

引用格式:张荣荣,宁晓菊,秦耀辰,等. 1980年以来河南省主要粮食作物产量对气候变化的敏感性分析[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 137-149. [Zhang R R, Ning X J, Qin Y C, et al. Analysis of sensitivity of main grain crops yield to climate change since 1980 in Henan Province[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 137-149.] DOI :10.18402/resci.2018.01.13

1980年以来河南省主要粮食作物产量对气候变化的敏感性分析

张荣荣¹, 宁晓菊², 秦耀辰¹, 赵凯娜¹, 李永贺¹

(1. 河南大学环境与规划学院/黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004;

2. 河南财经政法大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要:根据1980—2015年河南省及周边39个气象站点逐日观测数据,选取与主要粮食作物生育机理相关的气候指标,运用气候统计方法分析河南省主要粮食作物生育期内水热气候要素的时空变化。结合统计数据,运用面板非线性回归模型分析主要粮食作物产量对气候变化的敏感性。研究发现:①河南省冬小麦返青期最低气温和生育期平均气温均呈显著增加趋势,在空间上两者升温速率呈现从河南省中部向周边递减的特征。夏玉米生育期总日照时数呈明显减少趋势,其减少速度在豫中地区最快,在豫西南地区最慢。②从敏感效应来看,冬小麦和夏玉米产量分别对生育期平均气温和生育期总日照时数的敏感效应最强,对生育期总降水量的敏感效应均最弱。从敏感区看,冬小麦产量敏感区主要分布在豫北、豫西和豫南地区,夏玉米则集中在豫西和豫东地区。③冬小麦生育期平均气温突变后有利于除豫北以外共83.3%区域内产量的增加,返青期最低气温突变后有利于豫北和豫东共44.4%区域内产量的增加。夏玉米生育期总日照时数突变后对豫中和豫西共44.4%区域的产量增加有利。

关键词:气候变化;敏感性;作物生育期;冬小麦;夏玉米;河南

DOI :10.18402/resci.2018.01.13

1 引言

全球气候系统正经历以变暖为主要特征的变化,同时也导致了全球范围内降水的变化^[1,2]。农业生产活动,严重依赖于气候资源,对气候变化极其敏感^[3]。已有研究表明,气候变化对作物产量的影响在全球尺度上已出现负效应^[4],甚至一些国家的气候趋势影响很大,可以抵消很大一部分技术进步等因素导致的单产增加^[5],这将引发许多区域的粮食安全问题^[6]。因此较为准确地判定粮食产量对气候变化的敏感性就显得十分必要。

目前关于作物产量对气候变化的敏感性研究成果较多,然而由于区域尺度气候变化的不确定性,加之研究方法和研究尺度的差异,使得敏感性

研究结果在作物生育期不同阶段和地域间存在很大的差异^[7,8]。殷培红等量化了全国328个地区对气候变化响应的敏感性,结果表明有41.6%的地区粮食单产波动项对4—10月温度和5—9月降水两个气候波动项都敏感^[9]。李辉等研究发现,在温度较高和较低地区,玉米产量分别对平均最低温和平均最高温的变化较敏感,在降水较多地区,玉米产量对降水和日照时数的变化较敏感,降水较少地区,对日较差和日照时数的变化较敏感^[10]。陈超等评价四川冬小麦产量对单个气候因子的敏感性时,发现冬小麦产量对播种到拔节期辐射量下降表现为敏感的面积比例最大,占研究区域的9.4%^[11]。肖登攀等对华北平原冬小麦的研究指出:在出苗—抽穗生

收稿日期:2017-05-26 修订日期:2017-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41671536);河南省高等学校重点科研项目(18B170001;18A170002)。

作者简介:张荣荣,女,河南濮阳人,硕士生,研究方向为低碳经济与区域可持续发展。E-mail: zhangrr94@126.com

通讯作者:秦耀辰, E-mail: qinyyc@henu.edu.cn

长阶段,温度升高对冬小麦产量有正效应,而在抽穗-成熟阶段,温度升高会给产量带来负面影响^[12]。此外,由于作物对生育期不同生长阶段气候变化的响应和敏感性存在差异,而以往大量研究多基于全年气象数据进行历史分析,忽略了作物自身的生理机制^[13]。因此,在探讨作物产量对气候变化的敏感性时,需要根据作物不同生长阶段对气候变化的响应进行单独考虑^[12]。

河南省作为粮食大省并承担着保障国家粮食安全的重要任务^[14],粮食产量在全国所占比重逐渐上升同时,在气候变暖背景下,河南省暖干化趋势明显^[15],温度和降水的变化改变了河南省农业气候资源的时空格局,带来了主要粮食作物产量的波动^[16,17]。基于此,本文以粮食主产区—河南省为研究对象,选取主要粮食作物冬小麦和夏玉米生育期内关键气候因子,运用面板非线性回归模型研究冬小麦和夏玉米的产量与生育期气候因子之间的关系,揭示产量对气候变化的敏感性及区域差异,以期帮助分析未来气候变化对河南省主要粮食作物生产的影响,为确保河南省粮食稳产提供理论参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

气象数据由中国气象科学数据共享服务网^[18]提供,包括1980—2015年气温、降水和日照时数的逐日观测数据。其中,河南省具有国家级气象站点19个,考虑到插值边界的精确性,将河南省周边的20个国家级气象站点也列入研究范围,共涉及39个气象站点(图1)。同时结合已有研究^[19-22]选取冬小麦和夏玉米生育期内与产量密切相关且具有一定作物生理意义的气候因子作为气候指标(详见表1),从而提取出关键气候因子的气象数据。粮食作物产量数据来源于1981—2016年河南省统计年鉴^[23],由于1980—1988年作物产量数据缺失,故敏感性分析的气象数据与粮食作物数据的时间序列均为1988—2015年。

2.2 研究方法

2.2.1 气候因子分析

首先利用Mann-Kendall非参数检验法对粮食作物生育期气候因子的变化进行突变点检测,分析时间上生育期气候要素的多年变化趋势。其次,运用

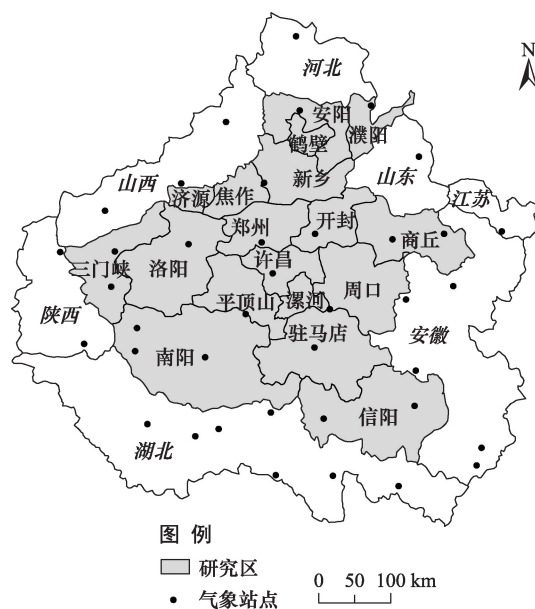


图1 河南省及周边地区国家级气象站点

Figure1 The distribution of national-level meteorological stations in Henan Province and its surrounding areas

表1 影响主要粮食作物产量的生育期关键气候因子

Table 1 The key climate factors affecting main grain crops yield during growth stages

作物	生育期关键气候因子
冬小麦	越冬期最高气温、返青期最低气温、生育期平均气温、灌浆期总降水量、生育期总降水量、灌浆期总日照时数
夏玉米	7—8月平均气温、生育期气温日较差、生育期总降水量、生育期总日照时数

滑动平均剔除噪音的影响后,借助线性倾向估计检验气候变化趋势的平稳性。最后,借助ArcGIS10.2对线性倾向值进行空间可视化表达,分析河南省主要粮食作物生育期气候因子变化的空间特征。

2.2.2 面板非线性回归模型——作物产量对气候变化的敏感性

本文采用Lobell D B等提出的面板非线性回归模型研究气候与产量的关系^[5],在回归模型中加入时间变量(如年)的线性趋势与二次趋势来消除技术进步等方面的影响^[6]。具体模型如下:

$$\log(Y_{i,t}) = c_i + d_{1t} \times year + d_{2t} \times year^2 + \beta \times X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

式中 $Y_{i,t}$ 为粮食作物单位面积产量(kg/hm^2); i 为河南省18个地级市; $t=1988, \dots, 2015$ 年; c_i 为地级市固定影响; β 为自变量系数,指气候因子变动一个单位,产量相应变化的百分比; $X_{i,t}$ 为自变量,包括越冬期最高气温、返青期最低气温和生育期平均气温等气候因

2018年1月

子; d 为时间趋势系数; $year$ 表示年份, $year=1988, \dots, 2015$; $year^2$ 表示年份的二次方; $\varepsilon(i,t)$ 为误差项。

通过建立粮食作物产量和生育期各阶段气候因子的面板非线性回归模型,之后根据显著性水平评价粮食作物产量对单个气候因子的敏感性。假设产量变化与气候因子的非线性回归方程显著相关($P<0.1$),则说明该区域粮食作物产量对该气候因子的变化有敏感性,则该区域为该气候因子影响下的敏感区,通过该模型还可以得到产量对该气候因子的敏感效应(即气候因子对产量的贡献率)。

3 结果与分析

3.1 粮食作物生育期气候因子多年变化趋势

3.1.1 冬小麦生育期气候因子时间变化

图2表示冬小麦生育期气候因子的多年变化趋势与突变情况。从图2可以明显的看出,部分气候因子(图2a,图2d,图2e,图2f)的UF和UB曲线产生多个交点,表明越冬期最高气温、灌浆期总降水量、生育期总降水量以及灌浆期总日照时数这4个气候因子呈波动变化趋势。由图2b,图2c发现,返青期最低气温和生育期平均气温发生突变的年份均为1997年,且于1999年左右UF曲线超过 $P<0.05$ 显著

性水平线,说明返青期最低温和生育期平均气温自21世纪初期升温趋势显著。

3.1.2 夏玉米生育期气候因子时间变化

图3表示夏玉米生育期气候因子的多年变化趋势与突变情况。从图中可以明显的看出,部分气候因子(图3a,图3b,图3c)的UF和UB曲线产生多个交点,表明7—8月平均气温、生育期气温日较差以及生育期总降水量这3个气候因子呈波动变化趋势。由图3d发现,生育期总日照时数的UF和UB曲线的交点在2003年,且位于置信区间内,并于2007年低于 $P<0.05$ 显著性水平线,因此,夏玉米生育期总日照时数在2003年发生突变,且自2007年后总日照时数减少趋势明显。

3.2 粮食作物生育期气候因子空间变化

本文对冬小麦和夏玉米生育期内气候因子分别进行3年、5年、7年和9年的滑动平均来剔除噪音的影响,根据平滑后的数值进行线性倾向估计,计算出线性倾向率 b ,并运用普通克里金插值将倾向率 b 进行空间插值,得到不同滑动平均下河南省主要粮食作物生育期内关键气候因子线性倾向率的空间分布。根据4种滑动平均下气候因子倾向率在

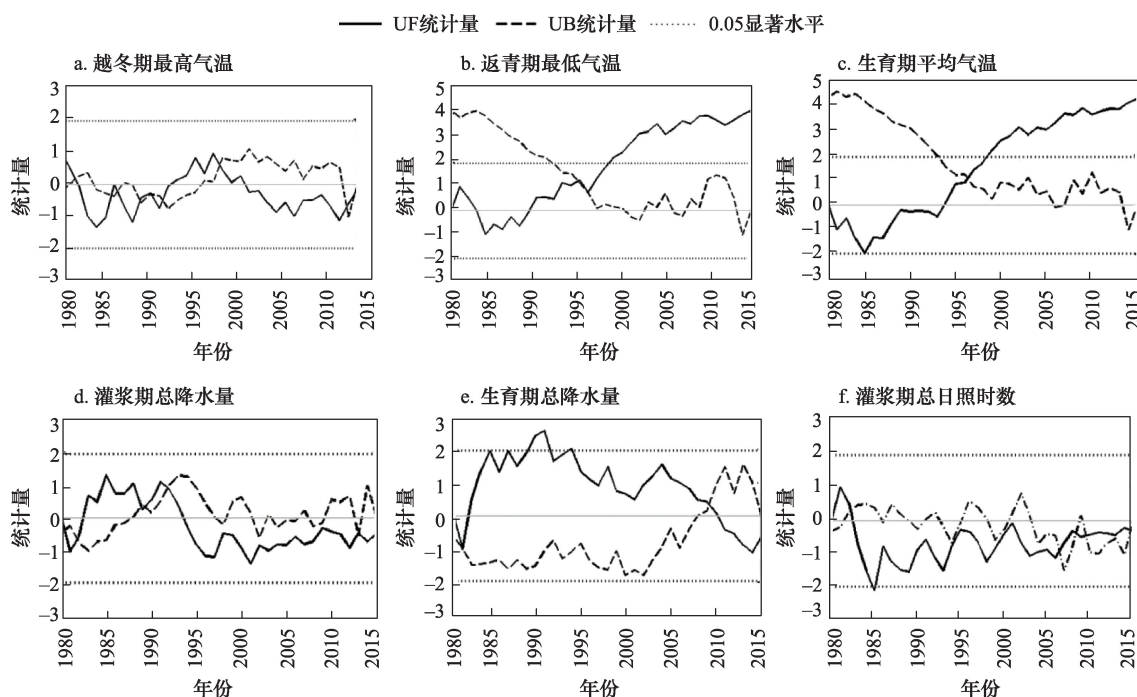


图2 冬小麦生育期气候因子的突变检验

Figure 2 M-K verifying of the climate factors of winter wheat during growth stages

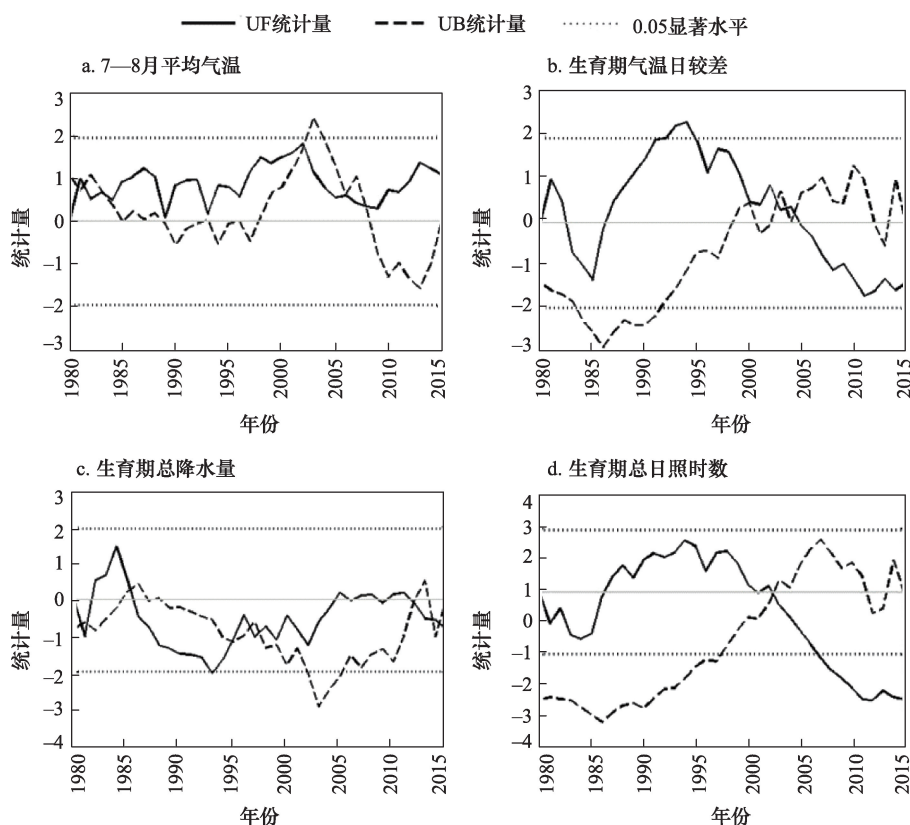


图3 夏玉米生育期气候因子的突变检验

Figure 3 M-K verifying of the climate factors of summer maize during growth stages

河南省的分布格局发现,选择7年滑动平均的线性倾向率进行讨论最为准确,故对3年、5年和9年滑动平均下河南省冬小麦和夏玉米生育期气候因子倾向率的空间分布则不进行一一展示。

冬小麦越冬期最高气温呈现增加和降低趋势的区域范围大致各占河南省的一半,呈增加趋势的区域主要分布在豫东、豫西和豫南的外围地区,其余地区则呈降低趋势(图4a)。冬小麦返青期最低气温和生育期平均气温在整个河南省均呈上升趋势,在空间上两者的升温速率呈现从河南省中部向外围递减的特征(图4b、图4c)。冬小麦灌浆期总降水量在河南省75%以上区域呈减少趋势,豫西和豫南部分地区降水增加(图4d)。冬小麦生育期总降水量在河南省90%以上区域内呈减少趋势,豫北濮阳和豫东商丘的部分地区呈增加趋势(图4e)。冬小麦灌浆期总日照时数在河南省56%区域呈增加趋势,主要分布在豫北、豫中和豫南,呈降低趋势区域则分布在豫西和豫东(图4f)。

夏玉米7—8月平均气温在河南省98%区域呈

升高趋势,且豫中地区升温速度最快,少数降温区主要以斑块状分布于豫北和豫东部分地区(图5a,见142页)。夏玉米生育期气温日较差在河南省90%以上区域内呈缩小趋势,且豫中地区缩小速度最快,少数气温日较差扩大区主要分布在河南省的外围地区(图5b,见142页)。夏玉米生育期总降水量在河南省70%以上区域呈增加趋势,豫西和豫南部分边缘地区降水呈减少趋势(图5c,见142页)。夏玉米生育期总日照时数在整个河南省呈现减少趋势,减少速率大致呈现从河南省中部向周边递减的空间特征(图5d,见142页)。

3.3 粮食作物产量对生育期气候因子的敏感效应分析

3.3.1 冬小麦产量对生育期气候因子的敏感效应分析

越冬期最高气温升高1℃,导致河南省冬小麦产量在-1.8%~1.8%之间变动(图6a,见143页)。在空间上,正向和负向变动区域的面积分别占河南省的67%和33%。正向变动的区域即增产区主要位于豫东、豫北和豫中地区,低增产区冬小麦增产幅度

2018年1月

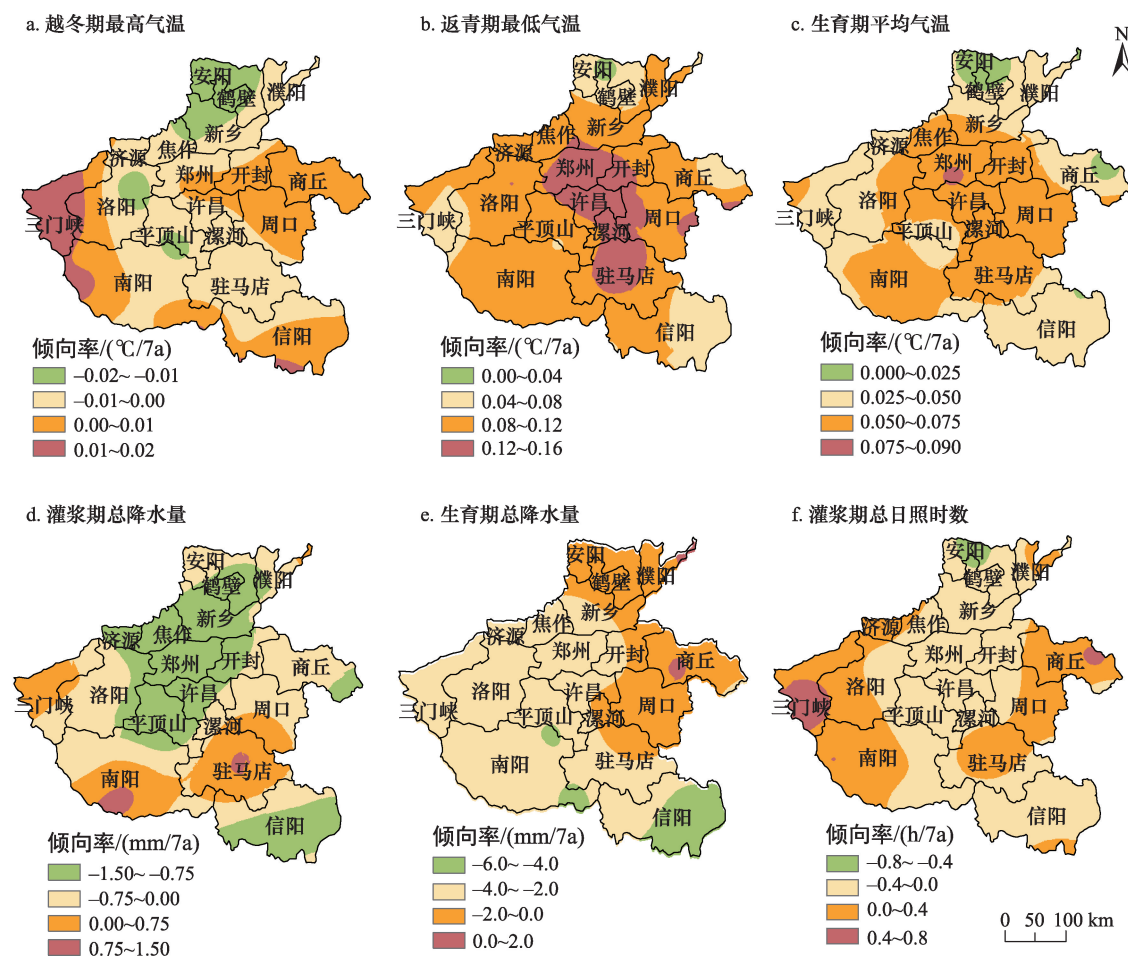


图4 1980—2015年河南省冬小麦生育期气候因子的空间变化趋势

Figure 4 Spatial change trend of key climate factors of winter wheat in growth period in Henan Province from 1980 to 2015

在0%~0.9%,分布在豫东、豫中和除鹤壁外的豫北地区,高增产区增产幅度在0.9%~1.8%,位于豫北的鹤壁。负向变动区域即减产区则集中于豫西、豫南和郑州,低减产区减产幅度在0%~0.9%之间,位于郑州、南阳、驻马店和信阳,高减产区减产幅度在0.9%~1.8%之间,分布在豫西的三门峡和洛阳。

返青期最低气温升高1℃,导致河南省冬小麦产量在-0.5%~1.5%之间变动(图6b,见143页)。在空间上,正向和负向变动区域分别占河南省的83%和17%。增产区增产幅度主要在0%~1.5%之间,低增产区冬小麦增产0%~0.5%,分布在豫北、豫中和豫南地区,中增产区冬小麦增产0.5%~1%,分布在三门峡和郑州,高增产区冬小麦增产1%~1.5%,分布在洛阳和驻马店。减产区减产幅度主要在0%~0.5%之间,主要位于鹤壁、商丘和漯河。

生育期平均气温升高1℃,导致河南省冬小麦

产量变化幅度为-6%~3%(图6c,见143页)。在空间上,正向和负向变动区域分别占河南省的72%和28%。增产区冬小麦增产幅度在0%~3%之间,主要位于豫北、豫东和豫南部分地区。减产区冬小麦减产幅度在0%~6%之间,主要位于豫西和豫南部分地区,低减产区冬小麦减产范围为0%~3%,主要分布在郑州、平顶山和南阳,高减产区冬小麦减产范围为3%~6%,分布在三门峡和洛阳。

灌浆期总降水量增加1mm,导致河南省冬小麦产量在-0.08%~0.08%之间变动(图6d,见143页)。在空间上,正向和负向变动区域分别占研究区域的28%和72%。增产区主要分布在豫西和豫南部分地区,低增产区增产幅度在0%~0.04%之间,分布在济源、三门峡、郑州以及南阳。高增产区增产幅度在0.04%~0.08%之间,分布于洛阳。减产区主要分布在豫北、豫东和豫南地区,低减产区减产幅度在0%

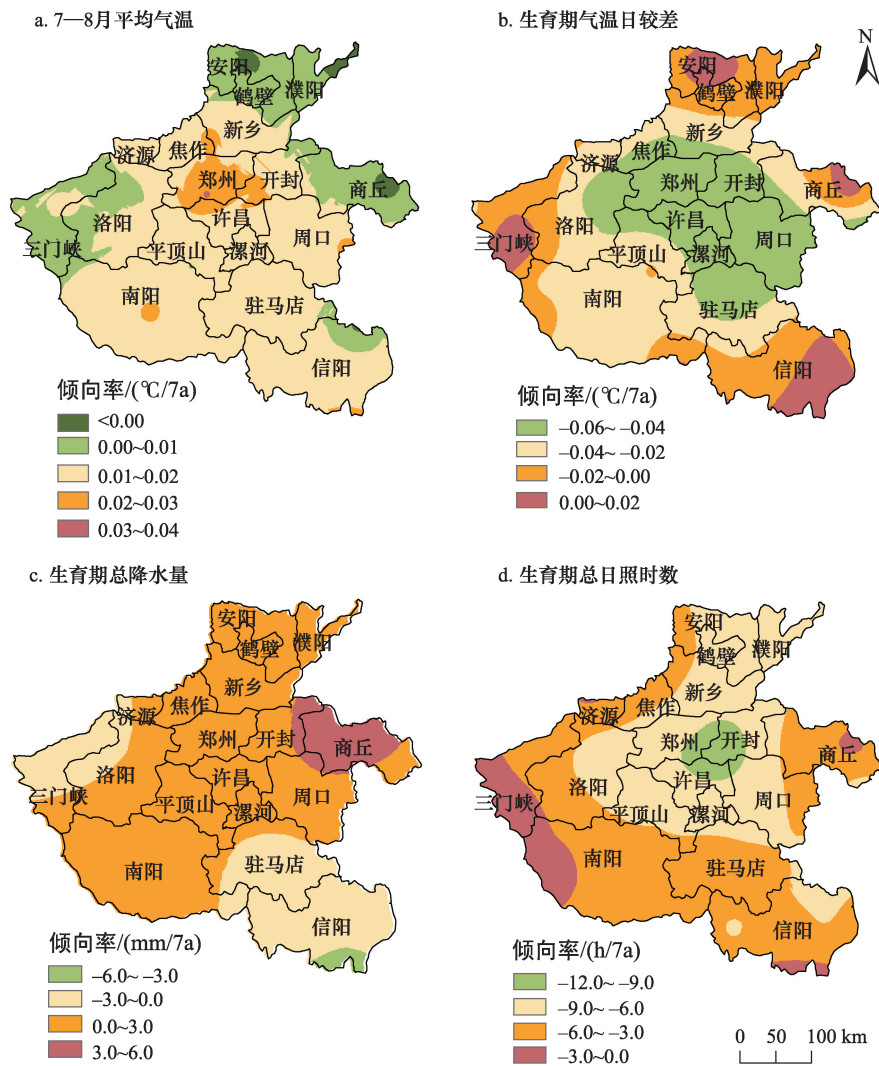


图5 1980—2015年河南省夏玉米生育期气候因子的空间变化趋势

Figure 5 Spatial change trend of key climate factors of summer maize in growth period in Henan Province during 1980-2015

~0.04%之间,主要分布在豫北和豫东区域。高减产区域减产幅度在0.04%~0.08%之间,主要分布于鹤壁、漯河、驻马店以及信阳。

生育期总降水量增加1mm,导致河南省冬小麦产量变化幅度为-0.03%~0.09%(图6e)。在空间上,正向和负向变动区域分别占河南省的22%和78%。增产区主要分布在三门峡、洛阳、郑州以及南阳,增产幅度在0%~0.09%之间。低增产区是郑州和南阳,增产幅度在0%~0.03%之间。中增产区是洛阳,增产0.05%。高增产区则是三门峡,增产0.07%。减产区主要分布在豫北、豫东、豫中和豫南的部分地区,减产幅度在0%~0.03%之间。

灌浆期总日照时数增加1h,导致河南省冬小麦

产量变动幅度在-0.8%~0.8%之间(图6f)。在空间上,正向和负向变动区域的面积占比分别是61%和39%。增产区主要位于豫中、豫北和豫东地区,增产幅度多在0%~0.8%之间。低增产区主要位于豫中和豫东,增产幅度在0%~0.4%之间,高增产区主要位于安阳、濮阳、鹤壁和信阳,增产幅度达0.4%~0.8%。减产区主要分布于豫西和豫南部分区域,减产幅度为0%~0.8%。低减产区主要分布在许昌、漯河驻马店以及商丘,减产幅度在0%~0.4%之间,高减产区集中在豫西的三门峡、洛阳和平顶山,减产幅度为0.4%~0.8%。

综上所述,从敏感效应的性质看,河南省冬小麦产量对越冬期最高气温、返青期最低气温和生育

2018年1月

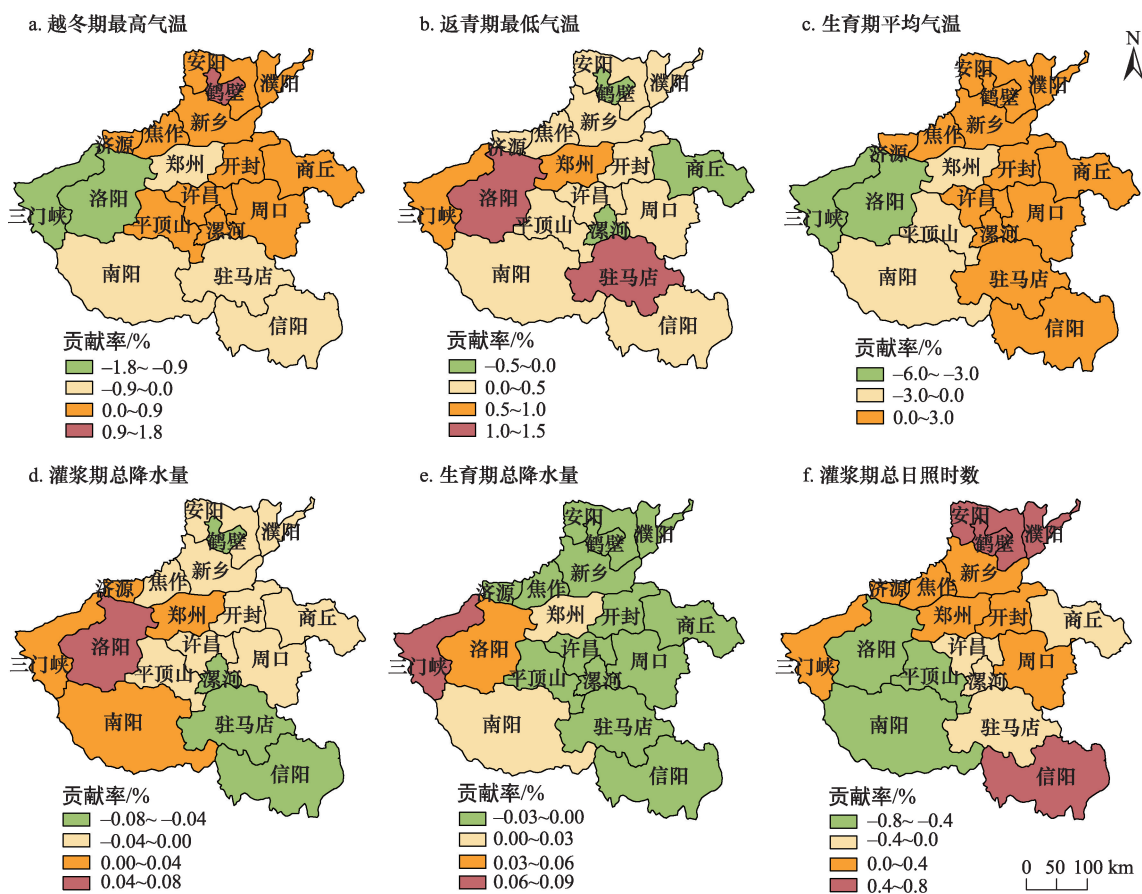


图6 冬小麦产量对生育期气候因子敏感效应的空间分布(生育期气候因子每变化一个单位对产量的贡献率,%)

Figure 6 The distribution of sensitive effect of winter wheat to changes of climate factors (Estimate yield changes (in %) are shown for each increase of 1 unit on climate factors)

期平均气温的敏感效应以正向效应为主,而对灌浆期总降水量、生育期总降水量以及灌浆期总日照时数的敏感效应以负向效应为主。从敏感效应的强度来看,冬小麦产量对生育期平均气温的敏感效应最强,对生育期总降水量的敏感效应最弱,其中对生育期平均气温的敏感效应值在0%~4%之间,对生育期总降水量的敏感效应值在-0.03%~0.09%之间。

3.3.2 夏玉米产量对生育期气候因子的敏感效应分析

7—8月平均气温升高1℃,导致河南省夏玉米产量在-8%~8%之间变动(图7a)。在空间上,正向和负向变动区域的面积占比分别是73%和27%。增产区主要位于豫北、豫中、豫东和豫南部分地区,低增产区增产幅度在0%~4%之间,主要分布于豫北、豫中、豫东和豫南地区。高增产区增产幅度在4%~8%之间,位于开封。减产区主要位于豫西和豫西南地区,低减产区减产幅度在0%~4%之间,分布在郑

州和南阳。高减产区减产幅度在4%~8%之间,分布在豫西的三门峡和洛阳。

生育期气温日较差增加1℃,导致河南省夏玉米产量在-8%~8%之间变动(图7b)。在空间上,正向和负向变动区域分别占河南省的61%和39%。增产区主要分布于豫北、豫东和豫南地区,低增产区增产范围为0%~4%,并且分布范围较广,主要分布在豫北、豫东和豫南的部分区域。高增产区位于开封,增产5%。减产区主要分布在豫中、豫西和豫南的部分地区,低减产区减产幅度在0%~4%之间,主要分布在郑州、许昌、平顶山和南阳。高减产区减产幅度在4%~8%之间,主要分布在济源、三门峡和洛阳。

生育期总降水量增加1mm,导致河南省夏玉米产量在-0.04%~0.04%之间变动(图7c)。在空间上,正向和负向变动区域分别占研究区域的33%和67%。增产区主要分布在豫西和豫南部分地区,低

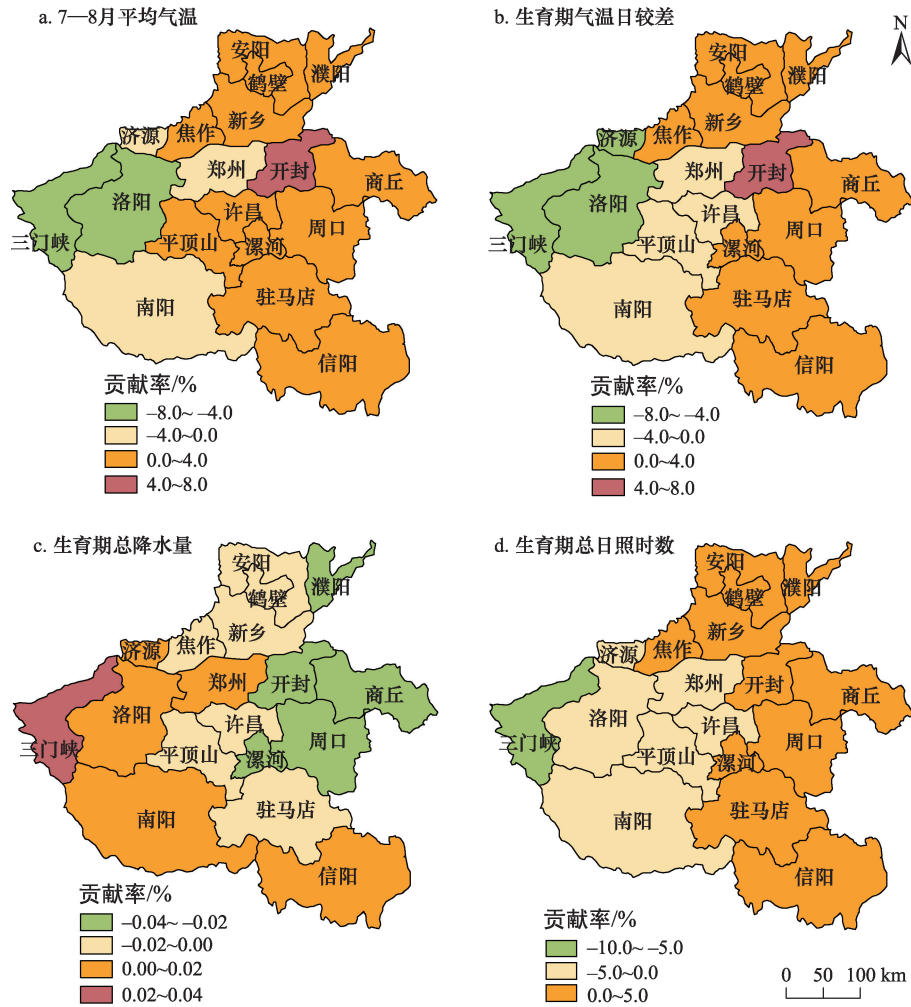


图7 夏玉米产量对生育期气候因子敏感效应的空间分布(生育期气候因子每变化一个单位,对产量的贡献率,%)

Figure 7 The distribution of sensitive effect of summer maize to changes of climate factors (Estimate yield changes (in %) are shown for each increase of 1 unit on climate factors)

增产区增产幅度在0%~0.02%之间,分布面积较大,主要分布在济源、郑州、洛阳、南阳以及信阳。高增产区增产幅度在0.02%~0.04%之间,位于豫西的三门峡。减产区主要分布在豫北、豫东和豫中,低减产区减产幅度在0%~0.02%之间,主要分布在豫北和豫中。高减产区减产幅度在0.02%~0.04%之间,主要集中分布在濮阳、开封、商丘、周口以及漯河。

生育期总日照时数增加1h,导致河南省夏玉米产量在-10%~5%之间变动(图7d)。在空间上,正向和负向变动区域的面积分别占比61%和39%。增产区主要分布在豫北、豫东和豫南的部分地区,增产幅度在0%~5%之间。减产区主要分布在豫西、豫中和豫南部分区域,低减产区分布范围较广,主要分

布在豫中、豫西和豫南的大部分区域,减产幅度在0%~5%之间。高减产区位于三门峡,减产9%。

综上所述,从敏感效应的性质来看,夏玉米产量对7—8月平均气温、生育期气温日较差和生育期总日照时数的敏感效应以正向效应为主,而对生育期总降水量的敏感效应以负向效应为主。从敏感效应的强度来看,夏玉米产量对生育期总日照时数的敏感效应最强,敏感效应值在-10%~5%之间,对生育期总降水量的敏感效应最弱,敏感效应值在-0.04%~0.04%之间。

3.3.3 主要粮食作物产量对气候趋势变化的敏感区

1980—2015年河南省粮食作物产量对气候多年变化趋势的敏感区分布如图(图8),可以看出,冬

2018年1月

小麦和夏玉米对生育期气候因子的敏感区域均占河南省38.9%的区域,若考虑灌溉适应措施,冬小麦和夏玉米的敏感区则分别占河南省的16.7%和22.2%。冬小麦产量对气候因子的敏感区主要分布在豫北、豫中、豫西和豫南,夏玉米产量对气候因子的敏感区主要分布于豫西和豫东地区。

在剔除了社会经济因素和科学技术进步的条件下,冬小麦产量敏感区中,生育期总降水量造成的敏感区面积最大,约占河南省的33.3%。灌浆期总降水量次之,约占22.2%。生育期平均气温和越冬期最高气温造成的敏感区范围最小,均占河南省的11.1%。从空间分布来看,生育期总降水量造成的产量敏感区域除豫东外,其余区域均有分布,灌浆期总降水量造成的产量敏感区主要分布在鹤壁、漯河、驻马店和信阳,生育期平均气温造成的产量敏感区集中分布于三门峡和洛阳,越冬期最高气温造成的产量敏感区则分布于鹤壁与三门峡。然而气候变化通过影响农田灌溉用水间接对单产的影响不可忽视,在考虑农户灌溉适应措施的情况下,生育期总降水量敏感区大致分布在信阳和洛阳,约占河南省的11.1%,灌浆期总降水量造成的敏感区则分布在信阳,约占河南省的5.6%。分析原因可能是信阳地处亚热带季风气候,降水充沛,农业属雨

养农业,冬小麦生长多依赖天然降水,因此受降水变化影响较大。洛阳属于暖温带大陆性季风气候,降水较少且年际变化大,农业为灌溉农业,作物全生育期生长主要依靠灌溉水源,而洛阳灌溉设施较差,2015年有效灌溉面积占耕地面积比重仅为33.6%,因此降水对冬小麦生产影响较大。

同样,在夏玉米产量敏感区中,生育期总降水量造成的敏感区范围最大,约占河南省的27.8%。7—8月平均气温和生育期气温日较差次之,导致的敏感区均占河南省的16.7%。生育期总日照时数造成的敏感区范围最小,占河南省的5.6%。从空间分布来看,生育期总降水量造成的敏感区集中分布于豫东地区,7—8月平均气温造成的敏感区主要位于三门峡、洛阳以及开封,生育期气温日较差造成的敏感区集中分布在豫西的济源、三门峡和洛阳,生育期总日照时数造成的敏感区则位于豫西的三门峡。在考虑农户灌溉适应措施的情况下,夏玉米生育期总降水量造成的敏感区大致分布在三门峡,约占河南省的5.6%,这可能是因为三门峡地处豫西山区,农业为灌溉农业,灌溉条件较豫东地区落后,2015年豫东平均有效灌溉面积占耕地面积比重为76.8%,高于三门峡的27.1%,因此三门峡的玉米生长对降水变化更为敏感。

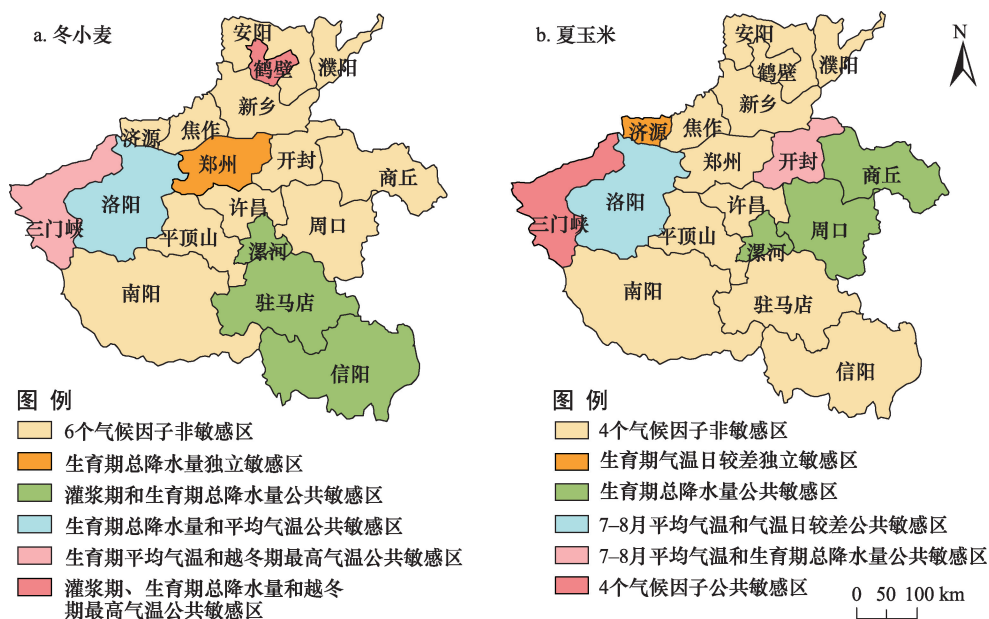


图8 粮食作物产量对生育期气候因子多年变化趋势的敏感区

Figure 8 The distribution of main grain crops yield area sensitive to key climate variation in the growth period in Henan Province

3.3.4 气候突变后主要粮食作物产量对气候因子敏感效应的变化

通过 Mann-Kendall 突变检验发现,冬小麦返青期最低气温和生育期平均气温发生突变的年份皆在 1997 年左右,故将 1997 作为时间节点划分突变

前后两个时间段。夏玉米生育期内发生突变的气候因子为生育期总日照时数,发生突变的年份在 2003 年左右,故将 2003 年作为夏玉米突变前后的时间节点,以此分析气候因子突变后粮食产量对生育期气候因子敏感效应的变化(表 2,图 9)。

表 2 主要粮食作物生育期气候因子突变后产量对气候因子敏感效应的变化

Table 2 The changes of sensitive effect in main grain crops yield to climate factors after M-K verifying (%)

城市	冬小麦返青期最低气温			冬小麦生育期平均气温			夏玉米生育期总日照时数		
	突变前	突变后	差值	突变前	突变后	差值	突变前	突变后	差值
郑州	6.0	0.1	-5.9	-8.0	-1.0	7.1	-2.8	0.1	2.9
开封	-0.2	0.5	0.7	-0.6	1.6	2.2	3.9	-1.7	-5.6
洛阳	14.0	-0.5	-14.5	-25.6	-4.2	21.4	-4.9	0.3	5.2
平顶山	2.2	-0.1	-2.2	-11.7	0.6	12.3	-3.6	0.7	4.3
安阳	-1.4	0.3	1.6	5.1	0.9	-4.3	1.1	-0.5	-1.6
鹤壁	-3.4	-0.2	3.1	11.8	0.9	-10.8	3.9	-0.4	-4.3
新乡	-1.1	0.4	1.5	4.6	0.8	-3.9	1.2	-0.2	-1.5
焦作	1.0	-0.1	-1.1	-3.9	0.4	4.3	0.0	0.2	0.2
濮阳	-0.2	0.1	0.3	0.6	1.0	0.4	3.5	-2.0	-5.5
许昌	2.0	0.1	-1.9	-8.1	0.9	9.1	-2.3	-0.4	1.9
漯河	-0.5	-0.2	0.3	-11.8	2.4	14.2	4.7	-0.6	-5.2
三门峡	9.6	-0.7	-10.3	-13.3	-7.9	5.3	-10.6	0.1	10.6
南阳	2.0	0.2	-1.8	-9.6	-1.7	8.0	-1.4	0.2	1.6
商丘	-2.7	-0.1	2.6	-15.7	1.6	17.3	2.5	-0.9	-3.4
信阳	5.3	-0.3	-5.6	1.5	3.0	1.5	5.8	1.7	-4.1
周口	2.7	-0.1	-2.8	-11.1	1.8	12.9	5.3	-0.4	-5.7
驻马店	10.8	0.7	-10.1	-3.2	2.7	5.9	4.8	1.4	-3.5
济源	无	无	无	无	无	无	无	无	无

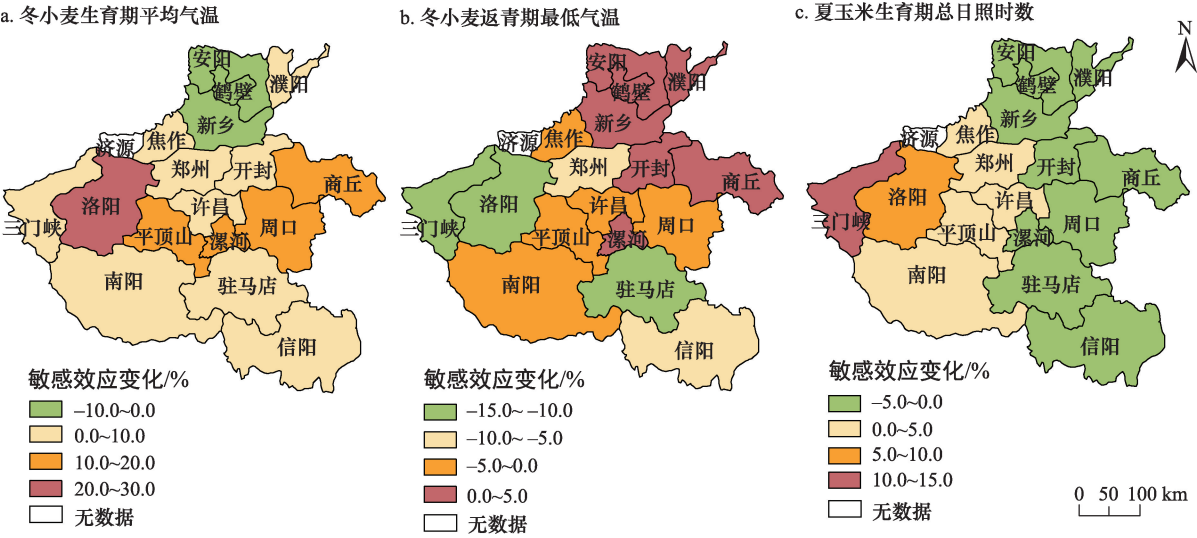


图 9 生育期气候因子突变后产量对气候因子敏感效应变化的空间分布

Figure 9 The distribution of changes of sensitive effect in main grain crops yield to climate factors after M-K verifying

2018年1月

冬小麦返青期最低气温和生育期平均气温突变后,产量对两者的敏感效应发生显著变化(图9a、图9b)。从河南省整体来看,冬小麦产量对生育期平均气温的敏感效应变化幅度较返青期最低气温敏感效应变化幅度大。生育期平均气温突变后,其不利于豫北地区冬小麦产量的增加,而对其余83.3%地区的产量增加有利。返青期最低气温突变后,不利于河南省55.6%区域的冬小麦产量的提高,主要分布于豫西、豫南以及豫中和豫东的部分区域,而有利于豫北和豫东部分区域的冬小麦产量提升。

夏玉米生育期总日照时数突变后,产量对其敏感效应发生明显变化(图9c)。从河南省整体来看,更有利于44.4%区域夏玉米产量的增加,主要分布在豫中和豫西地区。而对豫东、豫北和豫南地区的夏玉米生产带来不利影响。

4 结论与讨论

本文根据1980年以来河南省及周边逐日观测数据,选取与粮食作物生长发育紧密相关的生育期内温度、降水和日照因子,运用气候统计诊断方法分析作物生育期气候资源的时空变化,并结合粮食产量统计数据,使用面板非线性回归模型分析河南省粮食作物产量对气候变化的敏感性,得出以下结论:

(1)通过滑动平均发现河南省主要粮食作物生育期气候因子的平稳变化态势,近40年来,河南省冬小麦返青期最低气温和生育期平均气温在整个河南省呈显著增加趋势,在空间上,两者升温速率均呈现从河南省中部向周边递减的特征。夏玉米生育期总日照时数在河南省大部分地区呈明显减少趋势,其中豫中减少速度最快,豫西南减少最慢。

(2)整体上,河南省冬小麦和夏玉米产量分别对生育期平均气温和生育期总日照时数的敏感效应最强,均为正向敏感效应。两者对生育期总降水量的敏感效应最弱,均为负向敏感效应。

(3)河南省全域38.9%的区域为冬小麦和夏玉米的敏感区,若考虑灌溉适应措施,冬小麦和夏玉米的敏感区则分别占河南省的16.7%和22.2%。空间上冬小麦产量敏感区主要在豫北、豫西和豫南地区,夏玉米则主要在豫西和豫东地区。

(4)冬小麦生育期平均气温的突变有利于河南省冬小麦产量的增加,而返青期最低气温突变带来

河南省44.4%区域的冬小麦增产,增产区主要分布在豫北和豫东地区。夏玉米生育期总日照时数的突变则带来河南省44.4%区域的夏玉米增产,主要分布在豫中和豫西地区。

本文基于作物生育期关键阶段特征,探讨了粮食作物产量对生育期各气候要素变化的敏感性,能够针对生育期不同阶段的敏感性制定相应的适应对策。但本研究还存在一些不足,首先,本文对敏感效应强度的分析是在假设温度变化1℃、降水量变化1mm以及日照时数变化1h的情况下,比较三者对产量的影响而得出的结果,但温度、降水和日照是不同的物理量,可能会影响研究结果,尤其是在探讨降水量变化对产量的影响时,未来研究还需按照小雨、中雨、大雨等雨量等级来深入划分。其次,没有分析产量对极端气候事件的敏感性,同时限于数据的可获得性,本文的研究尺度没有细化到县域。未来需要考虑极端气候事件,丰富研究数据,在县域尺度上进一步分析。

参考文献(References):

- [1] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Compilation Committee. National Assessment Report on Climate Change. Second National Assessment Report on Climate Change [M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [2] 贾敬敦. 中国农业应对气候变化研究进展与对策[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013. [Jia J D. Progress and Countermeasures of Agricultural Coping with Climate Change in China [M]. Beijing: Agricultural science and Technology Press of China, 2013.]
- [3] Issahaku Z A, Maharjan K L. Crop substitution behavior among food crop farmers in Ghana: An efficient adaptation to climate change or costly stagnation in traditional agricultural production system? [J]. *Agricultural and Food Economics*, 2014, 2(1): 1-14.
- [4] Lobell D B, Field C B. Global scale climate crop yield relationships and the impacts of recent warming [J]. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(1): 014002.
- [5] Lobell D B, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980 [J]. *Science*, 2011, 333(6042): 616-620.
- [6] 史文娇, 陶福祿, 张朝. 基于统计模型识别气候变化对农业产量贡献的研究进展[J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1213-1222. [Shi W, Tao F, Zhao Z. Identifying contributions of climate change to

- crop yields based on statistical models: a review [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1213–1222.]
- [7] 朱珠, 陶福禄, 娄运生, 等. 江苏省水稻产量对气候变化的敏感性研究—基于县级和站点尺度[J]. 资源科学, 2013, 35(5): 1035–1043. [Zhu Z, Tao F, Lou Y, *et al.* Rice yield sensitivity to climate change in Jiangsu Province [J]. *Resources Science*, 2013, 35(5): 1035–1043.]
- [8] 谢云. 中国粮食生产对气候资源波动响应的敏感性分析[J]. 资源科学, 1999, 21(6): 13–17. [Xie Y. Analysis of sensitivity of crop yields to climate resource function in China [J]. *Resources Science*, 1999, 21(6): 13–17.]
- [9] 殷培红, 方修琦, 张学珍, 等. 中国粮食单产对气候变化的敏感性评价[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 515–524. [Yin P, Fang X, Zhang X Z, *et al.* Identification of the susceptible regions to climate change impact on grain yield per unit area in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 515–524.]
- [10] 李辉, 姚凤梅, 张佳华, 等. 东北地区玉米气候产量变化及其对气候变化的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(4): 423–428. [Hui L I, Yao F M, Zhang J H, *et al.* Analysis on climatic maize yield and its sensitivity to climate change in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(4): 423–428.]
- [11] 陈超, 庞艳梅, 张玉芳, 等. 四川冬小麦产量对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 127–136. [Chen C, Pang Y M, Zhang Y F, *et al.* Study on the sensitivity and vulnerability of winter wheat yield to climate change in Sichuan Province [J]. *Journal of nature resources*, 2017, 32(1): 127–136.]
- [12] 肖登攀, 陶福禄, 沈彦俊, 等. 华北平原冬小麦对过去30年气候变化响应的敏感性研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 430–438. [Xiao D P, Tao F L, Shen Y J, *et al.* Sensitivity of response of winter wheat to climate change in the North China Plain in the last three decades [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4): 430–438.]
- [13] 耿婷, 付伟, 陈群, 等. 近20年河南省冬小麦生育期气候资源的时空变化及其适应性研究[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(4): 652–661. [Geng T, Wei F U, Chen Q, *et al.* Spatial-temporal Feature of Climatic Resources and Adaptation of Winter Wheat during Last 20 Years in Henan Province [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(4): 652–661.]
- [14] 刘凤伟. 河南省粮食产量增长的影响因素研究—基于县级面板数据的实证分析[J]. 农业经济, 2010, (3): 40–42. [Liu F W. Study on the influencing factors of grain production in Henan Province: an empirical analysis based on panel data [J]. *Agricultural Economy*, 2010, (3): 40–42.]
- [15] 吴芳, 翟石艳, 赵丹丹. 气候变化对中国重要产粮区农民生计影响—以河南省为例[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 217–223. [Wu F, Zhai S Y, Zhao D D. Impact of climate change on farmers' livelihood in China's important grain-producing area—taking Henan Province as an example[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(35): 217–223.]
- [16] 崔力, 王春玲, 李改琴, 等. 濮阳市夏玉米产量与气象因子的关系分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(16): 341–344. [Cui L, Wang C, Li G, *et al.* The analysis of relationships between summer corn output and meteorological factors in Puyangcity [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(16): 341–344.]
- [17] 成林, 刘荣花, 马志红. 增温对河南省冬小麦产量的影响分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 854–859. [Lin C, Liu R H, Ma Z H. Influence of global warming on winter wheat yield in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 854–859.]
- [18] 国家气象局. 中国气象科学数据共享服务网[EB/OL]. (2012–08–04)[2016–10–20]. <http://www.cma.gov.cn/>. [National Meteorological Administration. China Meteorological Data Sharing Service System [EB/OL]. (2012–08–04)[2016–10–20]. <http://www.cma.gov.cn/>.]
- [19] 唐为安, 田红, 陈晓艺, 等. 气候变暖背景下安徽省冬小麦产量对气候要素变化的响应[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 66–78. [Tang W A, Tian H, Chen X Y, *et al.* Response of winter wheat yield to climate change under global warming in Anhui Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(1): 66–78.]
- [20] 李向东, 张德奇, 王汉芳, 等. 越冬前增温对小麦生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 839–846. [Li X D, Zhang D Q, Wang H F, *et al.* Impact of temperature increment before the over-wintering period on growth and development and grain yield of winter wheat [J]. *The Journal of Applied ecology*, 2015, 26(3): 839–846.]
- [21] 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. [Xu L L, Houquan Lv H Q, Fang L. Effect of climate change on the climate suitability of summer maize on the Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Resources Science*, 2014, 36(4): 782–787.]
- [22] 李德, 景元书, 祁宦. 1980–2012年安徽淮北平原冬小麦灌浆期连阴雨灾害风险分析[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 700–709. [Li D, Jing Y S, Qi H. An analysis of disaster risk for continuous cloudy-rainy weather during the filling stage of winter wheat on the HuaiBei Plain, Anhui [J]. *Resources Science*, 2015, 37(4): 700–709.]
- [23] 河南省统计局. 河南统计年鉴1981–2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 1981–2016. [Statistics Bureau of Henan Province. Henan Statistical Yearbook 1981–2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 1981–2016.]

Analysis of sensitivity of main grain crops yield to climate change since 1980 in Henan Province

ZHANG Rongrong¹, NING Xiaoju², QIN Yaochen¹, ZHAO Kaina¹, LI Yonghe¹

(1. College of Environment and Planning, / Key Laboratory of Geospatial Technology for Middle and Lower Yellow River Regions, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. College of Resources and Environment, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Based on statistical agricultural data and daily meteorological data for 39 national-level meteorological stations in Henan province and surrounding areas from 1980 to 2015, we analyzed spatio-temporal changes in hydrothermal conditions during the growth stage of main grain crops. The sensitive effect of main crop yield to changes in climate factors was explored using nonlinear regression. We found that the regreening stage minimum temperature and mean temperature in the growth stage of winter wheat increased significantly: the rate of increase decreased from the center to outside Henan. The sunshine duration of the summer maize growth period decreased significantly, furthermore, central Henan was the fastest reduction area in sunshine duration while southwestern Henan had the slowest reduction. The yield of winter wheat and summer maize exhibited the largest sensitive effect to mean temperature and sunshine duration during the growth period, and both exhibited the smallest sensitive effect to precipitation during the growth period. However, the sensitive region of both caused by the precipitation during the growth period was the largest, accounting for 33.3% and 22.2% respectively. After change in climate factors, mean temperature in the growth stage of winter wheat was beneficial to the rise of winter wheat that grew in the area except for northern Henan, accounting for 83.3% of Henan. However, the regreening stage minimum temperature more easily augmented winter wheat growing in northern and eastern Henan, accounting for 44.4% of Henan. Sunshine duration in the growth stage of summer maize was more beneficial to increased summer maize that grew in central and western Henan, accounting for 44.4% of Henan.

Key words: climate change; sensitivity; grow period; winter wheat; summer maize; Henan Province