

寒地水稻 耐冷性研究

邹德堂 刘化龙 著

中国农业科学技术出版社

寒地水稻

耐冷性研究

邹德堂 刘化龙 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

寒地水稻耐冷性研究/邹德堂, 刘化龙著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-5116-1373-8

I. ①寒… II. ①邹…②刘… III. ①寒冷地区-水稻-耐寒性-研究 IV. ①S511.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 214473 号

责任编辑 于建慧

责任校对 贾晓红

出版发行 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82109194 (编辑室)
(010) 82109703 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82109708

社 网 址 <http://www.castp.cn>

印 刷 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 850mm × 1 230mm 1/16

印 张 9.5

字 数 178 千字

版 次 2013 年 8 月第 1 版 2014 年 1 月第 2 次印刷

定 价 30.00 元

目 录

第一章 水稻冷害	(1)
第一节 水稻冷害概念	(1)
第二节 水稻冷害生理机制	(5)
第三节 国内外水稻冷害发生概况	(7)
第二章 寒地水稻耐冷性鉴定与评价	(12)
第一节 水稻耐冷性的鉴定方法和评价体系	(12)
第二节 寒地水稻耐冷性种质资源的鉴定与评价	(16)
第三节 寒地水稻不同生育期耐冷性综合评价	(27)
第三章 不同生育期低温胁迫对寒地水稻的影响	(30)
第一节 低温胁迫对寒地水稻发育结实的影响	(30)
第二节 低温冷害对寒地水稻生理生化指标的影响	(35)
第三节 低温胁迫对寒地水稻籽粒淀粉合成及积累的影响	(44)
第四节 低温胁迫对寒地水稻 RVA 谱特征值的影响	(62)
第五节 低温胁迫对寒地水稻产量及产量构成因素的影响	(66)
第四章 寒地水稻耐冷性 QTL 定位研究	(74)
第一节 水稻分子标记技术	(74)
第二节 水稻耐冷性 QTL 研究	(77)
第三节 寒地粳稻孕穗期耐冷性遗传规律及 QTL 定位研究	(83)
第四节 寒地粳稻孕穗期耐冷性 QTL 图谱整合及元分析	(85)
第五章 寒地水稻不同生育期耐冷性与 SSR 标记的关联分析	(92)
第一节 关联分析	(92)
第二节 寒地水稻耐冷性的关联分析	(98)
第三节 寒地水稻耐冷性优异等位基因发掘	(104)

第六章 黑龙江省稻区寒地水稻..... (115)

第一节 黑龙江省寒地稻区生态环境..... (115)

第二节 黑龙江省寒地水稻选育..... (119)

第三节 黑龙江省水稻低温冷害综合防控措施..... (131)

参考文献..... (144)

中国版本图书馆 CIP 数据 (2013) 第 256 号

(1) 寒地水稻 第一章

(1) 寒地水稻 第一章

(2) 寒地水稻 第二章

(3) 寒地水稻 第三章

(12) 寒地水稻 第二章

(12) 寒地水稻 第一章

(16) 寒地水稻 第二章

(25) 寒地水稻 第三章

寒地水稻 于美娟

寒地水稻 寒地水稻 第三章

(30) 寒地水稻 第一章

寒地水稻 寒地水稻 第二章

(44) 寒地水稻 第三章

(62) 寒地水稻 第四章

(66) 寒地水稻 第五章

寒地水稻 (2013) 第 256 号

寒地水稻 寒地水稻 第四章

寒地水稻 寒地水稻 第一章

(77) 寒地水稻 第二章

(83) 寒地水稻 第三章

(85) 寒地水稻 第四章

寒地水稻 寒地水稻 第五章

(92) 寒地水稻 第一章

(95) 寒地水稻 第二章

(98) 寒地水稻 第三章

(104) 寒地水稻 第三章

第一章 水稻冷害

第一节 水稻冷害概念

一、水稻冷害的定义

冷害是指 0°C 以上的低温下植物受到的伤害。一般来讲，水稻冷害是指水稻遭遇到低于正常生长发育的温度一段时间后，其正常的生长发育受到影响的现 象。这是目前广为接受的冷害定义，它包括两个含义：冷害是一个相对的概念。由于物种的适应性和多样性，造成了同一物种的不同亚种、亚种内不同品种之间在各个生长阶段对温度的敏感程度不同；如果环境温度低于 0°C ，则不属于冷害范畴，而是冻害。冷害与冻害、寒害和霜冻概念是有区别的，崔读昌（1999）指出，冷害与其他伤害在危害作物类型、发生时期、温度条件、生理反应和危害后果等方面有明显的区别，冷害主要发生在喜温作物的温暖期，发生条件为 $10\sim 23^{\circ}\text{C}$ ，造成的生理反应主要为生长发育障碍，危害后果为花器官受害或延迟生育和减产。

二、水稻冷害的分类

（一）根据低温使水稻产量受损的原因

根据低温使水稻产量受损的原因，日本学者酒井宽一最早将水稻冷害划分为延迟型冷害和障碍型冷害，此后星野达三对这两类冷害类型做了详尽阐述。

1. 延迟型冷害

延迟型冷害主要发生在营养生长期，在该时期受到持续低温，使水稻营养体的生长及幼穗分化延迟，有时也发生在乳熟期，使水稻不能正常灌浆，导致成熟不良，最终造成减产。有时在生殖生长期的冷害也属于延迟性冷害，例如，在抽

穗前期遭遇低温,使水稻的抽穗延迟,在灌浆初期遭遇低温,使籽粒灌浆不饱满等。延迟型冷害的主要特点是水稻受到长时间持续低温,导致生长发育缓慢、抽穗和开花延迟,虽能正常受精,但不能充分灌浆和成熟,一般表现为籽粒成熟度差,空瘪率高,粒重较低。延迟型冷害易在生长季节较短的稻作区发生,如日本北海道、我国高纬度的东北及长江流域的后季稻地区发生。

2. 障碍型冷害

障碍型冷害又称为不育型冷害,障碍型冷害指水稻在幼穗分化至完成受精的这段生殖生长时期内遭受低温,引起花粉的发育不良和花药不能正常开裂而不能正常受精,从而导致结实率的降低,进而使产量降低的一种冷害。障碍型冷害中危害最大的是孕穗期及开花期遭受低温而引起的不结实。其特点是短时间异常低温,使生殖器的生理功能改变,造成不育或部分不育而减产。障碍型冷害具有不可逆性质,又可分为孕穗期和抽穗、开花期冷害两种。大陆性气候以后期为主,海洋性气候则前后期均有。水稻孕穗期,特别是花粉母细胞减数分裂期,是水稻全生育期中对低温最敏感的时期。障碍型冷害的指标,粳稻和籼稻并不一致,花粉母细胞减数分裂期籼稻在日平均温度低于 19°C 即受害,而粳稻一般在 17°C 才受害。

3. 混合型冷害

混合型冷害是指同一年内延迟型冷害和障碍型冷害同时发生而导致稻谷产量受损的一种冷害。它比上述两种冷害单独出现要严重很多。

4. 稻瘟病型冷害

稻瘟病型冷害是指由于低温条件的危害而使穗颈瘟大发生,从而严重地影响稻谷产量的一类冷害,这类冷害常发生的地区在云南省的高原粳稻区。

(二) 根据低温冷害发生的时期

根据低温冷害发生时水稻所处的生育时期,可以将冷害分为:芽期冷害、苗期冷害、孕穗期冷害、开花期冷害和灌浆期冷害(戴陆园,2002;陈玮,2005)。

1. 芽期冷害

芽期冷害是指从播种到第一完全叶期间受到低温侵袭,导致出芽时间延长、幼芽的生长受到抑制或出现烂秧的一种冷害。这类冷害常发生在我国的长江中下游的早稻种植区及东北地区。

2. 苗期冷害

苗期冷害是指从第一完全叶开始的整个营养生长期受到低温影响,导致秧苗失绿、枯萎甚至死亡,分蘖减少等,最终使产量降低的一种冷害。这类冷害常发生在我国长江中下游的早稻种植区和东北、西北稻区及云贵高原的一季稻区。

3. 孕穗期冷害

孕穗期冷害是指从水稻生殖生长开始到开花前受到低温侵袭, 导致花粉发育不正常继而影响正常开花形成空秕粒一种冷害。这类冷害常发生在我国的云贵高原粳稻区、东北稻作区及长江中下游的晚作稻区。

白稈和黑稈是冷害危及颖花时产生的, 前者是冷害直接诱导的结果, 致使颖壳中的叶绿素在形成前就停止发育, 后者则是冷害间接造成的, 是低温下容易发生的叶鞘褐变病引起的。白稈的诱发温度粳稻一般为 $12 \sim 13^{\circ}\text{C}$, 处理 5d, 处理时间越早幼穗越小, 则白稈量越多。不同品种受低温冷害后出现的白稈量有多有少, 不过这种白稈通常在抽穗后脱落。

性器官畸变是低温造成的性器官畸形在外部形态上的表现。主要表现有颖、雌雄蕊、鳞片等小穗器官数目有增加趋势; 不同器官间或同一器官内发生粘连; 子房内器官或者组织发育异常, 生殖器官缺损; 各种组织器官呈肿瘤状肥大; 多小花小穗发生, 小穗雌性化, 如毡绒层细胞肥大、花粉的形成不良、花药药室异常肥大、胚的功能形成不良等。

4. 开花期冷害

开花期冷害是指在水稻开花期遇到低温, 导致颖壳不能正常开裂散粉或散落到柱头上的花粉不能正常萌发受精, 产生空秕粒而直接影响结实率的一种冷害。这种冷害常发生在高寒山区、高原高纬度稻区和长江中下游、华南的晚稻区。由于开花期冷害的发生时期与孕穗期冷害十分接近, 生产实践中有时很难将二者严格区分开, 因此常将二者合称为孕穗开花期冷害。孕穗期和开花期的冷害又可统称为障碍型冷害。

水稻抽穗开花期受低温的影响仅次于减数分裂期。我国寒地稻作区属大陆性气候, 水稻孕穗期的 7 月气温较高; 而抽穗、开花时期的 8 月, 温度急剧下降。此期如遭遇低温会发生水稻颖壳不能正常开裂, 花药不裂, 散不出花粉或花粉发芽率大幅度下降, 因而不育, 造成减产。由表 1-1 可以看出低温可使花粉粒着落在柱头上的数量及萌发花粉数量明显减少。东农 415 和哈 92-53 因低温表现出结实率明显降低, 而 Cr-23 的结实率并没有受到低温影响。导致品种(系)间结实率差异的原因主要是与花粉着落在柱头上的数量及萌发花粉粒数。在低温条件下, Cr-23 每个柱头的花粉着落数和萌发花粉粒数分别在 150 和 10 以上。而东农 415 和哈 92-53 的萌发花粉粒数不足 6 个。相关分析结果表明, 花粉着落数与萌发花粉粒数相关极显著 ($r=0.8882^{**}$), 花粉萌发数与结实率相关显著 ($r=0.5965^{*}$)。由此可见, 水稻颖花受精既需要一定数量的花粉着落在柱头上, 更需要一定数量的萌发花粉参与竞争受精过程。低温条件下颖花能否结实, 与

柱头接受的花粉量及萌发的花粉粒数有关。并可以此作为评价水稻不同品种（系）花期耐低温能力的指标。回暖后，柱头上的花粉着落数及萌发花粉粒数不同品种有不同程度上升，上升的快慢不仅与品种有关，也与低温持续的时间长短有关。

表 1-1 开花期低温处理对花粉着落、萌发及结实的影响
Tab. 1-1 The impact of low temperature on pollen landing, germination
and fructify during flowering

品种（系）	处理时间 （天）	着花粉数 （个）	萌发花粉粒数 （个）	花粉萌发率 （%）	结实率 （%）
Cr-23	0	306	20.1	6.8	91.9
	4	159	11.1	7	93.3
	6	187	14.6	7.8	94.2
	8	183	15.1	8.3	91.9
东农 415	0	137	11.2	8.5	95
	4	93	6	6.4	90.2
	6	107	3	2.9	88.6
	8	45	1.3	2.9	69.7
哈 92-53	0	96	9.1	9.5	94
	8	35	2.7	7.9	51.4

5. 灌浆期冷害

灌浆期冷害是指水稻受精以后受到低温侵袭，抑制了水稻叶片正常的光合作用，光合产物的运输受阻，进而使稻谷的充实度变差、品质变劣的一种冷害（戴陆园，2002）。这类冷害常发生在我国云贵高原稻作区。

三、水稻冷害症状

植物的低温危害是一个复杂的生理过程，它既受物种本身的遗传基因控制，也受环境条件的制约。水稻从种子发芽到成熟的整个生育期间都有可能遭受低温冷害，水稻在不同的时期受到低温冷害后，会表现出一系列不同的症状。

1. 苗期冷害症状

水稻苗期受低温冷害，主要表现为植株下部产生黄叶，甚至褐色，幼苗变弱，分蘖减少，从而易发生水稻立枯病，严重的还会发生烂秧死苗现象。

2. 分蘖期冷害症状

分蘖期受低温冷害，主要影响叶片和根系生长等方面。遇低温由于根系损伤无法恢复吸水能力，而使叶片极度凋萎至枯死，导致秧苗成活不良，分蘖减少，幼穗形成晚等。

3. 孕穗期冷害症状

水稻属高温短日照作物，需要高温诱导才能由营养生长期转入生殖生长期。在此时期遭受低温冷害，导致出穗延迟，且生育器官发生异常，其原因是枝梗及颖花的分化受到抑制并退化，使颖花数降低，幼穗发育受到抑制。

4. 抽穗开花期冷害症状

抽穗开花期受低温冷害，主要导致抽穗延迟。低温对水稻的雌雄性器官产生较大影响，且一般雄性器官比雌性器官对温度的反应更为敏感。同时，水稻在开花期受到低温，不仅会影响水稻正常开花受精，而且会使初生胚受精后的合子早期停止发育，最终使稻谷的秕粒增加，产量降低。

5. 成熟期冷害症状

成熟期受低温冷害，主要导致成熟度不良，籽粒饱满度差，米质降低等。在灌浆初期遭受低温会使米粒停止发育，米粒长度减少，甚至造成死米。在灌浆中期遭受低温会产生乳白米。在同一穗内，谷粒位置越低，出穗越晚，灌浆能力越差，二次枝梗数上的谷粒比一次枝梗数上的灌浆能力差。因此，弱势颖花比例高的品种更易受到低温冷害。与抽穗开花期一样，灌浆期的植株受到低温时会破坏叶绿素的形成，使叶片变黄，叶片会按照基部老叶—顶部新叶、叶尖—叶基顺序变黄。因此，造成叶片光合强度受到抑制，从而降低水稻的充实度和千粒重。

第二节 水稻冷害生理机制

水稻遭受冷害胁迫时，其细胞内部细胞膜和细胞内元素调节的生理机制都会受到影响，简要归纳如下。

一、膜脂相变机制

Lyons 认为，发生低温冷害时生物膜首先发生膜脂相变，即从液晶相向凝胶相转变，膜脂的脂肪酸链由无序变有序，膜发生收缩并出现裂缝或孔道，使膜的透性大大增加，细胞内水溶性物质大量外渗，同时，膜上 ATP 酶活力降低，代谢失调。受害后常表现出呼吸作用下降，能量供应减少，植物体积累大量有毒物质。冷害达到一定程度时，植物组织就会受害死亡。

相变温度与膜脂的组成和性质有关，王洪春对开花期水稻种子干胚膜脂肪酸不饱和指数和亚油酸/油酸比值与抗冷性关系进行研究，结果表明，生物膜的结

构和功能上的差异是导致耐冷性差别的主要原因, 据此认为, 冷害的机理是: 水稻在低温下, 生物膜和各种质体膜发生生物相变化, 使膜透性增大, 从而使质体内的大量离子外渗, 随后膜结合酶的活性降低受到抑制, 伴随着呼吸的减弱和能量的减少, 最终使组织受害死亡。

二、自由基机制

植物细胞可通过多种途径产生 O_2^- 、 H_2O_2 等自由基, 由于植物体内存在清除自由基或活性氧的保护系统, 酶类 SOD、CAT、POX 和非酶物质如还原型谷胱甘肽 (GSH)、维生素 E 等的存在, 使植物体内的自由基和活性氧处于动态平衡状态。当逆境胁迫时, 自由基和活性氧含量增加 (刘鸿先, 1989), 抗氧化剂如还原型谷胱甘肽、抗坏血酸等物质含量下降而使膜脂过氧化产生丙二醛 (MDA), 丙二醛 (MDA) 与蛋白质结合使蛋白质分子内及分子间发生交联, 从而使细胞膜上蛋白和酶的空间构型发生改变, 其功能也发生改变。

三、钙信使机制

关于钙是传导植物冷害生理信使的假说最早是由 Minorsky 提出, 钙在植物的生长发育过程中起着十分重要的作用。目前, 对胁迫产生的 Ca^{2+} 来源说法不一致, 一般认为 Ca^{2+} 在细胞内产生, 钙信使的作用方式是 Ca^{2+} 与钙结合蛋白结合后激活相应的靶酶或靶蛋白, 从而引起相应的生理生化反应。H Knight 认为, 低温可以诱发植物细胞产生钙信号, 胁迫处理对钙信号的修饰可为拟南芥适应逆境提供记忆。

四、其他物质的调节作用

植物对逆境的适应受遗传性和植物激素两种因素控制, 激素是抗冷基因表达的启动因子, Kacperska Palacz 认为, 是环境因素改变了植物体内各种激素的平衡关系, 从而使生长停止和代谢途径发生变化。研究表明, 对植物的抗冷性有明显的调节作用的激素包括脱落酸、多胺、赤霉素、钙调素、多效唑等。目前为止, 普遍认为脱落酸是影响逆境的主要激素, 在逆境下脱落酸 (ABA) 结合蛋白 (abscisic acid binding protein) 与 ABA 结合活性显著提高, 另外, ABA 参与了植物低温胁迫的信号传导, 主要表现在 ABA 可以诱导多数冷诱导基因, 外源 ABA 可以提高常温下植物的耐冷性。对于 ABA 和冷害关系方面的研究较多, 例如

J Sarah对 ABA 缺乏和敏感的拟南芥突变体在低温条件下的研究表明, ABA 独立控制一些耐冷基因的表达式; 齐光等的研究表明, 低温下外源 ABA 通过减缓叶片 SOD 的降低、减少 POD 和 MDA 含量的升高而增强水稻苗期耐冷性等。

第三节 国内外水稻冷害发生概况

在世界很多地区冷害是影响水稻产量和品质的最主要气象灾害之一。无论高纬度地区还是低纬度地区水稻冷害都时有发生, 低纬度地区水稻冷害多发生在高海拔地区。我国是受水稻冷害威胁较大的国家, 不同稻作带都有冷害发生。国内外对水稻低温冷害如冷害类型、发生机制、冷害指标及地域变化特征等已经做过较长时间研究, 并总结出一系列防御水稻冷害的关键技术措施。随着分子生物学等领域研究技术的发展, 基因水平的水稻冷害研究越来越深入, 正影响着水稻冷害研究和抗冷育种工作。

一、国外水稻低温冷害发生概况

水稻是起源于热带地区的喜温作物, 在其生长发育的过程中对温度的要求有最低点、最适点和最高点。温度过高或过低均能抑制发育, 超过一定的温度范围水稻就会受到伤害, 造成减产甚至绝收。低温冷害是影响世界水稻产量的最主要气象灾害之一。

全世界水稻播种面积约 14 亿 hm^2 , 其中, 1 500 万 hm^2 以上的稻作面积受到低温威胁, 共有 24 个国家存在严重的水稻低温冷害问题, 即亚洲的中国、日本、韩国、朝鲜、印度、泰国、斯里兰卡、菲律宾、尼泊尔、孟加拉国、巴基斯坦、印度尼西亚, 中东的伊朗、沙特阿拉伯, 非洲的塞内加尔, 大洋洲的澳大利亚, 欧洲的意大利、匈牙利、俄罗斯, 北美洲的美国, 南美洲的秘鲁、哥伦比亚、巴西、阿根廷等。

日本是一个低温冷害常发生的国家, 1993 年的低温冷害使该国的稻谷总产减少了 28%, 迫使日本当年大量进口大米。低温危害水稻生产, 不仅发生在温带的日本、韩国、美国、澳大利亚等国家和地区, 就是地处热带的斯里兰卡、印度尼西亚、菲律宾、印度、孟加拉国等国也时有发生, 其中, 有些国家和地区常因水稻冷害导致经济上的巨大损失。低纬度国家和地区发生水稻冷害, 主要是由于高海拔而造成的。例如, 菲律宾水稻冷害的面积超过 2 万 hm^2 , 在水稻生长季内, 常有 16~17℃ 低温天气出现在北部山区; 印度尼西亚有 50 万 hm^2 的水田分

布在海拔 500m 以上的高寒山区，其月最低温度 $12.8 \sim 16.6^{\circ}\text{C}$ ，常导致开花期的冷害；尼泊尔拥有 128 万 hm^2 的稻田，且大部分海拔在 1 000m 以上，是世界上最高的稻作区之一，即使在夏季的 6~8 月，极端最低气温为 15°C 以下，这种低温足可危害水稻的正常生长发育；印度有 180 万 hm^2 的水稻分布于长年受低温危害的丘陵地带，而且自水稻播种、发芽、分蘖、出穗直至灌浆结实均可发生水稻冷害，因而印度水稻冷害也十分严重。

二、国内水稻低温冷害发生概况

水稻是我国最主要的粮食作物之一，全国有 65% 以上人口以稻米为主食。我国水稻种植地域广，从北部的黑龙江省至南部海南省均有种植，水稻产区每年都有不同程度的水稻低温冷害发生。低温冷害是严重影响我国水稻产量和品质的气象灾害，而且发生频率大，受灾地域广，东北地区的水稻平均 3~4 年中有 1 年遭受低温冷害。长江中下游及华南地区的稻作除了受“五月害”外，更主要的是受“寒露风”的危害。1951—1980 年的 30 年间，长江中下游的粳稻和籼稻分别有 7 年和 9 年遭受“寒露风”危害，同期华南籼稻则有 8 年受到“寒露风”的侵袭而受损。纵观我国近年来的水稻生产情况，因苗期低温导致的水稻烂秧死苗和中后期低温造成的空壳秕粒几乎每隔 2~3 年就遇 1 次，尤其是水稻开花灌浆结实期间的冷害常成为减产的重要原因。根据丁颖对我国稻作的研究结果，全国可分为华南、华中、华北、东北、西北、西南 6 个稻作带，各稻作带内水稻冷害的受损情况较高粱、玉米、大豆等农作物更为严重，减产幅度也最大。

（一）华南稻作带

华南稻作带的水稻种植面积占全国水稻面积的 27%，产量约占全国水稻总产量的 22%。它包括“四省一区”，即广东省、福建省、海南省、广西壮族自治区和中国台湾省，属季风性湿热的热带和亚热带气候，为一年多熟制（一年三熟制）的双季籼稻为主的稻作区。气候特点是四季不分明，春季升温早而快，秋季降温晚且慢，“春秋暖、冬暖和、夏季长又热”，雨量充沛，沿海多台风大雨，是全国水热资源最丰富、生长季最长的稻作区。稻作期间平均气温为 $22 \sim 26^{\circ}\text{C}$ ，活动积温为 $6\,500 \sim 8\,000^{\circ}\text{C}$ ，稻作生长季为 270~290 d。但日照时数少，光合辐射强度低，早春常阴雨，夏季多台风，晚秋还有寒露风危害，本带以三熟制双季籼稻为主，兼有粳稻和杂交稻。早春阴雨，夏秋之间台风和晚秋的寒露风，都相伴带来低温天气，增大了冷害频率，其中，以晚秋稻受害频率和程度最大。2~3

月低温,使早稻烂秧;8~10月台风,则对各季晚稻都可能延长营养生长而推迟抽穗期,导致发生延迟型冷害和孕穗期、抽穗期、开花期的障碍型冷害,以及灌浆结实期的延迟型冷害;同时,也能对一季和三季中稻的结实期造成延迟型冷害。9月下旬和11月下旬期间的寒露风,对各季晚稻都有危害,主要是抽穗开花期的障碍型冷害和结实期的延迟型冷害。如遇台风重复受害,则受灾程度就更重。

(二) 华中稻作带

华中稻作带位于南岭以北,淮河、秦岭以南,包括江苏、安徽、湖南、湖北、四川、江西、陕西西部、上海市,占全国稻区面积的63%,是我国最重要也是最大的稻作带。该区属于季风性温暖湿润的亚热带气候,由于春暖、夏热、秋凉,南北跨8个纬度,海拔高度相差500m,生育期长,积温多,雨量充沛,为一年多熟制的单、双季早、中、晚熟籼、粳稻作区。但在早春温度不稳定,春夏之交的梅雨季节和夏秋沿海的台风暴雨时期,都会相伴出现低温天气,晚秋的寒露风亦会对本稻作区各季水稻造成不同类型的冷害。

早春低温,育苗期则易发生烂秧或降低秧苗质量;6月低温,恰处于早稻孕穗期,易遭遇障碍型冷害,同时也是中稻的分蘖期,可能形成延迟型冷害期,遭受障碍型冷害机会较多;10月低温,则对双季晚稻造成抽穗开花期的障碍型冷害和结实期的延迟型冷害。总之,本稻作区各季水稻都有发生冷害的可能性,其中以双季晚稻冷害的几率最大,其危害也最严重。

(三) 华北稻作带

本稻作带为一年一熟制一季春稻和一年二熟制一季夏稻,稻区位于秦岭淮河以北长城以南,包括山西、河南北部、安徽北部、陕西中西部、甘肃的兰州以东和宁夏回族自治区,稻作带面积占全国水稻总面积的1.5%,产量占全国总产量1.3%。本带属季风暖温带半湿润气候,稻作期间4月平均温度在13℃以上,9月在16℃以上,积温3300~4600℃,年降雨量500mm以上,相对湿度为60%~70%,水稻全生育期150~180d,品种以粳稻为主,兼有籼稻和杂交稻的分布。本区水稻冷害,总体上频率低于东北稻作带,受灾范围也小。低温冷害主要发生在麦茬稻区,在秋季常危及水稻的开花灌浆结实,从而使产量锐减。

(四) 东北稻作带

东北稻作带包括辽宁、吉林、黑龙江3省,水稻种植面积占全国稻区面积的12.39%,总产量占13.0%。漠河为我国最北种稻地区,生长期仅为110d。东北

稻作带的冷害主要发生在出穗至成熟期间,延迟型、障碍型、混合型冷害均可能发生,但以延迟型为主。本区水稻在1951—2003年,共计遭遇14次低温年,其中,1954、1969、1972、1976、1986、2002年为重度冷害年,辽宁省平均减产31.1%、吉林省平均减产33.5%、黑龙江省平均减产37.2%,危害程度随着纬度升高而加重。东北水稻冷害类型主要是延迟型冷害,以及由于延迟抽穗导致花期障碍,成为延迟型与障碍型并发型冷害,最北部和高海拔山区,时有孕穗和抽穗开花期遭遇低温时段而发生障碍型冷害。总之,本区地处寒温带,春季低温并回暖慢,夏季短且高温日少,秋季降温快又早,冬季长而严寒,但日照率高、光合辐射量多、日差较大,适宜种植单季粳稻。近几年来,普遍采用早育稀植栽培方法,对防御冷害起到积极作用,使水稻生产有了突破性进展。早育稀植栽培法没有低温烂种和死苗问题,即使遭受冷害,其受害程度也远较直播为轻,但多发性的6月低温,导致生育延迟,推迟抽穗期,而使结实期积温不足的延迟型冷害时有发生,或者孕穗期、抽穗开花期的低温,以及结实期的低温而造成障碍型和延迟型并发的混合型冷害。在高纬度或高海拔的局部地区,还会发生孕穗和抽穗开花期的障碍型冷害。

(五) 西北稻作带

本稻作带位于大兴安岭以西,长城、祁连山与青藏高原以北地区,包括甘肃、内蒙古和新疆等省(区),属大陆性干燥中温带气候,为一年一熟制单季粳稻的稻作区。此带水稻产量占全国稻区的0.3%左右。水稻生长季节自5~9月,平均温度18.3~19.8℃,气候干燥,雨量稀少,年降雨量200mm,水源不足,雪水、泉水温度又低,稻作期间受冷害威胁。本区水稻冷害,由于春季温度较低,温度变化剧烈,而且在5月中旬3叶期时,又常受降温发生烂秧的冷害,6月分蘖期降温则延迟生育抽穗期,秋季降温快,霜期早,导致成熟不良而减产,故培育耐冷抗病、耐盐的高产优质品种是本带水稻育种的重要目标。

(六) 西南高原稻作带

本稻作带位于我国西南部高原,包括云南、贵州、青海、西藏自治区、四川等省(区),属季风性低纬度高原湿润亚热带和温带气候,为一年一熟制单季稻、粳稻和一年二熟制一季中稻为主的稻作区。稻作面积占全国总面积的6.1%,产量占8.6%,稻田分布在海拔100~2600m的高原上,稻作季节为3~10月。本稻区处于低纬度高原,山峦重叠,地形错综复杂,地势高低悬殊,山间气候多样,垂直温度差异显著,而呈现出山区特有的立体分布气候特点,导致

光照、温度、雨量、时空分配不均，而形成多种栽培制度、多种品种类型交互的立体稻作特点。同时，由于春季升温缓慢，时有倒春寒，夏季雨热同季，高温不足，秋季降温早又常有寒露风袭击，对早稻的育秧、晚稻的孕穗、抽穗开花和结实都构成本区水稻冷害威胁。中稻比较安全，特别在低温强度大、持续时间长的异常冷害年，则各地普遍发生不同程度的早稻烂种、烂秧，以及晚稻空壳威胁年率高、结实不良的冷害而大幅度减产。

三、国内外水稻冷害研究进展

水稻冷害严重影响稻米产量和品质，多年来国内外对冷害已有较深入研究，基本明确了危害机制、指标及地域变化特征，并就水稻低温冷害发生频率、冷害类型及危害程度进行了广泛深入的研究，总结提出一系列防御水稻冷害的关键技术措施。研究认为，水稻冷害以延迟型冷害为主，兼有障碍型冷害发生。冷害的发生有一定周期性，3~4年发生1次。但这种周期是相对的，有连年发生冷害的实例，也有连续4~5年没有冷害发生的历史纪录。

低温冷害对水稻的生长发育甚至整个稻作生产都会产生不良影响，低温冷害严重时水稻的结实率明显下降，造成大幅度减产。水稻耐冷性最终以结实率来评价，同时，水稻的产量在很大程度上也取决于结实率的高低。而水稻结实率的高低主要取决于水稻颖花受精率和受精颖花的成熟度。受精率主要受花药和花粉发育状况的影响，成熟度则受控于籽粒灌浆过程的环境条件。因此，在低温条件下花药受害程度以及籽粒灌浆过程的环境条件对籽粒发育尤为重要。

国外研究冷害对农业产生的影响由来已久。工业发达的日本，农业生产长期受冷害的威胁，自20世纪30年代起就进行了有组织的科学研究，50年代冷害的实验研究加强；1964—1966年，日本连续发生冷害，特别是1964年，损失高达504亿日元。因此，20世纪60年代后期，日本对冷害的研究更为重视，制定了长期性计划，建造大型人工气候室等环境调控系统用于冷害的研究，并取得了良好的经济效益。

自20世纪60年代起，国内外的科研人员就大规模地开展水稻冷害研究工作，积累了大量实地调查、田间试验资料和科研成果。通过长期的研究，基本查明了从作物形态特征、生理、生态反映到气象条件上的诊断冷害方法和指标，初步明确了冷害发生机制上的一些问题，分析了各类冷害的时空分布规律。近些年来，随着分子生物学的发展，国内外相继发现了与水稻耐冷性有关的基因，从基因和基因表达等微观领域深度解读水稻冷害机理，为水稻耐冷研究提供了新的、快捷的途径，也将为水稻耐冷育种作出更大的贡献。

第二章 寒地水稻耐冷性鉴定与评价

第一节 水稻耐冷性的鉴定方法和评价体系

一、自然条件鉴定法

1. 分期播种法

根据研究的需要,实行分期播种,分别进行早播、适期播和晚播。这种方法通过播期调整来研究作物某一生育期的耐冷性,简单易行,在20世纪90年代应用广泛,缺点是周期长、受气候变化影响大,有时候达不到预期效果。

2. 地理播种法

根据位置不同纬度的温度差异,在同一天,使用同一品种在不同纬度地区播种。一般情况下,纬度每升高 1°N ,平均温度降低 1°C ,但这种鉴定方法对光敏感的品种进行耐冷鉴定是有缺陷的。

3. 山区垂直气候带鉴定法

观测表明,海拔每升高100m,气温约降低 0.65°C 。通过这种垂直种植方式的比较,可确定作物对低温的反应。

4. 冷水鉴定法

此法最为简单,是国内外较为推崇的方法。但因秧苗素质和受冷的均匀程度等方面的影响,准确性较差。云南丽江地区曾用此法,从幼穗分化开始到齐穗一直用 $15\sim 18^{\circ}\text{C}$ 的冷泉水深灌(戴陆园,2002)。李太贵(1981)将开花后的水稻植株用 $12^{\circ}\text{C}/10\text{d}$ 的冷水处理来鉴定成熟期耐冷性。戴陆园等(2002)控制冷水温度为 $(15.5\pm 1)^{\circ}\text{C}$,以秧苗的苗色、分蘖、生长量、冷灌溉生长率 $[(\text{冷水池生长量}/\text{对照池生长量})\times 100]$ 和抽穗延迟天数评价苗期耐冷性。