

引用格式:巫振富, 赵彦锋, 程道全, 等. 河南省夏玉米产量空间分布特征及其影响因素[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1935-1948.  
[Wu Z F, Zhao Y F, Cheng D Q, et al. Key factors affecting the spatial variation of summer maize yield in Henan Province, China[J].  
Resources Science, 2019, 41(10): 1935-1948.] DOI: 10.18402/resci.2019.10.15

# 河南省夏玉米产量空间分布特征及其影响因素

巫振富<sup>1</sup>, 赵彦锋<sup>2</sup>, 程道全<sup>3</sup>, 陈 杰<sup>2</sup>

(1. 郑州大学公共管理学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学农学院, 郑州 450001;

3. 河南省土壤肥料站, 郑州 450002)

**摘要:**科学评价各种影响因素在作物产量空间分异中的作用, 对因地制宜进行粮食生产功能区划定、种植结构选择、中低产田改造、高标准粮田建设等农业生产实践具有重要意义。本文以河南省为研究区, 收集整理2008—2010年各县田间肥料试验数据、耕地地力评价资料和夏玉米生长季气象数据, 利用Boruta算法和随机森林模型定量评价施肥、土壤、气候、品种和灌排等5个组别共计17个因素对夏玉米产量空间分异的影响。结果显示: 河南省夏玉米高产区分布在豫北黄淮海平原区, 中产区主要分布在豫东平原区和南阳盆地, 低产区分布在豫西、豫南和南阳盆地外围的丘陵山地。产量年际波动较小的区域主要集中分布于中产区。17个因素对夏玉米产量空间分异均有重要影响。施肥, 尤其是配方施肥, 虽然可以有效提高作物产量, 但是并不能改变作物产量的空间分布格局。上述结果表明, 作物产量空间分布格局主要受气候、土壤和立地条件等区域性因素的综合制约, 有效保护高产稳产的优质耕地资源、通过消除土壤障碍因素和改善耕地立地条件提高耕地基础地力是保障可持续粮食安全的重要途径。

**关键词:**夏玉米; 产量; 空间分异; Boruta算法; 随机森林; 土壤; 气候; 河南省

DOI: 10.18402/resci.2019.10.15

## 1 引言

作物产量及其空间分异特征是区域农田自然资源禀赋、物质技术投入、作物品种质量以及农艺管理措施等多种因素共同作用的结果, 系统分析和定量表达这些因素的影响, 对于开展粮食生产功能区规划与基本农田划定、中低产田改良与高标准粮田建设、因地制宜选择种植制度与作物品种、全面实施“藏粮于地, 藏粮于技”战略具有重要参考意义。

作物产量影响因素研究长期以来一直是农学等相关学科门类的一个热点研究领域。总结和分析以往的研究案例发现, 绝大多数研究可以归入两种类型: 一类是集中研究案例地区施肥<sup>[1-4]</sup>、土壤<sup>[5-6]</sup>、气候<sup>[7-13]</sup>、品种<sup>[14-16]</sup>、灌溉<sup>[17-18]</sup>等某一种因素对作物产量的影响, 如鲁艳红等<sup>[1]</sup>通过长期定位肥料试验和

盆栽试验结果, 发现氮磷钾肥或氮磷钾肥配施稻草均能提高双季稻产量; 檀满枝等<sup>[5]</sup>应用模糊C均值算法, 在河南省封丘案例区证明了土壤剖面质地构型对小麦产量的显著影响; 戴彤等<sup>[13]</sup>分析了气候因素对中国西南地区1961—2010年春玉米产量的影响, 指出生长季辐射降低、温度升高以及降水减少等气候因子的变化造成作物减产; Qian等<sup>[14]</sup>基于中国1980—2013年间玉米产量数据, 利用一系列方法量化了品种对玉米增产的贡献, 证实了玉米品种更新在以往20多年玉米产量提升过程中的重要作用; Corcoles等<sup>[18]</sup>在发现案例区甜玉米的产量与品质受灌溉方案显著影响的基础上, 进一步确定了甜玉米产量最高、品质最优的当季度最佳灌溉水量。另一类则集中分析和研究不同因素在影响作物产量时

收稿日期: 2019-03-22 修订日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971128)。

作者简介: 巫振富, 男, 广西八步人, 博士生, 从事土地资源可持续利用研究。E-mail: wfjt1988@163.com

通讯作者: 陈杰, 男, 河南长垣人, 教授, 博士生导师, 从事土壤地理与土地资源管理研究。E-mail: jchen@zzu.edu.cn

的交互作用,但涉及的因素通常不超过2个<sup>[19-24]</sup>。例如Sun等<sup>[19]</sup>的研究表明,气候变化和管理措施这两类因素对华北平原夏玉米产量产生影响,通过优化播种日期和改善种植密度等适应措施,能有效降低由气候变化导致的夏玉米产量波动;Iizumi等<sup>[20]</sup>系统分析和评估了1980—2006年气候变化对美国玉米种植区作物产量的影响,结果发现气候变化引起玉米减产,但将玉米播种期适当提前可有效消除该减产现象;康利允等<sup>[24]</sup>对比分析了不同施磷和灌溉处理下的冬小麦产量,发现在土壤水分供应不足时,磷肥深施有助于作物根系的生长发育,从而提高作物对土壤水分、养分的吸收利用能力,有助于形成高产。

此外,也有学者对作物产量的多种影响因素<sup>[25-29]</sup>进行了有益探讨,如Tamene等<sup>[25]</sup>在马拉维共和国代扎地区(Dedza)的研究结果表明,土壤养分状况、施肥等农艺措施、家庭财富等社会经济因素均可能对该区农户种植的玉米产量产生重要影响;Farmaha等<sup>[26]</sup>在美国内布拉斯加州(Nebraska)的研究发现,玉米高产通常与大豆-玉米轮作方式、适宜耕种的土壤条件、较高的氮肥投入以及可靠的灌溉保证率等因素密切相关。在作物产量多因素影响研究方面,大多数案例通常是基于不同产量水平下相关各因素的取值进行简单的分析与评价。

总体而言,目前尚无法完全厘清和定量描述多种因素对作物产量及其空间分异的相对贡献。玉米是全球重要的经、饲、粮作物,是产量最大的谷物类型,全球约23%的玉米产自中国<sup>[30]</sup>。河南省作为中国13个粮食主产区之一,生产了全国超过8%的玉米<sup>[31]</sup>。本文以河南省2008—2010年夏玉米产量数据为基础,定量分析与评价气候、土壤、品种、施肥、灌排等自然条件与社会经济因素对作物产量及其空间分异的影响程度,为提高作物种植水平、优化水肥资源管理、提升耕地基础地力、建设高产稳产的高标准粮田提供理论与技术支持。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源及处理

本文基础数据主要包括河南省2008—2010年夏玉米产量、作物品种类型、肥料结构和施用量、夏玉米种植区域的土壤性质和田间灌排设施条件、夏

玉米生长季气候条件,数据来源和处理过程如下:

(1)作物品种、施肥量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )和对应的夏玉米产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。为验证河南省县域测土配方施肥效果,2008—2010年各县农业局进行了三区示范田间试验,即不施肥处理的空白对照区(Control Check, CK)、按照当地农民习惯进行施肥处理的传统施肥区(Conventional Fertilization Treatment, CF)、根据土壤化验结果优化施肥处理的配方施肥区(formulated Fertilization Treatment, FF)。CK、CF和FF处理均详细记录了每年作物品种、氮肥(N)、磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ )和钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ )施用量以及与之对应的作物产量。收集整理633个(2008年)、716(2009年)和694个(2010年)河南省夏玉米三区示范田间试验样点的上述数据(图1),并按80%与20%的比例分年度将试验样点随机划分为训练样点和验证样点。

(2)土壤及农田灌排状况。土壤类型与土壤剖面性状、耕层土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量、灌溉保证率和排涝能力等数据与信息均来自河南省农业厅2014年建立的全省耕地地力评价基础数据库。其中,土壤剖面性状系指在省域耕地地力评价中综合反映质地构型、障碍性状、土体厚度等影响农业生产性能的土壤剖面信息<sup>[32]</sup>。

(3)气象数据。通过整理中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中的逐日气象资料(<http://data.cma.cn/site/index.html>)获得。为保证研究区边界区域气象数据的精度,将河南省境内及周边26个基准、基本气象站点共同作为本文的气象数据源(图1)。选取河南省2008—2010年夏玉米生育期内(6—9月)与作物产量形成密切相关的日照时数、降水量、蒸发量、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温以及 $10\sim 30^\circ\text{C}$ 积温作为本文气候因素<sup>[33]</sup>。按照空间距离最小、地形地貌相似的原则,将研究区各站点气候因素计算后赋值给不同空间位置。

为实施夏玉米产量空间预测,将河南省夏玉米种植区耕地进行 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 格网化处理,并将影响夏玉米产量的因素(不包括作物品种)按照空间位置一致性原则赋值给相应位置的格网。

### 2.2 研究方法

本文采用Boruta特征选择算法定量评价影响因素对夏玉米产量及其空间分异的重要性;采用随

2019年10月

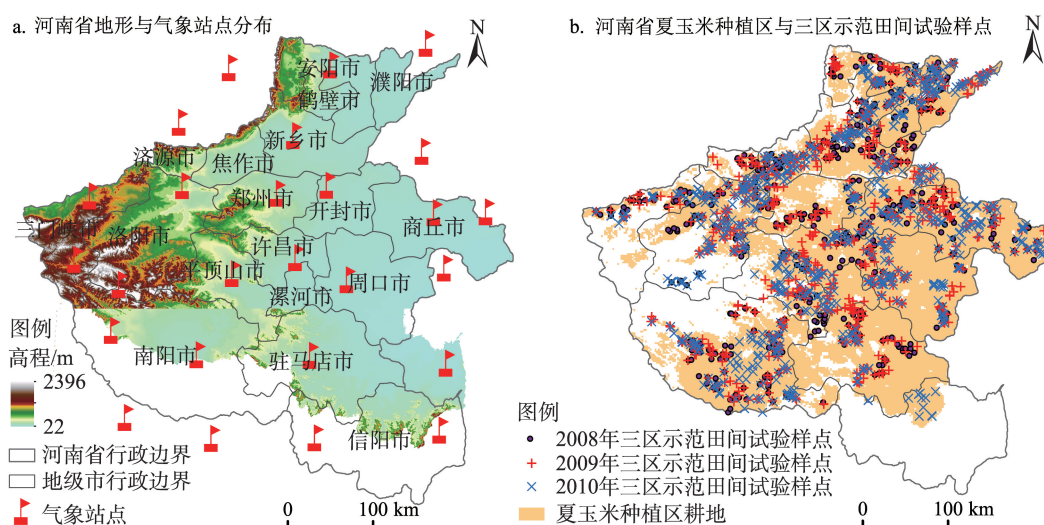


图1 河南省夏玉米种植区以及气象站点与三区示范田间试验样点空间分布

Figure 1 Spatial distribution of summer maize planting areas, meteorological stations, and field fertilization experiment sites in Henan Province

机森林(Random Forest, RF)模型计算不同因素组别对夏玉米产量及其空间分异的解释百分比,并对研究区夏玉米产量进行空间预测。

### 2.2.1 Boruta 特征选择

Boruta是围绕随机森林(Random Forest, RF)构建的用于特征选择的一种包装算法。本文应用Boruta特征选择算法定量评价研究区田间试验样点土壤类型、日照时数、作物品种、N施用量等17个影响因素对CK、CF和FF三种不同处理下夏玉米产量及其空间分异的重要性程度。

基于“RF中单棵树之间不相关”的假设,RF自身具有特征重要性评价功能<sup>[34]</sup>,但是相关研究<sup>[35-37]</sup>表明这种假设并不总是成立。Boruta算法通过向原始特征(Original Features)增加随机性有效解决了这个问题,其核心思想如下:首先,通过随机复制原始特征创建阴影特征(Shadow Features),并将两者合并构建扩展特征(Extended Features);其次,基于扩展特征训练RF模型,以重要性指数(Z-score)为指标评价原始特征与阴影特征的重要性,Z-score越高代表越重要;第三,比较每个原始特征与阴影特征的相对重要性,只有重要性高于所有阴影特征,即高于最好阴影特征( $shadow_{max}$ ),的原始特征才被判定为重要特征<sup>[38]</sup>。

### 2.2.2 随机森林模型

RF是一种多功能机器学习算法,既是一种能够

执行回归和分类任务的弱无偏分类器集合,同时它也是一种有效的数据降维手段。RF通过组合一定数量的分类器,能有效解决单一决策树分类规则复杂、局部最优解、过度拟合等一系列问题<sup>[34]</sup>。决策树的数量 $ntree$ 和每棵决策树节点分裂时选用的随机特征数量 $mtry$ 是RF建模的两个关键参数,本文参考以往相关研究,设置 $ntree=1000$ 、 $mtry=\log_2 M+1$  ( $M$ 为RF模型选定的特征总数量)<sup>[39]</sup>。

将本文选定的17个可能的产量影响因素划分为土壤、气候、灌排、品种、施肥等5个组别,以夏玉米产量为目标变量,依次以各组别因素和全部因素作为特征变量构建RF模型。基于RF模型袋外样本数据(Out-of-bag, OOB),根据公式(1)、(2)求算不同组别因素和全部因素对夏玉米产量及其空间分异的解释比 $PEV_{ar}$ :

$$MSR_{OOB} = k^{-1} \sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i^{OOB})^2 \quad (1)$$

式中: $MSR_{OOB}$ 表示对残差平方的无偏估计; $k$ 为训练样点数量(本文2008年、2009年、2010年 $k$ 值分别为506、573、555); $y_i$ 和 $\hat{y}_i^{OOB}$ 分别为第 $i$ 个训练样点的实测产量和OOB预测产量平均值。

$$PEV_{ar} = \left( 1 - \frac{MSR_{OOB}}{\hat{\sigma}_y^2} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $PEV_{ar}$ 为特征变量对夏玉米产量空间分异的解释百分比; $\hat{\sigma}_y^2$ 表示训练样点实测产量 $y$ 的方差(计算



过程中以 $k$ 作为分母,而非 $k-1$ 。

最后,基于 Boruta 特征选择结果,分别构建 CK、CF 和 FF 三种处理下夏玉米产量关于重要特征变量(不含作物品种)的 RF 模型,对河南省夏玉米种植区进行产量空间预测。

河南省三区示范田间试验样点施肥量和耕地地力调查评价农化样点土壤养分空间插值(相关方法参考文献[40]和[41],插值结果为  $2\text{ km}\times 2\text{ km}$  栅格图)、夏玉米产量空间分布图绘制均利用 ArcGIS 10.1 完成。本文涉及的 Boruta 和 Random Forest 相关分析计算在软件 R 3.5.1 环境中完成,分析结果整

理和图表绘制使用 Microsoft Excel 完成。

### 3 结果与分析

#### 3.1 施肥量和夏玉米产量统计特征

研究区 2008 年、2009 年、2010 年三区示范田间试验样点 CF 和 FF 处理的施肥量统计结果显示(表 1),CF 偏重施 N,轻施  $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  特征明显,FF 则更注重在肥料类型与施用量两个方面优化 N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  结构。以 2008 年抽选的 506 个训练样点为例,FF 采用 N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  配施的样点数为 499 个,配施样点比例远大于 CF,并且 FF 处理在减小 N 施用量的同时,增加了  $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  施用量。本文在三区示范田间

表 1 研究区三区示范田间试验样点施肥量统计特征

Table 1 Statistical characteristics of fertilizer application rate at the field experiment sites

			样点数	N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O		N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O 总 用量平均值 /(kg/hm <sup>2</sup> )
				平均值 /(kg/hm <sup>2</sup> )	变异系数/%	平均值 /(kg/hm <sup>2</sup> )	变异系数/%	平均值 /(kg/hm <sup>2</sup> )	变异系数/%	
2008 年	CF	NPK	230	218	25.41	56	49.18	50	62.26	—
		NP	74	213	17.15	70	58.99	—	—	—
		NK	9	198	25.30	—	—	35	44.26	—
		N	193	248	26.11	—	—	—	—	—
		小计	506	228	25.78	36	107.16	23	139.30	287
	FF	NPK	499	203	23.06	64	34.78	63	39.59	—
		NP	7	166	20.98	43	31.49	—	—	—
		小计	506	203	23.13	64	34.99	62	41.59	329
	2009 年	CF	NPK	274	219	26.62	50	47.42	45	45.65
NP			58	230	16.25	58	52.13	—	—	—
NK			9	233	11.83	—	—	41	16.91	—
N			232	265	22.28	—	—	—	—	—
小计			573	239	25.29	30	106.71	22	119.92	291
FF		NPK	510	211	21.72	58	42.79	55	36.99	—
		NP	30	168	15.62	41	39.59	—	—	—
		NK	22	187	13.23	—	—	37	24.93	—
		N	11	252	17.20	—	—	—	—	—
小计	573	209	22.01	54	51.02	51	47.77	313		
2010 年	CF	NPK	255	232	32.61	62	54.03	52	49.85	—
		NP	65	231	17.05	66	46.91	—	—	—
		NK	15	249	8.25	—	—	43	24.63	—
		N	217	266	29.19	—	—	—	—	—
		小计	552	246	30.13	36	109.62	25	124.14	307
	FF	NPK	491	211	23.42	48	35.42	52	37.96	—
		NP	30	144	47.84	49	34.78	—	—	—
		NK	14	197	12.96	—	—	32	26.73	—
		N	17	222	27.94	—	—	—	—	—
小计	552	207	25.48	45	43.96	47	50.50	299		

注: NPK、NP、NK、N 分别代表 N、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{K}_2\text{O}$  配施、N 和  $\text{P}_2\text{O}_5$  配施、N 和  $\text{K}_2\text{O}$  配施、N 单施。— 表示无该项数据。



2019年10月

试验实施期间,CF处理总施肥量从2008年的287 kg/hm<sup>2</sup>逐年增加至2010年的307 kg/hm<sup>2</sup>,而FF处理则通过不断优化调整施肥结构的方式,将施肥总量从2008年的329 kg/hm<sup>2</sup>减至2010年的299 kg/hm<sup>2</sup>。

训练样点的夏玉米产量统计结果见表2,CK、CF和FF三种处理下夏玉米产量依次增大的同时,各样点之间产量变异系数依次减小。上述结果表明,施肥明显提高了夏玉米产量,同时能有效提高夏玉米产量在空间上的稳定性;比较而言,FF处理对夏玉米产量及其空间稳定性的提升效果明显好于CF处理。

### 3.2 不同因素对夏玉米产量空间分异的重要性分析

Boruta 分析结果显示(图2),2008—2010年研究区CK处理下三区试验样点的蒸发量、降水量、土壤类型、10~30℃积温、日照时数、有机质、作物品种、全氮、≥10℃积温、速效钾、灌溉保证率、土壤剖面性状、排涝能力和有效磷等14个因素的重要性指数(*Z-score*)均大于最好阴影特征(*shadow<sub>max</sub>*),表明这些因素对玉米产量及空间分异具有重要影响。CF和FF处理下,除上述14个因素外,三区试验样点的N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O施用量同样对夏玉米产量及空间分异有重要影响。就管理有关因素而言,任何处理下,灌溉保证率的重要性均大于排涝能力;施肥处理下,无论是CF还是FF,N肥施用量的重要性均最大。

### 3.3 不同因素组别对夏玉米产量空间变异的解释程度

如图3所示,2008—2010年研究区三区示范田间试验实施期间,CK、CF和FF任一处理下,土壤、气候、品种和灌排对样点夏玉米产量及空间分异的解释程度均依次减小;施肥因素对CF和FF处理下

样点夏玉米产量及空间分异的解释程度最高,3年平均水平分别达到27.41%和29.42%,且施肥因素对FF处理样点夏玉米产量及空间分异的解释程度呈现出逐年增大的趋势。与CK处理相比,施肥处理条件下其他组别的因素对夏玉米产量及空间分异的解释程度均有下降,其中以品种、气候和土壤因素下降最为明显,表明在研究区内施肥是夏玉米产量最为重要的影响因素,其他因素的作用受施肥措施的影响。

土壤、气候、品种和灌排等4组因素对CK处理样点2008年、2009年、2010年夏玉米产量空间分异的综合解释比分别为39.05%、56.11%、46.45%,3年平均综合解释比为47.20%;施肥、土壤、气候、品种和灌排等5组因素对CF和FF处理样点2008年、2009年、2010年夏玉米产量空间分异的综合解释比分别为44.21%、49.34%、43.28%和46.30%、51.39%、53.15%,3年平均综合解释比分别为45.61%、50.28%。可以看出,各种影响因素对FF处理样点夏玉米产量空间分异的综合解释程度最高;虽然增加了施肥因素,但各种因素对CF处理样点夏玉米产量空间分异的综合解释程度低于CK处理样点。

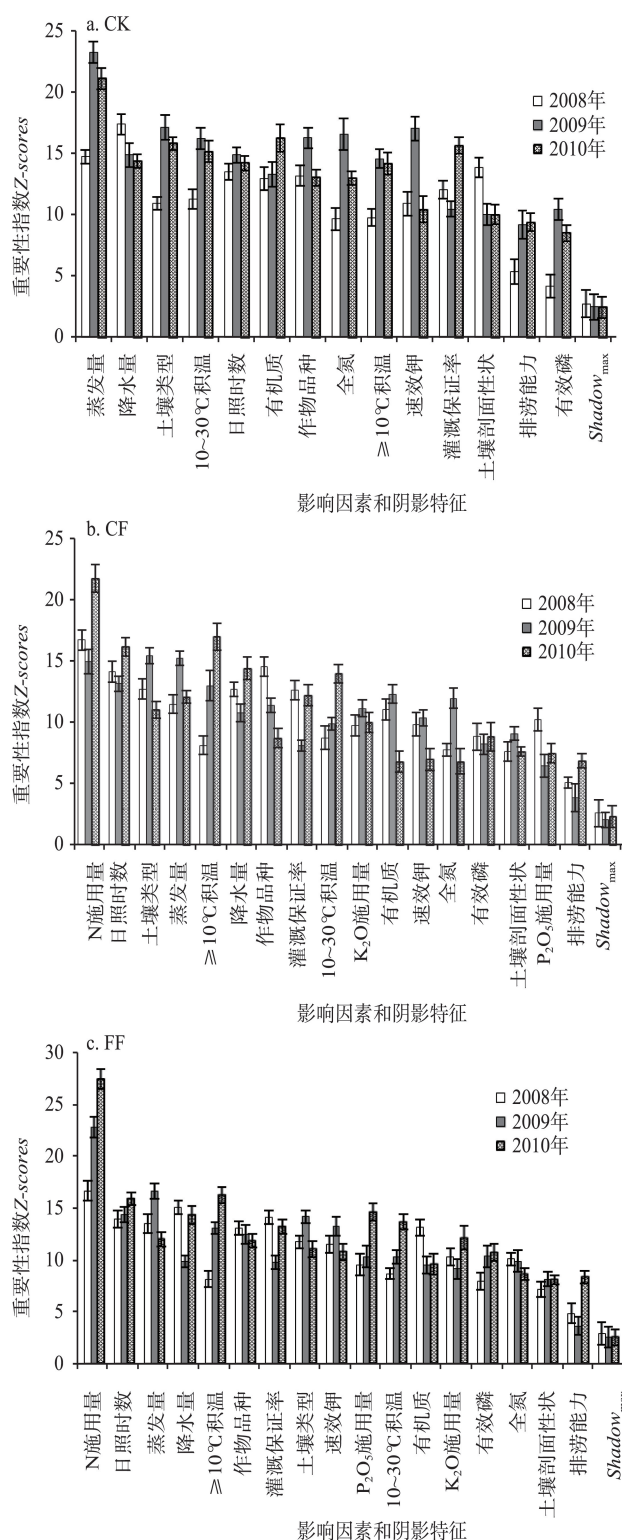
### 3.4 夏玉米产量空间预测

基于Boruta特征变量甄选结果,研究区CK处理试验样点选择蒸发量、降水量、土壤类型、10~30℃积温、日照时数、有机质、全氮、≥10℃积温、速效钾、灌溉保证率、土壤剖面性状、排涝能力和有效磷等13个因素为特征变量,CF和FF处理试验样点在上述13个因素中另加N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O施用量共16个因素为特征变量,分别构建CK、CF和FF处理下夏玉米

表2 研究区三区示范田间试验样点夏玉米产量统计特征

Table 2 Statistical characteristics of summer maize yields of the field experiment sites

年份	施肥处理	最低产量/(kg/hm <sup>2</sup> )	平均产量/(kg/hm <sup>2</sup> )	最高产量/(kg/hm <sup>2</sup> )	标准差/(kg/hm <sup>2</sup> )	变异系数/%
2008年	CK	2460	6020	10485	1429	23.74
	CF	3240	7630	11550	1355	17.76
	FF	4509	8460	12495	1410	16.67
2009年	CK	1889	5826	11505	1445	24.80
	CF	2154	7455	12150	1367	18.34
	FF	2334	8137	13395	1430	17.57
2010年	CK	2906	5787	11595	1282	22.15
	CF	4050	7332	11645	1345	18.34
	FF	4200	7992	12338	1431	17.91

图2 影响因素和阴影特征的重要性(误差线为 $\pm$ 标准差)Figure 2 Z-score values of influencing factors and  $shadow_{max}$  (error bar represents  $\pm 1$  standard deviation)

产量与重要特征变量的RF模型,实施研究区夏玉米产量空间预测。

输出结果显示,2008—2010年不同施肥处理下

夏玉米产量实测值与预测值呈极显著相关,相关系数0.60~0.75,均方根误差952~1145 kg/hm<sup>2</sup>,基于验证样点的预测精度列入表3。根据空间预测结果可

2019年10月

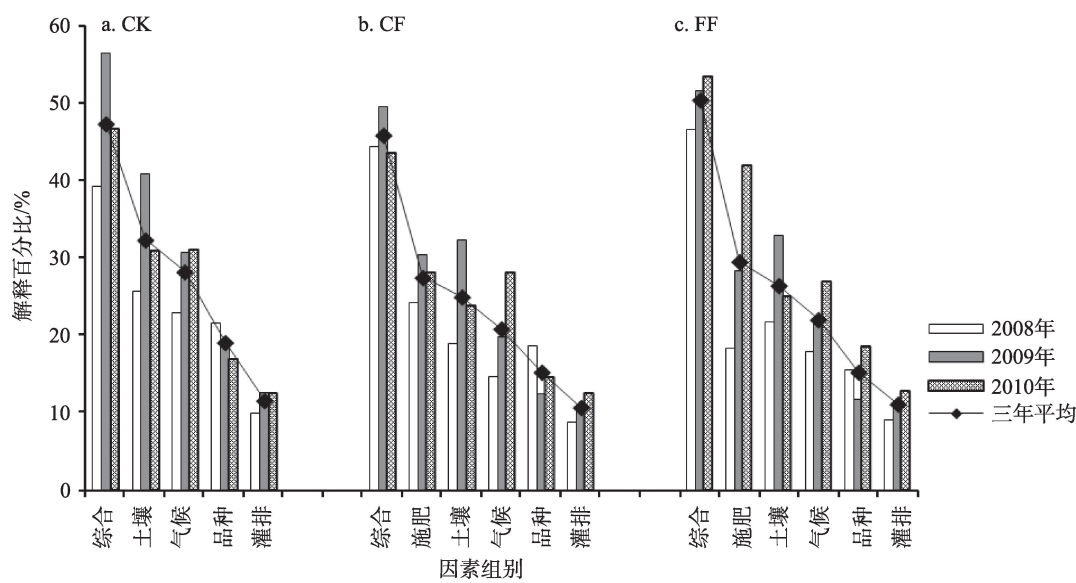


图3 不同因素组对夏玉米产量空间分异的解释百分比

Figure 3 Percent of spatial variation of summer maize yield explained by factor categories

表3 夏玉米产量预测精度

Table 3 Prediction accuracy of summer maize yield

	2008年			2009年			2010年		
	CK	CF	FF	CK	CF	FF	CK	CF	FF
相关系数 $r$	0.60***	0.64***	0.66***	0.75***	0.69***	0.71***	0.67***	0.65***	0.73***
均方根误差 $RMSE/(kg/hm^2)$	1145	1045	1060	965	997	1011	952	1018	982

注:\*\*\*表示在1%水平显著相关。

以发现(图4),首先,CK、CF和FF三种施肥处理下研究区3年平均单产分别为4035~8491 kg/hm<sup>2</sup>、5953~9808 kg/hm<sup>2</sup>和6302~10385 kg/hm<sup>2</sup>,虽然不同处理方式下夏玉米3年平均单产差距明显,但空间分布格局基本一致:高产区主要分布于濮阳、安阳、鹤壁、新乡、开封等河南省境内的黄淮海平原北部地区,中产区主要分布在商丘、周口、漯河、郑州、许昌等黄淮海平原南部地区以及南阳盆地,低产区则分布在豫西、豫南山区以及南阳盆地周边的丘陵山地。另外,相同施肥处理下夏玉米产量存在明显年际变化,其产量空间分布格局也存在局部差异:如FF处理下,2008年、2009年、2010年研究区夏玉米单产分别为5849~11102 kg/hm<sup>2</sup>、5570~11047 kg/hm<sup>2</sup>、5449~11219 kg/hm<sup>2</sup>;产量空间分布方面,2008年低产区集中分布在郑州、许昌、平顶山3市和洛阳交界的山地丘陵区,2009年低产区则零散分布于平顶山和许昌交界处、洛阳北部和西部、南阳盆地东侧等

山地丘陵区,2010年低产区扩展至驻马店南部,而商丘东部则由原来的中低产区变为高产区。本文田间试验开展期间(2008—2010年)与2015—2017年期间的河南省各市夏玉米平均产量散点图表明(图5),虽然各市夏玉米产量水平在两个时期有所变化,但是全省夏玉米产量空间分布格局并未发生根本性改变。

以同一空间位置多年作物产量的标准差表征该位置产量的年际波动情况,统计结果显示(图6),2008—2010年河南省夏玉米产量表现最稳定的区域主要是位于豫东商丘、周口、漯河、许昌等地的中产区,南阳盆地周边低产区和豫北高产区内的零星区域夏玉米产量也较稳定。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文研究得出,施肥处理可以显著提高田间试验样点夏玉米产量,并有效降低产量的空间变异性,



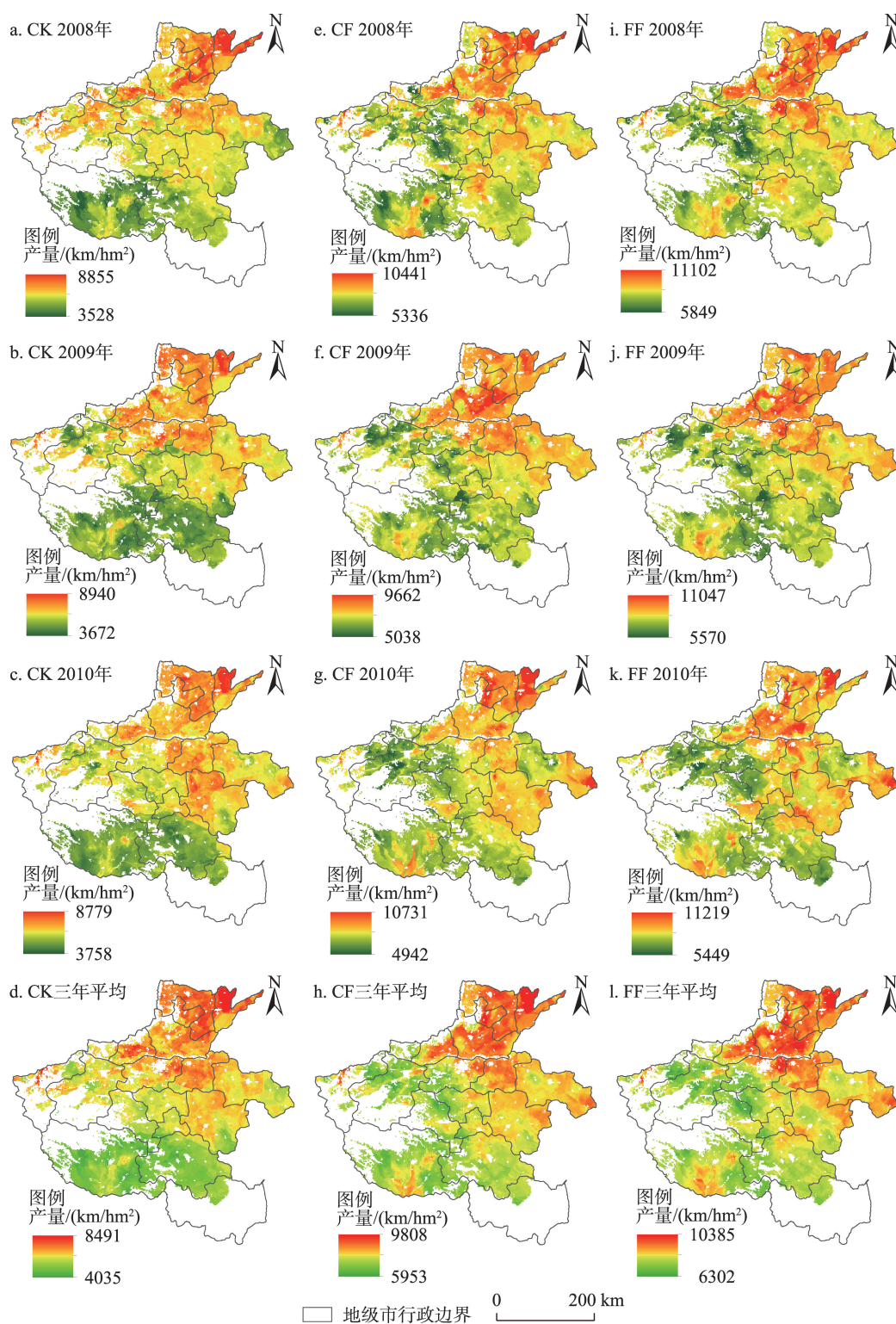


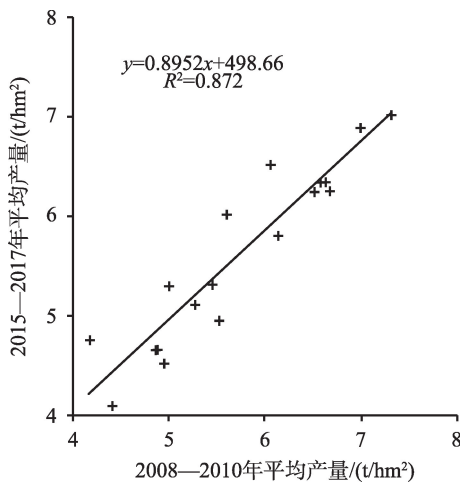
图4 研究区夏玉米预测产量空间分布图

Figure 4 Spatial distribution of predicted summer maize yields in Henan Province

这得到了在研究区实施的其他相关研究结果的支持<sup>[44,45]</sup>。另外,相关研究表明<sup>[46,47]</sup>,在研究区当前光温水平、土壤养分状况等条件下,在确保作物产量不

降低甚至有所提升的前提下,通过FF处理优化施肥结构、提高肥料利用率从而减少化肥施用量具有现实可行性。2015年中国提出“力争到2020年主要农

2019年10月



注:依据2009—2011年、2016—2018年《河南统计年鉴》<sup>[42,43]</sup>中各市夏玉米单位面积产量数据整理。

图5 河南省各市2008—2010年和2015—2017年夏玉米3年平均产量散点图

Figure 5 Scatter graph of average summer maize yields over three years of 2008–2010 and 2015–2017 of different cities in Henan Province

作物化肥使用量实现零增长”的宏伟目标已经提前3年实现,测土配方施肥技术发挥了巨大作用。

氮素是夏玉米生长所需的重要元素<sup>[48]</sup>,直接影响夏玉米生长发育并决定籽粒产量,是夏玉米最终产量的重要限制因子<sup>[49–51]</sup>。本文分析结果表明,N施用量对夏玉米产量重要性最大,在研究区开展的其他相关研究也得出了相同或相似的结论<sup>[52,53]</sup>。河南省降水量年际波动较大,空间分布不均,总体呈纬向分布,自南向北逐渐减少,北部夏玉米高产区降水日数相对较少,西部、北部均为夏玉米生产期内

干旱灾害的高发区<sup>[54,55]</sup>,在这样的农业气候资源条件下,通过灌溉有效补充土壤水分、保障作物生长期需水、缓解和消除夏玉米生理干旱对产量形成的影响,是保证研究区夏玉米高产稳产的关键措施。因此,相对于农田排涝能力,灌溉保证率对研究区夏玉米产量的重要性更大。

灌排因素在本文涉及的5个因素组别中对夏玉米产量空间变异的解释比最小,但这并不意味着田间水分管理对夏玉米产量不重要,与之相反,灌排管理可以有效改善农田土壤水分状况、提高肥料利用率、保证土壤通气性与适耕性,且相对于气候、土壤、品种等因素,灌排水平的改善与提高相对容易。灌排因素对夏玉米产量空间变异解释比低,是因为研究区内超过总面积60%的耕地灌溉保证、超过总面积90%的耕地排涝水平无明显差异<sup>[42,43]</sup>。从较大时间尺度上看,作物产量提高首先得益于作物品种的不断改良与新品种的不断推广<sup>[56,57]</sup>,其重要性超过土壤、气候等自然因素以及施肥、灌排等管理因素。而本文分析结果却显示,与施肥、土壤、气候和灌排4个因素组别相比,品种对于研究区夏玉米产量及空间分异的重要性只高于灌排水平,这显然与相关研究的结论不同。相关研究的时间尺度较大,旨在揭示过去几十年甚至更长周期内品种的推陈出新对玉米产量的重要影响;而本文则是在较小的时间尺度上、从空间视角出发,探讨包括品种在内的多种因素对夏玉米产量空间分异的影响,在这里,品种的差异主要体现为不同地区的品种本地

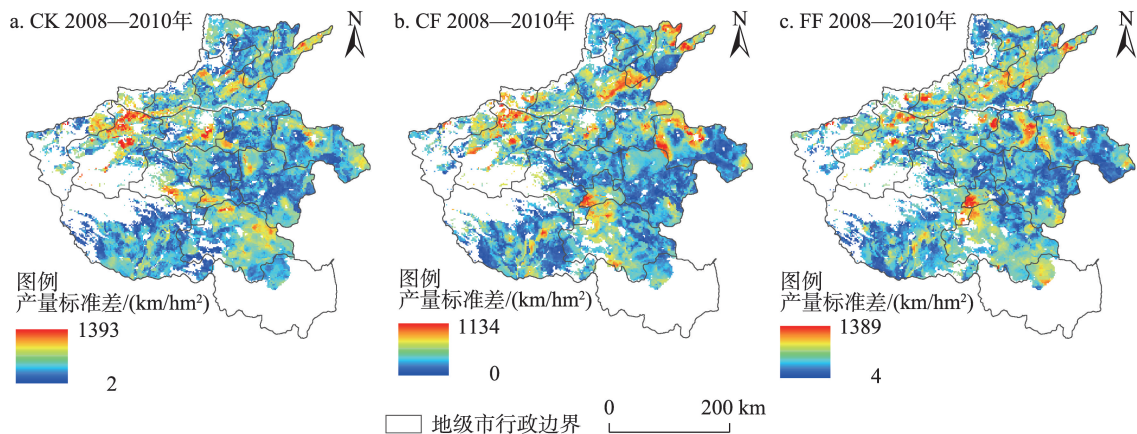


图6 2008—2010年3年夏玉米产量标准差空间分布图

Figure 6 Spatial distribution of standard deviation of summer maize yields, 2008–2010

化特征方面,同一试验样点3个连续不同年份的品种变化几乎不存在。

本文CK、CF、FF三种施肥处理条件下的夏玉米产量空间分布格局基本一致:高产区域主要分布在豫北黄淮海平原区,中产区主要分布在豫东平原地区和南阳盆地,低产区主要分布在豫西、豫南和南阳盆地外围的丘陵山地,这一结论与相关研究结果相似<sup>[58,59]</sup>。作物产量及其空间分异受多种因素综合影响<sup>[25]</sup>,主要包括土壤类型、土体构型和有效养分含量等土壤因素<sup>[60-62]</sup>,气温、降水、日照时数和有效积温等气候因素<sup>[63-65]</sup>,抗病、抗逆等作物品种特性<sup>[66,67]</sup>,灌溉排涝条件等田间基础设施因素<sup>[68-70]</sup>,以及施肥结构和施用量等施肥管理因素<sup>[71-75]</sup>。毋庸置疑,施肥能够在很大程度上提高夏玉米产量,但在省域空间尺度上,夏玉米产量的空间分布格局仍然深受气候要素、土壤类型、立地条件、管理水平等区域性因素的综合制约<sup>[45]</sup>,施肥措施并不能改变作物产量空间分布格局。

## 4.2 结论

基于河南省2008—2010年三区示范田间试验数据、省域耕地地力评价数据和夏玉米生长季逐日气象资料,采用Boruta算法和RF模型定量评价施肥、土壤、气候、品种和灌排等5组共计17个因素对河南省夏玉米产量及其空间分异的影响,主要结论如下:

(1)作物品种、土壤类型、土壤剖面性状、有机质、全氮、有效磷、速效钾、日照时数、降水量、蒸发量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ 积温、灌溉保证率、排涝能力和 $\text{N}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 施用量等17个因素对河南省夏玉米产量空间分异均具有重要影响。

(2)河南省夏玉米产量高产区主要分布在豫北黄淮海平原区,中产区主要分布在豫东平原区和南阳盆地,低产区分布在豫西、豫南和南阳盆地外围的丘陵山地。产量年际波动较小的稳产区主要集中分布于豫东黄淮海平原中产区,零散分布于南阳盆地周边低产区以及豫北高产区。

(3)作物产量空间分布格局主要受气候、土壤和立地条件等区域性因素的综合制约,施肥(尤其是配方施肥)虽然可以有效提高作物产量,但是并不能改变作物产量的空间分布格局。在国家大力

推进化肥减量提效的背景下,立足现有农业气候资源条件,有效保护高产稳产的优质耕地资源、通过消除土壤障碍因素和改善耕地立地条件提高耕地基础地力是河南省贯彻落实“藏粮于地”战略,实现粮食可持续高产稳产的重要途径。

## 参考文献(References):

- [1] 鲁艳红,廖育林,周兴,等.长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J].土壤学报,2015,52(3):597-606. [Lu Y H, Liao Y L, Zhou X, et al. Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 597-606.]
- [2] Larsen S U, Jorgensen U, Kjeldsen J B, et al. Long-term miscanthus yields influenced by location, genotype, row distance, fertilization and harvest season[J]. Bioenergy Research, 2014, 7(2): 620-635.
- [3] Hakl J, Kunzova E, Konecna J. Impact of long-term organic and mineral fertilization on lucerne forage yield over an 8-year period [J]. Plant Soil Environment, 2016, 62(1): 36-41.
- [4] Chen H, Deng A X, Zhang W J, et al. Long-term inorganic plus organic fertilization increases yield and yield stability of winter wheat[J]. The Crop Journal, 2018, 6(6): 589-599.
- [5] 檀满枝,李开丽,史学正,等.华北平原土壤剖面质地构型对小麦产量的影响研究[J].土壤,2014,46(5):913-919. [Tan M Z, Li K L, Shi X Z, et al. Impact of soil profile texture pattern (SPTP) on wheat yield in North China Plain[J]. Soils, 2014, 46(5): 913-919.]
- [6] Li T, Hao X M, Kang S Z. Spatial variability of grape yield and its association with soil water depletion within a vineyard of arid northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 158-166.
- [7] Hu Y N, Liu Y J, Tang H J, et al. Contribution of drought to potential crop yield reduction in a wheat-maize rotation region in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(7): 1509-1519.
- [8] Irmak S, Djaman K, Rudnick D R. Effect of full and limited irrigation amount and frequency on subsurface drip-irrigated maize evapotranspiration, yield, water use efficiency and yield response factors[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 271-286.
- [9] 贺亚琴,冷博峰,冯中朝.基于“超越对数生产函数”对湖北省油菜生长产量的气候影响探讨[J].资源科学,2015,37(7):1465-1473. [He Y Q, Leng B F, Feng Z C. The impact of climate factors on rapeseed production in Hubei by using translog production function[J]. Resources Science, 2015, 37(7): 1465-1473.]
- [10] 姚玉璧,王瑞君,王润元,等.黄土高原半湿润区玉米生长发育及产量形成对气候变化的响应[J].资源科学,2013,35(11):2273-2280. [Yao Y B, Wang R J, Wang R Y, et al. Growth and



2019年10月

- yield of corn under climate change in the semi-humid region of the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2013, 35(11): 2273-2280.]
- [11] 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.]
- [12] 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 L, Lou Y S, et al. Rice yield sensitivity to climate change in Jiangsu Province[J]. *Resources Science*, 2013, 35(5): 1035-1043.]
- [13] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 基于 APSIM 模型的气候变化对西南春玉米产量影响研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 155-165. [Dai T, Wang J, He D, et al. Modelling the impacts of climate change on spring maize yield in Southwest China using the APSIM model[J]. *Resources Science*, 2016, 38(1): 155-165.]
- [14] Qian J R, Zhao Z J. Estimating the contribution of new seed cultivars to increases in crop yields: A case study for corn[J]. *Sustainability*, 2017, DOI: 10.3390/su9071282.
- [15] Zhou M M, Gwata E T. Quantifying sugarcane cultivar genetic gains in the Midlands Region of South Africa[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(1): 342-348.
- [16] Mengistu N, Baenziger P S, Nelson L A, et al. Grain yield performance and stability of cultivar blends vs. component cultivars of hard winter wheat in Nebraska[J]. *Crop Science*, 2010, 50(2): 617-623.
- [17] 马文军, 宇振荣. 农户管理水平下微咸水灌溉对土壤盐动态及作物产量的影响[J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 585-593. [Ma W J, Yu Z R. Effects of slight saline water irrigation on soil salinity and crop yield[J]. *Resources Science*, 2013, 35(3): 585-593.]
- [18] Corcoles H L, De Juan J A, Picornell M R. Comparison of yield components and quality factors of sweet corn under different irrigation scheduling strategies[J]. *Outlook on Agriculture*, 2017, 46(3): 203-212.
- [19] Sun H Y, Zhang X Y, Wang E L, et al. Assessing the contribution of weather and management to the annual yield variation of summer maize using APSIM in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2016, 194: 94-102.
- [20] Iizumi T, Sakurai G, Yokozawa M. Contributions of historical changes in sowing date and climate to US maize yield trend: An evaluation using large-area crop modeling and data assimilation [J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2014, 70(2): 73-90.
- [21] Sarvari M, Pepo P. Effect of production factors on maize yield and yield stability[J]. *Cereal Research Communications*, 2014, 42(4): 710-720.
- [22] Ye Q, Lin X M, Adey E, et al. Evaluation of climatic variables as yield-limiting factors for maize in Kansas[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 464-475.
- [23] Szeles A, Horvath E, Vad A, et al. The impact of environmental factors on the protein content and yield of maize grain at different nutrient supply levels[J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2018, 30(9): 764-777.
- [24] 康利允, 沈玉芳, 岳善超, 等. 不同水分条件下分层施磷对冬小麦根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 140-147. [Kang L Y, Shen Y F, Yue S C, et al. Effect of phosphorus application in different soil depths on root distribution and grain yield of winter wheat under different water conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 140-147.]
- [25] Tamene L, Mponela P, Ndengu G, et al. Assessment of maize yield gap and major determinant factors between smallholder farmers in the Dedza district of Malawi[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 105(3): 291-308.
- [26] Farmaha B S, Lobell D B, Boone K E, et al. Contribution of persistent factors to yield gaps in high-yield irrigated maize[J]. *Field Crops Research*, 2016, 186: 124-132.
- [27] Kusano E, Chien H, Chen Y F, et al. Decomposition of the factors determining changes in China's maize yields[J]. *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly*, 2016, 50(1): 63-71.
- [28] Yin X G, Jabloun M, Olesen J E, et al. Effects of climatic factors, drought risk and irrigation requirement on maize yield in the Northeast Farming Region of China[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2016, 154(7): 1171-1189.
- [29] Chen G Q, Liu H J, Zhang J W, et al. Factors affecting summer maize yield under climate change in Shandong Province in the Huanghuaihai Region of China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(4): 621-629.
- [30] The Food and Agriculture Organization (FAO). Crop Statistics[EB/OL]. (2019-01-18) [2019-05-06]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- [31] 中国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. [National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.]
- [32] 赵彦锋, 张化楠, 程道全, 等. 基于归并“土体构型”图的省域耕地地力评价[J]. *土壤通报*, 2015, 46(5): 1040-1048. [Zhao Y F, Zhang H N, Cheng D Q, et al. Cultivated land productivity evaluation at provincial scale based on a map of grouped soil profile configuration pattern[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1040-1048.]
- [33] 陆伟婷, 于欢, 曹胜男, 等. 近20年黄淮海地区气候变暖对夏玉米生育进程及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(16): 3132-3145. [Lu W T, Yu H, Cao S N, et al. Effects of climate warming on growth process and yield of summer maize in Huang-Huai-Hai Plain in last 20 years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(16): 3132-3145.]
- [34] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.

- [35] Strobl C, Boulesteix A L, Zeileis A, et al. Bias in random forest variable importance measures: Illustrations, sources and a solution [J]. *Bmc Bioinformatics*, 2007, DOI: 10.1186/1471-2105-8-25.
- [36] Strobl C, Boulesteix A L, Kneib T, et al. Conditional variable importance for random forests[J]. *Bmc Bioinformatics*, 2008, DOI: 10.1186/1471-2105-9-307.
- [37] Rudnicki W R, Kierczak M, Koronacki J, et al. A Statistical Method for Determining Importance of Variables in an Information System[R]. Kobe: Rough Sets and Current Trends in Computing, Proceedings, 2006.
- [38] Kursa M B, Jankowski A, Rudnicki W R. Boruta—A system for feature selection[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2010, 101(4): 271–285.
- [39] 曹正凤. 随机森林算法优化研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2014. [Cao Z F. Study on Optimization of Random Forests Algorithm[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2014.]
- [40] 吴学文, 晏路明. 普通 Kriging 法的参数设置及变异函数模型选择方法: 以福建省一月均温空间内插为例[J]. *地球信息科学*, 2007, 9(3): 104–108. [Wu X W, Yan L M. Setting parameters and choosing optimum semivariogram models of ordinary kriging interpolation: A case study of spatial interpolation to January average temperature of Fujian Province[J]. *Geo-Information Science*, 2007, 9(3): 104–108.]
- [41] 巫振富, 赵彦锋, 陈杰. 土壤属性预测中 Kriging 参数对插值精度的影响研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 551–558. [Wu Z F, Zhao Y F, Chen J. Effects of parameter condition on prediction precision of soil attributes by Kriging interpolation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 551–558.]
- [42] 河南省统计局. 河南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009–2011. [Henan Province Bureau of Statistics. *Henan Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009–2011.]
- [43] 河南省统计局. 河南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016–2018. [Henan Province Bureau of Statistics. *Henan Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016–2018.]
- [44] 王宜伦, 韩燕来, 张许, 等. 氮磷钾配比对高产夏玉米产量、养分吸收积累的影响[J]. *玉米科学*, 2009, 17(6): 88–92. [Wang Y L, Han Y L, Zhang X, et al. Effects of different fertilizers on yield and plant nutrient accumulation of high-yield summer maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(6): 88–92.]
- [45] 巫振富, 赵彦锋, 程道全, 等. 基于地理加权回归的小麦测土配方施肥效果空间分析[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 860–872. [Wu Z F, Zhao Y F, Cheng D Q, et al. Spatial analysis of the effect of soil-testing-based-formulated-fertilization of wheat based on geographically weighted regression[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 860–872.]
- [46] 杨岩, 谭德水, 江丽华, 等. 黄淮海夏玉米一次性施肥技术效应研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3909–3919. [Yang Y, Tan D S, Jiang L H, et al. The effects of one-off fertilization of summer maize in Huang-Huai-Hai Region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3909–3919.]
- [47] 王宜伦, 苗玉红, 贵会平, 等. 不同土壤类型夏玉米推荐施肥效应研究[J]. *中国农业科技导报*, 2012, 14(1): 110–115. [Wang Y L, Miao Y H, Gui H P, et al. Effect of recommend fertilization on summer maize in different soil groups[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14(1): 110–115.]
- [48] Dobermann A, Cassman K G. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia[J]. *Plant and Soil*, 2002, 247(1): 153–175.
- [49] 裴瑞杰, 袁天佑, 王俊忠, 等. 施用腐殖酸对夏玉米产量和氮效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2189–2198. [Pei R J, Yuan T Y, Wang J Z, et al. Effects of application of humic acid on yield, nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2189–2198.]
- [50] Masclaux-Daubresse C, Daniel-Vedele F, Dechorgnat J, et al. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: Challenges for sustainable and productive agriculture[J]. *Annals of Botany*, 2010, 105(7): 1141–1157.
- [51] Cassman K G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(11): 5952–5959.
- [52] 孙克刚, 杨焕焕, 张琨, 等. 冬小麦、夏玉米高效施肥技术研究[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(10): 38–43. [Sun K G, Yang H H, Zhang K, et al. Study on high efficient fertilization technology of winter wheat and summer maize[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(10): 38–43.]
- [53] 王宜伦, 李慧, 张晓佳, 等. 不同质地潮土夏玉米推荐施肥方法研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(4): 402–407. [Wang Y L, Li H, Zhang X J, et al. Studies on recommended fertilization methods of summer maize in different fluvo-aquic soil texture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4): 402–407.]
- [54] 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. [Li S Y, Fang W S, Ma Z H. Changes of agricultural climate resources in Henan Province during summer maize growing season[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(7): 21–26.]
- [55] 薛昌颖, 马志红, 胡程达. 近40a黄淮海地区夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(2): 1–14. [Xue C Y, Ma Z H, Hu C D. Spatiotemporal characteristics of drought during summer maize growing season in Huang-Huai-Hai area for recent 40 years[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(2): 1–14.]
- [56] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivar shift, management practice and climate change to maize yield in North China Plain in 1981–2009[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60

2019年10月

- (7): 1111–1122.
- [57] Ma D L, Xie R Z, Zhang F L, et al. Genetic contribution to maize yield gain among different locations in China[J]. *Maydica*, 2015, 60 (1): 66–73.
- [58] 余卫东, 马志红. 近50年河南省夏玉米生产潜力及产量差时空变化特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 205–212. [Yu W D, Ma Z H. Temporal-spatial variation of yield potential and yield gaps of summer maize during the past 50 years in Henan Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1): 205–212.]
- [59] 张国合, 张博, 王海标, 等. 河南省夏玉米主产区土壤理化性状研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(20): 92–96. [Zhang G H, Zhang B, Wang H B, et al. Soil physical and chemical properties in main maize area of Henan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(20): 92–96.]
- [60] 黄晓婷, 赵亚丽, 杨艳, 等. 不同土壤类型冬小麦-夏玉米轮作施肥效应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(16): 3140–3151. [Huang X T, Zhao Y L, Yang Y, et al. Effects of fertilization on winter wheat-summer maize rotation system in different soil types[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3140–3151.]
- [61] 赵霞, 黄瑞冬, 唐保军, 等. 潮土区不同土体构型对夏玉米生长与产量的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 538–542. [Zhao X, Huang R D, Tang B J, et al. Effects of different fluvo-aquic soil configuration on growth and yield of summer maize[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 538–542.]
- [62] 徐娜, 党廷辉, 刘文兆. 黄土高原沟壑区农田土壤养分与作物产量变化的长期监测[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1240–1248. [Xu N, Dang T H, Liu W Z. Soil nutrient balance and crop yields after 10-years' fertilization in the gully area of the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (5): 1240–1248.]
- [63] Liu Y J, Qin Y, Ge Q S, et al. Responses and sensitivities of maize phenology to climate change from 1981 to 2009 in Henan Province, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(9): 1072–1084.
- [64] 江铭诺, 刘朝顺, 高伟. 华北平原夏玉米潜在产量时空演变及其对气候变化的响应[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(6): 865–876. [Jiang M N, Liu C S, Gao W. Analysis of spatial and temporal variation in potential summer maize yield and its response to climate change in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6): 865–876.]
- [65] 杨鹏宇, 胡琦, 马雪晴, 等. 1961–2015年华北平原夏玉米生长季光热资源变化及其影响[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(7): 431–441. [Yang P Y, Hu Q, Ma X Q, et al. Spatiotemporal variation of heat and solar resources and its impact on summer maize in the North China Plain over the period 1961–2015[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(7): 431–441.]
- [66] Ruffo M L, Gentry L F, Henninger A S, et al. Evaluating management factor contributions to reduce corn yield gaps[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(2): 495–505.
- [67] Williams R, Borges L F, Lacoste M, et al. On-farm evaluation of introduced maize varieties and their yield determining factors in East Timor[J]. *Field Crops Research*, 2012, 137: 170–177.
- [68] Djaman K, Irmak S, Rathje W R, et al. Maize evapotranspiration, yield production functions, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(2): 373–393.
- [69] Irmak S. Interannual variation in long-term center pivot-irrigated maize evapotranspiration and various water productivity response indices. I: Grain yield, actual and basal evapotranspiration, irrigation-yield production functions, evapotranspiration-yield production functions, and yield response factors[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2015, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000825.
- [70] 余卫东, 冯利平, 盛绍学, 等. 黄淮地区涝渍胁迫影响夏玉米生长及产量[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 127–136. [Yu W D, Feng L P, Sheng S X, et al. Effect of waterlogging at jointing and tasseling stages on growth and yield of summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (13): 127–136.]
- [71] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 178–185. [Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, et al. Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 178–185.]
- [72] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4781–4789. [Wang D Z, Hua K K, Guo Z B. Effects of long-term fertilization on crop yield and soil physical properties in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4781–4789.]
- [73] 王宜伦, 白由路, 王磊, 等. 基于养分专家系统的小麦-玉米推荐施肥效应研究[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(22): 4483–4492. [Wang Y L, Bai Y L, Wang L, et al. Effects of recommended fertilization based on nutrient expert in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (22): 4483–4492.]
- [74] 王宜伦, 李祥剑, 张许, 等. 豫东平原夏玉米平衡施钾效应研究[J]. *河南农业科学*, 2010, (4): 39–42. [Wang Y L, Li X J, Zhang X, et al. Effects of balanced fertilization on summer maize in the Eastern Plains of Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010, (4): 39–42.]
- [75] 张伟纳, 刘宇娟, 董成, 等. 氮肥运筹对潮土冬小麦/夏玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 165–175.



[Zhang W N, Liu Y J, Dong C, et al. Effect of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat and summer

maize in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 165–175.]

## Key factors affecting the spatial variation of summer maize yield in Henan Province, China

WU Zhenfu<sup>1</sup>, ZHAO Yanfeng<sup>2</sup>, CHENG Daoquan<sup>3</sup>, CHEN Jie<sup>2</sup>

(1. School of Public Administration, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Agricultural Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. Station of Soil and Fertilizer Extension Service, Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Assessing the contribution of various factors to the spatial variation of crop yield is of vital importance in promoting agricultural practice according to local conditions, such as delimiting functional regions of grain production, optimizing cropping system, improving medium and low yield fields, and developing high-standard grain fields. This study was carried out in Henan Province, China, by using the field fertilization experiment data at the county level from 2008 to 2010, cultivated land productivity evaluation data, and meteorological data in summer maize growing season. Employing the Boruta algorithm and random forest model, contributions of five factor categories (including 17 factors) namely fertilization, soil, climate, cultivar, and irrigation and drainage, to the spatial variation of summer maize yield were quantitatively assessed. It was demonstrated that the high-yield areas of summer maize were mainly distributed in the Huang-Huai-Hai Plain (HHHP) in the north, and the medium-yield fields were concentrically located in the HHHP in the east and in Nanyang Basin, while the low-yield parcels were scattered in the mountainous and hilly areas in the west, the south, and the periphery of Nanyang Basin. The fields with less inter-annual fluctuation of yield were mainly found in medium-yield areas. All the 17 factors played an important role in the spatial variation of summer maize yield. Fertilization, particularly formulated fertilization, effectively increased crop yield, however, it was not work on changing the spatial distribution pattern of crop yield. This led to the conclusion that the spatial distribution pattern of crop yield is dominated by regional factors such as climate, soil and site conditions. Thus, for sustainable food security, it is necessary to protect high quality cultivated land resources with high and stable yield, and to improve cultivated land productivity by eliminating soil obstacle factors and improving the site.

**Key words:** summer maize; yield; spatial variation; Boruta algorithm; random forest; soil; climate; Henan Province