

东北地区农作物 低温冷害研究

王春乙 等编著



东北地区农作物低温冷害研究

主 编	王春乙			
副主编	马树庆	毛 飞	高素华	郭建平
	霍治国			
编 委	马玉平	马树庆	王石立	王连敏
	王春乙	王 琪	毛 飞	刘 玲
	李祎君	张建平	陈 莉	钟秀丽
	高素华	郭建平	霍治国	

内容简介

本书为国家科学技术部“九五”科技攻关项目“农业气象灾害防御技术研究”和“十五”科技攻关项目“农林重大病虫害和农业气象灾害的预警与控制技术研究”的重要阶段性研究成果之一。主要介绍了我国东北地区农作物冷害的致灾机理、发生与分布规律,系统地阐述了低温冷害的监测预警技术和对农业的影响评估技术,以及低温冷害的防御技术,可为从事相关领域的科研人员提供参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

东北地区农作物低温冷害研究/王春乙等编著. —北京:
气象出版社,2008. 11
ISBN 978-7-5029-4611-1

I. 东… II. 王… III. 作物-冷害-研究-东北地区
IV. S426

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 168402 号

Dongbei Diqu Nongzuowu Diwen Lenghai Yanjiu

东北地区农作物低温冷害研究

王春乙 等编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:陈 红 章澄昌

封面设计:王 伟

责任校对:赵 寒

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:410 千字

版 次:2008 年 11 月第 1 版

定 价:48.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:陆同文

责任技编:吴庭芳

印 张:16

印 次:2008 年 11 月第 1 次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

序

农作物低温冷害是我国主要农业气象灾害之一,尤其是北方地区,低温冷害频繁,如 1969 年、1972 年和 1976 年等东北地区发生了大范围严重的低温冷害,造成粮食减产 20% 的重大损失。近些年来,受全球气候变暖的影响,各地热量资源条件有所改善,严重的延迟型低温冷害年相对少了一些。但是,由于极端气候事件趋于频繁,各地区温度波动幅度加大,因此,东北地区由短期严重低温造成的区域性作物障碍型低温冷害具有频繁且严重的趋势。同时,农民为了追求高产,不断扩种喜温作物及其偏晚熟品种,使喜温作物和中晚熟作物品种区域不断向北方地区推进。这种现象尽管有合理的一面,但是也增加了低温冷害的风险。气候变暖趋势是渐进和波动的,今后仍然会有低温和偏冷的年份,一旦发生低温冷害,农业经济损失将比以往更加严重。因此,低温冷害仍然是北方地区的主要气象灾害,防御低温冷害始终是北方农业生产中需要给予特别重视的工作。

党和政府历来十分重视农业气象灾害的防御工作,气象部门一直重视开展北方低温冷害的应用基础研究和防御技术开发。我国的作物低温冷害研究已经有 40 多年的历史,在低温冷害指标、冷害地理特征和防御技术等方面研究得到了科技部、农业部和中国气象局大力的支持,取得了多项科研成果。科技部在国家“九五”、“十五”和“十一五”农业重大科技攻关项目和科技支撑研究计划中,都把东北低温冷害研究列为重要的课题或专题。参加科技攻关的科研和业务人员对东北低温冷害的指标、灾害时空分布、监测预测模型、灾害评估技术和防御措施等进行了比较系统的研究,取得了丰富的研究成果,部分成果已经应用于农业防灾减灾和气象服务业务领域。同时,通过相关科学研究,培养了一批低温冷害科研和业务人才,形成了一个比较稳定的、水平较高的北方低温冷害协作研究队伍。

本书是国家“九五”和“十五”农业科技攻关项目中东北作物低温冷害研究成果的总结,主要内容是以东北作物低温冷害研究团队近十多年来在东北低温冷害基础理论、冷害机理、冷害时空分布规律、冷害监测预测、冷害评估和冷害防御技术体系等方面的研究成果为核心,并吸收了前人的相关研究成果,经过系统的整理和编辑,充分反映了东北低温冷害研究的最新进展和系统性成果。我相信该书的出版将大大推动低温冷害应用基础研究和低温冷害防御技术开发的科技进步,为我国气象灾害研究的学科发展添砖加瓦,同时也将带动其他气象灾害预测和防御研究的发展。

农业生产是在自然条件下进行的自然生产与社会生产相结合的过程。东北低温冷害研究尽管取得了比较丰富的研究成果,但是仍然有不少相关问题没有解决,特别是由于农业生产的复杂性和气候变化的不确定性,今后必然会出现低温制约农业生产的新问题,需要进一步深入研究,开发新技术,解决新问题。中国气象局将在低温冷害及其他气象灾害的研究开发方面提

供支持。我希望,相关科研和业务人员以本书为基础,进一步开展相关领域的科技攻关,一是要研究在新的农业生产和气候变化条件下气象灾害发生的基本规律,分析气候变化对灾害的影响和应对策略;二是要开展低温冷害等灾害的预警业务系统建设,努力建立灾害监测、预测、评估和防御业务化系统,建立相关农业气象服务体系,实现防灾减灾服务业务化;三是要进一步研究低温冷害等灾害的综合防御措施。通过这些研究和开发,进一步推动相关基础研究和学科发展,同时注重解决农业生产中的实际问题,为农业防灾减灾做出更大的贡献。

中国气象局局长 郑国光

2008 年 11 月

前 言

我国地处东亚季风区,是世界上主要的气候脆弱区之一,也是世界上气象灾害最为严重的国家之一,灾害种类多、分布地域广、发生频率高、造成的损失重。据统计,我国每年受各种气象灾害影响的人口达 3.8 亿人次,造成的经济损失平均达到 1800 多亿元,约相当于国内生产总值的 2.7%。特别是农业领域,我国每年因各种气象灾害造成的农作物受灾面积达 4800 多万 hm^2 ,其中干旱、低温灾害是我国当前重大的农业气象灾害,影响尤为严重。如农业干旱每年受灾面积高达 2000 多万 hm^2 ,粮食损失约 120 亿 kg ;低温灾害严重的年份可使粮食产量损失达 100 亿 kg 以上,对农业可持续发展和粮食安全构成严重威胁。近年来,在全球气候变暖为主要特征的大背景下,极端天气气候事件增加,农业气象灾害发生频率和程度呈现明显上升的态势,农业生产和粮食安全面临着越来越严峻的形势,而且这种威胁还将进一步加剧。因此,提高防灾减灾能力,积极应对气候变化,确保粮食安全势在必行。

东北地区是我国重要的商品粮生产基地之一,现阶段年粮食产量稳定在 730 亿 kg 左右,约占全国粮食总产量的 15%;粮食商品率在 60%以上,人均粮食占有量高达 590 kg ;对全国粮食贡献率为 11.2%,其中对玉米的贡献率为 22.4%,对水稻的贡献率为 8%,对大豆的贡献率高达 42%。资料分析表明,影响该地区粮食生产的主要气象灾害是冷害和干旱,特别是冷害严重威胁全区的粮食稳定生产。据统计,1951—1995 年曾出现近 10 次较强冷害年,其中,1969 年、1972 年和 1976 年最为严重,3 年平均减产达到 29 亿 kg 。灾害损失占当时粮食产量的 20%以上。近年来尽管气候变暖,但是由于晚熟品种的大范围北移东扩,越区种植,导致冷害影响仍然比较严重。玉米收获时含水率连年居高不下,因此,研究低温冷害对东北地区粮食生产的影响意义重大。

自“九五”以来,科技部对东北农作物低温冷害研究给予了持续的支持。其中,“九五”科技攻关项目“农业气象灾害防御技术研究”第 6 课题“东北农作物低温冷害综合防御技术研究”;“十五”科技攻关项目“农林重大病虫害和农业气象灾害的预警与控制技术研究”第 13 课题“农业气象灾害预警技术研究”、第 14 课题“农业气象灾害影响评估技术研究”、第 15 课题“农业气象灾害控制技术研究”及第 16 课题“并发性农业气象灾害影响评估与防御技术研究”等均设有东北农作物低温冷害的研究内容。本书即是依据上述课题研究成果编写而成,系统介绍了东北地区农作物低温冷害的发生机理与规律、监测、预警、影响评估和防御技术与方法。

全书由王春乙研究员等主持编写。其中,第 1 章由马树庆、王琪执笔;第 2 章由高素华、刘

玲执笔;第3章由马树庆、陈莉执笔;第4章由毛飞执笔;第5章由郭建平执笔;第6章由郭建平、马玉平、王石立、李祎君执笔;第7章由霍治国执笔;第8章由王春乙、张建平执笔;第9章由王春乙、马树庆、李祎君、郭建平、钟秀丽、王琪、王连敏执笔。

由于本书涉及面较广而作者知识累积有限,书稿中的文字和有关数据、图表、文献难免存在一定的疏漏之处,也可能存在一定的错误,请有关专家予以批评指正,以便进一步完善。

王春乙

2008年11月

目 录

序

前言

第 1 章 低温冷害概论	(1)
1.1 低温冷害概念、类型.....	(1)
1.2 低温冷害对农业的影响	(3)
1.3 低温冷害的指标	(7)
1.4 低温冷害的致灾因素.....	(15)
1.5 低温冷害研究进展与展望.....	(20)
第 2 章 低温冷害对农作物影响机理	(25)
2.1 低温冷害对农作物影响机理.....	(25)
2.2 低温冷害对玉米影响机理.....	(26)
2.3 低温冷害对玉米生理过程影响试验方案.....	(32)
2.4 低温冷害对玉米发芽率影响.....	(36)
2.5 低温冷害对玉米生理过程的影响.....	(38)
2.6 低温干旱并发对玉米生理过程的影响.....	(42)
第 3 章 东北冷夏气候特征和影响因素	(53)
3.1 东北夏季气温的变化特征.....	(53)
3.2 东北冷夏年的气候统计特征.....	(57)
3.3 东北低温冷夏形成的原因和影响因素.....	(60)
3.4 东北低温冷夏与东北冷涡天气.....	(69)
3.5 典型低温冷夏年的天气气候特征和灾情.....	(73)
第 4 章 东北农作物冷害发生规律	(77)
4.1 分析方法.....	(77)
4.2 热量条件分布规律.....	(81)
4.3 冷害时间分布规律.....	(85)
4.4 冷害空间分布规律.....	(92)
第 5 章 东北农作物冷害监测	(95)
5.1 低温冷害遥感监测方法.....	(95)
5.2 低温冷害发育期监测方法.....	(96)
5.3 低温冷害生长量变化监测方法.....	(97)
第 6 章 东北农作物冷害预测	(100)
6.1 低温冷害指标预测方法	(100)

6.2	低温冷害统计预测方法	(103)
6.3	基于作物生长模拟模型的低温冷害预测	(108)
6.4	不同发育阶段冷害预测	(120)
6.5	初霜影响及预测	(131)
第7章	东北农作物冷害影响评估	(135)
7.1	农作物冷害风险及其构成因素	(136)
7.2	农作物冷害风险分析	(140)
7.3	农作物冷害致灾强度评估	(144)
7.4	农作物冷害致灾损失评估	(147)
7.5	农作物冷害动态评估	(151)
7.6	农作物冷害风险区划	(158)
第8章	东北农作物冷害干旱并发影响评估	(163)
8.1	冷害干旱并发对农作物影响	(163)
8.2	WOFOST 模型简介	(167)
8.3	模型敏感性分析	(170)
8.4	低温干旱并发对作物影响评估	(171)
第9章	东北农作物冷害防御及调控	(174)
9.1	低温冷害综合防御技术概述	(174)
9.2	农作物结构配置	(178)
9.3	农作物品种熟性与搭配	(182)
9.4	适宜播种期判别	(190)
9.5	地膜覆盖	(195)
9.6	生化制剂及应用	(210)
9.7	冷害防御决策支持系统	(231)
参考文献		(239)

第 1 章

低温冷害概论

农作物低温冷害是我国主要农业气象灾害之一,并以北方地区,特别是我国东北地区发生得最为频繁和严重,其中 20 世纪 60—70 年代我国东北地区发生了几次大范围的严重低温冷害,给农业生产造成严重的经济损失。近些年由于气候变暖的趋势比较明显,基本没有发生大范围的严重的延迟型低温冷害,但区域性的和阶段性的低温冷害仍然时有发生,而且由于气候异常事件增多,年内气温波动幅度加大,使作物障碍型低温冷害有频繁和严重的趋势,因此防御低温冷害仍然是东北各地农业生产的重要工作内容之一。本章遵循农业气象灾害学的基本原理,以近十多年东北地区作物低温冷害攻关研究成果为主,结合前人的研究成果,对低温冷害的概念、类型、危害、指标、发生的主客观条件进行综合概述。

1.1 低温冷害概念、类型

1.1.1 低温冷害的概念

关于作物低温冷害的定义,不同年代、不同地区的学者有过不同的说法,但基本的内涵是一致的,即指在作物生长季比较温暖的时期内,持续的温度偏低导致作物生长发育受到抑制,并导致减产。日本农业气象学家坪井八十二认为,冷害是指因夏季低温少日照影响农作物生育而减产的灾害。佐竹彻夫把由于夏季冷凉气候的影响导致作物显著减产的现象叫做冷害。北京农业大学所著的《农业气象学》一书提出,冷害是指温度在 0°C 以上的,有时甚至是接近 20°C 条件下的低温对农作物生长发育和产量形成产生的危害。《中国农业百科全书·农业气象卷》指出,冷害是在农作物生长季节遭遇 0°C 以上的低温而受到的损害。王书裕(1995)在《农作物低温冷害的研究》中写到,低温冷害指作物生育期间 0°C 以上的低温,或者同时出现寡照,影响作物的生长发育并引起减产的自然灾害。

上述低温冷害的定义主要是针对延迟型冷害而言,因此并不全面。根据各地低温冷害的实际情况,从低温冷害形成机理角度出发,同时综合各家的看法,我们把低温冷害定义为:在作物生长发育期间,尽管日最低气温在 0°C 以上、天气比较温暖,但出现较长时间的持续性低温天气,或者在生殖生长期出现短期的强低温天气过程,日平均气温低于作物生长发育适宜温度的下限指标,影响农作物的生长发育和结实而引起减产的农业自然灾害。

不同作物的各个生育阶段要求的最适宜温度和能够耐受的临界低温有很大的差异,品种之间也不相同,所以低温对不同作物、品种及作物的不同生育阶段的影响有较大差异。冷害对产量的影响程度也因低温的强度和持续时间而异。在冷害程度相同的情况下,不同作物的减产幅度也不同。研究表明,在东北地区的主要作物中,水稻冷害的减产幅度最大,其次是高粱,再次是玉米和大豆。以吉林省为例,建国后 3 个严重冷害年(1969, 1972, 1976)比前一年的平均减产率,水稻为 43.8%,高粱为 25.4%,玉米为 10.6%(王书裕, 1995)。

由于冷害一般发生在作物生育的温暖季节,因此并不像霜冻等其他灾害那样,出现作物枯萎、死亡等明显症状。冷害对作物的危害主要有三种情况:一是低温延缓发育速度,致使作物在秋霜来临时尚不能完全成熟;二是低温引起作物的生长量(株高、叶面积、分蘖数等)降低,降低群体生产力;三是低温使作物的生殖器官直接受害,影响正常结实造成不孕,空瘪粒增多。此外,低温还减弱作物的光合作用强度,引起作物内部生理活动失调等。因为低温对植株的外观影响不很明显,所以我国东北地区的群众把冷害称为“哑巴灾”。我国华南地区寒露节气前后和长江中下游地区秋分节气前后的低温天气,对后季稻生殖生长和结实的危害很大,当地把这种低温冷害称为“寒露风”。

从上述关于冷害定义和作物受害的表现可以看出,低温冷害和霜冻是不同的。霜冻的危害是因短时间的 0°C 以下的低温,引起作物叶片枯萎或死亡,这与冷害的低温范围及其持续时间不同,植株受害的表现也不一样,所以不能把冷害与霜冻混同起来。但是,在生产实践中,有些年份因为生育期温度低,引起作物生育期延迟,在秋霜日期正常、甚至偏晚的情况下,作物仍遭秋霜危害而不能正常成熟。这种情况,霜害是冷害的必然结果。相反的,有些年份秋霜到来较早,却因生育期温度较高,作物在霜前已经成熟,并不会遭受早霜的危害。所以,既不应把冷害和霜冻的概念相混淆,又要看到二者的危害有时候是互相联系的。

在讨论低温冷害的概念时,还有必要把冷害与冻害、寒害加以区别。冻害是指小麦等越冬作物和果树在越冬期间或在早春和深秋,因长期严寒或几天时间的冻融交替,引起作物和果树在较短时间内枯死或部分器官腐烂。发生冻害的时间主要是冬季,温度范围是在 0°C 以下,甚至零下 20°C 左右,而且作物或果树的冻害都有明显的症状,这与冷害是完全不同的。寒害尽管气温也是在 0°C 以上,但它特指橡胶、龙眼、荔枝等热带、亚热带作物在冬季受寒潮低温危害的现象,在受害时间和承灾体上与冷害也是有明显区别的,在概念上不应混淆。

1.1.2 低温冷害的类型

在 0°C 以上、有时甚至是在接近 20°C 条件下的相对低温之所以会危害农作物,是因为这种温度低于作物生理上要求的适宜温度及能够耐受的临界低温,而且不同作物在其生育的不同阶段,要求的适宜温度及能够耐受的临界低温大不相同。一般在苗期和生育后期生理上要求的适宜温度相对低些,当作物生殖器官开始分化到抽穗、开花、授粉和受精的过程中,以及灌浆初期,要求的适宜温度和能忍受的临界低温比较高,此时如发生不适于作物生理要求的低温过程,就会延缓作物生长发育的速度,甚至破坏其生理活动机能,以至抽穗开花延迟,花器官发育异常,灌浆成熟过程延缓,造成不育或灌浆不饱满而导致减产。

从低温冷害形成机理角度出发,低温冷害主要有以下 3 种类型。

延迟型冷害 作物生长期间出现较长时间的持续性低温天气过程,导致生育期积温不足,使作物生理代谢缓慢,作物生育期延迟,不能在初霜到来之前正常成熟,从而导致减产。延迟

型冷害如发生在幼穗分化前的营养生长期,低温的危害是延迟抽穗;如发生在籽粒形成时期,低温使净光合生产能力降低,导致作物灌浆不充分而减产。例如1969年东北地区作物生长发育前期低温持续偏低,导致积温不足,玉米、水稻等作物生长进度明显滞后,霜前都没有成熟,发生了大范围严重的作物延迟型低温冷害,粮食减产20%左右。

障碍型冷害 作物在生殖生长期内遭受短时间(一般在几天内)异常的低温,使生殖器官的生理活动受到破坏,造成颖花不育、籽粒空秕而减产。例如1993年、1998年、2001年和2003年,东北地区的东部7月出现阶段性严重低温天气,发生严重的水稻障碍型低温冷害,多数县市减产40%左右,部分县市的部分乡镇绝收。

混合型冷害 就是延迟型冷害与障碍型冷害在同一生长季中相继出现或同时发生,给作物生育和产量形成带来严重危害。例如1957年和1954年等年份,东北地区作物生长前期、中期和后期都出现明显的低温过程,既发生了延迟型冷害,又发生了障碍型冷害,粮食减产20%以上。

作物低温冷害在整个作物生长季的每个阶段都有可能发生,不同时期低温冷害的影响和损失又有较大区别。根据冷害发生时期分类,还可以把低温冷害分为前期冷害、中期冷害、后期冷害。

前期冷害 指作物营养生长期遇低温,导致作物生长缓慢,生长量降低,发育期推迟,引起减产。

中期冷害 指从幼穗形成到抽穗开花期的冷害。其特点是幼穗生育缓慢,出穗期延迟,甚至低温直接危害生殖器官,造成籽粒不实,空秕率增多。

后期冷害 在作物灌浆至成熟阶段出现低温过程,引起干物质积累速度减慢,灌浆期延长,籽粒不能充分成熟,秕粒多,粒重降低。

显然,也可能有前、中、后期都出现冷害的情况(尽管可能性很小),相当于混合型冷害。

不同时期的低温冷害减产程度,主要看总热量条件,即总积温的亏损情况。研究表明,作物生长发育期间,前后期温度变化的影响有一定的互补性,而且以后期高温对前期低温影响的补偿作用更显著。此外,我国有的学者还考虑到光照、降水和干旱等条件,把冷害分为低温阴雨型、低温寡照型、低温干旱型等不同冷害类型。有人考虑到低温冷害与其他灾害的相互作用和共同影响,还把冷害分为低温稻瘟病型和低温早霜型等。例如,东北地区1969年发生低温早霜型冷害,1972年是低温干旱型冷害,1957年是低温多雨型冷害,1993年和1995年部分地区发生了低温寡照型冷害。

1.2 低温冷害对农业的影响

1.2.1 冷害发生概况及其对农业经济的影响

作物低温冷害在世界多数国家和地区都可能发生,如日本、澳大利亚、孟加拉国、印度、中国、哥伦比亚、秘鲁、美国、印度尼西亚、韩国等,都有作物冷害。农作物因低温冷害而减产的现象,不仅发生于较寒冷的地区,在暖温带、亚热带和热带都有发生。低温冷害受害的作物不限于水稻、玉米、高粱和棉花等喜温作物,谷子、大豆、小麦、蔬菜和果树等也都有可能因低温冷害而造成不同程度的减产。

东北地区是我国重点粮食生产基地之一,目前每年生产粮食 700 亿 kg 左右,约占全国的 15%,其年产量波动直接影响着全国粮食的供给。由于热量资源不足等原因,低温冷害是东北地区主要农业气象灾害之一,严重冷害年减产 20% 以上,是造成产量不高、不稳的主要因素之一。近 40 多年来,东北各地粮豆一般冷害和严重冷害发生频率都比较高。一般冷害年出现频率(减产 5%~15%),辽宁省大部为 15% 以下;吉林省中、西部和黑龙江省西南部为 15%~25%;黑龙江省北部及吉林省东部多为 25%~35%。严重冷害的发生频率(减产 15% 以上),辽宁省大部及吉林省西南部在 5% 以下;吉林省中部及黑龙江省南部为 5%~10%;吉林省半山区及黑龙江省中部为 10%~15%;黑龙江省北部及吉林省东部山区为 15%~25%。也就是说,东北粮食主产区每隔 3~5 年有一次一般性低温冷害,每隔 5~10 年有一次严重冷害。水稻障碍型冷害发生频率,辽宁省大部在 15%~20% 之间,东北地区中部多为 25%~40%,吉林省东部山区较高海拔地带及黑龙江省北部在 40%~60% 左右,即:东北地区大部每隔 2~3 年就有一次较明显障碍型冷害,冷害年减产 20% 以上。

40 多年来,东北地区曾发生 8 个严重冷害年,其中 1969 年、1972 年和 1976 年的冷害最严重,黑龙江、吉林和辽宁三省的粮豆总产量比正常年减产 50×10^8 kg 以上,三年平均减产为 57.8×10^8 kg,减产率达 20%,而且因遭受严重冷害使种子质量降低和经济损失,还造成缺乏良种和资金不足,影响第二年的农业生产。

北方地区的低温冷害不仅仅发生在粮食作物上,经济作物也存在低温冷害问题。新疆棉区棉花低温冷害比较常见,低温的年代发生频率约为 30%~40%,热量好的年代也近 20%。辽宁省棉花冷害频率为 17%,大约平均 5~6 年一遇,其中 1976 年发生严重冷害,全省棉花平均公顷单产仅 90 kg,霜前花率低于 20%,棉花品质也大大降低。

低温冷害不仅仅是我国北方地区的农业灾害,南方双季稻区也经常发生,因此是一种全国性的农业灾害。我国西北地区的黄河灌区,在高温年可以旱涝保收,但是遇到 1976 年那样的严重冷害时,也造成秋粮大幅度减产,尤其以水稻受害最重,稻谷空瘪率上升,甚至没有收成。我国南方双季稻区,后季稻的生育处在温度由高变低的过程中,其抽穗开花期正是秋季冷空气南侵的时候,容易遭受低温危害,影响水稻正常开花受精,空壳率增加,造成减产失收。早稻在育秧期间遇低温阴雨天气,也会引起烂秧。所以,我国南方稻区的冷害也是相当普遍的。

除中国的冷害影响比较严重以外,日本的水稻生产长期以来就受到冷害的威胁,是造成减产的主要因素。据大后美保计算,日本水稻产量波动的 60% 是由于夏季温度的年际变化而引起的。日本农业生产受冷害影响的情况有长期的详细记载:历史上的三次大饥荒(1751—1763, 1781—1788, 1830—1843)和常说的“明治凶作群”(1869, 1884, 1891, 1893, 1897, 1902, 1905, 1906)都是由低温造成的。进入昭和年代以来,冷害也经常发生,仅 20 世纪 70 年代发生冷害的就有 1970 年、1971 年、1976 年、1977 年和 1979 年,接着 1980 年和 1981 年连续两年冷害,1983 年部分地方出现冷害。这些冷害年份农业生产所受到的损失程度都很严重。1971 年北海道的冷害使水稻的收成指数下降到平年的 66%;1976 年日本北部冷害造成农作物的损失价值为 4093 亿日元;1980 年的冷害总受害面积达 2.9×10^6 hm²,经济损失 6919 亿日元,其中东北的青森县损失最严重,减产 53%。日本北海道地区最易发生水稻冷害,1926—1971 年共发生 15 次,平均每 3 年 1 次,其中连续 2 年发生冷害的有 5 次。

20 世纪 80 年代以来,由于气候变暖的影响,北方地区作物低温冷害的程度和频率尽管都有所下降,但低温冷害仍然是主要农业气象灾害之一,如 1985 年、1986 年、1995 年和 1998 年

中国东北地区发生了低温冷害,造成一定损失。应该指出,由于气候变暖引起气候异常事件增多,作物生长季节温度波动幅度加大,障碍型低温冷害有加重的趋势。例如,受鄂霍茨克冷空气频繁活动的影响,中国东北地区作物障碍型冷害有加重和频繁的趋势,1993—2005年,东北地区的东部每隔2,3年就发生一次严重的水稻障碍型冷害,其中多数县市每次减产40%左右,有的市县几乎绝收。还应指出,随着我国各地种植制度的改革、复种指数的增加和晚熟高产品种的推广应用,北方冷凉地区喜温作物偏晚熟品种的种植比例不断上升,农业生产对热量资源的要求更加严格,农业生产的热量资源供求仍然处于一种紧平衡状态,如遇到低温年,冷害问题将更加突出。另一方面,气候变暖以冬半年变暖为主,作物生长季节变暖不十分明显;而且,气候变暖问题还存在不确定性。可以肯定的是,尽管气候在变暖,但仍然会出现偏冷的阶段和低温的年份,因此低温冷害在今后相当长的时期内,仍然是北方地区主要农业气象灾害之一。

由此可见,冷害对农业和农业经济的影响是严重的,它所造成的经济损失是巨大的。因此,开展作物低温冷害的研究,加强低温冷害的防御,搞好低温冷害的监测、评估、预测和防御方面的信息和技术服务,无论是在过去、现在和将来,都是非常重要的。

1.2.2 低温冷害对农作物生长发育的危害

(1) 低温对水稻的危害

水稻是对低温反应比较敏感的喜温作物,低温、寡照是水稻空秕率偏高的重要原因。我国北方地区气温不高,热量不足,即使在夏季7—8月也常出现低温天气过程,因而易发生水稻低温冷害。水稻生产除了经常发生延迟型冷害外,还经常发生障碍型冷害,即因生殖生长关键期出现明显低温天气,导致结实不良。近20多年来,虽然大范围延迟型冷害发生较少,但区域性水稻障碍型冷害有频繁而严重的趋势,如1980年、1982年、1986年、1988年、1993年、1998年、2001年和2003年,东北地区的延边和牡丹江等地均发生严重障碍型冷害,减产都在20%以上,部分县市损失过半,年损失粮食达数十万吨。水稻栽培以水利灌溉为基础,受降水影响不大,其产量丰歉及品质好坏主要看是否发生低温冷害,这是北方地区水稻生产最大的风险性因素。

我国广大农民群众非常注意水稻抽穗期早晚及其对结实的影响。如东北地区水稻“处暑不出头,割去喂老牛”、湖南水稻“秋分不出头,割去喂老牛”等谚语指出了不同地区水稻抽穗期过晚将导致减产和绝收的现象。冷害对水稻生长发育和成熟的影响,在营养生长期主要影响叶片、分蘖和根系,温度低,出叶间距较长,叶片小而少,使总叶面积减少,单位叶面积的光合作用活性减弱,单株根数较少,根长变短,影响养分的吸收。温度低时,分蘖速度减慢,分蘖时间延长,无效分蘖增多。在生殖生长期,遇低温,将使幼穗分化进程减缓,小孢子形成期和花粉母细胞减数分裂期受低温危害机会增多,抽穗开花显著延迟,花粉发育不正常,不育率增加。

水稻生殖生长阶段对低温反应敏感的时期有三个,即幼穗分化期(抽穗前25~30 d),花粉母细胞减数分裂期(抽穗前10~15 d),抽穗开花期。对南方广大地区来说,抽穗开花期易受秋季低温的危害,减数分裂期和幼穗分化期受低温危害概率较小。我国北方障碍型冷害的敏感期也强调前两个时期,多数人认为减数分裂期是造成结实障碍的主要时期。

低温延迟水稻抽穗和成熟的敏感时期是在颖花分化前的营养生长期,此期生长的适温为26~30℃,这个时期遇到低温,水稻出叶速度慢,抑制分蘖,阻碍幼穗分化,以致延迟抽穗,发生

延迟型低温冷害。营养生长期下限温度是 $16\sim 18^{\circ}\text{C}$ 。在水稻营养生长期内,低温影响时间越长,则稻株含氮量越高、代谢机能紊乱,易加剧孕穗期的低温不育。我国东北地区水稻营养生长期遭受冷害的几率较高。在营养生长期,低温使穗原始体分化推迟 $5\sim 11\text{ d}$,则晚抽穗 7 d 左右。抽穗期延迟的天数主要与品种有关,早熟品种延迟天数少,愈是晚熟的品种延迟抽穗的天数愈多。

水稻生殖生长期受到低温影响会产生障碍型冷害。水稻生殖器官形成和发育的临界温度比营养生长期要高,因而它们对低温的反应比营养生长敏感。在遇到降温时,水稻茎叶尚无反应,而正在发育的幼穗或花粉却已受害。由于障碍型冷害直接破坏穗和花的发育,所以是形成籽粒空秕的主要原因,也是导致我国水稻遭低温减产的主要原因。

水稻障碍型冷害减产的原因,一般认为是低温导致减数分裂期生理机能紊乱,使花粉不能正常发育,形成空壳或畸形粒;抽穗开花期遇低温,则抑制花粉粒正常生长,物质代谢失常,这种受害的花粉粒有的虽然仍可完成发芽和受精过程,但受精后的谷粒不能进一步发育,后期仍形成空壳。

(2) 低温对高粱的危害

低温对高粱的危害主要有两个方面,一是表现在杂交高粱的小花败育,二是表现在灌浆期低温影响正常成熟。

所谓小花败育是指花器官的雌蕊或雄蕊发育不正常,使雌蕊无受精的能力,雄蕊无花粉或花粉甚少,这种现象是制种田不育系经常遇到的问题。小花败育的关键时期是孕穗前 $8\sim 10\text{ d}$,内部幼穗分化正处于雌雄蕊分化期,外部形态是打苞中、后期,这一时期称为小花败育的敏感期。在华北地区这一时期一般是7月下旬到8月初,此期一旦出现低温、阴雨等不良天气条件,即影响性器官的发育,造成小花败育现象。据河北的试验结果,在临界期内候平均气温低于或等于 19°C ,最低气温低于或等于 12°C ,即发生大量小花败育,尤其在降温前后温差大并有阴雨的情况下,更易出现败育现象。华南地区杂交高粱制种田不育系的小花败育温度指标稍偏高,在旗叶出现到展开这段时间若平均气温低于 21°C 、最低气温低于 14°C ,则严重影响花粉形成,产生败育。在这种情况下后期结实率不超过 15% 。

高粱灌浆成熟期要求天气晴朗,日照充足,日平均温度 $23\sim 25^{\circ}\text{C}$ 为宜,如气温低于 20°C ,则影响灌浆的正常进行,导致空壳或千粒重降低。在华北地区杂交高粱一般是麦收后的后茬作物,灌浆成熟期常推到9月,因此高粱灌浆期容易受低温的危害。

(3) 低温对玉米的危害

低温对玉米的影响也分延迟型和障碍型两类,前者发生在营养生长期,后者发生在开花授粉期。由于玉米生殖器官的形成和发育过程对低温的反应远不如水稻和高粱敏感,因此人们关注最多的是玉米延迟型低温冷害。

低温对玉米生长速度的影响是十分明显的。马树庆等分析玉米分期播种试验资料表明,东北地区低温对玉米生长发育速度的影响很大,正常水分条件下,播种出苗期间气温降低 1°C ,出苗期推迟 3 d 左右,出苗速度降低 17% 左右;出苗至抽雄期间气温每降低 1°C ,发育期推迟 6 d 左右,生育速度降低 18% ;玉米抽雄至成熟期间气温降低 1°C ,生育期推迟 4 d 左右。玉米营养生长旺盛时期是从拔节到开花这一阶段,此期间温度高低显著影响生育速度的快慢。东北地区日平均气温低于 18°C 时玉米开花受到抑制;在天津地区,这一阶段日平均温度为 20°C 时,间隔日数为 71 d ;日平均温度为 23°C 时,间隔日数缩短到 59 d 。因此,营养生长阶段

温度偏低会延迟抽穗,使整个玉米生育期向后推迟。

低温对玉米开花授粉的影响也比较明显。在抽雄开花时期日平均气温要求为 $24\sim 25^{\circ}\text{C}$, 低于 20°C 的低温阴雨天气会妨碍花药的开裂,并影响雌雄蕊的发育,低温时间延长,则易发生空秆。

低温对玉米植株生物量的影响也是明显的。分期播种试验表明,不同播期玉米生长所处的热量条件差异使玉米地上部总干重和叶干重都有较大差别,主要生长发育期间积温少 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,黄熟时每公顷总干重减少 500 kg 左右。

低温对玉米灌浆影响也比较大,在吐丝至完熟期间,相对积温减少 10%,相对百粒干重降低 13% 左右。玉米在灌浆成熟期间,要求日平均气温为 $20\sim 24^{\circ}\text{C}$,低于 20°C 玉米灌浆缓慢,温度低于 16°C ,则影响淀粉酶的活性,使籽粒不饱满。

低温对玉米生长发育的影响最终要体现在对产量的影响。马树庆等研究表明,在水分基本适宜的条件下,出苗至成熟期间积温减少 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,玉米单产降低 6.3% 左右;抽雄至成熟期平均气温降低 1°C ,公顷产量减少 550 kg 左右。东北地区玉米抽雄至成熟期间气温在 22°C 以上,干燥度在 0.75~0.90 之间玉米产量最高,低温和干燥都将使玉米单产明显下降。

(4) 低温对棉花的危害

低温对棉花生长发育和品质的影响是明显的。苗蕾期遇到低温,将延缓幼苗生长,推迟现蕾;铃絮时期遇到低温,将影响棉花纤维生长,使棉铃不能正常成熟吐絮而减产。冷害对棉花品质的影响主要表现在铃重变轻、衣分降低、纤维强度减小、细度变细和成熟系数变小,而对纤维长度则没有什么影响。其中低温使棉花纤维强度减小、变细和成熟系数变小,说明纤维成熟不良、品质变坏,这就必然导致衣分降低,棉铃重量变轻而减产。低温对棉花生长发育的危害在北方棉区主要发生在棉花吐絮前后。棉花吐絮期要求日照充足,日平均气温以 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 为宜,温度高有利于碳水化合物的合成并转化为纤维。气温在 20°C 以下棉花裂铃的速度减慢,气温在 15°C 以下将阻碍纤维的伸长和增厚,使棉花的品质降低、产量下降。

此外,北方地区的夏秋季低温对谷子的开花和灌浆,对大豆的开花和结荚,以及甘薯的块根形成等都有一定的不良影响。

1.3 低温冷害的指标

1.3.1 低温冷害年的总热量指标

农业气象科技工作者先后研究和采用过了多种低温冷害年的气象指标,但是实际生产和气象服务中,更多应用的是积温和平均气温之和的指标。

(1) 5—9 月各月平均气温

发生低温冷害的年份,虽然水稻、高粱、玉米、大豆和谷子等粮豆作物受害程度不一,但是都会引起减产。根据这一现象,我们确定低温冷害年的指标是对粮豆作物的综合减产幅度而言的,既不分作物,也不分低温出现在哪个时段。我国有关学者和科技人员根据不同的需要和研究目的,研究和使用的指标形式。

由于粮豆丰歉受 5—9 月平均气温的制约,因此人们常以东北地区 5—9 月各月平均气温之和(T_{5-9})表示作物生长季的温度条件,一般采用 T_{5-9} 的负距平(ΔT_{5-9})来作为冷害年的温

度指标。王书裕等在分析 ΔT_{5-9} 与各地减产率之间关系时发现,在冷害年,虽然 ΔT_{5-9} 的负距平相同,但它所引起的减产率却因各地 T_{5-9} 的高低而不同。一般是在 T_{5-9} 高的地方减产较轻,而 T_{5-9} 低的地方减产较重。也就是说,对应一定的减产率, T_{5-9} 高的地方冷害指标较高,而 T_{5-9} 低的地方冷害指标也较低。所以,不能用统一的 ΔT_{5-9} 作为各地的冷害指标。根据各地 ΔT_{5-9} 与减产率的关系,并把冷害分为一般冷害(减产率 5.0%~14.9%)和严重冷害(减产率 15.0%以上)两级,得出各地冷害年指标,如表 1.1 所示。

表 1.1 东北地区不同热量条件下粮食作物的冷害年指标(℃)

$\bar{T}_{5-9}$		80.0	85.0	90.0	95.0	100.0	105.0
ΔT_{5-9}	一般冷害年	-1.1	-1.4	-1.7	-2.0	-2.2	-2.3
ΔT_{5-9}	严重冷害年	-1.7	-2.4	-3.1	-3.7	-4.1	-4.4

王春乙(1999),毛飞(1999)也考虑了低温冷害指标的地域差异,提出东北地区不能用同一个指标值。经统计分析,各地的低温冷害指标值与当地的纬度和海拔高度存在很好的线性关系,定量表示为:

$$Y = -8.6116 + 0.1482(X + 0.0109H) \quad (1.1)$$

$$W = -18.3029 + 0.3270(X + 0.0109H) \quad (1.2)$$

式中 X 为纬度; H 为海拔; Y 和 W 分别为用 5—9 月各月平均气温之和的距平来表示的粮食作物一般低温冷害和严重低温冷害临界指标值。进而给出一般低温冷害指示值和严重低温冷害指示值:

$$CDY = \Delta T_{5-9} - Y \quad (1.3)$$

$$CDW = \Delta T_{5-9} - W \quad (1.4)$$

式中 CDY 和 CDW 分别为一般低温冷害指示值和严重低温冷害指示值,当 $CDY \leq 0$ 时,则出现一般低温冷害;当 $CDW \leq 0$ 时,则出现严重低温冷害。

(2) 生长季积温指标

不少人还用生育期的总积温作为低温冷害年的指标。潘铁夫等把作物生育期的总积温比历年平均值少 $100^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 的年份定义为一般低温冷害年,少 $200^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 的年份定义为严重低温冷害年。实际看来这个指标有些过高。王书裕和孙玉亭等在 20 世纪 70 年代把某年大于 10°C 的活动积温距平 $-50 \sim -100^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 的作为一般低温冷害年,低于 $-100^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 的为严重低温冷害年。由于气候变化等原因,这个指标在目前来看又有些过低。马树庆等综合上述方案,根据近 20 年气候变化情况,认为这个活动积温距平在 $-70 \sim -120^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 的为一般冷害年,在 $-120^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 以下为严重冷害年。这种指标很好地反映了延迟性冷害的性质,并能准确表现积温与产量的关系。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是不同的,这种指标没有和作物生育期联系,是农业气候学意义上的冷害指标。

(3) 热量指数指标

郭建平、高素华(2006)为了让低温冷害热量指标更具有生物学意义,定义了一种可充分反映玉米在不同时期对热量需求程度的指标 $F(T)$,它的大小直接反映了热量条件对作物生长发育的影响程度。这种指标表示为:

$$F(T) = [(T - T_1)(T_2 - T)^B] / [(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B] \quad (1.5)$$

$$B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1) \quad (1.6)$$