

陈凯,钱步东,智协飞,等. 2013. 加拿大主要农田作物临界气象指标[J]. 大气科学学报,36(4):385-398.

Chen Kai, Qian Bu-dong, Zhi Xie-fei, et al. 2013. Critical agrometeorological indicators for major field crops in Canada[J]. Trans Atmos Sci,36(4):385-398. (in Chinese)

## 加拿大主要农田作物临界气象指标

陈凯<sup>1</sup>, 钱步东<sup>2</sup>, 智协飞<sup>3</sup>, O' BRIEN E. G. Ted<sup>4</sup>

(1. 加拿大环境部, 安大略省 多伦多市 M3H 5T4; 2. 加拿大农业与农产食品部, 安大略省 渥太华市 K1A 0C6;  
3. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 4. 加拿大环境部, 萨斯喀奇旺省 利加拿市 S4P 4L2)

**摘要:**根据加拿大主要农田作物生长发育对天气与气候条件的要求、农业气象学与气候学原理以及全球气候变化对农作物生产的影响和发展趋势,选择6个关键性气象因素(极端气温、强降水、强风、冷冻、土壤极端水分和作物生产有效热能条件),开发和评价12个农业气象临界指标(寒潮及热浪天数、日及旬最大降水量、日最大风速、强风天数、无霜期及冰冻期天数、标准降水系数、季节性水分亏缺、作物生长有效积温和累积热能单位)。这些指标可供在该国各农产区科学规划和合理发展各类农田作物生产,包括喜暖性和喜凉性一年生草本作物,越冬性二年生及多年生草本及木本作物。该研究还依据该国这三类主要农田作物对临界温度和水分的需求,以及加拿大农田作物生长期和越冬期的天气和气候特征,建立了在任意农业生产年份中各类农田作物生长起始和终止日期的模式。本研究结果能用于指导该国将来在不同农产区适地适时种植适宜的农田作物和高效地经营与管理农场,同时可为农业生产咨询、政策制定和合理决策提供科学依据,也可供其他国家或地区开展类似的科学研究参考。

**关键词:**加拿大;农田作物生产;关键性农业气象因素;临界农业气象指标

中图分类号:S162.5 文献标志码:A 文章编号:1674-7097(2013)04-0385-14

## Critical agrometeorological indicators for major field crops in Canada

CHEN Kai<sup>1</sup>, QIAN Bu-dong<sup>2</sup>, ZHI Xie-fei<sup>3</sup>, O' BRIEN E. G. Ted<sup>4</sup>

(1. Environment Canada, Toronto, ON, M3H 5T4, Canada; 2. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, ON, K1A 0C6, Canada;  
3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Environment Canada, Regina, SK, S4P 4L2, Canada)

**Abstract:** According to the requirement for major field-crops' growth and development on weather and climate conditions in Canada, principles of agricultural meteorology and climatology, as well as impacts and trends of global climate change on the crop production, six key agrometeorological factors (extreme air temperature, heavy precipitation, strong wind, freezing, extreme soil moisture and effective heat-energy conditions for crop production) were selected for development and evaluation of twelve critical agrometeorological indicators (cool spell and heat wave days, maximal daily and ten-day precipitations, maximal daily wind speed, strong wind days, frost-free and freezing days, standardized precipitation index, seasonal water deficit, effective growing degree days and crop cumulative heat units). They can be used for scientific regionalization and rational development of different types of field crops, including warm season crops and cool season crops of annual herbaceous species, and over-wintering crops of biennial and perennial herbaceous and woody species in various agricultural regions across the country.

收稿日期:2013-01-06; 改回日期:2013-02-10

通信作者:陈凯,博士,加拿大环境部高级政策顾问, Kai.chen@ec.gc.ca; 通信地址:Environment Canada, 4905 Dufferin Street, Toronto, Ontario, M3H 5T4, Canada.

This study is also based on plant growth and development requirements for cardinal temperatures and water conditions for three types of major field crops and actual weather and climate characteristics during crop growing and overwintering seasons in any agricultural years to determine growing season starting and ending days of various field crops in Canada. The results can be used for rational arrangement, optimal selection and proper plantation of suitable field crops in various agricultural regions of the country, efficient farm operation and management, science advice, policy development and decision-making, as well as similar scientific researches in other countries and regions in the future.

**Key words:** Canada; field-crop production; key agrometeorological factor; critical agrometeorological indicator

## 0 引言

农业是加拿大重要的经济产业。农田作物生产力及其经济收益很大程度上取决于当地的农业气象条件。农业气象的多变性和不确定性是影响农田作物生产和带来风险的主要原因(Vincent and Mekis, 2006; Zha et al., 2010)。迄今为止,极端天气和气候条件尚无法有效控制(陈凯和章文才, 1991; 陈凯等, 1992a; Nadler, 2007)。例如,加拿大2001—2002年的严重旱灾直接导致农业损失36亿加元,减少58亿加元的国民经济生产总值和4万1千个职位(Wheaton et al., 2005; Bonsal and Regier, 2007)。由于农业气象因素错综复杂,许多情况仍未被充分认识,无法在极端气象灾害发生前精准预测。在实践中,除了气象预报本身条件的限制外,最显著的障碍因素是缺乏适宜的农业气象指标,用以科学地评价各地的天气和气候条件,合理安排农田作物生产,做到适时适地适栽(Robertson, 1968; Bootsma, 1994, 1997, 1999; Qian et al., 2010)。

世界气象组织早在1997年就发表了极端农业气象专题报告(Benson et al., 1997),于2003年出版了自然灾害和极端天气对农业生产的影响和减轻灾害措施论文集(Das et al., 2003),还建立了世界气象信息中心,通过互联网及时汇集各国官方的气象资料和极端天气预报,并成立了世界气候研究署,通过气候变化预测和指标开发专家组,协调国际合作事宜,已筛选出27个极端气候的核心指标(Nyenzi, 2006)。Frich et al. (2002)和Alexander et al. (2006)分别选择了10个和16个指标,分析和研究20世纪中全球极端气候的变化。最近实施的北美极端气候监测项目,为气候变化研究提供了12个重要的极端气象指标(NOAA, 2007a)。美国大气与海洋管理署全国气候数据中心也开发了6个极端天气指标(NOAA, 2007b)。然而,上述指标主要用于监测气候变化,而不是针对农业气象应用所需。加拿

大至今尚未形成一套较完整的农业气象临界指标。另一方面,与大气CO<sub>2</sub>富集相关联的全球气候变化导致地表气温上升和极端天气越来越明显(Alexander et al., 2006; Qian et al., 2009, 2010)。而各种各样的极端气象事件可能在全球各地不定期地频繁发生,进而造成农业生产的经济损失。例如,美国由于干旱而使农业年平均产值损失60~80亿美元(Narasimhan and Srinivasan, 2005)。据联合国减灾办公室估计,全球每年因极端气象灾害造成的总损失占其直接损失的比例为:一年生作物是1.5~2倍,多年生作物是5~7倍(Gommes, 1997)。预计全球气候变化将进一步增加发生极端农业气象事件的风险(Benson et al., 1997; Hewitt et al., 2008),为今后发展农田作物生产带来严峻挑战。但由于气候暖化和大气CO<sub>2</sub>富集效应,同时又可能为将来的农田作物生产提供增强光合能力而高产优质的机遇(Chen and Lenz, 1997; Chen et al., 1999, 2002; 陈凯等, 2012),这种趋势在像加拿大这样的高纬度国家更加明显。Qian et al. (2009, 2010)分析了该国农业气象和作物生长期历史资料,发现在1895—2007年期间由于全球气候变暖,加拿大栽培的喜凉作物、喜暖作物和越冬作物的生长期分别增加了13.3、15.4和20.0 d。

本研究旨在开发和评价适合加拿大主要农田作物的农业气象临界指标,为分析和探讨该国各农产区气候变化的趋势及其对农田作物生产的影响,精准地监测和预报极端天气和气候事件,预测农田作物生产和农场运作中面临的风险或机遇,提供有用的工具和可靠的资料,也可供对其他国家或地区类似的研究参考。

## 1 选择指标的原则和范围

使用农业气象指标者常有三类对象,他们对气象资料的需求各不相同。第一类是农业技术和科技咨询人员,他们对气象信息的科学性、可靠性、代表

性和责任性要求高,并经常需要比较现时的和过去的资料;第二类为制定农业政策、进行决策和生产布局的管理人员,他们注重如何利用农业气象指标直接为科学决策和效果评价服务,要求这些指标灵敏、实用和高效,并能同时提供历史性气象资料;第三类是农民、公众和媒体人员,他们需要清晰、简单、明确和实用的气象信息,以便于接受和直接应用。开发农业气象临界指标,必须同时满足以上三类人员的需求,不仅能帮助农业科技人员和专家监测极端的天气和气候状况,评价农业管理措施的效果;而且能促进农业决策和管理人员,更好地理解气象因素之间的相互作用和关系,更科学合理地进行农业生产布局和管理决策;还能为普通公众和新闻媒体及时提供农业生态系统中的天气和气候现状和变化趋势。极端的农业气象条件虽然较少发生,但对该国农产区的某些农田作物可能造成破坏性伤害,因此,本研究把待开发的关键性农业气象因素的临界指标设计为,能用于监测加拿大范围内影响农田作物的极端天气和气候条件的精准的科学工具。它们必须能代表在该国范围内显著影响农田作物生产的关键性极端天气和气候条件,诸如作物生长有效积温、农田有效水分等农业气象临界指标,这些因素能对农田作物生产造成大范围的负面影响、带来显著的经济风险、或引起严重的气象灾害(陈凯和章文才,1991;陈凯等,1992a,1992b)。本研究选择的关键性农业气象临界因素包括:在农田作物生长期或农业生产年中与极端气温和降水、强风、作物有效生长温度及其累积热能和土壤极端水分有关的较长时间内大范围频发性自然天气和气候条件,但不包括龙卷风和冰雹等较短时间内小范围突发性的自然灾害。由于缺乏足够的极端农业气象事件对牲畜生产影响的资料,本课题仅以农田作物(包括园艺作物和饲料作物)为研究对象。太阳光能是作物光合作用、生理发育和农产品成熟必需的能源因素(陈凯等,1992a,1992b;Chen and Lenz,1997;Chen et al.,1998,1999,2002)。在加拿大农田作物生产中,光照不是突出的限制条件(Brimelow et al.,2010a,2010b),因此本研究未考虑该因素。作物有效生长积温及其累积热能是直接影响该国农田作物在很短的生长期及时完成生长发育和高产优质的关键农业气象指标(Bootsma,1997;Szeto,2007),因而被采纳。另外,本研究对一年生作物生长期和二年生及多年生作物越冬期常遇到的冷冻现象也给予特别考虑。

## 2 农田作物的选择标准及其临界温度指标

农田作物对大气温度的生理反应可用其三种重要的临界温度指标来表示。它们是植株生长发育的最低临界温度( $T_{\min C}$ )、最高临界温度( $T_{\max C}$ )和最适温度( $T_{\text{opt}}$ )。在这三种温度情况下,作物生长发育分别处于开始、停止和最快的生理状态(James,1985;陈凯等,1992a,1992b)。不同作物对这些临界温度都有一定的适应范围,并由其遗传种性所决定(胡国谦等,1993)。而且,这类指标又随作物种类、品种及其生理发育阶段的不同而异(陈凯和章文才,1991)。这些临界温度指标发生的时间和阶段就是确保其植株健康生长发育和获得高产优质农产品的临界气象条件。在加拿大不同的农产区,根据各种农田作物的临界温度指标可分成越冬作物、喜凉作物、喜暖作物和喜热作物4大类。

### 2.1 越冬作物

这类农田作物包括冬小麦、草莓、苜蓿和猫尾草等草本作物,及苹果、梨、桃、樱桃、杏、李、红莓、蓝莓、悬钩子、醋栗和葡萄等木本落叶果树。它们在生长期能完成正常的生理发育,在非生长期休眠越冬。其中,草本作物的地上部器官自然枯死,地下部器官休眠,下一年生长期又萌发生长。在加拿大农产区,作物生长期中经常发生短暂的霜冻和寒流等极端天气,越冬期则出现持续的冰冻现象,这些气象事件显著影响该类作物生长发育及安全越冬。农田作物是否能安全过冬,在很多情况下取决于从晚秋到早春的气象条件,特别是冬季的冰冻伤害(Parker,1963;Nadler,2007)。因此,本研究除考虑作物生长期经常发生的霜冻和寒潮天气外,还把该类农田作物越冬期的冰冻状况作为一个重要的农业气象临界指标进行探讨。

### 2.2 喜凉作物

这类作物生长发育需要相对温凉的温度条件。在加拿大农田作物生产中,它们包括春小麦、大麦、油菜、燕麦、黑麦、豌豆和马铃薯等草本作物。这类作物仅栽培于该国南部与美国接壤的农产区,通常以早春农田化冻后春播为主,其植株在晚春和初夏快速生长和发育,于夏末至早秋成熟后收获。

### 2.3 喜暖作物

这类作物生长发育要求相对温暖的气温条件。在加拿大农田栽培的常见种类有玉米、青豆、大豆和红薯等草本作物,仅在该国最南部与美国交界边境

较温暖的地区可自然栽培,在夏季和早秋能正常生长发育,晚秋成熟收获,通常遇到首次秋霜后自行枯萎死亡。但在加拿大其他地区大多数年份中,由于生长期太短或有效积温不够而无法完成植株正常生长发育和成熟的整个生理代谢过程,因而难以高产稳产和优质栽培。

## 2.4 喜热作物

这类作物生长发育要求较高的温度条件。它们包括黄瓜、蕃茄、南瓜、甜瓜、西瓜和烟草等草本作物。除在温室或其他保护设施内及小气候温暖和立地条件较好的庭院中有很小规模栽培外,这些作物在加拿大大多数农产区自然条件下,几乎不能正常生长发育完善或达到充分生理成熟的程度,更不能在田间自然越冬。因此,这类作物未列入本研究对象。

根据加拿大各农产区现有农田作物生产和农业气象资料,本研究选择上述前三类主要农田作物,确定其各种相应的关键性农业气象临界指标。表 1 列出了它们在作物生长期和农业生产年中植株生长发育和农产品生理成熟所需的最低、最适和最高临界气温指标。这些作物相应的其他农业气象临界指标将分述于后。

表 1 加拿大主要农田作物的种类及其植株生长和发育的临界温度指标

Table 1 Types of major field crops and their critical indicators of cardinal temperatures for plant growth and development in Canada

农田作物种类 (主要栽培物种)	°C		
	$T_{\min C}$	$T_{\text{opt}}$	$T_{\max C}$
越冬作物(二年生或多年生农田草本作物和木本落叶果树作物)	5.0	25.0	35.0
喜凉作物(小麦、大麦、油菜、黑麦、燕麦、豌豆和马铃薯等一、二年生草本作物)	5.0	25.0	30.0
喜暖作物(玉米、青豆、大豆和红薯等一年生草本作物)	10.0	30.0	35.0

## 3 作物生长期和农业生产年的定义与划分

### 3.1 传统经验的作物生长期、非生长期和农业生产年

根据传统生产经验,加拿大用固定的公历日期表示上述三类农田作物生长期、非生长期和农业生产年的日期范围(表 2)。而在每个农业生产年中,这些作物的实际生长期,是从播种至其农产品充分

生理成熟(喜凉作物)、或至秋季首次出现霜冻而使植株地上部器官停止生长(喜暖作物和越冬作物)的日期长度,但它随不同年份和地区的自然环境差异而变化(Bootsma, 1994, 1997; Qian et al., 2010)。在实际应用中,由于各年各地的气候情况复杂多变,以及不同农产区的自然环境条件差异和全球气候变化及其在不同年份的波动,使这种传统经验的表示方法不能与各农产区每年的实际情况相符(Nuttonson, 1955, 1957, 1958)。

表 2 加拿大传统经验的作物生长期、非生长期和农业生产年的固定日期范围

Table 2 Traditionally fixed time frames of crop growing and non-growing seasons and agricultural year in Canada

农田作物种类	作物生长期	作物非生长期	农业生产年
越冬作物	4月1日— 9月30日	10月1日— 3月31日	10月1日— 9月30日
	4月1日— 8月31日	9月1日— 3月31日	9月1日— 8月31日
喜凉作物	5月1日— 9月30日	10月1日— 4月30日	10月1日— 9月30日
	5月1日— 9月30日	10月1日— 4月30日	10月1日— 9月30日

### 3.2 以植株生长和发育的最低和最高临界温度为科学依据的作物生长期模式

本研究以不同作物的植株生长和发育对最低和最高临界温度( $T_{\min C}$ 和 $T_{\max C}$ )的要求(表 1)为科学依据,建立加拿大不同农产区任意年份中各类作物生长起始日期(growing season starting date, GSSD)至结束日期(growing season ending date, GSED)的通用模式,精准地确定其实际的生长期。其中, GSSD 和 GSED 分别定义为,在该农业生产年中,日平均气温( $T_{\text{mean}}$ )的 5 d 滑动平均值首次和最后一次连续 5 d 达到或低于该作物的植株生长和发育最低临界温度( $T_{\min C}$ )的开始和终止日期。日平均气温的 5 d 滑动平均值可用下式计算:

$$\bar{X}_n = \frac{X_{n-2} + 4X_{n-1} + 6X_n + 4X_{n+1} + X_{n+2}}{16} \quad (1)$$

其中: $\bar{X}_n$ 是连续 5 d 中第一天至最后一天出现的滑动平均温度值(°C); $X_i$ ( $i = n - 2, n - 1, n, n + 1$ 和 $n + 2$ )是在农业生产年或作物生长期中,第  $n$  天的日平均温度。生长期长度是从 GSSD ( $D_{\text{GSS}}$ )至 GSED ( $D_{\text{GSE}}$ )的实际间隔天数(Qian et al., 2010)。因此,该农田作物的生长期长度(growing season length,  $L_{\text{GS}}$ ;单位:d)可用下列公式求得:

$$L_{\text{GS}} = (D_{\text{GSE}} - D_{\text{GSS}}) + 1 \quad (2)$$

采用上式计算时,先要把 GSSD 和 GSED 分别换算成该年中的第  $n$  天。例如,2013 年 2 月为 28 d,假设某农田作物在该年的 GSSD 和 GSED 依次为 4 月 5 日和 9 月 15 日,则其  $L_{GS} = (258 - 95) + 1 = 164$  d。

各类作物的 GSSD、GSED 和  $L_{GS}$  因地而异,又随年份有变化。在加拿大,喜凉作物主要是春播的谷类作物,多在春季农田化冻后播种。与越冬作物和喜暖作物不同,这类作物在夏季当气温达到季节性最高值时(多数在 8 月)成熟收获,故其 GSED 的估计方法需特殊考虑。因为如在该类作物即将生理成熟前一段时期遇到极端高温或低温天气,就会显著加速或延迟成熟,这些特殊年份的异常天气使作物成熟过程变得复杂异样,用上述方法难以正确判断其 GSED。为此,本研究因物制宜,改用日最高温度( $T_{max}$ )的 5 d 滑动平均值来确定该类作物的 GSED。根据加拿大各农产区该类作物历年实际多在 8 月收获这一客观事实(Nuttonson, 1955, 1957, 1958; Nadler, 2007),规定当连续 5 d 的最高温度滑动平均值达到 30 °C(喜凉作物的  $T_{maxC}$  值)时,该类作物生长期结束,但不得早于 8 月 1 日或晚于 8 月 31 日。通过这种特殊处理,使该类作物的 GSED 能符合其历年实际收获日期的统计规律(Nuttonson, 1955, 1957, 1958; Nadler, 2007)。

进一步把本研究根据不同作物临界温度而计算出的 GSSD 和 GSED,与已知的全国各地各主要农田作物的实际播种日期和收获日期的历史记录(Nuttonson, 1955, 1957, 1958; Robertson, 1968; Nadler, 2007)进行比较和统计分析,发现它们相符,说明以农田作物生长和发育的临界温度为科学依据的生长期模式不仅方法可靠,而且切合实际情况,它比传统经验法所固定的作物生长期更能客观地反映农田作物的实际生长期,同时还可把长期存在的全球气候变化(Bootsma, 1994; Chen et al., 1997, 1999, 2002; Qian et al., 2010)等因素考虑进去,以便于建立更完善和适用的关键性农业气象临界指标。

必须指出,对多数农田作物来说,其农业气象临界指标还会因各农产区的自然环境和不同种类作物的生长发育和生理状态不同而异。例如,多发于晚春和早秋的霜冻常在当大气温度下降到冰点时才会出现;相反,在夏季和早秋易发生的热害,使植物叶片、嫩芽、幼果及新梢等器官发生日灼,往往比单独根据气温指标估计的结果更严重。而其他气象因素和环境条件,如风向及其持续时间、太阳光照时间长

度和强度、光周期长短、坡度、坡向、排灌条件、遮荫、植物病虫害、土壤肥力、土壤有效养分和水分等因素都会影响农田作物的生长和发育状态(Chen et al., 1997, 1998; Raddatz and Hanesiak, 2008; Hanesiak et al., 2009)。各农产区当地的地理、水文、土壤和小气候等条件也会影响作物的分布和对立地条件的适宜性(胡国谦等, 1993),还会改变作物对极端气象条件的适应能力及获取高产优质的潜力(Bonsal and Regier, 2007; Brimelow et al., 2010b)。因此,应该采取因地制宜的手段,只有综合评价各地基本气象因素的变化规律和对农田作物生产的可能影响及其产生的潜在风险或有利条件,才能作出既全面正确、又科学合理的判断。

## 4 农田作物关键性农业气象因素及其临界指标

### 4.1 农田作物关键性农业气象因素

本研究重点考虑与加拿大各农产区主要农田作物生产密切相关的六大类极端天气和气候因素,以此建立关键性农业气象临界指标体系。这些因素包括该国作物生长期或农业生产年中经常出现的极端气温、降水、强风、冷冻、土壤极端水分和作物生长有效温度及累积热能(表 3)。气温是影响作物分布及其生长发育的关键气象因素(胡国谦等, 1993)。它不仅是调节植株生理代谢的物理催化剂,而且直接影响作物的产量和产品质量(陈凯和章文才, 1991; 陈凯等, 1992a, 1992b)。气温高低反映农田生态系统中的热能水平。冷冻会使农田作物的幼嫩器官遭受物理伤害,特别是在作物生长初期或晚期及晚秋和初冬的生理代谢转变阶段最敏感。有效积温是满足作物经过正常生理发育最终获得高产优质农产品必需的气象条件,可通过定量统计各种农田作物生长期的日平均有效温度及其累积水平来衡量。各种作物从播种或栽植经过生长发育到其产品成熟的生理代谢过程,一方面依赖于每天适宜的温度条件,另一方面取决于该期间作物生长的有效热能的累积水平。这两项温热因素不仅从根本上调节作物的生长期,而且通过影响植株的生理生化代谢而控制其生长发育及最终产量和质量的形成(Brown and Bootsma, 1993; Bootsma, 1999)。降水决定农田作物的水分供应条件,包括大气和土壤湿度。由于作物生产力往往受田间有效水分限制,通过分析农田降水量可以定量评估在该降水条件下农田作物获得经济产量和产品质量的潜力(Bonsal and Regier, 2007;

Raddatz and Hanesiak, 2008)。另外,水分又是调节环境和植株温度的重要生物物理因素。土壤水分是农田作物水分供应的主要来源。土壤湿度也能影响植株生长发育及其产量和品质。强风能使植株营养生长和生殖生长器官受到机械伤害,破坏农田中大气—作物—土壤生态系统的水分平衡关系,导致病虫害传播,从而影响作物生长发育及最终产量和品质。

上述各类极端天气和气候因素不仅会显著制约农田作物生产,而且常成为提高生产效益和农场运作效率的重要障碍(Nadler, 2007; Hanesiak et al., 2009; Qian et al., 2009, 2010)。它们是加拿大不同农产区因地制宜进行农田作物适时适地适栽必须首先考虑的关键气象条件。系统分析和全面了解这些农业气象因素在各地出现的频率和变化趋势,不仅可以有效地防止和减轻它们对农田作物生产带来的可能风险,而且能为作出合理的科学决策、制定相宜的方针政策、实现全国各地农业的持续发展贡献才智。

#### 4.2 农田作物关键性农业气象指标的选择与评价标准

表 3 列出了本研究所选择的 6 类关键性极端天气及气候因素和 12 个农业气象临界指标及其评价标准。它们代表加拿大农田生态系统中最关键的农业气象因素和客观条件。根据各类作物对最低、最高、霜冻和冰冻临界温度、降水、土壤湿度、强风,以及植株正常生长发育和实现高产优质所需的有效积温与累积热能等临界气象指标,可衡量和评估该国各农产区对农田作物生产影响最关键的极端农业气象条件及其临界指标。

#### 4.3 农田作物临界气象指标的科学意义和应用价值

上述 12 个农业气象临界指标归类于 6 类关键性农业气象因素(表 3),每类包含 2 个临界指标。它们的科学意义和在该国农田作物生产中的应用价值分述如下。

##### 4.3.1 异常温度临界指标

异常温度临界指标(表 3)包括在作物生长期中发生的寒潮和热浪天气。它们分别代表日最低温度低于作物所要求的最低临界温度( $< T_{\min C}$ )和日最高温度高于作物所要求的最高临界温度( $> T_{\max C}$ )。这两个指标是作物生长发育对极端低温和高温天气条件的客观要求,据此可以科学地评价极端温度条件对加拿大各农产区作物生长、植株健康的影响及

潜在风险。当田间气温低于或高于作物临界温度值时,植株生理代谢就会停止。

植物生长发育的温度临界值( $T_{\min C}$ 或 $T_{\max C}$ )随作物种类和品种不同而异(表 1),并能在实验室或经田间试验确定。每种作物还有其特定的生长发育最适温度( $T_{\text{opt}}$ )范围(表 1)。此外,在正常的田间条件下,虽然在作物生长发育的临界温度时(尤其是当夜间气温较低但尚高于冰冻温度时),植株的生长发育过程在总体上停止,但大多数农田作物在白天气温较高时某些生理代谢旺盛的器官仍保持一定的生长势。像加拿大这类地处高纬度的国家,尤其在其较北部的农产区,在农业生产实践中必须特别注意与低温(而不是高温)有关的极端农业气象条件及其对农田作物生产的不利影响和潜在风险(Nadler, 2007; Qian et al., 2009, 2010)。

##### 4.3.2 强降水临界指标

这类指标表示在作物生长期的一定时间范围内,如 1 d 或连续 10 d 的最大降水量(P1D 或 P10D)。它们都直接反映在其特定时间内的降水量,代表在该期间的平均降水强度。但后者比前者测量的期限更长,因而能更好地评价由于在较长的时间范围内连续强降水可能带来的洪涝或田间积水,对农田作物生长发育或产量及品质造成的负面影响与潜在风险。这类气象条件对农田作物生产和农事操作不仅与季节有关,而且因不同作物种类和品种对涝害的敏感性及其植株生长发育的生理状态而异。在早春阶段,强降水会妨碍农事操作,延误农田作物的播种。春季连阴雨常伴随低温天气,推迟农田作物生长发育,降低作物根系吸收养分的能力,甚至引起生长初期营养不良的症状。在夏季,强降水过程一方面会冲刷土壤,导致养分流失;另一方面会使土壤板结,降低通气性能,甚至影响作物正常生长发育,滋生和传播病虫害。秋季强降水易导致植株倒伏,推迟作物成熟,降低农产品产量和质量(陈凯等, 1992a, 1992b, 2012)。此外,在农田作物生长初期或收获后发生强降水最易造成农田土壤侵蚀、肥料流失和土地荒芜。而且,连续的强降水天气常带来高湿、低温和弱光照等逆境气象条件,引起农田作物和土壤病虫害暴发,不利于作物健康发育和高产优质。

##### 4.3.3 强风临界指标

风由空气的物理移动而产生。它能加强农田中空气对流、热能传导、水汽分布和大气  $\text{CO}_2$  扩散(Chen et al., 1997, 1998, 1999, 2002)。农田自身的

表3 加拿大主要农田作物临界气象指标的开发和评价标准

Table 3 Development and evaluation criteria of critical agrometeorological indicators of major field crops in Canada

临界气象指标	中、英文指标名称及代号和单位	农田作物临界气象指标的开发和评价标准
异常温度 临界指标	气温低于 $T_{\min C}$ 的寒潮天数 (days of cool spell below $T_{\min C}$ , DCS, d)	生长期中日最低温度 ( $T_{\min}$ ) 低于作物生长发育临界低温 ( $T_{\min C}$ ) 的天数。 令 $T_{ij-\min}$ 为在 $j$ 段时期中 $i$ 日的最低温度, 统计出现 $T_{ij-\min} < T_{\min C}$ 的首日至末日之间的天数。
	气温高于 $T_{\max C}$ 的热浪天数 (days of heat wave above $T_{\max C}$ , DHW, d)	生长期中日最高温度 ( $T_{\max}$ ) 高于作物生长发育临界高温 ( $T_{\max C}$ ) 的天数。 令 $T_{ij-\max}$ 为在 $j$ 段时期中 $i$ 日的最高温度, 统计出现 $T_{ij-\max} > T_{\max C}$ 的首日至末日之间的天数。
强降水临 界指标	日最大降水量 (greatest daily precipitation, P1D, mm)	生长期中最大日降水量。令 $P_{ij-1d}$ 为在 $j$ 段时期中 $i$ 日的降水量, 则最大日降水量 $P_{j-1d} = \text{Max}(P_{ij-1d})$ 。
	旬最大降水量 (greatest ten-day precipitation, P10D, mm)	生长期中最大旬降水量。令 $P_{ij-10d}$ 为在 $j$ 段时期中 $i$ 旬的降水量, 则最大旬降水量 $P_{j-10d} = \text{Max}(P_{ij-10d})$ 。
强风临 界指标	日最大风速 (maximum daily wind speed, MDWS, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	在生长期中记录每天的最大风速, 并与历史同期风速资料比较, 得出日最大风速。
	强风持续天数 (number of strong wind days, NSWD, d)	在生长期中记录日平均风速大于 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的日期。令 $V_{ij-\text{mean}}$ 为在 $j$ 年中 $i$ 日的平均风速, 统计 $V_{ij-\text{mean}} > 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的天数。从进入统计范围第一天至最后一天的连续日期即是强风持续天数。
冷冻临 界指标	无霜期天数 (number of frost-free days, NFFD, d)	在农业生产年中, 对喜暖作物和喜凉作物或越冬作物分别按日最低气温大于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ 的标准, 统计这些气温出现的天数。从进入统计范围第一天至最后一天的连续日期即是该类作物所需的无霜期持续天数。
	冰冻期天数 (number of ice-freezing days, NIFD, d)	生长期中, 4月1日—9月30日按日最低气温小于 $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ 的标准, 统计该温度出现的天数。非生长期中, 10月1日—11月30日、3月1—31日及12月1日—2月28/29日, 对草本和木本作物按日最低气温分别小于 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 及 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 的标准, 统计该温度出现的天数。
土壤极端水 分临界指标	标准降水系数 (standardized precipitation index, SPI, 无单位量)	根据作物生长期或农业生产年中标准降水量中值出现的概率记录, 令降水量等于0为SPI分布平均值。当SPI为负值时, 土壤比常年干燥; 当SPI为正值时, 土壤比常年潮湿。
	季节性水分亏缺 (seasonal water deficit, SWD, mm)	将作物生长期或农业生产年中农田潜在的日平均蒸发和蒸腾量 (PET) 减去日平均降水量 ( $P$ ) 为其季节性水分亏缺 (即 SWD 等于 PET 减去 $P$ )。当 SWD 为负值时, 土壤水分过剩; 当 SWD 为正值时, 土壤水分亏缺。
有效热能 临界指标	作物生长有效积温 (effective growing degree days, EGDD, 有效积温度日)	作物生长期中, 日平均气温大于其生长发育的临界最低温度 ( $T_{\min C}$ ) 的有效温度 (GDD) 累积值。将日长因素乘以 GDD 即得作物生长有效积温。
	作物累积热能单位 (crop cumulative heat unit, CCHU, 有效热能单位)	作物生长期中, 根据农田中日最低和最高气温, 累积计算出的大于各类作物生长发育临界最低温度 ( $T_{\min C}$ ) 的有效热能单位统计值。

位置及开阔程度和周围障碍物 (如其他作物、树木、建筑和立地条件) 等都显著影响田间风速。本研究选择作物生长期中日平均最大风速和平均风速大于  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的天数作为强风临界指标来探讨。其中, 前者可衡量农田中相对短暂的强风状况, 后者则表示持续的强风天气条件。

风在农田中至少可通过以下5种途径影响作物生长和发育: 1) 大气—土壤—作物生态系统中热能的传播和交换; 2) 土壤蒸发作用; 3) 作物蒸腾作用; 4) 大气中  $\text{CO}_2$  的扩散和被作物光合作用所吸收利用; 5) 植株机械伤害 (陈凯和章文才, 1991; 陈凯等, 1992a)。风直接促进大气—土壤—作物生态系统

中热能的扩散。土壤蒸发作用是农田水分损失及其湿度平衡的物理过程,强风会显著加强蒸发速率。在地表水层较浅和干燥炎热的天气下,暴露于直射光照下的裸露粗糙表土损失水分最多。作物蒸腾作用是其植株新陈代谢,通过叶片气孔散失水分的生理过程;它随风速的增强而增加,同时又因不同作物的种类及其发育年龄阶段而异。该过程还与农田气温和湿度有关。在干热天气时,强劲的干热风常会使作物快速地过度失水而引起植株萎蔫,造成植物生理逆境胁迫(陈凯等,1992a,1992b,2012;Chen and Lenz,1997)。在冬季,加拿大的农田土壤常处于冰冻状态,由于强风会使土壤和越冬作物过度失水,迫使植株因无法及时补充水分而引起其组织或器官严重受伤,甚至枯死。在作物生长期农田风速的适当增大会有利于 $\text{CO}_2$ 在作物群体中扩散,促进植株光合作用和利用 $\text{CO}_2$ ,增强其干物质生产的能力(Chen et al.,1997,1998,1999,2002),从而有利于高产优质。但强风会导致气孔关闭,太强的风力会损伤植株,甚至折断叶片、枝条、茎干、花朵和果实。另外,强风还会引起作物倒伏和土壤侵蚀,造成生理落花落果,促使作物病虫害在田间快速传播扩散,甚至导致作物减产和品质下降(陈凯等,1992a)。

#### 4.3.4 冷冻临界指标

在本研究中,冷冻临界指标被定义为极端低温下降到农田作物发生冻害的临界低温时的总日数。首次发生霜冻或冰冻及其持续天数对农田作物有显著的负面影响或潜在风险。在加拿大农业生产中,霜冻天数(NFFD)已被广泛用来估算农田作物生长期长度和确定各种作物最适宜的播种日期及收获日期(Qian et al.,2009,2010)。冰冻天数(NIFD)则被用来估计在自然条件下冰冻对越冬农田作物造成冻害的风险(Nadler,2007)。

霜冻常发生在农田作物生长刚开始或将结束阶段晴朗无风的夜里,因而很容易伤害作物叶幕上层的幼嫩器官。它多半在半夜到临晨较短的时间内发生,第二天早晨太阳出来后很快消失,持续时间短,对作物的影响较冰冻小。发生霜冻时,只有当作物组织温度下降到其临界致死温度以下时,才能引起植物生理生化的不可逆反应,造成细胞、组织或器官功能失控,生物内部结构破坏,导致作物受伤或死亡。但无论是早春还是晚秋发生严重霜冻都会对农田作物生产造成直接影响,甚至带来明显的经济损

失。在加拿大较北部的农产区,霜冻是发展农田作物的主要气象限制条件。早春最后一次霜冻对农田作物特别重要,它直接决定作物的播种期,同时会严重伤害刚开始生长的农田作物幼叶、嫩芽、花蕾和幼果,显著影响植株的营养生长和生殖生长(陈凯等,1992a)。秋季初霜则直接决定作物生长终止及收获日期,对该国较北部的农产区尤其重要。

无霜期对农田作物生产是实用、适宜和安全的气象指标。实际上,无霜期通常短于作物生长期长度(陈凯和章文才,1991)。本研究把无霜期定义为,从早春气温达到当农田作物生长发育所需临界温度至晚秋下降到低于该温度指标之间的天数。本研究规定,在农田作物生长期中估计霜冻伤害的起始和终止日的临界温度指标,对于喜暖作物为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对于喜凉作物和越冬作物为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表4)。在实践中用该指标能客观地比较各地和不同年份中农田作物的有效生长期长短,还可用来衡量不同农产区各种农田作物的生长期差异,有效地指导农田作物生产。表5列出了加拿大主栽的农田作物达到生理成熟所需无霜期天数(Nadler,2007)。

冰冻天气常发生在越冬农田作物的非生长季节。由于加拿大地处较寒冷地区,冬季冰冻是发展农田作物另一个重要的气象限制条件,尤其是多年生和二年生越冬作物(Parker,1963;胡国谦等,1993)。这类作物包括各种木本落叶果树作物和草本饲料作物及草莓等园艺作物。草本作物生长发育主要受气温控制。在生长期末,当气温下降到其临界低温时,这类作物就停止生长发育,地上部的茎、叶等器官在入冬前自然枯死。同时,其根系一般仅分布于表土层,根颈芽紧靠着表土层部位,并生理休眠而越冬。因此,要特别注意在非生长期中(尤其是初冬和冬末时)可能发生的冰冻,会伤害这类作物地上部尚在生长发育的器官(Nadler,2007;Parker et al.,2012)。木本作物在秋季停止生长主要取决于日照的长短,而不完全是气温的高低(James,1985);这类作物大多数根系强壮发达,入土深而广。其叶片在秋季停止生长并自然脱落,但其主干、枝条和芽等地上部器官则进入生理休眠状态而越冬。由于这些器官在冬季直接暴露于大气中,它们很容易遭受严寒风冻的伤害。所以,在加拿大农田作物生产中更应注意冬季冰冻的风险。

表4 加拿大各类农田作物受冻害的临界致死温度标准

Table 4 Freezing criteria of critical killing temperatures for various types of field crops in Canada

冷冻天气	常见发生季节	作物生理状态	常见发生时期	作物类别/种类	临界致死温度/℃
霜冻天气	所有农田作物生长期	生长发育阶段	5月1日—9月30日	喜暖作物	0
			4月1日—8月31日	喜凉作物	-2.0
			4月1日—9月30日	越冬作物	-2.0
冰冻天气	越冬农田作物非生长期	初冬准休眠阶段	10月1日—11月30日	二年生和多年生草本作物	-5.0
		及冬末脱休眠阶段	及3月1—31日	多年生木本落叶果树作物	-10.0
		隆冬深休眠阶段	12月1日—2月28/29日	二年生和多年生草本作物	-15.0
				多年生木本落叶果树作物	-30.0

表5 加拿大主栽的农田作物生理成熟所需的无霜期天数

Table 5 Number of frost-free days required for major field crops to physiological maturity in Canada

作物类别	作物名称	所需无霜期	平均无霜期
喜凉作物	大麦	70~90	87
	荞麦	70~90	
	燕麦	82~98	
	小麦	83~103	
	油菜	85~102	
喜暖作物	青豆	85~100	105
	玉米	100~120	
	大豆	105~120	

越冬农田作物的抗寒能力不仅因不同的草本和木本物种而异,而且与其植株当时的生理代谢状态密切相关(Parker, 1963; Nadler, 2007; Parker et al., 2012)。因此,本研究把农田作物越冬休眠过程按其生理特性进一步细分为初冬准(备)休眠阶段(10月1日—11月30日)、隆冬深(度)休眠阶段(12月1日—2月28/29日)和冬末脱(离)休眠阶段(3月1—31日)三个不同的生理阶段(表4)。根据植株的生理代谢状态,越冬作物在非生长期中必须经历这三种不同阶段的生理变化反应,才能完成越冬休眠的全过程。从晚秋至初冬,它们首先要经历准休眠适应阶段,逐渐完成与其体内一系列生理生化代谢相适应的内源有机物质转化及耐寒锻炼和休眠驯化过程,逐步提高细胞液浓度和增强组织的抗寒性。通过这个过程能显著增强植株越冬器官进入深休眠后对隆冬期严寒冰冻的抗御能力,提高越冬成活率。在冰冻天气下,当气温达到越冬作物临界致死低温时,植株或部分敏感的器官就开始受到伤害(陈凯和章文才, 1991)。表4列出了加拿大两大类越冬作物临界致死的低温指标。根据这些资料

和保证越冬农田作物安全过冬的要求,本研究规定,在非生长期中估计越冬作物准休眠阶段及脱休眠阶段和深休眠阶段可能遭受冰冻伤害的临界气温指标依次为:草本作物 $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,木本作物 $-15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表4)。到了次年早春,这类作物又必须经历逐步解脱休眠的生理过程,准备来年开始新一轮生长的一系列生理生化反应和内源有机物质的转化代谢及分配调节。

此外,正如前述,草本作物扎根浅,其根颈芽都紧靠表土休眠越冬,而加拿大的农田在冬季多被积雪覆盖,使它们能得到较好的防寒保护;木本植物扎根深,其休眠茎干和枝芽都暴露在空气中越冬,但它们经越冬锻炼驯化适应,使这些器官组织发育得较老熟耐寒。这些正是这两种不同类型的农田作物虽然越冬临界致死温度存在明显差异(表4),但它们在—同一农产区栽培时均能正常生长越冬的主要生态生理原因。

#### 4.3.5 土壤极端水分临界指标

土壤极端水分是表示农田过分干旱或潮湿的农业气象临界指标,包括标准降水系数(SPI)和季节性水分亏缺(SWD)。它们能用来确定土壤水分亏缺或过剩的水平,根据当地当时的气候和土壤等条件来决定是否需要灌水或排水。根据加拿大农田适宜性分类系统中土壤临界湿度分类标准(Pettapiece, 1995; Narasimhan and Srinivasan, 2005),本研究划分出农田土壤干旱和水渍的SPI和SWD临界标准值范围(表6)。

SPI是在任何时间范围内(通常在作物生长期中)的农田降水量统计概率。它能反映一定时间长度内不同土壤有效水资源在标准降水亏缺或积累过剩的条件下出现的农田土壤干旱或水渍现象。该指标可定量地监测在某个特定时期田间降水量超过或少于正常降水量的程度(Palmer, 1968; Narasimhan

表 6 加拿大农田土壤极端水分指标的临界标准值范围  
Table 6 Critical criteria of extreme soil-moisture indicators of farm land in Canada

极端水分指标	临界标准值	土壤水分状态	临界标准值	土壤水分状态
	-0.50 ~ 0	不干旱	0 ~ 0.50	不潮湿
	-0.80 ~ -0.51	稍微干旱	0.51 ~ 0.80	稍微潮湿
标准降水系数(SPI)	-1.30 ~ -0.81	轻度干旱	0.81 ~ 1.30	轻度潮湿
	-1.60 ~ -1.31	中度干旱	1.31 ~ 1.60	中度潮湿
	-2.00 ~ -1.61	严重干旱	1.61 ~ 2.00	严重潮湿
	≤ -2.01	极端干旱	≥ 2.01	极端潮湿
	-100 ~ 0	不潮湿	0 ~ 100	不干旱
	-101 ~ -200	稍微潮湿	101 ~ 200	稍微干旱
季节性水分亏缺(SWD)	-201 ~ -300	轻度潮湿	201 ~ 300	轻度干旱
	-301 ~ -400	中度潮湿	301 ~ 400	中度干旱
	-401 ~ -500	严重潮湿	401 ~ 500	严重干旱
	≤ -501	极端潮湿	≥ 501	极端干旱

and Srinivasan, 2005)。表 6 给出了在不同干旱或水渍条件下加拿大农田土壤的 SPI 值及其具体的分类体系和相关标准 (Pettapiece, 1995; Narasimhan and Srinivasan, 2005)。SPI 为负值时表示降水亏缺 (即干旱), 正值时代表降水过剩 (即水渍)。对任何农产区通常可依据在某个要求的时间段来估算 SPI 值。这种长期的记录符合当地降水的概率分布, 再转换成正态分布曲线。因而, 该地区在所设计的时间范围内的 SPI 中值是零。所以, 任何一个正的或负的 SPI 值即可表示其降水量多于或少于正常农田土壤含水量中值。SPI 是正常的标准化指标, 它能反映土壤过干或过湿的情况。因此, 在任何农产区某个给定的时期, 无论是干旱还是水渍都可用 SPI 来鉴别和分析农田土壤的水分状况。而且, 通过采用现代化计算机技术和统计分析方法, 很容易通过对某个农产区在某农业生产年中的 SPI 监测值进行计算分析, 对农田土壤干旱或水渍状态及其发生频率和严重性进行科学评估, 鉴别其对农田作物生长发育、农事操作以及作物产量和品质可能产生的显著影响或带来的潜在风险 (Bonsal and Wheaton, 2005; Hewitt et al., 2008)。用 SPI 还能就生长期中作物对土壤湿度逆境的敏感期可能增加或减少发生干旱或水渍的频率和强度进行长期性预测和趋势分析。此外, SPI 还比其他干旱指标简便得多, 而土壤湿度亏缺指数 (Narasimhan and Srinivasan, 2005) 及干旱指数 (Palmer, 1968) 需要考虑许多其他复杂因

素, 如在不同农产区自然降水条件下田间水分供需平衡、因土壤蒸发和作物蒸腾作用导致需水量增加、在不同坡地条件下造成水土冲刷流失、由于不同农田立地条件和地表覆盖情况以及土壤类型、成分、结构、pH 值、盐碱性、有机质、土壤有效持水率、作物种类、扎根深度、生长发育阶段和生理状况等引起的土壤水分条件差异。

季节性水分亏缺 (SWD,  $V_{\text{SWD}}$ ) 能根据农田的实际降水量 ( $P$ ) 与可能蒸发和蒸腾量 ( $\text{PET}, V_{\text{PET}}$ ) 之间的水分亏缺或过剩来表示土壤湿度情况。该指标同时考虑了气温对土壤蒸发和作物蒸腾的影响, 后两者直接影响农田潮湿程度, 进而影响作物生长发育 (Hewitt et al., 2008; Hanesiak et al., 2009; Brimelow et al., 2010a, 2010b)。SWD 能通过将一定时间范围内的 PET 减去同期的降水量 ( $P$ ) 而求得 (Baier, 1971; Qian et al., 2010)。即,

$$V_{\text{SWD}} = V_{\text{PET}} - P. \quad (3)$$

$V_{\text{PET}}$  可用 Baier (1971) 建立的通过计算农田生态系统中日最高和日最低气温 ( $T_{\text{max}}$  和  $T_{\text{min}}$ ) 与其大气层上方太阳辐射强度 ( $R_s$ ) 的关系来求得。农田潜在蒸发量 (latent evaporation,  $E_L$ ) 可用下列公式 (Baier, 1971; Bootsma, 1994) 估计:

$$E_L = -57.334 + 1.6704T_{\text{max}} + 1.6794(T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) + 1.1613R_s. \quad (4)$$

然后,  $E_L$  可通过下式转换成  $V_{\text{PET}}$ 。

$$V_{\text{PET}} = 0.086 \times E_L. \quad (5)$$

其中:  $V_{\text{SWD}}$ 、 $V_{\text{PET}}$  和  $P$  的单位是 mm;  $T_{\text{max}}$  和  $T_{\text{min}}$  的单位是  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E_L$  的单位是  $\text{cm}^3$ ;  $R_s$  的单位是  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。 $V_{\text{SWD}}$  为正值时, 表示降水小于土壤蒸发作用和作物蒸腾作用导致的水分损耗; 负值时, 代表降水大于土壤蒸发作用和作物蒸腾作用所需的水分。所以, 它是表示农田土壤水分临界状态的适用指标。

#### 4.3.6 有效热能临界指标

作物生长发育状态可根据其所要求的  $T_{\text{minC}}$  和  $T_{\text{maxC}}$  指标, 通过估计在作物生长期农田生态系统中所累积的有效热能来间接衡量。对这类临界农业气象指标, 可以用生物统计和现代化计算机模拟技术, 对生长期中所累积的有效热能进行统计分析来确定 (Robertson, 1968; Brown and Bootsma, 1993; Bootsma, 1994, 1997, 1999), 包括作物生长有效积温 (EGDD) 和作物累积热能单位 (CCHU)。由于加拿大每年的作物生长期很短, 这类指标对该国大多数农产区考虑安排喜暖作物和越冬作物生产时都非常重要。

EGDD 可依据自然农田条件下日平均气温大于作物正常生长发育的临界温度指标进行统计计算。在该国多数农产区,喜凉作物和喜暖作物生长发育的  $T_{\min C}$  分别为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (表1)。EGDD 是以在作物生长期中,从春季气温第一次连续 5 d 超过上述临界标准,到秋季气温最后一次连续 5 d 达到该临界标准期间,统计其实际的有效生长积温。可用下列公式计算达到该作物生长发育的有效积温 ( $T_{\text{GDD}}$ ) (Bootsma, 1994, 1997, 1999):

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2}, \quad (6)$$

$$T_{\text{GDD}} = T_{\text{mean}} - T_{\min C} \circ \quad (7)$$

其中:  $T_{\text{mean}}$  是日平均气温;  $T_{\text{max}}$  是日最高温;  $T_{\text{min}}$  是日最低温;  $T_{\min C}$  是作物生长发育要求的临界最低温度。

如  $\frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} < T_{\min C}$ , 则

$$T_{\text{GDD}} = 0. \quad (8)$$

喜凉作物生长发育的起始温度  $T_{\min C} > 5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而喜暖作物的  $T_{\min C} > 10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所以,对于选定的某种农田作物,在任意生长期中的总  $T_{\text{GDD}}$  值,可通过统计从  $T_{\text{mean}}$  在早春首次超过  $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  或  $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (即喜凉作物或喜暖作物的 GSSD) 到该年秋季最后一天达到该临界指标以上 (即喜凉作物或喜暖作物的 GSED) 为止的时期内的有效积温。这些数据便是该作物在此农产区栽培时所要求的总  $T_{\text{GDD}}$  (Bootsma, 1994, 1997, 1999)。因此,

$$\text{总 } T_{\text{GDD}} = \sum T_{\text{GDD}} \circ \quad (9)$$

于是,  $\sum T_{\text{GDD}}$  是该农田作物从 GSSD 到 GSED 的  $T_{\text{GDD}}$  累积值。为了能反映在高纬度地区日照长度对农田作物成熟的影响,本研究将  $T_{\text{GDD}}$  乘以日长因子 ( $\text{DLF}$ ,  $F_{\text{DL}}$ ) 而得到该作物的有效生长积温值 (Bootsma, 1994, 1997, 1999)。即,

$$V_{\text{EGDD}} = \text{总 } T_{\text{GDD}} \times F_{\text{DL}} \circ \quad (10)$$

式中:  $V_{\text{EGDD}}$  的单位是有效积温日;  $F_{\text{DL}}$  可根据当地纬度 ( $V_{\text{LAT}}$ ) 用以下判断 (Bootsma, 1994, 1997, 1999) 求得。

I. 若  $V_{\text{LAT}} \leq 49.0^{\circ}\text{N}$ , 则

$$F_{\text{DL}} = 1.0; \quad (11)$$

II. 若  $49.0^{\circ}\text{N} < V_{\text{LAT}} \leq 61.0^{\circ}\text{N}$ , 则

$$F_{\text{DL}} = -19.3257 + 1.158643(V_{\text{LAT}}) - 0.022107689(V_{\text{LAT}})^2 + 0.0001413685(V_{\text{LAT}})^3; \quad (12)$$

III. 若  $V_{\text{LAT}} > 61.0^{\circ}\text{N}$ , 则

$$F_{\text{DL}} = 1.180. \quad (13)$$

表7列出了加拿大主要农田作物达到正常生理成熟所需 EGDD 值范围 (Bootsma, 1994, 1999; Naddler, 2007)。根据这些资料,得出该国栽培喜凉作物和喜暖作物所要求的 EGDD 平均值分别为 1 485 和 1 375。值得注意的是,由于喜凉作物和喜暖作物的生长发育起始温度 ( $T_{\min C}$ ) 分别是  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (表1),即前者植株的有效生长发育临界温度低于后者,因此,在同一农产区同样的温度条件下,喜凉作物比喜暖作物生长发育起始早、结束迟。从而,前者的植株达到正常生理成熟所需的有效积温值大于后者 (表7)。

表7 加拿大主栽的农田作物生理成熟所需的有效积温 (EGDD) 临界标准

Table 7 Critical criteria of effective growing degree days (EGDD) of major field crops to physiological maturity in Canada

作物类别	作物名称	EGDD 值范围	EGDD 平均值
喜凉作物	小麦	1 538 ~ 1 680	1 485
	燕麦	1 483 ~ 1 750	
	大麦	1 269 ~ 1 540	
	油菜	1 152 ~ 1 445	
喜暖作物	大豆	1 186 ~ 1 719	1 375
	玉米	1 173 ~ 1 779	
	青豆	1 100 ~ 1 300	

确定不同作物的 EGDD 是行之有效的科学方法,它能客观地用来评价作物生长期中不同农产区每天实际累积的热能状况。然后把这些在统计学上定性化的数据累积起来,即能精准地估计作物生长期长度。因此,EGDD 是一个既简便又实用的农业气象指标,它能帮助我们科学地布局农田作物、合理安排农事操作和农场管理等生产实践,提供精确可靠的决策依据。

作物生长发育还在一定程度上受其周围环境条件对有效热能累积的影响。CCHU (crop cumulative heat unit,  $V_{\text{CCHU}}$ , 有效热能单位) 则是用来检测农田生态系统内生长期中作物正常生长发育有效热能水平的农业气象临界指标,尤其是喜暖作物。农田作物的生产能力主要取决于在生长期中的 CCHU 水平,因为 CCHU 直接影响作物的生长和器官发育,控制从播种到农产品生理成熟的整个新陈代谢进程 (Brown and Bootsma, 1993; Bootsma, 1997)。低温天气会减缓作物生理生化代谢速度;高温条件则能

加速上述过程(陈凯等,1992a)。在作物生长期出现异常气候的年份,CCHU 累积值处于较低水平时,农田作物生理成熟期会显著推迟,甚至无法正常成熟,从而显著影响作物生产力。1992 年加拿大安大略省夏季冷凉,使玉米和大豆等喜暖作物严重减产,就是典型例证(Wheaton et al.,2005)。

农田作物生产有效热能单位的日平均值( $V_{\text{CHU}}$ , $V_{\text{CHU}}$ )可用下式(Brown and Bootsma,1993)计算:

$$V_{\text{CHU}} = (Y_{\text{max}} + Y_{\text{min}})/2。 \quad (14)$$

其中:

$$Y_{\text{max}} = 3.33(T_{\text{max}} - 10.0) - 0.084(T_{\text{max}} - 10.0)^2, \quad (15)$$

(若  $T_{\text{max}} = 10.0$ , 则  $Y_{\text{max}} = 0$ );

$$Y_{\text{min}} = 1.8(T_{\text{min}} - 4.44), \quad (16)$$

(若  $T_{\text{min}} = 4.44$ , 则  $Y_{\text{min}} = 0$ )。

因而,

$$\text{总 } V_{\text{CCHU}} = \sum V_{\text{CHU}}。 \quad (17)$$

式中:  $\sum V_{\text{CHU}}$  是从 GSSD 到 GSED 的热能累积值。因此,CCHU 是根据在自然农田条件下每天的  $T_{\text{min}}$  和  $T_{\text{max}}$  值大小,对作物的  $T_{\text{minC}}$  和  $T_{\text{maxC}}$  之间的热能累积值,即作物生长发育的有效热能累积单位。实际上,在加拿大各农产区中很少会出现日  $T_{\text{max}} > 35^\circ\text{C}$  的情况(Brown and Bootsma,1993; Bootsma,1994; Szeto,2007)。当  $T_{\text{max}} > 30^\circ\text{C}$  时,喜凉作物一般都已生理成熟或收获。CCHU 对这类作物并不适用。因此,它仅用于考虑喜暖作物在该国各农产区栽培的情况。

EGDD 和 CCHU 都是农田作物所需有效热能的农业气象临界指标。它们反映作物生长期内农田中可供作物生长发育的有效热能水平,但两者有不同的农业气象含义。CCHU 是将日平均气温对不同作物特定的有效热能单位进行直接的算术换算,它考虑到田间气温与作物生长发育有效热能的关系。EGDD 是个较简单的有效热能指标,它能对作物生长期中所累积的有效温度作出定量的估计,特别适用于加拿大许多农产区中安排生长期相对较短的喜凉作物生产(Brown and Bootsma,1993; Bootsma,1999; Qian et al.,2009,2010)。虽然 EGDD 并不能精确地反映高温和低温的影响,但它仍是预测喜凉作物在自然的田间条件下能否正常生长发育的有用工具。相比之下,EGDD 比 CCHU 计算简单,而 CCHU 比 EGDD 更适用于鉴别该国各农产区发展不同农田作物因有效热能不足所带来的潜在风险和

预计作物的生理成熟期及适宜收获期。所以,在实践中 EGDD 和 CCHU 能分别适用于上述两个对有效热能需求不同的作物类型。喜暖作物比喜凉作物达到正常生理成熟时通常要求较高的 CCHU,但较少的 EGDD。这意味着对有效热能的要求水平前者 ( $> 10^\circ\text{C}$ ) 高于后者 ( $> 5^\circ\text{C}$ )。这正是为什么在加拿大喜暖作物仅局限在南部紧靠美国的几个温暖的农产区田间栽培的重要气象原因。

## 5 结论

在同一农产区相同日期中实际气温条件会随年份和地点而异,以日历天数为基础的传统经验法难以正确地反映和预报各地不同年份中农田作物的生长发育动态。大多数作物的临界温度指标虽已确定,但其生长发育生理代谢过程复杂多变,会影响确定其在不同地点和年份中实际临界温度的精准性。不同种类的作物对临界温度要求各异。本研究采用以各种作物正常生长发育所需的临界温度为科学依据的作物生长期估计方法,能较可靠、精准地预测各类农田作物的 GSSD、GSED 和  $L_{\text{GS}}$ 。应用本研究所开发的作物农业气象临界指标,可科学地预测早春和晚秋的霜冻、生长期中作物的 EGDD 和 CCHU、非生长期中冰冻等异常天气和气候的发生与影响、不同农产区自然生态环境下农田的土壤水分情况以及各种作物生长和发育的生理状态。这对于研究将来全球气候变化对不同农产区各种作物的临界气象指标的影响有帮助。EGDD 和 CCHU 都是作物生长期中农田有效热能的累积指标。它们不仅计算简便精准,而且能比传统经验的日历天数法更科学和客观地评估不同年份和各地区农田作物生长发育的气象条件。与 EGDD 相比,CCHU 是个更精确的农田作物临界气象指标,它适合于判断因有效热能不足对喜暖作物生产的影响大小及可能带来的潜在风险,因而能帮助各农产区正确选择最合适的农田作物种类和确定最适宜的播种期和收获期。另外,它根据农田中昼夜气温极端值( $T_{\text{max}}$  和  $T_{\text{min}}$ )来计算昼夜有效热能对作物生长和产量形成的关系( $Y_{\text{max}}$  和  $Y_{\text{min}}$ )。因此,CCHU 是农田作物重要的临界气象指标,它能精准地估计作物生长期中田间有效热能的累积水平,适用于在加拿大生长期较短而对有效生长温度要求较高而敏感的农田作物,尤其是喜暖作物。在农业生产实践中,NFFD 比 EGDD 和 CCHU 更容易直接简便地观测和计算。它能为农田作物生产直接提供可靠且实用的无霜期资料,并已在该国

农田作物生产中广泛应用,但用其来估计有效热能不足对农田作物生产的风险和判断结果不如 EGDD 和 CCHU 精确。因此,把这些农业气象指标结合起来使用,便会起到取长补短、互相比较和满足各类农业气象指标使用者需求的良好效果。SPI 和 SWD 都适用于评价无论是短期极端干旱或潮湿的天气现象还是长期干、湿的气候条件下土壤水分的实际状况。但 SPI 仅考虑降水因素,而 SWD 还同时考虑到农田太阳辐射条件、大气温度、土壤蒸发作用和作物蒸腾作用的影响。所以,后者更适宜于监测、区别、判断和预报各农产区农田作物发生干旱或水涝的土壤极端水分情况。

**致谢:** 作者感谢加拿大环境部 Downsview 图书馆 LATYSZEWSKYJ Maria 与 MCCARTHY Roberta 女士和加拿大农业与农产食品部 Ottawa 图书馆 TROWER Jennifer 女士为本研究查询农田作物临界气象指标提供有用的资料, DEJONG Reinder、NEILSEN Denise、CHIPANSHI Aston、HILL Harvey 和 ZHANG Xuebin 博士,以及 YAN Feng 和 BOOTSMA Andy 先生等对本课题提出的宝贵建议和帮助。本文献给 O' BRIEN E. G. Ted 先生光荣退休。

## 参考文献:

陈凯,章文才. 1991. 气象条件对柑桔树生长和结果的影响[J]. 气象科学,11(4):431-436.

陈凯,章文才,潘家铮,等. 1992a. 影响柑桔树开花结果性能的生态生理因素[J]. 植物资源与环境,1(4):16-23.

陈凯,章文才,刘道宏,等. 1992b. 温州蜜柑和甜橙叶片光合生产的适宜生态条件[J]. 生态学报,12(3):291-295.

陈凯,胡国谦,Keutgen N,等. 2012. 大气 CO<sub>2</sub> 富集对根际 NaCl 盐渍的人参果 (*Solanum muricatum* Ait.) 植株干物质生产和水分利用的影响[J]. 大气科学学报,35(2):129-139.

胡国谦,陈凯,郑萍,等. 1993. 中国优质水果资源的分布与适宜生态环境[J]. 植物资源与环境,2(1):19-24.

Alexander L V,Zhang X B,Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J Geophys Res,111:1-22.

Baier W. 1971. Evaluation of latent evaporation estimates and their conversion to potential evaporation[J]. Can J Plant Sci,51:255-266.

Benson G J,Dambe D,Damhofer T, et al. 1997. Extreme agrometeorological events[R]//WMO-CAGM Report No. 73.

Bonsal B,Regier M. 2007. Historical comparison of the 2001/2002 drought in the Canadian Prairies[J]. Climate Res,33:229-242.

Bonsal B,Wheaton E. 2005. Atmospheric circulation comparisons between the 2001 and 2002 and the 1961 and 1988 Canadian Prairie droughts[J]. Atmosphere-Ocean,43(2):163-172.

Bootsma A. 1994. Long-term (100 yr) climate trends for agriculture at selected locations in Canada[J]. Climatic Change,26:65-88.

Bootsma A. 1997. Canadian ecodistrict climate normals 1961—1990 [R]. Ottawa,ON;National Land and Water Info Service, Agriculture and Agri-Food Canada.

Bootsma A. 1999. Effective growing degree days: Procedure [R]. Ottawa,ON; National Land and Water Info Service, Agriculture and Agri-Food Canada.

Brimelow J C,Hanesiak J M,Raddatz R L, et al. 2010a. Validation of ET estimates from the Canadian prairie agrometeorological model for contrasting vegetation types and growing seasons [J]. Can J Water Res,35(2):209-230.

Brimelow J C,Hanesiak J M,Raddatz R L, et al. 2010b. Validation of the Canadian Prairie agrometeorological model and an examination of its sensitivity to soil hydraulic parameters using ensembles [J]. Agric For Meteorol,150:100-114.

Brown D M,Bootsma A. 1993. Crop heat units for corn and other warm-season crops in Ontario [R]//Ontario Ministry of Agriculture and Food, Fact sheet No. 93-119.

Chen K,Lenz F. 1997. Responses of strawberry to doubled CO<sub>2</sub> concentration and phosphorus deficiency II. Gas exchange and water consumption [J]. Gartenbauwissenschaft,62(2):90-96.

Chen K,Hu G Q,Keutgen N, et al. 1997. Effects of CO<sub>2</sub> concentration on strawberry V. Macronutrient uptake and utilization [J]. J Appl Bot,71(5/6):189-194.

Chen K,Hu G Q,Lenz F. 1998. Apple yield and quality as affected by training and shading [J]. Acta Hort,466:53-58.

Chen K,Hu G Q,Keutgen N, et al. 1999. Effects of NaCl salinity and CO<sub>2</sub> enrichment on pepino (*Solanum muricatum* Ait.) II. Leaf photosynthetic properties and gas exchange [J]. Sci Hort,81(1):43-56.

Chen K,Hu G Q,Lenz F. 2002. Effects of doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on apple trees II. Dry mass production [J]. Gartenbauwissenschaft,67(1):28-33.

Das H P,Adamenko T I,Anaman K A, et al. 2003. Agrometeorology related extreme events [M]//WMO No. 943.

Frich P,Alexander L V,Della-Marta P, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. Climate Res,19:193-212.

Gommes R. 1997. An overview on extreme agrometeorological events [R]//Benson G J,Dambe D,Damhofer T, et al. Extreme agrometeorological events; WMO-CAGM Report No. 73.

Hanesiak J,Tat A,Raddatz R L, et al. 2009. Initial soil moisture as a predictor of subsequent summer severe weather in the cropped grassland of the Canadian prairie provinces [J]. Int J Climatol,29:899-909.

Hewitt J,Brierley T,Chen K, et al. 2008. Assessment of climate change impacts on agricultural land-use suitability: Spring seeded small grains on the Prairies [R]//Agriculture and Agri-Food Canada Report.

James S. 1985. Glossary for horticultural crops [M]. New York, Wiley: Amer Soc Hort Sci.

- Nadler A. 2007. An agroclimatic risk assessment of crop production on the Canadian Prairies [ D ]. Winnipeg, MB: Dept of Soil Sci, Univ of Manitoba, Canada.
- Narasimhan B, Srinivasan R. 2005. Development and evaluation of soil moisture deficit index and evapotranspiration deficit index for agricultural drought monitoring [ J ]. *Agric For Meteor*, 133 ( 1/2/3/4 ): 69-88.
- NOAA-National Climatic Data Centre. 2007a. North America climate extremes monitoring [ R ]//NOAA Satellite & Info Service.
- NOAA-National Climatic Data Centre. 2007b. The U. S. climate extremes index [ R ]//NOAA Satellite & Info Service.
- Nuttonson M Y. 1955. Wheat-climate relationships and the use of phenology in ascertaining the thermal and photo-thermal requirements of wheat [ C ]. Washington D C: Amer Inst of Crop Ecol.
- Nuttonson M Y. 1957. Barley-climate relationships and the use of phenology in ascertaining the thermal and photo-thermal requirements of barley [ C ]. Washington D C: Amer Inst of Crop Ecol.
- Nuttonson M Y. 1958. Rye-climate relationships and the use of phenology in ascertaining the thermal and photo-thermal requirements of Rye [ C ]. Washington D C: Amer Inst of Crop Ecol.
- Nyenzi B. 2006. Commission for Climatology and its activities [ M ]//WMO publication.
- Palmer W C. 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index [ J ]. *Weatherwise*, 21 ( 4 ): 156-161.
- Parker J. 1963. Cold resistance in woody plants [ J ]. *Bot Rev*, 229: 124-201.
- Parker D S N, Zhang F T, Kim Y S, et al. 2012. Low temperature formation of naphthalene and its role in the synthesis of PAHs ( polycyclic aromatic hydrocarbons ) in the interstellar medium [ J ]. *Proc Nat Acad Sci, USA*, 109 ( 1 ): 53-58.
- Pettapiece W W. 1995. Land suitability rating system for agricultural crops 1. Spring-seed small crops [ R ]//Ottawa, ON, Technical Bull, 1995-6E. Ottawa, ON: Res Branch, Agriculture and Agri-Food Canada.
- Qian B D, De Jong R, Warren R, et al. 2009. Statistical spring wheat yield forecasting for the Canadian prairie provinces [ J ]. *Agric For Meteor*, 149: 1022-1031.
- Qian B D, Zhang X B, Chen K, et al. 2010. Observed long-term trends for agroclimate conditions in Canada [ J ]. *J Appl Meteor Climatol*, 49 ( 2 ): 604-618.
- Raddatz R L, Hanesiak J M. 2008. Significant summer rainfall in the Canadian Prairie provinces: Modes and mechanisms 2000—2004 [ J ]. *Int J Climatol*, 12: 1607-1613.
- Robertson G W. 1968. A biometeorological time scale for a cereal crop involving day and night temperature and photoperiod [ J ]. *Int J Biometeor*, 12 ( 3 ): 191-223.
- Szeto K K. 2007. Assessing water and energy budgets for the Saskatchewan River basin [ J ]. *J Meteor Soc Japan*, 85A: 167-186.
- Vincent L A, Mekis E. 2006. Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century [ J ]. *Atmosphere-Ocean*, 44: 177-193.
- Wheaton E, Wittrock V, Kulshreshtha S, et al. 2005. Lessons learned from the Canadian drought years of 2001 and 2002 [ R ]//Synthesis Report: Saskatchewan Research Council Publication No. 11602-46E03, Saskatoon, SK, January 2005.
- Zha T, Barr A G, Kamp G V D, et al. 2010. Interannual variability in evapotranspiration from forest and grassland ecosystems in western Canada in relation to drought [ J ]. *Agric For Meteor*, 150: 1476-1484.

(责任编辑:倪东鸿)