

褚荣浩, 申双和, 吕厚荃, 等. RegCM3 下 1951–2100 年江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(4): 779–785.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.04.011

RegCM3 下 1951–2100 年江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力

褚荣浩¹, 申双和², 吕厚荃³, 李 萌¹, 喻 丽⁴, 沙修竹⁵

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学气象灾害预警预报与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 3. 中国气象局国家气象中心, 北京 100081; 4. 盐城大丰市气象局, 江苏 大丰 224100; 5. 河南省人工影响天气领导小组办公室, 河南 郑州 450003)

摘要: 为揭示气候变化情景下江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力变化规律, 本研究根据江苏省 1971–2000 年逐日站点气象数据以及 RegCM3 模式模拟输出的格点气象数据, 从中提取江苏省气象资料, 对 RegCM3 下 1951–2100 年江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力进行时空变化分析。结果显示: (1) 江苏省热量资源总体呈现年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间上由东北向西南逐渐增加, 且随年份增加逐渐增加; 一季稻适播期 ($\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日) 空间上由西南向东北逐渐推迟, 且随年份增加逐渐提前; 一季稻生育期天数 1951–2010 年由东北向西南逐渐缩短, 2011–2100 年由东南向西北逐渐缩短。(2) 随着热量资源的逐渐增加, 江苏省一季稻气候生产潜力主要呈现出时间上低-高-低、空间上由西南向东北逐渐递减的趋势, 且苏南西南部一直为高值区。

关键词: RegCM3; 江苏省; 热量资源; 一季稻; 气候生产潜力

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)04-0779-07

Thermal resources and climatic potential productivity of single-season rice in Jiangsu province under RegCM3 from 1951 to 2100

CHU Rong-hao¹, SHEN Shuang-he², LÜ Hou-quan³, LI Meng¹, YU Li⁴, SHA Xiu-zhu⁵

(1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. National Meteorological Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 4. Dafeng Meteorological Bureau, Dafeng 224100, China; 5. Weather Modification Leading Group Office of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to reveal the change rules of thermal resources and climatic potential productivity of single season rice in Jiangsu province under climate change scenarios, based on daily meteorological data from 1971 to 2000 in Huang-Huai-Hai region combining with daily meteorological data from the regional climate model RegCM3, the meteorological data of Jiangsu province was extracted, and the spatial and temporal variations of the characteristics of thermal resources and climatic potential productivity of single-season rice in Jiangsu province under RegCM3 from 1951 to 2100 were analyzed. The results showed that:

① The accumulated temperature above 10°C increased gradually from northeast to southwest over time. The optimum sowing date (the first day for the daily temperature to steadily pass 10°C) of single-season rice advanced gradually over time and delayed gradually from southwest to northeast. The length of single-season rice growth season was shortened gradually from northeast to southwest from 1951 to 2010, and was shortened as well from southeast to

收稿日期: 2015-03-14

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106020, GYHY201506018)

作者简介: 褚荣浩(1991-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事农业气象研究。(Tel) 15365192379; (E-mail) ronghao_chu@163.com

通讯作者: 申双和, (E-mail) yqzhr@nuist.edu.cn

northwest from 2011 to 2100. and ②With the increase of thermal resources, the climatic potential productivity of single-season rice in Jiangsu province showed a low-high-low trend over time and decreased gradually from southwest to northeast, and the southwestern of southern Jiangsu province yielded the highest.

Key words: RegCM3; Jiangsu province; thermal resource; single-season rice; climatic potential productivity

近年来,全球气候变化越来越引起人们关注,据 IPCC 第五次评估报告 (AR5) 第一工作组 (WGI) 报告^[1]指出,未来全球气候变暖仍将持续,21 世纪末全球平均地表温度在 1986–2005 年的基础上将升高 0.3~4.8℃。未来气候变化将使农作物生长发育、产量、品质及农业种植结构布局发生改变,进而对农业生产成本产生重要影响^[2],最终对粮食安全产生严重影响。江苏省是中国农业大省,研究结果表明,以光、热、水为主的江苏省农业气候资源总量已发生明显改变^[3],将对农业生产产生深远影响。

目前,对于热量资源及作物气候生产潜力等相关领域已有很多研究^[4-12],但针对未来情景下长时间序列的江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力方面的研究还鲜见报道。本研究基于江苏省 1971–2000 年逐日站点气象数据以及 RegCM3 模式模拟输出的格点气象数据,从中提取江苏省气象资料,系统分析了未来情景下江苏省热量资源和一季稻气候生产潜力时空变化特征,为应对气候变化、合理利用热量资源调整农业种植结构、提高作物产量品质及一季稻气候生产潜力提供科学指导。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

江苏省地处东部沿海中部,地跨东经 116°18′~121°57′,北纬 30°45′~35°20′,属温带向亚热带过渡性气候,季风显著,四季分明,雨量集中,雨热同季,光能充足,热量富裕^[13],年平均气温约 15℃,是中国水稻主产区之一,水稻种植面积及总产量均排全国第五位,约占全省粮食总产的 56.2%^[14],且主要以一季稻为主。

1.2 资料来源与订正

本研究数据来源于国家气候中心 RegCM3 模式模拟 A1B 情景下 1951–2100 年 0.25°×0.25°格点气象资料日值,包括日平均气温(℃)、日最高和最低气温(℃)、日降水量(mm)、气压(hPa)、日总辐射(W/m²)、日平均风速(m/s)、日平均相对湿度。国家信息中心发布的 1971–2000 年黄淮海区域逐日

站点气象资料,包括日平均气温(℃)、日最高和最低气温(℃)、日降水量(mm)、日总辐射(W/m²)、日平均风速(m/s)、日平均相对湿度。按江苏经、纬度,提取出对应资料,其中基准资料(Baseline)选取国家信息中心发布的 1971–2000 年的黄淮海区域逐日站点气象资料,研究时段选取 1951–2100 年。采用双线性插值法以 Baseline 对 RegCM3 的网格点值(分辨率为 0.25°×0.25°)加以订正^[15]。

1.3 研究方法

将江苏省 1951–2100 年数据资料分成 5 个时段进行分析计算,分别为 1951–1980 年、1981–2010 年、2011–2040 年、2041–2070 年和 2071–2100 年。

1.3.1 江苏省一季稻生育期划分依据 本研究采用五日滑动平均法确定逐年≥10℃积温及日平均气温,以 10℃的初日作为江苏省一季稻适播期^[16],一季稻生长终止期根据积温指标进行划定。

1.3.2 界限值 按指定概率条件下界限值的计算公式^[17]为:

$$x = (1-a)x_j + ax_{j+1} \quad (1)$$

其中, j 为序号; n 为记录个数; x 指界限值; x_j 指适播期、生育期天数(均按 80% 保证率取值); $a = p(n+1)-j$, p 为指定概率。

1.3.3 气候生产潜力 本试验采用“作物生长动态统计”模型,按光合、光温、气候潜力三级订正进行计算,将水稻全生育期分为播种~出苗、出苗~移栽、移栽~分蘖、分蘖~拔节、拔节~抽穗、抽穗~成熟 6 个时段,采用积温指标计算各生育期起止日期,分别计算不同时段水稻生产潜力,进行累加得到全生育期生产潜力^[15]。计算公式如下:

①温度订正函数 $f(T)$ ^[18-19]

$$f(T) = [(T-T_1)(T_2-T)^B] / [(T_0-T_1)(T_2-T_0)^B] \quad (2)$$

$$B = (T_2-T_0) / (T_0-T_1)$$

式中, T 是水稻发育期的平均温度, T_1 、 T_2 和 T_0 分别是水稻生育期内生长发育的下限、上限和最适温度,且当 $T \leq T_1$ 时, $f(T) = 0$,各生育期三基点温度^[20-21]如表 1 所示。

表 1 江苏省一季稻各生育期三基点温度

Table 1 Three cardinal points in each growth period of single-season rice in Jiangsu province

生育期	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$
播种~出苗	25	12	40
出苗~移栽	26	15	35
移栽~分蘖	28	17	38
分蘖~拔节	28	17	38
拔节~抽穗	30	20	35
抽穗~成熟	26	15	35

②水分订正函数 $f(R)$ [22]

$$f(R) = \begin{cases} 1 & R_i \geq E_{0i} \\ R_i/E_{0i} & R_i < E_{0i} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $E_{0i} = \alpha_i \times E_i$, E_{0i} 为总蒸发量, R_i 为 i 时段降水量, E_i 采用世界粮农组织 (Food and Agricultural Organization) 推荐的经典参考作物蒸散 Penman-Monteith 估算模型 [23] 进行计算, α_i 为作物系数 [24]。

③农业气候生产潜力 [25-26]

光合生产潜力 Y_1 计算公式:

$$Y_1 = C \cdot f(Q) \quad (4)$$

$$f(Q) = \Omega \varepsilon \varphi (1-\alpha)(1-\beta)(1-\rho)(1-\gamma)(1-\omega) (1-\eta)^{-1} (1-\xi)^{-1} s q^{-1} f(L) \sum Q_i$$

式中, C 为单位换算系数, 取 10 000; Ω 为作物光合固定 CO_2 能力的比例, 取 1.00; ε 为光合辐射占总辐射比例, 取 0.49; φ 为光合作用量子效率, 取 0.224; α 为作物群体反射率, 取 0.68; β 为作物群体对太阳辐射漏射率, 取 0.06; ρ 为作物非光合器官对太阳辐射的无效吸收, 取 0.10; γ 为光饱和和限制率, 取 0.01; ω 为作物呼吸损耗率, 取 0.30; η 为成熟谷物含水率, 取 0.15; ξ 为作物灰分含量, 取 0.08; s 为作物经济系数, 取 0.40; q 为单位干物质含热量 (MJ/kg), 取 17.20; $f(L)$ 为作物叶面积动态变化订正值, 取 0.58; Q_i 为各生育期太阳总辐射 (MJ/m^2)。

光温生产潜力 Y_2 : 在 Y_1 的基础上对其进行温度和生育日数订正, 公式如下:

$$Y_2 = f(T) \cdot f(N) \cdot Y_1 \quad (5)$$

式中, $f(T)$ 为温度订正函数, $f(N)$ 是生育日数订正函数。

$$f(N) = 1 + (N - N_0) / (1.7N_0) \quad (6)$$

式中, N 为一季稻有效生育日数 (日均温 ≥ 10

$^{\circ}\text{C}$ 天数), N_0 为一季稻生育期日数。

气候生产潜力 Y_3 : 在 Y_2 基础上进行水分订正, 公式如下:

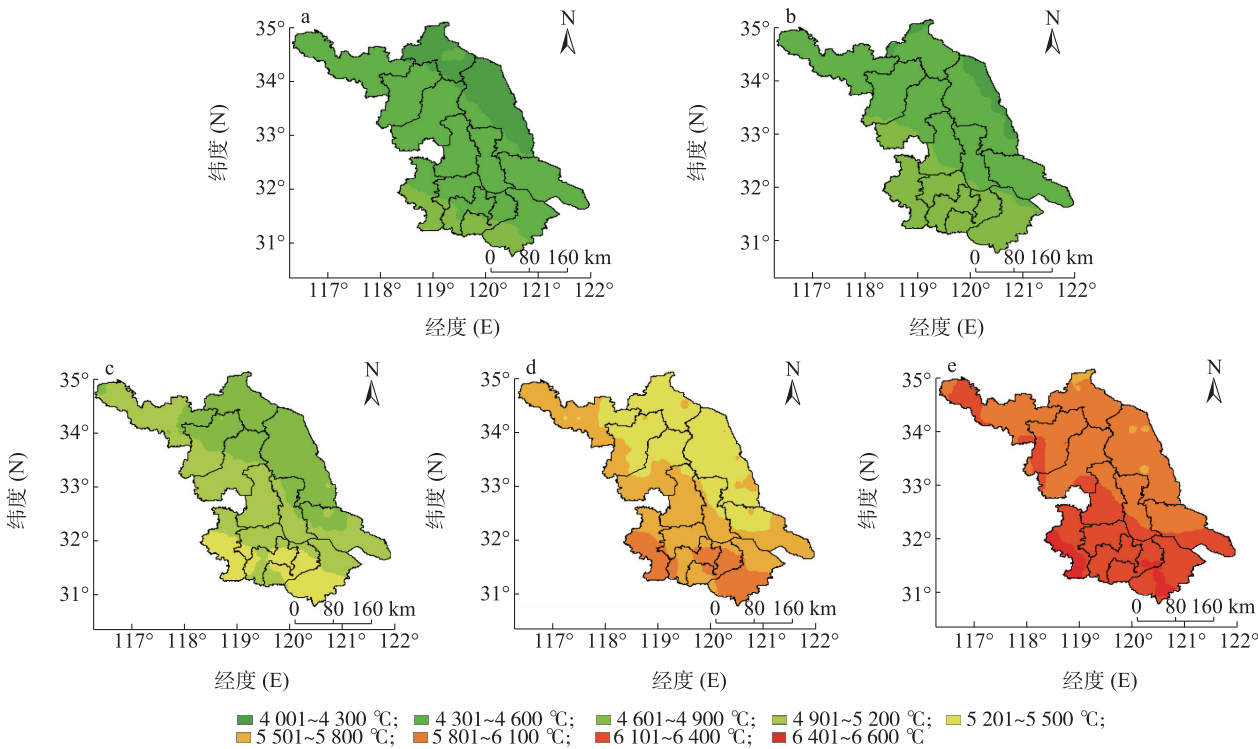
$$Y_3 = f(R) \cdot Y_2 \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 江苏省热量资源变化特征

2.1.1 一季稻生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 活动积温常用于农业气候中热量资源的分析, 且 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温最常使用。本试验对一季稻生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温变化进行分析, 由图 1 可知, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间上总体呈现出由东北向西南逐渐升高的趋势, 年份上呈现逐渐增加的趋势。相对于 1951–1980 年、1981–2010 年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温变化较平缓, 其中, 徐州东部、宿迁、淮安和南通北部、连云港、盐城大部 and 苏南北部地区年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温上升 300°C 左右。2011–2040 年, 全省 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温均在 $4\ 600^{\circ}\text{C}$ 以上, 南京、常州南部、无锡北部和苏州南部已达 $5\ 201 \sim 5\ 500^{\circ}\text{C}$ 。2041 年以后, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温增加趋势尤为明显, 全省均在 $5\ 200^{\circ}\text{C}$ 以上, 至 2071–2100 年, 苏南大部地区已达 $6\ 101 \sim 6\ 400^{\circ}\text{C}$, 其中南京、苏州南部更是高达 $6\ 401 \sim 6\ 600^{\circ}\text{C}$ 。

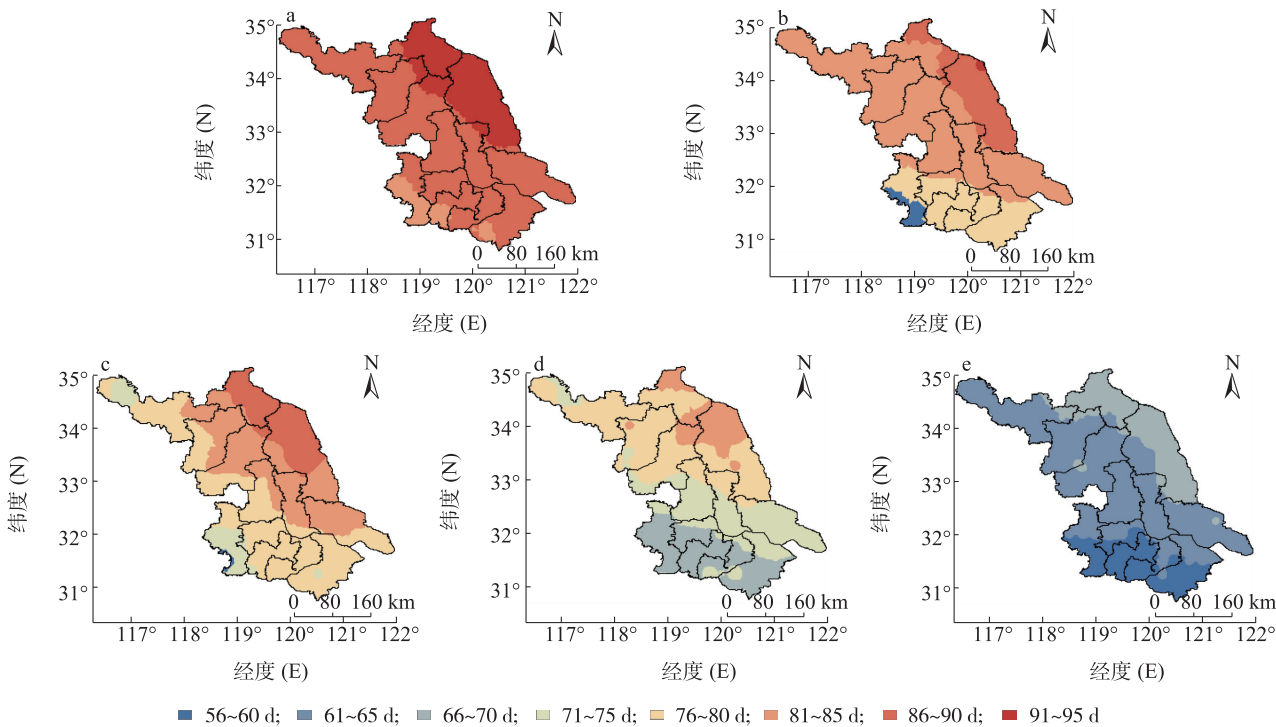
2.1.2 一季稻适播期 (年平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日) 的变化 1951–2100 年间, 江苏省一季稻适播期 ($\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日) 的变化如图 2 所示, 由图 2 可知, 江苏省一季稻适播期空间上整体呈现出由西南向东北逐渐推迟的趋势, 年份上呈现出逐渐提前的趋势。相对于 1951–1980 年、1981–2010 年江苏省一季稻适播期总体提前 5 d 以上, 其中连云港、盐城西南部、南京、镇江北部和苏锡常大部提前 5 ~ 10 d, 南京南部提前 25 d 左右。相对于 1981–2010 年, 2011–2040 年徐州大部、宿迁、淮安、扬州南部、南通东南部和南京中部将提前 5 d 左右, 南京西南部将有所推迟; 相对于 2011–2040 年, 2041–2070 年江苏省一季稻适播期提前趋势更为明显, 苏南大部、泰州、扬州中东部、南通西北部、连云港东南部和盐城中部提前 10 d 左右, 其余地区提前 0 ~ 5 d; 相对于 2041–2070 年, 2071–2100 年泰州、扬州北部、淮安中部、宿迁、徐州大部、连云港东北部、盐城北部一季稻适播期将提前 15 d 左右, 淮安南部、扬州、泰州中南部、南通大部提前 10 d 左右, 其余地区提前 5 d 左右。



a:1951-1980 年;b:1981-2010 年;c:2011-2040 年;d:2041-2070 年;e:2071-2100 年。

图 1 江苏省 1951-2100 年一季稻生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温

Fig. 1 The accumulated temperature above 10°C in a single-season rice growth season in Jiangsu province from 1951 to 2100



a:1951-1980 年;b:1981-2010 年;c:2011-2040 年;d:2041-2070 年;e:2071-2100 年。

图 2 江苏省 1951-2100 年一季稻适播期变化

Fig. 2 The change of optimum sowing date of single-season rice in Jiangsu province from 1951 to 2100

2.1.3 一季稻生育期天数的变化 江苏省 1951–2100 年一季稻生育期天数(图 3)总体呈现出 1951–2010 年由东北向西南逐渐缩短,2011–2100 年由东南向西北逐渐缩短的趋势。1951–1980 年时间段内江苏省一季稻生育期天数在 183 d 至 204 d 范围内,呈现东北部偏长、西南部偏短的分布趋势,其中南京西部最短,为 183 ~ 189 d。相对于 1951–1980 年时间段,1981–2010 年时间段江苏省一季稻生育期天数除南京西部和南通东南部有所延长,其余大部分区域变化不大。相对于 1981–2010 年,2011–2040 年,由于年平均气温有明显上升,江苏省一季稻生育期天数有明显缩短,江苏省大部分区域一季稻生长季为 176 ~ 182 d;徐州大部、宿迁西南部和南京西部生育期天数最短,为 169 ~ 175 d;盐城西南部、泰州东部和南通西北部局部地区最长,为 183 ~ 189 d。相对于 2011–2040 年,在 2041–2070 年内,由于温度的进一步升高,一季稻生育期天数进一步缩短,全省一季稻生育期天数均在 175 d 以下,其中徐州、宿迁大部、连云港大部、南京、镇江、扬州南部和常州大部较短,为 162 ~ 168 d;徐州西北部局部地区缩短至 155 ~ 161 d。相对于 2041–2070 年,在 2071–2100 年江苏省除苏州西部、盐城北部和东部沿海部分区域一季稻生育期天数略有缩短,其余区域变化不大。

2.2 一季稻气候生产潜力

由于江苏省农业气候资源的改变,使各时段一季稻气候生产潜力相对于基准时段(1981–2010 年)在空间(图 4)和年份(图 5)上都发生了明显变化。

与 1951–1980 年相比,1981–2010 年江苏省一季稻气候生产潜力空间上(图 4)有较小增加趋势,主要表现在泰州南部、扬州、南京、镇江、常州中部、淮安、无锡、苏州西南部。2011–2040 年,江苏省一季稻生产潜力继续增加,全省气候生产潜力均 $> 23\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$,其中苏中及苏南北部介于 $28\ 001 \sim 30\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$,苏南南部(尤其是无锡、苏州西南部)仍为气候生产潜力高值区。2041–2070 年,江苏省气候生产潜力有减小趋势,苏北为全省较低值区,基本介于 $20\ 501\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 至 $25\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 之间,其中徐州西部最低,仅为 $16\ 100 \sim 20\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$,苏南西南部仍为全省高值区,但相对之前有所下降。至 2071–2100 年,这一趋势更加明显,主要呈现出由东北向西南逐渐下降趋势,全省基本介于 $16\ 100\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 至 $28\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 之间,其中苏南西南部高值区逐渐缩小。

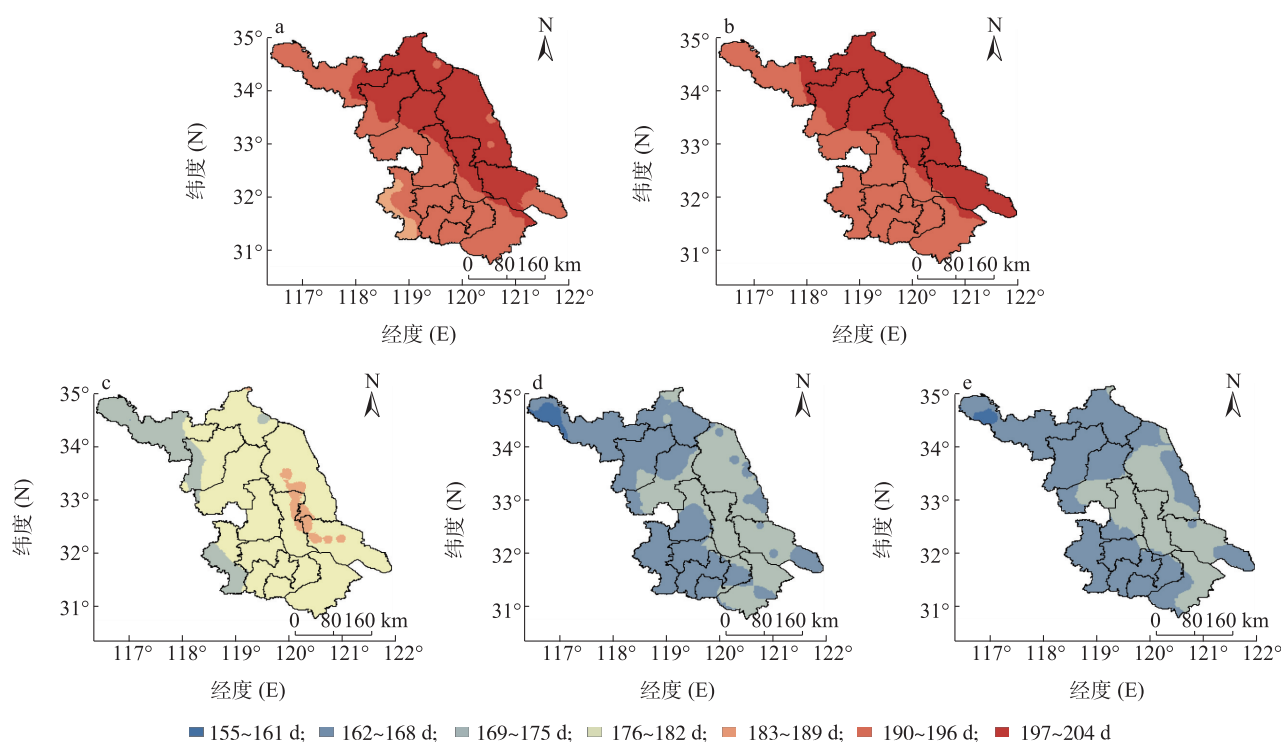
图 5 显示,2000 年之前江苏省一季稻气候生产潜力较小,随着热量资源的逐渐增加,气候生产潜力也开始逐渐增加,特别是 2021–2035 年间,一季稻气候生产潜力达较高水平,2061 年之后又开始逐渐下降。其原因主要是江苏省目前一段时间内的热量资源已能满足一季稻的生长发育,且达到较高产量,但是随着温度的逐渐升高,江苏省热量资源虽呈不断增加趋势,但部分地区过高温度已超过一季稻生长发育的上限温度,特别是 2061 年后,在一季稻抽穗–成熟阶段,日均温已高于一季稻产量形成的最适温度,故该时段一季稻气候生产潜力呈下降趋势。由此可见,在未来情景下,江苏省可适当调整一季稻播种时期,使其抽穗–成熟阶段避开高温时段,获得稳产、高产。

综上所述,应结合热量资源与气候生产潜力的时空变化,充分利用该区域热量资源,促进气候生产潜力增加。

3 讨论

本研究基于江苏省 1971–2000 年逐日站点气象数据以及 RegCM3 模式模拟输出的格点气象数据,对江苏省热量资源和一季稻气候生产潜力时空变化特征进行了分析。主要研究结果为:(1)1951–2100 年,江苏省 $\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 积温总体呈现出空间上由东北向西南逐渐升高,且随年份的增加呈逐渐增加的趋势。一季稻适播期(年平均气温 $\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 初日)整体呈现出空间上由西南向东北逐渐推迟,且随时间的增加呈逐渐提前的趋势;一季稻生长期总体呈现出 1951–2010 年由东北向西南逐渐缩短,2011–2100 年由东南向西北逐渐缩短的趋势。(2)江苏省一季稻气候生产潜力年份上呈现出先上升后下降的趋势,2000 年之前气候生产潜力较小,随着热量资源的逐渐增加,气候生产潜力也开始逐渐增加,特别是 2021–2035 年间,一季稻气候生产潜力达较高水平,2060 年之后又开始逐渐下降;空间上,苏南西南部一直为气候生产潜力高值区。在未来情景下,江苏省可适当调整一季稻播种期,使其抽穗–成熟阶段避开高温时段,获得稳产、高产。

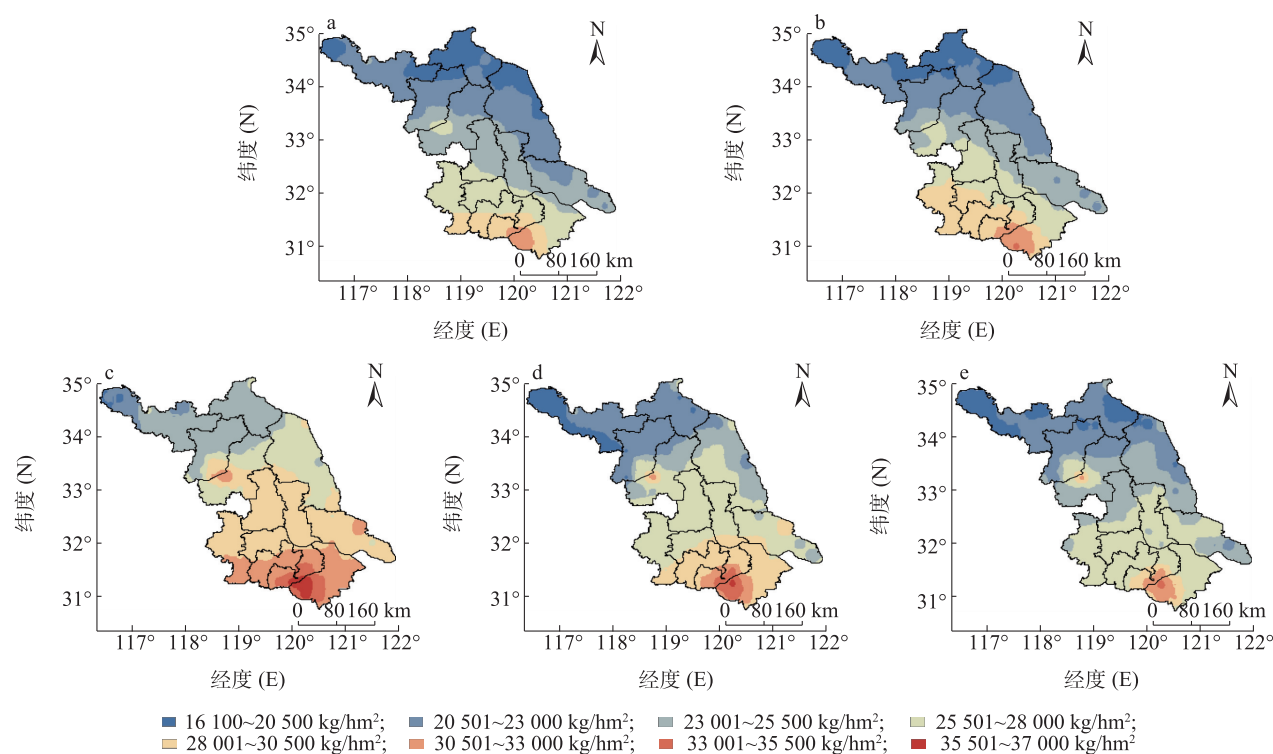
本研究不仅对一季稻气候生产潜力进行了研究,而且针对未来气候情景下进行了江苏省一季稻气候生产潜力的预估,为应对气候变化、合理利用热量资源调整农业种植结构、提高作物产量品质及一季稻气候生产潜力提供科学指导。



a:1951-1980 年;b:1981-2010 年;c:2011-2040 年;d:2041-2070 年;e:2071-2100 年。

图3 江苏省 1951-2100 年一季稻生育期天数变化

Fig.3 Change of the length of a single-season rice growth season in Jiangsu province from 1951 to 2100



a:1951-1980 年;b:1981-2010 年;c:2011-2040 年;d:2041-2070 年;e:2071-2100 年。

图4 江苏省 1951-2100 年一季稻气候生产潜力

Fig.4 The climatic potential productivity of single-season rice in Jiangsu province from 1951 to 2100

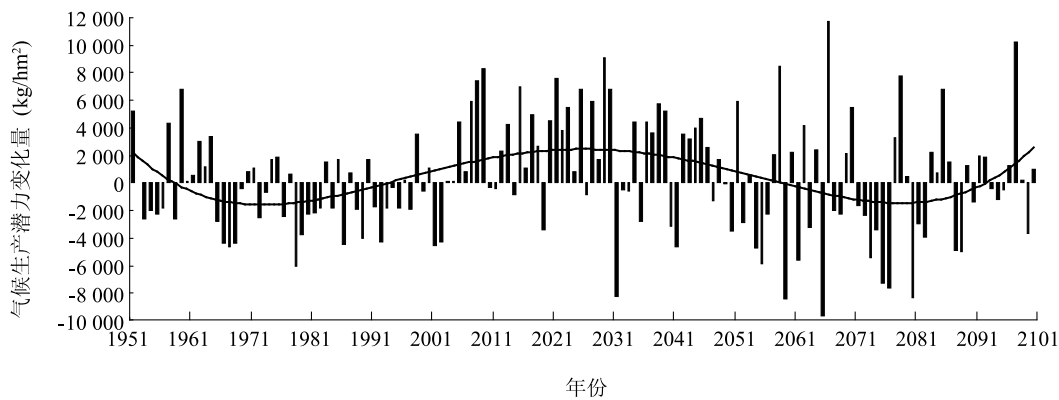


图5 江苏省 1951-2100 年一季稻气候生产潜力变化量

Fig.5 The variation of single-season rice climatic potential productivity in Jiangsu province from 1951 to 2100

对一季稻气候生产潜力研究的目的是提高一季稻产量和品质,作物生长是一个动态的过程,影响气候生产潜力的因子也是动态变化的。因此,在大量试验的基础上,建立精细化的作物数据库,从而进一步改进气候生产潜力模型。本研究范围仅局限于江苏省,进一步研究可以将研究范围扩大,以对气候生产潜力进行大规模的分析,便于政府宏观调控。

参考文献:

- [1] 秦大河, THOMAS S. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 赵俊芳, 郭建平, 张艳红, 等. 气候变化对农业影响研究综述[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 200-205.
- [3] 朱 敏, 袁建辉. 1961–2010 年江苏省农业气候资源演变特征[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(3): 69-77.
- [4] 赵俊芳, 郭建平, 马玉平, 等. 气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 2922-2930.
- [5] 冷明珠, 郭建平, 袁 彬, 等. 气候变化背景下东北地区热量资源及玉米温度适宜度[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2786-2794.
- [6] 胡 琦, 潘学标, 邵长秀, 等. 1961–2010 年中国农业热量资源分布和变化特征[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 119-127.
- [7] 钟新科, 刘 洛, 徐新良, 等. 近 30 年中国玉米气候生产潜力时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 94-101.
- [8] 尹海霞, 张 勃, 张建香, 等. 甘肃省河东地区春玉米气候因子及气候生产潜力时空变化[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1504-1510.
- [9] 赵俊芳, 郭建平, 郭定荣, 等. 2011–2050 年黄淮海冬小麦、夏玉米气候生产潜力评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3189-3195.
- [10] 谢 云, 王晓岚, 林 燕. 近 40 年中国东部地区夏秋粮作物农业气候生产潜力时空变化[J]. 资源科学, 2003, 25(2): 7-13.
- [11] 田 展, 梁卓然, 史 军, 等. 近 50 年气候变化对中国小麦生产潜力的影响分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(9): 61-69.
- [12] 陈长青, 类成霞, 王春春, 等. 气候变暖下东北地区春玉米生产潜力变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1272-1279.
- [13] 濮梅娟, 方 韩, 周曾奎. 江苏省决策气象服务手册[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [14] 包云轩, 刘 维, 高 苹, 等. 气候变暖背景下江苏省水稻热害发生规律及其对产量的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 289-296.
- [15] 袁 彬, 郭建平, 冷明珠, 等. 气候变化下东北春玉米品种熟型分布格局及其气候生产潜力[J]. 科学通报, 2012, 57(14): 1252-1262.
- [16] 孙卫国. 气候资源学[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [17] 颜 宏, 沈国权, 毛耀顺. 中华人民共和国气候图集[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [18] 王宗明, 张 柏, 张树清, 等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究[J]. 中国农业气象, 2005(26): 1-6.
- [19] 郭建平, 高素华, 潘亚茹. 东北地区农业气候生产潜力及其开发利用对策[J]. 气象, 1994(21): 3-9.
- [20] 赖纯佳, 千怀遂, 段海来, 等. 淮河流域双季稻气候适宜度及其变化趋势[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2339-2346.
- [21] 俞 芬, 千怀遂, 段海来, 等. 淮河流域水稻的气候适宜度及其变化趋势分析[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 537-542.
- [22] 刘 勤, 严昌荣, 何文清. 山西寿阳县旱作农业气候生产潜力研究[J]. 中国农业气象, 2007(28): 271-274.
- [23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D. Crop evapotranspiration [R]. Rome: FAO, 1998.
- [24] 丁加丽, 彭世彰, 徐俊增, 等. 控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 239-242.
- [25] 郭建平, 高素华, 潘亚茹. 东北地区农业气候生产潜力及其开发利用对策[J]. 气象, 1994(21): 3-9.
- [26] 刘 勤, 严昌荣, 何文清. 山西寿阳县旱作农业气候生产潜力研究[J]. 中国农业气象, 2007(28): 271-274.

(责任编辑: 袁 伟)