

气候变化对河南省小麦和玉米 气候资源利用效率的影响

徐延红^{1,2}, 李树岩^{1,3}

(1. 中国气象局 河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 河南 郑州 450003; 2. 洛阳市气象局, 河南 洛阳 471000;
3. 河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003)

摘 要: 基于 1981—2016 年河南省 29 个农业气象试验站逐日气象数据和小麦、玉米产量资料, 分析气候变化背景下小麦、玉米的光、热、水气候资源利用效率, 计算各气候因子对气候资源利用效率的贡献率和气候资源利用率综合指数, 进行气候资源利用效率综合评估。结果表明: 小麦生长季光能资源利用效率 (LUE) 为 $1.14 \sim 1.77 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$, 热量资源利用效率 (HUE) 为 $1.3 \sim 2.5 \text{ kg} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 降水资源利用效率 (PUE) 为 $8 \sim 43 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 玉米生长季内 LUE 为 $1.8 \sim 2.5 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$, HUE 为 $1.32 \sim 1.78 \text{ kg} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, PUE 为 $9.5 \sim 15.1 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。豫北、豫东地区 LUE 、 HUE 、 PUE 均高于豫西、豫南地区。对小麦、玉米气候资源利用效率贡献最大的分别是积温和降水。小麦生长季气候资源利用效率综合指数 (CUE^*) 在 $0.24 \sim 0.50$, 玉米生长季 CUE^* 在 $0.21 \sim 0.31$, 区域内差异明显, 提高小麦 HUE 和玉米 PUE 有助于提高气候资源综合利用效率。

关键词: 气候变化; 小麦; 玉米; 气候资源利用效率; 河南省

中图分类号: S162 **文献标志码:** A

Impact of climate change on climatic resources utilization efficiency of wheat and maize in Henan Province

XU Yan-hong^{1,2}, LI Shu-yan^{1,3}

(1. CMA, Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou, Henan 450003, China;
2. Luoyang Meteorological Bureau, Luoyang, Henan 471000, China;
3. Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: The tempo-spatial characteristics in light utilization efficiency (LUE), heat utilization efficiency (HUE), and precipitation utilization efficiency (PUE) of wheat and maize were studied based on crop production, total solar radiation, accumulated temperature and precipitation during crop growing season from the observed meteorological and crop data at 29 stations during 1981 to 2016 in Henan province. Subsequently, the contribution rates of the changes in climate resource to the change in LUE , HUE and PUE were calculated with the statistical regression method. Finally, climate resource utilization efficiency was comprehensively evaluated. The study results showed that LUE of wheat varied from 1.14 to $1.77 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$, HUE varied from 1.3 to $2.5 \text{ kg} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, and PUE varied from 8 to $43 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Henan province. The LUE of maize varied from 1.8 to $2.5 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$, HUE varied from 1.32 to $1.78 \text{ kg} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ and PUE varied from 9.5 to $15.1 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$. The areas with high values of LUE , HUE and PUE occurred in the northern and eastern parts of Henan, while the low value areas were in the west and south. Accumulated temperature and precipitation were the most important factors affecting climatic resources utilization efficiency of wheat and maize, respectively. Comprehensive Utilization Efficiency Index (CUE^*) of wheat varied from 0.24 to 0.50 , and CUE^* of maize varied from 0.21 to 0.31 , and

收稿日期: 2018-11-07

修回日期: 2019-09-16

基金项目: 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室开放基金项目 (AMF201905); 国家重点研发计划子课题 (2017YFD0300304)

作者简介: 徐延红 (1989-), 女, 江苏如东人, 硕士, 工程师, 主要从事农业气象研究。E-mail: xuyan hong_2011@126.com

通信作者: 李树岩 (1979-), 女, 河北唐山人, 硕士, 正研级高工, 主要从事农业气象研究。E-mail: lsy_126com@126.com

there was a great difference among regions. The improving of *HUE* of wheat and *PUE* of maize helped enhanced comprehensive utilization efficiency of climatic resources.

Keywords: climate change; wheat; maize; utilization efficiency of climate resource; Henan Province

气候资源是农业生产发展的重要环境条件,特别是光、热、水等重要的农业气候资源,直接关系到农业生产^[1-2]。如何科学有效地利用农业气候资源,按照各类农作物生长所需,实现光、热、水等气候因子的最佳组合,提高农业生产效率,最终实现农业气候资源的可持续利用,是农业气候资源研究的最终目标^[3]。多年来,针对作物对气候资源的利用进行了多方面的研究,作物品种涉及广泛,包含了玉米、水稻、小麦、高粱、谷子、大豆和棉花等,形成了多种农业气候资源的利用效率及程度评价的方法和模式^[4-13],为开展河南地区气候资源利用效率评估提供了技术支撑。李夏子^[5],王晓煜^[6]等从产量潜力损失率的角度分析作物对气候资源的利用状况。徐玲玲^[7],Guo J P^[8]等利用气候适宜度理论对一个地区的农业气候资源配置和利用情况进行评价。崔读昌^[9],高涛^[10],辛吉武^[11],钱锦霞^[12],宋梦美^[13],李淑娅^[14]等利用作物干物质或产量与光热水资源的比值,定量评价气候资源利用情况,该方法能够直观反映气候资源对产量的贡献,对合理评价生态气候资源具有重要意义。然而,当前研究多数是分析单一气象要素利用率,较少分析作物对不同气候资源综合利用率的时空分布。

河南省地处黄淮海平原腹地,光热资源丰富,是中国主要的小麦-玉米轮作种植区。其小麦播种面积约占全国小麦面积的 25%,总产量占全国总产的 24%左右,每年向市场提供的商品小麦占全国的 25%~30%,均居全国第一^[15]。玉米作为河南省的第二大作物,面积和总产量约占全国的 10%^[16]。小麦、玉米产量关系到国家粮食安全和人民温饱问题^[17]。河南省地形复杂,横跨第二、三级地貌台阶,包括山地、丘陵、平原和盆地^[18],自然资源地理分布差异较大,加之作物管理水平和技术等方面的限制,使得该区域的农业发展不平衡,粮食作物气候资源利用率区域间分布不均,蕴藏着巨大的潜力。受气候变化影响,近 50a 河南省平均气温呈明显增加趋势,降水量年际间波动增大,时空分配不均,局地干旱、高温、低温冷害等极端气候事件加剧,农业生产的不稳定性增加^[19-20],气候变化对充分合理利用气候资源、保障粮食安全提出了新的要求。因此,通过对河南省农业气候资源利用效率的综合分

析,研究其时空分布的变化特征是指导粮食生产和发展地区经济的需要。本研究选用河南省 29 个农业气象观测站 1981—2016 年气象数据和冬小麦、夏玉米产量数据,分析冬小麦、夏玉米生育期内气候资源变化特征,研究粮食生产的光能、热量和降水资源利用效率的现状和变化规律,对于提高农业气候资源利用效率和粮食产量以及适应未来气候变化具有重要指导意义。

1 资料与方法

1.1 数据来源

气象数据来源于河南省 29 个农业气象观测站,为 1981—2016 年的逐日气象资料,包括平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、降水量,辐射资料由日照时数估算得到^[21]。作物产量数据来源于河南省农业统计年鉴。

1.2 研究方法

1.2.1 光能利用效率 (Light Utilization Efficiency, *LUE*) 作物干物重的 90% 以上来自光合作用,籽粒产量主要取决于光能利用率的高低,即光合产物中贮存的能量占有效辐射能或占太阳总辐射能的百分比。

$$LUE = \frac{Y}{\sum Q} \tag{1}$$

式中,*LUE* 为光能利用率 ($\text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$),*Y* 为粮食作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), $\sum Q$ 为作物生长季内的太阳总辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{hm}^{-2}$),本研究中小麦生长季为 10 月—翌年 5 月,玉米生长季为 6—9 月。

1.2.2 热量利用效率 (Heat Utilization Efficiency, *HUE*) 农业气象学的热量条件以积温表示, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温表示全年生长期的热量条件, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温表示喜温作物生长的热量条件。

$$HUE = \frac{Y}{\sum T} \tag{2}$$

式中,*HUE* 为热量资源利用效率 ($\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$), $\sum T$ 为作物生长季积温 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)。小麦生长季 $\sum T$ 为 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温,玉米生长季 $\sum T$ 为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温。

1.2.3 降水量利用效率 (Precipitation Utilization Efficiency, *PUE*) 降水量利用效率反映降水对粮

食产量形成的贡献,即每生产 1kg 粮食所消耗的自然降水量,本研究忽略了灌溉、地下水供给,并非严格意义上的水分利用效率。

$$PUE = \frac{Y}{\sum R} \tag{3}$$

式中, PUE 为降水资源利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$), $\sum R$ 为作物生长季内总降水量 (mm)。

1.2.4 气候资源利用效率综合指数 (Utilization Efficiency Comprehensive Index, CUE^*)

(1) 各因子对气候资源利用效率的贡献率
对式(1) 两边取对数,得到

$$\ln(LUE) = \ln(Y) + \ln\left(\frac{1}{Q}\right) \tag{4}$$

根据研究区域内每个站点每年作物产量、太阳辐射以及光能利用效率,通过一元线性回归,分别得到近 36 a(1981—2016 年) $\ln(Y)$ 、 $\ln(1/Q)$ 和 $\ln(LUE)$ 的变化趋势及相应的一次线性回归方程,其斜率分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 。辐射变化对光能利用效率变化的贡献率为^[22]

$$C_{QLi} = \frac{k_2}{k_3} \times 100\% \tag{5}$$

$$C_{QL} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{QLi}| \tag{6}$$

式中, i 为站点序号, n 为研究区域内总站点数, C_{QLi} 表示某站点辐射变化对 LUE 变化的贡献率, C_{QL} 为研究区域内所有站点辐射变化对 LUE 变化的平均贡献率, C_{QL} 值越大表示辐射变化对 LUE 变化的贡献越大。

同样,对式(2)、(3) 取对数,用上述方法统计积温、降水量变化对 HUE 、 PUE 变化的贡献,用 C_{TH} 、 C_{RP} 分别表示积温变化对 HUE 变化的平均贡献率、降水量变化对 PUE 变化的平均贡献率。

(2) 气候资源利用效率综合指数

对光能、热量和降水量利用效率的综合评价采用综合利用效率指数。首先对 LUE 、 HUE 和 PUE 作离差标准化处理,使原始值映射到 $[0 \sim 1]$ 之间,记为 LUE^* 、 HUE^* 、 PUE^* ,具体计算公式如下式(7)

$$Z_i = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \tag{7}$$

式中, Z_i 为某要素的标准化值, X_i 为原始要素值, $X_{\max}$ 为某要素序列的最大值, $X_{\min}$ 为某要素序列的最小值。

综合光能、热量和降水量利用效率,定义粮食作物对农业气候资源的综合利用效率指数

CUE^* 为:

$$CUE^* = w_l LUE^* + w_h HUE^* + w_p PUE^* \tag{8}$$

$$w_l = \frac{C_{QL}}{C_{QL} + C_{TH} + C_{RP}} \tag{9}$$

$$w_h = \frac{C_{TH}}{C_{QL} + C_{TH} + C_{RP}} \tag{10}$$

$$w_p = \frac{C_{RP}}{C_{QL} + C_{TH} + C_{RP}} \tag{11}$$

式中, w_l 、 w_h 、 w_p 分别为光能、热量和降水量利用效率的权重系数,根据光、热、水资源变化对气候资源利用效率的贡献率来确定。

2 结果与分析

2.1 气候资源变化特征

2.1.1 太阳总辐射 如图 1 所示,除卢氏站点外,近 36 a 全省太阳总辐射均呈不同程度的减少趋势,小麦生长季平均每 10 a 减少 $56 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,玉米生长季平均每 10 a 减少 $62 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,豫东、豫北地区受人类活动影响,大气能见度降低,辐射资源下降较快;豫西地区多山区,所受影响相对较少,辐射资源下降较慢。

空间分布来看,豫北地区雨日数相对较少,大气透明度高,辐射较强,小麦生长季辐射在 $3\ 175 \sim 3\ 215 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,玉米生长季大部分地区辐射在 $2\ 250 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。豫南、豫东地区阴雨日数较多,大气透明度降低,太阳辐射较少,小麦生长季辐射为 $3\ 115 \sim 3\ 155 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,玉米生长季辐射在 $2\ 230 \sim 2\ 250 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。豫西、豫西南受地形影响,辐射资源亦较低,小麦生长季辐射资源多在 $3\ 055 \sim 3\ 095 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,玉米生长季辐射资源多在 $2\ 200 \sim 2\ 230 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,其中内乡站点辐射资源为全省最低。

2.1.2 积温 在全球变暖的背景下,河南省作物生长季的热量条件呈不同程度的上升趋势(图 2)。小麦生长季 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的积温倾向率为 $52 \sim 151^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,其中豫西北、驻马店和南阳地区增幅较大,增速在 $100^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 以上。玉米生长季, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温增加速率集中在 $7 \sim 47^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,伊川、郑州站点增加幅度最为明显,气候倾向率达 $87^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

由于地形、地貌以及大气环流条件的不同,热量资源空间分布差异较大,表现为北部少于南部,丘陵山区少于平原地区。小麦生长季 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温在 $1\ 850 \sim 2\ 450^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,豫南、豫中地区热量资源丰富,积温在 $2\ 250^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 以上,豫西、豫北地区积温低于 $2\ 150^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。玉米生长季 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温在 $2\ 600 \sim 3\ 040^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 范围内变化,豫西、豫北北部热量资源相

对匮乏,积温低于 2 920℃ · d,信阳地区高达3 040℃ · d,其他大部地区集中在 2 960~3 000℃ · d。

2.1.3 降水量 如图 3 所示,小麦生长季降水量变化气候倾向率为-1 mm · 10a⁻¹,玉米生长季降水量变化气候倾向率为-3 mm · 10a⁻¹,均未通过 0.05 的信度检验($P>0.05$)。降水量变化趋势空间分布不一致,小麦生长季,豫北、豫中以及信阳地区降水量

呈减少趋势,东部的商丘、周口、南部的驻马店、南阳东部降水量增加明显,气候倾向率为 6~15 mm · 10a⁻¹。玉米生长季,豫西、豫东南降水量呈减少趋势,豫北、豫东降水量有所增加,其中伊川、三门峡、汝州、巩义减少速率在 20 mm · 10a⁻¹以上,为全省降水量减少最明显的区域,新乡、商丘增加速率在 20 mm · 10a⁻¹以上,为全省降水增加较明显的地区。

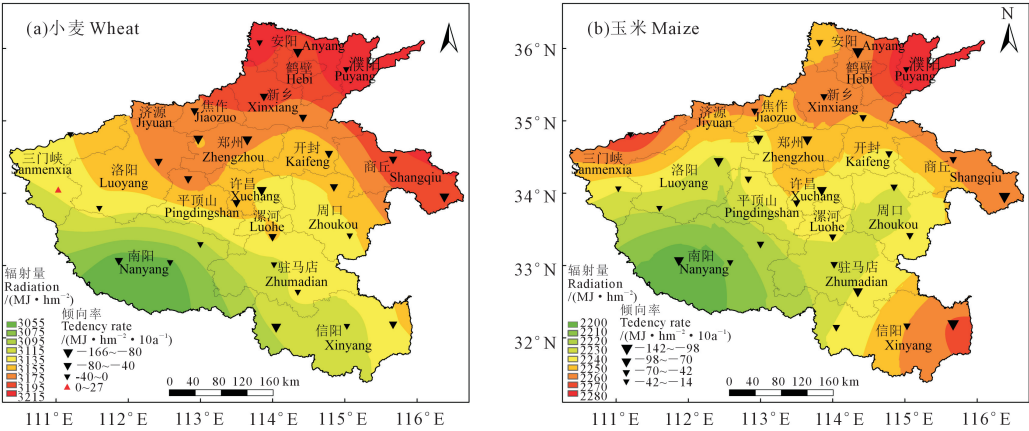


图 1 小麦、玉米生长季太阳总辐射的分布

Fig.1 Distribution of total solar radiation during wheat and maize growing seasons

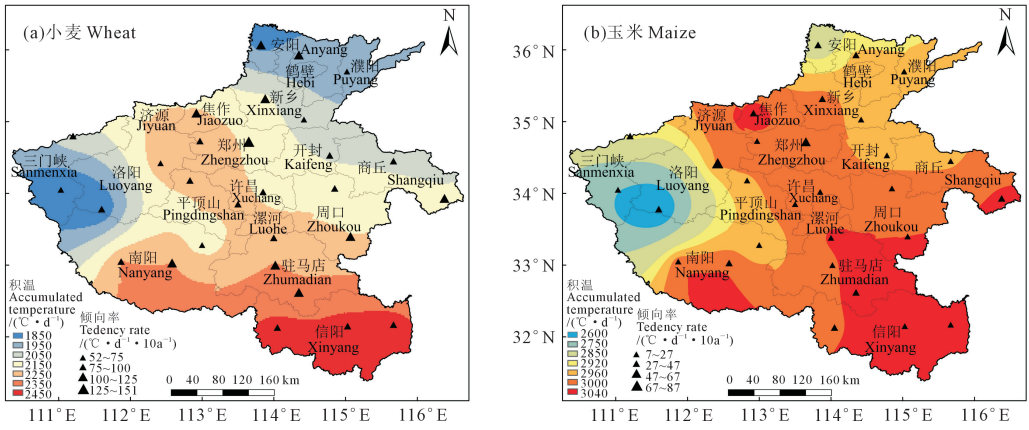


图 2 小麦、玉米生长季积温的分布

Fig.2 Distribution of accumulated temperature during wheat and maize growing season

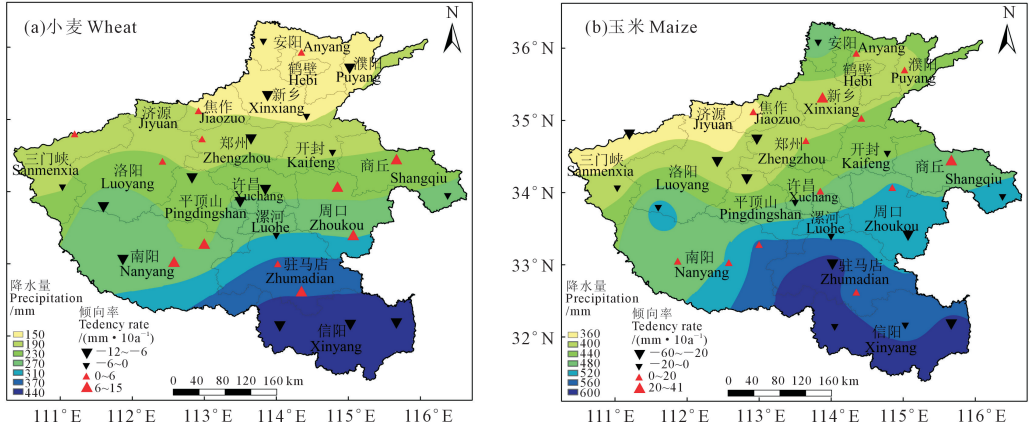


图 3 小麦、玉米生长季降水量的分布

Fig.3 Distribution of precipitation during wheat and maize growing seasons

受季风气候影响,加之地理条件复杂,河南省降水量水平及垂直差异显著。小麦生长季降水总量在 150~440 mm,由北向南明显递增,开封-郑州-洛阳-三门峡连线以北降水量在 230 mm 以下,最大降水中心位于信阳,降水量达 440 mm。玉米生长季降水总量在 360~600 mm,豫西北降水量低于 400 mm,为我省降水量的低值区,豫南地区降水量较充沛,达 520 mm 以上。

2.2 气候资源利用效率的时空分布

2.2.1 光能利用效率 全省光能利用效率如图 4 所示,小麦生长季,在辐射和产量变化的共同作用下,除三门峡外,其他 28 个站点小麦 *LUE* 呈显著增加趋势($P<0.05$)。焦作-许昌-驻马店连线以东地区,*LUE* 增幅较大,气候倾向率在 0.35~0.65 kg·MJ⁻¹·10a⁻¹。玉米生长季,除三门峡站点 *LUE* 不显著增加外,其余站点 *LUE* 均呈显著增加趋势($P<0.05$),增加速率为 0.12~0.83 kg·MJ⁻¹·10a⁻¹。

河南省小麦平均光能利用率为 1.48 kg·MJ⁻¹,而玉米达到 2.27 kg·MJ⁻¹,超过世界陆地植物平均光能利用率 1.69 kg·MJ⁻¹的水平^[21]。从分布图上可以看出(图 4),区域间差异也较大,表现为豫东北、豫东平原>豫中部>豫西丘陵旱地、淮南。豫东北、豫东平原光能利用率最高,小麦达 1.77 kg·MJ⁻¹以上,玉米达 2.50 kg·MJ⁻¹;豫中、豫西北、豫东南居中,小麦 *LUE* 在 1.50~1.68 kg·MJ⁻¹,玉米在 2.10~2.40 kg·MJ⁻¹;豫西、豫西南小麦 *LUE* 在 1.32 kg·MJ⁻¹以下,玉米不超过 1.90 kg·MJ⁻¹。小麦平均光能利用率大部分集中在 1.32~1.68 kg·MJ⁻¹范围内,玉米集中分布在 2.00~2.40 kg·MJ⁻¹。

2.2.2 热量利用效率 如图 5 所示,小麦生长季,除三门峡、巩义、郑州、林州外,其余站点 *HUE* 显著增加,气候倾向率为 0~0.69 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²·10a⁻¹。玉米生长季,除卢氏站点外,其余站点 *HUE* 均显著增加,气候倾向率为 0.04~0.46 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²·10a⁻¹。

空间上,热量利用效率并不随热量资源的多寡而呈现规律性的变化(图 5)。小麦生长季,热量利用效率在 1.30~2.50 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²,呈现北高南低、东高西低的特点。淮河以南虽热量丰富,但小麦产量不高,热量资源利用效率低,信阳 *HUE* 为 1.30 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²。旱区由于缺水,热量资源利用效率低于灌区。豫西、豫西南热量资源利用效率在 1.70 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²以下,豫东商丘、开封、周口,以及豫东北濮阳、安阳、新乡 *HUE* 较高,达 2.3 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²。玉米生长季,*HUE*

在 1.32~1.78 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²范围,呈西南向东北递增的特征。豫东北、豫东热量利用效率较高,达 1.72 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²以上。中部、西北部热量资源较为丰富,但常常因为水分限制,热量资源不能充分利用,*HUE* 为 1.48~1.64 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²。豫西、豫西南地区 *HUE* 为全省最低,数值在 1.32~1.40 kg·℃⁻¹·d⁻¹·hm⁻²。

2.2.3 降水量利用效率 如图 6 所示,小麦生长季,全省 *PUE* 气候倾向率在 0.5~10.1 kg·mm⁻¹·hm⁻²·10a⁻¹之间,79%的站点增加趋势显著,其中封丘、濮阳站点变化最为明显,*PUE* 增速达 7.5 kg·mm⁻¹·hm⁻²·10a⁻¹。玉米生长季,*PUE* 气候倾向率在 0.5~3.6 kg·mm⁻¹·hm⁻²·10a⁻¹之间,卢氏、郑州站点虽产量显著增加,但降水量变化不显著,两者作用导致 *PUE* 变化不显著,其余站点均显著增加($P<0.05$)。经统计,河南省小麦、玉米平均降水量利用效率分别高达 20.6、11.8 kg·mm⁻¹·hm⁻²,均高于全国平均水平^[23]。

从空间分布上看,降水量利用效率的高低和降水量密切相关,表现为由北部向南部逐渐减小的趋势。淮河以南降水量丰富,相对小麦需水量而言,为水分盈余区。由于阴雨多、光照不足等小麦生产限制因子,该区小麦 *PUE* 在 8 kg·mm⁻¹·hm⁻²以下,为降水量利用效率最低的区域。豫西南浅山丘陵地区,小麦 *PUE* 在 13 kg·mm⁻¹·hm⁻²以下,玉米 *PUE* 在 10.5 kg·mm⁻¹·hm⁻²以下。中部地区小麦 *PUE* 集中在 18~28 kg·mm⁻¹·hm⁻²,玉米在 10.5~13.5 kg·mm⁻¹·hm⁻²。豫北为半湿润易旱气候区,水分亏缺量大,但由于灌溉条件较好,气候资源协同作用,降水量利用效率较高,小麦 *PUE* 超过 33 kg·mm⁻¹·hm⁻²,玉米达 14.5 kg·mm⁻¹·hm⁻²。

2.3 气候资源利用效率综合指数及评估

2.3.1 气候资源利用效率的贡献率 计算 1981—2016 年各气象因子变化对气候资源利用效率变化的影响程度,结果见表 1。由表中可见,小麦季研究区域内总辐射变化对光能利用效率升高的平均贡献率 *C_{QL}* 为 10%,玉米季辐射变化的贡献率 *C_{QL}* 为 15%。小麦季温度变化对热量利用效率的贡献率 *C_{TH}* 为 30%,玉米 *C_{TH}* 为 6%,温度变化对小麦气候资源利用效率变化的影响程度高于玉米,这是由于玉米季温度升高的幅度较小麦季不明显,且玉米生长的积温需求比小麦高得多,热量增加对玉米生产的影响相对小麦较小。小麦季降水量变化对降水量利用效率的贡献率 *C_{RP}* 为 20%,低于玉米生长季 *C_{RP}* (30%)。不同气象要素变化对相应资源利用率变化

表 1 光、温、水因子对气候资源利用效率变化的贡献率

Table 1 Contribution rates of the changes in radiation, temperature and precipitation to the changes of climate resources utilization		
贡献率 Contribution rate	小麦 Wheat/%	玉米 Maize/%
C_{QL}	10	15
C_{TH}	30	6
C_{RP}	20	30

的影响程度不同,温度变化对小麦 HUE 增加的贡献率最大,降水次之,辐射最小;玉米季贡献率依次为降水>辐射>积温。贡献率除了受光、热、水资源自身增加或减少的速率影响外,还与农业生产对气候要素变化的敏感性相关,如玉米生长季豫西、豫北北部干旱地区对水资源的变化更为敏感,表现为该地区降水量变化的贡献率高于光、热要素;小麦生长季豫北地区温度变化的贡献率又高于光、水资源的贡献率。

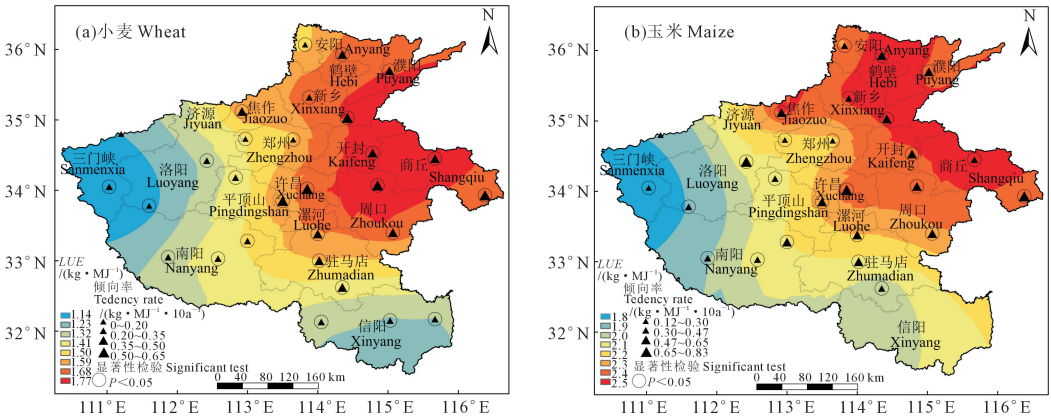


图 4 小麦、玉米生长季光能利用效率分布图

Fig.4 Distribution of light utilization efficiency during wheat and maize growing seasons

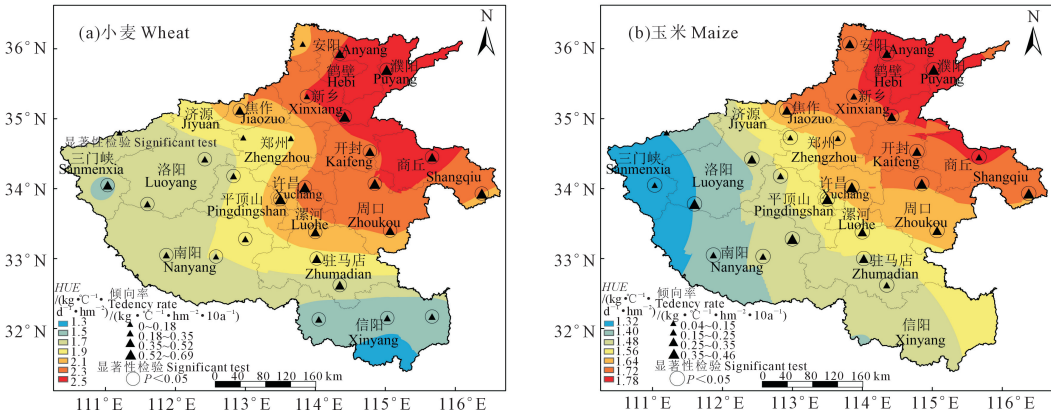


图 5 小麦、玉米生长季热量利用效率分布图

Fig.5 Distribution of heat utilization efficiency during wheat and maize growing seasons

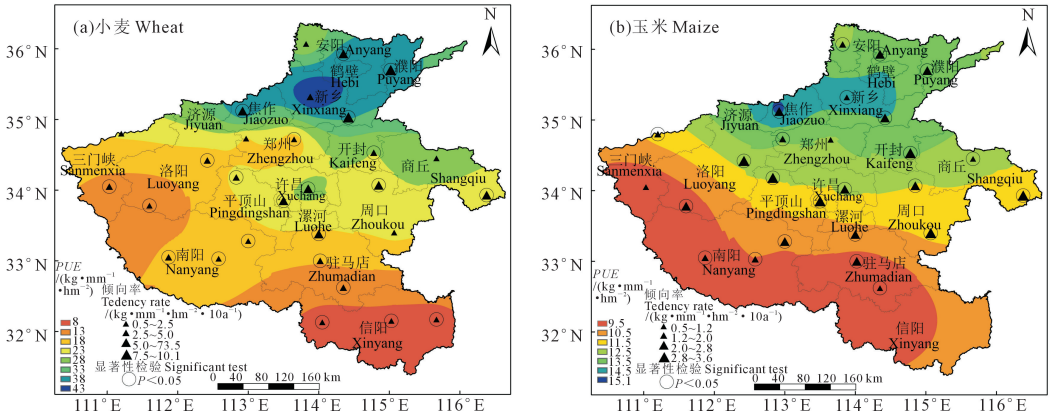


图 6 小麦、玉米生长季降水量利用效率分布图

Fig.6 Distribution of precipitation utilization efficiency during wheat and maize growing seasons

2.3.2 气候资源利用效率综合指数 根据各气象因子的贡献率及小麦、玉米季的气候资源利用效率,计算气候资源利用效率综合指数,如图 7 所示,小麦生长季的气候资源利用效率综合指数呈增加趋势,气候倾向率为 $0 \sim 0.15 \cdot 10a^{-1}$,除三门峡、巩义、郑州、林州外,其余站点均通过 0.05 显著性检验 ($P < 0.05$),60% 站点利用效率综合指数 CUE^* 变化集中在 $0.05 \sim 0.10 \cdot 10a^{-1}$ 。玉米生长季,研究区域内所有站点 CUE^* 均呈显著增加趋势 ($P < 0.05$),气候倾向率为 $0.03 \sim 0.09 \cdot 10a^{-1}$,其中开封、汝州、襄城、伊川、周口、永城站点增加趋势最为明显,气候倾向率为 $0.07 \sim 0.09 \cdot 10a^{-1}$ 。

从空间分布上看,河南省小麦对光、温、水气候

资源的利用效率综合指数分布在 $0.24 \sim 0.50$,呈西南向东北递增的趋势,濮阳、安阳东部、鹤壁、新乡综合利用效率较高,为 0.50 。三门峡、洛阳、南阳、信阳综合利用效率较低,为 $0.24 \sim 0.31$ 。中部地区 CUE^* 集中在 $0.35 \sim 0.47$ 。这一趋势与作物生长季内积温利用效率的空间分布特征一致。玉米气候资源利用效率综合指数为 $0.21 \sim 0.31$,与降水量利用效率的相关性最高,呈北高南低、东高西低的特征,高值区分布在豫北焦作、新乡、鹤壁、安阳,低值区分布在三门峡、洛阳、南阳、驻马店。未来分别提高小麦热量利用效率和玉米降水量利用效率有助于获得较高的气候资源利用效率综合指数。总体上,小麦气候资源综合利用效率高于玉米。

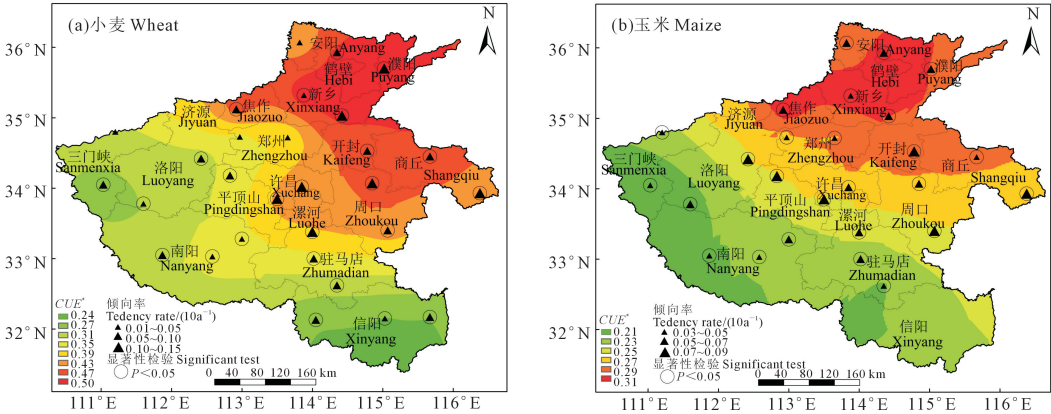


图 7 小麦、玉米生长季气候资源利用效率综合指数分布图

Fig.7 Distribution of comprehensive utilization efficiency index during wheat and maize growing seasons

3 讨 论

1)不同地区不同作物的气候资源利用效率不同,玉米积温、降水利用效率以及综合指数低于小麦,而光能利用效率高于小麦,从区域上来看,豫东北光、热、水资源利用率普遍高于豫西南,这与光照、热量、水分等条件、不同作物本身的生物学特性以及当地的生产力水平等多因素相关。高涛等^[24]研究认为内蒙古粮食作物平均热量利用效率 $\geq 0^{\circ}C$ 达 $0.74 \text{ kg} \cdot ^{\circ}C^{-1} \cdot d^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\geq 10^{\circ}C$ 达 $0.85 \text{ kg} \cdot ^{\circ}C^{-1} \cdot d^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,降水利用率为 $6.47 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。钱锦霞等^[12]认为山西省玉米平均光能利用率为 $1.46 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$,热量利用效率为 $1.37 \text{ kg} \cdot ^{\circ}C^{-1} \cdot d^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,降水量利用效率为 $12.28 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。王晓煜等^[6]对气候变化背景下东北三省主要粮食作物的气候资源利用效率研究表明,玉米对气候资源利用效率高于高粱、水稻、谷子、春小麦,其光能利用率达 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。与前人研究相比,河南地区小麦、玉米的光、热、水资源利用效率明显为高,但区域间差异更明显。

2)本文在研究小麦、玉米光、热、水单项利用率

时空变化特征的基础上,分析辐射、积温、降水量变化对 LUE 、 HUE 、 PUE 变化的贡献,并用指数化处理方法计算了光、热、水综合利用效率,与前人研究相比^[9-14],从气候角度探讨了资源利用率变化原因,反映气候变化对资源利用率的影响程度,为河南省作物合理利用光、热、水资源,挖掘高产潜力,粮食作物的合理布局以及适应未来气候变化提供理论指导。但是本文只考虑了自然降水影响,而灌溉是河南省大部分地区农作物生产的重要水分来源,因此计算的水分利用效率与实际情况有一定的差距,有待今后进一步完善。

3)气候变暖对河南省夏玉米-冬小麦种植模式产量的影响既是机遇又是挑战。温度升高使夏玉米-冬小麦轮作系统茬口时间出现一定时间的延长^[25],可以选择适合早播、生育期长的夏玉米品种,调整玉米、小麦的播期和种植结构,提高气候资源利用效率。目前,土地资源、水资源、养分资源等减少,土壤质量退化等问题制约着农业的可持续发展^[26]。从农业气候资源开发利用来看,设施农业可以人为控制农业生物生长发育所需要的生态条件,复种指数高,可大幅提高资源利用效率,实现资源

替代。另一方面,河南省地形复杂,山地丘陵在 40%左右,这部分土地气候资源丰富多样,为农林牧综合发展、特色农业提供了优越条件,因此,在深度挖掘耕地农业气候资源潜力的同时,可注重非耕地农业气候资源的开发利用。

4 结 论

全球气候变化背景下,河南省 1981—2016 年太阳总辐射呈逐渐减少的变化趋势,小麦生长季平均每 10 a 减少 56 MJ · m⁻²,玉米生长季平均每 10 a 减少 62 MJ · m⁻²,空间分布不均。热量资源表现为全省一致的增加趋势,小麦生长季≥0℃的积温气候倾向率为 52~151℃ · d · 10a⁻¹,玉米生长季≥10℃的积温气候倾向率为 7~87℃ · d · 10a⁻¹,豫南、豫中热量资源丰富,豫西、豫北地区相对匮乏。降水量总体变化趋势不显著,空间上由北向南递增。

1981—2016 年除三门峡站点外,河南省光能利用效率呈显著增加趋势($P<0.05$),小麦生长季 LUE 在 1.14~1.77 kg · MJ⁻¹,玉米生长季 LUE 在 1.8~2.5 kg · MJ⁻¹,空间分布表现为豫东、豫东北>豫中、豫西北、豫东南>豫西、豫西南。小麦、玉米生长季 HUE 分别为 1.3~2.5 kg · °C⁻¹ · d⁻¹ · hm⁻²和 1.32~1.78 kg · °C⁻¹ · d⁻¹ · hm⁻²,呈北高南低、东高西低的特点。小麦季 PUE 为 8~43 kg · mm⁻¹ · hm⁻²,玉米季 PUE 为 9.5~15.1 kg · mm⁻¹ · hm⁻²,存在一定的纬向差异,豫东北、豫东是降水资源利用效率的高值区,三门峡、洛阳、南阳、信阳地区较低。

在光、热、水资源共同作用下,河南省气候资源利用效率综合指数呈增加趋势,增加速率分别为 0~0.15 10a⁻¹(小麦)、0.03~0.09 10a⁻¹(玉米)。从区域上看,小麦利用效率综合指数分布在 0.24~0.50,温度变化对 HUE 增加的贡献率最大,提高热量利用率有助于增加小麦气候资源利用效率综合指数。玉米生长季利用效率综合指数分布在 0.21~0.31,降水量变化对资源利用率变化的影响大于积温和辐射,提高降水资源利用率有利于增加玉米气候资源的综合指数。豫北的光、热、水综合利用效率为全省的高值区,西部和南部地区为全省的低值区,农业气候资源利用率的潜力较大。

参 考 文 献:

[1] Zhao J, Yang X G. Average amount and stability of available agro-climate resources in the main maize cropping regions in China during 1981—2010 [J]. Journal of Meteorological Research, 2018, 32(1): 146-156.

[2] Bellon M R, Hodson D, and Hellin J. Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of

America, 2011, 108(33):13432-13437.

[3] 韩湘玲. 农业气候学[M]. 山西:山西科学技术出版社,1999:28-36.

[4] Verma R K, Chauhan A, Verma R S, et al. Improving production potential and resources use efficiency of peppermint (*Mentha piperita* L.) intercropped with geranium (*Pelargonium graveolens* L. Herit ex Ait) under different plant density [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 44:577-582.

[5] 李夏子,郭春燕,杨 晶,等. 气候变化对内蒙古牧草生产潜力的影响[J]. 中国农学通报,2018,34(16):106-114.

[6] 王晓煜,杨晓光,孙 爽. 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.

[7] 徐玲玲,吕厚荃,方利. 气候变化对黄淮海地区夏玉米气候适宜度的影响[J]. 资源科学,2014,36(4):782-787.

[8] Guo J P, Zhao J F, Xu Y H, et al. Effects of adjusting cropping systems on utilization efficiency of climatic resources in Northeast China under future climate scenarios [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2015, 87-88:87-96.

[9] 崔读昌. 世界谷物产量与农业气候资源利用率[J]. 自然资源学报, 1995,10(1):85-94.

[10] 高 涛,于 晓,李海英. 内蒙古粮食作物对光能利用率的分布特点[J]. 华北农学报,2003,18(1):103-106.

[11] 辛吉武,蒲金涌,马鹏里. 西北旱作区不同种植方式气候资源利用效率的定量评价—以天水市为例[J]. 华北农学报,2007,22(增刊):156-159.

[12] 钱锦霞,胡良温. 山西省玉米气候资源利用效率分析[J]. 玉米科学,2008,16(4):192-195.

[13] 宋梦美,安萍莉,江丽. 1993—2013 年吉林省主粮作物种植布局及其水热资源利用效率评估[J]. 资源科学,2017, 39(3):501-512.

[14] 李淑娅,田少阳,袁国印,等. 长江中游不同水稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究[J]. 作物学报,2015,41(10):1537-1547.

[15] 王绍中,王志和,田云峰等. 河南省小麦产业发展与展望[J]. 河南农业科学,2004,(7):27-29.

[16] 张新,王振华,张前进,等. 河南省玉米育种现状、问题及对策[J]. 河南农业科学,2010,44(6):22-26.

[17] 解宗方,栗娟,常建国. 河南省小麦—玉米两熟均衡增产技术探讨[J]. 河南农业科学,2011,40(8):87-88,103.

[18] 刘荣花,赵国强. 现代农业气象服务手册[M]. 北京:气象出版社, 2014:1-2.

[19] 褚荣浩,申双和,吕厚荃,等. 气候变化情景下黄淮海冬麦区农业气候资源变化特征[J]. 科学技术与工程,2015;15(26):1-10,18.

[20] 李树岩,方文松,马志红. 河南省夏玉米生长季农业气候资源变化分析[J]. 河南农业科学,2012,41(7):21-26.

[21] Wang J, Wang E, Yin H, et al. Differences between observed and calculated solar radiations and their impact on simulated crop yields [J]. Field Crops Research, 2015, 176:1-10.

[22] 常清,王靖,余卫东,等. 河南省小麦—玉米轮作系统光能利用率时空分布及其变化原因分析[J]. 中国农业气象,2016, 37(3): 316-325.

[23] 崔读昌. 中国粮食作物气候资源利用效率及其提高的途径[J]. 中国农业气象,2001,22(2):25-32.

[24] 高涛,于晓,李海英. 内蒙古粮食作物热量和降水资源利用效率的分布特点[J]. 华北农学报,2003,18(2):99-102.

[25] 孙新素,龙致炜,宋广鹏. 气候变化对黄淮海地区夏玉米—冬小麦种植模式和产量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(13):2476-2487.

[26] 王宜伦,苗玉红,韩燕来,等. 河南省农业资源利用探析[J]. 中国农学通报,2007;23(1):152-155.