

作物缺水状况的判别方法与灌水指标的研究*

康绍忠 熊运章

(西北农业大学)

提 要

本文从土壤-植物-大气连续体水分运移机理出发,提出了一个能全面反映作物缺水状况的水分亏缺敏感指数CWSI,在田间试验成果基础上,分析了CWSI的日变化规律和在全生育期内的变化,CWSI与土壤含水量和空气饱和差、净辐射、气温等因素的关系,论证了用中午的CWSI值作为作物水分亏缺判别标准和灌水指标的可行性,给出了冬小麦不同生育阶段需灌水时的临界CWSI值。

为了有效地进行节水灌溉,人们从不同方面研究作物缺水状况的评价方法,从而制定了相应的灌水指标^[1,2]。事实上,作物吸水和散失水分的过程是作物本身不同的器官和它所在环境的相互作用、反馈影响的结果,受土壤-植物-大气连续体(简称SPAC)各个环节的综合作用。因此,在解决作物水分问题时需要从整体上和相互作用上来考虑。本文的目的就在于从SPAC水分运移理论出发,寻找一个以严格的生物物理学和植物生理学为基础的、能全面反映作物缺水状况的综合灌水指标,为实现节水灌溉提供理论依据。

一、试验研究方法

为了建立作物缺水状况的判别方法、制定科学的灌水指标,我们在西北农业大学水利系灌溉试验站进行了田间小区试验研究。试验区四周较为开阔,能代表大田的气候条件。土壤水分从高到低设有6种处理,每个处理设有两次重复。小区土壤质地为中壤,其田间持水量为23.0%(占干土重的百分数)。为了控制降水对土壤水分的影响,在小区设有防雨棚。在试验过程中观测了土壤含水量,作物叶水势、气孔阻力、蒸腾强度、叶温、株高和叶面积指数,冠层顶太阳净辐射和空气温、湿度、风速等。各个项目的具体试验方法如下:

土壤含水量采用取土烘干法测定,每次在地表、20、40、60、80和100cm深度取土样3个进行烘干称重计算含水量。气孔阻力、蒸腾强度、叶温均采用LI-1600型稳态气孔计测定,每次在各小区内随机抽样测6个叶片,正、反两面都测,测点在叶片的中上部,冬小麦抽穗前测第二片叶,在抽穗后测第一片叶,每星期测定一次日变化过程(每小时测定一次),早6:00开始,晚8:00结束。由于冬小麦叶片两面均具有气孔,因此,叶片总的气孔阻力用如下公式求得:

$$1/r_{st} = 1/r_{s1} + 1/r_{s2}, \quad (1)$$

* 本文于1989年10月6日收到;系国家自然科学基金资助项目的一部分。

式中: r_{st} 为总的气孔阻力, r_{s1} 为正面气孔阻力, r_{s2} 为反面气孔阻力.

叶水势采用ZLZ-4型植物水分状况测定仪测定, 在全生育期内每周测定一次, 每次随机测定3个叶片代表小区的平均叶水势, 每次在上午9:00、下午1:00和下午5:00测定, 另在全生育期内各阶段选择有代表性的天气测定全日的叶水势变化, 从早6:00到晚8:00每小时观测一次.

用阿斯曼通风干湿表在小区内测定离地面1.0m高度的干、湿球温度日变化, 然后通过《湿度查算表》查出相应的空气饱和差 D . 用三杯风速仪测定离地面1.0m高度的风速. 这些测定项目与气孔阻力、叶水势等的测定同步进行. 用DYM1型净全辐射仪测定全生育期内每日(每小时一次)的净辐射变化.

在全生育期内每周测定一次作物的叶面积和株高, 其中叶面积每小区测定10株, 量取叶长和叶宽, 小区内的总叶面积采用株数乘以单株叶面积确定. 小区内的植株高度随机抽样测10株平均求得.

二、作物缺水状况的判别方法

当土壤含水量降低时, 产生土壤水分亏缺, 经过叶气孔的水分扩散阻力增大, 从而导致作物叶面蒸腾强度低于无水分亏缺时的蒸腾强度; 另一方面, 即使土壤水分能满足作物根系吸水要求, 但大气蒸发力过强时, 亦会使叶气孔开度减小、扩散阻力增加、蒸腾强度下降. 因此, 作物叶面蒸腾是作物因土壤水分过低或大气蒸发力过强等因素产生水分胁迫的综合反映. 作物缺水状况能用相对蒸腾速率表示, 相应的作物水分亏缺评价标准定义为:

$$CWSI = 1 - T/T_p, \tag{2}$$

式中: $CWSI$ 是作物水分亏缺指数 (crop water stress index), T 、 T_p 分别是有水分亏缺时作物的实际蒸腾速率和无水分亏缺存在时的潜在蒸腾速率.

蒸腾速率 T 采用彭曼-蒙特斯 (Penman-Monteith) 公式^[3]计算, 在海拔高度大于500m时, 应考虑气压订正, 于是有:

$$T = \frac{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} R'_n + \frac{\rho_a C_p}{\gamma} [e_w(T_a) - e_a]/r_a}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + (1 + r_{st}/r_a)}, \tag{3}$$

式中: R'_n 为作物冠层叶片所接受的净辐射, $e_w(T_a)$ 是气温为 T_a 时的饱和水汽压, e_a 是空气的实际水汽压, Δ 是饱和水汽压-温度曲线上的斜率, γ 是湿度计常数, ρ_a 是空气密度, C_p 是空气的定压比热, r_a 是空气边界层阻力, r_{st} 是叶片气孔阻力, P_0 和 P 分别是海平面标准大气压与计算所在地的实际气压.

当作物体内无水分亏缺时, 其气孔阻力 $r_{st} \rightarrow r_{st(\min)}$, 作物的蒸腾速率达到潜在蒸腾速率 T_p . 把式(3)和式(3)中 $r_{st} \rightarrow r_{st(\min)}$ 时的潜在蒸腾速率 T_p 的关系式代入式(2), 化简得:

$$CWSI = \frac{r_{st} - r_{st(\min)}}{\left(\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1\right)r_a + r_{st}}, \tag{4}$$

式中符号意义同前.

从式(4)可知当 $r_{st} \rightarrow r_{st(\min)}$ 时, $CWSI = 0$, 作物无水分亏缺发生; 当气孔因缺

水关闭时 $r_{st} \rightarrow \infty$, $CWSI=1.0$, 即作物水分亏缺指数变化于 0 与 1 之间. 根据我们的田间实测结果表明气孔阻力对缺水反应的敏感性比叶水势、细胞液浓度强, 因此用式(4)估算作物缺水程度是可行的.

式(4)中空气边界层阻力 r_a , 我们建议采用Thom和Oliver(1977)公式确定, 即:

$$r_a = 4.72 \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 / (1 + 0.54u_z), \quad (5)$$

式中: u_z 为 z 高度处的风速(m/s), z_0 为冠层表面粗糙度(m), d 为零平面位移(m). z_0 采用Szeicz等(1969)公式计算, d 采用Stanhill(1969)公式计算, 即:

$$\log z_0 = 0.997 \log H - 0.883, \quad (6)$$

$$\log d = 0.979 \log H - 0.154, \quad (7)$$

式中: H 是作物冠层高度(m).

最小气孔阻力 $r_{st(\min)}$ 是作物体内水分供需平衡时的阻力值, 可在田间直接测定, 也可用公式计算. 对于禾本科植物, 其气孔形状为槽形, 可采用Parlange和Wagoner(1970)公式计算. Miltorpe(1961)求得小麦的最小气孔阻力 $r_{st(\min)} = 0.25s/cm$. 我们在充分供水的田间实测冬小麦 $r_{st(\min)} = 0.496s/cm$.

气压修正项 P_0/P 采用下式计算:

$$P_0/P = 10^{\frac{H_0}{18400(1+T_z/273)}}, \quad (8)$$

式中: H_0 为计算地点的海拔高度(m), T_z 为气温.

饱和水汽压-温度曲线上的斜率 Δ 为:

$$\Delta = \frac{25966.89}{(241.9 + T_z)^2} \cdot 10^{\frac{7.63T_z}{241.9 + T_z}}, \quad (T_z > 0) \quad (9a)$$

$$\Delta = \frac{35485.05}{(265.5 + T_z)^2} \cdot 10^{\frac{9.5T_z}{265.5 + T_z}}, \quad (T_z \leq 0) \quad (9b)$$

式中: T_z 为气温($^{\circ}C$).

湿度计常数 γ 与气温有关, 即:

$$\gamma = 0.6455 + 0.00064T_z, \quad (10)$$

式中符号意义同前.

以上计算的各参数一并代入式(4)即求得作物水分亏缺指数CWSI, 用此作为作物水分亏缺程度的判别标准. 作物水分亏缺指数CWSI不仅反映了作物缺水状况和环境因素的关系, 而且从生理机制上反映了作物水分状况和叶片气孔阻力变化之间的定量关系, 具有重要的理论意义. 试验研究表明叶气孔阻力的变化是土壤水分状况和天气条件等因素综合影响的结果, 可根据试验资料建立气孔阻力的动态计算模式, 用此估算气孔阻力的变化来确定作物缺水状况, 这比直接用彭曼-蒙特斯公式计算 T_p 和 T 来估算作物缺水状况更简单、准确. 关于气孔阻力的动态计算模式作者在另文中有论述.

三、作物水分亏缺指数CWSI的变化规律

(一) 作物水分亏缺指数CWSI的日变化 我们用1989年5月31日冬小麦乳熟期的CWSI计算资料绘出了其日变化过程线(图1), 从图1可知CWSI的日变化早晚小、

中午较大，呈现抛物线状。上午的CWSI上升较快，曲线变化较陡，至中午12:00以后到下午2:00之前，CWSI达峰值，然后下降，下降速度较慢。不同土壤水分状况时的CWSI日变化规律是：低水分（亏缺量大）和高水分（无亏缺量或水分亏缺量小）的差异在早晨和傍晚较小，中午较大，而且低水分的CWSI日变化幅度大，高水分的CWSI日变幅小。

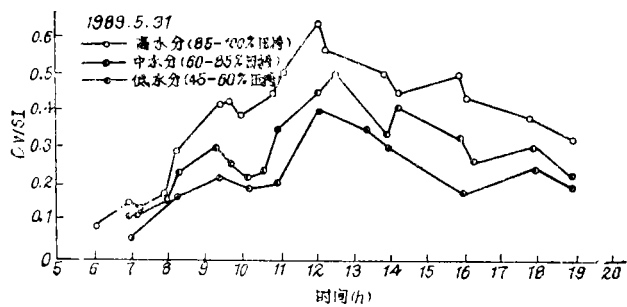


图 1 不同土壤水分条件的CWSI日变化过程

在相同土壤水分下，不同天气状况（晴天、阴天等）的CWSI日变化趋势不同，晴天CWSI日变幅大，而阴天CWSI日变化幅度较小，变化平缓（见图 2）。

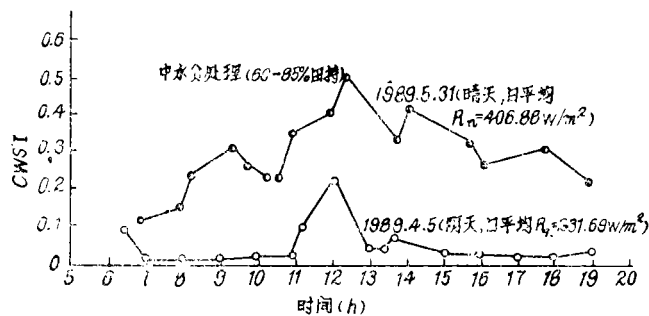


图 2 不同天气条件CWSI的日变化过程

（二）作物水分亏缺指数CWSI在全生育期的变化 CWSI在全生育期内总的变化趋势是当土壤水分水平较高时，CWSI值较小，土壤含水量接近于灌水下限时，CWSI值较大，灌水后CWSI减小，然后随着土壤水分的消耗而增加。前期CWSI变化比中、后期缓慢。阴雨天CWSI逐日增加缓慢，晴天CWSI逐日增加较快。今选用中水分处理（60—85%田间土壤持水量）每次实测的中午12:00至下午2:00之间的峰值，作出了CWSI在冬小麦全生育期内的变化过程（图 3）。

（三）作物水分亏缺指数CWSI与土壤水分状况的关系 作物水分亏缺指数CWSI与土壤含水量关系密切。我们根据测定CWSI时的净辐射 R_n ($R_n > R_n'$)和空气饱和差 D 的数值，把CWSI分为三种天气条件，作出了各日中午的CWSI峰值与土壤含水量的关系曲线，如图 4 所示。从图中可以看出：无论 R_n 和 D 的取值范围是多少，CWSI都是随土壤含水量增加而减小的，当土壤含水率增至一定范围时CWSI不再减小。晴天蒸发力较大时土壤含水率要达到85%田持时CWSI才不随土壤含水率增加而产生明显的变化；而阴天土壤含水率在70%田持时CWSI就趋于水平，不再随含水率变化。

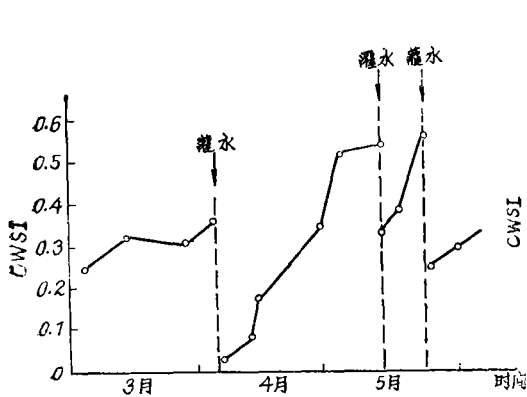


图 3 冬小麦返青后CWSI的变化过程

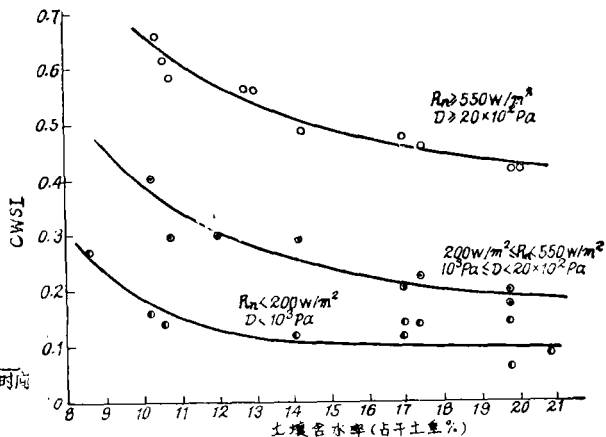


图 4 每日中午测定的CWSI与土壤含水率的关系曲线

(四) 作物水分亏缺指数CWSI与气象因素的关系 CWSI与净辐射 R_n 、饱和差 D 、气温 T_a 关系较密切。我们根据1989年5月31日实测资料绘出了CWSI与 R_n 、 D 及 T_a 日变化过程线(图5),从图5可知:该日上午10:00至11:00,饱和差有一个低值,CWSI也降低,在中午12:00左右 D 有一峰值,CWSI也升高,下午2:00左右 D 出现一个低值,CWSI也降低。对于不同日期CWSI的日变化不同,但与 D 的日变化趋势最相似。根据实测资料统计CWSI与 D 的关系最密切,与 R_n 次之。

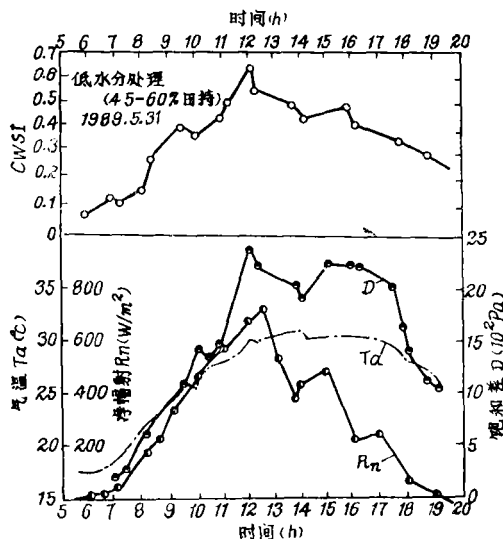


图 5 作物水分亏缺指数CWSI与气象因素之间的关系

四、作为作物灌水指标的临界CWSI值

研究作物水分亏缺状况的评价方法的目的是为了根据作物缺水状况的定量标准制定其灌水指标。单纯从土壤含水率出发制定的灌水指标是不全面的,需要引入现代科学理论扩展原有灌水指标的概念。作物生长的外界环境是土壤和大气,灌水的目的不仅仅是调节农田土壤水分状况,还应为调节农田小气候使作物有良好的生长环境。在炎热的天气或干热风天气,即使土壤水分亏缺不严重,但由于大气干燥而造成作物体内水分平衡

失调仍需进行灌水（特别是果园喷灌或雾灌），以降低较短时期的作物水分过量亏缺，提高产量。这正是CWSI能较全面的定量反映作物水分状况，作为灌水指标的依据。

试验研究结果表明CWSI在一日内变化幅度较大，但最能反映作物水分亏缺状况的是中午12:00至下午2:00之间的。此时作物缺水最严重，虽然高、中、低土壤水分处理作物在中午都产生一定程度的“午睡”现象或气孔开度减小，但低水分处理的“午睡”现象和气孔开度减小比高、中水分处理时更厉害，此时不同土壤水分处理的CWSI差异最明显。许多植物生理试验结果也表明用中午的CWSI值能较全面反映植物水分亏缺状况。因此，用中午的CWSI作为作物灌水指标是可行的。

任何灌水指标最终都必须反应在对产量的影响上。为此，我们分析了作物产量和各生育阶段CWSI之间的关系，绘制了各生育阶段CWSI变化对产量影响的曲线（图6）。从图6可看出：产量随CWSI增大而下降，但随CWSI增大而减产的程度在各生育阶段不同，在一定范围内产量不随CWSI增加而降低。我们把由于CWSI继续增加会导致减产时的临界值作为作物的灌水指标。冬小麦各生育阶段需灌水时的临界CWSI值如图6示。从图6可知作物前期需灌水的临界CWSI值较小，中、后期较大。这说明作物生长前期株体幼小，根系伸展浅，根系吸水力弱，其抗旱性差；作物生长中后期根系伸展深，根系吸水力强，抗旱性强。

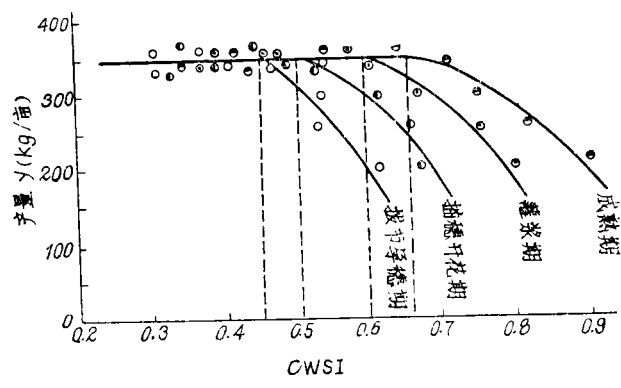


图 6 作物产量与各生育阶段CWSI的关系

土壤水分过低或空气干热、蒸发力太大，都会使CWSI大于需要灌水时的临界值。因而当土壤水分过低或空气太干热时均需灌水，否则会造成减产。这就为灌水预报提供了一个综合的定量标准。

致谢 西北水土保持研究所邵明安副研究员提供了试验场地和条件。

参 考 文 献

[1] Jackson, R.D., et al., Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, Vol.17, No.4, pp.1133—1138, 1981.

[2] Jones, H.G., *Plants and Microclimate—A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press, 1983.

[3] Monteith, J.L., *Vegetation and the Atmosphere*, Vol.1, Principles. Academic Press, London, 1975.