

气候变化背景下中国农业气候资源变化VIII. 江西省双季稻各生育期热量条件变化特征*

叶清^{1,2} 杨晓光^{1**} 李勇^{1,3} 代姝玮¹ 肖金香²

(¹ 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; ² 江西农业大学园林与艺术学院, 南昌 330045; ³ 贵州省气象局科技减灾处, 贵阳 550002)

摘要 基于江西省地面气象资料和农业气象试验站数据,分析了江西省双季稻生育期的变化趋势,并利用生长期日(GDD)、低温度日(CDD)和高温度日(HDD)对1981—2007年江西省水稻各生育期热量资源的变化趋势进行分析.结果表明:气候变暖背景下,江西省水稻生长季平均气温、平均最低气温和平均最高气温均呈升高趋势,引起双季稻生长季缩短,其中,营养生长期日数减少最明显,而生殖生长期延长;生长期日和高温度日均增加,低温度日减少.研究期间,江西省双季稻有效热量资源增加,低温风险减少,但高温风险增多;江西省水稻有效热量资源的空间变化特征表现为东北部的增幅大于西南部,南部的低温风险大于北部,中部的高温风险最大.

关键词 气候变化 生长期日 低温度日 高温度日 双季稻 时空特征

文章编号 1001-9332(2011)08-2021-10 **中图分类号** S162.3 **文献标识码** A

Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. VIII. Change characteristics of heat resources during the growth period of double cropping rice in Jiangxi Province. YE Qing^{1,2}, YANG Xiao-guang¹, LI Yong^{1,3}, DAI Shu-wei¹, XIAO Jin-xiang² (¹College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ²College of Landscape Architecture and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; ³Division of Technology and Disaster Reduction, Guizhou Meteorological Bureau, Guiyang 550002, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(8): 2021-2030.

Abstract: Based on the observation data from the meteorological stations and agricultural experimental stations in Jiangxi Province, this paper studied the change trend of the growth period of double cropping rice in the province, and, by using the indices growing degree-days (GDD), cool degree-days (CDD), and heat degree-days (HDD), the change trends of the heat resources at each growth stage of the double cropping rice in 1981-2007 were analyzed. Under the background of climate warming, the mean air temperature, mean minimum air temperature, mean maximum air temperature during the growth period of the double cropping rice all had an increasing trend, leading to the shortening of double cropping rice growth season, with the most obvious decrease of vegetative growth phase and the prolonged reproductive growth phase. In the vegetative growth phase, the GDD and HDD increased, while the CDD decreased. In 1981-2007, the effective heat resources of double cropping rice in Jiangxi Province increased, low temperature risk reduced, while high temperature risk increased. The increment of the effective heat resources for double cropping rice was higher in northeast Jiangxi than in southwest Jiangxi, low temperature risk was higher in south Jiangxi than that in north Jiangxi, and high temperature risk was the highest in middle Jiangxi.

Key words: climate change; growing degree-days; cool degree-days; heat degree-days; double cropping rice; spatiotemporal characteristics.

* 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951502)和公益性行业(气象)科研专项(201106020)资助.

** 通讯作者. E-mail: yangxg@cau.edu.cn

2011-01-04 收稿, 2011-05-12 接受.

20世纪以来,全球气候变化对粮食生产的影响引起国内外的广泛关注^[1-3],特别是气候变暖对世界第二大粮食作物——水稻的影响成为学术界研究热点. IPCC第4次评估报告指出,1905—2005年全球平均气温升高了 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.56\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[4]. 影响作物生长发育的日温和夜温都有相应的升高,1979—2003年,全球年均日温和夜温分别升高 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5]. 热量变化将引起水稻生育期的变化,水稻生长季内气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,全生育期日数将平均缩短 $7 \sim 8\text{ d}$ ^[6],其中,长江三角洲地区平均气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,全生育期将缩短 $14 \sim 15\text{ d}$ ^[7];热量变化也将对水稻产量产生影响. Peng等^[5]研究结果表明,水稻产量与温度的关系密切,热带地区平均气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,水稻产量将下降 15% ;最低气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,水稻产量将下降 10% . Welch等^[8]研究认为,日均气温的升高能增加水稻产量,平均夜温的升高却可能降低水稻产量,未来更高的夜温所引起的产量损失将超过高日温所带来的收益,且过高的日温将限制水稻产量形成. 水稻不同生育阶段对热量条件的要求不一样,如双季早稻播种时要求日均气温 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$,双季晚稻安全齐穗期要求日均气温 $>22\text{ }^{\circ}\text{C}$,当日均气温 $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会引起早稻灌浆不良、籽粒品质下降^[9].

江西省属亚热带湿润季风气候区,气候温暖、光照充足、雨量充沛、无霜期长,优越的农业气候资源非常有利于农作物生长,是我国南方主要粮食生产区^[10]. 水稻是江西省第一大粮食作物,分别占江西省粮食作物播种面积和总产量的 85% 以上和 93% ^[11]. 1961—2007年江西省年均气温上升 $0.60\text{ }^{\circ}\text{C}$,1984—2007年上升了 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[12]. 气候变暖对江西省双季稻不同生育期的影响、各生育期热量资源的分配变化趋势以及各生育期可能遭受的低温和高温风险等是农业生产管理部门和科研人员普遍关注的问题.

国内外学者普遍采用积温方法分析气候变化背景下作物热量条件的变化. 由于气候变暖引起的夜温升高比日温升高更快^[8],将最高、最低气温及其变化引入作物生长模型^[13-14]来研究气候变化背景下作物热量条件的研究较多,而气候变化对作物不同生育期热量条件影响的报道则鲜见. 度日(degree-days, DD)理论普遍应用于害虫和杂草的管理^[15-16]、降温指标体系研究^[17-18]等方面,DD是作物生长热量指标之一. 本文引入并改进了DD系列模型来计算江西省双季稻各生育期的生长期度日(growing

degree-days, GDD)、低温度日(cool degree-days, CDD)、高温度日(heat degree-days, HDD),并分析了其变化趋势,旨在探究气候变暖背景下江西省双季稻热量资源有效性的变化.

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

江西省1961—2007年18个地面气象台站(图1)的逐日平均气温、最高气温、最低气温和日照时数等气象数据以及江西省1981—2006年14个农业气象试验站的水稻生育期资料来自中国气象局.

1.2 研究方法

1.2.1 水稻生育期的划分及界限温度的选择 综合水稻栽培及不同生育期对温度要求的相关资料^[19-22],本文将水稻生育期划分为营养生长期(vegetative phase,从播种到孕穗)、营养生长与生殖生长并进期(vegetative and reproductive phase,简称并进期,从孕穗到开花)、生殖生长期(reproductive phase,从开花到成熟)3个阶段.

低温和高温不仅会危害水稻的营养生长,还会引起水稻颖花不育、灌浆受阻,造成水稻空壳率和秕谷率上升. 营养生长期低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度会造成水稻烂秧、死苗、返青延迟、僵苗^[19-20];营养生长和生殖生长并进期的温度低于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会引起水稻孕穗开花受阻、颖花不育^[23];生殖生长期气温低于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对灌浆不利,导致籽粒不饱满、粒重降低,此期温度高于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会阻碍水稻光合作用,导致株高、分蘖数和干物质质量减少^[19];营养生长和生殖生长并进期的温度高于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会造成水稻颖花严重不育,灌浆受阻以

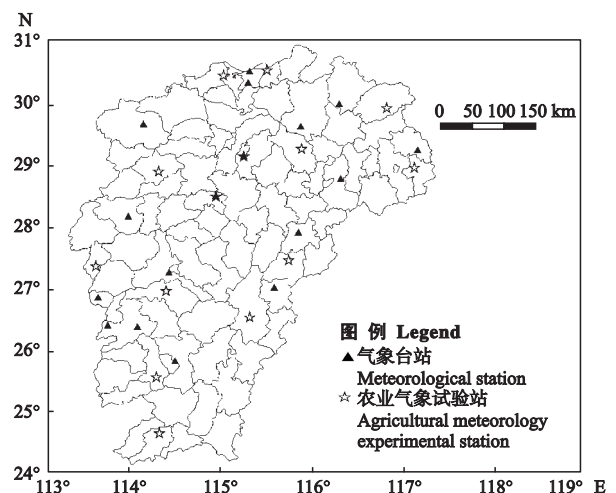


图1 研究区气象站点和农业气象试验站点的分布
Fig. 1 Distribution of the meteorological stations and agricultural meteorology experimental stations in the study area.

及结实率和千粒重下降^[21,22-25]. 为此, 本文确定水稻营养生长期的下限温度为 10 ℃, 上限温度为 35 ℃; 营养生长与生殖生长并进期的下限温度为 20 ℃, 上限温度为 35 ℃; 生殖生长期的下限温度为 15 ℃, 上限温度为 35 ℃.

1.2.2 热量指标的确定 利用积温学说和有效积温学说来评价作物生长期内热量条件的主要依据是水稻生长发育速率随日均气温升高而加快. 目前国内使用较多的热量指标是平均温度, 实际上高于水稻发育上限或低于水稻发育下限的那部分温度对水稻生长发育不起促进作用^[23]. 为了更好地分析水稻不同生育期高于发育上限、低于发育下限及处于两者之间的热量条件, 本文采用度日指标. 度日是进行害虫管理和衡量作物生长的基本热量单位. 本文所采用的度日指标包括生长度日、低温度日和高温度日. 由于引用的这 3 个概念与前人所述的概念有所区别, 所以本文对这 3 个概念进行如下界定, 并用图形进行说明(图 2).

生长度日(GDD)是分析作物生长的一个热量指标, 有专家将其定义为高于某生育阶段的生长下限温度的温度累积^[26]. 本文认为, GDD 应是介于作物生长上限温度与下限温度之间的温度值的累积^[27], 即上限温度与下限温度之间的净效积温, 因为低温^[23,28]与高温^[29-30]均对作物生长不利. GDD 算式如下:

$$GDD = \begin{cases} \int_{T_1}^{T_u} F(T) dT & T_1 > T_{\min}, T_u < T_{\max} \\ \int_{T_1}^{T_{\max}} F(T) dT & T_1 > T_{\min}, T_u \geq T_{\max} \\ \int_{T_{\min}}^{T_u} F(T) dT & T_{\max} > T_u, T_{\min} > T_1 \\ \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} F(T) dT & T_1 \leq T_{\min}, T_u \geq T_{\max} \\ 0 & T_{\max} \leq T_1 \text{ 或 } T_{\min} \geq T_u \end{cases} \quad (1)$$

式中: GDD 为生长度日(℃·d), 是介于作物生长上限温度与下限温度之间的热量累积, 也称为净效积温; T 为日均气温; T_1 为下限温度; T_u 为上限温度; T_{\max} 为最高气温; T_{\min} 为最低气温. 本文引用 GDD 来衡量水稻不同生育期的积温有效性, 分析气候变暖背景下双季稻各生育期净效积温的变化趋势.

低温度日(CDD)指低于作物生长下限温度的累积. 低温累积越多, 对作物的危害越大^[23]. 本文利用 CDD 来计算水稻不同生育期低温度日, 并分析水稻各生育期受低温危害的程度和趋势.

$$CDD = \begin{cases} \int_{T_{\min}}^{T_1} F(T) dT & T_1 > T_{\min} \\ \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} F(T) dT & T_1 \geq T_{\max} \\ 0 & T_1 \leq T_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: CDD 为低温度日(℃·d).

高温度日(HDD)指高于作物生长上限温度的累积. 高温可引起水稻颖花不育^[30], 影响灌浆过程, 造成高温逼熟, 从而引起水稻产量降低^[31]. 本文利用高温度日来衡量水稻各生育期的高温累积程度, 分析江西省水稻不同生育期受高温危害的可能程度及其变化趋势.

$$HDD = \begin{cases} \int_{T_u}^{T_{\max}} F(T) dT & T_{\max} > T_u \\ \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} F(T) dT & T_{\min} \geq T_u \\ 0 & T_{\max} < T_u \end{cases} \quad (3)$$

式中: HDD 为高温度日(℃·d).

本文利用单正弦波方法^[33]计算江西省水稻不同生育期的 GDD、HDD 和 CDD(图 2).

参照 Zalom 等^[32]的度日计算方法, 得出不同情形下度日的计算公式:

$$I (T_{\max} > T_u, T_1 > T_{\min}):$$

$$GDD = \frac{1}{\pi} [(\alpha - T_1)(\theta_2 - \theta_1) + \beta(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) + (T_u - T_1)(\frac{\pi}{2} - \theta_2)]$$

$$HDD = \frac{1}{\pi} [(\alpha - T_u)(\frac{\pi}{2} - \theta_2) + \beta\cos\theta_2]$$

$$CDD = \beta - GDD - HDD \quad (4)$$

$$II (T_u \geq T_{\max}, T_1 > T_{\min}):$$

$$GDD = \frac{1}{\pi} [(\alpha - T_1)(\frac{\pi}{2} - \theta_1) + \beta\cos\theta_1]$$

$$CDD = \beta - GDD$$

$$HDD = 0 \quad (5)$$

$$III (T_{\max} > T_u, T_{\min} \geq T_1):$$

$$GDD = \frac{1}{\pi} [(\alpha - T_1)(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) + (T_u - T_1)(\frac{\pi}{2} - \theta_2) - \beta\cos\theta_2]$$

$$HDD = \frac{1}{\pi} [(\alpha - T_u)(\frac{\pi}{2} - \theta_2) + \beta\cos\theta_2]$$

$$GDD = 0 \quad (6)$$

$$IV (T_{\max} \leq T_u, T_1 \leq T_{\min}):$$

$$GDD = \alpha - T_1$$

$$HDD = 0$$

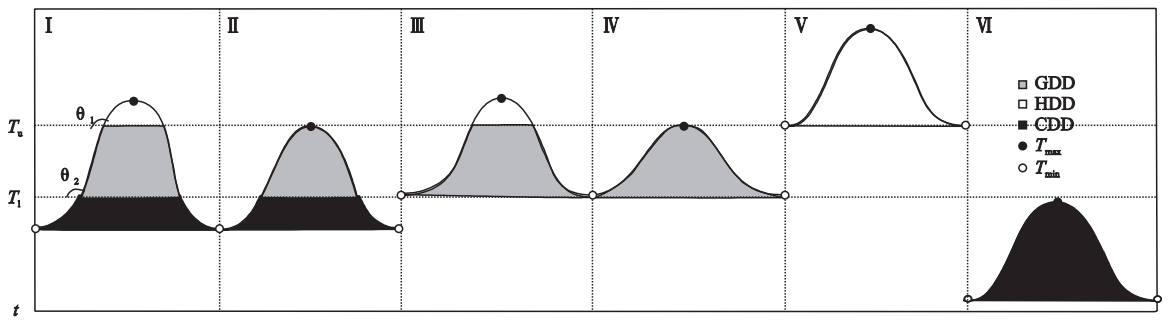


图2 不同情形下水稻度日示意图

Fig. 2 Schematic diagram of degree-days of rice under different situations.

I: $T_{\max} > T_u, T_l > T_{\min}$; II: $T_u \geq T_{\max}, T_l > T_{\min}$; III: $T_{\max} > T_u, T_{\min} \geq T_l$; IV: $T_{\max} \leq T_u, T_l \leq T_{\min}$; V: $T_u \leq T_{\min}$; VI: $T_l > T_{\max}$. T_l : 上限温度 Upper limit temperature; T_u : 下限温度 Lower limit temperature; T_{\max} : 日最高气温 Daily maximum air temperature; T_{\min} : 日最低气温 Daily minimum air temperature; GDD: 生长度日 Growing degree-days; CDD: 低温度日 Cool degree-days; HDD: 高温度日 Heat degree-days.

$$CDD = 0 \quad (7)$$

$$V (T_u \leq T_{\min}):$$

$$GDD = 0$$

$$HDD = \alpha - T_u$$

$$CDD = 0 \quad (8)$$

$$VI (T_l > T_{\max}):$$

$$GDD = 0$$

$$CDD = T_l - \alpha$$

$$HDD = 0 \quad (9)$$

式中: $\theta_1 = \arcsin[(T_l - \alpha)/\beta]$; $\theta_2 = \arcsin[(T_u - \alpha)/\beta]$; $\alpha = (T_{\max} + T_{\min})/2$; $\beta = (T_{\max} - T_{\min})/2$.

1.2.3 气候倾向率 用 X_i 表示样本量为 n 的某一气候变量,用 t 表示 X_i 所对应的时间,建立 X_i 与 t 之间的一元线性回归方程:

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

式中: a 为回归常数; b 为回归系数. a 和 b 可用最小二乘法进行估计. 以 b 的 10 倍作为各气候要素的气候倾向率^[33]. 本文利用气候倾向率分析 1961—2007 年江西省水稻生育期平均气温、最高气温、最低气温、生长度日、低温度日和高温度日的变化趋势.

1.3 数据处理

基于 Microsoft Excel 和 DPS 数据处理系统,采用相关分析方法对上述指标进行统计分析,并进行显著性检验. 采用 ArcGIS 软件的反距离加权插值方法 (IDW) 对气象数据进行插值,设定的 cell size 参数均为 0.002,生成空间栅格数据,然后根据指标要求,使用空间分析方法中的 Contour 工具提取相应等值线,最后生成所需的等值线图.

2 结果与分析

2.1 江西省水稻生长季平均气温的变化趋势

从图 3 可以看出,1961—2007 年,江西省早稻

生长季平均气温、平均最高气温、平均最低气温的气候倾向率分别在 $0.05 \sim 0.32 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $0.02 \sim 0.36 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $0.07 \sim 0.30 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,均呈增加趋势且表现为由南向北递增的分布趋势,其中平均最高气温的增幅最大. 晚稻生长季平均气温、平均最高气温和平均最低气温的变化趋势不明显,其中,一半以上站点的晚稻生长季平均气温呈降低趋势,大部分地区的平均最高气温呈降低趋势 (仅 1 个站点为增加趋势),但平均最低气温则呈上升趋势,且平均最低气温的增幅 [$0.10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] 大于最高气温的降幅 [$0.08 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$].

2.2 江西省水稻平均生育期及各生育期持续日数的变化趋势

根据 1981—2006 年江西省 14 个农业气象试验站点的水稻观测资料得到江西省双季稻各生育阶段的平均起止日期 (表 1) 和生育期持续日数及产量结构的变化趋势 (表 2).

从表 2 可以看出,1981—2006 年,江西省早稻和晚稻的全生育期日数总体均呈减少趋势,其中,晚稻的减幅明显大于早稻;早稻和晚稻的营养生长期日数总体均呈减少趋势,其中,早稻和晚稻分别有

表 1 江西省双季稻各生育阶段的平均起止日期
Table 1 Average beginning and ending dates of different growth and developmental stages for double cropping rice in Jiangxi Province

阶段 Phase	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
营养生长期 Vegetative growth phase	03-29—06-08	06-22—08-28
并进期 Vegetative and re-productive growth phase	06-09—06-21	08-29—09-17
生殖生长期 Reproductive growth phase	06-22—08-28	09-18—10-17

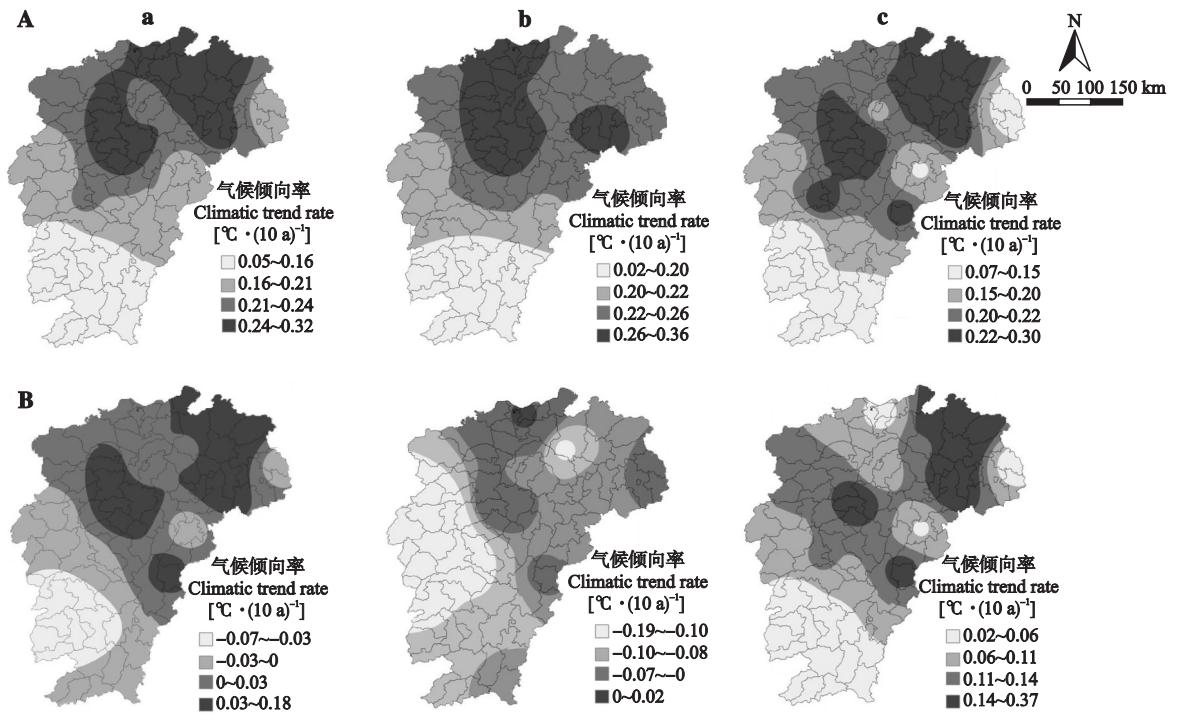


图3 1961—2007年江西省早稻(A)和晚稻(B)生长季平均气温(a)、平均最高气温(b)、平均最低气温(c)气候倾向率的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of climatic trend rates of mean air temperature (a), mean maximum air temperature (b) and mean minimum air temperature (c) during the growth period of early rice (A) and late rice (B) in Jiangxi Province.

表2 1981—2006年江西省水稻生育期日数、茎秆质量和产量的变化

Table 2 Variation of days of growth period, stem mass and yield for rice during 1981 and 2006 in Jiangxi Province

站点 Station	早稻 Early rice						晚稻 Late rice					
	全生育期 日数	营养生长期 日数	并进期 日数	生殖生长期 日数	茎秆质量 SM	籽粒质量 GM	全生育期 日数	营养生长期 日数	并进期 日数	生殖生长期 日数	茎秆质量 SM	籽粒质量 GM
	DWGP	DVGP	DVRGP	DRGP			DWGP	DVGP	DVRGP	DRGP		
樟树 Zhangshu	1.18 *	1.36	0.32 **	-0.50	-13.85	9.86 **	-0.10	-4.35	1.89	2.36 **	-6.56 **	4.27 **
余干 Yugan	1.69	0.15	-0.89	2.44 *	-11.06	5.30	3.63	2.43	-0.06	1.26	-5.71	3.10
宜丰 Yifeng	-2.56	-3.57 **	0.49	0.52	-16.73 **	10.25 **	-4.48	-2.56	-0.93	-0.99	-13.80 **	9.06 **
泰和 Taihe	-1.93	-4.11 **	-0.38	2.57 **	-2.01	7.89 **	-9.68 **	-8.83 **	0.44	-1.29	-2.38	0.29
婺源 Wuyuan	1.38	-3.58 **	1.69 **	3.27 **	-16.37 **	7.76 *	-4.83 *	-6.56 **	-0.23	1.96	-10.04	4.03
瑞昌 Ruichang	1.97	0.68	-0.30	1.59	-24.38 **	-0.36	-0.40	0.05	-1.08	0.63	-11.56	8.97
南丰 Nanfeng	-2.18	-1.42	-0.50	-0.26	-17.12 **	2.83	-2.08	-1.48	-0.99 **	0.39	-15.61 **	0.94
南康 Nankang	-4.47 **	-5.81 **	0.46	0.87	-4.86 **	11.14	-11.65 **	-9.36 **	-0.99 *	-1.30	-4.13	7.84 **
宁都 Ningdu	-0.09	-1.44	0.32	1.03	-9.65 **	2.65	-6.16 **	-5.03 **	-0.11	-1.02	-2.39	6.39 **
莲花 Lianhua	1.95	1.89	-0.33	0.39	-17.52 **	0.69	-5.03 *	-3.04 **	0.68	-2.68	-17.05 **	5.48
龙南 Longnan	1.66	-0.34	-0.11	2.11 **	-15.65 **	-0.53	-2.19	-5.04 **	0.50	2.36 **	-11.19 **	4.44
南昌 Nanchang	-1.46	-1.16	-0.08	-0.22	-19.55	-1.34	-4.31	-3.39	-1.08 *	0.15	-27.81 **	3.75
湖口 Hukou	-1.87	-2.43 *	-0.48	1.04 *	-22.81 **	8.22 *	-4.93 *	-4.88 **	-0.32	0.27	-14.68 *	-0.54
广丰 Guangfeng	-2.30	-1.64	-0.56	-0.10	-13.34 **	0.26	-11.68 **	-8.93 **	-0.73	-2.02	-10.11 **	2.32
平均 Mean	-0.50	-1.53	-0.03	1.05	-14.64	4.62	-4.56	-4.36	-0.22	0.01	-10.93	4.31

DWGP; Days of whole growth period [$\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]; DVGP; Days of vegetative growth phase [$\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]; DVRGP; Days of vegetative and reproductive growth phase [$\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]; DRGP; Days of reproductive growth phase [$\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]; SM; Stem mass ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); GM; Grain mass ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

29%和57%的站点的减少趋势达极显著水平($P < 0.01$);早稻和晚稻的并进期日数均呈略微减少趋

势;72%站点的早稻生殖生长期日数呈增加趋势,其中,余干、泰和、婺源、龙南和湖口站的增加趋势达到

显著水平($P < 0.05$),晚稻生殖生长期日数变化趋势的地区间差异明显,呈增加或减少趋势的站点各占50%。水稻营养生长期日数除受品种特性影响之外,还受此阶段水稻温光效应的影响^[34],因此,江西省双季稻营养生长日数的缩短与此阶段日均气温的升高有很大关系。营养生长期是水稻生长季生物量积累的主要阶段,水稻的茎秆质量从一定程度上反映了营养生长期水稻生物量的积累情况。研究期间,江西省早、晚稻的茎秆质量均呈显著减少趋势,说明营养生长期的缩短导致水稻生物量的积累减少;随着早稻和晚稻生殖生长期日数的增加,其产量呈增加趋势,这在一定程度上说明生殖生长期日数的延长有利于水稻产量的形成(表3)。从不同生育期日数与茎秆质量、籽粒质量的相关系数矩阵(表3)可以看出,早稻和晚稻营养生长期日数与籽粒产量、生殖生长期日数呈显著负相关,营养生长期缩短、生殖生长期延长,对后期灌浆有利,使产量增加。

2.3 江西省水稻不同生育期生长度日的变化趋势

生长度日(GDD)与作物生长速率、作物产量的关系密切。GDD越大,作物生长发育所获得的有效热量越多,对作物生长发育越有利。由于水稻不同生育期对温度的要求不同,单一的上下限温度无法全面反映水稻全生育期的生长度日,因此,本文利用3个生

育期生长度日的累计值作为全生育期生长度日。

1961—2007年,江西省早稻全生育期的平均生长度日呈增加趋势,其气候倾向率为 $4.7 \sim 32.0$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,呈南低北高的空间分布特征;营养生长期生长度日的变化趋势与全生育期相似,主要是

是因为营养生长期日数占全生育期日数的1/2以

表3 江西省水稻不同生育期持续日数、茎秆质量和籽粒质量的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of sustained days, stem mass and grain mass during each growth phase of rice in Jiangxi Province

	DV	DVR	DR	DA	WS	WG
DV	1	0.12*	0.06	0.85**	0.15**	-0.21**
DVR	-0.04	1	-0.15**	0.23**	0.08	-0.15**
DR	-0.38**	-0.08	1	0.52**	0.13*	0.12*
DA	0.81**	0.20**	0.17**	1	0.21**	-0.14*
WS	-0.02	0.03	-0.11*	-0.08	1	0.21**
WG	-0.15**	0.05	0.20**	-0.02	0.11*	1

DV:营养生长期日数 Days of vegetative growth phase; DVR:并进期日数 Days of vegetative and reproductive growth phase; DR:生殖生长期日数 Days of reproductive growth phase; DA:全生育期日数 Days of whole growth phase; WS:茎秆质量 Stem mass; WG:籽粒质量 Grain mass. 左下部分为早稻生长季内数据,右上部分为晚稻生长季内数据 The lower left-down part were the data during the growth phase of early rice, and the upper right-part were the data during the growth phase of late rice.

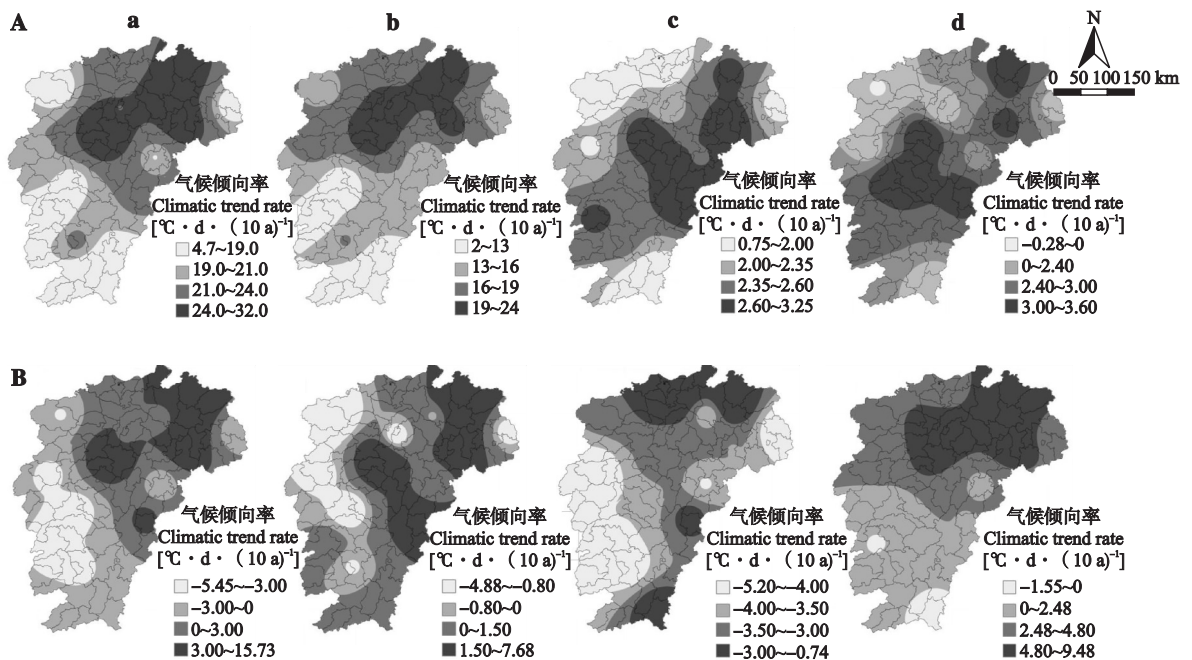


图4 1961—2007年江西省早稻(A)和晚稻(B)全生育期(a)、营养生长期(b)、并进期(c)和生殖生长期(d)生长度日(GDD)气候倾向率的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the climatic trend rates of GDD at whole growth phase (a), vegetative growth phase (b), vegetative and reproductive growth phase (c) and reproductive growth phase (d) of early rice (A) and late rice (B) in Jiangxi Province during 1961 and 2007.

上,其生长度日对早稻生长的贡献大于其他两个生长期;早稻并进期和生殖生长期的生长度日也呈增加趋势,且均表现为中部高、南部和北部低的区域分布特征(图 4A).

研究期间,江西省晚稻全生育期的生长度日呈西南部减少、东北部增加的变化趋势;营养生长期生长度日在赣西部分地区呈减少趋势,其气候倾向率为 $-4.88 \sim 0 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,在赣东和赣南部分地区则呈增加趋势,其气候倾向率为 $0 \sim 7.68 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;并进期生长度日总体呈减少趋势,气候倾向率在 $-5.28 \sim -0.74 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;大部分地区生殖生长期的生长度日呈增加趋势 $[0 \sim 9.48 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,仅寻乌、定南、安远和会昌等县呈减少趋势 $[-1.55 \sim 0 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,其气候倾向率总体表现为由南向北逐步递增(图 4B).

生长度日是影响作物产量的主要因素.生长度日越大,作物产量越高.1961—2007 年,江西省早稻生长季生长度日呈增加趋势,说明早稻生长季内有效热量资源在增加,其中,江西省北部有效热量资源的增加趋势较南部更明显;晚稻生长季生长度日的变化趋势存在区域差异,赣西南地区生长度日的减少将导致其有效热量资源减少,赣东北地区生长度日的增加将使其有效热量资源增加.有效热量资源的增减将影响双季稻的生长发育,进而对其产量产生相应影响.

2.4 江西省水稻不同生育期低温度日的变化趋势

低于作物某一生育期生长温度下限的温度对作物生长不利,其累积值越大,作物就越易受低温影响^[23].通过分析江西省 1961—2007 年的气温资料发现,早稻低温度日累积值主要出现在营养生长期和并进期,晚稻主要出现于并进期和生殖生长期.

从图 5 可以看出,1961—2007 年,江西省早稻营养生长期低温度日平均值的低值区主要位于赣南和赣中部分地区,在 $24 \sim 55 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$;高值区主要位于赣西北和赣西部分地区,达 $90 \sim 246 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$;低温度日总体呈自南向北、自东向西逐步增加分布特征,表明北部比南部、西部比东部更易受低温影响.研究期间,早稻并进期低温度日呈减少趋势,赣北、赣中减幅较大 $[-10.0 \sim -6.0 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,而赣南和赣东北、西北部分地区的减幅稍缓 $[-6.0 \sim -1.5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$;早稻并进期低温度日平均值呈南低北高的分布格局,除赣东北和赣南少部分地区呈增加趋势 $[0 \sim 3.3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 外,大部分地区呈减少趋势.

从图 6 可以看出,1961—2007 年,研究区晚稻并进期的低温度日呈由南向北逐渐增加的空间分布特征;研究区域内 27.5°N 以南及赣西南地区,晚稻并进期的低温度日自东向西呈逐步增加趋势 $[0 \sim 9.0 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,而赣东北地区大部的低温度日呈减少趋势.晚稻生殖生长期低温度日的空间分布特征与并进期相似,即由南向北增加;生殖生长期低温度日气候倾向率的正值区主要位于赣东北的大部地区 $[0 \sim 3.9 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,其他地区主要为负值区.

早稻营养生长期和并进期是江西省“倒春寒^[35]”和“小满寒^[36]”可能出现的时段,其低温度日也主要出现在这两个时期;晚稻低温度日主要出现在并进期和成熟期,此期正是江西省“寒露风^[37]”可能出现的时期.研究时段内低温度日总体呈下降趋势,说明江西省双季稻可能面临的低温冷害风险有所降低;早稻和晚稻并进期低于 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 有害积温值的降低将有利于水稻孕穗和抽穗,可提高成穗率;晚稻生殖生长期低于 $15 \text{ } ^\circ\text{C}$ 有害积温的减少,有利于水稻

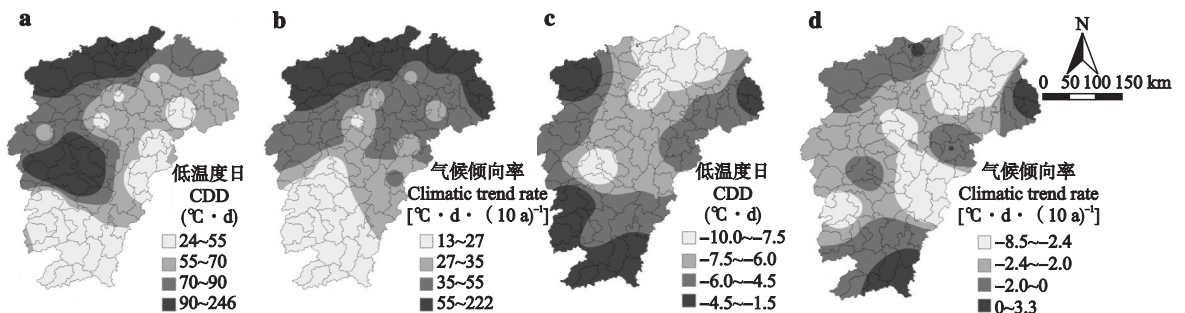


图 5 1961—2007 年江西省早稻营养生长期低温度日(a)及其气候倾向率(b)、并进期低温度日(c)及其气候倾向率(d)的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of CDD (a) and its climatic trend rate (b) at vegetative growth phase, CDD (c) and its climatic trend rate (d) at vegetative and reproductive growth phase of early rice during 1961 and 2007 in Jiangxi Province.

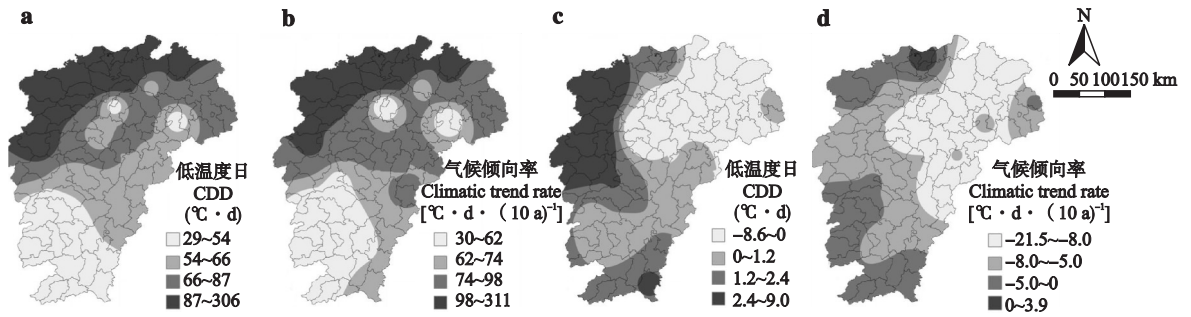


图6 1961—2007年江西省晚稻并进期低温度日(a)及其气候倾向率(b)、生殖生长期低温度日(c)及其气候倾向率(d)的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of CDD (a) and its climatic trend rate (b) at vegetative and reproductive growth phase, CDD (c) and its climatic trend rate (d) at reproductive growth phase of late rice during 1961 and 2007 in Jiangxi Province.

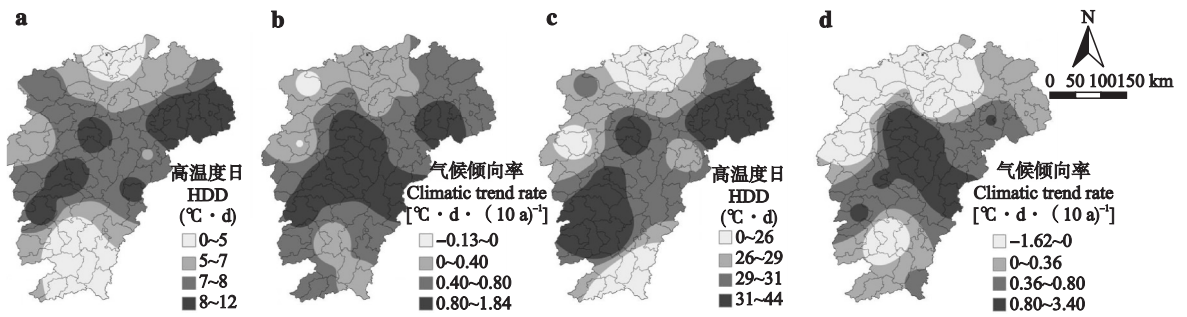


图7 1961—2007年江西省早稻生殖生长期高温度日(a)及其气候倾向率(b)和晚稻营养生长期高温度日(c)及其气候倾向率(d)的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of HDD (a) and its climatic trend rate (b) during reproductive growth phase of early rice, HDD (c) and its climate tendency rate (d) during vegetative growth phase of late rice during 1961 and 2007 in Jiangxi Province.

灌浆、结实,可降低秕谷率.江西省平均最低气温的升高使水稻生长季低温度日降低,可减少低温危害,最终有利于水稻的产量形成.

2.5 江西省水稻不同生育期高温度日的变化趋势

从图7可以看出,1961—2007年,江西省早稻高温度日(0~12.0 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)主要出现在生殖生长期;高温度日平均值的空间分布特征为由中部向南北两侧逐步减少;早稻生殖生长期高温度日总体呈增加趋势[0~1.82 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$],仅修水、宜春等局部地区减少.晚稻高温度日(0~44.00 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)主要出现在营养生长期,总体高于早稻,但空间分布特征与早稻类似;赣西北及赣南部分地区的晚稻高温度日呈减少趋势,气候倾向率在-1.62~0 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$,其余地区呈增加趋势.

高于作物生长发育上限的温度对作物的生长发育没有积极作用,会抑制作物的生长发育^[38].江西省双季稻生长季内高于35 $^{\circ}\text{C}$ 的温度累积值主要出现于早稻的生殖生长期和晚稻的营养生长期,也是江西省“高温热害”^[36]的主要出现时段.江西省双季稻高温度日总体呈增加趋势,使水稻生产可能面临

的高温风险更高,中部地区是高温风险的高值区.

3 讨论

积温学说在作物热量条件分析方面的应用非常广泛,很多学者对不同区域中不同作物 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 积温的年际变化及空间分布特征进行了分析,但并未充分说明气候变暖引起热量资源有效性的变化.活动积温既包括对作物生长发育有效的日温累积,也包括对作物生育有抑制作用的高温日温累积,这些高温日温累积对作物的生长发育无效^[39].同时,低于作物生长下限温度的低温累积也对作物的生长发育无效^[19].因此,在评价作物生长热量资源有效性时应剔除这些无效积温.本文利用度日模型对高于水稻不同生育期上限温度和低于下限温度的日温累积值进行分离,通过对江西省1961—2007年双季稻不同生育期生长期日变化趋势进行分析,说明了江西省水稻生长季热量资源有效性的变化;根据不同站点生长期日多年平均值的空间分布特征分析,说明了气候变暖背景下江西省水稻种植区域热量变化特征;并通过对不同生育期

高温度日、低温度日的变化趋势分析,说明了气候变暖背景下江西省双季稻种植期受低温和高温影响的时空分布特征.但本文仅基于温度指标分析了热量资源的有效性,未来应结合光照和水分探讨热量资源的有效性.

通过对江西省双季稻生长季的生育期日数、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、生长度日、低温度日和高温度日的时空变化特征进行分析,得到如下结论:

在气候变暖背景下,江西省水稻生长季平均气温、平均最低气温和平均最高气温均升高;早稻和晚稻生育期缩短,其中,营养生长期日数减少,但生殖生长期日数增加.结合水稻茎秆质量、籽粒质量的变化趋势及与不同生育期日数的相关性分析发现,早稻和晚稻营养生长期日数与籽粒质量、生殖生长期日数存在显著的负相关关系,随着营养生长期的缩短,生殖生长期延长、产量增加.

早稻生长季内平均气温呈增加趋势,其气候倾向率的纬向分布特征较明显,纬度越高,平均气温气候倾向率越大;平均最高气温的增加趋势大于平均最低气温;早稻生长季各生育期生长度日均呈增加趋势;低温度日累积值主要出现在营养生长期和并进期(与江西省早稻的“倒春寒”、“小满寒”可能出现的时段基本一致),且均呈减少趋势;高温度日主要出现于生殖生长期,其气候倾向率在 $-0.13 \sim 1.82 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$.

江西省晚稻全生育期平均气温呈南减北增的空间变化特征,平均最高气温总体呈减少趋势,平均最低气温呈增加趋势;晚稻全生育期和营养生长期的生长度日均呈西南减少、东北增加的趋势;晚稻并进期的生长度日呈总体减少趋势;晚稻生殖生长期的生长度日在江西省南部和北部均呈增加趋势,但南部增加的趋势弱于北部;晚稻低温度日主要出现在并进期和生殖生长期(与江西省“寒露风”可能出现的时段吻合),总体呈减少趋势;晚稻高温度日的增幅大于早稻,主要出现在营养生长期.

参考文献

- [1] Lin E-D (林而达). Climate Change and Agricultural Sustainable Development. Beijing: Beijing Press, 2001 (in Chinese)
- [2] Wang F-T (王馥棠), Zhao Z-C (赵宗慈), Wang S-L (王石立), et al. Climate Change Impacts on Agroecology. Beijing: China Meteorological Press, 2003 (in Chinese)
- [3] Kang YH, Khan S, Ma XY. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security: A review. *Progress in Natural Sciences*, 2009, **19**: 1665–1674
- [4] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Oslo: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007
- [5] Peng SB, Huang JL, Sheehy JE, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, **101**: 9971–9975
- [6] Wang X-L (王修兰). CO₂, Climate Change and Agriculture. Beijing: China Meteorological Press, 1996 (in Chinese)
- [7] Zhou W-K (周文魁). Agricultural strategies of Yangtze River Delta against background of weather warming. *Jiangnan Forum (江南论坛)*, 2009(6): 15–17 (in Chinese)
- [8] Welch JR, Vincent JR, Auffhammer M, et al. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**: 14562–14567
- [9] Lei X-S (雷玄肆). Application of GIS on heat condition analysis and distribution of double cropping rice in Fuliang County. *Journal of Hebei Agricultural Sciences (河北农业科学)*, 2008, **12**(3): 151–152 (in Chinese)
- [10] Li S-Y (李树勇), Zhou S-L (周顺亮), Xu Q-C (徐巧初), et al. Divisions of agricultural climate resources in Jiangxi Province. *Acta Agriculturae Jiangxi (江西农业学报)*, 2007, **19**(2): 102–105 (in Chinese)
- [11] Peng C-R (彭春瑞), Liu X-L (刘小林), Li M-D (李名迪), et al. Main weather disasters of rice and defensive countermeasures in Jiangxi. *Acta Agriculturae Jiangxi (江西农业学报)*, 2005, **17**(4): 127–130 (in Chinese)
- [12] Jiangxi Provincial Government (江西省政府). Jiangxi Provincial Climate Change Program. [EB/OL]. (2009-06-23) [2010-12-08]. http://www.jiangxi.gov.cn/zfgz/wjfg/szfwj/200907/t2009_0701_138198.htm (in Chinese)
- [13] Gao LZ, Jin ZQ, Huang Y, et al. Rice clock model: A computer model to simulate rice development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, **60**: 1–6
- [14] Yin X-Y (殷新佑). A nonlinear model to quantify temperature effect on rice phenology and its application. *Acta Agronomica Sinica (作物学报)*, 1994, **20**(6): 692–699 (in Chinese)
- [15] Pilkington LJ, Hoddle MS. Predictions of invasion success of *Gonatocerus triguttatus* (Hymenoptera: Mymaridae), an egg parasitoid of *Homalodisca vitripennis* (Hemiptera: Cicadellidae), in California using life table statistics and degree-day values. *Biological Control*, 2007, **42**: 9–15
- [16] Pilkington LJ, Hoddle MS. Use of life table statistics and degree-day values to predict the invasion success of *Gonatocerus ashmeadi* (Hymenoptera: Mymaridae), an

- egg parasitoid of *Homalodisca coagulata* (Hemiptera: Cicadellidae), in California. *Biological Control*, 2006, **37**: 276–283
- [17] Christenson M, Manz H, Gyalistras D. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**: 671–686
- [18] Martinaitis V, Bieksa D, Miseviciute V. Degree-days for the energy analysis of buildings. *Energy and Buildings*, 2010, **42**: 1063–1069
- [19] Gao L-Z (高亮之). Rice Meteorological Ecology. Beijing: China Agriculture Press, 1992 (in Chinese)
- [20] Han X-L (韩湘玲). Crop Ecology. Beijing: China Meteorological Press, 1991 (in Chinese)
- [21] Yang X-G (杨晓光), Yu H-N (于沪宁). China Climate Resources and Agriculture. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese)
- [22] Han X-L (韩湘玲). Agricultural Climatology. Shanxi: Shanxi Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [23] Shimono H, Okada M, Kanda E, *et al.* Low temperature induced sterility in rice; Evidence for the effects of temperature before panicle initiation. *Field Crops Research*, 2007, **101**: 221–231
- [24] Kuang H-Y (况慧云), Xu L-J (徐立军), Huang Y-J (黄英金). Research advances on the impact and mechanisms of heat victims on rice. *China Rice* (中国稻米), 2009(1): 15–17 (in Chinese)
- [25] Jiang D-L (蒋德隆). Rice Production and Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 1983 (in Chinese)
- [26] McMaster GS, Wilhelm WW. Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **87**: 291–300
- [27] Caton BP, Foin TC, Gibson KD, *et al.* A temperature-based model of direct-, water-seeded rice (*Oryza sativa*) stand establishment in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **90**: 91–102
- [28] Thakur P, Kumar S, Malik JA, *et al.* Cold stress effects on reproductive development in grain crops; An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, **67**: 429–443
- [29] Gooding MJ, Ellis RH, Shewry PR, *et al.* Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science*, 2003, **37**: 295–309
- [30] Jagadish SVK, Craufurd PQ, Wheeler TR. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany*, 2007, **58**: 1627–1635
- [31] Yao F-M (姚凤梅), Zhang J-H (张佳华). Simulation and impact of climate change on crop yield of China. Beijing: China Meteorological Press, 2008 (in Chinese)
- [32] Zalom FG, Goodell PB, Wilson LT, *et al.* Degree-days: The Calculation and Use of Heat Units in Pest Management. Leaflet: UC DANR, 1983
- [33] Qu M-L (曲曼丽). Agro-climatic Internship Guide. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1991 (in Chinese)
- [34] Chen E-Q (陈恩谦). A long-term study of the effects of temperature and bright on the nutrition growth of different types of rice. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2005, **21**(5): 242–244 (in Chinese)
- [35] Wei L (魏 丽). Impact of heat-forced maturity and grainbuds cold damage on yield of early rice in Jiangxi. *Meteorological Monthly* (气象), 1991, **17**(10): 47–49 (in Chinese)
- [36] Liu W-Y (刘文英), Zhang X-Z (张显真), Jian H-Y (简海燕). Evolution trend of cold-dew wind in recent 50 years in Jiangxi Province and its influence on late double-harvest rice. *Meteorology and Disaster Reduction Research* (气象与减灾研究), 2009, **32**(4): 67–71 (in Chinese)
- [37] Zhang Y-C (张养才), He W-X (何维勋), Li S-K (李世奎). Introduction to Agricultural Meteorological Disasters. Beijing: China Meteorological Press, 1991 (in Chinese)
- [38] Xie X-J (谢晓金), Li B-B (李秉柏), Wang L (王琳), *et al.* Spatial and temporal distribution of high temperature and strategies to rice florescence harm in the lower-middle reaches of Yangtze River. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2010, **31**(1): 144–150 (in Chinese)
- [39] Yu Y-S (余优森), Ge B-J (葛秉钧), Ren S-X (任三学). A study on availability of accumulative temperature in China subtropical western mountainous areas. *Meteorological Monthly* (气象), 1991, **17**(9): 21–25 (in Chinese)

作者简介 叶 清,男,1977年生,博士研究生.主要从事气候变化与农业减灾研究,发表论文10余篇. E-mail: qingye2005@yahoo.com.cn

责任编辑 杨 弘
