

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.027

1960年以来河南省玉米气候生产潜力估算与种植空间优化

高军波^{1,2} 楚冰洋¹ 闫军辉¹ 赵国永¹

(1. 信阳师范学院精准扶贫与乡村振兴软科学研究基地, 信阳 464000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 农作物生长直接依赖于降水、光照及温度等自然要素,对全球气候变化的影响最为敏感。基于河南省1960—2015年气候观测和太阳辐射量数据,采用逐步订正法估算了159个县级空间单元的玉米气候生产潜力,并进行河南省玉米种植空间的优化。结果表明:在全球气候变化背景下,受气温和降水双因素驱动,河南省玉米气候生产潜力在1960—2015年间呈倒U形的动态变化,玉米生产高气候潜力空间持续向豫西迁移,弱势气候潜力区自2000年来聚集于河南省北部地区。61.11%的河南省玉米生产优势气候潜力区与玉米优势种植区现状重合,但其他各类型潜力区与种植区现状偏差较大。种植规模分为适当增加、逐步减少、保持稳定3种类型,提出河南省玉米种植空间优化方案和对策建议。

关键词: 玉米; 河南省; 气候变化; 气候生产潜力; 逐步订正法

中图分类号: S5-33; S162.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0245-10

Estimation of Climate Production Potential of Corn and Optimization of Planting Space in Henan Province from 1960

GAO Junbo^{1,2} CHU Bingyang¹ YAN Junhui¹ ZHAO Guoyong¹

(1. The Center of Targeted Poverty Alleviation and Rural Revitalization, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Crop growth directly depends on natural elements such as precipitation, light and temperature, and which is most sensitive to global climate change. Based on the meteorological observations and solar radiation data of Henan Province from 1960 to 2015, the corn climatic production potential of 159 county-level spatial units was estimated by using the gradual correction method and the planting space of corn was optimized. The results showed that under the background of global climate change, driven by both temperature and precipitation, the climate productivity potential of maize in Henan Province showed an inverted U-shaped dynamic change from 1960 to 2015. The space of high climate potential of maize production continued to migrate to the west of Henan Province, and the disadvantaged climate potential areas were concentrated in the north of Henan Province since 2000. And 61.11% of the advantage cultivation area coincided with the advantage potential area, but there was a big deviation between the other potential areas and the current situation of planting areas. There were three types of corn planting: increasing planting scale appropriately, decreasing planting scale gradually and maintaining stability.

Key words: corn; Henan Province; climate change; climate production potential; step-by-step revision method

0 引言

气候变化是当今人们面临的重要课题之一,它

将改变降水与气温等气象因子的空间分布。近年来全球气候变暖趋势日益明显,使全球范围内的地表温度和气温都明显高于以往同期水平,极端气候事

收稿日期: 2018-06-09 修回日期: 2018-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401171)、教育部人文社科规划项目(18YJA840003)、河南省科技攻关计划(社会发展类)项目(18212310988)、河南省哲学社科规划项目(2017BSH009)和信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目

作者简介: 高军波(1979—),男,副教授,中国科学院博士后,主要从事城乡转型、乡村贫困与精准扶贫研究,E-mail: gaojb@xynu.edu.cn

件的强度和频率也有所加剧,给全球农业生产增加了不确定性。现有成果显示,随着气温及降水等气象因素的改变,近几十年来全球范围内的玉米产量下降了3.8%,玉米种植边界明显北移^[1]。气候生产潜力是指某地区光照、热量、水分等要素的质量及其相互协调程度,当作物充分并合理利用当地的光、热、水、气候资源,且土壤养分等条件最适时,作物单位面积产量就会趋向最高值。农作物生产潜力最早被发现与光能利用效率直接相关^[2],随后是温度与水分因素被引入作物生产潜力计算,农作物生产潜力计算模型得以逐步修正和完善^[3-4]。在国内,黄秉维^[5]最早于20世纪50年代就研究了农业生产潜力与积温、降水等气候因素的关系,在光能生产潜力的计算上首次提出光合潜力的概念,并对LOOMIS和WILLIAMS所提出的光合潜力计算公式进行修改,得出了更为简便的生产潜力计算式;随后陈明荣等^[6]将温度系数引入生产潜力估算,至此气候生产潜力的研究思路基本形成,相关实证理论与方法研究也逐步展开^[7-8]。逐步订正法是利用辐射量估算出光合生产潜力,再由温度、降水量数据对温度与水分订正系数进行逐步订正,从而得出光温生产潜力和气候生产潜力的方法,是联合国粮食和农业组织(FAO)推荐使用的气候生产潜力计算方法。刘博等^[9]基于逐步订正法对东北地区主要粮食作物进行了气候生产潜力实证,发现逐步订正法贴合气候变化的全球化背景,能反映作物生产潜力随辐射、温度及降水条件变化趋势,较具推广潜力。

河南省是我国夏播玉米主要种植区,对我国粮食安全起到重要的保障作用,但研究表明,受全球气候变化等影响,河南省在1970—2010年间,每年平均受灾面积和成灾面积分别为 $3.2081 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $1.4607 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中主要气象灾害有旱灾、涝灾、风雹灾、低温灾等^[10];尤其是2010年后,河南夏玉米产量主要受高温灾害影响显著^[11-13]。为应对全球气候变化,落实国家粮食安全战略,本研究拟以河南省为研究区域,以河南省第一大夏播作物——玉米为研究对象,采用逐步订正法和克里金插值县域气象数据等方式,量化研究1960—2015年河南省玉米气候生产潜力时空演变,并引导玉米种植空间优化,以期为河南省县域农业生产结构优化提供理论依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区域概况

河南省地处我国中部,属暖温带-亚热带、湿润-半湿润季风气候,土壤肥沃,水热同期,平原广布,是

我国重要粮食产区。河南省的玉米播种面积、产量在全国地位突出。如图1所示,在播种面积上,近20年来河南省玉米种植面积持续增大,由1998年 $2.153 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增加至2016年的 $3.344 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。在总产量上,由于受到气候变化影响,农作物生长过程中灾害发生频次呈增加趋势。2003年由于玉米生长期出现长时间持续低温寡照天气,造成大量玉米发育不完全或畸形发育,平均单产下降到 3211 kg/hm^2 ,随后进入快速增长期。但是,2011年和2012年河南西北部地区在玉米生长期高温风险突出^[11];2013年河南省平顶山市、信阳市等地是高温热害的重灾区,热害强度达百年一遇,同时局部地区伴有玉米螟虫害的发生^[12];2014年河南省部分地区夏玉米种植发生了极端干旱事件^[13],上述气候灾害和突发性极端事件,都导致了玉米的严重减产,对玉米的单产和总产量造成了较为严重的冲击。

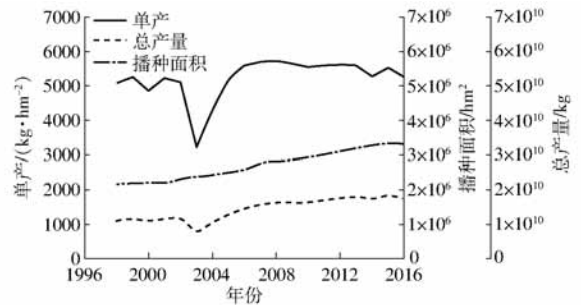


图1 1998—2016年河南省玉米总产量、种植面积和单产变化

Fig.1 Changes of total corn yield, planting area and yields in Henan Province in 1998—2016

从全国来看,山东、河南及东北三省是我国玉米主产区。如图2所示,河南省玉米单位产量与全国平均单产差别不大(2003年、2004年除外),2002年以前均稳定在 5000 kg/hm^2 左右。2005年以后全国平均单产呈稳定增长趋势,2016年增长至 6000 kg/hm^2 左右,而河南省的玉米单产稳定在

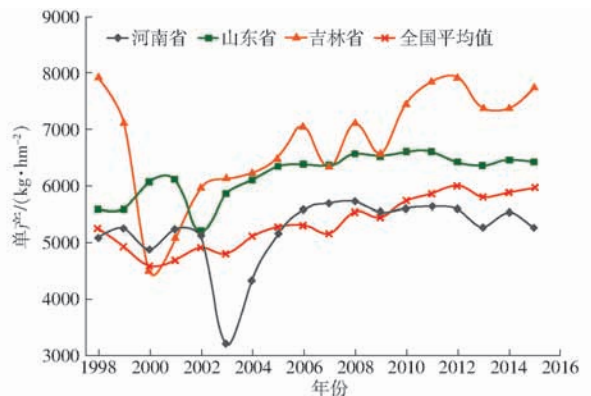


图2 河南省玉米单产与中国玉米主产省份比较
Fig.2 Comparison of maize yield in Henan Province with main production provinces in China

5 500 kg/hm²左右, 山东省稳定在 6 500 kg/hm² 左右, 吉林省玉米单产均值虽不稳定, 但总体上均高于山东、河南和全国单产均值, 且最高单产达 8 000 kg/hm² 左右。由此表明, 河南省玉米单产与我国其他玉米主产区相比, 整体上还存在较大差距。这与气温、降水、土壤肥力、生长周期等因素密切相关。因此, 在全球气候变暖和确保粮食安全战略背景下, 探究如何优化河南省玉米种植结构, 对提高玉米种植效益, 落实粮食安全战略, 实现农业可持续发展具有重要意义。

1.2 研究方法

逐步订正法计算模型为^[14]

$$Y_w = Qf(Q)f(t)f(W) = Y_Qf(t)f(W) = Y_Tf(W) \quad (1)$$

式中 Y_w ——气候生产潜力, kg/hm²
 Q ——5—9 月太阳总辐射, MJ/m²
 $f(Q)$ ——光合有效系数
 Y_Q ——单位面积光合生产潜力, kg/hm²
 $f(t)$ ——作物光合作用的温度订正系数
 Y_T ——光温生产潜力, kg/hm²
 $f(W)$ ——水分订正系数

其中温度订正系数 $f(t)$ 与水分订正系数 $f(W)$ 分别表示作物对于温度和降水量的敏感程度, 对于农作物适宜种植区的选择具有重要价值。两种订正系数取值范围介于 0~1 之间, 温度订正系数越低则表明作物对温度条件的适应性越低; 相应地, 水分订正系数越低表明作物对水分条件的满足度越低。

逐步订正法进行玉米气候生产潜力估算包括 3 个步骤:

(1) 光合生产潜力的计算

光合生产潜力的计算式为^[15-16]

$$Y_Q = Qf(Q) = CS\varepsilon\varphi(1-\alpha)(1-\beta)(1-\rho)(1-\gamma)(1-\omega)f(L)E \sum Q_i/q(1-\eta)(1-\xi) \quad (2)$$

式中 C ——单位换算系数
 Q_i ——生长季各月总辐射量, MJ/m²
 S ——作物光合固定 CO₂ 能力的比例, 取 1.00
 ε ——光合辐射占总辐射的比例, 取 0.49
 φ ——光合作用量子效率, 取 0.22
 α ——植物群体反射率, 取 0.08
 β ——植物繁茂群体透射率, 取 0.06
 ρ ——非光合器官截获辐射比例, 取 0.10
 γ ——超过光饱和点光的比例, 取 0.01
 ω ——呼吸消耗占光合产物的比例, 取 0.30
 E ——作物经济系数, 取 0.40

$f(L)$ ——作物叶面积动态变化订正值, 取 0.58

q ——单位干物质含热量, 取 17.20 MJ/kg

η ——成熟谷物含水量, 取 0.15

ξ ——植物无机灰分含量比例, 取 0.08

(2) 光温生产潜力的计算

光温生产潜力的计算式为

$$Y_T = Y_Qf(t) \quad (3)$$

其中

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

式中 t ——5—9 月各月平均温度

t_{\min} 、 t_s 、 t_{\max} 为作物生长发育期(5—9 月)三基点温度, 分别为下限温度、最适温度和上限温度, 具体数值为^[17-18]: 5 月苗期分别为 8.0、20.0、27.0℃, 6 月营养生长期分别为 11.5、24.5、30.0℃, 7 月营养生殖并进期分别为 27.0、14.0、33.0℃, 8 月开花/灌浆期分别为 25.5、14.0、33.0℃, 9 月灌浆成熟期分别为 19.0、10.0、30.0℃。

(3) 气候生产潜力的计算

气候生产潜力的计算式为

$$Y_w = Y_Tf(W) \quad (5)$$

其中

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

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

式中 p ——时段内的降水量, mm

ET_c ——作物需水量, mm

ET_0 ——作物参考蒸散量, mm

K_c ——作物系数, 玉米 5—9 月的 K_c 值分别为^[18-19]0.38、0.75、1.22、1.10、0.60

1.3 玉米生长期划分

玉米发育经历播种期、三叶期、七叶期、拔节期、抽雄期、开花期、吐丝期、乳熟期及成熟期 9 个阶段, 各发育期对温度、降水等需求不同^[20]。由于河南省各地气候条件不一, 玉米播种、收获时间存在差异。通过调查访谈得知, 河南省信阳市玉米生长季为 5—8 月, 其余各地均为 6—9 月, 总体上全省各地玉米生长周期均为 4 个月左右。本研究依据省域各地玉米生长实际情况, 选取不同的生长日期参数进行气候生产潜力计算。为便于下文论述, 统一将生长期描述为 5—9 月。

1.4 技术路线

首先, 采用克里金插值法将河南省 18 个县市的

5—9月最低气温、最高气温、月均温、降水量及辐射数据进行插值处理;其次,基于插值处理后的气象数据及玉米生长发育三基点温度、需水量、参考蒸散量数据,按逐步订正方法,对光合生产潜力及玉米温

度、水分订正系数进行计算;最后,经温度、水分逐级订正后估算河南省县域玉米气候生产潜力,并进行县域玉米种植空间格局演变与优化研究。具体流程如图3所示。

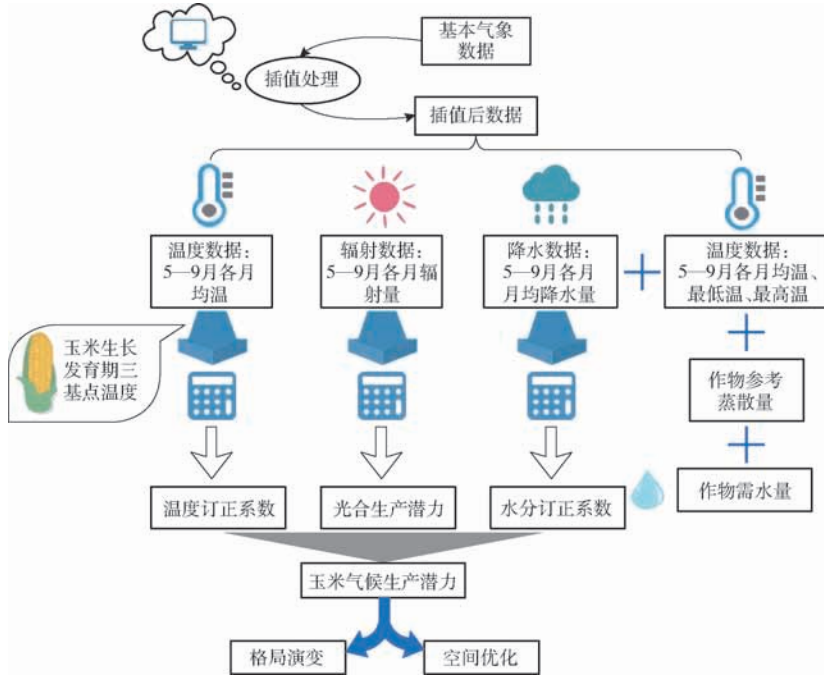


图3 研究过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of research process

1.5 数据来源及处理

所需数据包括基础数据及参数数据两种类型。基础数据来源于中国气象局国家气象信息中心的河南省18个地市站点1960—2015年基本气象数据及5个气象站台的生长季(5—9月)辐射数据,其中基本气象数据由5—9月均温、最低温、最高温数据和降水量数据组成。然后采用克里金插值法获取河南省域159个县区空间单元气象数据。参数数据包括玉米光合生产潜力参数、玉米生长发育期三基点温度、作物参考蒸散量及作物系数。其中,玉米光合生产潜力参数、生长发育期三基点温度及玉米的作物系数取自现有结果,蒸散量数据则通过哈格雷夫(Hargreaves)方法计算获得。此外,全国分省玉米实际产量数据来自对应年份统计年鉴数据。

为了更加清晰地描述河南省农作物生产潜力区域差异,按气候和地形条件将河南划分为5个区域:豫北暖温带山地丘陵区(安阳、濮阳、鹤壁、焦作);豫南亚热带山地丘陵盆地区(信阳、南阳、驻马店);豫东暖温带平原区(开封、周口、商丘);豫西暖温带山地丘陵区(三门峡、洛阳、济源);豫中暖温带河流冲击平原谷地丘陵区(郑州、新乡、许昌、平顶山、漯河),分区情况及河南省18个气象站点分布如图4所示。

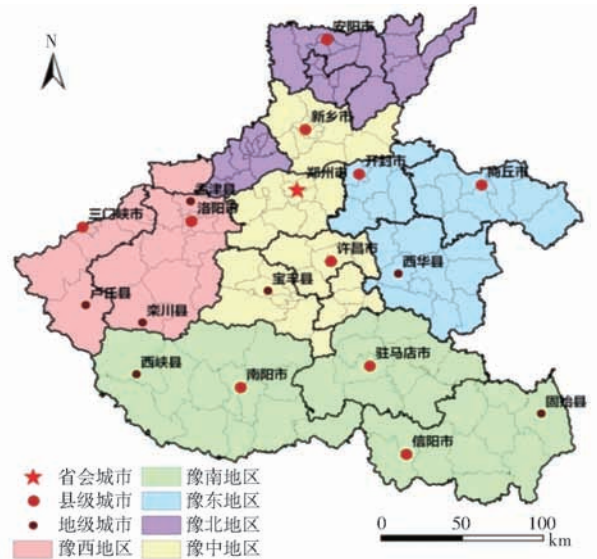


图4 河南省分区及站点分布图

Fig. 4 Distribution map of Henan Province division and site

2 玉米气候生产潜力估算与空间特征

2.1 2015年玉米气候生产潜力估算

基于2015年气候数据,通过式(4)与式(6),计算河南省2015年玉米气候生产潜力的温度订正系数与水分订正系数,分别为0.5716和0.8227。玉米温度订正系数偏低,表明整体上河南省玉米生产对温度条件较为敏感,与玉米生长的适宜温度还有

差距,对玉米生产造成不利影响;水分订正系数较高,说明降水条件能较充分满足玉米生长发育需要。整体上看,河南省玉米生产的气候因素中降水条件优于温度条件。

2015 年的玉米光合生产潜力、光温生产潜力及气候生产潜力分别由式(2)、(3)、(5)计算,结果如表 1 所示。对地区差异性指标而言,由大到小依次

为气候生产潜力、光温生产潜力、光合生产潜力,依据河南省气候和地形条件划分的 5 个不同区域,太阳辐射量西部要稍高于东部,气温条件呈现出东高西低、南高北低的概况,降水量则是南部和西部山区降水量相对丰沛,东部和北部地区降水量略低。进一步表现出不同区域玉米生产潜力与区域间的热量条件、温度条件、降水量因素等气候因子密切相关。

表 1 2015 年玉米气候生产潜力

Tab.1 Corn climate production potential in 2015

生产潜力	最高值/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	最低值/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	平均值/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	最高值/最低值	地区差异性指标
光合生产潜力	12 490.64	11 067.05	11 740.54	1.129	1.129
光温生产潜力	8 848.870	5 683.935	6 610.341	1.557	1.379
气候生产潜力	7 667.840	3 329.067	5 048.344	2.303	1.479

2015 年玉米气候生产潜力呈以豫北为中心的同心环格局,中心低外围高特征显著(图 5)。玉米气候生产潜力介于 $6\ 800\sim 7\ 700\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 之间为优势产区,主要位于河南省西部与南部,包括信阳地区、南阳地区、三门峡南部及洛阳西南部等 18 个县市,占河南省县域总规模 11.3%;生产潜力介于 $6\ 000\sim 6\ 800\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 之间为较优产区,主要分布在南阳、驻马店、商丘东部与西南部及洛阳部分地区,包括 34 个县市,占比 21.4%;生产潜力在 $5\ 200\sim 6\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 之间为一般产区,主要包括平顶山、漯河、济源及洛阳东部等地 37 个县市,占比 23.3%;生产潜力在 $4\ 500\sim 5\ 200\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 区间为较弱产区,分布在中部的开封、郑州、许昌、焦作及濮阳地区,涵盖 47 个县市,占比 29.6%;生产潜力介于 $3\ 300\sim 4\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 之间为弱势产区,集中分布在河南省北部 23 个县市,占比 14.5%。如前所述,2015 年全省玉米生长期雨水充足,满足玉米生长期所需水分,但受月最低及月最高气温的影响,温度订正系数较低,导致不同县域玉米生产潜力核算结果的差异。如 2015 年郑州、新乡、开封等地 5—9 月均温都高于 27°C ,而南阳及三门峡地区同期均温在 26.2°C 左右,温度适宜,利于玉米生长发育,可见气温条件差异是 2015 年地区玉米生产潜力差异的主要因素。

2.2 1960—2015 年玉米气候生产潜力时空变化特征

2.2.1 玉米气候生产潜力动态变化

河南省玉米生产潜力均值从 $6\ 388.66\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (1960 年)增加至 $8\ 004.94\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (1980 年),又于 2015 年减少至 $5\ 048.34\ \text{kg}/\text{hm}^2$,整体上随时间呈 M 形的动态变化。基于气候分区(图 4)及生产潜力计算,河南省玉米气候生产潜力如图 6 所示。豫南地区气候生产潜力变动剧烈,但仍是最大气候生产潜力所在区域;豫东地区在 1970 年前生产潜力持续快

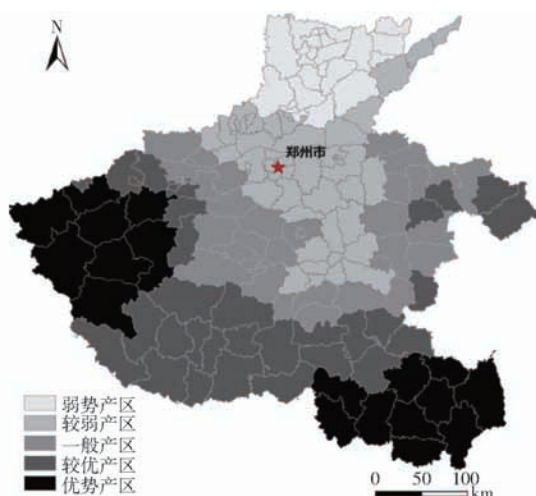


图 5 2015 年河南省玉米气候生产潜力分布图

Fig. 5 Distribution map of maize climatic production potential in Henan Province in 2015

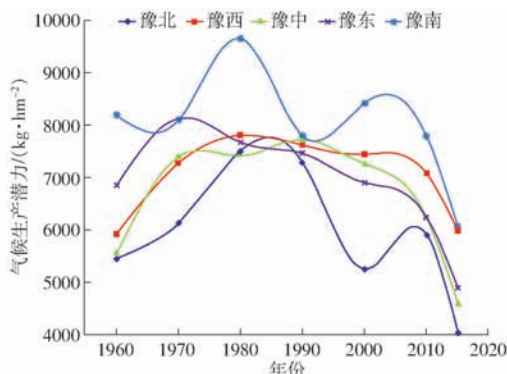


图 6 玉米气候生产潜力曲线

Fig. 6 Climatic potential productivity curves of maize

速上升,仅次于豫南地区,于 1970 年达到最高值,甚至超越豫南地区成为最具生产潜力的地区,但 1970 年后生产潜力持续下降,逐渐被豫西地区所取代。豫西地区在 1980 年之前生产潜力匀速上升,之后表现为较缓下降趋势,但具有较高的生产潜力,成为河南省域内第二大优势生产潜力区;豫中地区玉米生

产潜力变化也可划分为两个阶段,1990年之前波动上升,之后迅速下降;豫北地区则一直是生产潜力最低的区域。据此表明,具有亚热带气候和低山丘陵地形的豫南地区,其水热组合条件优越,历来是河南省玉米气候生产潜力的最优区位。受全球气候变暖影响,豫西地区在玉米生长期具有更优光照、降水、热量等气候因子组合,驱动河南省玉米气候生产潜力优势区呈现从豫东向豫西地区逐步转移的动态趋势。

2.2.2 生长季气温和降水变化对玉米气候生产潜力的影响

如图7所示,河南省1960—2015年玉米气候生产潜力整体上呈倒U形动态变化。其中在1960—1980年间,河南玉米气候生产潜力先以年均 80.8 kg/hm^2 的速度增加;在1980—2015年间,玉米气候生产潜力持续下降。以2010年为分界点,先以年均 46 kg/hm^2 的速度缓降,再以 157.6 kg/hm^2 的速度急降。为分析变化原因,将气候生产潜力的变化分别与生长季均温及生长季降水量的变化进行动态对比(图7),发现玉米生长季均温与同期气候生产潜力变化时间节点一致,但方向相反,即气候玉米生产潜力与气温变化具有较强的反比关系。与气温变化态势不同,玉米生长季降水量与气候生产潜力

呈同步趋势变化,即降水量增加,气候生产潜力也随之提升;降水量减少,气候生产潜力下降。其中,2000年可能受到冷暖变化剧烈及干湿交替出现的异常气候影响,河南省在玉米生长季出现长时间低温和低辐射天气,导致气候生产潜力突降,其余年份降水量与气候生产潜力变化节点和方向一致。综上所述,受全球变暖趋势影响,未来河南省玉米生长季气温将继续保持升高变化趋势,而同期降水量则可能持续减少,是河南省玉米气候生产潜力呈下降态势的关键因素。

2.2.3 玉米生产高潜力区变化

1960—2015年河南省玉米生产高潜力区(优势产区、较优产区)呈持续向西移动趋势(图8)。1960年河南省玉米生产高潜力区集中在信阳及驻马店东南部18个县,占省域县区规模比重为11.3%;1970年高生产潜力区范围缩小至信阳东部,覆盖7个县,占比4.0%;1980年范围扩大,覆盖信阳的大部分及南阳西南部共14个县,占比8.8%,高生产潜力地区重心由东往西迁移;1990年,高生产潜力区分布较为分散,包括信阳东部与中部、南阳西部及河南省西北部与中部的部分地区共24个县,占比升至15.1%;2000—2010年间,高潜力区从集中于豫西南向豫西和豫南分散聚集,县区规模从27个减少到20个,占比由17.0%提高到12.6%;而到2015年,河南玉米生产高潜力区进一步集中在西部和南部地区,涵盖18个县,占比降至11.3%。而同期玉米气候生产弱势潜力区(弱势产区、较弱产区),在1960年位于中部及北部地区,共58个县,占比36.5%;1970年降至16个县,占比10.1%;而在1980年又增加至28个县,占比回升到17.6%,且集中分布于河南省中部;在1990—2010年间,玉米生产弱势潜力区从3个县增加到53个县,占县区总规模比值也从1.9%增加到33.3%;2015年,河南玉米生产弱势潜力区共23个县,占比9.4%。自2000年以来,河南省玉米气候生产弱势潜力区均集中分布于河南省北部地区。从整体变化趋势上看,河南省玉米生产高潜力区规模波动幅度较小,而弱生产潜力区变化幅度较大。玉米生产高潜力区集中在河南省南部及西南部,是由豫南及西南部地区光温水资源充足,水热组合条件适宜所致,对玉米生长发育十分有利,诱导高潜力重心持续向西、向南迁移。因此为有效提高河南省粮食产量,提高土地利用效率,优化作物种植区域是一种重要的手段。

2.3 玉米气候生产潜力的制约特征

2011年,王冬妮等^[21]对1961—2008年吉林省18个县(市)春玉米气候生产潜力进行了估算及时空变化特征分析,发现近50a吉林省气候生产潜力

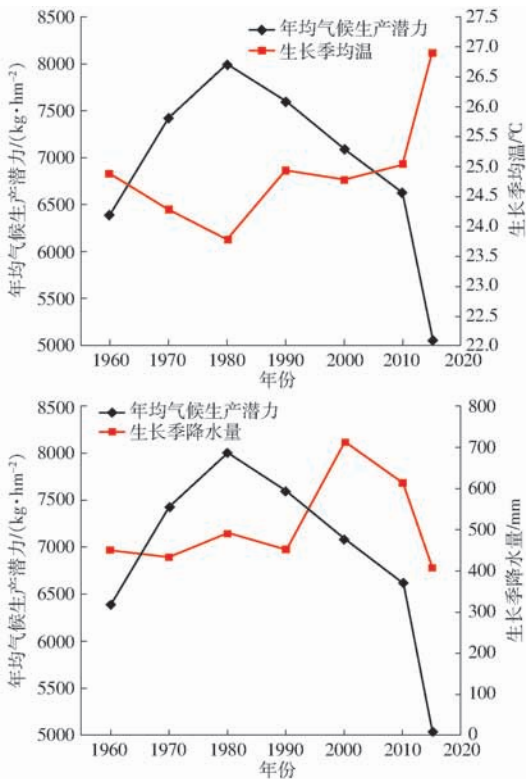


图7 玉米年均气候生产潜力与生长季均温、降水量变化关系

Fig. 7 Relationship between annual climatic production potential of maize and variation of average temperature and precipitation in growing season

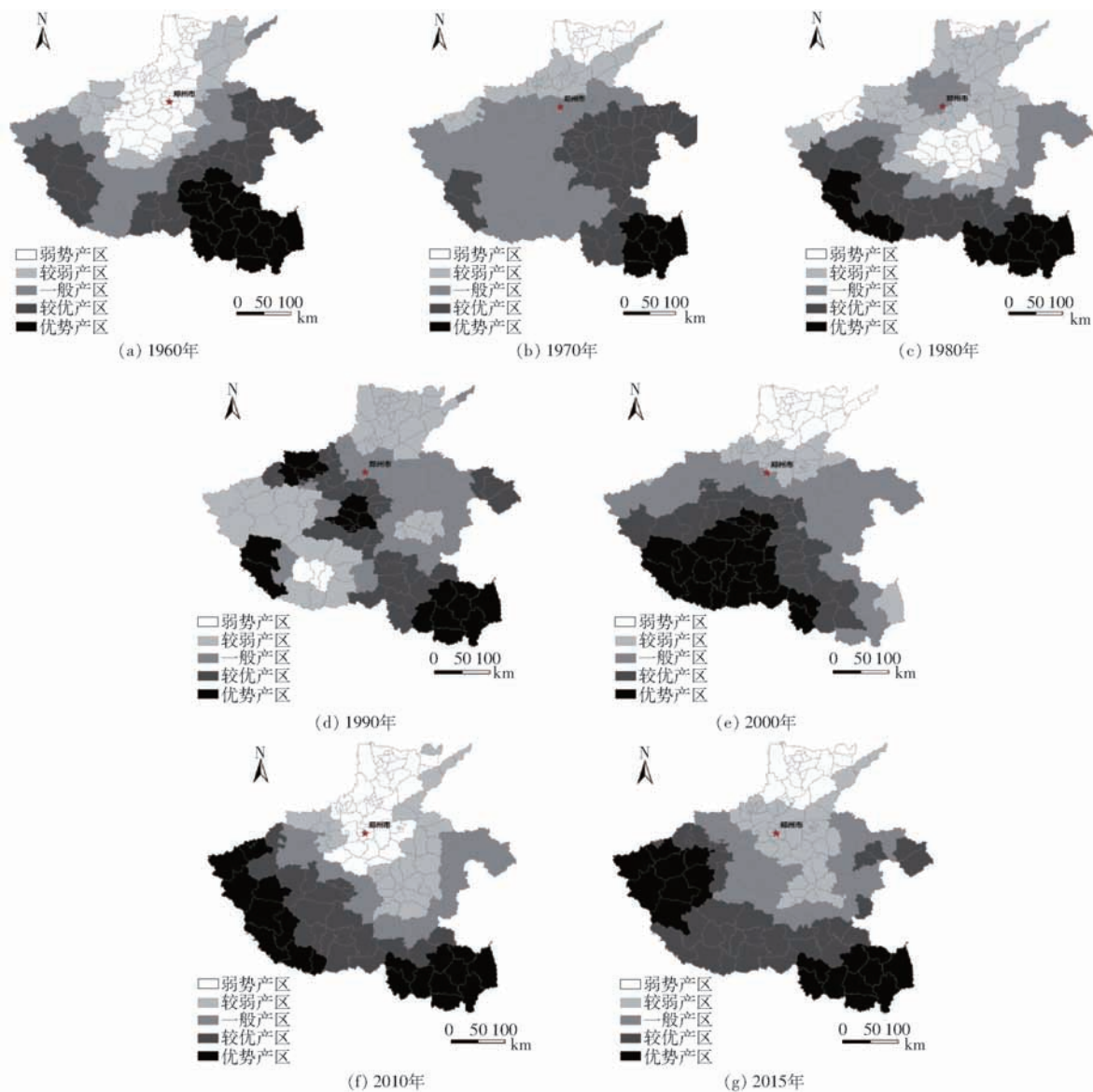


图 8 河南省玉米生产潜力分布图

Fig. 8 Distribution maps of maize production potential in Henan Province

呈下降趋势,水分是制约吉林省中西部春玉米产量的主要因子。赖荣生等^[22]利用宁夏中部干旱带 1961—2011 年平均气温和降水资料,指出降水条件是制约该区域春玉米气候生产潜力的关键因子,其作用对春玉米气候生产潜力的影响远大于气温的变化。葛亚宁等^[23]对近 50 a 来我国玉米生产潜力时空演变进行研究,得出生产潜力总体呈东高西低格局,单产潜力及总产量潜力整体呈现减少的趋势并且区域间的差异较大。与上述研究相比,河南省玉米气候生产潜力自 1980 年来,同样呈持续下降趋势,降水亦是制约玉米产量的重要因子。但同时,河南省玉米气候生产潜力与生长季气温呈强烈反比关系,在全球变暖趋势下,河南省玉米生长季不断升高的气温也是玉米气候生产潜力持续下降的重要因素。因此河南省玉米生产气候潜力受到气温和降水双因素制约,与东北(吉林)及西北(宁夏)地区不

同。究其原因,在于河南与吉林、宁夏的地理区位不同,受气候变化的影响程度不同。在中国气候变化区划中,吉林省位于东北-华北暖干趋势带东北边缘;宁夏中部地区位于东北-华北暖干趋势带西北边缘;河南省北部与西部位于西南-华南干暖趋势带东北边缘,东部、中部与南部位于华东-华中温暖趋势带西部边缘,使得河南省与吉林省和宁夏地区的玉米生产潜力更容易受到气温变化影响,分布规律也存在较大差异。此外,不同气候条件也使得其玉米播种期与生长发育时长不尽相同,吉林和宁夏中部地区玉米播种期早于河南省,生长发育时长较河南略长,也在一定程度上影响玉米季气温、降水及生产潜力变化。

3 玉米生产空间格局优化

3.1 玉米种植格局现状

基于河南省 2016 年农业统计数据,各地市玉米

播种面积差异较大。其中播种面积最大的是驻马店市,达 $4.5336 \times 10^5 \text{ hm}^2$;基于自然断点分类方法,将玉米种植区域分为优势种植区、较优种植区、中等种植区、较弱种植区和弱势种植区5个等级。其中,玉米优势种植区主要分布在南阳、驻马店、周口和商丘4个典型的传统农作物优势种植区,这里地势平坦,土壤肥沃,气候条件优越,利于玉米生长发育;较优种植区分布在河南北部的安阳与新乡,肥沃的土壤为该地区的作物提供了有利的生长条件;中等种植区包括河南中部的郑州、开封、许昌、平顶山以及西部的洛阳,城市的发展速度、政府政策等人文因素对该地区作物种植的影响较大;漯河、焦作、鹤壁及濮阳为玉米较弱种植区;信阳、三门峡与济源为玉米弱势种植区(图9)。



图9 河南省2016年玉米种植格局

Fig.9 Pattern of maize planting in Henan Province in 2016

3.2 玉米种植适宜程度分区

以河南省县域空间为单元,对2000年、2010年及2015年这3个年份各县的玉米气候生产潜力求均值,然后将所求均值的平均值作为标准值,与7个研究年份的玉米气候生产潜力进行比较。以大于标准值的年份次数为标准,将河南省划分为玉米生产的优势潜力区、较优潜力区、中等潜力区、较弱潜力区、弱势潜力区5种类型空间。其中,大于标准值年份次数小于等于2为弱势潜力区;等于3设定为较弱潜力区;等于4为中等潜力区;等于5为较优潜力区;大于等于6是优势潜力区,具体分区见图10。

3.3 县域玉米生产格局优化建议

通过对比图9和图10,发现河南省玉米优势种植区与优势气候生产潜力区具有较高重合度,其中61.11%的优势种植区与优势潜力区重合。如南阳、驻马店、周口及商丘地区,既为现状玉米优势种植

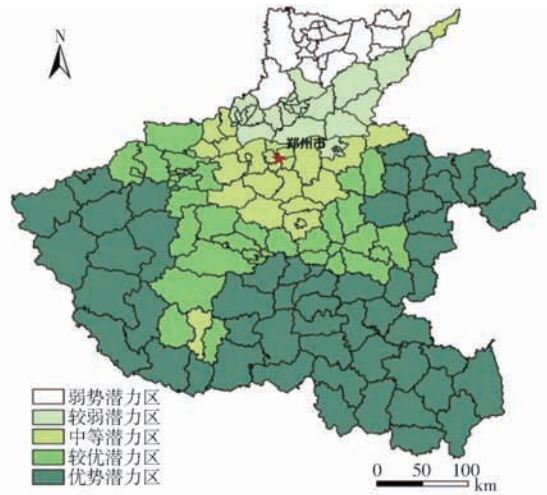


图10 玉米种植格局优化结果

Fig.10 Optimization chart of maize planting pattern

区,也是玉米优势气候生产潜力区;同样,豫中地区多为玉米气候生产的中等或较优潜力区,同时也是玉米的现状中等种植区。但其他各类玉米气候生产潜力区与现状种植区类型偏差较大。为了提高玉米实际产量及生产效率,可以依据玉米气候生产潜力导向,对河南省159个县市的玉米种植格局进行优化。根据玉米现状种植优势类型与气候生产潜力区类型差距,分为种植规模适当增加、逐步减少及保持现状3种类型,进行玉米种植空间优化(表2)。

需要注意的是,部分地区玉米气候生产潜力与种植现状类型不相符,是由于特定区域其他生产条件影响了农作物生产潜力。如安阳的玉米气候生产潜力整体偏低,划分为弱势潜力区,但在实际生产中安阳市却为较优种植区。究其原因,虽然安阳位于河南省最北部,温度偏高,是不利于玉米生产气候条件。如2016年河南省生长季(5—9月)均温为 25.4°C ,安阳市生长季均温为 27.4°C 。但是安阳土壤订正系数为0.8,土壤为高产田土^[24],土壤质地优势弥补了温度条件的不足,使安阳成为较优种植区;同样,就气候条件来讲,信阳大部分位于淮河以南,属亚热带季风气候,降雨丰沛,年均降水量 $900 \sim 1400 \text{ mm}$,气候条件更适合水稻作物的生长发育。而且水稻生产在当地粮食安全、防洪抗涝、保护环境中有不可替代的综合作用^[25],因此该市主要农作物为水稻而非玉米。由此表明,土壤质地优势弥补了气候条件的不足,使安阳成为较优种植区。信阳的气候条件虽然适合玉米生产,但该地充足的水热条件使水稻生产更具优势,致使玉米为信阳的弱势农作物。因此玉米等农作物种植空间受多种因素影响,如市场需求、自然条件及政策支持等,实际优化过程中,还要综合考虑人文要素、自然条件、政策支持等其他玉米产量影响因素。

表 2 河南省玉米种植格局优化

Tab. 2 Optimization of maize planting pattern in Henan Province

优化方式	玉米种植规模现状	玉米气候生产潜力等级	地区
种植规模适当增加	弱势种植区	较优潜力区	济源市、澠池县、义马市、临颖县、郾城区、召陵区
		优势潜力区	信阳市、舞阳县、源汇区、湖滨区、陕县、灵宝县、卢氏县
	较弱种植区	中等潜力区	台前县、孟州市、沁阳市、温县、博爱县
		较优潜力区	吉利区、新安县、孟津县、老城区、西工区、涧西区、瀍河回族区、偃师市、洛龙区、伊川县、汝阳县、通许县、杞县、平顶山市(叶县除外)、襄城县、鄢陵县
中等种植区	优势潜力区	宜阳县、洛宁县、栾川县、嵩县、叶县	
	较弱种植区	弱势潜力区	南乐县、清丰县、华龙区、鹤壁市
种植规模逐步减少	中等种植区	较弱潜力区	金明区、龙亭区、顺河回族区、鼓楼区
		弱势潜力区	安阳市(滑县除外)、辉县市
	较优种植区	较弱潜力区	滑县、新乡市(辉县市除外)
		中等潜力区	卧龙区
优势种植区	较优潜力区	南召县、镇平县、宛城区、扶沟县、西华县、商水县、淮阳县、川汇区	
	较弱种植区	较弱潜力区	濮阳县、范县、中站区、解放区、山阳区、武陟县、马村区、修武县
种植规模保持现状	中等种植区	中等潜力区	郑州市、兰考县、禹王台区、开封县、尉氏县、禹州市、长葛市、许昌县、魏都区
		优势潜力区	西峡县、淅川县、内乡县、方城县、社旗县、邓州市、新野县、唐河县、桐柏县、驻马店、太康县、鹿邑县、郸城县、沈丘县、项城市、商丘市
	优势种植区	优势潜力区	

4 讨论

农业发展实践表明,影响农作物生产的因素有很多,包括土地耕种面积、政府政策、生产方式、农民意愿、市场供求关系等,复杂多影响因素使气候生产潜力估算与实际产量之间存在误差。后续研究可以考虑将社会经济因素与自然环境因素逐步结合,进行作物生产潜力更精确估算探索。

同时,为应对全球气候变化及日趋严重的农作物生产气候问题,河南省农业生产可采取的对策如下:①继续研究农业生产潜力,提高农作物生产潜力的估算精度,不仅可以在农业生产结构调整等一系列决策问题上发挥重要的辅助作用,而且还可以发现并改善作物生长不利条件。②采取保护性耕作方法,如少耕、免耕、秸秆还田等措施,提高土壤本身的蓄水、蓄热能力,提高自然降水的利用效率,通过提高耕地利用率,改变熟制等方式提高作物产量^[26]。对气候条件处于劣势的地区采取如加强水利设施建设、人工降雨等手段进行改善,降低干旱对玉米生产的影响,或大力发展在本地生产潜力较大的优势农作物。③国家也要出台相关政策,如加大粮食补贴、

提高粮食收购价格等惠农政策及耕地面积保障政策等。

5 结论

(1)1960—2015 年河南省玉米气候生产潜力随气候条件的变化而发生改变。玉米气候生产潜力从 1960 年的 6 388.66 kg/hm² 增加至 1980 年的 8 004.94 kg/hm²,又于 2015 年减少至 5 048.34 kg/hm²,气候生产潜力随时间呈倒 U 形的动态变化,受气温和降水双因素驱动,河南省玉米生产气候潜力仍呈持续降低趋势。

(2)受全球气候变化影响,河南省 1960—2015 年玉米生产高气候潜力区整体上从豫东向豫西迁移;弱势气候潜力区自 2000 年来一直集中于河南省北部地区。河南省玉米生产气候潜力的气温和降水双因素制约特征显著。

(3)61.11% 的河南省玉米生产优势气候潜力区与玉米优势种植区现状重合,但其他各类型潜力区与种植区现状偏差较大,应依据玉米生产气候潜力区类型,种植规模分适当增加、逐步减少和保持现状 3 种类型,提出河南省玉米种植格局优化方案。

参 考 文 献

- [1] 赵锦. 气候变化背景下我国玉米产量潜力及提升空间研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. ZHAO Jin. The potential yield and improvement of maize in China under climate change [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [2] BONNER J. The upper limit of crop yield [J]. Science, 1962, 137(3523): 11 - 15.
- [3] DE WIT C. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops (simulation monographs) [J]. Agricultural Systems, 1982, 9(1): 74 - 75.
- [4] HANKS R J. Yield and water-use relationships; an overview [M] // TAYLORETTAL H M. Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. Madison: Crop Science Society of America Press, 1983.

- [5] 黄秉维. 中国农业生产潜力——光合潜力[M]//地理集刊(第17号), 农业生产潜力研究. 北京: 科学出版社, 1985: 17-22.
- [6] 陈明荣, 龙斯玉. 中国气候生产潜力区划的探讨[J]. 自然资源, 1984(3): 72-79.
CHEN Mingrong, LONG Siyu. China's climate productivity potential division [J]. Natural Resources, 1984(3): 72-79. (in Chinese)
- [7] 张丽娜, 陈志, 杨敏丽, 等. 我国玉米生产效率时空特征分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 183-193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180123&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.023.
ZHANG Li'na, CHEN Zhi, YANG Minli, et al. Spatio-temporal feature of maize production efficiency in main producing provinces of China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 183-193. (in Chinese)
- [8] 裴占江, 刘杰, 史风梅, 等. 气候变化对我国农业生产的影响研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2017(8): 112-118.
PEI Zhanjiang, LIU Jie, SHI Fengmei, et al. Research progress on the effect of climate change about the agricultural production of China [J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2017(8): 112-118. (in Chinese)
- [9] 刘博, 杨晓光, 王式功. 东北地区主要粮食作物生产潜力估算与分析[C]//S10 气象与现代农业发展, 2012.
- [10] 刘丹, 李迎春. 气候变化背景下江西省双季晚稻气候生产潜力的时空变化特征[J]. 西南农业学报, 2018, 31(1): 184-191.
LIU Dan, LI Yingchun. Characteristics of spatial-temporal of late rice production potential in Jiangxi Province under background of climate change [J]. Journal of Southwest Agriculture, 2018, 31(1): 184-191. (in Chinese)
- [11] 刘哲, 汪雪滢, 刘帝佑, 等. 基于MODIS数据的黄淮海夏玉米高温风险空间分布[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 175-181.
LIU Zhe, WANG Xueying, LIU Diyou, et al. Spatial distribution of high temperature risk on summer maize in Huang-Huai-Hai Plain based on MODIS data [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 175-181. (in Chinese)
- [12] 刘哲, 乔红兴, 赵祖亮, 等. 黄淮海夏播玉米花期高温热害空间分布规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 272-279. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150739&journal_id=jcsam]. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.039.
LIU Zhe, QIAO Hongxing, ZHAO Zuliang, et al. Study on the spatial distribution of high-temperature heat damage in the flowering period of maize under summer planting in Huang-huai-hai Plain [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 272-279. (in Chinese)
- [13] 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 Yanmei, CHEN Chao, MA Zhenfeng. 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. (in Chinese)
- [14] 孙世坤, 蔡焕杰, 王健. 基于GIS的石羊河流域玉米气候生产潜力分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 211-219.
SUN Shikun, CAI Huanjie, WANG Jian. Study on climatic potential productivity of maize based on GIS technology in Shiyang River Basin [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2010, 38(6): 211-219. (in Chinese)
- [15] 王磊. 气候变化对我国玉米种植区域划分的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
WANG Lei. Impacts of climate change to area division of maize plating in China [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [16] 马树庆. 吉林省农业气候研究[M]. 北京: 北京气象出版社, 1996.
- [17] 马树庆, 郭顺姬, 白亚梅, 等. 东北区农业气候土壤资源潜力及开发利用研究[J]. 地理科学, 1995(3): 243-252, 297.
MA Shuqing, GUO Shungji, BAI Yamei, et al. The analysis of the potential productivity, exploitation and utilization of climate-soil resources in northeast China [J]. Geographic Sciences, 1995(3): 243-252, 297. (in Chinese)
- [18] 王宗明, 张柏, 张树清, 等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究[J]. 中国农业气象, 2005(1): 2-7.
WANG Zongming, ZHANG Bo, ZHANG Shuqing, et al. Studies on agricultural climatic potential productivity and natural resources utilization ratio in Songnen Plain of Heilongjiang Province [J]. Agricultural Meteorology in China, 2005(1): 2-7. (in Chinese)
- [19] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993.
- [20] 刘战东, 肖俊夫, 南纪琴, 等. 播期对夏玉米生育期、形态指标及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(6): 91-94.
LIU Zhandong, XIAO Junfu, NAN Jiqin, et al. Effect of sowing date on growth period, morphology index and yield of summer maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(6): 91-94. (in Chinese)
- [21] 王冬妮, 郭春明, 晏晓英, 等. 吉林省春玉米生产潜力估算及其时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 249-253.
WANG Dongni, GUO Chunming, YAN Xiaoying, et al. Estimation of spring maize production potential in Jilin Province and analysis of its spatiotemporal characteristics [J]. Agricultural Research in the Arid Regions, 2011, 29(3): 249-253. (in Chinese)
- [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 Rongsheng, YU Hailong, HUANG Juying. Climate change in arid zone of central Ningxia and its influence on climate production potential of spring corn [J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(3): 108-114. (in Chinese)
- [23] 葛亚宁, 刘洛, 徐新良, 等. 近50 a 气候变化背景下我国玉米生产潜力时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 784-795.
GE Yanning, LIU Luo, XU Xinliang, et al. The spatial and temporal evolution of maize production potential in China under the background of climate change in the last 50 years [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 784-795. (in Chinese)
- [24] 侯亚兵. 河南省玉米生产潜力及增产途径研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.
HOU Yabing. The studies on the potential productivity and technology approach for increasing yield of maize in Henan Province [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [25] 申锦程. 信阳市平桥区水稻种植气候区划[J]. 中国农学通报, 2016, 32(31): 184-187.
SHEN Jincheng. Climatic regionalization of rice planting: Pingqiao, Xinyang [J]. Chinese Agriculture Bulletin, 2016, 32(31): 184-187. (in Chinese)
- [26] 杜国明, 张露洋, 徐新良, 等. 近50年气候驱动下东北地区玉米生产潜力时空演变分析[J]. 地理研究, 2016, 35(5): 864-874.
DU Guoming, ZHANG Luyang, XU Xinliang, et al. Spatial-temporal characteristics of maize production potential change under the background of climate change in Northeast China over the past 50 years [J]. Geographical Studies, 2016, 35(5): 864-874. (in Chinese)