

针对玉米的作物特性的干旱指数

Steven J. Meyer 等

I. 模式的研制与验证

摘要 目前广泛使用的农业干旱指标[如帕尔默干旱严重程度指数(PDSI)和作物水分指数(CMI)]都没有考虑特定作物对干旱事件的响应。因此,由PDSI及CMI等指数得到的值都不能直接把干旱对作物生产及产量的影响联系起来。该文提出了一个新的干旱指数,它针对某一种作物,且考虑了作物特定生长过程中的水分利用。研制作物特性干旱指数(简称CSDI)使用了内布拉斯加州中东部作物报告区(Crop Reporting District,简称CRD)8年的资料,并用该CRD另外10年资料、密苏里州东北部CRD 9年资料、威斯康星州中南部CRD 8年资料及印第安纳州中部CRD 9年资料加以验证。模式预测值与实际CSDI值产生的可决系数 r^2 的变化范围为0.32到0.76,吻合D指数值为0.72到0.90;均方根误差变化为7.7%到13.4%。CSDI模式可以为美国的玉米带提供一种有效的干旱监测和评估的工具。

引言

许多人曾经尝试以指标的形式来确定并监测干旱,PDSI(Palmer,1965a)也许是最为人们熟悉并被广泛使用的。Palmer研制PDSI的目的是推导出一种以指标形式来评估气象异常(如干旱)的一般方法,能够对干旱的严重程度进行时间和空间上的比较。

然而,PDSI旨在反映长期的土壤湿度条件,但这样做对土壤水分状况恶化的反应是很慢的。由于认识到这一事实,Palmer(1965b)对PDSI做了改进,提出作物水分指数(CMI),试图对迅速变化的土壤水分条件及旺盛生长中的作物的需求有所响应。然而,在推导该指标时也没有考虑特定作物对干旱条件的响应,在CMI值的计算中也没有考虑到这一点。为弄清内布拉斯加州的玉米、高粱和大豆的产量响应,Meyer等(1990)计算后得出结论,即使在相同的气象条件下生长,这三种作物也呈现出各自独特的响应。由于这

一特点,就无法把PDSI和CMI等指标值直接同干旱对产量的影响联系起来,因为每种作物对水热胁迫都有不同的响应。

尽管PDSI及CMI等指标的目的并不是打算研究干旱对作物的影响,CMI还是被广泛用于这方面(Wilhite等,1986)。事实上,Meyer等(1991)已经指出,PDSI和CMI对玉米都不是一种非常可信的干旱指标。特别是对于那些生长期开始时土壤水分充足,而后发生不适时的干热期的年份,或者是那些生长期开始时土壤水分状况较差,而后出现及时的湿润时期的年份。

Jensen(1968年)、Nairizi和Rydzewski(1977年)的工作已经阐明,作物对土壤水分胁迫的产量响应取决于所考虑的作物及发生胁迫所处的生长时期。过去的一些研究仅考虑植物生长期内的总水分消耗与最终产量之间的关系,事实上,这两者确实存在着很紧密的关系。然而,对任何一个估测未来产量的研究来说,考虑胁迫效应发生的时间是十分必

要的。本文提出了一种针对玉米的作物特性干旱指数(CSDI)。

材料和方法

本研究需要四种类型的资料:天气、土壤、物候及产量资料。天气和土壤资料作为模式输入,物候资料用于确定成熟速度,产量资料则用于对模式的输出结果进行比较,以评价模式性能。四个地点——内布拉斯加州的 North Omaha(内布拉斯加中东部作物报告区(CRD))、密苏里州的 Columbia(密苏里州东北部的 CRD)、威斯康星州的 Madison(威斯康星州中南部的 CRD)及印第安纳州的 Indianapolis(印第安纳州中部的 CRD)的 9 年天气资料(1972—1980 年),从国家气候资料中心(NCDC)的 SOLMET 磁带上获得。其中逐日资料包括最高和最低干球温度、24 小时平均露点温度、风速及太阳总辐射。假定这些资料对各个 CRD 都有较好的代表性。但考虑到单点降水资料不能很好地反映 CRD 尺度地区的情况,因此,在每个 CRD 中各取 5 个点的降水资料进行平均,作为该 CRD 的逐日降水量使其有较好的代表性。内布拉斯加中东部 CRD 的另外 9 年资料(1981—1989)从位于 North Omaha 站西部约 50 公里的 Mead 的内布拉斯加大学自动天气资料网获得。这样,内布拉斯加中东部 CRD 的资料总年数为 18 年(1972—1989 年)。

为表征土壤剖面的特性,对各个 CRD 内所用的每个县的农用土壤测定进行检查。其内容包括各县的土地百分比以及土壤质地、持水量(它提供田间持水量的一种估计)、各种土壤层(到 150cm)的厚度。根据这些信息,建立起每个 CRD 土壤剖面资料,它包含 6 个层次(一个 25mm 厚的表层、一个 275mm 厚的第二层和 4 个 300mm 厚的层次)(表 1 略)。基于主要的土壤质地,并参照有关文献,可以得到饱和点和凋萎点的值(Brady, 1974; Hausenbuiller, 1985)。

内布拉斯加、密苏里、威斯康星和印第安

纳州农业厅的农业统计服务部门提供了各自 CRD 9 年(内布拉斯加为 18 年)50%的玉米播种及 50%的玉米成熟日期资料。从播种日到成熟日之间的生长度日用 $30/10^{\circ}\text{C}$ ($86/50^{\circ}\text{F}$)法计算。累积生长度日可以用来确定整个生长季中玉米的生长阶段,用 Hanway 的约定(1971)。各个生长阶段所需生长度日根据 Neild 和 Seeley 的工作确定。他们以从播种到成熟所需生长度日总数的百分数来表示各发育阶段所需的生长度日。

Nairizi 和 Rydzewski (1977) 用 Jensen (1968)导出的公式来确定主要作物和非主要作物在整个生长周期中的各个生育期水分供应亏缺对产量的影响(按照 Hanway 的约定,一个生育期(growth period)由两个或两个以上的实际生长阶段(growth stage)组成)。这样,他们确定了由生育期决定的敏感性系数。对玉米来说,其表达式为:

$$\frac{Y_{\text{act}}}{Y_{\text{pot}}} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{W_{\text{appi}}}{W_{\text{pot}}} \right)^{\lambda_i} \quad (1)$$

其中 Y_{act} 和 Y_{pot} 分别为实际产量(kg ha^{-1})和潜在产量(即土壤水分不受限制时的产量)(kg ha^{-1}); W_{appi} 和 W_{pot} 分别为净水分利用(mm)和当土壤水分不受限制时的水分利用(mm); n 代表作物生长周期中包含的生育期个数, λ_i 为第 i 个生育期中作物对水分胁迫的相对敏感性。

为了得到作物特性干旱指数 CSDI,本研究对上述表达式进行了修改,实际 CSDI(CSDI_{act})表达式为:

$$\text{CSDI}_{\text{act}} = \frac{Y_{\text{act}}}{Y_{\text{pot}}} \quad (2)$$

其中 Y_{act} 和 Y_{pot} 分别为实际产量(对特定的作物报告区 CRD 和某一特定年(kg ha^{-1}))和最大潜在产量(即研究年限中某一 CRD 的最高产量)(kg ha^{-1})。预测的 CSDI($\text{CSDI}_{\text{pred}}$)的表达式为:

$$\text{CSDI}_{\text{pred}} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\sum \text{ET}_{\text{calc}}}{\sum \text{ET}_{\text{pc}}} \right)^{\lambda_i} = \frac{Y_{\text{pred}}}{Y_{\text{pot}}} \quad (3)$$

其中 ET_{calc} 和 ET_{pc} 分别为所研究作物(玉米)

的蒸散量计算值(mm)和潜在蒸散量(mm); n 为选择的代表作物生长期的生育期数量; λ_i 为第 i 个生育期中作物对水分胁迫的相对敏感性。通过(3)式 $CSDI_{pred}$ 和 Y_{pot} ($kg\ ha^{-1}$) 的乘积可以得到预测产量 (Y_{pred}) ($kg\ ha^{-1}$)。

显而易见, (1)式中的 W_{pot} 相当于(3)式中的 ET_{pc} ; 然而 Nairizi 和 Rydzewski (1977) 在用不同水分处理的实验中, 已经用计算的雨养玉米蒸散量 ET_{calc} 代替了 W_{pot} 项。由(3)式, 通过考虑以下两个重要标准, 就可以估计出干旱对产量的影响: (i) 作物实际消耗的水分与它的可能消耗量的比(即水分胁迫的程度); (ii) 作物对水分胁迫比较敏感或不太敏感的物候发育阶段。

CSDI 模式的基础是土壤水分平衡, 它可以计算土壤剖面中每日的含水量。本研究所用的土壤水分模式由 Hanks (1974) 研制, 1983 年 Hubbard 和 Hanks 对其进行了修改, 最近 Robinson 和 Hubbard 又做了进一步修正(1990)。土壤水分平衡模式在前一天水分值 S_0 (mm) 以及其它观测或估算的土壤水分平衡分量的基础上, 计算了根区的总土壤水分含量、逐日降水量 P (mm)、计算的蒸散量 ET_{calc} (mm)、径流量 R_0 (mm)、根区下的排水量 D_r (mm), 输入(4)式

$$S = S_0 + P - ET_{calc} - R_0 - D_r \quad (4)$$

因为此模式仅考虑雨养玉米, 所以水分平衡中未考虑灌溉。径流——通常是一个很难估计的变量, 因此只在 24 小时(00:00—24:00)内液态降水超过 25mm 时才考虑。由重力引起的排水量则通过 Campbell (1985) 推导的各层中的水分运动公式计算, 且认为排水量即从底层流出的水量。

可能蒸散 ET_p (mm) 由 Penman 方法 (1948) 年计算得到

$$\rho_w L_v ET_p = [\Delta(R_n - G) + \gamma f(U_2) \cdot (e_s - e_a)] / (\Delta + \gamma) \quad (5)$$

其中 ρ_w 、 L_v 、 R_n 、 G 、 $f(U_2)$ 、 e_s 和 e_a 分别为液态水的密度 ($kg\ m^{-3}$)、蒸发潜热 ($MJ\ kg^{-1}$)、净辐射 ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)、土壤热能量 ($MJ\ m^{-2}$

d^{-1})、2 米处的风函数 ($MJ\ kPa^{-1}\ m^{-2}\ d^{-1}$)、饱和水汽压 (kPa) 及实际的空气水汽压 (kPa)。式中 γ 为干湿表常数, Δ 为饱和水汽压曲线的斜率。净辐射 R_n 用 Kincaid 和 Heermann (1974) 的系数和公式来估算, 其中使用了实际总辐射、预计的晴天总辐射(为天数的函数)以及预计的晴天净反射长波辐射(为平均露点及最高、最低气温时的饱和水汽压的函数)。土壤热通量 G 设为零, 以前对它的估算研究 (Norman 和 Nielsen, 1983) 并未增加 ET_p 估算的准确率。风函数 $f(U_2)$ 也用 Kincaid 和 Heermann 的推导式表示为 $0.26(1.1 + 0.011W)$, 其中 W 为风速 (km/天)。饱和水汽压 e_s 由最高气温和最低气温时的平均饱和水汽压来估算, 实际水汽压 e_a 则认为是平均露点温度时的饱和水汽压。

土壤水分平衡模式中计算的蒸散包括地表蒸发 (E) 的计算和作物蒸腾 (T) 的计算(即 $ET_{calc} = E + T$), 地表蒸发 (mm) 用最近一个降水事件以来的天数 (d) 的函数来计算, 但仅限于能够贮存在表层 25mm 内的水量。

$$E = E_p \left(\frac{1}{d}\right)^2 \quad (6)$$

其中设 E_p 等于 ET_p ; 这样, E 就假定为降水事件当天的 ET_p 。读者必须了解本研究中的 ET_p 是在指定当天地球表面总能量变化的基础上计算的。在确定其两个分量 E 和 T 的数值时, 首先考虑 E , 剩余能量才是 T 可以利用的。然而, 如果可用于表层蒸发的水量少于计算的 E 值时, 那么这部分能量对 T 就变成可利用的。

计算的蒸腾 (T) (mm) 表示为:

$$T = (f)(K_c)(ET_p - E) \quad (7)$$

其中 K_c 为作物系数 (Hinkle 等, 1984), 它是作物对物候发育的响应 (Hanway, 1971), f 为土壤水分减少因子, $ET_p - E$ 为已用于地表蒸发消耗而剩下的那部分潜在蒸散的能量。

当土壤水分接近凋萎湿度时, 土壤水分减少因子 f 限制了作物的水分利用

$$f=1.0, \quad \text{如果}(S/WHC)>F$$

$$f=S/[F(WHC)], \quad \text{如果}(S/WHC)\leq F$$

持水量(WHC)为各层中可被作物利用的潜在有效水分,其值用田间持水量和凋萎湿度时的容积水含量的差值估算。 F 值代表有效水分与潜在有效水分的临界比。当 S 与 WHC 的比降到 F (临界值)以下时,计算的蒸腾按 $(1-f)$ 减少。 F 值的变化取决于土壤质地,但在田间持水量附近蒸腾一般不受土壤水分水平的影响。对本研究中涉及的土壤质地而言,采用Dyer和Baier(1979)提出的 $F=0.5$ 。

玉米的可能蒸散(ET_{pc})(mm)是作物系数和可能蒸散的蒸散的函数

$$ET_{pc} = (K_c)(ET_p) \quad (8)$$

采用内布拉斯加州中东部CRD 8年资料来推导CSDI模式(表2略),推导中使用了高、中、低三种产量年份的资料,以便得到更好的模式。选择内布拉斯加州中东部CRD是因为,(i)它有开展这项工作所需的最大的数据库;(ii)由于位于玉米带的最西部,其气候变异性较大。尽管有一些年份较湿润,但通常相当干燥(在降水和湿度方面均有表现),且比本研究中所用的东部州要暖得多。这样,在内布拉斯加州这种气候条件下性能良好的模式就有可能在较少极端气候条件下很好地运行。

尽管CSDI中模拟的生育期的个数是经验地推导出来的,但由于这种表示对玉米生长发育的物候描述(Hanway, 1971)较确切,又有大量关于对玉米具体生长阶段中的胁迫效应的研究,因此还是决定使用这种生育期(如Robins和Domingo(1953)等)。CSDI模式中使用了四个生育期(见表3),本文第二部分(I)用到了这四个生育期及相应的各个生长阶段。

(3)式中敏感性系数 λ_i 的数值通过(3)式的展开和数学处理来确定

$$\ln\left(\frac{Y_{act}}{Y_{pot}}\right) = \lambda_1 \left[\ln\left(\frac{\sum ET_{calc}}{\sum ET_{pc}}\right)_1 \right]$$

$$+ \lambda_2 \left[\ln\left(\frac{\sum ET_{calc}}{\sum ET_{pc}}\right)_2 \right] + \lambda_3 \left[\ln\left(\frac{\sum ET_{calc}}{\sum ET_{pc}}\right)_3 \right]$$

$$+ \lambda_4 \left[\ln\left(\frac{\sum ET_{calc}}{\sum ET_{pc}}\right)_4 \right] \quad (9)$$

用矩阵代数来求解这四个敏感性系数($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$)。由于该方法需要一个方阵,因此四个方程要同时求解,从而得到四个 λ 值的精确解。然而,因为用8年资料来推导该模式(其中一次仅能用4年资料),故对8年的每种可能组合都进行计算,产生70组 λ 值。

表3 用于推导CSDI模式所用的物候生长阶段和生育期的划分

时段	Hnaway的约定	生育期的划分	敏感性系数
1	播种至12叶	营养生长	0.058
2	14叶至16叶	胚珠发育	-0.179
3	吐丝至鼓粒	生殖生长/籽粒灌浆前期	1.539
4	乳熟至成熟	成熟	0.032

对得到的70组敏感性系数 λ_i 进行筛选,消除有一个或一个以上的 λ_i 值大于 ± 15 的那些组,这样做是为了消除由于某个 λ_i 值异常偏大而产生的偏离(λ_i 值异常偏大可认为是由于用以推导该组的一年或一年以上的年份中的非天气因素引起的)。对于 ± 15 的限制是通过分析 λ_i 值的频率分布后选出的。在频率分布中不仅有自然的间断点,而且正态分布曲线与 ± 15 限定处理后的资料也十分吻合。如果假设资料中包含正态分布误差,那么对 λ_i 值做 ± 15 的限定是合理的。筛选处理后,剩余的 λ 值对生育期平均,产生一组 λ 值。表3的 λ_i 值为CSDI模式推导的平均敏感性系数。

用内布拉斯加中东部CRD剩余10年资料及其它三个地点的9年资料(1972—1980);密苏里州东北部的CRD、威斯康星州中南部的CRD、印第安纳州中部的CRD资料进行CSDI模式验证。本文使用了广泛用于衡量吻合程度的 r^2 值。但是, r^2 与模式的运行性能的关系并不总是有指示意义,正如Willmott(1981)提醒的那样,它不能被单独

用于模式性能的分析。Willmott 和 Wicks (1980) 注意到, Pearson 的积距相关系数 (product-moment correlation coefficient) r 及简单可决系数 r^2 的高值与观测值和模式预测值之间差值的大小通常是无关的。因此, 本文还另外使用了 Willmott 的评估模式性能的吻合 D 指数, 表示为:

$$D = 1 - [\Sigma(P_i - O_i)^2 / \Sigma(|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2] \quad (10)$$

其中 P_i 和 O_i 分别为对第 i 年预测和观测的 CSDI 值, O 为观测的 CSDI 值的平均值。当与 r^2 统计对比时, D 指数对模式系统误差的反应比 r 、 r^2 更敏感, 并能反映出模式的系统偏差, D 值的变化范围从完全不吻合的 0.0 到完全吻合的 1.0。本文用到的其它一些模式性能量度有均方根误差 RMSE 及其系统分量 E_s 和非系统分量 E_n , 以及平均绝对误差 MAE, MAE 是一种表示 CSDI 预测值和实际值差异的平均量值, 一般认为它对极端值的反应不像均方根误差 RMSE 那么敏感 (Fox, 1981)。

$$E_s = [N^{-1} \Sigma(P_n - O_n)^2]^{1/2} \quad (11)$$

$$E_n = [N^{-1} \Sigma(P_i - P_n)^2]^{1/2} \quad (12)$$

$$RMSE = (E_s^2 + E_n^2)^{1/2} \quad (13)$$

$$MAE = N^{-1} \Sigma |P_i - O_i| \quad (14)$$

其中 P_n 通过 $CSDI_{pred}$ 与 $CSDI_{act}$ 回归关系式的斜率 b 和截距 a 来计算 ($P_n = a + (b \times O_n)$)。

结果与讨论

对 λ_i 值的检验揭示出产量对四个生育期中的每个生育期的水分亏缺的相对敏感性。由于 λ_i 值是指数系数, 因此相对较大的正 λ_i 值表明产量在该特定生育期对水分胁迫特别敏感。相反, λ_i 相对较小时, 无论是负值还是正值, 都表明产量对该生育期的胁迫条件不敏感。如表 3 所示, 只有第三生育期 (生殖生长/籽粒灌浆前期) 的 λ_i 值相对较大。这和一些文献所述的一致 (Robins 和

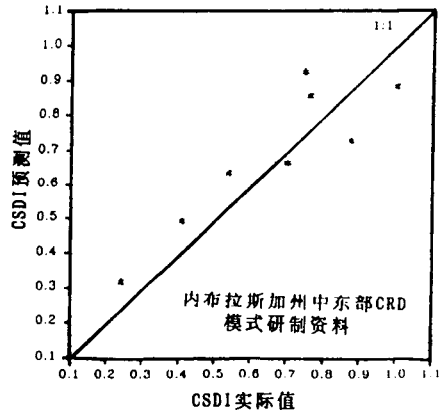


图 1 模式推导的内布拉斯加州中东部 CRD 的 $CSDI_{pred}$ 与 $CSDI_{act}$ 线性相关图

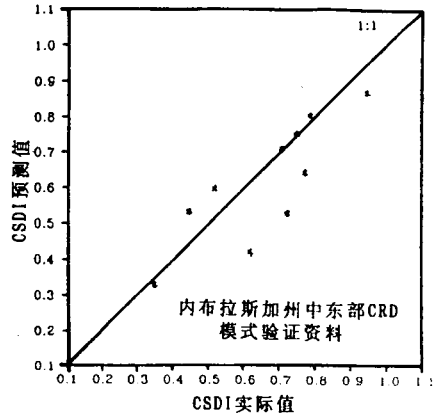


图 2 用内布拉斯加州中东部 CRD 10 年资料进行模式验证产生的 $CSDI_{pred}$ 与 $CSDI_{act}$ 线性相关图

Domingo (1953) 等)。表 3 列出了 CSDI 模式 ((3) 式) 中所使用的 λ_i 值。

表 4 (略) 列出 $CSDI_{act}$ 、 $CSDI_{pred}$ 及模拟的四个生育期的 ET_{calc}/ET_{pc} 比值, 这些比值同敏感性系数一起用来计算 $CSDI_{pred}$ 。它们可以作为一种基准, 使读者对各个生育期的 ET_{calc}/ET_{pc} 比值的量级以及它们在正常时段或干湿交替时段所受到的影响有所了解。

图 1 至图 5 (图 3—5 略) 为 $CSDI_{pred}$ 与 $CSDI_{act}$ 的值, 表 5 为统计结果。和期望的一样, 用内布拉斯加州中东部 CRD 8 年资料导出的 CSDI 模式运行良好 (按 r^2 和 D 指数评定), 可决系数 r^2 为 0.791, 吻合 D 指数为

表 5 CSDI 模式性能统计结果

地 点	r^2	D 指数	E_s	E_n	RMSE	MAE
内布拉斯加州中东部 CRD (用于推导的年份)	0.791	0.928	0.067	0.090	0.112	0.103
内布拉斯加州中东部 CRD (用于验证的年份)	0.687	0.895	0.055	0.091	0.106	0.081
密苏里州东北部 CRD	0.756	0.873	0.091	0.097	0.134	0.119
威斯康星州中南部 CRD	0.680	0.903	0.031	0.077	0.083	0.073
印第安纳州中部 CRD	0.319	0.721	0.044	0.094	0.104	0.095
验证资料汇总	0.709	0.903	0.041	0.101	0.109	0.092

0.928(表 5)。由图 1 可见一个良好的线性关系,数值点均较好地落在 1:1 线条的附近。然而,奇怪的是这些模式预测值都接近系统误差 E_s 、均方根误差 RMSE 和平均绝对误差 MAE 中的最高误差值,这可能是由于推导该模式时采用的气候条件范围较广所致。

在用内布拉斯加州中东部 CRD 其余 10 年资料对模式进行验证时的 r^2 和 D 指数值均表明 CSDI_{pred} 与 CSDI_{act} 之间存在着较好的一致性(分别为 0.687 和 0.895)。图 2 中,有 2 年因估算偏低而显得突出。反查表 4,可以看到 1984 与 1989 年相当相似,生殖生长至籽粒灌浆前期 ET_{calc}/ET_{pc} 的比值相对较低。CSDI 模式明显地过分补偿了这一阶段的水分胁迫,导致过低估算 CSDI_{pred}。误差值也相对较低,表 5 中 E_s 、 E_n 、RMSE 和 MAE 分别为 0.055、0.091、0.106 和 0.081。

类似地,对密苏里州东北部、威斯康星州中南部和印第安纳州中部的 CRD 模式运行

情况分别进行了验证(表 5)。

把四个 CRD 的验证资料进行汇总, r^2 和吻合 D 指数分别为 0.709 和 0.903, E_s 和 E_n 分别为 0.041 和 0.101, RMSE 和 MAE 分别为 0.109 和 0.092(见表 5)。

总的说来,CSDI 模式在不同的气候条件和地理位置范围内均运行良好。可决系数的值一般在 0.70 左右, D 指数值一般在 0.90 左右;系统误差 E_s 平均为 5.6%,非系统误差 E_n 平均为 9.0%;这样, RMSE 平均为 10.6%,CSDI_{pred} 和 CSDI_{act} 之间的平均误差为 9.2%。基于上述结果,我们认为玉米 CSDI 模式可以为所研究作物报告区提供一种干旱对玉米产量影响的比较准确的评估。

显然,经研究能提出一组用于整个美国玉米带的敏感性系数 λ_i 值。模式内还有许多因素没有考虑到(如杂种变异、病虫害、冰雹、风害及土地质量),这些因素无疑是模式中一些系统误差和非系统误差产生的原因。