

# 作物干旱指数 (CWSI) 和土壤 干旱指数 (SWSI)

李韵珠 陆锦文 吕梅

(北京农业大学, 100094)

史美胡 牛德贵 赵秀英

(邯郸地区气象局)

## 摘 要

本文根据邯郸地区的大范围观测资料,对小麦的作物干旱指数 (CWSI) 和裸地的土壤干旱指数 (SWSI) 及其与土壤水分的关系进行了研究,并分析了 CWSI 和 SWSI 的影响因素和在旱情监测中的实用性。

**关键词** 作物干旱指数 (CWSI), 土壤干旱指数 (SWSI)

作物旱情和土壤干旱状况是农业生产和研究领域所关注的重要问题。由于土壤和植物水分状况测量的繁重和费时,人们试图寻求较为简便的方法。用表面温度状况来衡量植物和土壤水分亏缺,便是方法中的一种。

植物叶片温度和水分状况的关系早已引起了科学家的重视<sup>[1]</sup>。植物蒸腾时,叶温降低。当水分亏缺,蒸腾减小,则导致叶温增高。60年代以来,红外辐射温度计的发展 (Monteith 和 Szeice, 1962; Tanner, 1983),使测定植物冠层温度成为可能,避免了单叶温度测定的田间代表性不足和变异等问题。

Jackson 等<sup>[8-10]</sup>根据热量平衡原理提出了作物水分亏缺指数 (CWSI) 的概念 (以下简称作物干旱指数),并进行了研究<sup>[7]</sup>。我国自 80 年代开始应用红外测温仪进行了作物旱情研究<sup>[1,2,4,5]</sup>,并利用 NOAA 数字图象监测和估算麦田蒸散状况。唐登银<sup>[6]</sup>根据热量平衡原理,提出了类似于 (CWSI) 的土壤干旱指数 (SWSI) 的概念,并用于地理干湿分异的研究。在以上研究基础上,李韵珠等<sup>[9]</sup>针对简化、易行的目的,研究了作物和土壤旱情的简化温差模型及其在监测旱情方面的应用。

本文根据 CWSI 和 SWSI 的原理,应用 1990—1991 年在邯郸地区 8 个点的大范围监测资料,进行了 CWSI 和 SWSI 的计算和与土壤水分关系的研究。目的是探讨 CWSI 和 SWSI 应用的条件和大面积旱情监测中的实用性。

## 一、原 理

作物干旱指数 (CWSI) 是根据热量平衡原理导出的,其表达式如下:

$$CWSI = 1 - \frac{ET}{ET_p} \quad (1)$$

式中  $ET$  为蒸散,  $ET_p$  为潜在蒸散。

根据 Penman-Monteith 的蒸散公式,

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (e_s^* - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (2)$$

其中  $\lambda E$  为向大气的潜热通量 ( $W/m^2$ ),  $\lambda$  为汽化热,  $R_n$  为净辐射 ( $W/m^2$ ),  $\rho$  为空气密度 ( $kg/m^3$ ),  $C_p$  为空气比热 ( $J/kg \cdot ^\circ C$ ),  $e_s^*$  为空气温度 ( $T_s$ ) 下的饱和水汽压 ( $P_s$ ),  $e_a$  为空气水汽压 ( $P_a$ ),  $r_a$  为空气动力学阻力 ( $s/m$ ),  $\Delta$  为  $(e_s^* - e_a^*) / (T_c - T_s)$  的斜率 ( $P_s / ^\circ C$ ),  $e_a^*$  为冠层温度 ( $T_c$ ) 下的饱和水汽压 ( $P_s$ ),  $\gamma$  为干湿表常数 ( $P_s / ^\circ C$ ),  $r_c$  为冠层对水汽传输的阻抗 ( $s/m$ )。

在潜在蒸散情况下,  $r_c = r_{C_p}$ ,  $r_{C_p}$  为潜在蒸散时的冠层阻抗 ( $s/m$ ), 则

$$\lambda E_p = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (e_s^* - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_{C_p} / r_a)} \quad (3)$$

$$\frac{ET}{ET_p} = \frac{\Delta + \gamma^*}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (4)$$

式中  $\gamma^* = \gamma (1 + r_{C_p} / r_a)$ , 将式(4)代入式(1), 则得:

$$CWSI = \frac{\gamma (1 + r_c / r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (5)$$

式中  $r_c / r_a$  可由热量平衡方程导出<sup>[9]</sup>:

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{\gamma r_a R_n / (\rho C_p) - (T_c - T_s) (\Delta + \gamma) - (e_s^* - e_a)}{\gamma [(T_c - T_s) - r_a R_n / (\rho C_p)]} \quad (6)$$

土壤干旱指数 (SWSI) 的表达式为:

$$SWSI = 1 - \frac{E}{E_p} \quad (7)$$

式中  $E$  为实际蒸发,  $E_p$  为潜在蒸发。与 CWSI 的原理相同,

$$SWSI = \frac{\gamma (1 + r_s / r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (8)$$

式中  $r_s$  为表土对水汽传输的阻抗 ( $s/m$ )。

$$\frac{r_s}{r_a} = \frac{\gamma r_s R_n / (\rho C_p) - (T_s - T_a) (\Delta + \gamma) - (e_s^* - e_a)}{\gamma [(T_s - T_a) - r_s R_n / (\rho C_p)]} \quad (9)$$

式中  $T_s$  为土壤表面温度 ( $^\circ C$ )。

根据式(5)–(8)可知, 由  $R_n$ ,  $T_c - T_s$  或  $T_s - T_a$ ,  $r_a$  和  $e_s^* - e_a$  等因子, 即可求得 CWSI 和 SWSI。从湿到干, CWSI 和 SWSI 的范围应由 0 到 1。

## 二、研究条件与方法

以河北省邯郸地区(除山区外)为研究区。选择武安、肥乡、曲周和大名四个县为基点, 共 8 个观测

区。其中小麦 6 个区,裸地 5 个区。土壤质地以壤土为主,有部分粘土和砂土。

### (一) 观测内容和方法

冠层温度 ( $T_c$ ) 由冠层上方 1m 处向下测定;空气温度 ( $T_a$ ),离地面 1.5m 高,探头与地面平行,避免太阳直接照射探头;裸土土表温度 ( $T_s$ ),离地面 1m 高处向下测定。并观察作物生长阶段与高度 ( $h$ );作物覆盖度 ( $c$ ) 估测;土壤含水量分 6 层取样,0—5,5—10,10—20,20—30,30—40,40—50cm,用烘干法测定。同时测定田间持水量;记录天气状况和灌溉状况。 $T_c$ 、 $T_s$  均用 BAU-1 型红外测温仪测定。其滤波窗口波长近似为 6.0—15.5 $\mu\text{m}$ ,测量范围为 -10—50 $^{\circ}\text{C}$ ,分辨率 0.1 $^{\circ}\text{C}$ ,测量精度为  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。测定时,每个测点为 9 次重复的平均值。气温测定应用 BAU-1 红外测温仪的温度传感装置。

观测时间为 1990 年至 1991 年的小麦主要生育阶段,裸地土表温度观测在 4、5 月和 10 月。测定时间为午后 14 时左右,即 13:30—14:30 之间。要求天气晴朗,云量小,风速不宜过大。

### (二) 参数确定

净辐射  $R_n$  采用离邯郸较近的河南封丘的经验式<sup>[1]</sup>计算:

$$R_n = -10.99 + 0.7438R_s \quad (10)$$

$$R_s = R_a(0.1144 + 0.5683n/N) \quad (11)$$

式中  $R_s$  为日总辐射量,  $R_a$  为大气层顶部理论太阳辐射;  $n$  为日照时数,由气象站提供;  $N$  为最大可能日照时数。

空气动力学阻抗  $r_a$ :

$$r_a = r_{ac} + r_{bh} \quad (12)$$

式中  $r_{ac}$  为经过稳定度修正的空气动力学阻抗<sup>[7]</sup>,  $r_{bh}$  为热传输对应于动量传输的剩余阻力<sup>[11]</sup>。

$$r_{ac} = r'_a \left[ 1 - \frac{n(z-d)g(T_c - T_a)}{T_a u^2} \right] \quad (13)$$

$$r'_a = \frac{\left( \ln \frac{z-d}{z_0} \right)^2}{k^2 u} \quad (14)$$

$$r_{bh} = \frac{4}{u_*^3}, \quad u \text{ 为摩擦风速} \quad (15)$$

$$u_* = \frac{k_u}{\ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)} \quad (16)$$

式中  $z$  为参照高度,用 2m;  $d$  为零平面位移,  $g$  为重力加速度,9.8m/s<sup>2</sup>;  $z_0$  为粗糙度。根据前人研究经验,对小麦,  $d = 0.63h$ ,  $z_0 = 0.13h$ ,  $h$  为作物高度,  $m_a$ 、 $T_a$  为  $\frac{1}{2}(T_c + T_s)$ ,  $k$ ;  $u$  为 2m 处风速,  $u_2 = 0.78u_{10}$ ,  $u_{10}$  为 10m 高处风速;  $k$  为卡码常数,取值为 0.4;  $n$  一般取值为 5。

在裸地情况下,参数与上相同,只是将  $T_a$  改为  $T_{s0}$ ,  $T_{s0} = \frac{1}{2}(T_s + T_a)$ ,  $k$ ;  $r'_a = \frac{\left( \ln \frac{z}{z_0} \right)^2}{k^2 \cdot u}$ ;

$$r_a = r_{ac} = r'_a \left[ 1 - \frac{nzg(T_s - T_a)}{T_{s0} u^2} \right]; \quad z_0 \text{ 取 } 0.002\text{m}.$$

在计算中,土壤含水量用相对含水量 (RW) 表示,即实际含水量除以田间持水量,因此计算时未区分质地。

## 三、结 果

### (一) CWSI 和 SWSI 的计算值

从两年观测资料中去除天气条件不符合观测要求和土壤水份过低( $RW < 0.3$ ) 或过湿 ( $RW > 1.0$ ) 的观测值后, 小麦共有 154 组数据, 裸土保留的范围较宽, 有 204 组。根据式(5)、(6)、(8)和(9)计算了 CWSI 和 SWSI, 结果如表 1。

表 1 CWSI 和 SWSI 的计算值范围

Table 1 The ranges for the calculated values of CWSI and SWSI

总样本数 Total samples			0—1		<0			>1		
数 目 Number	(% )		数目 Number	(%)	数目 Number	(%)	$\overline{RW}^*$	数目 Number	(%)	$\overline{RW}^*$
CWSI	154	100	120	77.9	25	16.2	0.82	9	5.8	0.39
SWSI	204	100	75	36.8	22	10.8	—	107	52.4	0.50

\*  $\overline{RW}$  为 0—5cm 土层的平均相对含水量。

根据表 1 结果可以看到, CWSI 和 SWSI 值处于 0—1 之间的各为 77.9% 和 36.8%。大于 1 者, 与之相应的 0—5cm 相对含量的平均值  $\overline{RW}$  各为 0.39 和 0.50。CWSI 小于 0 者, 其相应的  $\overline{RW}$  (0—5cm) 为 0.82。其原因将在下一节讨论。

## (二) CWSI 和 SWSI 与土壤水分的关系

根据上述计算结果, 将不同厚度土层的土壤相对含水量与处于 0—1 范围的 CWSI 和 SWSI 进行回归分析, 结果列于表 2。

表 2 不同层厚的土壤相对含水量与 CWSI 和 SWSI 的回归分析

Table 2 The regression analysis for CWSI, SWSI and the relative water content of soil with layers different in thickness

y	x	a	b	r	$S_y$	n
RW(0—5)	CWSI	0.872	-0.497	-0.614	0.164	120
RW(0—10)	CWSI	0.877	-0.449	-0.595	0.154	120
RW(0—20)	CWSI	0.881	-0.382	-0.550	0.149	120
RW(0—50)	CWSI	0.867	-0.270	-0.426	0.147	120
RW(0—5)	SWSI	1.03	-0.512	-0.704	0.139	75
RW(0—10)	SWSI	1.04	-0.449	-0.691	0.127	75
RW(0—20)	SWSI	1.01	-0.349	-0.640	0.113	75
RW(0—50)	SWSI	1.00	-0.293	-0.539	0.124	75

以上统计结果表明, RW 与 CWSI 和 SWSI 的关系都达到了极显著相关的水平。表 2 资料也说明, 随着层次加厚, 斜率 b 的绝对值和相关系数均减小的规律。

## 四、讨 论

### (一) 影响 CWSI 和 SWSI 计算值的因素分析

根据表 1 结果, CWSI 和 SWSI 各有 22.1% 和 63.2% 的计算值不在 0—1 范围内,

其原因如下:

根据式(5)和(8)可知,影响 CWSI 和 SWSI 的因子主要是  $r_c/r_a$  和  $r_s/r_a$ 。根据本文资料, CWSI 和 SWSI 与  $r_c/r_a$  和  $r_s/r_a$  的关系如图 1。

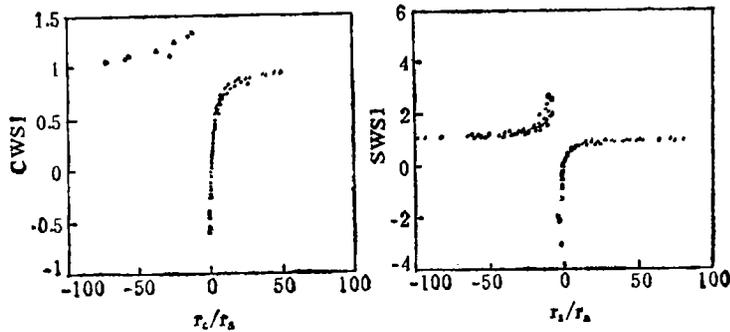


图1 CWSI 和 SWSI 和  $r_c/r_a$ 、 $r_s/r_a$  的关系图

Fig. 1 The relationships between CWSI and SWSI on the one hand and  $r_c/r_a$  and  $r_s/r_a$  on the other

由图 1 可见,凡  $r_c/r_a$  或  $r_s/r_a$  为负值者,相应的 CWSI 或 SWSI 成负值或大于 1。那么导致  $r_c/r_a$  或  $r_s/r_a$  为负值的因素又是什么呢? 从式(6)和式(9)可知,影响  $r_c/r_a$  或  $r_s/r_a$  的因素有  $R_a, r_a, T_c - T_a$  (或  $T_s - T_a$ ) 和  $e_a^* - e_a$ 。根据文献(6)的分析,  $T_c - T_a$  和  $r_c$  的关系在诸因素中最为密切。同时,根据资料,  $T_c - T_a$  (或  $T_s - T_a$ ) 与  $r_c/r_a$  (或  $r_s/r_a$ ) 成下列关系(图 2)。

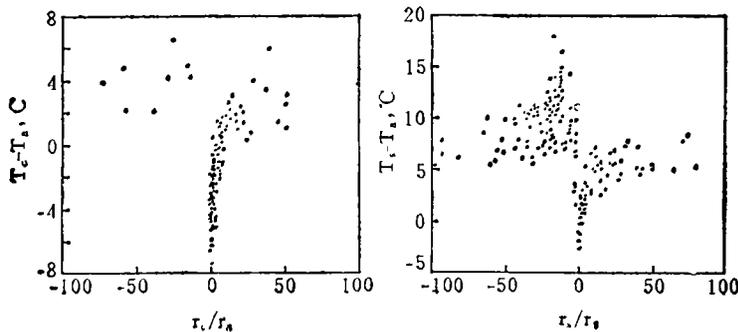


图2  $T_c - T_a, T_s - T_a$  和  $r_c/r_a$  和  $r_s/r_a$  的关系图

Fig. 2 The relationships between  $T_c - T_a$  and  $T_s - T_a$  on the one hand and  $r_c/r_a$  and  $r_s/r_a$  on the other

图 2 所示图形与图 1 有相似之处。温差高于或低于一定数值时,  $r_c/r_a$  和  $r_s/r_a$  相应为负值。根据 CWSI、SWSI 和  $T_c - T_a$ 、 $T_s - T_a$  的各自回归方程,

$$CWSI = 0.581 + 0.087(T_c - T_a), \gamma = 0.838, n = 120$$

$$SWSI = 0.330 + 0.084(T_s - T_a), \gamma = 0.844, n = 75$$

说明当 CWSI 和 SWSI 为 0 和 1 时,  $T_c - T_a$  为  $-6.7^\circ\text{C}$  和  $4.8^\circ\text{C}$ ,  $T_s - T_a$  为  $-3.9^\circ\text{C}$

和  $8.0^{\circ}\text{C}$ 。如温差超过此两端温度限值时, 干旱指数将为  $> 1$  或  $< 0$ 。

其机理应是, 当  $\text{CWSI} < 0$  时, 水分已充分满足作物要求, 冠层温度已不再反映作物水分的变化, 而主要受其他气象因素的影响。当  $\text{CWSI} > 1$  时, 水分亏缺严重, 与上相同,  $T_c$  也已不再反映水分变化, 而强烈地受  $R_a$  和  $r_a$  的影响<sup>[5]</sup>。

$\text{SWSI}$  为负值或大于 1 的原因与  $\text{CWSI}$  相同, 但更有其特殊性。从 22 个负值来分析, 其中绝大部分为风速过小 ( $u_2$  接近于 0 或 0.8), 致使  $r_a$  为负值(式(13)), 或风速较小 ( $u_2 = 1.6$ ), 再加上  $T_c - T_a$  偏高, 也会导致  $r_a$  为负值。 $\text{CWSI}$  也有类似情况。 $\text{SWSI} > 1$  者达 52.4%, 主要是  $T_c - T_a$  过大。为什么  $\text{CWSI}$  计算值在 0—1 范围以外的比例不高呢? 作者认为主要原因是,  $\text{CWSI}$  是从作物冠层温度与气温的差值来反映水分亏缺状况的。虽然测定的表面温度是冠层温度, 但作物主要根系所在土层至少涉及 20cm 厚。同时, 下部土层水分还可以补给上层。因此,  $\text{CWSI}$  的变化与较厚土层的水分状况有关, 但有滞后性。而  $\text{SWSI}$  是由土表温度反映水分状况的, 实际直接反映温度的表层极薄。当土壤表层成为风干土后,  $T_c - T_a$  的变化只受气候条件的影响, 已不再反映表土水分状况的变化。而土壤水分含量低时, 土壤的热容量小, 温度极易变化。所以  $\text{SWSI}$  所能反映的土壤水分层次较薄, 所以表示的水分范围也较窄。本文测定的最小土层厚度为 0—5cm, 已较厚。但表土湿度与其下层的水分在较稳定的条件下是有密切关系的。因此,  $\text{SWSI}$  与较厚土层的水分仍有密切的相关关系, 但不是直接反映温度的层次。

## (二) CWSI 和 SWSI 在旱情监测中的实用性分析

1.  $\text{CWSI}$  和  $\text{SWSI}$  所能反映的水分范围  $\text{CWSI}$  和  $\text{SWSI}$  在 0—1 范围内可以反映作物和土壤水亏缺状况。根据表 2 的回归方程与  $\text{CWSI}$ 、0 和 1 相对应的土壤相对含水量列于表 3。

表 3 相应于  $\text{CWSI}$  和  $\text{SWSI}$  0、1 值的相对含水量

Table 3 The relative soil water contents for the 0 and 1 values of  $\text{CWSI}$  and  $\text{SWSI}$

$\text{CWSI}$	0	1	$\text{SWSI}$	0	1
$\text{RW}(0-5)$	0.87	0.38	$\text{RW}(0-5)$	1.03	0.52
$\text{RW}(0-20)$	0.88	0.50	$\text{RW}(0-20)$	1.01	0.66

从表 3 可知, 对小麦来说,  $\text{RW}$  达到 0.87—0.88 就已满足作物对水的需要。当然  $\text{RW}$  为 0.88—1 的土壤水对小麦仍然有效, 但已不能由冠层温度来反映了。 $\text{SWSI}$  的 0 值, 则正好是田间持水量。

2.  $\text{CWSI}$  和灌溉指标 Jackson(1982) 提出,  $\text{CWSI} > 0.3$  时, 对作物开始造成危害。 $> 0.5$  时, 生长将停止。因此, 灌溉应在 0.3—0.5 之间进行。本文根据 Jackson 的指标和相应的相对含水量值, 对小麦旱情等级给出以下参考值(表 4)。

3.  $\text{CWSI}$  和  $\text{SWSI}$  在旱情监测中的实用性分析  $\text{CWSI}$  和  $\text{SWSI}$  具有严格的理论基础, 较为成熟, 能应用于不同气候区。应用方面的难度是所需气象资料较多, 且不易立即获得。因此, 在大面积旱情监测中应用有一定困难。与旱情简化温差模型,  $\text{RW} = a + b(T_c - T_a)$  相比, 两者所用观测资料相同, 精度相似。而简化温差模型在应用上具

有快速、简便的特点。其缺点是应用时具有地区性,必须作出本地区(气候条件相似地区)的参数。对 SWSI 的研究,尚属初步,需要进一步的研究。

表 4 旱情等级指标  
Table 4 The indices of drought grades

等级 Grade	旱 Drought	偏 旱 Moderate to drought	适 宜 Suitable
CWSI	1—0.5	0.5—0.3	0.3—0
RW(0—5)	0.38—0.62	0.62—0.72	0.72—0.87
RW(0—10)	0.43—0.65	0.65—0.74	0.74—0.88
RW(0—20)	0.50—0.69	0.69—0.77	0.77—0.88
RW(0—50)	0.60—0.73	0.73—0.79	0.79—0.87
$T_c - T_a, ^\circ\text{C}$	4.5—(-0.8)	(-0.8)—(-3.0)	(-3.0)—(-6.2)

## 五、结 论

本文根据邯郸地区大范围的观测资料,计算了小麦的 CWSI 和裸地的 SWSI。导致 CWSI 和 SWSI 计算超过 0—1 范围的原因,主要是超出了 CWSI 和 SWSI 所能反映的土壤水范围,致使  $T_c - T_a$  和  $T_s - T_a$  过高或过低。

土壤相对含水量与 CWSI 和 SWSI 有密切的相关关系。由此可得出相应的旱情等级和灌溉指标。

在大面积旱情监测中, CWSI 和 SWSI 所适用的地区性宽,但所需用的资料较多,不易及时获得旱情信息。

## 参 考 文 献

1. 田国良等, 1990: 用 NOAA-AVHRR 数字图象和地面气象站资料估算麦田的蒸散和土壤水分。《遥感动态研究》, 161—176 页, 科学出版社。
2. 刘国祥, 1987: 作物植被覆盖地土壤湿度的红外遥感监测。京津冀统一网络冬小麦遥感综合估产协作组编: 《京津冀冬小麦遥感估产试验研究论文集》, 138—145 页, 北京科学技术出版社。
3. 陈镜明, 1988: 现代遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进。科学通报, 第 6 期, 454—457 页。
4. 李付琴等, 1990: 植被条件下遥感监测土壤水分的方法探讨——田间实验部分。遥感动态研究, 151—160 页, 科学出版社。
5. 李韵珠, 陆锦文等, 1992: 作物和土壤旱情的温差模型。气象, 第 18 卷 5 期, 9—15 页。
6. 唐登银, 1987: 一种以能量平衡为基础的干旱指数。地理研究, 第 6 卷 2 期, 21—30 页。
7. Hatfield, J. L., Perrier, A., and Jackson, R.D., 1983: Estimation of evapotranspiration at time-of-day using remotely sensed surface temperatures. Agri. Water Manag. 7:341—350.
8. Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.L., and Pinter, P. J., Tr., 1981: Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resour. Res. 17: 1133—1138.

## CROP WATER STRESS INDEX (CWSI) AND SOIL WATER STRESS INDEX (SWSI)

Li Yunzhu, Lu Jinwen, Lü Mei  
(*Beijing Agricultural University, 100094*)

Shi Meihu, Niu Degui, Zhao Xiuying  
(*Handan Bureau of Meteorology*)

### Summary

Crop water stress index (CWSI) for wheat and soil water stress index (SWSI) for bare soil were determined based on the data observed for canopy temperature of wheat, surface temperature of bare soil, main meteorological factors and soil water content during 1990 and 1991 in Handan district, Hebei Province. The main cause influencing the values of CWSI and SWSI out of 0—1 range was that the soil water content was out of the range which could be reflected by SWSI and CWSI and thus causing the  $T_c - T_a$  and  $T_s - T_a$  too high or too low. The correlations among CWSI, SWSI and relative soil water content were analyzed and drought grades indices of the soil water with various thickness layers were suggested. CWSI and SWSI could be applied in various regions for drought monitoring, but the timely obtaining of the information of drought would be influenced because more data and parameters should be obtained.

**Key words** Crop water stress index (CWSI), Soil water stress index (SWSI)