

不同应对措施对高温胁迫下夏玉米生长的影响

刘忠贤¹, 张琪¹, 杨再强², 姚嫄¹

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044;

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/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044)

摘要: 通过文献检索共获得 52 篇缓解夏玉米受高温影响的相关试验性文献, 以不采取任何措施为对照, 基于 Meta 分析方法定量研究高温胁迫下采取不同应对措施对夏玉米的影响。结果表明, 高温胁迫下, 选用耐热型夏玉米品种对产量的提升效果最优, 达 27.62%, 选用耐热性品种主要提高夏玉米的授粉结实能力。施用植物生长调节剂、施肥和调整播期可分别使夏玉米产量提高 23.55%、19.15% 和 13.15%, 施用植物生长调节剂主要影响穗位叶抗氧化酶活性, 施肥对穗位叶净光合速率的提高效果最突出。综合分析表明, 选用耐热型品种是缓解夏玉米高温热害最直接有效的方法, 在此基础上可通过施用植物生长调节剂、施肥和调整播期进一步缓解高温所带来的不利影响。

关键词: 夏玉米; 高温胁迫; 应对措施; Meta 分析

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Effect of Different Countermeasures on the Growth of Summer Maize under High Temperature Stress

LIU Zhong-xian¹, ZHANG Qi¹, YANG Zai-qiang², YAO Man¹

(1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044;

2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology / Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China)

Abstract: This study aims to quantify the effect of different response measures on high temperature in summer maize by Meta-analysis method with no measures as control. The results showed that, the selection of heat-resistant varieties had the best effect of enhancing summer maize yield. Compared with the heat-sensitive varieties, the selection of heat-resistant varieties had the most positive effect on the pollination and setting capacity. The application of plant growth regulators mainly affected yield and activities of oxidase, while fertilization mainly affected net photosynthetic rate. The selection of heat-resistant varieties is the most effective approach to alleviate the heat damage of summer maize. Additionally, applying plant growth regulators, fertilizing, and adjusting the sowing period can further alleviate the adverse effects of heat stress.

Key words: Summer maize; High temperature stress; Countermeasure; Meta-analysis

玉米是我国第一大粮食作物, 在保障国家粮食安全中有着不可替代的作用^[1]。近年来, 极端高温天气频发对玉米生产造成了显著的负面影响, 全球平均温度每升高 1℃ 将造成玉米减产 7.4%^[2]。研究

显示, 全球温度仍将继续上升, 未来玉米生产遭受高温危害将会日趋严重^[3]。采取切实有效的防灾减灾措施、增强抵御高温能力, 是保障玉米高产稳产的重要手段^[4]。因此, 系统整理夏玉米高温的防御措施并量化各种措施的效果对于科学制定高温防御对策、保障粮食安全具有重要意义。

目前, 众多学者通过田间定位试验对不同应对措施缓解夏玉米高温胁迫的效果进行了研究, 主要通过选用耐热型品种^[5]、施肥^[6]、施用植物生长调节剂^[7]、适当降低种植密度^[8]等提高夏玉米的耐热性; 通过灌水^[9]直接降低田间温度, 通过调整播期^[10]使玉米产量关键期避开高温天气, 减轻高温热害带来的

录用日期: 2023-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977410)、国家重点研发计划课题(2019YFC1510205)

作者简介: 刘忠贤(1999-), 江苏盱眙人, 硕士, 研究方向为农业气象灾害风险评估。E-mail: 1303266208@qq.com

张琪为本文通信作者。

E-mail: zhangq861206@126.com

不利影响。在各种应对措施中,选用耐热型品种、施用植物生长调节剂、施肥和调整播期的研究最为丰富,但当前少有研究比较不同应对措施之间的效果差异。由于独立的试验结果高度依赖于试验场地特定的气候、土壤等环境因素^[1],不同试验结果之间不能直接进行比较。若要达到定量化比较不同应对措施效果的目的,可将大量的独立试验结果进行整合,弥补单独试验结果代表性差的不足。

Meta分析方法是定量综合的统计方法,能将若干独立的同类研究结果进行整合分析^[12]。本研究通过对多个数据库进行文献检索,运用Meta分析方法整理文献数据,系统量化不同应对措施对夏玉米高温的缓解效应,综合比较不同应对措施对夏玉米高温缓解效果的差异,为制定科学有效的夏玉米高温应对措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

在中国知网、维普、Web of Science中英文数据库中,以玉米、高温、品种、植物生长调节剂、施肥、播期为主要关键词进行文献检索。根据Meta分析方法对数据的要求以及本研究的目的,基于4个标准对文献做进一步筛选,研究区域位于我国的夏玉米种植区;试验期间必须存在高温胁迫;同一研究中必须包含采取高温应对措施的试验处理和不采取任何措施的对照处理;文中须列出两种处理的重复数以及各指标均值和标准差或 P 值。基于以上标准,共筛选出52篇试验性论文,其中选用耐热型品种20篇、施用植物生长调节剂12篇、施肥11篇、调整播期9篇。

提取每篇论文中试验处理及对照处理的夏玉米各指标的均值、标准差以及处理重复次数。在提取论文中的这些数值时,若以图形形式展示的,采用GetData Graph Digitizer软件进行具体数值的提取;若原文献中未直接提供标准差,参考刘海宁等通过 P 值对标准差进行估计^[13]。最终得到833组试验数据用于Meta分析。

1.2 数据分类

需要对论文中提取的试验数据进行分类用于后续的Meta分析。首先,将试验数据按照不同应对措施分为选用耐热型品种、施用植物生长调节剂、施肥、调整播期4类;其次,由于研究中主要通过观测不同试验处理下夏玉米产量及其构成要素(产量、穗粒数、百粒重)、穗位叶光合特性(叶绿素相对含量、净光合速率)、授粉结实能力(结实率、雄穗分枝数、

雌雄间隔期)、穗位叶抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)活性及丙二醛(MDA)含量这些响应指标来描述高温胁迫下采取各种应对措施的效果。因此根据上述响应指标对数据进行二级分类。根据上述分类采用Meta分析方法探究不同应对措施对夏玉米高温的缓解效应的差异。

1.3 Meta分析方法

本研究使用Metawin2.1软件进行Meta分析,采用响应比的自然对数为效应值($\ln R$),以反映某独立试验对夏玉米高温的缓解效应^[14],计算公式如下:

$$\ln R = \ln \frac{Y_e}{Y_c} \quad (1)$$

式中, R 为某组数据的响应比; Y_e 为该组数据中试验处理(本研究中为采取高温应对措施)的夏玉米各相关指标的均值; Y_c 为对照处理(本研究中为不采取措施)的夏玉米各相关指标的均值。

对同一类别各独立试验的效应值进行加权平均,可得综合效应值($\ln R_{++}$)和95%置信区间,权重是通过该组数据的均值、标准差和重复数确定的。综合效应值($\ln R_{++}$)反映了4种高温应对措施对夏玉米各相关指标的综合影响程度,可用以对比不同应对措施缓解夏玉米高温的效果。为了便于对比影响程度,将综合效应值转化为百分比变化率^[15]:

$$Z = [\exp(\ln R_{++}) - 1] \times 100\% \quad (2)$$

若变化率的95%置信区间全部大于0,则说明不同应对措施具有显著的正效应,可增加高温胁迫下夏玉米各相关指标;若置信区间全部小于0,则说明不同应对措施具有显著的负效应;若置信区间包含0,则说明无显著影响。采用Origin2019b软件进行作图。

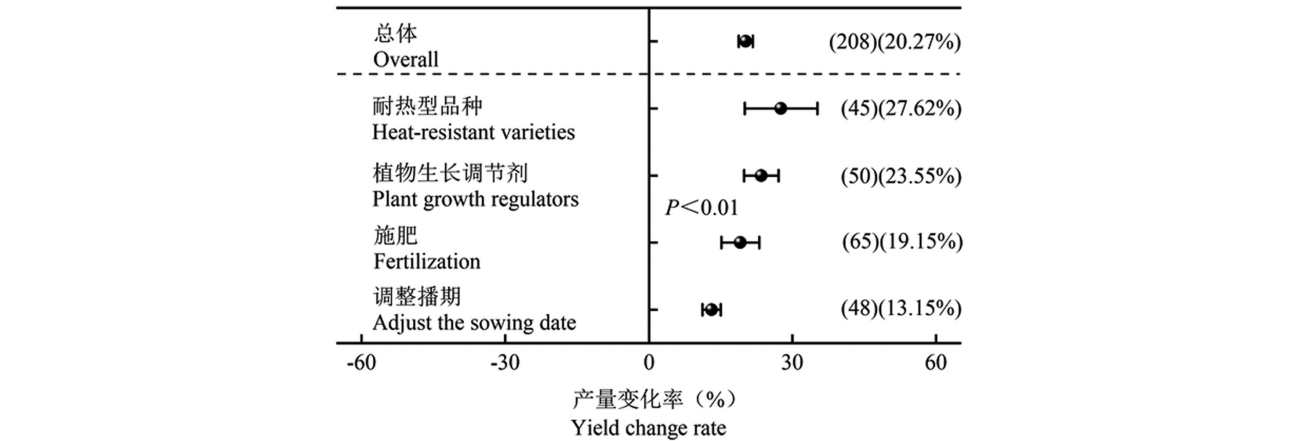
2 结果与分析

2.1 高温胁迫下采取不同应对措施夏玉米产量变化

产量是衡量各种应对措施效果的最主要指标。如图1所示,相较于不采取任何措施,发生高温胁迫时通过这4种应对措施总体上可以显著提高夏玉米产量20.27%,选用耐热型夏玉米品种、施用植物生长调节剂、施肥和调整播期可分别使夏玉米产量提高27.62%、23.55%、19.15%和13.15%。组间差异性 $P < 0.01$,即不同应对措施之间增产效果存在极显著差异,选用耐热型品种显著优于其他应对措施。

2.2 高温胁迫下耐热型夏玉米品种产量及生理特性变化

高温胁迫下,耐热型夏玉米品种与热敏感品种



注:误差线为95%置信区间CI,若跨越零线,则效果不显著,反之显著;括号内的数字和百分数分别代表每个类别的样本数和点对应的变化率;
 P 值为图中类别之间的差异,若 $P<0.05$,则表示类别间差异显著,若 $P<0.01$,则类别间差异极显著。下图同。
Note: The error bars denote 95% confidence interval(CI). If 95% CI go across the zero line, the effect is not significant, otherwise it is significant. The values and percent in parentheses represent the sample size of each category and percent response to dots, respectively; P value is the difference between categories, $P<0.05$ indicates significant difference among categories, $P<0.01$ indicates highly significant difference among categories. The same as below.

图 1 高温胁迫下采取不同应对措施时夏玉米产量变化率
Fig.1 The yield change rate of summer maize under high temperature stress with different countermeasures

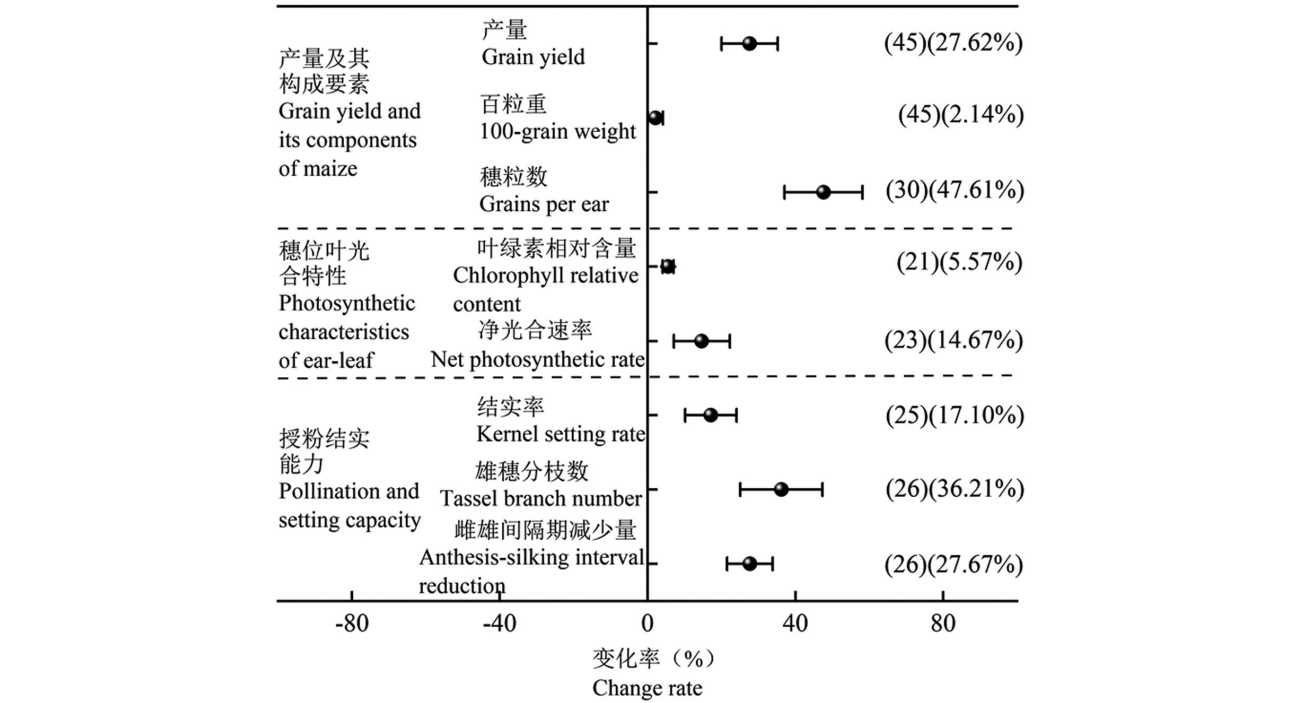


图 2 高温胁迫下耐热型夏玉米品种与热敏品种相对对产量及生理特性的变化率
Fig.2 Change rate of heat-tolerant summer maize varieties compared to heat-sensitive varieties for various indicators under high temperature stress

相比各类指标有明显的差异。如图2所示,相较于热敏感型品种,耐热型品种可显著提高高温胁迫下夏玉米的产量,其提高幅度为27.62%;对于产量构成要素中的百粒重和穗粒数,耐热型品种分别提高2.14%和47.61%,产量的提高主要是由穗粒数的增

加带来的。耐热型与热敏型夏玉米品种的穗位叶光合特性对高温的响应也不同,相较于热敏感型品种,耐热型品种可显著提高夏玉米叶绿素相对含量和净光合速率,提高幅度分别为5.57%和14.67%。在授粉结实能力方面,高温胁迫下,耐热型夏玉米品种可

显著提高结实率和雄穗分枝数并显著降低雌雄间隔期,变化幅度分别为17.10%、36.21%和27.67%。关于耐热品种穗位叶抗氧化酶活性的相关研究较少,因此未呈现这方面的数据。总体而言,选用耐热型品种对于夏玉米产量及其构成要素、穗位叶光合特性和授粉结实能力均有一定的正向影响,特别是授粉结实能力。

2.3 高温胁迫下施用植物生长调节剂对夏玉米产量及生理特性的影响

高温胁迫下施用植物生长调节剂对夏玉米产量及其构成要素、穗位叶光合特性和抗氧化酶活性及MDA含量均有不同程度的影响。如图3所示。在高

温胁迫下,施用植物生长调节剂相较于不施用处理可显著提高夏玉米产量,提高幅度为23.55%;产量构成要素中的百粒重和穗粒数分别提高了4.71%和10.36%。对于穗位叶光合特性,施用植物生长调节剂可显著提高夏玉米叶绿素相对含量和净光合速率,提高幅度分别为9.87%和15.29%。对于穗位叶抗氧化酶活性和MDA含量而言,植物生长调节剂的施用显著提高了SOD、POD和CAT活性,提高幅度分别为19.97%、23.26%和15.95%;MDA含量显著减少,幅度为15.94%。总体而言施用植物生长调节剂对产量和酶活性提高幅度较大。

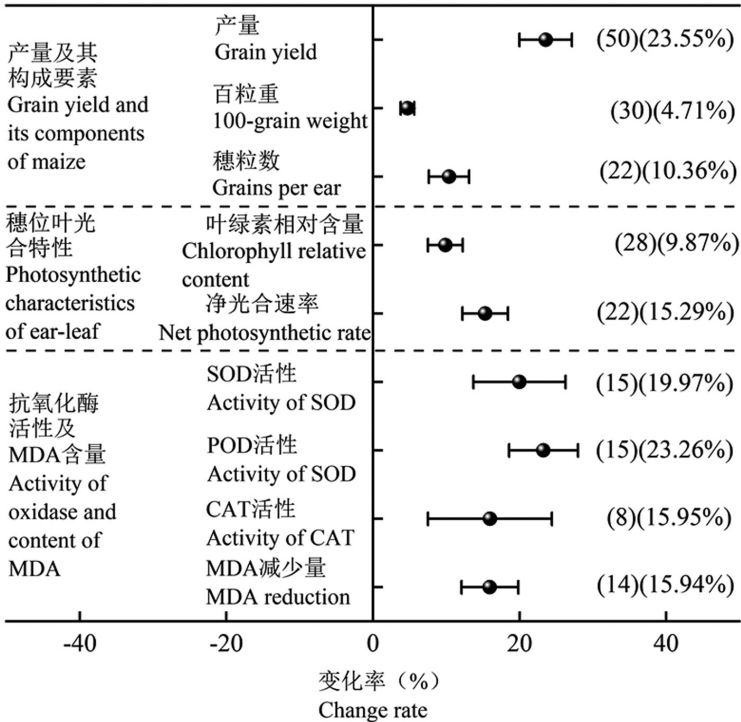


图 3 高温胁迫下施用植物生长调节剂对夏玉米产量及生理特性的影响

Fig.3 Effects of plant growth regulator application under high temperature stress on the yield and various indicators of summer maize

2.4 高温胁迫下施肥对夏玉米产量及生理特性的影响

高温胁迫下施肥对夏玉米产量及其构成要素、穗位叶光合特性和抗氧化酶活性及MDA含量有着不同程度的影响。如图4所示,施肥相较于不施肥处理可显著提高夏玉米产量、百粒重和穗粒数,提高幅度分别为19.15%、2.49%和10.45%。高温胁迫下施肥可显著提高夏玉米叶绿素相对含量18.12%和净光合速率18.95%。就穗位抗氧化酶活性和MDA含量而言,施肥处理显著提高了SOD、POD和CAT活性,提高幅度分别为5.01%、14.13%和8.58%,并可显著降低MDA含量12.93%。总体而言,施肥对产

2.5 高温胁迫下适宜播期的夏玉米产量及其构成要素的影响

生育期内有高温胁迫发生,最适宜播期的夏玉米产量及其构成要素显著高于其他播期。如图5所示,适宜播期的夏玉米产量较其他播期提高了13.15%;产量构成要素中的百粒重和穗粒数分别提高了5.81%和10.37%。目前,关于通过调整播期缓解高温对夏玉米影响的试验研究主要集中在观测最终产量及其构成要素的变化,并未对其他生理生态指标进行观测,难以收集到足够的描述其他指标的数据进行Meta分析。

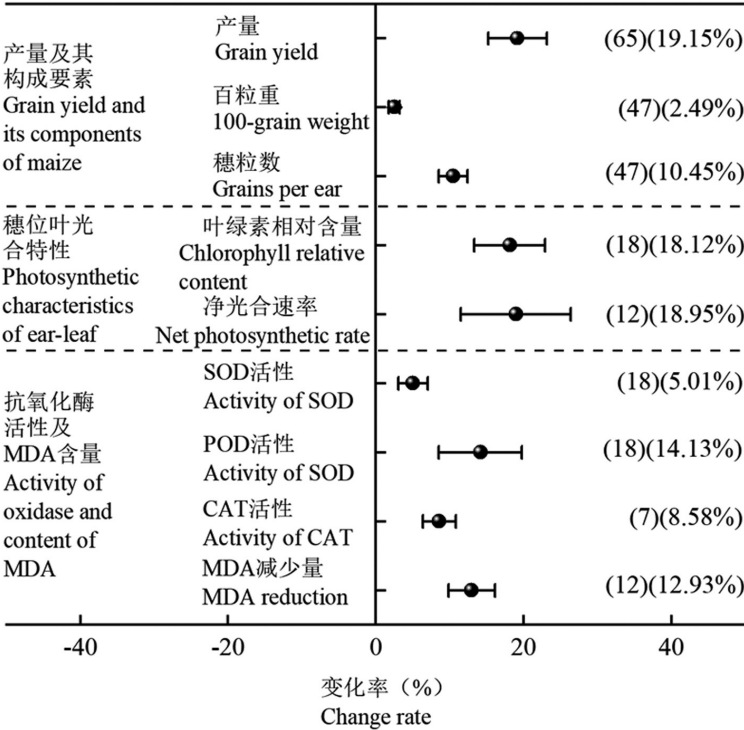


图 4 高温胁迫下施肥对夏玉米产量及生理特性的影响

Fig.4 Effect of the fertilization under high temperature stress on the yield and various indicators of summer maize

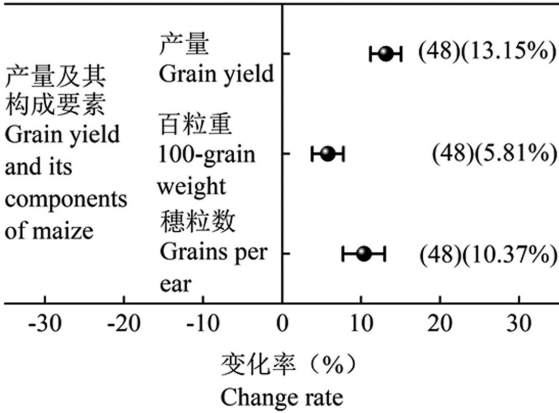


图 5 高温胁迫下调整播期对夏玉米产量及其构成要素的影响

Fig.5 Effects of adjusting sowing date on summer maize yield and its components under high temperature stress

3 结论与讨论

3.1 高温胁迫下不同应对措施作用机制及增产效果的比较

高温胁迫下不同应对措施的作用机制不同。本研究结果显示,相较于其他应对措施,选用耐热型品种主要通过提高夏玉米的授粉结实能力,从而显著增加产量。玉米雄穗散粉和雌穗吐丝的协调同步是保障雌穗受精结实及产量形成的关键因素,高温胁迫会延缓吐丝进程,从而影响这种协调性^[16]。选用耐热型品种可缩短雌雄间隔期,维持雌雄同步,且耐

热型品种雄穗分枝数多,花粉量大,受精成功率高,能够弥补高温逆境产生的不利影响,显著提高产量^[17]。耐热型品种在高温胁迫下可以维持较好的光合性能,这可能是由于在高温胁迫下,耐热型夏玉米穗位叶的核酮糖二磷酸(RuBP)羧化酶和磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)羧化酶活性降低幅度小于热敏感型品种,而这两种酶是夏玉米光合作用的关键酶,其活性的降低是造成夏玉米光合速率下降的主要因素之一。

研究表明,在几种应对措施中,施用植物生长调节剂对于夏玉米穗位叶抗氧化酶活性的提高效果最

为突出。植物生长调节剂主要是通过控制植物体内酶的产生或活动对植物生长发育的各个方面起调节作用^[18]。高温胁迫会造成玉米穗位叶内活性氧过多积累,这些活性氧具有高度的活性与毒性,会对植物造成过氧化伤害^[19]。酶的抗氧化机制是清除活性氧的关键部分^[20],植物生长调节剂的施用显著提高了玉米穗位叶内的抗氧化酶活性,有效缓解了高温对玉米叶片造成的过氧化伤害。在高温胁迫下,施用植物生长调节剂可有效地提升夏玉米的光合性能,这也与植物生长调节剂可提高夏玉米的抗氧化能力有关,高温胁迫下夏玉米受氧化胁迫易造成叶绿体类囊体膜的破坏,从而引起光合系统光化学能力的降低,施用植物生长调节剂可在一定程度上缓解高温胁迫对叶绿体造成的损害,从而提高光合性能。

本研究结果显示,高温胁迫下施肥的效果主要体现在大幅度增强玉米穗位叶的光合性能。肥料中的矿质营养元素直接或间接参与植物的光合作用,如氮、磷、硫等元素是叶绿体结构中组成叶绿素、蛋白质的成分,锰、氯是光合放氧的必须因子等^[21]。光合作用是植物干物质积累和产量的主要来源,高温胁迫会严重影响植物叶片的光合作用,降低叶片的净光合速率^[22,23]。肥料的施用能够显著缓解高温对夏玉米穗位叶光合性能的不利影响,从而减少产量损失。

产量是评价农田管理措施最直观、最根本的指标^[24]。本研究结果显示,与不做任何应对措施相比,选用耐热型品种对高温胁迫下夏玉米产量的提高效果最优,提高幅度为27.62%,略高于施用植物生长调节剂(23.55%)和施肥(19.15%),调整播期的增产幅度最低,为13.15%。选用耐热型品种主要是通过提高授粉结实能力来缓解高温不利影响,从而对产量的提升幅度最大。通过调整播期能够避免或减轻夏玉米关键生育期遭遇高温,从而缓解高温的不利影响,高温发生在其他生育期依然会对夏玉米造成胁迫。因此,通过调整播期来缓解高温不利影响在几种措施中效果相对较差。

3.2 不同夏玉米高温应对措施的适用情景

在生产实践中需要根据各地的实际情况和不同应对措施的特点综合制定科学合理的防御对策。总体而言,在夏玉米播种前可根据当地的气候特点选择合适的品种和播期,在生长过程若遭遇高温需及时采取诸如施肥、施用化控剂等应对措施,用以缓解高温不利影响。各种措施在使用时也有一定的限制。关于夏玉米品种的选择,大量研究表明,在温度适宜时,耐热型品种并没有很好的产量优势^[25],因

此,需要结合当地长期的气候特征以及气象部门的中长期天气预报进行品种选择,在高温频发的地区或当年有较大概率温度偏高时,应建议农户选择耐热型品种;反之则应种植其他虽然不耐高温但高产稳产的品种。

调整播期虽然可以避免或减轻夏玉米关键生育期遭遇高温,但夏玉米种植区的种植制度多为夏玉米-冬小麦轮作,受前茬冬小麦收获时间的影响夏玉米不可能过早播种。同时过晚播种不利于夏玉米营养阶段物质累积,还可能前期高温催熟的现象发生^[26],影响产量,此外也会影响后序冬小麦的播种。

在夏玉米生长过程中遭遇高温虽然可以通过额外施用植物生长调节剂、施肥等应对措施缓解高温的不利影响,需要严格管控用量,过高的调节剂浓度易引发严重的药害。使用化肥、植物生长调节剂不仅会增加额外投入、提高生产成本,而且还会对土壤环境、空气造成污染^[27]。此外,耐热型品种在高温胁迫下具有较好的自主调节能力,施用化肥和植物生长调节剂起到的缓解效果有限,要远低于热敏感品种。因此,夏玉米生长过程中遭遇高温应综合考虑种植的夏玉米品种、投入产出比、环境危害等因素来决定是否施用化肥和植物生长调节剂及具体用量。

参考文献:

- [1] 宋佳欣. 内蒙古东部气候资源评价及春玉米热量资源利用研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2022.
- [2] ZHAO C, LIU B, WANG X H, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2017, 114(35): 9326-9331.
- [3] 周润, 慈秀芹, 肖建华, 等. 气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估[J]. *生物多样性*, 2021, 29(6): 697-711.
- [4] ZHOU R, CI X Q, XIAO J H, et al. Effects and conservation assessment of climate change on the dominant group—the genus *Cinnamomum* of subtropical evergreen broad-leaved forests[J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(6): 697-711. (in Chinese)
- [4] 宋英博. 气象灾害对我国玉米安全生产的影响及对策[J]. *作物研究*, 2022, 36(1): 80-83.
- [5] SONG Y B. Influence of meteorological disasters on safe production of maize in China and its countermeasures[J]. *Crop Research*, 2022, 36(1): 80-83. (in Chinese)
- [5] 朱亚迪, 王慧琴, 王洪章, 等. 不同夏玉米品种大喇叭口期耐热性评价和鉴定指标筛选[J]. *作物学报*, 2022, 48(12): 3130-3143.
- [6] ZHU Y D, WANG H Q, WANG H Z, et al. Evaluation and identification index of heat tolerance in different summer maize varieties at V12 stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(12): 3130-3143. (in Chinese)
- [6] YAN P, CHEN Y Q, DADOUMA A, et al. Effect of nitrogen regimes

- on narrowing the magnitude of maize yield penalty caused by high temperature stress in North China Plain[J]. *Plant Soil Environ*, 2017, 63(3): 131–138.
- [7] ZHANG H, ZHAO D, TANG Z Y, et al. Exogenous brassinosteroids promotes root growth, enhances stress tolerance, and increases yield in maize[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2022, 17(1): 1–14.
- [8] 刘兴舟, 李 猛, 陈瑞佑, 等. 夏玉米穗部性状对种植密度的响应研究[J]. *农学学报*, 2020, 10(10): 12–18.
- LIU X Z, LI M, CHEN R J, et al. Ear characters of summer maize: response to planting density[J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(10): 12–18. (in Chinese)
- [9] 张保仁. 高温对玉米产量和品质的影响及调控研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- [10] GE J Z, YING X, ZHONG X Y, et al. Climatic conditions varied by planting date affects maize yield in Central China[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(3): 966–977.
- [11] LIU B, LIN B, LI X, et al. Appropriate farming practices of summer maize in the North China Plain: Reducing nitrogen use to promote sustainable agricultural development[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 175.
- [12] ROMERO-OLIVARES A L, ALLISON S D, TRESEDER K K. Soil microbes and their response to experimental warming over time: A meta-analysis of field studies[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 107: 32–40.
- [13] 刘海宁, 吴 昊, 姚 灿, 等. Meta分析中连续性数据的深度提取方法[J]. *中国循证医学杂志*, 2017, 17(1): 117–121.
- LIU H N, WU H, YAO C, et al. Advanced methods of data extraction for continuous outcomes in meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Evidence-Based Medicine*, 2017, 17(1): 117–121. (in Chinese)
- [14] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150–1156.
- [15] LI Q, LI H, ZHANG L, et al. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 50–60.
- [16] PAGANO E, CELA S, MADDONNI G A, et al. Intra-specific competition in maize: Ear development, flowering dynamics and kernel set of early-established plant hierarchies[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102(3): 198–209.
- [17] 穆心愿, 马智艳, 张兰薰, 等. 不同耐/感玉米品种的叶片光合荧光特性、授粉结实和产量构成因素对花期高温的反应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(1): 57–71.
- MU X Y, MA Z Y, ZHANG L X, et al. Responses of the photosynthetic fluorescence characteristics, pollination and yield compositions of different tolerant/susceptible maize varieties to high temperature during flowering[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(1): 57–71. (in Chinese)
- [18] 许耀照, 孙柏林, 曾秀存. 植物生长调节剂在农作物上的利用研究[J]. *陕西农业科学*, 2017, 63(5): 77–80.
- XU Y Z, SUN B L, ZENG X C. Study on the utilization of plant growth regulators in crops[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 63(5): 77–80. (in Chinese)
- [19] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909–930.
- [20] XU Z, ZHOU G, HAN G. Photosynthetic potential and its association with lipid peroxidation in response to high temperature at different leaf ages in maize[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2011, 30(1): 41–50.
- [21] 刘 芳. 影响农作物光合作用的因素[J]. *新疆农业科技*, 2008(6): 16.
- LIU F. Factors affecting photosynthesis of crops[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2008(6): 16. (in Chinese)
- [22] MATHUR S, AGRAWAL D, JAJOO A. Photosynthesis: Response to high temperature stress[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology*, 2014, 137(8): 116–126.
- [23] WAHID A, GELANI S, ASHRAF M, et al. Heat tolerance in plants: An overview[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2007, 61(3): 199–223.
- [24] 潘万鹏. 水稻秸秆全量粉碎旋混还田技术应用效果的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [25] 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[J]. *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[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4947–4958. (in Chinese)
- [26] 安盼盼, 明 博, 董朋飞, 等. 黄淮南部玉米产量对气候生态条件的响应[J]. *作物学报*, 2018, 44(3): 442–453.
- AN P P, MING B, DONG P F, et al. Response of maize yield to climatic ecological condition on the south Yellow-Huaihe-Haihe rivers plain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(3): 442–453. (in Chinese)
- [27] 李 晋, 刘小丽, 李文广, 等. 周年肥料运筹对冬小麦-夏玉米轮作体系周年产量的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(增刊): 241–249.
- LI J, LIU X L, LI W G, et al. Effect of annual fertilizer management on annual yield of winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(S1): 241–249. (in Chinese)

(责任编辑: 栾天宇)