

# 基于冠层温度的冬小麦水分胁迫指数的实验研究\*

刘学著 张连根

(北京农业大学农业气象系, 北京 100094)

周守华

(湖北省荆州农业气象试验站, 荆州 434100)

## 提 要

在田间实验基础上对冬小麦田逐日 14 时基于冠层温度的作物水分胁迫指数(CWSI)进行了计算和分析. 同一时刻干旱处理 CWSI 高于湿润处理; 麦田灌溉后 CWSI 4~6 天降到极小值, 表明了灌水后作物从水分胁迫状态恢复所需的时间; 从本次灌溉后 CWSI 达到极小值至再次灌溉期间, CWSI 呈持续增加趋势. 这些表明 CWSI 较好的反映了因土壤供水不足导致的作物水分胁迫. CWSI 与叶水势之间呈明显的负相关关系. CWSI 等于 0.4, 相当于实际蒸散与可能蒸散的比率为 60%, 是指示冬小麦发生严重水分胁迫的关键性指标.

**关键词:** 冬小麦; 冠层温度; 作物水分胁迫.

## 引 言

随着红外测温技术的广泛应用, 利用冠层温度指示作物水分胁迫的研究受到农学和环境学家的重视<sup>[1-5]</sup>. Jackson<sup>[5]</sup>提出了具有理论依据的作物水分胁迫指数(*Crop Water Stress Index*, CWSI). CWSI 是在考虑了众多生物及环境因子, 综合作用基础上构造的基于冠层温度的作物水分胁迫指数. 这无疑为进一步研究利用冠层温度指示作物水分胁迫奠定了良好的基础. 王宏<sup>[6]</sup>利用盆栽实验研究了充分灌溉与干旱处理间小麦冠层温度的差别. 李付琴<sup>[7]</sup>对基于冠层温度的冬小麦水分胁迫指数进行了实验研究.

本文在实验基础上进一步考察不同水分胁迫冬小麦田 CWSI 的差别及其季节变化规律以及 CWSI 与叶水势间的相关性.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料与方 法

田间试验于 1993 年在北京农业大学科学园进行, 冬小麦品种为农大 84015, 土壤质地

\* 本文是自然科学基金资助项目.

1994-02-08 收到, 1994-06-28 收到修改稿.

为土壤上,有A和B两块试验田.A试验田只有一个水分处理,试验田面积为600 m<sup>2</sup>,冠层温度观测选择5个点取平均值代表整块田.本田分别于4月20日、5月8日和5月24日浇拔节水、抽穗水和灌浆水.B试验田有4个水分处理,记为B1、B2、B3和B4.该田灌拔节水、抽穗水和灌浆水的日期为4月19日、5月5日和5月26日.4个处理拔节水和抽穗水灌溉方案不同,B1处理的灌水量分别为60 mm和80 mm;B2处理没灌拔节水,而抽穗水灌量为50 mm;B3处理拔节水灌量为50 mm,没灌抽穗水;B4处理拔节水和抽穗水都没灌.即从B1至B4土壤水分条件依次从湿润变为干旱.设置3个重复,小区面积为120m<sup>2</sup>.

观测项目包括冠层温度、叶水势、干湿球温度、太阳总辐射、风速和土壤重量含水量.观测时间为4月20日至5月底逐日13:45~14:15.干湿球温度表距地面1.5 m高,风速表距地面2 m高.冠层温度观测采用BAU-1型红外测温仪,垂直于行向并顺入射光方向观测,探棒倾角为30°,感应头距冠层10~20 cm.取8次观测值的平均值代表一个测点的观测值.叶水势观测采用压力室法,测定植株最上部展开叶,取3~4片叶子的平均.土壤水分观测采用土钻法,每周一次,灌溉前后加测.

## 1.2 CWSI 计算公式<sup>[5]</sup>

$$CWSI = 1 - E/E_p = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)}$$

其中:

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{\gamma r_a (R_n - G) / (\rho c_p) - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e_a^* - e_a)}{\gamma [(T_c - T_a) - r_a (R_n - G) / (\rho c_p)]}$$

式中  $E$  为实际蒸散,  $E_p$  为可能蒸散,  $R_n$  为净辐射量 ( $Wm^{-2}$ ),  $G$  为土壤热通量 ( $Wm^{-2}$ ),  $\rho$  为空气密度 ( $kgm^{-3}$ ),  $c_p$  为空气热容量 ( $Jkg^{-1}C^{-1}$ ),  $T_c$  为冠层温度 ( $^{\circ}C$ ),  $T_a$  为空气温度 ( $^{\circ}C$ ),  $e_a$  为空气水汽压 (Pa),  $e_a^*$  为空气温度下的饱和水汽压 (Pa),  $\gamma$  为干湿表常数 ( $Pa^{\circ}C^{-1}$ ),  $r_a$  为空气动力学阻抗 ( $sm^{-1}$ ),  $r_c$  为水分传输冠层阻抗 ( $sm^{-1}$ ),  $\Delta$  为饱和水汽压对温度的斜率 ( $Pa^{\circ}C^{-1}$ ).

本文计算空气动力学阻抗、土壤热通量和饱和水汽压对温度的斜率采用文献[7]中介绍的估算公式.净辐射取总辐射的0.75倍<sup>[5]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 CWSI 变化的特征

2.1.1 CWSI 变化趋势 图1为A田冬小麦CWSI逐日变化折线图.可以看出,5月8日灌抽穗水后CWSI开始下降,4天以后于13日前后达到极小值,约为0.19;13日至23日期间随着土壤水分的消耗CWSI呈持续增大的趋势,从0.19增至0.70;5月24日浇灌浆水后又开始减小,4天以后于28日前后达到极小值,约为0.2.

图2为B试验田4个处理5月份逐日CWSI变化折线图.同一时刻4个处理CWSI的数值间的比较表明,较干旱处理的CWSI值依次大于较湿润处理的CWSI值,即  $B1 < B2 < B3 < B4$ . B1、B2、B3和B4处理观测期间的平均CWSI值分别为0.33、0.33、0.46和0.53, B3和B4处理明显高于B1和B2处理.虽然B3和B4两个处理5月5日均没灌抽穗

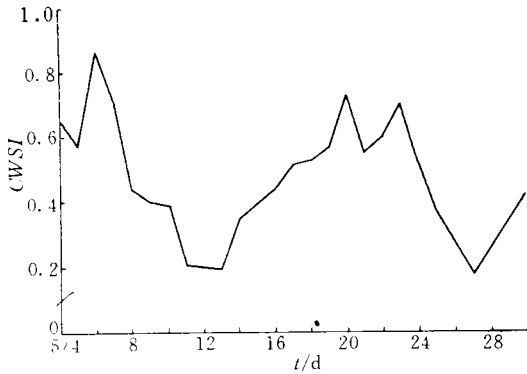


图1 A小麦田作物水分胁迫指数(CWSI)5月份逐日变化

Fig. 1 Crop water stress index as a function of date for wheat field A in May

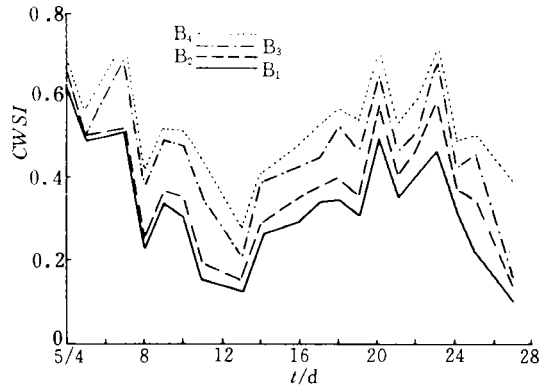


图2 B小麦田4个水分处理(B1~B4)作物水分胁迫指数(CWSI)5月份逐日变化

Fig. 2 As in Fig. 1, but for wheat field B ( $B_1 \sim B_4$ )

水,但B3处理于4月19日灌了拔节水,而B4处理没灌。从图中可以看出,5月份B3处理的CWSI值始终低于B4处理,即说明B3处理小麦水分胁迫程度要比B4轻。把B1处理和B2处理比较,B1处理拔节水和抽穗水灌量分别为60 mm和80 mm,而B2处理拔节水没灌,抽穗水灌量为50 mm。图中B1处理CWSI值明显低于B2处理。这些都证明CWSI可以反映出在相同的天气条件下,干旱处理的冬小麦田发生水分胁迫的程度高于湿润处理。此外,B麦田CWSI的逐日变化与A田表现类似的规律。该田B1和B2处理5月5日浇抽穗水后CWSI开始减小,于12日前后达到极小值。13日至24日期间随着土壤水分消耗CWSI数值呈持续增大的趋势。虽然B3和B4处理没灌抽穗水,但是,由于5月5日至7日和11日至13日为连阴雨天气,6日和12日下了小雨,致使这两个处理的CWSI值在此期间也有所减小。但是其余时间都保持较大的数值(在0.4以上)。

我们注意到麦田灌水以后CWSI并不是马上达到极小值,而是需要约4~6天达到极小值。这表明了土壤水分入渗和作物吸收土壤水分减轻水分胁迫的生理调整需要一定的时间。Jackson<sup>[5]</sup>也发现相同的现象。

2.1.2 CWSI的波动性 由图1和图2也可以看出,在麦田逐日CWSI逐渐增加的趋势上叠加着小的波动。少数波动幅度还比较大。CWSI的这种波动性在某种程度上反映了在土壤水分含量相近条件下(如相邻日),由于大气蒸发势不同导致的作物发生水分胁迫程度的不同。但是也不能完全排除CWSI不真实反映作物水分胁迫程度的可能性。因为观测时天气不稳定(如云量变化)可造成观测误差。此外,CWSI表达式也存在着不能准确描述某些环境因素(如风速)效应的可能性。从图1和图2还看出,5月6~13日和5月19~24日期间CWSI数值的波动较大,实际上这两个时段正是两次不稳定的天气过程出现的时间。这段时间的CWSI数值就不能准确的反映因土壤干旱造成作物的水分胁迫程度。

因此,冠层温度观测最好选择气象条件比较稳定(晴或者是多云)的天气连续几日进行,要避免明显的阴雨和大风降温天气。

## 2.2 CWSI与叶水势的相关性

植株水势是近几十年来被广泛采用的基本的作物水分状况指示指标. Millar and Denmend<sup>[8]</sup> 和 Ehrler<sup>[9]</sup> 的研究表明叶水势达到  $-1.9 \sim -2.0$  MPa 时, 麦田冠层温度接近空气温度, 如果此时土壤有效水分含量继续降低, 作物蒸腾速率明显减小, 随着叶水势降低冠气温差迅速增加. 即叶水势等于  $-1.9 \sim -2.0$  MPa 是小麦发生严重水分胁迫的关键性指标.

图 3 为本实验 *CWSI* 与叶水势的相关点聚图. 可以看出, *CWSI* 与叶水势之间呈明显的负相关关系. 用简单线性模型近似表达这一关系, 表达式为:

$$CWSI = 0.03 - 0.19 \times \Phi$$

式中 *CWSI* 为作物水分胁迫指数,  $\Phi$  为叶水势; 量纲为 MPa. 此模型的样本数为 69, 相关系数为  $-0.60$ , 相关达到极显著水平. 当叶水势为  $-2.0$  MPa 时 *CWSI* 取  $0.4$ ; 并且从图 3 点聚图也可以看出, 当 *CWSI* 取  $0.4$  时叶水势值绝大部分高于  $-1.9 \sim -2.0$  MPa, 当 *CWSI* 大于  $0.4$  时叶水势值大部分低于  $-1.9 \sim -2.0$  MPa. 因此推测  $CWSI = 0.4$ ,

即作物实际蒸散与可能蒸散的比率为  $60\%$ , 是指示麦田发生严重水分胁迫的关键性指标. 从图 2 可以看出, 5 月 5 日灌抽穗水的 *B1* 和 *B2* 两个处理的 *CWSI* 数值基本上维持在  $0.4$  以下, 而没灌抽穗水的 *B3* 和 *B4* 处理 *CWSI* 基本上维持在  $0.4$  以上. 即 *B3* 和 *B4* 处理麦田经历较严重的水分胁迫.

### 3 小 结

同一时刻较干旱处理麦田 *CWSI* 数值大于较湿润处理麦田; 随着土壤水分消耗, 各处理 *CWSI* 呈逐渐增加的趋势. 这表明不同水分处理麦田 *CWSI* 的差异以及 *CWSI* 逐日变化趋势能较好的反映因土壤供水能力不同导致的作物水分胁迫程度的不同. *CWSI* 的波动性在一定程度上说明了在土壤供水能力相近条件下, 因大气蒸发势不同导致的作物水分胁迫程度的不同. 但是, 由于天气条件的不稳定会造成 *CWSI* 不能真实反映作物水分胁迫程度, 因此应该选择气象条件较稳定的天气进行观测.

麦田灌溉以后, *CWSI* 一般要  $4 \sim 6$  天以后达到极小值, 这表明了灌溉后土壤水分的人渗和作物解除水分胁迫所需要的时间.

关于 *CWSI* 用于指导灌溉决策的指标仍有待进一步研究. 这需要在不同的土壤和气候条件下进行大量细致的试验研究, 也需要考察生物本身的效应, 如不同作物品种以及同一品种的不同生育阶段对环境的适应性的不同. 本次实验研究表明冬小麦 *CWSI* 与叶水势之间呈明显的负相关关系;  $CWSI = 0.4$ , 相当于作物实际蒸散与可能蒸散的比率大约

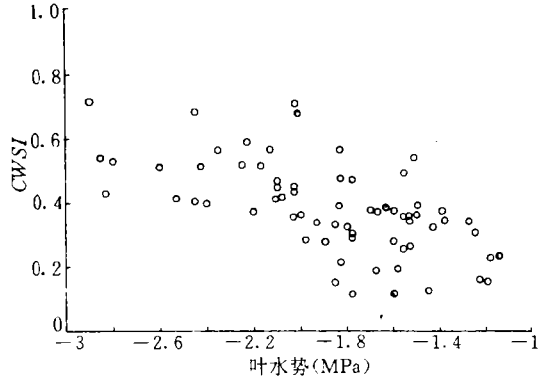


图 3 冬小麦作物水分胁迫指数 (*CWSI*) 与叶水势的关系

Fig. 3 Relationship between crop water stress index and the leaf water potential of wheat

在 60%,可能是指示冬小麦发生严重水分胁迫的一个关键性指标.

## 参 考 文 献

- 1 Idso S B, Jackson R D and Reginato R J. Remote sensing of crop yields. *Science*, 1977, **196**: 19~25.
- 2 Jackson R D, Reginato R J and Idso S B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.*, 1977, **13**: 651~656.
- 3 Idso S B, Jackson R D, Pinter P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 1981, **24**: 45~55.
- 4 Idso S B. Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress, *Agric. Meteorol.*, 1982, **27**: 50~70.
- 5 Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, 1981, **17**(4): 1133~1138.
- 6 王宏, 于沪宁和邓根云等. 小麦不同生育期水分胁迫对产量的影响及干旱诊断方法初探. 华北农学报, 1989, **4**(4): 1~4.
- 7 李付琴, 田国良. 植被条件下遥感监测土壤水分的方法探讨——田间实验部分. 遥感研究动态, 北京: 科学出版社, 1990, 151~159.
- 8 Millar B D and Denmead O T. Water relations of wheat leaves in the field. *Agron. J.*, 1976, **68**: 303~307.
- 9 Ehrler W L, Idso S B, Jackson R D, et al. Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agron. J.*, 1978, **70**: 251~256.

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF WINTER WHEAT WATER STRESS INDEX BASED ON THE CANOPY TEMPERATURE

Liu Xuezhu Zhang Liangen

(Beijing Agricultural University, Beijing 100094)

Zhou Shouhua

(Jingzhou Agrometeorological Experimental Station of Hubei Province, Jingzhou 434100)

### Abstract

The crop water stress index (*CWSI*) based on the daily canopy temperature at 14:00, has been calculated on the basis of winter wheat field experiment. The results indicate that the *CWSI* with drying process is higher than that with wet process at the same time; after 4~6 days of irrigation, *CWSI* drops to a minimum, it is a period of plant recovering from a stressed condition. And, the steady increase trend of *CWSI* between two times of irrigation shows that crop water stress increases with time in this period. The above inclusions show that the plant water stress is due to the lack of water. There is obvious negative correlation between *CWSI* and leaf water potential. When *CWSI* equals 0.4, it could be a critical index in indicating winter wheat water stress.

**Key words:** Wheat; Canopy temperature; Crop water stress.