

长江中下游地区高温热害对水稻的影响^{*}

张 倩, 赵艳霞, 王春乙

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 以长江中下游地区的气象资料和水稻生长发育观测资料为基础, 应用 WOFOST 作物模型模拟了不同发育时段高温热害对早稻和中稻生长发育及产量的影响, 评估了长江中下游地区高温热害对水稻的影响程度。研究表明: 高温主要影响早稻和中稻的孕穗、开花和灌浆, 受高温影响减产程度依次为灌浆期最大, 开花期次之, 孕穗期最小; 当高温强度和持续日数增加到某一数值, 中稻开花期高温减产开始大于灌浆期。对于典型高温年份, 无论早稻还是中稻减产率均高达 30% 以上, 为重度灾害, 而且中稻的最大减产率一般要大于早稻。

关键词: 高温热害; 水稻; WOFOST 模型; 长江中下游; 影响评估

中图分类号: X43; P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)04-0057-06

近百年来, 全球气候呈现出以变暖为主要特征的显著变化, 全球变暖已经是不争的科学事实^[1]。政府间气候变化专门委员会第一工作组发布的第四次评估报告指出, 过去 100 年(1906-2005 年), 全球地表平均气温升高了 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。未来 50~100 年全球和我国的气候将继续向变暖方向发展^[3]。预计到 21 世纪末, 全球地表平均温度还将上升 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4]。气候变化诱发的自然灾害的增加可能会使我国农业生产变得更不稳定, 粮食安全变得更脆弱^[5]。我国长江流域及其以南地区, 从 1999 年至今, 几乎每年都会出现持续 10 d 以上的强度大、范围广的极端高温天气。预计在未来全球气候变暖背景下, 我国多数大陆地区在 21 世纪极端高温、热浪等事件的发生频率很可能继续增加^[6]。因此深入研究水稻热害发生的规律及其对气候变化、农业措施改进的响应、确定灾害风险指标, 并及早采取适宜措施对水稻热害进行防御, 对保障我国未来粮食安全意义重大^[7]。

1970 年以来, 水稻热害问题已有较多报道。目前, 国内外学者对水稻高温热害生理生态机制方面的研究已经取得了较好的成果, 积累了丰富的水稻热害理论与调控技术。研究认为高温导致水稻不结实的关键期是在花期前后^[8-9], 光合作用

则是对高温最敏感的过程之一^[10]。高温主要从两方面影响水稻的生长发育过程: 一方面高温伤害水稻开花受精过程, 导致空粒率增加; 另一方面, 高温伤害水稻的灌浆过程, 导致秕粒率增加, 千粒重下降^[11-12]。

1 材料与方法

1.1 基本资料

本文研究区域为长江中下游地区湖北、湖南、安徽、江西、江苏及浙江六省。气象资料为研究区域内 91 个气象台站的观测数据(1961-2006 年), 主要包括: 逐日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、日降水量、2 m 高处风速和水汽压。作物资料为 63 个农业气象台站的观测数据(1981-2006 年), 主要包括水稻品种熟性、主要发育期和生物量数据。土壤资料为研究区域土壤的相关物理性质、肥力特性等数据。

1.2 作物模型及验证

本文选用荷兰瓦赫宁根大学开发研制的作物模型 WOFOST7.1。作物模型生长发育参数是通过实验室或田间的控制试验获得的, 因此要根据实际观测资料, 先确定水稻发育期, 再由发育期确定有效积温, 得到水稻生长发育的初始参数。

^{*} 收稿日期: 2011-05-06

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY200806008); 国家科技支撑计划课(2011BAD32B01)

作者简介: 张倩(1984-), 女, 天津人, 硕士, 主要从事农业气象灾害研究。E-mail: zhqiane@163.com

通讯作者: 赵艳霞(1968-), 女, 研究员, 主要从事农业气象灾害监测评估、气候变化对农业影响评估、作物模式等方面的研究。

E-mail: zyx@cams.cma.gov.cn

首先分别计算出早稻和中稻的平均播种、出苗、开花和成熟日期(儒略日),再根据发育期计算出播种至出苗、出苗至开花、开花至成熟的有效积温,将求出的平均值作为模型初始参数。由于生物量资料有限,特选取资料相对较长和全面的湖南常德(早稻)和安徽合肥(中稻)两站水稻发育期及生物量资料作为参数调试时的对比试验数据。

为使模拟结果与实际值更加接近,可利用模型中的试错校正工具 RERUN 进行多次试调,最后确定参数取值。播种到出苗所需有效积温: TSUMEM(早稻) = 31.1, TSUMEM(晚稻) = 60.7; 出苗到开花所需有效积温 TSUM1(早稻) = 998.5, TSUM1(晚稻) = 1 800.3; 开花到成熟所需有效积温: TSUM2(早稻) = 421.2, TSUM2(晚稻) = 460.7。应用同样方法确定其他参数取值,得到出苗时临界最低温度: TBASEM = 10, 出苗时的最高有效温度: TEFFMX = 30, 作物初始干物质重: TDWI = 40, 出苗时的叶面积指数 LAIEM = 0.15。

利用湖南常德 1997、1998 和 2001 年的资料对模型进行检验,图 1a~b 分别为水稻地上部分干重和穗干重的模拟与观测值之间的关系。由图可以看出,WOFOST 模型模拟的水稻干物质重与观测值吻合度较好,均通过了较高的显著性水平(显著水平 $p < 0.001$),说明模型可以较好地模拟水稻干物质的累积和产量。

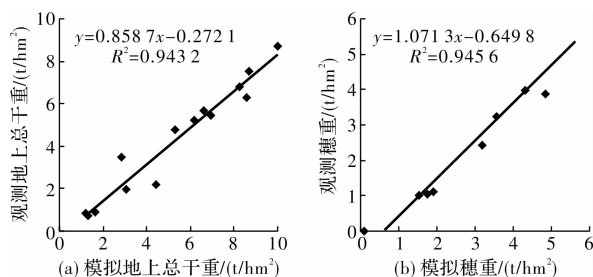


图1 水稻干物质模拟与观测值关系

1.3 减产率

产量变化率可以用来表示实际气象条件下作物产量偏离平均气象条件下作物产量的波动幅度值。其表达式为:

$$D_t = \frac{Y_t - \bar{Y}_t}{\bar{Y}_t} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: D_t 表示第 t 年的产量变化率(%)。 Y_t 表示实际气象条件下第 t 年的模拟产量 (kg/hm^2)。 \bar{Y}_t 表示平均气象条件下第 t 年的模拟产量 (kg/hm^2)。当 $D_t > 0$ 时,为增产率,表示该地区该年份没有发

生灾害;当 $D_t < 0$ 时,为减产率,表示该地区该年份发生了灾害。

1.4 高温热害指标选取

在农业气象工作中,通常以日平均气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 或日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 作为判别水稻开花结实期受害的临界温度指标。本文高温热害等级划分为^[13]:

日平均气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 或日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 持续日数大于 3 d 为水稻轻度高温热害;

日平均气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 或日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 持续日数大于 5 d 为水稻中度高温热害;

日平均气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 或日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 持续日数大于 8 d 为水稻重度高温热害。

1.5 模拟方案设计

许多研究表明,水稻营养生长阶段短期的高温危害对水稻产量影响较小,孕穗期、抽穗扬花期和灌浆成熟期是水稻对高温比较敏感的几个发育时期^[14-18]。因此本文主要研究水稻孕穗期、抽穗开花期以及灌浆结实期三个发育阶段内高温对水稻结实的影响。

对现有作物资料进行统计并结合前人研究,早稻孕穗期和抽穗开花期适宜温度为 27°C , 灌浆结实期为 26°C ; 中稻孕穗期、抽穗开花期和灌浆结实期适宜温度分别为 27°C 、 26°C 和 25°C 。在应用 WOFOST 模型模拟高温对水稻产量影响时,根据水稻的发育进程,首先确定孕穗期、抽穗开花期以及灌浆结实期这三个发育期所处的日序,模拟这三个发育阶段在适宜温度下的正常产量。然后以各发育阶段的开始日序为起始点,在早稻和中稻 1 个、2 个和 3 个发育期中将温度分别从适宜温度升至 30°C 、 31°C 、 32°C 、 33°C 、 34°C 、 35°C 、 36°C ,再模拟 1 d、持续 3 d 以及持续 5 d 高温影响下的水稻产量,计算各种情况下的水稻减产率。

在开展区域高温热害影响评估时,首先计算研究区域各台站最低和最高温度的多年平均值,得到各台站平均气象条件,分别利用平均天气条件和实际天气条件驱动 WOFOST 模型,逐台站模拟早稻和中稻产量,计算出各台站减产率,开展水稻热害区域影响评估。

2 结果与分析

2.1 同一强度不同持续日数高温对水稻产量的影响

在模拟高温对水稻影响时,选取生物量资料

较完整且温度接近常年的 1997 年湖南常德、江苏赣榆分别作为早稻和中稻的模拟代表台站。

图 2 所示为早稻和中稻各生育期日平均温度达 30 °C 持续不同天数时的减产情况。由图可知, 单一发育阶段受高温(30 °C)影响时, 除早稻 1 d 受高温影响情况外, 早稻和中稻减产程度均为灌浆期最大, 开花期次之, 孕穗期最小。当两个发育期同时遭遇高温, 以开花期和灌浆期受高温影响, 早稻和中稻产量损失最为严重。此外, 随着高温持续日数的增加, 早稻和中稻各发育阶段产量减少随之增加, 一般中稻的减产幅度要略大于早稻。其中, 1 d 高温天气对早稻和中稻各发育期产量的影响较为接近, 产量损失都在 5% 左右。三个发育期同时发生高温减产最为明显, 早稻减产最大可达 14% 左右, 中稻减产最大在 19% 左右。

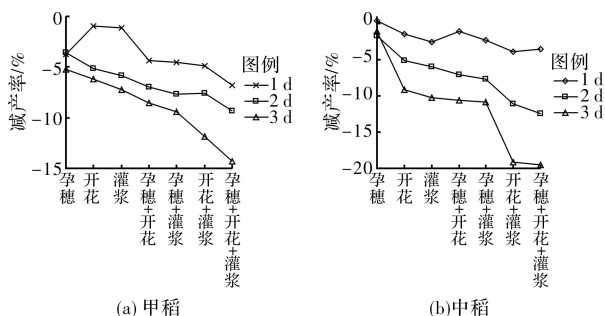


图 2 早稻(常德, 1997)和中稻(赣榆, 1997)各发育期平均温度达 30 °C 持续不同天数时的减产率

(注: 为了图示清楚, “抽穗开花期”在图中简化为“开花”, “灌浆结实期”简化为“灌浆”, 下同。)

图 3 所示为温度达 35 °C 持续不同天数时早稻和中稻减产率。可以看出, 单一发育期发生 35 °C 高温, 早稻减产情况仍为灌浆期最大, 孕穗期最小。中稻在 1 d 高温天气的影响下, 各发育阶段减产情况与早稻近似, 当高温持续日数达 3 d 开始, 中稻减产程度变为开花期最大, 灌浆期次之, 孕穗期最小, 所以高温持续日数越长, 对中稻花期的影响越为显著。当两个发育期同时受高温影响仍为开花期和灌浆期均遭遇高温时产量损失最为严重。对于不同持续日数的高温, 当 1 d 高温达 35 °C 时, 早稻和中稻各发育期减产比较接近, 均在 10% 左右, 随着高温持续日数增加, 各发育期减产幅度也呈增加趋势。三个发育期同时遭遇连续 5 d 达 35 °C 高温, 早稻减产最大达 37% 左右, 中稻减产最大为 45% 左右。

2.2 同一持续日数不同强度高温对水稻产量的影响

图 4 分别为连续 3 d 出现不同程度高温天气

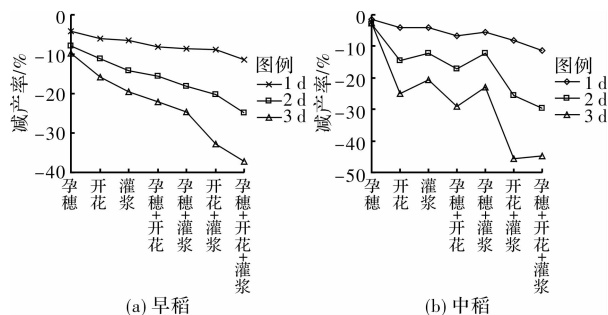


图 3 早稻(常德, 1997)和中稻(赣榆, 1997)各发育期平均温度达 35 °C 持续不同天数时的减产率

时, 早稻和中稻的产量损失随日平均温度的变化。由图可知, 早稻各发育阶段受同一持续日数(3 d)高温影响, 减产情况也为灌浆期最大, 孕穗期最小。中稻在高温强度小于 34 °C 时, 各发育阶段减产情况与早稻近似, 当高温强度达 34 °C 时, 中稻开花期减产程度开始大于灌浆期, 孕穗期减产仍为最小, 因此强度较大的高温对中稻开花期的影响更为严重。当两个发育期同时遭遇高温时, 对于早稻和中稻仍以开花期和灌浆期叠加发生热害, 产量损失最为严重。在同一持续日数高温影响下, 随着高温强度的增加, 早稻和中稻减产幅度逐渐增大, 且各强度高温影响下的减产率曲线变化趋势比较接近, 波动不大。多个发育期同时受高温胁迫, 温度达 36 °C 时, 产量损失最为严重, 早稻减产可达 29% 左右, 中稻减产可达 30% 左右

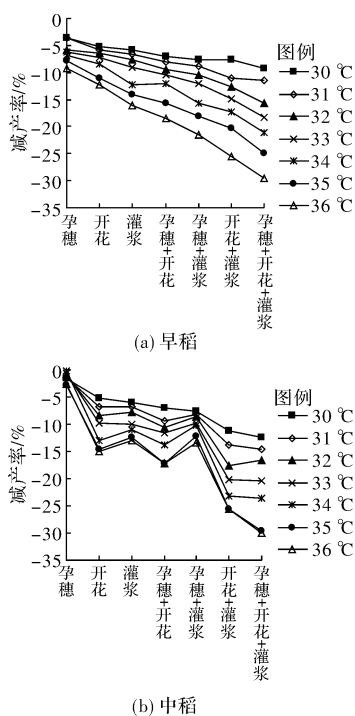


图 4 早稻(常德, 1997)和中稻(赣榆, 1997)各发育期发生连续 3 d 不同程度高温时的减产率

图5所示为持续日数为5 d时,不同日平均温度下早稻和中稻的产量损失变化。早稻各发育阶段减产率的变化情况与连续3 d高温时比较近似,对孕穗期影响最小,灌浆期影响最大。中稻各发育阶段发生高温,仅对孕穗期影响小,开花和灌浆期影响均较大,在温度小于34℃时,开花期减产略小于灌浆期,大于34℃时,灌浆期减产略大于开花期。两个发育期同时遭遇高温时,花期和灌浆期叠加发生热害,早稻和中稻产量损失最大。随着高温强度的增加,早稻和中稻减产幅度随之增大。各发育期同时受高温胁迫,当高温达36℃时,早稻减产在44%左右,中稻减产在45%左右。

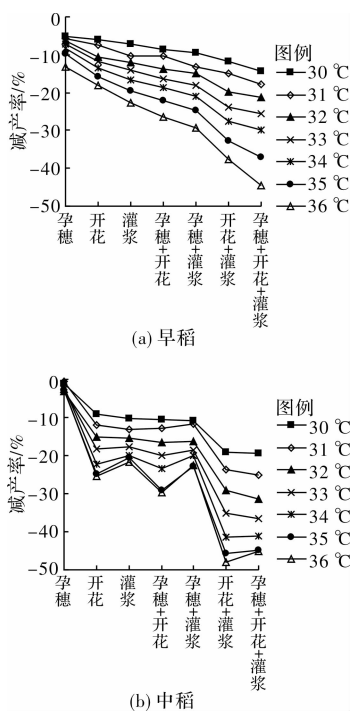


图5 早稻(常德,1997)和中稻(赣榆,1997)各发育期发生连续5 d不同程度高温时的减产率

2.3 同一地点不同时段高温对早稻和中稻产量的影响

图6所示为赣榆站早稻和中稻在相同生长条件受连续3 d 35℃高温影响时的产量损失情况。当孕穗期日平均温度连续3 d达35℃时,早稻、中稻产量损失均小于5%。当抽穗开花期受高温影响,早稻减产8.5%,中稻减产14.4%。当灌浆结实期遭遇高温,早稻和中稻产量受损均为12.1%。由图中曲线对比情况可以看出,中稻的抽穗开花期较早稻更易受高温影响,减产较早稻明显,其他各发育阶段早稻和中稻减产情况比较接近。当三个发育期同时遭遇高温时,中稻产量损失要大于早稻。

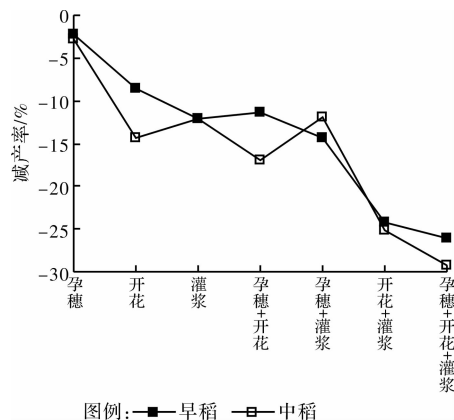


图6 早稻和中稻各发育期连续3 d 35℃高温时的减产率(赣榆,1997)

2.4 长江中下游地区典型高温年份水稻高温热害空间分布

根据前人研究,选取1967、1978、1994以及2003年这几个典型的高温年份。对这些年份的水稻产量进行模拟,根据减产情况绘制水稻的灾害等级分布图。由于版面所限,本文仅以1994年、2003年两年为例,对高温热害的影响进行分析。

图7所示为1994年水稻的灾害等级分布,高温对早稻产量的影响范围明显大于中稻。图7a中,早稻除在长江中下游地区的湖北南部、湖南和江西北部部分地区有中度灾害外,在三省的其余大部分地区及研究区域东部的安徽、江苏、浙江全省均为重度高温热害,产量损失最大达32%左右。图7b中,中稻在研究区域南部的湖南、江西大部分地区为轻度灾害或无灾区,而在研究区域北部的湖北、安徽和江苏全省则主要发生了重度灾害,减产最大达46%。

图8所示为2003年水稻的灾害等级分布,2003年的高温对中稻的影响程度明显大于早稻。图8a中,早稻受高温影响减产区域不大,仅在长江中下游东南部分地区有减产出现,江西大部主要为轻度灾害,浙江西部为中度灾害,而在该省东部地区则主要为重度高温灾害,早稻减产最大可达31%左右。图8b中,中稻除在研究区域北部有小范围轻度灾害和无灾区域外,整个南部大部分地区包括湖北、安徽和江苏北部大部以及湖南、江西和浙江全省均为重度高温热害区,产量损失最多在55%以上,是所研究的几个高温年中中稻减产最为严重的一年。

由以上各图可以看出,在典型高温年份,无论早稻还是中稻产量均受到了高温天气较大程度的影响,产量损失最大均达30%以上,在高温热

害的区域分布中, 重度高温热害在总的灾害分布

范围中分布区域也较显著。

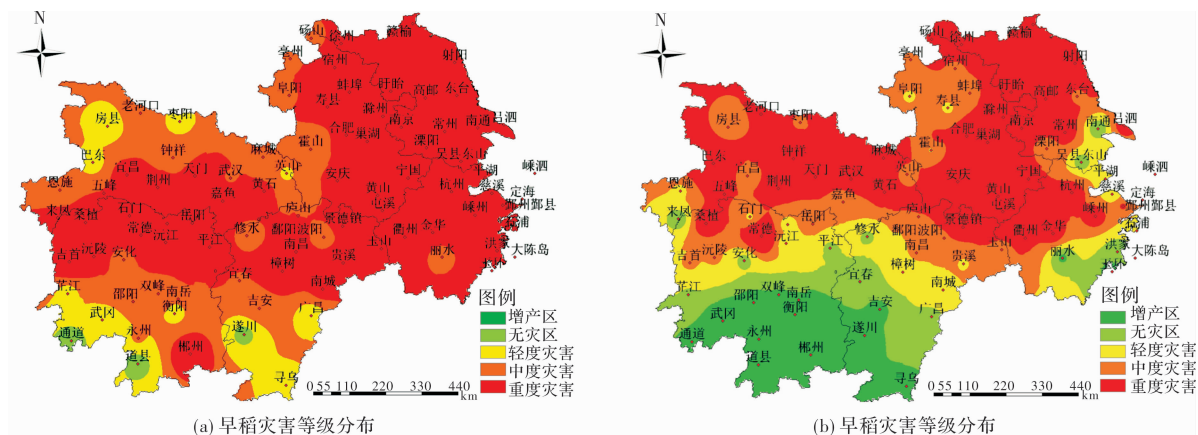


图7 1994年长江中下游地区早稻(a)和中稻(b)灾害等级分布

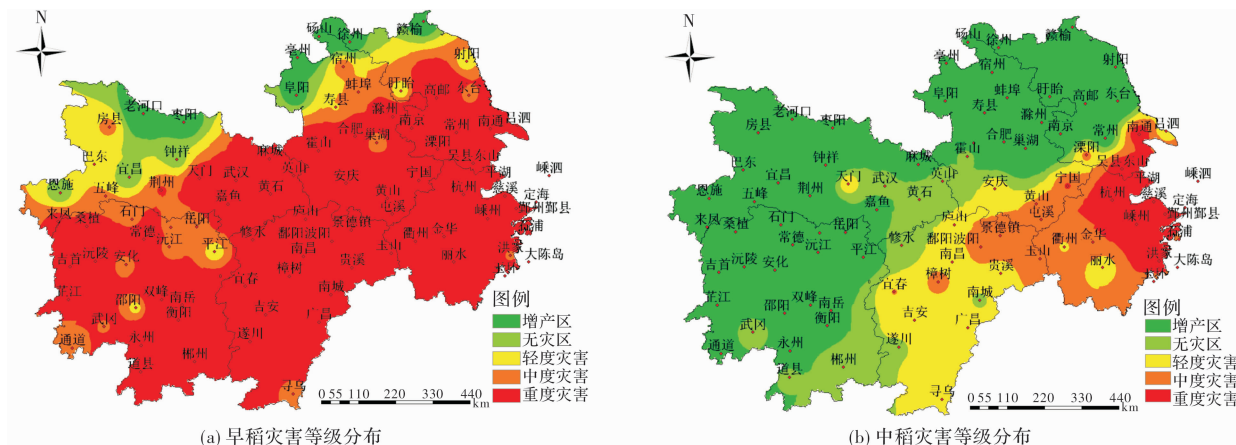


图8 2003年长江中下游地区早稻(a)和中稻(b)灾害等级分布

3 结论与讨论

(1) 在不同强度和持续日数高温影响下, 早稻减产程度依次为灌浆期最大, 开花期次之, 孕穗期最小; 而对于中稻来说, 高温发生并不显著时, 各发育期产量损失与早稻类似, 也为灌浆期最大, 孕穗期最小, 但当高温强度及持续日数达较高值时, 中稻开花期的产量损失就开始大于灌浆期。说明高温对中稻开花期危害更大。

(2) 对于早稻和中稻来说, 孕穗期受高温影响较小, 1 d 的高温天气引起的各发育期减产幅度均不大。随着高温天气强度和持续日数的增加, 各发育阶段产量损失相应增加。

(3) 在高温热害典型年份, 无论早稻还是中稻产量都有明显减少, 产量损失最高均达 30% 以上。在相同高温年份, 中稻的最大减产率值一般要大于早稻。因此总的来说, 高温热害对中稻产量的不利影响略大于早稻。

(4) 本文在模拟高温热害对水稻各发育期的影响时发现, 当温度达 37 °C 或是高温持续天数达 7 d 开始, 模型对水稻干物质累积和产量的模拟结果不合常理。如图 9 所示, 中稻各发育期遭遇 38 °C 高温时, 产量损失要小于遭遇 37 °C 高温影响下的情况。说明 WOFOST 模型尚不具备对于极端气象条件下作物生长发育进行模拟的能力, 有待进一步对其改进。

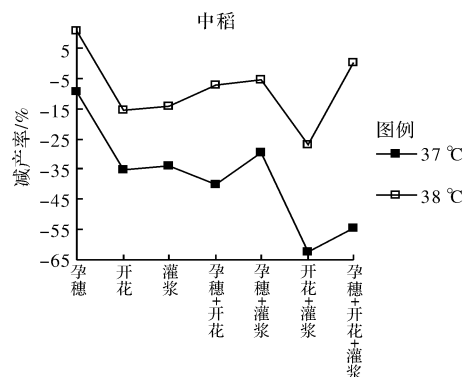


图9 中稻(赣榆, 1997)各发育期发生连续 7 d 不同程度高温时的减产率

(5)目前,应用 WOFOST 模型模拟水稻方面的相关研究较少,模拟过程中未考虑种植制度以及管理措施等的改进,简化了实际情况,且模型并未很好地考虑水稻的移栽过程。

(6)此外,长江中下游地区各种农业气象灾害并非独立发生,可能同时存在几种灾害,有时各种灾害彼此相互作用。因此,今后研究单一农业气象灾害时,应该尽量分离其他灾害的影响,找出各种灾害的影响权重。

(7)本研究的主要意义在于提出用作物模型开展灾害影响评估的步骤和方法,文中定量的评估结论尚待今后进一步证实。

参考文献:

- [1] 秦大河,陈振林,罗勇,等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge and New York: Cambridge University. Press, 2007: 996.
- [3] 秦大河,罗勇. 全球气候变化的原因和未来变化趋势[J]. 科学对社会的影响, 2008(2): 16-20.
- [4] 刘长友,陈爱丽,巴图,等. 从 IPCC 第四次评估报告看全球气候变化及防灾减灾对策[J]. 防灾科技学院学报, 2008, 10(4): 140-141.
- [5] 周曙东,周文魁. 气候变化对长三角地区农业生产的影响及对策[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(4): 307-310.
- [6] 史军,丁一汇,崔林丽. 华东地区夏季高温期的气候特征及其变化规律[J]. 地理学报, 2008, 63(3): 237-246.
- [7] 郑建初,张彬,陈留根,等. 抽穗期高温对水稻产量构成要素和稻米品质的影响及其基因型差异[J]. 江苏农业学报, 2005, 21(4): 249-254.
- [8] 许传祯,元生朝,蔡士玉. 高温对杂交水稻结实率的影响[J]. 华中农学院学报, 1982(2): 1-8.
- [9] 唐永红,张嵩午,高如嵩,等. 温度对稻米品质的时段效应分析[J]. 中国农业气象, 1997, 18(1): 9-12.
- [10] Berry J A, Bjorkman O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1980, 31: 491-543.
- [11] 农学系水稻栽培课题组. 高温对杂交水稻开花结实的影响[J]. 西南农学院学报, 1984(1): 25-30.
- [12] 杨晓春,林瑞坤,吴振海. 水稻高温热害的研究进展[J]. 福建农业科技, 2006(2): 68-69.
- [13] 高素华,王培娟. 长江中下游高温热害及对水稻的影响[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [14] 朱昌兰,肖应辉,王春明,等. 水稻灌浆期耐热害的数量性状基因位点分析[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(2): 17-121.
- [15] 杨太明,陈金华. 江淮之间夏季高温热害对水稻生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(27): 8530-8531.
- [16] 张桂莲,陈立云,雷东阳,等. 水稻耐热性研究进展[J]. 杂交水稻, 2005, 20(1): 1-5.
- [17] 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[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1765-1771.
- [18] 程方民,钟连进,孙宗修. 灌浆结实期温度对早籼水稻籽粒淀粉合成代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 492-501.

Study on the Impact of High Temperature Damage to Rice in the Lower and Middle Reaches of the Yangtze River

Zhang Qian, Zhao Yanxia and Wang Chunyi

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on meteorological data of the lower and middle reaches of Yangtze River and the growth period data of rice, this paper uses crop model WOFOST to simulate the impact of high temperature in different growth periods on early season rice and mid-season rice, and to assess their yield variation. The results show that high temperature usually affects booting, flowering and filling. For the three developmental stages of rice, when the same intensity hot damage occur, the maximum level of production reduction is filling stage, the second is flowering stage and the minimum is booting stage. When the intensity and day numbers of duration of high temperature increase to a value, mid-season rice yield reduction due to flowering stage high temperature will be greater than filling stage. For a typical high-temperature year, yield reduction rate of both early season rice and mid-season rice is as high as 30% or over which is defined as severe disasters. Generally, in the same high temperature year, the maximum yield reduction rate of mid-season rice is higher than that of early season rice.

Key words: high temperature damage; rice; WOFOST; lower and middle reaches of Yangtze River; impact assessment