

引用格式:常清,王靖,余卫东,等.河南小麦-玉米轮作系统热量利用率时空分布[J].资源科学,2019,41(6):1176–1187. [Chang Q, Wang J, Yu W D, et al. Spatiotemporal variation and potential of heat use efficiency of wheat-maize rotation system in Henan Province[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1176–1187.] DOI: 10.18402/resci.2019.06.16

# 河南小麦-玉米轮作系统热量利用率时空分布

常清<sup>1,2</sup>,王靖<sup>1</sup>,余卫东<sup>3</sup>,张宁<sup>4</sup>,李孟蔚<sup>5</sup>,李文科<sup>6</sup>,黄明霞<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193;2. 山西省气象服务中心,太原 030002;3. 中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点实验室,郑州 450003;4. 山西省气象信息中心,太原 030002;5. 山西省气候中心,太原 030002;6. 山东省气象服务中心,济南 250000)

**摘要:**为研究河南省小麦、玉米及其轮作系统热量利用率的时空变化规律,因地制宜地提出挖掘河南省不同区域热量潜力和提升热量利用率的有效措施,本文利用河南省17个农业气象观测站1981—2014年的气象资料及小麦和玉米的生长发育资料,统计分析河南省不同区域小麦、玉米及小麦-玉米轮作系统的热量分布及其利用率的时空变化特征,剖析了其区域差异及形成原因。结果表明:1981—2014年,不同年代小麦-玉米轮作系统生育期在豫北略增加、在豫东呈增—减—增变化特征、在豫西缩短、在豫南则先减后增;河南省各区域小麦和玉米生育期所需有效积温均呈增加趋势,是各区域适应气候变化、提高热量利用率而选用中晚熟品种的结果;小麦和玉米潜在与实际有效积温差南高北低,且小麦有效积温差升高,玉米有效积温差降低,表明玉米热量利用程度高于小麦热量利用程度;在小麦和玉米潜在与实际有效积温的共同变化下,小麦-玉米轮作系统有效积温差在豫南和豫东大部较高,而热量利用率北高南低,东高西低,但均呈升高趋势,表明河南大部分地区小麦-玉米轮作系统热量利用率有明显提升,但在豫南和豫东仍存在较大的提升潜力,今后应着重提高该区的热量利用率。

**关键词:**热量利用率;生育期;小麦-玉米轮作系统;潜在有效积温;实际有效积温;河南省

DOI: 10.18402/resci.2019.06.16

## 1 引言

华北平原是中国重要的小麦和玉米生产区域<sup>[1]</sup>,其中河南省地位尤为重要<sup>[2]</sup>。河南省商品小麦的市场年输出量占全国的25%~30%,玉米种植面积和产量分别占全国的8.9%和8.5%<sup>[3]</sup>。河南省地势西高东低,光热资源丰富,冬季适宜小麦生长,夏季适宜玉米生长<sup>[4]</sup>,因此其主要种植制度为小麦-玉米轮作,相较于一年一熟或两年三熟,这种种植方式不仅能提高水分利用效率、促进粮食增产,而且有利于光、温等农业气候资源的充分利用<sup>[4-7]</sup>。研究该种植方式下热量利用率(HUE)的时空变化及其提升潜力,对充分利用光热气候条件、提高作物生长发育与热量资源的吻合度等具有重要意义。

作物生长发育需要一定的热量条件。积温是作物生育期日有效温度的累积(单位为 $^{\circ}\text{Cd}$ ),作物全生育期所需有效积温是反映作物品种熟型的重要指标。HUE是指单位土地面积上作物产量与全生育期所需有效积温之比<sup>[8]</sup>,用于评价一个地区的热量资源利用水平。崔读昌<sup>[9]</sup>指出,世界范围内HUE分布极不平衡,如北欧的荷兰和瑞典HUE达 $2.0 \text{ kg} \cdot (^{\circ}\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,而非洲东北部的苏丹和亚洲西南部的也门HUE则低于 $0.1 \text{ kg} \cdot (^{\circ}\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ 。中国粮食作物的HUE区域差异也很明显<sup>[10]</sup>,如东北地区HUE为 $1.4 \text{ kg} \cdot (^{\circ}\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,华北平原为 $1.0 \text{ kg} \cdot (^{\circ}\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,长江中下游为 $0.87 \text{ kg} \cdot (^{\circ}\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,干旱半干旱地区为 $0.86 \text{ kg} \cdot (^{\circ}\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,西南地区为

收稿日期:2018-08-04,修订日期:2018-11-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300105;2017YFD0300404)。

作者简介:常清,女,山西人,助理工程师,主要研究领域为专业气象服务。E-mail: changqing707448911@163.com

通讯作者:王靖,男,内蒙古乌兰察布人,副教授,博士生导师,主要研究领域为气候变化与农业生产系统模拟。E-mail: wangj@cau.edu.cn

2019年6月

$0.65 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ , 华南地区为  $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ 。总体上, 中国 HUE 北方高于南方, 热量资源丰富的地区 HUE 较低。研究表明, 同种作物 HUE 在不同区域也存在较大差异, 如刘晓迎<sup>[11]</sup>计算得到 1983—2014 年豫北沁阳夏玉米 HUE 平均为  $4.0 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ , 而钱锦霞等<sup>[8]</sup>计算的山西省玉米 HUE 为  $1.37 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ 。此外, 作物类型<sup>[11]</sup>和种植方式<sup>[12]</sup>对 HUE 也有较大影响。

当前对 HUE 的研究多数是基于小麦或玉米等单种作物, 而对小麦-玉米轮作系统的热量资源时空变化及其利用潜力尚不明确, 缺乏系统性和定量化研究, 以小麦-玉米轮作为主要种植制度的河南省 HUE 区域差异较大, 区域间热量资源提升潜力不同<sup>[13]</sup>。本文在河南省作物区划基础上, 分析不同区域 1981—2014 年小麦、玉米及其轮作系统的生育期变化规律, 并对作物潜在和实际有效积温及作物热量利用率时空分布特征进行研究, 定量化评价河南省热量资源的利用程度及提升潜力, 以期河南省乃至华北平原热量资源的优化配置、作物生产潜力的挖掘及热量资源利用效率的提高提供理论支撑。

## 2 研究区概况、数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

河南省位于中国中部偏东, 黄河中下游, 介于  $110^{\circ}21'E-116^{\circ}39'E$ 、 $31^{\circ}23'N-36^{\circ}22'N$  之间, 地势西高东低, 东部属于黄淮海平原。该区为大陆性季风气候, 雨热同季<sup>[14]</sup>, 年平均气温为  $12\sim 15^{\circ}\text{C}$ <sup>[13]</sup>, 年平均降水量  $500\sim 900 \text{ mm}$ <sup>[15]</sup>, 无霜期约为  $190\sim 230 \text{ d}$ <sup>[16]</sup>, 是中国主要的小麦-玉米轮作系统种植区<sup>[17]</sup>。小麦生长期  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温为  $1700\sim 2800^{\circ}\text{Cd}$ <sup>[18]</sup>, 玉米生长期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温为  $2100\sim 2700^{\circ}\text{Cd}$ <sup>[4]</sup>。

根据农业气候特点, 本文的研究区域分为豫北(I), 豫西(II), 豫东(III)和豫南(IV), 包括 17 个研究站点, 研究区域 V 为水稻种植区<sup>[19]</sup>。其中豫北包括汤阴、濮阳、新乡、沁阳和封丘; 豫西包括三门峡、卢氏、伊川和汝州; 豫东包括杞县、商丘、黄泛区、沈丘和驻马店; 豫南包括内乡、南阳和方城(图 1)。

### 2.2 数据来源与研究方法

#### 2.2.1 数据来源及作物有效积温、有效积温差和热量利用率

河南省 17 个研究站点 1981—2014 年逐日平均气温资料来自中国气象局国家气象信息中心, 用于

计算作物潜在和实际有效积温及有效积温差。潜在有效积温为作物潜在生长季内的有效积温, 为便于比较, 本文统一设定小麦为上年 10 月—翌年 5 月  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  的有效积温, 玉米为 6 月—9 月  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的有效积温, 小麦-玉米轮作系统潜在有效积温为两者之和。实际有效积温为作物实际生长期内的有效积温, 小麦为其实际生长期内  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  的有效积温, 玉米为其实际生长期内  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的有效积温, 小麦-玉米轮作系统实际有效积温为两者之和。有效积温差指潜在有效积温减去实际有效积温, 反映热量资源的利用程度。

小麦和玉米的实际生长期和产量资料来自于河南省农业气象观测站。小麦和玉米的实际生长期为其播种到成熟日期间的时间段(表 1), 用于计算作物的实际有效积温。小麦生长期均在 10 月—翌年 6 月之间, 玉米生长期除汤阴和濮阳平均播种期在 5 月下旬、卢氏成熟期在 10 月 1 日外, 各站玉米生长期均在 6 月—9 月之间。作物实际有效积温与小麦和玉米产量用于计算作物的 HUE ( $\text{kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ )。

作物热量利用率由下式计算:

$$HUE = \frac{Y}{\sum_{i=1}^k T_i} \quad (1)$$

式中:  $Y$  为作物实际产量 ( $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2)^{-1}$ );  $T_i$  为作物生

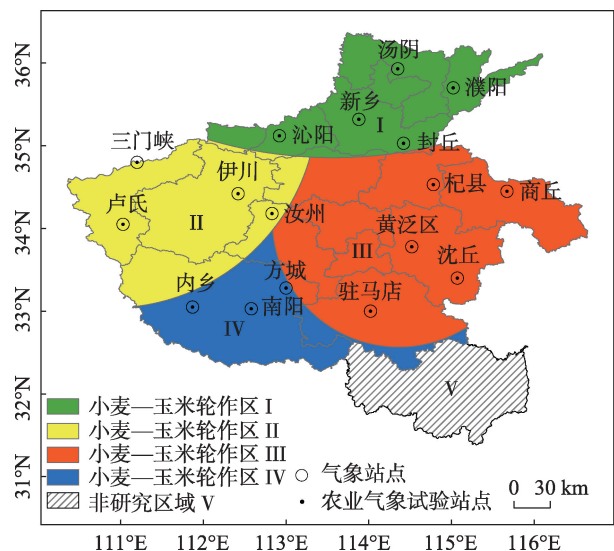


图 1 河南省小麦-玉米轮作系统研究分区和研究站点

Figure 1 Study division of wheat-maize rotation system and distribution of study sites in Henan Province

长期内第*i*日实际有效积温,为各区域小麦和玉米实际生长期日平均气温减去其生长下限温度(小麦和玉米分别为0°C和10°C)(表1);*k*为小麦和玉米生长期的日数。

### 2.2.2 变化趋势和显著性检验

线性回归是数理统计中一种简单的回归分析方法,常采用最小二乘法拟合,用于表示因变量与自变量之间的线性相关关系,该方法简单、方便,可以准确计量各因素之间的相关程度及回归拟合程度的高低,在实际中得到广泛应用。本文采用一元线性回归分析法分析小麦、玉米及其轮作系统潜在与实际有效积温、有效积温差及热量利用率随时间的变化趋势<sup>[20]</sup>,计算公式为:

$$y = at + b \quad (2)$$

式中:*t*表示要素所对应的年序;*a*为回归系数,表示要素多年变化趋势,正值表示呈增加趋势,负值表示呈减少趋势;*b*为常数项。采用F检验对回归系数*a*进行显著性检验( $P < 0.05$ 为变化显著)。

### 2.2.3 空间插值

反距离加权插值(Inverse Distance Weighting, IDW)是ArcGIS中一种常用而简单的空间插值方

法,它以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本赋予的权重越大。此种方法简单易行、直观、效率高,常用于站点尺度向区域尺度的转化<sup>[21]</sup>。相较于克里金插值等其他方法,该插值法在已知点分布均匀的情况下插值效果好,插值结果在插值数据的最大值和最小值之间,但缺点是易受极值的影响。河南省地势平坦、气温等气象要素空间变化幅度较均匀,极值情况不易发生,且研究站点在空间上分布较均匀,适用反距离加权插值法,因此本文采用该方法对研究区域各站点数值进行插值,得到各要素空间分布特征和变化趋势。

## 3 结果分析

### 3.1 小麦、玉米及其轮作系统实际生育期长度及其年代际变化

小麦生育期长度随纬度升高而增加,玉米则无明显空间分布规律。在各区域小麦和玉米生育期长度变化的共同影响下,不同年代小麦-玉米轮作系统生育期长度变化特征为:豫北略增加、豫东呈增—减—增变化特征、豫西呈缩短趋势、豫南呈先减后增变化趋势(图2)。

小麦生育期长度豫北为234~239 d,豫东为

表1 研究区域不同站点小麦和玉米实际生长期

Table 1 Actual growth period of wheat and maize at the study sites in Henan Province

区域	站点	小麦		玉米	
		播种日期	成熟日期	播种日期	成熟日期
豫北	汤阴	10月8日	5月28日	5月26日	9月16日
	濮阳	10月10日	6月5日	5月23日	8月25日
	新乡	10月10日	6月1日	6月5日	9月14日
	封丘	10月12日	6月6日	6月6日	9月17日
	沁阳	10月8日	5月30日	6月4日	9月9日
豫东	杞县	10月17日	6月4日	6月6日	9月15日
	商丘	10月14日	5月31日	6月9日	9月13日
	驻马店	10月17日	5月25日	6月8日	9月14日
	黄泛区	10月13日	6月1日	6月12日	9月18日
	沈丘	10月12日	5月30日	6月8日	9月14日
豫西	三门峡	10月10日	6月3日	6月7日	9月20日
	伊川	10月10日	5月26日	6月4日	9月11日
	汝州	10月13日	5月30日	6月3日	9月11日
	卢氏	10月17日	6月11日	6月14日	10月1日
豫南	方城	10月24日	5月30日	6月7日	9月18日
	内乡	10月21日	5月27日	6月4日	9月6日
	南阳	10月22日	5月28日	6月6日	9月12日

注:河南省部分站点玉米播种日期早于小麦成熟日期,与播种和收割日期取多年平均值以及种植方式为小麦、玉米套种有关。



2019年6月

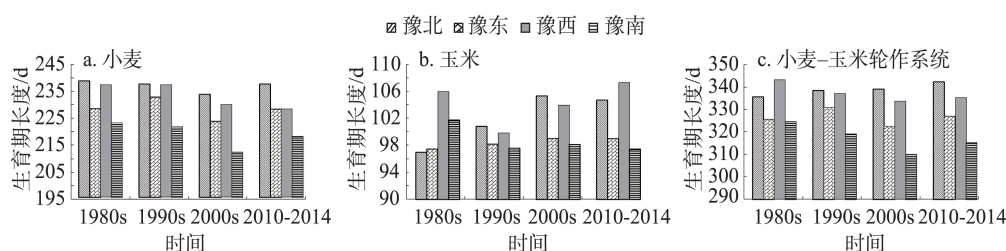


图2 1981—2014年不同年代河南省不同区域小麦、玉米和小麦-玉米轮作系统生育期长度

Figure 2 Length of growing periods of wheat, maize and wheat-maize, cropping system in different areas of Henan Province in the 1980s, 1990s, 2000s and 2010-2014

223~233 d, 豫西为228~238 d, 豫南仅212~224 d, 表现出随纬度降低而减少的特征。玉米生育期长度在各区域均为97~108 d, 空间差异较小。从各区域不同年代作物生育期长度变化看, 豫北玉米生育期长度增加而小麦生育期长度无明显变化, 因此小麦-玉米轮作系统生育期长度略有增加; 豫东小麦生育期长度呈增—减—增变化特征而玉米生育期长度无明显变化, 因此小麦-玉米轮作系统生育期长度也呈增—减—增的变化特征; 豫西小麦生育期长度从2000s开始明显缩短, 而玉米生育期长度以1990s为时间节点呈先减后增变化趋势, 因此小麦-玉米轮作系统生育期长度随年代变化呈缩短趋势; 豫南小麦-玉米轮作系统生育期长度为先减后增趋势, 主要是由于小麦生育期长度在2000s以前缩短、2000s以后略有增加, 而玉米生育期长度无明显变化所致。

小麦生育期长度呈纬向分布特征主要与不同纬度带小麦生长期的温度差异有关。作物生育期长度的时空变化特征是不同的区域气候变化、作物品种更替及播期变化共同作用的结果。

### 3.2 小麦和玉米品种生育期所需有效积温变化

选取豫北的新乡、豫西的三门峡、豫东的商丘和豫南的南阳作为各区域代表站, 图3和图4分别表示1981—2014年小麦和玉米品种生育期所需实际有效积温的变化特征。

1981—2014年, 小麦生育期所需有效积温在豫北的新乡、豫西的三门峡、豫东的商丘和豫南的南阳分别增加 $11.6^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $4.6^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $5.1^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $6.2^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{a}^{-1}$ (图3)。可见, 该时期上述各区域小麦生育期所需有效积温均呈显著增长趋势, 且豫北增长最多。小麦品种生长所需有效积温增加反映了采

用中晚熟品种对小麦适应气候变暖和保证生育期长度的稳定有重要作用。

1981—2014年, 玉米生育期所需有效积温在豫北的新乡、豫西的三门峡、豫东的商丘和豫南的南阳分别增加 $8.7^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $5.1^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $3.1^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $3.5^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{a}^{-1}$ (图4)。可见, 与小麦生育期所需有效积温变化趋势相似, 该时期上述各区域玉米生育期所需有效积温也均呈显著增长趋势, 增长速率豫北最高, 豫西次之, 豫东和豫南最低。同样反映了玉米采用中晚熟品种以缓解气候变暖对玉米生育期缩短影响的必要性。

### 3.3 小麦潜在有效积温、实际有效积温和有效积温差及其变化

小麦 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 潜在有效积温在 $2170\sim 2660^{\circ}\text{Cd}$ 之间, 纬向变化北低南高, 经向变化自西向东呈低—高一低的变化趋势(图5a)。实际有效积温在 $2040\sim 2430^{\circ}\text{Cd}$ 之间, 豫西和豫东交界处最高, 豫北北部和豫南最低(图5b)。小麦有效积温差在 $4\sim 445^{\circ}\text{Cd}$ 之间, 且随纬度的升高呈减少趋势(图5c)。小麦有效积温差均为正值, 表明河南省各区域小麦生长季的热量资源未被充分利用, 有效积温差随纬度降低而增加, 表明豫南热量利用潜力较豫北大。

小麦潜在有效积温除豫北的封丘外均呈显著增加趋势, 且增加趋势在豫北西部、豫东南部 and 豫南尤为显著(图5d); 小麦实际有效积温除豫西的汝州和豫南的方城外也均呈增加趋势, 且河南省东北部增长速率高于西南部(图5e)。在小麦潜在和实际有效积温变化的共同影响下, 小麦有效积温差除豫北的汤阴和新乡外均呈增加趋势, 且河南西南部增长速率高于东北部(图5f)。综上, 1981—2014年, 在气候变暖背景下, 随着小麦品种更替, 小麦潜



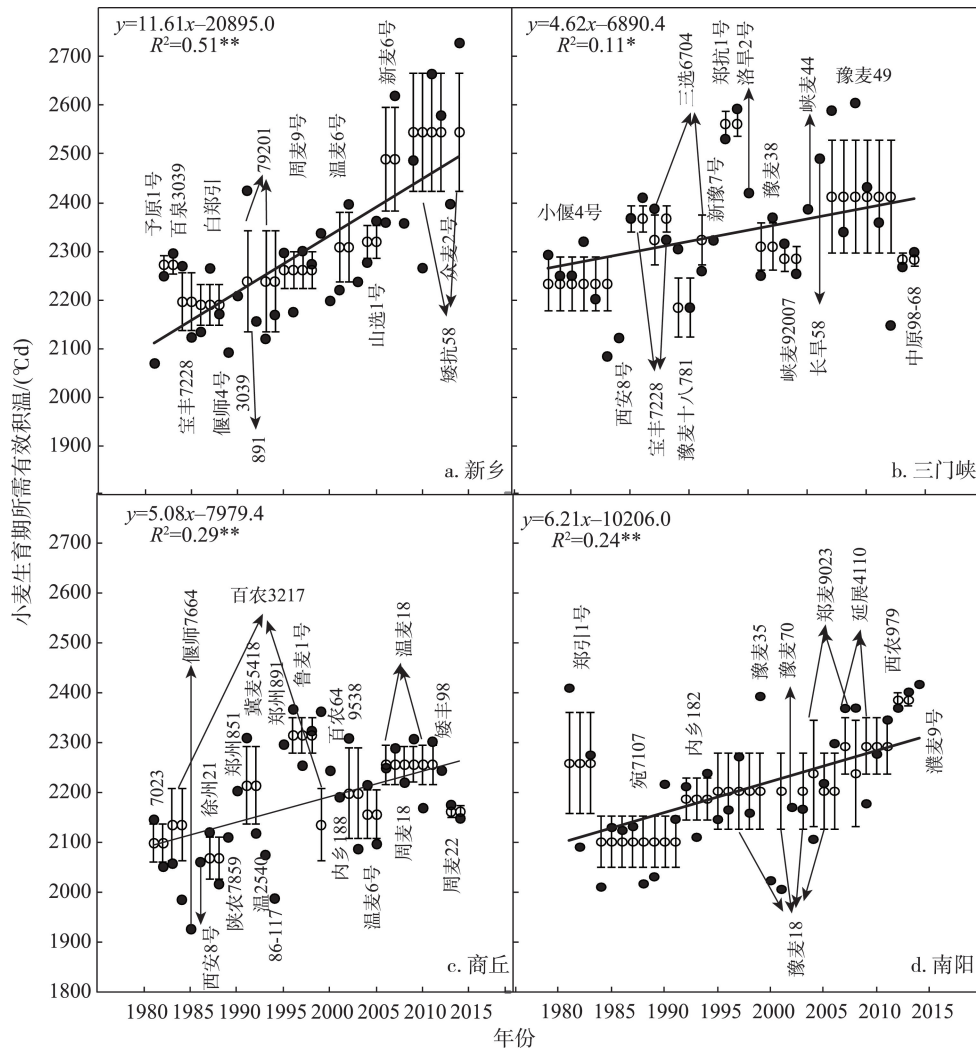


图3 1981—2014年河南省新乡(豫北)、三门峡(豫西)、商丘(豫东)、南阳(豫南)小麦生育期所需有效积温变化趋势

Figure 3 Trend in actual effective thermal time of winter wheat in Xinxian (Northern Henan), Sanmenxia (Western Henan), Shangqiu (Eastern Henan) and Nanyang (Southern Henan) of Henan Province, 1981-2014

注:回归线为小麦品种生育期所需有效积温的变化趋势,\*\*为极显著 $P < 0.01$ ,\*为显著 $P < 0.05$ ;误差线为相同品种有效积温的变化;空心点表示相同品种生育期所需有效积温的平均值,实心点表示各品种当年生育期所需有效积温;回归线旁为品种名称。

在和实际有效积温均增加,且豫南小麦有效积温差较高,热量利用潜力较大。

### 3.4 玉米潜在有效积温、实际有效积温和有效积温差及其变化

玉米 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 潜在有效积温在 $1630\sim 1960^{\circ}\text{Cd}$ 之间,经向变化西低东高(图6a),实际有效积温在 $1460\sim 1790^{\circ}\text{Cd}$ 之间,纬向变化北高南低,经向上自西向东呈低—高一低的变化趋势(图6b)。在潜在和实际有效积温的共同影响下,玉米有效积温差在 $50\sim 327^{\circ}\text{Cd}$ 之间,豫东和豫南高于豫北和豫西(图6c)。与小麦有效积温差相似,玉米有效积温差也均

为正值,表明河南省各区域玉米生长期热量资源未被充分利用,且东部和南部热量利用潜力更高。

玉米潜在有效积温在河南省均呈增加趋势,且82.4%的站点增加显著,主要位于豫北西部和豫西大部(图6d);玉米实际有效积温除豫北的封丘、豫西的卢氏及豫南的内乡和方城外均呈增加趋势,且61.5%的站点增加显著,河南省东北部的增长速率高于西南部(图6e)。在玉米潜在和实际有效积温变化的共同影响下,玉米有效积温差在河南大部分地区呈下降趋势,其中豫北的汤阴、新乡和豫东的杞县下降显著(图6f)。表明河南省大部分地区玉

2019年6月

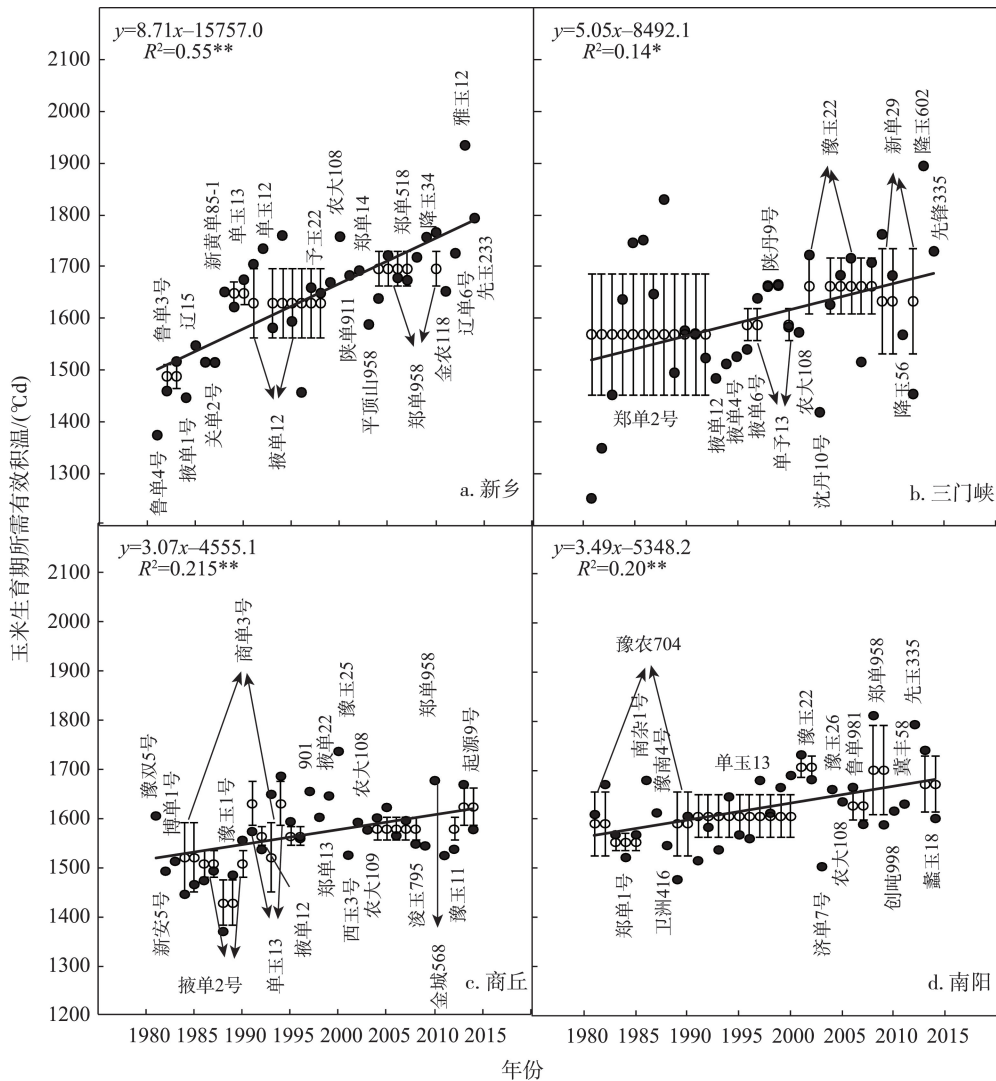


图4 1981—2014年河南省新乡(豫北)、三门峡(豫西)、商丘(豫东)、南阳(豫南)玉米生育期所需有效积温变化趋势

Figure 4 Trend in actual effective thermal time of maize in Xinxiang (Northern Henan), Sanmenxia (Western Henan), Shangqiu (Eastern Henan) and Nanyang (Southern Henan) of Henan Province, 1981-2014

注:回归线为玉米品种生育期所需有效积温的变化趋势,\*\*为极显著 $P<0.01$ ,\*为显著 $P<0.05$ ;误差线为相同品种有效积温的变化;空心点表示相同品种生育期所需有效积温的平均值,实心点表示各品种当年生育期所需的有效积温;回归线旁为品种名称。

米生长期对热量资源的利用程度有较大提高。

### 3.5 小麦-玉米轮作系统潜在有效积温、实际有效积温和有效积温差及其变化

小麦-玉米轮作系统潜在和实际有效积温分别在 $3815\sim 4560^{\circ}\text{Cd}$ (图7a)和 $3650\sim 4115^{\circ}\text{Cd}$ 之间(图7b),有效积温差在 $154\sim 827^{\circ}\text{Cd}$ 之间(图7c)。潜在有效积温纬向变化北低南高,经向变化自西向东呈低—高一低—低的特征,实际有效积温河南省西北部高于东南部,有效积温差随纬度的升高呈减少趋势。可见,豫北和豫西西部潜在和实际有效积温均较低,有效积温差也较低,该区域热量资源匮乏是限

制热量潜力提升的关键因素;豫西东部潜在和实际有效积温均较高,有效积温差也较高,该区热量资源丰富,仍有较大的利用潜力;豫东大部 and 豫南潜在有效积温较高而实际有效积温较低,因此有效积温差较高,该区热量资源丰富而实际利用效率低,今后应着重提高该区热量资源的利用率。

1981—2014年,小麦-玉米轮作系统潜在有效积温除豫北的封丘外均呈显著增加趋势,且河南西部增加趋势较东部更为显著(图7d),主要与区域间气候变暖程度差异有关;实际有效积温除豫南的方城外均呈增加趋势,且56.3%的站点增长显著(图

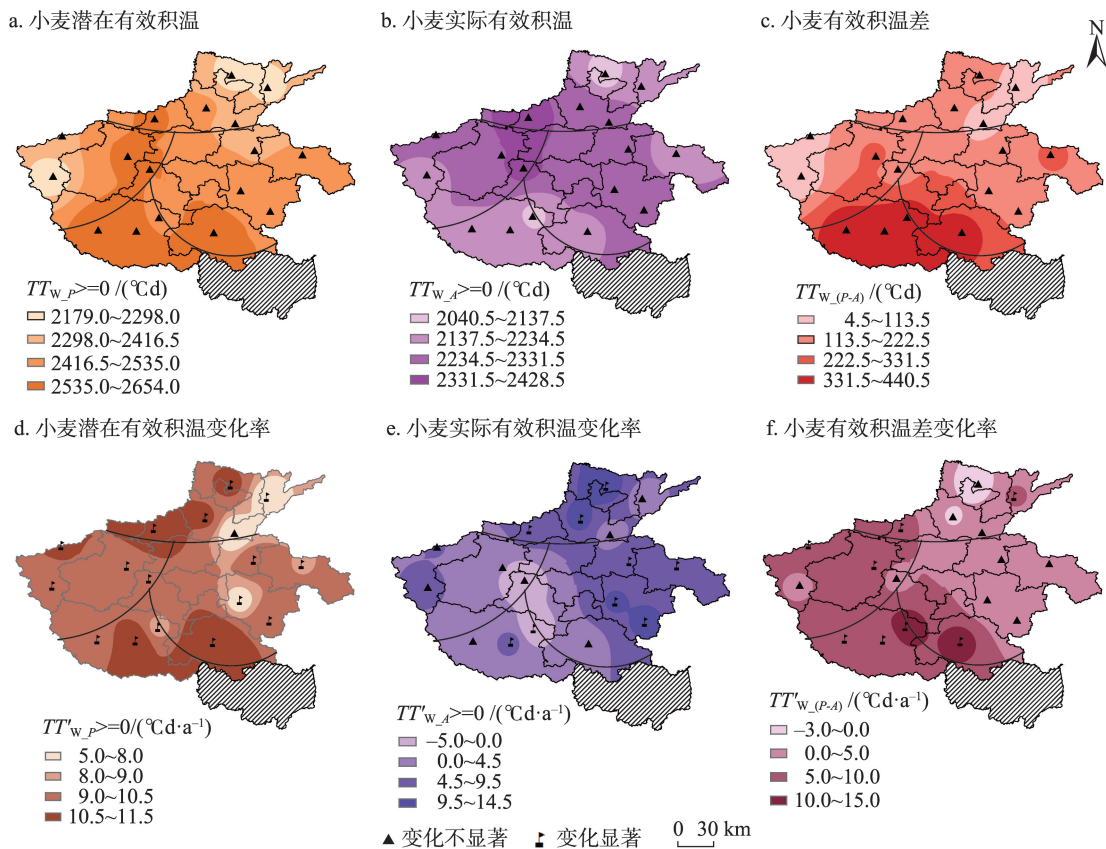


图5 小麦潜在有效积温、实际有效积温和有效积温差(a, b, c)及其变化率(d, e, f)

Figure 5 Potential (a) and actual (b) effective thermal time and the gap between potential and actual effective thermal times (c) of wheat and their change rates (d, e, f)

注:  $TT_{w_P}$ : 小麦潜在有效积温;  $TT_{w_A}$ : 小麦实际有效积温;  $TT_{w_(P-A)}$ : 小麦有效积温差;  $TT'_{w_P}$ : 小麦潜在有效积温变化率;  $TT'_{w_A}$ : 小麦实际有效积温变化率;  $TT'_{w_(P-A)}$ : 小麦有效积温差变化率。

7e)。表明通过小麦和玉米品种的改良与选择、中晚熟品种提高了作物对该区热量资源的利用程度;小麦-玉米轮作系统有效积温差仅有2个站点显著下降,而6个站点显著升高,其余站点变化不显著(图7f),表明河南省大部分地区热量资源仍有较高的挖掘潜力。

### 3.6 小麦、玉米及其轮作系统热量利用率时空分布

小麦-玉米轮作系统热量利用率( $HUE$ )受作物生育期有效积温和产量的共同影响。

1981—2014年,小麦热量利用率 $HUE_w$ 为1.5~2.8  $\text{kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ (图8a),玉米 $HUE_m$ 为2.3~4.3  $\text{kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ (图8b),小麦-玉米轮作系统 $HUE$ 为1.7~3.4  $\text{kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ (图8c),介于小麦和玉米之间。空间分布特征较为相似,均表现为豫北高于豫南,豫东高于豫西。

1981—2014年,64.7%的研究站点 $HUE_w$ 显著提

升,主要位于豫北东部和豫东大部(图8d),该区 $HUE_w$ 有所提升,但仍存在较大的提升空间。52.9%的研究站点 $HUE_m$ 显著升高,主要位于豫北东部、豫东东部和南部、豫南及豫西西部(图8e),河南省有超过一半的站点 $HUE_m$ 显著提升,热量利用程度得到较大改善。 $HUE$ 除豫东的黄泛区和豫西的伊川外,76.5%的站点显著提升,变化显著的站点分布与玉米的相似(图8f),在小麦和玉米共同影响下,河南大部分地区 $HUE$ 有所提升,但仍存在较大的提升潜力,尤其是在豫南和豫东大部。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文在分析1981—2014年不同年代小麦、玉米及其轮作系统生育期长度变化规律、不同作物品种生育期所需有效积温变化特征的基础上,研究了河南省小麦、玉米及其轮作系统潜在与实际有效积温



2019年6月

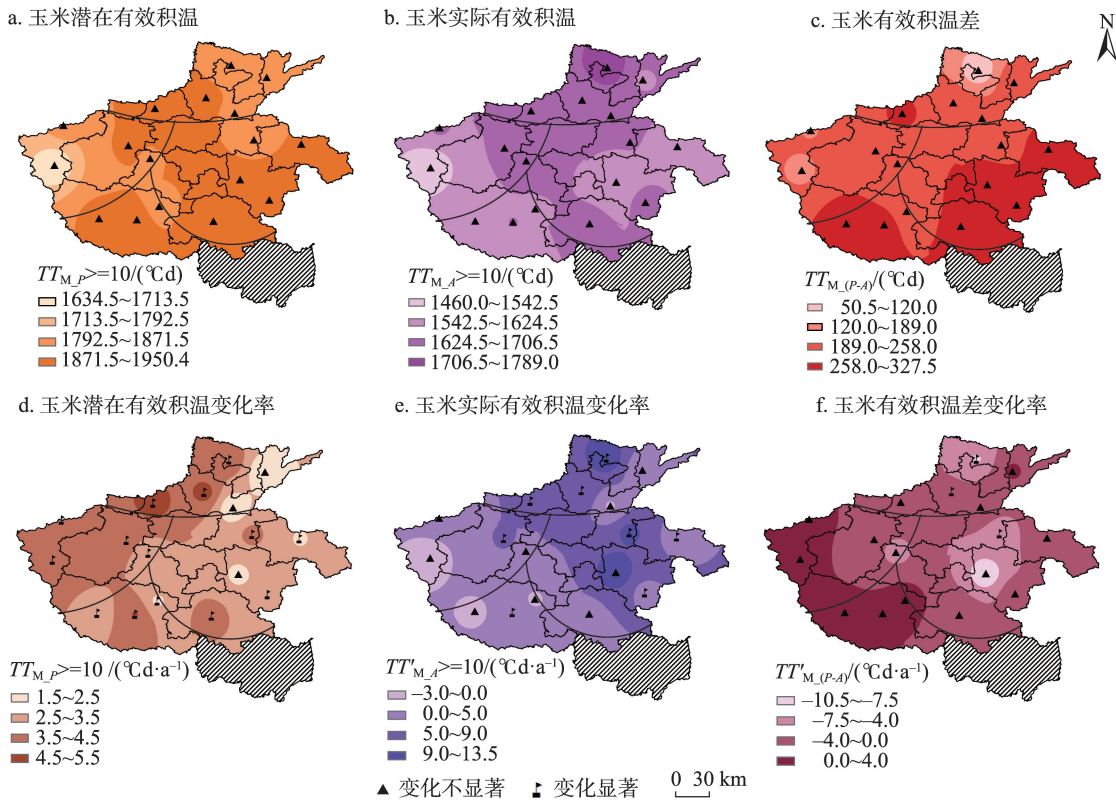


图6 玉米潜在有效积温、实际有效积温和有效积温差(a, b, c)及其变化率(d, e, f)

Figure 6 Potential (a) and actual (b) effective thermal time and the gap between potential and actual effective thermal times (c) of maize and their change rates (d, e, f)

注:  $TT_{M,P}$ : 玉米潜在有效积温;  $TT_{M,A}$ : 玉米实际有效积温;  $TT_{M,(P-A)}$ : 玉米有效积温差;  $TT'_{M,P}$ : 玉米潜在有效积温变化率;  $TT'_{M,A}$ : 玉米实际有效积温变化率;  $TT'_{M,(P-A)}$ : 玉米有效积温差变化率。

和有效积温差及其变化,进一步分析了作物热量利用率的时空变化特征,得到如下结论:

(1) 1981—2014年,河南省各区域小麦和玉米生育期所需有效积温均呈增加趋势,是各区域为适应气候变化、提高热量利用率而选用中晚熟品种的结果。

(2) 小麦有效积温差为4~445°Cd,随纬度升高递减,豫南热量利用潜力较豫北大,今后应充分挖掘。而玉米有效积温差为50~327°Cd,自西北向东南递增,随年代变化呈下降趋势,反映玉米生长季热量利用程度有较大提升。小麦-玉米轮作系统有效积温差为154~827°Cd,88.2%的站点有效积温差并未下降,热量利用程度未得到有效改善。豫东大部 and 豫南有效积温差较高,该区热量资源丰富而实际利用效率低,今后应着重提高热量资源的利用率。

(3) 1981—2014年,小麦、玉米及其轮作系统热量利用率分别为  $1.5\sim 2.8 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,  $2.3\sim 4.3$

$\text{kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$  和  $1.7\sim 3.4 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,均为豫北高于豫南,豫东高于豫西。河南大部分地区小麦-玉米轮作系统热量利用率有明显提升和改善,但在豫南和豫东仍存在较大的提升潜力。

## 4.2 讨论

对比不同地区的HUE可反映不同研究区的热量利用程度和提升潜力。研究发现不同地区粮食作物HUE差异较大,青藏高原粮食作物HUE为  $1.50 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,东北地区为  $1.40 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,华北、西南、华南地区分别为  $1.00 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ 、 $1.65 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ 、 $0.55 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$  [10]。本文计算得出河南省HUE<sub>W</sub>、HUE<sub>M</sub>分别为  $1.5\sim 2.8 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$  和  $2.3\sim 4.3 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,高于华北地区粮食作物HUE,反映了河南省热量利用强度在华北平原处于较高的水平。周宝元 [22] 试验研究指出,河南浚县小麦和玉米热量利用率分别约为  $4.70 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$  和  $4.90 \text{ kg} \cdot (\text{°Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ,兰考为  $4.20$

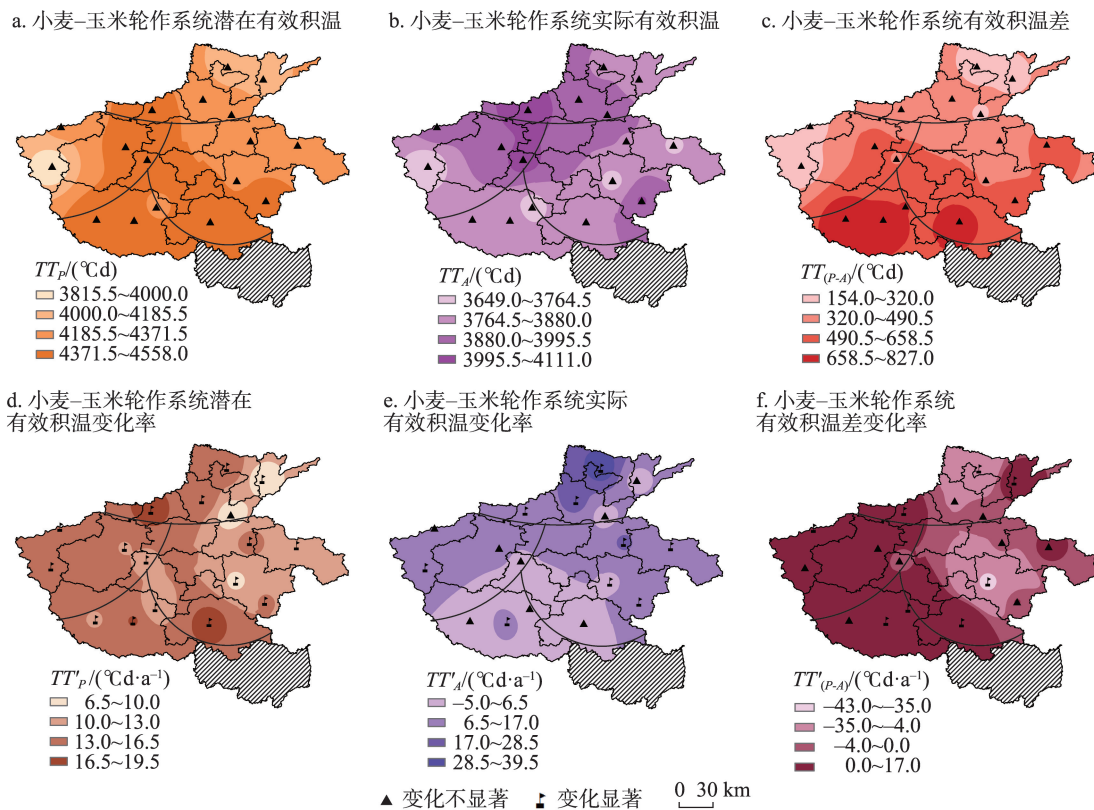


图7 小麦-玉米轮作系统潜在有效积温、实际有效积温和有效积温差(a, b, c)及其变化率(d, e, f)

Figure 7 Potential (a) and actual (b) effective thermal time and the gap between potential and actual effective thermal times (c) of wheat-maize cropping system and their change rates (d, e, f)

注:  $TT_p$ : 小麦-玉米轮作系统潜在有效积温;  $TT_a$ : 小麦-玉米轮作系统实际有效积温;  $TT_{(P-A)}$ : 小麦-玉米轮作系统有效积温差;  $TT'_p$ : 小麦-玉米轮作系统潜在有效积温变化率;  $TT'_a$ : 小麦-玉米轮作系统实际有效积温变化率;  $TT'_{(P-A)}$ : 小麦-玉米轮作系统有效积温差变化率。

$\text{kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$  和  $4.00 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ , 温县为  $4.50 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$  和  $4.10 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ ; 付雪丽<sup>[23]</sup>试验研究表明河南省温县和焦作周年热量利用率为  $3.90 \sim 4.23 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$  和  $4.19 \sim 4.21 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ , 高于本文得到的  $HUE$  结果, 这是因为以上研究基于高产试验, 因而产量普遍高于农业气象观测站。此外, 本研究结果得出的小麦-玉米轮作系统  $HUE$  为  $1.7 \sim 3.4 \text{ kg} \cdot (\text{Cd} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$ , 介于  $HUE_w$  和  $HUE_m$  之间, 是小麦和玉米热量利用率的综合结果。

总体而言, 小麦-玉米轮作系统  $HUE$  在豫西、豫南和豫东西部、南部较低, 特别需要注意通过作物品种的选择和搭配, 合理安排小麦和玉米生长季长度, 从而充分利用各区域热量资源, 达到提高资源利用效率和高产的目的。豫西小麦热量利用潜力差异较大, 实际利用率较低, 且多年并未提高; 玉米热量利用潜力较大, 实际利用率较低, 仅在豫西西部显著提升。因此, 豫西应选择生育期较长的小麦

和玉米品种, 充分利用增加的热量资源。豫南、豫东南部和西部小麦和玉米热量利用潜力均较高, 而小麦热量利用率较高、玉米热量利用率较低, 因此这些区域应重点考虑提高玉米产量以改善玉米热量利用率。

豫南及豫东南部和东部热量资源丰富, 但作物生育期较短, 热量未被充分利用, 主要与该区土壤肥力较低、生产条件差、田间管理粗放、季节性旱涝和病虫害频发有关。该区应通过增施磷钾肥、改善种植条件、提升栽培管理技术、合理灌溉、及时排水等农业管理措施, 减轻小麦-玉米轮作系统热量利用率的限制因素<sup>[24]</sup>。豫东北部、豫西和豫北地区潜在和实际有效积温总体较低, 空间分布差异较大, 表明该区热量资源匮乏、利用率水平区域差异大, 仍有较多的热量资源未被充分利用。究其原因, 一方面与该区域降水量不足有关, 水分不足导致热量资源未能被充分利用, 今后在该区应通过合理灌

2019年6月

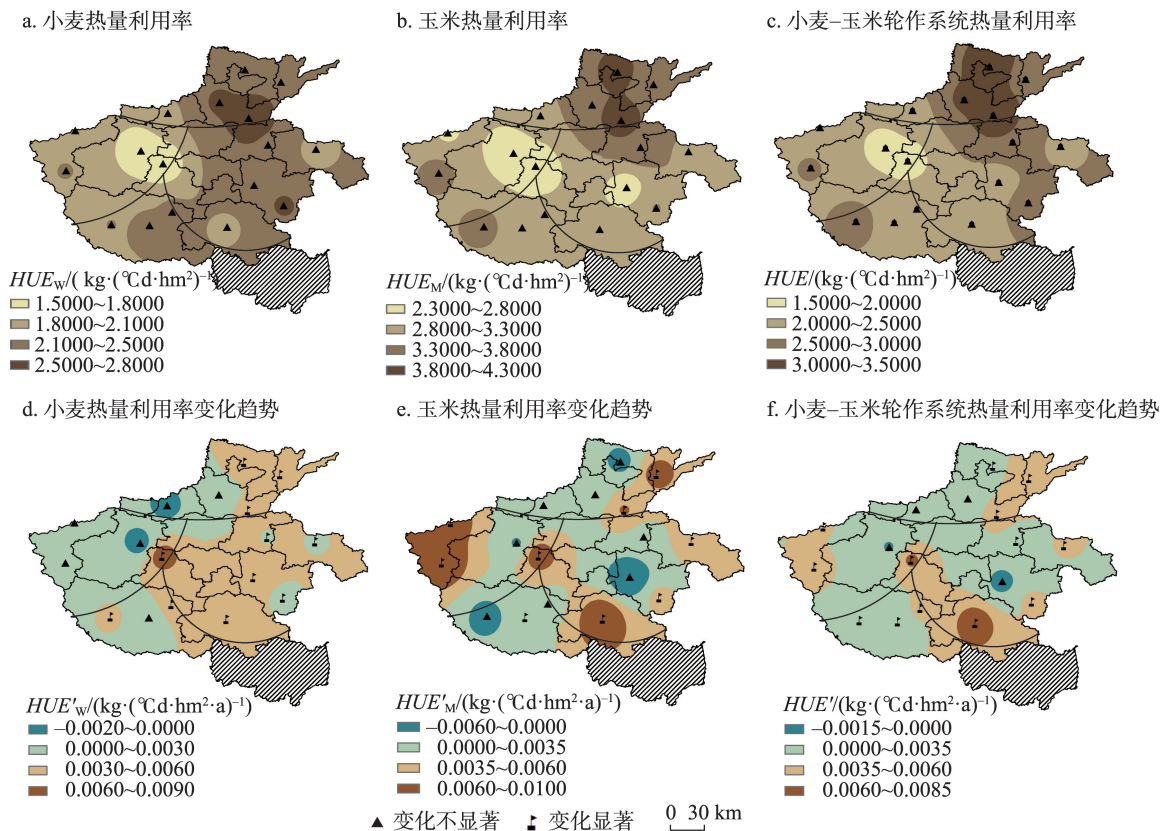


图8 小麦、玉米和小麦-玉米轮作系统的热量利用率(a, b, c)及其变化率(d, e, f)

Figure 8 Heat use efficiency (HUE) of wheat (a), maize (b), wheat-maize cropping system (c) and their change rates (d, e, f)

注:  $HUE_w$ : 小麦热量利用率;  $HUE_m$ : 玉米热量利用率;  $HUE_{wm}$ : 小麦-玉米轮作系统热量利用率;  $HUE'_w$ : 小麦热量利用率的变化率;  $HUE'_m$ : 玉米热量利用率的变化率;  $HUE'$ : 小麦-玉米轮作系统热量利用率的变化率, 表示 HUE 的变化快慢程度。

溉,特别是冬小麦生长季及时灌溉<sup>[25]</sup>,玉米开花期补充灌溉,以满足作物对水分的需求从而提高热量利用率;另一方面,还与品种选择不当、施肥管理不科学有关。为此,今后应选用株型紧凑、成熟期中等的品种,如周麦16和周麦22等;施肥方面应采用秸秆还田,尽量增施有机肥,合理分配氮肥基追比例,推广化肥深施技术等<sup>[26]</sup>。

### 参考文献(References):

- [1] Wang J, Wang E L, Yang X G, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. *Climate Change*, 2012, 113(3-4): 825-840.
- [2] 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. [Chang Q, Wang J, Yu W D, et al. Tempo-spatial characteristics and impacts factors of radiation use efficiency of wheat-maize rotation system in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(3): 316-325.]
- [3] 刘娇, 刘举, 苏瑞光, 等. 河南省小麦、玉米生产现状、问题与对策[J]. *农学学报*, 2015, 5(1): 5-9. [Liu J, Liu J, Su R G, et al. Current status, problems and countermeasures of wheat and maize production in Henan Province[J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(1): 5-9.]
- [4] 余卫东, 陈怀亮. 河南省夏玉米精细化农业气候区划研究[J]. *气象与环境科学*, 2010, 33(2): 14-19. [Yu W D, Chen H L. Study on precise comprehensive agricultural climate regional planning of summer maize in Henan Province[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2010, 33(2): 14-19.]
- [5] 薛彦东, 辛景树, 任意, 等. 华北小麦-玉米轮作区耕地地力等级划分及等级[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(6): 530-536. [Xue Y D, Xin J S, Ren Y, et al. Characteristics and gradations of cultivated land fertility for winter wheat-summer maize rotation system in North China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(6): 530-536.]
- [6] Hu F L, Gan Y T, Zhao C, et al. Intercropping maize and wheat with conservation agriculture principles improves water harvesting and reduces carbon emissions in dry areas[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 74: 9-17.



- [7] Yang L L, Ding X Q, Liu X J, et al. Impacts of long-term jujube tree/winter wheat–summer maize intercropping on soil fertility and economic efficiency: A case study in the lower North China Plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 75(1): 105–117.
- [8] 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. [Qian J X, Hu L W. Analysis of climatic resources utilization efficiency of maize in Shanxi Province[J]. *Journal of Maize Science*, 2008, 16(4): 192–195.]
- [9] 崔读昌. 世界谷物产量与农业气候资源利用效率[J]. *自然资源学报*, 1995, 10(1): 85–94. [Cui D C. The cereal yield in the world and the utilization efficiency of agroclimatic resources[J]. *Journal of Natural Resource*, 1995, 10(1): 85–94.]
- [10] 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. [Cui D C. Climatic resources utilization coefficient of cereal crops in China and development measures[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2001, 22(2): 25–32.]
- [11] 刘晓迎, 陈罗成, 赵巧梅, 等. 豫北主要农作物光热资源利用效率研究[J]. *河南农业科学*, 2012, 41(4): 29–33. [Liu X Y, Chen L C, Zhao Q M, et al. Light and heat utilization efficiency of winter wheat and summer maize in northern region of Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(4): 29–33.]
- [12] 王美云, 仁天志, 赵明, 等. 双季青贮玉米模式物质生产及资源利用效率研究[J]. *作物学报*, 2007, 33(8): 1316–1323. [Wang M Y, Ren Y Z, Zhao M, et al. Matter production and resources use efficiency of double-cropping silage maize system[J]. *Journal of Crop Science*, 2007, 33(8): 1316–1323.]
- [13] 王真. 河南中、北地区麦–玉两熟制小麦光热利用特性及其对产量影响的比较研究[D]. 郑州: 河南师范大学, 2015. [Wang Z. Comparative Study on Effects of Wheat Photothermal Utilization on Yield under Wheat–corn Cropping System in Central and North of Henan[D]. Zhengzhou: Henan Normal University, 2015.]
- [14] Xie Z F, Zhang W. Wheat–corn double cropping production status and balanced yield–increasing potential in Henan Province[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, 13(2): 318–323.
- [15] 李贵才. 基于MODIS数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院, 2004. [Li G C. Estimation of Chinese Terrestrial Net Primary Production Using LUE Model and MODIS Data[D]. Beijing: The Chinese Academy of Sciences, 2004.]
- [16] 张雪芬. 河南省气候资源的保证率及利用率[J]. *河南气象*, 1999, (3): 30–31. [Zhang X F. Reliability and utilization of climate resources in Henan Province[J]. *Journal of Henan Meteorology*, 1999, (3): 30–31.]
- [17] 介领军. 河南省小麦–玉米两熟制粮田增产潜力及其技术途径调查报告[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015. [Jie L J. The Survey Report in Regard to the Production Potential and Technological Approaches of Winter Wheat–summer Corn Yield Two Crops a Year in Henan Province[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015.]
- [18] 李彤霄. 气候变化对河南省冬小麦生育期影响的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009. [Li T X. Studies on Impacts of Climate Change on Winter Wheat Growth and Development in Henan Province[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.]
- [19] 李树岩, 王靖, 余卫东, 等. 气候变化对河南省夏玉米主栽品种发育期的影响模拟[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 479–488. [Li S Y, Wang J, Yu W D, et al. Modeling the impacts of climate change on phenology of representative maize varieties in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 479–488.]
- [20] 沈瑛, 曾燕, 肖卉, 等. 江苏省日照时数的气候特征分析[J]. *气象科学*, 2007, 27(4): 425–429. [Shen C, Zeng Y, Xiao H, et al. Changes of sunshine hours in the recent 40 years over Jiangsu Province[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(4): 425–429.]
- [21] 王娜, 王靖, 冯利平, 等. 华北平原冬小麦–夏玉米轮作区采用“两晚”技术的产量效应模拟分析[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(5): 611–618. [Wang N, Wang J, Feng L P, et al. Modeling the impact of “double-delay” technology on yield of wheat–maize cropping system in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(5): 611–618.]
- [22] 周宝元. 黄淮海两熟制资源季节间优化配置及季节内高效利用技术体系研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. [Zhou B Y. Study on the Distribution and High Efficient Utilization of Resources for Double Cropping System in Huang-huai-hai Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.]
- [23] 付雪丽, 张惠, 贾继增, 等. 冬小麦–夏玉米“两晚”种植模式的产量形成及资源效率研究[J]. *作物学报*, 2009, 35(9): 1708–1714. [Fu X L, Zhang H, Jia J Z, et al. Yield performance and resource use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(9): 1708–1714.]
- [24] 曹文堂, 冯晓曦, 许波, 等. 豫南地区小麦–玉米两熟丰产栽培技术[J]. *作物杂志*, 2009, (4): 102–104. [Cao W T, Feng X X, Xu B, et al. Cultivation technique of high yield of wheat–maize rotation system in Southern Henan[J]. *Crops*, 2009, (4): 102–104.]
- [25] 陈超, 于强, 王恩利, 等. 华北平原作物水分生产力区域分异规律模拟[J]. *资源科学*, 2009, 31(9): 1477–1485. [Chen C, Yu Q, Wang E L, et al. Modeling the spatial distribution of crop water productivity in the North China Plain[J]. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1477–1485.]
- [26] 郭智萍, 李秀民, 梅兹君, 等. 豫北地区小麦–夏玉米一年两熟高产栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2013, (4): 44–45. [Guo Z P, Li X M, Mei Z J, et al. Cultivation technique of high yield of wheat–maize rotation system in Southern Henan[J]. *Modern Agricultural Technology*, 2013, (4): 44–45.]

# Spatiotemporal variation and potential of heat use efficiency of wheat-maize rotation system in Henan Province

CHANG Qing<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, YU Weidong<sup>3</sup>, ZHANG Ning<sup>4</sup>, LI Mengwei<sup>5</sup>,  
LI Wenke<sup>6</sup>, HUANG Mingxia<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;  
2. Shanxi Meteorological Service Center, Taiyuan 030002, China; 3. China Meteorological Administrator/Henan  
Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China;  
4. Shanxi Meteorological Information Center, Taiyuan 030002, China; 5. Shanxi Climate Center, Taiyuan 030002, China;  
6. Shandong Provincial Meteorological Service Center, Jinan 253700, China)

**Abstract:** To explore the spatial and temporal changes of heat use efficiency (HUE) of wheat, maize, and wheat-maize rotation system and put forward effective measures for fully utilizing regional heat potential and improving HUE based on local production condition in Henan Province, the spatial and temporal characteristics of heat resources and HUE of wheat, maize, and wheat-maize rotation system were examined based on crop yield from the agro-meteorological observational sites and temperature data from meteorological stations respectively from 1981 to 2014 at 17 study sites in the province. The regional differences and the controlling factors of HUE were further revealed based on the statistical analysis results. The study showed that there were large spatial differences in calculated potential effective thermal time, actual effective thermal time, and heat use efficiency of wheat, maize, and wheat-maize rotation system. In 1981 to 2014, the length of growing period of wheat-maize rotation system increased slightly in Northern Henan while decreased in Western Henan. For Eastern and Southern Henan, the length of growing period of wheat-maize rotation system showed a trend of increase-decrease-increase and increased firstly and then decreased, respectively. With the selection of mid-late maturing varieties to adapt to climate change and improve HUE, growing period effective thermal time of wheat and maize increased in all the regions in Henan Province. The gap between potential and actual effective thermal times of wheat and maize increased from the north to the south and from the west to the east in the province. The gap between potential and actual effective thermal times increased for wheat but decreased for maize, which suggests that maize had higher heat use degree than wheat. Under the interactive impacts of crop yield and actual effective thermal time, heat use efficiency of wheat, maize, and wheat-maize rotation system was higher in the north and east of Henan than in the south and west of the province. From 1981 to 2014, potential and actual effective thermal times and heat use efficiency showed increasing trends with different increase rates caused by changes in growing period temperature, the length of crop growth period, and crop yield. In the future, there is an urgent need to improve the utilization of heat use efficiency especially in the Southern and Eastern Henan.

**Key words:** heat use efficiency; growth period; wheat-maize rotation system; potential effective thermal time; actual effective thermal time; Henan Province