



# 不同栽培技术因子对雨养春玉米产量与氮素效率差异的影响

曹玉军<sup>1</sup>, 姚凡云<sup>1</sup>, 王丹<sup>2</sup>, 吕艳杰<sup>1</sup>, 刘小丹<sup>1</sup>, 王立春<sup>1</sup>, 王永军<sup>1,2</sup>, 李从锋<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/玉米国家工程实验室, 长春 130033; <sup>2</sup>吉林农业大学农学院, 长春 130030;

<sup>3</sup>中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

**摘要:**【目的】探明不同产量水平模式中增(减)技术因子对玉米产量、养分效率的影响并明确其优先序, 以期对不同生产水平玉米产量及氮素效率缩差增效提供理论依据。【方法】通过调研农户、高产高效和超高产 3 个产量水平的生产模式, 确定了种植密度、耕作方式、氮素管理、品种是不同生产模式玉米产量与氮素效率提升的主要技术因子, 在此基础上设置了超高产(SH)、高产高效(HH)和农户(FP)3个不同产量水平的综合管理技术模式, 针对不同模式中的技术因子设计了裂区试验, 以耕作方式为主区、品种为副区, 氮肥管理为副副区、密度为副副副区, 分析增(减)技术因子对不同生产模式玉米产量及氮素效率的技术贡献率。【结果】FP 模式中技术因子对产量贡献率的大小依次为氮素管理、种植密度、土壤耕作、品种, 贡献率分别为 9.9%、6.0%、4.4%和 2.5%; HH 模式中栽培措施对产量贡献率的大小依次为种植密度、氮素管理、土壤耕作、品种, 贡献率分别为 7.7%、5.2%、4.5%和 3.5%; SH 模式中栽培措施对产量贡献率大小依次为种植密度、土壤耕作、氮素管理、品种, 贡献率分别为 8.9%、7.3%、6.5%和 4.3%。而 3 种模式中, 栽培技术因子对氮素效率贡献率从高到低依次均为氮素管理、种植密度、土壤耕作、品种。其中, FP 模式的氮素管理、种植密度、土壤耕作、品种对氮素效率的贡献率分别为 30.5%、6.0%、4.4%和 2.5%, HH 模式分别为 19.7%、7.7%、4.7%和 4.5%, SH 模式分别为 25.4%、8.3%、6.5%和 4.5%。【结论】技术因子对产量的贡献在不同模式中的优先序不同, 不同管理水平下产量差由多因素共同作用形成, 技术因子间具有协同效应。当前农户水平下氮素管理方式对产量的贡献率居首位, 高产水平下种植密度和土壤耕作对产量贡献较大, 而不同产量水平下氮素效率差异主要取决于氮肥管理方式。

**关键词:**栽培技术因子; 雨养; 春玉米; 产量差; 氮素效率差

## Effects of Different Agronomy Factors on Yield Gap and Nitrogen Efficiency Gap of Spring Maize Under Rain-Fed Conditions

CAO YuJun<sup>1</sup>, YAO FanYun<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>2</sup>, LÜ YanJie<sup>1</sup>, LIU XiaoDan<sup>1</sup>,  
WANG LiChun<sup>1</sup>, WANG YongJun<sup>1,2</sup>, LI CongFeng<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agriculture Sciences/State Engineering Laboratory of Maize, Changchun 130033; <sup>2</sup>College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130030; <sup>3</sup>Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** 【Objective】In order to provide a theoretical basis for the further improvement of the yield and nutrient efficiency of different maize production levels, the effects of the increasing and decreasing measures on the yield and nutrient efficiency of maize under different technical modes were explored, and the technical priorities were clarified. 【Method】By investigating the yield level and technical mode of farmers, high-yield and high-efficiency, as well as super high yield, it was clear that planting density,

收稿日期: 2020-05-09; 接受日期: 2020-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300103)、国家自然科学基金(31701349)、国家玉米产业技术体系(CARS-02-16)

联系方式: 曹玉军, E-mail: caoyujun828@163.com。通信作者王永军, E-mail: yjwang2004@126.com。通信作者李从锋, E-mail: licongfeng@caas.cn

cultivation measures, nitrogen management and varieties were the main measures to limit the yield and efficiency improvement of maize at different production levels. On the basis, three technical models of super high yield (SH), high-yield and high-efficiency (HH) and farmer household (FP) were set up. According to the measure factors under different technical modes, the split area experiment was carried out, in which the tillage method was the main plot, the variety was sub-plot, the nitrogen fertilizer management was sub-sub-plot, and the density was sub-sub-sub-plot. 【Result】 Under the FP model, the priority order of technical measures to yield contribution was nitrogen management, planting density, soil tillage, and variety, while the contribution rate to yield was 9.9%, 6.0%, 4.4% and 2.5%, respectively. Under the HH model, the priority order of cultivation measures to yield contribution was planting density, nitrogen management, soil tillage, and variety, with the contribution rate of 7.7%, 5.2%, 4.5% and 3.5%, respectively. Under SH mode, the priority order of cultivation measures to yield contribution was planting density, soil tillage, nitrogen management, and variety, with the contribution rate of 8.9%, 7.3%, 6.5% and 4.3%, respectively. Among the three models, the contribution rate of cultivation technical factors to nitrogen efficiency from high to low was nitrogen management, planting density, soil cultivation and variety. Among them, the contribution rate of nitrogen management, planting density, soil tillage and variety to nitrogen efficiency was 30.5%, 6.0%, 4.4% and 2.5% in FP mode, 19.7%, 7.7%, 4.7% and 4.5% in HH mode, 25.4%, 8.3%, 6.5% and 4.5% in SH mode, respectively. 【Conclusion】 There was no fixed priority order for the contribution of technical factors to the yield. The formation of yield gap under different management levels was affected by multiple factors, and the technical factors had synergistic effect. Under the management of farmer's level, the contribution rate of nitrogen management to the yield ranked first, while the contribution of planting density and soil tillage to the yield was greater under the higher management level. However, the nutrient efficiency gap was mainly caused by nitrogen management, and the contribution rate of nitrogen management to nutrient efficiency ranked the first at different yield levels.

**Key words:** agronomy factor; rain-fed; spring maize; yield gap; nitrogen efficiency gap

## 0 引言

【研究意义】玉米是我国第一大粮食作物,在保障国家粮食安全中占有重要地位。随着人口持续增加和人民生活水平不断提高,粮食需求量日趋增大。据预测,2050 年全球谷物需增加约 56% 才能满足基本粮食需求,其中对玉米的需求占到 45%<sup>[1]</sup>。由于耕地资源限制及种植业结构调整,玉米种植面积大幅度增加的可能性不大,未来玉米总产进一步增加将主要依靠单产水平提高。然而,由于生产管理技术措施的不同,同一区域内农户实际产量与田间试验边际产量及高产纪录产量间存在较大差距。MENG 等<sup>[2]</sup>对中国玉米产量差的研究表明,农户产量与田间试验产量差达 4.5 t·hm<sup>-2</sup>,为试验产量的 64%。基于试验产量和高产纪录产量,内蒙古自治区农户玉米实际产量分别实现了 66% 和 51%<sup>[3]</sup>。近 10 年,山东省玉米高产田块产量多地已突破 20 t·hm<sup>-2</sup>,但目前山东省平均产量只有 6.4 t·hm<sup>-2</sup>,不到纪录产量的 1/3<sup>[4-5]</sup>。吉林省作为全国玉米单产较高的省份,单产达 7.8 t·hm<sup>-2</sup>,而与吉林省高产纪录相比仍有 10.4 t·hm<sup>-2</sup> 的产量差距<sup>[6]</sup>。与此同时,为保持粮食生产的快速增长,中国近年来氮肥用量达 3 100×10<sup>4</sup> t,占全球消费量的 29%,位居世界第一<sup>[7]</sup>,但实际农业生产中由于氮肥的过量不合理施用致使我国玉米氮肥利用率不足 35%,远低于美国

50%—60% 的水平,而生育前期的氮肥利用率仅为 10% 左右,通过氨挥发、反硝化和淋洗损失的氮肥超过 270 kg·hm<sup>-2</sup>,造成了严重的大气和水污染以及土壤酸化<sup>[8-10]</sup>。大量田间试验表明,在不损失水稻、小麦和玉米产量的情况下,氮肥用量可减少 30%—60%<sup>[11]</sup>。因此,明确玉米产量提升的主要限制因素和技术因子优先顺序对提高作物产量,缩小产量和养分效率差距具有重要意义<sup>[12]</sup>。【前人研究进展】近年来,许多学者通过不同方法对作物产量差距开展了较多研究。如刘保花等<sup>[12]</sup>通过对近年发表的文献总结得出,当前全世界小麦、水稻、玉米的平均产量潜力分别为 6.7、8.1、11.2 t·hm<sup>-2</sup>,农户产量分别实现了产量潜力的 60%、60%、53%。李雅剑等<sup>[3]</sup>采用密度联网试验和模型模拟相结合的方法得到内蒙古农户玉米产量与模型模拟、高产纪录和试验产量的差距分别为 7.5、7.0 和 3.8 t·hm<sup>-2</sup>。CHEN 等<sup>[13]</sup>基于多年农户调研和田间试验,发现农户平均产量与可实现最高产量的差距为 3.7 t·hm<sup>-2</sup>,农户氮肥偏生产力平均为 49.1 kg·kg<sup>-1</sup>,与可实现氮肥偏生产力的差距高达 47.0 kg·kg<sup>-1</sup>。而王洪章等<sup>[14]</sup>则通过生产调研和高产攻关,定量分析了山东夏玉米超高产、高产高效和农户 3 个产量层次的综合管理模式之间的产量肥料利用效率差距特征。【本研究切入点】玉米生产是一个综合管理的系统过程,受气候、社会、栽培管理措施、遗传潜力等多因素影响。前人采用开放式问卷

和参与式评估等方法,将栽培管理措施及技术到位率列为当前东北春玉米产区产量提升的第一制约因素<sup>[15-17]</sup>。但限制东北春玉米产量和效率提升的主要栽培技术因子有哪些?主要栽培技术因子对产量、养分效率的贡献率及优先序目前尚不明确。【拟解决的关键问题】本研究通过生产调研、问卷调查和春玉米高产攻关经验总结分析,确定了种植密度、耕作措施、氮素管理和品种选择为4个最主要的技术要素,为进一步明确上述因子对东北春玉米产量和氮素效率提升的技术贡献,在农户(FP)、高产高效(HH)和超高产(SH)3种不同产量水平的综合管理模式之间,分析了种植密度、耕作措施、氮肥管理和品种对产量和氮素效率差形成的技术因子贡献率,并明确了对应管理模式的

技术因子优先顺序,以期为东北春玉米生产过程中缩差增效技术的优化提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2017—2018年,在吉林省农安县吉林省农业科学院哈拉海综合试验站(44°05'N, 124°51'E)进行,试验区位于吉林省中部的半湿润区,属温带大陆性季风气候,雨热同期,玉米生长季平均降雨量480 mm左右,为典型雨养农业区。土壤类型为黑土,0—20 cm耕层土壤有机质27.4 g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.7 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷26.8 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾201.4 mg·kg<sup>-1</sup>。生育期气象数据(平均温度、辐射量、降雨量)如图1所示。

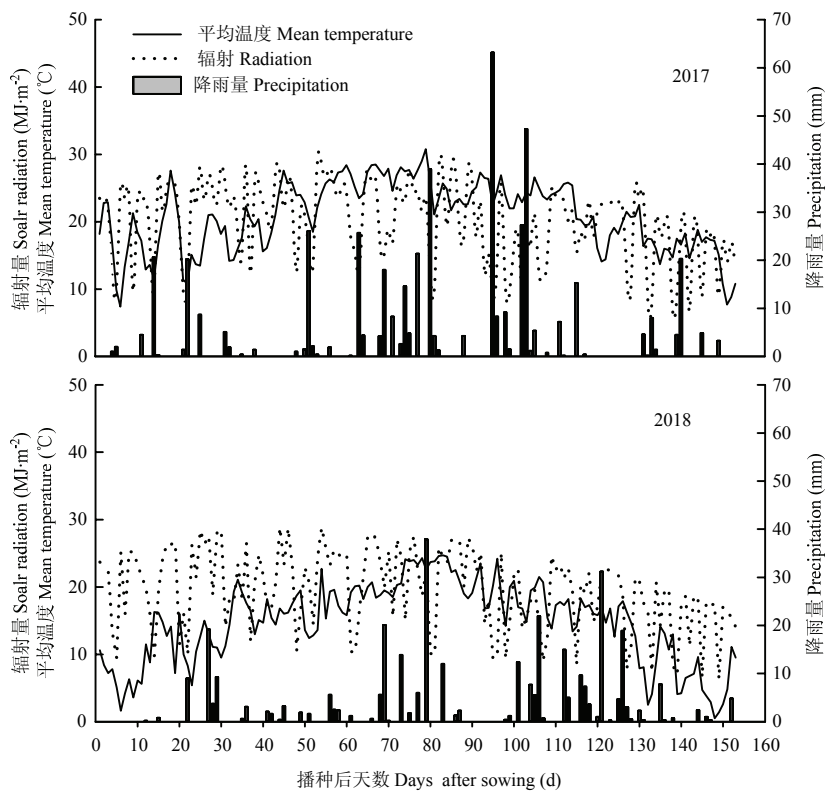


图1 玉米生育期气象条件  
Fig. 1 Meteorological conditions in 2017 and 2018 growing season

### 1.2 试验设计

通过调研农户、高产高效和超高产纪录田块的技术模式,明确限制玉米产量、效率提升的主要技术因子(包括种植密度、耕作措施、氮素管理、品种),设置了超高产(SH)、高产高效(HH)和农户(FP)

3个不同产量水平的技术模式,不同技术模式具体措施详见表1。针对不同技术模式中的技术因子设计裂区试验,其中以耕作方式为主区、品种为副区,氮肥管理为副副区、密度为副副副区。2种耕作方式:(1)播前进行浅旋灭茬处理,浅旋深度15 cm,(2)采用

表 1 不同模式的种植密度、耕作方式与肥料运筹

Table 1 Plant density, cultivation patters and fertilizer application under different technique modes

技术模式 Technique mode	种植密度 Planting density ( $\times 10^4$ plants/hm <sup>2</sup> )	耕作方式 Tillage method	肥料 Fertilizer	总用量 Total amount (kg·hm <sup>-2</sup> )	肥料施用时期和施用比例 Fertilizer application period and application ratio			
					播前 Before sowing	拔节 Jointing stage	大喇叭口期 Bell stage	吐丝期 Silking stage
FP	6.0	浅旋 15 cm	氮肥 N	270	100%	—	—	—
		Shallow rotary (15 cm)	磷肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	120	100%	—	—	—
			钾肥 K <sub>2</sub> O	120	100%	—	—	—
HH	7.5	深松/深翻	氮肥 N	225	20%	30%	30%	30%
		Deep tillage	磷肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	120	100%	—	—	—
			钾肥 K <sub>2</sub> O	120	100%	—	—	—
			有机肥 Organic fertilizer	15000	100%	—	—	—
SH	9.0	深松/深翻	氮肥 N	360	40%	30%	—	30%
		Deep tillage	磷肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	120	100%	—	—	—
			钾肥 K <sub>2</sub> O	120	100%	—	—	—
			有机肥 Organic fertilizer	15000	100%	—	—	—

夏季深松，秋季收获后深翻+有机肥 15 000 kg·hm<sup>-2</sup>，深松深度 30 cm；2 个供试品种：先玉 335（对照品种）和翔玉 998（生产主推品种）；3 个氮肥处理：（1）总施氮量为 270 kg·hm<sup>-2</sup>，采用播前一次性施肥，（2）总施氮量为 225 kg·hm<sup>-2</sup>，分别于播前、拔节期、大喇叭口期、吐丝期按 2：3：3：2 比例施入，（3）总施氮量为 360 kg·hm<sup>-2</sup>，分别于播前、拔节期、大喇叭口期、按 4：3：3 比例施入；3 个种植密度：6.0×10<sup>4</sup>、7.5×10<sup>4</sup>、9.0×10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>。

（1）农户模式（FP），+土壤耕作表示耕作方式为夏季深松，秋季收获后深翻；+氮肥管理表示总施氮量为 225 kg·hm<sup>-2</sup>，分别于播前、拔节期、大喇叭口期、吐丝期按 2：3：3：2 比例施入，+密度表示种植密度为 7.5×10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>，+品种代表品种为翔玉 998。

（2）高产高效模式（HH），-土壤耕作表示耕作方式为灭茬浅旋，-氮肥管理表示总施氮量为 270 kg·hm<sup>-2</sup>，采用“一炮轰”施肥方式，-密度表示种植密度为 6.0×10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>，++密度表示种植密度为 9.0×10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>，+品种代表供试品种为翔玉 998。

（3）超高产模式（SH），-土壤耕作表示耕作方式为灭茬浅旋，-氮肥管理表示总施氮量为 270 kg·hm<sup>-2</sup>，采用“一炮轰”施肥方式，+氮肥管理表示总施氮量为 225 kg·hm<sup>-2</sup>，分别于播前、拔节期、大喇叭口期、吐丝期按 2：3：3：2 比例施入，-密度表示种植密度为 7.5×10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>，+品种代表供试品种为翔玉 998。

磷肥（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）与钾肥（K<sub>2</sub>O）不同产量水平均施

120 kg·hm<sup>-2</sup>，作底肥一次施入。小区为 6 行区，8 m 行长，行距 65 cm，小区面积 31.2 m<sup>2</sup>，重复 2 次。其他管理措施按正常田间管理进行，及时防治病虫害。

1.3 测定项目

1.3.1 产量及产量构成因素 在生理成熟期，每个小区选取中间 2 行进行人工收获，统计有效穗数，用均值法选取 10 穗，自然风干后进行考种，测定穗粒重、穗粒数、百粒重及含水量，籽粒产量按含水量 14%进行折算。

1.3.2 相关指标计算公式

氮肥偏生产力（PFP<sub>N</sub>）=籽粒产量/施氮量；  
产量（效率）差=增（减）技术因子产量（效率）-对应模式的产量（效率）；  
措施贡献率=产量（效率）差/对应模式的产量（效率）×100%。

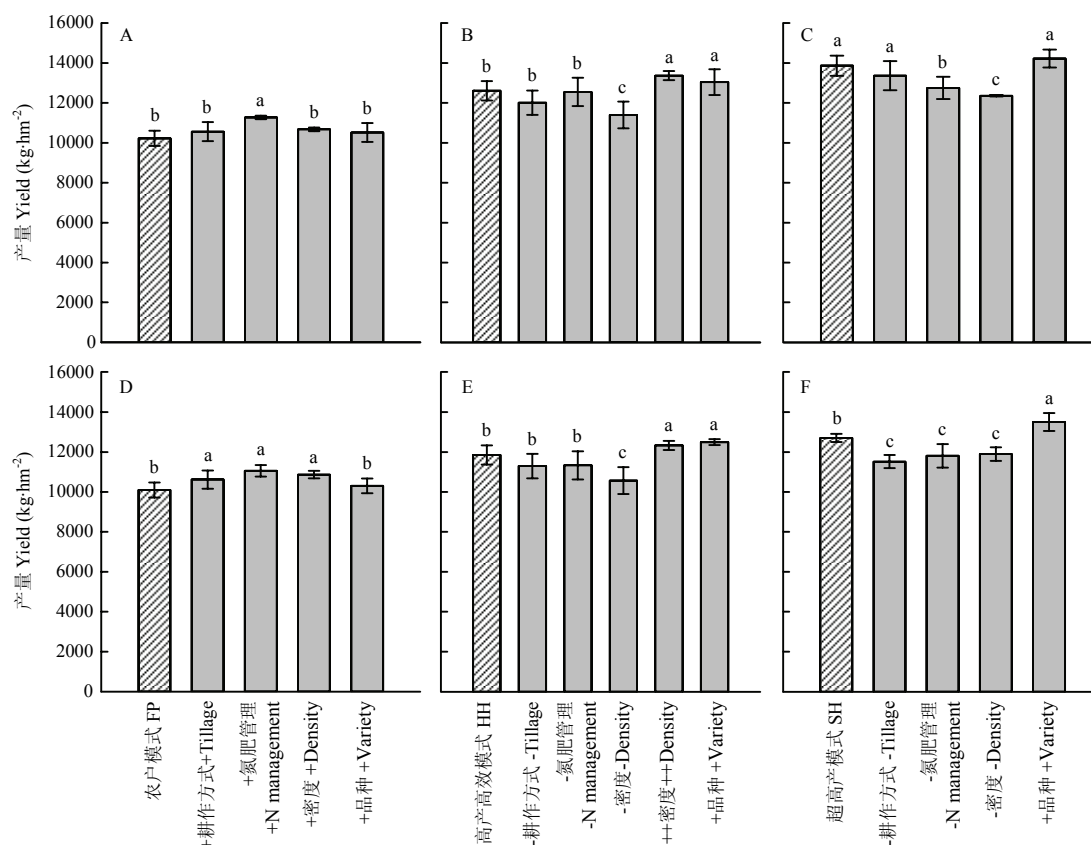
1.4 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理，运用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析，使用最小差异（LSD）法检验差异显著性，并将显著性水平设定为 0.05；利用 SigmaPlot 14.0 软件作图。

2 结果

2.1 不同技术模式及增（减）栽培因子对玉米产量的影响

由图 2 可知，不同技术模式间产量 2 年均表现为超高产模式>高产高效模式>农户模式，其中 2017



A、B、C 分别代表 2017 年农户模式、高产高效模式、超高产模式及增（减）技术因子处理的产量；D、E、F 分别代表 2018 年农户模式、高产高效模式、超高产模式及增（减）技术因子处理的产量

A, B, C represented the yield of FP, HH, SH technical mode and the yield of increasing and decreasing technical factor in 2017, respectively; D, E, F represented the yield of FP, HH, SH technical mode and the yield of increasing and technical measure factor in 2018, respectively

图 2 不同技术模式及其增（减）技术因子对玉米产量的影响

Fig. 2 Effect of different technical models and their increasing and decreasing measures on maize yield

年超高产模式产量分别比高产高效、农户模式产量提高 10.3%和 35.5%，2018 年超高产模式产量分别比高产高效、农户模式产量提高 9.4%和 17.9%，而产量在不同年份间表现为 2017 年要高于 2018 年。

## 2.2 增（减）技术因子形成的产量差及对产量的贡献率

农户模式中（FP），优化各技术因子 2 年的试验结果均表现为较 FP 模式增产，其中优化氮素管理 2017 和 2018 年分别增产 1 050.5、960.0 kg·hm<sup>-2</sup>，对产量的贡献率分别为 10.3%和 9.5%，增产效果均达显著水平，优化种植密度（密度提高至 7.5×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>）产量分别增加 770.8、449.0 kg·hm<sup>-2</sup>，对产量的贡献率分别为 7.6%、4.4%；优化耕作措施（深松、深翻）2 年分别较对照模式增产 361.9 和 523.6 kg·hm<sup>-2</sup>，对产量贡献率分别为 3.5%和 5.2%；而优化品种（新品种翔玉

998）增产效果差异不大，2 年平均增产 212.5 kg·hm<sup>-2</sup>，对产量的贡献率平均仅为 2.5%。高产高效模式中（HH），未经优化土壤耕作、氮素管理、种植密度等技术措施均表现为减产，其中降低种植密度（密度降至 6.0×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>）减产幅度最大，2 年分别减产 1 209.3 和 1 279.0 kg·hm<sup>-2</sup>，相应的产量贡献率分别达 9.6%和 10.8%；未经优化耕作措施（浅旋灭茬）2 年分别减产 594.0、678.1 kg·hm<sup>-2</sup>，相应的产量贡献率分别为 4.7%和 5.7%；未经优化氮素管理（采用“一炮轰”施肥方式）2 年分别减产 556.2 和 513.8 kg·hm<sup>-2</sup>，对产量的贡献率分别为 4.4%和 4.3%；而在高产高效模式中密度增加至 9.0×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>时，产量则分别增加 760.6、483.8 kg·hm<sup>-2</sup>，对产量的贡献率分别为 6.0%、4.1%。可见，在 HH 模式中继续增密的技术效应低于减密技术效应，将 HH 模式中密度增（减）

后形成的产量差绝对值平均,由密度形成的产量差为 933.2 kg·hm<sup>-2</sup>,对产量的贡献率为 7.7%;优化品种(采用高产新品种)同样表现为增产,2 年分别增产 434.5 和 649.8 kg·hm<sup>-2</sup>,对产量的贡献率分别为 3.5%和 5.1%。在超高产模式中(SH),采用未经优化技术因子同样表现为减产,其中常规耕作措施(浅旋灭茬)2017 年减产 498.5 kg·hm<sup>-2</sup>,而 2018 年产量降低 1 182.7 kg·hm<sup>-2</sup>,减产幅度显著高于 2017 年,相应的产量贡献率 2 年分别为 3.6%、9.3%;未经优化氮素

管理 2 年分别减产 1 114.1、833.1 kg·hm<sup>-2</sup>,对产量的贡献率分别为 8.0%和 6.6%;而降低种植密度(密度降至 7.5×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>)2 年产量分别降低 1 507.0 和 808.3 kg·hm<sup>-2</sup>,对产量的贡献率分别为 10.9%和 6.9%;而优化品种同样表现为增产,2 年分别增产 557.4 和 799.2 kg·hm<sup>-2</sup>,对产量的贡献率分别为 4.0%和 6.2%(表 2)。由上述可知,不同技术模式中不同技术因子对产量的贡献率不同,而同一技术因子在不同年份间也存在差异。

表 2 增(减)技术因子形成的产量差及技术因子对产量的贡献率

Table 2 The yield gap formed by increasing and decreasing measure factor and the contribution rate of measure factor to yield

技术模式 Technical mode	技术因子 Technique factor	2017		2018		平均 Average	
		产量差	贡献率	产量差	贡献率	产量差	贡献率
		Yield gap (kg·hm <sup>-2</sup> )	Contribution rate (%)	Yield gap (kg·hm <sup>-2</sup> )	Contribution rate (%)	Yield gap (kg·hm <sup>-2</sup> )	Contribution rate (%)
FP	与 FP 比较 Compared with the FP						
	+土壤耕作 +Tillage	361.9	3.5	523.6	5.1	442.8	4.4
	+氮肥管理 +N management	1050.5	10.3	960	9.5	1005.3	9.9
	+密度 +Density	770.8	7.6	440.9	4.4	609.9	6.0
	+品种 +Variety	294.6	2.9	205.7	2.1	250.2	2.5
HH	与 HH 比较 Compared with the FP						
	-土壤耕作 -Tillage	-594.0	-4.7	-678.1	-5.7	-571.1	-5.2
	-氮肥管理 -N management	-556.2	-4.4	-513.8	-4.3	-510.0	-4.4
	-密度 -Density	-1209.3	-9.6	-1279.1	-10.8	-1244.2	-10.2
	++密度 ++Density	760.6	6.0	483.8	4.1	622.2	5.1
	+品种 +Variety	434.5	3.5	599.8	5.1	542.2	4.3
SH	与 SH 比较 Compared with the SH						
	-土壤耕作 -Tillage	-498.5	-3.6	-1182.7	-9.1	-840.6	-6.5
	-氮肥管理 -N management	-1114.1	-8.0	-833.1	-6.4	-973.6	-7.3
	-密度 -Density	-1507.0	-10.9	-908.3	-6.9	-1207.7	-8.9
	+品种 +Variety	557.4	4.0	799.2	6.2	678.3	5.1

2.3 不同技术模式及增(减)技术因子对玉米氮素偏生产力(PFP<sub>N</sub>)的影响

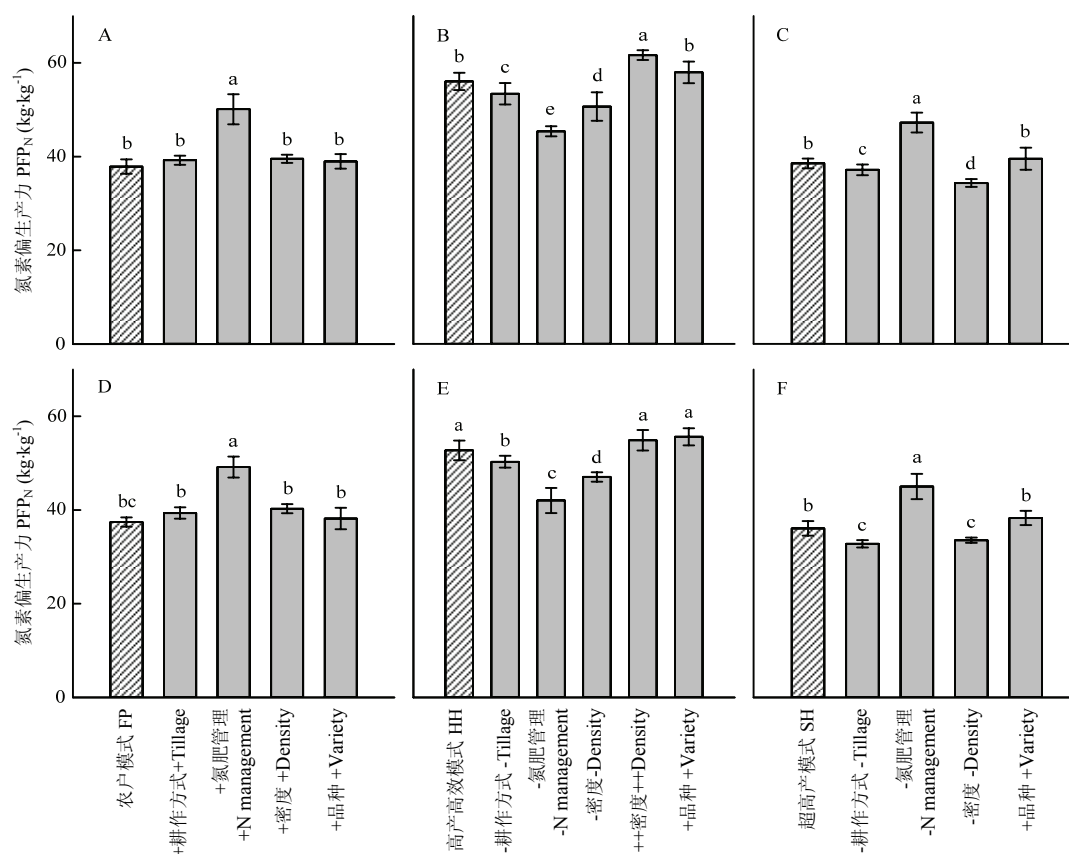
由图 3 可知,不同技术模式氮肥偏生产力(PFP<sub>N</sub>)2 年均表现为 HH 模式显著高于 FP 和 SH 模式,而 FP 和 SH 模式间差异不明显,其中 2017 年 HH 模式 PFP<sub>N</sub> 分别比 FP、SH 提高 47.9%和 45.5%,2018 年 HH 模式 PFP<sub>N</sub> 分别比 FP、SH 提高 40.9%和 46.2%。

2.4 增(减)技术因子形成的氮素效率差及对氮效率的贡献率

表 3 所示,在 FP 模式基础上优化各技术因子,PFP<sub>N</sub> 均有不同程度增加,其中优化氮素管理 PFP<sub>N</sub> 最

大,2 年平均达 49.6 kg·kg<sup>-1</sup>,与 FP 模式的效率差为 12.0 kg·kg<sup>-1</sup>,对 PFP<sub>N</sub> 贡献率达 30.5%;优化种植密度 PFP<sub>N</sub> 差距 2 年分别为 1.7 和 2.9 kg·kg<sup>-1</sup>,对 PFP<sub>N</sub> 的贡献分别为 3.3%和 5.8%;优化耕作措施 2 年与对照模式的效率差分别为 1.3 和 1.9 kg·kg<sup>-1</sup>,对 PFP<sub>N</sub> 的贡献分别为 3.5%和 5.2%;而优化品种增效差异不大,2 年平均增效 0.9 kg·kg<sup>-1</sup>,对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率平均仅为 2.5%。在 HH 模式中,采用常规耕作措施 PFP<sub>N</sub> 2 年分别降低 2.6 和 3.0 kg·kg<sup>-1</sup>,对 PFP<sub>N</sub> 的贡献分别为 4.7%和 5.7%;未经优化氮素管理 PFP<sub>N</sub> 则大幅降低,2 年分别降低了 10.66 和 10.69 kg·kg<sup>-1</sup>,对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率分别达 19.0%





A、B、C 分别代表 2017 年农户模式、高产高效模式、超高产模式及增（减）技术因子的 PFP<sub>N</sub>；D、E、F 分别代表 2018 年农户模式、高产高效模式、超高产模式及增（减）技术因子的 PFP<sub>N</sub>

A, B, C represented the PFP<sub>N</sub> of FP, HH, SH technical mode and the PFP<sub>N</sub> of increasing and decreasing measure factor in 2017, respectively; D, E, F represented the PFP<sub>N</sub> of FP, HH, SH technical mode and the PFP<sub>N</sub> of increasing and decreasing measure factor in 2018, respectively

图 3 不同技术模式及增（减）技术因子对氮素偏生产力（PFP<sub>N</sub>）的影响

Fig. 3 Effect of different technical models and their increasing and decreasing technical factor on PFP<sub>N</sub>

和 20.3%；在 HH 模式中降低种植密度，PFP<sub>N</sub> 2 年分别降低 5.4 和 5.7 kg·kg<sup>-1</sup>，对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率分别为 9.6% 和 10.2%，而提高种植密度，PFP<sub>N</sub> 则分别提高了 3.6、2.2 kg·kg<sup>-1</sup>，对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率分别为 6.0%、4.1%。将 HH 模式中密度增（减）后形成的 PFP<sub>N</sub> 差绝对值平均，由密度形成的 PFP<sub>N</sub> 差为 4.2 kg·kg<sup>-1</sup>，对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率为 7.7%；优化品种 PFP<sub>N</sub> 提高，2 年分别提高 1.9 和 2.9 kg·kg<sup>-1</sup>，对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率分别为 3.5% 和 5.5%。在 SH 模式基础上采用常规耕作措施，PFP<sub>N</sub> 降低，与对照模式相比 2 年分别降低 1.4 和 3.3 kg·kg<sup>-1</sup>，相应 PFP<sub>N</sub> 贡献率为 3.6% 和 9.1%；而未经优化氮素管理 PFP<sub>N</sub> 则较对照模式提高，2 年分别提高了 8.7 和 8.9 kg·kg<sup>-1</sup>，对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率达 23.5% 和 27.3%；在 SH 模式基础上降低种植密度（7.5×10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>），PFP<sub>N</sub> 2 年分别降低 4.2 和 2.5 kg·kg<sup>-1</sup>，对 PFP<sub>N</sub> 的贡献分别为 10.9%

和 6.9%；优化品种 PFP<sub>N</sub> 同样提高，2 年分别提高 1.5 和 2.2 kg·kg<sup>-1</sup>，对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率分别为 4.0% 和 6.2%。由上述分析可知，同产量结果相似，不同技术模式中不同技术因子对 PFP<sub>N</sub> 的贡献率不同，而同一技术因子对 PFP<sub>N</sub> 的影响在不同年份间也存在着差异。

## 2.5 栽培技术因子对玉米产量及效率贡献的优先序

如图 4 所示，不同产量水平下不同技术因子对玉米产量和效率的贡献率存在着较大差异。将 2 年技术措施贡献率的研究结果平均，FP 模式中，栽培措施对产量贡献的优先序为氮素管理、种植密度、土壤耕作、品种，对产量的贡献率分别为 9.9%、6.0%、4.4% 和 2.5%；HH 模式中，栽培措施对产量贡献的优先序为种植密度、氮素管理、土壤耕作、品种，对产量的贡献率分别为 7.7%、5.2%、4.5% 和 3.5%；SH 模式中栽培措施对产量贡献的优先序是：种植密度、土壤

表 3 增（减）技术因子形成的养分效率差及技术因子对氮素效率的贡献率

Table 3 The nutrient efficiency gap formed by increasing (decreasing) measure factor and the contribution rate of measure factor to nitrogen efficiency

技术模式 Technical mode	技术因子 Measure factor	2017		2018		平均 Average	
		效率差	贡献率	效率差	贡献率	效率差	贡献率
		Efficiency gap (kg·kg <sup>-1</sup> )	Contribution rate (%)	Efficiency gap (kg·kg <sup>-1</sup> )	Contribution rate (%)	Efficiency gap (kg·kg <sup>-1</sup> )	Contribution rate (%)
FP	与 FP 比较 Compared with the FP						
	+土壤耕作 +Tillage	1.3	3.5	1.9	5.1	1.64	4.4
	+氮肥管理 +N management	12.2	31.2	11.8	29.8	12.0	30.5
	+密度 +Density	2.8	7.6	1.6	4.5	2.2	6.0
	+品种 +Variety	1.1	2.9	0.8	2.1	0.9	2.5
HH	与 HH 比较 Compared with the HH						
	-土壤耕作 -Tillage	-2.6	-4.7	-3.0	-5.7	-2.8	-5.2
	-氮肥管理 -N management	-10.7	-19.0	-10.7	-20.3	-10.7	-19.7
	-密度 -Density	-5.4	-9.6	-5.7	-10.8	-5.5	-10.2
	++密度 ++Density	3.6	6.0	2.2	4.1	2.9	5.2
	+品种 +Variety	1.9	3.5	2.8	5.1	2.4	4.3
SH	与 SH 比较 Compared with the SH						
	-土壤耕作 -Tillage	-1.4	-3.6	-3.3	-9.1	-2.3	-6.4
	-氮肥管理 -N management	8.7	23.5	8.9	27.3	8.8	25.4
	-密度 -Density	-4.2	-10.9	-2.5	-6.9	-3.4	-8.9
	+品种 +Variety	1.5	4.0	2.2	6.2	1.9	5.1

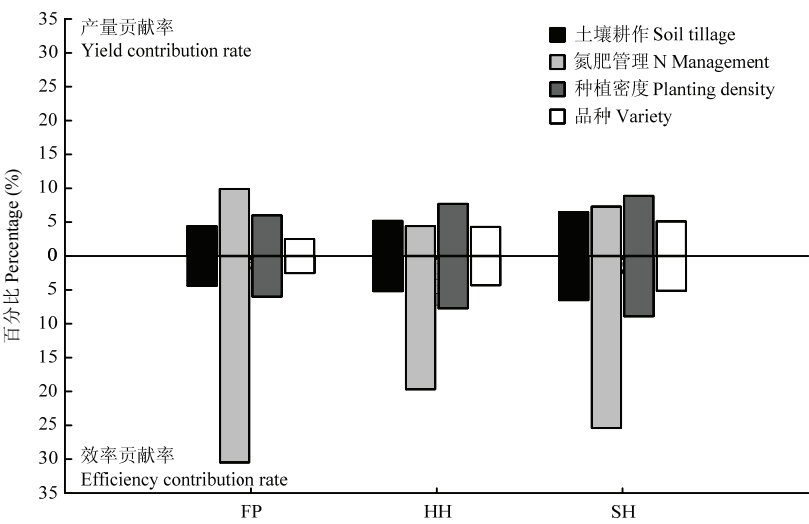


图 4 技术因子对玉米产量及效率贡献的优先序

Fig. 4 Priority of contribution of measure factors to maize yield and efficiency

耕作、氮素管理、品种，对产量的贡献率分别为 8.9%、7.3%、6.5%和 4%。FP 模式中，栽培措施对氮效率贡献的优先序为氮素管理、种植密度、土壤耕作、品种，贡献率分别为 30.5%、6.0%、4.4%和 2.5%；HH 模式中，栽培措施对氮效率贡献的优先序为氮素管理、种植密度、土壤耕作、品种，贡献率分别为 19.7%、7.7%、



4.7%和 4.5%；SH 模式中栽培措施对氮效率贡献的优先序是氮素管理、种植密度、土壤耕作、品种，贡献率分别为 25.4%、8.3%、6.5%和 4.5%。

### 3 讨论

综合农艺管理措施被定义为一个综合管理框架，包括种植密度、养分管理、耕作方式、播种日期等<sup>[11,18]</sup>，通过这些技术因子间的优化整合，交互作用使作物产量和氮素效率得到了极大提高<sup>[19]</sup>。然而，同一技术因子在不同管理模式下的技术效果不同，原因是制约产量水平逐级提高的主要矛盾会发生转变。所以，明确不同管理模式技术因子对缩小产量差距的贡献率及优先序，为采取更具针对性措施，进一步优化技术模式提供了科学依据，对实现缩差增效具有重要意义。

种植密度是影响玉米产量的重要因素。密植群体通过冠层叶片截获太阳辐射，而后通过光合作用影响玉米的生长发育、光合物质生产和分配，并最终决定群体产量的高低<sup>[20-21]</sup>。提高种植密度，获得足够的收获穗数，是实现玉米高产的关键措施<sup>[22]</sup>，而增密增产的同时显著提高了肥料效率<sup>[23-24]</sup>，在不调整农户现有体系其他技术因子情况下增加种植密度会导致产量显著下降<sup>[25]</sup>。本研究结果表明，在 FP 模式中增加种植密度，玉米产量显著增加，2 年平均比对照模式增产 770.8 kg·hm<sup>-2</sup>，对产量的贡献率为 6.0%，与此同时 PFP<sub>N</sub> 提高 2.3 kg·kg<sup>-1</sup>，效率贡献率与产量一致。而将 HH 模式中的密度降至 FP 模式水平、SH 模式中的密度降至 HH 模式水平，产量均大幅度下降，对产量的贡献率分别为 10.2%和 8.9%，效率贡献率同产量一致。可见，在 FP 模式中密度对产量的影响要低于在 HH 和 SH 模式中的影响，说明在一般管理水平下增密的增产效应受其他因子如养分供应、土壤质量等因素限制<sup>[26]</sup>。

我国目前大多数农户常常过量施用氮肥且施肥时期不合理<sup>[27-28]</sup>。本研究前期调研发现，为了节省劳动力，近 50%的农户为一次性基施氮肥，即便追肥的农户大部分也选在拔节期前进行撒施追肥，由于玉米生长初期对氮素的需求相对较低，前期氮肥投入过大可导致生育期间养分大量淋洗，造成玉米后期脱肥而严重影响产量<sup>[29]</sup>。根据玉米氮素需求规律，科学的追肥时期应该是喇叭口期<sup>[30]</sup>。优化氮素管理，采用总量平衡、分期调控的养分管理方式在玉米增产增效方面已得到了广泛认可。袁静超等<sup>[31]</sup>研究表明，与农民“一炮轰”传统施肥方式相比，氮肥减量、分

期调控显著提高了玉米产量和氮肥利用率，同时降低了肥料氮在土壤中残留，减少氮损失<sup>[32]</sup>。本研究结果表明，在 FP 模式基础上优化氮素管理，玉米平均增产 1 005 kg·hm<sup>-2</sup>，对产量的贡献率达 9.9%，与此同时 PFP<sub>N</sub> 提高了 12.0 kg·kg<sup>-1</sup>，效率贡献率高达 30.5%，产量和效率贡献率均居于首位。而将 HH 和 SH 模式中施肥方式改为农户模式的“一炮轰”方式，与对应技术模式相比产量分别降低 435.0 和 973.6 kg·hm<sup>-2</sup>。FP 模式中氮素管理对产量的影响要高于在 HH 和 SH 模式中的影响，说明在 FP 模式中优化养分管理，产量仍有很大提升空间，而在 HH 和 SH 模式中可能由于其他措施的优化，在一定程度上降低了养分管理对产量的影响。SH 模式中劣化氮素管理产量虽然降低，但由于施氮量减少，氮效率反而显著增加，如何实现作物高产和养分效率协同提高是我国玉米生产中必须解决的重要课题。

良好的土壤耕层是实现玉米高产和资源高效的重要保障。东北春玉米区多年来长期采用土壤浅层旋耕和连续多次作业，使耕层厚度逐渐降低，犁底层逐渐加厚<sup>[33-34]</sup>，东北地区有效耕层厚度只有 15.1 cm，低于全国平均的 16.5 cm<sup>[4,35]</sup>。高的土壤容重和犁底层阻碍了根系生长和延伸，限制了水分和养分的吸收，严重制约着玉米产量的提高<sup>[36]</sup>。而深松可以打破犁底层，增加耕层厚度，改善土壤结构，使土壤疏松通气，提高耕地质量，从而提高产量<sup>[37]</sup>。本研究表明，在 FP 模式基础上优化耕作措施（深松改土），玉米产量提高，而将 HH 和 SH 模式中的深松耕作方式替换为浅旋耕作方式、玉米产量降低，但不同技术模式中耕作措施的技术贡献率年份间有所差异，表现为 2018 年高于 2017 年，这可能与 2018 年生育期降水量比 2017 年少有关，试验生育期平均降雨量为 450 mm，2017 年降雨量为 480 mm，而 2018 年不足 370 mm，前人研究结果也表明干旱年份深松处理对玉米产量的贡献更大<sup>[38]</sup>。此外，随种植密度提高，耕作措施对产量及氮素效率的贡献率也随之增大，在 FP、HH 和 SH 模式中，2018 年耕作措施对产量及相应氮素效率的贡献率均为 5.1%、5.7%和 9.1%，而 2017 年耕作措施对产量及相应氮素效率的贡献率均为 3.5%、4.7%、3.6%，可见干旱年份优化耕作措施对高密度群体的正向调控作用更显著。

不同生产技术模式中品种的产量差异较大。本研究发现，不同技术模式中耐密植品种翔玉 998 与对照品种先玉 335 相比产量均有所增加，且在高密度条件

下增产效应明显提高, 但增产效果同其他措施相比没有明显优势, 品种选择对产量及氮素效率贡献率在 FP、HH 和 SH 模式中分别为 2.5%、4.3% 和 5.1%, 在所有技术因子中贡献率最小。这与前人的研究结果不同, ZHAO 等<sup>[26]</sup>在夏玉米上的研究表明限制玉米产量提升的主要因素中品种选择要优先于种植密度和养分管理, 究其原因可能与本研究选用的对照品种先玉 335 在试验中表现出的较高产量水平有关, 该品种曾多年雄踞东北春玉米区标杆性品种地位, 密植高产潜力大、适应性强。先玉 335 作为本区域玉米育种的对照种, 与之相比, 近年新品种的产量遗传增益的提高较慢, 因此本研究所选择的 2 个品种(先玉 335 和翔玉 998)虽审定时间相差较远, 但在综合农艺措施管理系统中, 品种更新换代对增产增效贡献相对较小, 这也说明通过栽培技术多因子的进一步优化是实现东北春玉米缩差增效的重要技术途径。

## 4 结论

不同产量水平的生产模式中, 不同技术因子对产量差及效率差的影响存在着较大差异, 技术因子对产量的贡献并不存在完全一致的优先序, 不同管理水平下产量差的形成是由多因素共同作用的, 技术因子间具有协同作用。当前农户生产模式中氮素管理对产量的贡献率居于首位, 而在高产生产模式中种植密度与土壤耕作对产量贡献较大, 且不同产量水平模式间 PFP<sub>N</sub> 效率差异主要是由氮素管理方式所致。

## References

- [1] ROSSINI M A, MADDONNI G A, OTEGUI M E. Inter-plant competition for resources in maize crops grown under contrasting nitrogen supply and density: Variability in plant and ear growth. *Field Crops Research*, 2011, 121: 373-380.
- [2] MENG Q F, HOU P, WU L, CHEN X P, CUI Z L, ZHANG F S. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China. *Field Crops Research*, 2013, 143: 91-97.
- [3] 李雅剑, 王志刚, 高聚林, 孙继颖, 于晓芳, 胡树平, 余少波, 梁红伟, 裴宽. 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. *中国生态农业学报*, 2016, 24(7): 935-943.
- [4] LI Y J, WANG Z G, GAO J L, SUN J Y, YU X F, HU S P, YU S B, LIAG H W, PEI K. Understanding yield gap and production potential based on networked variety-density tests and Hybrid-Maize model in maize production areas of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(7): 935-943. (in Chinese)
- [5] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 赵明, 李潮海, 崔彦宏, 刘永红, 高聚林, 薛吉全, 王立春, 王璞, 陆卫平, 王俊河, 杨祁峰, 王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [6] LI S K, ZHAO J R, DONG S T, ZHAO M, LI C H, CUI Y H, LIU Y H, GAO J L, XUE J Q, WANG L C, WANG P, LU W P, WANG J H, YANG Q F, WANG Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese)
- [7] 王洪章, 刘鹏, 董树亭, 张吉旺, 赵斌, 任佰朝. 夏玉米产量与光温生产效率差异分析—以山东省为例. *中国农业科学*, 2019, 52(8): 1355-1367.
- [8] WANG H Z, LIU P, DONG S T, ZHANG J W, ZHAO B, REN B Z. Analysis of gap between yield and radiation production efficiency and temperature production efficiency in summer maize: Taking Shandong province as an example. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(8): 1355-1367. (in Chinese)
- [9] 王立春, 王永军, 边少锋, 蔡红光, 任军, 郑金玉, 朱平. 吉林省玉米高产高效绿色发展的理论与实践. *吉林农业大学学报*, 2018, 40(4): 383-392.
- [10] WANG L C, WANG Y J, BIAN S F, CAI H G, REN J, ZHENG J Y, ZHU P. Theory and practice for high yield, high efficiency and green development of maize in Jilin province. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4): 383-392. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] CHEN G F. Limiting factors analysis and designing for high yield and high nutrient use efficiency for winter wheat and summer maize in smaller farmers fields in the North China Plain[D]. Beijing: China Agriculture University, 2018. (in Chinese)
- [13] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 117-127.
- [14] FANG Q X, YU Q, WANG E L, CHEN Y H, ZHANG G L, WANG J, LI L H. Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by 12 fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain. *Plant Soil*, 2006, 284: 335-350.
- [15] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [16] ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, CUI Z L, MA W Q, CHEN X P, JIANG R F. Current status and improvement of fertilizer

- utilization rate of main grain crops in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [11] CHEN X P, CUI Z L, VITOUSEK P M, CASSMAN K G, MATSON P A, BAI J S, MENG Q F, HOU P, YUE S C, ZHANG F S. Integrated soil-crop system management for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(16): 6399-6404.
- [12] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 孟庆锋, 赵明. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 5-14.
- LIU B H, CHEN X P, CUI Z L, MENG Q F, ZHAO M. Research advance on yield potential and yield gaps for three major cereal crops. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(5): 5-14. (in Chinese)
- [13] CHEN G F, CAO H Z, LIANG J, MA W Q, GUO L F, ZHANG S H, JIANG R F, ZHANG H Y, KEITH W T, ZHANG F S. Affecting nitrogen use efficiency and grain yield of summer maize on smallholder farms in the North China Plain. *Sustainability*, 2018, 10(2): 363.
- [14] 王洪章, 刘鹏, 贾绪存, 李静, 任昊, 董树亭, 张吉旺, 赵斌. 不同栽培管理条件下夏玉米产量与肥料利用效率的差异解析. 作物学报, 2019, 45(10): 1544-1553.
- WANG H Z, LIU P, JIA X C, LI J, REN H, DONG S T, ZHANG J W, ZHAO B. Analysis of differences in summer maize yield and fertilizer use efficiency under different cultivation managements. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(10): 1544-1553. (in Chinese)
- [15] 胡瑞法, ERIKA C H M, 张世煌, 石晓华. 中国玉米研究的优先序. 中国科学基金, 2003, 17(5): 273-276.
- HU R F, ERIKA C H M, ZHANG S H, SHI X H. Prioritization for maize research in China. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2003, 17(5): 273-276. (in Chinese)
- [16] 王崇桃, 李少昆. 玉米生产限制因素评估与技术优先序. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1136-1146.
- WANG C T, LI S K. Assessment of limiting factors and techniques prioritization for maize production in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(6): 1136-1146. (in Chinese)
- [17] 闫孝贡, 刘剑钊, 张洪喜, 袁静超, 蔡红光, 任军. 吉林省春玉米大面积增产与资源增效限制因素评估. 吉林农业科学, 2012, 37(6): 9-11, 24.
- YAN X G, LIU J Z, ZHANG H X, YUAN J C, CAI H G, REN J. Assessment of limiting factors on high yield of large-scale spring maize production and high efficiency of resource in Jilin province. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2012, 37(6): 9-11, 24. (in Chinese)
- [18] LIU Z, GAO J, GAO F, DONG S T, LIU P, ZHAO B, ZHANG J W. Integrated agronomic practices management improve yield and nitrogen balance in double cropping of winter wheat-summer maize. *Field Crops Research*, 2018, 221: 196-206.
- [19] JIN L B, CUI H Y, LI B, ZHANG J W, DONG S T, LIU P. Effects of integrated agronomic management practices on yield and nitrogen efficiency of summer maize in North China. *Field Crops Research*, 2012, 134: 30-35.
- [20] YAN P, ZHANG Q, SHUAI X F, PAN J X, ZHANG W J, SHI J F, WANG M, CHEN X P, CUI Z L. Interaction between plant density and nitrogen management strategy in improving maize grain yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain. *Journal of Agricultural Science*, 2016, 154(6): 978-988.
- [21] 柏延文, 杨永红, 朱亚利, 李红杰, 薛吉全, 张仁和. 种植密度对不同株型玉米冠层光能截获和产量的影响. 作物学报, 2019, 45(12): 1868-1879.
- BAI Y W, YANG Y H, ZHU Y L, LI H J, XUE J Q, ZHANG R H. Effect of planting density on light interception within canopy and grain yield of different plant types of maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(12): 1868-1879. (in Chinese)
- [22] 刘伟, 张吉旺, 吕鹏, 杨今胜, 刘鹏, 董树亭, 李登海, 孙庆泉. 种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响. 作物学报, 2011, 37(7): 1301-1307.
- LIU W, ZHANG J W, LÜ P, YANG J S, LIU P, DONG S T, LI D H, SUN Q Q. Effect of plant density on grain yield dry matter accumulation and partitioning in summer maize cultivar Denghai661. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1301-1307. (in Chinese)
- [23] 曹胜彪, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 杨今胜. 施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1343-1353.
- CAO S B, ZHANG J W, DONG S T, LIU P, ZHAO B, YANG J S. Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1343-1353. (in Chinese)
- [24] 李广浩, 刘娟, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌, 石德杨. 密植与氮肥用量对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2247-2258.
- LI G H, LIU J, DONG S T, LIU P, ZHANG J W, ZHAO B, SHI D Y. Effects of close planting and nitrogen application rates on grain yield and nitrogen utilization efficiency of different density-tolerance maize hybrids. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(12): 2247-2258. (in Chinese)
- [25] RUFFO M L, GENTRY L F, HENNINGER A S, SEEBAYER J R, BELOW F E. Evaluating management factor contributions to reduce

- corn yield gaps. *Agronomy Journal*, 2015, 107: 495-505.
- [26] ZHAO P F, CAO G X, ZHAO Y, ZHANG H Y, CHEN X P, LI X L, CUI Z L. Training and organization programs increases maize yield and nitrogen-use efficiency in smallholder agriculture in China. *Agronomy Journal*, 2016, 108(5): 1944-1950.
- [27] CUI Z L, CHEN X P, ZHANG F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China. *AMBIO*, 2010, 39(5/6): 376-384.
- [28] MENG Q F, YUE S C, HOU P, CUI Z L, CHEN X P. Improving yield and nitrogen use efficiency simultaneously for maize and wheat in China: A review. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 137-147.
- [29] SINCLAIR T R, RUFTY T W. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security*, 2012, 1(2): 94-98.
- [30] 侯云鹏, 杨建, 尹彩侠, 秦裕波, 李前, 于雷, 孔丽丽, 刘志全. 氮肥后移对春玉米产量、氮素吸收利用及土壤氮素供应的影响. *玉米科学*, 2019, 27(2): 146-154.
- HOU Y P, YANG J, YIN C X, QIN Y B, LI Q, YU L, KONG L L, LIU Z Q. Effect of postponing nitrogen application on the yield, nitrogen absorption and utilization and soil nitrogen supply in spring maize. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(2): 146-154. (in Chinese)
- [31] 袁静超, 刘剑钊, 梁尧, 展文洁, 张洪喜, 曾子豪, 蔡红光, 任军. 综合农学管理模式对春玉米产量和养分累积特征的影响. *中国农业科学*, 2019, 52(20): 3546-3558.
- YUAN J C, LIU J Z, LIANG Y, ZHAN W J, ZHANG H X, ZENG Z H, CAI H G, REN J. Characteristics of grain yield and nutrient accumulation for spring maize under different agronomic management practices. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(20): 3546-3558. (in Chinese)
- [32] 马星竹, 郝小雨, 高中超, 李一丹, 周宝库. 氮肥用量对土壤养分含量、春玉米产量及农学效率的影响. *玉米科学*, 2016, 24(6): 131-135.
- MA X Z, HAO X Y, GAO Z C, LI Y D, ZHOU B K. Influence to the rate of nitrogen fertilizer application on soil nutrient content, spring maize yield and agronomic efficiency. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(6): 131-135. (in Chinese)
- [33] 王鸿斌, 陈丽梅, 赵兰坡, 刘会青, 王宇. 吉林玉米带现行耕作制度对黑土肥力退化的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 301-305.
- WANG H B, CHEN L M, ZHAO L P, LIU H Q, WANG Y. Influence of present farming system of corn belt on fertility degradation in Jilin province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(9): 301-305. (in Chinese)
- [34] 王立春, 马虹, 郑金玉. 东北春玉米耕地合理耕层构造研究. *玉米科学*, 2008, 16(4): 13-17.
- WANG L C, MA H, ZHENG J Y. Research on rational plough layer construction of spring maize soil in northeast China. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(4): 13-17. (in Chinese)
- [35] 张世煌, 李少昆. 国内外玉米产业技术发展报告. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- ZHANG S H, LI S K. *Domestic and Foreign Corn Industrial Technology Development Report*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [36] WATSON G W, KELSEY P. The impact of soil compaction on soil aeration and fine root density of *Quercus palustris*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(2): 69-74.
- [37] EVANS S D, LINDSTROM M J, VOORHEES W B, MONCRIEF J F, NELSON G A. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil and Tillage Research*, 1996, 38(1/2): 35-46.
- [38] CAI H G, MA W, ZHANG X Z, PING J Q, YAN X G, LIU J Z, YUAN J C, WANG L C, REN J. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. *The Crop Journal*, 2014, 2(5): 297-307.

(责任编辑 杨鑫浩)