

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190694

赵向阳, 丛佳慧, 安志超, 陈明优, 郭校伟, 赵凌, 崔振岭. 冀南夏玉米氮肥效率变异特征与高产限制因子解析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 365–374

ZHAO X Y, CONG J H, AN Z C, CHEN M Y, GUO X W, ZHAO L, CUI Z L. Nitrogen fertilizer efficiency and high-yield limiting factors of summer maize in the southern Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 365–374

冀南夏玉米氮肥效率变异特征与高产 限制因子解析*

赵向阳, 丛佳慧, 安志超, 陈明优, 郭校伟, 赵凌, 崔振岭**

(中国农业大学资源与环境学院 北京 100193)

摘要: 夏玉米产量的形成受气候、栽培、施肥等诸多因素的影响, 为找到产量、氮肥效率的变异特征和产量差异在土壤养分和管理措施上的响应, 提出科学的优化方案, 本研究以河北省曲周县为例, 连续4年对农户田块的田间管理和土壤养分进行实时跟踪, 研究农户尺度的产量、氮肥效率变异特征; 同时采用边界线的分析方法对管理措施和土壤养分进行分析, 找出该地区限制高产的主要因素。结果表明: 2015—2018年农户夏玉米平均产量为 $10.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 变异系数为 15.64%, 年度之间产量和氮肥效率呈波动状。2015—2018年总农户产量差为 $4.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 当季农户产量差的变化范围为 $1.96 \sim 3.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 消除产量差可实现 16.46%~34.72%的增产。4年内农户获得高产或氮肥高效的次数呈正态分布, 获得一次高产和一次氮肥高效的占比最大, 同一个农户不同年份的产量、氮肥效率处于不稳定的状况。高产稳定型农户分别在有效穗数、千粒重、播期、密度上与低产稳定型农户有显著差异($P < 0.05$)。产量差的形成均是由各个因素共同导致, 不同年份各因素对产量差的贡献不同, 总体来看, 密度、土壤有机质、播期是造成该区域产量差的主要因素。区域产量的提高, 农户间产量差和氮肥效率差的缩减, 以及低产农户向高产稳定型农户的转变, 都需要土壤养分的改善和综合管理措施的优化。

关键词: 夏玉米; 田块尺度; 高产; 氮肥效率; 产量差; 管理措施

中图分类号: S513

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Nitrogen fertilizer efficiency and high-yield limiting factors of summer maize in the southern Hebei Province*

ZHAO Xiangyang, CONG Jiahui, AN Zhichao, CHEN Mingyou,
GUO Xiaowei, ZHAO Ling, CUI Zhenling**

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The output of summer maize from the Huanghuaihai region accounts for approximately 35% of the national maize output, and so increasing the summer maize output of this region is of great significance to China's food security. The formation of summer maize yield is affected by many factors, such as climate, cultivation, fertilization, and so on. To find the yield variation characteristics, improve the nitrogen fertilizer efficiency, understand the different yield responses to soil nutrients and management measures, and

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0200107)资助

** 通信作者: 崔振岭, 主要研究方向为养分管理与作物施肥。E-mail: cuizl@cau.edu.cn

赵向阳, 主要研究方向为小麦/玉米养分综合管理。E-mail: 18801261351@126.com

收稿日期: 2019-09-24 接受日期: 2019-12-26

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0200107).

** Corresponding author, E-mail: cuizl@cau.edu.cn

Received Sep. 24, 2019; accepted Dec. 26, 2019

propose a scientific optimization plan, this study used the example of Quzhou County of Hebei Province to investigate nitrogen fertilizer efficiency and high-yield limiting factors of summer maize. The management and soil nutrients of farmer's fields were tracked in real time for 4 consecutive years, and the yield variation characteristics and nitrogen fertilizer efficiency were studied at the farm scale. Meanwhile, the management measures and soil nutrients were analyzed using the boundary line analysis method, to identify the main factors that limit high yields in the region. The results showed that the average summer maize yield for farmers during 2015–2018 was $10.26 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, the coefficient of variation was 15.64%, and the yield and nitrogen fertilizer efficiency fluctuated between years. From 2015 to 2018, the total yield gap was $4.02 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, which varied from 1.96 to $3.68 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ between years. Eliminating the yield gap could achieve a yield increase of 16.46%–34.72%. Over 4 years, the occurrences of farmers obtaining a high yield or nitrogen fertilizer efficiency was normally distributed. The proportions of obtaining one high yield and one high nitrogen fertilizer efficiency were the largest. The yield and nitrogen fertilizer efficiency of a farmer were in an unstable state over the years. The stable-high-yield farmers had significant differences concerning the number of productive ears, 1000-grain weight, sowing date, and density compared with the stable-low-yield farmers ($P < 0.05$). This study showed that, in this region, the optimal sowing date was June 9–14, the optimal harvest density was 56 000–59 000 plants $\cdot\text{hm}^{-2}$, the optimal N application rate was 210–230 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, the optimal P_2O_5 application rate was 45–65 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, the optimal K_2O application rate was 50–60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the optimal N-bass application ratio was 0.7–0.8. The formation of the yield gap was caused by various factors, and the contribution of different factors to the yield gap was different in different years. Generally speaking, the density, soil organic matter, and sowing date were the main factors that influenced the yield gap. Increasing regional yields, shrinking yield gaps between farmers, and increasing nitrogen fertilizer efficiency, as well as the shift from low-yield farmers to stable-high-yield farmers, all require improvements in soil nutrients and the optimization of comprehensive management measures.

Keywords: Summer maize; Field scale; High yield; Nitrogen fertilizer efficiency; Yield gap; Management measures

中国是世界第二大玉米(*Zea mays*)生产国, 玉米总产量约占世界 21%(FAO, 2016)。黄淮海平原是我国最大的夏玉米产区, 种植面积约 1 000 万 hm^2 , 总产量占全国玉米产量的 35%左右^[1], 提高该地区夏玉米的产量水平对我国粮食安全意义重大。小农户生产是黄淮海平原最主要的经营模式, 大量研究指出, 该地区当前农户夏玉米产量水平为 $4.5\sim 15.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[2-5], 氮肥偏生产力为 $15.4\sim 96.1 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[3,6-7], 农户间产量、氮肥效率差异较大。通过光温气候模型模拟分析, 黄淮海地区夏玉米的生产潜力为 $9.2\sim 18.9 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[8], 随着育种技术的不断发展, 夏玉米品种的生产潜力大幅度增加^[9], 农户产量与潜在产量差距明显。分析农户夏玉米的产量、氮肥效率变异特征, 缩小农户间产量差异, 提高氮肥利用效率, 对于满足当前的粮食需求至关重要^[10]。

夏玉米产量的形成受气候、栽培、施肥等诸多因素的影响^[11], 农户间产量差异的形成也是由土壤养分和管理措施的不同所导致, 找到产量差异在土壤养分和管理措施上的响应, 是缩小农户间产量差距的有效方法, 也是提高低产田块产量水平的方法之一。近年来对产量差的研究越来越多^[12-16], 产量差是指不同产量水平之间的差异^[17-19]。产量差分析是将造成这种产量差值的因子定义为产量限制因子, 利用边界线分析各种产量限制因子和产量之间的相关性, 边界线分析可用于定量化分析土壤因素、农户管理因素等对产量差的贡献。解析产量差产生的

原因, 找出区域限制因素, 有利于提高区域作物产量。该分析方法主要分为试验调查与统计分析和作物模拟模型系统分析两大类^[20]。目前通过模型模拟分析的研究很多, 李克南^[21]和范兰等^[22]通过模型分析指出了区域尺度冬小麦(*Triticum aestivum*)的产量潜力和产量差的时空变异特征; 李雅剑等^[23]采用品种 $\times$ 密度联网试验和 Hybrid-Maize 模型模拟相结合的方法分析内蒙古玉米产量差及产量潜力; Liu 等^[24]利用 Hybrid-Maize 模型对我国玉米主产区的产量潜力和产量差进行了定量分析。目前通过试验调查对产量变异分析的较少; 高肖贤等^[4]采用跟踪记载和实测的方法分析了各个措施与产量的关系, 但未能 在同一系统中定量比较。

本研究采用农户田块实时跟踪的方法, 连续 4 年跟踪相同农户玉米田块的管理措施和土壤养分动态, 解析农户田块年际间、年度内的产量、氮肥效率变异特征; 探究高产稳定型田块和低产稳定型田块在土壤养分指标和管理措施上的响应, 旨在找到导致田块低产的主要原因, 为低产稳定型田块的增产提供理论依据; 同时利用 Boundary line 系统, 定量化该地区高产的限制因子, 旨在为该地区产量差的缩减寻找途径。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域地处河北省曲周县($114^{\circ}50'22.3''\sim$

115°13'27.4"E, 36°35'43"~36°57'N), 位于河北省南部、海河低平原区, 在漳河冲积、漳河-滏阳河冲积平原和黄河冲积平原交汇处, 黄淮海平原中部, 海拔 40~45 m。全县土地面积 667 km², 属温带半湿润大陆性季风气候区, 冬春季寒冷干燥, 夏季温热多雨。雨热同季, 干湿交替明显。热量条件能满足一年两熟种植, 属雨养与灌溉相结合的农业模式, 冬小麦-夏玉米轮作为该地区主要的种植模式。

1.2 数据来源

本文依托于 2011 年在河北省曲周县第四疃镇王庄村建立的“科技小院”^[25], 对当地 3 个村庄(王庄、付庄、小李庄, 表 1)农户的作物生产进行长期的实时、定点跟踪和农户走访调查。跟踪调查内容包括夏玉米生产的管理措施、土壤养分含量、玉米产量。

表 1 不同年份 3 个村庄跟踪田块数量

Table 1 Number of tracked fields in the three investigated villages in different years

年份 Year	王庄 Wangzhuang	付庄 Fuzhuang	小李庄 Xiaolizhuang	总计 Total
2015	90	13	12	115
2016	92	9	12	113
2017	84	15	13	112
2018	70	8	14	92

于 2015—2018 年每年夏玉米播种前, 采用五点取样法用土钻对各田块 0~20 cm 耕层土壤进行样品采集, 充分混匀后取 1/4 装入自封袋中并带回实验室处理、化验获取土壤养分数据: 土壤 pH 采用电极法测定, 水土比为 2.5:1; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 土壤有效磷采用 Olsen 法测定; 土壤全氮采用半微量凯式定氮法测定; 土壤速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定。每年夏玉米生育期内通过各田块实时跟踪获取品种、播期、底肥配方及用量、追肥配方及用量等管理数据。每年收获季通过对各田块的测产获取玉米产量及产量构成、收获密度等数据: 每个地块选择长势均匀的 3 个点(避开路边、树下、边行等), 每个点测量 1 次 10 m 双行玉米株数、4 行玉米行距, 收 1 个 5 m 双行的测产方。晾晒之后用机器脱粒, 用谷物水分仪测定含水量, 测得实际产量(换算成 13%含水量)。从样方样品中随机选取均匀的 10 穗测定穗粒数、千粒重等产量构成指标。

1.3 数据分析

1.3.1 各指标计算方法

氮肥效率采用氮肥偏生产力(N-PFP)表征:

$$N-PFP(kg \cdot kg^{-1}) = \text{产量}(kg \cdot hm^{-2}) / \text{施氮量}(kg \cdot hm^{-2}) \quad (1)$$

产量变异采用变异系数(CV)衡量, 变异系数值

越低产量越稳定。

$$CV = (\text{标准偏差} / \text{平均值}) \times 100\% \quad (2)$$

根据 Lobell 等^[19]提出的概念, 定义:

$$\text{当季农户产量差} = \text{当季农户可获得最高产量} - \text{当季农户平均产量} \quad (3)$$

$$\text{总农户产量差} = \text{农户可获得最高产量} - \text{所有农户平均产量} \quad (4)$$

$$\text{当季氮肥效率差} = \text{当季农户可获得最大氮肥偏生产力} - \text{当季农户平均氮肥偏生产力} \quad (5)$$

$$\text{总氮肥效率差} = \text{农户可获得最大氮肥偏生产力} - \text{所有农户平均氮肥偏生产力} \quad (6)$$

$$\text{增产率} = \text{当季农户产量差} / \text{当季农户平均产量} \quad (7)$$

1.3.2 边界线系统

本研究结合边界线系统对农户产量限制因素进行分析。边界线是指数据体边缘表现最佳的边界点拟合成的一条曲线, 用来表征两个变量之间的关系, 从而可从多个因素中孤立出某一因素, 预测该因素变量下的产量变化^[16,26]。为了更好地对农户产量差进行研究, 提出以下概念(图 1):

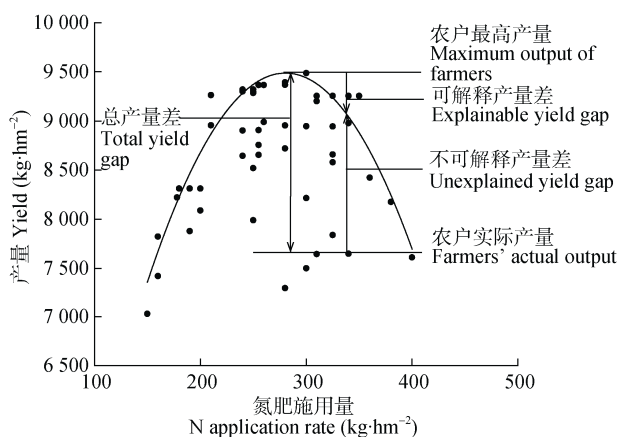


图 1 农户夏玉米产量限制因素的边界线分析方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the boundary line analysis method of yield limiting factors of summer maize of farmers

1)总产量差: 跟踪农户田块中的最高产量与农户实际产量之差, 等于可解释产量差与不可解释产量差之和; 2)可解释产量差: 跟踪农户田块中的最高产量与不同管理因素下农户田块的预测产量之差; 3)不可解释产量差: 即不同管理因素下农户田块的预测产量与农户实际产量之差。

每个农户田块在某因素下的可解释产量差是由相对应的 X 值(影响因素)的不同所导致的, 不可解释产量差则是由未知不可解释的因素所导致的。每一因素对产量差的贡献程度表示为可解释产量差占总产量差的比例, 比例越大, 其对产量差的贡献作用就越大。找出每个农户的最大可解释产量差所对

应的因素,确定每个因素作为最大可解释产量差对应的农户数量,用所占总样本量的比例来表示这一因素对该地区农户产量差的贡献率,贡献率越大,其对产量提高的限制越大。

1.3.3 农户产量和氮肥效率分类标准

结合前人的研究结果^[27-28],将夏玉米产量高于 11 t·hm⁻² 认为高产水平,反之则为低产水平;氮肥偏生产力大于 60 kg·kg⁻¹ 认为高效水平,反之则为低效水平。

1.3.4 数据处理

数据采用 Excel 2010 进行整理,SPSS 20.0 进行方差检验分析,Origin 2016 进行作图。

2 结果与分析

2.1 农户夏玉米产量和氮肥效率的变异及分布

如表 2 所示,根据夏玉米产量和氮肥效率的分级标准将农户田块分为 4 类:高产高效(HH)、高产低效(HL)、低产高效(LH)、低产低效(LL)。整体来看,低产低效田块所占比例最大,为 52.0%;高产高效、高产低效、低产高效所占比例相近,分别为 16.0%、16.7%和 15.3%。受气候、光温条件影响,不同年份表现情况不同,2016 年田块产量普遍较高,其中高产高效田块占比最高,为 42.9%,低产低效田块占比最低,为 8.9%。其他年份产量水平较低,

低产低效田块所占比例均最高。

如表 3 所示,不同年份农户的产量水平表现不同,当季农户平均产量为 9.02~11.91 t·hm⁻²,变异系数范围为 8.55%~12.19%。2016 年农户产量水平最高,平均为 11.91 t·hm⁻²,显著高于其他年份,变异系数最小,为 8.55%。当季农户产量差的变化范围为 1.96~3.68 t·hm⁻²。2015—2018 年农户产量波动较大,最高产量为 14.28 t·hm⁻²,最低产量为 5.63 t·hm⁻²,变异系数为 15.64%,总农户产量差为 4.02 t·hm⁻²。

表 2 2015—2018 年不同夏玉米产量和氮肥效率(氮肥偏生产力)表现类型的农户比例

Table 2 Proportions of farmers with different types of yield and nitrogen efficiency (partial factor productivity, N-PFP) in 2015–2018 %

年份 Year	样本量 Number of sample	农户类型 Farmer type			
		HH	HL	LH	LL
2015	115	15.7	20.9	18.3	45.2
2016	113	42.9	41.1	7.1	8.9
2017	112	0.9	0	20.5	78.6
2018	92	2.2	2.2	15.2	80.4
2015—2018	432	16.0	16.7	15.3	52.0

HH: 高产高效; HL: 高产低效; LH: 低产高效; LL: 低产低效。
HH: high-yield and high-N-PFP; HL: high-yield and low-N-PFP; LH: low-yield and high-N-PFP; LL: low-yield and low-N-PFP.

表 3 2015—2018 年农户夏玉米产量和氮肥偏生产力(N-PFP)的变异分析

Table 3 Variation analysis of yield and nitrogen partial factor productivity (N-PFP) of summer maize in 2015–2018

项目 Item	年份 Year	样本量 Number of samples	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最大值 Max.	最小值 Min.	中位值 Med.	变异系数 CV (%)	产量差/氮肥效率差 Yield gap / N-PFP gap
产量 Yield (t·hm ⁻²)	2015	115	10.60b	1.21	14.28	7.31	10.59	11.42	3.68
	2016	113	11.91a	1.02	13.87	9.63	11.94	8.55	1.96
	2017	112	9.02c	1.09	11.89	5.63	9.14	12.13	2.87
	2018	92	9.32c	1.14	12.36	6.43	9.40	12.19	3.04
	2015—2018	432	10.26	1.60	14.28	5.63	10.25	15.64	4.02
N-PFP (kg·kg ⁻¹)	2015	115	51.50b	19.59	113.63	25.53	42.79	38.04	62.14
	2016	113	59.49a	18.68	95.95	26.66	59.42	31.40	36.46
	2017	112	50.62b	15.02	97.62	21.98	51.98	29.66	46.99
	2018	92	52.27b	9.38	79.24	29.56	51.55	17.94	26.97
	2015—2018	432	53.51	16.78	113.63	21.98	51.31	31.35	60.12

平均值后同列不同字母表示不同年份间在 0.05 水平差异显著(Duncan 检验)。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different years at 0.05 level according to Duncan test.

不同年份农户的氮肥偏生产力(N-PFP)相对稳定,当季农户平均 N-PFP 为 50.62~59.49 kg·kg⁻¹,变异系数为 17.94%~38.04%; 2015—2018 年总农户平均 N-PFP 为 53.51 kg·kg⁻¹,变异系数为 31.35%。2016 年的平均 N-PFP 最高,显著高于其他年份。2018 年的 N-PFP 变异系数最小,为 17.94%。当季农户 N-PFP 差变化范围为 26.97~62.14 kg·kg⁻¹,总农户

N-PFP 差为 60.12 kg·kg⁻¹。

2.2 同一农户不同年份夏玉米产量和氮肥利用效率的变异情况

通过对 66 个农户田块连续 4 年(2015—2018 年)夏玉米的监测数据进行分析显示,4 年内农户获得高产或氮肥高效的次数呈正态分布(图 2),获得 1 次高产和 1 次氮肥高效的占比最大。4 年中连续获得高

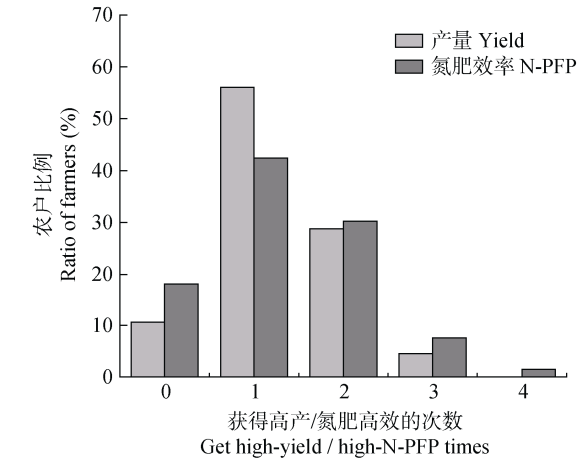


图 2 2015—2018 年农户夏玉米产量、氮肥效率的稳定情况
Fig. 2 Stability of summer maize yield and nitrogen partial factor productivity (N-PFP) of farmers in 2015–2018

产的农户为 0, 3 次获得高产的农户为 4.55%, 两次获得高产的农户为 28.79%, 1 次获得高产的农户为

56.06%, 未获得高产的农户为 10.61%。连续 4 年实现氮肥高效的农户为 1.52%, 1 次未获得氮肥高效的农户为 18.18%。分析可得：同一个农户连续获得高产比连续实现氮肥高效的概率更低，同一个农户不同年份的产量、氮肥效率处于不稳定的状况。

2.3 高产稳定型农户和低产稳定型农户在产量要素、土壤养分及管理因素上的差异

除 2017 年受到天气影响未出现高产农户外，其他 3 年均出现高产和低产农户。其中有 3 个农户 4 年中实现了 3 年的高产(H3)，我们将之称为高产稳定型农户；7 个农户连续 4 年未实现高产(H0)，我们将之称为低产稳定型农户，本文将这两类农户作为研究对象，对比连续 4 年的产量要素，分析发现高产稳定型农户在穗数和千粒重上都显著高于低产稳定型农户，两者在穗粒数上无显著差异(表 4，图 3)。

表 4 高产稳定型农户和低产稳定型农户的产量要素差异
Table 4 Differences in production factors between stable-high-yield farmers and stable-low-yield farmers

产量构成 Yield composition	农户分组 Group	样本量 Number of samples	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最大值 Max.	最小值 Min.	中位值 Med.	变异系数 CV (%)
穗数 Ear numbers (10 ⁴ ·hm ⁻²)	H3	12	5.74*	0.46	6.67	4.77	5.68	8.08
	H0	28	5.32	0.59	6.30	4.18	5.40	11.01
穗粒数 Grains per ear	H3	12	543.16	86.75	716.90	416.56	522.51	15.97
	H0	28	543.86	65.44	681.95	436.50	534.07	12.03
千粒重 1 000-grain weight (g)	H3	12	314.11*	22.21	348.13	276.30	315.40	7.07
	H0	28	300.54	16.73	343.74	274.15	304.89	5.57

表示两组农户间在 $P<0.05$ 水平差异显著。H3 代表 4 年中 3 次获得高产的农户，H0 代表 4 年中 0 次获得高产的农户。 indicates significant difference between two farmer groups at 0.05 level. H3: a farmer got 3 high yield in 4 years; H0: a farmer got 0 high yield in 4 years.

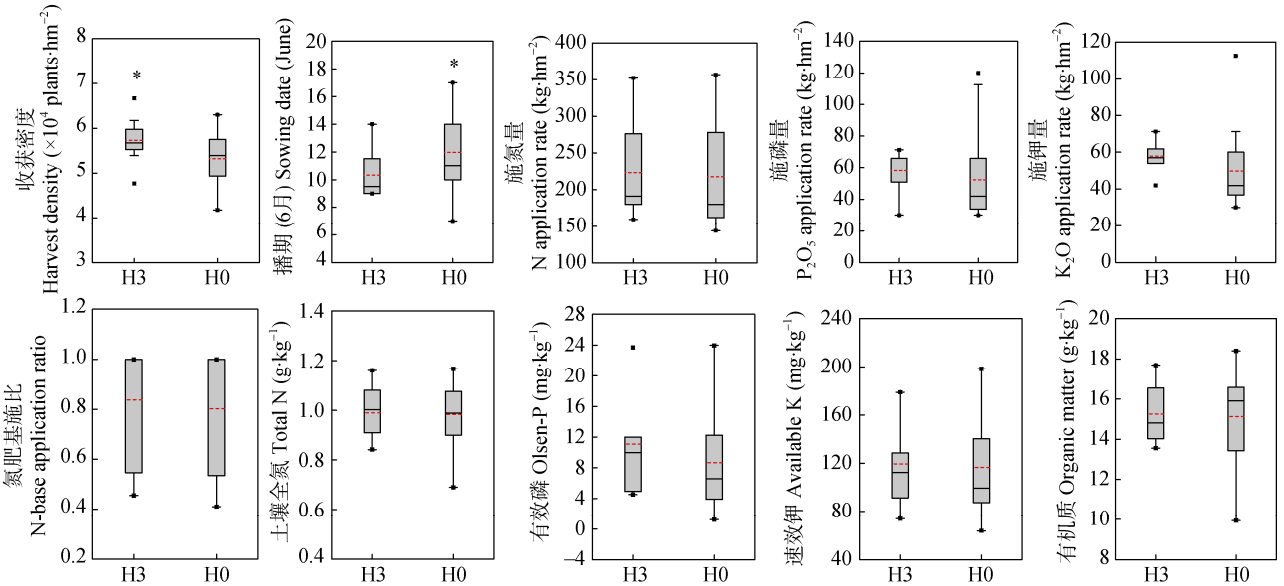


图 3 高产稳定型农户和低产稳定型农户的土壤养分和管理因素差异

Fig. 3 Differences in soil nutrients and management factors between stable-high-yield farmers and stable-low-yield farmers
表示两组农户间在 $P<0.05$ 水平差异显著。H3 代表 4 年中 3 次获得高产的农户，H0 代表 4 年中 0 次获得高产的农户。 indicates significant difference between two farmer groups at 0.05 level. H3: a farmer got 3 high yield in 4 years; H0: a farmer got 0 high yield in 4 years.

2.4 不同年度内产量差形成的限制因素分析

如图 4 所示,采用边界线对各管理因素和土壤因素模拟分析。其中,播期、密度、N 施用量、氮肥基施比、pH 使用二次方程进行拟合,以上因素产量均表现出先增加后降低的趋势。综合 4 年的分析结果,预测产量表现最佳的播期是 6 月 9—14 日,最佳收获密度为 5.6 万~5.9 万株·hm⁻²,最佳施氮量是 210~230 kg·hm⁻²,最佳氮肥基施比是 0.7~0.8。磷肥、钾肥施用量、土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质使用“线性+平台”方程进行拟合:磷、钾施用量集中在 32~66 kg·hm⁻² 时出现“平台”拐点;土壤全氮在 0.87~1.02 g·kg⁻¹ 时出现拐点;有效磷的拐点变化较大,2016 年在 2.86 mg·kg⁻¹ 出现拐点,其余 3 年在 5.49~9.95 mg·kg⁻¹ 出现拐点;速效钾在 84.1~112.06 mg·kg⁻¹ 时出现拐点;有机质在 12.11~15.85 g·kg⁻¹ 时出现拐点。

采用边界线系统定量了各因素对产量差的贡献比例(图 4),每年产量差的形成均是由各因素共同导致,不同年份各因素对产量差的贡献有所不同。对产量差贡献最大的 3 项 2015 年依次为施磷量(22.94%)>密度(17.43%)>pH(14.68%),2016 年依次为有机质(20.45%)>密度(14.77%)≥全氮(14.77%),2017 年依次为密度(31.53%)>播期(22.52%)>施氮量(12.61%),2018 年依次为有机质(37.97%)>密度(32.91%)>有效磷(7.59%)。综合 4 年结果来看,密度、有机质含量、播期是造成该区域产量差的主导因素。

3 讨论

3.1 玉米产量和氮肥效率的差异变化

农户间产量、氮肥效率差异大是小农户生产经营的显著特征^[2],而提高低产田块产量,缩小高产田与低产田之间的差距是提高区域作物产量的重要方法。调查区域夏玉米年度之间的产量和氮肥效率具有波动性,低产低效农户占比较多,2016 年表现最好。2015—2018 年农户平均产量为 10.26 t·hm⁻²,变异系数为 15.64%。受当季降雨量和气候波动的影响^[29],年度之间农户平均产量呈波动状,当季农户平均产量为 9.02~11.91 t·hm⁻²,变异系数为 8.55%~12.19%。产量结果与陈广锋^[2]的平均产量 10.5 t·hm⁻² 相似,比高肖贤等^[4]2009—2011 年的平均产量 8.0~9.6 t·hm⁻²、曹国鑫等^[3]2012 年的产量范围 7.1~8.3 t·hm⁻² 偏高。这是因为调查区域近年来的科技辐射增强,使得技术到位率不断增高^[5],农户整体产量水平呈现一个升高的趋势^[30]。当季农户产量差的变化范围为 1.96~3.68 t·hm⁻²,消除产量差可实

现 16.46%~34.72% 的增产。当季农户 N-PFP 为 50.62~59.49 kg·kg⁻¹,2016 年产量水平最高,同时对应年份 N-PFP 也达最高 59.49 kg·kg⁻¹。夏玉米产量水平越高,单位籽粒氮磷钾需求量越低^[31],其对应的养分利用效率就越高,可充分说明增加单产水平也是实现资源高效的另一种途径。

3.2 产量、氮肥效率的稳定性与农户措施对比

66 个连续 4 年跟踪的农户田块中,未出现连续 4 年获得高产的田块,连续 4 年获得氮肥高效的占比为 1.52%。这一方面可能是在气象条件的综合作用下,田块尺度生产力稳定性会下降^[32];另一方面也可能是由于农户的农田管理操作时间,受很多社会因素的影响^[5,30],无法保证每年的技术应用一致。其中未获得高产的田块占比 10.61%,89.4% 的田块均获得过高产,表明实现该地区大面积高产的可能性很大。获得 1、2 次高产的田块占比 80.8%,表明不稳定型农户较多,因此增加技术到位率、田间管理标准化是提高小农户产量高产稳产的方向。

较多的有效穗数是高产的基础^[33],最大程度地增加穗粒数和千粒重可增加产量,而适当晚收有利于光温积累,有利于千粒重的增加^[34]。高产稳定型农户田块的有效穗数和千粒重显著高于低产稳定型农户田块。本研究还探索了高产稳定型农户田块和低产稳定型农户田块在土壤养分和管理措施上的区别,分析发现只有播期和收获密度两者出现显著差异,其余各项均未出现显著差异。可能因为调查田块分布在相邻的 3 个村庄,土壤养分条件和管理措施相似,调查点和分析结果需要进一步验证;另外也因为产量差的产生是由众多因素综合导致,单一因素间差异较小,同时也侧面证明了边界线系统分析的优势,其可量化不同因素的贡献值,对我们明确产量差的形成具有指导意义。

3.3 最佳的响应措施与高产限制因子

播期与玉米干物质积累关系密切^[35-36],适当调节播期,可使玉米关键生育期处于适宜的气候条件以利于发挥玉米产量潜力^[37]。调查区域播期较分散,分析所得 6 月 9—14 日最佳,与 Chen 等^[7]发现的高产高效农户播期为 6 月 14 日类似。该地区最佳收获密度为 5.6~5.9 万株·hm⁻²,这可能与当地常种玉米品种“登海 605”的特性有关,该品种随着密度增高,空秆率增加^[38]。另外,不同地区的最适密度与土壤肥力水平、施肥水平密切相关^[39-40],该地区肥力水平为中等水平^[41],不适宜密植。该地区最佳施氮量为 210~230 kg·hm⁻²,最佳施磷量为 45~65 kg·hm⁻²,最

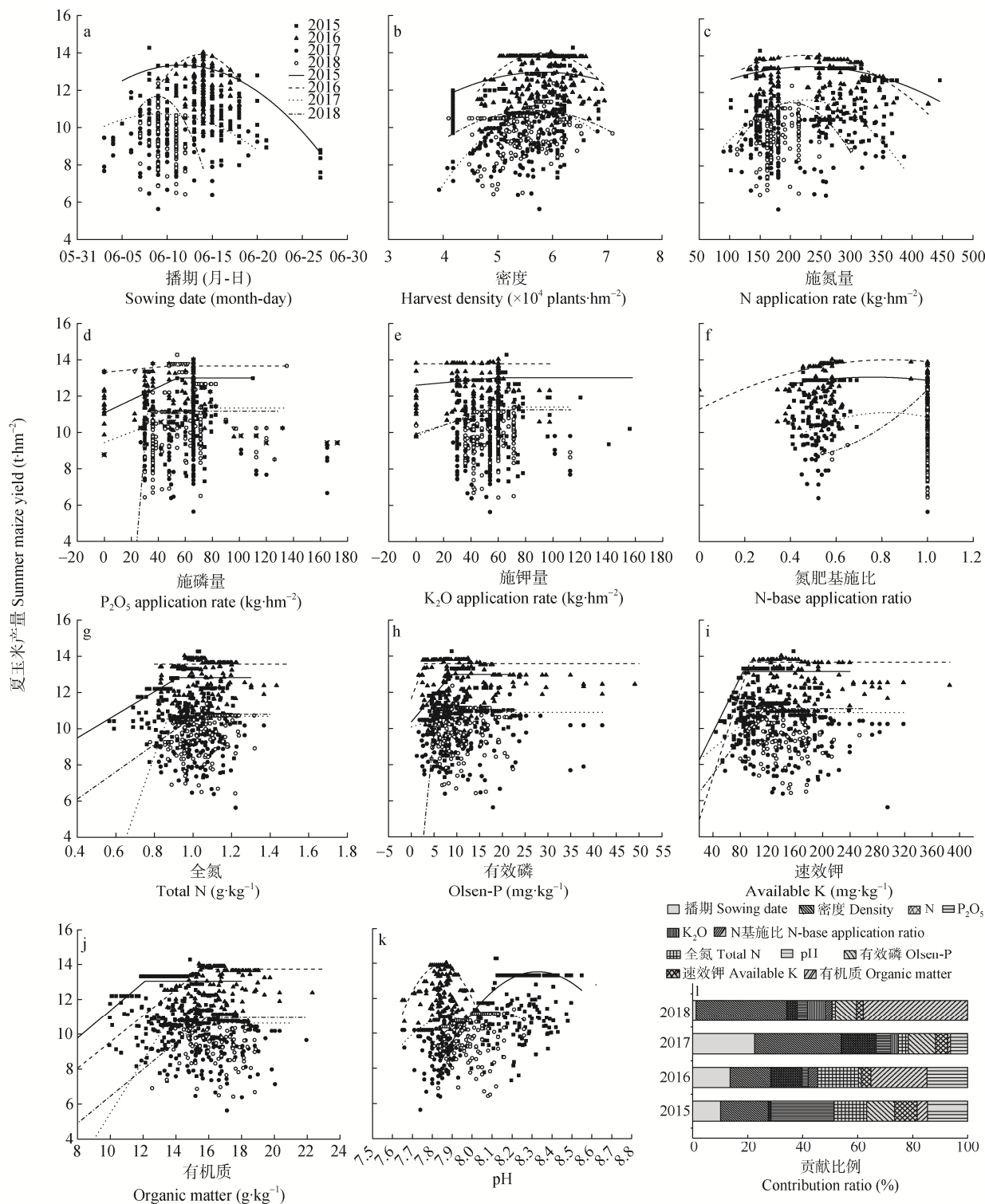


图4 各因素边界线分析与对夏玉米可解释产量差的贡献比例

Fig. 4 Boundary lines of various factors and the contribution to the interpretable yield gaps of summer maize

佳施钾量为50~60 kg·hm⁻², 最佳氮肥基施比为0.7~0.8。

农户夏玉米产量差的形成均是由各个因素共同导致^[4], 但本研究发现不同年度内各因素的贡献程度不同。这可能与每年的降雨量和光温条件不同有关, 光温条件变化会影响土壤有效养分含量^[42], 影响玉米温度积累。降雨量不同会影响玉米的根状和

土壤速效养分含量^[43], 进而对产量产生影响。总体来看, 密度、土壤有机质含量、播期是造成该区域产量差的主导因素。从调查结果来看, 该地区农户播种密度集中为6.3万株·hm⁻²左右, 但生长期因农户管理、苗期病虫害等原因造成不同程度的密度损失^[44], 使得大部分田块最终的收获密度偏离最佳

值。农田土壤因子中土壤有机质对玉米产量影响最大^[45], 土壤有机质含量高低代表着土壤肥力水平, 这也充分证明了好的土壤养分条件是高产的基础。农户播期观测值较为分散, 偏离最佳值的部分占比较大, 而农户夏玉米收获时间基本一致, 因此播期对玉米的温度、干物质积累等影响较大^[46]。

3.4 区域作物增产途径

根据本研究结果, 可总结出实现区域作物高产的

解析思路(图 5): 在农户尺度上, 采用边界线拟合分析田块尺度的农户管理措施和土壤养分, 找到本地区最佳的管理措施响应值和实现高产的土壤条件, 帮助农户实现高产; 对比高产稳定型田块与低产稳定型田块, 分析土壤养分和管理措施上的区别和规律, 帮助农户实现稳定高产。在区域尺度上, 产量差分析找到限制区域高产的主导性因素, 通过宣传、统一订购农资农机等方法实现大面积技术到位, 解决主要限制因子实现高产。

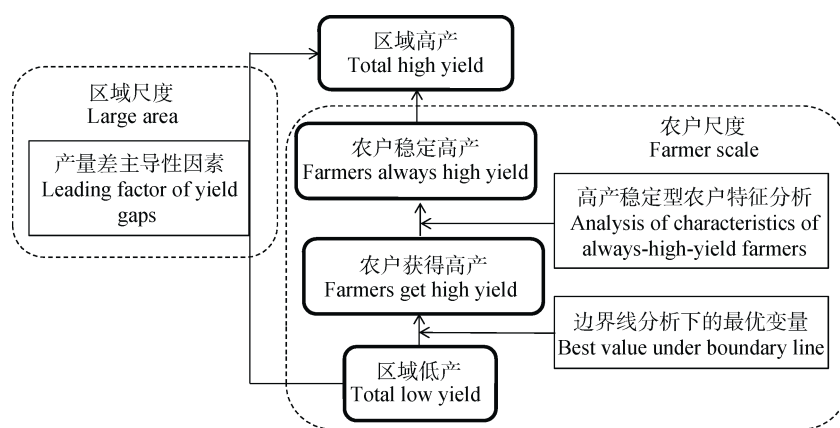


图 5 区域作物增产解析模型

Fig. 5 Analytical model of regional crop yield increase

4 结论

曲周县2015—2018年小农户夏玉米平均产量为 $10.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 变异系数为15.64%, 年度之间产量和氮肥效率呈波动状。当季农户产量差的变化范围为 $1.96 \sim 3.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 总农户产量差为 $4.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。4年内农户获得高产或氮肥高效的次数呈正态分布, 获得1次高产和1次高效的占比最大, 同一个农户不同年份的产量、氮肥效率处于不稳定的状况。高产稳定型农户分别在有效穗数、千粒重、播期、密度上显著高于低产稳定型农户($P < 0.05$)。本研究显示该地区最佳播期为6月9—14日, 最佳收获密度为5.6万~5.9万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 最佳施氮量为 $210 \sim 230 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最佳施磷量为 $45 \sim 65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最佳施钾量为 $50 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最佳氮肥基施比为 $0.7 \sim 0.8$ 。产量差的形成均是由各个因素共同导致, 不同年份各因素对产量差的贡献不同, 总体来看, 密度、土壤有机质、播期是造成该区域农户产量差的主导因素。农户间产量和氮肥效率差的缩减, 以及低产农户向高产稳定型农户的转变, 都需要土壤养分条件的改善和综合管理措施的优化。区域作物产量的提高, 需要解决主要限制因素和优化综合管理措施。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国农业部. 2014 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. 2014 China Agriculture Statistical Report[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2015
- [2] 陈广锋. 华北平原小农户小麦/玉米高产高效限制因素及优化体系设计研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 1-114
CHEN G F. Limiting factors analysis and designing for high yield and high nutrient use efficiency for winter wheat and summer maize in smallholder farmers fields in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 1-114
- [3] 曹国鑫, 王文珂, 张宏彦, 等. 华北小农户不同规模化组织的生产效率研究[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(6): 1001-1006
CAO G X, WANG W K, ZHANG H Y, et al. Agricultural production efficiencies of four typical farming organizations in the North China Plain[J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(6): 1001-1006
- [4] 高肖贤, 张华芳, 米慧玲, 等. 河北省农户夏玉米产量差异及其制约因素分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 68-72
GAO X X, ZHANG H F, MI H L, et al. Analysis of summer maize yield difference and its restricting factors in Hebei Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(9): 68-72
- [5] 赵鹏飞. 小麦/玉米轮作体系农户产量差定量及其缩减途

- 径[D]. 北京: 中国农业大学, 2016: 1–124
ZHAO P F. Quantifying and closing yield gaps for winter wheat and summer maize rotation in smallholder farming system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016: 1–124
- [6] 黄少辉, 杨云马, 刘克桐, 等. 河北夏玉米产量潜力、产量差与氮肥效率差分析[J]. 玉米科学, 2016, 24(5): 123–127
HUANG S H, YANG Y M, LIU K T, et al. Yield potential, yield gap and nitrogen use efficiency gap of summer maize in Hebei Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(5): 123–127
- [7] CHEN G F, CAO H Z, LIANG J, et al. Factors affecting nitrogen use efficiency and grain yield of summer maize on smallholder farms in the North China Plain[J]. Sustainability, 2018, 10(2): 363
- [8] 张岩. 中国黄淮海夏玉米区玉米光温生产潜力时空演变特征模拟分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 1–69
ZHANG Y. Simulation analysis of the temporal and spatial changing trends of photo-thermal yields of summer maize in Huang-Huai-Hai area of China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural College, 2013: 1–69
- [9] 刘洪军. 黄淮海地区夏玉米产量潜力的变化及影响因素分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009: 1–46
LIU H J. Analysis on the change of summer maize yield potential and its influencing factors in Huang-Huai-Hai Region[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2009: 1–46
- [10] 班红勤. 我国主要粮食作物增产增效潜力及其实现策略[D]. 保定: 河北农业大学, 2012: 1–62
BAN H Q. Strategies and potential to improve on-farm cereal crops yield and fertilizer use efficiency in China[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012: 1–62
- [11] KUCHARIK C J. Contribution of planting date trends to increased maize yields in the Central United States[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(2): 328–336
- [12] VAN ITTERSUM M K, CASSMAN K G, GRASSINI P, et al. Yield gap analysis with local to global relevance — A review[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 4–17
- [13] LOBELL D B. The use of satellite data for crop yield gap analysis[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 56–64
- [14] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 等. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 525–534
LIU B H, CHEN X P, CUI Z L, et al. Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 525–534
- [15] 马小龙, 余旭, 王朝辉, 等. 旱地小麦产量差异与栽培、施肥及主要土壤肥力因素的关系[J]. 中国农业科学, 2016, 49(24): 4757–4771
MA X L, SHE X, WANG Z H, et al. Yield variation of winter wheat and its relation to cultivation, fertilization, and main soil fertility factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(24): 4757–4771
- [16] WANG N, JASSOGNE L, VAN ASTEN P J A, et al. Evaluating coffee yield gaps and important biotic, abiotic, and management factors limiting coffee production in Uganda[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 63: 1–11
- [17] 范兰, 吕昌河, 陈朝. 作物产量差及其形成原因综述[J]. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2155–2166
FAN L, LYU C H, CHEN Z. A review on crop yield gaps and the causes[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(12): 2155–2166
- [18] DE DATTA S K. Principles and Practices of Rice Production[M]. New York: John Wiley & Sons, 1981
- [19] LOBELL D B, ORTIZ-MONASTERIO J I. Regional importance of crop yield constraints: Linking simulation models and geostatistics to interpret spatial patterns[J]. Ecological Modelling, 2006, 196(1/2): 173–182
- [20] 杨晓光, 刘志娟. 作物产量差研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(14): 2731–2741
YANG X G, LIU Z J. Advances in research on crop yield gaps[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(14): 2731–2741
- [21] 李克南. 华北地区冬小麦-夏玉米作物生产体系产量差特征解析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 1–131
LI K N. Yield gap analysis focused on winter wheat and summer maize rotation in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 1–131
- [22] 范兰, 吕昌河, 于伯华, 等. 华北平原小麦-玉米两作生产潜力与产量差[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 33–40
FAN L, LYU C H, YU B H, et al. Yield potential and yield gap of wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 33–40
- [23] 李雅剑, 王志刚, 高聚林, 等. 基于密度联网试验和 Hybrid-Maize 模型的内蒙古玉米产量差和生产潜力评估[J]. 中国生态农业学报, 2016, 34(7): 935–943
LI Y J, WANG Z G, GAO J L, et al. Understanding yield gap and production potential based on networked variety-density tests and Hybrid-Maize model in maize production areas of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 34(7): 935–943
- [24] LIU B H, CHEN X P, MENG Q F, et al. Estimating maize yield potential and yield gap with agro-climatic zones in China — Distinguish irrigated and rainfed conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 239: 108–117
- [25] JIAO X Q, ZHANG H Y, MA W Q, et al. Science and technology backyard: A novel approach to empower smallholder farmers for sustainable intensification of agriculture in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(8): 1657–1666
- [26] BHATTARAI S, ALVAREZ S, GARY C, et al. Combining farm typology and yield gap analysis to identify major variables limiting yields in the highland coffee systems of Llano Bonito, Costa Rica[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 243: 132–142
- [27] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature, 2018, 555(7696): 363–366
- [28] ZHANG W F, CAO G X, LI X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. Nature, 2016, 537(7622): 671–674
- [29] 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 等. 气象因子变化对华北平原夏

- 玉米产量的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 215–218
SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Effect of meteorological factors on grain yield of summer maize in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(2): 215–218
- [30] LIU Z J, YANG X G, LIN X M, et al. Maize yield gaps caused by non-controllable, agronomic, and socioeconomic factors in a changing climate of Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 756–764
- [31] 程乙, 刘鹏, 刘玉文, 等. 黄淮海区域现代夏玉米品种产量与养分吸收规律[J]. 作物学报, 2019, 45(11): 1699–1714
CHENG Y, LIU P, LIU Y W, et al. Regulation of grain yield and nutrient absorption of modern summer maize varieties in the Yellow-Huaihe-Haihe Rivers region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(11): 1699–1714
- [32] 李新旺. 中小尺度耕地生产力稳定性评价体系研究——以河北省雄县为例[D]. 保定: 河北农业大学, 2011: 1–122
LI X W. Evaluation system of cultivated land productivity stability in the agricultural ecosystem for the meso-small scale — A study case Xiong County of Hebei[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011: 1–122
- [33] 刘伟, 吕鹏, 苏凯, 等. 种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1737–1743
LIU W, LYU P, SU K, et al. Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1737–1743
- [34] 李月华, 侯大山, 刘强, 等. 收获期对夏玉米千粒重及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2008, 12(7): 1–3
LI Y H, HOU D S, LIU Q, et al. Effect of harvest period on 1000-grain weight and yield of summer maize[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(7): 1–3
- [35] 任丽雯, 马兴祥, 丁文魁. 干旱区不同灌溉模式和播期对玉米干物质积累分配的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 147–153
REN L W, MA X X, DING W K. Effects of different irrigation methods and sowing dates on maize dry matter accumulation and distribution in arid region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5): 147–153
- [36] BONELLI L E, MONZON J P, CERRUDO A, et al. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date[J]. Field Crops Research, 2016, 198: 215–225
- [37] 于吉琳, 聂林雪, 郑洪兵, 等. 播期与密度对玉米物质生产及产量形成的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 76–80
YU J L, NIE L X, ZHENG H B, et al. Effect of matter production and yield formation on sowing date and density in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(5): 76–80
- [38] 闫伟平, 边少锋, 张丽华, 等. 半干旱区耐密稳产玉米品种的评价及筛选[J]. 现代农业科技, 2019, (16): 38–41
YAN W P, BIAN S F, ZHANG L H, et al. Evaluation and selection of stable and density tolerance maize varieties in semiarid area[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, (16): 38–41
- [39] 李保峰, 鹿红卫, 张金奎, 等. 不同肥力水平下种植密度对浚单 29 产量性状及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(13): 18–20
LI B F, LU H W, ZHANG J K, et al. The effect of planting density under different fertility levels on the yield traits and yield of Xundan 29[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(13): 18–20
- [40] WEI S S, WANG X Y, ZHU Q C, et al. Optimising yield and resource utilisation of summer maize under the conditions of increasing density and reducing nitrogen fertilization[J]. The Science of Nature, 2017, 104(11/12): 86
- [41] 孙晓兵, 张青璞, 孔祥斌, 等. 华北集约化农区耕地土壤肥力时空演变特征——以河北省曲周县为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1857–1869
SUN X B, ZHANG Q P, KONG X B, et al. Spatial-temporal characteristics of cultivated soil fertility in the intensive agricultural region of North China: A case study of Quzhou County in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1857–1869
- [42] 何银彪. 模拟气候变化条件下稻田土壤碳氮及速效养分含量的动态变化[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 1–46
HE Y B. Dynamic change of carbon, nitrogen and nutrients under the condition of simulated climate change in paddy soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural College, 2014: 1–46
- [43] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨量条件下沟垄集雨种植对土壤养分分布及夏玉米根系生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 94–99
REN X L, JIA Z K, CHEN X L, et al. Effect of ridge and furrow planting of rainfall harvesting on soil available nutrient distribution and root growth of summer corn under simulated rainfall conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 94–99
- [44] ZHAO Y J, XING S, ZHANG Q S, et al. Causes of maize density loss in farmers' fields in Northeast China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(8): 1680–1689
- [45] 李春喜, 韩蕊, 邵云, 等. 黄淮海地区麦玉周年土壤肥力与玉米产量相关和通径分析[J]. 玉米科学, 2019, 27(3): 127–133
LI C X, HAN R, SHAO Y, et al. Correlation and path analysis between soil fertility and maize yield in wheat-maize rotation system of Huang-Huai-Hai Region[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(3): 127–133
- [46] 吕新, 白萍, 张伟, 等. 不同播期对玉米干物质积累的影响及分析[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2004, 22(4): 285–288
LYU X, BAI P, ZHANG W, et al. Analysis on effect of ecological factors on maize dry weight accumulation in different sowing periods[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2004, 22(4): 285–288