



盛花期高温对大豆结荚及产量的影响

卢城¹, 官青涛¹, 陶雨佳¹, 尹帝¹, 邢兴华², 邢邯¹, 江海东¹

(1. 南京农业大学 农学院/农业部作物生理生态与生产管理重点实验室/江苏省现代作物生产协同创新中心/国家大豆改良中心, 江苏 南京 210095; 2. 江苏徐淮地区徐州农业科学研究所, 江苏 徐州 221131)

摘要:为探明花期高温对大豆结荚和产量的影响及其生理机制,以大豆品种潍科 12 为材料,于盛花期(R₂)在大棚内进行连续 3 d 高温处理(9:00—16:00, 45 ± 2 °C; 16:00—次日 9:00, 自然环境温度),研究盛花期高温胁迫对大豆结荚状况、荚和荚柄内部解剖结构、荚的氧化胁迫和产量构成的影响。结果表明:盛花期高温对大豆叶片的影响是非延续性的且对后期的“源”没有影响,但会导致受高温影响的花后期形成荚的 H₂O₂ 和 MDA 含量上升;部分荚的荚柄细胞崩溃呈丝状、荚壳维管束变稀疏,导致“流”不畅,籽粒内部细胞中空,减少“库”的数量,造成落荚、空瘪荚、缺粒荚增多,总粒数减少,粒重降低,产量下降;副花序可在一定程度上补偿高温带来的产量损失。因此盛花期高温对大豆“流”和“库”造成影响,最终导致减产。

关键词:大豆;盛花期;高温;荚;产量

Effects of High Temperature at Full Flowering Stage on Podding and Yield of Soybean

LU Cheng¹, GONG Qing-tao¹, TAO Yu-jia¹, YIN Di¹, XING Xing-hua², XING Han¹, JIANG Hai-dong¹

(1. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology Ecology and Production Management, Ministry of Agriculture/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production/National Center for Soybean Improvement, Nanjing 210095, China; 2. Xuzhou Institute of Agricultural Sciences of Xu-huai Region of Jiangsu, Xuzhou 221131, China)

Abstract: The aim of this study was to explore the effects of high temperature at full flowering stage on podding and yield of soybean and its physiological mechanism. We used soybean variety Suike 12 as material. At the full flowering stage (R₂), 3 days high temperature treatment (R₂H, 9:00 – 16:00, 45 ± 2°C; 16:00 – 9:00 next day, normal ambient temperature) in the greenhouse was set up, and taking 24 h normal ambient temperature as control. The effects of heat stress at full flowering stage on podding, anatomical structure, oxidative stress and yield components of soybean were studied. The results showed that the effects of high temperature on leaves at R₂ stage was not continuous, which did not effect the “source” in the later period, while high temperature increased the contents of H₂O₂ and MDA in the pods of stressed flowers. The stalk cells of some pods were affected by high temperature, which collapsed into filaments and the vascular bundles of pod shell became sparse, which led to unfluent “flux”, hollow seed and less “sink”, such as pods falling, more empty and seedless pods, fewer seeds, lower seed weight and lower yield. The accessory inflorescence might compensate the yield loss caused by high temperature to some extent. Therefore, high temperature at full flowering stage affected the “flux” and “sink” of soybean, which eventually led to yield reduction.

Keywords: Soybean; The full flowering stage; High temperature; Pods; Yield

大豆是我国主要油料作物之一,是人类蛋白和油脂的重要来源。随着全球气候变暖,温室效应加剧,导致短期极端高温天气频发^[1-2],高温是导致大豆减产的重要因素之一,给大豆安全生产带来极大

的风险^[3]。在大豆生长发育过程中,高温胁迫会影响大豆的生理生化过程,促使大豆细胞膜质过氧化^[4]。相比营养生长期,大豆在生殖生长期对高温胁迫尤为敏感,更易受到高温胁迫的影响^[5]。

收稿日期:2021-01-18

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD1000900)。

第一作者:卢城(1995—),男,在读硕士,主要从事作物生理生态研究。E-mail:1916085117@qq.com。

通讯作者:江海东(1968—),男,博士,副教授,主要从事作物生理生态研究。E-mail:hdjiang@njau.edu.cn。

目前,高温对大豆生长发育影响的研究主要集中在高温对当前生育期的影响,如花期高温会对大豆花、叶产生影响^[6-7],导致花粉败育,无法正常进行授粉受精,掉花率升高^[8],从而影响结荚数。花荚期高温胁迫会影响大豆籽粒正常发育,导致籽粒败育^[9]。本实验室前期研究发现花期高温也影响鼓粒期籽粒灌浆,导致四粒荚数减少,一粒荚和无效荚数增多,荚粒数减少^[10],可见生殖生长前期高温会对后期大豆生长发育产生影响,但相关研究较少,机理尚未明确。本研究在大豆品种潍科 12 的盛花期(R2)进高温处理,通过研究花期高温对大豆结荚动态、荚的解剖结构、荚的氧化胁迫和产量构成的影响,揭示高温对大豆生殖生长阶段源库流的影响,为大豆耐高温栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为潍科 12,由安徽省濉溪县科协选育,属于中熟夏大豆品种,本实验室前期发现花后不同生育时期高温对潍科 12 都有影响,尤以盛花期影响最大^[11]。

试验涉及主要试剂为 FAA(福尔马林-醋酸-酒精)固定液(G1103-500ML,武汉赛维尔生物科技有限公司),主要仪器有体式显微镜(OLYMPUS CX-21,日本奥林巴斯公司)、温湿度记录仪(DWL-20E,深圳宇问加壹传感系统有限公司)等。

1.2 试验设计

试验于 2020 年在江苏省南京农业大学牌楼教学科研基地进行。采用盆栽方法,试验用土为黄棕色土壤,pH7.08,有机质 22.8 g·kg⁻¹,全氮 7.6 g·kg⁻¹,速效磷 43.5 g·kg⁻¹,速效钾 101.6 g·kg⁻¹。于 6 月 20 号种植 100 盆,每盆装土 10 kg,播种 8 粒,置于室外正常生长,并于 5 叶期(7 月 10 号)定苗,每盆保留 3 株长势较为一致的壮苗。从播种至开花第 3 天,植株全部放置在棚外自然环境下正常生长。

试验设高温(R2H)和对照(CK)两个处理。在植株开花第 4 天,进入盛花期(R2 期)时,将 70 盆移入塑料大棚中进行连续 3 d 的高温处理。夏季极端高温时气象台站气温可达 38~40℃^[12],而田间作物群体内温度约高于气象台站 4~5℃^[13],因此设

定高温处理温度为 45℃。在每天 9:00—16:00,用温湿度记录仪进行监测,通过调节塑料大棚两侧薄膜的开放程度来保持处理期间棚内温度处在(45±2)℃范围,以模拟田间真实高温环境;当日 16:00—次日 9:00,将塑料大棚两侧薄膜完全打开,使其与自然温度相同。另外 30 盆全天放置在另一两侧薄膜完全打开的棚内生长,保持自然温度生长作为对照处理(CK)。两棚薄膜为同一批次,保证相同光照强度。在开花第 7 天,解除高温处理,将 R2H 和 CK 处理的全部植株移出大棚在自然环境下正常生长至成熟。

试验过程中从开花第 1 天至高温处理结束后第 8 天(即开花第 14 天),每天用不同颜色铁丝环对 CK、R2H 大豆植株套花标记,以开花后第 3、5、7 天的花分别代表高温前、中、后开放的花。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 开花结荚情况 每个处理中选取 10 株长势相对一致的植株进行定株观察,从植株第 1 朵花开放起,每天定时记录主茎及分枝上各节位花朵的开放和花、荚凋落情况,直至荚期结束。最终统计各阶段开花数、落花数、落荚数、成荚数,计算总花数、落荚率、成荚率;落荚率(%)=落荚数/成荚数×100;成荚率(%)=成荚数/总花数×100。

1.3.2 荚柄和荚壳解剖结构 根据套花标记的铁丝环颜色区分出 R2H 植株高温前、中、后形成的 3 种荚,每种荚取 3 个(共 9 个荚),CK 植株选取与 R2H 同时期荚共 9 个,两处理同时在开花后第 12 天取样,在植株上将荚用镊子取下立即置于 FAA 溶液中固定,待做切片。切片时采用番红-固绿染色,置于显微镜(40 倍镜)下观察并拍照记录。

1.3.3 荚的 H₂O₂ 和 MDA 含量 将 R2H 植株高温前、中、后形成的 3 种荚和 CK 植株的荚在高温处理结束后第 20 天下午 4:00 取样,各取 3 个重复,每个重复荚重约 5 g,取下立即放入液氮中保存,进行过氧化氢(H₂O₂)、丙二醛(MDA)含量测定。H₂O₂ 含量测定采用试剂盒(南京建成生物工程研究所提供,型号 A064-1-1),MDA 含量测定采用赵世杰等^[14]的方法。

1.3.4 叶片的 H₂O₂ 和 MDA 含量 在高温处理第

3天和高温处理结束后第20天(同荚)下午4:00取R2H和CK植株倒三叶,各取3个重复,取下立即放入液氮中保存,进行过氧化氢(H₂O₂)、丙二醛(MDA)含量测定,方法同上。

1.3.5 产量构成 收获后对CK、R2H大豆植株进行考种,统计总荚数(总荚数=落荚数+成荚数)、落荚数、成荚数(成荚数=空瘪荚数+有效荚数)、空瘪荚数、缺粒荚数、鼓粒荚数、有效荚数(有效荚数=缺粒荚数+鼓粒荚数)、每荚粒数(每荚粒数=总粒数/有效荚数)、总粒数、百粒重、单株产量(单株产量=单株总粒数×百粒重/100)。

1.4 数据分析

采用Excel 2010进行数据处理并作图,采用SPSS 20.0进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 盛花期高温对大豆结荚的影响

如表1所示,R2H植株整体成荚率相比CK降低9.89百分点。对主花序来说,R2H植株高温前花的成荚数相比CK减少63.19%,成荚率降低15.50百分点;高温处理期间花的成荚数减少49.17%,成荚率降低25.70百分点;高温后花的成荚数减少36.57%,成荚率降低0.90百分点。但对于副花序,成荚数相比CK增多118.83%,成荚率升高11.04百分点。总之,高温使R2H植株整个主花序成荚数减少,成荚率降低,同时刺激副花序生长发育,使得副花序成荚数、成荚率升高,但R2H处理的植株整株成荚率仍然下降。

表1 盛花期高温对大豆成荚的影响

Table 1 The effects of high temperature at full flowering stage on soybean podding

处理 Treatment	主花序 Main inflorescence						副花序 Accessory inflorescence		整株 The whole plant
	高温前		高温中		高温后		成荚数 Podding number	成荚率 Podding rate/%	成荚率 Podding rate/%
	Before high temperature		During high temperature		After high temperature				
	成荚数	成荚率	成荚数	成荚率	成荚数	成荚率			
	Podding	Podding	Podding	Podding	Podding	Podding			
number	rate/%	number	rate/%	number	rate/%	number	rate/%	rate/%	
CK	6.33 ±	40.80 ±	9.64 ±	39.80 ±	8.97 ±	48.70 ±	6.48 ±	52.55 ±	44.63 ±
	0.10 aA	1.20 aA	0.50 aA	0.66 aA	0.31 aA	0.40 aA	0.13 bA	0.67 bA	0.06 aA
R2H	2.33 ±	25.30 ±	4.90 ±	14.10 ±	5.69 ±	47.80 ±	14.18 ±	63.59 ±	34.74 ±
	0.10 bA	0.31 bA	0.20 bA	0.30 bB	0.48 bA	0.29 aA	0.20 aA	0.33 aA	0.44 bA

同列数值后不同大小写字母分别代表在0.01和0.05水平上差异显著。下同。
Values within the same column followed by different capital or lowercase are significant different at 0.01 and 0.05 probability level, respectively. The same below.

如表2所示,相比CK植株而言,R2H植株总荚数下降6.38%,落荚数增加54.05%,荚数降低13.75%,空瘪荚数增加9.69%,缺粒荚数增加11.86%,鼓粒荚数减少27.79%,有效荚数减少

17.09%,每荚粒数减少1.66%,但其中总荚数、空瘪荚数和每荚粒数与CK相比差异均不显著,其他指标均与CK呈显著差异。总之,高温使大豆植株荚数和粒数减少。

表2 盛花期高温对大豆结荚情况的影响

Table 2 The effects of high temperature at full flowering stage on soybean pods

处理 Treatment	总荚数 Total pods number	落荚数 Fallen pods number	荚数 Pods number	空瘪荚数 Empty pods number	缺粒荚数 Seedless pods number	鼓粒荚数 Full pods number	有效荚数 Effective pods number	每荚粒数 Seeds number per pod
CK	35.25 ± 0.22 a	3.83 ± 0.05 b	31.42 ± 0.17 a	3.92 ± 0.01 a	7.42 ± 0.04 b	20.08 ± 0.12 a	27.50 ± 0.16 a	1.81 ± 0.03 a
R2H	33.00 ± 0.22 a	5.90 ± 0.06 a	27.10 ± 0.16 b	4.30 ± 0.64 a	8.30 ± 0.02 a	14.50 ± 0.50 b	22.80 ± 0.48 b	1.78 ± 0.03 a

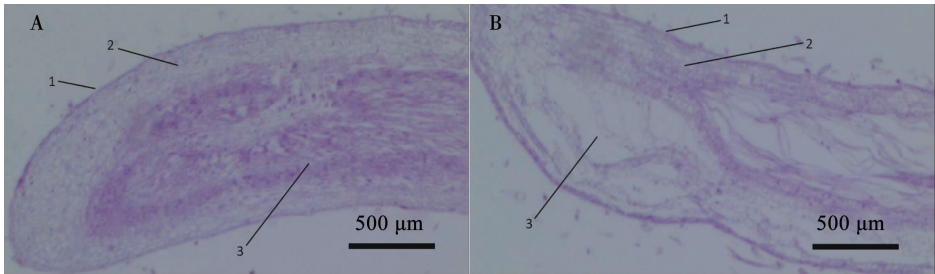
2.2 盛花期高温对大豆荚解剖结构的影响

2.2.1 荚柄 如图1所示,CK荚柄的表皮细胞、薄壁组织细胞和木质部细胞之间层次清晰,木质部细

胞排列紧密有序,三者的细胞结构均表现正常(图1A)。与CK相比,R2H荚柄的表皮细胞表现正常,薄壁组织细胞受到伤害,却仍留有部分细胞可被分

辨出来,但是木质部细胞已经完全被破坏,原本紧密排列的内部细胞结构已经崩溃瓦解,呈现出丝状

结构(图 1B)。可见高温破坏了荚柄内部部分薄壁组织和整个木质部,使物质运输受阻。



A - CK; B - R2H.
1 - 表皮; 2 - 薄壁组织; 3 - 木质部。
1 - Epidermis; 2 - Parenchymal tissue; 3 - Xylem.

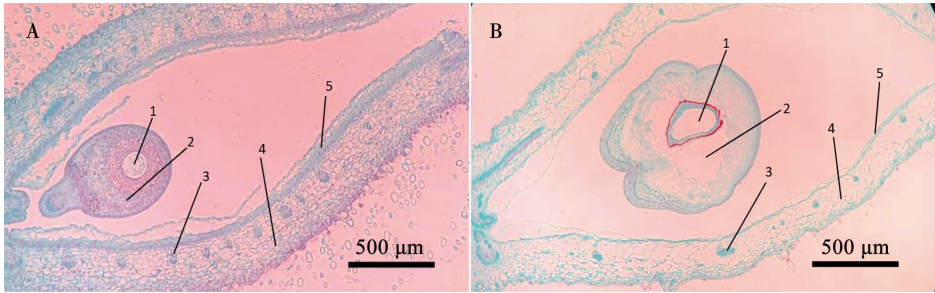
图 1 不同处理大豆荚柄解剖结构(纵切)

Fig. 1 The anatomical structure (longitudinal-cut) of pod stalk under different treatments

2. 2. 2 荚 如图 2 所示,CK 处理中大豆籽粒内部的胚和胚乳充实饱满,且荚壳内壁的荚膜较厚(图 2A);而与 CK 相比而言,R2H 处理大豆的籽粒受到高温伤害,籽粒的胚和胚乳内部细胞均出现部分破碎的情况,有较大面积的空洞,荚壳内壁的荚膜厚度变薄(图 2B)。

束,维管束间距为 372.5 μm;而 R2H 大豆平均荚壳内部只有 15 个维管束,维管束间距为 660.7 μm。相比于 CK,R2H 处理豆荚的维管束在数量上减少了 24.24%;间距扩大了 77.37%,二者均呈现出显著差异。因此,高温破坏了籽粒内部的胚和胚乳,使荚膜变薄,维管束变少且间距扩大,在荚壳上的分布变得更为稀疏。

CK 处理大豆平均荚壳内部共有 19.8 个维管



A - CK; B - R2H.
1 - 胚; 2 - 胚乳; 3 - 维管束; 4 - 荚壳; 5 - 荚膜。
1 - Embryo; 2 - Endosperm; 3 - Vascular bundle; 4 - Pod shell; 5 - Pod membrane.

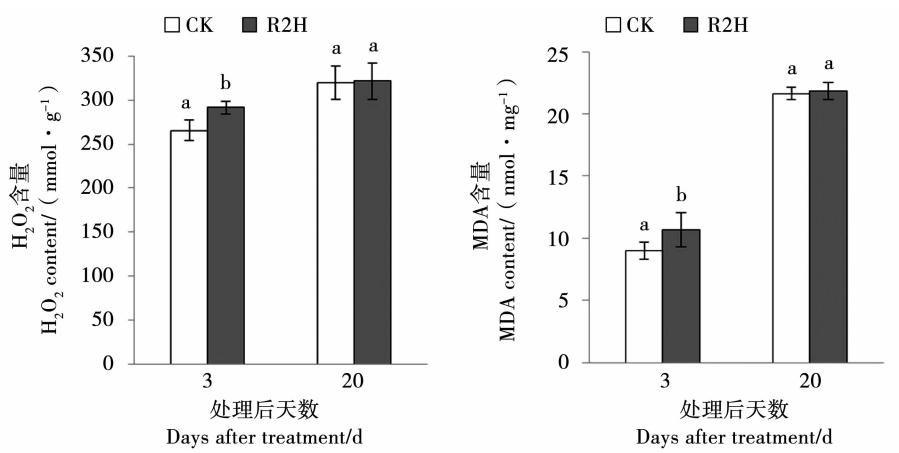
图 2 不同处理大豆荚解剖结构

Fig. 2 The anatomical structure of pod under different treatments

2. 3 盛花期高温对大豆 H₂O₂ 和 MDA 含量的影响

2. 3. 1 叶 如图 3 所示,在高温处理后第 3 天,R2H 叶片的 H₂O₂ 和 MDA 含量均显著高于 CK,其中 H₂O₂ 和 MDA 含量分别升高 9.86% 和 18.40%;在高温处理后第 20 天,此时大豆植株已经处于荚期,R2H 叶片的 H₂O₂ 和 MDA 含量与 CK 叶片的 H₂O₂ 和 MDA 含量近乎相同,明显差异(图 3)。所以,高温胁迫使 R2H 叶片当时的 H₂O₂ 和 MDA 含量明显升高,但荚期 R2H 叶片的 H₂O₂ 和 MDA 含量与 CK 并无明显差异,说明高温只影响了当时的叶片,而对荚期叶片无明显影响。

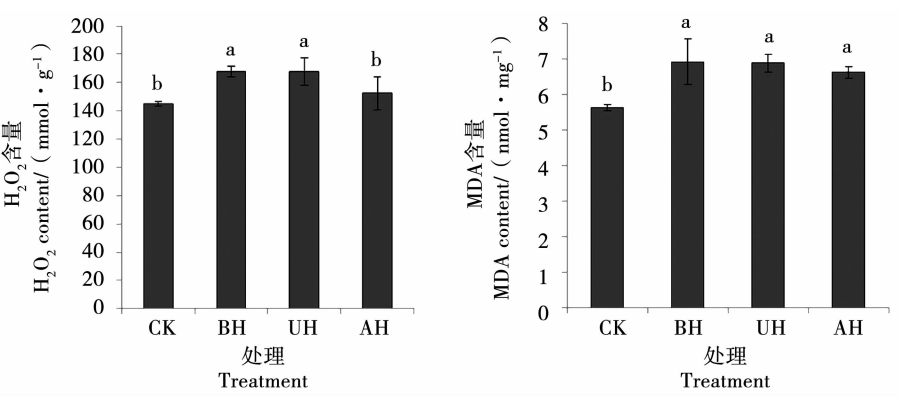
2. 3. 2 荚 如图 4 所示,高温前(BH)、中(UH)、后(AH)花成荚的 H₂O₂ 含量分别比 CK 升高 15.62%、15.79% 和 5.05%,其中高温前、中花成荚的 H₂O₂ 含量与 CK 相比呈现出显著差异,高温后花成荚的 H₂O₂ 含量与 CK 相比差异不显著。MDA 含量,高温前、中、后花成荚的 MDA 含量分别比 CK 升高 22.91%、22.20% 和 17.58%,高温处理前、中、后花成荚的 MDA 含量与 CK 相比均呈现出显著差异。说明盛花期高温仍会影响后期的荚,导致其 H₂O₂ 和 MDA 含量上升,尤其是高温前和高温中花成的荚,受高温胁迫较严重,H₂O₂ 和 MDA 含量也最高。



不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。下同。
The different lowercase refer to significant difference at 5% , respectively. The same below.

图 3 不同处理叶的 H₂O₂ 和 MDA 含量

Fig. 3 The contents of H₂O₂ and MDA in leaves under different treatments



CK - 对照;BH、UH 和 AH 分别代表花后第 3、5、7 天花成的荚。
CK - Contrast; BH, UH and AH indicate pod forming from flower at 3, 5, 7 d after blooming.

图 4 不同处理荚的 H₂O₂ 和 MDA 含量

Fig. 4 The H₂O₂ and MDA content in pods under different treatments

2.4 盛花期高温对大豆产量的影响

如表 3 所示,受高温胁迫的影响,R2H 植株主花序百粒重相比 CK 降低了 15.25%,呈现出极显著差异;R2H 和 CK 植株的副花序百粒重差异不显著。R2H 大豆单株百粒重相比 CK 降低了 8.25%,单株总粒数相比 CK 减少 18.72%,二者在单株百粒重和单株粒数上均呈现极显著差异。由于单株百粒重

的降低和单株粒数的减少,使得 R2H 大豆单株产量相比 CK 降低 25.45%,呈现极显著差异,造成 R2H 大豆减产。因此,高温胁迫使得 R2H 植株主花序百粒重下降,进而拉低了单株百粒重,并且高温使单株粒数减少,从而造成 R2H 大豆单株产量严重降低。

表 3 盛花期高温对大豆产量及其构成因素的影响

Table 3 The effects of high temperature at full flowering stage on soybean yield and its components

处理 Treatment	主花序百粒重 100-seed weight of main inflorescence/g	副花序百粒重 100-seed weight of accessory inflorescence/g	单株百粒重 100-seed weight per plant/g	单株粒数 Seeds number per plant	单株产量 Yield per plant/g
CK	19.34 ± 0.07 aA	18.50 ± 0.52 a	18.92 ± 0.23 aA	49.83 ± 0.14 aA	9.43 ± 0.15 aA
R2H	16.39 ± 0.03 bB	18.33 ± 0.51 a	17.36 ± 0.26 bB	40.50 ± 0.07 bB	7.03 ± 0.10 bB

3 讨 论

花期高温会对作物生长发育产生不利影响^[15-17]。本研究发现,花期高温虽然对花期的叶片产生了伤害,但是这种伤害是非延续的,后期大豆功能叶未表现出显著的差异。但花期高温会使高温前、中、后开的花所成荚的 H₂O₂ 和 MDA 含量显著升高,说明花期高温对于大豆的生殖器官的伤害是持续性的,不仅影响开花,还会影响结荚。这可能是由于高温处理后,大豆的花芽分化受到不同程度的影响,胚囊母细胞发育不良(高温中、后的花),或者子房发育受阻(高温前的花),从而不仅导致成荚率降低,还造成荚的质量不高,籽粒内部细胞破碎,出现空洞,有效荚率下降。

籽粒是大豆最主要的库,流的主要载体是源库间的输导系统,大豆源-流-库间物质及同化物运输是从叶片依次经过茎、荚柄、荚壳、荚膜最后到达籽粒的过程^[18-19]。在本研究中,高温造成荚柄木质部细胞崩溃瓦解呈丝状结构,影响了水分和矿物质的运输。荚壳中维管束数量变少,间距变大,影响了光合产物向籽粒的运输效率^[20-21]。表明高温通过影响豆荚的发育降低了大豆流的通畅性,影响了灌浆,导致籽粒发育不良^[22]。表现为受到高温影响的花所成的荚中,空瘪荚、缺粒荚增多,鼓粒荚、有效荚减少,每荚粒数降低,粒重降低。

高温使主花序的荚减少,从而促进了副花序的发生,对植株产量进行补充^[23-24]。而且副花序是在高温处理后开始花芽分化的,未受到高温的直接影响,因此成荚数、成荚率明显上升,百粒重与 CK 相当。

4 结 论

花期高温对生殖器官的伤害有持续性但不影响后期大豆叶片功能。花期高温通过影响花器官发育减少库的数量,通过影响荚的发育造成流不畅,进一步影响库的数量和质量,从而降低产量。副花序的补偿效应能在一定程度上弥补产量的损失。

参考文献

[1] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 全球变暖与气候突变[J]. 气候变化研究进展,2021,17(1):114-120. (Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. Global warming and abrupt climate change[J]. Climate Change Research,2021,17(1):114-120.)

[2] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013(5):1068-1076. (Sheng Y P, Wang G Y. Key findings and assessment

results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013(5):1068-1076.)

[3] Porter J R. Rising temperatures are likely to reduce crop yields [J]. Nature,2005,436:174.

[4] 靳路真,王洋,张伟,等. 高温胁迫对不同耐性大豆品种生理生化影响[J]. 大豆科学,2019,38(1):63-71. (Jin L Z, Wang Y, Zhang W, et al. Effects of high temperature stress on physiological and biochemical traits of soybeans with different heat tolerance[J]. Soybean Science, 2019,38(1):63-71.)

[5] Prasad P V V, Bheemanahalli R, Jagadish S V K. Field crops and the fear of heat stress-opportunities, challenges and future directions[J]. Field Crops Research,2017,200:114-121.

[6] Prasad P V V, Djanaguiraman M, Perumal R, et al. Impact of high temperature stress on floret fertility and individual grain weight of grain sorghum; Sensitive stages and thresholds for temperature and duration[J]. Frontiers in Plant Science,2015(6):4-5.

[7] Prasad P V V, Djanaguiraman M. Response of floret fertility and individual grain weight of wheat to high temperature stress: Sensitive stages and thresholds for temperature and duration[J]. Functional Plant Biology,2014,41(12):1261-1269.

[8] Djanaguiraman M, Prasad P V V, Boyle D L, et al. Soybean pollen anatomy, viability and pod set under high temperature stress[J]. Journal of Agronomy & Crop Science,2013,199(3):171-177.

[9] 莫先树,梁家铭,李得孝,等. 黄淮海夏大豆田“症青”的成因探析及预防[J]. 大豆科学, 2019, 38(5): 770-778. (Mo X S, Liang J M, Li D X, et al. Exploring the causes and precautions of soybean staygreen syndrome in Huang-Huai-Hai regions[J]. Soybean Science, 2019, 38(5): 770-778.)

[10] 谢云灿,何孝磊,杜鹏,等. 外源油菜素内酯对高温胁迫下大豆光合特性及产量品质的影响[J]. 大豆科学,2017, 36(2):237-243. (Xie Y C, He X L, Du P, et el. Effect of heat acclimation and EBR on photosynthesis characteristics in leaves of soybean flowering stage, yield and quality maturation stage [J]. Soybean Science, 2017,36(2):41-43.)

[11] 何孝磊. 短期高温胁迫对大豆开花结荚过程及产量的影响 [D]. 南京:南京农业大学,2016:49-55. (He X L. Effects of short-time high temperature on flowering and setting pod progression, yield of soybean [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2016:49-55.)

[12] 梅一清,彭小燕,张树民,等. 南通地区夏季高温特征和极端高温事件分析[J]. 安徽农学通报,2020,26(14):151-153. (Mei Y Q, Peng X Y, Zhang S M, et. al. Characteristics of summer high temperature and comparison of extreme heat events in Nantong area[J]. Journal of Anhui Agricultural Science,2020,26(14):151-153.)

[13] 王阳阳. 基于田间温度和台站温度的水稻高温热害评判研究 [D]. 南京:南京信息工程大学,2018:17-21. (Wang Y Y. Evaluation of high temperature heat damage of rice based on field temperature and station temperature [D]. Nanjing: Nanjing Information Engineering University,2018:17-21.)

[14] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进 [J]. 植物生理学通讯,1994(3):207-210. (Zhao S J, Xu C C, Zhou J, et al. Improvement of method for measurement of malondialdehyde in plant tissue [J]. Plant Physiology Communications,1994(3):207-210.) (下转第 516 页)