

基于冠气温差的作物水分胁迫 指数经验模型研究进展

赵福年¹, 王瑞君², 张虹³, 张龙⁴, 陈家宙³

1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020;
2. 黄河水利委员会宁夏水文水资源局巴彦高勒蒸发站, 内蒙古 磴口 015200;
3. 华中农业大学农业部亚热带农业资源与环境重点开放实验室, 湖北 武汉 430070;
4. 甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020)

摘要:以作物冠层和空气温度的差值为基础, 构建指标监测农田作物水分状况, 在过去40 a间取得了很大的进步。在简要论述了以冠气温差为基础的3个指标(胁迫积温、作物水分胁迫指数经验模型和理论模型)发展历程后, 着重介绍了作物水分胁迫指数(CWSI)经验模型在计算及应用中存在的主要问题。分析认为CWSI经验模型在目前的使用中存在基线计算方法不统一、基线建立所受环境因素过多、不同地区推广存在区域适用性以及CWSI经验模型应用具有单一性等问题。CWSI经验模型计算简便, 如何针对存在的问题进行必要的改进, 对该指标的标准化和推广具有重要的应用价值。

关键词:冠气温差; 作物水分胁迫指数; 经验模型

中图分类号: S162

文献标识码: A

引言

由于气温和降水等气象原因, 作物不能从土壤或空气中获得生长发育的足够水分, 就会遭受水分胁迫, 从而导致其生长发育不良甚至死亡, 并最终造成农业产量或农产品质量下降, 这一现象被称为农业气象干旱^[1-2]。农业气象干旱不仅存在于我国的干旱和半干旱地区, 在湿润和半湿润地区也广泛存在^[3-4]。因而及时有效地诊断作物受旱状况, 对农业生产十分重要。

目前, 世界范围内使用的农业干旱指标众多, 大致可分为4类。一是基于气象因子的气象干旱类指标, 由于农业受旱首先是一定时期内的蒸散过强, 降水不足, 蒸散量大于降水量导致的, 因而考察区域内气象状况, 从而确定农业干旱发生状况具有一定的效用^[5], 不过气象干旱指标反映的是一段时期内的状况, 只能表征农业干旱的大概趋势, 不能反映作物的实际受旱程度; 第二类是土壤干旱指标, 农田中作

物缺水实际上是土壤水分不足, 利用土壤水分表征作物缺水状况是研究和使用较为成熟的指标^[6-8], 但是利用传统方法测量土壤水分耗时费力, 而新型的土壤水分速测仪又价格昂贵, 而且不同地区土壤理化性质差异较大, 仪器使用时需要校正, 所以该类指标难以在大范围地区推广使用; 第三类指标是作物形态学指标, 即利用作物的长势和长相来进行作物水分胁迫诊断, 该类指标表现直观, 观测方便, 但这类指标是一种定性的方法, 不能定量, 在使用时难免带有主观性, 而且由于作物品种、作物生长环境等因素的差异, 难以将该类指标应用于大范围的旱情诊断; 第四类指标是作物生理指标, 如作物叶片气孔导度、叶水势、光合速率以及冠层温度等^[9], 该类指标直接以作物本身为研究对象, 诊断作物体内的水分状况, 是最理想的作物水分胁迫诊断指标。在这类指标中, 作物冠层温度对水分胁迫敏感, 观测方法简单, 而且随着遥感红外监测技术的进步, 这一指标

收稿日期: 2012-04-24; 改回日期: 2012-07-18

基金项目: 国家重大科学研究计划(2012CB955903)及甘肃省气象局气象科研项目“基于作物系数的春小麦干旱指标体系建立”(2012-15)共同资助

作者简介: 赵福年(1987-), 男, 甘肃省武威市人, 硕士, 主要从事农业气象研究. E-mail: pavel0622@sina.com

的研究在近几十年来取得了长足的进步。

1 研究进展与方法

作物冠层温度是由土壤—植物—大气连续体内的热量和水汽通量所决定的,当土壤供水状况不能满足植物体蒸腾需水要求时,蒸腾速率下降,从而蒸腾消耗的潜热减少,显热随之增加,引起作物冠层温度升高,反之,当土壤供水充分时,冠层温度则降低,因而可以根据这一原理来诊断作物供水状况^[10-11]。以冠层温度作为研究对象,诊断作物干旱发生状况,只有短短几十年的时间。最初的研究主要集中在美国农业部(USDA)设在亚利桑那州凤凰城的水利实验室,他们在作物冠层温度这一研究领域做了大量的试验和工作,并建立了许多在今天仍旧非常实用的干旱监测指标,主要有胁迫积温(*SDD*)和作物水分胁迫指数(*CWSI*)^[12]。

凤凰城的试验研究从1976年开始,而后 Jackson等^[13]在1977年对胁迫积温(*SDD*)的计算方法和意义进行了系统的描述。*SDD*是每日地表温度最大时(正午后1到1.5 h),作物冠层温度和空气温度差值($T_c - T_a$)的累计。*SDD*计算如下:

$$SDD = \sum_{i=1}^n (T_c - T_a)_i \quad (1)$$

式中: T_c 为作物冠层温度(°C); T_a 为离地面150 cm处空气温度(°C); i 为作物生育期内任一天; n 为生育期持续的天数。*SDD*越大,表示作物在整个生育期内累计受旱程度越严重。一般,如果作物水分充足,那么 $T_c - T_a$ 值会接近于0或者是负值;反之,如果作物水分不足,那么 $T_c - T_a$ 将会 >0 。Jackson等^[13]将 $T_c - T_a$ 为负值的数据设置为0,并将 $T_c - T_a > 0$ 的值进行累加,以这些正的数值累加并作为一个指标,即 SDD_{pos} ,然后用该指标来确定作物灌溉时间。Jackson等^[13]在亚利桑那州确定当 SDD_{pos} 为10时,小麦就需要灌溉。但是他同时指出判断灌溉时间的 SDD_{pos} ,这一数值的确定需要依据空气温度和作物冠层温度的测量方法、作物品种以及不同地区作物生长的土壤和气候状况来确定。不过无论如何,*SDD*这个指标使遥感测温诊断作物水分成为了可能,这为作物灌溉时间的确定提供了极大的便捷。

作物水分胁迫指数(*CWSI*)的引入要晚于*SDD*,该指标是由Idso^[14]在1982年建立的。由于胁迫积

温(*SDD*)受诸如空气水汽压、净辐射以及风速等因素的影响,因而非常有必要将这些因素考虑进来并建立一个合适的指标,使得胁迫积温(*SDD*)更加规范和准确,而*CWSI*就是基于对这些因素的综合考虑而建立的。Ehrler^[15]在1973年发现在晴天无云时,从早上08:00到下午18:00,供水充足的棉花叶片温度和空气温度的差值与对应时刻的空气饱和差(*VPD*)成线性关系。Idso等^[16]利用这一结论对苜蓿、大豆以及南瓜进行了试验,结果发现这些作物在白天时,叶片和空气的温差与空气饱和差都成线性关系,只是不同作物之间这种线性关系存在差异。而且他还发现这种线性关系不受其他气象因子的影响(诸如风速和日照辐射在一天中的变化),只是多云条件会对叶片(冠层)和空气温度的降低有一定影响。Idso将作物在晴天条件下存在的这种线性关系定义为“非水分胁迫下基线”,并据此提出了一个水分胁迫监测指标,即作物水分胁迫指数(*CWSI*)。*CWSI*定义如下^[14]:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_u}{(T_c - T_a)_l - (T_c - T_a)_u} \quad (2)$$

式中 T_c 为作物冠层温度,°C; T_a 为冠层上方的空气温度,°C; $(T_c - T_a)_l$ 为冠气温差的下限(即下基线); $(T_c - T_a)_u$ 为冠气温差的上限(即上基线)。从公式(2)可知,上下基线的获取是计算*CWSI*的关键,在得到冠气温差上下基线的经验关系之后,只需要观测作物冠层温度、空气温度和空气饱和差就能计算得到*CWSI*。Idso^[14]随后对不同灌水处理作物,计算获取了*CWSI*,并进行了比较,得出*CWSI*对土壤水分供给敏感,在作物灌水后,*CWSI*能随着土壤水分增多而减小,反之土壤水分供给不足时,*CWSI*则增大。可见,*CWSI*是一个非常有用,且能够快速诊断出农田作物水分胁迫程度的指标。

随后,1982年Jackson等^[17]以冠层能量平衡原理为基础,考虑了冠层净辐射、作物最小冠层阻力、冠层温度和空气饱和气压差提出了*CWSI*理论模型,并将Idso定义的*CWSI*称为*CWSI*经验模型。*CWSI*理论模型对Idso的冠气温差上下限进行了理论解释,对作物冠层的微气象条件进行了更为细致的考察,使*CWSI*的理论依据加强,而且其计算方法也具有了很好的物理意义。不过*CWSI*理论模型尽管能够确定冠气温差的上下限,但在实践中很难获取确定的作物最小冠层阻力所需的空气动力学阻力

这一必要参数,因而在实际应用时,其存在的最大问题是计算所需参数过多,而一般地区又难以准确获得这些气象和作物参数,这为该模型方法的推广使用带来了很大的难度^[18-19]。

2 存在问题

以冠气温差为基础的作物水分胁迫监测指标引入已经有 30 多 a 了,但是其发展和应用却长盛不衰,这其中尤以 Idso 建立的 *CWSI* 经验模型因计算简单,使用最为广泛。国内外许多研究者在干旱和半干旱地区,利用 *CWSI* 经验模型监测作物水分状况、制定作物灌溉制度以及对作物最终产量进行预测估计^[20-23]。不过尽管 *CWSI* 经验模型应用和研究较为普遍,但是其在计算和使用方面依旧存在诸多问题,需要不断探索和改进。

2.1 基线计算方法不统一

作物水分胁迫指数 (*CWSI*) 使用的关键是其上下基线的建立,只要建立了 *CWSI* 上下基线,再只需要观测作物冠层温度、空气温度以及空气湿度就可以获得观测时刻的 *CWSI*。但是目前国内外在 *CWSI* 经验模型使用时,存在的首要问题就是上下基线的确定方法并不统一,这必然给 *CWSI* 的推广和标准化带来问题。

Idso 在引入 *CWSI* 经验方法时,对下基线的确定主要是根据 Ehrler^[15] 在 1973 年发现的经验关系式来获取的。这一经验关系式一旦确立,计算 *CWSI* 时就只需要依据该经验关系式,在观测时刻空气饱和差下,找出对应时刻的冠气温差即可。而这个冠气温差就是(3)式中所得冠气温差下限。

$$(T_c - T_a)_l = A + B \cdot VPD \quad (3)$$

式中 *VPD* 是空气饱和差(利用空气温度和湿度可计算获得^[24]), kPa; *A*、*B* 分别为线性回归系数。因而在不同观测时刻,如果空气饱和差不同,那么这个冠气温差下限应该是变动的。而有的研究者在计算时,却将试验期间出现最大饱和差时对应的冠气温差作为 *CWSI* 的下限值,并且将该值固定,在其他任何观测时刻,这一下限值是定的。这样的确定方法无疑会使冠气温差下限减小,那么 *CWSI* 的计算结果将偏小。

此外,大部分研究者在使用 *CWSI* 时,更关注于 *CWSI* 下基线的建立,但是 *CWSI* 上基线的获取对 *CWSI* 的计算同样重要。目前国内外计算 *CWSI* 上

基线的方法有 3 种,一种是 Idso^[25] 在引入 *CWSI* 时所定义的,即他认为在空气饱和差 (*VPD*) 为 0 时,空气与叶片的水汽交换应该为 0,交换通量应该停止,但是在实际情形下,这种水汽交换并未停止,于是他就估计了一种空气的过饱和状态,即空气与叶片的水汽交换完全停止,为 0 的状态。这种状态时,空气饱和差设定为 *VPG*(图 1),是空气温度为 T_a 时与空气温度为 $T_a + A$ 时的饱和水汽压差值,可利用模拟下基线所建立的基线斜率和截距,求出特定观测温度下的上基线,计算式如下:

$$(T_c - T_a)_u = A + B \cdot VPG \quad (4)$$

式中 *A*、*B* 分别为线性回归系数[式(3)和式(4)中数值相同]; *VPG* 是温度为 T_a 时的空气饱和水汽压与温度为 $T_a + A$ 时的空气饱和水汽压的差。

第 2 种方法是经验观测值,即设置作物完全遭受胁迫的水分处理,观察作物冠层温度,计算出在水分完全胁迫时的冠气温差,即为上限。许多国外的研究者普遍采用这个方法来计算上基线^[20,26-27]。但是 Tool 等^[28] 认为环境因素的变动,会在很大程度上影响上基线的观测和计算结果,因而会造成极大的误差,这将会导致 *CWSI* 的计算结果有误。

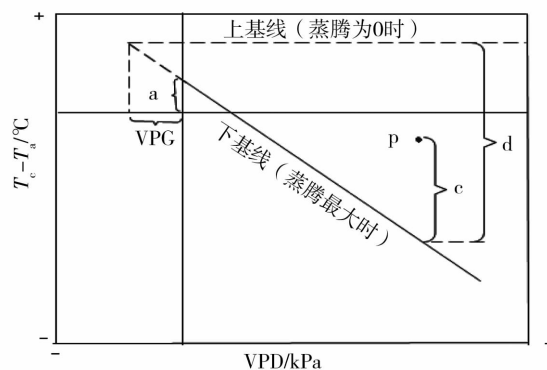


图 1 *CWSI* 基线的计算^[25]

Fig. 1 The calculation of *CWSI* baselines

CWSI 上基线获取的第 3 种方法,是将冠层阻力设置为无限大,即假定在此时空气与叶片水汽交换量为 0。该方法的获得需要涉及能量平衡公式,与 *CWSI* 理论模型上限的获得相似,需要较多的参数,获取较难,因而难以得到较好的推广使用。

2.2 基线建立所受因素较多

CWSI 经验模型监测作物水分状况计算获取简便,但是影响其大面积推广的最大问题就是基线的

建立模拟广受质疑,即使是同一种作物在不同地区气候环境条件下,所建立的作物水分胁迫指数下基线也不完全相同(图2),从而给CWSI经验模型的大面积推广使用带来了难度。目前对CWSI基线造成影响的原因研究主要可以分为2个方向,一个是作物本身因素及土壤理化性质等原因,一个是不同地区气候存在差异。

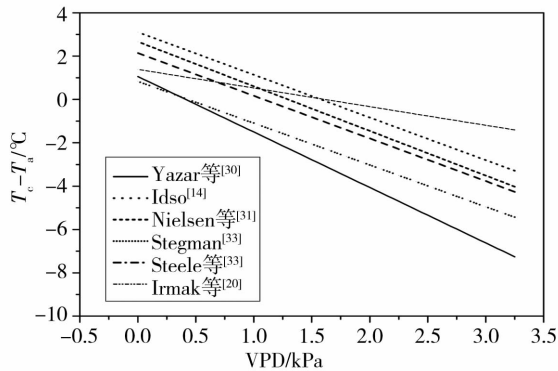


图2 不同研究者获得的玉米CWSI下基线^[29]

Fig. 2 Low baselines reported by several different researchers for corn

Idso^[14]在创建了CWSI经验模型后,建立了26种不同作物的CWSI下基线,发现不同种作物下基线各不相同。FAN^[34]等对40个不同基因型小麦在灌水和不灌水条件下进行了冠层温度观测,发现不同的基因型小麦冠气温差差异很大。那么如果用不同基因型小麦的观测结果模拟CWSI基线,必将会得到各不相同的CWSI基线。此外,还有研究者在作物不同生育期,对CWSI下基线进行了模拟,发现在作物生长的不同阶段CWSI下基线存在差异^[35-36]。Alderfasi^[37]等用同一条CWSI下基线,比较了7种不同基因型冬小麦在相同灌水处理条件下的CWSI值,发现各品种之间CWSI差异很大,他认为不同基因型小麦应该有不同的CWSI下基线。此外在他的研究中计算获得的冬小麦CWSI下基线方程截距明显小于Howell^[38]等研究所得的CWSI下基线截距,他认为是因为气候的因素造成的。Nielsen等^[39]在1991年对不同施氮处理和不同水分胁迫条件下,研究了CWSI在表征作物遭受水分胁迫时的效用,他发现作物在不同的水分胁迫下,CWSI会随着不同的施氮处理而变动,而这种波动是作物生长发育状况造成的,还是施肥对作物CWSI基线造成偏差而导致的,还难以解释清楚。赵福年等^[40]在南方红壤区的试验研究发现,施用不同量的氮肥会对

玉米CWSI基线的建立造成影响。Nielsen^[41]在1994年对作物不同生长发育时期非水分胁迫基线进行了分析,发现当冠层叶面积 <0.2 时,作物非水分胁迫基线会受作物生长数量的影响,在作物生长的营养生长阶段和开花期作物非水分胁迫基线并无差异,而乳熟期的非水分胁迫基线和其他阶段的基线有很大差异。这些研究结果说明,作物品种、作物生长发育状况以及土壤理化性质等会对CWSI基线的建立模拟造成很大影响。

而也有一些研究者在发现相同作物CWSI基线存在差异后,将这种差异归结为是气候条件不同造成的。Idso^[14]在引入CWSI之初,在晴天和多云条件下,建立了多种作物的CWSI下基线,他发现,在多云条件下所建立的CWSI下基线位置普遍低于晴天条件下建立的基线,而且晴天和多云条件下的这种差值平均达 $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Jensen等^[42]研究得出无论作物是供水充足还是遭受了水分胁迫,不同的太阳辐射会对作物冠气温差造成影响,当太阳辐射很强时,冠气温差能够达到 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,而当太阳辐射很小时,即使遭受严重水分胁迫的作物,冠气温差也有可能 <0 。风速能够影响作物叶片气孔阻力,当风速不同时,作物冠层温度也会有差异。Testi等^[43]试验发现作物在 $>2.7\text{ m/s}$, $2.7\sim 3.5\text{ m/s}$, $>3.5\text{ m/s}$ 3个风速范围时,作物下基线斜率和截距不完全相同。这些研究者的研究结论得出不同的太阳辐射、风速以及云量多少都会对作物冠层温度造成影响,从而会使CWSI基线产生偏差。

Yazar等^[30]将导致相同作物CWSI基线存在差异的因素分为以下6个方面:(1)空气温度(T_a)和相对湿度(RH)观测点的选择不同;(2)相对湿度(RH)的观测方法之间存在差异;(3)手持式红外测温仪校正方式不同;(4)手持式红外测温仪观测时的角度选取存在差异;(5)作物品种的差异;(6)气象因素的影响(诸如风速和云量),即气象气候因素。这些因素中,在使用CWSI时前4个因素能够通过方法的统一,可以避免,而后面2个因素却不能完全忽略,影响也最大。在这后2个因素中,到底是作物以及土壤理化性质等因素占据主导地位,还是气候差异占据主导作用,目前还没有公认的结论和合理的解释。

2.3 考虑微气象条件的基线在其他气候区的适用性

鉴于CWSI基线在不同环境条件下,建立模拟结果存在差异,那么就无法将一个地区建立的作物

水分胁迫指数(*CWSI*)基线完全照搬,在另一地区使用。由于气候条件、土壤因素、作物品种差异以及生育期等原因,无论是作物上基线还是下基线,都会或多或少存在一定的差异,如果不根据当地的环境和作物特点直接照搬了其他地区所建立的基线,那么计算结果肯定会存在误差。

Payero^[29,44]等经过试验,建立了考虑多个气象因子的综合*CWSI*下基线,以期能够在其他气候条件下推广使用,但是这样的综合*CWSI*下基线是否正确,目前还没有进行有效的验证,并且里面涉及到的几个气象参数也不能较为方便地准确获取。因而在考虑气候条件差异时,需要对这种多个综合气象因子的基线进行有效地试验验证。

此外,*CWSI*起源于气候干燥的美国亚利桑那州,一些研究者认为*CWSI*下基线在干旱地区模拟时,由于空气饱和差变动范围较大,冠气温差与空气饱和差的线性关系会比较明显,而在湿润地区空气饱和差变动范围小,模拟作物下基线会显得较为困难。Gardener等^[45]通过试验研究,建议在建立*CWSI*下基线时,空气饱和差至少要在1~6 kPa之间变化。目前国内外对*CWSI*的应用也多集中于干旱和半干旱地区,而其在气候较为湿润的地区使用效果如何,只有很少部分的研究结果^[9,47]。在我国南方湿润地区,每年夏秋季的农业干旱非常严重,因而需要进一步加大对*CWSI*在不同气候区的适用性研究,以将其推广至更广大的地区使用。

2.4 应用及应用效果方面存在的问题

作物水分胁迫指数(*CWSI*)在建立之初,主要是用来诊断作物受旱的严重程度,随后一些研究者依据诊断结果,逐步建立了*CWSI*与作物产量的关系,从而可以用来确定作物灌溉时间,而在无灌溉设施的地区,可以依据不同生育期的*CWSI*值对作物的最终产量进行估计。不过在对作物估产时,存在一定的问题,即生育期的选择,选择作物哪个生长阶段的*CWSI*值对产量进行估计效果好,以及选取多长时间的值,取平均还是取当天测定值,这些都没有统一且合理的规定。

*CWSI*能够诊断作物干旱状况,而作物受旱又是土壤水分不足引起的,那么*CWSI*肯定能够反映农田土壤水分状况。许多研究者都认为*CWSI*与土壤水分的变化具有很好的一致性,*CWSI*能够反映农田水分变化趋势^[47-49]。不过*CWSI*的降低趋势往往滞后于农田灌溉,并不是灌溉后,*CWSI*立即降低,而

是通常会晚1~2 d。不同研究者对*CWSI*与土壤水分的相关关系进行了分析,均得出二者呈负相关关系,但是一些研究者得出的相关关系显著,一些研究者得出的相关关系并不显著,即*CWSI*是否能准确地及时反映农田干旱尚存在一定的争议^[50-51]。

此外,*CWSI*在应用时,存在一个很大的问题,即只能评估作物受旱程度,无法对灌溉量进行定量的估计,这是其使用的一大限制因素。一些研究者根据农田水分平衡原理,在*CWSI*确定灌溉量方面进行了一些初步的探索。Paul等^[52]引入了土壤水分胁迫指数(*SWSI*)和土壤水分胁迫系数 *Krec* 2个概念,*SWSI*可以通过土壤水分胁迫系数 *Ks* 和 *Krec* 得出,而根据农田水分平衡原理为基础获得的 *SWSI* 又可被 *CWSI* 替换,所以就可以用 *CWSI* 来估算农田水分亏缺量了,不过该方法在灌溉频繁的地区使用效果会稍差,而且农田水分平衡模型设计参数较多,获取不易,会对该方法的普及带来很大的难度。

3 研究展望

作物冠层及叶片温度观测简易,可以在不破坏作物的情况下获得,而其又能在一定程度上表征作物水分状况,因而在过去的40 a里获得了迅速的推广和使用。依赖作物冠层温度计算所得的*CWSI*经验模型意义明确,许多研究者利用其监测作物受旱状况、安排灌溉时间以及预测产量。*CWSI*经验模型尽管计算简单,获取容易,但是其上下基线应用存在无法转移性,即相同作物在不同试验条件下获得的*CWSI*基线不尽相同,这给*CWSI*的推广带来了一定的局限,若直接照搬其他研究者获得的作物*CWSI*基线来计算*CWSI*,必然会导致误差。因而如何改进*CWSI*经验模型,使其获取更具有理论意义,并从多角度考虑影响其准确建立的因素是当前急需解决的问题。

(1)*CWSI*经验模型要大面积推广和使用,就必须要有统一的计算标准,而且在计算时最好能找出一些能够易于修改的参数模型,在不同地区使用时,只需要根据当地地区所种植作物品种、土壤理化性质以及气候条件等,校正这些可变动的参数,然后即可使用;或者编制出一些傻瓜型的计算软件,观测者只需要将观测数据输入软件,软件则自动生成*CWSI*的上下基线以及*CWSI*值,这样可以使*CWSI*使用更方便,计算更加统一。

(2)传统的农业干旱监测,依赖农田土壤水分

墒情的测量,土壤水分监测费时费力,无法及时准确地诊断出干旱发生状况。*CWSI* 使用便捷,操作简单,可以作为传统农业干旱监测技术的辅助工具,在农田农业干旱监测中推广使用。这将会为农业作物受旱监测带来极大的便捷。

(3) 基于能量平衡的 *CWSI* 理论模型,因采用航天航空遥感技术,扩大了其应用研究范围。而 *CWSI* 经验模型在研究和使用中却依旧停留在田间尺度,经验模型中作物冠层温度的观测还主要依赖于传统的手持式红外测温仪或架设在农田上方的红外测温仪获取^[29,44,53]。这大大限制了 *CWSI* 经验模型的推广和使用,如何将航天和航空遥感技术应用于 *CWSI* 经验模型中将是一个亟待解决的问题。

作物缺水诊断是农业产出过程中十分关键的部分,因而如何有效地找出一些可大面积推广且标准度较高的作物缺水诊断指标是一项十分有意义的工作,*CWSI* 经验模型具有其自身所特有的优点,如何对其进行有效的改进将是未来研究的一个重难点。

参考文献:

- [1] Ashok K M, Vijay P S. A review of drought concepts[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1-2):202-216.
- [2] 周跃武,冯建英,译. 美国 20 世纪干旱指数评述[J]. *干旱气象*, 2006, 24(1):79-87.
- [3] 张斌,张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策研究[J]. *生态学报*, 1995, 15(4):413-419.
- [4] 黄道友,彭廷柏,王克林,等. 应用 Z 指数方法判断南方季节性干旱的结果分析[J]. *中国农业气象*, 2003, 24(4):12-15.
- [5] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等. 气象-农业干旱指标综述[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1):185-189.
- [6] 周跃武,王劲松,译. 干旱的量化:干旱指数的评价[J]. *干旱气象*, 2005, 23(2):85-94.
- [7] 王劲松,郭江勇,周跃武,等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(1):60-64.
- [8] 赵鸿,李凤民,熊友才,等. 土壤干旱对作物生长过程和产量影响的研究进展[J]. *干旱气象*, 2008, 26(3):67-71.
- [9] 陈家宙,林丽蓉,吕国安,等. 红壤施氮对玉米水分胁迫指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5):1114-1119.
- [10] 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.
- [11] 王丽明,邱国玉,张清涛,等. 作物缺水指数新方法的验证[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(4):229-232.
- [12] Kirkham M B. Principles of soil and plant water relations[M]. Burlington, MA, USA: Elsevier Academic Press. 2005. 437-453.
- [13] Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements[J]. *Water Resources Research*, 1977, 13:651-656.
- [14] Idso S B. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress[J]. *Agricultural Meteorology*, 1982, 27(1-2):59-70.
- [15] Ehler W L. Cotton leaf temperature as related to soil water depletion and meteorological factors[J]. *Agronomy Journal*, 1973, 65:404-409.
- [16] Idso S B, Jackson R D, Pinter Jr P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability[J]. *Agricultural Meteorology*, 1981, 24:45-55.
- [17] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. *Water Resources Research*, 1981, 17:1133-1138.
- [18] Barbosa B S, Ramana T V R. The *CWSI* variations of a cotton crop in a semi-arid region of Northeast Brazil[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(4):649-659.
- [19] 俞龙,王卫星,崔晓,等. 基于冠层温度的夏玉米旱情指数理论模型和经验模型比较[J]. *华南农业大学学报*, 2007, 28(3):110-112.
- [20] Irmak S, Haman D Z, Bastug R. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn[J]. *Journal of Agronomy*, 2000, 92(6):1221-1227.
- [21] Sepaskhah A R, Kamgar-Haghighi A A. Saffron Irrigation Regime[J]. *International Journal of Plant Production*, 2009, 3(1):1-16.
- [22] 张喜英,裴东,陈素英. 用冠气温差指导冬小麦灌溉的指标研究[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(2):102-106.
- [23] 张振华,蔡焕杰,杨润亚. 基于 *CWSI* 和实际耗水量的膜下滴灌作物需水量研究[J]. *中国农村水利水电*, 2005, 3:4-6.
- [24] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56[M]. Rome:FAO, 1998. 17-23.
- [25] Idso S B, Reginato R J. Soil- and atmosphere-induced plant water stress in cotton as inferred from foliage temperatures[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(4):1143-1148.
- [26] Yesim Erdem, Tolga Erdem, A. Hamlim Orta, Hakan Okursoy. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (*CWSI*) [J]. *Journal of Central European Agriculture*, 2005, 6(4):449-460.
- [27] Tolga Erdem, A. Halim Orta, Yesim Erdem, et al. Crop water stress index for potato under furrow and drip irrigation systems[J]. *Potato Research*, 2005, 48(1-2):49-58.
- [28] Toole O J C, Hatfield J L. Effect of wind on the crop water stress index derived by infrared thermometry[J]. *Agronomy Journal*, 1983, 75:811-817.
- [29] Payero J O, Neale C M U, Wright J L. Non-water-stressed baselines for calculating crop water stress index (*CWSI*) for alfalfa and tall fescue grass[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2005, 48(2):653-661.
- [30] Yazar A, Howell T A, DUSEK D A, et al. Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated maize[J]. *Irrigation Science*, 1999, 18(4):171-180.
- [31] Nielsen D C, Gardner B R. Scheduling irrigation for corn with the crop water stress index (*CWSI*) [J]. *Application Agricultural Research*, 1987, 2(5):295-300.
- [32] Stegman E C. Efficient irrigation timing methods for corn production[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1986, 29(1):203-210.

- [33] Steele D D, Stegman E C, Gregor B L. Field comparison of irrigation scheduling methods for corn[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1994,37(4):1197-1203.
- [34] Fan T L, Maria B, Rudd J, et al. Canopy temperature depression as a potential selection criterion for drought resistance in wheat[J]. Agricultural Sciences in China, 2005,4(10):793-800.
- [35] Gontia N K, Tiwari K N. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation A using infrared thermometry[J]. Agricultural Water Management, 2008,95(10):1144-1152.
- [36] Bernardo Barbosa da Silva, Jose Alberto Ferreira, Tantravahi Venkata Ramana Rao, et al. Crop water stress index and water-use efficiency for melon (*Cucumis melo* L.) on different irrigation regimes[J]. Agricultural Journal, 2007,2(1):31-37.
- [37] Alderfasi A A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat[J]. Agricultural Water Management, 2001,47(1):69-75.
- [38] Howell T A, Musick J T, Tolk J A. Canopy temperature of irrigated winter wheat[J]. Transactions of the American society of agricultural engineers, 1986,29:1692-1699.
- [39] Nielsen D C, Halvorson A D. Nitrogen fertility influence on water stress and yield of winter wheat[J]. Agronomy Journal, 1991,83(6):1065-1070.
- [40] 赵福年,陈家宙,张虹. 施氮水平对红壤区夏玉米水分胁迫指数下基线的影响[J]. 中国农业气象, 2012,33(2):215-219.
- [41] Nielsen D C. Non water-stressed baselines for sunflowers[J]. Agricultural Water Management, 1994,26(4):265-276.
- [42] Jensen H E, Svendsen H, Jensen S E, et al. Canopy-air temperature of crops grown under different irrigation regimes in a temperate humid climate[J]. Irrigation Science, 1990,11(3):181-188.
- [43] Testi L, Goldhamer D A, Iniesta F, et al. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees[J]. Irrigation Science, 2008,26(5):395-405.
- [44] Payero J O, Irmak S. Variable upper and lower crop water stress index baselines for maize and soybean[J]. Irrigation Science, 2006,25(1):21-32.
- [45] Gardner B R, Nielsen D C, Shock C C. Infrared thermometry and the crop water stress II: sampling procedures and interpretation[J]. Journal of Production Agriculture, 1992,5(4):466-475.
- [46] Lebourgeois V, Chopart J L, Begue A, et al. Towards using a thermal infrared index combined with water balance modelling to monitor sugarcane irrigation in a tropical environment[J]. Agricultural Water Management, 2010,97(1):75-82.
- [47] 张振华,蔡焕杰,杨润亚. 基于CWSI和土壤水分修正系数的冬小麦田土壤含水量估算[J]. 土壤学报, 2005,42(3):373-378.
- [48] Halim Orta A, Yesim Erdem, Tolga Erdem. Crop water stress index for watermelon[J]. Scientia Horticulturae, 2003,98(2):121-130.
- [49] Muhammad Usman, Ashfaq Ahmad, Shakeel Ahmad, et al. Development and application of crop water stress index for scheduling irrigation in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under semiarid environment[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2009,7(3-4):386-391.
- [50] Carcova J, Maddoni G A, Ghera C M. Crop water stress index of three maize hybrids grown in soils with different quality[J]. Field Crop Research, 1998,55(1-2):165-174.
- [51] 赵晨,罗毅,袁国富,等. 作物水分胁迫指数与土壤含水量关系探讨[J]. 中国生态农业学报, 2001,9(1):34-36.
- [52] Paul D, Colaizzi Edward, Barnes M, et al. Estimating soil moisture under low frequency surface irrigation using crop water stress index[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003,129(1):27-35.
- [53] 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.

Advances in Crop Water Stress Index Empirical Model Research Based on Canopy and Atmosphere Temperature Difference

ZHAO Funian¹, WANG Ruijun², ZHANG Hong³, ZHANG Long⁴, CHEN Jiazhou³

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction, Lanzhou 730020, China;
2. Evaporation Experimental Station of Bayangaole, Hydrology and Water Resources Bureau of the Ningxia- Inner Mongolia Reach, Yellow River Water Conservancy Committee, Dengkou 015200, China;
3. Key Open Laboratory of Subtropical Agricultural Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 4. Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on canopy-air temperature difference, some indexes for monitoring crop water status were constructed and those techniques had been developed quickly since the 1970s. This paper mainly discussed the problems for calculation and application of CWSI (Crop water stress index) empirical model. There are four main problems for usage of CWSI empirical model. Firstly, the method of CWSI calculation is not unified for different researchers. Secondly, the formulation of CWSI baselines is affected by many factors. Thirdly, CWSI can be used only in some specific regions. Finally, in different regions there are different baselines. For giving a great usage of CWSI, we have to work out those problems in future research.

Key words: canopy-air temperature difference; crop water stress index; empirical model