

控释尿素与常规尿素配施比例对甜玉米产量和氮肥利用的影响

黄巧义, 唐拴虎*, 张发宝, 张 木, 黄 旭, 逢玉万, 李 苹, 付弘婷

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部南方植物营养与肥料重点实验室/
广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640)

摘要:【目的】研究在不同施氮水平下, 控释尿素与普通尿素不同组配比例施用对甜玉米生长、产量及氮肥利用率的影响, 为控释尿素在甜玉米生产上的推广应用提供参考。【方法】2015 年在广东省博罗县和惠阳县以当地主栽品种华珍和粤甜 9 号开展田间试验。试验共设 7 个处理: 不施氮 (CK); 施尿素 N 360 kg/hm² (U1); 减施尿素 30% (252 kg/hm², U2); 40% 控释尿素, 减氮 30% (252 kg/hm², 40% CRU1); 40% 控释尿素, 减氮 50% (180 kg/hm², 40% CRU2); 60% 控释尿素, 减氮 30% (252 kg/hm², 60% CRU1); 60% 控释尿素, 减氮 50% (N 180 kg/hm², 60% CRU2)。乳熟期采集甜玉米植株样品进行养分分析, 每小区单独采收后记录产量和产量构成要素。【结果】施氮显著提高甜玉米鲜苞产量 ($P < 0.05$)。且随着施氮量的增加, 甜玉米鲜苞产量逐渐提高。U1 处理的鲜苞产量最高, 其次是 60% CRU1 处理, 40% CRU2 处理的鲜苞产量显著降低。60% CRU1 处理的甜玉米鲜苞产量与 U1 基本持平。在等氮条件下, 甜玉米鲜苞产量表现为 60%CRU > 40% CRU > U, 两地结果一致。施氮主要提高甜玉米穗长、穗粗和行粒数, 显著提高甜玉米物质积累量和氮素吸收积累量 ($P < 0.05$), 秸秆和籽粒的平均增幅分别为 55.1% 和 24.2%, 95.0% 和 43.4%, 秸秆增幅更大。甜玉米物质积累量和氮素吸收积累量随着施氮量的增加而提高; 在等氮条件下, 甜玉米物质积累量和氮素吸收积累量均表现为 60%CRU > 40% CRU > U, 以 60%CRU 处理的氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率最高, 其次是 40%CRU 处理, U 处理最低。不同施肥处理对氮肥生理利用率和氮收获指数没有影响。不同施肥处理对甜玉米维生素 C 和可溶糖含量没有影响。【结论】控释尿素与普通尿素配施处理的甜玉米产量、物质积累量和氮素吸收积累量均优于常规施肥处理, 且随着控释尿素配施比例的增加而增加。在甜玉米生产中, 控释尿素与普通尿素配施可显著提高氮肥利用效率, 是甜玉米化肥减施增效的有效途径。

关键词: 甜玉米; 控释尿素; 氮肥利用率; 掺混比例

Effect of the blending ratio of controlled-release urea and conventional urea on yield and nitrogen utilization efficiency of sweet corn

HUANG Qiao-yi, TANG Shuan-hu*, ZHANG Fa-bao, ZHANG Mu, HUANG Xu, PANG Yu-wan, LI Ping, FU Hong-ting
(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture/ Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

Abstract: 【Objectives】Effects of different blending rates of controlled-release urea (CRU) and conventional urea (U) at different N amounts on growth, grain yield, nitrogen uptake and nitrogen efficiency of sweet corn were studied to provide reference for the application and dissemination of CRU in sweet corn production. 【Methods】Field experiments of sweet corn were carried out using sweet corn cultivars of Huazhen and Yuetian 9 as tested materials in Boluo County and Huiyang County of Guangdong Province simultaneously in 2015.

收稿日期: 2016-08-01 接受日期: 2016-09-19

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303103, 201503123); 广东省科技计划项目 (2016A020210035, 2014B090904068) 资助。

作者简介: 黄巧义 (1985—), 男, 广东潮阳人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤培肥及高效施肥技术研究。

E-mail: huangqiaoyi@hotmail.com. *通信作者 Tel: 020-32885730, E-mail: 1006339502@qq.com

Conventional urea and controlled-release urea were mixed in different ratio and total N input in different rate. No nitrogen fertilizer as CK, urea N 360 kg/hm² (U1), 252 kg/hm² (U2), N 252 kg/hm² with 40% CRU (40% CRU1), N 180 kg/hm² with 40% CRU (40% CRU2), N 252 kg/hm² with 60% CRU (60% CRU1), and N 180 kg/hm² with 60% CRU (60% CRU2). All treatments were fertilized with P₂O₅ 157 kg/hm² and K₂O 360 kg/hm². Straw and ear of sweet corn were collected at maturity period for the N analysis. The yield and yield components were also recorded after the harvest. 【 **Results** 】 The ear yields of sweet corn were increased significantly due to the nitrogen applications ($P < 0.05$), and increased as more nitrogen was applied. The highest ear yield of sweet corn was achieved under the U1, and the second highest yield was obtained under the 60% CRU1, but that of the 40% CRU2 decreased significantly. No significant differences between the U1 and the 60% CRU1 were observed. On the basis of the uniform N rate, the yields of different treatments at the two sites were all in order: 60% CRU > 40% CRU > U. The application of N fertilizers mainly increased the ear yield through increasing the ear length and diameter and kernel number per row. The accumulative amounts of dry matter and N uptake of sweet corn were increased significantly by applying N fertilizers, the average increases of dry matter and N uptake in straw and kernel were 55.1% and 24.2%, and 95.0% and 43.4%, and the increases in the straw were greater. The accumulative amounts of dry matter and N uptake of sweet corn were increased due to more N applied. And on the basis of the same N rate, accumulative amounts of dry matter and N uptake of sweet corn under different treatments at the two sites were in order: 60% CRU > 40% CRU > U. On the basis of the same N rate, the agronomic N use efficiencies, partial factor productivities of N fertilizer and N recovery efficiencies of different treatments at the two sites were all in order: 60% CRU > 40% CRU > U. But no significant differences in the physiology efficiencies of nitrogen and nitrogen harvest indices among different treatments were observed. There were no significant differences in Vc and soluble sugar contents of sweet corn among different treatments.

【 **Conclusions** 】 The yield, dry matter and N uptake of sweet corn were increased due to the blending application of controlled-release urea and urea, and increased more with controlled-release urea addition of 60%. The blending application of controlled-release urea and urea could benefit to the nitrogen utilization efficiency of sweet corn, and be potential way to decrease the total N fertilizer input.

Key words: sweet corn; controlled-release urea; nitrogen use efficiency; blending ratio

甜玉米 (*Zea mays* L. var *rugosa*) 具有甜、爽、脆、嫩等多种风味, 在全国各地广受青睐, 市场需求量大, 种植效益高^[1-2]。自 2008 年以来, 全国甜玉米种植面积迅速扩张, 广东是我国甜玉米主产区, 其种植面积约占全国总面积的 60%^[3]。随着居民生活水平的提高及加工技术水平的提高, 甜玉米消费需求持续稳定增加, 已成为全球最重要的蔬菜作物之一^[3]。甜玉米国内消费市场不断扩大, 向韩国、日本及欧盟等出口数量也持续上升, 供应缺口较大^[3-4]。改进甜玉米种植技术, 提高甜玉米产量, 将有助于提高农民收入。氮素对甜玉米产量和品质具有显著影响, 因此, 氮肥管理是甜玉米高产优质栽培的关键措施^[1-2, 5]。

甜玉米生长速度快, 生物累积量大, 对养分需求量大、强度高^[2, 6]。氮素供应是影响甜玉米生长和产量形成的主导因素^[2]。氮素管理显著影响甜玉米的

农艺性状、口感以及糖度, 从而决定了甜玉米的商品性状^[1, 7-8]。同时, 甜玉米在鲜食期采摘, 子粒成分不同于其他玉米亚种, 其氮素积累和分配可能有其自身的变化特征^[9]。张白鸽等^[4]通过多点“3414”试验结果, 提出广东地区甜玉米的氮素最佳施肥量为 N 360 kg/hm²。陈建生等^[2]采用氮、磷、钾三元素二次饱和 D-最优回归方法, 也得出甜玉米适宜施氮量为 N 371 kg/hm², 低于该施氮量会导致减产, 而过高施肥不但未能进一步增产, 同时还降低甜玉米品质。另一方面, 广东秋播甜玉米的整个生育期内, 气候高温干旱, 追肥难度大, 影响肥料利用效率。控释氮肥通过包膜技术使肥料的释放和供应速率尽量接近作物的营养需求, 实现氮素长效供应的智能化^[10-11]。施用控释肥能提高玉米产量, 减少氨挥发, 提高氮肥利用效率^[12-14]。控释尿素的利用率高、肥效长、作物增产明显, 且可减少施肥次数,

节省劳力^[15-17]。已有研究表明,控释尿素与普通尿素混施在水稻、夏玉米等作物上表现出良好的增产效果,是控释肥在大田作物生产中推广应用的主要方向^[14, 18]。目前,控释肥掺混比例、施用时期以及肥料减量幅度尚处于摸索阶段,相关技术指标的定性化、量化、标准化还有待进一步建立。为此,本研究以 ICL, Specialty Fertilizer 公司的 E-max 型控释尿素为材料(养分释放期为 2~3 个月),配以不同比例的普通尿素,在广东省两个甜玉米主产区开展田间肥效试验。研究在不同施氮条件下,控释尿素与普通尿素混施对甜玉米生长、氮素累积分配、氮肥利用率以及产量的影响,以及甜玉米生产过程中的施氮量、控释尿素与普通尿素的掺混比例,为甜玉米高产优质安全生产的氮肥增效减施生产技术提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2015 年 9 月至 12 月在广东省惠州市惠阳县平潭镇(E 114.61°, N 23.06°)和博罗县白塘镇(E 114.34°, N 23.37°)开展甜玉米田间试验。两试验点均属亚热带季风性湿润气候,年平均气温 22℃,年平均降雨量 1770 mm,无霜期长达 350 d,阳光充足,雨量充沛。两试验点供试土壤理化性状见表 1。供试控释尿素(CRU)为 ICL, Specialty Fertilizer 公司的 E-max 型控释尿素(含 N 43%,养分释放期为 2~3 个月)。

博罗试验点采用甜玉米品种为华珍,由台湾农友种苗有限公司引进,生育期为 85~95 天,具有耐热性好、品质优和抗性强等特点,平均鲜穗产量为 13.5 t/hm²。惠阳试验点采用甜玉米品种为粤甜 9 号,由广东省农科院作物所选育,该品种具有品质优、产量高、综合抗性较好等优点,平均鲜穗产量为 12.8 t/hm²。

1.2 试验设计

根据对广东省甜玉米主产区惠州、广州种植大

户的施肥习惯进行调查总结,同时结合文献^[4, 8]确定了甜玉米的常规施肥量及施肥方式。试验共设 7 个处理,以不施氮为 CK,在常规施氮量 360 kg/hm²的基础上,设置 6 个不同氮肥量和不同控释氮肥比例处理,具体氮肥施用量、施用比例和施用方法见表 2。所有处理的磷肥施用量为 P₂O₅ 157 kg/hm²,在秧苗移栽前 1 天做基肥一次性施入;钾肥施用量为 K₂O 360 kg/hm²,50% 在秧苗移栽前 1 天施入,50% 在拔节期施用。拔节期和抽穗期施肥前先用锄头挖出施肥沟,肥料均匀撒施后,用铁锹将肥料埋入土中。

采用起畦双行种植,畦宽 1.7 m、株距 0.25 m,小区面积 30.6 m²(9.0 m × 3.4 m)。试验所有处理设 4 次重复,随机区组排列。博罗试验点甜玉米品种为华珍,于 9 月 16 日播种,9 月 30 日移栽,12 月 11 日收获;惠阳试验点甜玉米品种为粤甜 9 号,于 9 月 22 日播种,10 月 6 日移栽,12 月 8 日收获。

在甜玉米生长期,博罗试验点平均温度为 21.5℃,累积降雨量 106.1 mm,其中 11 月降雨量偏少,仅 16.9 mm。惠阳试验点平均温度为 20.8℃,累积降雨量 101.1 mm,其中 11 月降雨量偏少,仅 9.8 mm,两试验点均采用传统沟渠引水灌溉方式进行灌溉。

在甜玉米苗期撒施毒死蜱防治地下害虫,喷施除草剂防止杂草生长;在拔节前,及时去除次生分蘖,保留主茎;在拔节成穗期喷施锐劲特和苏云金杆菌(Bt)防止玉米螟发生。其他管理按常规方法。

1.3 测定项目与方法

田间试验开始前采集 0—20 cm 耕层土样用于测定 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量。成熟期每小区采集样品用于考种和品质分析;并采集代表性植株用于生物量及含氮量的测定,测定秸秆和玉米穗的氮含量。成熟期采集各小区耕层土样,用于碱解氮测定。土样和植株样品均采用常规方法分析测定。各小区单独收获玉米穗和秸秆,分别测定其经济产量和生物产量。

生物量测定:样品采集后立即洗净、擦干,将秸秆和玉米穗分开,在 105℃ 下杀青 30 min,再在 75℃ 下烘干至恒重,称量并换算成每株植株的干重。

表 1 供试土壤基本理化性状
Table 1 Soil properties of the experimental sites

地点 Site	土壤质地 Texture	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	碱解氮 (mg/kg) Alkali-hydro N	有效磷 (mg/kg) Available P ₂ O ₅	速效钾 (mg/kg) Available K ₂ O
博罗 Boluo	砂质壤土 Sandy loam	4.47	20.0	217.93	107.95	182.50
惠阳 Huiyang	粘壤土 Clay loam	4.50	37.6	128.77	55.97	279.50

表 2 氮肥施用量、配比和施用方法
Table 2 Nitrogen fertilizer input, ratios and application methods

处理 Treatment	氮肥配比 Nitrogen ratio	总施氮量 Total N input (kg/hm ²)	氮肥用量 Allocation of N fertilizers (kg/hm ²)			
			3~4 叶期 3-4 leaf stage	7~8 叶期 7-8 leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage
CK	不施氮 No N	0	0	0	0	0
U1	常规用量, 100% 尿素 Conventional rate, 100% Urea	360	U 78.3	U 78.3	U 352.2	U 273.9
U2	减氮 30%, 100% 尿素 30% less N input, 100% Urea	252	U 54.8	U 54.8	U 246.5	U 191.7
40% CRU1	减氮 30%, 40% 控释氮 + 60% 尿素 30% less N input, 40% CRU + 60% Urea	252	U 54.8	U 54.8	CRU 234.4 + U 219.1	0
40% CRU2	减氮 50%, 40% 控释氮 + 60% 尿素 50% less N input, 40% CRU + 60% Urea	180	U 39.1	U 39.1	CRU 167.4 + U 156.5	0
60% CRU1	减氮 30%, 60% 控释氮 + 40% 尿素 30% less N input, 60% CRU + 40% Urea	252	U 54.8	U 54.8	CRU 351.6 + U 109.6	0
60% CRU2	减氮 50%, 60% 控释氮 + 40% 尿素 50% less N input, 60% CRU + 40% Urea	180	U 39.1	U 39.1	CRU 251.2 + U 78.3	0

植株含氮量测定：将各处理的秸秆和玉米穗样品在 85℃ 下杀青 30 min，随后在 75℃ 下烘至恒重，粉碎后过 0.5 mm 筛，采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，AA3 型自动分析仪测定。

甜玉米氮吸收累积量的计算：氮积累总量 (kg/hm²) = 秸秆生物量 (kg/hm²) × 秸秆含氮量 (%) + 玉米穗生物量 (kg/hm²) × 玉米穗含氮量 (%)

土壤样品经风干过筛后，采用常规土壤农化分析方法进行理化分析^[19]。土壤 pH 用酸度计电位法，有机质用重铬酸钾容量法，土壤碱解氮用碱解扩散法，有效磷用 Olsen 法，速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度法测定。

1.4 计算方法

氮素吸收量及氮素利用效率相关参数^[14, 20]的计算方法为：

氮肥农学效率 (NAE, kg_{籽粒}/kg_N) = (施氮区产量 - 对照区产量)/施氮量

氮肥偏生产力 (PFP, kg_{籽粒}/kg_N) = 施肥区鲜苞产量/施氮量

氮肥吸收利用率 (NRE, %) = (施氮区地上部吸氮量 - 对照区地上部吸氮量) × 100/施氮量

氮素生理利用率 (NPE, kg_{籽粒}/kg_N) = (施肥区鲜苞产量 - 对照区鲜苞产量)/(施肥区地上部氮吸收量 - 对照区地上部氮吸收量)

氮收获指数(NHI, %) = 苞子氮吸收量 × 100/地上部氮吸收量

1.5 统计方法

采用 MS Excel 2007 进行数据整理。数据采用 R 软件的 agricolae 包进行方差分析，各处理之间的多重比较采用 LSD-test ($P < 0.05$) 法；数据图采用 R 软件的 ggplot2 包进行绘制。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对甜玉米鲜苞产量的影响

从图 1 可见，施氮显著提高甜玉米鲜苞产量，平均增幅分别为 24.88% (博罗试验点) 和 26.34% (惠阳试验点)。不同施氮处理也显著影响甜玉米鲜苞产量，其中常规施肥 100% 氮处理 (U1) 的产量最高，其次是 60% 控氮减氮 30% 处理 (60% CRU1)，而 40% 控氮减氮 50% 处理 (40% CRU2) 的甜玉米鲜苞产量显著降低 ($P < 0.05$)。甜玉米鲜苞产量与施氮量显著相关，随着施氮量的增加而增加，表明施氮是提高甜玉米鲜苞产量的关键因素。在减氮 30% 条件下，CRU 处理的甜玉米鲜苞产量较常规施肥有所增加，且增幅随着 CRU 施用比例的增加而增加。在相同施氮水平下，甜玉米鲜苞产量均随着 CRU 施用比例的增加而增加。

2.2 不同施肥处理对甜玉米鲜苞主要性状的影响

从表 3 可见，施氮显著提高甜玉米穗长 ($P < 0.05$)，且甜玉米穗长随着施氮量的减少逐渐降低，其中常规施肥减氮 30% 处理 (U2) 和 40% 控氮减氮

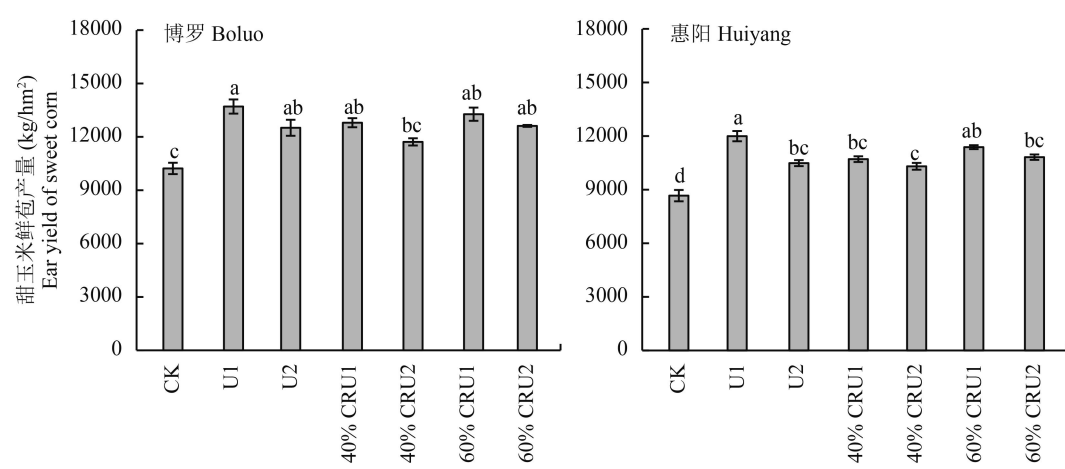


图 1 不同施肥处理对甜玉米鲜苞产量的影响

Fig. 1 The ear yields of sweet corn in different fertilizing treatments

[注 (Note) : 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平
Different letters on the bars mean significant differences among the treatments at the 5% level.]

表 3 不同施肥处理对甜玉米鲜苞主要性状的影响

Table 3 Effects of different treatments on the ear characteristics of sweet corn

处理 Treatment	穗长 (cm) Ear length		穗粗 (mm) Ear diameter		不秃尖 (%) Tip fill		穗行数 Row number per ear		行粒数 Kernel No. per row	
	博罗 Boluo	惠阳 Huiyang	博罗 Boluo	惠阳 Huiyang	博罗 Boluo	惠阳 Huiyang	博罗 Boluo	惠阳 Huiyang	博罗 Boluo	惠阳 Huiyang
	Boluo	Huiyang	Boluo	Huiyang	Boluo	Huiyang	Boluo	Huiyang	Boluo	Huiyang
CK	17.0 ± 0.6 b	15.7 ± 0.3 c	46.9 ± 1.3 a	46.4 ± 0.4 a	86.1 ± 1.1 a	91.1 ± 1.7 a	12 ± 0.52 a	12 ± 0.32 a	33 ± 1.7 a	33 ± 1.3 a
U1	18.7 ± 0.2 a	17.8 ± 0.1 a	50.1 ± 0.5 a	48.2 ± 1.2 a	91.5 ± 1.3 a	92.2 ± 2.2 a	12 ± 0.50 a	13 ± 0.27 a	37 ± 0.5 a	37 ± 0.3 a
U2	18.4 ± 0.2 a	16.4 ± 0.1 c	49.1 ± 1.4 a	46.9 ± 1.8 a	90.2 ± 0.5 a	89.2 ± 1.4 a	12 ± 0.17 a	12 ± 0.79 a	37 ± 0.8 a	35 ± 0.5 a
40% CRU1	18.3 ± 0.1 a	17.7 ± 0.2 a	49.4 ± 1.0 a	47.0 ± 0.7 a	91.1 ± 1.3 a	89.8 ± 1.0 a	12 ± 0.00 a	13 ± 0.27 a	37 ± 0.7 a	36 ± 0.8 a
40% CRU2	18.1 ± 0.3 ab	16.7 ± 0.2 bc	48.0 ± 1.1 a	45.2 ± 1.0 a	89.8 ± 2.4 a	90.3 ± 2.5 a	12 ± 0.32 a	12 ± 0.32 a	36 ± 1.0 a	34 ± 1.9 a
60% CRU1	18.7 ± 0.1 a	17.8 ± 0.2 a	50.2 ± 1.1 a	47.8 ± 0.4 a	91.1 ± 0.8 a	92.8 ± 0.3 a	13 ± 0.27 a	12 ± 0.19 a	37 ± 0.3 a	37 ± 0.8 a
60% CRU2	18.5 ± 0.4 a	17.7 ± 0.1 ab	49.1 ± 1.6 a	46.8 ± 0.8 a	89.9 ± 1.8 a	88.8 ± 1.5 a	13 ± 0.00 a	13 ± 0.32 a	37 ± 1.2 a	37 ± 1.0 a

注 (Note) : 数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters mean significant differences among treatments at 0.05 level.

50% 处理 (40% CRU2) 的穗长显著降低。施氮处理的穗粗和行粒数较不施氮处理有所提高, 且在相同的施肥方式下, 穗粗和行粒数随着施氮量的降低呈逐渐减少的趋势, 然而, 不同施肥处理的穗粗和行粒数的差异不显著。不同施肥处理对不秃尖率和穗行数没有显著影响。

2.3 不同施肥处理对甜玉米品质的影响

从表 4 可见, 施氮处理和不施氮处理的可溶糖含量没有显著差异。在同样施肥方式下, 可溶糖含量随着施氮量的减少而提高, 然而, 不同处理的可溶糖含量没有显著差异。施氮处理的甜玉米籽粒中维生素 C 含量较不施氮处理有所提高, 但差异不显著。

2.4 不同施肥处理对甜玉米生物量和氮吸收累积量的影响

从图 2 可见, 施氮显著提高甜玉米的地上部分干物质累积量 ($P < 0.05$), 两试验点施氮处理的甜玉米干物质累积量平均较不施氮处理提高了 25.0% (博罗点) 和 45.1% (惠阳点), 其中秸秆增幅为 30.0% (博罗点) 和 80.1% (惠阳点), 籽粒增幅为 21.3% (博罗点) 和 27.2% (惠阳点), 秸秆干物质质量的增幅更大。不同施氮处理的甜玉米地上部分干物质质量没有显著差异。甜玉米的秸秆和籽粒干物质质量随着施氮量的减少而降低, 籽粒的降幅更明显, 其中惠阳点常规施肥方式下减氮 30% (U2) 和 40% 控氮减氮 50%

表 4 不同施肥处理对甜玉米籽粒中可溶糖和维生素 C 含量的影响

Table 4 Soluble sugar and Vc contents of kernel of sweet corn under different treatments

处理 Treatment	可溶糖 Soluble sugar (mg/kg)		Vc (mg/kg)	
	博罗 Boluo	惠阳 Huiyang	博罗 Boluo	惠阳 Huiyang
CK	93.27 ± 2.91 a	121.03 ± 4.04 a	98.74 ± 6.45 a	101.49 ± 3.25 a
U1	91.67 ± 1.34 a	121.58 ± 6.28 a	109.37 ± 4.89 a	106.27 ± 3.38 a
U2	89.17 ± 1.14 a	117.03 ± 7.43 a	103.07 ± 2.39 a	105.10 ± 3.79 a
40% CRU1	92.72 ± 1.60 a	123.78 ± 6.88 a	109.11 ± 2.24 a	102.72 ± 1.20 a
40% CRU2	85.82 ± 2.78 a	117.68 ± 3.76 a	106.00 ± 5.20 a	101.24 ± 1.85 a
60% CRU1	94.56 ± 2.45 a	123.93 ± 7.39 a	105.91 ± 8.11 a	104.08 ± 3.01 a
60% CRU2	92.50 ± 1.33 a	114.13 ± 5.33 a	102.99 ± 7.70 a	101.47 ± 1.75 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters mean significant differences among treatments at 0.05 level.

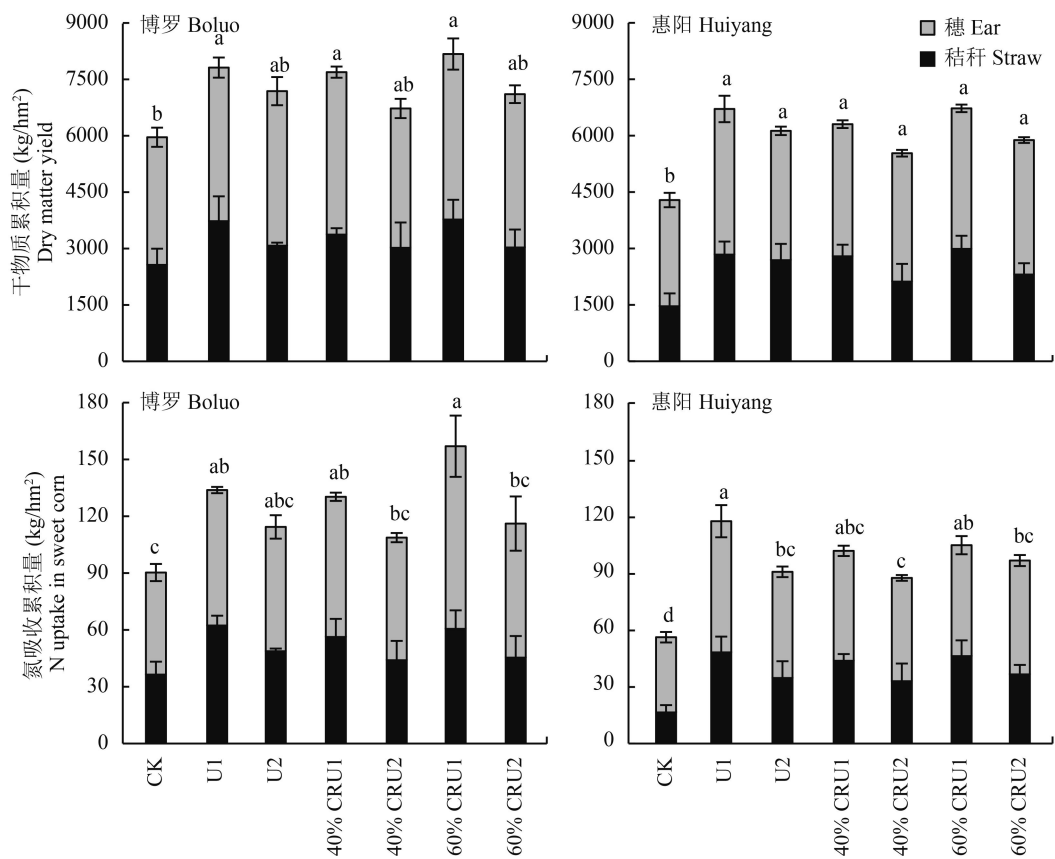


图 2 不同施肥处理对甜玉米地上部分干物质和氮吸收累积量的影响

Fig. 2 Dry matter and N uptake in above ground parts of sweet corn in different fertilizing treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平
Different small letters above the bars indicate significant differences at $P < 0.05$ level among treatments.]

(40% CRU2) 处理的籽粒干物质质量均显著降低 ($P < 0.05$)。

施氮处理的氮吸收累积量显著高于不施氮处理 ($P < 0.05$)，博罗点平均增幅为 40.4%，惠阳点为 79.0%，其中秸秆增幅为 45.3% (博罗点) 和 146.6% (惠阳点)，籽粒增幅为 37.0% (博罗点) 和 49.7% (惠阳点)。不同施氮处理显著影响氮吸收累积量，其中 60% 控氮减氮 30% 处理 (60% CRU1) 的氮吸收累积

量最大，其次是常规施肥 100% 氮处理 (U1)，而 40% 控氮减氮 50% 处理 (40% CRU2)、60% 控氮减氮 50% 处理 (60% CRU2) 的氮吸收累积量显著降低 ($P < 0.05$)。不同施肥处理显著影响甜玉米秸秆氮吸收累积量，其中常规施肥和 40% 控氮施肥方式下，秸秆的氮吸收累积量均随着施氮量的降低显著降低

($P < 0.05$)；60% 控氮施肥方式下，秸秆的氮吸收累积量也随着施氮量的降低而降低，但差异不显著。不同施氮处理对甜玉米籽粒的氮吸收累积量没有显著影响。

2.5 不同施肥处理甜玉米的氮素利用效率

从表 5 可见，CRU 各处理的氮肥农学效率、氮

表 5 不同施肥处理的甜玉米氮素养分吸收利用效率
Table 5 The nitrogen use efficiencies of sweet corn in different fertilizing treatments

试验点 Site	处理 Treatment	氮肥农学效率 NAE (kg/kg)	氮肥偏生产力 PFP (kg/kg)	氮肥吸收利用率 NRE (%)	氮肥生理利用率 NPE (kg/kg)	氮收获指数 NHI (%)
博罗 Boluo	CK					59.94 ± 4.81 a
	U1	8.67 ± 1.29 b	38.07 ± 2.21 c	11.61 ± 0.50 a	79.80 ± 24.53 a	53.52 ± 2.38 a
	U2	9.81 ± 1.41 b	49.64 ± 3.57 b	11.45 ± 1.06 a	89.15 ± 24.07 a	57.33 ± 2.58 a
	40% CRU1	10.70 ± 1.74 ab	50.77 ± 2.02 b	16.26 ± 3.75 a	76.83 ± 26.89 a	57.05 ± 4.29 a
	40% CRU2	10.71 ± 0.58 ab	65.09 ± 2.26 a	12.81 ± 4.49 a	88.02 ± 33.61 a	59.92 ± 5.21 a
	60% CRU1	10.70 ± 0.59 ab	52.67 ± 2.95 b	16.84 ± 8.02 a	79.23 ± 15.93 a	61.33 ± 4.91 a
	60% CRU2	13.28 ± 0.62 a	70.08 ± 0.60 a	18.60 ± 7.51 a	80.67 ± 25.52 a	61.04 ± 7.03
惠阳 Huiyang	CK					71.02 ± 5.95 a
	U1	8.50 ± 0.63 d	33.32 ± 1.59 c	17.12 ± 0.44 ab	53.91 ± 8.38 a	60.03 ± 7.12 a
	U2	8.78 ± 0.62 d	41.61 ± 1.34 b	13.82 ± 2.70 b	54.27 ± 16.59 a	64.28 ± 7.11 a
	40% CRU1	9.90 ± 0.23 cd	42.49 ± 1.26 b	18.22 ± 1.40 ab	54.84 ± 8.99 a	61.15 ± 2.74 a
	40% CRU2	11.61 ± 0.48 ab	57.26 ± 2.12 a	17.55 ± 4.78 ab	55.05 ± 22.44 a	65.93 ± 7.13 a
	60% CRU1	10.87 ± 0.73 bc	45.16 ± 0.87 b	19.42 ± 3.31 ab	56.58 ± 9.76 a	62.69 ± 2.86 a
	60% CRU2	12.46 ± 0.84 a	60.11 ± 1.68 a	22.67 ± 2.32 a	53.47 ± 10.92 a	64.38 ± 4.04 a

注 (Note) : NAE—Nitrogen agronomic efficiency; PFP—Nitrogen partial productivity; NRE—Nitrogen recovery efficiency; NPE—Nitrogen physiological efficiency; NHI—Nitrogen harvest index; 同列数据后不同字母表示相同地点各处理差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column mean significant differences among the same site treatments at the 0.05 level.

肥偏生产力和氮肥吸收利用率均显著高于 U 处理。不同施肥处理对氮肥生理利用率和氮收获指数没有显著影响。随着施氮量的降低，氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮收获指数均呈逐渐提高的趋势；而氮肥吸收利用率的变化趋势不明显。当施氮量为 N 252 kg/hm² 时，60% CRU 处理的氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率最高，其次是 40% CRU 处理，U 处理最低。当施氮量为 N 180 kg/hm² 时，60% CRU 处理的氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率也高于 40% CRU 处理。

2.6 不同施氮处理对土壤碱解氮含量的影响

从表 6 可见，施氮提高了土壤碱解氮含量，但差异不显著。在等氮条件下，CRU 处理的土壤碱解氮含量比 U 处理高，但 40% CRU 处理和 60% CRU 处理间的土壤碱解氮含量基本一致。

表 6 甜玉米收获后不同施肥处理的土壤碱解氮含量 (mg/kg)

Table 6 Soil available N after corn harvest in different treatments			
处理 Treatment	博罗 Boluo	惠阳 Huiyang	平均 Average
CK	105.84 ± 7.75 a	108.32 ± 5.90 a	107.08
U1	126.74 ± 16.42 a	120.79 ± 5.36 a	123.77
U2	121.15 ± 7.47 a	111.61 ± 3.90 a	116.38
40% CRU1	126.27 ± 17.48 a	119.70 ± 12.73 a	122.99
40% CRU2	112.91 ± 11.99 a	110.51 ± 10.83 a	111.71
60% CRU1	123.65 ± 3.92 a	118.81 ± 5.71 a	121.23
60% CRU2	114.48 ± 7.18 a	113.79 ± 16.46 a	114.14

注 (Note) : 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters mean significant differences among the treatments at the 0.05 level.

3 讨论

甜玉米生长速度快且生物量大, 物质形成和累积速率极高, 对养分吸收强度大^[2, 8, 21]。氮素供应水平显著影响甜玉米的物质形成累积及产量形成^[2]。本研究结果也表明, 施氮显著提高甜玉米产量, 且随着施氮量的增加, 甜玉米产量和生物量均显著提高(图1和图2), 进一步表明氮素是甜玉米产量形成的关键因素。研究表明, 施氮显著提高甜玉米穗长、穗粗、穗行粒数和百粒重, 缩短秃尖长, 从而实现增产^[5, 7, 22]。本研究结果中, 甜玉米的穗长和穗粗随着施氮量的增加而提高(表2)。同时, 随着施氮量的增加, 甜玉米维生素C含量和可溶糖含量均有所提高(表3)。赵福成等^[1]认为, 合理施氮能提高甜玉米籽粒中蔗糖合成关键酶的活性, 从而提高甜玉米籽粒中可溶糖含量。研究表明, 甜玉米对氮肥的响应存在基因型差异^[9, 23], 同时显著受土壤、气候因素影响^[2, 24]。本研究供试品种华珍和粤甜9号的品种特性较接近, 均属于半紧凑型、生长旺盛、株型高达、生物量大^[25-26], 对养分需求量较大, 以施氮量为N 360 kg/hm²处理的甜玉米产量最高, 该结果与前人研究结果相似^[2, 4]。博罗和惠阳分别位于惠州市的东南和中南部, 在试验开展期间两地平均温度和降雨量均非常接近, 分别为21.5℃和20.8℃, 106.1 mm和101.1 mm。博罗试验点土壤为砂质壤土, 碱解氮含量较高, 土壤肥力水平相对高于惠阳试验点。但相关研究表明, 基础地力对玉米产量的贡献率较低, 尤其在南方仅为20%~30%^[27]。且两地的氮肥农学效率、氮肥偏生产力均非常接近, 表明本研究中博罗和惠阳两地的土壤地力对甜玉米产量的贡献率相对一致。因此, 本研究中甜玉米的产量和氮素吸收利用效率主要受施肥措施的影响。

氮素显著影响甜玉米产量和品质, 因此, 合理高效氮素管理在甜玉米高产、优质生产中至关重要^[1-2, 5]。另一方面, 甜玉米在籽粒生理成熟期前收获, 生育期短, 各主要生育期的物质形成和累积速率都相当高^[2]。甜玉米生物体较小, 氮吸收累积量较低, 但氮含量比较高^[6]。甜玉米苗期对氮素的需求量相对较低, 但浓度较高, 且其根系系统尚小。因此, 甜玉米种植户在实际生产过程中常在苗期采用淋水肥的方式补充氮素营养。随着生育期的推进, 甜玉米的物质吸收累积量和氮素吸收累积量从拔节期开始大幅提高, 并在吐丝至灌浆期达到高峰^[6, 21], 拔节初期和吐丝期是氮营养关键时期^[2, 8]。拔节到开花期和开花至鲜食期的氮素积累量显著影响甜玉米

产量水平^[9]。由于甜玉米的收获时期是鲜食期, 叶片中氮素含量没有向子粒大量转移, 灌浆期间的氮吸收累积量非常关键^[9]。为满足甜玉米拔节到开花和开花至鲜食期间高强度的氮吸收累积需求, 甜玉米种植户常分两次追肥, 拔节初期撒施肥料于畦面并结合培土措施将肥料覆盖, 在抽雄期将肥料直接撒施于种植畦之间的沟里, 并灌水。在抽雄期甜玉米的植株较大, 基本封行, 追肥不好操作; 同时, 广东秋季常干旱缺水, 撒施畦面的肥料利用率较低。因此, 农户常采用直接撒施于种植畦之间的沟里, 并灌水, 然而氮肥流失风险较大。

缓控释肥可有效降低或控制养分释放速率, 减少肥料挥发、淋溶损失, 提高肥料利用率, 降低施肥的环境风险^[10-11, 15, 28]。前期研究结果表明, 甜玉米施用缓控释肥可减少施肥量和施肥次数, 同时实现增产增收^[29-30]。本研究结果表明, 在拔节期配施控释尿素和普通尿素, 其产量水平与常规施肥措施基本持平。控释尿素和普通尿素掺混施用, 可显著降低肥料施用成本, 实现肥料间养分供应持续接力, 充分发挥控释尿素的养分控释增效性能。李伟等^[14]通过比较控释氮肥与普通尿素不同掺混比例对夏玉米生长、产量、效应和氮肥利用率的影响, 得出控释尿素与普通尿素的掺混比例为1:1时, 产量最佳。本研究结果表明, 在等氮条件下, 控释尿素与普通尿素掺混施用处理的产量显著高于常规施肥处理, 且随着控释尿素施用比例的增加而增加。赵斌等^[12]研究结果也表明, 随着控释氮肥施用比例增加, 夏玉米产量和氮素吸收累积量逐渐提高。然而, 随着控释尿素施用比例增加, 施肥成本必然随着提高。因此, 为进一步优化控释氮肥施用比例, 需进一步结合肥料成本、作物价格、土壤氮肥可持续性等多方面进行探讨。

因一部分肥料养分被固定在土壤中, 当季肥料表观利用率并不能很好地反映肥料真实利用效率^[31]。当前氮肥农学效率、氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率和氮肥生理利用率依然是反映作物对氮肥的吸收、利用效果的有效指标^[32]。研究表明, 施用控释尿素显著提高水稻、玉米、小麦等作物的氮肥利用率和氮肥农学效率^[13-14, 16, 20, 33]。本研究结果也表明, 控释尿素与普通尿素配施处理的氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率均显著高于常规施肥处理(表5), 且随着控释尿素配施比例的增加而增加, 但对氮肥生理利用率和氮收获指数没有影响。我国化肥施用量大, 强度高, 以致造成了农业面源污染和地力下

降等^[34]。2014 年全国农业工作会议明确提出了“化肥增效减施”任务指标, 试图通过提高肥料利用率, 降低化肥用量, 促进农业可持续发展。研究表明, 采用控释尿素作为氮素补充肥料在水稻、小麦、夏玉米、土豆等作物上均能在稳产, 甚至增产情况下实现减量施肥^[10, 12-13, 20]。本研究结果也表明, 60% 控释氮施用比例处理在减氮 30% 的情况下, 其甜玉米产量与常规施肥 100% 施氮量处理没有显著差异。因此, 控释尿素在甜玉米生产中可作为化肥减施的有效载体。

4 结论

在拔节初期配施控释尿素和普通尿素可以满足甜玉米灌浆期间的氮素供应需求, 其产量水平和籽粒品质与常规施肥基本一致, 甜玉米产量随着控释尿素配施比例的增加而增加。另一方面, 控释尿素和普通尿素处理显著提高氮肥农学效率、氮肥偏生产力及氮肥吸收利用率, 在甜玉米生产中可作为化肥减施的有效途径。因此, 在广东省秋播甜玉米生产过程中, 在拔节初期结合培土配施控释尿素和普通尿素可减少施肥次数, 提高氮肥效率, 是一种实际可行且增产增效的施肥措施。

参 考 文 献:

- [1] 赵福成, 景立权, 闫发宝, 等. 施氮量对甜玉米产量、品质和蔗糖代谢酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 45-53.
Zhao F C, Jing L Q, Yan F B, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on yield, quality and enzyme activity associated with sucrose metabolism of sweet corn[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 45-53.
- [2] 陈建生, 徐培智, 唐拴虎, 等. 施肥对甜玉米物质形成累积特征影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 58-64.
Cheng J S, Xu P Z, Tang S H, *et al.* Effects of fertilization on cumulating characteristics of dried matter mass of sweet corn[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 58-64.
- [3] 甘阳英, 万忠, 刘蔚楠, 等. 2014 年广东甜玉米产业发展形势与对策建议[J]. 广东农业科学, 2015, (11): 11-15.
Gan Y Y, Wang Z, Liu W N, *et al.* Development situation and countermeasures of Guangdong sweet corn industry in 2014[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, (11): 11-15.
- [4] 张白鸽, 李强, 陈琼贤, 等. 广东甜玉米施肥指标体系研究[J]. 广东农业科学, 2013, (20): 67-70.
Zhang B G, Li Q, Chen Q X, *et al.* Research on index system for sweet maize fertilization in Guangdong[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, (20): 67-70.
- [5] 程杏安, 梁秀兰, 胡美英. 不同施氮量对秋播超甜玉米产量性状的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 291-294.
Cheng X A, Liang X L, Hu M Y. Effect of different nitrogen application levels on yield traits of fall super-sweet maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(9): 291-294.
- [6] 林电, 王强, 叶顶强, 等. 超甜玉米营养元素规律研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(10): 426-430.
Lin D, Wang Q, Ye D Q, *et al.* Studies on nutrient characters of super sweet corn[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(10): 426-430.
- [7] 孙桂森, 李梅, 王蕴波, 等. 施肥对甜玉米产量及农艺性状的影响[J]. 广东农业科学, 2013, (14): 60-62.
Sun G S, Li M, Wang Y B, *et al.* Effects of fertilization on yield and agronomic traits of sweet corn[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, (14): 60-62.
- [8] 陈建生, 徐培智, 唐拴虎, 等. 秋播甜玉米氮磷钾营养特点及施肥措施对其影响研究[J]. 中国农学通报, 2008, 24(11): 272-277.
Cheng J S, Xu P Z, Tang S H, *et al.* Characteristics of NPK nutrition and as affected by fertilization for fall-sowing sweet corn[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(11): 272-277.
- [9] 陆大雷, 刘小兵, 赵久然, 等. 甜玉米氮素积累和分配的基因型差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 852-857.
Lu D L, Liu X B, Zhao J R, *et al.* Genotypic differences in nitrogen accumulation and distribution among different sweet maize varieties[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 852-857.
- [10] Timilsena Y P, Adhikari R, Casey P, *et al.* Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1131-1142.
- [11] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463-473.
Fan X L, Liu F, Liao Z Y, *et al.* The status and outlook for the study of controlled-release fertilizers in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 463-473.
- [12] 赵斌, 董树亭, 张吉旺, 等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1760-1768.
Zhao B, Dong S T, Zhang J W, *et al.* Effects of controlled-release fertilizer on yield and nitrogen accumulation and distribution in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1760-1768.
- [13] 赵斌, 董树亭, 王空军, 等. 控释肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2678-2684.
Zhao B, Dong S T, Wang K J, *et al.* Effects of controlled-release fertilizers on summer maize grain yield, field ammonia volatilization, and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2678-2684.
- [14] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 699-706.
Li W, Li X H, Li H Y, *et al.* Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(4): 699-706.
- [15] 高璐阳, 王怀利, 王晓飞, 等. 我国发展缓控释肥的意义及前景[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30(4): 14-17.
Gao L Y, Wang H L, Wang X F, *et al.* The significance and prospect of slow/controlled release fertilizer development in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2015, 30(4): 14-17.
- [16] 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 209-215.

- Lu Y L, Bai Y L, Wang L, *et al.* Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat-maize in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 209–215.
- [17] 徐明岗, 李菊梅, 李冬初, 等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1010–1015.
- Xu M G, Li J M, Li D C, *et al.* Effect of controlled-release nitrogen on growth and fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in southern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1010–1015.
- [18] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 等. 缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(24): 4892–4902.
- Xing X M, Li X C, Ding Y F, *et al.* Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on yield and dry mass production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(24): 4892–4902.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2004. 430–472.
- Lu R K, The analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004. 430–472.
- [20] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 155–161.
- Lu Y H, Nie J, Niao Y L, *et al.* Effect of application reduction of controlled release nitrogen fertilizer on yield of double cropping rice and nitrogen nutrient uptake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 155–161.
- [21] 陈建生, 徐培智, 唐拴虎, 等. 秋播甜玉米的物质形成累积特征及施肥措施对其影响研究[J]. *广东农业科学*, 2008, (6): 3–6.
- Cheng J S, Xu P Z, Tang S H, *et al.* Characteristics of dried matter mass cumulating and as affected by fertilization for fall-sowing sweet corn[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2008, (6): 3–6.
- [22] 张红芳, 王璞, 张来生, 等. 不同密度下施氮对甜玉米果穗形成的影响[J]. *玉米科学*, 2008, 16(2): 125–130.
- Zhang H F, Wang P, Zhang L S, *et al.* Effects of nitrogen application on formation of ear under different densities in sweet corn[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(2): 125–130.
- [23] 陆大雷, 刘小兵, 赵久然, 等. 甜玉米氮素吸收利用的基因型差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 258–263.
- Lu D L, Liu X B, Zhao J R, *et al.* Genotypic differences in nitrogen uptake and utilization of sweet maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 258–263.
- [24] 王玉兰, 乔春贵, 矫树凯, 等. 播期和施肥方式对甜玉米主要数量性状的影响[J]. *吉林农业科学*, 1994, (1): 15–17.
- Wang Y L, Qiao C G, Jiao S K, *et al.* The influence of sowing date and fertilization on the main quantitative characteristics of sweet corn[J]. *Jilin Agricultural Sciences*, 1994, (1): 15–17.
- [25] 方志伟, 胡建广, 刘建华, 等. 超甜玉米新品种粤甜9号选育初报[J]. *广东农业科学*, 2004, (S1): 43–44.
- Fang Z W, Hu J G, Liu J H, *et al.* The preliminary study of new sweet corn cultivar Yuetian 9[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2004, (S1): 43–44.
- [26] 王道泽, 石建尧, 俞琦英, 等. 甜玉米华珍的特征特性及栽培技术[J]. *浙江农业科学*, 2005, (5): 379–380.
- Wang D Z, Shi J Y, Yu Q Y, *et al.* The characteristics and cultivation techniques of sweet corn Huazhen[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2005, (5): 379–380.
- [27] 汤勇华, 黄耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率和基础产量的空间分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(5): 1070–1078.
- Tang Y H, Huang Y. Spatial distribution characteristics of the percentage of soil fertility contribution and its associated basic crop yield in mainland China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5): 1070–1078.
- [28] Shaviv A, Mikkelsen R L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation- A review[J]. *Fertilizer Research*, 1993, 35: 1–12.
- [29] 游奕来, 李伯欣, 甘道建, 等. 甜玉米施用控释肥效应研究[J]. *广东农业科学*, 2008, (6): 16–17.
- You Y L, Li B X, Gan D J, *et al.* Effects of application of controlled released fertilizers on sweet corn[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2008, (6): 16–17.
- [30] 张发宝, 徐培智, 唐拴虎, 等. 新型控释BB肥在甜玉米上的施用效果研究[J]. *广东农业科学*, 2004, (4): 41–42.
- Zhang F B, Xu P Z, Tang S H, *et al.* A study on the application of blending controlled-released fertilizers on the growth and yield of sweet corn[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2004, (4): 41–42.
- [31] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 216–225.
- Wang H Y, Zhou J M. Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 216–225.
- [32] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1311–1324.
- Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiency of major grain crops in China in recent 10 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1311–1324.
- [33] 刘飞, 张民, 诸葛玉平, 等. 马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1351–1358.
- Liu F, Zhang M, Zhuge Y P, *et al.* Effects of controlled-release fertilizer on vertical distribution of soil nutrients and nutrient use efficiencies under potato and maize relay cropping system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1351–1358.
- [34] 金书秦, 周芳, 沈贵银. 农业发展与面源污染治理双重目标下的化肥减量路径探析[J]. *环境保护*, 2015, (8): 50–53.
- Jin S Q, Zhou F, Shen G Y. Feasible routes for reducing chemical fertilizer use with dual goals of agricultural development and non-point source pollution prevention[J]. *Environmental Protection*, 2015, (8): 50–53.