

减数分裂期高温对水稻穗粒数影响的定量分析

石春林¹ 骆宗强² 江敏² 侍永乐³ 李映雪³ 宣守丽¹ 刘杨¹ 杨沈斌³ 于庚康⁴

(¹江苏省农业科学院 农业信息研究所/农业部长江下游农业环境重点实验室, 南京 210014; ²福建农林大学 作物学院, 福州 350002; ³南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044; ⁴江苏省气象服务中心, 南京 210008)

An Quantitative Analysis of High Temperature Effects During Meiosis Stage on Rice Grain Number per Panicle

SHI Chunlin¹, LUO Zongqiang², JIANG Min², SHI Yongle³, LI Yingxue³, XUAN Shouli¹, LIU Yang¹, YANG Shenbin³, YU Gengkang⁴

(¹Institute of Agricultural Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agricultural Environment in Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; ²College of Crop Sciences, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China; ³College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; ⁴Meteorological Service Center of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China)

Abstract: 【Objective】 Grain number per panicle is one of yield component factors for rice. In order to analyze the effect of high temperature on the grain number per panicle and develop the quantitative model to evaluate it, 【Method】 a pot experiment under different high temperatures and durations during meiosis stage was conducted with Liangyoupeijiu and Nanjing 45 as materials in 2014—2015. 【Result】 Grain number per panicle decreased with the rising temperature and prolonging duration exposed to high temperature. The relationship between grain number per panicle and temperature could be expressed with a quadratic equation. The terminal time of grain number per panicle sensitive to high temperature was five days before heading date. The validation result showed the model could better simulate the effect of high temperature during meiosis stage on the grain number per panicle with $rRMSE$ 0.094 and 0.085 for Liangyoupeijiu and Nanjing 45, respectively. 【Conclusion】 This study would help improve the quantitative effect of high temperature on rice growth duration.

Key words: rice; meiosis stage; high temperature; grain number per panicle; quantitative model

摘要: 【目的】穗粒数是水稻产量构成因子之一。为明确减数分裂期高温对水稻穗粒数的可能影响, 构建其定量估算模型, 【方法】于 2014—2015 年以两优培九和南粳 45 为供试材料, 于减数分裂期设置不同强度和持续时间的高温处理, 以自然无高温环境为对照, 分析了减数分裂期不同高温强度和高温持续时间对穗粒数的影响, 建立了减数分裂期高温与穗粒数的定量关系, 最后根据温度日变化特征, 构建了自然环境下的减数分裂期高温对穗粒数的定量影响算法。【结果】减数分裂期高温对穗粒数的影响程度与高温强度、持续时间有关。同样高温条件下, 穗粒数随高温持续天数增加呈指数减少; 日相对穗粒数随温度增加而减少, 可用二次曲线进行描述。穗粒数对高温敏感的终止时间大约为抽穗前 5 d。利用 2015 年试验资料对上述模型进行了检验, 两优培九和南粳 45 穗粒数模拟值的相对均方根差为 0.094 和 0.085, 说明模型可很好地模拟减数期高温对穗粒数的影响。【结论】对完善高温对水稻生长过程的定量影响具有重要作用。

关键词: 水稻; 减数分裂期; 高温; 穗粒数; 定量模型

中图分类号: S511.01; S313

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)06-0658-07

随着全球气候变暖, 高温热害已成为我国水稻生产的重要灾害之一^[1-2]。2003 年和 2013 年长江中下游地区发生了大范围的高温, 对当地的水稻生产

带来了重大损失^[3-4]。有关高温对水稻生长的影响已有较多研究, 大多侧重于分析高温对颖花败育的机理^[5-8]、基因型响应差异^[9-10]、高温对光合作用、物

收稿日期: 2017-03-16; 修改稿收到日期: 2017-05-19。

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306035); 国家自然科学基金资助项目(31671574, 31401279); 江苏省农业科技自主创新资金资助项目[CX(14)2113]; 福建农林大学科技创新专项基金资助项目(CXZX2016165)。

质分配及产量构成的影响等^[11-13]。在高温对水稻生长的定量研究方面, 以往研究大多侧重于分析高温与结实率的关系^[14-16]。研究者根据高温与结实率的定量关系, 结合温度日变化特征、群体颖花开放特征和花时规律等建立了水稻高温败育模型^[17-19]。虽然已有不少研究发现, 减数分裂期(或孕穗期)高温不仅影响结实率, 还对穗粒数、千粒重等产量构成因子造成影响^[12,20-21], 作者等建立了减数分裂期高温对水稻颖花结实率的定量影响模型^[22], 但目前对减数分裂期高温对穗粒数的定量影响方面还缺乏相关研究。本研究在控制试验的基础上, 分析了减数分裂期高温与穗粒数的影响特征, 构建了减数分裂期高温对穗粒数的定量影响模型, 旨在为完善高温定量影响模型、高温损失评估奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计及测定

试验于 2014 和 2015 年在江苏省农业科学院试验基地进行。供试品种为两优培九和南粳 45。两年均于 5 月 7 日浸种, 12 日播种于大田, 6 月 10 日

选择长势一致的苗移栽至塑料桶中。两优培九每桶 2 穴、南粳 45 每桶 3 穴, 每穴单株苗, 每个品种移栽 150 桶, 共 300 桶。塑料桶高 23 cm, 直径 22 cm, 移栽前每桶中装入 6.5 kg 水稻土, 施 3.5 g 复合肥(N、P、K 各含 15%)。移栽 7d 后每桶施尿素 0.45 g(蘖肥), 倒 4 叶期和倒 2 叶期每桶分别施尿素 0.35 g(穗肥)。管理措施按南京地区水稻高产栽培方案进行。

于水稻减数分裂期(2014 年为剑叶抽穗一半时、2015 年为剑叶完全抽出时)选取长势一致的植株, 利用人工气候箱(2 台 RXZ500 型、2 台 RXZ1000 型智能多段编程人工气候箱)进行不同高温水平和持续天数处理试验。两年高温强度一致, 均为 35℃、38℃和 41℃, 高温持续天数 2014 年为 1 d、3 d、5 d、7 d, 而 2015 年设为 1 d、3 d、6 d。选择每天 10:00—15:00 高温处理 5 h, 人工气候箱内湿度设置为 85%, 光照设置为 100% lx。每个处理 2 桶, 处理结束后移至自然环境。以自然环境条件为对照(CK)。成熟时测定各处理及对照每穗穗粒数。高温处理时间及对照抽穗期如表 1。

高温处理前后自然环境日最高温度和日均相对湿度变化特征如图 1 所示。从图中可以看出, 本

表 1 减数分裂期高温处理时间及对照抽穗期

Table 1. High temperature treatment time during meiosis stage and heading date for CK.

| 品种 Material | 高温持续天数 Duration / d | 高温处理时间(月-日) Start-stop time of high temperature treatment(Month-Day) | | 对照抽穗期 Heading date of CK | |
|------------------------|------------------------|---|-------------|-----------------------------|-------|
| | | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 |
| 两优培九 Liangyoupeiuiu | 1 | 08-13-08-13 | 08-11-08-11 | 08-27 | 08-20 |
| | 3 | 08-13-08-15 | 08-11-08-13 | | |
| | 5(2014), 6(2015) | 08-13-08-17 | 08-11-08-16 | | |
| | 7 | 08-13-08-19 | | | |
| 南粳 45 Nanjing 45 | 1 | 08-09-08-09 | 08-14-08-14 | 08-24 | 08-23 |
| | 3 | 08-09-08-11 | 08-14-08-16 | | |
| | 5(2014), 6(2015) | 08-09-08-13 | 08-14-08-19 | | |
| | 7 | 08-09-08-15 | | | |

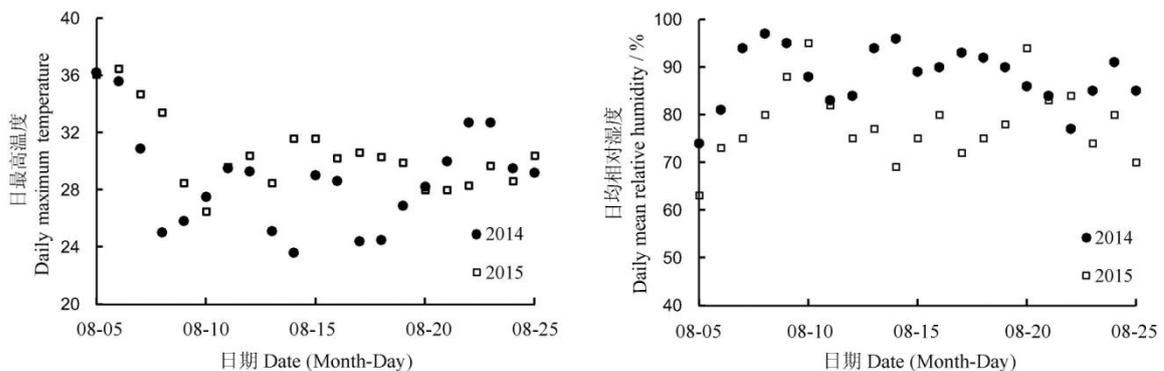


图 1 2014—2015 年高温处理期间自然环境日最高温度和日均相对湿度变化特征

Fig. 1. Daily maximum temperature and relative daily mean humidity of natural environment in 2014—2015.

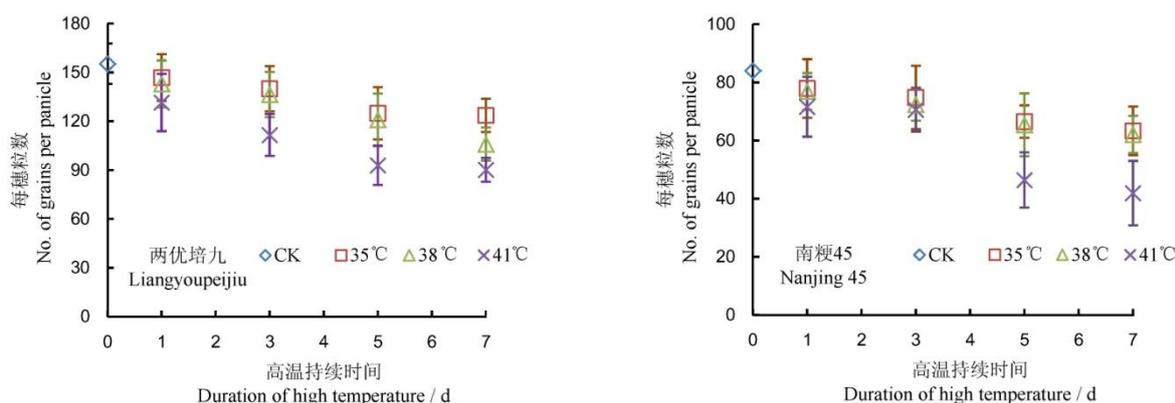


图2 减数分裂期高温对不同水稻品种穗粒数的影响

Fig. 2. Effects of high temperature at the meiosis stage on grain number per panicle of two rice cultivars.

表2 两个品种在不同温度处理下穗粒数与高温持续天数拟合方程的参数 a 、 b 及 R^2 值Table 2. Parameter a , b , and R^2 values of the fitting equations under different temperatures.

| 温度 Temperature/°C | 两优培九 Liangyoupeijiu | | | 南粳 45 Nanjing 45 | | |
|----------------------|---------------------|----------|---------|------------------|----------|---------|
| | a | b | R^2 | a | b | R^2 |
| 35 | 0.98754 | -0.03151 | 0.91719 | 0.97232 | -0.03817 | 0.96581 |
| 38 | 1.03890 | -0.05202 | 0.89389 | 0.99642 | -0.05532 | 0.99070 |
| 41 | 0.99856 | -0.06597 | 0.85639 | 0.98988 | -0.09562 | 0.94214 |

试验高温处理期间(8月中旬)自然环境日最高温度一般在 32°C 以下, 即可以认为对照不受高温影响。高温处理期间自然环境相对湿度一般在 70%~90%, 而人工气候箱高温处理下的相对湿度设置为 85%, 因此可以认为处理与对照下的湿度对穗粒数无影响。严格来说, 人工气候箱光照强度明显低于 CK, 但考虑到每天高温处理仅为 5 h, 且减数分裂期的生长中心仍以茎叶为主, 因此认为人工气候箱的弱光环境相对高温对水稻穗粒数的影响要低得多。

1.2 模型建立与检验

利用 2014 年试验数据分析温度与穗粒数的定量关系, 建立高温对穗粒数的定量影响模型, 2015 年的数据对上述定量关系进行检验。检验时采用国际上常用的相对均方根差($rRMSE$)^[17]对模拟结果进行分析。 $rRMSE$ 的算法如下:

$$rRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} / \overline{OBS} \quad ; \quad 1)$$

式 1) 中, OBS_i 为观测值; SIM_i 为模拟值; n 为样本容量, \overline{OBS} 为观测值的平均值。一般来说, $rRMSE \leq 10\%$, 表示模拟效果很好, $10\% < rRMSE \leq 20\%$ 表示模拟效果较好, $20\% < rRMSE \leq 30\%$ 表示模拟效果一般, $rRMSE > 30\%$ 表示模拟效果较差。

$rRMSE$ 值越小, 表明模拟值与观测值的一致性越好, 定量关系的模拟结果越准确、可靠。

2 结果与分析

2.1 减数分裂期高温与穗粒数的相关性分析

减数分裂期不同强度及持续时间的高温对穗粒数的影响如图 2 所示。随着温度升高, 高温持续时间延长, 两个品种水稻穗粒数均呈减少趋势。在 41°C 高温处理 1 d 时, 水稻穗粒数减少至对照的 85%, 处理 7 d 时, 两优培九和南粳 45 的穗粒数分别为对照的 50%、55%。随着高温持续天数增加, 穗粒数呈指数下降的趋势。由于实际穗粒数受气候条件、管理水平、种植方式等多种因素制约, 研究中为消除气候条件、种植方式等因素的影响, 用相对穗粒数来分析高温的影响。相对穗粒数为高温处理下的穗粒数与 CK 的比值。因而, 可用式 2) 描述不同温度下相对穗粒数与高温持续天数的关系:

$$RGNP = a \times \exp(b \times DT); \quad 2)$$

式 2) 中, a 、 b 为拟合参数; $RGNP$ 为相对穗粒数; DT 为高温持续天数。表 2 为两个品种在各处理温度下的 a 、 b 及其 R^2 值。

由表 2 可见, 不同高温处理下, 参数 a 相对比较稳定, 约为 1; b 均随着温度升高而逐渐减小。

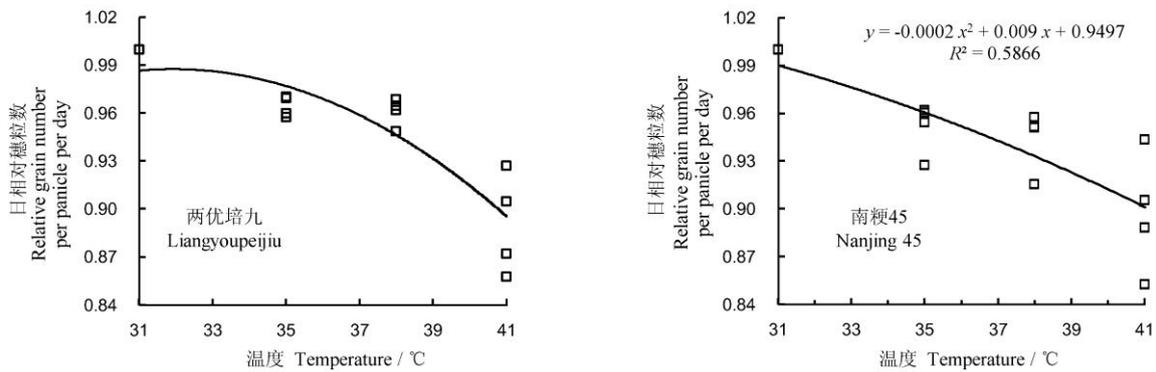


图3 不同温度与日相对穗粒数的关系
 Fig. 3. Relationship between relative grain numbers per panicle per day and temperature.

研究中假定减数分裂期每日高温对穗粒数的影响一致，考虑到颖花退化的不可逆性，若1 d 高温引起颖花退化百分率为 $x\%$ ，则 N d 高温影响下的穗粒数为对照条件下穗粒数与 $(1-x\%)^N$ 的乘积。因此， $\sqrt[2]{RGNP}$ 为高温处理下的日相对穗粒数，进而可根据不同高温处理的相对穗粒数，建立 $\sqrt[2]{RGNP}$ 与温度的关系(图3)。

从图3可以看出，随温度升高，日相对穗粒数呈下降趋势，其关系可用二次曲线拟合，即

$$DRGNP = \begin{cases} 1 & T \leq T_c \\ 1 - a \times (T - T_c)^2 & T > T_c \end{cases} ; \quad (3)$$

式3)中 a 、 T_c 为品种参数，体现了减数分裂期穗粒数对高温的响应程度。其中 T_c 为品种穗粒数受高温影响的临界上限。研究中两个品种的 a 、 T_c 参数基本一致，约为0.001和31℃。

式3)中参数 a 是一天5小时高温对穗粒数的影响因子。同样假设每小时高温的影响程度是相同的，即可得1 h 高温对穗粒数的影响因子：

$$RGNP_h = \begin{cases} 1 & T \leq T_c \\ 1 - a \times (T - T_c)^2 / 5 & T > T_c \end{cases} ; \quad (4)$$

2.2 温度日变化模式下的高温影响计算

生产实际中，由于减数分裂期每日最高温度存在变化，每日温度也存在日变化，因此需先进行温度日变化模式下日高温影响因子的计算，再进行减数分裂期高温影响因子的估算。

研究中认为颖花的退化是不可逆转的，即在减数分裂期某日因高温导致退化的颖花在未来的发育中不可能再成为正常颖花。因此，全减数分裂期的高温穗粒数影响因子可由下式估算：

$$Y = \prod_{i=t_0}^{t_1} Y_i ; \quad (5)$$

式中， Y 为减数分裂期高温对相对穗粒数的总影响， t_0 、 t_1 为减数分裂期颖花穗粒数对高温敏感的起止时间， Y_i 为逐日高温对穗粒数的影响因子。

同样假定前一时刻退化的颖花在以后的发育中不能成不正常颖花，可根据温度日变化规律^[17]得到日高温影响因子，如下式：

$$Y_i = \prod_{h=0}^{23} RGNP_h ; \quad (6)$$

式中， h 为一日中的时间； $RGNP_h$ 为第 h 时刻的相对穗粒数因子，由式4)结合温度日变化特征得到。

2.3 定量关系检验

采用2015年资料检验，对上述定量关系进行了检验。检验结果如表3，总体来看，两优培九和南粳45对应的根均方差(RMSE)均为12.1和6.7，相对均方根差分别为0.094和0.085，说明模拟效果很好。从表中还可以看出，1 d 和3 d 高温下的模拟值与实测值基本一致，而6 d 时的模拟误差相对较大，其可能原因高温处理时间不同导致的。2014年从叶龄余数为0.5时进行高温处理，而2015年是从叶龄余数为0时进行高温处理。也就是说虽然两年高温处理都处于减数分裂期，但颖花的发育状态仍存在一定差异，2015年的颖花高温处理时更接近于抽穗期，在处理时间较长的情况下，有可能后面的1~2 d 对高温响应不敏感。穗粒数对高温敏感的终止期大约在抽穗前5 d。

曹云英等^[20]以双桂1号和黄华占为材料，于孕穗期(始穗前10 d)进行每天9 h 的35℃高温处理，

表3 穗粒数观测值与模拟值比较

Table 3. Comparison between observed values and simulated values of grain number per panicle.

| 处理 Treatment | | 两优培九 Liangyoupei9 | | 南粳 45 Nanjing 45 | |
|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 温度 Temperature/°C | 持续天数 Duration/d | 实测值 Observed value | 模拟值 Simulated value | 实测值 Observed value | 模拟值 Simulated value |
| 35 | 1 | 143.4 | 146.9 | 89.8 | 91.3 |
| | 3 | 142.9 | 136.8 | 81.9 | 84.4 |
| | 6 | 133.2 | 123.0 | 78.9 | 75.0 |
| 38 | 1 | 139.4 | 142.2 | 88.8 | 88.4 |
| | 3 | 135.9 | 123.9 | 80.6 | 76.7 |
| | 6 | 125.2 | 100.8 | 70.3 | 61.9 |
| 41 | 1 | 130.0 | 135.8 | 83.9 | 84.8 |
| | 3 | 114.1 | 107.9 | 72.1 | 67.7 |
| | 6 | 94.7 | 76.4 | 65.0 | 48.3 |

持续 9 d, 穗粒数分别下降 13% 和 16%。依据本研究得到的穗粒数与温度的响应关系, 考虑到穗粒数对高温敏感的终止期, 利用两优培九的响应参数, 得到模拟的下降百分率约为 14.6%, 与实测值基本接近。

3 讨论

本研究在控制试验的基础上, 分析了穗粒数与减数分裂期高温的定量关系, 建立了减数分裂期高温对穗粒数的定量模型, 独立试验数据检验结果表明, 模型可较好地模拟减数分裂期高温对穗粒数的影响。该研究对完善高温对水稻产量构成因子的定量影响和水稻生长模型具有重要作用。

IPCC 第五次评估报告指出, 随着全球气候的变暖, 高温热浪发生的频率和强度可能更高^[1]。而高温发生的时期通常为 7—8 月, 时值长江中下游单季早稻和中稻的高温敏感期(减数分裂期和开花期), 因此加强高温热害损失评估和风险分析对合理安排品种类型和种植方式具有重要意义。

在当前气象灾害呈增多增强的大背景下, 研究气象灾害的预警监测与定量评估技术对提升农业生产水平、推进农业灾害保险业务具有重要作用^[23]。近年来基于生长模型的灾害损失评估已有初步研究^[24-25], 但由于现有模型^[26-28]对灾害过程的定量影响考虑还不够全面, 导致上述结果可能偏差较大。在水稻高温影响方面, 虽然一些模型中引入了高温与结实率的关系, 进行模型的订正, 但研究中对高温对穗粒数和千粒重的影响、对光合生产和物质分

配的影响还缺乏系统研究, 因此在未来的工作中要加强这方面的研究。

温度、湿度和风速等气象因子都会影响水稻颖花发育, 目前在水稻高温热害的定量研究中一般仅考虑温度一个要素, 因此, 加强多气象因子胁迫对水稻生长发育的定量影响分析对完善高温热害研究具有重要作用。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The Physical Science Basis. London: Cambridge University Press, 2013
- [2] 王连喜, 任景全, 李琪. 未来气候变化情景下江苏水稻高温热害模拟研究: II. 孕穗-抽穗期水稻对高温热害的适应性分析. 中国农业气象, 2014, 35(2): 206-213.
Wang L X, Ren J Q, Li Q. Simulation of the heat injury on rice Production in Jiangsu Province under the climate change scenarios: II. Adaptability analysis of the rice to heat injury from booting to heading stage. *Chin J Agrometeorol*, 2014, 35(2): 206-213. (in Chinese with English abstract)
- [3] 黄义德, 曹流俭, 武立权, 严平, 陈多璞, 杨安中. 2003 年安徽省中稻花期高温热害的调查分析. 安徽农业大学学报, 2004, 31(4): 385-388.
Huang Y D, Cao L J, Wu L Q, Yan P, Chen D P, Yang A Z. Investigation and analysis of heat damage on rice at blossoming stage in Anhui Province in 2003. *J Anhui Agric Univ*, 2004, 31(4): 385-388. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张长海, 汪向东, 刘玲, 李朝辉, 郭亚玲. 2013 年桐城市杂交中粳高温热害表现与成因分析. 杂交水稻, 2015, 30(1): 42-47.

- Zhang C H, Wang X D, Liu L, Li C H, Guo Y L. Analysis on high temperature damage and its causes of medium *indica* hybrid rice at Tongcheng in 2013. *Hybrid Rice*, 2015, 30(1): 42-47. (in Chinese with English abstract)
- [5] Satake T, Yoshida S. High temperature induced sterility in *indica* rice at flowering. *Jpn J Crop Sci*, 1978, 47(1): 6-17.
- [6] Das S, P Krishnan, Nayak M, Ramakrishnan B. High temperature stress effects on pollens of rice (*Oryza sativa* L) genotypes. *Environ Exp Bot*, 2014, 101: 36-46.
- [7] Shah F, J Huang, K Cui, Nie L, Shah T, Chen C, Wang K. Impact of high-temperature stress on rice plant and its traits related to tolerance. *J Agric Sci*, 2011, 149: 545-556.
- [8] Yao Y, Yamamoto Y, Yoshida T, Nitta Y, Miyazaki A. Response of differentiated and degenerated spikelets to top-dressing, shading and day/night temperature treatments in rice cultivars with larger panicles. *Soil Sci Plant Nutr*, 2000, 46(3): 631-641.
- [9] Matsui T, K Omasa, T Horie. The difference in sterility due to high temperature during the flowering period among japonica rice varieties. *Plant Production Sci*, 2001, 4: 90-93.
- [10] 高亮之, 李林. 水稻气象生态. 北京: 农业出版社, 1992: 180-197.
Gao L Z, Lin L. Rice Meteorological Ecology. Beijing: Agriculture Press, 1992: 180-197. (in Chinese)
- [11] Lü G H, Wu Y F, Bai W B, Ma B, Wang C Y, Song J Q. Influence of high temperature stress on net photosynthesis, dry matter partitioning and rice grain yield at flowering and grain filling stages. *J Integr Agric*, 2013, 12(4): 603-609
- [12] 骆宗强, 石春林, 江敏, 刘杨, 宣守丽, 金之庆. 孕穗期高温对水稻物质分配及产量结构的影响. 中国农业气象, 2016, 37(3): 326-334.
Luo Z Q, Shi C L, Jiang M, Liu Y, Xuan S L, Jin Z Q. Effect of high temperature on rice dry matter partition and yield component during booting stage. *Chin J Agrometeorol*, 2016, 37(3): 326-334. (in Chinese with English abstract)
- [13] 滕中华, 智丽, 吕俊, 宗学风, 王三根, 何光华. 灌浆期高温对水稻光合特性、内源激素和稻米品质的影响. 生态学报, 2010, 30(23): 6504-6511.
Teng Z H, Zhi L, Lü J, Zong X F, Wang S G, He G H. Effects of high temperature on photosynthesis characteristics, phytohormones and grain quality during filling-periods in rice. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(23): 6504-6511. (in Chinese with English abstract)
- [14] Matthews R B, Kropff M J, Bachelet D. Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia. Wallingford, UK: CAB International, 1995: 51-66.
- [15] Julia C. Thermal Stresses and Spikelet Sterility in Rice: Sensitive Phases and Role of Microclimate. Cedex, France: University of Montpellier, 2012: 145.
- [16] Abeyesiriwardena D S D Z, Ohba K, Maruyama A. Influence of temperature and relative humidity on grain sterility in rice. *Nat Sci*, 2002, 30(1-2): 33-41.
- [17] 石春林, 金之庆, 汤日圣, 郑建初. 水稻高温败育模拟模型. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 220-222.
Shi C L, Jin Z Q, Tang R S, Zheng J C. A model to simulate high temperature-induced sterility of rice. *Chin J Rice Sci*, 2007, 21(2): 220-222. (in Chinese with English abstract)
- [18] Nguyen D N, Lee K J, Kim D I, Anh N T, Lee B W. Modeling and validation of high-temperature induced spikelet sterility in rice. *Field Crops Res*, 2014(156): 293-302.
- [19] van Oort P A J, Saito K, Zwart S J, Shrestha S. A simple model for simulating heat induced sterility in rice as a function of flowering time and transportational cooling. *Field Crops Res*, 2014, 156: 303-312.
- [20] 曹云英, 段骅, 杨立年, 王志琴, 周少川. 减数分裂期高温胁迫对耐热性不同水稻品种产量的影响及其生理原因. 作物学报, 2008, 34(12): 2134-2142.
Cao Y Y, Duan Y, Yang L N, Wang Z Q, Zhou S C. Effect of heat-stress during meiosis on grain yield of rice cultivars differing in heat-tolerance and its physiological mechanism. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(12): 2134-2142. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨军, 陈小荣, 朱昌兰, 彭小松, 贺晓鹏, 傅军如, 欧阳林娟, 边建民, 胡丽芳, 贺浩华. 氮肥和孕穗后期高温对两个早稻品种产量和生理特性的影响. 中国水稻科学, 2014, 28(5): 523-533.
Yang J, Chen X R, Zhu C L, Peng X S, He X P, Fu J R, Ouyang L J, Bian J M, Hu L F, He H H. Effects of nitrogen level and high temperature at late booting stage on yield and physiological characteristics of two early rice cultivars. *Chin J Rice Sci*, 2014, 28(5): 523-533. (in Chinese with English abstract)
- [22] 石春林, 金之庆, 郑建初, 汤日圣. 减数分裂期高温对水稻颖花结实率影响的定量分析. 作物学报, 2008, 34(4): 627-631.
Shi C L, Jin Z Q, Zheng J C, Tang R S. Quantitative analysis on the effects of high temperature at meiosis stage on seed-setting rate of rice florets. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(4): 627-631. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王春乙, 王石立, 霍治国, 郭建平, 李祎君. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展. 气象学报, 2005, 63(5): 659-671.
Wang C Y, Wang S L, Huo Z G, Guo J P, Li Y J. Progress in research of agro-meteorological disasters in china in recent decade. *Acta Meteorol Sin*, 2005, 63(5): 659-671. (in Chinese with English abstract)

- [24] 张倩, 赵艳霞, 王春乙. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响. *灾害学*, 2011, 26(4): 57-62.
Zhang Q, Zhao Y X, Wang C Y. Study on the impact of high temperature damage to rice in the lower and middle reaches of the Yangtze River. *J Catastrophol*, 2005, 63(5): 659-671. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘伟昌, 张雪芬, 余卫东. 水稻高温热害风险评估方法研究. *气象与环境科学*, 2009, 32(1): 33-38.
Liu W C, Zhang X F, Yu W D. Assessment method on high temperature damage to rice. *Meteorol Environ Sci*, 2009, 32(1): 33-38. (in Chinese with English abstract)
- [26] Ritchie J T, Alocijia E C, Uehara G. IBSNAT and the CERES-Rice model weather and rice//Proceedings of the International Workshop on the Impact of Weather Parameters on Growth and Yield of Rice. Manila, Philippines: IRRI, 1987: 271-281.
- [27] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P. ORYZA2000: Modelling lowland rice. Manila, Philippines: IRRI, 2001
- [28] Tang L, Zhu Y, Hannaway D. RiceGrow: A rice growth and productivity model. *NJAS-Wageningen J Life Sci*, 2009, 57(1): 83-92.