中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响

庞艳梅，陈超，徐富贤，郭晓艺

引用本文:
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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1661–1672.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200150

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候变化对关中地区粮食产量的影响及趋势分析

Impact of climate change on grain yield and its trend across Guanzhong region

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 467–479 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190752

西南区域单季稻生长季干湿演变及影响因素分析

Dry–wet evolution and its influencing factors in single cropping rice growing season in Southwest China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 492–502 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190727

基于AEZ模型的河南省冬小麦产量差时空特征分析

Spatio–temporal analysis of winter wheat yield gaps in Henan Province using AEZ model

中国生态农业学报. 2018, 26(4): 547–558 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170843

近50年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响

Influence of climate change on potential productivity of naked barley in the Tibetan Plateau in the past 50 years

中国生态农业学报. 2015, 23(10): 1329–1338 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150552

气候变化背景下安徽省冬小麦气候生产潜力和胁迫风险研究

Climatic potential productivity and stress risk of winter wheat under the background of climate change in Anhui Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 17–30 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190463

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 11 月 第 28 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2020, 28(11): 1661−1672

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200150

庞艳梅, 陈超, 徐富贤, 郭晓艺. 气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1661−1672
PANG Y M, CHEN C, XU F X, GUO X Y. Impact of climate change on potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(11): 1661−1672

气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响*

庞艳梅[1], 陈 超[1,2**], 徐富贤[3], 郭晓艺[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. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室 成都 610066; 3. 四川省农业科学院水稻高粱研究所 德阳 618000)

摘 要: 基于四川盆地 1961—2018 年 63 个气象台站的逐日气象资料和 1981—2018 年 46 个农业气象观测站的主要粮食作物(水稻、玉米和冬小麦)生育期资料, 利用逐级订正的方法计算作物气候生产潜力, 分析太阳辐射、气温、降水及气候变化对四川盆地主要粮食作物气候生产潜力的影响, 研究旨在为提高区域农业生产力并保障农业可持续发展提供科学依据。结果显示: 1961—2018 年四川盆地作物多年平均气候生产潜力的分布为水稻由西向东递增, 玉米在盆地北部和西南偏高、其他地区偏低, 冬小麦南北高、中部低。辐射量减小对 3 种作物气候生产潜力的影响为负效应; 平均气温升高对作物气候生产潜力的影响为正效应; 降水量变化是作物气候生产潜力变化出现空间差异的主要原因, 降水量增加对作物气候生产潜力的影响为正效应, 而降水量减少为负效应。气候变化对水稻气候生产潜力的影响在盆地西南部和北部的部分地区为正效应, 其余地区为负效应; 气候变化对玉米气候生产潜力的影响在盆地南部和东部的部分地区为正效应, 其余地区为负效应; 气候变化对冬小麦气候生产潜力的影响在盆地东北部的部分地区为负效应, 其余大部地区为正效应。总体来看, 气候变化对四川盆地冬小麦气候生产潜力的影响最大, 为 9.9 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, 而对玉米和水稻的影响分别为 −1.4 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和 0.5 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$。为了适应气候变化, 四川盆地应选育光合效率高和抗旱性强的作物品种, 并加强农田管理, 以提高农业生产水平并保障粮食安全。

关键词: 气候变化; 主要粮食作物; 气候生产潜力; 四川盆地

中图分类号: S162.3 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Impact of climate change on potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin*

PANG Yanmei[1], CHEN Chao[1,2**], XU Fuxian[3], GUO Xiaoyi[3]

(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 Sciences, Deyang 618000, China)

* 国家重点研发计划重点专项(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(省重实验室 2018-重点-05-01, SCQXKJQN2020029)和中国气象局成都高原气象研究所基本科研费业务项目(BROP202016)资助

** 通信作者: 陈超, 主要从事气候变化影响评价、生物气候模型与信息系统的研究。E-mail: chenchao16306@sina.com
庞艳梅, 主要从事气候变化对农业的影响评估研究。E-mail: pangyanm@126.com

收稿日期: 2020-03-02 接受日期: 2020-06-12

* This study was supported by the Key Special Project of National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300400), the Science and Technology Development Foundation of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province (Key Laboratory of Sichuan Province-2018-Key-05-01, SCQXKJQN2020029), and the Basic Business Project of Institute of Plateau Meteorology, Chinese Meteorological Administration (BROP202016).

** Corresponding author, E-mail: chenchao16306@sina.com

Received Mar. 2, 2020; accepted Jun. 12, 2020

Abstract: Potential crop productivity is important for evaluating agricultural climate resources. This study calculated the climatic potential productivity (CPP) of three grain crops (rice, maize, and winter wheat) using meteorological data. Daily measurements from 1961 to 2018 from 63 meteorological stations (Sichuan Basin, China) and crop phenology data from 1981 to 2018 from 46 agricultural meteorological stations were used to analyze productivity. Climatic factors, such as radiation, air temperature, and precipitation, and the effects of climate change were evaluated to provide regionally specific guidance for increasing agricultural productivity and sustainability. The results showed that the rice CPP in the Sichuan Basin increased from west to east between 1961 and 2018, the maize CPP was higher in the north and southwest, and the CPP of winter wheat was higher in the north and south. Reduced radiation negatively affected the CPPs of three crops, and higher temperatures positively affected the crop CPPs. Precipitation was the dominant climatic factor, affecting the spatial change of the CPP. Increased precipitation positively affected the crop CPPs, and decreased precipitation negatively affected the CPPs. The impact of climate change on the rice, maize, and winter wheat CPP was variable (positive in some basin areas, but negative in others); the overall effects of climate change on the CPPs were 0.5 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ for rice, −1.4 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ for maize, and 9.9 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ for winter wheat. Improving the selection of photosynthetically-efficient and drought-resistant crop varieties and crop field management are needed for climate change adaptation and to ensure food security.

Keywords: Climate change; Main grain crops; Climatic potential productivity; Sichuan Basin

以气候变暖为标志的全球环境变化已发生，并将持续到可预见的未来。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次评估报告中提出，气候变化比原先人类的认识更为严重，在过去的30年间，每10年的地表温度高于有记录以来的任意10年，并且在2000年以后的10多年来气温最高[1]。农业是受气候变化影响最直接的产业之一，温度、降水和辐射等气候因子的变化深刻影响了作物生产与粮食安全[2]。农业气候生产潜力是评价粮食综合生产能力的重要指标之一，也是评价农业气候资源优劣的判据之一，它的大小由光、温、水的数量及相互配合协调的程度所决定[3-4]。因而，在全球变暖的背景下，开展气候资源变化对作物生产潜力的影响研究，将为农业适应气候变化，确保粮食安全提供科学依据[5-6]。国内外对作物气候生产潜力的研究方法主要包括经验模型和作物生长模型两种[5]。常用的经验模型包括农业生态区域模型(agro-ecological zoning)[7-8]、Miami模型[9]、Thornthwait Memory模型[10]以及逐级订正模型[11-12]等，该方法计算较为简单，但对作物机理考虑不足。常用的作物生长模型包括ORYZA模型[13-14]、CERES模型[15]、EPIC模型[16]等，模型模拟法机理性强，是农业气象学研究技术的发展方向，但是模型所需参数较多，且需要对模型的有效性进行验证，在区域尺度应用时的准确性还有待提高。其中逐级订正模型是一种可以反映不同作物发育期内生产潜力的经验模型，尽管参数的确定多依据调查和经验，但它物理意义清晰，能够较好地反映气候资源的匹配情况，且基础数据易于获得，因此仍是当前应用最广泛的作物生产潜力模拟方法之一[2,5]。

近年来，针对我国作物生产潜力时空变化特征的研究主要集中在黄淮海区域[17-18]、东北区域[7,19]、西北区域[20-22]和西南区域[23-25]等地。研究指出，不同区域间的评估结果存在明显差异，即使在同一区域，不同作物间的评估结果也存在差异[2,5-6]。过去的研究多是建立气温、降水等气候因子与作物生产潜力的相关关系，或是假设气温、降水等气候因子增减单位量后导致作物生产潜力的变化。然而，针对气候因子及综合气候变化对区域不同作物气候生产潜力的影响研究还较少。四川地处我国西南，东部和西部地形地貌迥然不同，东部是四周高峻、中间低陷的典型盆地，西部是大幅度隆起的高原和山地。境内由于光热水的区域分布极不均衡、干湿季节分明、局地气候千差万别、气象灾害种类多等气候特点，易受到气候变化的影响[26-30]。其中，四川盆地在西南的粮食生产中占据重要地位[31]。鉴于此，本研究采用对光合生产潜力进行温度、降水逐级订正的方法，分析气候变化背景下四川盆地主要粮食作物[水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)、冬小麦(*Triticum aestivum*)]气候生产潜力的分布特征，探讨气候因子及综合气候资源变化对主要粮食作物气候生产潜力的影响，旨在为研究区域提高农业生产力并保障农业可持续发展提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据来源

四川地处西南内陆，全省面积共48.6万km^2，列全国第5位。作为全国13个粮食主产区之一，2017年四川省粮食总产量达3 489万t，居全国第8位。境内东部为盆地，全省70%的耕地、80%的粮食产量以及70%~80%的经济作物产量在此区域。西南为山地，

是全国杧果(*Mangifera indica*)、石榴(*Punica granatum*)、葡萄(*Vitis vinifera*)的适宜产区之一; 西部为高山峡谷高原, 适宜种植反季节蔬菜等特色作物[31]。本文选择四川盆地(非纯粹的地貌概念, 为照顾县市行政区域完整性, 包括了盆地周围边缘山地和盆中丘陵)作为研究区域。

气象资料来自气象数据统一服务接口(MUSIC), 包括1961—2018年四川盆地63个气象台站的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、平均风速和相对湿度资料。主要粮食作物(水稻、玉米和冬小麦)生育期(播种至成熟)资料来自1981—2018年四川省气象探测数据中心农业气象观测报表。

研究区域气象台站的分布如图1所示。

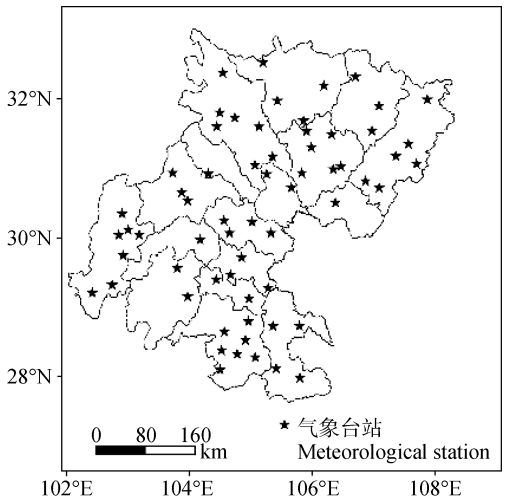

图 1　研究区域气象台站的分布

Fig. 1　Distribution of meteorological stations in the study region

1.2　研究方法

1.2.1　作物气候生产潜力的计算

作物气候生产潜力是指充分和合理利用当地的光、热、水气候资源, 而其他条件(如土壤、养分、二氧化碳等)处于最佳状况时, 单位面积土地上可获得的最高农业产量。本文利用对光合生产潜力进行温度和降水逐级订正的方法得到作物气候生产潜力[3,32-33], 公式如下:

$$Y_{\mathrm{W}} = Y_{\mathrm{T}} \times f(w) \tag{1}$$

式中: Y_{W}指气候生产潜力(kg·hm^{-2}), Y_{T}指光温生产潜力(kg·hm^{-2}), $f(w)$指水分订正系数。

其中, 水分订正系数的计算公式如下:

$$f(w) = \begin{cases} \dfrac{P}{\mathrm{RT_c}} & (0 \leqslant P < \mathrm{ET_c}) \\ 1 & (P \geqslant \mathrm{ET_c}) \end{cases} \tag{2}$$

式中: P指作物生育期的降水量(mm), $\mathrm{ET_c}$指作物需水量(mm)。采用参考作物蒸散量和作物系数的乘积计算$\mathrm{ET_c}$, 采用联合国粮食与农业组织推荐的Penman-Monteith公式和分段单值平均法[34]分别计算参考作物蒸散量和作物系数。

$$Y_{\mathrm{T}} = Y_{\mathrm{Q}} \times f(t) \tag{3}$$

式中: Y_{T}指光温生产潜力(kg·hm^{-2}), Y_{Q}指光合生产潜力(kg·hm^{-2}), $f(t)$指温度订正系数。

其中, 温度订正系数[35]的计算公式如下:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_{\min}, t > t_{\max}) \\ \dfrac{t - t_{\min}}{t_{\mathrm{op}} - t_{\min}} & (t_{\min} \leqslant t < t_{\mathrm{op}}) \\ \dfrac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_{\mathrm{op}}} & (t_{\mathrm{op}} \leqslant t \leqslant t_{\max}) \end{cases} \tag{4}$$

式中: $f(t)$指温度订正系数; t指作物生育期的平均气温(℃); $t_{\min}$为作物生长下限温度(℃), 水稻、玉米和冬小麦分别取值9、11和3; t_{op}为作物生长最适温度(℃), 水稻、玉米和冬小麦分别取值25、24和20; $t_{\max}$为作物生长上限温度(℃), 水稻、玉米和冬小麦分别取值33、34和30。

利用侯光良[36]法计算光合生产潜力, 公式如下:

$$Y_{\mathrm{Q}} = k \times \mu \times \varepsilon \times \varphi \times (1-\alpha) \times (1-\beta) \times (1-\rho) \times (1-\gamma) \times (1-\omega) \times (1-\eta)^{-1} \times (1-\xi)^{-1} \times s \times q^{-1} \times F(L) \times \sum Q_{\mathrm{i}} \tag{5}$$

式中: Y_{Q}指光合生产潜力(kg·hm^{-2}), k指单位换算函数, μ指作物光合固定CO_2能力的比值, ε指光合辐射量与总辐射量的比值, φ指光合作用量子效率, α指植物群体的反射率, β指植物繁茂群体的透射率, ρ指非光合器官所截获的辐射比例, γ指超过光饱和点的光的比例, ω指呼吸消耗与光合产物的比值, η指成熟谷物的含水率, ξ指植物无机灰分含量的比例, s指作物的经济系数, q指单位干物质的热量(MJ·kg^{-1}), $F(L)$指叶面积时间变化的动态订正系数, Q_{i}指太阳总辐射量(MJ·m^{-2})。参考前人[11,19,37-38]的研究成果, 结合四川作物实际生产, 各参数取值如表1所示。

太阳总辐射量的计算公式如下:

$$Q_{\mathrm{i}} = (m \times s + n) \times Q_{\mathrm{s}} \tag{6}$$

式中: Q_{i}指太阳总辐射量(MJ·m^{-2}); s指日照百分率(%); Q_{s}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[39]。

1.2.2　气候资源变化对作物气候生产潜力影响的计算

各气候因子变化及综合气候资源变化对气候生产潜力影响的计算公式[40]如下:

$$Y_{\mathrm{r}} = \left(\frac{Y_{\mathrm{Q}}}{Y_{\mathrm{1}}}\right) \times Y_{\mathrm{3}} \tag{7}$$

$$Y_t = \left(\frac{y_T}{Y_2} - \frac{y_Q}{Y_1}\right) \times Y_3 \tag{8}$$

$$Y_p = \left(\frac{y_W}{Y_3} - \frac{y_T}{Y_2}\right) \times Y_3 \tag{9}$$

$$Y_c = Y_W \tag{10}$$

式中: Y_r、Y_t、Y_p、Y_c分别指太阳辐射资源、热量资源、降水资源及整个气候资源对作物气候生产潜力的影响(kg·hm^{-2}·a^{-1}); y_Q、y_T、y_W分别指作物光合生产潜力、光温生产潜力及气候生产潜力的年变化率(kg·hm^{-2}·a^{-1}); Y_1、Y_2、Y_3分别指1961—2018年作物光合生产潜力、光温生产潜力及气候生产潜力的多年平均值(kg·hm^{-2})。

表 1 作物光合生产潜力模型各参数取值

Table 1 Value of each parameter for photosynthetic potential productivity of crops

参数 Parameter	水稻 Rice	玉米 Maize	小麦 Winter wheat
μ	0.9	1.0	1.0
ε	0.49	0.49	0.49
φ	0.224	0.224	0.224
α	0.08	0.08	0.10
β	0.06	0.06	0.07
ρ	0.10	0.10	0.10
γ	0.01	0.01	0.03
ω	0.33	0.30	0.33
η	0.15	0.15	0.15
ξ	0.08	0.08	0.08
s	0.45	0.40	0.40
q	17.2	17.8	17.5
$F(L)$	0.55	0.58	0.55

2 结果与分析

2.1 四川盆地主要粮食作物生产潜力的分布特征

1961—2018年, 四川盆地水稻光温生产潜力最大, 为16 796 kg·hm^{-2}; 玉米次之, 为13 642 kg·hm^{-2}; 冬小麦最小, 为10 373 kg·hm^{-2}。从分布特征来看(图2), 不同粮食作物光温生产潜力的空间分布差异较大。水稻光温生产潜力呈现由西向东逐渐增加的趋势, 为10 488~20 452 kg·hm^{-2}, 高值区主要位于盆地东北部和盆地南部; 玉米光温生产潜力呈现东西低、中部高的趋势, 为10 172~16 036 kg·hm^{-2}, 高值区主要位于德阳、绵阳和眉山等地; 冬小麦光温生产潜力呈现西高东低的趋势, 为7 586~14 341 kg·hm^{-2}, 高值区主要位于盆地西北部和西南部。

1961—2018年, 四川盆地水稻气候生产潜力最大, 为12 220 kg·hm^{-2}; 玉米次之, 为10 001 kg·hm^{-2}; 冬小麦最小, 为6 023 kg·hm^{-2}。从分布特征来看(图3), 不同粮食作物气候生产潜力的空间分布差异较大。水稻气候生产潜力呈现由西向东逐渐增加的趋势, 为7 089~14 889 kg·hm^{-2}, 高值区主要位于盆地东北部和盆地南部; 玉米气候生产潜力为7 809~11 980 kg·hm^{-2}, 高值区主要位于盆地北部和眉山等地; 冬小麦气候生产潜力呈现南北高、中部低的趋势, 为3 309~11 520 kg·hm^{-2}。

2.2 气候资源变化对四川盆地主要粮食作物气候生产潜力的影响

2.2.1 辐射资源变化对主要粮食作物气候生产潜力的影响

1961—2018年, 四川盆地水稻、玉米和冬小麦3种主要粮食作物生育期辐射量均以减小为主, 变化率分别为−17.7 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$、−16.8 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$和−11.7 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$(图4)。从辐射量变化的空间

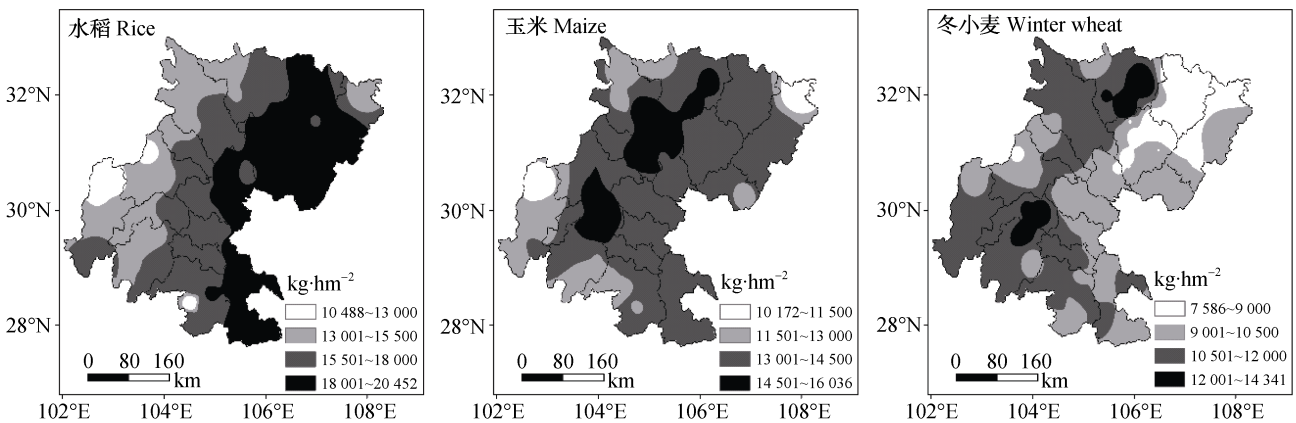

图 2 1961—2018 年四川盆地主要粮食作物光温生产潜力的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of light-temperature potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin during 1961−2018

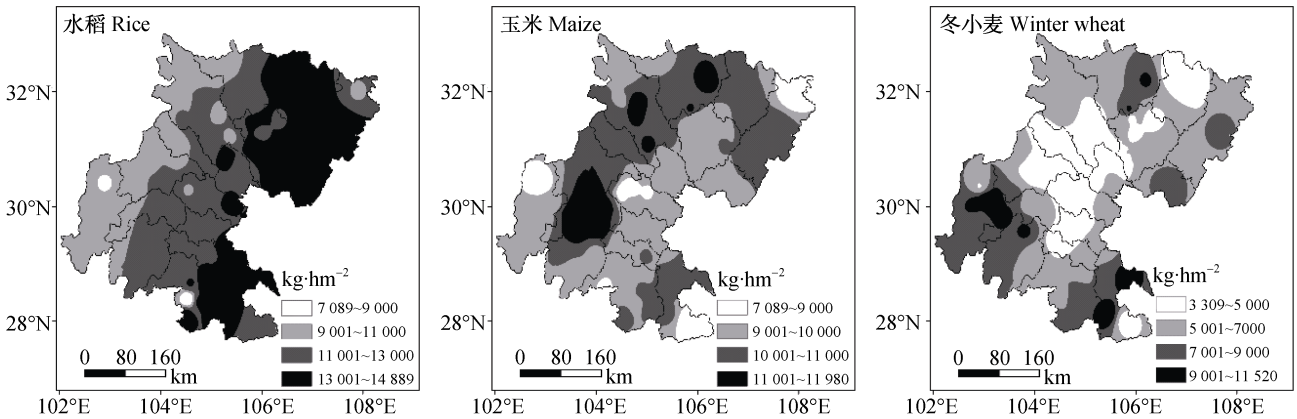

图 3　1961—2018 年四川盆地主要粮食作物气候生产潜力的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of climatic potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin during 1961−2018

分布特征来看，水稻、玉米和冬小麦生育期辐射量在大部区域均以减小为主，变化率分别为−58.6~60.5 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$、−50.8~51.9 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$和−48.8~10.8 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$(图5)。辐射资源变化对3种作物气候生产潜力的影响均为负效应，辐射量减小对水稻的影响最大，为−8.9 kg·hm^{-2}·a^{-1}；玉米次之，为−7.7 kg·hm^{-2}·a^{-1}；冬小麦最小，为−5.3 kg·hm^{-2}·a^{-1}。从辐射资源变化对作物气候生产潜力影响的空间分布特征来看，与辐射量变化的空间分布特征基本一致，即大部分区域辐射量的减小对水稻、玉米和冬小麦气候生产潜力的影响以负效应为主，影响程度分别为−30.8~29.2 kg·hm^{-2}·a^{-1}、−27.4~21.7 kg·hm^{-2}·a^{-1}和−18~4.4 kg·hm^{-2}·a^{-1}(图6)。

2.2.2　热量资源变化对主要粮食作物气候生产潜力的影响

1961—2018年，四川盆地水稻、玉米和冬小麦3种主要粮食作物生育期平均气温均以升高为主，变化率分别为0.16 ℃·(10a)$^{-1}$、0.11 ℃·(10a)$^{-1}$和0.24 ℃·(10a)$^{-1}$(图7)。从平均气温变化的空间分布特征来看，水稻、玉米和冬小麦生育期平均气温在大部区域均以升高为主，变化率分别为−0.22~0.76 ℃·(10a)$^{-1}$、−0.23~0.96 ℃·(10a)$^{-1}$和0~0.37 ℃·(10a)$^{-1}$(图8)。热量资源变化对3种作物气候生产潜力的影响均为正效应，平均气温升高对冬小麦的影响最大，为14.3 kg·hm^{-2}·a^{-1}；水稻次之，为8.6 kg·hm^{-2}·a^{-1}；玉米最小，为5.8 kg·hm^{-2}·a^{-1}。从热量资源变化对作物气候生产潜力影响的空间分布特征来看，与平均气温变化的空间分布特征类似，即大部分区域平均气温的增加对水稻、玉米和冬小麦气候生产潜力的影响以正效应为主，影响程度分别为−10.9~42.2 kg·hm^{-2}·a^{-1}、−9.4~40.9 kg·hm^{-2}·a^{-1}和0.2~32.1 kg·hm^{-2}·a^{-1}(图9)。

2.2.3　降水资源变化对主要粮食作物气候生产潜力的影响

1961—2018年，四川盆地水稻、玉米和冬小麦3种主要粮食作物生育期降水量的变化趋势不明显，变化率分别为−0.9 mm·(10a)$^{-1}$、−5.4 mm·(10a)$^{-1}$和

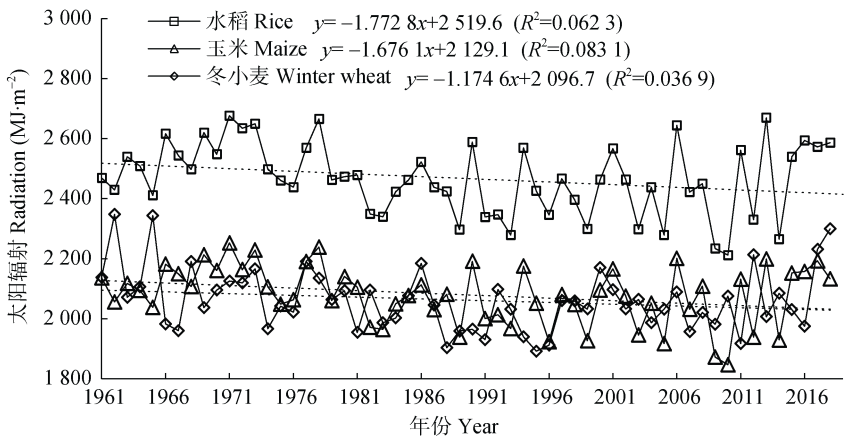

图 4　1961—2018 年四川盆地主要粮食作物生育期辐射量的变化趋势

Fig. 4　Change of radiation during the growth periods of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

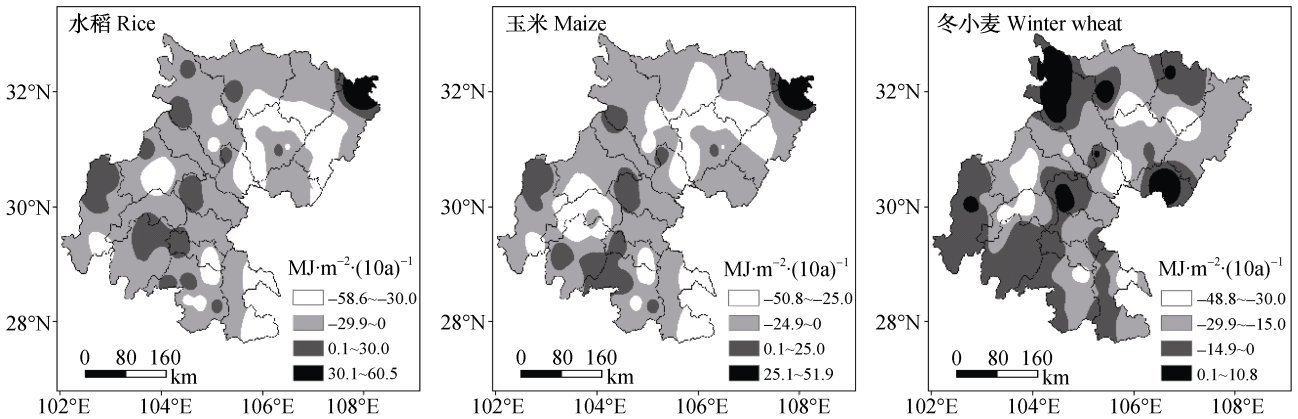

图 5 1961—2018 年四川盆地主要粮食作物生育期辐射量变化趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of change in radiation during the growth periods of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

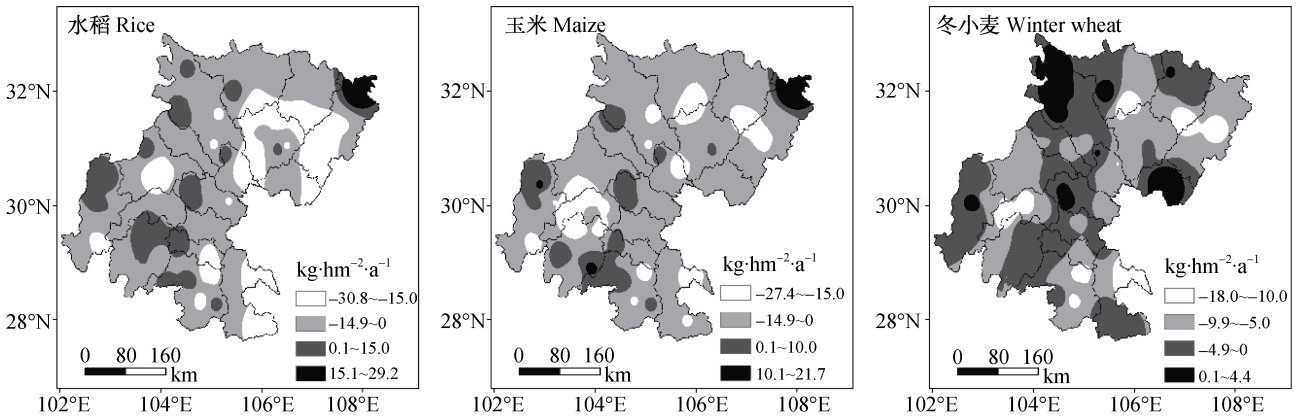

图 6 1961—2018 年辐射资源变化对四川盆地主要粮食作物气候生产潜力的影响

Fig. 6 Effects of radiation resource changes on the climatic potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

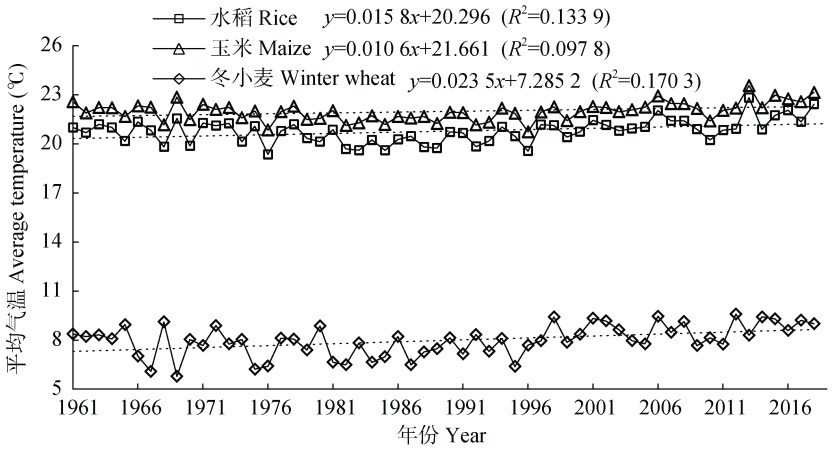

图 7 1961—2018 年四川盆地主要粮食作物生育期平均气温的变化趋势

Fig. 7 Change of average temperature during the growth periods of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

−0.1 mm·(10a)$^{-1}$(图10)。从降水量变化的空间分布特征来看，水稻、玉米生育期的降水量在盆地北部和南部以增加为主，而在其他区域以减少为主，变化率分别为−29.3~28.6 mm·(10a)$^{-1}$和−51.0~24.1 mm·(10a)$^{-1}$；冬小麦生育期降水量在盆地西南部和中部以增加为主，而在其他区域以减少为主，变化率为−11.4~12.9 mm·(10a)$^{-1}$(图11)。降水资源变化对水稻、玉米和冬小麦气候生产潜力的总体影响分别为0.8 kg·hm^{-2}·a^{-1}、0.5 kg·hm^{-2}·a^{-1}和0.9 kg·hm^{-2}·a^{-1}。从降水资源变化对作物气候生产潜力影响的空间分布

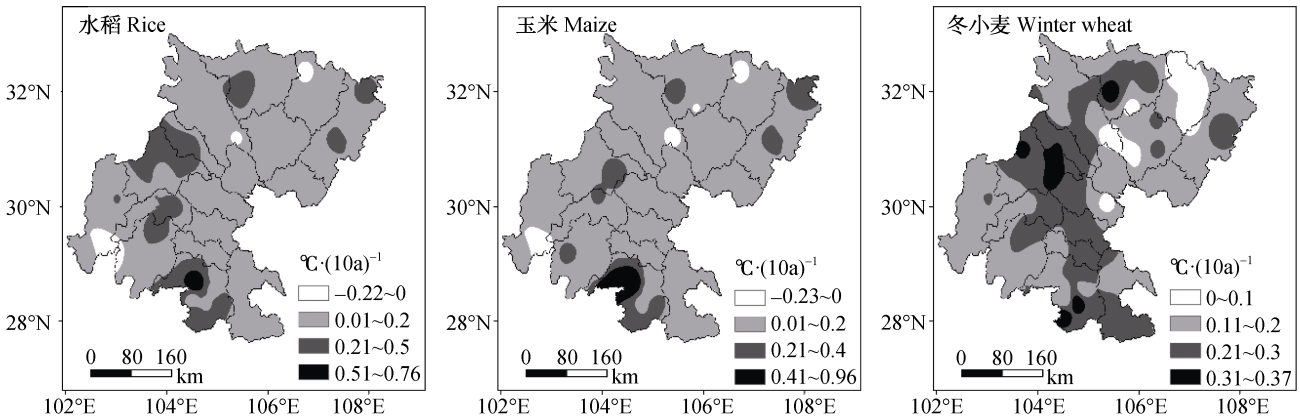

图 8　1961—2018 年四川盆地主要粮食作物生育期平均气温变化趋势的空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of change in average temperature during the growth periods of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

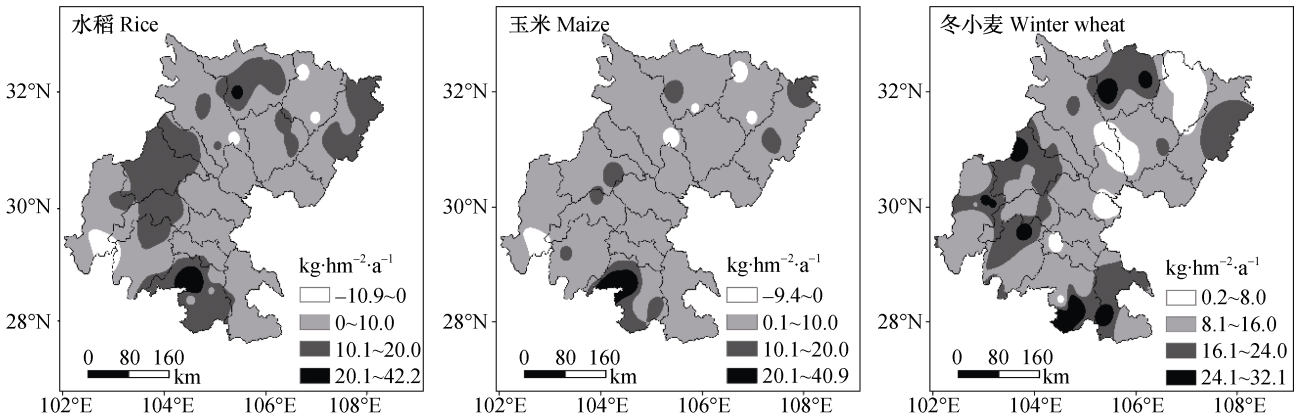

图 9　1961—2018 年热量资源变化对四川盆地主要粮食作物气候生产潜力的影响

Fig. 9　Effects of thermal resource changes on the climatic potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

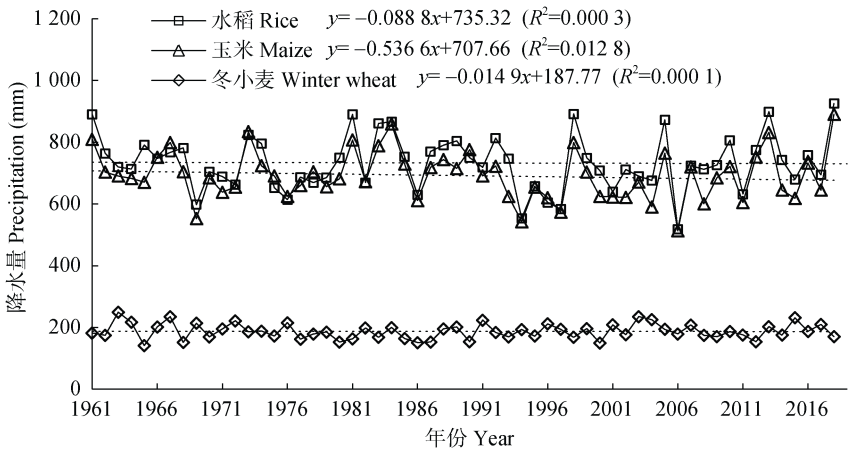

图 10　1961—2018 年四川盆地主要粮食作物生育期降水量的变化趋势

Fig. 10　Change of precipitation during the growth periods of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

特征来看，降水量不足是导致作物生长发育的主要制约要素，即水稻和玉米生育期降水量增加的盆地北部和南部、冬小麦生育期降水量增加的盆地西南部和中部对作物气候生产潜力的影响为正效应，而降水量减少的区域对作物气候生产潜力的影响为负效应，降水量变化对3种作物气候生产潜力的影响分别为−31.7~37.2 kg·hm^{-2}·a^{-1}、−33.1~29.9 kg·hm^{-2}·a^{-1}和−40.8~39.2 kg·hm^{-2}·a^{-1}(图12)。

2.2.4　气候变化对主要粮食作物气候生产潜力的影响

气候变化对水稻气候生产潜力的影响在盆地西

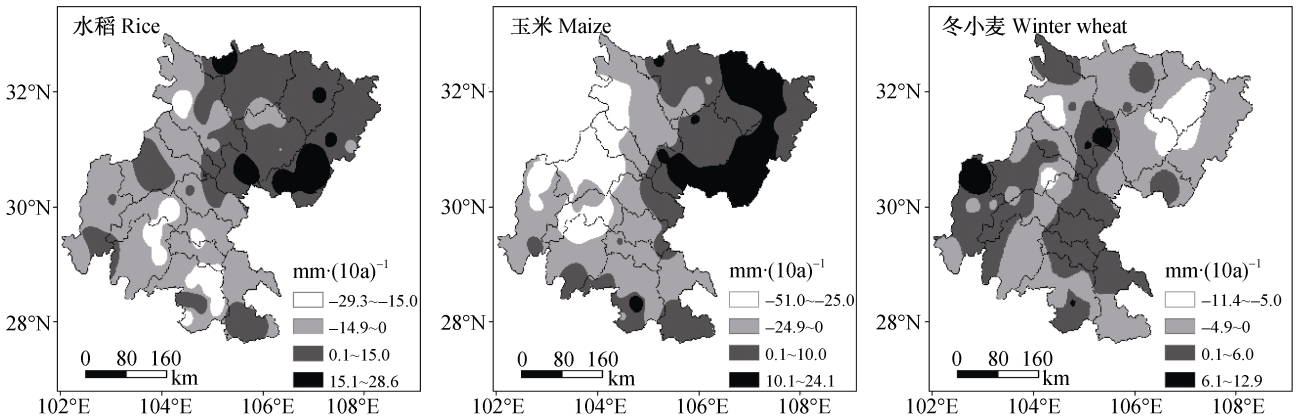

图 11 1961—2018 年四川盆地主要粮食作物生育期降水量变化趋势的空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of change in precipitation during the growth periods of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

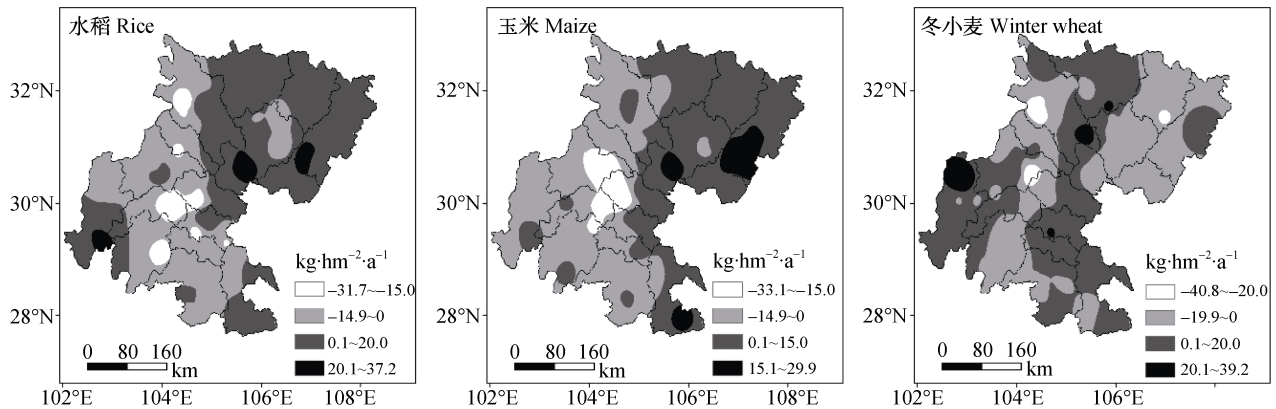

图 12 1961—2018 年降水资源变化对四川盆地主要粮食作物气候生产潜力的影响

Fig. 12 Effects of change in the precipitation resources on the climatic potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

南部和北部的部分地区为正效应，其余地区为负效应，变化率为−30.8~46.5 kg·hm^{-2}·a^{-1}(图13a)，与降水资源变化对气候生产潜力的影响特征基本一致。气候变化对玉米气候生产潜力的影响在盆地南部和东部的部分地区为正效应，其余大部分地区为负效应，变化率为−35.2~35.9 kg·hm^{-2}·a^{-1}(图13b)，与降水资源变化对气候生产潜力的影响特征大体一致，但盆地北部的广元、南充等地为负效应，主要是因为辐射量变化的负效应大于降水量变化的正效应。气候变化对冬小麦气候生产潜力的影响在盆地东北部的部分地区为负效应，其余大部分地区为正效应，变化率为−29.8~47.7 kg·hm^{-2}·a^{-1}(图13c)。从1961—2018年气候变化对3大粮食作物气候生产潜力的平均影响程度来看，冬小麦最大，为9.9 kg·hm^{-2}·a^{-1}，玉米和水稻分别为−1.4 kg·hm^{-2}·a^{-1}和0.5 kg·hm^{-2}·a^{-1}。

3 讨论

过去，针对气候变化对作物生产潜力影响的研究，大多是建立辐射量、平均气温及降水量等气候因子变化与作物生产潜力的相关关系[41]，或者是假定辐射量、平均气温和降水量等气候因子增减某个单位量后导致作物生产潜力的变化幅度[42]。本研究以光合、光温与气候生产潜力的年变化率和多年平均值为基础建立统计模型，分离出了太阳辐射资源、热量资源和降水资源变化对作物气候生产潜力的影响[40]。研究结果显示，气候要素变化对四川盆地不同作物气候生产潜力的影响有差异。辐射资源变化对水稻、玉米和冬小麦气候生产潜力的影响均为负效应，主要是因为辐射量的减小不利于作物生长，导致作物光合生产潜力减小[15-16]，尤其对水稻的不利影响最大。热量资源变化对3种作物气候生产潜力的影响均为正效应，主要是因为作物生育期的气温大多在最适温度范围内，气候变暖对作物增产有利[15-16]，尤其改善了冬小麦生育期的热量条件。降水量不足是导致作物生长发育的主要制约要素，即降水量增加的区域对作物气候生产潜力的影响为正效应，而降水量减少的区域为负效应，主要是因为降水量的不足会导致作物生长过程中水分胁迫加

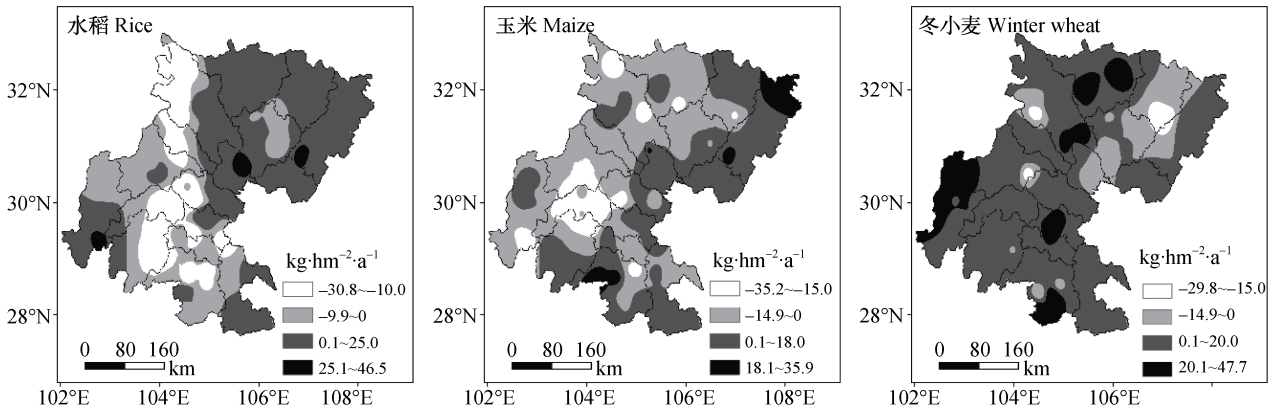

图 13　1961—2018 年气候变化对四川盆地主要粮食作物气候生产潜力的影响

Fig. 13　Effects of climate change on the climatic potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin from 1961 to 2018

重[15-16]。总体来看，气候变化对四川盆地大部分地区冬小麦气候生产潜力的影响有利，而对盆西和盆南大部区域水稻、盆北和盆西南大部区域玉米气候生产潜力的影响不利。因此，为了适应气候变化，应针对不同区域、不同粮食作物提出具体的对策措施。首先，考虑辐射资源下降对粮食作物生产潜力的不利影响，在四川盆地选育光合效率高的作物品种；其次，对于降水量减少导致作物生产潜力下降的区域，选育抗旱性强的作物品种；另外，四川盆地受到地形地势和经济发展的影响，农业机械化和科技水平还不高，应加强田间管理，选择合理的栽培方式，适时推广生物覆盖与农业节水技术，提高作物的水分利用效率[20,31]。

本文还有一些不足之处有待改进和完善。第一，本研究采用逐级订正法来计算作物生产潜力，该方法涉及的参数包括光、温和水等影响作物产量形成的气候要素与指标，基础数据获取容易，计算结果的物理学和生物学意义明确[20-21]。然而，由于逐级订正法中的参数确定具有很大的经验性，仅能反映当前作物总体的品种特性，而伴随育种与栽培技术的不断发展，未来更优良品种的参数可能不同，从而可能导致作物生产潜力的计算结果发生变化[10]；同时，本研究主要通过文献查阅的方法确定参数值，田间试验数据的支撑不足[20]。因此，未来应根据实际生产条件适时对参数进行修正，以获得更为准确的结果。第二，逐级订正法中水分订正系数的计算未考虑降水量远远大于作物需水量，甚至导致洪涝灾害时对作物生产潜力的负面影响。另外，本研究中逐级订正法中水分订正系数是以雨养方式为前提，对小麦和玉米基本适合，但四川盆地的水稻几乎全部是水田，旱稻极少，水分来源不仅是降水，更多来自河流，灌溉水源可充分保证稻田。因此，采用与小麦、玉米同样的逐级订正法，对于水稻的实际意义偏弱。其次，逐级订正法中温度订正系数的计算采用了线性关系，而由于作物不同生育阶段对温度的要求存在差异，温度订正系数实际可能是非线性的。因此，未来还需要对该方法中的不足之处进行改进。第三，二氧化碳浓度增高具有施肥效应和提高作物水分利用效率的作用，且对C3作物更为突出，但因计算复杂本文未进行估算。第四，由于资料的不完整性和不连续性，本文采用的是农业气象观测站作物多年平均生育期资料，但随着气候变暖实际生育期是变化的。小麦由于品种间熟期差异很小，生育期缩短明显，会影响到生育期间气候资源总量。水稻不同品种间熟期有一定差异，玉米差异更大，气候变暖后随着积温增加，可改用生育期更长的品种来充分利用增加的积温，挖掘利用气候生产潜力将成为有效的气候变化适应措施。因此，未来应选择长时间资料的代表站点，研究生育期变化对作物生产潜力的影响。第五，光、温、水等气候资源变化对作物生长期间不同生育期的影响是不同的，特别在关键生育期内气象条件对作物的产量形成有很大影响，因此，未来可以结合作物生长机理，研究四川盆地主要粮食作物关键生育期内的气候资源变化对作物生产潜力的影响[20]。第六，作物气候生产潜力是理想状况下的最大产量，而农作物的实际产量受气候、土壤、社会经济等诸多因素的影响。因而，未来可以利用多因素进行综合分析，开展作物气候生产潜力和实际产量的对比研究，从而探讨二者间的差异与响应[16]。

4　结论

1961—2018年，四川盆地作物光温生产潜力和气候生产潜力均是水稻最大，玉米次之，冬小麦最

低。不同粮食作物生产潜力的空间分布差异较大。

1961—2018年，四川盆地水稻、玉米和冬小麦生育期辐射量均以减小为主；辐射量减小对3种作物气候生产潜力的影响均为负效应，对水稻的影响最大，玉米次之。3种作物生育期平均气温均以升高为主；平均气温升高对3种作物气候生产潜力的影响均为正效应，对冬小麦的影响最大，水稻次之。3种作物生育期降水量的总体变化趋势不明显，但空间差异显著；降水量变化是作物生产潜力变化出现空间差异的主要原因；水稻和玉米生育期降水量增加的盆地北部和南部、冬小麦生育期降水量增加的盆地西南部和中部对作物气候生产潜力的影响为正效应，而降水量减少的区域对作物气候生产潜力的影响则为负效应。

气候变化对水稻气候生产潜力的影响在盆地西南部和北部的部分地区为正效应，其余地区为负效应；气候变化对玉米的影响在盆地南部和东部的部分地区为正效应，其余地区为负效应；气候变化对冬小麦的影响在盆地东北部的部分地区为负效应，其余大部地区为正效应。

参考文献 References

[1] 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[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

[2] 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

[3] 侯西勇. 1951—2000 年中国气候生产潜力时空动态特征[J]. 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[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(5): 723–730

[4] 郭建平. 气候变化对农业气候资源有效性的影响评估[M]. 北京: 气象出版社, 2016
GUO J P. Impact of Climate Change on the Effectiveness of Agroclimatic Resources[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016

[5] 李三爱, 居辉, 池宝亮. 作物生产潜力研究进展[J]. 中国农业气象, 2005, 26(2): 106–111
LI S A, JU H, CHI B L. Reviews on crop potential productivity researches[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(2): 106–111

[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

[7] 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[J]. 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[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(14): 1252–1262

[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[J]. 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[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(5): 896–903

[9] 陈国南. 用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J]. 自然资源学报, 1987, 2(3): 270–278
CHEN G N. Preliminary study on calculation of primary production of ecosystem in China with application of Miami model[J]. Journal of Natural Resources, 1987, 2(3): 270–278

[10] 高素华, 潘亚茹, 郭建平. 气候变化对植物气候生产力的影响[J]. 气象, 1994, 20(1): 30–33
GAO S H, PAN Y R, GUO J P. The variation of plant climate productivity for the last 40 years and the effects of climate change in China[J]. Meteorological Monthly, 1994, 20(1): 30–33

[11] 马雅丽, 郭建平, 赵俊芳. 晋北农牧交错带作物气候生产潜力分布特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 818–827
MA Y L, GUO J P, ZHAO J F. Spatial distribution of crop climatic potential productivity and its response to climate change in agro-pastural ecotone in northern Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 818–827

[12] 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[J]. 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[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(7): 813–820

[13] 帅细强, 王石立, 马玉平, 等. 基于 ORYZA2000 模型的湘赣双季稻气候生产潜力[J]. 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 ORYZA 2000 model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 575–581

[14] 汤开磊. 中国水稻光温生产潜力时空演变特征模拟分析[D]. 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[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013

[15] 李军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2): 161–165
LI J, WANG L X, SHAO M A, et al. Simulation of wheat potential productivity on Loess Plateau region of China[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(2): 161–165

[16] 王宗明, 梁银丽. 应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜

力的初步尝试[J]. 自然资源学报, 2000, 17(4): 481–487
WANG Z M, LIANG Y L. The application of EPIC model to calculate crop productive potentialities in Loessic Yuan region[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 17(4): 481–487

[17] 刘建栋, 于强, 傅抱璞. 黄淮海地区冬小麦光温生产潜力数值模拟研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(2): 169–174
LIU J D, YU Q, FU B P. The numerical simulation of winter wheat photo-temperature productivity in Huang-Huai-Hai region[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(2): 169–174

[18] 赵俊芳, 郭建平, 邬定荣, 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
ZHAO J F, GUO J P, WU D R, et al. Climatic potential productivity of winter wheat and summer maize in Huanghuaihai Plain in 2011–2050[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3189–3195

[19] 王晓煜, 杨晓光, 孙爽, 等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3091–3102
WANG X Y, YANG X G, SUN S, et al. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food crops in three provinces of Northeast China under climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3091–3102

[20] 姚玉壁, 李耀辉, 王毅荣, 等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 202–208
YAO Y B, LI Y H, WANG Y R, et al. Effects of the climate and climatic productivity in the Loess Plateau of China on global climate change[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(2): 202–208

[21] 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
YIN H X, ZHANG B, ZHANG J X, et al. Spatiotemporal variation patterns of climatic factors and climatic potential productivity of spring maize in eastern Gansu of Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(6): 1504–1510

[22] 赖荣生, 余海龙, 黄菊莹. 宁夏中部干旱带气候变化及其对春玉米气候生产潜力的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(3): 108–114
LAI R S, YU H L, HUANG J Y. Effects of climate changes on spring maize's climate potential productivity in middle arid region of Ningxia[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(3): 108–114

[23] 王素艳, 郭海燕, 邓彪, 等. 气候变化对四川盆地作物生产潜力的影响评估[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(2): 49–53
WANG S Y, GUO H Y, DENG B, et al. Impact of climatic variation on crop potential productivity in Sichuan basin[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2009, 29(2): 49–53

[24] 庞艳梅, 陈超, 潘学标, 等. 未来气候变化对四川盆地玉米生育期气候资源及生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1526–1536
PANG Y M, CHEN C, PAN X B, et al. Impact of future climate change on climatic resources and potential productivity of maize in Sichuan basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(12): 1526–1536

[25] 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[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(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[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(1): 58–68

[26] 《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决策者摘要及执行摘要—2012[M]. 北京: 气象出版社, 2013
Compilation Committee of the Assessment Report on Climate Change in Southwest China. Summary for Policymakers and Executive Summary of Assessment Report on Climate Change in Southwest China–2012[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013

[27] 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等. 西南区域气候变化原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 35–42
QI D M, ZHOU C Y, LI Y Q, et al. Cause analysis of climate changes in Southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2012, 32(1): 35–42

[28] 石兴琼, 肖天贵, 房玉洁, 等. 西南地区不同地质灾害影响区的降水阈值研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 63–67
SHI X Q, XIAO T G, FANG Y J, et al. Study of precipitation concentration threshold at the different geological disaster affected zone in Southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(1): 63–67

[29] 李瀚, 韩琳, 贾志军, 等. 中国西南地区地面平均相对湿度变化分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 42–47
LI H, HAN L, JIA Z J, et al. The changes of the average relative humidity in Southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(4): 42–47

[30] 郝婧宇, 倪长健, 朱杰. 四川地区降水幂律指数研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 44–51
HAO J Y, NI C J, ZHU J. Analysis of the power-law exponent of precipitation in Sichuan[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(1): 44–51

[31] 陈超, 庞艳梅, 金垚, 等. 气候变化对四川农业的影响研究[M]. 北京: 气象出版社, 2019
CHEN C, PANG Y M, JIN Y, et al. Research on Impact of Climate Change on Agriculture in Sichuan Province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2019

[32] 韩湘玲. 农业气候学[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1999
HAN X L. Agroclimatology[M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1999

[33] CHAVAS D R, IZAURRALDE R C, THOMSON A M, et al. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6/7): 1118–1128

[34] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization, 1998

[35] 曹卫星. 作物栽培学总论[M]. 北京: 科学出版社, 2006
CAO W X. General Crop Cultivation[M]. Beijing: Science Press, 2006

[36] 侯光良. 关于我国作物气候生产力估算问题的讨论[M]//全国农业气候资源和农业气候区划研究协作组. 中国农业气候资源和农业气候区划文集. 北京: 气象出版社, 1986
HOU G L. Discussion on the problems of estimating crop climate productivity in China[M]//National Agroclimatic Resources and Agroclimatic Regionalization Research Cooperation Group. China Agricultural Climate Resources and Agro-climatic Zoning Set. Beijing: China Meteorological Press, 1986

[37] 李世奎. 中国农业气候资源和农业气候区划[M]. 北京: 科学出版社, 1988
LI S K. Agricultural Climate Resources and Agro-climatic Zoning in China[M]. Beijing: Science Press, 1988

[38] 中国农业科学院. 中国农业气象学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999
Chinese Academy of Agricultural Sciences. Chinese Agricultural Meteorology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999

[39] 邓先瑞. 气候资源概论[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 1995
DENG X R. Introduction to Climate Resources[M]. Wuhan: Huazhong Normal University Press, 1995

[40] GUO J P, ZHAO J F, WU D R, et al. Attribution of maize yield increase in China to climate change and technological advancement between 1980 and 2010[J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(6): 1168–1181

[41] 姚筠, 许莹, 马晓群. 淮河流域降水变化对主要农作物气候生产潜力的限制[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 490–500
YAO Y, XU Y, MA X Q. Influence of precipitation change on climatic potential productivity of major crops in the Huaihe River basin[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 490–500

[42] 谢万银, 郭小芹, 陆登荣, 等. 陇中黄土高原气候生产潜力时空变化及水热因子驱动分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(5): 861–866
XIE W Y, GUO X Q, LU D R, et al. Spatial and temporal variation of climatic production potential and its driving force factors in middle Gansu loess plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(5): 861–866