

# 近 50 年四川省水稻生产潜力变化特征分析\*

张玉芳<sup>1,2</sup> 庞艳梅<sup>1</sup> 刘琰琰<sup>3</sup> 陈超<sup>4\*\*</sup> 董孝斌<sup>5</sup>

- (1. 中国气象局成都高原气象研究所 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. 成都信息工程学院大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室 成都 610225; 4. 四川省气候中心 成都 610072;  
5. 北京师范大学资源学院 北京 100089)

**摘要** 气候变化对农业生产的影响日益加剧,特别是作为我国粮食重要产区的四川。科学评价气候变化对四川省水稻生产的影响对于区域农业可持续发展具有重要意义。本文基于四川省 45 个气象站点 50 年的气象数据和 20 年的水稻生育期资料,采用侯光良法分析了四川省 7 个水稻种植区的水稻光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力的时空分布特征,并结合现实生产力数据分析了气候变化背景下四川省水稻的增产潜力。结果表明:1961—2010 年四川省水稻生育期内光合生产潜力的空间分布呈北低南高中部最低,光温生产潜力呈现北高南低,气候生产潜力为南北低中间高。近 50 年来日照时数的减少使得水稻光合生产潜力从 20 世纪 80 年代开始持续偏低;温度的升高有利于水稻光温生产潜力的增加,尤其在 2006 年出现高值;降水量的减少使水稻气候生产潜力从 20 世纪 90 年代开始下降明显。四川省水稻存在增产潜力,但增产潜力呈下降趋势,未来应加大农业科技投入,合理利用气候资源,提升水稻生产力。

**关键词** 气候变化 水稻 光合生产潜力 光温生产潜力 气候生产潜力 增产潜力 四川省

**中图分类号:** S166 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2014)07-0813-08

## Potential productivity of rice in Sichuan Province in recent five decades

ZHANG Yufang<sup>1,2</sup>, PANG Yanmei<sup>1</sup>, LIU Yanyan<sup>3</sup>, CHEN Chao<sup>4</sup>, DONG Xiaobin<sup>5</sup>

- (1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Key Laboratory for Water-saving Agriculture in the South Hill Area, Chengdu 610066, China; 3. College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology / Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 4. Sichuan Climate Center, Chengdu 610072, China; 5. College of Resources, Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100089, China)

**Abstract** Climate change has significantly influenced agricultural production in Sichuan, a main grain producing region in China. Scientific evaluation of the impact of climate change on rice production is crucial for sustainable development of regional agriculture. In this study, daily meteorological data for the period 1961–2010 from 45 weather stations were collected along with phenological data of rice for the period of 1981–2010 in order to analyze the temporal and spatial distributions of potential productivity of rice in Sichuan. The whole area of Sichuan was divided into 8 regions, including 7 rice growing regions and one non-rice growing region. Photosynthetic potential productivity, light-temperature potential productivity and climate potential productivity of rice in each region were calculated and the corresponding spatial and temporal variations analyzed. The improvements in potential yields of rice were further analyzed by comparison of potential productivity to actual yield. The results showed that while photosynthetic potential productivity was high in the southern Sichuan, it was low in central Sichuan. Light-temperature potential productivity was high in the northern and low in the southern regions. Climate potential productivity was high in central Sichuan and low in the northern and southern regions. Decreasing sunshine hours in the last five decades led to the declines in rice photosynthetic potential productivity since the 1980s. Temperature increase

\* 南方丘陵区节水农业研究四川省重点实验室 2013 年开放课题、四川省气象局重点课题项目(川气课题-2012-开发-06)、中国气象局成都高原气象研究所高原气象开放基金课题(LPM2013002)、高原大气与环境四川省重点实验室开放基金项目(PAEKL-2011-Y3)、国家科技支撑计划课题(2012BAD14B03)、中国气象局气候变化专项(CCSF201422)和四川省气象局科学技术研究开发课题(2014-青年-08)资助

\*\* 通讯作者: 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: chenchaol6306@sina.com

张玉芳, 主要从事灾害风险评估及区划研究。E-mail: yufang918@sina.com.cn

收稿日期: 2013-11-25 接受日期: 2014-05-16

benefited light-temperature potential productivity of rice and the peak value of light-temperature potential productivity was in 2006. Precipitation was one of the main limitations and decreasing precipitation resulted in low climate potential productivity since the 1990s. A significant gap was noted between potential productivity and actual yield and the potential for improving rice yield declined with the decades. There was urgent need to develop science and technology in order to make better use of the climate resources and raise the yield of rice in the study area.

**Keywords** Climate change; Rice; Photosynthetic potential productivity; Light-temperature potential productivity; Climate potential productivity; Yield increase potential; Sichuan Province

(Received Nov. 25, 2013; accepted May 16, 2014)

四川是一个具有特殊地形地貌的省份,对自然气候的依赖性很强<sup>[1]</sup>。特别是近 50 年以来,四川省在全球气候变化大背景下,气候发生了明显变化:热量资源增加,空间分布呈经向带状特征,由西向东逐渐升高;降水量在攀西地区有所增多,盆地大部减少;日照时数全省大部地区减少,以盆东北部减少最为明显<sup>[2]</sup>。光、热、水的变化对四川省农业生产产生巨大的影响。水稻是中国和四川省最主要的粮食作物<sup>[1]</sup>,研究其近 50 年区域生产潜力特征变化具有重要的意义。

粮食生产潜力对粮食生产规划、粮食储运等一系列基本国策的制定都具有重要意义。我国学者在如何充分挖掘气候资源生产潜力,提高作物产量方面做了大量的研究,其中王秀芬等<sup>[3]</sup>用 AEZ 模型测算了黑龙江省近 30 年来的光温和气候生产潜力,分析了玉米光温和气候生产潜力的变化趋势;许信旺等<sup>[4]</sup>统计了近 30 年来安徽省的气温和降水资料,讨论了气候变化对水稻生产的影响;陈长青等<sup>[5]</sup>研究了东北地区春玉米生长季平均气温、太阳辐射总量和降水量的变化趋势,利用 GIS 技术分析东北地区春玉米光温生产潜力及气候生产潜力的时空变化;蔡承智等<sup>[6]</sup>利用 AEZ 模型对我国农区小麦生产潜力进行分析;居辉等<sup>[7]</sup>以北方旱农区为宏观尺度,利用 CERES-wheat 作物模型,模拟北方旱区雨养小麦生产潜力水平,分析潜力时空分布规律。以上研究大都是通过分析气候要素随时间变化规律,利用模型计算分析了区域不同作物生产潜力的时空分布及气候变化对作物生长和产量的影响。

目前,针对四川省具体作物尤其是水稻分区域、分年代的生产潜力时空分布特征的研究尚少有报道。本文通过对四川省水稻生产潜力的时空变化特征进行深入研究,探讨近 50 年气候变化对水稻生长的影响及现实生产与生产潜力的差距,分析造成差距的原因,寻求缩小差距的措施。研究结果可为合理利用气候资源、实现区域农业可持续发展提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

本研究收集了四川省 45 个气象站点 1961—

2010 年的逐日降水量、平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均气压、平均水汽压、平均相对湿度、风速以及海拔等数据,四川省 43 个农业气象观测站、2 个农业气象试验站 1981—2010 年的水稻生育期资料。现实生产力数据来自于《四川省统计年鉴》。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 水稻分区及生育时间确定

四川省水稻主要分布在盆地、盆周山区及川西南山地区域,按地理地貌类型及种植区形成的现状,将四川省划分为 7 个种植区及 1 个非种植区(图 1)<sup>[8]</sup>。通过统计农业气象观测站和农业气象试验站观测报表的生育期资料,结合大田生产调查,得出各区域水稻播种—成熟期全生育阶段的时间。7 个种植区及其水稻生育期分别为:盆西平丘区(44 个区县,简称“盆西”),3 月下旬—9 月上旬;盆中浅丘区(33 个区县,简称“盆中”),3 月下旬—8 月下旬;盆南丘陵区(35 个区县,简称“盆南”),3 月上旬—8 月上旬;盆东平行岭谷区(11 个区县,简称“盆东”),3 月下旬—8 月下旬;盆周边缘山地区(17 个区县,简称“盆周”),3 月下旬—9 月下旬<sup>[9]</sup>;川西南中山山地区(17 个区县),3 月下旬—8 月下旬;川西南中山宽谷区(13 个区县),3 月下旬—9 月上旬;川西北高原非农区(34 个区县,简称“川西北高原”)<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 生产潜力

光合生产潜力指在热量、水分、土壤等自然环境条件适宜、最优的管理条件下,选用最优品种,在可能的生长期,作物本身通过外界环境将所投射到该地的光能转换为生物化学的潜能,光合生产力是作物能达到的最高理论产量;光温生产潜力指农业生产条件充分保证,在充足的水分供应和 CO<sub>2</sub> 条件下,由当地的光、温条件决定的作物能达到的最高产量;气候生产潜力指在光温生产潜力的基础上,加入水分对作物产量的影响。

本文采用侯光良<sup>[11]</sup>的方法计算光合生产潜力,计算步骤如下:

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

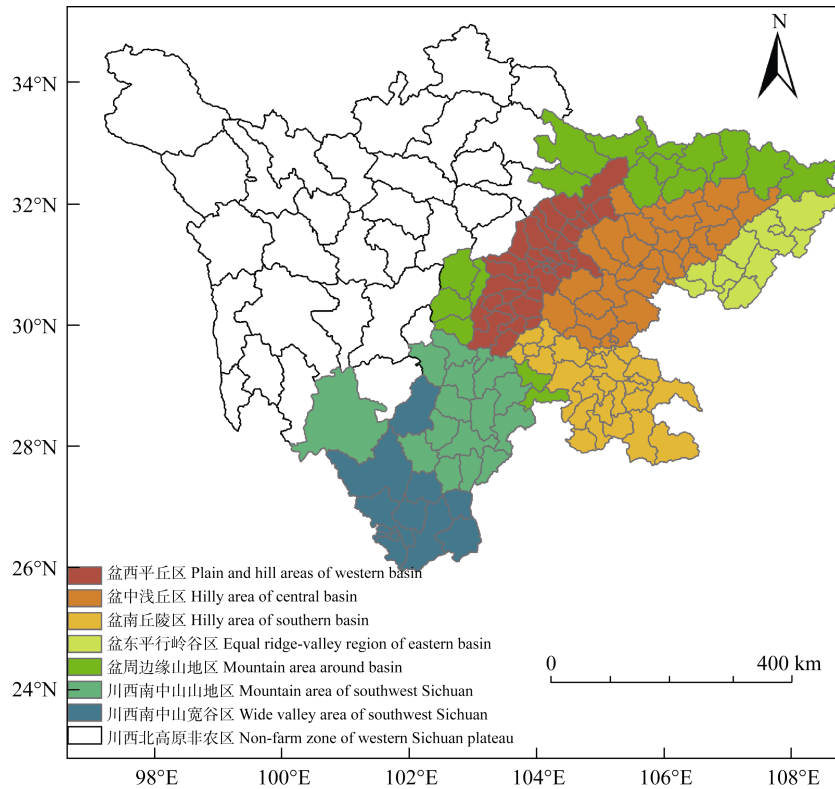


图 1 四川省水稻种植分区图

Fig. 1 Rice growing regions in Sichuan Province

式中:  $YQ$ 为光合产量潜力( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $k$ 为单位换算系数;  $\mu$ 为作物光合固定 $\text{CO}_2$ 能力的比例, 取1.0;  $\varepsilon$ 为光合辐射占总辐射的比例, 取0.49;  $\varphi$ 是光合作用量子效率, 取0.224;  $\alpha$ 是植物群体反射率, 取0.06;  $\beta$ 为植物繁茂群体透射率, 取0.06;  $\rho$ 为非光合器官截获辐射比例, 取0.10;  $\gamma$ 为超过光饱和点的光的比例, 取0.03;  $\omega$ 为呼吸消耗占光合产物比例, 取0.30;  $\eta$ 为成熟谷物含水率, 取0.14;  $\zeta$ 为植物无机灰分含量比例, 取0.08;  $s$ 为作物经济系数, 水稻取0.50;  $q$ 为单位干物质所占热量, 取 $17.5 \text{ mJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $F(L)$ 为叶面积时间变化动态订正值, 取0.55;  $Q_i$ 为太阳总辐射( $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ), 可利用各站点日照百分率资料计算:

$$Q_i = (m \times s + c) \times Q_A \quad (2)$$

式中:  $Q_A$ 为天文辐射量( $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ );  $s$ 为日照百分率(%);  $m$ 和  $c$ 为经验常数, 四川地区分别为 0.475 和 0.205<sup>[12]</sup>。

光温生产潜力为:

$$YT = YQ \times f(t) \quad (3)$$

式中:  $YT$ 为光温生产潜力( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $YQ$ 为光合产量潜力( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $f(t)$ 为温度订正函数, 计算公式如下:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_{\min}, t > t_{\max}) \\ \frac{t - t_{\min}}{t_s - t_{\min}} & (t_{\min} \leq t < t_s) \\ \frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_s} & (t_s \leq t \leq t_{\max}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $t$ 为某阶段的平均温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_{\min}$ 为作物生长下限温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_s$ 为作物生长最适温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_{\max}$ 为作物生长上限温度( $^{\circ}\text{C}$ )。本文中水稻的三基点温度分别取下限温度  $10^{\circ}\text{C}$ , 最适温度  $30^{\circ}\text{C}$ , 上限温度  $42^{\circ}\text{C}$ <sup>[13]</sup>。

气候生产潜力为:

$$YW = YT \times f(w) \quad (5)$$

式中:  $YW$ 为气候产量潜力( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $YT$ 为光温产量潜力( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $f(w)$ 为水分订正函数, 公式如下:

$$f(w) = \begin{cases} \frac{Pe}{ET_c} & (0 \leq Pe < ET_c) \\ 1 & (Pe \geq ET_c) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Pe$ 为作物生育期内的有效降水量( $\text{mm}$ ),  $ET_c$ 为作物需水量( $\text{mm}$ )。

采用FAO推荐的公式作物确定需水量( $ET_c$ )<sup>[14]</sup>:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (7)$$

式中:  $ET_c$ 为作物需水量,  $\text{mm}$ ;  $K_c$ 为作物系数;  $ET_0$ 为参考作物蒸散量,  $\text{mm}$ 。

本文采用1998年联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的分段单值平均法<sup>[14]</sup>计算 $K_c$ 值, 由于四川省大多数地区的实际情况与上述特定标准条件有一定差距, 因此王明田等<sup>[15]</sup>根据四川当地土壤和气候条件对 $K_c$ 值进行了订正, 本文采用订正后的 $K_c$ 值。

### 1.2.3 气候倾向率

在计算变化趋势时, 采用最小二乘法, 计算样

本  $X_t$  时间  $t$  (年) 的线性回归系数 ( $a$ ), 从而要素的变化可用一次线性方程计算:

$$X_t = at + b \quad (t=1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

以线性回归系数  $a$  的 10 倍作为气候倾向率, 其中  $X_t$  表示气候要素值。

#### 1.2.4 水稻增产潜力

增产潜力 = [光合(光温、气候)生产潜力 - 现实生产力] / 光合(光温、气候)生产潜力  $(9)$

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻生育期内光合生产潜力变化

由图 2 可以看出, 四川省水稻生育期内光合生产潜力的空间分布呈现北少南多中部最低的趋势, 多年平均值  $17\ 044\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 最高值发生年代在 2010s, 出现在川西南山地的昭觉, 为  $21\ 018\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 最低值发生年代也在 2010s, 出现在盆西的都江堰, 为  $13\ 539\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中值较大 ( $\geq 18\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 区域主要分布在川西南中山山地区和川西南中山宽谷区大部, 且随年代增加, 面积也在逐步减少; 值较

小区域 ( $\leq 17\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 是 1960s 的盆西北、盆南及盆中部分区域, 随着年代的递增, 面积逐步扩大, 尤其在 1980s、1990s、2010s 面积已覆盖除川西南中山山地区和川西南中山宽谷区的所有区域。

1961—2010 年, 水稻光合生产潜力在四川省水稻种植区大部呈减少的趋势, 减少趋势较大的区域主要在盆中大部、盆北及盆西部分区域, 减少速率为  $500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  以上, 远高于平均减少速率 ( $386\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ); 而减少速率相对较小区域主要集中在川西南中山山地区和川西南中山宽谷区的大部区域, 减少速率多在  $300\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  以内, 减少速率最小点在会理县, 减少速率为  $34\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  (图 2)。

### 2.2 水稻生育期内光温生产潜力变化

由图 3 可以看出, 四川省水稻生育期内光温生产潜力的空间分布呈现北多南少的变化趋势, 多年平均值  $11\ 065\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 最高值发生年代在 1960s, 出现在盆东北的达州, 为  $15\ 238\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 最低值也发生在 1960s, 出现在川西南山地的木里县, 为  $5\ 865\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中值较大 ( $\geq 13\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 出现在 1960s 和 1970s, 区

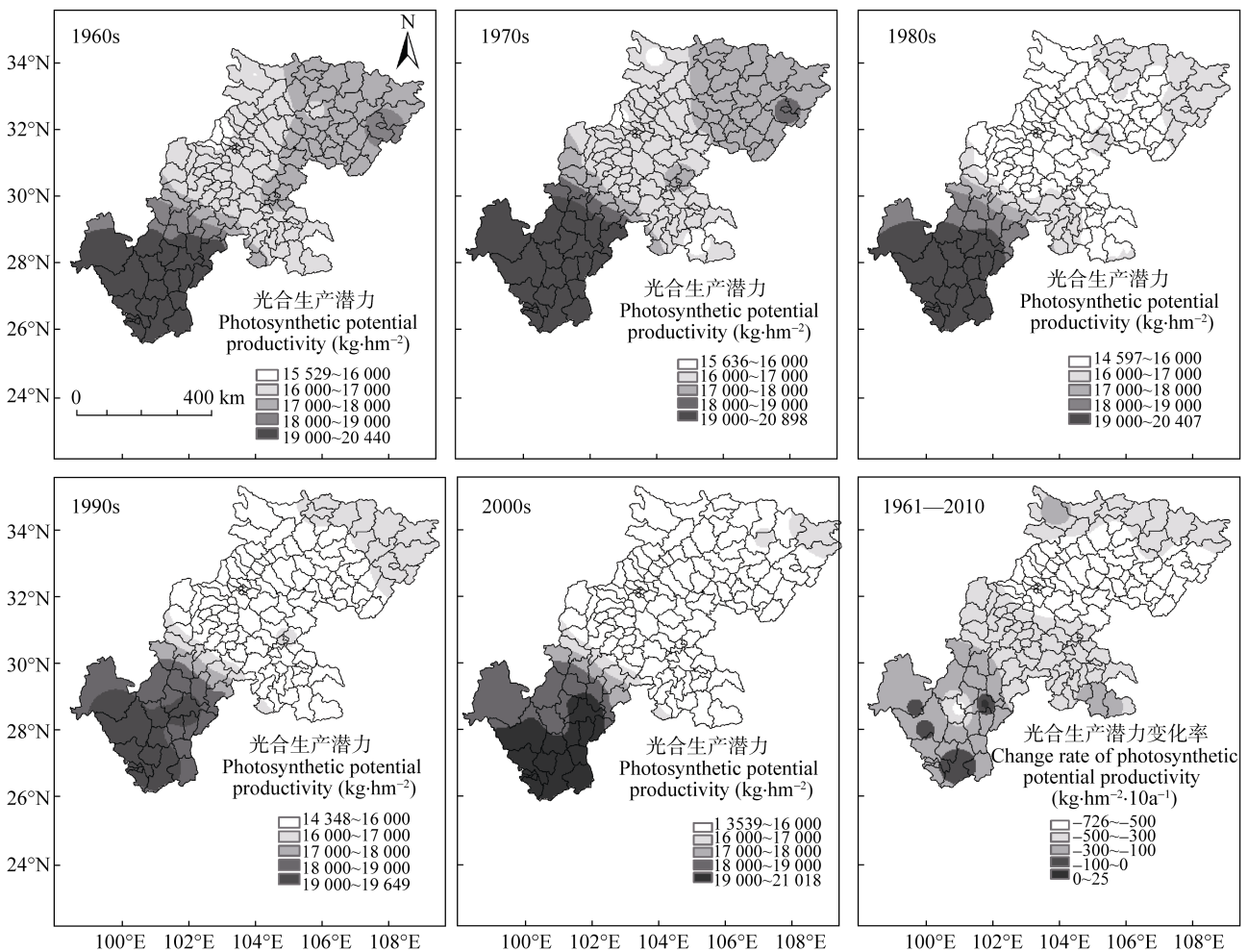


图 2 四川省水稻种植区 1961—2010 年各年代水稻生育期内光合生产潜力及其 50 年间变化率的时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial variations of rice photosynthetic potential productivity in decades from 1961 to 2010 and change rate in the five decades in rice growing area in Sichuan Province

域主要集中在盆东北大部及盆中部分区域, 随着年代递增, 值逐渐减小, 1980s、1990s 及 2010s  $\geq 12\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的区域分布在盆东北部分区域, 面积减少也较为明显; 值较小区域( $\leq 11\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )出现在 1960s, 主要分布在川西南中山山地区、川西南中山宽谷区及盆南部分区域, 随着年代的递增, 面积也在逐步向北扩大, 尤其在 1980s、1990s、2010s 已覆盖川西南中山山地区、

川西南中山宽谷区、盆西及盆南大部区域。

1961—2010 年, 四川省水稻种植区水稻光温生产潜力除川西南山地东北及东南部分区域出现增加的趋势, 其余大部都呈减少趋势, 减少趋势较大的区域主要在盆东北局部, 减少速率为  $500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  以上, 远高于平均减少速率( $228\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ), 盆地大部农区减少速率多在  $100\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  以上(图 3)。

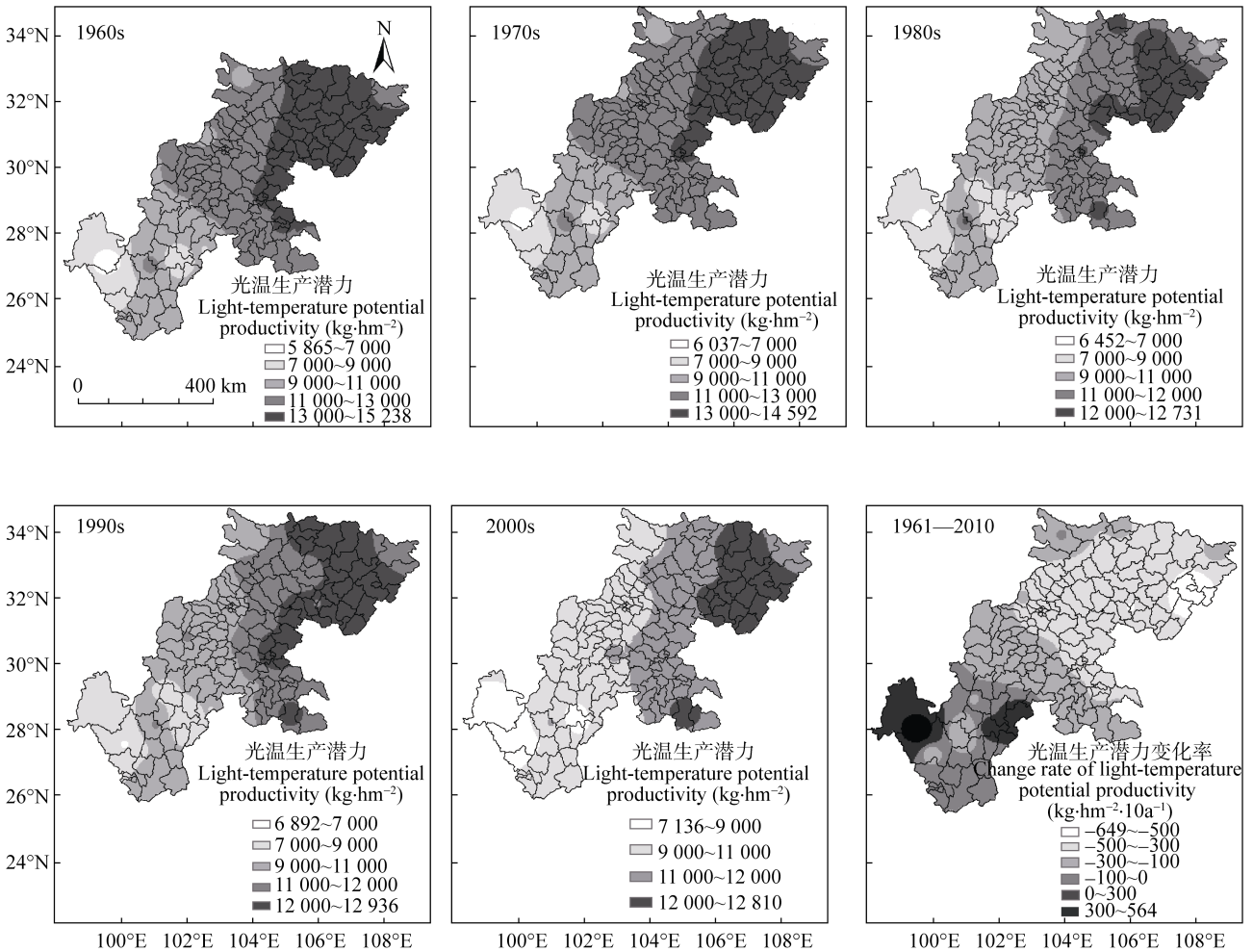


图 3 四川省水稻种植区 1961—2010 年各年代水稻生育期内光温生产潜力及其 50 年间变化率的时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial variations of rice light-temperature potential productivity in decades from 1961 to 2010 and change rate in the five decades in rice growing area in Sichuan Province

### 2.3 水稻生育期内气候生产潜力变化

由图 4 可以看出, 四川省水稻生育期内的气候生产潜力的空间分布呈现南北小中间大的变化趋势, 多年平均值  $5\ 232\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 最高值发生在 1980s, 出现在盆西的雅安, 为  $7\ 821\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 最低值发生在 2010s, 出现在凉山州的盐源, 为  $3\ 668\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中值较大( $\geq 6\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )区域主要分布在盆西大部, 且随年代增加, 面积也在逐步减少; 值较小区域( $\leq 5\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )在发生在 1960s、1970s 及 1990s, 主要分布在盆北大部及盆中部分区域, 随着年代的递增, 面积在逐步扩大, 尤其在 2010s 面积已覆盖除

盆西农区的所有区域。

1961—2010 年, 四川省水稻种植区的水稻气候生产潜力除川西南山地部分区域及盆东局部出现增加趋势, 其余大部出现减少的趋势, 减少趋势较大的区域主要在除盆东北、川西南山地大部及盆东南部分区域外的所有农区, 减少速率为  $100\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  以上, 远高于平均减少速率( $89\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ); 而减少速率相对较小区域主要集中在川西南山地及盆东北大部区域, 减少速率多在  $100\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  以内, 减少速率最小点在会理县, 减少速率为  $10\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  (图 4)。

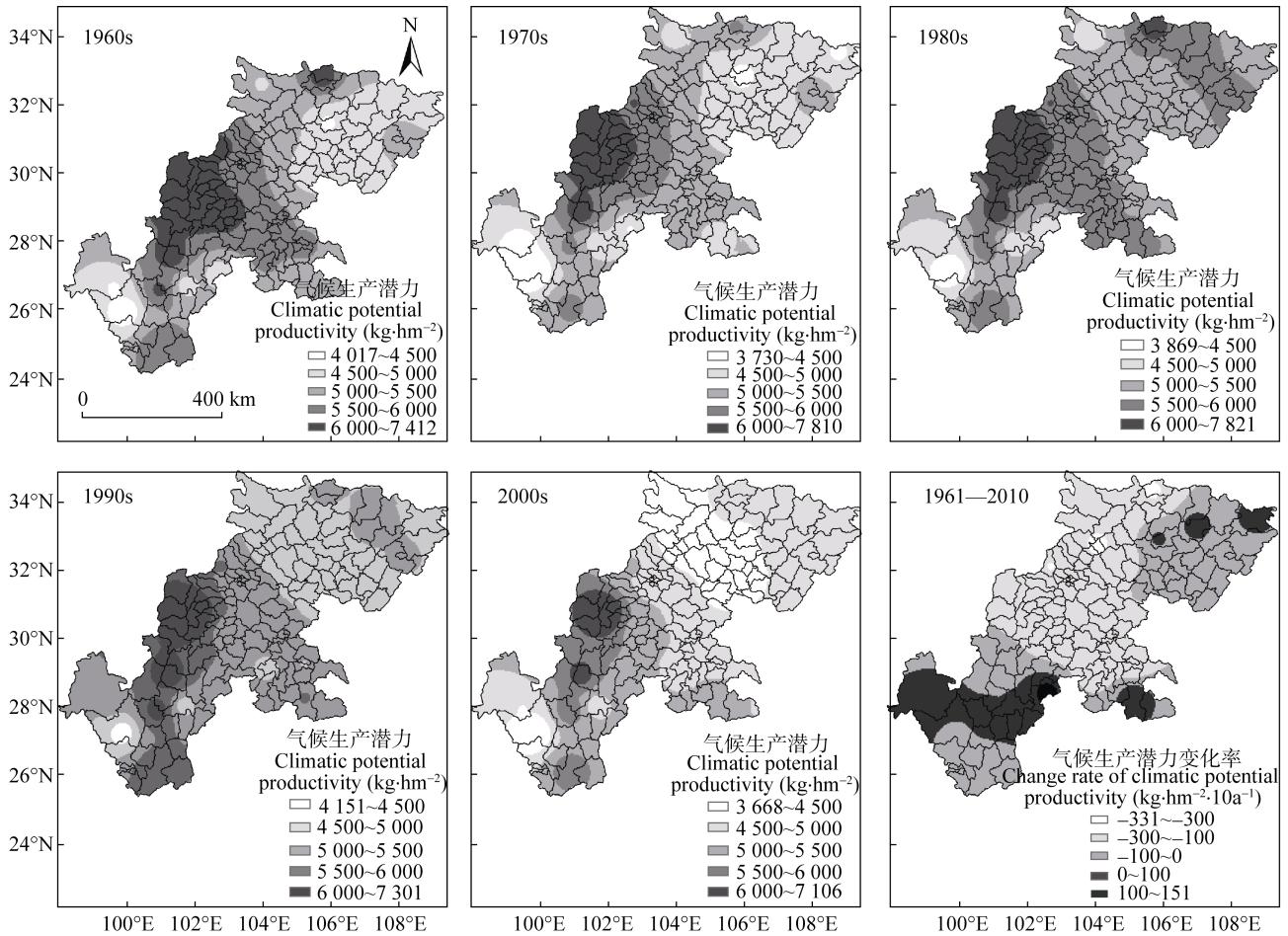


图 4 四川省水稻种植区 1961—2010 年各年代水稻生育期内气候生产潜力及其 50 年间变化率的时空分布  
 Fig. 4 Temporal and spatial variations of rice climatic potential productivity in decades from 1961 to 2010 and change rate in the five decades in rice growing area in Sichuan Province

2.4 气候变化对水稻增产潜力的影响

在计算了四川省 45 个代表站点水稻生育期光合生产潜力、光温生产潜力、气候生产潜力的基础上，本研究分析了四川省水稻增产潜力，结果如图 5

所示。从图 5 可以看出，无论是光合生产潜力、光温生产潜力或是气候生产潜力，水稻单产的增产潜力均呈现下降趋势，但增产的潜力仍不小。相对于光合生产潜力而言，1961—2010 年水稻增产潜力近

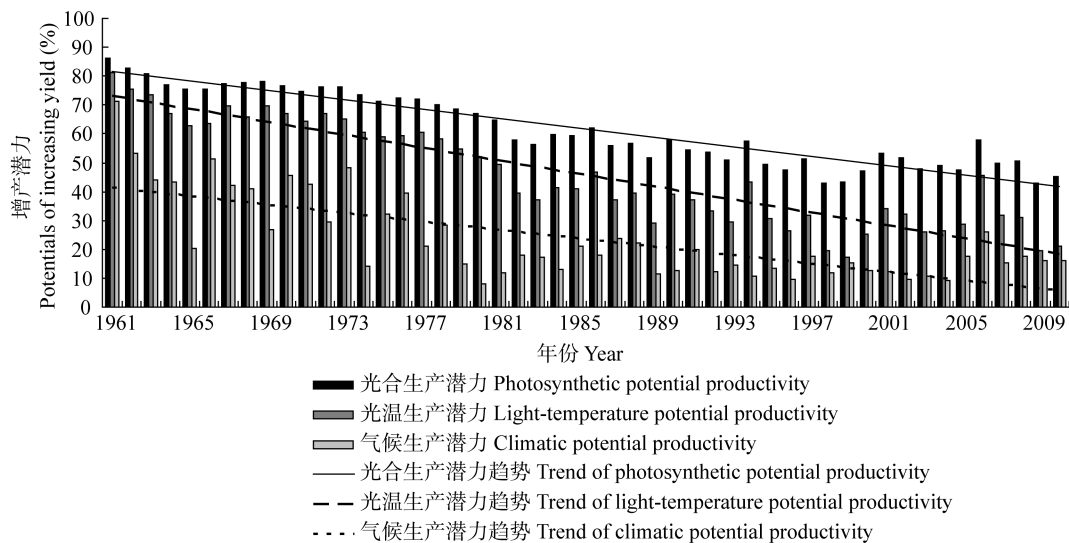


图 5 1961—2010 年四川省水稻增产潜力随时间的变化  
 Fig. 5 Variations of rice yield increasing potentials from 1961 to 2010 in Sichuan Province

50 年平均为 62%，总体呈减少趋势；增产潜力最大年份为 1961 年，为 86%；增产潜力最小的年份为 2009 年，为 43%。相对于光温生产潜力而言，1961—2010 年水稻增产潜力仍呈现减少趋势，近 50 年平均为 46% 最大值出现在 1961 年，为 81%，即仍有 19% 的提升空间；最小值出现在 1999 年，为 17%。相对于气候生产潜力而言，1961—2010 年水稻增产潜力也呈下降趋势，且大都为 10%~50%，但到 2010 年增产潜力仍然不小，为 16%，近 50 年平均增产潜力为 24%。

### 3 结论

本文采用侯光良法分析了四川省 7 个水稻种植区的水稻光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力的时空分布特征，并结合现实生产力数据分析了气候变化背景下四川省水稻的增产潜力。结论如下：

1961—2010 年 50 年间，四川省水稻生育期内光合生产潜力的空间分布呈北低南高中部最低，光温生产潜力呈现北高南低，气候生产潜力为南北低中间高的空间变化趋势。气候变化背景下，1961—2010 年日照时数的减少使四川水稻光合生产潜力在大部地区呈现减少的趋势，减少最明显的区域主要分布在盆中大部、盆北及盆西，尤其从 20 世纪 80 年代开始减少趋势尤为显著。1961—2010 年来四川水稻光温生产潜力除川西南山地部分区域出现增加趋势外，其余大部都是减少趋势，减少趋势较大的区域主要在盆东北局部，且减少速率明显小于光合生产潜力，主要由于大部农区增温趋势明显，农业生长季活动积温增加显著，出现正效应。1961—2010 年四川省水稻气候生产潜力除川西南山地部分区域及盆东局部出现增加趋势，其余大部都呈减少趋势，减少趋势较大的区域主要在除盆东北、川西南山地大部及盆东南部分区域外的所有水稻种植区。盆东北大部及盆中部分区域温度条件较好，光温生产潜力值相对较高，在该区域水稻高温热害发生概率相对较高，应适当延迟作物播种及移栽期，避免抽穗扬花期遭受损失；可考虑在有水源保证的地方，加快水利建设，扩大稻田面积，特别是盆中浅丘区。1961—2010 年，四川省水稻具有一定的增产潜力，但气候变化背景下增产潜力呈下降趋势，说明随着农业科学技术的发展，现实生产力不断提高，但理论产量仍有一定差距。未来生产中应加快大中型水利工程建设步伐，发展节水灌溉，同时强化作物栽培措施<sup>[16]</sup>，如适时早播，充分利用热量资源。

本文在水稻进行分区的基础上比较研究了各年代生产潜力特征，但在现实生产力与光合生产潜

力、光温生产潜力、气候生产潜力的产量差分析中，未进行分区探究，主要考虑现实生产力数据收集不全面，用的是 11 个市州水稻单产的均值，这是文中的不足之处，随着未来资料的不断完善，研究结论也将不断深入。

### 参考文献

- [1] 陈淑全, 罗富顺, 熊志强, 等. 四川气候[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1997: 139-142  
Chen S Q, Luo F S, Xiong Z Q, et al. Sichuan Climate[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1997: 139-142
- [2] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 气候变化背景下四川省气候资源变化趋势分析[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1310-1316  
Chen C, Pang Y M, Pan X B, et al. Characteristics of climate resources under global climate change in Sichuan Province[J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1310-1316
- [3] 王秀芬, 杨艳昭, 尤飞. 黑龙江省气候变化及其对玉米生产潜力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 25-29  
Wang X F, Yang Y Z, You F. Climate change and its impact on maize potential productivity of Heilongjiang Province in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(5): 25-29
- [4] 许信旺, 孙满英, 方宇媛, 等. 安徽省气候变化对水稻生产的影响及应对[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1755-1763  
Xu X W, Sun M Y, Fang Y Y, et al. Impact of climatic change on rice production and response strategies in Anhui Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1755-1763
- [5] 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  
Chen C Q, Lei C X, Wang C C, et al. Changes of spring maize potential productivity under the background of global warming in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(10): 1272-1279
- [6] 蔡承智, Van Velthuizen H, Fischer G, 等. 基于 AEZ 模型的我国农区小麦生产潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 182-184  
Cai C Z, Van Velthuizen H, Fischer G, et al. Analyses of wheat yield potential by AEZ model on the basis of Chinese farming system zonation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(5): 182-184
- [7] 居辉, 李三爱, 严昌荣. 我国北方旱区雨养小麦生产潜力研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 728-731  
Ju H, Li S A, Yan C R. Potential productivity of rain-fed wheat in dry farmlands of North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 728-731
- [8] 郑霖. 四川农业地理[M]. 成都: 四川人民出版社, 1980: 138-231  
Zheng L. Sichuan Agricultural Geography[M]. Chengdu: Sichuan Renmin Press, 1980: 138-231
- [9] 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
- [10] 甘书龙, 付绥宁, 唐洪潜, 等. 四川省农业资源与区划[M]. 成都: 四川省社会科学院出版社, 1986: 90-92  
Gan S L, Fu S N, Tang H Q, et al. Sichuan Agricultural Resources and Division[M]. Chengdu: Sichuan Academy of Social Sciences Press, 1986: 90-92
- [11] 侯光良. 关于我国作物气候生产潜力估算问题的初步讨论[M]//中国农业气候资源和农业气候区划论文集. 北京: 气象出版社, 1986: 30-35  
Hou G L. Discussion on the problems of estimating crop climate productivity in China[M]//China Agricultural Climate Resources and Agro-climatic Zoning Set. Beijing: China Meteorological Press, 1986: 30-35
- [12] 邓先瑞. 气候资源概论[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 1995: 104-107  
Deng X R. Climate Resources in General[M]. Wuhan: Huazhong Normal University Press, 1995: 104-107
- [13] 曹卫星. 作物栽培学总论[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 108-153  
Cao W X. General Crop Cultivation[M]. Beijing: Science Press, 2006: 108-153
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 37-58
- [15] 王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等. 基于降水保证指数的四川省种植制度优化研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(10): 82-92  
Wang M T, Qu H H, Yang X G, et al. Optimized cropping systems based on ensure index of precipitation in Sichuan Province[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(10): 82-92
- [16] 蔡承智, 陈阜, 隋鹏, 等. 作物产量潜力极限研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 145-148  
Cai C Z, Chen F, Sui P, et al. Study on potential limit of crop yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(2): 145-148