

霍治国, 张海燕, 李春晖, 等. 中国玉米高温热害研究进展. 应用气象学报, 2023, 34(1): 1-14.

DOI: 10.11898/1001-7313.20230101

中国玉米高温热害研究进展

霍治国^{1)2)*} 张海燕¹⁾ 李春晖¹⁾ 孔 瑞¹⁾³⁾ 江梦圆¹⁾²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

²⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

³⁾(中国地质大学, 武汉 430074)

摘 要

在气候变化背景下, 中国玉米生产遭受的高温危害日益加剧。基于已有研究成果和实际灾情, 从高温热害的概念及分类出发, 对玉米高温热害的危害机理、气象成因、致灾指标、时空分布、防御对策等方面进行系统归纳阐述, 并对未来玉米高温热害研究方向进行展望。中国玉米高温热害分为延迟型、障碍型、生长不良型和混合型 4 类, 高温降低玉米花粉活力抑制散粉, 缩短灌浆时间, 导致玉米产量及品质降低。中国玉米种植区高温热害天气主要由环流异常引起, 致灾指标包括生理生化指标及气象学指标等, 但目前尚无统一标准。近 10 年中国玉米高温热害发生强度及频次增大, 春玉米高温热害在北方玉米区的松辽平原、西南玉米区的东北部风险较高, 夏玉米高温热害在河北省东南部、河南省大部以及山东省西部频发。采取适当的防御对策能减轻高温热害对玉米的不利影响。未来的研究应在综合动态的玉米高温热害指标体系、高温热害灾损模拟及风险评估与区划、高温热害精细化监测预警服务系统等方面重点突破。

关键词: 玉米; 高温热害; 危害机理; 气象成因; 时空分布

引 言

全球气候变化已成为不争事实, 气候的多变性及极端事件发生频率和强度增加, 农业气象灾害风险随之增大, 极大地威胁中国农业生产及粮食安全^[1]。玉米对天气变化特别是气温最为敏感, 气温升高对玉米产量产生较大的负面影响^[2]。研究表明: 全球平均气温每上升 1℃, 玉米产量下降 7.4%^[3], 气温升高 2℃造成的玉米产量变化比降水减少 20% 的影响更大^[4]。玉米作为三大粮食作物之一, 是中国粮食增产的主要贡献者, 2021 年种植面积达 4.33×10^7 hm², 其产量占中国粮食总产量的 40%, 中国北方春玉米区产量预测结果表明, 气温增加 1 个标准偏差, 产量下降 1.4%^[5]。在气候变化背景下, 玉米高温热害频发。2003 年意大利玉

米受高温影响, 产量下降 36%^[6]。2009 年中国河北省部分地区持续高温, 致使玉米叶片枯黄, 灌浆缓慢甚至停止, 雄穗干瘪无粉, 花期不遇, 造成空杆, 绝收 4.2×10^4 hm²; 2013—2018 年黄淮海夏玉米产区连续 6 年遭遇高温热害, 致使部分地区玉米结实不良, 甚至绝收, 其中 2016 年夏玉米生育期缩短 4.8%~8.5%, 产量降低 12.4%^[7]; 2019 年 7—8 月安徽省北部玉米主产区出现异常高温, 阻碍夏玉米正常开花授粉, 导致玉米结实不良、产量降低, 严重地块减产 30% 以上^[8]。

针对玉米高温热害这一突出问题, 已有学者从不同角度开展了相关研究, 取得一定成果。本文综合玉米高温热害的已有研究成果, 对玉米高温热害的概念、分类、影响和危害机理、气象成因、时空分布特征、防御对策等方面进行整合梳理, 以期为玉米高温热害防御和农业减灾增效提供科学支持及深入研

2022-07-13 收到, 2022-11-23 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502801), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2020Z005)

* 邮箱: huozg@cma.gov.cn

究的参考。

1 概念及分类

1.1 概念及特点

1.1.1 高温热害

高温热害指当气温上升到一定程度,高温对作物正常生长发育、产量、品质等造成危害^[9],会加剧干旱、加速作物植株的蒸腾,导致作物脱水萎蔫甚至死亡,也称酷热灾害。中国高温热害集中出现于5—9月,频发于盛夏7—8月,具有持续时间长、强度大、影响范围广等特点,易对玉米、水稻、棉花、茶树、苹果、猕猴桃、枇杷、设施番茄等作物^[10-12]产生不利影响。近年高温热害频发严重影响中国各地的农业生产,如2013年夏季全国各地多次出现罕见大范围持续性高温天气,浙江省茶园受灾面积达 $1.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$,夏秋茶减产 $4.74 \times 10^4 \text{ t}$,经济损失为17.2亿元^[13],湖南省衡阳、邵阳等地约10%的一季稻、玉米等作物受灾绝收^[14]。2016年湖北省出现持续晴热高温天气,约98.3%的中稻在抽穗扬花期和灌浆期遭遇高温热害,结实率较常年偏低12%~15%^[15]。

1.1.2 玉米高温热害及其特点

玉米是C₄植物,生育期内相对较高的气温有利于玉米增产,但气温超过一定范围就会对其产生不利影响。玉米高温热害是指玉米生长过程中出现的一种持续高温且空气湿度较低的危害性天气,可使玉米生长发育延迟或不良、花粉不遇或授粉不良,导致减产甚至绝收,具有一定的隐蔽性和累积效应^[16]。同一天气条件下,玉米高温热害受害程度随品种、播期、种植密度、植株长势、水肥管理条件、间套作方式等因素而变化。雄穗分支多、花粉量大的品种对高温环境表现不敏感。异常高温天气常与干旱并发,植株遭受双重危害,损失加重,如2012年美国中东部出现极端高温并引发大范围干旱,整个玉米种植带均遭受高温干旱侵袭,农业损失超过300亿美元^[17]。此外,高温还可引发其他病害,如纹枯病、青枯病、瘤黑粉病、穗腐病等^[18]。

1.2 分类

基于高温热害的发生时段及对玉米影响与危害结果的差异,可将玉米高温热害分为延迟型、障碍型、生长不良型和混合型4类。

1.2.1 延迟型

延迟型热害发生在玉米营养生长期,气温过高

抑制植株向上发育,大幅减缓植株生长过程,热害严重时玉米冠层生长发育停止,根基部位出现过量的分蘖,大量消耗植株营养物质,造成减产或绝收。延迟型热害在不同区域、栽培条件、玉米品种下均有发生。高温多雨是玉米分蘖发生的主导因素,通过适当的田间管理如保持水肥,及早中耕培土等,可以减轻分蘖过多而减产的影响。2013年河南省邓州7月上中旬玉米营养生长期,出现长达10 d的高温天气,玉米植株叶片萎蔫,冠层生长发育受阻,基部蘖芽大量生发^[16]。

1.2.2 障碍型

障碍型热害发生在玉米生殖生长期,高温对植株生殖器官造成损伤,致使雄蕊不育或部分不育,受害时间短但难以恢复正常。玉米植株受害后无法正常抽雄或开花,果穗秃尖、缺粒、缺行甚至无果穗,对产量影响较大。障碍型热害的危害程度与品种特性有关,雄穗分枝数少,花粉数量少,授粉期短的玉米品种,受害更为严重^[19]。2016年7月河南省遂平县出现持续高温,正值花期的玉米出现不授粉或授粉不良现象,结实率大幅下降,危害严重地区结实率不足30%^[20]。

1.2.3 生长不良型

生长不良型热害常发生在玉米营养生长期,高温破坏了玉米植株内部碳循环,净光合产物积累减少,植株未得到充足的养分而不能发育果实。植株形态表现为整体株高减小,叶片数、穗粒数、千粒重等减少,果穗变短,但成熟期无明显的延迟现象。2018年山东省兖州7月中下旬玉米大喇叭口期出现连续高温,叶原基发育及伸长受到抑制,雌穗分化受阻甚至畸形,平均减产5.4%^[21]。

1.2.4 混合型

混合型热害即在玉米生长前期遭遇高温热害,生长后期又发生高温热害以及其他气象灾害,植株受害后症状集延迟型、障碍型、生长不良型于一体,玉米在营养生长阶段滋生大量蘖芽,生殖生长阶段授粉不良,灌浆期缩短,致使玉米大幅减产甚至绝收。中国玉米种植区混合型热害发生最为频繁,2013年河南省平舆县夏玉米在营养生长阶段长期干旱,株高降低,抽雄授粉期遭遇高温、暴雨授粉不良,玉米缺粒穗最高达78%,灌浆期又出现极端高温,灌浆迟缓且时间缩短,发生高温逼熟现象,千粒重下降14.65%,减产20.45%^[18]。2017年河南省新乡玉米遭遇历史罕见的混合型热害,拔节期前异

常增生分蘖,生长中期遭遇高温干旱授粉不良,后期遇连阴雨天气,成熟期推迟,粒重降低;高温热害造成部分地区玉米空秆畸形穗率高达 50%以上,10%以上的地区不同程度减产甚至绝收^[22]。

2 高温热害危害机理

高温热害可能发生在玉米生长的各个阶段,但对玉米造成的危害和产量损失不同,在出苗后的第 29—62 日气温升高对产量影响最大^[23]。当玉米苗期遭遇高温热害,叶片颜色变浅,地上部分生物量显著降低,植株外形瘦弱^[24];开花授粉期遭遇高温热害,其花粉花丝的形态结构出现异常败育或畸形,影响授粉结实;灌浆期遭遇高温热害则会缩短灌浆持续时间,影响同化物向籽粒的转运过程,粒重降低从而造成减产^[25]。

2.1 高温对玉米光合作用的影响

光合作用是对高温极其敏感的生理过程之一,大喇叭口期到成熟期高温会导致玉米光合色素含量及相关酶活性显著降低,光合速率下降^[26]。研究表明,高温使得光合速率降低是由非气孔因素即叶肉细胞光合活性下降造成^[27]。高温条件下,叶片内叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量会随着胁迫温度和时间的增加而减小,同时叶绿体类囊体膜流动性增加,结构和组织的生理特性发生改变,造成光系统 II 的最大光化学量子产量、电子传递的实际量子产量降低^[24,28],从而降低光合速率。此外,光合作用关键酶的活性降低也是影响作物光合速率的主要因素之一,高温胁迫下酶活性比光系统 II 的光化学最大量子产量反应更为敏感^[28]。试验证明 35℃ 高温处理下磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)羧化酶、核酮糖二磷酸(RuBP)羧化酶活性显著降低,高温条件下叶片含水率、可溶性蛋白质含量下降^[29],RuBP 活化酶受到抑制,从而降低 RuBP 酶的活化状态^[30],叶片光饱和状态下的 CO₂ 交换速率也随之降低。

2.2 高温对玉米育性的影响

高温是导致玉米花粉活力减退的重要原因,而花粉活力的高低对玉米穗粒数有直接影响,最终影响产量。高温胁迫使得花药壁加厚,花药难以开裂影响散粉,花药皱缩变小,药室发生变形,药隔维管束变小,花室中花粉粒散乱,花粉皱缩,花粉萌发孔凹陷或严重畸形,花粉内淀粉粒体积及密度变小^[31-32],导致玉米花粉生活力及萌发力减弱致使花

粉败育,活性降低。此外,高温还会改变玉米开花特性,使抽雄期提前、开花期和盛花期延后,抽雄吐丝间隔期延长^[33],雌雄间隔期可延长 3 d,部分品种间隔期可增加 76.5%^[32],散粉量下降,散粉严重受阻,结实率降低。玉米花期高于平均最高气温(33℃)3~5℃的高温处理下高活力花粉比例降低 23.1%,当气温超过 38℃时,雄穗不能开花,散粉受阻,授粉率与气温呈负相关,38℃高温处理 30 min 后玉米的小花受精率和总结实率均为 0^[34-36]。

2.3 高温对玉米灌浆的影响

灌浆期是玉米籽粒物质积累和产量形成的关键时期,对气温变化较为敏感,此时遭遇高温胁迫会影响籽粒灌浆速率及持续时间,对产量影响较大。花后前期(授粉后第 5—20 日)高温处理使籽粒发育前期的灌浆速率加快,但抑制了灌浆中后期的速率^[37],灌浆后期胚、胚乳和种皮重量增速在高温胁迫下显著受抑,籽粒淀粉合成相关酶活性逐渐降低,最大可降低 42%,叶片衰老加速,光合参数降低,同化物向籽粒转运减少^[28-29],粒重增速缓慢,穗粒数减少,导致灌浆后期籽粒干重及产量降低。高温会降低玉米籽粒的含水率,加快籽粒果皮中淀粉体的降解速度,而胚乳细胞中淀粉体充实提前,淀粉积累加速,持续积累时间缩短^[38],但灌浆速率加快不能补偿灌浆期缩短造成的影响。此外,高温对灌浆速率及持续时间的影响与玉米品种特性有关,晚熟品种灌浆期长而灌浆速率相对较低,早熟品种灌浆期短而灌浆速率相对较高^[39]。

2.4 高温对玉米品质的影响

玉米发育后期的高温条件对玉米籽粒品质及糊化特性有显著影响,灌浆期高温较开花期高温对玉米籽粒品质的影响更大^[40]。高温胁迫会影响叶片与籽粒的碳、氮同化物积累及分配状况,高温时叶片中的氮快速向籽粒转移,提高了氮的同化效率,籽粒中蛋白质含量升高。高温影响淀粉代谢酶的活性及淀粉合成相关基因的表达,阻碍糖分向淀粉的转化,籽粒中粗脂肪、粗淀粉含量降低,同时改变籽粒内淀粉结构,淀粉粒变大,异常淀粉粒数增加,糊化温度升高,峰值粘度下降,面粉回生率增大^[41-42],品质下降。

3 玉米高温热害的气象成因

高温热害是一种大范围的灾害性天气,形成于

特定的大尺度环流背景下,其发生发展具有极强的区域差异性和过程性,强度及持续日数受多种因素影响。全球气候变暖加剧气候系统不稳定,是造成极端高温事件频发的气候背景,而影响气温异常的最直接因子是大气环流的异常。中国夏季各地区高温过程受西太平洋副热带高压及青藏高原上空南亚高压两个关键环流系统影响。在高压系统外围西风场的控制下,通过太阳短波辐射和下沉气流的增温作用使气温在短时间内迅速升高,从而引发大范围高温事件^[43]。大气的干燥程度也是影响气温升高的重要因素之一,持续性高温天气发生时,也伴随着水汽输送环流的异常,使大气更易增温,常形成持续高温少雨天气^[44]。鉴于高温天气条件成因的区域差异以及高温出现时间与夏玉米发育时段匹配的不同,将中国优势玉米区(黄淮海夏玉米区、北方春玉米区、西南玉米区)的高温热害气象成因与高温热害发生的主要类型及其关联关系进行分区评述。

3.1 黄淮海夏玉米区

黄淮海地区出现异常高温的主要原因是西风带冷空气活动势力较弱,冷空气及低压槽在西亚地区稳定少动,大部分地区由强大的大陆暖高压控制,空气下沉绝热增温,加快地面温度升高^[45]。从前期高空环流形势(500 hPa 平均高度场)演变看,高温时段内欧亚大陆中高纬地区维持两槽一脊形势,盛行纬向环流,黄淮海地区处于脊前西北气流(暖性高压脊)控制,水汽输送气流由新疆北部指向华北地区,含水量少,辐射增温强^[46]。在850 hPa 温度场上,北方多为干区,且存在自西向东逐渐降低的温度梯度,盛行偏西风将干暖空气带到黄淮地区,由于西北部多山脉,气团干绝热增温促使高温天气形成^[47]。在黄淮海夏玉米生育期(6—9月)内,由于不同年际间高温天气出现时间与夏玉米发育时段匹配的差异性,延迟型、障碍型、生长不良型和混合型4种高温热害均有出现,以苗期-拔节期(6月中旬—7月下旬)高温发生次数最多、抽穗-灌浆期(8月)高温危害最重^[48-49]。

3.2 北方春玉米区

北方春玉米区异常高温成因与黄淮海夏玉米区类似,纬向环流占优势,东北冷涡活动少,冷空气不活跃,40°N 以北地区西风急流异常偏北,对流层上部南亚高压向东北方向倾斜,西太平洋副热带高压西伸北抬,对流层高中低层均受反气旋环流控制,暖脊发展深厚,闭合的高压中心重叠,其所控制地区气

流下沉,出现持续性高温^[50]。受反气旋环流影响,40°N 附近地区以偏东风为主,南侧存在异常的气旋性环流,阻挡南海、辽东半岛的暖湿气流向北输送,空气辐散加剧下沉运动增温^[51]。北方春玉米生育期(4月下旬—9月中旬)的抽穗至灌浆期(7月中旬—8月下旬)易发生高温热害,多见障碍型高温热害发生的报道。近年随着气候变暖趋势加剧,春玉米播种至抽穗期高温热害风险也在增加,未来有其他类型高温热害发生的可能^[52-53]。

3.3 西南玉米区

西南丘陵山地玉米区易在春夏季出现极端高温,亚洲中高纬纬向环流槽脊活动偏弱,宽槽区明显,西太平洋副热带高压偏西、偏北,强度偏强,与青藏高压合并,对流层中上层有显著的反气旋异常,大气下沉运动强烈,云量减少,到达地表的太阳短波辐射增加,致使地面气温快速升高^[54]。菲律宾海区及中国西南地区对流层低层有显著的气旋性环流异常,高压南侧的西南季风东传受阻,切断了西南地区的两大水汽通道——孟加拉湾和南海暖湿气流的输送,促进地表升温^[55]。西南玉米区春玉米生育期为3月上旬—8月中旬,夏玉米生育期为4月上旬—9月中旬,高温热害易发生在抽穗至灌浆期(春玉米为6月中旬—7月中旬,夏玉米为7月上旬—8月下旬),在苗期、拔节期也有发生,目前多见障碍型高温热害发生的报道^[56-57]。

4 玉米高温热害致灾指标

高温影响植株光合、授粉、灌浆、结实等过程,在实际生产中,通过观察植物形态变化难以确定不同程度的高温热害,试验研究多从生理生化及产量构成要素等指标的角度解释高温危害程度的大小。王海梅^[58]通过分析不同温度梯度下玉米可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、SOD(超氧化物歧化酶)活性等生理指标,确定38℃为玉米耐受高温的重要转折温度。张学鹏等^[59]通过温度控制试验,对比不同温度胁迫下的叶片光合反应、气孔及叶绿体结构变化,确定36℃为玉米叶片“源”的胁迫阈值。生理指标虽精准可靠,但时效性差,取样、测定需要投入较多的人力、财力,适用于小面积的研究使用。

对玉米高温热害是否发生的判别标准,有研究以日最高气温及其持续日数等气象学指标为主,但不同地区不同发育阶段的玉米高温热害研究采用的

温度阈值及判断标准有所不同,综合已有研究成果,表 1 为玉米不同发育时段高温热害发生的温度判别指标。致灾指标同高温热害导致的玉米生理变化及产量损失的关系有待于进一步验证,致灾指标阈值有待进一步规范统一。中华人民共和国国家标准 GB/T 21985—2008《主要农作物高温危害指标》以最高气温不小于 30℃或 35℃,开花较少或不开花作为玉米花期的热害指标^[9]。王丽君^[60]以高温累积度日(日最高气温大于 32℃的积温)和高温发生日数(日最高气温大于 32℃的日数)为指标,评价夏玉米生育期内极端高温风险;和骅芸等^[61]、管玥等^[62]以日最高气温不小于 35℃、高温日数持续 3,4,5 d 为标准划分华北平原夏玉米花期高温热害的危害等级;徐延红等^[63]、陈怀亮等^[64]以花期日最高气温不小于 32℃和不小于 35℃发生频率和日最高气温不小于 32℃和不小于 35℃的积热量 4 个致灾气象因子,构建河南省夏玉米高温热害评估指标;刘哲

等^[65]以日最高气温 34℃、时长 7 h 为高温指标分析夏玉米花期的热害分布规律;刘盼等^[66]分别以日最高气温不小于 32,34℃为高温阈值分析 1971—2018 年河北省玉米花期高温累计日数的时空变化;张琪等^[67]通过积温产量模型确定山东省夏玉米拔节期前后不同发育阶段的极端高温阈值;韦丹等^[68]以 30,32,35℃为高温阈值,结合 APSIM 模型探究京津冀地区极端高温对玉米产量的影响;于振文^[69]总结归纳中国北方地区玉米不同发育阶段的高温胁迫阈值;尹小刚等^[70]以日最高气温不小于 30℃的积温及发生日数为判断标准,探讨高温对东北农作区玉米生产的影响;韩佳昊等^[71]采用百分位法以气温序列的 85%和 90%两个百分位值及持续时间 3 d,5 d 两个等级,定义 4 种等级水平的玉米高温事件;周梦子等^[72]利用格点数据以某日最高气温序列 95%分位值的相对阈值定义玉米极端高温。

表 1 玉米高温热害判别指标统计表

Table 1 Statistical table of discrimination index of high temperature and heat damage of maize

发育阶段	温度阈值(日最高气温)	研究区域	参考文献
生育期	不小于 30℃	东北农作区	[70]
生育期	不小于 32℃	中国玉米区	[53]
生育期	不小于 32℃	黄淮海玉米区	[60]
生育期	不小于 35℃	海河平原	[48]
生育期	不小于 30,32,35℃	京津冀地区	[68]
生育期	85%,90%分位值	海河平原	[71]
生育期	95%分位值	中国玉米区	[72]
花期	不小于 32,35℃	河南省	[63-64]
花期	不小于 34℃	黄淮海玉米区	[65]
花期	不小于 32,34℃	河北平原	[66]
花期	不小于 35℃	淮北平原	[93]
花期	不小于 35℃	华北平原	[61-62]
花期	不小于 35℃	河南省	[92]
拔节期前	不小于 35.2℃	山东省	[67]
拔节期后	不小于 34.5℃	山东省	[67]
吐丝-成熟	不小于 35℃	湖南省春玉米区	[79]
播种-出苗	不小于 31℃	中国北方地区	[69]
出苗-抽雄	不小于 33℃	中国北方地区	[69]
抽雄-吐丝	不小于 35℃	中国北方地区	[69]
吐丝-成熟	不小于 33℃	中国北方地区	[69]

5 时空分布特征

中国玉米产区分布广泛,根据自然生态、种植结构、玉米种植规模及发展前景,将中国划分为 6 个玉米种植区:北方春玉米区、黄淮海夏玉米区、西南山地玉米区、南方丘陵玉米区、西北灌溉玉米区、青藏

高原玉米区,随着玉米生产布局的优化,形成以北方春玉米区、黄淮海夏玉米区、西南玉米区为优势产区的中国玉米带^[73]。春玉米主要分布在东北、西北、西南各省的高海拔丘陵山地地区,东北三省种植面积最大,以玉米单作或间作大豆、马铃薯为主;夏玉米主要分布在黄淮海平原,间套复种并存,小麦玉米两作平播或套播种植占 70%以上。

5.1 春玉米高温热害时空分布特征

春玉米种植集中地区气温相对较低,不易遭遇高温热害,2003年后北方地区高温状况加剧,最近10年频繁出现异常高温过程,且集中在6月^[74]。东北地区盛夏高温是春玉米气象产量增加的限制因子,气温上升,东北地区西南部减产,黑龙江省东部平原地区产量增加,春玉米生育期内平均气温在空间上呈现自东北向西南逐渐增加的趋势,辽宁地区春玉米发育期遭遇极端高温的风险明显增加^[75-77]。A1B情景(IPCC排放情景报告所假设的未来大气CO₂等温室气体保持中等排放的平衡发展情景)下2011—2100年东北地区玉米生育期内高温逐步增加,增加幅度高值区主要位于黑龙江省西部与东北部^[78]。湖南省春玉米高温热害年次概率高值区在衡阳大部、株洲中南部等地,衡阳市最高为81.8%^[79]。广西壮族自治区岩溶山区约23%的频率出现高温减产年,导致春玉米减产1成以上^[80]。

春玉米高温热害多发生在开花授粉期,但随着各地播期不同而改变,晚播春玉米(4月中旬—5月上旬播种)灌浆期也易遭遇高温天气^[81]。北方春玉米区开花期(7月中下旬)最高气温明显增加,松辽平原地区高温风险高于其他地区^[70]。西南春玉米高温天气主要发生在乳熟-成熟阶段,且主要集中在东北部地区,部分地区气候变暖后高温发生日数较变暖前明显增加,高达10.4 d^[82]。四川省南充高于35℃的高温天气最早可能出现在4月,春玉米在5月中旬拔节抽雄时遭受高温危害^[83]。湖南省春玉米(3月下旬—7月中下旬)几乎整个灌浆期都处于高温胁迫状态,7月中旬胁迫最重^[84]。2016—2018年西北河套灌区春玉米在7—8月均遭遇不同程度的高温热害,最早发生在7月7日,最长持续时间为18 d,安徽省利辛县春玉米在7月灌浆期发生高温热害^[85-88]。

5.2 夏玉米高温热害时空分布特征

夏玉米高温热害风险主要集中在黄淮海产区,空间上呈现南高北低、西高东低的分布态势,河北省东南部、河南省大部以及山东省西部地区高温热害风险最高,受害最为严重^[89]。河南省南阳南部、驻马店、周口、漯河、许昌东部等地夏玉米高温热害频率超过55%,与未来气候变化情景下(RCP4.5情景,到2100年温室气体浓度对应辐射强迫为4.5 W·m⁻²)高温发生频率高值区基本一致^[63-64]。河北省高温热害高风险区主要分布在邢台和邯郸两市中东、衡

水西部和南部、石家庄东南部地区^[90]。山东省夏玉米拔节期前后高温均呈现从沿海向内陆增加的趋势,菏泽、济阳、济宁等地是高发地区^[67]。

夏玉米高温热害风险高于春玉米,拔节期后较拔节期前发生频次更高,开花散粉期高温威胁最为严重,河北省夏玉米在拔节抽雄期的高温风险最大,1958—2008年河南省郑州夏玉米灌浆结实期高温热害严重程度高于抽穗开花期,并呈现加重趋势^[90-91]。黄淮海地区夏玉米拔节至开花期内,约有44%的时间处于极端高温胁迫下,2010—2019年夏玉米花期高温热害加重,频次急剧增加,以河南省最为显著^[60-61]。近50年河南省夏玉米花期不同等级高温热害发生频率呈现先减小后增加的趋势,20世纪90年代后频次明显增加,1992年、1994年、2013年、2018年高温热害较为严重,66%的区域发生重度高温热害的概率高于10%,未来在RCP4.5情景下河南省高温发生频率为30.6%~89.9%^[62-64]。豫南地区7月20—29日发生5 d及以上高温日数的频次为每10年2~3次^[92]。淮北平原夏玉米花期高温热害发生频率约1.7年一遇,中重度高温热害发生频率高达20%^[93]。

6 防御对策

玉米高温热害的防御主要有两种方法。

6.1 高温热害监测预警

玉米高温热害的监测预警指在结合实时或未来天气条件和玉米生育特性的基础上,参照高温热害指标,监测预报玉米是否受到危害以及危害的时间、程度,以指导后续采取有效可行的防御措施。目前玉米高温热害监测预警研究尚处于起步阶段,主要是通过地面气象观测、高空卫星遥感监测两种方式,将获取的气温预测结果与高温热害判别指标、作物发育时期相结合,开展高温热害发生强度、范围的实时动态监测。部分地区气象部门已建立区域性高温监测预警系统及适用的高温预测模型,浙江省杭州市气象局建立了针对十余类农产品的农业气象灾害预警业务服务平台,对高温热害等气象灾害指标与预报实况因子进行关联判断,自动生成预警材料实时发布,提升了区域作物高温热害防控的时效性^[94];河南省地方标准DB41/T 2094—2021《夏玉米花期高温预警气象等级》^[95]的建立与编制,为河南省夏玉米产区提供了及时、准确、可量化的花期高

温监测预警信息和技术支撑。杨磊等^[89]将地面实测气温数据、遥感数据及夏玉米高温热害指标相结合,构建黄淮海夏玉米主产区高温热害评估模型,实现了对夏玉米花期高温热害的监测评估。陈刚等^[96]利用数码相机获取玉米冠层数字图像的可见光光谱对夏玉米进行高温胁迫的诊断分析,验证了应用光谱参数反应不同高温胁迫程度的可行性。

6.2 栽培管理措施

6.2.1 选用抗逆性品种

高温对玉米的危害在不同品种之间存在显著性差异,选育耐热基因型玉米品种对减缓高温危害十分有效,同时也是预防高温热害最经济有效的措施。在气候变化背景下,玉米育种应注意因地制宜,选育在高温条件下能保持授粉、结实良好、叶片短、直立上冲、叶片较厚、持绿性好、光合效率高的耐热品种,以适应和缓解高温造成的伤害。

6.2.2 调整播期

不同发育阶段的玉米植株对高温的耐受程度不同,调整播期能减少玉米关键发育时段与高温出现时间的耦合,减轻高温热害的不利影响,是促进玉米高产的途径之一。和骅芸等^[61]研究表明,选择适宜的播种期能降低夏玉米花期遭受高温热害的频率。刘佳鸿等^[97]通过对比黄淮北部地区不同播种期夏玉米的灾害发生频率及产量特征,发现 6 月 15 日播种的夏玉米花期遭遇高温热害的频率最小,产量最高。

6.2.3 喷施外源调节剂

外源植物激素在缓解高温热害对植株生长发育危害方面有重要作用。喷施 CaCl_2 能使叶片在高温下维持较高的叶绿素含量,减轻高温胁迫对植株光合作用产生的不利影响;喷施水杨酸能稳定叶片光合性能,降低高温胁迫对夏玉米的减产效应;吐丝期喷施油菜素内酯能降低高温引起的过氧化伤害,花后高温条件下的玉米籽粒产量提高 32.6%^[98]。

6.2.4 科学水肥管理

科学的水肥管理措施能够增加玉米植株的抗旱耐热性,降低玉米高温热害风险。适当灌溉能够调节玉米群体内湿度,降低冠层温度,改善授粉环境,促进玉米雌雄穗协调均衡发育,是抵御作物高温热害的有效措施。在高温胁迫下,灌溉能有效减缓玉米发育后期叶面积指数下降幅度,显著增加作物结实率、千粒重和产量,玉米收获指数提高 17.6%^[99]。科学施肥即在保证施足底肥的基础上,结合玉米不同

发育时期的田间发育情况,合理进行一定比例的追肥或叶面肥喷施,施肥原则是基肥占 50%,苗期追肥占 20%,大喇叭口期追肥占 30%。在玉米拔节期和大喇叭口期喷施氨基酸叶面肥后,开花期遭遇持续高温(不小于 35℃)的玉米植株花粉活力提高 21.6%^[100]。在逆境胁迫下补施钾肥能提高叶片水分含量,施用锌肥和硼肥,能增加玉米干物质积累量,改善籽粒品质。

6.2.5 其他措施

玉米遭遇高温热害时,散粉及受精结实能力严重下降,通过隔株去雄或人工辅助授粉可以显著提高结实率。此外,改善种植方式,适当调整种植密度,实行宽窄行交替种植、高矮作物间套作,调控群体冠层结构,改善田间通风和透光条件,增加单株干物质生产量,培育壮苗等可提高玉米抵御高温逆境的能力。

7 存在的主要问题

本文基于已有研究成果,从玉米高温热害概念与分类出发,对危害机理、气象成因、致灾指标、时空分布、防御对策等方面进行总结阐述,系统评述中国玉米高温热害的研究进展。受已有研究成果及观测数据限制,存在的主要问题如下:玉米高温热害的危害影响试验研究结果较多,但实际灾情数据较少,存在一定差异性;玉米花期高温热害的相关成果较多,但其他可能受害发育期的研究成果报道偏少;多从气候学角度分析高温热害的发生特征,针对玉米高温热害的监测预警研究较少。具体解决措施探讨如下。

7.1 玉米高温热害判识标准有待统一规范

农学上通常通过栽培试验的方式,利用穗粒数、小穗育性、结实率和千粒重等指标进行玉米高温热害的定量评价,气象学上多基于不同温度阈值的高温强度、持续日数、积温等对高温热害进行灾害等级的划分。因此,亟待建立统一规范的玉米高温热害等级判识标准。构建玉米高温热害等级判识标准应重点关注:①玉米高温热害可能发生的时段较长,而已有研究多集中于开花抽穗期、灌浆结实期等敏感时期,应充分考虑所有可能遭受高温热害的发育期,建立完善的玉米高温热害判识指标;②温度控制试验研究应从不同程度的高温胁迫对玉米生理生化过程的影响入手,深入探究玉米温度胁迫的耐受阈值,

建立明确生物学意义的定量化高温热害指标;③玉米高温热害是一个动态持续的生物学过程,业务应用中的热害判识指标应充分考虑气象因子、玉米品种、水肥条件、栽培管理措施等因素,建立综合动态的高温热害指标体系。

7.2 玉米高温热害灾损模拟及风险评估有待加强

已有研究多为玉米生育期或不同发育阶段的高温胁迫及其日数的时空特征分析,仅少数研究应用统计分析、作物模型等方法揭示极端高温对玉米产量影响,但在灾害致灾因子与玉米灾损的定量关系、玉米高温热害风险评估与区划等方面研究成果匮乏,有待深入开展相关研究:①玉米生育期内往往受到多种灾害的复合影响,对高温的响应机制也随品种、发育阶段等变化,单一的模型及方法不能明确揭示其内在联系,未来应充分结合统计模型、作物模型、生理特征变化等深入研究高温热害影响机理及评估方法,准确提取由高温热害造成的产量损失,构建玉米高温热害灾损评估模型;②玉米高温热害风险研究多是基于气象数据的分析结果,影响因素考虑不全,应充分结合玉米高温热害的致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性以及防灾抗灾能力等方面进行全面评估,特别是热害发生严重及多发地区,高温热害风险评估应重点予以加强。

7.3 玉米高温热害监测预警研究有待深入

已有研究成果表明:未来玉米遭受高温热害的风险将进一步加剧,玉米种植布局、高温热害时空分布等随气候变化而发生改变,但目前玉米高温热害监测预警研究进展缓慢,现有研究成果不能满足实际生产及业务服务的需求,加强玉米产区的高温热害监测评估和预警预报的技术研究已迫在眉睫。针对玉米高温热害的监测预警应重点突破以下技术问题:①基于玉米发育数据和气象大数据,系统收集玉米高温热害历史灾情数据,揭示气候变化背景下中国玉米种植布局变化,加强玉米高温热害的动态监测与影响评估研究,探析热害高发区域的气象成因及防御对策;②充分利用土壤湿度数据、遥感数据等,结合作物模拟模式与遥感技术、地理信息系统等的耦合应用,建立精细化的玉米高温热害监测预警及影响评估体系,研发可供业务应用的灾害监测预警服务系统。

参考文献

[1] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulner-

- ability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [2] Bassu S, Brisson N, Durand J L, et al. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors?. *Global Change Biol*, 2014, 20(7): 2301-2330.
- [3] Zhao C, Liu B, Piao S L, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114(35): 9326-9331.
- [4] Lobell D B, Marshall B B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agric For Meteorol*, 2010, 150(11): 1443-1452.
- [5] Ma J L, Maystadt J F. The impact of weather variations on maize yields and household income: Income diversification as adaptation in rural China. *Global Environ Change*, 2017, 42: 93-106.
- [6] Ciaia P, Reichstein M, Viovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, 437(7058): 529-533.
- [7] 任寒, 刘鹏, 董树亭, 等. 高温胁迫影响玉米生长发育的生理机制研究进展. *玉米科学*, 2019, 27(5): 109-115.
Ren H, Liu P, Dong S T, et al. Research advancements of effect of high temperature stress on growth and development of maize. *J Maize Sci*, 2019, 27(5): 109-115.
- [8] 赵曼丝, 李森郁, 鲁溢超, 等. 高温胁迫对安徽省夏玉米生产的影响及对策. *安徽农学通报*, 2021, 27(18): 36-38.
Zhao M S, Li S Y, Lu Y C, et al. Effects and countermeasures of high temperature stress on summer maize production in Anhui Province. *Anhui Agric Sci Bull*, 2021, 27(18): 36-38.
- [9] 冯明, 刘安国, 吴义城, 等. 主要农作物高温危害温度指标 (GB/T 21985—2008). 2008.
Feng M, Liu A G, Wu Y C, et al. Temperature Index of High Temperature Harm for Main Crops (GB/T 21985—2008). 2008.
- [10] 杨建莹, 霍治国, 王培娟, 等. 江西早稻高温热害发生时间分布特征. *应用气象学报*, 2020, 31(1): 42-51.
Yang J Y, Huo Z G, Wang P J, et al. Occurrence characteristics of early rice heat disaster in Jiangxi Province. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(1): 42-51.
- [11] 李化龙, 王景红, 张维敏, 等. 高温胁迫对猕猴桃叶片叶绿素荧光特性的影响. *应用气象学报*, 2021, 32(4): 468-478.
Li H L, Wang J H, Zhang W M, et al. Effects of high temperature stress on leaf chlorophyll fluorescence characteristics of kiwifruit. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 468-478.
- [12] 郑艳姣, 杨再强, 王琳, 等. 中国南方设施番茄高温热害风险区划. *应用气象学报*, 2021, 32(4): 432-442.
Zheng Y J, Yang Z Q, Wang L, et al. Refined risk zoning of high temperature and heat damage to greenhouse tomato in southern China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 432-442.
- [13] 罗列万. 2013年浙江省夏季茶园高温干旱受灾情况调查评估. *中国茶叶*, 2013, 35(9): 17.
Luo L W. Survey and evaluation of high temperature and drought disaster in summer tea gardens in Zhejiang Province in 2013. *China Tea*, 2013, 35(9): 17.

- [14] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴. 北京:气象出版社,2015.
China Meteorological Administration. Yearbook of Meteorological Disasters in China. Beijing: China Meteorological Press,2015.
- [15] 邓爱娟,刘可群,刘敏,等. 2016年湖北省中稻高温热害影响调查分析. 湖北农业科学,2017,56(17):3260-3264;3291.
Deng A J, Liu K Q, Liu M, et al. Investigation and analysis for the influence of heat damage made onto middle rice in Hubei Province in 2016. *Hubei Agric Sci*, 2017, 56(17): 3260-3264; 3291.
- [16] 郭振荣,赵颖丽. 邓州市夏玉米高温热害发生特点及预防策略初探. 农业科技通讯,2020(3):169-171.
Guo Z R, Zhao Y L. Characteristics and prevention strategies of summer maize high temperature damage in Dengzhou City. *Bull Agric Sci Technol*, 2020(3): 169-171.
- [17] LeComte D. US weather highlights 2012: Heat, drought, and sandy. *Weatherwise*, 2013, 66(3): 12-19.
- [18] 冯贺奎,臧俊岭,万保恒,等. 平舆县2013年持续高温干旱对夏玉米生产的影响及对策. 作物杂志,2014(2):127-131.
Feng H K, Zang J L, Wan B H, et al. Effects of persistent high temperature and drought on summer maize production in Pingyu County in 2013 and countermeasures. *Crops*, 2014 (2): 127-131.
- [19] 梁世强,杜德强,宋志敏,等. 玉米高温热害原因及应对措施. 现代农村科技,2019(5):19-20.
Liang S Q, Du D Q, Song Z M, et al. Cause of high temperature heat damage of corn and its countermeasures. *Modern Rural Sci Technol*, 2019(5): 19-20.
- [20] 许纪东,潘秀燕,范春燕,等. 2016年高温热害对遂平县玉米的影响及防御措施. 农业科技通讯,2017(1):155-157.
Xu J D, Pan X Y, Fan C Y, et al. Impacts and defense measures of high temperature and heat damage on corn in Suiping County in 2016. *Bull Agric Sci Technol*, 2017(1): 155-157.
- [21] 张娟,滕岩,蒋明洋,等. 兖州玉米生产主要气象灾害及防御措施. 农业知识,2022(7):17-19.
Zhang J, Teng Y, Jiang M Y, et al. Major meteorological disasters and preventive measures of maize production in Yanzhou. *Agric Knowledge*, 2022(7): 17-19.
- [22] 王伟莉,史淑新,张东升,等. 2017年新乡市夏玉米灾害情况调查报告. 农业科技通讯,2019(1):40-44.
Wang W L, Shi S X, Zhang D S, et al. Investigation report on summer corn disaster in Xinxiang City in 2017. *Bull Agric Sci Technol*, 2019(1): 40-44.
- [23] 张保仁. 高温对玉米产量和品质的影响及调控研究. 泰安:山东农业大学,2003.
Zhang B R. Studies on Effect of High Temperature on Yield and Quality and Regulation in Maize (*Zea Mays* L.). Taian: Shandong Agricultural University, 2003.
- [24] 牛丽,刘源,于康珂,等. 玉米杂交种苗期耐热性评价. 玉米科学,2015,23(1):107-114.
Niu L, Liu Y, Yu K K, et al. Evaluation of heat-tolerance of maize hybrids at seedling stage. *J Maize Sci*, 2015, 23(1): 107-114.
- [25] Kobata T, Uemuki N. High temperatures during the grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. *Agron J*, 2004, 96(2): 406-414.
- [26] 张吉旺,董树亭,王空军,等. 大田增温对夏玉米光合特性的影响. 应用生态学报,2008,19(1):81-86.
Zhang J W, Dong S T, Wang K J, et al. Effects of increasing field temperature on photosynthetic characteristics of summer maize. *Chinese J Appl Ecology*, 2008, 19(1): 81-86.
- [27] 赵龙飞,李潮海,刘天学,等. 花期前后高温对不同基因型玉米光合特性及产量和品质的影响. 中国农业科学,2012,45(23):4947-4958.
Zhao L F, Li C H, Liu T X, et al. Effect of high temperature during flowering on photosynthetic characteristics and grain yield and quality of different genotypes of maize (*Zea Mays* L.). *Sci Agric Sinica*, 2012, 45(23): 4947-4958.
- [28] Law R D, Crafts-Brandner S J. Inhibition and acclimation of photosynthesis to heat stress is closely correlated with activation of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase. *Plant Physiol*, 1999, 120(1): 173-181.
- [29] 杨欢. 灌浆期高温干旱胁迫影响糯玉米籽粒产量形成的生理机制. 扬州:扬州大学,2017.
Yang H. Physiological Mechanism of High Temperature and Drought Stress During Grain Filling on Grain Yield Formation in Waxy Mmaize. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [30] Xu Z Z, Zhou G S. Combined effects of water stress and high temperature on photosynthesis, nitrogen metabolism and lipid peroxidation of a perennial grass *leymus chinensis*. *Planta*, 2006, 224(5): 1080-1090.
- [31] 闫振华,刘东尧,贾绪存,等. 花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响. 中国农业科学,2021,54(17):3592-3608.
Yan Z H, Liu D Y, Jia X C, et al. Maize tassel development, physiological traits and yield under heat and drought stress during flowering stage. *Sci Agric Sinica*, 2021, 54(17): 3592-3608.
- [32] 张韶昀. 高温胁迫对夏玉米生殖器官发育及产量的影响. 保定:河北农业大学,2019.
Zhang S Y. Effects of High Temperature Stress on Reproductive Organ Development and Yield of Summer Maize. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019.
- [33] 侯昕芳,王媛媛,黄收兵,等. 花期前后高温对玉米花粉发育及结实率的影响. 中国农业大学学报,2020,25(3):10-16.
Hou X F, Wang Y Y, Huang S B, et al. Effects of high temperature during flowering on pollen development and seed setting rate of maize (*Zea Mays* L.). *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 10-16.
- [34] 邵靖宜,李小凡,于维祯,等. 高温干旱复合胁迫对夏玉米产量和茎秆显微结构的影响. 中国农业科学,2021,54(17):3623-3631.

- Shao J Y, Li X F, Yu W Z, et al. Combined effects of high temperature and drought on yield and stem microstructure of summer maize. *Sci Agric Sinica*, 2021, 54(17): 3623-3631.
- [35] 陈朝辉, 王安乐, 王娟娟, 等. 高温对玉米生产的危害及防御措施. 作物杂志, 2008(4): 90-92.
- Chen Z H, Wang A L, Wang J J, et al. Influence of high temperature on growth and development of maize. *Crops*, 2008(4): 90-92.
- [36] 降志兵, 陶洪斌, 吴拓, 等. 高温对玉米花粉活力的影响. 中国农业大学学报, 2016, 21(3): 25-29.
- Jiang Z B, Tao H B, Wu T, et al. Effects of high temperature on maize pollen viability. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(3): 25-29.
- [37] 赵丽晓, 张萍, 王若男, 等. 花后前期高温对玉米强弱势籽粒生长发育的影响. 作物学报, 2014, 40(10): 1839-1845.
- Zhao L X, Zhang P, Wang R N, et al. Effect of high temperature after flowering on growth and development of superior and inferior maize kernels. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(10): 1839-1845.
- [38] 杨欢, 沈鑫, 丁梦秋, 等. 结实期高温胁迫对糯玉米籽粒发育和内源激素含量的影响. 玉米科学, 2017, 25(2): 55-60; 67.
- Yang H, Shen X, Ding M Q, et al. Effects of high temperature after pollination on grain development and endogenous hormone contents of waxy maize. *J Maize Sci*, 2017, 25(2): 55-60; 67.
- [39] 郑洪建, 董树亭, 王空军, 等. 生态因素对玉米籽粒发育影响及调控的研究. 玉米科学, 2001, 9(1): 69-73.
- Zheng H J, Dong S T, Wang K J, et al. Studies on effect of ecological factors on maize kernel growth and corresponding regulative measures. *J Maize Sci*, 2001, 9(1): 69-73.
- [40] 李文阳, 王长进, 方伟, 等. 不同生育期高温对玉米籽粒品质及淀粉糊化特性的影响. 玉米科学, 2017, 25(1): 82-86.
- Li W Y, Wang C J, Fang W, et al. Effects of high temperature at different stages on kernel quality and starch pasting properties of maize. *J Maize Sci*, 2017, 25(1): 82-86.
- [41] 张保仁, 董树亭, 胡昌浩, 等. 高温对玉米籽粒淀粉合成及产量的影响. 作物学报, 2007(1): 38-42.
- Zhang B R, Dong S T, Hu C H, et al. Effect of high air temperature during different growth stage on starch synthesis in grain and yield in maize (*Zea Mays* L.). *Crops*, 2007(1): 38-42.
- [42] Lu D L, Sun X L, Yan F B, et al. Effects of high temperature during grain filling under control conditions on the physicochemical properties of waxy maize flour. *Carbohydr Polym*, 2013, 98: 302-310.
- [43] 钱婷婷, 王迎春, 郑祉芳, 等. 造成北京连续高温的河套高压结构分析. 应用气象学报, 2005, 16(2): 167-173.
- Qian T T, Wang Y C, Zheng Z F, et al. A case study of the structure of the Hetao high which caused long-lasting hot weather in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2005, 16(2): 167-173.
- [44] 陈金秋, 施晓晖. 青藏高原-孟加拉湾大气热力差异与夏季暴雨. 应用气象学报, 2022, 33(2): 244-256.
- Chen J Q, Shi X H. Possible effects of difference in atmospheric heating between the Tibetan Plateau and the Bay of Bengal on spatiotemporal evolution of rainstorms. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(2): 244-256.
- [45] 董晓晓, 武炳义. 江淮地区夏季高温事件与北极冷异常的动力联系. 应用气象学报, 2019, 30(4): 431-442.
- Dong X X, Wu B Y. Dynamic linkages between heat wave events in Jianghuai Region and Arctic summer cold anomaly. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(4): 431-442.
- [46] 张迎新, 张守保. 2009年华北平原大范围持续性高温过程的成因分析. 气象, 2010, 36(10): 8-13.
- Zhang Y X, Zhang S B. Causation analysis on a large-scale continuous high temperature process occurring in North China Plain. *Meteor Mon*, 2010, 36(10): 8-13.
- [47] 李雨鸿. 北京夏季高温特征、成因及其模拟研究. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- Li Y H. Characteristics, Causes and Simulation of Summer High Temperature over Beijing. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.
- [48] 王辉, 陆鑫海, 杜美芳, 等. 1960—2019年海河平原地区夏玉米生长季高温特征分析. 中国农学通报, 2022, 38(4): 62-68.
- Wang H, Lu X H, Du M F, et al. Spatio-temporal characteristics of extreme heat during summer maize growing season in Haihe Plain from 1960 to 2019. *Chinese Agric Sci Bull*, 2022, 38(4): 62-68.
- [49] 林爱兰, 谷德军, 彭冬冬, 等. 近60年我国东部区域性持续高温过程变化特征. 应用气象学报, 2021, 32(3): 302-314.
- Lin A L, Gu D J, Peng D D, et al. Climatic characteristics of regional persistent heat event in the eastern China during recent 60 years. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 302-314.
- [50] 焦敏, 李辑, 陈鹏狮, 等. 2018年夏季辽宁异常高温干旱的环流特征及成因. 大气科学学报, 2019, 42(4): 571-580.
- Jiao M, Li J, Chen P S, et al. Analysis of circulation characteristics and cause of anomalous high temperature and drought in summer of 2018 over Liaoning. *Trans Atmos Sci*, 2019, 42(4): 571-580.
- [51] 王秀萍, 李燕, 张悦, 等. 2018年盛夏大连地区极端高温干旱天气环流特征及成因分析. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 70-77.
- Wang X P, Li Y, Zhang Y, et al. Analysis of circulation characteristics and cause of extremely high temperature and drought in midsummer of 2018 over Dalian Area. *J Meteor Environ*, 2021, 37(4): 70-77.
- [52] 张书萍, 王延波, 赵海岩, 等. 东北春玉米区温度条件与玉米生长发育及产量形成的量化分析. 玉米科学, 2022, 30(3): 54-62.
- Zhang S P, Wang Y B, Zhao H Y, et al. Quantitative analysis of temperature conditions and maize growth and yield formation in spring maize region of Northeast China. *J Maize Sci*, 2022, 30(3): 54-62.

- [53] 商蒙非,石晓宇,赵炯超,等. 气候变化背景下中国不同区域玉米生育期高温胁迫时空变化特征. 作物学报, 2023, 49(1): 167-176.
Shang M F, Shi X Y, Zhao J C, et al. Spatiotemporal variation of high temperature stress in different regions of China under climate change. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(1): 167-176.
- [54] 解明恩,程建刚,范波,等. 2003年云南夏季罕见高温干旱的诊断研究. 气象, 2005, 31(7): 32-37.
Xie M E, Cheng J G, Fan B, et al. Diagnosis of high temperature and drought event in summer 2003 in Yunnan. *Meteor Mon*, 2005, 31(7): 32-37.
- [55] 杨群,晏理华,周长志,等. 2009年铜仁地区高温干旱特征及成因诊断分析. 高原气象, 2011, 30(4): 1018-1026.
Yang Q, Yan L H, Zhou C Z, et al. Characteristic and diagnostic analysis of high temperature and drought in Tongren area in 2009. *Plateau Meteor*, 2011, 30(4): 1018-1026.
- [56] 胡学爱. 川东南高温伏旱区连作双季玉米春玉米高产栽培技术的研究及应用. 西南农业学报, 1993, 6(4): 36-41.
Hu X A. Research and application of high-yield cultivation technology of double-cropping maize spring maize in the high-temperature and arid areas of southeast Sichuan. *Southwest China J Agric Sci*, 1993, 6(4): 36-41.
- [57] 荣韧,陈乐,亢强,等. 农业气象灾害对四川省彭州市春玉米套种春马铃薯关键发育期的影响. 农业灾害研究, 2016, 6(1): 30-33.
Rong R, Chen L, Kang Q, et al. Effects of agricultural meteorological disasters on key development period of spring maize interplanting spring potato in Pengzhou, Sichuan Province. *J Agric Catastropho*, 2016, 6(1): 30-33.
- [58] 王海梅. 高温胁迫对河套灌区玉米生理指标及产量构成要素的影响. 干旱气象, 2015, 33(1): 59-62.
Wang H M. Influence of high temperature stress on physiological indexes and yield components of maize in Hetao irrigation district. *J Arid Meteor*, 2015, 33(1): 59-62.
- [59] 张学鹏,李腾,王彪,等. 玉米叶片“源”的高温胁迫阈值研究. 作物杂志, 2021(2): 62-70.
Zhang X P, Li T, Wang B, et al. Study on high temperature stress threshold of maize leaves. *Crops*, 2021(2): 62-70.
- [60] 王丽君. 黄淮海平原夏玉米季干旱、高温的发生特征及对产量的影响. 北京: 中国农业大学, 2018.
Wang L J. Spatiotemporal Characteristics of Drought, Heat and Its Effect on Yield for Summer Maize in Huang-Huai-Hai Plain, China. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [61] 和骅芸,胡琦,潘学标,等. 气候变化背景下华北平原夏玉米花期高温热害特征及适宜播期分析. 中国农业气象, 2020, 41(1): 1-15.
He H Y, Hu Q, Pan X B, et al. Characteristics of heat damage during flowering period of summer maize and suitable sowing time in North China Plain under climate change. *Chinese J Agrom*, 2020, 41(1): 1-15.
- [62] 管玥,刘佳鸿,何奇瑾,等. 基于信息扩散理论分析华北平原夏玉米花期高温热害的风险概率. 中国农业气象, 2021, 42(7): 606-615.
Guan Y, Liu J H, He Q J, et al. Risk probability of heat injury during summer maize flowering period in North China Plain based on information diffusion theory. *Chinese J Agrom*, 2021, 42(7): 606-615.
- [63] 徐延红,刘天学,方文松,等. 河南省夏玉米花期高温热害风险分析. 中国农业气象, 2021, 42(10): 879-888.
Xu Y H, Liu T X, Fang W S, et al. Risk analysis of high temperature disaster during summer maize flowering period in Henan Province. *Chinese J Agrom*, 2021, 42(10): 879-888.
- [64] 陈怀亮,李树岩. 气候变暖背景下河南省夏玉米花期高温灾害风险预估. 中国生态农业学报, 2020, 28(3): 337-348.
Chen H L, Li S Y. Prediction of high temperature disaster risks during summer maize flowering under future climate warming background in Henan Province. *Chinese J Eco-Agr*, 2020, 28(3): 337-348.
- [65] 刘哲,乔红兴,赵祖亮,等. 黄淮海夏播玉米花期高温热害空间分布规律研究. 农业机械学报, 2015, 46(7): 272-279.
Liu Z, Qiao H X, Zhao Z L, et al. Spatial distribution of high temperature stress at corn flowering stage in Huang-Huai-Hai Plain of China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 272-279.
- [66] 刘盼,尹宝重,吴云龙,等. 近48年河北平原夏玉米季花期高温时空分布特征. 玉米科学, 2022, 30(3): 94-99.
Liu P, Yin B Z, Wu Y L, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of high temperature in flowering season of summer maize in Hebei Plain in recent 48 years. *J Maize Sci*, 2022, 30(3): 94-99.
- [67] 张琪,唐婕,冯一淳,等. 基于积温产量模型确定山东夏玉米拔节前后的极端高温阈值. 中国农业气象, 2017, 38(12): 795-800.
Zhang Q, Tang J, Feng Y C, et al. Determination of extreme high temperature thresholds before and after summer corn jointing stage in Shandong based on accumulated temperature-yield model. *Chinese J Agrom*, 2017, 38(12): 795-800.
- [68] 韦丹,曾晓豪,罗宁,等. 京津冀地区极端高温发生对夏玉米产量的影响. 中国农业大学学报, 2021, 26(1): 1-17.
Wei D, Zeng X H, Luo N, et al. Effects of extreme high temperature on summer maize yield in Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(1): 1-17.
- [69] 于振文. 作物栽培学各论北方本(第二版). 北京: 中国农业出版社, 2013.
Yu Z W. Crop Cultivation Monographs Northern Edition(2nd Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- [70] 尹小刚,王猛,孔箐箐,等. 东北地区高温对玉米生产的影响及对策. 应用生态学报, 2015, 26(1): 186-198.
Yin X G, Wang M, Kong J X, et al. Impact of high temperature on maize production and adaptation measures in North-

- east China. *Chinese J Appl Eco*, 2015, 26(1): 186-198.
- [71] 韩佳昊, 张琪, 王丽荣, 等. 海河平原夏玉米主要生育期发生高温干旱并发生事件的气候学分析. *中国农业气象*, 2021, 42(6): 507-517.
Han J H, Zhang Q, Wang L R, et al. Climatological analysis of extreme heat and drought concurrent events in main growth periods of summer maize in Haihe Plain. *Chinese J Agrom*, 2021, 42(6): 507-517.
- [72] 周梦子, 王会军, 霍治国. 极端高温天气对玉米产量的影响及其与大气环流和海温的关系. *气候与环境研究*, 2017, 22(2): 134-148.
Zhou M Z, Wang H J, Huo Z G. The influence of heat stress on maize yield and its association with atmospheric general circulation and sea surface temperature. *Climatic Environ Res*, 2017, 22(2): 134-148.
- [73] 农业部. 玉米优势区域布局规划(2008—2015年). 农业工程技术(农产品加工业), 2010(5): 11-13.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The layout planning of advantageous areas of corn(2008—2015). *Appl Engineering Techno-Agric Product Processing Industry*, 2010(5): 11-13.
- [74] 潘晓红. 我国东部地区30年夏季(6~9月)高温闷热天气研究. 上海: 上海师范大学, 2010.
Pan X H. Study on the Heat Wave and Sultry Weather in Summer of Eastern China Area for Past 30 Years. Shanghai: Shanghai Normal University, 2010.
- [75] 初征, 郭建平. 未来气候变化对东北玉米品种布局的影响. *应用气象学报*, 2018, 29(2): 165-176.
Chu Z, Guo J P. Effects of climatic change on maize varieties distribution in the future of Northeast China. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(2): 165-176.
- [76] 陈群, 耿婷, 侯雯嘉, 等. 近20年东北气候变暖对春玉米生长发育及产量的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(10): 1904-1916.
Chen Q, Geng T, Hou W J, et al. Impacts of climate warming on growth and yield of spring maize in recent 20 years in Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10): 1904-1916.
- [77] 曹永强, 冯兴兴, 李玲慧, 等. 气候变化下辽宁省春玉米水热时空特征及干旱风险. *生态学报*, 2021, 41(3): 1092-1105.
Cao Y Q, Feng X X, Li L H, et al. Temporal and spatial variation of spring corn in Liaoning Province under climate change. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1092-1105.
- [78] 马建勇. 东北地区高温干旱对玉米产量影响的情景分析. 北京: 中国农业科学院, 2012.
Ma J Y. Scenario Analysis of the Effect of High Temperature and Drought on Maize Yield in Northeast China. Beijing: China Academe of Agricultural Sciences, 2012.
- [79] 陆魁东, 黄晚华, 方丽, 等. 气象灾害指标在湖南春玉米种植区划中的应用. *应用气象学报*, 2007, 18(4): 548-554.
Lu K D, Huang W H, Fang L, et al. The climatic zoning of spring maize in Hunan based on meteorological disaster indexes. *J Appl Meteor Sci*, 2007, 18(4): 548-554.
- [80] 黄海平, 赖三斜, 文振德. 岩溶山区春玉米套种夏大豆的气候诊断. *广西气象*, 1996, 17(3): 21-23.
Huang H P, Lai S X, Wen Z D. Climatic diagnosis of spring maize interplanting with summer soybean in karst mountainous area. *Guangxi Meteor*, 1996, 17(3): 21-23.
- [81] 陶志强, 陈源泉, 李超, 等. 华北低平原不同播种期春玉米的产量表现及其与气象因子的通径分析. *作物学报*, 2013, 39(9): 1628-1634.
Tao Z Q, Chen Y Q, Li C, et al. Path analysis between yield of spring maize and meteorological factors at different sowing times in North China low plain. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(9): 1628-1634.
- [82] 黄亿, 王靖, 赫迪, 等. 气候变暖下西南春玉米生长季不利气象条件的时空演变. *资源科学*, 2017, 39(9): 1753-1764.
Huang Y, Wang J, He D, et al. Temporal-spatial change in adverse meteorological conditions during spring maize growth in Southwest China under climate warming. *Resources Sci*, 2017, 39(9): 1753-1764.
- [83] 赵锴. 南充市高温干旱灾害特征分析及对春玉米生产的影响. *黑龙江粮食*, 2021(10): 104-105.
Zhao K. Analysis on characteristics of high temperature and drought disaster in Nanchong City and its influence on spring corn production. *J Heilongjiang Grain*, 2021(10): 104-105.
- [84] 郭欢乐, 汤彬, 曹钟洋, 等. 湖南省春夏秋三季玉米生长发育及温度胁迫特点研究. *作物研究*, 2020, 34(3): 217-222; 226.
Guo H L, Tang B, Cao Z Y, et al. Study on growth and temperature stress of spring, summer and autumn maize in Hunan Province. *Crop Res*, 2020, 34(3): 217-222; 226.
- [85] 孙向伟. 2016年农业气象条件对河套灌区春玉米生长的影响. *农业灾害研究*, 2016, 6(9): 16-17.
Sun X W. Influence of agrometeorological conditions on the growth of spring corn in Hetao irrigation district in 2016. *J Agric Catastropho*, 2016, 6(9): 16-17.
- [86] 孙向伟. 2017年农业气象条件对河套灌区春玉米生长的影响. *农业灾害研究*, 2017, 7(9/10): 23-24.
Sun X W. Influence of agrometeorological conditions on the growth of spring corn in Hetao irrigation district in 2017. *J Agric Catastropho*, 2017, 7(9/10): 23-24.
- [87] 刘佳. 2018年农业气象条件对河套灌区春玉米生长的影响. *种子科技*, 2019, 37(5): 150.
Liu J. Influence of agrometeorological conditions on the growth of spring corn in Hetao irrigation district in 2018. *Seed Sci & Technol*, 2019, 37(5): 150.
- [88] 马飞. 2003年玉米减产原因及2004年玉米生产对策. *安徽农业*, 2004(5): 27.
Ma F. Causes of corn yield reduction in 2003 and countermeasures of maize production in 2004. *Anhui Agric*, 2004(5): 27.
- [89] 杨磊, 韩丽娟, 宋金玲, 等. 基于遥感数据的夏玉米高温热害监测评估. *应用气象学报*, 2020, 31(6): 749-758.

- Yang L, Han L J, Song J L, et al. Monitoring and evaluation of high temperature and heat damage of summer maize based on remote sensing data. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6): 749-758.
- [90] 代立芹, 康西言, 姚树然, 等. 河北省玉米高温热害监测与量化评估指标研究. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(4): 171-176.
- Dai L Q, Kang X Y, Yao S R, et al. Monitoring and evaluation indices of high temperature damage for maize in Hebei Province. *J Arid Land Resources and Environ*, 2022, 36(4): 171-176.
- [91] 刘聪. 全球气候变化背景下应用温度三区理论对郑州地区夏玉米高温热害规律研究. *现代农业研究*, 2018(9): 20-22; 28.
- Liu C. Study on the rule of high temperature heat damage of summer maize in Zhengzhou by using the temperature three range theory under the background of global climate change. *Modern Agric Res*, 2018(9): 20-22; 28.
- [92] 王秀萍, 方文松, 杜子璇, 等. 夏玉米花期高温热害时空分布特征. *玉米科学*, 2021, 29(1): 61-68.
- Wang X P, Fang W S, Du Z X, et al. Spatiotemporal variation of flowering stage heat damage of summer maize. *J Maize Sci*, 2021, 29(1): 61-68.
- [93] 李德, 孙义, 孙有丰. 淮北平原夏玉米花期高温热害综合气候指标研究. *中国生态农业学报*, 2015, 23(8): 1035-1044.
- Li D, Sun Y, Sun Y F. Use of integrated climatic index to determine high temperature damage to summer maize at florescence in the Huaibei Plain. *Chinese J Eco-Agric*, 2015, 23(8): 1035-1044.
- [94] 朱兰娟, 蔡海航, 姜纪红, 等. 农业气象灾害预警系统的开发与应用. *科技通报*, 2008, 24(6): 758-761; 819.
- Zhu L J, Cai H H, Jiang J H, et al. A brief account about the agrometeorological disaster forewarning system. *Bull Sci Technol*, 2008, 24(6): 758-761; 819.
- [95] 李树岩, 薛昌颖, 刘天学, 等. 夏玉米花期高温预警气象等级 (DB41/T 2094—2021). 2021.
- Li S Y, Xue C Y, Liu T X, et al. High Temperature Warning Meteorological Grade of Summer Corn Flowering Period (DB41/T 2094—2021). 2021.
- [96] 陈刚, 黄收兵, 王璞. 应用数字图像技术对不同株型夏玉米进行高温胁迫诊断. *作物杂志*, 2012(3): 36-38.
- Chen G, Huang S B, Wang P. Heat stress diagnosis of different plant type summer maize by using visible spectral analysis technology. *Crops*, 2012(3): 36-38.
- [97] 刘佳鸿, 何奇瑾, 管玥, 等. 黄淮海北部地区夏玉米稳产高产的播期优选. *农业工程学报*, 2022, 38(5): 131-138.
- Liu J H, He Q J, Guan Y, et al. Suitable sowing date for stable and high yield of summer maize in the northern region of Huang-Huai-Hai, China. *Transactions of the Chinese Society of Agric Engineering*, 2022, 38(5): 131-138.
- [98] 陈燕华, 王亚梁, 朱德峰, 等. 外源油菜素内酯缓解水稻穗分化期高温伤害的机理研究. *中国水稻科学*, 2019, 33(5): 457-466.
- Chen Y H, Wang Y L, Zhu D F, et al. Mechanism of exogenous brassinolide in alleviating high temperature injury at panicle initiation stage in rice. *Chinese J Rice Sci*, 2019, 33(5): 457-466.
- [99] 朱暖暖. 灌水对高温胁迫下玉米生长发育及产量的调控效应. 郑州: 河南农业大学, 2021.
- Zhu N N. Regulating Effects of Irrigation on Maize (*Zea Mays* L.) Growth and Yield Under High Temperature Stress. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.
- [100] 张志辉. 氨基酸叶面肥处理对玉米开花期高温胁迫的调控效应研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- Zhang Z H. Regulatory Effects of Different Amino-acid Foliar Fertilizers on High Temperature Stress at Flowering Stage in Maize. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.

Review on High Temperature Heat Damage of Maize in China

Huo Zhiguo¹⁾²⁾ Zhang Haiyan¹⁾ Li Chunhui¹⁾ Kong Rui¹⁾³⁾ Jiang Mengyuan¹⁾²⁾

¹⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

³⁾ (*China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

Abstract

As the climate warms, the threat of high temperature to China's maize production is increasing. Starting from the concept and classification of high temperature heat damage, the research progress is systematically summarized, expounding the hazard mechanism, meteorological causes, disaster causative indicators, spatial and temporal distribution and defense countermeasure of high temperature heat damage of maize, and the future research trend is also discussed. The high temperature heat damage of maize in China has a long duration, and its impacts can be divided into four categories: Delay, obstacle, poor growth and mixed. High temperature reduces the photosynthetic rate of maize, weakens pollen activity, inhibits the scattering of powder, shortens the filling time, and causes the yield and quality of maize to decrease. The high temperature and heat damage weather in maize growing areas is mainly caused by abnormal circulation and affected by the degree of atmospheric dryness. The meteorological causes, main types and occurrence periods of high temperature and heat damage are different in each dominant maize region. The disaster indicators include physiological and biochemical indicators and meteorological indicators, but there is no clear and unified standard for distinguishing high-temperature heat damage in maize at present. In the past 10 years, the intensity and frequency of heat damage of maize have increased. High temperature and heat damage of spring maize mostly occurs in flowering and pollination period, and the risk is higher in north-east Liaoning and southwest of Northeast China. High temperature heat damage of summer maize is more likely to occur after the jointing period, and is more frequent in southeastern Hebei Province, most of Henan Province and western Shandong Province. There are two methods to prevent the high-temperature heat damage of maize. The research on monitoring and early warning of high-temperature heat damage is still in its infancy, and the adverse effects of high-temperature heat damage on maize can be reduced by selecting appropriate field cultivation and management measures. The future research should focus on establishing a comprehensive dynamic maize high temperature heat damage index system, strengthening the simulation and risk assessment and further developing a refined monitoring and early warning service system.

Key words: maize; high temperature and heat damage; hazard mechanism; meteorological causes; spatial and temporal distribution