frac{dY_r}{dW} = -0.014785(W-14.260)^2 e^{-0.0063(W-14.260)^2} \quad (12)$$

$W_{\max}=14.3$, 为最适宜的土壤水分指标。对(12)式斜率总体进行分割, 则最优分割点的土壤湿度为8.6%, 可以此作为干旱指标, 表明湿度在此以下, 可造成明显减产。

相对产量与拔节—抽穗期的土壤湿度也有密切的关系。根据试验资料分析, 相对产量和土壤湿度之间的关系为

$$Y_r = 1.113e^{-0.0108(W-13.650)^2} \quad (13)$$

用同样的方法, 可求得此期适宜土壤湿度为 $W=13.7\%$, 干旱指标为9.8%。

6. 成穗率与土壤湿度的关系

按照小麦分蘖消长规律, 自拔节后, 分蘖开始向两极分化, 一部分被淘汰, 一部分可以成穗, 其成穗率以收获时有效穗数和拔节时茎数之比来表示。成穗率的高低与拔节—抽穗期土壤湿度的关系十分密切。其关系为:

$$H = 0.6287e^{-0.0069(W-13.1091)^2} \quad (14)$$

式中 H 为成穗率, W 为土壤湿度。用上述方法, 可求得适宜土壤湿度为13.1%, 干旱指标为8.7%。

7. 穗粒数与土壤湿度的关系

小麦拔节时, 正值小花分化期, 土壤水分状况如何, 直接影响着每个小穗的小花数, 并进而影响穗粒数。根据试验资料, 穗粒数与拔节—抽穗期土壤湿度的关系为:

$$G = 32.7270e^{-0.006(W-12.8244)^2} \quad (15)$$

式中 G 为穗粒数, W 为土壤湿度。由此求得的适宜土壤湿度和干旱指标分别为12.8%和8.3%。

8. 水分利用效率(WUE)与土壤湿度的关系

作物在生长发育过程中, 每消耗单位水分所形成的干物质, 称为水分利用效率(WUE)^[7], 即 $\Delta W_g/E_T$ 。其中 E_T 为某时段实际蒸散, 单位为毫米; ΔW_g 为该时段干物质增量, 单位为克。水分利用效率愈高, 表明外界环境条件与内部生理功能之间的配合愈好。根据拔节—抽穗期的测定资料, 水分利用效率和土壤湿度之间的关系为:

$$WUE = 85.1388e^{-0.01537(W-12.8117)^2} \quad (16)$$

由此所求得的适宜土壤水分指标和干旱指标分别为12.8%和9.5%。

通过上述分析, 所确定的水分指标如附表所示:

可以看出, 在同一个生育阶段, 不管从哪一个生理生态特征所确定的指标, 基本上是一致的。这不是偶然的, 而是作物本身固有特性的反映。它反映了正常生长情况下所需要的适宜水分指标和发生水分短缺而使生长发育开始受到明显抑制时的干旱指标。

在土壤水分指标确定之后, 即可进一步确定各主要生育阶段的耗水量指标。目前世界上常用气候学的方法计算潜在蒸散(ET_0), 而后用相对蒸散值(K)加以订正, 得出作物的耗水量(或实际蒸散)指标(ET), 即

$$ET = K \cdot ET_0 \quad (17)$$

附表 从各种生理生态特征确定的土壤水分指标 (1.3米土层)

发育阶段	指标项目	适宜水分指标			干旱指标		
		土壤湿度 (%)	占田间持水量 (%)	有效水分 (毫米)	土壤湿度 (%)	占田间持水量 (%)	有效水分 (毫米)
拔节—抽穗	水分利用率	12.8	59.0	130.5	9.5	43.8	70.4
	成穗率	13.1	60.4	136.0	8.7	40.1	55.9
	穗粒数	12.8	59.0	130.5	8.3	38.3	48.6
	相对产量	13.7	63.1	146.9	9.8	45.2	75.9
	平均	13.1	60.4	136.0	9.1	41.8	62.7
抽穗—成熟	气孔阻力	13.6	62.7	145.1	8.3	38.3	48.6
	光合强度	14.5	66.8	161.3	8.2	37.8	46.8
	灌浆速度	14.4	66.4	159.6	8.3	38.3	48.6
	生长率	14.6	67.3	163.3			
	相对产量	14.3	65.9	157.8	8.6	39.6	54.1
	平均	14.3	65.8	157.4	8.4	38.5	49.5

本试验采用1979年经FAO修订的Penman公式^[8]计算 ET_0 ，而用水平衡法*计算 ET_0 。分析结果表明，影响 K 值的最主要的因子是叶面积系数(LAI)和土壤湿度(W)，其关系为：

$$K = -0.979 + 0.4806 \ln W + 0.3902 e^{0.0238W} \ln(LAI + 1) \quad (18)$$

根据试验资料，冬小麦拔节—抽穗和抽穗—成熟的叶面积系统分别为4.67和2.05，而适宜的水分指标(如上述)分别为13.1%和14.3%；代入式(18)，则 K 值分别为1.182和0.911。而同期潜在蒸散 ET_0 分别为105.8和145.3毫米，由式(17)可得出两阶段适宜耗水量分别为125.1和132.4毫米。若以干旱指标代入，则两阶段最低耗水量应分别为97.7和83.6毫米。根据当地多年降水资料，冬小麦拔节—抽穗和抽穗—成熟期间降水量分别为65.3和79.8毫米，故尚需要利用一部分土壤贮存水。

四、结 语

1. 综合各种生理生态特征分析结果，可得出轻壤土冬小麦拔节—抽穗和抽穗—成熟的适宜土壤水分指标分别为13.1%和14.3%，干旱指标分别为9.1%和8.4%。它反映出拔节—抽穗期对水分比较敏感，要求较高的下限指标；如果水分不足，将导致小花退化，影响产量。灌浆期由于群体大、气温高，要求较高的适宜水分指标，但适应范围也比较大，此时水分多少主要影响千粒重。

2. 根据冬小麦主要生育阶段的叶面积系数(LAI)和上述指标，可求得相对蒸散值(K)，从而可运用气候学方法计算作物耗水量。据计算，对巩县这种半干旱丘陵地区，冬小麦各主要生育阶段降水量略低于耗水量下限，需利用一部分土壤贮存水。为达到适

* 本文采用简化的水平衡计算公式

$$ET = 0.1 \sum_{i=1}^n h_i d_i (W_{1i} - W_{2i}) + P + I$$

其中 h_i 为第 i 层土层厚度， d_i 为第 i 层容重， W_{1i} 和 W_{2i} 分别为时段始末第 i 层土壤湿度， P 为降水量， I 为灌溉量。

宜水分指标, 可分别在拔节—抽穗和抽穗—成熟阶段灌水50毫米左右。

参 考 文 献

- [1] N. J. Rosenberg, North American Drought, Westview Press, U. S. A., 1978.
- [2] W·拉夏埃尔著, 李博等译, 植物生理生态学, 科学出版社, 1985。
- [3] I. D. Teare, M.M. Peet, Crop-Water Relations, A Wiley-Interscience Publication, New York, 1982.
- [4] 赵微平, 作物生理, 农业出版社, 1982。
- [5] J. L. Monteith, Vegetation and Atmosphere, Vol. 1, Principles, Academic Press, London, 1975.
- [6] J. Doorenbos, W. O. Pruitt, Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper, 24, 1977.
- [7] Norman J. Rosenberg, Blaine L. Blad, Shashi B. Verman, Microclimate, The Biological Environment, A Wiley-Interscience Publication, 1983.
- [8] M. Frère and G. F. Popov, Agrometeorological Crop Monitoring and Forecasting, FAO Plant Production and Protection Paper, 17, FAO of The United Nations, Rome, 1979.

AN ECOLOGICAL ANALYSIS ON SOIL MOISTURE INDICES OF WINTER WHEAT IN ITS MAIN STAGES

Zhu Zixi Niu Xianzeng

(Agrometeorological Experimental Station of Henan Province)

Abstract

In this paper, by using the experimental data obtained from Gong County Meteorological Station in Henan Province, the relation between the physiological function of winter wheat in its main stages and soil moisture is simulated, and the optimum index for soil moisture and the drought index for moisture are given. On the basis of these indices, the water consumption of winter wheat in its main stages is obtained from modified Penman equation by consideration of the relative evapotranspiration related to the coefficient of crop leaf area and the index of soil moisture.