排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 1 月 Jan. 2017 | 第 35 卷 第 1 期 Vol. 35 No. 1

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0249

茶树水分胁迫建模及试验

孙道宗[1,2]，王卫星[1,2]，唐劲驰[3]，姜晟[2]

（1.华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室，广东 广州 510642；2.华南农业大学电子工程学院，广东 广州 510642；3.广东省农业科学院茶叶研究所，广东 广州 510640）



孙道宗

摘要：通过观测冬季和春季塑料大棚中不同灌溉条件下茶树的冠层温度、空气温湿度、土壤热流密度、土壤湿度、太阳净辐射照度及风速等因素，利用 Idso 经验模式确定了冠气温差的下限方程.通过观察不同水分处理条件下茶树作物水分胁迫指数的日变化和季节变化，得出了反映茶树水分状况的关系曲线.研究分析了 Jackson 的理论模式与 Idso 的经验模式反映茶树水分胁迫的差异性，针对华南地区经常出现的冬旱及春旱，首先通过人工田间数据采集的方法，分 9—12 月和 1—3 月 2 个阶段测量茶树作物水分胁迫指数中所涉及的各个参数，建立了茶树冬季和春季的作物水分胁迫指数模型.研究结果发现，茶树冬季和春季作物水分胁迫指数模型相差不大，冬季经验模型中，系数 A 和 B 的值分别为 1.265 和 −0.220，而春季经验模型中，系数 A 和 B 的值分别是 1.230 和 −0.214，这可能与茶树属于多年生植物，冬季和春季叶面积指数等变化不大相关.

关键词：茶树；冠层温度；作物水分胁迫；经验模型；理论模型

中图分类号：S12；S275.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2017)01-0065-06

孙道宗，王卫星，唐劲驰，等. 茶树水分胁迫建模及试验[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(1)：65-70，79.

SUN Daozong，WANG Weixing，TANG Jinchi，et al. Modeling and testing of tea tree water stress[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2017，35(1)：65-70，79.(in Chinese)

Modeling and testing of tea tree water stress

SUN Daozong[1,2]，*WANG Weixing*[1,2]，*TANG Jinchi*[3]，*JIANG Sheng*[2]

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment(SCAU)，Ministry of Education，Guangzhou，Guangdong 510642，China；2. College of Electronic Engineering，South China Agricultural University，Guangzhou，Guangdong 510642，China；3. Tea Research Institute，Guangdong Academy of Agricultural Sciences，Guangzhou，Guangdong 510640，China)

Abstract：The canopy temperature，air temperature and humidity，soil heat flux，soil moisture，net solar radiation，wind speed and other factors are observed when tea trees are growing in a greenhouse under different irrigation conditions in winter and spring，then a lower limit equation of canopy temperature difference is determined by using the Idso empirical model. Finally，the curves for representing tea tree moisture content status are obtained by observing the diurnal and seasonal variation curves of tea crop water stress index (CWSI) under different moisture contents. Additionally，the difference in CWSI between Jackson theoretical model and Idso empirical model are analyzed. Since drought often happens in spring and winter in South China，the field data are collected manually in September－December and January－March next year. The various parameters related to CWSI are extracted，and the

收稿日期：2015-11-16；**网络出版时间**：2017-01-09

网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170109.0845.026.html

基金项目：2014 年广东省科技计划项目(2013B020314014)；国家星火计划项目(2013GA780046)

作者简介：孙道宗(1979—)，男，安徽怀远人，高级实验师，博士(sundaozong@scau.edu.cn)，主要从事农业电气化及自动化研究.

王卫星(1963—)，男，河北宣化人，教授，博士生导师(通信作者，weixing@scau.edu.cn)，主要从事无线传感器网络研究.

water stress index models for winter and spring are developed, respectively. The results reveal that there is no significant difference in tea tree water stress index models between winter and spring. In winter, the coefficients A and B in the model are 1.265 and −0.220, while they are 1.230 and −0.214 in spring. It may be because the tea tree is perennial crop and the leaf area index is similar in spring and winter.

Key words: tea tree; canopy temperature; crop water stress index; experience model; theoretical model

作物冠层温度(canopy temperature)是作物对环境因子例如空气湿度、太阳净辐射、气温、空气流动及水分等进行综合性反映的一个重要指标,现有的研究结果已经表明,通过作物冠层温度判断作物受水分胁迫程度是一种行之有效的方法.目前比较成熟且广泛应用的有 Idso 提出的作物水分胁迫指数(crop water stress index,CWSI)经验模型、Jackson 提出的 CWSI 理论模型和 Moran 提出的水分亏缺指数(water deficit index,WDI)等[1-2].国内外关于 CWSI 的研究工作在小麦、玉米、棉花、油桃树、西瓜等作物蔬菜方面均取得长足的进展,充分说明 CWSI 模型能够真实地反映农作物的缺水状况.茶树较之小麦、玉米等农作物而言更具有明显的树冠,冠层温度更能反映茶树的能量平衡情况.

TANNER 等[3]率先提出了用冠层温度指示植物的水分亏缺.近年来国内外针对小麦、玉米、棉花等农作物进行了作物缺水及精确灌溉研究.IRMAK 等[4]针对地中海半干旱耕作条件进行了夏季玉米的水分胁迫监测,建立了基于 CWSI 的玉米产量模型,得到了根据玉米产量和季度平均 CWSI 值估测玉米产量趋势的方程式,指出 CWSI 模型适宜于对地中海气候条件的玉米进行监测和产量估测.袁国富等[5-6]研究了冬小麦不同发育期的最小冠层阻力,得到冬小麦不同生育阶段的平均最小冠层阻力,显示出抽穗差异;分析了京津冀平原地区旱地农业干旱的区域差异和时间变化规律,可以用于半干旱半湿润地区农业实际旱情的分析.HALIM ORTA 等[7]利用 CWSI 对滴灌条件下的西瓜进行节水灌溉研究,测试了红外冠层温度、气温和饱和水汽压差,观测了西瓜产量和相应的 CWSI,发现 CWSI 的变化趋势与土壤含水量(与灌溉水平有关)一致,灌溉前 CWSI 平均值为 0.41 时获得了最大产量,西瓜产量与 CWSI 有着密切关系.崔晓等[8]、王卫星等[9]探讨并建立了适合于中国华北地区夏玉米水分状况监测的作物水分胁迫指数模型,通过不同的田间试验处理和严密的科学观测,建立了不同生育阶段的经验模型和理论模型.EMEKLI 等[10]研究、评价了应用于地中海流域百慕大草场的 CWSI 模型,探讨了将红外测温仪用于百慕大草场灌溉决策的可行性.监测的参数包括土壤含水量、冠层温度等,CWSI 值利用经验模型;作者认为 CWSI 可以用于确定百慕大草场的灌溉时间选择.相关研究成果充分说明了 CWSI 模型能够反映作物本身的水分胁迫状况,对文中项目构建茶树水分胁迫指数模型可以起到理论和研究方法方面的支撑,具有很好的借鉴作用.

文中通过田间试验,测试英红九号茶树生长过程的环境参数,包括茶树冠层温度、大气温湿度、土壤含水量和光照强度等,构建茶树生长过程不同生长期的 CWSI 经验模型和理论模型,从茶树生理反应方面测定茶树的水分胁迫程度.

1 试验材料和方法

1.1 试验设计

在研究 CWSI 监测茶树水分胁迫的表现上,需通过试验以观察在不同水分条件下 CWSI 的变化特点,因此要求试验时处理茶园不同的水分条件,然后观察不同水分条件下茶树的冠层温度、土壤湿度、土壤热通量等,用于计算和分析 CWSI 的变化特征.

试验在广东省农业科学院茶叶研究所英德试验基地进行,试验基地经度为 113°23′05″E,纬度为 24°18′09″N,海拔为 44 m,位于粤北山区,北近北江,属于典型的第四纪红土发育的红壤.基本理化性状:pH 值为 5.7;土壤有机质、全氮、全磷、全钾的质量分数分别为 0.680%, 0.045%, 0.048%, 1.330%;碱解氮的质量比为 50 mg/kg;速效磷痕迹;速效钾的质量比为 40 mg/kg;质地属轻黏土.试验基地的自然条件基本能代表华南地区的特点,特别对盛产茶叶的粤北、粤东地区有代表性.

试验在试验基地的水分池中进行,供试的茶树品种为英红九号(C. sinensis cv. yinghong No.9),适制红茶,树龄约为 18 a,平均树高为 1.2 m,树冠

平均直径约为 53 cm,叶面积指数为 5.3,每个池高 60 cm,长 150 cm,宽 133 cm,每个池填土量为 1 477 kg,茶树采用双行植,小行距为 40 cm,株距为 30 cm,每个池种植 6 株,种植密度约为 30 000 株/hm^2.

水分池中肥料的管理与普通大田的相似,3 月份每 hm^2 施复合肥 375 kg;5 月份每 hm^2 施尿素 375 kg;7 月份每 hm^2 施尿素 375 kg;9 月每 hm^2 施尿素 375 kg,施有机肥;12 月为冬季管理,每 hm^2 施有机肥 11 250 kg,没有养分胁迫.

试验开始前,采用小区灌水法测定田间持水量为 38.4%.此后,对于试验基地的供试英红九号做了 5 个水分处理,每个处理有 3 个重复,共 15 个水分池.如前所述,由于各水分池中含有大量牛粪、羊粪等有机肥料,使得水分池中的土壤较为松散,测量所得到的土壤水分质量含量比理论土壤水分质量含量小,因而,设计水分池处理见表 1.为了使水分池的土壤湿度不受自然降雨的影响,15 个水分池均位于塑料大棚中.

表 1　各水分池处理情况
Tab.1　Status of every water content

水分池	处理方式	灌溉量
1#,6#,11#	田间持水量的 80% ±5%	根据设定的土壤湿度值自动灌溉
2#,7#,12#	田间持水量的 60% ±5%	
3#,8#,13#	田间持水量的 45% ±5%	
4#,9#,14#	田间持水量的 35% ±5%	
5#,10#,15#	田间持水量的 25% ±5%	

1.2　观测项目

同一个水平的 3 个水分池共用一根滴灌管道灌溉,保证 3 个水分池的土壤湿度相同或相近,1—5 号水分池中,每个池子装有 1 个辽宁锦州阳光公司生产的 TDR-3 型土壤湿度传感器.同样,1—5 号池中,在每个水分池土壤表层下方 5 cm 处,水平埋设 1 个邯郸市丛台锐研智华电子有限公生产的 RY-DRT 型土壤热通量传感器,用以测量不同水分池的土壤热通量.无论灌溉与否,系统每 30 min 记录 1 次土壤湿度和土壤热通量值.

1—5 号池的冠层温度通过 CI-340 便携式光合作用测定仪测得,为了提高测量效率,6—15 号池的冠层温度通过 Fluke ST80 + 红外测温仪测得.

太阳净辐射照度通过辽宁锦州阳光公司的 TBB-1L 型太阳净辐射仪测得.传感器安装在距离地面约 1.5 m 的茶树冠层的正上方,空气温湿度通过浙江托普仪器有限公司生产的 TNHY-11 农业环境检测仪测得.

试验从 2011 年 4 月开始,但因 CWSI 的经验及理论模型适用于空气湿度较小的环境,所以在数据处理时,仅采用 9 月到次年 3 月的数据,这个阶段包含了广东地区常出现的冬旱和春旱 2 个时间段.

2　理论依据

2.1　作物水分胁迫指数的经验模式

CWSI 这一概念首先由 Idso 提出[11],后人在将其与 Jackson 随后提出的模式区别时,将 Idso 模式称为作物水分胁迫指数的经验模式(Empirical mode).这一指标基于一个重要的经验关系,即作物在充分灌水(或潜在蒸发)条件下,冠层表面温度与冠层上方空气温度的差(简称冠气温差与空气的饱和水汽压差)呈线性关系,表示为

$$(T_c - T_a)_{ll} = A + Bp_{vpd}, \tag{1}$$

式中:$(T_c - T_a)_{ll}$为作物在潜在蒸发状态下的冠气温差,是冠气温差的下限,℃;T_c,T_a 分别为冠层的表面温度、上方空气温度,℃;下标 ll 表示下限方程(lower limit equation);A,B 分别为线性回归系数;p_{vpd}为空气的饱和水汽压差(vapor pressure deficit),Pa.这一方程又称为冠气温差的下限方程(non-water-stressed baseline).

因而 Idso 定义 $CWSI$ 为

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{ll}}{(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{ll}}, \tag{2}$$

式中:$CWSI$ 为作物水分胁迫指数;$(T_c - T_a)_{ul}$为作物无蒸腾条件下的冠气温差,是冠气温差的上限,℃,Idso 认为这是一个仅与空气温度有关的值,可以由式(3)计算;下标 ul 表示上限方程(upper limit equation).

$$(T_c - T_a)_{ul} = A + Bp_{vpg}, \tag{3}$$

式中:p_{vpg}为温度为 T_a 时的空气饱和水汽压和温度为 $T_a + A$ 时的空气饱和水汽压之差,Pa;A,B 与式(1)相同,式(3)被称为冠气温差上限方程.

对经验模型的改进,主要是考虑影响冠层温度的其他环境因子,例如风速[12]、净辐射照度[13],将它们与冠气温差上下限进行多元线性回归,从而改善经验模式的应用.这些改进的冠气温差上、下限方程基本形式可以分别表述为下面的形式,即

$$(T_c - T_a)_{ll} = A' + B'p_{vpd} + CR_n, \tag{4}$$

$$(T_c - T_a)_{ul} = A + Bp_{vpd} + (a' + b'v), \tag{5}$$

式中:R_n 为冠层表面净辐射照度,W/m^2;v 为风速,m/s;A,B,C,A',B',a',b'为线性回归系数.

经验模式的优点在于其要求的变量少、简单方便,但它的使用需要比较苛刻的条件,不同气候,不同年份下,都需要对其冠气温差的上下限方程进行重新标定.

2.2 作物水分胁迫指数的理论模式

在 Idso 提出作物水分胁迫指数 CWSI 之后,Jackson 在同一时期对这一指标进行了理论解释[14],Jackson 提出的这一指标随后被称之为作物水分胁迫指数 CWSI 的理论模式(theoretical mode).

作物水分胁迫指数理论模式是基于冠层能量平衡单层模型推导的. 在作物冠层表面,能量平衡方程为

$$R_n = E_{LE} + H + G, \tag{6}$$

式中:E_{LE} 为冠层潜热流密度,W/m^2;H 为感热流密度,W/m^2;G 为土壤热流密度或冠层下方能量的热流密度,W/m^2.

根据能量平衡阻力形式,感热流密度和潜热流密度可分别表示为

$$H = \rho c_p (T_c - T_a)/r_a, \tag{7}$$

$$E_{LE} = \frac{\rho c_p (e_c^* - e_a)}{\gamma (r_a - r_c)}, \tag{8}$$

式中:ρ 为空气密度,kg/m^3;c_p 为空气比定压热容,J/(kg·K);r_a 为空气动力学阻力,s/m;e_c^* 为气温在 T_c 时的饱和水汽压,Pa;e_a 为空气实际水汽压,Pa;γ 为干湿度计常数,Pa/℃;r_c 为冠层水汽扩散阻力,s/m.

这样联立方程(6),(7)和(8)有

$$(T_c - T_a) = \frac{r_a (R_n - G)}{\rho c_p} \frac{\gamma (1 + r_c/r_a)}{\Delta + \gamma (1 + r_c/r_a)} - \frac{p_{vpd}}{\gamma (1 + r_c/r_a)}, \tag{9}$$

式中:Δ 为饱和水汽压随温度变化的斜率,Pa/℃.

根据方程(9),可以推导出冠气温差上下限方程的理论表达式. 对于冠气温差的上限,是指作物无蒸腾作用,气孔完全关闭的情形,此时冠层阻力无限增大,当 $r_c \to \infty$ 时由方程(9)可得冠气温差的上限方程为

$$(T_c - T_a)_{ul} = \frac{r_a (R_n - G)}{\rho c_p}, \tag{10}$$

式中:R_n 为式(6)的能量平衡方程.

当土壤充分供水作物处在潜在蒸发状态下,设潜在蒸发下的冠层阻力为 r_{cp}(s/m),则可以得到冠气温差的下限方程:

$$(T_c - T_a)_{ll} = \frac{r_a (R_a - G)}{\rho c_p} \frac{\gamma (1 + r_{cp}/r_a)}{\Delta + \gamma (1 + r_{cp}/r_a)} - \frac{p_{vpd}}{\gamma (1 + r_{cp}/r_a)}. \tag{11}$$

方程(10)和(11)就是 Jackson 的作物水分胁迫指数的理论模式. 这一指标出现时也定义为如下形式,即

$$CWSI = 1 - \lambda E/\lambda E_p, \tag{12}$$

式中:λE,λE_p 分别为作物实际蒸散和潜在蒸散的热流密度,W/m^2.

这一定义计算的结果与上述温差模型的理论计算结果相同,说明使用冠层温度探测作物缺水的变化实质上是探测作物的蒸腾速率的变化,而蒸腾速率是作物对水分亏缺的一个十分敏感的指标.

3 结果分析

3.1 CWSI 经验模式确定

3.1.1 下限方程的确定

1,6,11 号水分池土壤水分含量始终保持为田间持水量的 80%,此种情况下,近似认为茶树处在潜在蒸发状态下,能够获取最小冠层温度,所以确定下限方程的数据取自其中的 1 号水分池. 根据在 1 号水分池获得的多组冠层表面温度空气饱和水汽压差和净辐射照度的数据,拟合了冠气温差与空气饱和差的关系,试验分为 9—12 月份、1—3 月份 2 个阶段进行,也即分为广东地区常出现的冬旱和春旱 2 个阶段,以分别拟合冠气温差与空气饱和差的关系.

参与拟合方程的太阳净辐射照度等参数均在 1 号水分池附近测得,其中,太阳净辐射照度传感器安装在 1 号水分池茶树冠层上方约 0.3 m(距离地面约 1.5 m)处. 下限方程如下:

$$(T_c - T_a)_{ll} = 1.265 - 0.220 p_{vpd}, \ 9—12 \text{ 月}, \tag{13}$$

$$(T_c - T_a)_{ll} = 1.230 - 0.214 p_{vpd}, \ 1—3 \text{ 月}. \tag{14}$$

3.1.2 茶树 CWSI 方程上限的处理

根据 Idso 的定义,冠气温差的上限方程即作物在极端受旱、作物蒸腾为 0 时的冠气温差可以用公式(3)表示,公式中的 A,B 值与下限方程(5)中的 A,B 值相同,是在建立下限方程时的回归系数.

3.2 经验模式下的茶树 CWSI 日变化特征

使用茶树冬季和春季的 2011 年 11 月 20 日、

2012 年 3 月 4 日的分时 CWSI 值，绘制茶树的 CWSI 经验模式的变化曲线，如图 1 所示.

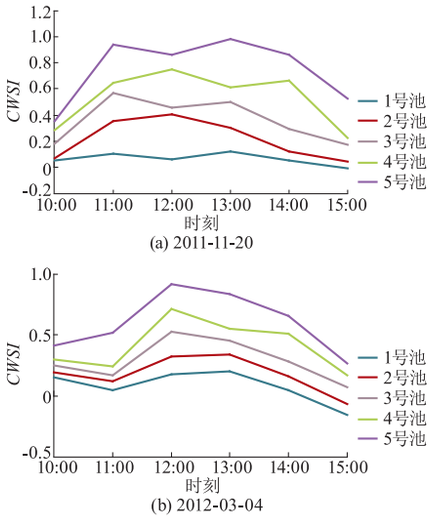


图 1　5 个水分池的 CWSI 状况

Fig. 1　CWSI at five water contents

由图 1 可知，2011 年 11 月 20 日和 2012 年 3 月 4 日 2 天的 CWSI 日变化，均出现了小于 0 的情况，2011 年 11 月 20 日的 CWSI 值还出现了大于 1 的情况. 按照 Idso 的经验模型，CWSI 的值应处于 0 ~ 1 内，这可能与将 CWSI 的冠气温差的下限方程做固定处理并影响了上限方程有关，使得有时会出现比冠气温差更低的冠层温度和比上限方程计算得到的冠气温差更高的冠层温度.

图 1 总体反映了茶树的水分胁迫状况，一天中气温比较高的时段，水分胁迫表现得更加明显；气温降低后，水分胁迫状况有所缓解.

3.3　理论模式下的茶树 CWSI 日变化特征

与经验模式相同，仍然选取 2011 年 11 月 20 日和 2012 年 3 月 4 日的试验数据绘制理论模式的单日变化曲线，如图 2 所示.

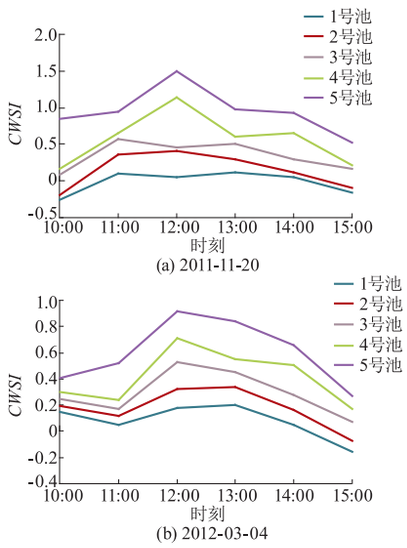


图 2　理论模式下各水分池的单日 CWSI 表现

Fig. 2　Daily CWSI given by theoretical model at various water contents

由图 2 可知，与经验模式基本相同，仍然是时刻 12:00 前后 CWSI 的表现较为明显；之后 CWSI 值逐渐减小，茶树水分胁迫逐渐缓解.

3.4　经验模式与理论模式的阶段比较

分别选取 3 个水分池进行 CWSI 的经验模型和理论模型的比较，通过对图形曲线的具体比较，即可观察 2 个模型在冬季、春季的表现情况，如图 3 所示.

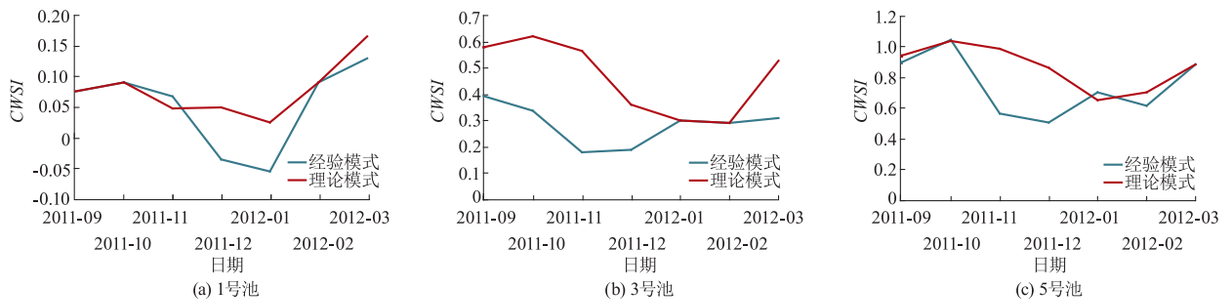


图 3　CWSI 经验模式与理论模式的比较

Fig. 3　Comparison of CWSI between empirical and theoretical models

由图 3 可以看出，理论模式的图形曲线比经验模式的图形曲线平坦，且波动的幅度较小，大部分值处于 0 ~ 1 内，说明理论模式比经验模式的可信度高. 尽管经验模式也能基本反映茶树缺水情况，但由于经验模式的计算值溢出为 0 ~ 1[15-16]，以及出现较大的波动，因此在预测茶树缺水的应用中，没有理论模式的适用性强；但经验模式需要测量的参数较少这一特点，也是其相对于理论模式的优点.

4 结 论

1）针对华南地区经常出现的冬旱及春旱，在塑料大棚中通过人工田间数据采集的方法，测量茶树作物水分胁迫指数中所涉及的各个参数，建立了茶树水分胁迫指数模型. 经田间试验验证，模型的CWSI值能客观反映茶树的水分胁迫情况，达到了预期试验目的.

2）以经济价值较高的英红九号为试验对象，得到茶树水分胁迫的经验模型和理论模型. 拓展2种模型的应用对象，同时也可根据模型计算得到的茶树CWSI值进行精确灌溉. 目前正在开展以CWSI为依据的茶园节水灌溉试验，使模型具有一定的应用价值.

3）现有关于CWSI的研究工作多是在环境因素不可控的大田进行数据采集，建立作物水分胁迫模型. 而该研究工作在环境可控的塑料大棚中进行前期试验并建立模型，因此，模型具有更高的可信度.

4）使用经验模型进行田间验证试验时，所得到的CWSI值有时会超出(0,1)，主要原因是拟合得到的A,B值存在误差. 经验模式的公式是通过冠层表面温度空气饱和水汽压差p_{vpd}和净辐射照度的数据拟合得出的结果，通过试验确定系数A,B时，还涉及无蒸腾条件下和充分灌溉后潜在蒸腾条件下的冠气温差，因为灌溉后存在的时空差异性，水分并不能立即影响到冠层的温度，不同的茶树冠层，影响的速度、程度都有差异，所以拟合所用到的p_{vpd}、冠气温差等存在一定的误差，进而导致系数A,B存在误差，由此导致曲线有可能超出CWSI的取值范围(0,1).

5）田间试验表明，相对于经验模型，理论模型的稳定性更好，更能体现出茶树的水分胁迫状况. 但是理论模型所涉及的参数较多，实际应用时具有较大难度.

6）结合CWSI模型进行茶园精确灌溉的试验尚未有结果. 今后将继续开展该试验，并与未使用该模型、采用传统定时灌溉的茶园进行茶叶产量、质量、效益对比，但需要较长时间的试验.

参考文献(References)

[1] 陈四龙，张喜英，陈素英，等. 不同供水条件下冬小麦冠气温差、叶片水势和水分亏缺指数的变化及其相互关系[J]. 麦类作物学报，2005，25(5)：38－43.
CHEN Silong，ZHANG Xiying，CHEN Suying，et al. Variation and interrelationship of winter wheat canopy-air temperature difference，leaf water potential and crop water stress index under different water supply conditions[J]. Journal of triticeae crops，2005，25(5)：38－43.(in Chinese)

[2] 史宝成，刘钰，蔡甲冰. 冠层温度指导冬小麦灌溉的试验研究[J]. 节水灌溉，2008(4)：11－14.
SHI Baocheng，LIU Yu，CAI Jiabing. Experimental study on using canopu temperature to guide winter wheat irrigation[J]. Water saving irrigation，2008(4)：11－14.(in Chinese)

[3] TANNER C B，SINCLAIR T R. Efficient water use in crop production：research and re-search？[M]//TAYLOR H M，JORDAN W R，SINCLAIR T R. Limitations to efficient water use in crop production. Madison，WI，USA：American Society of Agronomy，1983：1－27.

[4] IRMAK S，HAMAN D Z，BASTUG R. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn[J]. Agronomy journal，2000，92(6)：1221－1227.

[5] 袁国富，罗毅，孙晓敏，等. 作物冠层表面温度诊断冬小麦水分胁迫的试验研究[J]. 农业工程学报，2002，18(6)：13－17.
YUAN Guofu，LUO Yi，SUN Xiaomin，et al. Winter wheat water stress detection based on canopy surface temperature[J]. Transactions of the CSAE，2002，18(6)：13－17.(in Chinese)

[6] 袁国富，唐登银，罗毅，等. 基于冠层温度的作物缺水研究进展[J]. 地球科学进展，2000，16(1)：49－54.
YUAN Guofu，TANG Dengyin，LUO Yi，et al. Advances in canopy-temperature-based crop water stress research[J]. Advance in earth sciences，2000，16(1)：49－54.(in Chinese)

[7] HALIM ORTA A，ERDEM Y，ERDEM T. Crop water stress index for watermelon[J]. Scientia horticulturae，2003，98(2)：121－130.

[8] 崔晓，许利霞，袁国富，等. 基于冠层温度的夏玉米水分胁迫指数模型的试验研究[J]. 农业工程学报，2005，21(8)：22－24.
CUI Xiao，XU Lixia，YUAN Guofu，et al. Crop water stress index model for monitoring summer maize water stress based on canopy surface temperature[J]. Transactions of the CSAE，2005，21(8)：22－24.(in Chinese)

(下转第79页)