

江淮地区气温变化对一季中稻产量 和产量构成的影响

马晓群¹, 许莹¹, 赵海燕²

(1 安徽省气象科学研究所、安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031;

2 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 在气候变暖背景下, 最高和最低气温不同的变化特征会对水稻产量和产量构成产生明显影响。根据江淮地区代表性站点近 50 年来一季中稻产量形成阶段最高和最低气温的统计分析表明, 1991 年以来, 最低气温升温速率大于最高气温, 日较差减小, 极端高温事件强度、频率有所增强。利用安徽省农科院 2000~2004 年中稻分期播种试验水稻产量和产量构成数据与产量形成阶段的最高与最低气温不同步长滑动平均值进行动态相关统计分析。结果表明, 气温对水稻产量构成和产量在始穗前和始穗后各有一个负影响时段, 其影响程度始穗前大于始穗后; 对结实率影响最大, 其次是千粒重, 再次是产量; 最低气温的影响大于最高气温。随着滑动步长的增加, 最高气温负影响程度的增大主要体现在抽穗前, 最低气温则贯穿于整个产量形成过程中。

关键词: 气候变暖; 最高温度; 最低温度; 一季中稻; 产量; 产量构成

文章编号: 1000-0585(2008)03-0603-10

1 引言

水稻是我国主要粮食作物, 其播种面积和产量均占我国粮食作物的首位。近十几年来气候变暖对水稻生产的影响得到学术界和政府部门的广泛关注^[1~5]。气候变暖对水稻生产的影响一方面是由于平均气温的升高导致积温增加, 使得水稻发育进程加快, 生育期缩短, 产量降低。另一方面是极端高温事件增加, 危害水稻正常发育进程, 影响产量。其中高温危害导致的减产更值得重视。近年来苏、皖、湘、鄂等地一季中稻和单晚的高温热害问题日益突出^[6~8]。高温热害通常出现在 7 月上旬至 8 月下旬, 此时正是一季稻粒数和粒重形成的关键时期, 造成结实率降低, 大面积空壳减产。高温对水稻的危害有较多的研究成果。通过试验及统计的方法对高温危害指标和危害机理已得到比较一致的结论。水稻在幼穗分化时日平均温度超过 30℃、连续 3 天以上会造成水稻花器发育不全, 花粉发育不良, 活力下降; 抽穗扬花期日平均气温 30℃、最高气温超过 35℃为伤害的临界指标, 持续 3 天以上会影响花粉管伸长和正常散粉, 导致不能授精而形成空壳粒, 结实率降低; 据研究, 在抽穗后 11~15 天为受高温影响粒重降低最大的时期^[6~11]。但在温度等要素对产量及产量构成影响的统计分析中多数采用研究时段的平均值^[12~14], 对最高气温和最低气

收稿日期: 2007-09-22; 修订日期: 2008-03-14

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划课题(2004BA611B-02)、国家科技支撑计划课题(2006BAD04B04)资助。

作者简介: 马晓群(1954), 安徽省芜湖市人, 高级工程师。主要研究方向为农业气象灾害和气候变化对农业的影响。Tel: 0551-2290316

温对水稻影响的差异研究比较少^[15]。由于城市热岛效应、灌溉、土壤荒漠化和土地利用格局的变化等局地因素以及云量增加,辐射减少,温室效应增强等大尺度气候因素的影响,气温随年代的变化趋势表现出明显的不对称性,最低气温上升速率大于最高气温,下降速率慢于最高气温^[16~18]。由于水稻在产量形成过程中的不同阶段对温度的要求和对高温的敏感程度不同,最高和最低气温对水稻的影响机理也存在差异,因此有必要对水稻产量形成关键时段的最和最低气温的变化及影响进行更细致的分析研究。安徽省位于江淮地区,是我国水稻的主产省份之一,上世纪70年代以来稻谷播种面积超过全国平均水平^[19]。近年来一季稻播种面积占水稻总播种面积达到70%以上^[20],在长江中下游稻区具有代表性,其研究结果对研究气候变化对我国粮食安全影响也具有重要意义。

2 资料与分析方法

利用江淮地区代表站(寿县、霍山、六安、滁州、合肥、铜陵、安庆、广德和屯溪9站)建站(上世纪50年代中后期)至2005年一季稻产量形成时期的7月、8月和9月的月平均最高和最低气温资料分析近50年气温的时间变化趋势和波动情况。气温变化趋势利用逐年各月气温距平值进行11年滑动平均分析,以滤去短周期波动,突出长周期的变化趋势,并进行时间趋势的显著性检验。气温波动分析拟将各代表站自建站(上世纪50年代中后期)至2005年近50年按气温时间变化周期分为3个阶段,分别为建站~1975年、1976~1990年和1991~2005年,与平均最高和平均最低气温变化周期的峰谷基本对应。分别计算各阶段7月、8月和9月的日最高气温和最低气温平均值、方差以及大于95%概率动态阈值等统计量。以反映各阶段气温的平均状况、波动情况以及极端高温事件可能出现的强度和频率变化。

试验观测研究内容包括水稻发育期、结实率、千粒重和产量,由安徽省农业科学院水稻研究所完成。观测时间为2000~2004年,共5年。试验地点同上述代表站,分布于北纬29°72′~32°95′,东经116°32′~119°02′的范围,分别位于沿淮、江淮和沿江江南等不同气候类型的稻作区。选择对照品种汕优63作为主要分析品种,多点、多播期共131个样本。汕优63是本区一季中粳主栽品种,对高温、低温的抗逆性较强^[21]。另选择对高温抗性较弱的试验品种渝优10号进行对比分析(22个样本)。

水稻产量由单位面积上的有效穗数、每穗颖花数、结实率和粒重构成。由于有效穗数和每穗粒数在一定范围内可以互相补偿^[22],因此本文主要讨论高温对结实率、千粒重以及产量的影响。影响结实率的敏感时期为出穗前的颖花分化期和减数分裂期及出穗至乳熟盛期,粒重的敏感时期是抽穗前的减数分裂期和抽穗后的灌浆乳熟阶段^[23],因此选择始穗前15天至始穗后20天,即水稻幼穗分化的减数分裂期至灌浆乳熟期作为分析时段。分别以3、5、7、9天为滑动步长,计算各样本该时段最高和最低气温不同步长的滑动平均值,形成滑动平均序列。将这些序列分别与相应的结实率、千粒重和产量进行相关统计计算,并进行显著性检验。分析最高和最低气温不同强度、不同时间长度对一季中稻产量和产量构成的影响差异,揭示一季中稻产量构成及产量对高温的敏感时段和敏感程度。

3 结果与分析

3.1 江淮地区代表站近50年最高气温和最低气温的变化趋势

图1为合肥站7、8、9月最高气温、最低气温和日较差的年代演变趋势,其他各站基

本相似。从图 1 可以看出，最高和最低气温随年代的演变趋势逐月具有不同的特征。最高气温 7 月和 9 月份表现出典型的二次曲线，70 年代中期至 80 年代为低值期，90 年代开始，气温迅速回升，8 月份呈下降趋势；最低气温 3 个月均呈二次曲线形式，90 年代开始迅速上升，其中 7 月最低气温上升的趋势强于最高气温，因此日较差 7、8 月份呈下降趋势，9 月份则反之，自 90 年代后呈上升趋势。经检验，气温的时间变化趋势除 8 月份最低气温为 0.05 显著水平，其余均通过 0.01 显著性水平检验。

年代分阶段的一季中稻产量形成时期（7~9 月份）逐日最高和最低气温变化的统计分析表明（表 1），其平均值、方差以及大于 95% 概率动态阈值等统计量具有明显的年代特征。即使在气温的两个高值时期（1975 年前和 1991 年后），气温统计量也有明显的异同。其差异表现在最高气温各统计量变化规律逐月不同，1991~2005 年与 1975 年前相比，7 月份平均值和动态阈值持平，方差增大；8 月份平均值和动态阈值降低，方差增大；而 9 月份则是平均值和

表 1 安徽省试验点建站（50 年代中期）到 2005 年 7~9 月逐日最高气温、最低气温变化的统计分析表

Tab 1 The changes in daily maximum and minimum temperature of station from July to September in Yangtze Huaihe area from the mid-1950s to 2005										
年代		7 月			8 月			9 月		
		平均值	方差	95% 阈值	平均值	方差	95% 阈值	平均值	方差	95% 阈值
最高气温 (℃)	建站~ 1975 年	32.9	11.4	37.7	32.7	11.1	37.8	27.6	14.3	34.0
	1976~ 1990 年	32.0	13.5	37.2	31.8	10.8	36.7	26.8	13.6	33.0
	1991~ 2005 年	32.8	13.3	37.6	31.5	12.6	36.6	28.3	13.0	34.7
	差值 1	- 0.1	1.9	- 0.1	- 1.2	1.5	- 1.2	0.7	- 1.3	0.7
	差值 2	0.8	- 0.2	0.4	- 0.3	1.9	- 0.1	1.5	- 0.6	1.7
最低气温 (℃)	建站~ 1975 年	24.5	4.2	27.8	23.9	4.6	27.2	19.1	11.7	24.4
	1976~ 1990 年	24.3	4.9	27.9	23.9	4.6	27.3	18.9	9.7	24.1
	1991~ 2005 年	24.9	5.6	28.8	24.0	5.3	27.7	19.7	10.8	25.2
	差值 1	0.4	1.4	1.0	0.1	0.7	0.5	0.6	- 0.9	0.8
	差值 2	0.5	0.7	0.9	0.1	0.7	0.4	0.8	1.1	1.1

注：差值 1 为 1991~2005 年与建站~1975 年的差值；差值 2 为 1991~2005 年与 1976~1990 年的差值。

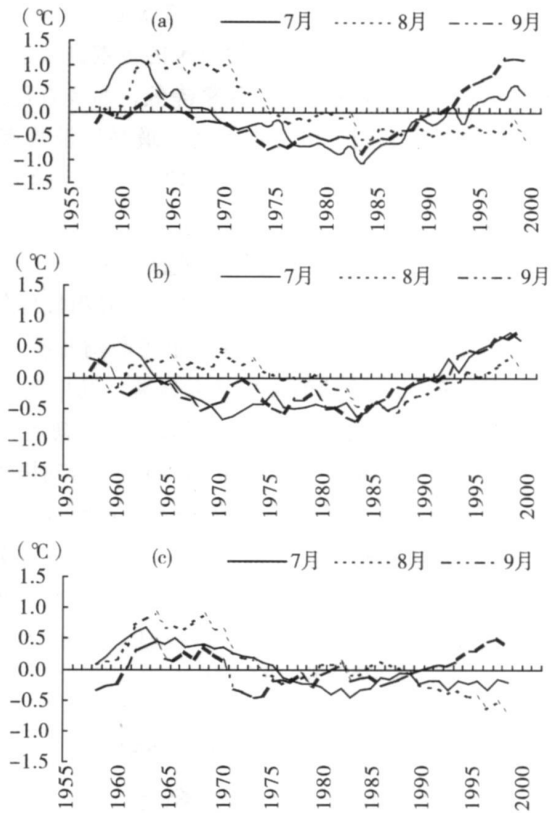


图 1 合肥 1953~2005 年月最高 (a)、最低 (b) 气温和日较差 (c) 11 年滑动平均值的变化

Fig. 1 The change of 11-year moving average of monthly maximum (a), minimum temperature (b) and daily temperature range (c) in Hefei from 1953 to 2005

动态阈值升高，方差减小。而共同点是各月最低气温平均值、方差和动态阈值均升高（仅9月方差除外）。因此90年代以来的极端高温事件与1975年前相比，7月份强度持平，频率增大；9月份强度增强，频率降低；而8月份虽高温强度偏低、但频率增强。综合以上分析，最低气温的年代变化较之于最高气温具有更为一致和显著的升高趋势，1991年以来极端高温事件强度加大、频率增多，并伴随着较高的最低气温，对水稻生长发育和产量的影响更大。

3 2 气温对水稻产量构成和产量的影响

3 2 1 气温对结实率的影响 最高气温和最低气温对两个品种结实率的影响曲线基本相似。有两个主要负影响时段和一个正影响时段。从3天滑动平均结果看，最高气温对汕优63的负影响在始穗期前4~15天显著，其中始穗前5~14天达极显著水平，始穗后16~17天为另一显著负影响时段；正影响为始穗后7~8天和11~13天。对渝优10号的负影响为始穗前6~15天，其中前11~14天达到极显著水平，始穗后13~16天为另一负影响时段，其中14~15天为极显著相关，正影响时段在始穗后6~7天。两品种与平均最低气温的相关系数在整个阶段都为负值，汕优63在始穗前15天至始穗后5天，渝优10号在始穗前3~15天负影响显著，其中绝大部分时间极显著，另一影响时段分别为始穗后15~19天和12~17天，其中15~18天、13~16天极显著（图2）。因此，气温对两品种结

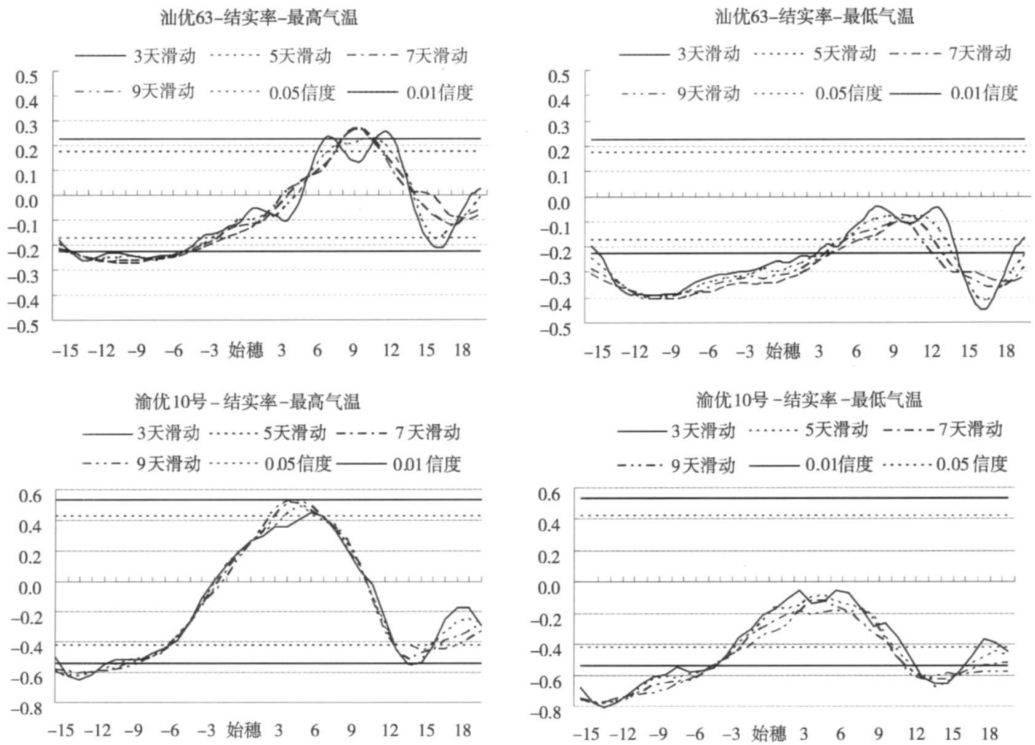


图2 汕优63和渝优10号始穗前15天至始穗后20天最高温和最低气温不同滑动步长平均值和结实率相关系数变化曲线

Fig. 2 The correlation coefficient curves of moving average of different step-lengths in daily maximum and minimum temperature and corresponding seed-setting rate of Shanyou 63 and Yuyou 10 from 15 days before heading to 20 days start heading

实率的影响基本一致，在始穗之前的时段负影响显著而持久，而在始穗后灌浆阶段负影响时间短。其中最低气温的负影响程度明显大于最高气温。

3 2 2 气温对千粒重的影响 与结实率相似，气温对千粒重的负影响也有两个主要时段。以 3 天滑动平均为例，最高气温对汕优 63 的第一个负影响时段出现在始穗前 3~ 8 天，另一段为始穗后 16~ 17 天；正影响出现时段出现在始穗后 3~ 12 天，其中 5~ 12 天影响极显著。对渝优 10 号的负影响只出现在始穗前 2~ 6 天，其中 3~ 5 天极显著，正影响为始穗后 6~ 8 天。最低气温对汕优 63 的负影响一段为始穗前 14 天至始穗后 1 天，其中始穗前 13 天至始穗当天相关极显著，另一段为始穗后 14~ 19 天，其中 14~ 18 天相关极显著。正影响为始穗后的 7~ 8 天；对渝优 10 号的负影响出现在始穗前 2~ 8 天（其中 2~ 6 天相关极显著）和始穗后 15~ 16 天，没有显著正影响时段。

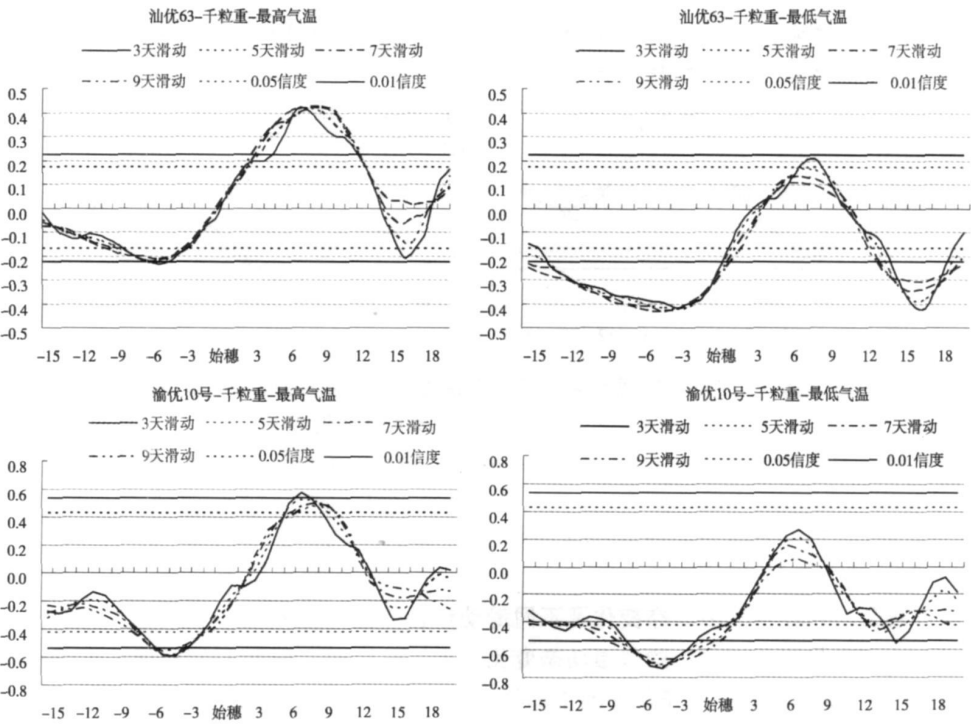


图 3 汕优 63 和渝优 10 号始穗前 15 天至始穗后 20 天最高和最低气温不同滑动步长平均值和千粒重相关系数变化曲线

Fig 3 The correlation coefficient curves of moving average of different step-lengths in daily maximum and minimum temperature and corresponding 1000-grain weight of Shanyou 63 and Yuyou 10 from 15 days before heading to 20 days after heading

3 2 3 气温对产量的影响 气温对产量的影响两品种差异较大。以 3 天滑动平均为例，最高气温对汕优 63 没有显著负影响时段，正影响出现在始穗后 7~ 13 天，其中 8~ 12 天极显著，而渝优 10 号在始穗前 4~ 5 天为显著负相关，始穗后 5~ 9 天显著正相关，其中 6~ 8 天相关极显著。最低气温对汕优 63 的正负影响均未达显著水平，而渝优 10 号在始穗前 1~ 6 天相关显著，其中 3~ 6 天极显著，始穗后正负相关均不显著。高温对产量的影响程度明显小于对结实率和千粒重的影响。

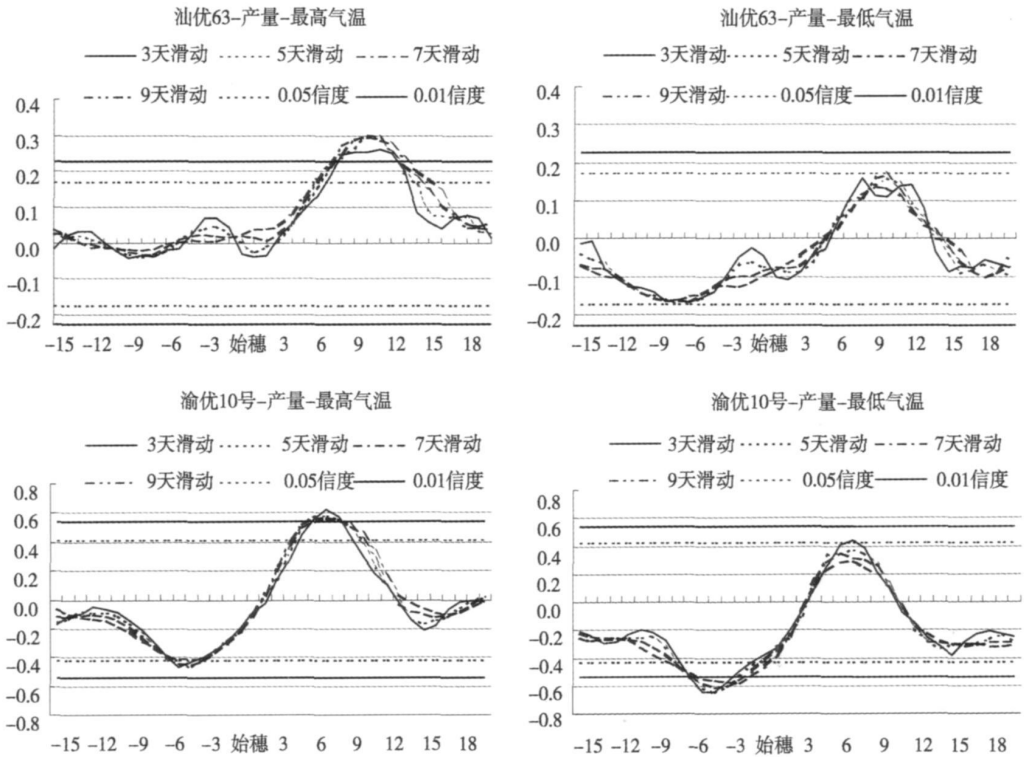


图 4 汕优 63 和渝优 10 号始穗前 15 天至始穗后 20 天最高和最低气温不同滑动步长平均值和产量的相关系数时间变化曲线

Fig 4 The correlation coefficient curves of moving average of different step lengths in daily maximum and minimum temperature and corresponding yield of Shanyou 63 and Yuyou 10 from 15 days before heading to 20 days after heading

3 3 产量形成过程中气温动态变化及不同滑动步长的影响分析

3 3 1 水稻产量形成过程中的气温动态变化 上述气温对产量和产量构成的影响分析是建立在水稻产量形成对温度条件的要求和样本中气温动态变化基础上的。在水稻产量形成过程中,逐日气温的变化如在水稻发育对温度的要求的适宜范围内,则对产量呈正效应;反之,如果偏离了水稻的适宜温度要求,则表现为负效应,偏离得越远,负效应越大。在水稻对温度条件的敏感时段尤为明显。

试验样本全生育期处于 4 月底至 10 月上旬,始穗期绝大部分处于 8 月上旬后期至 8 月下旬前期,因此始穗前 15 天至后 20 天大体处于 7 月下旬至 9 月中旬前期,自北向南提前。统计了该时段的逐日最高和最低气温的极大值、平均值和大于临界温度(最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 、最低气温 $\geq 26^{\circ}\text{C}$)高温出现频率,分别反映气温的极端强度、平均强度和高温出现的集中程度。可以看出(图 5),始穗前气温极端强度明显超出水稻幼穗分化的减数分裂和开花对高温的承受能力,且高温出现集中,对产量构成负影响显著,随着气温极值降低,高温频率降到 10% 以下,气温对产量构成的负影响开始降低,并逐步呈现正效应。但随着大于临界温度的高温频率抬头(又恢复到 10% 以上),而此时水稻对温度的要求比前期偏低,因此温度对产量构成的影响又成为负效应。通过对气温和产量构成的时间动态

分析可以得出，气温对产量构成的影响与水稻与温度的要求以及高温频率和强度在时间上的动态变化密切相关。试验样本高温出现强度大，频率高的时段正是水稻产量和产量构成对高温的敏感时段，因此负影响显著。

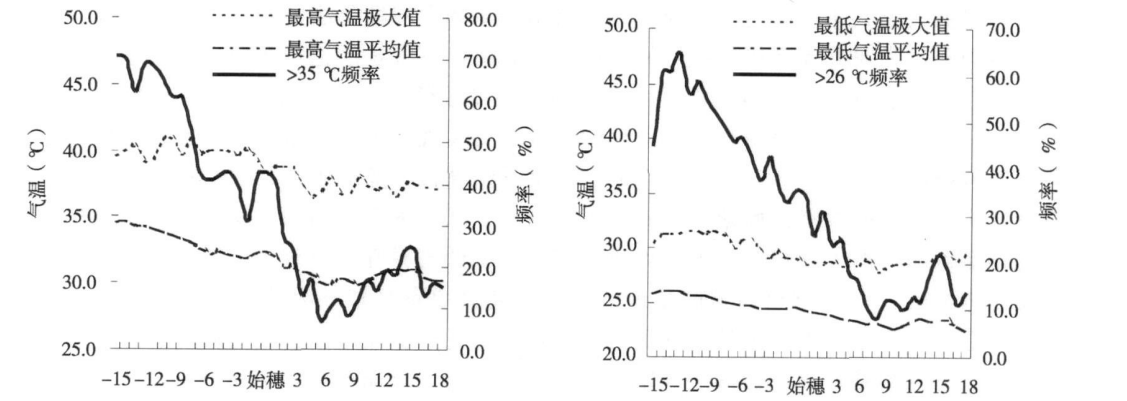


图5 2000~ 2004年试验样本始穗前15天至始穗后20天日最高和最低气温的时间分布

Fig 5 The time distribution of daily maximum and minimum temperature of samples from 15 days before heading to 20 days after heading from 2000 to 2004

3.3.2 气温不同滑动步长的影响分析 分析最高和最低气温不同滑动步长的平均值对产量和产量构成的影响，可看出二者对产量形成影响的不同途径。同样，这种影响也受到产量形成阶段的气温动态变化制约，导致最高和最低气温不同滑动步长平均值对水稻产量构成和产量的影响在始穗前后具有不同特征。始穗前处于7月下旬至8月中旬阶段，正是高温强度大、频率高的时期，此时，随滑动步长增加，最高和最低气温平均最大值下降幅度小，最小值上升幅度大，最低气温相对升高，高温强度变化不大，高温持续时间延长。因此，随着滑动步长的增加，气温负影响效应增强，最低气温表现更为明显。始穗后高温强度和频率有所下降。随着滑动步长的增加，高温强度进一步下降，最高气温最大值降到35℃以下，但最低气温的下降幅度小于最高气温，气温日较差减小，此时最高和最低气温影响表现出差异，随着滑动步长的增加最高气温正影响有所加强，负影响有所减弱；最低气温正影响有所减弱，负影响有所加强。

表2 汕优63始穗前15天与始穗后20天最高和最低气温不同滑动步长平均值的变化特征

Tab 2 The variation characteristics of moving average of different step-lengths in daily maximum and minimum temperature from 15 days before heading to 20 days after heading of Shanyou 63

滑动步长	最高气温						最低气温					
	始穗前0~15天			始穗后1~20天			始穗前0~15天			始穗后1~20天		
	最大值	最小值	较差	最大值	最小值	较差	最大值	最小值	较差	最大值	最小值	较差
3天	36.7	29.2	7.4	35.0	25.8	9.2	27.4	22.8	4.5	26.1	20.4	5.7
5天	36.2	29.9	6.3	34.3	26.8	7.5	27.1	23.1	4.0	25.6	21.0	4.6
7天	35.9	30.2	5.6	34.0	27.5	6.5	26.9	23.4	3.5	25.3	21.3	4.0
9天	35.5	30.5	5.0	33.6	27.8	5.8	26.5	23.2	3.3	25.1	21.3	3.8
3天~9天	-1.1	1.3		-1.4	2.1		-0.8	0.4		-1.0	0.9	

4 讨论

气温对水稻产量和产量构成的影响程度,从时间上看,始穗前大于始穗后;从气温要素看,最低气温大于最高气温。前者是由水稻的生物学特性所决定的,水稻在颖花分化至减数分裂阶段是对外界环境最敏感的时期,而后者目前肯定的论据还较少,但也有一些类似的结论^[14, 15]。在极端高温条件下,空气相对湿度较低($< 60\%$),会造成水稻生理代谢失调、光合能力减弱,最高气温对水稻的影响主要表现在影响花粉管伸长和正常散粉,导致不能授精而形成空壳粒,结实率降低,持续时间越长,危害越重,因此最高气温对水稻产量影响最显著的时期在始穗前,而且随着滑动步长加长影响加重,始穗后的影响较弱。与高温导致减产的生理机制认识已很清楚相比,最低气温升高导致水稻减产的生理机制目前尚不太清楚^[15],目前已清楚的是最低气温升高会导致水稻呼吸消耗增强,净光合产物减少,造成秕粒率增加、千粒重降低而减产,因此对产量构成和产量的影响贯穿于整个产量形成过程的始终,无论始穗前或始穗后,随着滑动步长加长负影响均加重。联系到气候变暖过程中最低气温增加幅度大于最高气温这一事实,加强最低气温升高对水稻产量构成影响机理研究的需求十分迫切,而作物生长模型应更精确的模拟气候变化情景下夜间气温升高对作物生理进程的影响^[15]。

5 结论

(1) 江淮一季稻主产区代表站气候变化分析结果表明,近 50 年来在一季中稻产量形成的 7~9 月份最高和最低气温具有不同的变化趋势。1991 年以来,最高气温 7 月和 9 月呈上升趋势、8 月份呈下降趋势,但最低气温各月均呈显著上升趋势,日较差 7~8 月份随年代减小,9 月份有增大趋势,极端高温事件强度、频率有所增强。

(2) 试验数据分析表明,高温对汕优 63 和渝优 10 号两品种产量构成和产量影响的规律基本一致。对渝优 10 号的影响大于汕优 63。结实率是对高温最敏感的产量构成,两品种影响程度接近;其次是千粒重,品种间表现出差异;差异最大的是产量,与品种对高温的抗逆性有关,产量高低还与有效穗数、每穗颖花数等产量构成有关,因此产量对温度的敏感性与结实率和千粒重对温度的敏感性是否一致,品种间存在差异。

(3) 最高和最低气温滑动步长增加对水稻产量和产量构成的影响始穗前和始穗后具有不同特征。始穗前随着滑动步长的增加,气温负影响效应增强,最低气温表现更为明显。始穗后随着滑动步长的增加最高气温正影响有所加强,负影响有所减弱;最低气温正影响有所减弱,负影响有所加强。反映了高温强度和持续时间对水稻产量和产量构成的综合影响以及最高气温和最低气温对产量影响的机理差异。

(4) 在气候变暖背景下,江淮一季稻产量形成阶段最低气温随年代升高显著,而最低气温对中稻产量构成和产量的影响在程度和持续时间方面均大于最高气温,这种现象值得关注,需要加强人工控制试验和作物模型相结合的方法进行最低气温升高对水稻产量构成影响的机理研究,为采取应对气候变化的适应性对策提供依据。

致谢: 本文试验数据由安徽省农业科学院水稻研究所提供,特表谢意!

参考文献:

- [1] 张宇,王馥棠. 气候变暖对中国水稻生产可能影响的研究. 气象学报, 1998, 56(3): 370~ 375.
- [2] 石春林, 金之庆, 葛道阔, 等. 气候变化对长江中下游平原粮食生产的阶段性影响和适应性对策. 江苏农业学报, 2001, 17(1): 1~ 6
- [3] 严力蛟, 全为民. 水稻生长动态模拟研究进展. 生态学报, 2002, 22(7): 1143~ 1151.
- [4] 刘桃菊, 殷新佑, 戚昌瀚, 等. 气候变化与水稻生长发育及产量形成关系的模拟研究. 应用生态学报, 2005, 16(3): 486~ 490
- [5] 谢立勇, 林而达, 赵海燕, 等. 基于改进的 CTGC 系统下不同 CO₂ 浓度对水稻生长发育的影响. 中国农学通报, 2006, 22(8): 139~ 143
- [6] 曾汉来, 卢开阳, 贺道华. 中籼杂交水稻新组合结实性的高温适应性鉴定. 华中农业大学学报, 2000, 19(1): 1~ 4
- [7] 蒋之坝, 黄仲青, 杨惠成. 关于江淮稻区 2003 年早中稻花期热害的调查研究. 安徽农业科学, 2004, 32(4): 607~ 609
- [8] 盛绍学, 马晓群, 陈晓艺. 2003 年罕见高温对农业生产的影响, 气象, 2004, 30(suppl): 封二~ 封三.
- [9] 谭中和, 蓝泰源, 任昌福, 等. 杂交籼稻开花期高温危害及对策研究. 作物学报, 1985, 11(2): 103~ 108
- [10] Matsui L, Omasa K, Horie T. High temperature-induced spikelet sterility of Japonica rice at flowering in relation to air temperature, humidity and wind velocity conditions. Japanese Journal of Crop Science, 1997, 66: 449~ 455
- [11] 王亚莉, 贺立源. 气象条件对杂交水稻汕优 63 产量构成因子的影响. 中国农学通报, 2006, 22(8): 206~ 210
- [12] 陆魁东, 申建斌, 黄晚华, 等. 湖南一季晚稻抽穗扬花期间高温分析及对种植布局的建议. 湖南农业科学, 2005, (4): 28~ 30
- [13] 赵海燕, 姚凤梅, 张勇, 等. 长江中下游水稻开花灌浆期气象要素与结实率和粒重的相关性分析. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1765~ 1771.
- [14] 许吟隆, 赵海燕, 姚凤梅, 等. 长江中下游高温事件对中稻产量构成要素影响的统计分析. 中国农业气象, 2005, 25(增刊): 20~ 23
- [15] Shaobing Peng, Jianliang Huang, John E. Sheehy. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. PNAS, 2004, 101(27): 9971~ 9975
- [16] Peiling Lu, Qiang Yu, Jiandong Liu, *et al.* Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 138: 120~ 131.
- [17] Easterling D R, Horton B, Jones P D, *et al.* Maximum and minimum temperature trends for the globe. Science, 1997, 277(18): 364~ 367.
- [18] Karl T R, Jones P D, Knight R W, *et al.* A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. B Am Meteorol Soc, 1993, 74(6): 1007~ 1023
- [19] 国家统计局农村社会经济调查总队. 新中国五十年农业统计资料. 北京: 中国统计出版社, 2000. 275~ 277.
- [20] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴. 2001~ 2005. 北京: 中国统计出版社, 2001~ 2005
- [21] 张桂莲, 陈立云, 雷东阳. 水稻耐热性研究进展. 杂交水稻, 2005, 20(1): 1~ 5
- [22] 曾翔, 李阳生, 李达模, 等. 影响杂交水稻结实率的因素分析及其关键调控技术. 湖南农业科学, 2003, (4): 28~ 31.
- [23] 南京农学院, 江苏农学院, 等. 作物栽培学(南方本). 上海: 上海科技出版社, 1979. 32~ 33

Impacts of maximum or minimum temperature on yield and yield components of single-season Indica rice in Yangtze-Huaihe area

MA Xiao-qun, XU Ying, ZHAO Hai-yan

(1 Anhui Institute of Meteorological Science, Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Hefei 230031, China;

2 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory for

Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Under the background of climate warming, characteristics of maximum and minimum temperature variation may markedly affect yield and yield components of rice. Maximum or minimum temperatures in the stage of yield formation during recent 50 years in the Yangtze-Huaihe area were analyzed. The result showed that the temperature-rising rate of minimum temperature has been higher than that of maximum temperature, with a decreasing diurnal temperature range (DTR), and an increasing intensity and frequency of extremely hot weather since 1991. The dynamic analysis of daily maximum or minimum temperature in different step-lengths with rice yield and yield components were made, using experimental data of Anhui Academy of Agricultural Sciences during 2000~2004. The result indicates that there are two negative effect stages of temperature on rice and rice yield before tasseling and after tasseling. And the temperature effect is most obvious on seed-setting rate, secondly on 1000-grain weight and thirdly on yield. The effect of minimum temperature on rice is greater than that of maximum temperature. With the increase of moving step-length in temperature, the increase of negative effect on maximum temperature occurs before tasseling, while the negative impacts of minimum temperature appear throughout yield formation process.

Key words: climate warming; maximum temperature; minimum temperature; single-season Indica rice; yield; yield components