

1961—2015年西南区域单季稻生长季气候年型及其生产潜力分析

庞艳梅¹, 陈超^{1,2}, 郭晓艺³, 徐富贤³

(1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072; 2. 南方丘陵山区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066; 3. 四川省农科院水稻高粱研究所, 德阳 618000)

摘要: 了解气候变化背景下农作物气候年型以及不同气候年型下作物的生产潜力, 对实现农业的可持续发展具有重要意义。基于1961—2015年西南区域单季稻种植区316个气象台站的逐日气象资料和单季稻生产资料, 利用异常度概念分析了单季稻生长季的10种气候年型, 解析了不同气候年型下单季稻的气候生产潜力, 并分析气候变化对单季稻生长季气候年型及生产潜力的影响。结果表明: (1) 近55年来西南区域单季稻生长季正常年型发生频次最高, 平均21.5次, 其次是少雨年型和多雨年型。从空间分布来看, 正常年型多出现在云南南部和西北部、四川攀西和四川盆地南部的部分地区, 少雨和多雨年型多出现在四川盆地大部和其他省市的部分地区, 高温年型多出现在四川攀西地区、云南和贵州的个别地区, 低温和寡照年型的空间差异不明显。(2) 1961—2015年, 西南区域单季稻气候生产潜力平均为7065.6 kg/hm²。与正常年相比, 多雨年型气候生产潜力偏高超过10%, 少雨年型偏低超过14%, 降水是影响单季稻气候生产潜力的最主要因子。(3) 气候变暖对西南区域单季稻生长季气候年型变化的影响最为显著。与1961—1990年相比, 1991—2015年暖年增加, 冷年减少。近55年来西南各省市单季稻气候生产潜力均呈下降趋势, 1990年代以来暖年的增加有利于气候生产潜力的提高, 而少雨和寡照年的增加是气候生产潜力总体下降的主要原因。

关键词: 单季稻; 气候年型; 生产潜力; 气候变化; 西南区域

农业气候资源是农业自然资源的重要组成部分之一, 其数量及配置会直接影响农业生产, 并会为农业生产提供必要的能量和物质。农业气候资源主要包括热量资源、光照资源及水分资源^[1]。农作物气候年型是指农业年度或者农作物整个生育期农业气象因子的不同组合类型^[2], 它在一定程度上影响了农业种植制度、作物品种布局以及生长发育和产量^[1]。全球气候变暖背景下^[3], 我国农业气候资源体表现为热量资源显著增加、辐射资源减少、降水资源变化不显著的变化特征, 但不同区域间存在明显差异^[1,4,5]。近年来, 很多学者针对气候变化背景下我国水稻生产潜力的变化特征展开了研究。在利用经验模型研究方面, 孙雯^[6]采用光合生产潜力和温度订正函数的乘积估算了我国水稻光温生产潜力, 指出1961—2008年东北单季稻区、华南双季稻区及长江中下游稻区光温生产潜力增加,

收稿日期: 2019-05-24; 修订日期: 2019-07-11

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2017YFD0300400); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(省重点实验室2018-重点-05-01); 中国气象局成都高原气象研究所基本科研业务项目(BROP201817)

作者简介: 庞艳梅(1983-), 女, 北京人, 博士, 副研究员, 研究方向为气候变化对农业的影响评估。

E-mail: pangyanm@126.com

通讯作者: 陈超(1982-), 男, 湖南安乡人, 博士, 正高级工程师, 研究方向为气候变化影响评价、生物气候模型与信息系统。E-mail: chenchao16306@sina.com

而四川盆地降低。庞艳梅等^[7]利用逐级订正法计算了1961—2018年四川盆地水稻气候生产潜力,并分析了气候要素变化对水稻气候生产潜力的影响。石全红等^[8]利用农业生态区域法模型测算了南方稻区1980—2010年水稻光温生产潜力。张玉芳等^[9]采用侯光良法及温度、降水逐步订正法研究了四川水稻光合、光温和气候生产潜力的时空分布特征。在利用作物模型研究方面,帅细强等^[10]利用ORYZA 2000模型分析了1961—2006年湘赣双季稻气候生产潜力的变化特征。汤开磊^[11]利用ORYZA 2000模型研究了我国主要稻区1961—2007年的水稻光温生产潜力的变化特征,并指出温度与太阳辐射变化可能影响水稻光温生产潜力。

水稻是西南最重要的粮食作物之一,主要分布于云南、贵州、四川和重庆。国家统计局的数据显示,2017年西南区域水稻种植面积410.49万 hm^2 ,总产量2938.7万t,分别占西南区域粮食作物种植总面积和总产量的26.41%和38.39%,其中以一季中稻为主^[12]。研究指出,1961—2010年西南区域年平均气温增温速率为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,年降水量下降速率为 $13\text{ mm}/10\text{ a}$,年日照时数、风速、气温年较差均呈减少趋势。在气候变化背景下,西南区域极端气候事件频发,水稻生产的不稳定性也会增加^[13-15]。

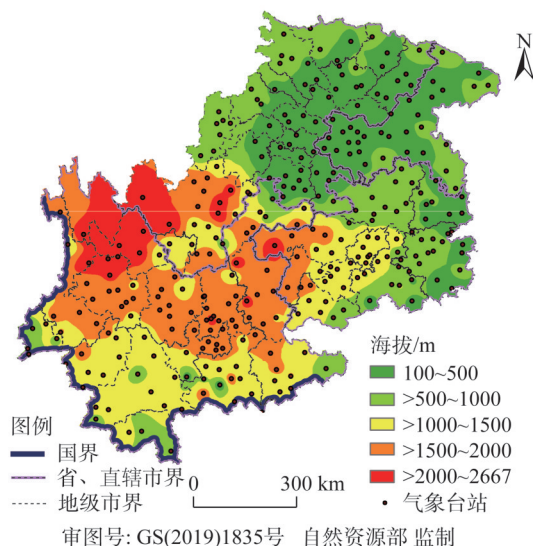
综上,前人的研究大多针对单个气候因子进行时空变化特征分析,缺乏对西南区域水稻生长季农业气候资源(光、温、水)的综合评估,尤其是水稻生长季不同气候因子组合的气候年型变化及对生产潜力影响的研究较少涉及。鉴于此,本文基于西南单季稻种植区的气象资料和单季稻生产资料,利用异常度概念分析单季稻生长季的气候年型,解析不同气候年型下单季稻的气候生产潜力,并分析气候变化对单季稻生长季气候年型及生产潜力的影响,以期合理利用气候资源、实现西南区域农业的可持续发展提供依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 数据来源

气象资料来自国家气象信息中心,包括1961—2015年重庆市、四川省、贵州省和云南省共316个气象台站的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、风速和相对湿度资料。气象站点分布及海拔高度如图1。

水稻生长季资料来自《中国农业物候图集》^[16]和《全国水稻高产创建技术规范模式图》。本文参考了张建平^[17]的研究结论,将西南稻区划分为6个分区,并给出了每个分区内单季稻的生长季(播种至成熟)。具体划分标准为:Ⅰ区为重庆中部、东北部和西部(生长季为3月上旬至8月下旬);Ⅱ区为贵州北部、四川东北部万源、达县一带(生长季为3月上旬至8月下旬);Ⅲ区为四川西部阆



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 研究区气象站点及海拔高度

Fig. 1 Distribution of weather stations and altitude in the study area

中遂宁一带、贵州大部（生长季为4月上旬至9月下旬）；Ⅳ区为云南西北部及四川盆地边缘（生长季为3月上旬至8月中旬）；Ⅴ区为云南中部和东北部、贵州西部边缘、四川南部（生长季为3月中旬至9月中旬）；Ⅵ区为云南南部、西南部及东南部（生长季为2月下旬至8月中旬）。

1.2 平均气温和日照时数异常度及等级划分

农业气候因子异常度指气候因子偏离序列平均值的程度：

$$C = \frac{Y - Y_p}{s}$$
(1)

式中：C指平均气温或日照时数异常度；Y指逐年单季稻生长季平均气温或日照时数；Y_p指研究时段内单季稻生长季平均气温或日照时数序列的多年平均值；s指平均气温或日照时数的标准差。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y - Y_p)^2}$$
(2)

根据GBT 21986-2008 农业气候影响评价农作物气候年型划分方法^[2]，年平均气温和日照时数异常度的等级划分，见表1。

1.3 降水异常度及等级划分

降水异常度以降水距平百分率表示，即：

$$\Delta R = \frac{R - R_p}{R_p} \times 100\%$$
(3)

式中：ΔR指降水距平百分率；R指年单季稻生长季降水量（mm）；R_p指研究时段内单季稻生长季降水量序列的多年平均值。

根据GBT 21986-2008农业气候影响评价农作物气候年型划分方法^[2]，年降水异常度的等级划分，见表2。

1.4 农作物气候年型的划分

农作物气候年型的划分根据农业气候因子异常度的不同组合来确定。本文结合西南区域的气候特点，依据单季稻生长季平均气温、降水量和日照时数异常度划分了10种农业气候年型，分别为正常年型、高温年型、低温年型、多雨年型、少雨年型、暖湿年型、暖干年型、冷湿年型、冷干年型、寡照年型。农作物气候年型的划分标准见表3。

1.5 气候生产潜力

气候生产潜力指农业生产条件充

表1 年平均气温和日照时数异常度的等级

Table 1 Grade division for the annual mean temperature and sunshine abnormality

气候因子	高（多）	低（少）	正常
平均气温	$C \geq 1.0$	$C < -1.0$	$1.0 > C \geq -1.0$
日照	$C \geq 1.0$	$C < -1.0$	$1.0 > C \geq -1.0$

表2 年降水量异常度的等级

Table 2 Grade division for the annual precipitation abnormality (%)

气候因子	多	少	正常
降水	$\Delta R > 15$	$\Delta R < -15$	$-15 \leq \Delta R \leq 15$

表3 农作物气候年型的划分标准

Table 3 Classifications of the annual crop climate types

农作物气候年型	平均气温	降水	日照时数
正常年型	正常	正常	—
高温年型	高	正常	—
低温年型	低	正常	—
多雨年型	正常	多	—
少雨年型	正常	少	—
暖湿年型	高	多	—
暖干年型	高	少	—
冷湿年型	低	多	—
冷干年型	低	少	—
寡照年型	—	—	少

分保证, 充足的CO₂供应, 理想群体在当地气候条件下能达到的最高产量。本文采用对光合生产潜力进行温度、降水逐步订正的方法计算气候生产潜力^[18-20]。

$$YW = YT \times f(w) \quad (4)$$

式中: YW 指气候生产潜力 (kg/hm²); YT 指光温生产潜力 (kg/hm²); $f(w)$ 指水分订正系数。

$$f(w) = \begin{cases} \frac{Pe}{ET_c} & 0 \leq Pe < ET_c \\ 1 & Pe \geq ET_c \end{cases} \quad (5)$$

式中: Pe 指作物生育阶段的有效降水量 (mm); ET_c 指作物需水量 (mm)。 ET_c 的计算采用参考作物蒸散量乘以作物系数, 参考作物蒸散量的计算采用联合国粮食与农业组织推荐的Penman-Monteith公式, 作物系数的计算采用联合国粮食与农业组织推荐的分段单值平均法^[21]。

有效降水量 Pe 的计算采用美国农业部土壤保持局推荐的方法, 该方法在我国的适用性已得到验证^[22,23]:

$$Pe = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17} & P < 8.3 \text{ mm/d} \\ P = 4.17 + 0.1P & P \geq 8.3 \text{ mm/d} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P 指降水量 (mm/d)。

$$YT = YQ \times f(t) \quad (7)$$

式中: YQ 指光合生产潜力 (kg/hm²); $f(t)$ 指温度订正系数。

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{\min}, t > t_{\max} \\ \frac{t - t_{\min}}{t_s - t_{\min}} & t_{\min} \leq t < t_s \\ \frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_s} & t_s \leq t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: t 指作物生长阶段的平均气温 (°C); t_{\min} 、 t_s 、 t_{\max} 分别指作物生长的下限温度 (°C)、最适温度 (°C)、上限温度 (°C)。水稻的下限温度、最适温度和上限温度分别取 10 °C、30 °C和38 °C^[24]。

本文利用侯光良法^[25]估算光合生产潜力, 公式如下:

$$YQ = k \times \mu \times \varepsilon \times \varphi \times (1 - \alpha) \times (1 - \beta) \times (1 - \rho) \times (1 - \gamma) \times (1 - \omega) \times (1 - \eta)^{-1} \times (1 - \xi)^{-1} \times s \times q^{-1} \times F(L) \times \sum Q_i \quad (9)$$

式中: k 指单位换算函数; μ 指作物光合固定CO₂能力的比值, 本文取1.0; ε 指光合辐射量与总辐射量的比值, 本文取0.49; φ 指光合作用量子效率, 本文取0.22; α 指植物群体的反射率, 本文取0.08; β 指植物繁茂群体的透射率, 本文取0.06; ρ 指非光合器官所截获的辐射比例, 本文取0.10; γ 指超过光饱和点的光比例, 本文取0.01; ω 指呼吸消耗与光合产物的比值, 本文取0.30; η 指成熟谷物的含水率, 本文取0.15; ξ 指植物无机灰分含量的比例, 本文取0.08; s 指作物的经济系数, 本文取0.50; q 指单位干物质的热量, 本文取17.2 mJ/kg; $F(L)$ 指叶面积时间变化的动态订正系数, 取0.55; Q_i 指太阳总辐射量 (mJ/m²)。

$$Q_i = (ms + n) \times Q_s \quad (10)$$

式中： s 指日照百分率（%）； Q_0 指天文辐射量（ mJ/m^2 ）； m 和 n 指经验系数，本文取0.47与0.20^[26]。

2 结果分析

2.1 西南区域单季稻生长季的气候年型

利用西南稻区316个气象站点1961—2015年的平均气温、降水量与日照资料计算各站点近55年单季稻生长季的气候年型，分别统计316个站点不同气候年型的发生频次（图2）。由图2可知，1961—2015年西南区域单季稻生长季发生最多的气候年型为正常年型，频次（平均值 \pm 标准偏差）为 21.5 ± 3.8 次；其次是少雨年型与多雨年型，频次分别为 11.9 ± 2.9 次与 11.6 ± 2.6 次；然后是低温年型、高温年型与寡照年型，频次分别为 9.1 ± 2.0 次、 8.6 ± 1.9 次与 8.4 ± 1.9 次。而暖湿年型、暖干年型、冷湿年型和冷干年型的发生频次较低，平均都小于4次，因而，不同气候年型的空间分布及对单季稻生产潜力的影响研究不考虑这4种气候年型。

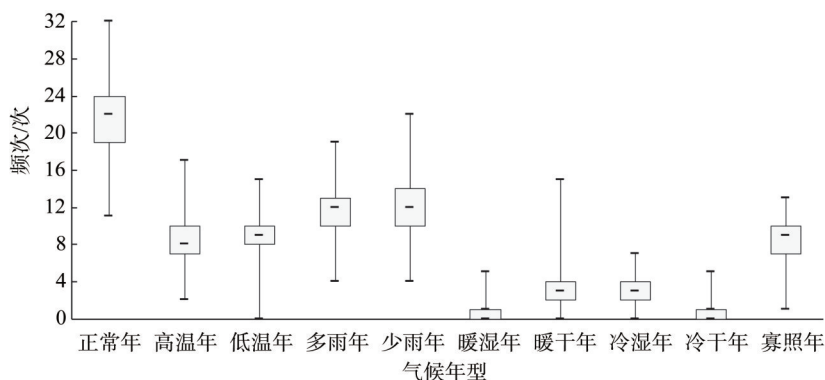


图2 1961—2015年西南区域316个站点单季稻生长季不同气候年型平均发生频次的比较

Fig. 2 Frequencies of the annual climate types in single cropping rice growing season of the 316 sites in Southwest China during 1961-2015

进一步分析1961—2015年西南区域单季稻生长季不同气候年型发生频次的空间分布（图3）。由图可知，近55年来正常年型的频次在11~31.9次；云南的南部和西北部、四川攀西和盆地南部的部分地区正常年型的频次最高，在26~31.9次（图3a）。高温年型的频次在2~17次；低发区主要出现在四川盆地的北部和中南部、云南的中部和东部，频次在2~8次；其余大部地区高温年型的频次在8~17次（图3b）。低温年型的频次在云南的西北部 and 东部、四川攀西地区的西部和贵州的部分地区偏低，低于8次；其余大部地区低温年型的频次在8~15次（图3c）。多雨年型的高发区主要出现在四川盆地和重庆大部、云南的北部和贵州的中、西部，频次在11~19次；其余大部地区多雨年型的频次均低于11次（图3d）。少雨年型的高发区主要出现在四川盆地西北部、重庆东北部、云南的北部，频次在13~22次；其余大部地区少雨年型的频次均低于13次（图3e）。寡照年型的频次在1~12.9次，其中大部分地区的发生频次在7~12.9次（图3f）。

本文在划分农作物气候年型时，除了寡照年型外，其他气候年型均未考虑日照时数的异常度等级，故将寡照年型中各种光热年型的组合作进一步的研究（表4）。由表4可

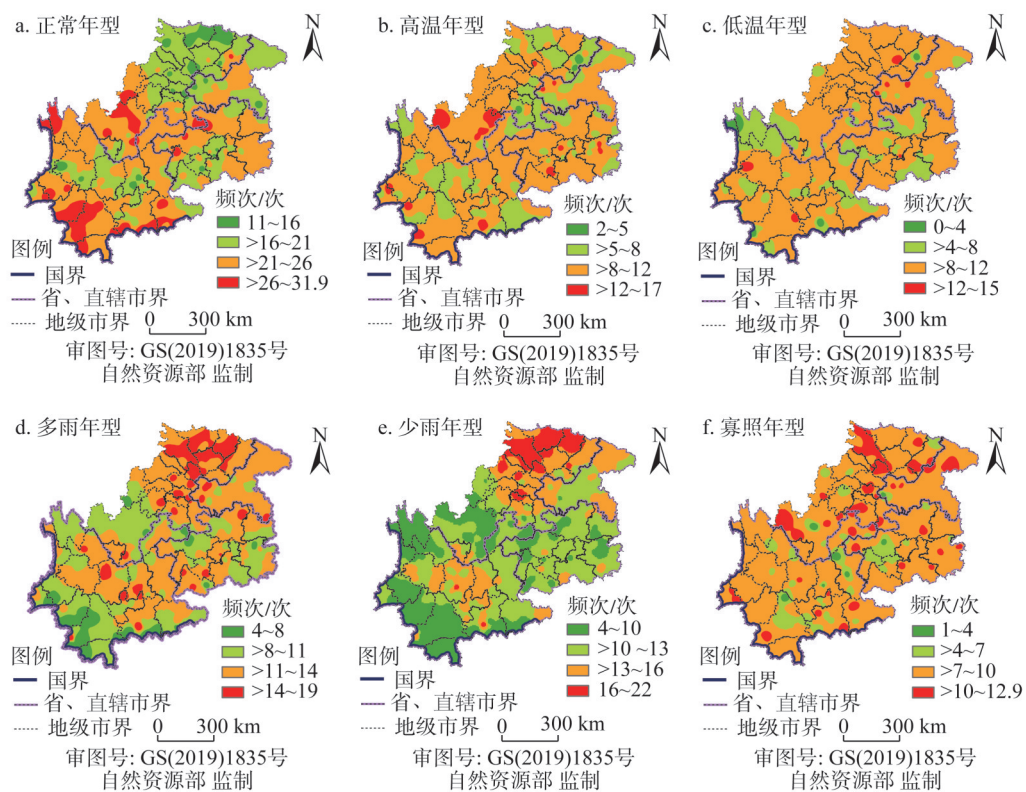


图3 1961—2015年西南区域单季稻生长季不同气候年型发生频次的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the frequencies of annual climate types in single cropping rice growing season in Southwest China during 1961-2015

知，1961—2015年西南单季稻生长季寡照年型中发生最多的为正常年型，发生频次是 3.1 ± 1.6 次，多雨和低温年型次之，发生频次分别是 2.5 ± 1.5 次和 2.4 ± 1.6 次。

2.2 西南区域单季稻生长季不同气候年型下的气候生产潜力

基于西南稻区316个气象站点1961—2015年的气象资料计算各站点单季稻的年气候生产潜力，并结合当年的气候年型，比较不同气候年型下单季稻气候生产潜力的差异（图4）。由图4可知，近55年来正常年型下西南区域单季稻气候生产潜力为

表4 西南区域单季稻生长季寡照年型中各种水热年型的发生频次

Table 4 Frequencies of different annual photothermal types in scant lighting year in single cropping rice growing season in Southwest China

气候年型	发生频次/次（平均值±标准偏差）
正常年型	3.1±1.6
高温年型	0.7±0.9
低温年型	2.4±1.6
多雨年型	2.5±1.5
少雨年型	1.1±1.1
暖湿年型	0.1±0.4
暖干年型	0.2±0.7
冷湿年型	0.9±0.9
冷干年型	0.2±0.5

$3029.8\sim14466.7\text{ kg/hm}^2$ ，316个站点多年平均值为 7065.6 kg/hm^2 。降水偏多的（多雨年型、暖湿年型和冷湿年型）年型有利于单季稻生长，和正常年型相比较，平均气候生产潜力分别增加14.4%、15.3%和11.0%。降水偏少（少雨年型、暖干年型和冷干年型）的

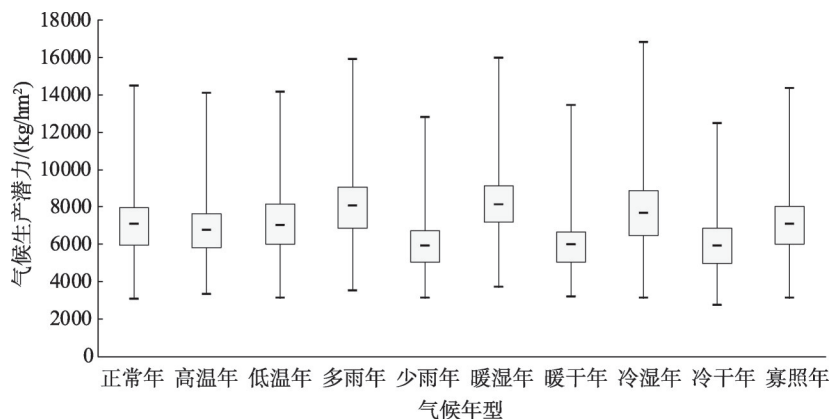


图4 1961—2015年西南区域316个站点不同气候年型下单季稻气候生产潜力的比较

Fig. 4 Climatic potential yield of single cropping rice in different annual climate types of the 316 sites in Southwest China during 1961-2015

年型气候生产潜力较低,和正常年型相比较,平均气候生产潜力分别减少14.8%、14.5%和15.2%。高温年型下单季稻气候生产潜力比正常年型偏低3.1%。而低温和寡照年型下单季稻气候生产潜力较正常年型变化很小。研究表明,降水是影响西南区域单季稻气候生产潜力的最主要因素。

进一步分析1961—2015年西南区域不同气候年型下单季稻气候生产潜力较正常年型变化率的空间分布(图5)。由图5可知,近55年来多雨年型单季稻气候生产潜力较正常年型的变化率在全区呈正值,增产率为5.3%~28.3%;其中云南北部、四川盆地北部和中南部增幅最大,在17%~28.3%(图5c)。少雨年型单季稻气候生产潜力较正常年型的变化率在全区大部呈负值,减产率为0~23.5%;其中云南北部、贵州大部、重庆东北部、四川盆地北部和南部减幅最大,在17%~23.5%(图5d)。而高温年型、低温年型和寡照年型单季稻气候生产潜力较正常年型的变化率空间差异较大,变化率分别为-18.6%~18.9%、-28.2%~22.8%、-20.6%~17.7%。高温年型单季稻气候生产潜力较正常年型增产的区域主要分布在四川盆地西北部 and 西南部、四川攀西北部、贵州的西北部、云南西北部和南部的个别地区,而其余地区以减产为主(图5a)。低温年型单季稻气候生产潜力较正常年型增产的区域主要分布在云南大部、四川盆地东北部和南部的部分地区、四川攀西地区、重庆的东北部和西部、贵州的北部,而其余地区以减产为主(图5b)。寡照年型单季稻气候生产潜力较正常年型增产的区域主要分布在云南大部、四川盆地北部和中部的部分地区、四川攀西地区、重庆的东南部和西部、贵州的西南和东南部,而其余地区以减产为主(图5e)。

2.3 气候变化背景下西南区域单季稻生长季气候年型及气候生产潜力的变化特征

我国大部分地区气温的变化从20世纪80年代出现转折点^[27],但在西南区域这一转折点相对滞后,出现在20世纪90年代^[28]。因此,本文以1990年作为分界线,比较1961—1990年和1991—2015年2个时间段内西南区域单季稻生长季不同气候年型的发生频率(图6)。由图6可知,和1961—1990年相比较,1991—2015年正常年型、低温年型、多雨年型、冷湿年型和冷干年型的发生频率呈减少趋势,分别减少0.05次/10 a、1.56次/10 a、0.34次/10 a、0.57次/10 a和0.11次/10 a;而高温年型、少雨年型、暖湿年

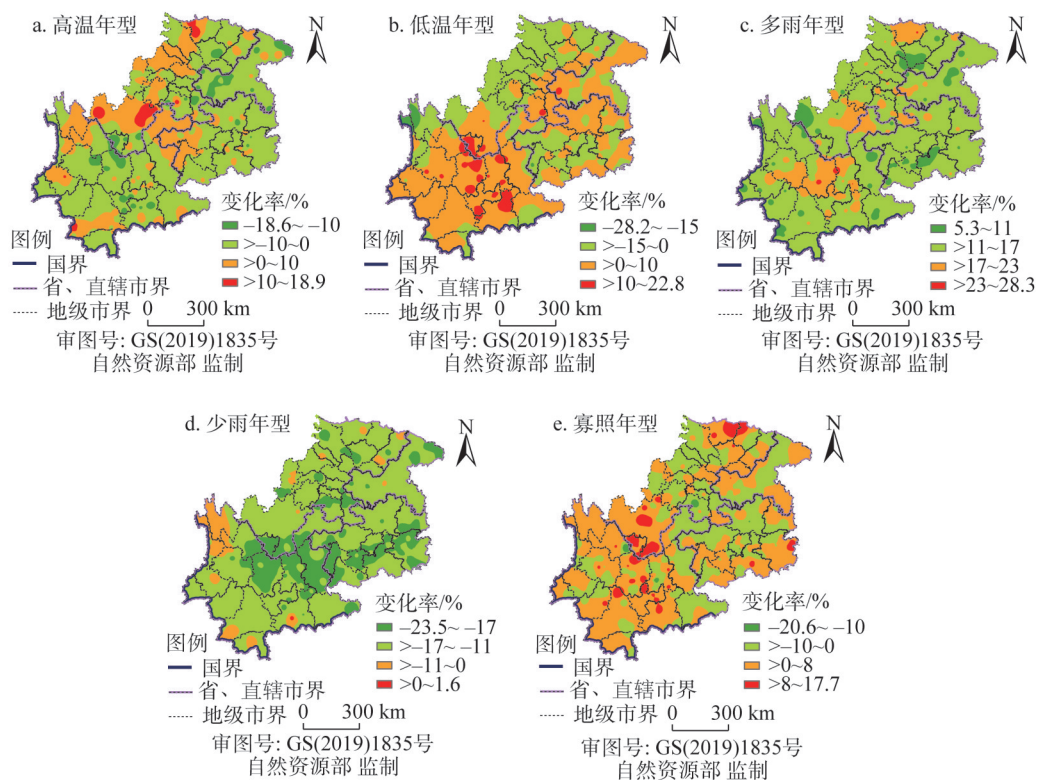


图5 1961—2015年西南区域不同气候年型下单季稻气候生产潜力较正常年型变化率的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of climatic potential yield variation for single cropping rice between annual climate type and normal year in Southwest China during 1961-2015

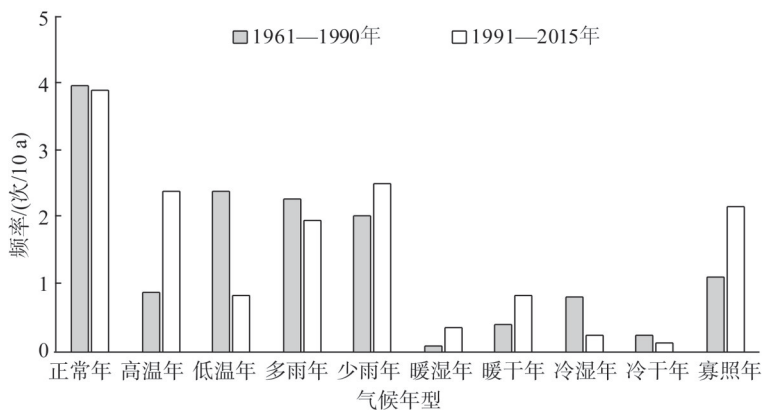


图6 不同时间段(1961—1990年和1991—2015年)西南区域单季稻生长季气候年型发生频率的比较

Fig. 6 Comparison of annual climate types in single cropping rice growing season at different time periods (1961-1990 and 1991-2015) in Southwest China

型、暖干年型和寡照年型的发生频率呈增加趋势, 分别增加1.49次/10 a、0.48次/10 a、0.27次/10 a、0.43次/10 a和1.05次/10 a。研究指出, 气温升高对西南区域单季稻生长季气候年型变化的影响最为显著, 而日照时数的下降导致了寡照年型的增加。

西南区域单季稻生长季的气候年型变化影响了单季稻的气候生产潜力。1961—2015年西南区域单季稻气候生产潜力的年际变化特征见图7。由图7可知,1961—2015年各省(市)单季稻气候生产潜力均呈下降趋势。云南、贵州、重庆和四川气候生产潜力的变化率分别为 $-15.8 \text{ kg/hm}^2/(10 \text{ a})$ 、 $-83.6 \text{ kg/hm}^2/(10 \text{ a})$ 、 $-108.0 \text{ kg/hm}^2/(10 \text{ a})$ 和 $-55.9 \text{ kg/hm}^2/(10 \text{ a})$ 。

进一步比较1961—1990年和1991—2015年两个时间段内西南区域不同气候年型下单季稻年平均气候生产潜力(图8)。由图可知,和1961—1990年相比较,1991—2015年暖年(高温年型、暖湿年型、暖干年型)年型下单季稻气候生产潜力分别升高 330.9 kg/hm^2 、 241.4 kg/hm^2 和 119.6 kg/hm^2 ,加之暖年发生频率的增加(图6),因此,气候变化背景

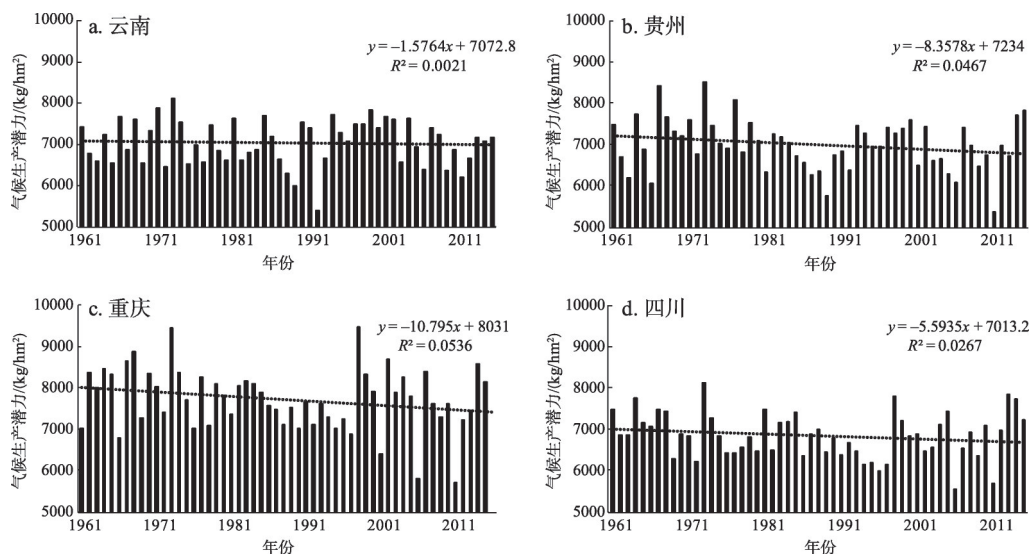


图7 1961—2015年西南区域各省(市)单季稻气候生产潜力的变化特征

Fig. 7 Variations of climatic potential yield for single cropping rice in the provinces (municipalities) in Southwest China during 1961-2015

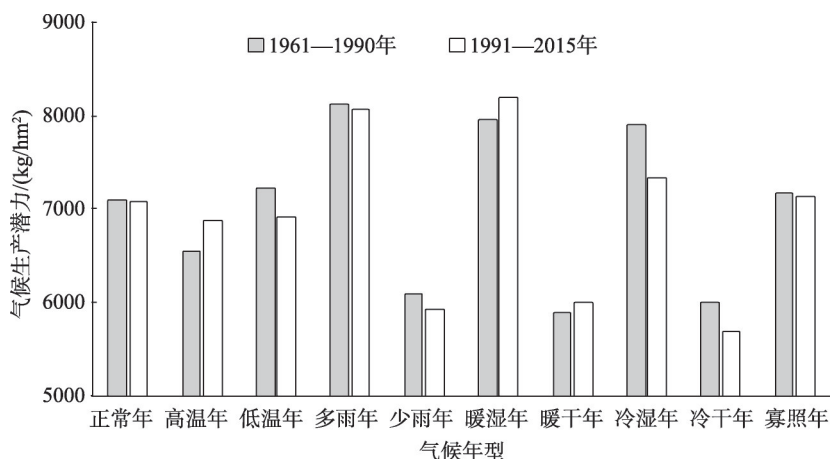


图8 不同时间段(1961—1990年和1991—2015年)西南区域不同气候年型下单季稻气候生产潜力的比较

Fig. 8 Comparison of climatic potential yield for single cropping rice in different annual climate types at different time periods (1961-1990 and 1991-2015) in Southwest China

下,西南区域暖年型的增加导致单季稻气候生产潜力提高。和1961—1990年相比较,1991—2015年冷年(低温年型、冷湿年型、冷干年型)年型下单季稻气候生产潜力分别下降 300.7 kg/hm^2 、 561.2 kg/hm^2 和 311.8 kg/hm^2 ,但气温偏低年型发生频率减少(图6),因此,气候变化背景下,二者对单季稻气候生产潜力变化的影响有抵消作用。和1961—1990年相比较,1991—2015年少雨年型下单季稻气候生产潜力下降 162.8 kg/hm^2 ,加之少雨年型发生频率的增加(图6),因此,气候变化背景下,西南区域少雨年型的增加导致单季稻气候生产潜力下降。和1961—1990年相比较,1991—2015年正常年型、多雨年型和寡照年型下单季稻气候生产潜力也均呈下降趋势,但变化不明显;综合分析图6的变化可知,气候变化背景下,正常年型和多雨年型发生频率的减少对气候生产潜力的下降有抵消作用,而寡照年型发生频率的增加将加剧单季稻气候生产潜力的下降。

3 结论与讨论

3.1 结论

1961—2015年,西南区域单季稻生长季发生频次最高的年型为正常年型,平均21.5次;其次是少雨年型和多雨年型。空间分布来看,正常年型的高发区主要出现在云南南部和西北部、四川攀西和盆南的部分地区。少雨年型的高发区主要出现在四川盆地大部、重庆东北部、云南的北部。多雨年型的高发区主要出现在四川盆地和重庆大部、云南的北部和贵州的中、西部。高温年型在四川盆地的北部和中南部、云南的中部和东部的发生频次在为2~8次,其余地区为8~17次。低温年型在云南西北部和东部、四川攀西的西部、贵州的部分地区低于8次,其余地区为8~15次。寡照年型在大部地区的发生频次为7~12.9次。1961—2015年西南单季稻生长季寡照年型中最常见的为正常年型,发生频次为 3.1 ± 1.6 次,多雨年型和低温年型次之。

1961—2015年,西南区域单季稻气候生产潜力平均为 7065.6 kg/hm^2 。和正常年型相比较,多雨、暖湿和冷湿年型的气候生产潜力分别增加14.4%、15.3%和11.0%,而少雨、暖干、冷干和高温年型气候生产潜力偏低,降水量是影响西南区域单季稻气候生产潜力的最主要因子。从非正常气候年型下单季稻气候生产潜力较正常年型变化率的空间分布来看,近55年来多雨年型气候生产潜力较正常年型增产5.3%~28.3%,其中云南北部、四川盆地北部和中南部增幅最大。少雨年型较正常年型减产0~23.5%,其中云南北部、贵州大部、重庆东北部、四川盆地北部和南部减幅最大。而高温年型、低温年型和寡照年型较正常年型的变化率空间差异较大,变化率分别为-18.6%~18.9%、-28.2%~22.8%、-20.6%~17.7%。

气候变暖对西南区域单季稻生长季气候年型变化的影响最为显著,和1961—1990年相比较,1991—2015年暖年和寡照年增加、冷年减少。气候变化背景下,近55年来西南各省(市)单季稻气候生产潜力总体均呈下降趋势。和1961—1990年相比较,1991—2015年西南区域暖年型的增加有利于单季稻气候生产潜力的提高,而少雨和寡照年型的增加是单季稻气候生产潜力下降的主要原因。

3.2 讨论

农作物气候年型是指农业年度或农作物整个生育期农业气象因子的不同组合类型。西南区域复杂的地形特点使得气候类型多样,也导致气候年型多样且空间差异大。本

文基于单季稻生长季平均气温、降水量和日照时数的异常度划分了10种农业气候年型。研究指出,非正常年型中少雨年型和多雨年型发生频次最多,分别为 11.9 ± 2.9 次和 11.6 ± 2.6 次,高发区主要出现在四川盆地大部、云南北部、重庆东北部和贵州的个别地区,这与西南区域干旱和暴雨洪涝出现频率高、影响范围广的特点一致^[13]。

农作物的生长发育和农业气候资源关系密切^[1],不同的气候年型反映了不同的气候资源组合,必将影响作物的气候生产潜力。本文采用对光合生产潜力进行温度、降水逐步订正的方法计算气候生产潜力,结果表明,影响西南区域单季稻气候生产潜力的最主要因素是降水,和正常年相比较,多雨年型气候生产潜力增加,少雨年型气候生产潜力减少。这一结论与马雪晴等^[29]的研究结果类似,正常年型下降水量能够满足作物生长的需求,而降水偏少年的气候潜在产量下降明显。

在全球和中国气候变化背景下,西南区域气候资源和农业气候资源也发生了明显变化。据研究,西南区域1961—2010年平均气温增温速率为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,略高于全球平均升温速率,而年降水量和年日照时数均呈减少趋势^[3]。温度生长期 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温呈增加趋势,降水量和参考作物蒸散量则呈减少趋势^[30]。本文结论与西南区域气候变化的总趋势一致,即单季稻生长季内暖年(高温年型、暖湿年型、暖干年型)和寡照年型增加,冷年(低温年型、冷湿年型、冷干年型)减少。气候年型的变化反映了农业气候资源的变化,也将影响作物气候生产潜力的变化^[31]。

研究表明,1961—2015年西南区域各省市单季稻气候生产潜力均呈下降趋势,这一结论与张玉芳等^[9]对四川水稻生产潜力变化特征的研究一致。和1961—1990年相比较,1991—2015年西南区域少雨和寡照年型时单季稻气候生产潜力分别下降 $162.8\text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $45.9\text{ kg}/\text{hm}^2$,加之少雨和寡照年型发生频率的增多,二者共同作用导致气候生产潜力下降。然而与此相反,国家统计局(<http://www.stats.gov.cn>)的数据显示,1981—2015年,四川、贵州、云南和重庆单季稻实际单产均呈增加趋势,增幅分别为 $513.4\text{ kg}/\text{hm}^2/10\text{ a}$ 、 $540.1\text{ kg}/\text{hm}^2/10\text{ a}$ 、 $619.0\text{ kg}/\text{hm}^2/10\text{ a}$ 和 $533.8\text{ kg}/\text{hm}^2/10\text{ a}$ 。水稻气候生产潜力的下降主要是受到不利年景的影响,而实际单产的增加则主要受益于品种改良、灌溉措施的改进、肥料的有效利用等技术手段的提高^[29]。

值得注意的是,在实际生产中,气候年型对单季稻潜在产量的影响更复杂,由热量、水分和光照资源异常度的不同组合划分出的西南区域农业气候年型也可能不限于本文中提出的10种,尤其是未考虑到极端天气气候事件的影响,例如冷年型可能出现寡照、阴雨等灾害性天气,暖年型可能出现高温热害,多雨年型也可能发生涝害或渍害。其次,农作物的实际产量受到气候、土壤、社会经济等诸多因素的影响,而气候生产潜力仅是评价农业气候资源的依据之一,作物实际产量与气候生产潜力间也并非完全对应。因而,如何考虑社会经济等非气候因素对产量的贡献率将是未来需要研究的方向之一^[27]。第三,本文未研究不同气候年型对单季稻实际产量的影响,在西南区域各省(市)实际产量持续上升的背景下,不同气候年型对其的影响程度和范围如何还需更深入的探讨。最后,今后还可以基于气候模式模拟结果对气候年型进行年度预测或未来预估,为西南区域制定单季稻防灾减灾、适应气候变化的措施提供依据^[29,32]。

参考文献(References):

- [1] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11. [GUO J P. Advances in im-

- pacts of climate change on agricultural production in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(1): 1-11.]
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21986-2008 农业气候影响评价农作物气候年型划分方法. 北京: 中国标准出版社, 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 21986-2008 Assessment of Agroclimate Impact: Classification Method of Annual Crop Climate Types. Beijing: Standards Press of China, 2008.]
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告 I: 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8. [DING Y H, REN G Y, SHI G Y, et al. National assessment report of climate change I: Climate change in China and its future trend. *Advance in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8.]
- [5] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望. 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. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2015, 38(1): 80-94.]
- [6] 孙雯. 气候变暖对中国水稻生产的影响. 南京: 南京农业大学, 2011. [SUN W. Global warming impacts on production and photosynthetic thermal productivity of rice in China. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.]
- [7] 庞艳梅, 陈超, 徐富贤, 等. 气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1661-1672. [PANG Y M, CHEN C, XU F X, et al. Impact of climate change on potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(11): 1661-1672.]
- [8] 石全红, 刘建刚, 王兆华, 等. 南方稻区水稻产量差的变化及其气候影响因素. 作物学报, 2012, 38(5): 896-903. [SHI Q H, LIU J G, WANG Z H, et al. Change of rice yield gaps and influential climatic factors in Southern China. *Acta Agonomica Sinica*, 2012, 38(5): 896-903.]
- [9] 张玉芳, 庞艳梅, 刘琰琰, 等. 近50年四川省水稻生产潜力变化特征分析. 中国生态农业学报, 2014, 22(7): 813-820. [ZHANG Y F, PANG Y M, LIU Y Y, et al. Potential productivity of rice in Sichuan province in recent five decades. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(7): 813-820.]
- [10] 帅细强, 王石立, 马玉平, 等. 基于ORYZA 2000模型的湘赣双季稻气候生产潜力. 中国农业气象, 2009, 30(4): 575-581. [SHUAI X Q, WANG S L, MA Y P, et al. Studies on potential climate productivity of double rice in Hunan and Jiangxi provinces based on ORYZA2000 model. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(4): 575-581.]
- [11] 汤开磊. 中国水稻光温生产潜力时空演变特征模拟分析. 南京: 南京农业大学, 2013. [TU K L. Simulation analysis of the temporal and spatial changing trends of rice photo-thermal yields in China. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.]
- [12] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2018.]
- [13] 《西南区域气候变化评估报告》编写委员会. 西南区域气候变化评估报告. 北京: 气象出版社, 2013. [Compilation Committee of the Assessment Report on Climate Change in Southwest China. *Assessment Report on Climate Change in Southwest China*. Beijing: China Meteorological Press, 2013.]
- [14] 陈超, 庞艳梅, 张玉芳, 等. 四川单季稻产量对气候变化的敏感性和脆弱性研究. 自然资源学报, 2016, 31(2): 331-342. [CHEN C, PANG Y M, ZHANG Y H, et al. Study on the sensitivity and vulnerability of single cropping rice yield to climate change in Sichuan. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(2): 331-342.]
- [15] 柳媛普, 王素萍, 王劲松, 等. 气候变暖背景下西南地区干旱灾害风险评估. 自然资源学报, 2018, 33(2): 325-336. [LIU Y P, WANG S P, WANG J S, et al. Risk assessment of drought disaster in Southwest China under the background of climate warming. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(2): 325-336.]
- [16] 张福春. 中国农业物候图集. 北京: 科学出版社, 1987. [ZHANG F C. *Chinese Agricultural Phenology Atlas*. Beijing: Science Press, 1987.]
- [17] 张建平, 刘宗元, 何永坤, 等. 西南地区水稻干旱时空分布特征. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3103-3110. [ZHANG J P, LIU Z Y, HE Y K, et al. Temporal and spatial distribution of rice drought in Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3103-3110.]

- [18] 韩湘玲. 农业气候学. 太原: 山西科学技术出版社, 1999. [HAN X L. Agroclimatology. Taiyuan: Shanxi Meteorological Press, 1999.]
- [19] 侯西勇. 1951—2000年中国气候生产潜力时空动态特征. 干旱区地理, 2008, 31(5): 723-730. [HOU X Y. Temporal and spatial dynamics of climatic potential productivity in China from 1951 to 2000. Arid Land Geography, 2008, 31(5): 723-730.]
- [20] CHAVAS D R, LZAURRALDE R C, THOMSON A M, et al. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in Eastern China. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149: 1118-1128.
- [21] ALLEN R G, PEREIRA L, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [22] 李勇, 杨晓光, 叶清, 等. 1961—2007年长江中下游地区水稻需水量的变化特征. 农业工程学报, 2011, 27(9): 175-183. [LI Y, YANG X G, YE Q, et al. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961-2007. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 175-183.]
- [23] 陈超, 庞艳梅, 潘学标. 气候变化背景下四川省单季稻水分盈亏的变化特征. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1508-1519. [CHEN C, PANG Y M, PAN X B. Variation characteristics of single cropping rice water surplus deficit under the background of climate change in Sichuan province. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1508-1519.]
- [24] 曹卫星. 作物栽培学总论. 北京: 科学出版社, 2006. [CAO W X. General Crop Cultivation. Beijing: Science Press, 2006.]
- [25] 侯光良. 关于我国作物气候生产力估算问题的讨论: 中国农业气候资源和农业气候区划集. 北京: 气象出版社, 1986. [HOU G L. Discussion on the Problems of Estimating Crop Climate Productivity in China: China Agricultural Climate Resources and Agro-climatic Zoning Set. Beijing: China Meteorological Press, 1986.]
- [26] 邓先瑞. 气候资源概论. 武汉: 华中师范大学出版社, 1995. [DENG X R. Introduction to Climate Resources. Wuhan: Huazhong Normal University Press, 1995.]
- [27] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956. [REN G Y, GUO J, XU M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942-956.]
- [28] MA Z F, LIU J, ZHANG S Q, et al. Observed climate changes in Southwest China during 1961-2010. Advances in Climate Change Research, 2013, 4(1): 30-40.
- [29] 马雪晴, 胡琦, 潘学标, 等. 1961—2015年华北平原夏玉米生长季气候年型及其影响分析. 中国农业气象, 2019, 40(2): 65-75. [MA X Q, HU Q, PAN X B, et al. Analysis of annual climate types and its impact on summer maize in the North China Plain over the period 1961-2015. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(2): 65-75.]
- [30] 代姝玮, 杨晓光, 赵孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅱ. 西南地区农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442-452. [DAI S W, YANG X G, ZHAO M, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change Ⅱ. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Southwest China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 442-452.]
- [31] 袁彬, 郭建平, 冶明珠, 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. 科学通报, 2012, 57(14): 1252-1262. [YUAN B, GUO J P, YE M Z, et al. Variety distribution pattern and climatic potential productivity of spring maize in Northeast China under climate change. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(14): 1252-1262.]
- [32] 庞艳梅, 陈超, 马振峰. 未来气候变化对四川省水稻生育期气候资源及生产潜力的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 13(1): 58-68. [PANG Y M, CHEN C, MA Z F. Impacts of future climate change on climatic resources and production potential during growth period of rice in Sichuan province. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2015, 13(1): 58-68.]

Analysis of annual climate types and potential yield for single cropping rice in Southwest China during 1961-2015

PANG Yan-mei¹, CHEN Chao^{1,2}, GUO Xiao-yi³, XU Fu-xian³

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu 610066, China; 3. Institute of Rice and Sorghum, Sichuan Academy of Agricultural Science, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: Annual crop climate types refer to different combinations of agrometeorological elements in agricultural year or the whole growth stage of crops, which affects the agricultural planting system, variety distribution, crop development and yield. It is of great significance to know and grasp annual crop climate types and crop potential yield under the background of the effects of climate change on the sustainable agricultural development. Based on the daily meteorological data from 316 meteorological stations and corresponding historical production data of single cropping rice in Southwest China from 1961 to 2015, and by calculating the abnormality of mean temperature, precipitation and sunshine, ten annual crop climate types were determined and the climatic potential yield of single cropping rice under different annual climate types was analyzed, and the impacts of climate change on annual climate types and climatic potential yield of single-cropping rice were also studied. The following conclusions can be drawn as follows: (1) The normal year showed the greatest frequencies with an average value of 21.5, followed by the drought year and rainy year. In terms of spatial distribution, most of the normal years were mainly found in the southern and northwestern Yunnan, Panxi and southern basin of Sichuan. Most of drought years and rainy years occurred in most of the Sichuan Basin and parts of other provincial-level regions. The high temperature year mostly appeared in the Panxi area of Sichuan, a small part of Yunnan and Guizhou. The low temperature year and scant lighting year showed least variations among different regions. (2) The average climatic potential yield of single cropping rice in Southwest China was $7065.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ during 1961-2015. Compared with the normal year, the climatic potential yield of single cropping rice in rainy year increased by more than 10%, while that in drought year reduced by more than 14%. Precipitation was the most important limiting factor for climatic potential yield of single cropping rice in Southwest China. (3) Climate warming had the most significant impact on the change of annual climate types in single cropping rice growing season in Southwest China. Compared with 1961-1990, the warm years showed an increasing trend while a decreasing trend was found in the cold years during 1991-2015. In the 55 years, the climatic potential yield of single cropping rice in all the provincial-level regions of Southwest China showed a decreasing trend. Since the 1990s, the increase in warm years was conducive to the improvement of climatic potential yield, and the increase in drought and scant lighting years was the main reason for the decline in climatic potential yield of single cropping rice over Southwest China.

Keywords: single cropping rice; annual climate type; potential yield; climate change; Southwest China