

文章编号:1004-4574(2010)06-0040-15

我国主要农业气象灾害指标研究进展

张 倩,赵艳霞,王春乙

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要:由于我国气候复杂,作物在其生育期间经常会遭遇农业气象灾害,其中干旱、低温冷害、寒害和高温热害是我国常见的农业气象灾害。针对这 4 种灾害,归纳了其常用的灾害判别指标,并对各种指标的优劣、界定范围及其在各领域的主要用途进行了总结,同时也对目前灾害指标存在的问题和改进的方向提出了看法,为今后进一步改进灾害指标及各类灾害的监测评估及防灾减灾工作提供参考。

关键词:农业气象灾害;农业干旱;低温冷害;寒害;高温热害;指标

中图分类号:S42

文献标识码:A

Advances in research on major agro-meteorological disaster index in China

ZHANG Qian, ZHAO Yan-xia, WANG Chun-yi

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Owing to the complexity of climate conditions, agro-meteorological disasters is more frequent during crops' growing period in China. there are mainly four sorts of agro-meteorological disasters—drought, cool damage, chilling injury and hot damage. In the light of climate change and constant improving agricultural production technologies, further research on agro-meteorological disaster index is necessary. On the basis of the published researches, this paper summarizes and improves the indexes used to define the four disasters and discusses the advantages and disadvantages of each index. In addition, the range of each index and their use in different fields were discussed. This paper tries to provide a foundation in disasters supervision and assessment, as well as supplies a reference to preventing and mitigateing the disasters. Research trend is also put forward to improve the applicability of the indexes in China.

Key words: agro-meteorological disasters; drought; cool damage; chilling injury; hot damage; index

我国地处东亚季风区,气象条件年际波动较大,是农业气象灾害的多发地区。全国各地干旱、洪涝、低温冷害、寒害、高温热害等气象灾害频繁发生,对我国农业生产影响尤为严重。据统计,我国每年因各种气象灾害造成的农田受灾面积达 $34 \times 10^6 \text{ hm}^2$,造成的经济损失约占国民生产总值(GDP)的 3%~6%^[1]。尤其是近年来,在全球变暖为主要特征的气候变化背景下,极端气象及气候灾害有增加的趋势,使农业结构、农业病虫害及农业气象灾害发生规律产生了变化,导致我国农业生产的不稳定性增加,使防灾减灾任务更加紧迫。

收稿日期:2009-05-23; 修订日期:2010-06-16

基金项目:公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY200806008);国家科技支撑计划课(2006BAD04B09);国家自然科学基金项目(40575058)共同资助

作者简介:张倩(1984-),女,硕士研究生,主要从事农业气象灾害研究. E-mail: zhqiane@163.com

通讯作者:赵艳霞,女,研究员. E-mail: zyx@cma.gov.cn

农业气象灾害指标是评判灾害的标准,也是开展影响评估的基本工具。目前,虽然有多种农业气象灾害指标,但由于研究目的的不同,每一种指标都有其自身的优缺点,有其一定的适用领域和范围。在气候变化背景及农业生产已经发生重大变革的今天,急需对现有的农业气象灾害指标进行归纳和总结,以便在此基础上,综合考虑气候变化、作物品种更替以及农业措施的改进等因素,研究新一代的重大农业气象灾害指标。本文主要归纳了四种常见的农业气象灾害即干旱、低温冷害、寒害和高温热害指标,并对各种指标的优劣、界定范围及其在各领域的主要用途进行了初步分析,同时也对目前灾害指标存在的问题和改进的方向提出看法,为今后进一步改进灾害指标及为各类灾害的监测评估及防灾减灾工作提供参考依据。

1 农业干旱

从气候角度,干旱的根本原因是雨量减少,蒸发量增加,使得水分严重短缺。目前描述气候干旱的指标主要有:降雨量,无雨日数及降水距平、标准差等^[2]。这些干旱指标以自然降水作为判别气候干旱的首要因素,能够基本反映气候干旱的发生趋势。

农业干旱是指长时间降水偏少,造成空气干燥,土壤缺水,使农作物体内水分发生亏缺,影响正常生长发育而减产的一种农业气象灾害^[3]。农业干旱是农业生产上最为严重的一种农业气象灾害,也是中国小麦生产的主要限制因素之一。由于农业干旱与作物有关,其成因及影响有一定复杂性,因此判别农业干旱的指标也较气候干旱指标复杂。常用的农业干旱指标通常考虑降水量、土壤水分、作物需水量等;另外,由于遥感在干旱监测中的广泛使用,还出现了一些包含遥感信息的干旱指标。

1.1 土壤含水量指标

作物生长所需水分主要来源于土壤,土壤中水分含量的多寡会直接影响作物根系的吸水情况。当土壤含水量少时,作物根系吸水困难,水分满足不了作物需要,故阻碍作物正常生长。因此,农业气象上常用的干旱指标很多包含了与土壤水分有关的因子。

1.1.1 土壤湿度

土壤湿度是指土壤水分重量占干土重的百分数(质量湿度),也有以土壤水分容积占土壤总体积的百分数表示(容积湿度);土壤相对湿度是土壤湿度占田间持水量的百分比。土壤湿度低于某一数值时,作物吸收不到足够的水分就会受旱。不同质地土壤,植物受旱的土壤湿度阈值不同。一般地,砂性土壤值较小,粘性土壤值较高,且砂粒越粗值越小,越细值越大(见表1)^[4-5]。

表1 不同质地土壤干旱指标
Table 1 Drought indexes for different soil textures

土壤质地 种类	砂壤土	轻壤土	中壤土	重壤土	轻粘土	中粘土
质量湿度/%	4~6	4~9	6~10	6~13	15	12~17
容积湿度/%	5~9	6~12	8~15	9~18	20	17~24

目前,较常用的土壤湿度指数为20cm深的土壤相对湿度(S_d)。用土壤相对湿度作农业干旱指标时,干旱程度界定为:当 $60\% > S_d > 50\%$ 时,干旱程度为轻旱;当 $50\% > S_d > 40\%$ 时,干旱程度为中旱;当 $S_d < 40\%$ 时,干旱程度为大旱^[6-7]。

土壤湿度干旱指标是实际干旱程度很好的一种反映,判别农业干旱比较方便,可以直观地表示作物生长的供水状况,作为农业干旱指标有很大的优越性。但由于现有土壤湿度观测资料年代较短,湿度观测深度不够,不能完全反映有些作物吸水层的真实湿度情况,在使用中存在一定问题^[8]。

1.1.2 土壤有效水分存储量

土壤里贮存的能被植物利用的水分多少决定了作物的水分供应状况,当土壤有效水分存储量少到一定程度,作物将存在受旱的危险。土壤某一厚度层中存储的能被植物根系吸收的水分叫土壤有效水分存储量S,其计算式如下^[4-5]:

$$S = (W - W_w) \times \rho \times h \times 0.1.$$

(1)

式中 W 为土壤湿度(质量湿度%), W_w 为凋萎湿度, ρ 为土壤容重(单位为 g/cm^3), h 为土层厚度(单位为 cm)。由公式可见, 土层厚度不同, 土壤有效水分贮藏量的干旱指标也不同。如谷类作物分蘖到拔节时期 0~20cm 土层中土壤有效水分贮存量少于 20cm, 作物就会因缺水而影响生长; 不足 10cm 就会明显受旱。拔节到开花时期 1m 深土壤有效水分贮存量少于 80cm, 作物就会因水分不足受旱。土壤有效水分存储量指标可以反映土壤的缺水程度及评价农业旱情, 在判别农业干旱时需要依据作物种类、发育时段、根系的深度及土壤特性等决定, 涉及的参数有一定复杂性。

1.2 作物需水量指标

作物需水量是指土壤水分充足、作物正常发育状况下, 农田消耗与作物蒸腾和株间土壤蒸发的总水量。目前国内外常用方法是计算出标准蒸散量, 再通过作物需水系数的订正, 算出实际作物需水量^[9]。该类指标生物学意义比较明确, 是常用的农业干旱指标, 但计算相对复杂。

1.2.1 积分湿度指标

元来福等^[10]在评价我国干旱状况时, 定义了一个定量而又比较简单的积分湿度指标(I):

$$I = \sum_{i=1}^n K \times T_i \sum_{i=1}^n T_i.$$

(2)

式中: I 为年内月平均气温 $>0^\circ\text{C}$ 时期的积分湿度指标, T_i 为月平均气温, n 为月平均气温 $>0^\circ\text{C}$ 的月数, K 为月湿润指数, $K = R/0.16 \sum t$, 其中, R 是月降水量, $\sum t$ 是大于 0°C 的月积温。系数 0.16 是根据灌溉试验资料确定的, 在干旱地区可取小一点, 在湿润地区可取大一点。 $K = 1.0$ 表示农业水分供需平衡; $K > 1.0$ 表示水分供大于求; $K < 1.0$ 表示水份不足引起干旱, K 值越小于旱越严重。为了分析四季农业干旱状况, 先统计多年逐年逐月湿润指数, 然后按春(3-5月)、夏(6-8月)、秋(9-11月)、冬(12-2月)计算季湿润指数, 划分干旱等级(见表2)。

用积分湿度和季湿润指数对全国范围内自然降水对农业需水的满足程度和干旱程度进行评价, 结果定量客观, 并可在大范围进行比较, 但只适用于月平均气温 $>0^\circ\text{C}$ 的时期, 难以评价北方冬季农业干旱状况。

1.2.2 水分平衡指标

在农作物生长期间, 综合考虑降水、农作物的需水和土壤含水量, 才能比较全面地反映农业干旱的实际情况^[11]。王密侠等在陕西省作物旱情预报系统的研究中, 根据农田水量平衡原理, 建立的作物供需水比例指标(K_d)^[12]:

表 2 按季湿润指数值划分的干旱等级

Table 2 Drought degrees classified by quarterly moisture index

K 值	干旱等级	干旱程度
≥ 1.00	0	无旱
0.76 ~ 0.99	1	轻旱
0.51 ~ 0.75	2	中旱
0.26 ~ 0.50	3	重旱
≤ 0.25	4	严重旱

$$K_d = \frac{P_0 + G + (W_1 - W_0) + I}{(W_2 - W_0) + E_T}.$$

(3)

式中: P_0, G, I 分别为时段内有效降雨量、地下水补给量和灌溉量; W_1, W_2 分别为时段初和时段末作物根系活动层内土壤含水量; W_0 为作物根系活动层内土壤凋萎含水量; E_T 为时段内充分供水条件下作物潜在需水量。 K_d 值的大小, 反映了土壤-植物-大气连续体中的水分状况。当 $K_d \geq 1.0$ 时, 表示农田水分满足作物水分需求外尚有盈余; $K_d < 1.0$ 时, 表示农田水分对作物供应出现亏缺, 作物可能受旱, K_d 越小受旱程度越重。通过对冬小麦等作物的试验可初步确定 K_d 值划分干旱程度的标准为: $K_d > 1.3$ 时, 作物水分过多; $1.3 \geq K_d > 0.8$ 时, 作物水分正常; $0.8 \geq K_d > 0.6$ 时, 作物开始受旱; $0.6 \geq K_d > 0.4$ 时, 作物中等干旱; $0.4 \geq K_d > 0$ 时, 作物严重干旱。

水分平衡指标物理概念明确, 综合考虑了水量平衡的各个因素, 比较全面, 并与农作物需水量相联系, 能较好地反映农业干旱的时空变化规律, 在我国旱作农业区应用较广。但它的缺点同样是考虑的参数较繁杂,

实际操作中某些参数难以确定。

1.3 温度指标

农田实际蒸散量与最大蒸散量之比能反映作物需水与土壤供水的关系,作物层温度与气温差则反映了植物蒸腾强度的变化。当土壤干旱时,叶片蒸散失去的水分得不到及时的补给,气孔阻力加大,蒸腾减弱,叶温就会升高,且高于气温,土壤水分越少叶温与气温差值越大。一般地,13~15时,植物叶片蒸腾最强,此时若水分得到满足,一天其它时刻都能满足;若缺水,则这段时期内缺水情况也最为严重。董振国^[13]提出了用13~15时作物层温度与气温差表示的干旱指标(S):

$$S = \sum_{n=1}^N (T_c - T_a), \quad (T_c > T_a).$$

(4)

式中: n 是作物层温度高于气温时的起始日期, N 是 S 值达到预定缺水指标时的天数, T_c 为作物层温度(冠温), T_a 是作物层顶以上2.0m处的空气温度。当土壤水分减少到某一值以下时,作物层温度开始高于气温,连续 N 天正值温差累加值大于 S 时,表示农田水分缺失。 S 值等于或大于50℃时,表示0~50cm土壤含水量下降到15%以下,小麦开始缺水^[4-5]。

很多学者都对该指标进行过一定介绍^[14-15],它的优点在于可以与遥感技术相结合,通过遥感技术迅速地准确地测得大面积作物的冠层温度,对农业旱情进行分析评价,进而迅速地作出相应对策。但是气温指标也同降水指标一样,不能较准确地对农作物遭受的干旱程度作出评价。

1.4 Palmer 干旱指数

1965年,Palmer^[16]提出了目前国际上应用最为广泛的帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI),用于测量水分供给的累计偏差,这是一种理想的监测不同地区和时间水分情况的指数。

该指数的计算过程大致可分为两步,一是计算水分平衡各量的实际值、可能值及平均值,求出有关气候常数和系数(蒸散系数、土壤补水系数、径流系数和土壤失水系数),进而得到气候上适宜的降水量($\hat{P}$):

$$\hat{P} = \hat{E}_T + \hat{R} + \hat{R}_0 - \hat{L}$$

(5)

式中: $\hat{E}_T, \hat{R}_0, \hat{L}$ 分别为本月气候适宜蒸散量、土壤补水量、径流量和失水量。

第二步是先求出各月实际降水量(P)与气候适宜降水量的距平(d): $d = P - \hat{R}$;通过计算权重 K ,得到表示水分盈亏程度的水分距平指数: $Z = K \cdot d$;在此基础上,考虑干旱等级与水分距平累积量和持续时间的关系,得出帕默尔指数(x):

$$x_i = Z_i/3 + 0.897x_{i-1}.$$

(6)

式中: i 为时间(月)。通过与PDSI指数干旱等级的对照,便可得到有关地区的干旱情况。表3为美国使用的干湿等级。

1985年安顺清等^[17-18]为了得出在时间和空间上相对独立的干旱指标,利用我国济南、郑州的气象站资料对帕默尔旱度模式进行了修正,分析建立了适合我国气候特征的改进Palmer干旱模型,并应用这个模型对我国一些地区的干旱情况进行了研究探讨。修正后的帕默尔指数为:

$$x_i = Z_i/57.136 + 0.805x_{i-1}.$$

(7)

利用此模式计算的我国北方地区站点的帕默尔指数值与一些文献记载的实际旱涝灾情况进行验证表明,进一步修正的帕默尔旱度模式能较为准确地评估旱涝情况,特别是对一些严重的干旱时段能较客观地反映实际旱涝程度^[19],而且在一些研究工作中该模式的应用已经取得一定进展^[20-23]。

是一种重要的综合干旱指标,在美国已经成为半官方的干旱指标,现在又叫做帕默尔干旱情景(Palmer drought outlooks),其研究历史已有几十年。该指标加入了降水、蒸散和土壤含水量等多种因子的影响,在干旱量化准确度上要比其它指标高。并且,同时考虑了某一时段的水分短缺量、持续时间及程度的变化,在描述农业干旱的起止时间、持续时期及干旱程度时,都具有较高的可信度。但是具体计算相对比比较复杂,并且需要结合当地的实际情况开展一定研究工作,确定好相应的参数后方可使用。

1.5 基于遥感的干旱指标

为了尽量减小干旱对农业的影响,有必要进行大范围旱情的监测,为抗旱提供重要的技术支撑。遥感由于具有大范围可重复观测的特点,相对于传统干旱监测方法有着明显的优势,因此近年来被广泛用于旱情监测,且取得了大量成果^[5]。

1.5.1 植被指数指标

作物的长势可以直接反映出干旱的情况,当作物受旱缺水时,作物的生长将受到限制和影响,反映绿色植物生长和分布的特征函数——植被指数(NDVI)将会降低,所以监测各种植被指数的变化,也是干旱遥感监测的基本方法之一^[24]。

1.5.1.1 距平植被指数(AVI)

陈维英等^[25]在对1992年特大干旱进行监测研究时,使用了距平植被指数(AVI),其表达式为:

$$AVI = NDVI_i - \overline{NDVI}$$

(8)

式中:NDVI_i为特定年第*i*时段某像元的值NDVI, $\overline{NDVI}$ 为多年该时段NDVI的平均值。如果AVI>0,表明植被生长状况较一般年份好;如果AVI<0,表明植被生长状况较一般年份差。一般而言,AVI为-0.1~-0.2时,表示旱情出现;为-0.3~-0.6时,表示旱情严重。使用距平植被指数反映干旱情况比较简单直观。

1.5.1.2 植被状态指数(VCI)

NDVI是对地表植被覆盖以及生长状况的度量,某地区多年的最大和最小值能够反映该地区某年最佳和最差气候条件^[26]。根据这些特点,Kogan^[27-28]将多年进行归一化,作为量化气候影响的指标,提出了条件植被指数(VCI):

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

(9)

式中:DNVI_i为特定年第*i*时段某一像元的值NDVI;NDVI_{max},NDVI_{min}分别为研究年限内年第*i*时段同一像元NDVI的最大和最小值。VCI值越小,表明植被生长状况越差,存在水分胁迫,从而反映出干旱情况^[29]。

植被状态指数能够较好地反映水分胁迫状况,不但能监测和跟踪区域干旱,还能描述植被时空变化,是应用最为广泛的一种卫星遥感干旱指数。但是使用植被状态指数法监测干旱时要求监测区域具有较长时间的DNVI资料,且其监测结果会受遥感数据的数量和质量影响。

1.5.1.3 植被温度指数(TCI)

由于温度与植物生长关系密切,与植被状态指数定义类似,Kogan^[30]还提出了植被温度指数(TCI):

$$TCI = \frac{T_{max} - T_i}{T_{max} - T_{min}}$$

(10)

式中:*T_i*为特定年第*i*时段某一像元的地表温度;*T_{max}*和*T_{min}*分别表示在所研究年限内第时段同一像元地表温度的最大和最小值。同样,TCI的值越小,表示该时段植被生长状况越差,水分胁迫越严重。

表 3 帕默尔指数干湿等级

Table 3 Palmer index dry and moisture degrees

帕默尔指数值(<i>x</i>)	等级
≥ 4.00	极端湿润
3.00 ~ 3.99	严重湿润
2.00 ~ 2.99	中等湿润
1.00 ~ 1.99	轻微湿润
0.99 ~ -0.99	正 常
-1.00 ~ -1.99	轻微干旱
-2.00 ~ -2.99	中等干旱
-3.00 ~ -3.99	严重干旱
≤ -4.00	极端干旱

植被温度指数法基于植被冠层或土壤表面温度随着水分胁迫的增加而增加这一原理,与植被状态指数具有同等指示作用。VCI,TCI 值的变化范围都为 0~1,0 值为水分胁迫最厉害的情况;1 值为水分状况最好的情况^[31]。

1.5.1.4 植被温度状态指数(VTCI)

由于干旱发生的时间和地点存在着时空变异,所以在像元水平上,AVI,VCI,TCI 三种干旱指标可能不同,进而造成某一特定时期内不同像元之间的监测结果可比性较差。基于此,王鹏新等^[32]提出了条件植被温度指数(VTCI):

$$VTCI = \frac{T_{NDVlimax} - T_{NDVli}}{T_{NDVlimax} - T_{NDVlimin}}, \tag{11}$$

$$T_{NDVlimax} = a + b \times NDVI_i, \tag{12}$$

$$T_{NDVlimin} = a' + b' \times NDVI_i. \tag{13}$$

式中, $T_{NDVlimax}$ 与 $T_{NDVlimin}$ 分别表示在研究区域内,当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时的所有像元的地表温度的最大和最小值; T_{NDVli} 表示某一像元的 $NDVI$ 值为 $NDVI_i$ 时的地表温度。 a,b,a',b' 为待定系数,可由地表温度(LST)和植被指数散点图估算出来。VTCI 的取值范围也是 0~1,的值越小,VTCI 代表干旱程度越严重^[33]。

使用植被温度状态指数法监测干旱发生发展时,要求研究区足够大且土壤表层含水量变化范围为凋萎含水量到田间持水量之间^[31]。植被温度状态指数既考虑了归一化植被指数变化,又考虑了相同条件下地表温度的变化,适用于分析某一特定年内某一时期某个区域的干旱程度及其变化规律。

1.5.1.5 植被供水指数(VSWI)

刘丽等^[34]在贵州的干旱遥感监测中,使用了植被供水指数法,综合考虑了植被指数和植被冠层温度两个因子,取得了较好效果,其表达式为:

$$VSWI = \frac{NDVI}{T_s}. \tag{14}$$

式中, T_s 为植被冠层温度是第 4 通道的亮温,VSWI 代表作物受旱程度的相对大小,值越小,表明植被冠层温度越高,植被指数越低,作物受旱越重。一般而言,当作物供水正常时,在一定生长期卫星遥感的植被指数和植被冠层温度将保持在一定范围内,如遇到干旱,作物供水不足,生长受到影响,卫星遥感的植被指数将降低,而冠层温度将升高。

此方法物理意义明确,较适用于蒸腾较强的植被情况及常年植被覆盖较高的地区,一般使用单时相遥感资料即可对旱情进行监测。但在植被分布状况差异较大的区域条件下,监测结果会受到一定影响。

1.5.2 热惯量指数(ATI)

热惯量是土壤阻止温度变化的一个度量,反映了土壤的热学特性。Watson 等^[35]最早提出了热惯量模式。Price 等^[36]在平衡方程的基础上,简化潜热蒸发形式,引入地表综合参数概念,提出了表观热惯量(ATI)的概念,其表达式为:

$$ATI = \frac{2Q(1 - a)}{\Delta T}. \tag{15}$$

式中: Q 为太阳总辐射通量, a 为地表反照率, ΔT 为地表日最高、最低温度差。土壤表观热惯量是土壤热稳定性的量度指标,与土壤密度、比热和热传导率存在一定相关,进而也就与决定上述因素的土壤含水量存在一定相关性。一般可通过遥感获取地表的有关信息,推算出热惯量及热惯量与土壤含水量之间的关系,从而达到监测土壤水分状况和干旱发生趋势的目的^[37]。

表观热惯量法用于监测土壤温度比较稳定,在遥感监测干旱研究中得到广泛应用。该指数要求昼夜两次的晴空卫星资料,适合于在裸露植被或植被覆盖度较低的情况下使用,对于作物覆盖度较高的地区,会影响其监测效果。

1.5.3 作物缺水指数(CWSI)

可能蒸散指全覆盖条件下水分供应充足时的蒸散。实际蒸散是在实际土壤水分和大气条件下受作物特性和状态所制约的蒸散量^[38]。Jackson 等^[39]考虑了土壤水分和农田蒸散两方面因素进行干旱监测,提出了作物缺水指数(CWSI),其表达式为:

$$CWSI = \frac{ET - ET_a}{ET} = 1 - \frac{ET_a}{ET} \tag{16}$$

式中:ET_a 为作物实际蒸发蒸腾量即实际耗水量;ET 为作物潜在蒸发蒸腾量即潜在最大需水量。CWSI 变化范围为 0~1,其值越大,表明作物越缺水,干旱越严重。当 CWSI=0 时,作物无水分亏缺发生;当 CWSI=1 时,表明作物严重缺水,气孔因缺水而关闭。

作物缺水指数法利用热红外遥感温度和常规气象资料来间接监测植被条件下的土壤水分,是遥感监测土壤水分的一种很重要的方法^[40]。在有植被覆盖的条件下,作物缺水指数法监测土壤水分的精度高于热惯量法。但其涉及的气象、土壤等资料较多,计算量大,实现相对复杂。

2 低温冷害

低温冷害指在作物整个生育期或某个生育期,气温低于作物所需的临界温度而造成减产的现象。延迟型冷害是作物生长季节持续低温导致积温不足使作物不能正常成熟而减产;障碍型冷害是生殖生长关键期内短期强低温天气使生殖生长受到抑制而导致减产^[41]。低温冷害是中国主要的农业气象灾害之一,特别是东北地区发生最为频繁。该区是我国重要的商品粮生产基地,也是重要的中国玉米生产带,占全国玉米生产的 30%。目前对低温冷害的研究主要以气候上的低温冷害指标为主,也有一些考虑了作物因素。

2.1 5-9 月平均气温之和距平指标

王书裕^[42]在研究吉林省全省及 7 个地区产量波动与气温关系时,发现全省粮豆产量与 5-9 月气温呈线性关系,产量随着气温升高而增加,即高温年要比低温年产量高,二者之间关系式为:

$$\Delta y = 6.33 + 3.29 \sum_9^5 \Delta T \tag{17}$$

式中:Δy 为粮豆总产量的趋势离差(亿斤), $\sum_9^5 \Delta T$ 为 5-9 月平均气温距平和。当某一年距平和 1℃(相当于 5-9 月积温大约高 30℃),全省粮豆总产量将相应地增加 1.5 亿 kg 以上。

根据冷害的发生与生育期总温度条件的关系进一步分析低温年减产程度与生长季月平均温度总和距平值(ΔT₅₋₉)之间的关系发现,整个东北地区粮豆产量与 5-9 月平均温度总和(T₅₋₉)也呈高度正相关。因此,可用 T₅₋₉表示作物生育期的温度条件,而用 T₅₋₉的负距平(ΔT₅₋₉)判断生育期是否发生冷害及冷害程度^[43-44],但不能用统一的 ΔT₅₋₉值作为全区的冷害指标,而应随着水平的不同而改变(见表 4)^[45-46]。另外,丁士晟^[47]在东北地区作物冷害的研究中,通过最优分割法确定了冷害指标,用 5-9 月的月平均温度总和的负距平值 ΔT₅₋₉表示:ΔT₅₋₉= -1.3℃,为一般低温冷害年;ΔT₅₋₉= -3.3℃,为严重低温冷害年。

表 4 不同热量条件下作物冷害指标

Table 4 Cool damage index of crops under different heat conditions

T ₅₋₉	80.0	85.0	90.0	95.0	100.0	105.0	减产率/%
ΔT ₅₋₉ 一般冷害	-1.1	-1.4	-1.7	-2	-2.2	-2.3	5~15
严重冷害	-1.7	-2.4	-3.1	-3.7	-4.1	-4.4	>15

王春乙、毛飞等^[48-49]收集了东北地区 50 个台站的多年气温、纬度和海拔高度资料,统计出各站历年和多年平均 5-9 月的月平均温度总和。由于东北地域辽阔,海拔高度差异显著,且各地的低温冷害临界指标值与当地的纬度和海拔高度存在很好的线性关系,由此建立了低温冷害指标与海拔、纬度的关系式:

$$Y = - 8.611\ 6 + 0.148\ 2(X + 0.0109H),$$

(18)

$$W = - 18.302\ 9 + 0.327\ 0(X + 0.0109H).$$

(19)

式中: Y 为一般低温冷害指标, W 为严重低温冷害指标, X 为纬度, H 为海拔高度。当某地某一年的 $\Delta T_{5-9} \leq Y$ 时,出现一般低温冷害;当 $\Delta T_{5-9} \leq W$ 时,出现严重低温冷害。根据 T_{5-9} 与低温冷害临界指标值的定量关系及与订正到海平面的 T_{5-9} 的统计关系,这样确立的指标计算式只与纬度和海拔高度有关,便于网格化的计算。

袭祝香,马树庆等^[50]在进行东北区低温冷害风险评估和综合风险区划时,采用的东北区作物发生低温冷害的指标或界限为:

一般低温冷害:

$$\overline{\Delta T}_{5-9} = - 94.80 + 3.238\overline{T}_{5-9} - 3.672 \times 10^{-2}\overline{T}_{5-9}^2 + 1.358 \times 10^{-4}\overline{T}_{5-9}^3$$

(20)

严重低温冷害:

$$\overline{\Delta T}_{5-9} = - 80.47 + 2.963\overline{T}_{5-9} - 3.567 \times 10^{-2}\overline{T}_{5-9}^2 + 1.367\ 1 \times 10^{-4}\overline{T}_{5-9}^3$$

(21)

式中: $\overline{\Delta T}_{5-9}$ 为5-9月平均气温总和的距平, $\overline{T}_{5-9}$ 为5-9月平均气温总和的多年平均值。如果某一站点5-9月平均气温和距平值低于式(20)中的且大于式(21)中的,则视为发生了一般低温冷害;如果5-9月平均气温和的距平低于式(21)中的 $\overline{\Delta T}_{5-9}$,则视为发生了严重低温冷害。也就是说5-9月平均气温和的高低,决定了东北区作物是否发生低温冷害。

从现有研究成果看出,东北地区受低温冷害的程度与5-9月气温水平高低有关,这类低温冷害指标认可度比较高,也较为常用,适合比较不同地区冷害发生频率的差异。但是该指标不能与农作物的生长发育状况对热量条件的需求直接结合,缺乏农业意义和生物学意义。在考虑到产量时,只是以单一温度作为冷害是否发生的标准,没有很有效地和作物遭受冷害的过程联系起来,缺乏对产量影响的评价意义^[51]。

2.2 生育期积温指标

很多学者用生育期的总积温作为低温冷害年的指标。元来福^[52]在研究东北低温冷害与粮食产量之间的关系时,指出粮食产量与积温密切相关,且生育前期是关键期,此期间的温度不足是造成作物冷害的主要原因。潘铁夫等^[53]把作物生育期的总积温比历年平均值少100℃定义为一般低温冷害;比历年平均值少200℃定义为严重低温冷害,这个指标定义的积温差值是比较大的。王书裕^[54]定义了积温差值比较小的指标,把大于等于10℃的活动积温较常年少50℃作为一般低温冷害年,较常年少100℃以上作为严重低温冷害年。马树庆等^[55-56]根据多年气候变化情况,综合上述积温指标,认为活动积温较常年少70~120℃会发生一般低温冷害,较常年少120℃以上会导致严重低温冷害^[4]。许多学者根据不同地区不同时段的气候情况,研究制定了不同的积温指标进行低温冷害的预报监测和影响评价^[57-59]。

积温冷害指标计算简便易行,对于分析和判断不同地区或年份是否发生冷害或冷害程度很适用。可以很好的反映延迟性冷害的性质,以及温度变化与作物产量的关系。但在相同积温情况下,不同时期发生冷害对作物的影响显然不同,若要具体分析某地区某时段是否发生低温冷害,就需要和作物生育期各阶段相联系。

2.3 热量指数

郭建平、高素华等^[60-64]在研究玉米生长发育与热量条件的关系时,认为生长发育最快的温度并非是获得产量最高的适宜温度指标,而应在温度基本满足的条件下,生育期越长,产量越高。因此,在计算作物光温产量进行温度订正时,其最适温度应为生长发育速率适当、产量最高的温度。考虑到东北地区的热量条件,以各种主要作物的生长发育和实现高产的三基点温度指标为基准,对计算玉米生产潜力公式中的热量订正系数公式进行改进,获得如下计算玉米热量指数的公式:

$$F(T) = 100 \times \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B}$$

(22)

式中: $B = (T_2 - T)/(T_0 - T_1)$, $F(T)$ 是作物光合作用的温度订正函数, T 为某一时段的平均气温; T_1, T_2, T_0 分别为该时段内玉米生长发育所需的下限温度、上限温度和适宜温度。该公式可反映不同时期的热量条件对玉米生长发育的影响程度。当 $T \leq T_1$ 时, $F(T) = 0$, $F(T)$ 的量值在 0 ~ 100 之间, $F(T)$ 值越大, 则表明玉米生长季的热量条件越好, 反之则热量条件越差。当 $F(T)$ 小于某一临界值时, 玉米就有可能受到低温冷害的影响。在其他作物的低温冷害研究中, 也经常使用这种热量指数来判别冷害情况^[65-66]。

热量指数指标的生物学意义十分清晰, 充分考虑了玉米生长季不同发育时段的三基点温度及不同时期热量条件对玉米生长的影响。但由于不同热量年型的热量指标差异不明显, 且不同发育时段作物对低温的敏感性不同, 在计算整个生长季的热量指数时, 也存在一定误差, 要准确判断不同年型及低温冷害的发生还应结合其它指标。

2.4 综合指标

作物在不同的生长发育阶段对温度的要求不同, 且存在一个对温度极其敏感的关键时期, 所以不能笼统的使用一个指标进行冷害的诊断预测。王春乙, 李祎君^[67-69]以长春站为代表, 提出了一个诊断玉米低温冷害的综合指标。这个冷害综合指标由主导指标、辅助指标和参考指标 3 部分组成。其核心为主导指标, 即前、中、后 3 个发育时段 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温负距平; 辅助指标由前、中、后三期逐日负积温累积指数 (SPT) 和各个发育时段的延迟日数构成, 其定义如下:

$$\text{SPT} = \sum I_i$$

(23)

式中: $I_i = (T_i - T_{0i})$, T_i 为此发育时段的逐日平均温度; T_{0i} 为此发育时段的逐日适宜温度。一般来说适宜温度是一个温度范围, 但在分发育阶段计算 SPT 时, 只能使用一个确定的适宜温度值参与计算, 因此可根据作物各发育时段的适宜温度范围, 采用一次线性插值方法获得逐日适宜温度。逐日负积温累积指数 SPT 是按照发育阶段逐日累计的, 其值与同一发育时段玉米生长发育所需的天数呈反相关关系, 其值愈小表征低温累积程度愈大, 低温胁迫愈严重, 达到一定值也就是低温累积到一定程度就会发生冷害。辅助指标能够反映玉米整个生育期内低温的分布情况, 增强了生物学意义; 同时, 将对产量有很大影响的初霜日的早晚引入综合指标, 作为低温冷害的一个判别因素; 最后, 以产量损失情况作为参考指标, 划分低温冷害的等级 (见表 5)。

表 5 作物不同生育时期低温冷害综合指标
Table 5 Comprehensive cool damage indexes for different growing periods of crop

综合指标	时期	一般低温冷害	严重低温冷害
主导指标	前期	积温负距平大于 -50℃ 小于 -20℃	积温负距平小于 -45℃
	中期	积温负距平大于 -50℃ 小于 -20℃	积温负距平小于 -50℃
	后期	积温负距平大于 -60℃ 小于 -20℃	积温负距平小于 -60℃
辅助指标	前期	发育延迟天数 3 ~ 5d	发育延迟天数 5d 以上
	中期	发育延迟天数 3 ~ 5d	发育延迟天数 5d 以上
	后期	发育延迟天数 4 ~ 6d	发育延迟天数 6d 以上
早霜年份	后期	早霜提前 7 ~ 11d	早霜提前 12d 以上
参考指标	后期	产量减少大于 5% 小于 15%	产量减少大于 15% 以上

低温冷害综合指标计算比较简便, 准确率较高, 有利于等级的客观划分。该指标与作物生育状况相结合, 能综合反映作物生长过程中的低温积累效应和高温补偿效应。在判别作物冷害时, 考虑的因素也较其它指标全面, 主要是分时段讨论低温冷害, 一定程度上可以反映出不同发育时段作物的不同温度要求, 从而得出既具有生物学意义又符合实际情况的低温冷害指标。

3 寒害

寒害主要指热带、亚热带作物在冬季生育期间温度不低于 0℃ 时, 因气温降低引起作物生理机能障碍,

导致减产甚至死亡的一种农业气象灾害^[70]。寒害多发生在我国华南地区,该地区冬季常遭受冷空气影响,造成强烈降温,对香蕉、荔枝、龙眼、甘蔗、橡胶等华南主要热带、亚热带经济作物危害严重。由于不同品种作物对于寒害的敏感度差异较大,所以目前的寒害指标研究多针对不同作物给出具体判别标准。

3.1 冬季寒害综合指标

冯颖竹等^[71]以广东省历年冬季寒害资料为依据,用寒害过程的日最低气温、寒害的持续天数及寒害的负积温这3个致灾因子来描述寒害的强度,从3个特征向量场中找出物理意义清晰、方差贡献率大的主要分量,将其定义为寒害综合指标(临界温度定为5.0℃)。具体定义广东寒害过程为:当最低气温≤5.0℃时,为寒害过程开始;当最低气温回升至>5.0℃时,为寒害过程结束;期间连续出现最低气温≤5.0℃的天数,称为该次寒害过程的天数。分析表明:寒害综合指标物理意义清晰,能较好反映作物受灾情况。杜尧东等^[72]在广东地区香蕉、荔枝寒害研究中,使用了寒害综合指标,将香蕉、荔枝受害临界温度定为5.0℃。研究表明,寒害综合指标与香蕉、荔枝单产具有显著的负相关关系,可以用来分析香蕉、荔枝的寒害严重程度。

3.2 几种热带果树的寒害指标

香蕉是大型多年生草本植物,属南亚热带水果,对温度极为敏感,耐低温能力差。危害我国香蕉的寒害可分为辐射型寒害和平流型寒害。在辐射寒害为主的情况下,极端最低温度是最主要的影响因子;而在平流寒害为主的情况下,低温的程度和持续时间则为最主要的影响因子。此外,过程降温幅度也可影响香蕉的适应能力,从而影响其抗寒力^[73]。黄朝荣^[74-75]据南宁市1987-1990

年香蕉寒害的观测资料,并结合多年香蕉寒害调查所收集的有关数据进行综合分析。认为在出现霜冻的条件下,极端最低气温小于4.0至2.6℃,香蕉轻度受害;小于2.5至0.6℃为中等受害;小于0.5至-1.0℃为严重受害;在寒流入侵影响下,香蕉在8℃以下容易出现寒害,并结合低温持续时间和有效积寒作为香蕉的寒害指标,当日平均气温低于8℃连续3~5d,有效积寒4~6℃·d,香蕉出现轻度寒害;连续6~9d,有效积寒6.1~8.9℃·d,出现中等寒害;连续10d以上,有效积寒>9.0℃·d,出现严重寒害。庞庭颐^[76]对桂南等地香蕉越冬低温指标进行研究发现,在-0.1~-1.0℃的霜冻低温条件下,未抽蕾的大蕉株的心叶尚未死亡,故对香蕉的霜冻低温指标作一些修正,认为最低气温1.1~4.0℃香蕉轻度受害;最低气温0.1~1.0℃为中度受害;最低气温-1.0~0.0℃为重度受害。而当冬季寒潮入侵时,出现日均温≤8℃,最低气温≤5.5℃的低温阴雨天气,持续时间达2~3d时,香蕉就会出现寒害症状,用有害积寒量表示其寒害指标为,积寒量≥-5.0℃香蕉轻度受害;积寒量为-5.1~10.0℃香蕉中度受害;积寒量为<-10.0℃香蕉重度受害。张建平等^[77]通过对南宁、玉林两地香蕉越冬资料的分析,认为香蕉植株受冻害的临界温度条件是:日平均气温干日≤10.0℃连续3d,48h日平均气温的变温≥12℃;日平均气温干≤8.0℃连续3d;日极端最低气温≤5.0℃或有连续3d以上的霜出现。当气温达以上条件之一时,香蕉开始出现受害症状,致害温度的时间越长,气温越低,受害就越重。

荔枝与香蕉一样也是喜温作物,易受低温危害,但比香蕉受寒害机率低、受害程度也轻。植石群、刘锦奎等^[78-79]从寒害对香蕉、荔枝产量的影响出发,考虑到华南地区寒害的发生特点,以过程降温幅度和同时出现的最低气温两个因素作为寒害指标,将寒害分为2大类5个亚类(见表6)。应用该分类标准可对香蕉、荔枝的灾损率、易灾性和防寒抗灾能力进行分析以及对广东寒害风险进行空间区划。

林日暖等^[80]在广东经济林果寒害研究中,统计了历年最强一次冷空气资料,分析各因子和寒害灾情的关系,并与寒潮指标相比较,建立了寒害

表6 香蕉、荔枝寒害指标					
Table 6 Chilling injury indexes for banana/litchi					
寒害等级	一般寒害			严重寒害	
	1	2	3	4	5
过程降温幅度/℃	≥10	≥5	≥15	≥10	≥5
同时出现的最低气温/℃	≤5	≤0	≤5	≤0	≤-2

表7 香蕉、荔枝寒害等级指标			
Table 7 Chilly injury degree indexes for banana/litchi			
强度	极端最低气温/℃	降温幅度/℃	持续时间/d
强	≤1.0		
	1.1~3.0	≥15.0	>10
中等	1.1~3.0	≥15.0	≤10
	1.1~3.0	<15.0	>10
	3.1~5.0	≥15.0	>10
弱	3.1~5.0	≥10.0	<10
	3.1~5.0	10.0~14.9	>10
无	3.1~5.0	<10.0	<10
	>5.0		

等级指标(见表 7)用于描述香蕉、荔枝的寒害过程。严格来讲香蕉与荔枝的寒害指标是不同的,但由于香蕉、荔枝对温度条件的要求差异不很大,两者寒害强度等级标准大体上是一致的,故使用同一寒害指标,但在具体分析可能出现的灾情时应作必要的说明。

荔枝、龙眼和芒果等南亚热带果树,抗寒能力与树龄、树势、品种和栽培管理措施以及土壤水分的多寡有密切关系。幼龄树抗寒能力较弱,成龄树较强。同一地点荔枝、龙眼两种果树的成龄树受霜冻害的状况基本一致、差异不明显,故将两种果树的调查材料统一分析并归纳寒害指标;芒果耐寒性相比荔枝、龙眼要差,同一气象站附近,树龄相近,芒果树受霜冻害的状况要重于荔枝和龙眼,因此其寒害指标需单独考虑。庞庭颐^[81]对桂南 14 个气象站附近的荔枝等果树在 1999 年 12 月下旬严重霜冻中的受害状况进行了分析,得出荔枝等果树的霜冻低温指标(见表 8)。

表 8 荔枝、龙眼、芒果的霜冻害等级指标
Table 8 Frost injury degree indexes for litchi/longan/mango

级别	受害程度	荔枝、龙眼冻害指标	芒果冻害指标
		最低气温/℃	最低气温/℃
1	晚秋梢或冬梢叶片受害,树冠叶片受害率<10%。	-0.1~-1.5	-0.1~-1.0
2	树冠叶片受害率为10%~50%。	-1.6~-2.0	-1.1~-1.5
3	树冠叶片受害率为51%~80%。	-2.1~-3.0	-1.6~-2.5
4	树冠叶片受害率为81%~100%,主枝枯,或主干裂	-3.1~-4.0	-2.6~-3.5

3.3 甘蔗的寒害指标

华南是我国主要蔗糖产区,特别是广西,蔗糖业已成为支柱产业。甘蔗的寒害主要是指低温霜冻,由于霜冻灾害的频繁发生,给广西蔗糖生产带来了严重影响。广西甘蔗冻害大致可分为 4 级:轻(霜冻)、中(霜冻)、重(霜冻)及严重(霜冻)。李仕谟等^[82]为了解决广西甘蔗冻害,深入各地蔗区对 1982/1983 年甘蔗冻害进行广泛实地调查,以气象站和气象哨观测场附近甘蔗的冻害程度和伴随出现的霜冻低温记录为依据,对甘蔗冻害的温度条件进行考察分析,确定了不同冻害程度的温度标准(见表 9)。涂方旭等^[83]在此冻害指标基础上,以冬季 5a 一遇和 10a 一遇的最低气温作为广西甘蔗冻害(霜冻)指标,对广西甘蔗冻害进行区划,该研究结果对于广西甘蔗生产的合理布局,减轻甘蔗冻害,提高广西甘蔗生产和蔗糖产业的经济效益有一定参考价值。

在上述研究基础上,谭宗琨等^[84]根据 1999/2000 年冬季严重霜冻灾害期间,广西南宁、百色、扶绥、玉林、贵港、来宾、柳州、蒙山等农业气象试验站对不同区域、不同程度受害甘蔗的田间调查结果,将广西甘蔗受冻害温度指标进一步订正和补充,认为最低温度 2.0~0.4℃ 为轻霜冻;最低温度 -0.5~1.0℃ 为中霜冻;最低温度 -1.0~2.0℃ 为重霜冻;最低温度 < -2.1℃ 为严重霜冻。

3.4 橡胶的寒害指标

橡胶是典型的热带作物,需要较高温度才能生存。在橡胶生产的“技术规程”中,将橡胶寒害分为 0~6 级共 7 级,0~1 级为不受寒害或受害轻微;2~3 级为树冠受害树干基本不受害;4~6 级为树干受害至全部枯死。温福光等^[85]依据橡胶寒害资料,橡胶寒害分为平流型寒害和辐射型寒害两种,并考虑橡胶生产的经济效果,分别确定指标。平流型寒害指标定为:轻寒害年,最大一次寒害积温 < 50℃,橡胶 4~6 级受害率 < 30%;中寒害年,最大一次寒害积温为 50~70℃,橡胶 4~6 级受害率为 30%~50%;重寒害年,最大一次寒害积温 > 70℃,橡胶 4~6 级受害率 > 50%。辐射型寒害指标定为:轻寒害年,极端最低气温 > -1.0℃,橡胶 4~6 级受害率 < 30%;中寒害年,极端最低气温 -1.0~-2.2℃ 之间,橡胶 4~6 级受害率为 30%~50%;重寒害年,极端最低气温 < -2.2℃,橡胶 4~6 级受害率 > 50%。

基于目前对寒害的研究表明,不同种类作物的抗寒能力是不同的,因此作物的寒害指标存在明显的差

表 9 甘蔗冻害程度与低温强度关系

Table 9 Relationship between frost injury degree of sugarcane and low-temperature intensity

冻害程度	受害程度	最低气温/℃
轻	蔗叶轻微或部分受害	1.0~-0.4℃
中	蔗叶全部和生长点受害	-0.5~-1.0℃
重	生长点及茎上部芽冻死	-1.1~-2.0℃
严重	地上茎全部冻死	< -2.1℃

异,必须针对不同的灾害类型,不同的作物品种制定相应的判别指标,并采取相应的防御措施,才能有效减少灾害损失。

4 高温热害

高温对作物生长发育及产量造成的危害,统称为高温热害。在生产实践中,水稻受高温危害最为严重,例如,长江中、下游地区早、中稻和华南早稻,在开花灌浆时期,常受高温危害,引起产量明显下降。水稻的高温危害是指水稻处于孕穗后期和抽穗扬花期,在7月下旬至8月上旬遭遇连续日平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 、日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 、同时极端最高气温 38°C 以上、相对湿度70%以下的高温天气,致使孕穗后期的部分颖花发育畸形,扬花水稻影响花药开裂及花粉活力、抑制花粉管伸长,形成受精不良,降低结实率,造成的减产或严重减产^[86]。水稻的整个生长过程中,从发育的角度来讲,以开花期对高温最敏感,灌浆期次之,营养生长期最小;就产量构成性状而言,则表现为结实率对高温最敏感,每穗粒数次之,千粒重第三,株穗数最小^[87]。目前,主要以温度和高温持续日数来判别高温热害,主要的判别指标有以下几种。

4.1 平均气温

太华杰等^[4]在夏季高温对早稻影响的研究中,对不同品种、不同开花日期的空壳率与日平均气温、最高气温和日较差等因子进行相关分析。结果表明,开花前后5d的最高气温与空壳率的相关系数达0.90以上(达极显著水平)。确定开花前后5d平均最高气温 $33\sim 34^{\circ}\text{C}$ 为轻度受害指标,受害温度每递增 1°C ,空壳率可递增达10%。

常规早稻在灌浆期间,日平均气温 24°C 时,千粒重最高,随气温上升,千粒重下降。当日平均气温 $\geq 28^{\circ}\text{C}$ 时,千粒重下降1.5g,当日平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 时,千粒重下降3.0g;杂交早稻当日平均气温 $\geq 28^{\circ}\text{C}$ 时,千粒重下降2.5g,当日平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 时,千粒重下降4.0g^[88]。

在对籼稻进行高温试验时,通过连续不同的高温处理,认为籼稻开花期长期高温伤害的临界温度为 30°C ;短期高温伤害的临界温度为 35°C ^[89]。

4.2 最高气温

谭中和^[90]在杂交籼稻的研究中提出,日平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$,日最高温度 $\geq 35^{\circ}\text{C}$,可作为高温的致害指标。在农业气象工作中,通常以日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 作为早稻开花结实期受害的临界温度指标,并引用 $>35^{\circ}\text{C}$ 有效危害温度的“时积温”值表示影响灌浆的农业气象指标^[4]。

通常来说,孕穗至抽穗扬花期前后的最适宜温度为 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$,当温度高于 30°C 时,对开花结实就会有明显伤害。一般以日最高温度大于 35°C ,作为水稻抽穗开花期的热害指标,大于该温度将导致花器发育不全,花粉不良,活力下降。在恒温 38°C 下,水稻将全部不结实。在同样高温条件下抽穗扬花,杂交稻空壳率明显高于常规稻。杂交中稻开花受粉期,以日平均温度 $25\sim 28^{\circ}\text{C}$ 为宜,如连日出现 35°C 以上高温,就会产生热害^[91]。

4.3 高温持续天数

一般情况下,早稻个体增长和粒重增加最快的时期是在开花后 $5\sim 10\text{d}$ 的乳熟前期,此时期是决定灌浆增重的关键时期。该期间若受到持续高温的影响,则灌浆速度加快,灌浆时间缩短,影响产量和品质;高温增加了每株花序数,却降低了每穗粒数,结实率和粒重;乳熟期的高温危害,可使黄熟期的籽粒增重大幅度下降。当日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 时,粒重增长速度受到明显抑制;连续3d最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$,千粒重开始下降;连续7d最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$,受害明显加剧;连续10d以上最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 千粒重降到最低值^[88]。

陶炳炎等认为水稻开花遇连续7d大于 35°C 高温,空壳率提高10倍;王前和等把中稻抽穗开花期日最高气温 $\geq 37^{\circ}\text{C}$ 、持续5d以上作为造成大田空壳率发生的热害指标。根据江淮20世纪80年代推广杂交稻以来气象资料和空壳发生情况,杨太明等认为从安徽省生产实际出发,可把中稻抽穗开花期日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 、持续5d以上作为造成水稻大田空壳率发生的热害指标^[92]。

相比低温干旱和冷害等,高温热害的研究相对较少。目前,一致认为一定强度的高温会影响水稻的开花结实,降低产量,但各类研究中所提出的致害温度指标却不尽相同。在高温对早稻结实伤害的试验中,由于研究条件和方法的不同以及试验水稻的播期、种植区域和品种的不同,目前还没有比较客观统一的高温热害指标。

5 讨论和展望

本文归纳总结了干旱、低温冷害、寒害以及高温热害等主要农业气象灾害指标,分析了各种灾害指标的适用领域及使用存在的一些优缺点,在今后的灾害指标研究中仍存在许多需要进一步探讨的问题。

(1) 农业干旱的含义有多种,农业干旱指标的研究也是从多种角度展开的,单因子干旱指标使用比较方便,数据易于获得,但一般多用于描述气候干旱;多气象要素综合的干旱指标可较好的反映受旱程度或干旱持续时间,但观测数据一般有限,某些参数可靠度也不够,使用时存在一定困难;应用遥感技术监测干旱快速直观,是实现大范围干旱监测的可行性技术之一,但由于遥感参数之间关系复杂,各种监测模型的适用性和精度都有待于进一步提高。基于干旱指标的研究现状,下一步应从加强干旱指标的综合性和针对性等方面进行改进。首先应考虑多方面因素的综合影响,包括大气、作物和土壤的整体水分收支情况,注重干旱的发生机理,建立相应的干旱模型。其次,应根据不同的生长期确定相应的干旱指标,针对不同生育期对干旱发展进行判别可简化干旱指标,使预测结果更具可信度。

(2) 现有低温冷害指标的研究已有很多,主要以气候意义上的指标为主,可以很好的预测玉米生长发育时期的热量条件,但由于不同年型的热量差异较小,要准确判断冷害发生情况还有一定困难。另外,还有一些指标是与作物相结合的,具有一定生物学意义,属于农业气象灾害指标,但大多计算复杂,参数较多,不便于台站应用。在今后的指标研究中,应注重考虑作物生理生长特性,如作物生长发育各阶段对低温敏感度不同,还应考虑各时期温度变化对农田水分情况的影响。要准确预测多种气候条件下的热量年型,可以结合其他方法,或多种指标互相辅助使用,既考虑气候变化指标,也注意农作物特征指数改变,在准确预报灾害发生的基础上,对指标进行一定程度的简化。

(3) 有关寒害的研究主要集中于作物寒害发生机理及抗寒技术方面,针对于寒害指标的研究并不多。由于冬季影响华南地区的寒害天气类型较多,作物的受害机理、灾损程度等又存在明显差别,因此寒害指标一般是根据不同的作物类型而分别提出的,较其他三种指标而言其针对性更强。现有寒害指标的研究中,主要涉及香蕉、荔枝等几种作物,研究地区多限于广东、广西,指标中的致灾因子多以最低温度及其持续时间为主。根据上述特点,在今后研究中,寒害指标的研究对象、区域应该进一步拓展,研究技术方法也有待提高,将最低温度指标结合其它寒害发生的影响因子,并与作物生长生理联系起来,发展寒害的综合指标。

(4) 目前,开展的关于高温热害的研究不多,高温热害的指标也很少,主要是以温度因子来判别热害的发生。温度指标适用于区域地理条件和气候特征,根据实际温度与预测的界限温度差值及高温持续时间等判断热害情况,通常能反映一定的高温特征,但区域之间仍缺乏比较。我国尚未建立起一套完整的可预报高温热害的监测体系,对热害指标的研究也属起步阶段,因此,今后需增强高温热害的研究,针对热害发生机理制定出准确性高的统一的预测指标,同时可结合风、湿等其他因子,加强高温热害的可预见性。

综合上述,农业气象灾害指标要与农作物生长过程、生理特性及受环境影响程度相联系;同时,在全球变化背景下,还要充分考虑气候变化的因素以及农业措施改进的影响,以便吸收现有指标的的优点基础上研制新一代农业气象灾害指标。另外,如何应用农业气象灾害指标,结合作物模型,开展灾害的预测和评估,以及应对可能出现的灾害,既是今后农业气象灾害指标的主要研究发展方向,也是灾害指标应用的主要途径。

参考文献:

- [1] 王春乙,王石立,霍治国,等. 近10年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报,2005,63(5):659-671.
- [2] 孙荣强. 干旱定义及其指标评述[J]. 灾害学,1994,9(1):17-21.
- [3] 何为勋,王一鸣. 干旱,中国农业百科全书·农业气象卷[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [4] 张养才,何维勋,李世奎. 中国农业气象灾害概论[M]. 北京:气象出版社,1991:272-282,348-353.
- [5] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展气[M]. 北京:气象出版社,2007:7-11.
- [6] 冯平,李绍飞,王仲珏. 干旱识别与分析指标综述[J]. 中国农村水利水电,2002,(7):13-15.
- [7] 房稳静,张雪芬,赵龙,等. 河南省冬小麦干旱灾害的空间分布研究[J]. 气象与环境科学,2007,30(2):61-63.
- [8] 谢安,孙永翌,白人海. 中国东北近50年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J]. 地理学报,2003,58(增刊):75-82.
- [9] 袁文平,周广生. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展,2004,19(6):982-991.
- [10] 元来福,王继琴. 从农业需水量评价我国的干旱状况[J]. 应用气象学报,1995,6(3):356-360.
- [11] 关兆涌,冯智文. 利用水分平衡指标检验农业干旱的研究[J]. 干旱地区农业研究,1986,(1):1-13.

- [12] 王密侠,胡彦华,熊云章. 陕西省作物旱情预报系统的研究[J]. 西北水资源与水工程,1996,7(2):52-56.
- [13] 董振国. 对土壤水分指标的研究[J]. 气象,1985,(1):32-33.
- [14] 张叶,罗怀良. 农业气象干旱指标研究综述[J]. 资源开发与市场,2006,(1):50-52.
- [15] 李星敏,杨文峰,高蓓,等. 气象与农业业务干旱指标的研究与应用现状[J]. 西北农林科技大学学报,2007,35(7):111-116.
- [16] Palmer W C. Meteorological Drought[J]. Weather Bureau, U. S. Research Paper, 1965,45:1-58.
- [17] 安顺清,邢久星. 修正的帕默尔干旱指数及其应用[J]. 气象,1985,(12):17-19.
- [18] 安顺清,邢久星. 帕默尔旱度模式的修正[J]. 气象科学研究院院刊,1986,1(1):75-82.
- [19] 刘巍巍,安顺清,刘庚山,等. 帕默尔旱度模式的进一步修正[J]. 应用气象学报,2004,15(2):207-216.
- [20] 刘庚山,郭安红,安顺清,等. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报,2004,13(4).
- [21] 卫捷,陶诗言,张庆云. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用[J]. 地理学报,2003,58 卷增刊:91-99.
- [22] 卫捷,马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. 地理学报,2003,58 卷增刊:117-124.
- [23] John Keyantash, John A Dracup, 周跃武,等. 干旱的量化:干旱指数的评价[J]. 干旱气象,2005(2):85-94.
- [24] 郭虎,王瑛,王芳. 旱灾灾情监测中的遥感应用综述[J]. 遥感技术与应用,2008,23(1):111-116.
- [25] 陈维英,肖乾广,盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J]. 环境遥感,1994,9(2):106-112.
- [26] 郭锐,管晓丹. 植被状况指数的改进及在西北干旱监测中的应用[J]. 地球科学进展,2007,22(11):1160-1168.
- [27] Kogan F N. Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in Non-homogeneous Area[J]. International Journal of Remote Sensing,1990,11:1405-1420.
- [28] Kogan F N. Droughts of the Late 1980s in the United State as Derived from NOAA Polar-orbiting Satellite Data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1995,76:655-668.
- [29] 王鹏新,孙威. 基于植被指数和地表温度的干旱监测方法的对比分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(3):319-323.
- [30] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. Advances in Space Research,1995,15(11):91-100.
- [31] 侯英雨,何延波,柳钦火,等. 干旱监测指数研究[J]. 生态学杂志,2007,26(6):892-897.
- [32] 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2001,26:412-418.
- [33] 孙威,王鹏新,韩丽娟,等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 2006,22(2):22-26.
- [34] 刘丽,刘清,周颖,等. 卫星遥感信息在贵州干旱监测中的应用[J]. 中国农业气象,1999,20(3):43-47.
- [35] Watson K, Rowen L C, Offield T W. Application of Thermal Modeling in the Geologic Interpretation of IR Image[J]. Remote Sensing of Environment,1971,3:2017-2041.
- [36] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia[J]. Remote Sensing of Environment,1985,18(1):59-73.
- [37] 李亚春,王志华. 我国干旱热红外遥感监测方法的研究进展[J]. 干旱地区农业研究,1999,17(2):98-102.
- [38] 康绍忠,熊运章. 作物缺水状况的判别方法与灌水指标的研究[J]. 水利学报,1991,(1):34-39.
- [39] Jackson R D, Idso S B. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research,1981,17:1133-1138.
- [40] 王小平,郭锐. 遥感监测干旱的方法及研究进展[J]. 干旱气象,2003,21(4):76-81.
- [41] 王春乙. 东北地区农作物低温冷害研究[M]. 北京:气象出版社,2008:8,25.
- [42] 王书裕. 吉林省的冷害及其分布[J]. 气象科技,1975,(8):19-22.
- [43] 王书裕. 东北区作物冷害区划[J]. 气象,1982,(6):26-28.
- [44] 王书裕. 我国作物冷害研究的进展[J]. 气象科技,1984,12(4):75-79.
- [45] 孙玉亭,王书裕,杨永岐. 东北地区作物冷害的研究[J]. 气象学报,1983,41(3):313-321.
- [46] 北方主要作物冷害科研协作组技术组. 东北区主要作物冷害研究[J]. 沈阳农业大学学报,1982,(1):27-45.
- [47] 丁士晟. 东北低温冷害和粮食产量[J]. 气象,1980,6(5):1-3.
- [48] 王春乙,毛飞. 东北地区低温冷害分布特征[G]//王春乙,郭建平主编. 农作物低温冷害防御技术. 北京:气象出版社,1999:9-15.
- [49] 毛飞,高素华,庄立伟. 近 40 年东北地区低温冷害发生规律的研究[G]//王春乙,郭建平. 农作物低温冷害防御技术. 北京:气象出版社,1999:17-26.
- [50] 袭祝香,马树庆,王琪. 东北区低温冷害风险评估及区划[J]. 自然灾害学报,2003,12(2):98-102.
- [51] 王远皓,王春乙,张雪芬. 作物低温冷害指标及风险评估研究进展[J]. 气象科技,2008,36(3):310-317.
- [52] 亓来福. 东北低温冷害的分析研究[J]. 气象科技,1979,7(3):25-28.
- [53] 潘铁夫,方展森,赵洪凯,卢庆善. 农作物低温冷害及其防御[M]. 北京:农业出版社,1983:8,13-16,43.
- [54] 王书裕. 作物冷害的研究[M]. 北京:气象出版社,1995:72-77,116-121.
- [55] 马树庆,袭祝香,王琪. 中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):137-141.
- [56] 马树庆,刘玉英,王琪. 玉米低温冷害动态评估和预测方法[J]. 应用生态学报,2006,17(10):1905-1910.
- [57] 吉书琴,张玉书,关德新,等. 辽宁地区作物低温冷害的遥感监测和气象预报[J]. 沈阳农业大学,1998,29(1):16-20.
- [58] 朱桂香,贾艳梅,朴承国. 延边地区的低温冷害及其预报经验总结[J]. 吉林气象,1999,(增刊):39-40.
- [59] 薛桂莉,唐文俊,刘治权,等. 低温冷害对农作物的危害及防御措施[J]. 农业与科技,2004,24(1):85-86,92.
- [60] 高素华. 中国东北地区农业气候生产潜力及开发利用对策[M]. 北京:气象出版社,1995.

- [61] 郭建平,高素华.东北地区农作物热量年型的划分及指标的确定[A]//王春乙,郭建平.农作物低温冷害防御技术.北京:气象出版社,1999.158-164.
- [62] 郭建平,田志会,张涓涓.东北地区玉米热量指数的预测模型研究[J].应用气象学报,2003,14(5):626-633.
- [63] 高素华.玉米延迟型低温冷害的动态监测[J].自然灾害学报,2003,12(2):117-121.
- [64] 王石立,郭建平,马玉平.从东北玉米冷害预测模型展望农业灾害预测技术的发展[J].气象与环境学报,2006,22(1):45-50.
- [65] 李新建,毛伟峰,谭艳梅.新疆棉花延迟型冷害的热量指数评估及意义[J].中国农业科学,2005,38(10):1989-1995.
- [66] 李新建,毛伟峰,杨举芳,等.以热量指数表示北疆棉区棉花延迟型冷害指标的研究[J].棉花学报,2005,17(2):88-93.
- [67] 李祎君.吉林省玉米低温冷害预测技术研究[D].北京:中国气象科学研究院,2005.
- [68] 李祎君,王春乙.基于多种预测模型的玉米低温冷害预测集成模型[J].灾害学,2006,21(4):1-7.
- [69] 李祎君,王春乙.东北地区玉米低温冷害综合指标研究[J].自然灾害学报,2007,16(6):15-20.
- [70] 崔读昌.关于冻害、寒害、冷害和霜冻[J].中国农业气象,1999,20(1):56-57.
- [71] 冯颖竹,梁红,黄璜.广东冬季寒害指标研究[J].2005,14(1):59-65.
- [72] 杜尧东,李春梅,毛慧琴.广东省香蕉与荔枝寒害致灾因子和综合气候指标研究[J].生态学杂志,2006,25(2):225-230.
- [73] 刘长全.香蕉寒害研究进展[J].果树学报,2006,23(3):448-453.
- [74] 黄朝荣.南宁市香蕉冷害指标及防御措施探讨[J].广西农业科学,1991,(3):106-109.
- [75] 黄朝荣.气象条件对香蕉生长和产量影响初步分析[J].中国农业气象,1993,(2):7-10.
- [76] 庞庭颐,宾士益,陈进民,等.香蕉越冬低温指标的初步鉴定[J].广西气象,1990,11(3):43-45.
- [77] 张建平,黄朝荣.广西植蕉区香蕉越冬气温条件初探[J].广西农业科学,1992(5):212-214.
- [78] 植石群,刘锦鉴,杜尧东.广东省香蕉寒害风险分析[J].自然灾害学报,2003,12(2):113-116.
- [79] 刘锦鉴,杜尧东,毛慧琴.华南地区荔枝寒害风险分析与区划[J].自然灾害学报,2003,12(3):126-130.
- [80] 林日暖,崔巧娟,朱正心.广东经济林果寒害地面预警强信号和长期统计预报模式的研究[J].广西蔗糖,2002,(4):499-501.
- [81] 庞庭颐.荔枝等果树的霜冻低温指标与避寒种植环境的选择[J].广西气象,2003,21(1):12-14.
- [82] 李仕漠,符合,张彦增.广西甘蔗冻害调查分析[J].中国农业气象,1985,(1):53-56.
- [83] 涂方旭,况雪源,李艳兰.对广西甘蔗冻害区划的探讨[J].广西蔗糖,2002,(4):11-13.
- [84] 谭宗琨,欧钊荣,何燕.广西蔗糖发展主要气象灾害分析及蔗糖产业优化布局的研究[J].甘蔗糖业,2006,(1):17-33.
- [85] 温福光,陈敬泽.对橡胶寒害指标的分析[J].气象,1982,(8):33.
- [86] 陶启波,严昀,石继权.农作物高温热害及其防御措施浅析[J].安徽农学通报,2004,10(6):56-57.
- [87] 杨晓春,林瑞坤,吴振海.水稻高温热害的研究进展[J].福建农业科技,2006,(2):68-69.
- [88] 魏丽.“高温逼熟”和“小满寒”对江西省早稻产量的影响[J].气象,1991,17(10):47-49.
- [89] 徐云碧,石春海,申宗坦.热害对早稻结实率的影响[J].浙江农业科学,1989,(2):51-54.
- [90] 谭中和,蓝泰源,任昌福,等.杂交籼稻开花期高温危害及其对策的研究[J].作物学,1985:103-108.
- [91] 汪寿康,汪更文,汪又佳.2003年水稻高温热害情况的调查[J].安徽农学通报,2004,10(1):27,35.
- [92] 杨太明,陈金华.江淮之间夏季高温热害对水稻生长的影响[J].安徽农业科学 2007,35(27):8530-8531.