



综合农学管理模式对春玉米产量和养分累积特征的影响

袁静超¹, 刘剑钊¹, 梁尧¹, 展文洁^{1,2}, 张洪喜¹, 曾子豪^{1,2}, 蔡红光¹, 任军¹

(¹吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部东北植物营养与农业环境重点实验室, 长春 130033; ²吉林农业大学, 长春 130118)

摘要:【目的】研究综合农学管理模式对春玉米产量及开花前后植株养分累积与转运特征, 旨在为春玉米高产高效生产提供理论和技术支持。【方法】试验于 2009—2011 年在吉林省公主岭市铁北区进行, 以先玉 335 为供试材料, 在大田条件下设置 5 种不同农学管理模式, 即无肥区 (CK)、农户习惯模式 (FP)、综合农学管理模式 1 (Opt-1)、综合农学管理模式 2 (Opt-2)、综合农学管理模式 3 (Opt-3), 通过 3 年定位试验, 系统监测不同生育时期植株氮、磷、钾养分吸收与累积特征, 重点对开花前后春玉米干物质及氮磷钾养分累积与转运特征进行比较研究。【结果】合理增密、平衡施肥和深松作业是春玉米获得高产的关键措施。5 种模式间以 Opt-3 最优, 与农户习惯模式 (FP) 相比, Opt-3 产量和干物质累积量增幅分别为 13.9% 和 22.4%, 其增产贡献主要来自于收获穗数 (较农户模式增加 34.3%)。在与 FP 处理化肥投入量基本一致的情况下, Opt-3 处理下植株氮、磷、钾累积量分别增加 9.5%、28.1% 和 23.9%, 氮、磷、钾素转运效率分别增加 47.7%、21.7% 和 45.0%, 氮肥偏生产力增加 14.0%, 磷肥偏生产力增加 4.4%。与 Opt-1 模式相比, Opt-3 处理主要通过增加密度实现了产量的进一步提升 (较 Opt-1 种植密度增加 10 000 株/hm², 增产 56—346 kg·hm⁻²); 与 Opt-2 模式相比, Opt-3 主要通过肥料的进一步优化实现了效率的提升 (较 Opt-2 氮肥农学利用率提高 29.5%)。通过肥料成本核算, Opt-3 处理较 FP 处理增加收益 2 218 元/hm², 较 Opt-1 处理增加收益 290 元/hm², 较 Opt-2 处理节约成本 367 元/hm²。【结论】合理增密至 70 000 株/hm²、优化化肥用量 (N 225 kg·hm⁻²-P₂O₅ 90 kg·hm⁻²-K₂O 90 kg·hm⁻²) 和施用时期、增施有机肥 (15 000 kg·hm⁻²)、补充中微肥 (150 kg·hm⁻²), 并结合土壤深松是较为优化的综合农学管理模式, 可以实现东北中部春玉米产量和效率的协同提升。

关键词: 农学管理; 春玉米; 产量; 养分累积与转运; 偏生产力

Characteristics of Grain Yield and Nutrient Accumulation for Spring Maize Under Different Agronomic Management Practices

YUAN JingChao¹, LIU JianZhao¹, LIANG Yao¹, ZHAN WenJie^{1,2}, ZHANG HongXi¹,
ZENG ZiHao^{1,2}, CAI HongGuang¹, REN Jun¹

(¹Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northeast Region, Ministry of Agriculture, Changchun 130033;

²Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: 【Objective】This research aimed to investigate the characteristics of grain yield, nutrient accumulation and transport of spring maize before and after flowering under different agronomic management practices, so as to provide theoretical and technical support for high yield and efficient production of spring maize. 【Method】The field experiment was conducted from 2009

收稿日期: 2019-03-19; 接受日期: 2019-07-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0201804)、吉林省科技厅重点研发项目 (20180201077NY)、吉林省农业科技创新工程 (CXGC2017ZD001)、吉林省人才开发资金项目

联系方式: 袁静超, E-mail: jingchao_yuan@163.com. 通信作者蔡红光, E-mail: caihongguang1981@163.com. 通信作者任军, E-mail: renjun557@163.com

to 2012 in Gongzhuling of Jilin province. The hybrid “Xianyu335” was used as research material. During three consecutive years, five different agronomic management practices (CK, FP, Opt-1, Opt-2, and Opt-3) were set under the field conditions. The characteristics of dry matter accumulation, nutrient absorbing and transport were monitored before and after flowering of spring maize. The influence of grain yield was studied under different agronomic management practices. 【Result】Reasonable densification, nutrient management and deep scarification were the key measures for high yield of spring maize. The result indicated Opt-3 was optimal under five different agronomic management practices. Compared with FP, the grain yield and dry matter accumulation of Opt-3 increased 13.9% and 22.4%, respectively. The number of maize ears in harvest stage contributed yield mostly, and the yield under Opt-3 was 34.3% higher than that under FP. Under the condition of same amount of fertilizer input between Opt-3 and FP, N, P and K accumulation of Opt-3 increased by 9.5%, 28.1% and 23.9% than that of FP, respectively. N, P and K translocation rate of Opt-3 increased by 47.7%, 21.7% and 45.0%, respectively. Partial productivity of N, P fertilizer increased by 14.0% and 4.4%, respectively. Compared with Opt-1, the grain yield of Opt-3 was further augmented by increasing planting density. When planting density was increased by 10 000 plant/hm², the grain yield increased 56-346 kg·hm⁻². Compared with Opt-2, the efficiency of Opt-3 was improved through further optimization of fertilizer, and ANUE of Opt-3 increased 29.5%. Through fertilizer cost accounting, compared with FP, Opt-3 increased income by 2 218 yuan/hm². Compared with Opt-1, Opt-3 increased income by 290 yuan/hm². Compared with Opt-2, Opt-3 saved 367 yuan/hm². 【Conclusion】By reasonable densification to 70 000 plant/hm², optimized fertilizer (N 225 kg·hm⁻²-P₂O₅ 90 kg·hm⁻²-K₂O 90 kg·hm⁻²) and application period, organic fertilizer (1 500 kg·hm⁻²), added microelement fertilizer (150 kg·hm⁻²), combined with soil deep tillage, it was a relatively optimized integrated agronomic management mode, which could realize the synergistic improvement of spring maize yield and efficiency in the middle of northeast China.

Key words: agronomic management practices; spring maize; grain yield; nutrient accumulation and transport; partial productivity

0 引言

【研究意义】我国人多地少, 资源利用效率低, 如何协同实现作物高产与资源高效利用一直是农业领域研究的热点^[1-2]。玉米是中国三大粮食作物之一, 在保证国家粮食安全中占有重要地位。东北春玉米区是我国玉米主产区, 在其有限的耕地面积上实现玉米产量与效率的协同提高具有重要意义。【前人研究进展】早在“九五”期间, 已有学者提出减少化肥投入, 提高肥料利用率, 实现作物高产高效^[3], 21 世纪初期, 任军团队对吉林省高产土壤培肥、高产施肥适宜用量和高产田建设进行了系统研究, 明确了不同产量农田土壤速效养分状况及调控途径, 初步构建了 14 250 kg·hm⁻² 土壤培肥与施肥技术^[4-7]。关于玉米高产高效的形成机理, 前人已从产量及构成因素^[8]、养分累积^[9-10]、光合特性^[11]、冠层结构^[12]、根系构建^[13]等方面进行了系统研究, 针对单项农学措施对产量形成与资源利用效率的影响也有较多研究, 王海燕等^[14]认为随着密度增加, 产量和氮素利用率呈增加趋势, 高秆大穗型品种更易产生“密度效应”, 适宜密度可调动营养器官中养分的运转。如何在最佳时期施入适宜化肥用量, 使作物养分供应持续有效, 保障作物产量的同时减少土壤养分淋失, 值得深究^[15]。现阶段从作物产量看, 长期施用有机肥的增产效果趋同于单施化肥 (NPK), 长期有机培肥, 可提升土壤肥力, 且增加

有机肥替代率^[16]。而微肥施用可以促进植株对养分吸收、籽粒的形成以及干物质的累积, 吉林中部地区增施硫肥, 西部地区增施锌肥效果最好^[17]。通过对留茬深松、免耕、翻耕和传统耕法长期定位研究, 刘武仁等^[18]认为通过留茬深松可打破犁底层降低容重, 蓄水保墒, 利于光合产物积累。隗英华等^[19]提出了以磷、钾肥作基肥一次性施入, 氮肥作基肥深施、拔节肥+大喇叭口肥追施的东北地区春玉米生产高效施肥技术。高伟等^[20]研究表明在东北地区种植的春玉米可以适当推迟追肥时间, 增加玉米对养分的吸收, 从而提高玉米产量。【本研究切入点】前人研究侧重于提高产量和养分单一元素效率, 或通过适当调增种植密度和化肥施用量改进农学管理模式, 但缺乏作物栽培和养分管理的系统技术集成与优化研究。可否通过栽培方式的改变、养分管理的优化及耕作方式的改良进行技术集成和优化, 同步提高产量与养分利用效率? 目前在东北春玉米区还鲜有这方面的研究实证报道。

【拟解决的关键问题】本文将栽培方式、种植密度和肥料运筹相结合, 研究综合农学管理模式对春玉米产量和养分累积特征的影响, 旨在为东北春玉米高产资源高效利用提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设在吉林省公主岭市铁北区 (43°29'55"N,

124°48'43"E), 海拔 221 m。试验田为玉米连作区, 无灌溉。玉米生育期间平均气温为 19.6℃左右, 无霜期 125—140 d, 有效积温 2 600—3 000℃, 总日照时数 1 220 h 左右。2009 年生育期内日照总时数 697.5 h, 总降雨量 254.8 mm, 活动积温 3 265.8℃。2010 年生育期内日照总时数 633.4 h, 总降雨量 628.2 mm, 活动积温 3 108.8℃。2011 年生育期内日照总时数 542.6 h, 总降雨量 320.6 mm, 活动积温 2 983.0℃ (图 1)。其中 2009 年较为干旱, 5—8 月份均呈现出寡雨状态; 2010 年降雨较为充足, 尤其是 5 月、7 月和 8 月, 6 月份在玉米拔节期反而雨量较少; 2011 年各个月份雨水较为均匀, 但降雨量不充足, 总降雨量高于 2009 年。供试土壤为黑土, 0—20 cm 耕层土壤主要性状为有机质 26.4 g·kg⁻¹, 碱解氮 244.0 mg·kg⁻¹、速效磷 35.9 mg·kg⁻¹、速效钾 140 mg·kg⁻¹、pH 6.59。

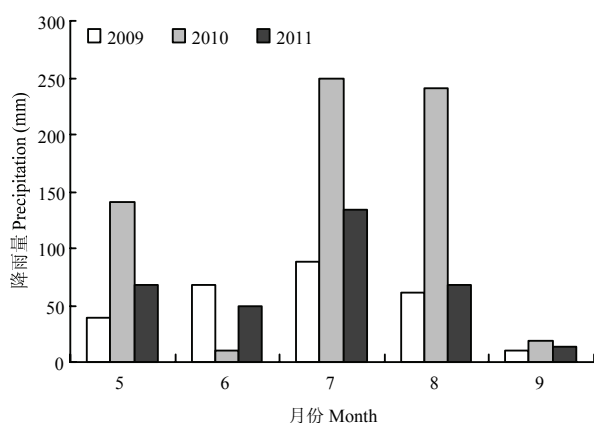


图 1 试验区 2009—2011 年玉米生育期降雨量分布

Fig. 1 Precipitation in experiment field during maize growth stage from 2009 to 2011

1.2 试验设计

以先玉 335 为供试品种, 将种植密度、耕作方式、肥料施用量及施用时期进行系统性整合, 设 5 种综合农学管理模式 (表 1), 具体如下:

(1) 无肥区 (CK): 种植密度 60 000 株/hm²、不施化肥、灭茬旋耕;

(2) 当地农户习惯 (FP): 种植密度 50 000 株/hm²、一次性施化肥 N 225 kg·hm⁻²、P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻²、K₂O 67.5 kg·hm⁻²、灭茬旋耕;

(3) 综合农学管理模式 1 (Opt-1): 种植密度增

加至 60 000 株/hm², 化肥减施, 用量为 N 195 kg·hm⁻²、P₂O₅ 75 kg·hm⁻²、K₂O 82.5 kg·hm⁻², 氮肥分 2 次施用, 播前和拔节期分别施 78 和 117 kg·hm⁻², 基施有机肥 15 000 kg·hm⁻² 及中微肥 60 kg·hm⁻², 灭茬旋耕;

(4) 综合农学管理模式 2 (Opt-2): 种植密度增加至 70 000 株/hm², 化肥增施, 用量为 N 300 kg·hm⁻²、P₂O₅ 120 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻², 氮肥分 3 次施用, 播前、拔节和抽雄期分别施用 120、120、60 kg·hm⁻², 磷肥和钾肥分两次施用, 播前和拔节期分别施用 96 和 24 kg·hm⁻², 基施有机肥 15 000 kg·hm⁻², 增施中微肥 150 kg·hm⁻², 深松;

(5) 综合农学管理模式 3 (Opt-3): 种植密度增加至 70 000 株/hm², 化肥较 Opt-2 减施, 用量为 N 225 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 90 kg·hm⁻², 氮肥分 3 次施用, 播前、拔节和抽雄期分别施用 90、90、45 kg·hm⁻², 磷肥和钾肥分 2 次施用, 播前和拔节期分别施用 72 和 18 kg·hm⁻², 有机肥、中微肥、种植密度及耕作方式同 Opt-2。

试验中微肥为锌、锰、硼复混肥, 比例为 2 :

1 : 1; 有机肥中全氮、全磷、全钾的含量分别为 16.6、5.9、20.6 g·kg⁻¹。每个处理重复 4 次, 小区面积 144 m², 随机区组排列。5 种模式的其他田间管理方式一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤理化性质测定 参照文献鲍士旦^[21]的方法, 用碱解扩散法测定速效氮; 用 NaHCO₃ 浸提, 钼锑抗比色法测定速效磷; 用 NH₄OAC 浸提, 火焰光度计法测定速效钾; 以水土比为 2.5 : 1.0, 复合电极测定 pH。

1.3.2 产量及其构成因素 完全成熟后收获中间 2 行玉米, 装入尼龙网袋, 晒干脱粒称重, 用水分仪测定水分, 以含水量 14% 的重量折算小区产量, 另取 10 穗玉米考种, 调查穗长、穗行数、穗粒数、行粒数和百粒重等。

产量 (kg·hm⁻²) = 有效公顷穗数 × 千粒重 / 1000 × (1 - 含水量) / (1 - 14%)

1.3.3 干物质累积量 分别在玉米 6 展叶 (V6)、12 展叶 (V12)、吐丝期 (R1)、灌浆期 (R3)、成熟期 (R6) 5 个生育时期, 每个处理选择生长发育一致、叶片无病斑和破损的植株地上部 3 株, 将植株按叶、茎 (鞘)、籽粒、穗轴器官分开, 烘箱 105℃ 杀青 60 min, 75℃ 烘至恒重称干重, 之后粉碎用于测定 N、P、K 含量。

表 1 综合农学管理模式的栽培措施
Table 1 Cultivation of different integrated agronomic management practices

处理 Treatment	种植密度 Plant density ($\times 10^4$ plants/hm ²)	耕作 Tillage	肥料 Fertilizer	肥料施用量 Fertilizer application amount (kg·hm ⁻²)			
				施肥量 Fertilizing amount	播前 Before seeding	拔节期 V6	抽雄期 VT
CK	6.0	灭茬旋耕 Stubble rotary tillage	N	0	—	—	—
			P	0	—	—	—
			K	0	—	—	—
			微量肥 Microelement	0	—	—	—
			有机肥 Organic	0	—	—	—
FP	5.0	灭茬旋耕 Stubble rotary tillage	N	225	225	—	—
			P	82.5	82.5	—	—
			K	67.5	67.5	—	—
			微量肥 Microelement	0	—	—	—
			有机肥 Organic	0	—	—	—
Opt-1	6.0	灭茬旋耕 Stubble rotary tillage	N	195	78	117	—
			P	75	75	—	—
			K	82.5	82.5	—	—
			微量肥 Microelement	60	60	—	—
			有机肥 Organic	15000	15000	—	—
Opt-2	7.0	6 展叶深松 V6-subsoiling	N	300	120	120	60
			P	120	96	24	—
			K	120	96	24	—
			微量肥 Microelement	150	150	—	—
			有机肥 Organic	15000	15000	—	—
Opt-3	7.0	6 展叶深松 V6-subsoiling	N	225	90	90	45
			P	90	72	18	—
			K	90	72	18	—
			微量肥 Microelement	150	150	—	—
			有机肥 Organic	15000	15000	—	—

1.3.4 氮、磷、钾含量 全氮采用凯氏定氮法，全磷采用钼锑抗比色法，全钾采用火焰光度计法。

1.3.5 相关参数计算 吐丝前干物质（养分）积累率（%）=吐丝期干物质（养分）积累量/收获时干物质（养分）积累量×100；

吐丝后干物质（养分）积累量（kg·hm⁻²）=收获时干物质（养分）积累量-吐丝期干物质（养分）积累量；

吐丝后干物质（养分）积累率（%）=吐丝后干物质（养分）积累量/收获时干物质（养分）积累量×100；

干物质转运量（kg·hm⁻²）=吐丝期植株干物质（养分）积累量-成熟期植株干物质（养分）积累量；

干物质（养分）转运效率（%）=（吐丝期干物质（养分）积累量-成熟期干物质（养分）积累量）/吐丝期干物质积累量×100；

吐丝前干物质（养分）积累对产量的贡献率（%）=干物质（养分）转运量/籽粒产量×100；

吐丝后干物质（养分）积累对产量的贡献率（%）=100-吐丝前干物质（养分）积累对产量的贡献率；

偏生产力（kg·kg⁻¹）=玉米产量/施肥量

1.4 数据整理与统计方法

所有数据采用 Microsoft Excel 2010 软件处理后，用 SAS 8.0 统计软件进行方差分析和多重比较。

2 结果

2.1 不同农学管理模式春玉米的产量及其构成因素

本研究中 CK 仅作为无肥对照处理, 因此不作为综合农学管理模式进行系统讨论。其他 4 种综合农学管理模式的产量呈波动性增加, 年际变化趋势一致(表 2), Opt-1、Opt-2、Opt-3 3 种农学管理模式年均产量分别为 9 922、10 203 和 10 084 kg·hm⁻², 较 FP 处理均有增产效果, 增产幅度分别为 9.0%—15.0%、9.4%—19.7%、9.7%—18.7%。年际间比较, 2010 年产量比 2009、2011 年显著增加, 这可能是由于 2010 年降雨

量和积温较高, 弱化了肥料以及农学管理模式对作物生长的影响。方差分析结果也表明, 年份、处理以及年份和处理的交互作用均对产量有极显著影响。在产量的构成因子中, 穗数、穗粒数、粒重是最重要的 3 个组分。2009—2011 年, Opt-1、Opt-2、Opt-3 3 种农学管理模式下的收获穗数均显著的高于 FP 处理, 除 2009 年外, 其他年份在 Opt-1、Opt-2、Opt-3 3 种模式下的穗粒数均低于 FP, 表明产量主要是依靠收获穗数的增加来实现。年份、处理以及年份和处理的交互作用对收获穗数、穗粒数和百粒重均产生了极显著影响, 进一步说明了合理密植可实现产量潜力的提升。

表 2 不同农学管理模式春玉米的产量及其构成因素

Table 2 The grain yield and its components under different agronomic management practices

年份	处理	产量	收获穗数	穗粒数	百粒重	增产
Year	Treatment	Grain yield (kg·hm ⁻²)	Ear number (hm ⁻²)	Kernel number	100-kernel weight (g)	Increase (%)
2009	CK	5991.6b	53000c	389b	29.8b	—
	FP	8356.6a	45000d	503a	37.2a	—
	Opt-1	9108.0a	63000a	521a	29.9b	9.0
	Opt-2	9142.0a	61000b	504a	30.4b	9.4
	Opt-3	9163.7a	63000a	501a	29.8b	9.7
2010	CK	7526.1c	58000b	398c	33.9c	—
	FP	8945.6b	51000c	479a	37.9b	—
	Opt-1	10019.9a	57000b	455a	40.7a	12.0
	Opt-2	10390.4a	67000a	388c	41.7a	16.2
	Opt-3	10102.5a	64000a	401b	41.0a	12.9
2011	CK	4457.0c	57000b	288c	27.6b	—
	FP	9253.0b	47000c	638a	35.2ab	—
	Opt-1	10639.0a	57000b	558b	32.6a	15.0
	Opt-2	11077.9a	62000a	504b	33.5ab	19.7
	Opt-3	10985.0a	65000a	504b	32.5b	18.7

变异来源 Sources of variance

年份 Year (Y)	15.77**	15.81**	28.55**	104.26**
处理 Treatment (T)	85.66**	3.23**	45.64**	21.85**
年份×处理 Y×T	8.09**	11.90**	11.78**	6.87**

同列数据后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。*代表差异显著 ($P<0.05$), **代表差异极显著 ($P<0.01$)。CK、FP、Opt-1、Opt-2、Opt-3 分别代表 5 个综合农学管理处理。下同
Values followed by different letters in the same column mean significant differences at 0.05 level; * means significant difference at 0.05 level; ** means significant difference at 0.01 level; CK, FP, Opt-1, Opt-2, and Opt-3 represent integrated agronomic practices, respectively. The same as below

2.2 不同农学管理模式春玉米干物质及养分吸收动态

由图 2 可知, 干物质累积量的高低表现为 Opt-2 > Opt-3 > Opt-1 > FP > CK, Opt-1、Opt-2 及 Opt-3 3

种农学管理模式的吸氮量在生育前期与 FP 差异不显著, 但吐丝期 (R1) 后, 其吸氮量显著高于 FP。Opt-1、Opt-2 及 Opt-3 3 个处理植株磷素和钾素吸收变化趋势与 FP 处理基本一致, 自拔节期 (V12)

后, 氮、磷、钾吸收量均高于 FP。乳熟期 (R3) 至成熟期 (R6) 阶段 (氮吸收高峰), FP、Opt-1、Opt-2 及 Opt-3 氮素积累量分别占整个生育期氮素积累量的 32.0%—39.8%、31.3%—38.9%、31.7%—36.8%、30.4%—38.2%。Opt-1、Opt-2 及 Opt-3 的整个生育期磷素吸收量分别为 1.2—98.6、1.7—120.5、1.8—122.8 和 2.0—118.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 成熟期

(R6) 磷素积累量分别占总吸收量的 32.2%—49.7%、33.3%—50.3%、33.3%—44.4%、34.7%—46.2%。Opt-1、Opt-2 及 Opt-3 整个生育期吸钾量分别为 5.5—178.8、8.5—217.7、8.6—231.9 和 6.8—224.2 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其乳熟期的吸收量分别占总吸收量的 26.9%—32.9%、29.0%—35.7%、29.3%—35.4%、28.0%—34.5%。

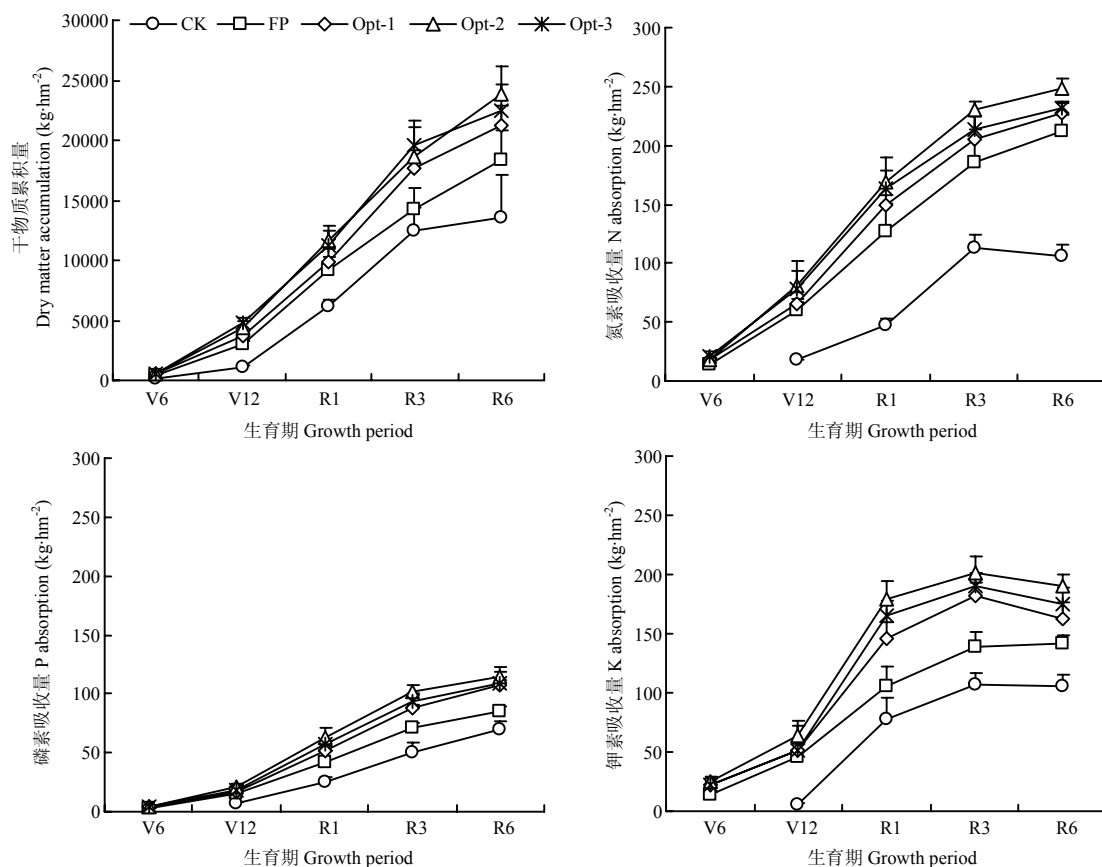


图 2 不同农学管理模式下春玉米干物质及养分吸收动态

Fig. 2 Accumulation of dry matter and absorption of N,P and K under different agronomic management practices

2.3 不同农学管理模式下春玉米开花前后干物质积累与分配

3 种优化的农学管理模式, 吐丝前后的干物质积累量均显著高于 FP (表 3), 吐丝前和吐丝后 Opt-1、Opt-2、Opt-3 干物质积累量分别较 FP 增加 6.7%、29.9%、24.7%和 25.5%、33.4%、23.1%。干物质积累率和干物质积累对籽粒的贡献率均表现吐丝前 Opt-3 > FP > Opt-2 > Opt-1 > CK, 吐丝后 CK > Opt-1 > Opt-2 > FP > Opt-3 (3 年结果均值)。其中 Opt-3 干物质积累率和干物质积累对籽粒的贡献率在吐丝前较 FP 提

高 0.4%和 11.2%, 吐丝后较 FP 降低 0.4%和 1.7%。Opt-1、Opt-2 干物质积累率在吐丝前分别较 FP 降低 5.8%、1.7%, 吐丝后分别提高 5.9%、1.7%; Opt-1、Opt-2 干物质积累对籽粒的贡献率在吐丝前分别较 FP 降低 8.8%、3.2%, 吐丝后分别提高 1.4%、0.5%。说明干物质生产能力 Opt-3 前期更强, Opt-1 和 Opt-2 后期更强, 由此可见, 通过农学管理模式的改变有利于群体干物质质量的积累, 为提高籽粒产量奠定基础。Opt-3 的干物质转运效率比 FP 提高 8.3%, 差异显著, 且比 Opt-1、Opt-2 分别提高 19.5%和 14.8%。

表 3 不同农学管理模式下春玉米干物质积累及对籽粒的贡献

Table 3 Dry matter accumulation and contribution to grain of spring maize under different agronomic management practices

年份 Year	处理 Treatment	积累量 Accumulation of dry matter (kg·hm ⁻²)		积累率 Accumulation rate (%)		对籽粒贡献率 Accumulation rate (%)		转运效率 Translocation rate
		吐丝前 BS	吐丝后 AS	吐丝前 BS	吐丝后 AS	吐丝前 BS	吐丝后 AS	(%)
2009	CK	6312.0c	8235.0a	43.4	56.6	2.8	97.2	3.3
	FP	8384.5b	7832.4a	51.7	48.3	19.4	80.6	19.3
	Opt-1	9976.0a	9696.2a	50.7	49.3	13.6	86.4	13.3
	Opt-2	11514.3a	9293.9a	55.3	44.7	25.4	74.6	23.2
	Opt-3	11239.2a	8579.4a	56.7	43.3	25.9	74.1	22.8
2010	CK	6028.0b	6480.8d	48.2	51.8	14.2	85.8	15.2
	FP	7850.0b	8985.1c	46.6	53.4	6.2	93.8	6.6
	Opt-1	10154.0a	8739.8c	53.7	46.3	21.3	78.7	19.9
	Opt-2	10920.0a	14267.1a	43.4	56.6	1.1	98.9	1.3
	Opt-3	9906.0a	11906.0b	45.4	54.6	6.9	93.1	7.8
2011	CK	—	—	—	—	—	—	—
	FP	11468.0ab	10453.3c	52.3	47.7	14.7	85.3	13.6
	Opt-1	9433.3b	15800.7a	37.4	62.6	1.8	98.2	2.6
	Opt-2	12480.0a	12831.3b	49.3	50.7	12.5	87.5	12.8
	Opt-3	13408.5a	13097.0b	49.1	50.9	11.9	88.1	12.2

BS-吐丝前, AS-吐丝后。下同
BS-Before silking; AS-After silking. The same as below

2.4 不同农学管理模式下春玉米开花前后养分积累与转运

3 种优化综合农学管理模式 (Opt-1、Opt-2、Opt-3) 植株氮、磷、钾积累量在吐丝前较 FP 平均增加 27.1%、32.8%和 47.7%;在吐丝后较 FP 平均增加 13.9%、31.1%和 30.6% (表 4—6)。氮素积累率和氮素积累对籽粒的贡献率均表现为吐丝前 Opt-3>Opt-2>Opt-1>FP>CK, 吐丝后 CK>FP>Opt-1>Opt-2>Opt-3 (3 年结果均值)。其中 Opt-1、Opt-2、Opt-3 氮素积累率在吐丝前较 FP 分别提高 9.5%、13.0%、16.2%, 吐丝后分别降低 14.6%、20.0%、24.8%; Opt-1、Opt-2、Opt-3 氮素积累对籽粒的贡献率在吐丝前较 FP 分别提高 35.9%、46.6%、54.8%, 吐丝后分别降低 22.0%、28.6%和 33.6%, 说明 3 种优化后的农学管理模式氮素积累前期更强。Opt-1、Opt-2、Opt-3 的氮素转运效率与 FP 差异显著, 分别提高 34.8%、44.5%和 47.7%, 其中 Opt-3 转运效率比 Opt-1、Opt-2 提高 9.6%和 2.2%。

磷素积累率和磷素积累对籽粒的贡献率均表现为

吐丝前 Opt-2>Opt-3>FP>Opt-1>CK, 吐丝后 CK>Opt-1>FP>Opt-3>Opt-2 (3 年结果均值)。其中 Opt-2、Opt-3 磷素积累率在吐丝前较 FP 分别提高 8.6%、2.9%, 吐丝后分别降低 9.3%、3.2%; Opt-2、Opt-3 磷素积累对籽粒的贡献率在吐丝前较 FP 分别提高 22.3%、11.1%, 吐丝后分别降低 13.7%、6.9%; 而 Opt-1 磷素积累率和磷素积累对籽粒的贡献率在吐丝前较 FP 分别降低 4.1%和 1.3%, 吐丝后较 FP 分别提高 4.5%和 0.8%, 这可能是由于 Opt-1 施磷量低于 FP, 使得前期作物磷素吸收量较低, 随生育期不断推进, 根系有效下扎, 使得作物在土壤中汲取更多的养分, 进而转化为籽粒所需的同化产物。钾素积累率和钾素积累对籽粒的贡献率均表现为吐丝前 Opt-3>Opt-2>Opt-1>FP>CK, 吐丝后 CK>FP>Opt-1>Opt-2>Opt-3 (3 年结果均值)。其中 Opt-1、Opt-2、Opt-3 钾素积累率在吐丝前较 FP 分别提高 11.7%、13.6%、18.7%; 吐丝后分别降低 37.4%、43.6%、59.6%; Opt-1、Opt-2、Opt-3 钾素积累对籽粒的贡献率在吐丝前较 FP 分别提高 49.9%、51.5%、73.9%,

吐丝后分别降低 37.9%、39.2%、56.2%，说明 3 种优化后的农学管理模式钾素积累前期更强。Opt-3 的钾素转运效率与 FP 差异显著，与 Opt-1 和 Opt-2 比较，钾素转运效率分别提高 15.0%、6.3%。

表 4 不同农学管理模式下春玉米氮素积累及对籽粒的贡献
Table 4 N accumulation and contribution to grain of spring maize under different agronomic management practices

年份 Year	处理 Treatment	积累量		积累率		对籽粒贡献率		转运效率
		Accumulation of dry matter (kg·hm ⁻²)		Accumulation rate (%)		Accumulation rate (%)		Translocation rate
		吐丝前 BS	吐丝后 AS	吐丝前 BS	吐丝后 AS	吐丝前 BS	吐丝后 AS	(%)
2009	CK	46.8c	78.0a	37.5	62.5	19.4	80.6	37.7
	FP	115.9b	61.3a	65.4	34.6	54.3	45.7	57.8
	Opt-1	141.8a	69.2a	67.2	32.8	57.6	42.4	60.4
	Opt-2	159.5a	57.4a	73.5	26.5	67.7	32.3	65.9
	Opt-3	144.6a	63.7a	69.4	30.6	61.8	38.2	63.9
2010	CK	—	—	—	—	—	—	—
	FP	149.7b	65.4a	69.6	30.4	52.3	47.7	42.8
	Opt-1	170.7a	48.5b	77.9	22.1	70.9	29.1	57.9
	Opt-2	186.3a	78.2a	70.4	29.6	57.5	42.5	49.9
	Opt-3	166.1a	67.9a	71.0	29.0	59.0	41.0	51.0
2011	CK	—	—	—	—	—	—	—
	FP	113.3bc	130.7a	46.4	53.6	7.4	92.6	8.6
	Opt-1	136.5b	117.8b	53.7	46.3	26.5	73.5	28.9
	Opt-2	161.0a	102.2b	61.2	38.8	41.9	58.1	42.0
	Opt-3	179.4a	75.2c	70.5	29.5	55.7	44.3	46.3

表 5 不同农学管理模式下春玉米磷素积累及对籽粒的贡献
Table 5 P accumulation and contribution to grain of spring maize under different agronomic management practices

年份 Year	处理 Treatment	积累量		积累率		对籽粒贡献率		转运效率
		Accumulation of dry matter (kg·hm ⁻²)		Accumulation rate (%)		Accumulation rate (%)		Translocation rate
		吐丝前 BS	吐丝后 AS	吐丝前 BS	吐丝后 AS	吐丝前 BS	吐丝后 AS	(%)
2009	CK	26.6b	40.4c	39.7	60.3	29.2	70.8	60.1
	FP	35.3b	63.3b	35.8	64.2	19.0	81.0	40.6
	Opt-1	38.4b	82.1a	31.9	68.1	19.5	80.5	50.6
	Opt-2	53.5a	66.2b	44.7	55.3	38.5	61.5	74.3
	Opt-3	50.9a	67.1b	43.1	56.9	37.1	62.9	75.1
2010	CK	—	—	—	—	—	—	—
	FP	52.8b	18.8ab	73.8	26.2	64.0	36.0	59.6
	Opt-1	65.4a	22.2a	74.7	25.3	68.4	31.6	66.2
	Opt-2	73.5a	27.0a	73.1	26.9	67.1	32.9	69.2
	Opt-3	59.2b	33.9a	63.6	36.4	51.5	48.5	58.9
2011	CK	—	—	—	—	—	—	—
	FP	38.8b	44.8b	46.4	53.6	31.3	68.7	51.1
	Opt-1	49.3b	65.2a	43.1	56.9	24.9	75.1	42.0
	Opt-2	61.2a	59.5ab	51.6	48.4	34.2	65.8	45.6
	Opt-3	62.8a	52.6ab	53.9	46.1	38.4	61.6	50.0

表 6 不同农学管理模式下春玉米钾素积累及对籽粒的贡献

Table 6 K accumulation and contribution to grain of spring maize under different agronomic management practices

年份 Year	处理 Treatment	积累量		积累率		对籽粒贡献率		转运效率
		Accumulation of dry matter (kg·hm ⁻²)		Accumulation rate (%)		Accumulation rate (%)		Translocation rate
		吐丝前 BS	吐丝后 AS	吐丝前 BS	吐丝后 AS	吐丝前 BS	吐丝后 AS	(%)
2009	CK	78.1b	27.5b	74.0	26.0	35.3	64.7	14.7
	FP	117.9b	60.9a	65.9	34.1	22.1	77.9	12.2
	Opt-1	163.8ab	22.0b	88.2	11.8	76.1	23.9	26.9
	Opt-2	188.4a	19.6b	90.6	9.4	81.9	18.1	25.9
	Opt-3	173.8a	13.7c	92.7	7.3	89.0	11.0	29.1
2010	CK	—	—	—	—	—	—	—
	FP	112.6b	3.4c	97.0	3.0	85.7	14.3	23.0
	Opt-1	134.9a	5.3c	96.2	3.8	77.9	22.1	9.9
	Opt-2	148.7a	29.9a	83.3	16.7	50.6	49.4	15.5
	Opt-3	145.5a	15.3b	90.5	9.5	67.2	32.8	16.9
2011	CK	—	—	—	—	—	—	—
	FP	84.6c	45.2a	65.2	34.8	21.8	78.2	13.3
	Opt-1	114.1b	47.7a	70.5	29.5	40.2	59.8	24.5
	Opt-2	156.2a	26.4b	85.5	14.5	63.8	36.2	25.0
	Opt-3	156.1a	21.9b	87.7	12.3	69.2	30.8	24.4

2.5 养分偏生产力

与 FP 相比较，Opt-1、Opt-3 农学管理模式下的春玉米氮肥偏生产力和磷肥偏生产力显著提高，其中氮肥偏生产力分别增加 29.5%、14.0%，

磷肥偏生产力分别增加 23.3%、4.4%（3 年结果均值）。4 种综合农艺管理模式氮肥偏生产力、磷肥偏生产力及钾肥偏生产力均以 Opt-2 处理最低。

表 7 不同农学管理模式下春玉米氮、磷、钾偏生产力

Table 7 Partial factor productivity of N, P, and K under different agronomic management practices

年份 Year	处理 Treatment	氮肥偏生产力	磷肥偏生产力	钾肥偏生产力
		Partial factor productivity of N	Partial factor productivity of P	Partial factor productivity of K
2009	CK	—	—	—
	FP	37.1d	101.3b	123.8a
	Opt-1	46.7a	121.4a	110.4b
	Opt-2	30.5c	76.2c	76.2d
	Opt-3	40.7b	101.8b	101.8c
2010	CK	—	—	—
	FP	39.8c	108.4c	132.5a
	Opt-1	51.4a	133.6a	121.4b
	Opt-2	34.6cd	86.6d	86.6d
	Opt-3	44.9b	112.2b	112.3c
2011	CK	—	—	—
	FP	41.1c	112.2c	137.1a
	Opt-1	54.6a	141.9a	129.0ab
	Opt-2	36.9d	92.3d	92.3c
	Opt-3	48.8b	122.1b	122.1b

3 讨论

3.1 不同农学管理模式对春玉米养分吸收、积累及其与产量的关系

增加密度、合理施肥、深松耕作一直以来都是提高玉米产量和养分效率的重要技术措施^[22-27]。本研究在适当增加密度的基础上,重点通过肥料的优化管理,结合深松作业,集成了3种农学管理模式。研究表明,Opt-1、Opt-2及Opt-3较FP分别增产12.1%、15.3%和13.9%,其中Opt-3的产量较Opt-1提高1.6%,较Opt-2降低1.2%,Opt-3的干物质转运量较Opt-1、Opt-2分别提高35.7%、10.5%,转运效率分别提高19.5%、14.8%,可见通过农学方式的改变有利于群体干物质质量的积累,为提高籽粒产量奠定基础^[28]。在此基础上,如何使群体与个体协调发展,如何实现土壤养分供应与高产作物需求同步,需要集成不同的技术措施并结合实际情况进行模式优化^[29]。密度、施肥技术改进等在增产和/或增效中发挥了作用^[30],增密需与增氮相结合,氮素过高会增加作物倒伏的几率,也可能降低氮素利用率^[31],且由于增密会影响根系生长^[32],需要结合深松等改土措施以及有机肥培肥创造好的根际环境,维持根系活力,使土壤能够持续为作物提供氮素等营养^[33]。本研究中Opt-3能够实现高产高效,与Opt-1比较,从干物质生产能力上看Opt-3吐丝前期更强,转化为籽粒的同化产物更多,其中氮、磷、钾积累量在吐丝前较Opt-1分别增加12.6%、12.5%、9.3%;吐丝后分别增加3.1%、3.7%、5.8%。Opt-3较Opt-2化肥投入量低25%,其中氮、磷、钾积累量在吐丝前较Opt-2分别减少2.2%、7.9%、10.6%;吐丝后分别减少6.9%、6.2%、6.5%,产量、干物质转运量与转运效率却有所提高。Opt-3与FP施肥量相近,氮、磷、钾吸收量分别增加9.5%、23%和5.9%,按照肥料尿素2500元/t、重过磷酸钙3500元/t,硫酸钾2500元/t,玉米价格1800元/t计算,Opt-1较FP节约肥料成本64元/hm²,产量增加收益1928元/hm²,节本增效1992元/hm²;Opt-2和Opt-3分别较FP增加肥料成本450元/hm²、83元/hm²,产量增加收益2434元/hm²、2218元/hm²,Opt-2和Opt-3分别节本增效1984元/hm²、2135元/hm²。因此从经济效益、养分吸收量及累积量来看,Opt-3为最优的综合农管理模式。

3.2 不同农学管理模式对土壤-根系-作物协调机制

笔者曾对不同农学管理模式对春玉米土壤物理化

学性状及根系建成进行了系统研究^[34],指出Opt-2吸氮量高于其他模式,主要是因为其氮肥用量高达300 kg·hm⁻²,分3次施用,且磷钾充足,吸收的氮素更多集中于茎叶中,转化为经济(籽粒)产量的效率仍然相对较低。深松可有效增加土壤气相,减少土壤固相所占比例,增加土壤通透性,减缓黑土自身容量的恢复速率^[35],Opt-3在12展叶即完成了深层(30—60 cm)根系构建,优化后的施氮处理可减少硝态氮在土壤中的残留,促进了根系下扎和吸收养分^[34]。与FP相比较,Opt-1及Opt-3农学管理模式下的春玉米氮肥偏生产力显著提高,分别增加了29.5%、14.0%(3年结果平均),均达显著水平。而磷肥偏生产力和钾肥偏生产力则以Opt-1处理最高,Opt-2处理最低,这说明Opt-2处理肥料用量过大,且未被作物有效吸收和利用。Opt-3的氮、磷、钾肥偏生产力较Opt-2提高程度一致,均为31.8%,较Opt-1分别降低11.9%、15.3%、6.8%,可见高投入的Opt-2处理下氮肥利用率很高,但氮、磷、钾肥偏生产力却低于与FP氮肥施肥量一致的Opt-3,进一步说明了Opt-2处理下作物吸收的氮、磷、钾并未充分地在增加产量上发挥作用,且存在奢侈吸收。在保证作物群体质量及养分吸收足量的前提下,Opt-3通过进一步优化肥料投入,增施有机物料,补充中微量元素,实现了高产和高效的协同提升。

4 结论

与农户习惯FP模式相比,Opt-3处理收获穗数增加34.3%,产量和干物质累积分别增加13.9%和22.4%。Opt-3处理与FP处理氮肥用量一致,仅磷、钾肥施用量略高,但植株氮、磷、钾累积量分别增加9.5%、28.1%和23.9%,氮、磷、钾素转运效率分别增加47.7%、21.7%和45.0%,氮肥偏生产力增加14.0%,磷肥偏生产力增加4.4%,达到了增产增效的目标。研究表明,通过适当增密(70000株/hm²)、养分调控(N 225 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 90 kg·hm⁻²、中微肥)、有机培肥(15000 kg·hm⁻²)和深松改土可以实现东北中部春玉米产量和效率的协同提升。

References

- [1] 颜鹏. 支撑夏玉米高产高效群体的根层氮素调控机制与途径[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- YAN P. The mechanisms of root-zone N management regulates maize canopy development with high yield and high N use efficiency[D].

- Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [2] 卜令铎. 旱地春玉米高产高效栽培体系构建、评价及区域模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- BU L D. The cultivation system establishment and assessment contributing to yield and efficiency improvement of dryland maize, and regional simulation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- [3] 李伟波, 张效朴. 吉林中部玉米高产施肥与提高化肥利用率研究. 玉米科学, 1998, 6(2): 65-68.
- LI W B, ZHANG X P. Study on high yield fertilization and fertilizer utilization of maize in central Jilin province. *Maize Sciences*, 1998, 6(2): 65-68. (in Chinese)
- [4] 张梅, 任军, 郭金瑞, 闫孝贡, 刘剑钊, 蔡红光, 边秀芝. 吉林中部黑土区玉米高产栽培土壤培肥技术研究. 玉米科学, 2011, 19(6): 101-104.
- ZHANG M, REN J, GUO J R, YAN X G, LIU J Z, CAI H G, BIAN X Z. Study on the technology of soil fertility for high yielding cultivation of maize plant in Jilin province. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(6): 101-104. (in Chinese)
- [5] 任军, 边秀芝, 郭金瑞, 闫孝贡, 刘剑钊. 黑土区高产土壤培肥与玉米高产田建设研究. 玉米科学, 2008, 16(4): 147-151, 157.
- REN J, BIAN X Z, GUO J R, YAN X G, LIU J Z. Building up fertility for high yield soil and construction of high-yield field in the black soil regions. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(4): 147-151, 157. (in Chinese)
- [6] 边秀芝, 郭金瑞, 闫孝贡, 刘剑钊, 任军. 吉林西部半干旱区玉米高产氮磷钾肥适宜用量研究. 中国土壤与肥料, 2010(2): 63-65.
- BIAN X Z, GUO J R, YAN X G, LIU J Z, REN J. Study on optimum rate of NPK fertilizer application for corn at western semiarid area of Jilin. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(2): 63-65. (in Chinese)
- [7] 边秀芝, 郭金瑞, 闫孝贡, 刘剑钊, 任军. 吉林中部玉米高产施肥模式研究. 吉林农业科学, 2008, 33(6): 41-43.
- BIAN X Z, GUO J R, YAN X G, LIU J Z, REN J. Fertilization model of high yield of maize in middle Jilin province. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2008, 33(6): 41-43. (in Chinese)
- [8] 王楷, 王克如, 王永宏, 赵健, 赵如浪, 王喜梅, 李健, 梁明晰, 李少昆. 密度对玉米产量 ($>15000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 及其产量构成因子的影响. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3437-3445.
- WANG K, WANG K R, WANG Y H, ZHAO J, ZHAO R L, WANG X M, LI J, LIANG M X, LI S K. Effects of density on maize yield and yield components. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(16): 3437-3445. (in Chinese)
- [9] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响. 植物营养与肥科学报, 2006, 12(5): 622-627.
- ZHAO Y, TONG Y A, ZHAO H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 622-627. (in Chinese)
- [10] 王帅, 王楠, 张溪, 杨锡财, 权振贵, 冷冰原. 玉米栽培模式对暗棕壤微生物学特性及养分状况的影响. 水土保持学报, 2016, 30(1): 165-170, 195.
- WANG S, WANG N, ZHANG X, YANG X C, QUAN Z G, LENG B Y. Effect of different corn cultivation modes on the microbiological characteristics and nutrient conditions of dark-brown soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 165-170, 195. (in Chinese)
- [11] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 赵先丽, 张玉书. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应. 生态学报, 2015, 35(9): 2092-2909.
- YU W Y, JI R P, FENG R, ZHAO X L, ZHANG Y S. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2902-2909. (in Chinese)
- [12] 靳立斌, 张吉旺, 李波, 崔海岩, 董树亭, 刘鹏, 赵斌. 高产高效夏玉米的冠层结构及其光合特性. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2430-2439.
- JIN L B, ZHANG J W, LI B, CUI H Y, DONG S T, LIU P, ZHAO B. Canopy structure and photosynthetic characteristics of high yield and high nitrogen efficiency summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(12): 2430-2439. (in Chinese)
- [13] 李秀芳, 李淑文, 和亮, 文宏达. 水肥配合对夏玉米养分吸收及根系活性的影响. 水土保持学报, 2011, 25(1): 188-191, 233.
- LI X F, LI S W, HE L, WEN H D. Effects of water and fertilizer cooperation on plant nutrient accumulation and root activity of summer maize. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 188-191, 233. (in Chinese)
- [14] 王海燕, 高聚林, 王志刚, 于晓芳, 孙继颖, 崔超, 高鑫. 密度对超高产春玉米氮素积累、运转、利用及叶片衰老的影响. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 194-198.
- WANG H Y, GAO J L, WANG Z G, YU X F, SUN J Y, CUI C, GAO X. Effects of planting density on nitrogen accumulation, operation, use and leaves senescence of super-high yield spring maize. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2011, 32(3): 194-198. (in Chinese)
- [15] 王宜伦, 李潮海, 何萍, 金继运, 韩燕来, 张许, 谭金芳. 超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律研究. 植物营养学报, 2010, 16(3): 559-566.

- WANG Y L, LI C H, HE P, JIN J Y, HAN Y L, ZHANG X, TAN J F. Nutrient restrictive factors and accumulation of super-high-yield summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 559-566. (in Chinese)
- [16] 龚海清, 付海美, 徐明岗, 邵红建, 朱平, 高洪军. 长期施肥下黑土有机肥替代率变化特征. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1398-1406.
- GONG H Q, FU H M, XU M G, GAO H J, ZHU P, GAO H J. Substitution rate of organic fertilizer under long-term fertilization in black soils. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1398-1406. (in Chinese)
- [17] 蔡红光, 张秀芝, 闫孝贡, 刘剑钊, 盖嘉慧, 张洪喜, 袁静超, 周康, 任军. 吉林省春玉米土壤中、微量元素“潜缺乏”初探. *玉米科学*, 2013, 21(3): 71-75.
- CAI H G, ZHANG X Z, YAN X G, LIU J Z, GAI J H, ZHANG H X, YUAN J C, ZHOU K, REN J. Preliminary study on hidden deficiency of secondary and trace elements in spring maize in Jilin province. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(3): 71-75. (in Chinese)
- [18] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 郑洪兵, 李瑞平, 李伟堂, 李征, 胡庆生, 杨秀梅. 不同耕作方式对玉米叶片冠层光合特性的影响. *玉米科学*, 2012, 20(6): 103-106, 111.
- LIU W R, ZHENG J Y, LUO Y, ZHENG H B, LI R P, LI W T, LI Z, HU Q S, YANG X M. Effects of different tillage methods on the photosynthetic traits of maize leaf. *Maize Science*, 2012, 20(6): 103-106, 111. (in Chinese)
- [19] 隗英华, 汪仁, 孙文涛, 邢月华, 隋世江, 鲁东, 毛佰传. 施氮模式对春玉米养分累积特性的影响. *核农学报*, 2011, 25(1): 143-148.
- JUAN Y H, WANG R, SUN W T, XING Y H, SUI S J, LU D, MAO B C. Effects of models of applying nitrogen fertilizer on nutrition accumulation of spring maize. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(1): 143-148. (in Chinese)
- [20] 高伟, 金继运, 何萍, 李书田. 我国北方不同地区玉米养分吸收及累积动态研究. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 623-629.
- GAO W, JIN J Y, HE P, LI S T. Dynamics of maize nutrient uptake and accumulation in different regions of northern China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 623-629. (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Analysis of Soil Agronomization*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [22] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 李国红, 高聚林, 王志刚. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 315-323.
- YANG H S, ZHANG Y Q, XU S J, LI G H, GAO J L, WANG Z G. Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and translocation of super-high-yield maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 315-323. (in Chinese)
- [23] 齐文增, 陈晓璐, 刘鹏, 刘惠惠, 李耕, 邵立杰, 王飞飞, 董树亭, 张吉旺, 赵斌. 超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 26-36.
- QI W Z, CHEN X L, LIU P, LIU H H, LI G, SHAO L J, WANG F F, DONG S T, ZHANG J W, ZHAO B. Characteristics of dry matter, accumulation and distribution of N, P and K of super-high-yield summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 26-36. (in Chinese)
- [24] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振玲, 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): 918-924.
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, CUI Z L, MA W Q, CHEN X P, JIANG R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 918-924. (in Chinese)
- [25] WANG Y L, LIANG Z Y, YANG Z P, GUO J L, GUO C X, WANG Q. Study on matter production and population photosynthetic characteristics of high-yielding spring maize under different modes. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17(12): 2779-2783.
- [26] 靳立斌, 崔海岩, 李波, 杨今胜, 董树亭, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺. 综合农学管理对夏玉米氮效率和土壤硝态氮的影响. *作物学报*, 2013, 39(11): 2009-2015.
- JIN L B, CUI H Y, LI B, YANG J S, DONG S T, ZHAO B, LIU P, ZHANG J W. Effects of integrated agronomic practices on nitrogen efficiency and soil nitrate nitrogen of summer maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(11): 2009-2015. (in Chinese)
- [27] JAT S L, PARIHAR C M, SINGH A K, KUMAR B, SINGH B, SAVEIPUNE D. Plant density and fertilization in hybrid quality protein maize (*Zea mays*): Effects on the soil nutrient status and performance of succeeding wheat (*Triticum aestivum*) and productivity of cropping system. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 87(1): 23-28.
- [28] Amanullah. Rate and timing of nitrogen application influence partial factor productivity and agronomic NUE of maize (*Zea mays* L.) planted at low and high densities on calcareous soil in northwest Pakistan. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(5): 683-690.
- [29] 杨晓卡, 米慧玲, 高韩钰, 辛思颖, 马文奇, 魏静. 不同栽培模式对冬小麦-夏玉米轮作系统产量、氮素累积和平衡的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1935-1941.
- YANG X K, MI H L, GAO H Y, XIN S Y, MA W Q, WEI J. Effects of

- different cultivation patterns on yield, nitrate accumulation and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1935-1941. (in Chinese)
- [30] 张平良, 郭天文, 刘晓伟, 李书田, 曾骏, 谭雪莲, 董博. 密度和施氮量互作对全膜双垄沟播玉米产量、氮素和水分利用效率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 579-590.
- ZHANG P L, GUO T W, LIU X W, LI S T, ZENG J, TAN X L, DONG B. Effect of plant density and nitrogen application rate on yield, nitrogen and water use efficiencies of spring maize under whole plastic-film mulching and double-furrow sowing. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 579-590. (in Chinese)
- [31] 佟桐, 李彩凤, 顾万荣, 王明泉, 张立国, 刘笑鸣, 王彬, 赵猛. 氮肥和密度对黑龙江春玉米物质积累、抗倒伏及产量的影响. *西北农业学报*, 2019, 28(3): 377-387.
- TONG T, LI C F, GU W R, WANG M Q, ZHANG L G, LIU X M, WANG B, ZHAO M. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on dry matter accumulation, lodging resistance and yield of spring maize in Heilongjiang province. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, 28(3): 377-387. (in Chinese)
- [32] 罗方, 杨恒山, 张玉芹, 柳宝林. 春玉米根系特征对种植密度的响应. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(6): 494-498.
- LUO F, YANG H S, ZHANG Y Q, LIU B L. Response of root system characteristics of spring maize to planting density. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities(Natural Sciences)*, 2017, 32(6): 494-498. (in Chinese)
- [33] 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.
- [34] 袁静超, 刘剑钊, 闫孝贡, 张洪喜, 梁尧, 蔡红光, 任军. 春玉米连作体系高产栽培模式优化研究. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 53-62.
- YUAN J C, LIU J Z, YAN X G, ZHANG H X, LIANG Y, CAI H G, REN J. Optimization of agronomic management mode for high-yield continuous spring maize cropping system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 53-62. (in Chinese)
- [35] 蔡红光, 袁静超, 闫孝贡, 刘剑钊, 张洪喜, 梁尧, 任军. 不同培肥措施对土壤物理性状及无机氮的影响. *土壤通报*, 2017, 48(2): 14-22.
- CAI H G, YUAN J C, YAN X G, LIU J Z, ZHANG H X, LIANG Y, REN J. Characteristics of soil physical property and mineral nitrogen in different soil fertility managements. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(2): 14-22. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)