

骆宗强,石春林,江敏. 水稻高温热害预警监测与定量评估研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(4):12-15.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.04.004

# 水稻高温热害预警监测与定量评估研究进展

骆宗强<sup>1,2</sup>, 石春林<sup>2</sup>, 江敏<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学作物学院, 福建福州 350002; 2. 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 江苏南京 210014)

**摘要:**近几十年来,在全球气候变化的大背景下,气候变暖及极端气象灾害对农业生产的影响越来越受到各国科学家的重视。水稻是我国主要的粮食作物之一,随着气温的升高,水稻遭受的高温热害的趋势也越来越严重。本文综述了水稻高温热害的表现、发生规律以及高温热害监测预警、定量评估等方面的研究进展及发展趋势。

**关键词:**水稻;热害;定量评估;研究进展

**中图分类号:** S428 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)04-0012-04

水稻是一种喜温作物,具有一定的耐热性。但早在 20 世纪 60 年代一些学者在亚洲和非洲的热带地区就观察到由于高温导致的水稻颖花结实率下降、空壳率增加等现象<sup>[1-2]</sup>。Sataka 指出在水稻开花时气温超过 35 ℃ 就会导致高温热害<sup>[3]</sup>。2003 年和 2013 年在中国亚热带的长江中下游地区 7 月下旬至 8 月中旬,发生了大范围的持续高温,导致该地区水稻特别是中稻产量受损严重<sup>[4-5]</sup>。随着人类活动产生的二氧化碳等温室气体排放增多,全球气候变暖趋势越来越明显,高温对水稻生长和产量的影响已经威胁到我国的粮食生产安全。目前对于水稻高温热害的研究主要集中在高温对水稻生

长发育、产量和发生规律、颖花败育机理、水稻耐热性分子遗传以及高温热害预警监测及风险评估等方面。本文主要综述了水稻高温热害的影响及发生规律、水稻高温热害的监测预警、水稻高温热害的败育模型及定量评估的研究进展,旨在更全面掌握水稻高温热害的研究概况,为水稻高温热害的进一步研究奠定基础。

## 1 高温热害对水稻生长的影响及发生规律

### 1.1 高温热害对水稻生长的影响

水稻生长发育的适宜温度一般为 20~30 ℃,当环境温度达到 35 ℃ 时,就容易出现高温热害<sup>[6]</sup>。水稻不同生长阶段高温热害的表现形式不同,在营养生长期主要表现为植株分蘖减少、植株矮小,有时甚至叶片出现白斑等<sup>[7-9]</sup>;抽穗开花期主要表现为花粉发育不良、花粉活力下降、花药开裂异常、柱头着粉率减少、结实率降低<sup>[10-13]</sup>;在灌浆期,高温将导致叶片温度过高,致使叶片衰老加速,籽粒灌浆加速但有效灌浆期变

收稿日期:2015-03-30

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201306035);江苏省农业科技自主创新基金[编号:CX(14)2113]。

作者简介:骆宗强(1991—),男,江西抚州人,硕士研究生,主要从事农业气象研究。E-mail:Luozongxiang@163.com。

通信作者:石春林。E-mail:shicll@jaas.ac.cn。

chromatographic determination of glyphosate and (aminomethyl) phosphonic acid in human serum after conversion into p-toluenesulphonyl derivatives[J]. Journal of Chromatography, 1991, 566(1): 239-243.

[58] Roy D N, Konar S K. Development of an analytical method for the determination of glyphosate and (aminomethyl) phosphonic acid residues in soils by nitrogen-selective gas chromatography[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1989, 37(2): 441-443.

[59] Alferness P L, Iwata Y A. Phosphonic acid in Soil, plant and animal matrixes, and water by capillary gas chromatography with mass-selective detection[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1994, 42(12): 2751-2759.

[60] Kudzin Z H, Galak D K, Drabowicz J, et al. Novel approach for the simultaneous analysis of glyphosate and its metabolites[J]. Journal of Chromatography, 2002, 947(1): 129-141.

[61] 王彦辉, 李欣, 周小毛, 等. 草甘膦盐在苎麻田的残留及消解动态[J]. 农药学报, 2010, 12(2): 201-206.

[62] Zelenkova N F, Vinokurova N G, Leontievskii A A. Determination of Amine-Containing phosphonic acids and amino acids as dansyl derivatives[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2010, 65(11):

1143-1147.

[63] Tomita M, Okuyama T, Nigo Y, et al. Determination of glyphosate and its metabolite, (aminomethyl) phosphonic acid, in serum using capillary electrophoresis[J]. Journal of Chromatography, 1991, 571(1/2): 324-330.

[64] 曹丽伟, 梁丝柳, 谭小芳, 等. 毛细管电泳-激光诱导荧光法测定草甘膦、草胺磷及氨基甲基膦酸[J]. 色谱, 2012, 30(12): 1295-1300.

[65] Veiga F, Zapata J M, Marcos M F, et al. Dynamics of glyphosate and aminomethyl phosphonic acid in a forest soil in Galicia, north-west Spain[J]. Science of the Total Environment, 2001, 271(1/2/3): 135-144.

[66] Sorensen S R, Schultz A, Jacobsen O S, et al. Sorption, desorption and mineralisation of the herbicides glyphosate and MCPA in samples from two Danish soil and subsurface profiles[J]. Environmental Pollution, 2006, 141(1): 184-194.

[67] Ermakova I T, Kiseleva N I, Shushkova T A, et al. Bioremediation of glyphosate-contaminated soils[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 88(2): 585-594.

[68] Shushkova T, Ermakova I, Leontievsky A. Glyphosate bioavailability in soil[J]. Biodegradation, 2010, 21(3): 403-410.

短,灌浆不完全,千粒质量降低,瘪粒数增加,产量明显下降,也对稻米品质造成影响<sup>[14-15]</sup>。不同的水稻品种对高温的响应存在差异,不含有耐热基因的品种较含有耐热基因的品种受害重<sup>[16]</sup>。在同一生育阶段相同高温强度和持续时间时,常规粳稻受害最轻,杂交粳稻和籼粳杂交稻次之,梗稻受害较重<sup>[17]</sup>,其中三系杂交稻受影响的程度又较两系杂交稻更为严重<sup>[18]</sup>。

### 1.2 水稻高温热害的分布规律

我国水稻种植区主要分为长江中下游单双季稻区、华南双季稻区和东北单季稻区。我国是典型的季风气候区,受副热带高压的影响,每年7—8月长江中下游及华南地区常常出现持续的高温天气。长江中下游单双季稻区是我国主要的高温热害受灾区<sup>[19]</sup>,其中又以江西和浙江南部的局部地区高温热害的发生程度高、频率也高<sup>[20]</sup>,主要出现在水稻分蘖后期、孕穗开花期;华南双季稻区的高温热害一般发生在早稻的灌浆期和晚稻的苗期,对水稻产量影响不会太严重<sup>[21-22]</sup>。目前对水稻高温热害发生规律的研究一般是根据研究地点或区域的气象资料进行高温发生时间、发生频率的统计分析,这些分析能很好地揭示研究区域的高温发生时间及空间分布规律,对水稻栽培有一定的指导意义。但研究中大多没有结合水稻发育进程进行高温的可能影响分析,因而对水稻生产的指导具有一定的局限性。

## 2 水稻高温热害的监测预警

高温热害已成为水稻生产中的重大农业气象灾害,准确的高温热害监测预警有助于农业生产部门及时采取有效措施,减轻灾害损失,保证和促进水稻持续稳定生产<sup>[23]</sup>。目前虽有一些利用高光谱手段监测高温胁迫下水稻冠层红边特征的研究<sup>[24]</sup>,但利用卫星进行大面积水稻高温监测的研究还不多,一方面由于地表或植被高温一般发生于13:00—14:00,因此欲实现水稻高温监测需要有适时过境的卫星;另一方面遥感监测得到的是以叶片为主体的地表植被综合信息,即叶温,而对水稻结实率有直接影响的因子应该是穗温。因此遥感监测得到的植被温度还不能直接应用于高温影响分析。阳园燕等从高温热害对水稻危害的生物学角度出发,筛选影响水稻品质及产量形成的主要气象因子,并建立水稻高温热害累积危害指数,结合天气预报、GIS技术,开发出水稻高温热害累积危害指数等级预报业务系统,根据每天的天气预报,实现对水稻高温热害的动态预测<sup>[25]</sup>。潘敖大等采用灰色系统GM(1,1)模型,利用相关分析原理,通过计算高温热害指标与海温之间的相关系数,利用逐步回归方法,建立了江苏省水稻高温热害指标的预警模型<sup>[26]</sup>。目前基于统计的高温预测模型一般是建立在大空间尺度的基础上,在具体应用中对于区域的空间分布特征不能很好表达,基于短中期天气预报开展高温的预测预警虽然在时效性上不如前者,但能更好地体现空间分布特征。目前基于无线传感网络的环境监测系统在设施作物和大田作物中均有初步应用,利用该系统进行稻田温度监测理论上是可行的,但由于稻田环境空间变异较大,大范围的监测网络需要大量的资金投入,因此该系统目前在水稻生产中还没有广泛应用。

## 3 水稻高温热害败育模型及定量评估

### 3.1 在高温对水稻颖花不育率的定量影响研究方面

水稻开花期间对高温最为敏感。Horie 等研究表明开花期高温对颖花不育率的影响可用 Logistic 曲线描述<sup>[27-28]</sup>, Abeyasiriwardena 等认为在高温发生时,不育率随圆锥花序的温度呈正相关<sup>[29-31]</sup>。Weerakoon 等研究表明,高温时不育率与温度呈指数增加<sup>[32]</sup>。任昌福等通过高温控制试验研究表明,抽穗期热害损失与高温持续时间和强度呈正相关,且空秕率和温度呈二次曲线关系<sup>[33-34]</sup>。石春林等分析了减数分裂期温度与结实率的关系,结果表明减数分裂期温度与结实率呈二次曲线关系<sup>[35]</sup>。目前的研究大多侧重开花期的定量影响,而对开花前颖花发育过程中的高温影响模式、临界温度等研究还不充分。此外,上述研究大多侧重于高温对结实率的定量影响,而对高温对光合速率、物质分配等过程的定量影响还缺乏系统分析。

### 3.2 水稻高温败育模型

目前,一些模型根据开花期高温与结实率的关系进行产量订正,如 ORYZA2000 模型利用开花期(发育指数为 0.6 ~ 1.22)的平均日最高温度和 Horie 等给出的高温与结实率关系<sup>[27]</sup>进行高温影响订正。这个模型没有考虑开花过程、温度日变化等规律。石春林等将日开花变化规律、日开花结实率变化、温度日变化等过程相结合,构建了基于过程的水稻开花期高温败育模型<sup>[36]</sup>。石春林等在控制试验的基础上,构建了减数分裂期高温败育的定量方法<sup>[35]</sup>。van Oort 在综合考虑温度日变化、穗呼吸降温(穗温与气温差异)、日开花规律、高温败育因子等过程的基础上,构建了水稻群体结实率模型<sup>[37]</sup>,但模型中没有考虑减数分裂期高温的影响。Nguyen 等基于逐日开花量、颖花日开花规律、温度日变化、开花期和减数分裂期的高温败育因子,建立了高温败育模型<sup>[28]</sup>。更完善的水稻高温败育模型需要将逐日开花量、无胁迫时逐日开花结实率、日开花特征(花时)、温度日变化、穗温与气温差异的日变化特征、开花期和减数分裂期的高温定量影响因子等相结合。目前对减数分裂期的高温败育定量研究虽有开展,但 Yoshida 等的研究表明水稻开花前 15 d 至开花期的高温均对结实率有影响<sup>[9-10]</sup>,因此需要进一步明确开花前颖花发育过程不同阶段对高温的响应特征与差异。

现有的研究中对高温败育研究中,较少讨论高温过程对光合速率、物质分配等过程的影响。Lu 等分析了开花期和灌浆期高温处理后 2~5 d 的光合速率日变化过程及成熟期的物质分配特征<sup>[38]</sup>,但研究中对高温处理后光合速率、物质分配的动态变化趋势缺乏系统描述。此外这种变化与上述高温败育模型之间存在的关系还没有深入分析。因此更完善的高温热害评估模型应该将高温对光合速率、物质分配的定量影响与上述高温败育模型相结合。

### 3.3 基于过程模型的高温热害损失评估

20 世纪 90 年代以来,作物生产的气候风险和灾损评估分析成为农业气象研究的热点之一。早期的风险分析和灾损评估研究中一般根据作物受灾强度和持续时间进行灾损定量或半定量化分析。如宫德吉等依据因灾减产与相应年份农作物不同生长期所发生的气象灾害的强度、范围以及作物对

干旱灾害的敏感度等关系,建立起因灾减产的结构型统计评估模型<sup>[39]</sup>。姜爱军等根据影响江苏省的 7 种重要气象灾害的定量指标,考虑其共同影响和受灾区域的社会、经济状况,建立了江苏省的农业气象灾害定量指标和评估方法<sup>[40]</sup>。马晓群等根据降水和辐射指标建立了江淮地区渍害评估技术<sup>[41]</sup>。霍治国等根据气候产量指标建立了华北干旱评估模型<sup>[42]</sup>。这些研究中一般根据产量与灾害发生强度和时间建立统计模型,而不讨论灾害对作物生长过程的具体影响。因此,上述研究对灾害影响的解释性不强,且对作物不同发育阶段的气象灾害影响差异考虑较少。近年来基于过程模型的作物气象灾害风险评估得到了初步研究。张倩等应用改进的 WOFOST 模型,模拟了不同发育时段高温热害对长江中下游地区早稻和中稻生长发育与产量的影响,并对该地区高温热害对水稻的影响程度进行了评估<sup>[43]</sup>。刘伟昌等利用 ORYZA2000 水稻模型,以衡阳地区的单季中稻为研究对象,根据该地区 1961—2006 年的气象资料等,模拟该地区的气候条件,设定高温条件,计算各年实际产量和设定条件下产量灾害损失,在此基础上建立水稻产量灾损率评估模型<sup>[44]</sup>。郑道远等利用江苏省农业科学院研制的水稻高温败育模型<sup>[45]</sup>对福建省高温热害进行了定量评估<sup>[46]</sup>。以上分析中一般都没考虑气象站点气温和稻田气温、穗温和稻田气温的差异。

在穗温和稻田气温的差异方面已有一些观测研究,一般认为在空气湿度较低时,由于穗呼吸降温,穗温低于气温、而空气湿度高时,气温与穗温接近。穗温(或颖花温度)依赖于辐射、风速和相对湿度、气孔阻抗、穗位置与形态等<sup>[47-49]</sup>。Julia 等综合上述要素建立了热平衡模式,用于估计气温和穗温差<sup>[31,50-51]</sup>,但模型需要输入较多难以获得的信息。van Oort 利用前人观测资料,建立了穗温和气温差的估算模型<sup>[37]</sup>,简便易用,但估算值变异较大(约 2℃),上述观测大多针对开花期进行,而对减数分裂期的分析较少。

#### 4 展望

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate change,IPCC)第五次评估报告<sup>[52]</sup>指出,气候系统的变暖是毋庸置疑的。自 20 世纪 50 年代以来,观测到的许多变化在几十年乃至上千年时间里都是前所未有的。过去 3 个 10 年的地表已连续偏暖于 1850 年以来的任何 1 个 10 年,在北半球,1983—2012 年可能是过去 1400 年中最暖的 30 年。对于未来的气候变化趋势,报告指出,与 1986—2005 年相比,2016—2035 年期间全球平均表面温度变化可能升高 0.3~0.7℃。相对于 1985—1900 年,所有情景下 21 世纪末全球表面温度变化可能超过 1.5℃。此外,几乎确定的是,随着全球平均温度上升,大部分陆地区域的极端暖事件将增多,热浪发生的频率很可能更高、时间更长。因此研究高温热害对水稻生长的影响在现在和未来都有较强的现实和指导意义。

过去 50 年来,国内外众多学者对水稻高温热害的成因与机理、区域高温发生规律及高温应对措施等方面开展了广泛研究,并取得了很多成果。在水稻高温热害的预警评估方面已有初步研究,但还不够系统,相关成果在生产上的应用还不多。因此,结合中长期的天气预报开展水稻高温热害的动态预警技术研究、基于高温对水稻生长过程全面的定量化分析

构建水稻高温热害灾损定量化评估研究以及基于区域长期的气候特征开展水稻高温热害的风险评估和灾害保险是下一步研究的重点,这些研究对促进区域水稻生产具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Sato K. Accelerating generations of rice varieties by short day treatments(in Japanese)[J]. Ministry of Agriculture and Forestry,1960, 5:38-39.
- [2] Sato I. The report on the technical support to develop the U, A, R desert[J]. Overseas Technical Cooperation Agency,1967,3:100-104.
- [3] Satake T. Circular dense culture of rice plants in pots,the purpose of obtaining many uniform panicles of main streams[J]. Crop Science, 1972,41:361-362.
- [4] 黄义德,曹流俭,武立权,等. 2003 年安徽省中稻花期高温热害的调查与分析[J]. 安徽农业大学学报,2004,31(4):385-388.
- [5] 孙正玉,霍金兰,孙明,等. 2013 年夏季高温对盐城水稻生产的影响[J]. 大麦与谷类科学,2014(3):12-14.
- [6] 许传桢,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(2):1-8.
- [7] Das S, Krishnan P, Nayak M, et al. High temperature stress effects on pollens of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes[J]. Environmental and Experimental Botany,2014,101:36-46.
- [8] Shah F, Huang J, Cui K, et al. Impact of high-temperature stress on rice plant and its traits related to tolerance [J]. Journal of Agricultural Science,2011,149(5):545-556.
- [9] Yoshida S. Fundamentals of rice crop science[R]. IRRI,1984.
- [10] Satake T, Yoshida S. High temperature induced sterility in indica rices at flowering[J]. Japanese Journal of Crop Science,1978,47(1):6-17.
- [11] Prasad P V, Boote K J, Jr L A, et al. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress[J]. Field Crops Research,2006,95:398-411.
- [12] 石春林,金之庆,汤日圣,等. 水稻颖花结实率对减数分裂期和开花期高温的响应差异[J]. 江苏农业学报,2010,26(6):1139-1142.
- [13] Cao Y Y, Duan H, Yang L N, et al. Effect of heat stress during meiosis on grain yield of rice cultivars differing in heat tolerance and its physiological mechanism[J]. Acta Agronomica Sinica,2008,34(12):2134-2142.
- [14] Kim J, Shon J, Lee C K, et al. Relationship between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature [J]. Field Crops Research,2011,122(3):207-213.
- [15] Fu G F, Song J, Xiong J, et al. Thermal resistance of common rice maintainer and restorer lines to high temperature during flowering and early grain filling stages[J]. Rice Science,2012,19(4):309-314.
- [16] Matsui T, Omasa K, Horie T. The difference in sterility due to high temperature during the flowering period among japonica rice varieties [J]. Plant Production Science,2001,4:90-93.
- [17] 高亮之,李林. 水稻气象生态[M]. 北京:农业出版社,1992:180-197.
- [18] 张再君,朱英国. 高温对不同杂稻结实率的影响[C]//

- 湖北省遗传学会第七次代表大会暨学术讨论会论文摘要集, 2004:145-158.
- [19] 刘玲, 沙奕卓, 白月明. 中国主要农业气象灾害区域分布与减灾对策[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 92-97.
- [20] 刘伟昌, 张雪芬, 余卫东, 等. 长江中下游水稻高温热害时空分布规律研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(14): 6454-6457.
- [21] 程勇翔, 王秀珍, 郭建平, 等. 中国水稻生产的时空动态分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3473-3485.
- [22] 陈文佳. 中国水稻生产空间布局变迁及影响因素分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [23] 王春乙, 王石立, 霍治国, 等. 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[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 659-671.
- [24] 谢晓金, 申双和, 李映雪, 等. 高温胁迫下水稻红边特征及SPAD和LAI的监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 183-190.
- [25] Yang Y Y, He Y K, Luo Z Z, et al. Study on monitoring and early warning technology of rice heat injury in the three gorges reservoir area[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2006, 26(3): 1249-1254.
- [26] 潘敖大, 高苹, 刘梅, 等. 基于海温的江苏省水稻高温热害预测[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 136-144.
- [27] Horie T, Nakagawa H, Centeno H, et al. Modelling the impact of climate change on rice in Asia[M]. Wallingford: CAB International, 1995: 51-66.
- [28] Nguyen D N, Lee K J, Kim D I, et al. Modeling and validation of high-temperature induced spikelet sterility in rice[J]. Field Crops Research, 2014, 156: 293-302.
- [29] Abeyisiriwardena D Z, Ohba K, Maruyama A. Influence of temperature and relative humidity on grain sterility in rice[J]. Natural Science, 2002, 30(1/2): 33-41.
- [30] Yan C, Ding Y, Wang Q, et al. The impact of relative humidity, genotypes and fertilizer application rates on panicle, leaf temperature, fertility and seed setting of rice[J]. Journal of Agricultural Science, 2010, 148(3): 329-339.
- [31] Julia C. Thermal stresses and spikelet sterility in rice: sensitive phases and role of microclimate[D]. Cedex, France: University of Montpellier, 2012: 145.
- [32] Weerakoon W, Maruyama A, Ohba K. Impact of humidity on temperature-induced grain sterility in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2008, 194(2): 135-140.
- [33] 任昌福, 陈安和, 刘保国. 高温影响杂交水稻开花结实的生理生化基础[J]. 西南农业大学学报, 1990, 12(5): 440-443.
- [34] 郑建初, 盛婧, 汤日圣, 等. 南京和安庆地区高温发生规律及高温对水稻结实率的影响[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(1): 1-4.
- [35] 石春林, 金之庆, 郑建初, 等. 减数分裂期高温对水稻颖花结实率影响的定量分析[J]. 作物学报, 2008, 34(4): 627-631.
- [36] 石春林, 金之庆, 汤日圣, 等. 水稻高温败育模拟模型[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 220-222.
- [37] van Oort P J, Saito K, Zwart S J, et al. A simple model for simulating heat induced sterility in rice as a function of flowering time and transportational cooling[J]. Field Crops Research, 2014, 156: 303-312.
- [38] Lü G H, Wu Y F, Bai W B, et al. Influence of high temperature stress on net photosynthesis, dry matter partitioning and rice grain yield at flowering and grain filling stages[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(4): 603-609.
- [39] 宫德吉, 陈素华. 农业气象灾害损失评估方法及其在产量预报中的应用[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 66-71.
- [40] 姜爱军, 郑敏, 王冰梅. 江苏省重要气象灾害综合评估方法的研究[J]. 气象科学, 1998, 18(2): 196-202.
- [41] 马晓群, 陈晓艺, 盛绍学. 安徽省冬小麦渍涝灾害损失评估模型研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 158-162.
- [42] 霍治国, 李世奎, 王素艳, 等. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(6): 692-703.
- [43] 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[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 57-62.
- [44] 刘伟昌, 张雪芬, 余卫东, 等. 水稻高温热害风险评估方法研究[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(1): 33-38.
- [45] 石春林, 金之庆, 汤日圣, 等. 水稻高温败育模拟模型[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 220-222.
- [46] 郑道远. 高温热害对福建省水稻生产的影响及对策研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [47] Matsui T, Kobayashi K, Yoshimoto M, et al. Stability of rice pollination in the field under hot and dry conditions in the Riverina Region of New South Wales[J]. Australia Plant Production Science, 2007, 10: 57-63.
- [48] Tian X, Matsui T, Li S, et al. Heat-induced floret sterility of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under humid and low wind conditions in the field of Jiang han basin[J]. China Plant Production Science, 2010, 13(3): 243-251.
- [49] Ishimaru T, Hirabayashi H, Kuwagata T A, et al. The early-morning flowering trait of rice reduces spikelet sterility under windy and elevated temperature conditions at anthesis[J]. Plant Production Science, 2012, 15(1): 19-22.
- [50] Yoshimoto M, Oue H, Takahashi H, et al. The effects of FACE (free-air CO<sub>2</sub> enrichment) on temperatures and transpiration of rice panicles at flowering stage[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 60: 597-600.
- [51] Yoshimoto M, Fukuoka M, Hasegawa T, et al. Integrated micrometeorology model for panicle and canopy temperature (IM2PACT) for rice heat stress studies under climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 67: 233-247.
- [52] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.