

# 近50年河南省夏玉米生产潜力 及产量差时空变化特征

余卫东<sup>1,2</sup>, 马志红<sup>1,2</sup>

(1. 中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 河南 郑州 450003; 2. 河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 利用河南省96个县1961—2010年气象资料和夏玉米实际产量, 采用逐步订正模型, 计算了近50年河南省夏玉米光温生产潜力和气候生产潜力, 分析了光温生产潜力与气候生产潜力、光温生产潜力与实际产量两种产量差的时空变化特征。结果表明: (1) 光温生产潜力由北向南、由东向西递减, 近50年呈极显著下降趋势, 全省平均每10 a减少696.8 kg·hm<sup>-2</sup>, 北、中大部分站点和南部的部分站点下降幅度较大。 (2) 气候生产潜力南部高于北部、东部高于西部, 近50年变化趋势不明显。光温生产潜力与气候生产潜力之间的产量差呈极显著下降趋势, 平均每10 a减少958.7 kg·hm<sup>-2</sup>。 (3) 夏玉米实际产量极显著增加, 光温生产潜力与实际产量之间的产量差极显著下降, 平均每10 a减少1 718.0 kg·hm<sup>-2</sup>, 但71.9%的站点产量差大于24 000 kg·hm<sup>-2</sup>, 产量潜力仍有较大提升空间。降水是制约河南省西部夏玉米产量的主要因素, 可通过灌溉提高产量; 后期热量不足影响北部玉米产量进一步提高, 选用中早熟品种和改进栽培技术是提高产量的途径; 东部可通过增加灌溉面积、选用优良品种和科学施肥等措施缩小产量差。

**关键词:** 光温生产潜力; 气候生产潜力; 产量差; 夏玉米; 气候变化

**中图分类号:** S162.5; S513 **文献标志码:** A

## Temporal-spatial variation of yield potential and yield gaps of summer maize during the past 50 years in Henan province

YU Wei-dong<sup>1,2</sup>, MA Zhi-hong<sup>1,2</sup>

(1. Henan Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou, Henan 450003, China; 2. Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou, Henan 450003, China)

**Abstract:** The objective of this study is to make full use of natural resources, to analyze the yield potential of summer maize in different regions in Henan province and to find the ways to bridge the gap between potential and actual crop yield. Based on daily meteorological observation data, yield data of summer maize in 96 counties in the target region from 1961 to 2010, a successive correcting model was used to calculate photo-thermo productivity ( $Y_T$ ) and climate productivity ( $Y_W$ ) and clarify the yield gap between  $Y_T$  and  $\Delta Y_W$ , the yield gap between  $Y_T$  and actual productivity ( $\Delta Y_A$ ), the spatial-temporal characteristics of two types of yield gap in the past 50 years. The results showed that  $Y_T$  increased from the north to the south and from the east to the west of the province, but it showed a diminishing trend during the past 50 years, with a decreasing rate of  $-696.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ . This is in particular obvious for most of the stations in northern and central areas and part of the stations in southern areas.  $\Delta Y_W$  decreased obviously, with a rate of  $-958.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ . The actual yield of summer maize increased significantly, while  $\Delta Y_A$  decreased with a rate of  $-1 718.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ . The yield gaps were over  $24 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , in 71.9% of stations, indicating a substantial yield potential. The precipitation is the key restricting factor on yield in the west of Henan province, suggesting the necessity of irrigation. The shortage of heat resources at later stage is the influencing factor in the north, implying the importance of selecting early maturity varieties and improving agronomical practices in this area. In addition, expanding irrigation area, choosing suitable varieties and reasonable fertilization can be used to bridge the yield gaps in the east.

**Keywords:** photo-thermo productivity; climate productivity; yield gap; summer maize; climate change

气候变化引起的农业生产条件改变,不仅直接影响作物的生长发育和产量形成,对作物生产潜力、品种布局以及种植制度都会产生重要影响<sup>[1-2]</sup>。河南省地处华北平原中南部,属大陆性季风气候区,受气候变化影响,干旱、强降水等极端天气气候事件增多<sup>[3-4]</sup>,作物生产潜力也发生了相应变化<sup>[5-7]</sup>。同时河南省又是我国夏玉米主产省之一,2010年播种面积  $2\,946 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ,占全国玉米播种面积的 10%;单产  $5\,549 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,高于全国平均水平<sup>[8]</sup>,在我国粮食安全中占有重要地位。

随着全球粮食安全问题日益突出,稳定并提高作物单产,缩小潜在产量与实际产量之间的差距成为解决这一问题的的重要途径,产量差研究也逐渐深入。产量差是指作物上限产量与实际产量之间的差距,由于研究目的和研究尺度不同,不同学者对上限产量的认识和划分也不尽相同<sup>[9-10]</sup>。已有研究中,常用的上限产量主要有光温生产潜力<sup>[11-14]</sup>、水分限制生产力(气候生产力)、试验站产量<sup>[15-17]</sup>、农户最高产量<sup>[18-19]</sup>、产量由低到高排序后第 90% 或 95% 序位的产量<sup>[9,20]</sup>等。其中光温生产潜力和气候生产力可通过经验公式<sup>[21-22]</sup>或作物模型模拟<sup>[23-24]</sup>得到。灌溉农业一般以光温生产潜力作为上限产量,而雨养农业多以气候生产力作为上限产量。另外,随着有机农业的快速发展,其与传统农业之间的产量差异也开始被重视并纳入产量差的研究范围<sup>[25]</sup>。

河南省夏玉米生长季(6—9月)集中了全年 50%~60% 的降水量,自然降水总体能满足夏玉米生长所需,加之全省农田有效灌溉面积与常用耕地面积比已达 70.5%<sup>[26]</sup>,夏玉米的光温生产潜力受水分条件制约较小,因此选取光温生产潜力作为河南省夏玉米上限产量。另外,作物模型虽然可以定量模拟气候、土壤、作物品种和栽培管理等因素对作物生长发育和产量形成的影响,但受作物、土壤等相关参数的限制,部分作物模型对夏玉米光温生产潜力的模拟结果偏低,我国黄淮平原和东北地区的玉米高产纪录已经接近甚至超过了模型输出产量<sup>[27-28,24]</sup>,因此本文夏玉米光温生产潜力计算选用环境因子逐步订正模型<sup>[29]</sup>。利用 1961—2010 年气象资料 and 同期的夏玉米实产数据,计算河南省 96 个县夏玉米光温生产潜力、水分限制生产力及产量差,研究近 50 年夏玉米产量潜力和不同层次产量差的时空变化特征,分析不同地区夏玉米增产潜力及限制性因素,对于合理利用自然资源、充分挖掘玉米生产能力、指导农业生产具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 资料来源

本文所用气象数据来自河南省 96 个气象观测站 1961—2010 年逐日资料,主要包括平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )、降水量(mm)、日照时数(h)、平均风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、气压(hPa)、水汽压(kPa)。夏玉米实际产量数据来自河南省年鉴的分县资料,时间序列为 1961—2010 年。

### 1.2 夏玉米生产潜力计算方法

作物生产潜力是在一定外界环境条件下,一定时期内单位土地面积上可能获得的最高产量<sup>[22]</sup>。从农业气候资源角度分析,通常计算光能生产潜力( $Y_Q$ ),然后对光能生产潜力进行温度订正得到光温生产潜力( $Y_T$ ),再进行水分订正得到气候生产潜力( $Y_W$ ),具体计算方法如下<sup>[30]</sup>:

$$Y_Q = \sum Q_j \times \varepsilon \alpha (1 - \rho)(1 - \gamma) \Phi (1 - \omega)(1 - \chi)^{-1} H^{-1} S \quad (1)$$

$$Y_T = Y_Q \times f(T) \quad (2)$$

$$Y_W = Y_T \times f(W) \quad (3)$$

式中, $Y_Q$ 为光能生产潜力; $Y_T$ 为光温生产潜力; $f(T)$ 为温度有效系数; $Y_W$ 为气候生产潜力; $f(W)$ 为水分有效系数。

光能生产潜力计算公式中, $Q_j$ 为各生育阶段总辐射量( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ ),采用逐日辐射模型<sup>[31]</sup>推算; $\varepsilon$ 为光合辐射占总辐射的比例,华北为 0.49; $\alpha$ 为作物群体吸收率, $\alpha = (1 - a - \beta) \times f(L)$ , $a$ 为作物群体反射率,玉米单作田为 27.6%, $\beta$ 为漏射率,取 0.06, $f(L)$ 为叶面积时间变化动态订正函数; $\rho$ 为非光合器官无效吸收部分,取 0.01; $\gamma$ 为超过光饱和点的限制比例,玉米是  $C_4$  植物,一般不受光饱和限制,取 0.01; $\Phi$ 为光合作用量子效率,取 0.30; $\omega$ 为呼吸消耗占光合产物的比例,温带取 0.3; $\chi$ 为水分和无机灰分含量,取 0.08; $H$ 为形成单位质量干物质所需的能量,取  $17.2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $S$ 为经济系数,取 0.40。

温度有效系数  $f(T)$ ,采取下式计算:

$$f(T) = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B} \quad (4)$$

$$B = \frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1} \quad (5)$$

$T$ 是某一时段的平均气温, $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 分别为该时段作物产量形成的最适温度、生长发育下限和上限温度。河南省夏玉米生长季节为 6—9 月份,将夏玉米生长季划分为播种—拔节、拔节—抽雄、抽雄

— 乳熟、乳熟—完熟 4 个阶段,根据夏玉米多年发育期观测资料和已有研究成果<sup>[32]</sup>,确定各生育阶段的起止时间及三基点温度确定见表 1。

水分有效系数  $f(W)$ ,采取下式计算:

$$f(W) = \begin{cases} 1 - \frac{|\Delta W_j|}{W_j} & \Delta W_j < 0 \\ 1 & \Delta W_j \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

表 1 夏玉米发育阶段划分及各阶段模型参数

Table 1 Developmental stages and model parameters of summer maize

时间 Date	发育阶段 Developmental Stage	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$K$
6 月上旬—7 月上旬 Early June – early July	播种—拔节 Sowing – jointing	26	20	35	0.8
7 月中旬—7 月下旬 Mid. July – late July	拔节—抽雄 Jointing – heading	26	23	35	1.1
8 月上旬—8 月下旬 Early August – late August	抽雄—乳熟 Heading – milky	25	20	33	1.3
9 月上旬—9 月下旬 Early September – late September	乳熟—完熟 Milky – maturity	20	16	30	1.0

### 1.3 产量差计算

本文定义两种类型的产量差,一是光温生产潜力与气候生产潜力之间的差值,它反映了水分限制造成的产量差,即玉米产量通过灌溉措施可提升的空间。二是光温生产潜力与实际产量之间的产量差,它反映了研究区域玉米产量可提升的总量,可以通过选育优良品种、优化灌溉、改善土壤条件等途径缩小产量差距。两种类型的产量差计算方法如下:

$$\Delta Y_W = Y_T - Y_W \quad (7)$$

$$\Delta Y_A = Y_T - Y_A \quad (8)$$

式中, $\Delta Y_W$  表示光温生产潜力与气候生产潜力之间的产量差, $\Delta Y_A$  是光温生产潜力与实际产量之间的产量差, $Y_T$  是夏玉米光温生产潜力, $Y_W$  是气候生产潜力, $Y_A$  是实际产量。

### 1.4 数据序列的时空分析方法

各种产量及产量差的时间变化采取最小二乘法计算线性倾向率。利用数据序列(产量或产量差)与时间序列(年份)的相关系数进行显著性检验,通过  $\alpha = 0.05$  显著性检验,为变化趋势显著;通过  $\alpha =$

其中, $\Delta W_j$  为农田水分盈亏额, $\Delta W_j = R_j - W_j$ , $W_j = K_j E_j$ ;  $R_j$  为各旬降水量; $W_j$  为各旬作物理论需水量; $\Delta W_j \geq 0$  时,即降水量能满足玉米生长所需; $E_j$  为参考作物蒸散量,由 Penman – Monteith 公式计算逐日参考蒸散量,然后累加所得。 $K_j$  为时段内作物需水系数<sup>[33]</sup>,取值见表 1。

0.01 显著性检验,为变化趋势极显著。采取 Mann – Kendall 法进行多年变化的突变分析<sup>[34]</sup>。数据序列的空间分析采用 Surfer 9.0 中提供的 Kriging 插值方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 光温生产潜力与气候生产潜力变化特征

2.1.1 时间变化 用 96 个站的平均值代表河南省状况,光温生产潜力( $Y_T$ )与气候生产潜力( $Y_W$ )年际间变化趋势见图 1。近 50 年来河南省夏玉米光温生产潜力呈下降趋势而气候生产潜力呈上升趋势,其中光温生产潜力在 21 000 ~ 33 000  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,平均每 10 a 下降 696.8  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,2010 年为最小值 21 703.8  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,1965 年为最大值 32 665.5  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。气候生产潜力在 9 900 ~ 23 700  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,平均每 10 a 增加 280.6  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。光温生产潜力下降趋势达  $\alpha = 0.01$  的极显著水平并在 2001 年出现了突变下降点;气候生产潜力增加趋势没有达到显著水平,也没有出现突变点。

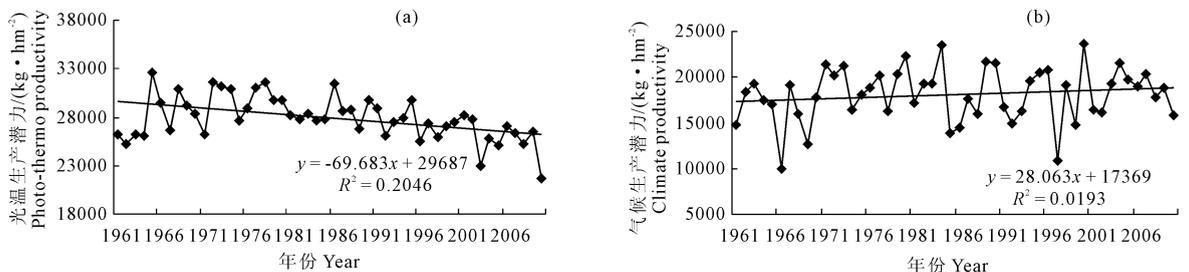


图 1 1961—2010 年河南省夏玉米光温生产潜力(a)与气候生产潜力(b)变化趋势

Fig.1 The evolutionary trend of photo-thermo productivity (a) and climate productivity (b) of summer maize in Henan from 1961 to 2010

2.1.2 空间分布 将各站逐年的光温生产潜力和气候生产潜力进行平均,得到每站 50 年的平均值,其空间分布及近 50 年的变化倾向率见图 2。河南省各地夏玉米光温生产潜力在  $20\ 000 \sim 33\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间(图 2a),空间分布呈由北向南、由东向西的递减趋势,高值区在中东部和北部,低值区主要分布在豫西栾川和豫南的潢川,光温生产潜力不足  $24\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。研究区域的 96 个站点中有 94 站光温生产潜力呈下降趋势,70.8% 的站点显著下降(图 2b),其中豫北和豫中大部分地区及豫南部分地区下降幅度较大,平均每 10 a 降低  $700 \sim 1\ 700\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。豫西和豫西南大部分地区,下降幅度较小,尤其洛阳、南阳的大部分地区每 10 a 下降趋势小于  $200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

气候生产潜力在  $14\ 000 \sim 22\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间

(图 2c),呈西北向东南的递增趋势,与光温生产潜力空间分布特征不同。高值区分布在南部的驻马店、南阳和信阳一带,其气候生产潜力大于  $20\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,虽然这一地区不是光温生产潜力高值区(图 2a),但 6—9 月降水量能满足夏玉米需求,其气候生产潜力相对较高。低值区主要分布在西部的三门峡和洛阳等地,这些地区夏玉米生长期内降水量较少,苗期和拔节—抽雄期干旱频率高。

气候生产潜力的线性倾向率在空间上呈纬向分布。有 22 个站(22.9%)呈下降趋势,主要分布在北部和西北部,其中濮阳—巩义—伊川一带下降幅度较大,平均每 10 a 降低  $400 \sim 800\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;其余 74 站呈上升趋势,其中有 9 个站达显著水平。西南部和中部的南阳、襄城一带增加趋势明显,平均每 10 a 增加  $800 \sim 1\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 2d)。

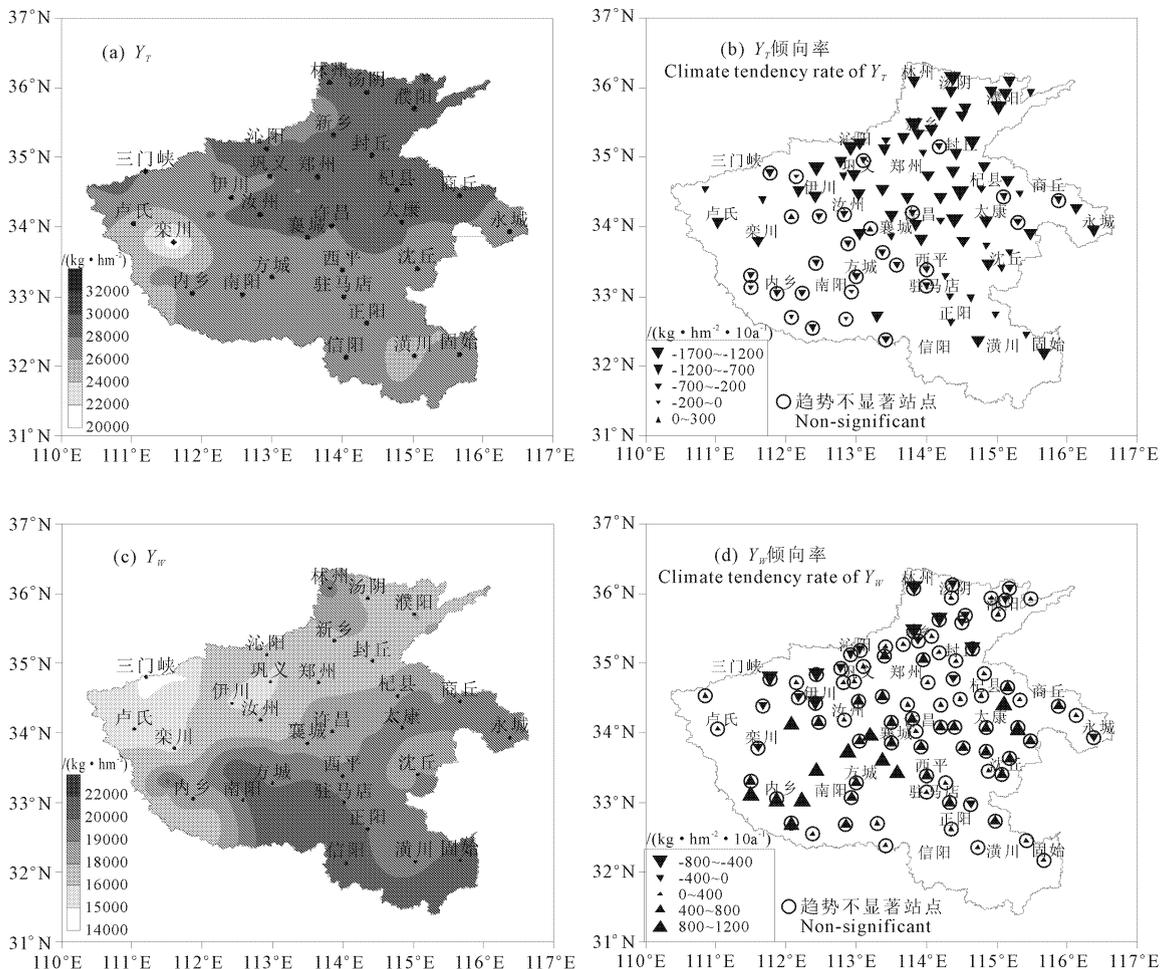


图 2 河南省夏玉米光温生产潜力( $Y_T$ )和气候生产潜力( $Y_W$ )及线性倾向率的空间分布

Fig. 2 Distribution of photo-thermo productivity ( $Y_T$ ), climate productivity ( $Y_W$ ), changing trend of photo-thermo productivity and changing trend of climate productivity of summer maize in Henan, 1961—2010

近 50 年河南省夏玉米光温生产潜力下降是由 6—9 月日照时数显著减少和平均气温降低共同引

起的,其中日照时数减少是主要原因。1961—2010 年全省日照时数平均每 10 a 减少 53.7 h,96 个站点

减少趋势全部达到了0.05的显著水平,其中90个站点(93.8%)达到了0.01的极显著水平(空间分布图略)。6—9月全省平均气温呈不显著的下降趋势,平均每10 a下降0.1℃,有34.4%的站点下降趋势达到了0.05的显著水平。全省平均降水量呈现不显著的增加趋势,平均每10 a增加8.0 mm,65.6%的站点降水量增加,主要分布在西南部的南阳、方城和东部的太康,这是气候生产潜力增加的主要原因。

## 2.2 实际产量时空变化

近50年河南省夏玉米平均单产由1961年的721.1 kg·hm<sup>-2</sup>,增加到2010年的5 548.5 kg·hm<sup>-2</sup>。线性倾向率每10 a产量增加1 021 kg·hm<sup>-2</sup>,达极显著水平(图3)。空间分布在2 100~5 700 kg·hm<sup>-2</sup>范围内变化,以豫北汤阴、沁阳和豫中许昌一带最高,平均单产在5 000 kg·hm<sup>-2</sup>以上;南部的信阳和西部的三门峡、卢氏等较低,在3 000 kg·hm<sup>-2</sup>以下(图

4a)。实际产量的线性倾向率在空间上表现为全省一致的增加趋势(图4b),且所有站点都达到了极显著水平。增加幅度较大的地区主要分布在北部、中部和西南部的南阳地区,平均每10 a增加幅度在1 000 kg·hm<sup>-2</sup>以上;西部洛阳、三门峡以及南部的信阳等地产量增幅较小,平均每10 a增加幅度在300~650 kg·hm<sup>-2</sup>之间。

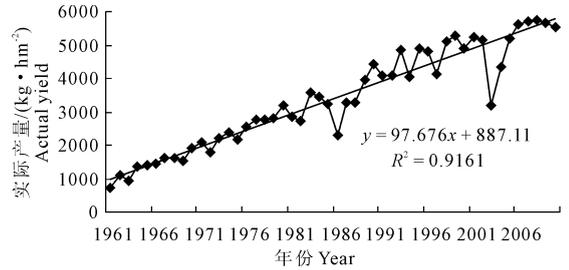


图3 1961—2010年河南省夏玉米实际产量变化趋势  
Fig.3 Changing trend of actual yield of summer maize in Henan from 1961—2010

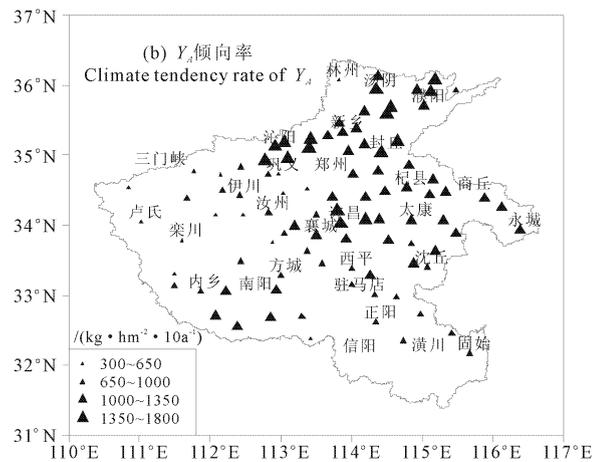
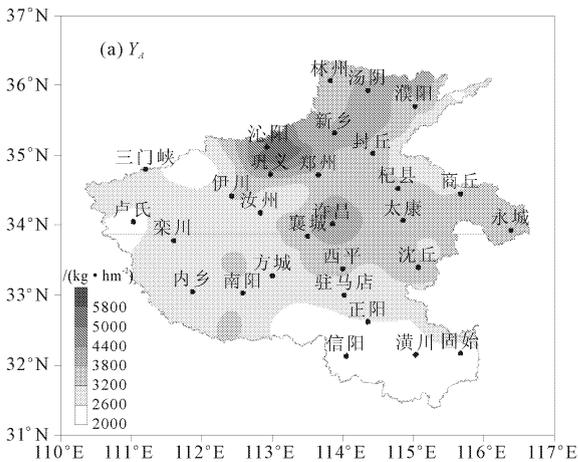


图4 1961—2010年河南省夏玉米实际产量(a)及线性倾向率(b)空间分布

Fig.4 Spatial distribution of actual yield (a) and liner trend rate (b) of summer maize in Henan 1961—2010

## 2.3 产量差变化特征

2.3.1 产量差年际变化 近50年来河南省夏玉米两种产量差均呈极显著的下降趋势,其中光温生产潜力与气候生产潜力之间的产量差( $\Delta Y_W$ )平均每10 a减少958.7 kg·hm<sup>-2</sup>(图5a),光温潜力与实际产量的差值( $\Delta Y_A$ )平均每10 a减少1 718.0 kg·hm<sup>-2</sup>(图5b)。M-K检验结果显示, $\Delta Y_W$ 和 $\Delta Y_A$ 均未出现突变点。气候生产潜力与光温生产潜力多年平均相差9 800 kg·hm<sup>-2</sup>左右,占光温生产潜力多年平均值的35.2%。这说明虽然夏玉米生育期间总降水量能基本满足玉米需求,但降水年际变化大,时空分布不均,常常出现阶段性干旱,降水对 $\Delta Y_W$ 的影响仍然十分明显。

2.3.2 产量差空间分布特征 河南省夏玉米两种

产量差及其线性倾向率的空间分布见图6。光温生产潜力与气候生产潜力产量差( $\Delta Y_W$ )在5 000~15 000 kg·hm<sup>-2</sup>之间(图6a),总体上由北向南递减,高值区主要分布在北部和西部的濮阳、巩义和三门峡等地,产量差大于12 000 kg·hm<sup>-2</sup>;低值区主要集中在西南部和南部的栾川、南阳和信阳等地,产量差在8 000 kg·hm<sup>-2</sup>以下。 $\Delta Y_W$ 空间分布南低北高主要是因为河南省6—9月降水量南部多于北部,东部多于西部,夏玉米气候生产潜力东、南部高,西、北部低;而光温生产潜力则是北、中部高,西、南部低。另外,西部栾川站的光温生产潜力和气候生产潜力都较低, $Y_T$ 和 $Y_W$ 分别比全省平均偏少26.6%和15.5%,因此 $Y_T$ 低是引起该站 $\Delta Y_W$ 偏低的主要原因。全省所有站点 $\Delta Y_W$ 的线性倾向率都小于0,其

中有 55.2% 的站点  $\Delta Y_w$  下降趋势达显著水平(图 6b)。中部、东部和西南部的大部分站点  $\Delta Y_w$  减少幅度较大,平均每 10 a 下降幅度大于 1 000

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;北部、西部和南部的大部分站  $\Delta Y_w$  减少幅度相对较小,平均每 10 a 下降幅度小于 500  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

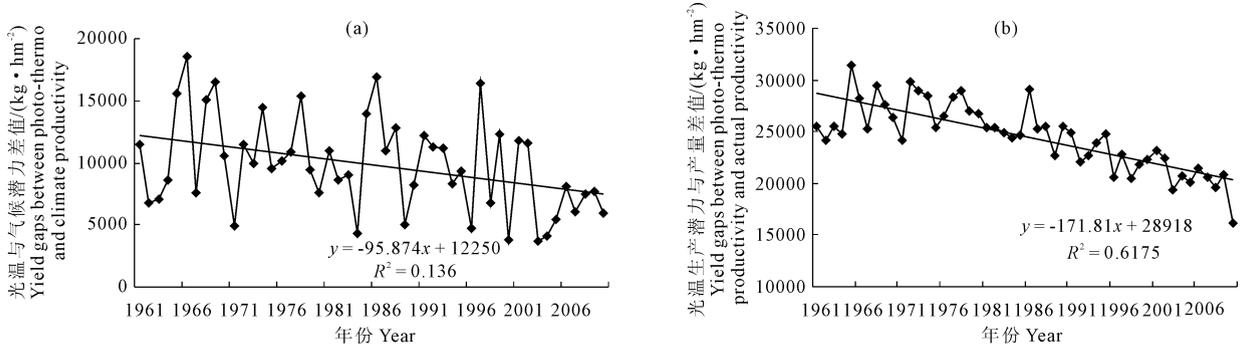


图 5 1961—2010 年河南省夏玉米光温潜力与气候潜力产量差(a)及光温潜力与实际产量的产量差(b)

Fig.5 Yield gaps between photo-thermo productivity and climate productivity(a), the yield gaps between photo-thermo productivity and actual productivity(b) of summer maize in Henan 1961—2010

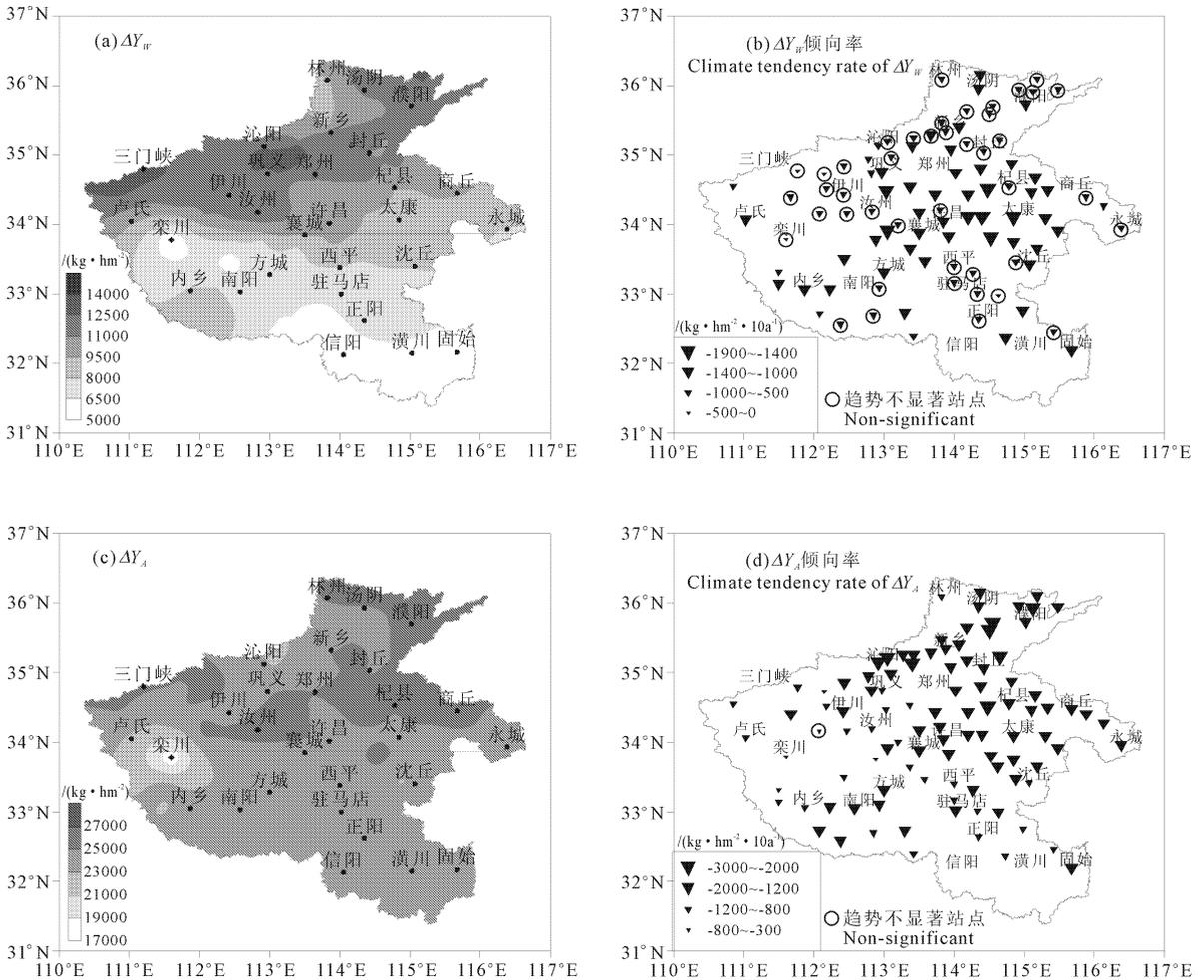


图 6 河南省夏玉米光温生产潜力与气候生产潜力产量差( $\Delta Y_w$ )和光温生产潜力与实际产量间产量差( $\Delta Y_A$ )及线性倾向率的空间分布

Fig.6 Distribution of the mean values( $\Delta Y_w$ ), liner trend rate of yield gap between photo-thermo productivity and climate productivity, distribution of the mean values( $\Delta Y_A$ ), changing trend of yield gap between photo-thermo productivity and actual productivity in Henan, 1961—2010

夏玉米光温生产潜力与实际产量的差( $\Delta Y_A$ )在17 000~27 000  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间(图6c),有71.9%的站点 $\Delta Y_A$ 在24 000  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,产量可提升的空间仍然较大。 $\Delta Y_A$ 高值区主要分布在北部的汤阴、濮阳、新乡及东部的杞县、商丘以及西部的汝州、三门峡等地, $\Delta Y_A$ 在25 000  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上;西部的栾川和北部的沁阳 $\Delta Y_A$ 相对较小,在20 000  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以下。 $\Delta Y_A$ 线性倾向率的空间分布和 $\Delta Y_W$ 相似,全省所有站点都呈下降趋势,且除嵩县站外其余站线性倾向率都达显著水平(图6d)。西部和南部大部分站点 $\Delta Y_A$ 减少幅度相对较小,平均每10 a下降幅度小于800  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;其余地区 $\Delta Y_A$ 倾向率减少幅度较大,平均每10 a下降幅度大于1 200  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

产量差的形成受多种因素制约,河南省不同地区夏玉米产量差的成因也不尽相同。北部汤阴、濮阳、新乡等地的夏玉米单产已经较高,这些地区的水利条件较好,水分不是产量进一步提升的主要限制因子。但秋季降温早且降温较快,玉米生长后期热量紧张,影响玉米的灌浆和成熟。可通过麦垄套种、选用中早熟优良品种以及适当推迟收获时间等措施提高产量。东部的商丘、杞县等地灌溉条件不如北部,受初夏旱和“卡脖旱”影响较为严重。可通过提高灌溉比例、选用高产抗逆品种、科学施肥等措施缩小产量差。西部三门峡、汝州等地产量差较大是因为这些地区以山地丘陵为主,土壤肥力较差,农业基础条件和生产技术相对落后,耕作栽培管理粗放。需通过加大农田基本建设、扩大灌溉面积,增强抵御自然灾害的能力来稳定和提高了夏玉米单产。

### 3 讨论

在作物生产潜力及产量差研究中,也有不少学者利用作物模型进行产量潜力估算。但受作物、土壤等相关参数的限制,许多研究结果中作物模型对潜在产量的模拟结果偏低,黄淮平原和东北地区的玉米实际单产纪录已经接近甚至超过了作物模型输出的潜在产量<sup>[12,24,27-28]</sup>,因此本文采用气候因子逐级订正的方法计算了河南省夏玉米光温生产潜力和气候生产潜力。虽然该方法参数取值有一定的经验性,但都具有明确的生物学意义,取值时综合考虑了研究区域的气候背景及玉米本身的特性,计算结果与李少昆<sup>[27]</sup>和陈怀亮<sup>[35]</sup>等已有的研究结果接近。

产量差的形成受自然因素和社会因素等多方面影响,其中气象灾害是影响河南省夏玉米产量形成的主要自然因素,尤其以初夏旱和“卡脖旱”影响最

为严重。另外渍涝、花期阴雨、大风、冰雹等多种气象灾害发生频繁,都制约着夏玉米高产稳产。社会因素主要包括栽培技术(肥料搭配与比例不合理、施肥时期、和方法不当)、玉米品种多乱杂和水利设施不完善等。本文主要从农业气候资源角度分析了不同地区产量差的自然因素及增产途径。

### 4 结论

1) 河南省夏玉米光温生产潜力全省多年平均值在21 000~33 000  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,空间分布呈由北向南、由东向西递减。近50年呈极显著下降趋势,平均每10 a下降696.8  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,下降幅度较大地区主要分布在北、中部和南部个别站点。

2) 夏玉米气候生产潜力全省多年平均值在9 900~23 700  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,线性倾向率平均每10 a增加280.6  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,趋势不显著。空间分布由西北向东南递增,变化趋势空间分布表现为北部下降,中、南部增加。

3) 夏玉米光温生产潜力与气候生产潜力的产量差在4 500~14 000  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,空间分布由北向南递减。近50年呈极显著下降趋势,平均每10 a减少958.7  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,变化趋势表现为全省一致降低,下降比较明显的地区主要分布在西南和中、东部。

4) 河南省夏玉米实际单产近50年极显著增加,光温生产潜力与实际产量的差值在17 000~27 000  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,呈极显著下降趋势,平均每10 a减少1 718.0  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。北部的汤阴、濮阳、新乡,东部的杞县、商丘以及西部的汝州、三门峡等地产量可提升潜力较大。

### 参考文献:

- [1] 杨晓光,刘志娟,陈 阜.全球气候变暖对中国种植制度可能影响:VI.未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响[J].中国农业科学,2011,44(8):1562-1570.
- [2] 肖风劲,张海东,王春乙,等.气候变化对我国农业的可能影响及适应性对策[J].自然灾害学报,2006,15(6):327-331.
- [3] 王道龙,钟秀丽,李茂松,等.20世纪90年代以来主要气象灾害对我国粮食生产的影响与减灾对策[J].灾害学,2006,21(1):18-22.
- [4] 余卫东,柳俊高,常 军,等.1957—2005年河南省降水和温度极端事件变化[J].气候变化研究进展,2008,14(2):78-83.
- [5] 居 辉,李三爱,严昌荣,等.北方旱农区玉米自然降水生产潜力研究[J].自然资源学报,2006,7(4):632-637.
- [6] 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.
- [7] 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): 723-729.
- [8] 国家统计局河南调查总队. 河南调查年鉴 [M]. 郑州: 国家统计局河南调查总队, 2011: 29-33.
- [9] Van Ittersum M K, Cassman K G, Grassini P, et al. Yield gap analysis with local to global relevance — A review [J]. *Field crops research*, 2013, 143: 4-17.
- [10] 范 兰, 吕昌河, 陈 朝. 作物产量差及其形成原因综述 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2155-2166.
- [11] Liu Zhijuan, Yang Xiaoguang, Hubbard K, et al. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China [J]. *Global change biology*, 2012, (18): 3441-3454.
- [12] 钟新科, 刘洛, 徐新良, 等. 近 30 年中国玉米气候生产潜力时空变化特征 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 94-101.
- [13] Verdoodt E, Van R, Van A W. Modeling crop production potentials for yield gap analysis under semiarid conditions in GUquka, South Africa [J]. *Soil use and management*, 2003, 19: 372-380.
- [14] Grassini P, Thorburn J, Burr C, et al. High-yield irrigated maize in the Western U. S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield-potential, and impact of management practices [J]. *Field crop research*, 2011, 120: 142-150.
- [15] Hochman Z, Holzworth D, Hunt J R. Potential to improve on-farm wheat yield and WUE in Australia [J]. *Crop pasture sciences*, 2009, 60: 708-716.
- [16] Tittone P, Shepherd K D, Vanlauwe, B, et al. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya — an application of classification and regression tree analysis [J]. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 2008, 123: 137-150.
- [17] Laborte A G, Bie K, Smaling E M A, et al. Rice yields and yield gaps in Southeast Asia: Past trends and future outlook [J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 36: 9-20.
- [18] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I. Regional importance of crop yield constraints: Linking simulation models and geostatistics to interpret spatial patterns [J]. *Ecological modeling*, 2006, 196: 173-182.
- [19] Liang Weili, Peter C, Wang Guiyan, et al. Quantifying the yield gap in wheat-maize cropping systems of the hebei plain, China [J]. *Agricultural systems*, 2011, 124: 180-185.
- [20] Rachel L, Matt J, Jonathan A F, et al. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the 'yield gap' of croplands around the world? [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19: 769-782.
- [21] 于荣环, 孙孟梅, 孙孚广. 黑龙江省作物气候生产潜力计算方法的研究 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 1997, (2): 66-71.
- [22] 侯光良, 刘允芬. 我国气候生产潜力及其分区 [J]. *自然资源*, 1985, 8(3): 52-59.
- [23] 王纯枝, 宇振荣, 辛景峰, 等. 基于遥感和作物生长模型的作物产量差估测 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 84-89.
- [24] 王 静, 杨晓光, 吕 硕, 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(10): 1914-1925.
- [25] Tomek de P, Bert R, Martin K I. The crop yield gap between organic and conventional agriculture [J]. *Agricultural Systems*, 2012, 108: 1-9.
- [26] 李树岩, 刘荣花, 成 林, 等. 河南省综合抗旱能力分析 with 区划 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1555-1560.
- [27] 李少昆, 王崇桃. 玉米高产潜力途径 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 306-309.
- [28] 黄川荣, 刘 洪. 气候变化对黄淮海平原冬小麦与夏玉米生产潜力的影响 [J]. *中国农业气象*, 2011, 32(增 1): 118-123.
- [29] 李世奎, 侯光良, 欧阳海, 等. 中国农业气候资源和农业气候区划 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 124-127.
- [30] 张 强, 杨贤为, 黄朝迎. 近 30 年气候变化对黄土高原地区玉米生产潜力的影响 [J]. *中国农业气象*, 1995, 16(6): 19-24.
- [31] 曹 雯, 申双和. 我国太阳日总辐射计算方法的研究 [J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(4): 587-591.
- [32] 魏瑞江, 宋迎波, 王 鑫. 基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法 [J]. *应用气象学报*, 2009, 20(5): 622-627.
- [33] 朱自玺, 侯建新, 牛现增, 等. 夏玉米耗水量和耗水规律分析 [J]. *华北农学报*, 1987, 2(3): 52-60.
- [34] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007: 63-66.
- [35] 陈怀亮, 张雪芬. 玉米生产农业气象服务 [M]. 北京: 气象出版社, 1999: 15-31.

(上接第 169 页)

- [13] Jackson J E. Light interception and utilization by orchard systems [J]. *Horticultural Reviews*, 1980, 2: 208-267.
- [14] Sansavini S, Corelli-Grappadelli L. Yield and light efficiency for high quality fruit in apple and peach high density planting [J]. *Acta Horticulturae*, 1996, 451: 559-568.
- [15] Willaume M, Lauri P-E, Sinoquet H. Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation [J]. *Trees*, 2004, 18(6): 705-713.
- [16] Marini R P, Sowers D S. Peach tree growth, yield, and profitability as influenced by tree form and tree density [J]. *HortScience*, 2000, 35(5): 837-842.
- [17] Watson R, Wright C, McBurney T, et al. Influence of harvest date and light integral on the development of strawberry flavour compounds [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(377): 21-9.
- [18] Kliewer W. Effect of day temperature and light intensity on concentration of malic and tartaric acids in *Vitis vinifera* L. grapes [J]. *J Amer. Soc. Hort. Sci*, 1971, 96(3): 372-7.
- [19] 陈俊伟, 秦巧平, 谢 鸣, 等. 草莓果实蔗糖和己糖的代谢特性及其与糖积累的关系 [J]. *果树学报*, 2007, 1: 49-54.