

灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒性状的影响

孙涛, 魏贺勤, 王东兴, 余海兵, 程昕昕

(安徽科技学院农学院, 安徽 凤阳 233100)

摘要: 以凤甜188(FT188)、凤甜8号(FT008)两个超甜玉米品种为试验材料, 在灌浆期进行CK(26℃±2℃)和HT(37℃±2℃)两个温度处理, 探讨高温胁迫对超甜玉米子粒性状(粒长、粒宽、粒厚、子粒体积、果皮厚度)、子粒重量、含水率以及子粒主要营养品质(蔗糖、果糖、葡萄糖、淀粉、蛋白质、维生素C)的影响。不同温度处理比较表明, 子粒的长度、宽度、厚度、子粒体积、子粒鲜重、干重以及子粒蔗糖、葡萄糖、淀粉含量在HT处理与CK处理间有较为显著的差异。品种间比较表明, FT188和FT008在同等温度条件下各项指标差异不明显。结果表明, 高温胁迫加快超甜玉米子粒成熟的时间, 使子粒粒长、粒宽、粒厚增加, 导致子粒体积膨大, 果皮变厚, 并加速子粒水分流失; 同时, 高温加速了子粒中果糖、淀粉、蛋白质的合成, 但减少了子粒中蔗糖、葡萄糖、维生素C含量。

关键词: 超甜玉米; 高温胁迫; 灌浆期; 营养品质

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Effect of High Temperature Stress on Grain Traits of Super Sweet Corn during the Filling Period

SUN Tao, WEI He-qin, WANG Dong-xing, YU Hai-bing, CHENG Xin-xin

(College of Agriculture, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: In this study, two super sweet corn varieties, Fengtian188(FT188) and Fengtian No.8(FT008), were used as experimental materials. Temperature treatments were applied during the filling stage: CK(26℃±2℃) and HT(37℃±2℃). The effects of high temperature stress on grain traits(grain length, grain width, grain thickness, grain volume, peel thickness), grain weight, water content and main nutritional qualities(sucrose, fructose, glucose, starch, protein, vitamin C) of super sweet corn were studied. The results showed that the grain length, width, thickness, volume, fresh weight, dry weight, sucrose, glucose and starch contents were significantly different between HT and CK. There was no significant difference between FT188 and FT008 under the same temperature conditions. High temperature stress accelerated the ripening time of super sweet corn, increasing the length, width and thickness of the grain, which led to the expansion of the grain volume, the thickening of the peel, and accelerated the water loss of the grain. Moreover, high temperature accelerated the synthesis of fructose, starch and protein, but reduced the content of sucrose, glucose and vitamin C in the grains.

Key words: Super sweet corn; High temperature stress; Grouting period; Nutritional quality

甜玉米也称“蔬菜玉米”“水果玉米”, 起源于南美洲。相较于普通玉米, 甜玉米具有较高的营养价值^[1], 富含多种维生素、氨基酸等人体有益成分, 因其口感较好, 营养成分丰富, 而具有广阔的市场前景^[2]。甜玉米是喜温作物, 整个生育期需要较高的

温度, 最佳生长温度为28~31℃, 上限温度为40~42℃^[3]。近年来, 随着全球气候变暖的加剧, 我国局部地区气温超过30℃以上的天气明显增多, 极端高温天气也频繁发生, 连续的高温天气影响子粒生长, 导致子粒发育不良、营养成分合成受阻^[4]。因此, 高温已成为限制我国甜玉米产业发展的瓶颈因素之一。

高温胁迫会影响作物的物质转化代谢, 造成其生育期缩短, 生长发育受到抑制等问题^[5]。灌浆期是作物生育期中对高温胁迫最敏感的时期之一, 也是影响其生长发育较大的时期^[6]。近年来, 高温胁迫

录用日期: 2024-05-09

基金项目: 安徽科技学院科研发展基金项目(FZ230126)

作者简介: 孙涛(1996-), 男, 硕士, 研究方向为甜玉米遗传育种。

E-mail: 450851752@qq.com

程昕昕为本文通信作者。

E-mail: chengxin0901@163.com

迫对作物的影响已在玉米^[7]、水稻^[8]、小麦^[9]等许多作物中进行报道。前期学者们发现,玉米在灌浆期受到高温胁迫会加速叶片衰老,抑制其酶活性,从而影响玉米营养物质的形成^[10]和淀粉、蛋白质等物质的转化^[11]。高温胁迫影响了玉米雌雄穗的生长发育过程,造成雄穗散粉延迟、雌穗吐丝延迟、雌雄间隔时期变长、授粉过程受阻,致使产量降低^[12]。吴伟华等^[13]研究发现,高温胁迫会导致玉米子粒粒长、粒宽、粒厚以及子粒体积都发生一定程度的变化,且不同的玉米品种变化程度不同。王海堂等^[14]研究表明,灌浆期高温胁迫导致玉米子粒干重下降,灌浆速率下降,淀粉含量减少。高温胁迫对灌浆期超甜玉米子粒发育和营养成分的变化鲜有报道。本研究主要探讨灌浆期高温(37℃±2℃)对超甜玉米子粒形态、粒重及营养成分的影响,为在灌浆期高温环境下超甜玉米最佳采收时期提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验材料主要选用安徽科技学院玉米创新团队选育的超甜玉米品种凤甜188(FT188)和凤甜8号(FT008)。试验采用盆栽试验(盆上口口径28 cm,下口径22 cm,高36 cm),每盆装土壤15 kg(土壤为肥力中等的黄褐土,pH值6.1),每盆土壤施入复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15%-15%-15%)10 g作为底肥,种植后拔节期、大喇叭口期两次追肥尿素,追肥量为每盆6 g。盆栽试验为每盆定苗1株,开花期人工授粉后将盆栽移入温室大棚中进行温度处理。温度设置两个梯度,以26℃±2℃温度为对照处理(CK),设置高温处理为37℃±2℃(HT)。增温方式为可控温式温室大棚增温,每天白天处理8 h(9:00-17:00)。室内光照采用人工光照,高温处理结束后,恢复正常室外温度,高温处理时间为人工授粉后至收获期。

1.2 授粉与取样

授粉方式采用人工辅助授粉,并分别在玉米授粉后15、18、21、24 d采收3株发育一致的新鲜果穗,剥去果穗基部1/3至1/2处子粒混匀,待测。

1.3 子粒粒长、粒宽、粒厚以及果皮厚度测定

随机取果穗基部1/3至1/2处10粒子粒,利用游标卡尺测量子粒粒长、粒宽、粒厚,并计算其平均值。

随机取果穗基部1/3至1/2处10粒子粒,通过螺旋测微仪测定果皮厚度,并计算其平均值。

1.4 子粒鲜重、体积、干重、含水率测定

鲜重测定:随机取果穗基部1/3至1/2处100粒新鲜子粒称重,3次重复并做好标记,供体积、干重

及含水率的后续测定。

体积测定:将鲜重测定后的3次重复样本子粒通过排水法进行体积测量。

干重测定:将体积测定后的3次重复样本子粒通过烘干机进行烘干,然后进行称重^[15]。

含水率测定:含水率=(子粒鲜重-子粒干重)/子粒鲜重×100%。

1.5 子粒主要营养品质测定

蔗糖测定:采用可见分光光度法^[16],通过碱与样本共热,破坏其中的还原糖,然后在酸性条件下将蔗糖水解生成葡萄糖和果糖,果糖进一步与间苯二酚反应,生成有色物质,在480 nm波长下进行检测。3次重复。

果糖测定:采用可见分光光度法^[17],在酸性条件下果糖与间苯二酚反应,生成有色物质,在480 nm波长下进行检测。3次重复。

葡萄糖测定:采用可见分光光度法^[18],通过葡萄糖氧化酶催化葡萄糖氧化成葡萄糖酸,并产生过氧化氢;过氧化物酶催化过氧化氢氧化4-氨基安替比林偶联酚,生成有色化合物,在505 nm波长下进行检测。3次重复。

淀粉测定:采用可见分光光度法^[19],利用80%乙醇把样本可溶性糖与样本分开,进一步采用酸水解法分解淀粉为葡萄糖,采用蒽酮比色法测定葡萄糖含量,即可计算淀粉含量,在620 nm波长下进行检测。3次重复。

蛋白质测定:采用考马斯亮蓝法^[20],通过考马斯亮蓝染料上的阴离子与蛋白质中的蛋白-NH₃⁺结合,使溶液变为蓝色,在595 nm波长下进行检测。3次重复。

维生素C(抗坏血酸)测定:采用紫外分光光度法^[21],通过抗坏血酸氧化酶(AAO)催化AsA氧化成DHA,通过测定AsA的氧化速率计算AsA的含量,在265 nm波长下进行检测。3次重复。

1.6 数据统计与分析

采用Excel 2021进行数据处理、表格、折线图制作。利用SPSS 24进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒形态指标的影响

从表1可以看出,随着灌浆时间的逐渐推进,两个超甜玉米品种子粒粒长、粒宽、粒厚、子粒体积、果皮厚度均呈逐步上升趋势,且在高温胁迫下,子粒粒长、粒宽、粒厚、子粒体积、果皮厚度发育较快。比较

发现,在高温胁迫下,同一收获时期的FT188和FT008子粒粒长、粒宽、粒厚、体积以及果皮厚度均高于CK处理。在不同温度下,FT188在21 d粒长差异达到最大值1.15 mm;15 d粒宽差异达到最大值2.27 mm;24 d粒厚差异达到最大值1.33 mm、子粒体积(100粒)差异达到最大值16.34 cm³、果皮厚度差异达到最大值22 μm。FT008在21 d粒长差异达到最

大值1.75 mm;15 d粒厚差异达到最大值0.92 mm、果皮厚度差异达到最大值16 μm;24 d粒宽差异达到最大值3.05 mm、子粒体积(100粒)差异达到最大值14.67 cm³。在不同温度条件比较下,超甜玉米的子粒长度、宽度、厚度、体积均有较为显著的差异;不同品种比较发现,相同温度下的FT188和FT008没有明显的差异。

表1 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒形态指标的影响

Table 1 Effects of high temperature stress on grain morphology of super sweet corn during filling stage

| 品种 Variety | 处理 Treatment | 灌浆天数 (d) Grouting days | 子粒长度 (mm) Kernel length | 子粒宽度 (mm) Kernel width | 子粒厚度 (mm) Kernel thickness | 子粒体积 (cm ³ /100粒) Kernel volume | 果皮厚度(μm) Pericarp thickness |
|---------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| FT188 | CK | 15 | 8.72±0.31 c | 7.45±0.25 c | 4.4±0.26 b | 14.00±1.00 c | 86±4 b |
| | | 18 | 9.15±0.23 bc | 8.38±0.19 b | 4.41±0.2 b | 19.33±0.58 b | 87±4 b |
| | | 21 | 9.24±0.44 b | 8.61±0.33 b | 4.68±0.32 ab | 20.33±3.21 b | 99±7 a |
| | | 24 | 10.16±0.25 a | 9.24±0.18 a | 4.85±0.26 a | 25.33±2.52 a | 103±5 a |
| | HT | 15 | 8.93±0.5 d | 9.72±0.48 b | 4.8±0.26 c | 28.00±3.00 c | 105±3 b |
| | | 18 | 9.63±0.36 c | 9.81±0.42 b | 4.89±0.31 c | 30.33±3.21 b | 105±3 b |
| | | 21 | 10.39±0.3 b | 10.77±0.29 a | 5.35±0.21 b | 36.00±1.73 b | 119±5 a |
| | | 24 | 11.14±0.44 a | 11.07±0.27 a | 6.18±0.47 a | 41.67±1.53 a | 125±3 a |
| FT008 | CK | 15 | 8.11±0.14 c | 6.68±0.38 c | 3.75±0.21 c | 13.33±1.53 c | 85±2 c |
| | | 18 | 8.38±0.24 bc | 7.27±0.23 b | 4.98±0.22 b | 19.67±0.58 c | 89±3 c |
| | | 21 | 8.59±0.28 b | 7.8±0.57 a | 5.3±0.23 ab | 22.67±2.52 b | 105±3 b |
| | | 24 | 9.52±0.45 a | 7.98±0.24 a | 5.5±0.47 a | 26.33±2.52 a | 111±3 a |
| | HT | 15 | 8.28±0.23 c | 8.86±0.32 b | 4.67±0.26 c | 25.00±2.00 c | 101±3 b |
| | | 18 | 8.48±0.26 c | 9.32±0.22 b | 5.21±0.47 b | 32.33±3.79 b | 104±2 b |
| | | 21 | 10.34±0.52 a | 9.47±0.6 b | 5.23±0.31 b | 36.67±0.58 ab | 110±2 a |
| | | 24 | 11.13±0.29 b | 11.03±0.53 a | 6.37±0.26 a | 41.00±4.36 a | 113±4 a |

注:不同小写字母表示不同样品之间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between samples($P<0.05$). The same below.

2.2 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒粒重和含水率影响

随着采收期的推迟,超甜玉米子粒鲜重、干重均呈逐步上升趋势。不同温度处理比较发现,FT188和FT008高温与低温子粒鲜重和干重有较为显著的差异(表2)。其中,在灌浆21 d时,FT188子粒鲜重(100粒)差异达到最大值,为16.93 g;在灌浆24 d时,FT188子粒干重(100粒)差异达到最大值,为5.82 g,FT008子粒鲜重(100粒)差异达到最大值,为15.57 g、子粒干重(100粒)差异达到最大值,为5.39 g。品种间比较发现,FT188和FT008在同等温度下的子粒鲜重、干重差异不显著。

子粒含水量直接影响甜玉米的感官品质。随着灌浆时间的延长,超甜玉米子粒含水率呈逐步下降的趋势。比较发现,高温下的甜玉米子粒平均含水

率要低于对照。在灌浆15 d时,FT188在CK处理下比HT处理含水率高4.07%,在灌浆24 d时高1.11%;在灌浆15 d时,FT008在CK处理下比HT处理含水率高3.39%,在灌浆24 d时高3.9%。子粒含水率在不同温度和不同品种比较下差异不显著。

2.3 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒主要营养成分的影响

2.3.1 蔗糖

由图1可以看出,随着灌浆时间的延长,在CK和HT处理下,FT188和FT008的蔗糖含量均呈先升后降趋势。在CK处理下,FT188和FT008在灌浆21 d蔗糖含量分别达到峰值46.28 mg/g和54.44 mg/g;在HT处理下,FT188和FT008在灌浆18 d蔗糖含量分别达到峰值37.4 mg/g和44.04 mg/g,两个品种的高温 and 对照均有较为显著的差异。不同温度比较发

现,高温增加了子粒中蔗糖的含量,随着生育期的增加,高温抑制了蔗糖的合成。不同品种比较发现, FT008 在高温和对照条件下蔗糖含量要高于 FT188。

表 2 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒粒重和含水率的影响

Table 2 Effects of high temperature stress on grain weight and water content of super sweet corn at filling stage

| 品种 Variety | 处理 Treatment | 灌浆天数(d) Grouting days | 子粒鲜重(g/100粒) Fresh kernel weight | 子粒干重(g/100粒) Kernel dry weight | 子粒含水率(%) Kernel moisture content |
|---------------|-----------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| FT188 | CK | 15 | 15.26±0.90 c | 2.44±0.24 d | 84.05 |
| | | 18 | 18.77±1.29 b | 4.23±0.59 c | 77.54 |
| | | 21 | 20.43±3.74 b | 5.87±0.83 b | 74.63 |
| | | 24 | 26.49±2.64 a | 7.10±0.35 a | 71.11 |
| | HT | 15 | 27.44±2.77 c | 5.49±0.46 c | 79.98 |
| | | 18 | 31.96±3.24 b | 7.20±0.60 b | 77.42 |
| | | 21 | 37.36±1.78 b | 9.48±0.46 b | 73.07 |
| | | 24 | 43.10±1.66 a | 12.92±0.10 a | 70.00 |
| FT008 | CK | 15 | 12.87±2.35 c | 2.23±0.44 d | 82.74 |
| | | 18 | 20.05±0.54 c | 4.55±0.40 c | 77.35 |
| | | 21 | 23.03±2.46 b | 5.08±0.62 b | 77.93 |
| | | 24 | 27.32±2.89 a | 6.71±0.92 a | 75.50 |
| | HT | 15 | 25.74±1.78 c | 5.31±0.38 d | 79.35 |
| | | 18 | 34.79±3.20 b | 7.08±0.72 c | 79.65 |
| | | 21 | 38.36±0.42 ab | 10.36±0.17 b | 73.00 |
| | | 24 | 42.89±4.25 a | 12.10±0.04 a | 71.60 |

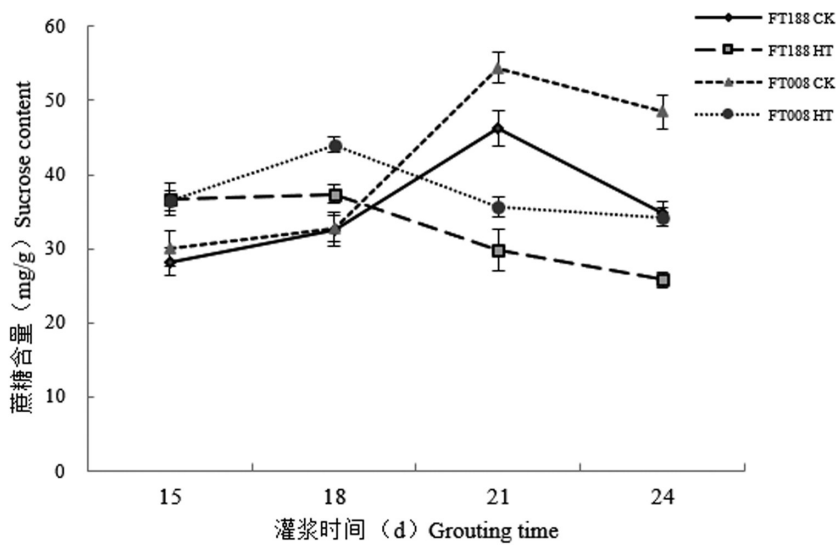


图 1 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒蔗糖含量的影响

Fig.1 Effect of high temperature stress on sucrose content in super sweet corn grain during filling stage

2.3.2 果糖

从图 2 可以看出,随着灌浆时间的延长,在 CK 处理下,FT188 和 FT008 的果糖含量均呈先上升后下降趋势。在 CK 处理下,FT188 和 FT008 在灌浆 18 d 果糖含量分别达到峰值 68.83 mg/g 和 86.68 mg/g;在 HT 处理下,FT188 和 FT008 的果糖含量均呈逐步下降趋势。在灌浆 15 d 时,FT188 和 FT008 的果糖含

量已分别达到 84.59 mg/g 和 104.95 mg/g。不同温度比较发现,高温加速了果糖含量的合成,且在生育前期高温下的果糖含量较高,随着生育期的推进,两个品种在高温下的果糖含量都呈逐步下降趋势。不同品种比较发现,FT008 在高温和对照条件下果糖含量要高于 FT188。

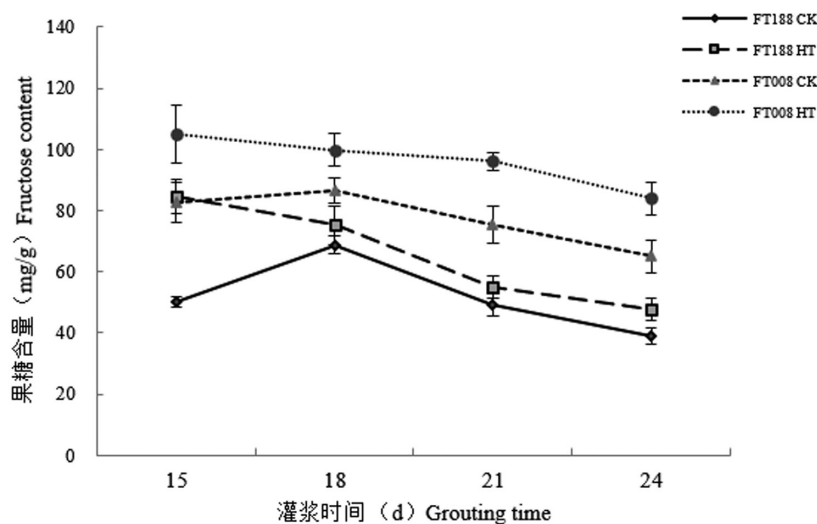


图2 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒果糖含量的影响

Fig.2 Effect of high temperature stress on grain fructose content in super sweet corn during filling stage

2.3.3 葡萄糖

从图3可以看出,在CK处理下,FT188葡萄糖含量呈先升后降趋势,在灌浆21 d葡萄糖含量达到峰值22.52 $\mu\text{mol/g}$; FT008葡萄糖含量呈逐步下降趋势,在灌浆15 d葡萄糖含量已达到18.99 $\mu\text{mol/g}$ 。在HT处理下,FT188葡萄糖含量呈逐步下降趋势,在

灌浆15 d已达到18.99 $\mu\text{mol/g}$; FT008的葡萄糖含量呈先升后降趋势,在灌浆18 d达到峰值含量13.22 $\mu\text{mol/g}$ 。比较发现,FT188和FT008在CK处理下的葡萄糖含量要高于HT处理,且差异较为明显,说明高温抑制了子粒葡萄糖含量的增长。

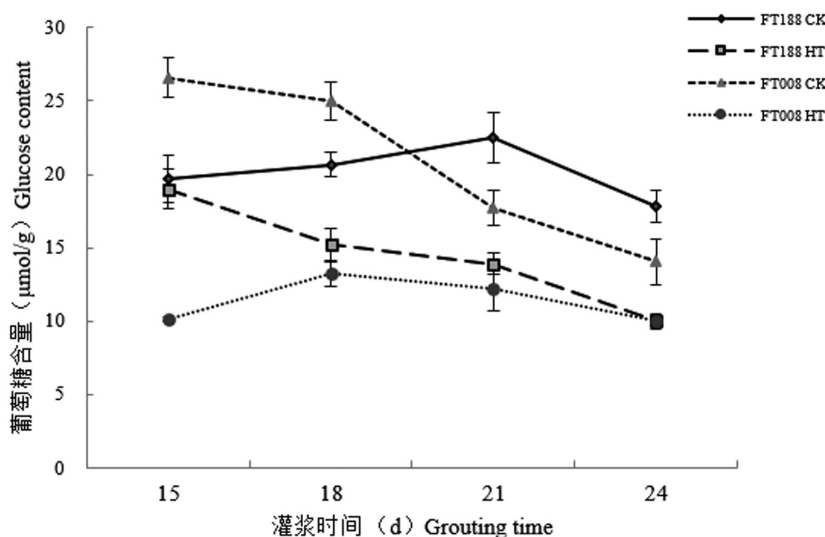


图3 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒葡萄糖含量的影响

Fig.3 Effect of high temperature stress on grain glucose content of super sweet corn during filling stage

2.3.4 淀粉

从图4中可以看出,随着灌浆时间的延长,在CK和HT处理下,FT188和FT008的淀粉含量均呈逐步上升趋势。不同温度比较发现,FT188和FT008在灌浆15 d的淀粉含量差距较为明显。在灌浆15 d下,FT188淀粉含量HT处理比CK处理高82.5 mg/g;

FT008淀粉含量HT处理比CK处理高99.95 mg/g。比较发现,高温下的淀粉含量均高于对照温度,两个品种在CK处理下的淀粉含量前期较少,但增长较快,后期增速放缓。说明高温促使超甜玉米子粒加速衰老,提早了超甜玉米子粒淀粉的合成时间。

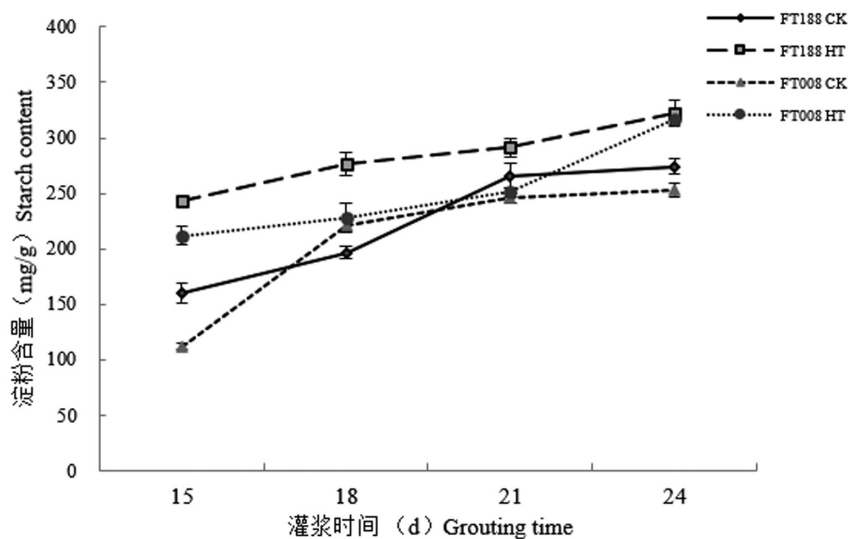


图4 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒淀粉含量的影响

Fig.4 Effect of high temperature stress on grain starch content of super sweet corn at filling stage

2.3.5 蛋白质

如图5所示,随着灌浆时间的推进,FT188和FT008在不同温度下蛋白质都分别呈先升后降的趋势。在CK处理温度下,FT188的蛋白质含量在灌浆18 d达到峰值9.08 g/L;FT008的蛋白质含量在灌浆21 d达到峰值9.12 g/L。在HT温度下,FT188蛋白质含量在灌浆18 d达到峰值11.13 g/L;FT008蛋白质含量在灌浆18 d达到峰值10.95 g/L。从图5可以

看出,在高温和对照条件下,两个品种在灌浆15~18 d蛋白质的增长速度较为明显。不同温度比较发现,高温条件下蛋白质含量前期积累量较多,后期蛋白质含量变少。表明高温在生育前期促进了蛋白质的增长,但生育后期抑制蛋白质含量积累。品种间比较发现,TF188和FT008的蛋白质含量在同温度条件下没有明显的差异。

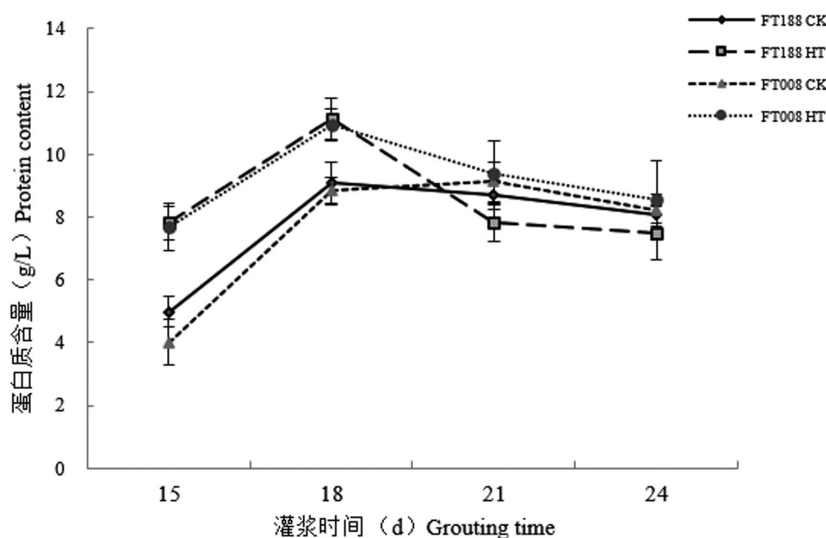


图5 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒蛋白质含量的影响

Fig.5 Effect of high temperature stress on grain protein content of super sweet corn at filling stage

2.3.6 维生素C

从图6可以看出,随着灌浆时间的延长,在CK和HT处理下,FT188都呈先升后降的趋势;FT008的维生素C含量在CK处理下呈逐步上升趋势,在HT

处理下呈先升后降的趋势。在CK处理下,FT188在灌浆21 d维生素C达到峰值含量24.99 mg/100 g。在HT处理下,FT188在灌浆21 d维生素C达到峰值含量18.71 mg/100 g;FT008在灌浆18 d维生素C达

到峰值含量。品种间比较发现,FT188在CK处理下的维生素C含量均要高于HT处理,FT008在HT处理下前期维生素C含量高于CK处理,后期低于CK处理,出现这种差异可能是由于两个品种的不同生

理特性导致。不同温度比较发现,高温环境条件下的子粒维生素C含量要低于对照,说明高温抑制了超甜玉米维生素C的合成。

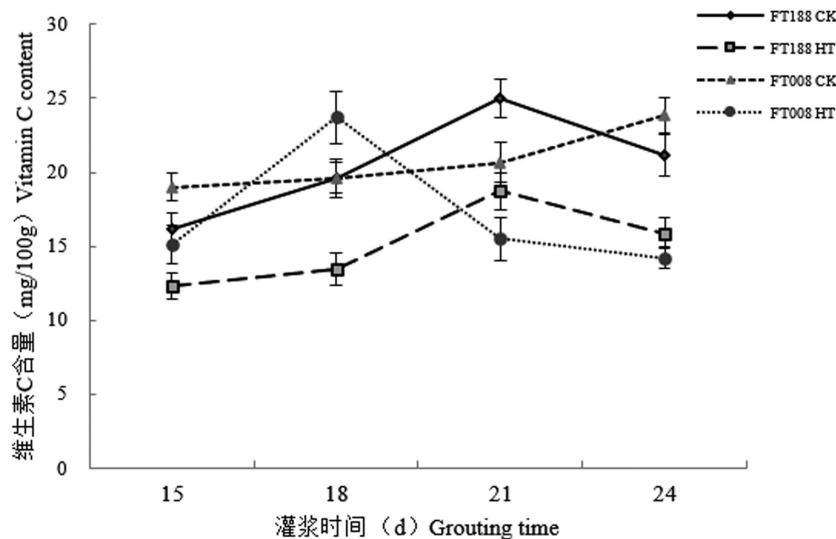


图6 灌浆期高温胁迫对超甜玉米子粒维生素C含量的影响

Fig.6 Effect of high temperature stress on vitamin C content in super sweet corn grains during filling stage

3 结论与讨论

玉米子粒的形态特性对产量有着重要的意义,高温对玉米的子粒形成具有重要的影响。研究表明,高温加快了作物灌浆进程,使子粒成熟度出现差异^[22]。赵福成等^[23]研究表明,高温胁迫缩短了甜玉米的生育期,且高温降低了甜玉米子粒的含水量。本研究发现,HT处理下的超甜玉米子粒的大小和体积均高于CK处理,随着灌浆时间的逐渐推进,两个超甜玉米品种子粒粒长、粒宽、粒厚、粒重、子粒体积、果皮厚度均呈逐步上升的趋势,在相同采收天数下,高温胁迫下的超甜玉米子粒粒长、粒宽、粒厚、粒重、子粒体积、果皮厚度发育较快。在HT处理下,FT188和FT008子粒含水率低于对照,因此,可以推断高温在加速子粒成熟、老化的同时,也加快子粒水分的蒸发速率。HT处理下的超甜玉米子粒大小高于CK处理的原因,可能是因为高温加快了胚乳细胞的分裂速度,使其超甜玉米子粒发育膨大,生长速度更快^[24]。甜玉米适宜采收期含水率在68%~74%^[25]。本研究发现,在37℃±2℃高温环境下,FT188和FT008在HT处理下授粉后21~24d其子粒含水率也在适宜的采收范围内,而CK处理下的FT188授粉后21~24d含水率在最佳采收范围,FT008含水率则略高。高温显著增加了超甜玉米子

粒生长速度,使其子粒提前衰老,导致超甜玉米子粒膨大、果皮变厚、含水率降低。超甜玉米属于鲜食玉米,其过早地衰老会对其口感造成影响。因此,在生产上高温气候使FT188和FT008生育期缩短,子粒加速衰老,采收时期需要适当提前;温度较低气候的FT188和FT008生育期相对更长,子粒发育速度相对缓慢,采收时期也需要适当的延长。

超甜玉米作为鲜食玉米,其营养品质也非常重要,相较于普通玉米而言,甜玉米具有更高的糖分和维生素等其他营养成分。甜玉米中的糖分主要分为蔗糖、果糖、葡萄糖。蔗糖是一种碳水化合物,是由葡萄糖和果糖通过化学键连接而成的二糖,是人体重要的能量来源之一^[26]。研究表明,高温胁迫降低了蔗糖代谢相关酶SPS和SS的活性,子粒蔗糖合成量小于分解量,导致蔗糖含量降低,淀粉含量升高^[27]。本研究发现,在CK处理下,两个超甜玉米品种子粒蔗糖含量均高于HT处理,且达到峰值时间较长,在一定程度上,高温抑制了蔗糖含量的积累,且积累总量下降。HT处理下的两个品种子粒淀粉含量均要高于CK处理,说明了高温对超甜玉米子粒蔗糖和淀粉含量的转化造成了影响。果糖和葡萄糖都是一种单糖,对人体血糖调节和脂肪代谢有着重要的作用,也是生物体内能量的主要来源之一。前人研究发现,果糖和葡萄糖可以通过蔗糖合成酶

分解蔗糖产生^[28],高温致使蔗糖分解果糖含量增高,相应的葡萄糖含量下降。本文研究发现,在高温条件下,FT188和FT008的果糖含量高于CK处理,葡萄糖含量低于CK处理。在生产上,甜玉米淀粉含量的升高会导致其口感变差,而糖分含量的降低也会导致甜玉米的甜度下降。因此,高温生长条件下的甜玉米其子粒口感会变差,甜度也会下降,生产上需要及时提前采收。蛋白质是生命体内非常重要的大分子有机化合物之一,对于生物体的正常功能和生理活动起着关键的作用。赵龙飞等^[29]研究发现,高温胁迫会使玉米的粗蛋白提高。李文阳等^[30]研究表明,高温显著增加了玉米子粒蛋白质的含量。本研究发现,两个超甜玉米品种在高温下前期蛋白质的含量要高于对照处理,随着生育期的推进,蛋白质的含量开始变少,这种现象可能是由于高温加速了前期蛋白质的合成量,后期高温加速了超甜玉米子粒的衰老,导致蛋白质含量大量流失。高温胁迫下玉米子粒碳代谢受抑制,可能是高温导致蛋白质含量升高的原因^[30]。维生素C是一种水溶性维生素,有着抗氧化、抗衰老等多种作用。Richardson等^[31]在猕猴桃中研究发现,高温显著地降低了水果维生素C含量的积累,高温短期和长期的反应,以及热暴露的时间对水果中的维生素C水平均有影响。本研究发现,FT188和FT008在高温条件下的维生素C含量均要低于对照温度,结果表明,高温抑制了维生素C含量的增长。本研究在超甜玉米FT188和FT008营养品质方面的研究发现,高温胁迫会造成淀粉、蛋白质和果糖含量的升高,蔗糖、葡萄糖和维生素C含量下降,在HT处理下灌浆18d左右是营养品质较为均衡的阶段,而CK处理下灌浆21d以后的营养品质较高。

综上所述,通过对超甜玉米FT188和FT008的研究发现,高温会导致超甜玉米子粒生长速度变快,加速子粒成熟、水分流失,导致子粒膨大,果皮厚度增加。高温导致子粒蔗糖、葡萄糖、维生素C含量下降,果糖、淀粉和蛋白质含量上升。在大田生产中,高温环境条件下种植超甜玉米,采收时需要适当提早采收时期,防止超甜玉米子粒衰老,营养流失,影响其食用品质。

参考文献:

- [1] SWAPNA G, JADESHA G, MAHADEVU P. Sweet corn—a future healthy human nutrition food[J]. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 2020, 9(7): 3859–3865.
- [2] 李昂,刘瑞涵,王俊英. 中国甜玉米贸易结构分析[J]. *中国蔬菜*, 2020(11):17–22.
LI A, LIU R H, WANG J Y. Analysis of sweet corn trade structure in China[J]. *China Vegetables*, 2020(11): 17–22. (in Chinese)
- [3] 郭庆法,王庆成,汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2004.
- [4] 付景,孙宁宇,刘天学,等. 穗期高温对玉米子粒灌浆生理及产量的影响[J]. *作物杂志*, 2019, 35(3):118–125.
FU J, SUN N N, LIU T X, et al. Effect of high temperature in ear stage on grain filling physiology and yield of maize[J]. *Crops*, 2019, 35(3): 118–125. (in Chinese)
- [5] PRASAD P V V, STAGGENBORG S A, RISTIC Z. Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants[M]. *Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes*, 2008, 1: 301–355.
- [6] 张萍,陈冠英,耿鹏,等. 子粒灌浆期高温对不同耐热型玉米品种强弱势粒发育的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11):2061–2070.
ZHANG P, CHEN G Y, GENG P, et al. Effects of high temperature on the development of strong and weak grains in different heat-resistant maize varieties during grain filling[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2061–2070. (in Chinese)
- [7] 穆心愿,马智艳,卢良涛,等. 授粉期高温胁迫对夏玉米植株形态、叶片光合及产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(1):106–118.
MU X Y, MA Z Y, LU L T, et al. Effects of high temperature stress on plant morphology, leaf photosynthesis and yield of summer maize during pollination period[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(1): 106–118. (in Chinese)
- [8] 刘晓龙,叶世河,廖俊婕,等. 灌浆初期高温胁迫对水稻子粒活性氧积累及产量形成的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2024(5):1–15.
LIU X L, YE S H, LIAO J J, et al. Effect of high temperature stress on reactive oxygen species accumulation and yield formation in rice grains in early filling period[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2024(5): 1–15. (in Chinese)
- [9] 张月,贺威,崔国际,等. 夜间增温对灌浆期高温胁迫下小麦干物质及灌浆特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2024(1):1–13.
ZHANG Y, HE W, CUI G J, et al. Effects of nighttime warming on dry matter and filling characteristics of wheat under high temperature stress at filling stage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024(1): 1–13. (in Chinese)
- [10] 余梦奇,路梦莉,张雅婷,等. 灌浆期高温对玉米叶片光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. *中国农业气象*, 2023, 44(7):599–610.
YU M Q, LU M L, ZHANG Y T, et al. Effects of high temperature on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of maize leaves during filling period[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(7): 599–610. (in Chinese)
- [11] 徐欣莹,邵长秀,孙志刚,等. 高温胁迫对玉米关键生育期生理特性和产量的影响研究进展[J]. *玉米科学*, 2021, 29(2):81–88, 96.
XU X Y, SHAO C X, SUN Z G, et al. Research progress on effects of high temperature stress on physiological characteristics and yield of maize during key growth period[J]. *Journal of Maize Scienc-*

- es, 2021, 29(2): 81–88, 96. (in Chinese)
- [12] 赵丽晓, 雷鸣, 王璞, 等. 花期高温对玉米子粒发育和产量的影响[J]. 作物杂志, 2014(4): 6–9.
ZHAO L X, LEI M, WANG P, et al. Effects of high temperature at flowering stage on grain development and yield of maize[J]. Crops, 2014(4): 6–9. (in Chinese)
- [13] 吴伟华, 王秋岭, 张运栋, 等. 拔节至大喇叭口期高温胁迫对夏玉米穗粒形状的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(4): 62–69.
WU W H, WANG Q L, ZHANG Y D, et al. Effect of high temperature stress on ear grain shape of summer maize from jointing to trumpet stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(4): 62–69. (in Chinese)
- [14] 王海堂, 张复君. 灌浆期高温胁迫对玉米子粒灌浆及产量的影响[J]. 热带农业科学, 2021, 41(3): 11–16.
WANG H T, ZHANG F J. Effect of high temperature stress on corn grain filling and yield during filling period[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(3): 11–16. (in Chinese)
- [15] 李小凡. 高温、干旱及其复合胁迫对夏玉米产量形成的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [16] FILS-LYCAON B, JULIANUS P, CHILLET M, et al. Acid invertase as a serious candidate to control the balance sucrose versus (glucose+ fructose) of banana fruit during ripening[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(2): 197–206.
- [17] VARANDAS S, TEIXEIRA M J, MARQUES J C, et al. Glucose and fructose levels on grape skin: interference in *Lobesia botrana* behaviour[J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 513(1): 351–355.
- [18] GALANT A L, KAUFMAN R C, WILSON J D. Glucose: Detection and analysis[J]. Food Chemistry, 2015, 188: 149–160.
- [19] CHEN M X, ZHU F Y, WANG F Z, et al. Alternative splicing and translation play important roles in Hypoxic germination in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(3): 817–833.
- [20] 徐亚, 范会芬, 赵玓玲, 等. 考马斯亮蓝法测定大豆水溶性蛋白提取方法的优化[J]. 大豆科学, 2022, 41(2): 196–202.
XU Y, FAN H F, ZHAO D L, et al. Optimization of extraction method for determination of soybean water-soluble protein by Coomassie brilliant blue method[J]. Soybean Science, 2022, 41(2): 196–202. (in Chinese)
- [21] DESAI A P, DESAI S. UV spectroscopic method for determination of vitamin C(ascorbic acid) content in different fruits in South Gujarat region[J]. Int. J. Environ. Sci. Nat. Res., 2019, 21(1): 41–44.
- [22] 舒英杰, 王爽, 陶源, 等. 生理成熟期高温高湿胁迫对春大豆种子活力、主要营养成分及种皮结构的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1380–1386.
SHU Y J, WANG S, TAO Y, et al. Effects of high temperature and high humidity stress at physiological maturity on seed vitality, main nutrients and seed coat structure of spring soybean[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(5): 1380–1386. (in Chinese)
- [23] 赵福成, 景立权, 闫发宝, 等. 灌浆期高温胁迫对甜玉米子粒糖分积累和蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(9): 1644–1651.
ZHAO F C, JING L Q, YAN F B, et al. Effects of high temperature stress on sugar accumulation and sucrose metabolism related enzyme activities in sweet maize during filling period[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(9): 1644–1651. (in Chinese)
- [24] 封超年, 郭文善, 施劲松, 等. 小麦花后高温对子粒胚乳细胞发育及粒重的影响[J]. 作物学报, 2000(4): 399–405.
FENG C N, GUO W S, SHI J S, et al. Effects of post-anthesis high temperature on endosperm cell development and grain weight in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000(4): 399–405. (in Chinese)
- [25] 刘萍, 陆卫平, 王凤格, 等. 超甜玉米品质差异及适宜采收指标的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2007(1): 72–76.
LIU P, LU W P, WANG F G, et al. Study on quality difference and suitable harvest index of super sweet maize[J]. Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition), 2007(1): 72–76. (in Chinese)
- [26] TIAN Y, DENG Y, ZHANG W, et al. Correction to: Sucrose isomers as alternative sweeteners: properties, production, and applications[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2020, 104(1): 451–3.
- [27] PENG L, CHANGHAO H. Comparison of enzymes activity associated with sucrose metabolism in the developed grains between sweet corn and normal corn[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(1): 52–58.
- [28] 李天, 刘奇华, 大杉立, 等. 灌浆结实期高温对水稻子粒蔗糖及降解酶活性的影响[J]. 中国水稻科学, 2006(6): 626–630.
LI T, LIU Q H, DA S L, et al. Effect of high temperature on sucrose and degrading enzyme activities in rice grain during filling and setting stage[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006(6): 626–630. (in Chinese)
- [29] 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. Effects of high temperature before and after flowering on photosynthetic characteristics, yield and quality of maize with different genotypes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(23): 4947–4958. (in Chinese)
- [30] 李文阳, 王长进, 方伟, 等. 不同生育期高温对玉米子粒品质及淀粉糊化特性的影响[J]. 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 growth stages on grain quality and starch gelatinization characteristics of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(1): 82–86. (in Chinese)
- [31] RICHARDSON A C, MARSH K B, BOLDINGH H L, et al. High growing temperatures reduce fruit carbohydrate and vitamin C in kiwifruit[J]. Plant, Cell & Environment, 2004, 27(4): 423–435.

(责任编辑: 栾天宇)