

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.09.001

黄维,吴炫柯,刘永裕,等.气候变化对广西双季稻种植布局的影响[J].中国农业气象,2020,41(9):539-551

气候变化对广西双季稻种植布局的影响*

黄 维¹, 吴炫柯^{1**}, 刘永裕¹, 何 燕², 安佳君¹

(1.柳州市农业气象试验站, 柳州 545003; 2.广西气象科学研究所, 南宁 530022)

摘要: 利用 1960–2019 年广西 91 个气象站逐日气温和日照时数资料, 将研究时段分成前 30a (P1: 1960–1989 年) 和后 30a (P2: 1990–2019 年) 两个阶段, 分析影响水稻种植布局的 4 个关键气候因子即双季稻安全生育期、安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温、全年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日照总时数和年平均气温的变化规律, 采用等权重原则对两个阶段的关键气候因子进行评估打分, 根据总得分将广西双季稻种植划分为单季再生稻 (S+R)、早中熟双季稻 (E+M)、中迟熟双季稻 (M+L) 和迟熟双季稻 (L+L) 4 个气候适宜区组合模式, 并分析两个阶段内双季稻不同组合模式的空间分布特征及变化规律。结果表明: 桂北和桂西水稻安全生育期显著延长, 研究区大部分地区安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温和年平均气温显著上升, 而全年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日照总时数显著下降。热量资源在空间上呈现向北向高海拔地区递增趋势, 而日照时数由北向南减少, 后 30a (1990–2019 年) 单季再生稻和中迟熟双季稻气候适宜区面积较前 30a (1960–1989 年) 分别提高 2.1 个和 4.2 个百分点, 而早中熟双季稻和迟熟双季稻气候适宜区面积较前 30a (1960–1989 年) 分别下降了 3.6 个和 2.7 个百分点, 变化显著的区域主要分布在桂林阳朔、荔浦地区, 贺州市区周边以及南宁马山、隆安地区。

关键词: 气候变化; 水稻; 种植区划; 广西

Impact of Climate Change on Layout of Double Cropping Rice in Guangxi

HUANG Wei¹, WU Xuan-ke¹, LIU Yong-yu¹, HE Yan², AN Jia-jun¹

(1. Liuzhou Agrometeorological Experimental Station, Liuzhou, Guangxi 545003, China; 2. Guangxi Institute of Meteorological Science, Nanning, Guangxi 530022)

Abstract: Climate change has become an indisputable fact. According to the fifth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the global average temperature has increased by 0.85°C in the past 100 years. Warming as the main feature of climate change has had a series of important impacts on cropping system and quality layout. Its concrete performance is as follows: crop planting boundaries moved to north and expanded to high altitude, crop variety layout and crop planting structure changed obviously, and multi-cropping indices increased significantly. Relevant researches revealed that annual and seasonal average temperature showed a roughly upward trend in paddy region of Guangxi. In addition, growth period and agricultural climate resources allocation pattern changed obviously in these areas. Layout of double cropping rice is sensitive to the change of agricultural resources. However, the impacts of climate change on the planting layout of double cropping rice in Guangxi was seldom discussed. In order to reveal the change characteristics of layout of double cropping rice under the background of climate change, meteorological data from Guangxi Meteorological Bureau and geographic data from National Geomatics Center of China were utilized in the study. Four climatic factors were selected as the key factors which

* 收稿日期: 2020-04-30 ** 通讯作者吴炫柯, E-mail: 378892370@qq.com

基金项目: 广西科技重点研发计划项目 (桂科 AB171195037); 广西自然科学基金 (2020GXNSFAA159028); 中国气象局应急减灾与公共服务司项目“农业气象试验站冬小麦、水稻、玉米区域联合试验”(气减函 2017-53)

第一作者联系方式: 黄维, E-mail: 827643506@qq.com

affected the layout of rice planting. They were safe days of growth period of double cropping rice, active integrated temperature ($\geq 10^{\circ}\text{C}$) during safe growth period, total sunshine hours during the period of daily average temperature above 10°C in a year and annual average temperature respectively. In this paper they were abbreviated to D, AT, SH and T. Based on the daily temperature and sunshine hours of 91 meteorological stations in Guangxi from 1960 to 2019, changing trend of four key climatic factors were analyzed. The study period was divided into two phases, namely first 30 years (P1:1960–1989) and last 30 years (P2:1990–2019). The equal weight principle was used to evaluate and score each key climatic factor in the two phases. According to the total scores of four key climatic factors, double cropping rice planting zones were divided into four climatic suitable regions in Guangxi, namely regions of single cropping and ratooning rice (S+R), regions of early and medium maturing double cropping rice (E+M), regions of medium and late maturing double cropping rice (M+L) and regions of late maturing double cropping rice (L+L). Different combination patterns of double cropping rice mentioned above were determined by their demands for agricultural climatic resources. Generally speaking, demand of single cropping and ratooning rice for heat resources was small. It mainly distributed in the high altitude areas of north and west of Guangxi, while the late maturing double cropping rice distributed in south areas involved Youjiang river valley of Guangxi because of the great demand for heat resources and longer safe growth season. Early and middle maturing double cropping rice and middle and late maturing double cropping rice mainly distributed in the central areas of Guangxi. Their demands for agricultural climatic resources were between S+R and L+L. In the end, the spatial distribution characteristics and changing rules of different combination patterns of double cropping rice were analyzed in two phases. The results revealed that safe days of growth period of double cropping rice increased significantly in the north and west of Guangxi. Active integrated temperature ($\geq 10^{\circ}\text{C}$) and annual average temperature increased significantly, while the total sunshine hours during the period of daily average temperature above 10°C in a year decreased significantly in most study areas. The heat resources increased towards to the north and high altitude, while sunshine hours decreased from the north to the south. Comparing with the first 30 years (P1:1960–1989), climatic suitable areas of single cropping and ratooning rice and medium and late maturing double cropping rice increased by 2.1 and 4.2 percent point, while those of early and middle maturing double cropping rice and late maturing double cropping rice decreased by 3.6 and 2.7 percent point in the last 30 years (P2:1990–2019). The significantly changing areas mainly distributed in Yangshuo and Lipu regions of Guilin, the surrounding regions of Hezhou, Mashan and Longan regions of Nanning. The purpose of this research is to provide a scientific reference to make full use of the sunlight and heat resources under background of climate change and to optimize planting layout of double cropping rice in Guangxi.

Key words: Climate change; Rice; Planting regionalization; Guangxi

气候变化已成为不容置疑的事实。政府间气候变化委员会 (IPCC) 第五次报告指出, 近 100a 内, 全球平均温度已升高 0.85°C , 近 60a 上升尤其明显^[1-2]。中国气候变化趋势与全球气候变化的总趋势基本一致, 近百年来地表年均气温升高 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$, 北方地区增加幅度大于南方地区^[3], 与此同时, 日照时数呈总体减少趋势, 夏季下降幅度最大, 秋季、冬季次之, 春季最小^[4]。这种以变暖为显著特点的气候变化, 已对农业气候资源、农作物气候生产潜力和气候资源利用率、农作物生长发育和产量、农业种植制度和品种布局

等产生了一系列不可忽视的影响^[5-7]。其中, 对农业种植制度和品质布局的影响主要体现在作物种植界线和多熟制种植界线北移高扩^[8-13], 作物品种布局和作物种植结构发生明显改变^[14-16], 作物复种指数大幅度提高^[17]等方面。

水稻是中国主要粮食作物, 种植区从北向南跨越了温带、亚热带及热带地区, 分布很广, 种植制度主要包括一年一熟、一年两熟、一年三熟、两年三熟^[18]。自 1978 年以来, 中国大多数地区水稻种植面积缩减, 特别是传统的南方水稻主产区减少较多^[19]。广西位于中国南部的低纬度地区, 气候资源

丰富，是南方地区重要的双季稻种植区，水稻熟性搭配模式主要为单季再生稻、早中熟双季稻、中迟熟双季稻和迟熟双季稻，其中单季再生稻热量需求较小，主要分布在桂北桂西高海拔地区，迟熟双季稻分布在安全生长期较长的桂南和右江河谷一带，而早中熟双季稻和中迟熟双季稻主要分布在广西中部^[20-21]。据统计，2018 年广西水稻种植面积 $1.75 \times 10^6 \text{hm}^2$ ，占全区粮食总种植面积的 63%，产量占粮食总产的 74%^[22]，水稻生产在该区域粮食生产中占有十分重要的地位，但自 1995 年以来水稻种植面积呈连续下降趋势，稳定该地区水稻种植面积对保障国家粮食安全具有重要意义。

在全球气候变化的影响下，水稻种植制度及空间布局发生显著变化。已有研究表明，中国东北地区水稻种植界限已北移 4 个纬度带，南方水稻品种逐渐向北方扩展^[6]，早熟种植区面积减小而晚熟种植区面积扩大^[23]。广西水稻产区年平均气温及各季节平均气温普遍呈上升趋势，水稻发育期已发生显著变化，农业气候资源配置格局改变^[21]，但关于气候变化对广西双季稻种植布局的影响却鲜有探讨，因此，本研究以 1960–2019 年气象资料为数据源，分析影响广西水稻布局关键气候因子的变化趋势，并将研究时段划分为 P1（1960–1989 年）和 P2（1990–2019 年）2 个时段，分别对两个时段的水稻种植布局进行区划，尝试分析气候变化对广西双季稻种植布局的影响，旨在为制定广西地区水稻种植计划和优化生产布局提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料及其来源

从广西气象局获取 1960–2019 年广西 91 个气象观测站逐日气象资料，包括日平均气温和日照时数，气象观测站空间分布如图 1 所示。从国家基础地理信息中心获取广西地区 1:25 万基础地理数据，包括 DEM 数据和地市级行政矢量边界等，对 DEM 数据进行拼接、重采样和裁剪，提取出 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 空间分辨率的广西 DEM 数据，并从 DEM 数据中提取经度和纬度的栅格数据备用。另外从中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 获取 20 世纪 80 年代末期（1990 年）和 2018 年共 2 期广西土地利用遥感监测数据，该数据空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ ，并提取出水田类型区域，即有水源保证和灌溉设施，在一般年景能正常灌溉，用以种植水稻、莲藕等水

生农作物的耕地，包括实行水稻和旱地作物轮种的耕地。数据处理均在 ArcGIS10.3 平台进行，制图均采用阿伯斯投影坐标系。

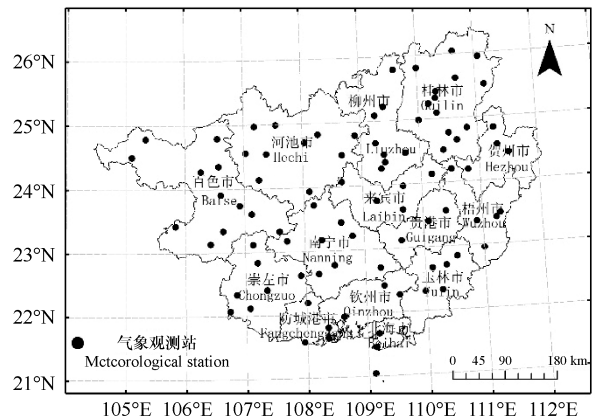


图 1 广西 91 个气象观测站空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of 91 meteorological stations in Guangxi

1.2 关键气候因子

选取双季稻安全生育期天数 (D)、安全期内 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温 (AT)、全年日平均气温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 期间的日照总时数 (SH) 和年平均气温 (T) 作为影响广西双季稻布局的关键气候因子^[20]。双季稻安全生育期指早稻安全播种期–晚稻安全齐穗期的持续时间，早稻安全播种期为上半年日平均气温稳定通过 12°C 的初日^[21]，晚稻安全齐穗期为下半年日平均气温稳定通过 22°C 终日，初终日均采用 5 日滑动平均法计算^[24-25]。

1.3 趋势分析方法

采用直线回归方法分析各因子的时间变化趋势^[26]，即

$$x_t = a_0 + a_1 t \quad (1)$$

式中， x_t 为气候因子变量的拟合值； a_0 为变量初始值； a_1 为趋势系数； t 为时间。 a_1 正值表示 x 随时间 t 呈增加趋势，反之呈减少趋势， $a_1 \times 10$ 为气候倾向率，表示各气候因子每 10a 的变化率，采用 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验趋势系数的显著性^[27]。

1.4 气候因子空间推算模型

利用 91 个气象观测站关键气候因子的平均值，使用逐步回归法建立其与经度、纬度、高程的回归方程，并计算残差，采用反距离权重 (IDW) 插值法对残差进行插值。气候因子与地理因子的关系模型可表示为^[28-29]

$$y = f(x_1, x_2, x_3) + \varepsilon \quad (2)$$

式中, y 为关键气候因子, $f(x_1, x_2, x_3)$ 为气候因子推算值, ε 为地理残差。

1.5 区域划分

由于关键气候因子的单位不一致, 为使其无量纲化, 采用专家打分法对各关键气候因子进行分级打分, 参考文献[20], 依次将落在单季再生稻(S+R)、早中熟双季稻(E+M)、中迟熟双季稻(M+L)和迟

熟双季稻(L+L)气候适宜区的气候因子分别评为4分、8分、12分、16分, 最后根据区域内4个气候因子总得分(G)将广西稻区划分为迟熟双季稻气候适宜气候区($G=64$ 分)、中迟熟双季稻气候适宜区($48 \text{分} \leq G < 64 \text{分}$)、早中熟双季稻气候适宜区($32 \text{分} \leq G < 48 \text{分}$)以及单季再生稻气候适宜区($16 \text{分} \leq G < 32 \text{分}$), 如表1所示。

表 1 影响双季稻布局关键气候因子的评分标准

Table 1 Division standard of the key climatic factors affecting layout of double cropping rice in Guangxi

因子 Factor	双季稻种植模式 Model of double cropping rice			
	S+R	E+M	M+L	L+L
D (d)	$D < 185$	$185 \leq D < 205$	$205 \leq D < 225$	$D \geq 225$
AT ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	$AT < 4800$	$4800 \leq AT < 5200$	$5200 \leq AT < 5600$	$AT \geq 5600$
SH (h)	$SH < 1100$	$1100 \leq SH < 1300$	$1300 \leq SH < 1500$	$SH \geq 1500$
T ($^{\circ}\text{C}$)	$T < 18.0$	$18.0 \leq T < 19.5$	$19.5 \leq T < 20.5$	$T \geq 20.5$
分值 Score	4	8	12	16
总分 Total score(G)	$16 \leq G < 32$	$32 \leq G < 48$	$48 \leq G < 64$	64

注: S+R 为单季再生稻, E+M 为早中熟双季稻, M+L 为中迟熟双季稻, L+L 为迟熟双季稻, D 为双季稻安全生育期, AT 为安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温, SH 为全年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日照总时数, T 为年平均气温。下同。

Note: S+R is single cropping + ratooning. E+M is early maturing + medium maturing. M+L is medium maturing + late maturing. L+L is late maturing + late maturing. D is safe days of growth period of double cropping rice. AT is the active integrated temperature ($\geq 10^{\circ}\text{C}$) during safe growth period. SH is the total sunshine hours during the period of daily average temperature above 10°C in a year. T is annual average temperature. Each climatic factor is rated as 4 points, 8 points, 12 points and 16 points according to whether they meet corresponding climatic condition of S+R, E+M, M+L and L+L. The same as below.

2 结果与分析

2.1 影响双季稻布局关键气候因子的时间变化

2.1.1 线性变化趋势

由图 2a 可见, 研究期内(1960–2019 年) 91 个气象观测站中 45.6% 站点的双季稻安全生育期(D)表现出明显的延长趋势, 线性倾向率在 $2.4 \sim 5.5 \text{d} \cdot 10 \text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$), 这些站点主要分布在桂西区域以及桂林市、柳州市北部为主的桂北, 贵港市平南观测站变化最快, 桂林市龙胜观测站变化最慢, 百色、河池、来宾、梧州、南宁、北海也有一些站点延长, 其余 54.4% 气象观测站变化趋势不显著。

由图 2b 可见, 73.6% 气象观测站的双季稻安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温(AT)均表现出明显的增加趋势, 其线性变化倾向率为 $54.2 \sim 172.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10 \text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$), 主要分布在研究区东北部和西南部, 防城港市防城观测站增加最快, 桂林市灌阳观测站增加最慢, 其余 26.4% 气象观测站无显著变化趋势。

由图 2c 可见, 58.2% 气象观测站的全年日平均温度 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日照总时数(SH)变化趋势明显,

其中北海市合浦观测站的全年日平均温度 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日照总时数(SH)呈现明显增加趋势, 线性变化倾向率为 $0.3 \text{h} \cdot 10 \text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$), 其余变化趋势显著的气象站呈现明显下降趋势, 研究区各地市均有分布, 线性变化倾向率在 $21.6 \sim 76.6 \text{h} \cdot 10 \text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$), 百色市右江观测站下降速度最快, 百色市凌云观测站下降速度最慢, 其余 41.8% 气象观测站无显著变化趋势。

由图 2d 可见, 94.5% 气象观测站的年平均气温(T)呈现显著上升趋势, 线性变化倾向率在 $0.1 \sim 0.4^{\circ}\text{C} \cdot 10 \text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$), 与研究区中部相比, 桂北、桂东、桂南、桂西上升速度较快, 防城港观测站上升速度最快, 百色市右江观测站上升速度最慢, 其余 5.5% 气象观测站的年平均气温(T)变化趋势不显著。

可见, 研究时段内桂北和桂西水稻安全生育期显著延长, 研究区大部分地区安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温和年平均气温显著增加, 而全年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日照总时数显著下降, 光热资源的显著变化为当地双季稻种植布局的调整提供了条件。

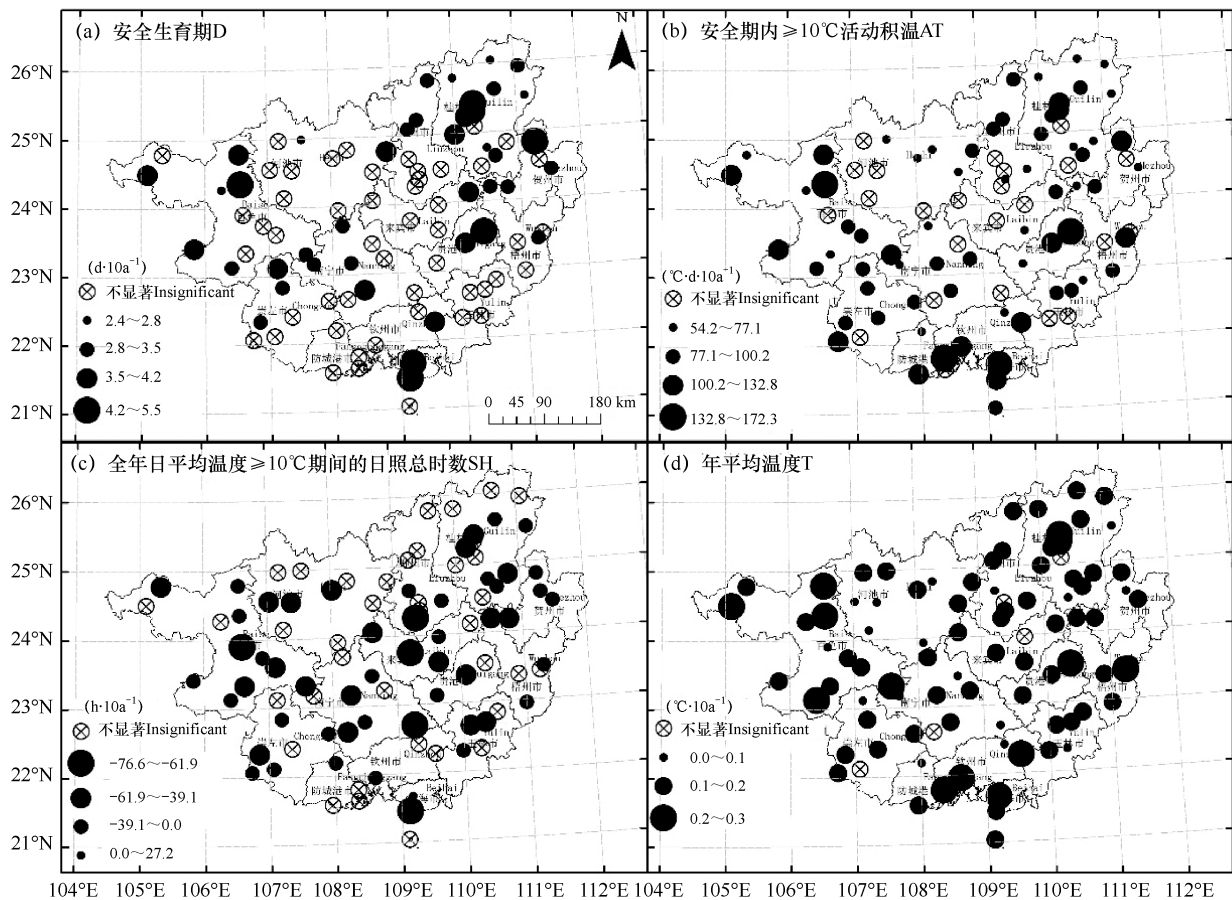


图 2 广西 91 个气象站 1960–2019 年 4 个关键气候因子的线性变化倾向率

Fig. 2 Linear trend of four key climatic factors in 91 meteorological stations of Guangxi from 1960 to 2019

2.1.2 阶段变化特征

将研究区 91 个气象站 1960–2019 年的资料划分为前 30a (P1: 1960–1989 年) 和后 30a (P2: 1990–2019 年) 两个阶段, 分别计算两个阶段关键气候因子 1/4 分位数 (Q1)、中位数 (Q2)、3/4 分位数 (Q3) 和平均值, 制作箱图, 并对两个时段的平均值进行 t 检验, 结果如图 3 所示。由图可见, P2 阶段安全生育期 (D) 的 Q1、Q2 和 Q3 分别比 P1 阶段长 8、6 和 11d (图 3a), 安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 (AT) 的 Q1、Q2 和 Q3 分别比 P1 阶段多 232、472 和 271 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (图 3b), 全年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日照总时数 (SH) 的 Q1、Q2 和 Q3 分别比 P1 阶段少 84、87 和 85h (图 3c), 年平均气温 (T) 的 Q1、Q2 和 Q3 分别比 P1 阶段高 0.6、0.5 和 0.4 $^{\circ}\text{C}$ (图 3d)。就两阶段各因子平均值而言, P2 阶段的安全生育期 (D)、安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 (AT) 和年平均气温 (T) 分别比 P1 阶段大 9d、254 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$

和 0.5 $^{\circ}\text{C}$, 均通过 0.05 水平显著性检验, 而 P2 阶段的全年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日照总时数 (SH) 比 P1 阶段少 84h, 通过了 0.01 水平显著性检验。由以上分析可知, 研究区前后两时段的关键气候因子均发生显著变化, 因此, 制作 P1 阶段和 P2 阶段气候因子的空间分布图, 比较两个阶段地域上的差异及变化规律, 是分析气候变化对广西双季稻种植布局影响的重要过程。

2.2 双季稻布局关键气候因子的空间变化

2.2.1 空间推算模型

利用各气象观测站的 4 个关键气候因子分别在 P1 阶段和 P2 阶段的平均值, 与经度、纬度、高程进行逐步回归分析, 采用反距离权重 (IDW) 插值法对残差进行插值计算, 结果见表 2。由表可知, P1 阶段和 P2 阶段的双季稻安全生育期 (D)、安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 (AT) 和年平均气温 (T) 的自变量包括经度 (x_1)、纬度 (x_2)、高程 (x_3) 全部

进入回归模型，P1 阶段和 P2 阶段全年日平均气温 ≥10℃ 期间的日照总时数 (SH) 的回归模型中都剔除自变量经度 (x₁)，模型显示日照时数的空间分布

与经度无关。上述关键气候因子与经纬度及高程的回归系数均通过了 0.01 水平的显著性检验，模拟效果较好。

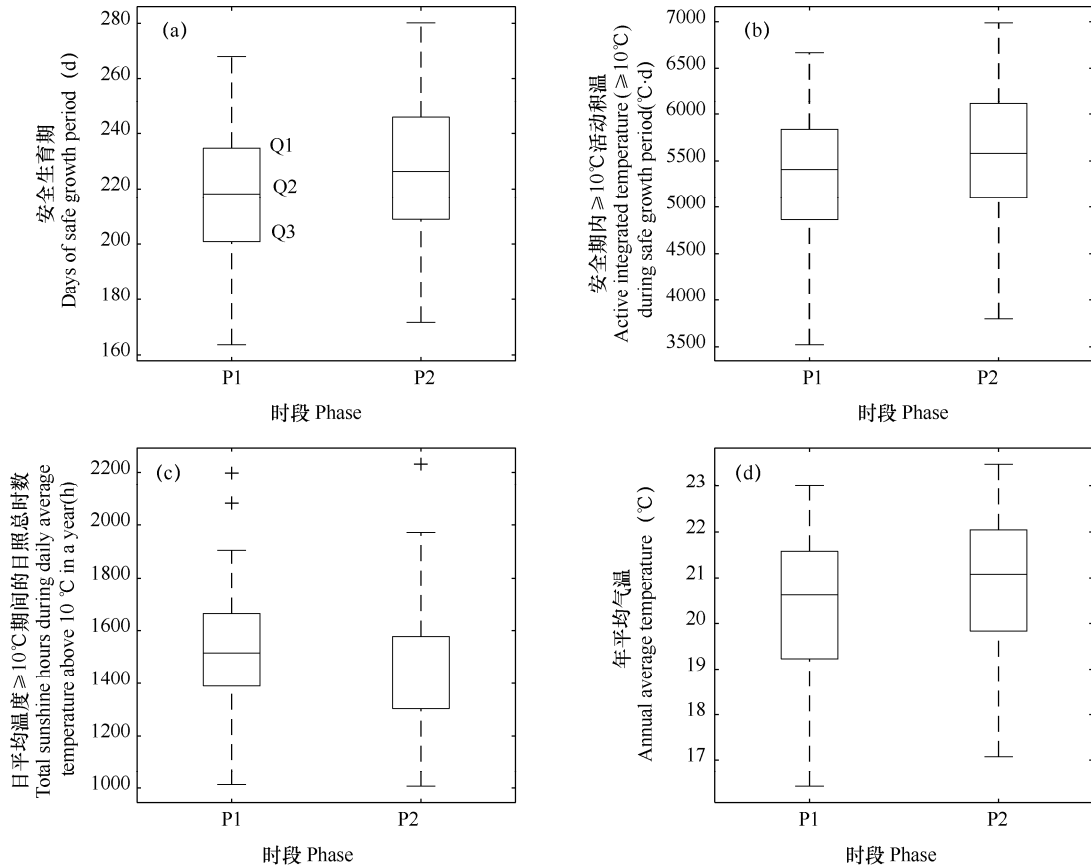


图 3 91 个气象站前 30a (P1: 1960–1989 年) 和后 30a (P2: 1990–2019 年) 4 个关键气候因子的统计分析
Fig.3 Statistical analysis of four key climatic factors in the first 30 years (P1: 1960–1989) and in the last 30 years (P2: 1990–2019) in 91 meteorological stations

注：上、下两根短线为极大值和极小值，“+”为离群值，Q1 为 1/4 分位数，Q2 为中位数，Q3 为 3/4 分位数。
Note: The upper and lower short lines are maximum and minimum. “+” is outlier. Q1 is 1/4 quantile. Q2 is median. Q3 is 3/4 quantile.

表 2 P1 阶段和 P2 阶段关键气候因子的空间推算模型
Table 2 Spatial prediction model of key climate factors in P1 and P2 phase

时段 Phase	回归方程 Regression equation	R	P
P1: 1960–1989	$D = 1074.59 - 5.162x_1 - 11.882x_2 - 0.062x_3$	0.964	<0.01
	$AT = 27060.663 - 128.464x_1 - 305.488x_2 - 2.246x_3$	0.969	<0.01
	$SH = 4660.159 - 116.58x_2 - 0.299x_3$	0.787	<0.01
	$T = 71.535 - 0.303x_1 - 0.724x_2 - 0.005x_3$	0.961	<0.01
P2: 1990–2019	$D = 1074.979 - 4.955x_1 - 12.501x_2 - 0.06x_3$	0.962	<0.01
	$AT = 27483.201 - 124.591x_1 - 331.304x_2 - 2.198x_3$	0.968	<0.01
	$SH = 4317.53 - 118.947x_2 - 0.231x_3$	0.804	<0.01
	$T = 69.435 - 0.273x_1 - 0.751x_2 - 0.004x_3$	0.960	<0.01

注：x₁、x₂、x₃ 表示经度 (°)、纬度 (°) 和海拔高度 (m)，R 为相关系数，P 为显著性检验。
Note: x₁, x₂ and x₃ represent longitude (°), latitude (°) and elevation (m), respectively. R is correlation coefficient, P is significance test level.

2.2.2 空间分布特征

利用表2中模型计算得到P1和P2时段关键气候因子的空间分布,结果见图4。由图可见,两个阶段影响双季稻布局的关键气候因子有一定差异。图4a中,研究区内满足迟熟双季稻(L+L)生产安全期条件即 $D \geq 225d$ 的区域面积在P2阶段占40.1%,而在P1阶段仅占29.5%,P2比P1提高了10.6个百分点。具体分布上,P1阶段 $D \geq 225d$ 的区域主要分布在右江河谷一带及研究区南部,P2阶段明显向中部扩张,并延伸至来宾市和河池市南部,且由右江河谷向四周扩大;满足中迟熟双季稻(M+L)生产安全期条件即 $205 \leq D < 225d$ 的区域面积在P1阶段占25.8%,P2阶段占25.0%,两个阶段相差不大,但分布区域由P1阶段的研究区中部包括崇左、南宁、贵港、梧州北部、来宾、柳州南部和河池中部以东地区,在P2阶段明显向北迁移,在河池中部以东继续扩大,同时延伸至柳州融安、融水一带和桂林南部,并覆盖贺州大部分地区;满足早中熟双季稻(E+M)生产安全期条件即 $185 \leq D < 205d$ 的区域面积在P1阶段占22.3%,在P2阶段占20.6%,P2比P1降低了1.7个百分点,P1阶段 $185 \leq D < 205d$ 的区域主要分布在研究区北部的低海拔地区,涉及百色南部,河池,柳州中北部和桂林中南部,以及贺州大部分地区,P2阶段明显向北、向高海拔地区迁移,主要分布地包括百色和河池高海拔地区,柳州中北部,以及桂林中部和兴安、全州一带;满足单季再生稻(S+R)生产安全期条件即 $D < 185d$ 的区域面积在P1阶段占22.4%,P2阶段占14.3%,P2比P1降低了8.1个百分点,P1阶段 $D < 185d$ 的区域主要分布在研究区北部的高海拔地区,包括百色、河池、柳州和桂林北部,以及来宾东部,贺州部分高海拔地区,P2阶段在P1阶段基础上大幅从高海拔区收缩。可见,后30a(P2:1990–2019年),由于气候变化,满足迟熟双季稻(L+L)生产安全期条件的区域明显向北扩大,满足早中熟双季稻(E+M)和中迟熟双季稻(M+L)生产安全期条件的区域面积变化不大,但整体向北向高海拔地区转移,满足单季再生稻(S+R)生产安全期条件的区域面积大幅度从北部和高海拔地区收缩。

从图4b中可以看出,满足迟熟双季稻(L+L)生产的安全期 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温条件即 $AT \geq 5600^\circ\text{C}\cdot\text{d}$

的区域面积在P2阶段占37.8%,在P1阶段占27.7%,P2比P1提高10.1个百分点。P1阶段 $AT \geq 5600^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域主要分布在右江河谷一带及研究区南部,P2阶段由研究区南部向中部扩张,并延伸至来宾市北部和河池市南部,且在右江河谷的范围扩大;满足中迟熟双季稻(M+L)生产的安全期活动积温条件即 $5200 \leq AT < 5600^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域面积在P2阶段占15.9%,在P1阶段占17.3%,P2比P1降低了1.4个百分点,P1阶段 $5200 \leq AT < 5600^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域主要分布在研究区中部,南宁北部、来宾和柳州南部,P2阶段明显向北迁移,延伸至柳州市融安、融水一带,在河池中部以东扩大,桂林市南部和贺州市也有分布;满足早中熟双季稻(E+M)生产的安全期活动积温条件即 $4800 \leq AT < 5200^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域面积在P2阶段占14.7%,在P1阶段占15.5%,两阶段面积比相差不大,P1阶段 $4800 \leq AT < 5200^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域主要分布在河池中、东部,柳州中部和桂林南部,以及贺州等地,P2阶段集中分布在柳州中、北部、桂林中部和贺州中、北部;满足单季再生稻(S+R)生产的安全期活动积温条件即 $AT < 4800^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域面积在P2阶段占31.6%,在P1阶段占39.4%,P2比P1降低了7.8个百分点,P1阶段 $AT < 4800^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 的区域主要分布在研究区北部,包括百色、河池、柳州和桂林北部地区,以及来宾东部,贺州部分高海拔地区,P2阶段在P1阶段所占区域的基础上大幅度从北部和高海拔地区压缩。可见,后30a(P2:1990–2019年),受气候变暖影响,满足迟熟双季稻(L+L)生产的安全期活动积温条件的区域面积增加近10个百分点,增加面积主要集中在右江河谷和研究区中部;满足早中熟双季稻(E+M)和中迟熟双季稻(M+L)生产的活动积温条件的区域面积变化不大,但整体向北迁移;满足单季再生稻(S+R)生产的活动积温条件的区域面积大幅度从北部和高海拔地区缩减。

从图4c中可以看出,满足迟熟双季稻(L+L)生产的全年日平均温度 $\geq 10^\circ\text{C}$ 期间的年日照总时数 $SH \geq 1500\text{h}$ 的区域面积在P2阶段占31.5%,而在P1阶段高达89.0%,P2比P1降低了57.5个百分点。P1阶段 $SH \geq 1500\text{h}$ 区域基本覆盖整个研究区,而P2阶段主要分布地区包括右江河谷地区及研究区南部、东南部等;满足中迟熟双季稻(M+L)、早中熟双季稻(E+M)和单季再生稻(S+R)生产的全年日平均温度 $\geq 10^\circ\text{C}$ 期间的日照总时数 $1300 \leq SH < 1500\text{h}$ 、

1100≤SH<1300h 和 SH<1100h 的区域面积在 P1 阶段所占比例均比较小, 分别为 9.5%、1.4%和 0.1%, 主要分布在研究区北部的高海拔高纬度地区, 而 1300≤SH<1500h 的区域面积在 P2 阶段占 37.1%, 比 P1 阶段提高了 27.6 个百分点, 主要分布在包括百

色、南宁、来宾和贺州大部分地区, 以及河池、柳州和桂林南部, 1100≤SH<1300h 的区域面积在 P2 阶段占 25.0%, 比 P1 阶段提高了 23.6 个百分点, 主要分布在研究区北部, SH<1100h 的区域面积在 P2 阶段占 6.5%, 比 P1 阶段提高了 6.4%, 主要分布在

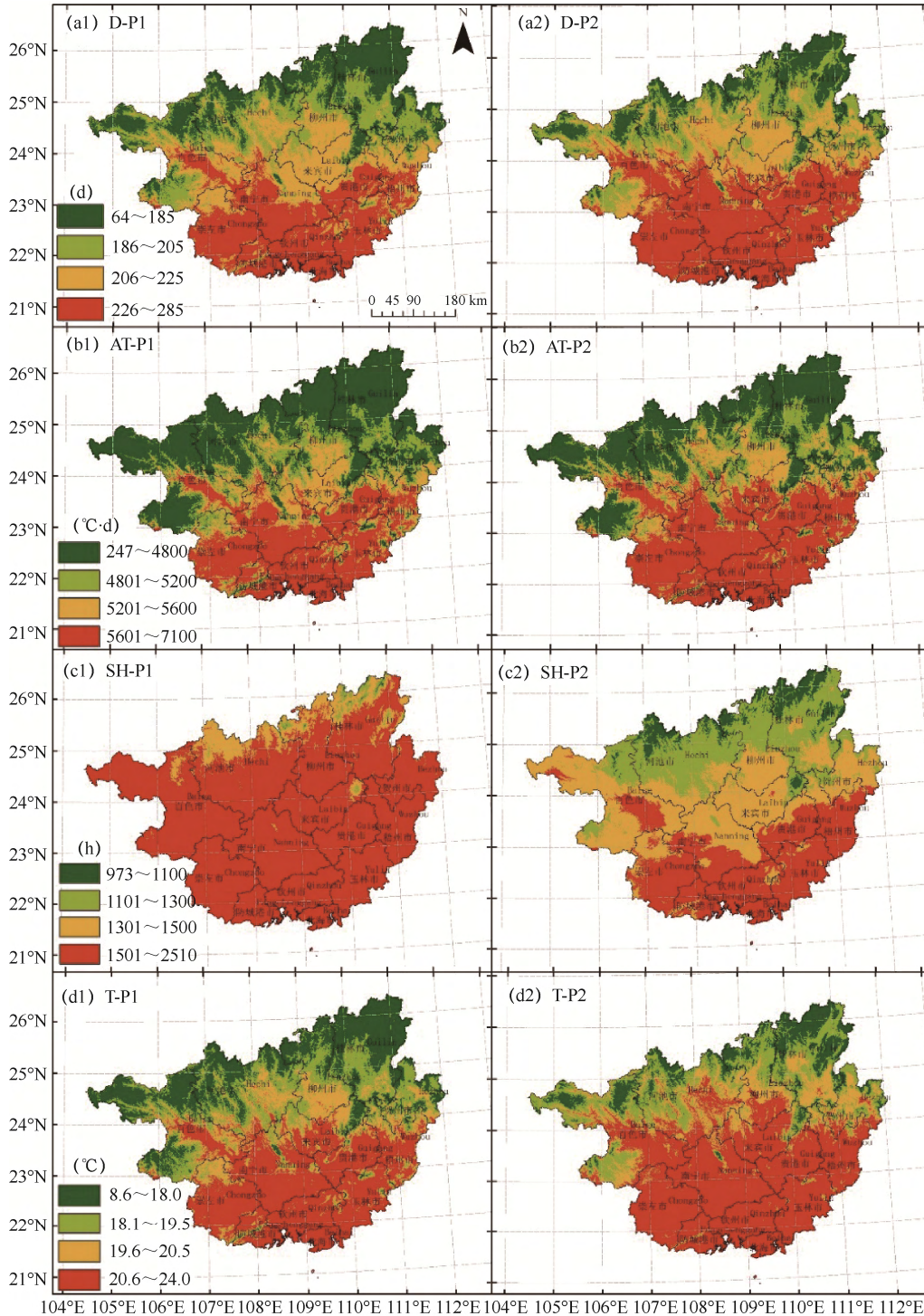


图 4 P1 阶段 (1960-1989 年) 和 P2 阶段 (1990-2019 年) 4 个关键气候因子的空间分布
 Fig. 4 Spatial distribution of four key climatic factors in P1 (1960-1989) and P2 (1990-2019) phase

研究区北部的高海拔山区。从以上分析可知，后 30a 年（P2：1990–2019 年）满足迟熟双季稻（L+L）生产的全年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间日照总时数的区域缩减至右江河谷和研究区南部一带，而满足中迟熟双季稻（M+L）、早中熟双季稻（E+M）和单季再生稻（S+R）生产日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日照总时数的区域大幅增加，因此，日照时数的衰减成为限制迟熟双季稻（L+L）北扩的主要气候因子。

从图 4d 中可以看出，满足迟熟双季稻（L+L）生产年平均气温 $T \geq 20.5^{\circ}\text{C}$ 的区域面积在 P2 阶段占 50.9%，在 P1 阶段占 36.3%，P2 比 P1 提高了 14.6 个百分点。P1 阶段 $T \geq 20.5^{\circ}\text{C}$ 的区域主要分布在右江河谷一带及研究区中、南部，P2 阶段明显向北部扩张，并延伸至河池市中部以东和柳州市南部，且由右江河谷向四周扩大。满足中迟熟双季稻（M+L）生产年平均气温 $19.5 \leq T < 20.5^{\circ}\text{C}$ 的区域面积在 P2 阶段占 18.0%，在 P1 阶段占 17.7%，P2 与 P1 所占比例相差不大。P1 阶段 $19.5 \leq T < 20.5^{\circ}\text{C}$ 的区域主要分布在研究区中北部，包括河池中部以东、柳州南部、桂林南部，以及百色、来宾、贺州部分地区，P2 阶段明显向北、向高海拔地区迁移，延伸至柳州融安、融水一带和桂林中部，并覆盖贺州大部分地区。满足早中熟双季稻（E+M）生产年平均气温 $18.0 \leq T < 19.5^{\circ}\text{C}$ 的区域面积在 P2 阶段占 19.9%，在 P1 阶段占 21.6%，P2 比 P1 降低了 1.7 个百分点。P1 阶段 $18.0 \leq T < 19.5^{\circ}\text{C}$ 的区域主要分布在研究区北部、西部，涉及百色南部、河池、柳州北部和桂林南部，以及贺州中、北部地区，P2 阶段明显向北、高海拔地区迁移，并延伸至北部的兴安、全州一带。满足单季再生稻（S+R）生产年平均气温 $T < 18.0^{\circ}\text{C}$ 的区域面积在 P2 阶段占 11.2%，在 P1 阶段占 24.4%，P2 比 P1 下降了 13.2 个百分点。P1 阶段 $T < 18.0^{\circ}\text{C}$ 的区域主要分布在研究区北部的高海拔地区，涉及百色、河池、柳州和桂林北部，以及来宾东部，贺州部分高海拔地区，P2 阶段 $T < 18.0^{\circ}\text{C}$ 的区域在 P1 阶段所占区域的基础上大幅从向高海拔地区收紧，主要分布在百色、河池和桂林北部的高海拔山区。从以上分析可知，后 30a（P2：1990–2019 年）满足迟熟双季稻（L+L）生产平均气温的区域面积占研究区面积近 50%，较前 30a 年（P1：1960–1989 年）提升幅度大，这为迟熟双季稻（L+L）北扩提供了丰富

的热量资源。

2.3 双季稻种植组合的区域划分

对影响双季稻分布的 4 个关键气候因子的空间分布图层进行运算，分别叠加 1990 年和 2018 年广西水田空间分布，制作 P1 阶段和 P2 阶段广西双季稻不同组合即单季再生稻（S+R）、早中熟双季稻（E+M）、中迟熟双季稻（M+L）和迟熟双季稻（L+L）的气候适宜性区划图，结果如图 5 所示。从图可以看出，单季再生稻（S+R）的气候适宜区面积在 P2 阶段占 8.4%，在 P1 阶段占 6.3%，P1 阶段主要分布在百色那坡、西林、隆林和乐业等高海拔地区，以及河池南丹、天峨以北地区和桂林兴安、全州和资源区域，P2 阶段仍分布在河池、桂林以北地区以及百色高海拔地区，变化幅度不大。早中熟双季稻（E+M）的气候适宜区面积在 P2 阶段占 18.6%，在 P1 阶段占 22.2%，P1 阶段主要分布在在百色靖西、德保和右江河谷一带，以及河池巴马、东兰和河池中部以东地区，柳州中部，桂林中部、南部和贺州大部分区域，P2 阶段分布区域与 P1 阶段大体一致，减少区域主要分布在桂林阳朔、荔浦地区和贺州市区周边。中迟熟双季稻（M+L）的气候适宜区面积在 P2 阶段占 34.7%，在 P1 阶段占 30.5%，P1 阶段主要分布在百色田东、平果区域，来宾市大部分地区，南宁宾阳、上林地区以及崇左天等、大新区域，但 P2 阶段的面积以来宾市为中心向四周扩大，东部延伸至梧州北部，南至南宁横县，西至百色平果、隆安，北至桂林市南部的荔浦、平乐地区。迟熟双季稻（L+L）的气候适宜区面积在 P2 阶段占 38.3%，在 P1 阶段占 41.0%，P1 阶段主要分布在研究区南部，以及百色右江河谷一带，北界为南宁马山—南宁宾阳—贵港平南—梧州苍梧一线，P2 阶段减少区域主要集中在南宁市和贵港市以及右江河谷一带，其中右江河谷与隆安连片区域中断，北界由南宁马山地区回退至南宁隆安地区，贵港市迟熟双季稻（L+L）的气候适宜区面积在一定程度上缩减。以上分析可知，受气候变化下光热资源变化的影响，研究区后 30a（1990–2019 年）单季再生稻（S+R）和中迟熟双季稻（M+L）气候适宜区面积较前 30a（1960–1989 年）增加，而早中熟双季稻（E+M）和迟熟双季稻（L+L）气候适宜区面积减少，晚熟双季稻北移高扩不明显。

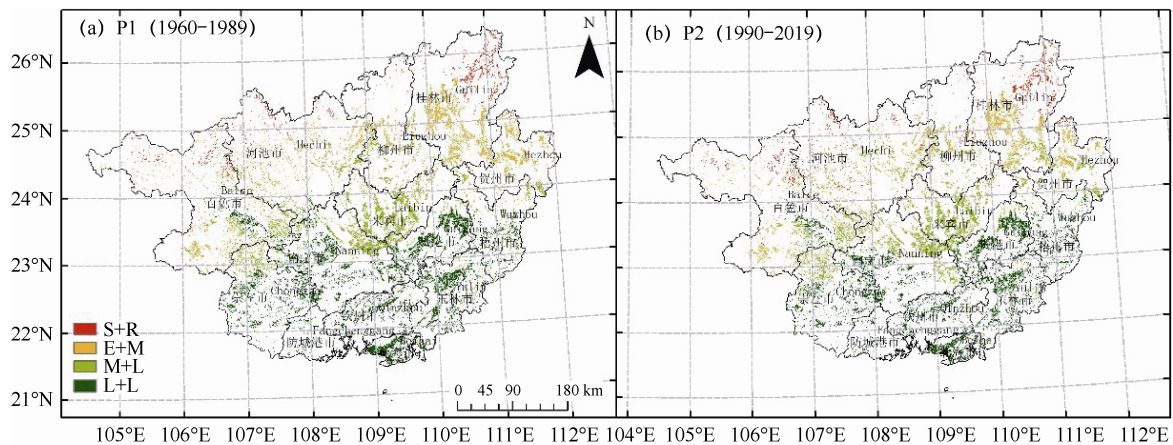


图 5 P1 阶段 (1960-1989 年) 和 P2 阶段 (1990-2019 年) 双季稻种植不同组合的区域划分

Fig. 5 Regional division of different models of double cropping rice in P1 (1960-1989) and P2 (1990-2019) phase

3 讨论与结论

3.1 讨论

指标的选择是水稻种植气候区划首要环节。目前多数学者首选热量指标进行水稻种植气候区划,如涂方旭^[30]以水稻安全生长期作为区划指标对广西水稻进行区划,但仅选择单个因子作为农作物气候区划指标,区划结果缺乏合理客观性,因此以多个热量因子为区划指标应用更广,如 10~20℃有效积温和抽穗-灌浆成熟期日平均气温≥27℃天数的组合指标^[31],双季稻安全生育期日数和≥10℃积温的组合指标^[23],以及通过 10℃活动积温、水稻生长期长度和安全生育期天数的组合指标^[32],组合指标得到的区划结果较单一因子更具有客观性和全面性^[20]。但以上区划指标均未考虑光照资源对水稻种植气候区划的影响,本研究在以往研究成果基础上,参照何燕等^[20, 33-34]的研究,引入日平均温度≥10℃期间的日照总时数,既能充分发挥广西热量资源的优势,还能充分利用光照资源。除光热指标外,水分也是影响水稻生产的重要因子,但本研究未将降水量纳入区划指标,主要考虑到广西绝大部分水稻均种植在有水灌溉的地区,雨养稻田稀少,因此可通过广西土地利用分类筛选出水田区域(水源保证和有灌溉措施),在理论上直接排除无灌溉条件区域以及水稻不宜种植的石山、林区、旱坡地、水域、城市居民用地等。

气候变化下广西大部分地区热量资源显著上升、光照资源下降,空间分布上热量资源呈现向北向高海拔地区递增的趋势,而光照资源从北向南递

减,这与叶瑜等^[35-36]关于广西光热资源变化趋势研究基本一致。最终区划结果为后 30a (1990-2019 年)单季再生稻(S+R)和中迟熟双季稻(M+L)气候适宜区面积较前 30a (1960-1989 年)增加,而早中熟双季稻(E+M)和迟熟双季稻(L+L)气候适宜区面积减少,这与杜尧东等^[23]研究所得的广东晚熟+晚熟区面积明显扩大和早熟+晚熟区面积明显减小的结论不一致,可能原因除了对水稻安全期的定义和活动积温的时间范围上不一致外,是否考虑日照时数变化对水稻布局的影响和是否排除非水田区域面积所占比例有较大关系。根据桂林、柳州、南宁和玉林农气站以及广西农业科学院提供的田间观测数据来看,桂林地区为有效避开春季倒春寒和秋季寒露风影响,近 60a 一直沿用熟性搭配为早熟+早熟,早稻播种期均在清明前后,无明显变化。柳州近 10a 早稻播种期均在春分前后,比 1990s 提早 5d,熟性搭配已由 1990s 的早熟+中熟转为中熟+中熟,且以柳州融安地区最为显著,此外,根据柳州农业气象试验站 2018-2019 年分期播种试验结果来看,柳州南部早稻播种期适当提前,采用中熟+晚熟搭配更能充分利用光热资源和提高产量。玉林地区一直沿用中熟+中晚熟搭配,但早稻播种期由 1990s 的 3 月 1 日推迟至 3 月 9 日前后,主要原因是热量条件的增加使中熟品种完成整个生育期的时间缩短。南宁熟性搭配为晚熟+晚熟或中熟+晚熟,各县区均有种植,也无显著变化。研究成果与上述各地实际情况有一定出入,一方面是由于本研究仅从气候资源的平均状态分析,未考虑低温冷害等农业气象灾害对研究

区特别是桂北地区水稻生产的影响,另一方面由于各地水稻种植以经验习惯为主,种植多沿用前人种植习惯。因此在实际生产中,面临重新调整熟性搭配时,不仅要考虑气候变化下光热资源的变化,还需综合考虑当地实际生产情况以及农业气象灾害对水稻生产的影响,结合田间分期播种试验确定其可行性,最终获取最优熟性搭配。

3.2 结论

气候变化背景下,桂北和桂西双季稻安全生长期显著延长,研究区大部分地区安全期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温和年平均气温显著上升,而全年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的日照总时数显著下降。区划结果显示,后30a(1990–2019年)单季再生稻和中迟熟双季稻气候适宜区面积较前30a(1960–1989年)增加,而早中熟双季稻和迟熟双季稻气候适宜区面积较前30a(1960–1989年)减少,变化区域主要分布在桂林阳朔、荔浦地区,贺州市区周边以及南宁马山、隆安地区。因此,充分考虑气候变化下光热资源变化,结合当地水稻实际生产情况,优化双季稻熟性搭配,是应对气候变化有效措施之一。

参考文献 References

- [1]Stocker T F.Climate change 2013:the physical science basis: working group i contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Computational Geometry,2013,18(2):95-123.
- [2]沈永平,王国亚.IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.
- Shen Y P,Wang G Y.Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1068-1076.(in Chinese)
- [3]王菱,谢贤群,苏文,等.中国北方地区 50 年来最高和最低气温变化及其影响[J].自然资源学报,2004,19(3):337-343.
- Wang L,Xie X Q,Su W,et al.Changes of maximum and minimum temperature and their impacts in northern China over the second half of the 20th century[J].Journal of Natural Resources,2004,19(3):337-343.(in Chinese)
- [4]矫梅燕.农业应对气候变化蓝皮书:气候变化对中国农业影响评估报告(NO.1)[M].北京:社会科学文献出版社,2014.
- Jiao M Y.Blue book on agriculture's response to climate change: assessment report on the impact of climate change on China's agriculture(NO.1)[M].Beijing:Social Sciences Literature Press,2014.(in Chinese)
- [5]郭建平.气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J].应用气象学报,2015,26(1):1-11.
- Guo J P.Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J].Journal of Applied Meteorological Science,2015,26(1):1-11.(in Chinese)
- [6]周广胜.气候变化对中国农业生产影响研究展望[J].气象与环境科学,2015,38(1):80-94.
- Zhou G S.Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J].Meteorological and Environmental Sciences,2015,38(1):80-94.(in Chinese)
- [7]李帅,张勃,马彬,等.基于格点数据的中国 1961-2016 年 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温时空演变[J].自然资源学报,2020,35(5):1216-1227.
- Li S,Zhang B,Ma B,et al.Spatiotemporal evolution of effective accumulated temperatures of $\geq 5^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10^{\circ}\text{C}$ based on grid data in China from 1961 to 2016[J].Journal of Natural Resources,2020,35(5):1216-1227.(in Chinese)
- [8]张山清,普宗朝,李景林,等.气候变化对新疆红枣种植气候区划的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(6):713-721.
- Zhang S Q,Pu Z C,Li J L,et al.Impact of climate change on the division of jujube planting zones in Xinjiang[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2014,22(6):713-721.(in Chinese)
- [9]胡博.松嫩平原作物布局对气候变化的响应[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.
- Hu B.Response of crop distribution to climate change in Songnen plain[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2016.(in Chinese)
- [10]白秀广,李小盼.气候变化对中国苹果主产区生产布局变迁的影响分析[J].北方园艺,2016,352(1):204-209.
- Bai X G,Li X P.Impact of climate change on the layout of apple production in China[J].Northern Horticulture,2016,352(1):204-209.(in Chinese)
- [11]张山清,普宗朝,吉春容,等.气候变化对新疆酿酒葡萄种植气候区划的影响[J].中国农业资源与区划,2016,37(9):125-134.
- Zhang S Q,Pu Z C,ji C R,et al.Impact of climate change on wine grape-planting climatic division in Xinjiang[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2016,37(9):125-134.(in Chinese)
- [12]黄杰.气候变化对中国油菜生产布局的影响研究[D].武汉:

- 华中农业大学,2019.
- Huang J.Study on the impact of climate change on canola distribution in China[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2019.(in Chinese)
- [13]张悦,胡琦,和骅芸,等.气候变化背景下华北平原冬小麦冬前生育期与节气对应及偏移分析[J].中国农业气象,2019,40(7):411-421.
- Zhang Y,Hu Q,He H Y,et al.Correspondence and shifting analysis for the winter wheat growing period before winter and solar terms in the North China plain under climate change background[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2019,40(7):411-421.(in Chinese)
- [14]初征,郭建平.未来气候变化对东北玉米品种布局的影响[J].应用气象学报,2018,29(2):165-176.
- Chu Z,Guo J P.Effects of climatic change on maize varieties distribution in the future of Northeast China[J].Journal of Applied Meteorological Science,2018,29(2):165-176.(in Chinese)
- [15]刘锦月,巩铁雄,乔江波,等.近期气候变化对黄土高原苹果产区分布格局的影响[J].水土保持研究,2020,27(3):153-158.
- Liu J Y,Gong T X,Qiao J B,et al.Effects of recent climate change on distribution pattern of apple production areas in the Loess Plateau[J].Research of Soil and Water Conservation,2020,27(3):153-158.(in Chinese)
- [16]许瀚林,刘瑶,袁晓峰,等.气候变化对冀西北青贮玉米种植布局影响的预测[J].作物杂志,2020,(1):124-129.
- Xu H L,Liu Y,Yuan X F,et al.Projection of climate change on the planting distribution of silage maize in northwest Hebei province[J].Crops,2020,(1):124-129.(in Chinese)
- [17]刘欢,熊伟,李迎春,等.气候变化对中国轮作系统影响的研究进展[J].中国农业气象,2017,38(10):613-631.
- Liu H,Xiong W,Li Y C,et al.Advances of impacts and adaptation of climate change on crop rotations in China[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2017, 38(10): 613-631.(in Chinese)
- [18]孙雯.气候变暖对中国水稻生产的影响[D].南京:南京农业大学,2011.
- Sun W.Impacts of climate warming on rice production in China[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2011.(in Chinese)
- [19]黄欣乐,郑百龙.产量及面积视角的中国水稻生产变动[J].江苏农业科学,2020,48(2):311-316.
- Huang X L,Zheng B L.Changes of rice production in China from the perspective of yield and area[J].Jiangsu Agricultural Sciences,2020,48(2):311-316.(in Chinese)
- [20]何燕,王斌,江立庚,等.基于 GIS 的广西水稻种植布局精细化气候区划[J].中国水稻科学,2013,27(6):658-664.
- He Y,Wang B,Jiang L G,et al.Refined climatic division of rice planting distribution using GIS in Guangxi,China[J]. Chinese Journal of Rice Science,2013,27(6):658-664.(in Chinese)
- [21]黄桂珍,李莉,匡昭敏.气候变化背景下广西水稻发育期变化特征分析[J].现代农业科技,2018,(11):5-13.
- Huang G Z,Li L,Kuang Z M.Characteristics of rice growth period in Guangxi under the background of climate change[J].Modern Agricultural Science and Technology, 2018,(11):5-13.(in Chinese)
- [22]广西壮族自治区统计局.广西统计年鉴 2019[Z].北京:中国统计出版社,2019:321-341.
- Statistics Department of Guangxi Autonomous Region. Guangxi statistical yearbook 2019[Z].Beijing:China Statistics Press,2019:321-341.(in Chinese)
- [23]杜尧东,沈平,王华,等.气候变化对广东省双季稻种植气候区划的影响[J].应用生态学报,2018,29(12):4013-4021.
- Du Y D,Shen P,Wang H,et al.Impacts of climate change on climatic division for double cropping rice in Guangdong Province,China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2018, 29(12):4013-4021.(in Chinese)
- [24]阳显林,汪官平.确定水稻安全齐穗期的基本方法[J].贵州气象,2003,27(4):18-19.
- Yang X L,Wang G P.A brief introduction of base method to define heading period of rice[J].Journal of Guizhou Meteorology,2003,27(4):18-19.(in Chinese)
- [25]岳伟,阮新民,陈金华,等.近 50 年安徽省双季稻安全生产期变化特征[J].长江流域资源与环境,2019,28(9):2230-2238.
- Yue W,Ruan X M,Chen J H,et al.Changing characteristics of safe growth period of double-season rice in Anhui Province during recent 50 years[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(9):2230-2238.(in Chinese)
- [26]陈斐,杨沈斌,申双和,等.长江中下游双季稻区春季低温冷害的时空分布[J].江苏农业学报,2013,29(3):540-547.
- Chen F,Yang S B,Shen S H,et al.Spatial and temporal distribution of spring cold damage in double cropping rice

- areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J].Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2013,29(3):540-547.(in Chinese)
- [27] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:43-45.
- Wei F Y.Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M].Beijing:China Meteorological Press,1999:43-45.(in Chinese)
- [28] 苏永秀,李政.GIS 支持下的芒果种植农业气候区划[J].广西气象,2002,23(1):46-48.
- Su Y X,Li Z.Agricultural climatic regionalization supported by GIS for mango planting[J].Journal of Guangxi Meteorology,2002,23(1):46-48.(in Chinese)
- [29] 郭淑敏,陈印军,苏永秀,等.广西荔枝精细化农业气候区划与应用研究[J].中国农学通报,2011,27(2):205-209.
- Guo S M,Chen Y J,Su Y X,et al.Study on precise comprehensive agricultural climate regional planning and application of leechee in Guangxi[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2011,27(2):205-209.(in Chinese)
- [30] 涂方旭.广西水稻主要生育期气候条件分析[J].广西农业科学,2006,37(4):370-373.
- Tu F X.Analysis on climate conditions in main rice growth and development stages in Guangxi[J].Guangxi Agricultural Sciences,2006,37(4):370-373.(in Chinese)
- [31] 魏丽,殷剑敏,王怀清.GIS 支持下的江西省优质早稻种植气候区划[J].中国农业气象,2002,23(2):28-32.
- Wei L,Yan J M,Wang H Q.Climate division of high quality early rice planting area in Jiangxi Province on the basis of GIS[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2002,23(2):28-32.(in Chinese)
- [32] 秦鹏程,万素琴,邓环,等.湖北省水稻种植布局精细化气候区划[J].湖北农业科学,2016,55(16):4150-4153.
- Qin P C,Wan S Q,Deng H,et al.Fine climatic regionalization of rice cultivated patterns in Hubei province[J].Hubei Agricultural Sciences,2016,55(16):4150-4153.(in Chinese)
- [33] 王斌.基于 GIS 的广西水稻气候区划研究[D].南宁:广西大学,2012.
- Wang B.Study on rice climate regionalization in Guangxi based on GIS[D].Nanning:Guangxi University,2012. (in Chinese)
- [34] 杜东升,廖玉芳,陆魁东,等.湖南双季超级稻熟性搭配精细化气候区划研究[J].中国稻米,2015,21(4):49-52.
- Du D S,Liao Y F,Lu K D,et al.Refined climate regionalization of double cropping super rice maturity in Hunan province[J].China Rice,2015,21(4):49-52.(in Chinese)
- [35] 叶瑜,苏永秀,李政,等.近 50 年广西日照时数时空变化特征分析[J].中国农学通报,2013,29(14):196-201.
- Ye Y,Su Y X,Li Z,et al.The analysis on sunshine duration spatial and temporal variations over Guangxi in recent 50 years[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(14):196-201.(in Chinese)
- [36] 王莹,苏永秀,李政.1961-2010 年广西气温变化对全球变暖的响应[J].自然资源学报,2013,28(10):1707-1717.
- Wang Y,Su Y X,Li Z.Responses of temperature change in Guangxi to global warming during 1961-2010[J].Journal of Natural Resources,2013,28(10):1707-1717.(in Chinese)