

铃期增温对棉花产量、品质的影响及其生理机制 *

贺新颖 周治国 戴艳娇 强志英 陈兵林 王友华 **

(南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 南京 210095)

摘要 以泗棉3号棉花品种为材料,于2010和2011年在南京农业大学牌楼试验站设置铃期(7月13日—8月24日)增温试验,模拟全球增温条件下棉花产量、品质的变化趋势及其生理机制。结果表明:在铃期增温2~3℃(日均温31.1~35.2℃)条件下,植株总生物量下降约10%,单株皮棉及籽棉产量降低30%~40%。棉纤维品质变化显著,且不同纤维品质指标对增温的响应程度存在较大差异:马克隆值和断裂比强度显著升高,纤维长度下降,而整齐度指数和伸长率无显著变化。棉株光合能力、干物质累积能力和光合产物输出能力显著下降;可溶性氨基酸、可溶性糖、蔗糖含量及碳氮比均显著下降,而淀粉含量显著上升;增温条件下营养器官干物质分配比例增多,生殖器官干物质分配比例相对减少,经济系数随之降低。棉株下部果枝受增温影响较小,中、上及顶部果枝受增温影响较大。表明在增温2~3℃条件下,棉株大部分时间处于热胁迫状态,不仅光合能力下降,而且光合产物向“库”端的转运能力下降,最终导致其减产。

关键词 棉花 铃期 增温 功能叶 光合作用

文章编号 1001-9332(2013)12-3501-07 **中图分类号** S561 **文献标识码** A

Effect of increased temperature in boll period on fiber yield and quality of cotton and its physiological mechanism. HE Xin-ying, ZHOU Zhi-guo, DAI Yan-jiao, QIANG Zhi-ying, CHEN Bing-lin, WANG You-hua (*Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(12): 3501–3507.

Abstract: To study the effect of temperature increase in boll period (13-Jul. to 24-Aug.) on cotton yield and fiber quality under the global warming background, a pot experiment with cotton cultivar Simian 3 was carried out in half-open-top greenhouse in Pailou experiment station (32°02' N, 118°50' E) of Nanjing Agricultural University in 2010 and 2011. The results indicated that when the temperature was increased by 2–3 °C (with an average daily temperature of 31.1 to 35.2 °C), the biomass declined by 10%, while the cotton yield declined by 30%–40%. The fiber quality also changed significantly with the relative indices responding differently. The micronaire value and fiber strength increased, the fiber length reduced while the fiber uniformity and elongation rate changed little. The plant photosynthesis capability, the biomass accumulation and the ability of carbohydrates transferring to sink organs all decreased. The soluble amino acids, soluble sugar, sucrose and C/N decreased significantly, while the starch content increased significantly. The allocation in vegetative organs was increased while that in reproductive organs was reduced, which in turn declined the economical index. The lower fruit branches were affected little under increased temperature condition while the middle, upper and top branches were affected greatly. The results indicated that, under the 2–3 °C warmer condition, the cotton plants experienced the high temperature stress, both the photosynthesis ability and the carbohydrates transportation from source to sink were decreased, leading to the decline of cotton yield.

Key words: cotton; boll period; increased temperature; functional leaf; photosynthesis.

* 农业部公益性行业科研专项(BK200903003)和江苏省自然科学基金项目(BK20131318)资助。

** 通讯作者. E-mail: w_youhua@njau.edu.cn

2013-04-18 收稿, 2013-09-24 接受.

棉花(*Gossypium hirsutum*)作为全球性的重要经济作物和纺织原料,其产量、品质形成对环境异常敏感,高温胁迫导致棉花产量、品质严重下降^[1-4].在棉花产量、品质形成的关键期(7—10月),高温等灾害的发生也最为频繁.随着全球温室效应的不断加剧,预计到2100年全球气温将再升高5.5℃^[5],而且极端性气候,特别是夏季高温的发生将更为频繁^[6-7].因此,铃期高温必将成为影响棉花产量、品质的重要因子.

许多研究证明热胁迫会影响作物的光合作用^[8-11].高温对光合作用的影响可分为两个方面:第一,直接的影响是高温对光合机构的破坏,导致光合作用减弱和呼吸作用增强.如高温胁迫降低了叶片叶绿素含量^[12]及对光系统Ⅱ的破坏^[13]等;第二,间接的影响是高温会影响光合物质的存储和转运,导致碳水化合物向库端的转运减少.如郭文善等^[14]研究发现,高温处理下叶片中光合产物的储藏量多于对照;Loka等^[15]发现,夜间增温可导致叶片中碳水化合物含量显著下降;赵辉等^[16]发现,高温对小麦花后的物质转运和光合同化有显著影响.Oosterhuis^[17]研究表明,高温对棉花光合作用、光合产物输出能力有明显影响,使源端向库端碳水化合物的供应产生不足,并最终导致棉花品质和产量下降.但有关棉花铃期小幅增温条件下棉花产量和品质的变化趋势及其生理机制目前尚未见报道.本试验研究了棉花铃期日均温升高2~3℃条件下,棉花的光合作用、物质合成、物质分配及产量和品质的变化,以期明确田间增温对棉花产量、品质形成的影响及其生理生态机制,为棉花高产、稳产、优质栽培技术体系的形成提供理论依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 材料处理

表1 增温区与对照区棉花冠层温度

Table 1 Air temperature on cotton canopy in increased temperature and control zones (℃)

年份 Year	日期 Date	白天 Daytime			夜间 Nighttime			全天 All day		
		$T_{a,H}$	$T_{a,CK}$	T_d	$T_{a,H}$	$T_{a,CK}$	T_d	$T_{a,H}$	$T_{a,CK}$	T_d
2010	07-28	33.6	30.7	3.0	30.4	27.0	3.5	33.1	30.0	3.0
	08-05	36.2	33.4	2.8	35.5	32.6	2.9	35.5	32.6	2.9
	08-18	34.1	32.0	2.1	34.0	31.1	2.9	33.4	31.1	2.3
2011	07-22	35.6	33.6	2.0	30.3	27.7	2.6	32.9	30.6	2.3
	07-29	37.6	34.2	3.5	30.5	27.3	3.2	34.1	30.7	3.3
	08-12	37.9	36.7	1.2	34.0	31.8	2.2	36.0	34.3	1.7
	08-21	35.6	35.1	0.6	30.8	28.5	2.3	33.2	31.8	1.4
	08-26	28.0	25.4	2.6	26.5	24.2	2.3	27.2	24.8	2.4

$T_{a,H}$:增温处理平均温度 Average temperature of increased treatment; $T_{a,CK}$:对照平均温度 Average temperature of control; T_d :温差 Difference of temperature.

试验于2010—2011年在江苏省南京市南京农业大学牌楼试验站(32°02' N, 118°50' E)进行.采用盆栽方法,供试土壤为黄棕壤,0~20 cm土层土壤含有机质17.2 g·kg⁻¹、全氮4.1 g·kg⁻¹、碱解氮62.4 mg·kg⁻¹、速效磷38.1 mg·kg⁻¹、速效钾90.3 mg·kg⁻¹.供试棉花品种为泗棉3号.所用盆钵直径38 cm、高30 cm,每盆装含水量70%左右鲜土30 kg.于4月15日营养钵育苗,5月20日选择生长一致的壮苗移栽到盆钵中,每盆1株.棉花6~7果枝内围开花时开始增温处理,其他管理按高产栽培要求进行.

利用本课题组研发的开顶式自动控温温室设置增温(HT)和对照(CK)处理,增温区较对照区夜间平均温度提高2~3℃,白天提高约2℃(表1).2010年棉花铃期增温时间为7月27日—9月5日,整个铃期温度都较高,增温区日均温为32.59℃,对照区日均温为30.01℃;2011年棉花铃期增温时间为7月25日—9月8日,铃期温度波动较大,可以分为前中期(7月25日—8月18日)和中后期(8月19日—9月8日)2个时期,增温区日均温分别为32.4和27.2℃,对照区日均温分别为29.7和24.8℃(图1).2010年生理指标测定时间为7月28日、8月5日和18日,日均温分别为33.5、35.2和33.8℃;2011年生理指标测定时间为7月22日、29日、8月12日、21日和26日,日均温分别为33.0、34.8、31.1、26.5和27.0℃.

1.2 测定指标和方法

1.2.1 光合性能参数测定 选择生长均匀一致的棉花植株3株,用美国产Li-6400型光合仪测定棉株主茎倒4叶净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r),每次测定重复3次.测定时仪器使用开放式气路,测定光源为内置光源,光强为1500 μmol·m⁻²·s⁻¹.

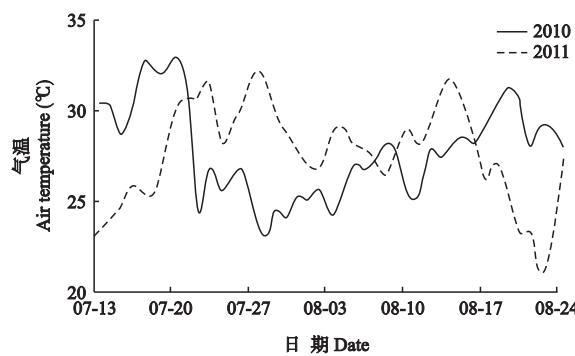


图1 棉花铃的期气温变化

Fig. 1 Air temperature in cotton boll period.

1.2.2 SPAD 值和比叶重的测定 用 SPAD 502 叶绿素计于铃期在每株倒 4 叶上取 4 个点进行测定, 取平均值作为该叶片的 SPAD 值; 每处理的 3 株棉花相同叶位叶片 SPAD 值再平均, 作为该处理该叶位的 SPAD 值. 将测完 SPAD 值的叶片除去叶脉, 平均裁剪成 2 份, 一份用 Li-2000 叶面积仪测量叶面积, 然后在 70 ℃ 的烘箱内烘干至恒量, 称干质量, 另一份用于测量光合代谢物质含量. 比叶重 ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) 为叶面积/叶片干质量.

1.2.3 光合代谢物质含量测定 每处理选择 3 株长势相近的代表性棉株, 采用蒽酮比色法测定棉花叶片可溶性糖、蔗糖和淀粉含量, 用茚三酮显色法测定可溶性氨基酸含量, 以单位鲜质量叶片中可溶性糖含量与可溶性氨基酸含量的比值作为 C/N.

1.2.4 生物量测定 每处理选择 3 株长势相近的代表性棉株, 按根、主茎+果枝、叶片、蕾和花铃分开, 在 105 ℃ 杀青 30 min 后, 70 ℃ 烘至恒量, 测定其生物量.

1.2.5 分配系数和产量测定 分配系数 = 植株某一器官生物量/植株总生物量. 所用棉花按不同处理以单株为单位依次收花, 测定并统计单株铃数、铃质量和籽棉产量.

表2 铃期增温对棉花主茎功能叶 SPAD 值和比叶重的影响

Table 2 Effects of increased temperature in boll period on chlorophyll SPAD values and specific leaf mass of functional leaf on main stem of cotton (mean±SD, n=5)

年份 Year	日期 Date	SPAD 值 SPAD value			比叶重 SLW ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)			叶面积 Leaf area (cm^2)		
		HT	CK	$\Delta (\%)$	HT	CK	$\Delta (\%)$	HT	CK	$\Delta (\%)$
2010	07-28	46.6±0.2b	49.6±0.5a	-6.0	175.4±2.3b	193.6±8.3a	-9.4	215.7±3.1b	251.7±4.3a	-14.3
	08-05	52.0±0.7b	53.9±0.7a	-3.7	183.3±5.1b	198.7±6.4a	-7.8	263.9±2.8b	302.1±3.2a	-12.6
	08-18	53.1±0.6b	58.5±0.6a	-9.3	195.4±3.2b	214.6±6.7a	-8.9	301.0±4.8b	332.6±3.7a	-9.5
2011	08-02	48.7±0.4a	49.6±0.2a	-1.9	190.4±6.5a	209.3±7.3b	-9.0	213.5±3.8b	253.3±6.6a	-15.7
	08-10	53.0±0.3a	53.1±0.6a	-0.2	154.0±5.3a	189.9±8.7b	-18.9	271.6±7.5b	295.6±5.5a	-8.1
	08-15	53.1±0.7a	53.6±0.4a	-1.0	185.0±4.0a	209.7±6.3b	-11.8	277.2±6.3b	320.8±5.3a	-13.6
	08-22	56.6±0.2a	54.5±0.8a	3.9	196.0±5.2a	200.9±4.7a	-2.5	257.2±4.5b	280.2±6.1a	-8.2

HT: 增温 Increased temperature; CK: 对照 Control; $\Delta = (HT - CK) / CK \times 100\%$. 下同 The same below.

1.2.6 纤维品质测定 由农业部纤维检测中心采用 HFT9000 仪器测定 (HVICC 校准).

1.3 数据处理

采用 Excel 软件进行数据处理, 采用 SPSS 11.0 软件进行方差分析. 采用 LSR 法进行差异显著性比较, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$.

2 结果与分析

2.1 铃期增温对棉株光合特征参数的影响

试验结果表明, 增温抑制了植株叶片的光合能力 (表 2、表 3). 2011 年主茎功能叶 SPAD 值和净光合速率 (P_n) 在铃期的前中期 (日均温 32.4 ~ 35.2 ℃) 显著下降, 铃期的中后期 (日均温 27.2 ~ 31.1 ℃) 上升, 而 2010 年则整个铃期均低于对照; 而蒸腾速率 (T_r) 与 SPAD 值和 P_n 的变化趋势正好相反. 这说明在日均温 32.4 ~ 35.2 ℃、增温 2 ~ 3 ℃ 的环境下棉株已经遭受了高温胁迫; 而日均温 27.2 ~ 31.1 ℃ 的环境温度则相对较低, 增温 2 ~ 3 ℃ 更有利于棉株生长. 铃期增温 (日均温 31.1 ~ 35.2 ℃) 条件下, 棉株主茎功能叶的比叶重和叶面积呈下降趋势, 进一步表明叶片的光合能力下降.

增温条件下叶片气孔导度 (g_s)、 T_r 及胞间 CO_2 浓度 (C_i) 整体呈上升趋势, 而净光合速率呈下降趋势 (表 3), 表明增温条件下叶片光合能力显著下降, 且主要由非气孔限制因素所致.

2.2 铃期增温对棉株功能叶光合物质代谢的影响

两年试验结果表明, 增温条件下棉花主茎功能叶中淀粉含量整体呈上升趋势, 随时间的推移, 其增加幅度逐渐下降并最终低于对照 (表 4), 说明增温条件下, 棉花叶片光合产物向储藏性物质转化的比例增加, 光合产物更多地转化为储藏物质储藏在叶片中. 增温条件下可溶性氨基酸、可溶性糖和蔗糖含量均显著下降, 且棉花主茎功能叶 C/N 下降. 由于

表 3 铃期增温对棉花主茎功能叶光合特征参数的影响

Table 3 Effects of increased temperature in boll period on photosynthesis characters of functional leaf on main stem of cotton ($n=5$)

年份 Year	日期 Date	P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			T_r ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			g_s ($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		
		HT	CK	$\Delta(\%)$	HT	CK	$\Delta(\%)$	HT	CK	$\Delta(\%)$	HT	CK	$\Delta(\%)$
2010	07-28	24.7±0.2a	25.3±0.4a	-2.4	9.5±0.1a	9.3±0.3a	2.4	0.9±0.0b	0.7±0.0a	22.0	275.4±5.5b	233.5±2.0a	17.9
	08-05	21.4±0.1a	24.4±0.3b	-12.3	14.3±0.1a	13.7±0.4a	3.8	0.8±0.0b	0.7±0.0a	24.7	295.3±2.6b	251.3±3.7a	17.5
	08-18	18.0±0.1a	24.8±0.3b	-27.4	14.4±0.4b	13.4±0.3a	7.2	0.7±0.0b	0.5±0.0a	29.3	290.1±6.6b	233.8±5.5a	24.1
2011	07-22	22.6±0.4a	24.5±0.6b	-7.8	14.2±0.2a	12.7±0.5b	11.6	0.9±0.1a	0.9±0.1a	-4.7	287.7±7.5a	278.4±6.1b	3.3
	07-29	28.2±0.6a	29.7±0.5a	-5.2	20.2±0.3a	19.2±0.4b	5.1	1.2±0.1a	1.1±0.0a	14.8	262.9±0.6a	262.8±0.7a	0
	08-12	28.8±0.3a	31.0±0.8a	-7.0	9.4±0.0a	8.1±0.1b	15.7	1.0±0.1a	0.9±0.0a	19.1	285.6±0.5a	282.0±1.2b	1.3
	08-21	22.5±0.1a	22.2±0.4a	1.1	4.5±0.1b	6.3±0.1a	-28.4	0.8±0.0a	0.8±0.0b	7.5	292.9±6.0a	269.1±2.2b	8.8
	08-26	20.6±0.4b	18.8±0.5a	9.5	2.6±0.1a	3.3±0.3a	-20.0	0.5±0.1a	0.3±0.1b	37.6	216.7±9.1b	230.8±2.3a	-6.1

C/N 是棉铃对位叶光合输出潜力的重要指标^[18], “源”端旺盛的碳氮代谢有利于光合产物向“库”端转运及植株干物质积累^[19~20]. 表明增温条件下叶片的光合产物输出能力下降.

2.3 铃期增温对棉株干物质分配的影响

增温条件下, 棉株的总生物积累量下降 10% 左右, 根冠比、根分配系数没有显著变化, 经济系数显著下降, 茎分配系数显著上升(表 5). 铃期增温(日均温 31.1 ~ 35.2 °C)不仅导致棉株总生物积累量下降, 而且会导致生殖器官占总生物量的比例下降. 在营养器官中, 尽管茎杆的绝对生物量变化不大, 但因总生物量的下降, 其所占比例将显著增加. 上述结果表明, 尽管增温条件下冠层的小幅增温(2 ~ 3 °C)不会导致地上部/地下部生长的平衡发生变化, 但会显著改变总生物量的累积及生殖器官/营养器官和

茎/叶生长的平衡.

棉花的经济产量往往与果枝生物量呈正相关, 而果枝生物量是果枝生殖器官(棉铃)和营养器官(果枝茎叶)生物量之和. 在增温条件下, 总果枝分配系数变化不显著, 但生殖器官分配系数和营养器官分配系数呈显著差异; 增温条件下, 生殖器官分配系数下降, 营养器官分配系数上升, 同时生殖器官分配系数/营养器官分配系数低于对照; 而棉株各层次之间的果枝分配系数均有差异, 在上部果枝分配系数中, 生殖器官/营养器官的差异达到最大. 表明铃期增温 2 ~ 3 °C (日均温 31.1 ~ 35.2 °C) 条件下, 棉株果枝营养器官与生殖器官的比例显著上升, 温度增加对下部果枝物质分配的影响较小, 对中、上及顶部果枝物质分配的影响较大(表 6).

2.4 铃期增温对棉花产量和纤维品质的影响

表 4 铃期增温对棉花主茎功能叶光合产物含量的影响

Table 4 Effects of increased temperature in boll period on photosynthesis metabolism of functional leaf on main stem of cotton (2010–2011) ($n=3$)

年份 Year	日期 Date	SAAC ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{DM}$)			STC ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{DM}$)			SSC ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{DM}$)			SC ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{DM}$)			C/N		
		HT	CK	$\Delta(\%)$	HT	CK	$\Delta(\%)$	HT	CK	$\Delta(\%)$	HT	CK	$\Delta(\%)$	HT	CK	$\Delta(\%)$
2010	07-28	14.3±0.4b	15.7±0.4a	-8.9	3.7±0.1a	2.6±0.1b	43.5	36.3±0.7b	43.2±0.5a	-16.0	22.6±0.6b	26.0±0.7a	-13.2	2.5±0.7b	2.8±0.5a	7.7
	08-05	13.6±0.2a	14.5±0.3a	-6.2	4.5±0.1a	3.0±0.1b	51.9	31.2±1.0a	34.8±0.8a	-10.3	20.9±0.5b	24.8±0.5a	-15.8	2.3±0.7b	2.4±0.8a	-4.4
	08-18	11.4±0.1b	12.5±0.2a	-8.8	3.2±0.1a	2.5±0.1b	28.7	28.3±1.0b	33.1±0.5a	-14.5	18.4±1.3a	20.0±0.1a	-8.0	2.5±0.6b	2.6±0.9a	-6.3
2011	08-02	14.4±0.7a	14.6±0.8a	-1.4	2.5±0.1a	1.9±0.2b	36.1	38.6±0.10b	42.3±0.66a	-8.7	20.8±0.6b	25.2±0.2a	-17.4	2.7±0.4b	2.9±0.6a	-7.5
	08-10	12.3±0.3a	12.7±0.2a	-3.2	3.3±0.3a	2.4±0.1b	35.6	36.4±0.11b	40.5±0.39a	-10.1	15.6±0.3b	17.9±0.7a	-12.7	3.0±0.6b	3.2±0.5a	-7.2
	08-15	15.4±0.2a	17.9±0.9a	-14.0	6.7±0.1a	5.2±0.2b	28.9	26.5±0.8b	42.8±1.1a	-38.1	9.7±0.1b	19.1±0.7a	-49.0	1.7±0.5b	2.4±0.3a	-28.0
	08-22	4.3±0.5a	5.1±0.5a	-15.7	0.5±0.2b	1.6±0.2a	-68.7	13.4±1.4b	20.3±1.5a	-34.0	7.0±0.4b	9.1±0.4a	-22.7	3.1±0.8b	4.0±0.5a	-21.7

SAAC: 可溶性氨基酸 Soluble amino acid; STC: 淀粉 Starch; SSC: 可溶性糖 Soluble sugar; SC: 蔗糖 Sucrose; C/N: 碳氮比 Carbon to nitrogen ratio.

表 5 2011 年铃期增温对棉株物质分配的影响

Table 5 Effects of increased temperature in boll period on biomass distribution of cotton in 2011 ($n=5$)

处理 Treatment	总生物量 Biomass (g)		根冠比 Root to shoot ratio ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	分配系数 Distribution coefficient			经济系数 Economic coefficient
	地上部 Shoot	根 Root		茎 Stem			
HT	226.04±23.79b	0.16±0.04a	0.86±0.03a	0.14±0.03a	0.28±0.03b	0.44±0.02b	
CK	251.27±34.04a	0.16±0.01a	0.86±0.01a	0.14±0.01a	0.22±0.02a	0.52±0.02a	
$\Delta(\%)$	-10.04	0.00	0.00	0.00	27.27	-16.11	

表 6 铃期增温对棉花果枝物质分配的影响

Table 6 Effects of increased temperature in boll period on biomass distribution of cotton fruit branch ($n=5$)

生物量 Biomass	处理 Treatment	总果枝 Fruiting branch	下部果枝 Lower fruiting branch	中部果枝 Middle fruiting branch	上部果枝 Upper fruiting branch	顶部果枝 Top fruiting branch
整株	HT	0.67±0.23a	0.22±0.04a	0.20±0.07a	0.14±0.04a	0.11±0.07b
All fruiting branch	CK	0.66±0.15a	0.19±0.04a	0.13±0.04b	0.15±0.04a	0.19±0.07a
生殖器官	HT	0.44±0.16b	0.15±0.02a	0.13±0.06a	0.09±0.03a	0.07±0.05b
Reproductive organ	CK	0.52±0.12a	0.15±0.03a	0.09±0.03a	0.12±0.03a	0.16±0.02a
营养器官	HT	0.23±0.07a	0.07±0.02a	0.07±0.01a	0.05±0.01a	0.04±0.02a
Vegetative organ	CK	0.14±0.04b	0.04±0.01b	0.04±0.01b	0.03±0.01a	0.03±0.01a
生殖器官/营养器官	HT	2.20	1.70	1.92	1.79	1.91
Reproductive/vegetative organ	CK	4.25	2.15	3.91	5.08	3.74

表 7 铃期增温对棉株产量及其构成的影响

Table 7 Effects of increased temperature in boll period on cotton yield and its components ($n=7$)

年份 Year	处理 Treatment	单株籽棉产量 Cotton yield per plant (g)	单株皮棉产量 Lint yield per plant (g)	果节数 Fruit node number	脱落率 Shed rate (%)	铃质量 Boll mass (g)	衣分 Lint percent (%)	总成铃率 Boll retention rate (%)	成铃数 Boll number
2010	HT	46.9b	17.1b	57.3b	0.6a	3.6b	36.4b	0.2a	12.9b
	CK	64.6a	24.7a	65.1a	0.5b	4.2a	38.3a	0.2a	15.2a
	Δ(%)	-27.4	-30.8	-11.9	24.0	-14.4	-4.9	-4.2	-15.2
2011	HT	42.3b	15.2b	50.9b	0.8a	3.6b	35.9a	0.2a	11.8b
	CK	72.1a	25.9a	70.6a	0.7b	4.0a	36.0a	0.3a	17.9a
	Δ(%)	-41.3	-41.3	-28.0	6.8	-10.7	-0.2	-8.0	-34.3

表 8 铃期增温对棉纤维主要品质指标的影响

Table 8 Effects of increased temperature in boll period on cotton fiber quality ($n=7$)

年份 Year	处理 Treatment	长度 Length (mm)	整齐度指数 Uniformity index (%)	马克隆值 Micronaire	伸长率 Elongation rate (%)	断裂比强度 Fiber strength (cN · tex ⁻¹)
2010	HT	27.2±0.6a	84.4±0.8a	4.9±0.3a	6.6±0.2a	28.3±0.7a
	CK	27.9±0.6a	84.4±0.8a	4.6±0.3b	6.6±0.2a	27.2±0.5b
	Δ(%)	-2.3	0.0	7.0	-0.2	4.2
2011	HT	28.2±1.4b	84.4±0.9a	5.0±0.3a	6.6±0.3a	28.8±1.2a
	CK	28.7±0.8a	84.3±0.3a	4.7±0.4b	6.5±0.2a	28.0±0.7b
	Δ(%)	-1.9	0.1	6.2	0.6	2.9

2.4.1 对棉花单株产量及产量构成的影响 增温条件下棉花单株籽棉产量和皮棉产量显著下降, 2010 和 2011 粟棉产量分别下降 27.4% 和 41.3%, 皮棉产量分别下降 30.8% 和 41.3%. 在棉花产量构成因素中, 果节数、成铃数和铃质量均显著下降, 2010 和 2011 年分别下降 11.9%、15.2%、14.4% 和 28%、34.2%、10.7%, 其中下降幅度最大的均为成铃数 (表 7). 表明成铃数是对增温最为敏感的产量构成因素, 本试验增温条件下单株产量的下降主要是由铃数的减少导致的.

2.4.2 对棉纤维主要品质指标的影响 增温条件下两年的试验结果基本一致: 马克隆值和断裂比强度均显著升高, 而长度下降, 整齐度指数和伸长率无显

著变化(表 8). 表明增温对棉纤维品质有一定影响, 但不同品质指标对增温的反应不同. 全球温室效应加剧背景下将可能导致棉纤维长度、马克隆值和断裂比强度发生较大变化, 而整齐度指数和伸长率则变化不明显.

3 讨 论

高温是影响棉花产量和品质的最重要因素之一. Oosterhuis^[17] 试验表明, 棉花经历高温会导致产量下降, 并且认为导致产量下降的根本原因是碳水化合物的供应不足, 碳水化合物的供应不足主要是由于棉株“源”端受到高温的影响. 本试验在铃期增温 2~3 °C 的条件下(铃期日均温 31.1~35.2 °C),

植株已受到显著热胁迫,棉株总干物质累积量下降10%左右,单株皮棉及籽棉产量将下降30%~40%,这与Singh等^[21]的研究结果一致,产量的下降主要表现在棉铃脱落率升高、畸形铃增多和棉铃个体变小。碳水化合物的供应不足对棉纤维品质有一定影响,但棉纤维品质的变化幅度相对较小,且不同棉纤维品质指标对增温的响应程度也存在较大差异:马克隆值和断裂比强度均显著升高,而长度下降,整齐度指数和伸长率则无显著变化。碳水化合物的供应不足也会影响干物质积累和分配:营养器官分配比例增多,生殖器官分配比例相对减少,经济系数随之降低;茎总生物量变化较小但其分配比例有所上升。棉株下部果枝受增温影响较小,中、上及顶部果枝受增温影响较大。

温度升高对“源”端的影响往往表现在3个方面:一是光合作用减弱,光合产物生成能力下降并最终导致植株源能力下降^[22];二是呼吸作用增强,光合产物消耗增加导致的源能力下降^[23~24];三是光合产物转化或转运能力受阻导致的源能力下降^[25]。棉花光合碳同化初级产物代谢主要趋向合成淀粉,并以淀粉的形式暂时存储在叶片中^[26]。本研究增温条件下,叶片的可溶性糖、蔗糖含量降低,淀粉含量上升,其中以蔗糖和淀粉含量的变化幅度最为显著。结合Herold^[27]的蔗糖含量控制光合产物运输速度及Herold和Walker^[28]的菠菜叶片中光合产物输出停滞时淀粉的合成增加的研究结论,本试验结果表明:在增温2~3℃(铃期日均温31.1~35.2℃)条件下,棉花“源”能力的下降主要归因于光合产物向淀粉转化的比例增加和向“库”端的转运能力下降。

本试验分析了全球气候温室效应加剧、未来50年铃期平均温度增加2~3℃条件下,长江流域棉花产量和品质的变化趋势。而增温对植物生长的影响与增温前的基础温度及增温的幅度有关。因此,本研究在对照温度(基础温度)不恒定、增温条件不严格均一的条件下得出的结论还需要通过多年数据进行进一步确认。

参考文献

- [1] Haigler CH, Zhang D, Wilkerson CG. Biotechnological improvement of cotton fiber maturity. *Physiologia Plantarum*, 2005, **124**: 285~294
- [2] Bradow JM, Johnson RM, Bauer PJ, et al. Variability in micronaire: Sources and significance. Proceeding of the Beltwide Cotton Conferences, Memphis, 2001: 477~478
- [3] Yfoulis A, Fasoulas A. Role of minimum and maximum environmental temperature on maturation period of the cotton boll. *Agronomy Journal*, 1978, **70**: 421~425
- [4] Gipson JR, Joham HE. Influence of night temperature on growth and development of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). III. Fiber elongation. *Crop Science*, 1969, **9**: 127~129
- [5] Cox PM, Betts RA, Jones CD, et al. Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2002, **408**: 184~187
- [6] Chen Z-G (陈志刚), Xie Z-Q (谢宗强), Zheng H-S (郑海水). The research of heat-tolerance of different provenances of *Betula alnoides* seedlings. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(11): 2327~2332 (in Chinese)
- [7] Khandekar ML, Murty TS, Chittibabu P. The global warming debate: A review of the state of science. *Pure and Applied Geophysics*, 2005, **162**: 1557~1586
- [8] Berry J, Bjorkman O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, **31**: 491~543
- [9] Lee BH, Won SH, Lee HS, et al. Expression of the chloroplast-localized small heat shock protein by oxidative stress in rice. *Gene*, 2000, **245**: 283~290
- [10] Zhao P (赵平), Sun G-C (孙谷畴), Cai X-A (蔡锡安), et al. Night-time warming increases photosynthetic capacity of sapling leaf of *Cinnamomum burmanni* grown with different nitrogen supplies. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(10): 2703~2708 (in Chinese)
- [11] Guo P-G (郭培国), Li R-H (李荣华). Effects of high nocturnal temperature on photosynthetic organization in rice leaves. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2000, **42**(7): 673~678 (in Chinese)
- [12] Zhang J-W (张吉旺), Dong S-T (董树亭), Wang K-J (王空军), et al. Effects of increasing field temperature on photosynthetic characteristics of summer maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(1): 81~86 (in Chinese)
- [13] Barber J, Andersson B. Too much of a good thing: Light can be bad for photosynthesis. *Trends in Biochemical Sciences*, 1992, **17**: 61~66
- [14] Guo W-S (郭文善), Shi J-S (施劲松), Peng Y-X (彭永欣), et al. Effects of high temperature on photosynthetic products operation in grouting of wheat. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica* (核农学报), 1998, **12**(1): 21~27 (in Chinese)
- [15] Loka DA, Oosterhuis DM. Effect of high night temperatures on cotton respiration, ATP levels and carbohydrate content. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, **68**: 258~263
- [16] Zhao H (赵辉), Dai T-B (戴廷波), Jiang D (姜东), et al. Effects of drought and water logging on flag leaf post-anthesis photosynthetic characteristics and assimilates translocation in winter wheat under high temperature. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(2): 333~338 (in Chinese)
- [17] Oosterhuis DM. Day or night high temperatures: A ma-

- ajor cause of yield variability. *Cotton Grower*, 2002, **46**: 8–9
- [18] Hu H-B (胡宏标), Zhang W-J (张文静), Chen B-L (陈兵林), et al. Changes of C/N ratio in the subtending leaf of cotton boll and its relationship to cotton boll dry matter accumulation and distribution. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2008, **34**(2): 254–260 (in Chinese)
- [19] Nakamura Y, Yuki K, Park SY. Carbohydrate metabolism in the developing endosperm of rice grains. *Plant and Cell Physiology*, 1989, **30**: 833–839
- [20] Gao S-J (高松洁), Wang W-J (王文静), Guo T-C (郭天财), et al. C-N metabolism characteristics in flag leaf and starch accumulating developments in seed during grain filling stage in two winter wheat cultivars with different spike type. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2003, **29**(3): 427–431 (in Chinese)
- [21] Singh RP, Prasad PV, Sunita K, et al. Influence of high temperature and breeding for heat tolerance in cotton: A review. *Advances in Agronomy*, 2007, **93**: 315–385
- [22] Reddy KR, Kakani VG, Zhao D, et al. Interactive effects of ultraviolet- β radiation and temperature on cotton growth, development, physiology and hyperspectral reflectance. *Photochemistry and Photobiology*, 2004, **79**: 416–427
- [23] Xu S (徐胜), He X-Y (何兴元), Chen W (陈玮), et al. Ecophysiological responses of *Festuca arundinacea* to high temperature stress. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(10): 2219–2226 (in Chinese)
- [24] Guo Y-P (郭延平), Zhou H-F (周慧芬), Zeng G-H (曾光辉), et al. Effects of high temperature stress on net photosynthetic rate and photosystem II activity in citrus. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(6): 867–870 (in Chinese)
- [25] Sun X-Z (孙啸震), Zhang L-N (张黎妮), Dai Y-J (戴艳娇), et al. Effect of increased canopy temperature on cotton plant dry matter accumulation and its physiological mechanism. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2012, **38**(4): 683–690 (in Chinese)
- [26] Shen Y-G (沈允钢), Li D-Y (李德耀), Wei J-M (魏家绵), et al. Improving the dry weight method for the determination of photosynthesis applied research. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 1980(2): 37–41 (in Chinese)
- [27] Herold A. Regulation of photosynthesis by sink activity: The missing link. *New Phytologist*, 1980, **86**: 131–144
- [28] Herold A, Walker DA. Transport across chloroplast envelopes: The role of orthophosphate// Giebisch G, Tostesen DC, Ussing HH, eds. *Handbook on Transport*. Berlin: Springer-Verlag, 1979: 411–439

作者简介 贺新颖,男,1987年生,硕士研究生。主要从事作物生理生态研究。E-mail: celerecho@163.com

责任编辑 张凤丽