

甜玉米产量和氮磷养分利用率对施氮量的响应

崔玉涛, 李贞希, 张彪, 代军, 陈缘, 陈昊东, 李美, 吕建国, 陈有君, 王弢, 胡小康*

(大理大学农学与生物科学学院, 云南大理 671003)

摘要 [目的] 阐明甜玉米产量和氮磷养分利用效率对氮肥施用量的响应模式, 从而为改善甜玉米的氮肥管理方案、提高养分利用效率提供支撑。[方法] 在云南省大理市的洱海流域开展田间试验, 设置 5 个氮肥施用量处理 (0、100、200、300、400 kg/hm²), 测定鲜穗产量、籽粒产量、地上部生物量产量, 以及茎叶、苞叶、籽粒、穗轴等的氮磷含量; 计算收获指数、籽粒吸氮量和吸磷量、地上部吸氮量和吸磷量、氮肥和磷肥偏生产力、氮肥农学利用效率、氮肥回收率、籽粒氮肥利用效率、籽粒氮和磷利用效率、氮和磷收获指数及氮磷平衡。在此基础上, 分析以上指标对氮肥施用量的响应模式。[结果] 鲜穗产量、籽粒产量、籽粒吸氮量、籽粒吸磷量及磷肥偏生产力随氮肥施用量的增加呈渐近增长的模式, 最大增长幅度均为 17.2% (与不施氮肥的对照相比)。地上部生物量产量、地上部吸氮量和吸磷量随氮肥施用量的增加呈渐近增长的趋势, 但其统计模型不显著。氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率及籽粒氮肥利用效率在施氮量为 100 kg/hm² 时最大, 分别为 27.20、2.51 kg/kg 及 3.2%, 三者随氮肥施用量的增加而指数下降, 最大下降幅度分别为 73.6%、59.8% 及 59.9%。收获指数、氮肥回收率、籽粒氮利用效率、氮收获指数、籽粒磷利用效率及磷收获指数等指标在处理间的变化范围分别为 22.9%~25.5%、5.5%~11.9%、22.3~25.1 kg/kg、28.3%~31.9%、30.1~34.3 kg/kg 及 20.2%~23.0%, 且随氮肥施用量的增加呈下降趋势, 但有关模型不显著。施氮量为 115 kg/hm² 时, 以地上部总吸氮量计算所得的氮平衡值等于 1.0。[结论] 研究区域的土壤基础肥力较高, 导致在较低施氮量时有较高的氮肥偏生产力, 以及较低的氮肥农学利用效率、氮肥回收率、籽粒氮肥利用效率。茎叶吸收的氮向玉米穗和籽粒转移效率较低, 由此进一步降低研究区域甜玉米的氮利用效率。增施氮肥能提高甜玉米对磷的利用效率。施氮量在 115 kg/hm² 左右是研究区域甜玉米施氮量的合理参考值。

关键词 甜玉米; 氮肥利用效率; 氮磷平衡; 磷肥利用效率; 洱海流域

中图分类号 S513 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)19-0157-09

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.19.042

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The Responses of Yield and Nitrogen and Phosphorus Use Efficiency of Sweet Corn (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt) to Nitrogen Fertilizer Input Rate

CUI Yu-tao, JI Zhen-xi, ZHANG Biao et al (College of Agriculture and Biological Sciences, Dali University, Dali, Yunnan 671003)

Abstract [Objective] To elucidate the response patterns of yield and nitrogen (N) and phosphorus (P) use efficiency of sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt) to N input rate, and then provide scientific support for improving N fertilizer management programmes, and increasing nutrient use efficiency of sweet corn. [Method] A field experiment amended with five N fertilizer input rate (i.e. 0, 100, 200, 300, and 400 kg/hm²) at Erhai watershed, Dali, Yunnan, PR China was conducted. The yield of fresh ear, grain, and aboveground biomass, and N and P content in stalks and leaves, husk leaves, grains, and shanks were analyzed, and then harvest index (HI), N and P uptake in grain, N and P uptake in aboveground biomass, partial factor productivity of N and P fertilizer (PFP_{NF} and PFP_{PF}), agronomic use efficiency of N fertilizer (AUE_{NF}), recovery efficiency of N fertilizer (RE_{NF}), grain utilization efficiency of N fertilizer (GUE_{NF}), N and P use efficiency of grain (NUE_{grain} and PUE_{grain}), harvest index of N and P (HI_N and HI_P), and partial N balance (PNB) were calculated, and thereafter exploring the response patterns of the above mentioned indices to N fertilizer input rate. [Result] Fresh ear yield, grain yield, N and P uptake in grain, and PFP_{PF} response to N fertilizer input rate presented an asymptotic growth model, and the maximum increment extent was 17.2% when compared with the control. Aboveground biomass and N and P uptake in aboveground biomass tended to increase asymptotically with N input rate, the associated statistical models, however, were not significant. The maximum PFP_{NF}, AUE_{NF}, and GUE_{NF} was observed at the N input rate of 100 kg/hm², and with the value of 27.20 kg/kg, 2.51 kg/kg, and 3.2%, respectively. Increasing N input rate induced exponentially decrease of PFP_{NF}, AUE_{NF}, and GUE_{NF}, and the maximum decrease extent was 73.6%, 59.8%, and 59.9%, respectively. HI, RE_{NF}, NUE_{grain}, HI_N, PUE_{grain}, and HI_P of the five treatments were within the range of 22.9%~25.5%, 5.5%~11.9%, 22.3~25.1 kg/kg, 28.3%~31.9%, 30.1~34.3 kg/kg, and 20.2%~23.0%, respectively, and these indices tended to decrease with N input rate, however, the associated models were not significant. PNB was 1.0 when N input rate was 115 kg/hm² and when PNB was calculated with aboveground N uptake. [Conclusion] Taken together, the basic fertility of the soil in the study area was relatively high, which resulted in the high PFP_{NF} and low AUE_{NF}, RE_{NF}, and GUE_{NF} at low N input rate. N utilization efficiency of the sweet corn in the study area was further reduced by the low efficiency of N transformation from stalks and leaves to ears and grains. Increasing N fertilizer input could enhance P use efficiency of sweet corn. The recommended N fertilizer rate for sweet corn of the study area was 115 kg/hm².

Key words Sweet corn; Nitrogen fertilizer use efficiency; Partial nitrogen balance; Phosphorus fertilizer use efficiency; Erhai watershed

甜玉米 (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt) 是兼具粮、果、蔬等三重用途的重要经济作物, 在国内外被广泛种植^[1]。统计数据显示, 包括甜玉米在内的鲜食玉米种植在 2015 年占全国玉米种植面积的 3%^[2]。随着社会经济的发展和生活水平的

提高, 消费市场对甜玉米的需求量还将持续增长, 甜玉米的种植规模将进一步扩大^[3]。氮肥是作物种植所需的最关键肥料, 其对作物生长和产量建成的促进作用早已被广泛认知^[4-6]。然而, 由于缺乏科学的管理和对作物产量的盲目追求, 氮肥不合理施用已成为国内外普遍存在的现象, 特别是偏施氮肥的现象更为突出, 由此导致氮肥利用效率低、生态环境遭受严重负面影响等问题^[7-9]。在此背景下, 合理施用氮肥、提高氮肥利用效率、降低氮肥对生态环境的不良影响已成为当前农业生产研究中最关注的重大问题之一^[10-13]。

基金项目 国家自然科学基金项目 (41963007); 大理大学博士科研启动费项目 (KYBS2018028)。

作者简介 崔玉涛 (1997—), 女, 重庆人, 从事植物养分管理研究。
* 通信作者, 讲师, 博士, 从事作物养分管理与农田养分循环研究。

收稿日期 2020-03-24; **修回日期** 2020-04-13

甜玉米作为需氮量很大的一类作物,研究其对氮肥的吸收和利用特征、提高氮肥利用效率,将对其生产提质增效和农业绿色发展有重要指导意义。

迄今,针对提高普通玉米的氮肥利用效率研究较多,研究者从土壤与植物营养、农学、育种等多学科角度着手,探索出系列管理技术,如确定合理的氮肥施用量和施用时间、配方施肥、优化种植密度及播种时间、改善品种等^[14-17]。在已有的所有技术中,确定氮肥的合理施用量是其中的核心之一,大多围绕这一主题展开^[5,18]。目前,研究表明,我国玉米生产的氮肥平均施用量应控制在 214~256 kg/hm²,此时可兼顾较高的产量和较高的氮肥利用效率,在保证粮食安全的同时有效降低氮肥对生态环境的负面影响(产量为 12 600~14 200 kg/hm²,氮肥偏生产力为 56~59 kg/kg^[18])。

相比之下,国内外对甜玉米氮肥需求规律的研究则异常匮乏,与此有关的针对性研究仅见少量报道。资料显示,与普通玉米及北美地区的甜玉米种植相比,我国甜玉米的氮肥管理显得较为粗放,有关研究也显得较为薄弱。当前,我国甜玉米的氮肥施用量普遍较高,大多数研究均超过 250 kg/hm²,在一些研究中高达 458~607 kg/hm²^[19-23];而在一些农技推广指导中,除大量施用有机肥外,同时额外增施的化学氮肥用量甚至达 345~500 kg/hm²^[24-26]。然而,美国和加拿大的甜玉米施氮量基本在 150 kg/hm² 以下,只有个别研究中的施氮量达 200 kg/hm² 左右^[27-32]。

造成我国甜玉米氮肥施用量偏高的一个主要原因是当前的甜玉米种植以高产为主要目标,很少考虑氮肥施用量对氮肥利用效率及生态环境的影响。迄今,仅发现 4 篇文献对氮肥施用量与甜玉米产量间的关系做过较为细致的研究,而这其中仅有一篇文献同时报道了氮肥利用效率对氮肥施用量的响应特征^[33-36]。这 4 项研究表明,仅权衡产量和玉米穗农艺性状表现时,其中一项研究的甜玉米最佳施氮量为 210 kg/hm²^[36],另外 3 项研究的甜玉米最佳施氮量可高达 300~405 kg/hm²^[33-35]。但如果同时权衡产量、氮肥利用效率及经济效益时,甜玉米最佳施氮量需从 400 kg/hm² 下调到 250 kg/hm²,下调幅度高达 38%^[34]。因此,在我国甜玉米生产中,关于氮肥施用量对甜玉米氮肥利用效率的影响亟待深入研究。

在评价玉米氮肥利用效率时,对普通玉米的有关研究已经发展出系列指标,包括氮肥偏生产力(partial factor productivity of nitrogen fertilizer, PFP_{NF})、氮肥农学利用效率(agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer, AUE_{NF})、氮肥回收率(recovery efficiency of nitrogen fertilizer, RE_{NF})、籽粒氮肥利用效率(grain utilization efficiency of nitrogen fertilizer, GUE_{NF})、籽粒氮利用效率(nitrogen use efficiency of grain, NUE_{grain})、氮收获指数(harvest index of nitrogen, HI_N)及氮偏平衡(partial nitrogen balance, PNB)等^[37-39]。对这些指标分别进行分析,能较为全面地认识调控甜玉米氮肥利用效率的各内外环节所起的作用,从而为改进管理技术提供有针对性的指导^[37]。当前,在普通玉米的研究中,对这些指标的认识与应用已臻

成熟,值得在甜玉米的研究中对其进行借鉴和采纳。基于以上背景,笔者通过在云南大理洱海流域开展田间试验,解析氮肥施用量对甜玉米产量和氮磷养分利用效率的影响规律,以期改善区域甜玉米氮肥管理现状提供理论基础和技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况 研究地点位于云南省大理市的大理大学农学实验站,地理坐标为 100°10′30″ E, 25°41′3″ N,海拔 2 002 m。该区域属亚热带高原季风气候类型,气温年较差小,日较差大,雨热同季。近 30 年间,年均温 15.5℃,最暖月和最冷月分别为 7 月和 1 月(月均温分别为 20.1 和 8.6℃);年降水量 1 060 mm,6—10 月为雨季(降水量占全年降水量的 80.3%),11—次年 5 月为旱季。0~50 cm 土层 pH 为 5.3,容重为 1.22~1.46 g/cm³,有机质含量为 30~67 g/kg,速效磷含量为 76.4~225.3 mg/kg(表 1)。

表 1 试验区土壤理化性质
Table 1 Soil physical and chemical properties of the experimental site

土层深度 Soil depth cm	pH	容重 Bulk density g/cm ³	有机质含量 Organic matter content g/kg	速效磷含量 Available P content mg/kg
0~10	5.3	1.22	67	225.3
10~30		1.26	59	150.0
30~50		1.46	30	76.4

1.2 田间试验设计和管理 用耘甜 8 号(广东现代金穗种业公司)作为供试甜玉米品种。研究因素为氮肥施用量,设置 5 个水平(0、100、200、300、400 kg/hm²)。所用氮肥为尿素(N 含量 46%),分 3 次施用,分别为基肥、六叶期及抽雄期 3 个阶段各施入全生育期氮肥施用总量的 30%、35%及 35%。磷肥和钾肥分别用过磷酸钙(P₂O₅ 含量 16%)和硫酸钾(K₂O 含量 50%),二者皆全部用作基肥,施用量均为 100 kg/hm²(按 P₂O₅ 和 K₂O 计)。基肥于整地前撒施于地表,整地时与表层 30 cm 土层混匀。作为追肥的氮肥先撒施于地表,之后浇水。试验小区采用随机区组排列,设 4 次重复,小区面积为 9.5 m×1.9 m=17.5 m²。2018 年 6 月 20 日播种,乳熟期收获(10 月 1 日),共持续 105 d。甜玉米株距和行距分别为 25 cm 和 60 cm(66 667 株/hm²)。田间试验期间为研究区域的雨季,除追施氮肥时进行少量浇水外,其余时间未浇水,并做好排水工作。

1.3 样品采集与测定 整地前采集土壤样品,用于测定土壤容重、pH、有机质及速效磷含量。采集土壤样品时,在整个试验区随机选取 4 个采样点(即 4 次重复),对各采样点的 0~10、10~30 及 30~50 cm 3 个土层土壤进行分层采样。

产量测定及玉米样品采集于甜玉米达到最佳鲜食程度时进行(乳熟期,10 月 1 日)。测产时,在各小区内部选取 2 行玉米,每行连续采玉米 6 株,2 行共 12 株;在田间测定各株玉米的茎叶鲜重及对应的穗鲜重(包括苞叶、籽粒及穗轴 3 个部分的总种)。然后从各小区的 12 株玉米中分别随机采茎叶样品 1 份,玉米穗样品 3 穗,带回实验室测定茎叶、籽

粒、苞叶及穗轴等的水分含量、干物质重量、氮磷养分元素含量及出籽率。

气候数据源自附近的大理气象观测站。土壤容重用环刀法测定;pH用pH计测定;有机质含量用灼烧法测定^[40];速效磷含量用 $\text{NH}_4\text{F}-\text{HCl}$ 溶液浸提-钼锑抗显色法测定^[41]。田间试验期间的土壤温度和体积含水量动态变化用土壤温湿度监测仪EM50(Decagon Devices, Inc. USA)监测;在田间选取2个监测点,在10和30 cm深度土层安装温湿度探头(即每个深度2次重复),每10 min采集一次土壤温湿度数据。玉米样品在60℃的烘箱中烘干至恒重后计算含水量。玉米茎叶、籽粒、苞叶及穗轴等用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,之后用凯氏定氮法测定全氮含量,用钼锑抗显色法测定磷含量^[42]。

1.4 数据计算与统计分析 土壤温湿度各监测点在一天当中的温度和水分含量日均值、最大值及最小值分别用各探头一天中记录的全部数据(144个数据/d)的均值、最大值及最小值表示;各土层2个重复一天中的温湿度日均值、最大值及最小值的均值作为试验区相应土层温湿度的日均值、最大值及最小值。

鲜穗产量包括苞叶、籽粒及穗轴的总鲜重,以各小区12株玉米的鲜穗总重来换算成相应小区的产量。籽粒、苞叶及穗轴的干物质产量分别以他们各自占鲜穗的百分数和鲜穗产量来计算。地上部生物量产量以干物质计,包括茎叶、籽粒、苞叶、穗轴的干物质总重。收获指数(harvest index, HI)为籽粒产量占地上部总生物量的百分数(均以干重计)^[43]。籽粒吸氮量和吸磷量为籽粒干物质产量分别乘以籽粒含氮量和含磷量;地上部吸氮量和吸磷量为地上部茎叶、籽粒、苞叶及穗轴各自的干物质产量分别乘以他们各自的氮磷含量后相加取和。

氮利用效率用如下7项指标表征:氮肥偏生产力(PFP_{NF})、氮肥农学利用效率(AUE_{NF})、氮肥回收率(RE_{NF})、籽粒氮肥利用效率(GUE_{NF})、籽粒氮利用效率($\text{NUE}_{\text{grain}}$)、氮收获指数(HI_{N})、氮偏平衡(PNB)。

$\text{PFP}_{\text{NF}} = Y_{\text{grain}}/N_r$ 。式中, PFP_{NF} ,氮肥偏生产力,kg/kg; Y_{grain} ,籽粒产量,kg/hm²; N_r ,氮肥施用量,kg/hm²^[39]。

$\text{AUE}_{\text{NF}} = (Y_{\text{grainN}} - Y_{\text{grain0}})/N_r$ 。式中, AUE_{NF} ,氮肥农学利用效率,kg/kg; Y_{grainN} ,施氮区籽粒产量,kg/hm²; Y_{grain0} ,不施氮区籽粒产量,kg/hm²; N_r ,氮肥施用量,kg/hm²^[44-45]。

$\text{RE}_{\text{NF}} = (\text{UN}_N - \text{UN}_0)/N_r \times 100\%$ 。式中, RE_{NF} ,氮肥回收率,%; UN_N ,施氮区玉米地上部吸氮总量,kg/hm²; UN_0 ,不施氮区玉米地上部吸氮总量,kg/hm²; N_r ,氮肥施用量,kg/hm²^[46-47]。

$\text{GUE}_{\text{NF}} = (\text{GN}_N - \text{GN}_0)/N_r \times 100\%$ 。式中, GUE_{NF} ,籽粒氮肥利用效率,%; GN_N ,施氮区籽粒吸氮总量,kg/hm²; GN_0 ,不施氮区籽粒吸氮总量,kg/hm²; N_r ,氮肥施用量,kg/hm²^[45,48]。

$\text{NUE}_{\text{grain}} = Y_{\text{grain}}/U_N$ 。式中, $\text{NUE}_{\text{grain}}$,籽粒氮利用效率,kg/kg; Y_{grain} ,籽粒产量,kg/hm²; U_N ,地上部吸氮总量,kg/hm²^[49]。

$\text{HI}_N = G_N/U_N \times 100\%$ 。式中, HI_N ,氮收获指数,%; G_N ,籽粒吸氮量,kg/hm²; U_N ,玉米地上部吸氮总量,kg/hm²^[43]。

$\text{PNB} = U_N/N_r$ 。式中,PNB,氮偏平衡,无量纲; U_N ,收获物中带走的氮养分量,kg/hm²; N_r ,氮肥施用量,kg/hm²^[38]。该研究中,用籽粒吸氮量、玉米穗(包括苞叶、籽粒及穗轴)吸氮量及地上部(包括茎叶和玉米穗)吸氮量等3种方法分别计算收获物中带走的氮养分量,然后再分别计算氮偏平衡。

磷肥偏生产力(PFP_{PF})、籽粒磷利用效率($\text{PUE}_{\text{grain}}$)及磷收获指数(HI_P)分别按氮肥偏生产力、籽粒氮利用效率及氮收获指数的公式进行计算,其中的磷肥施用量和玉米磷吸收量以 P_2O_5 计。

氮肥施用量与鲜穗产量、籽粒产量、地上部生物量产量、籽粒吸氮量、地上部吸氮量、籽粒吸磷量、地上部吸磷量、磷肥偏生产力之间的关系用渐近增长模型拟合^[50-51]:

$$y = \alpha + \delta(1 - e^{-\beta x})$$

式中, y ,应变量; α ,未施用氮肥时应变量的取值; δ ,应变量对氮肥施用的最大响应程度(即氮肥供应充足时,应变量的最大增加潜力); β ,应变量对氮肥施用量增加的响应速率; x ,氮肥施用量。

氮肥施用量与收获指数之间的关系用简单线性模型拟合。氮肥施用量与氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率、氮肥回收率、籽粒氮肥利用效率、籽粒氮利用效率、氮收获指数、籽粒磷利用效率、磷收获指数及氮偏平衡之间的关系用指数下降模型拟合^[52]:

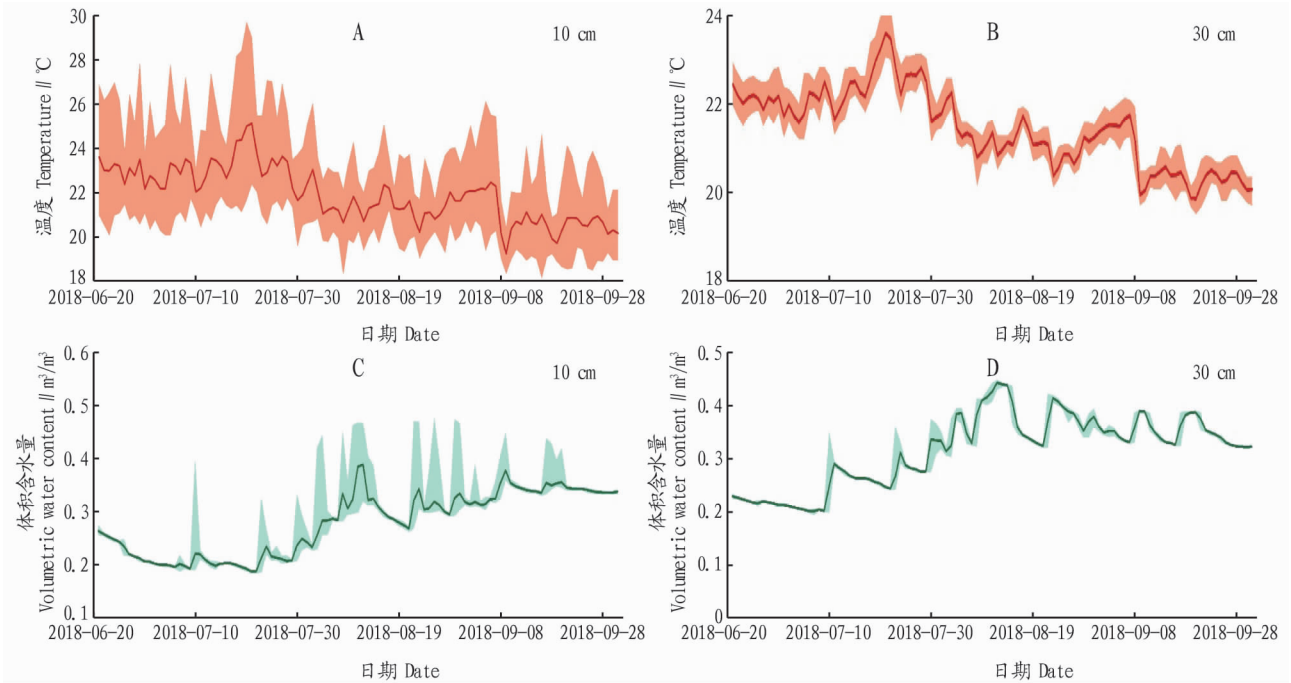
$$y = \theta e^{-kx}$$

式中, y ,应变量; θ ,拟合参数,相当于应变量可能达到的最大值; k ,应变量对氮肥施用量的响应速率; x ,氮肥施用量。用SigmaPlot(version 12.0)软件进行模型的拟合,并在 $\alpha = 0.05$ 的水平上检验统计模型显著性。

2 结果与分析

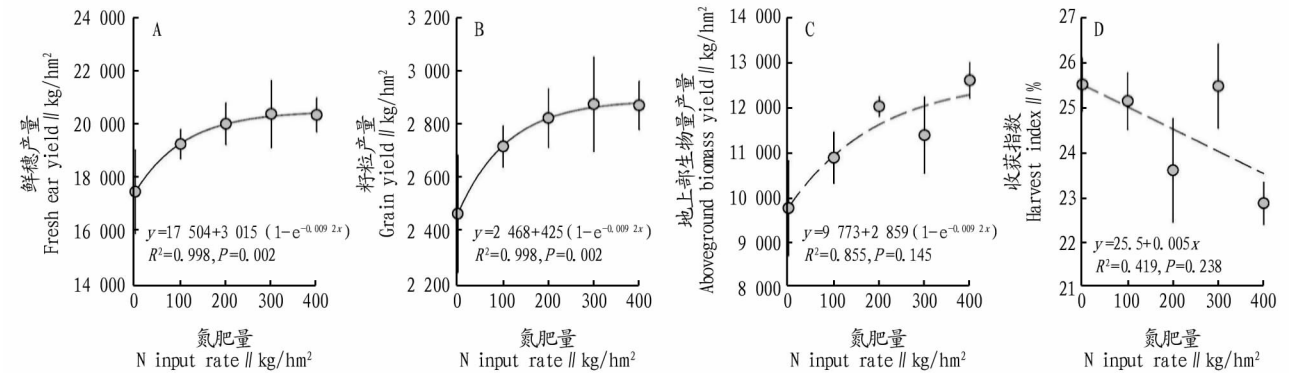
2.1 土壤温湿度状况 田间试验期间,土壤温度较高,水分充足。10和30 cm深度土层中,日均温分别在19.2~25.1℃和19.8~23.6℃,瞬时最低温分别为18.1和19.5℃,瞬时最高温分别为29.7和24.1℃(图1A和B);水分含量日均值分别在0.19~0.39和0.20~0.43 m³/m³,瞬时最低含水量分别为0.18和0.19 m³/m³,瞬时最高含水量分别为0.48和0.44 m³/m³(图1C和D)。

2.2 产量指标对氮肥施用量的响应 未施氮肥的处理鲜穗产量和籽粒产量分别为17 510和2 469 kg/hm²,二者均随氮肥施用量的增加而增加($P < 0.05$),最大增加幅度分别为3 015和425 kg/hm²(渐近增长模型的参数 δ),二者的增加量均为17.2%(图2A和B)。地上部生物量产量随氮肥施用量的增加呈渐近增长的趋势,但其模型不显著。处理间地上部生物量产量的变异范围为9 758~12 575 kg/hm²,最高产量的处理(400 kg/hm²处理)比最低产量的处理(0 kg/hm²处理)高28.9%(图2C)。收获指数在处理间的变异范围为22.9%~25.5%,随施氮量的增加呈下降趋势,但其模型不显著(图2D)。



注:实线为温度及土壤含水量的日平均值,浅色背景为温度及土壤含水量的日变化范围。数据点的值为 $\pm 1s(n=2)$
Note:The solid line was the daily average of temperature and soil water content,while the light background was the daily range of temperature and soil water content. The value of the data point was $\pm 1s(n=2)$

图 1 田间试验期间土壤温湿度动态
Fig.1 Soil temperature and humidity dynamics during field experiment



注:籽粒产量和地上部生物量产量为干物质重量。数据点的值为 $\pm 1s(n=4)$ 。在 $\alpha=0.05$ 水平上显著的模型,其拟合线用实线表示,否则用虚线表示

Note:Fresh panicle yield included the total weight of bracts,grains and cobs. Grain yield and aboveground biomass yield were dry matter weight. The value of the data point was $\pm 1s(n=4)$. For the significant model at $\alpha=0.05$,the fitting line was represented by a solid line,or a dashed line

图 2 甜玉米产量指标对氮肥施用量的响应
Fig.2 Response of yield index of sweet corn to nitrogen application rate

2.3 氮磷养分吸收对氮肥施用量的响应 未施氮肥的处理,籽粒吸氮量和吸磷量分别为 31.36 和 16.57 kg/hm²,二者均随氮肥施用量的增加而增加($P<0.05$),最大增加量分别为 5.40 和 2.85 kg/hm²(渐近增长模型的参数 δ),增加幅度均为 17.2%(图 3A 和 C)。地上部吸氮总量和吸磷总量在处理间的变异范围分别为 99.2~129.2 和 72.7~95.6 kg/hm²,二者均随氮肥施用量的增加呈上升趋势,但统计模型不显著(图 3B 和 D)。

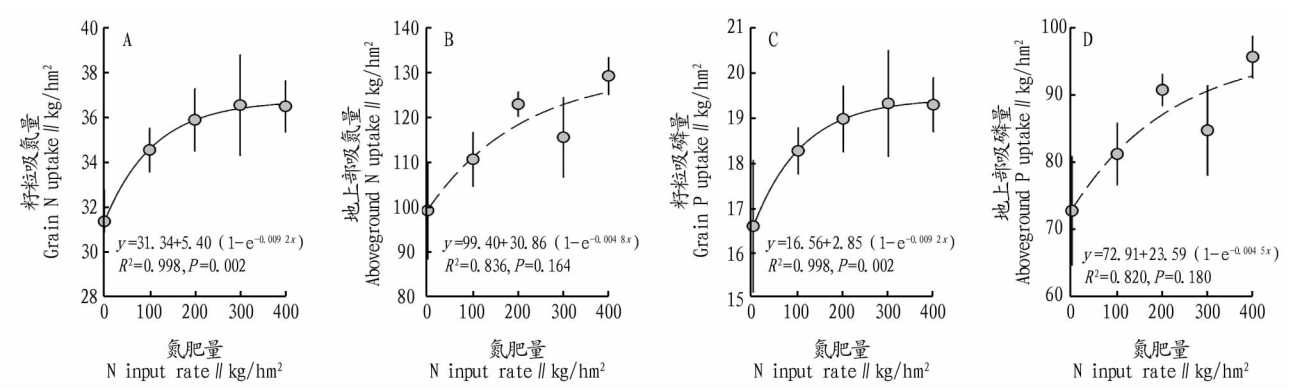
2.4 氮利用效率对氮肥施用量的响应 施氮量为

100 kg/hm² 时,氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率及籽粒氮肥利用效率分别为 27.20、2.51 kg/kg 及 3.2%,三者均随氮肥施用量的增加而下降($P<0.05$),最大下降幅度分别为 73.6%、59.8%及 59.9%(图 4A、B 和 D)。如果以鲜穗产量计,氮肥施用量为 100、200、300、400 kg/hm² 时,各自的氮肥偏生产力依次为 193、100、68 及 51 kg/kg,氮肥农学利用效率依次为 17.79、12.66、9.66 及 7.17 kg/kg。

氮肥回收率、籽粒氮利用效率及籽粒氮收获指数在处理间的变异范围分别为 5.45%~11.87%、22.25~25.09 kg/kg

及 28.3%~31.9%,三者均随氮肥施用量的增加呈下降趋势,下降幅度分别为 54.1%、11.3%及 11.3%,但三者与氮肥施用量关系的模型不显著(图 4C、E 和 F)。如果以全穗吸氮量

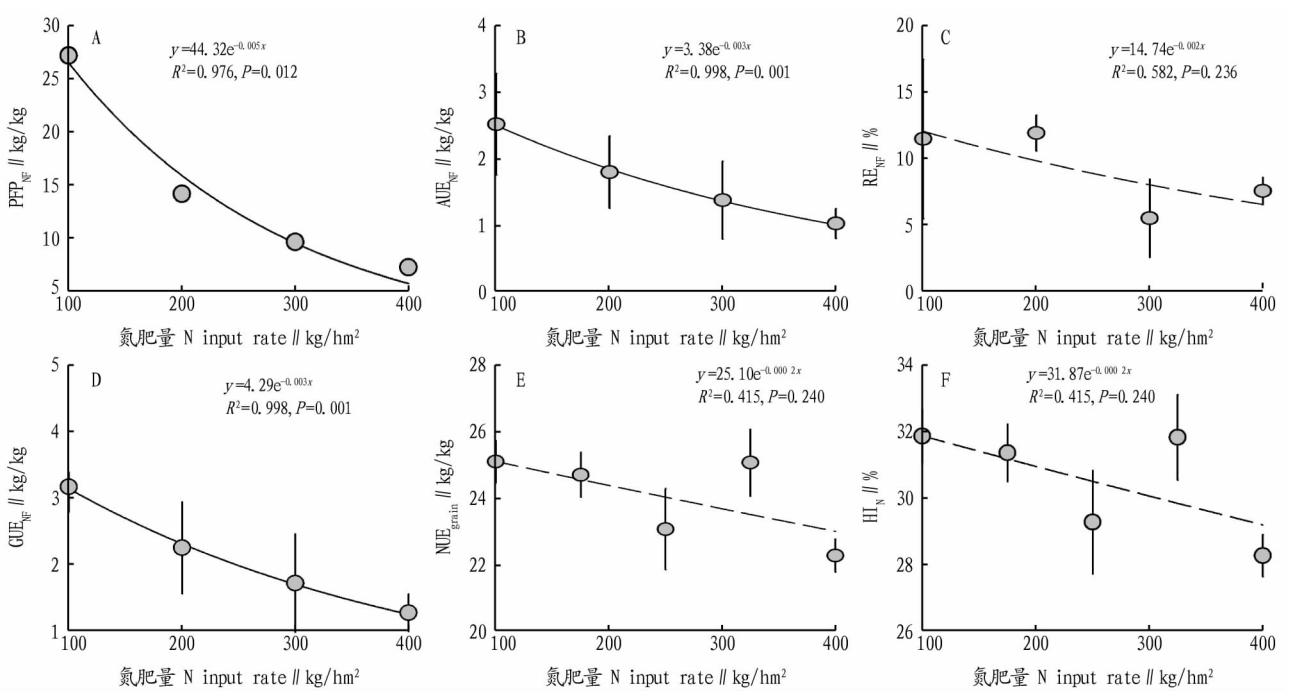
(包括籽粒、穗轴、苞叶)计算,氮收获指数随氮肥施用量增加呈下降趋势,但二者之间的线性模型不显著,氮收获指数在 34.8%~39.2%,平均值为 37.5%。



注:数据点的值为 $\pm 1s$ ($n=4$)。回归模型在 $\alpha=0.05$ 水平上显著的拟合线用实线表示,不显著的拟合线用虚线表示
Note: The value of the data point was $\pm 1s$ ($n=4$). For the significant model at $\alpha=0.05$, the fitting line was represented by a solid line, or a dashed line

图 3 甜玉米氮磷吸收对氮肥施用量的响应

Fig. 3 Response of nitrogen and phosphorus uptake of sweet corn to nitrogen fertilizer application rate



注:数据点的值为 $\pm 1s$ ($n=4$),部分数据点由于标准误差较小,导致其误差线被数据点遮盖。回归模型在 $\alpha=0.05$ 水平上显著的拟合线用实线表示,否则用虚线表示
Note: The value of data points was $\pm 1s$ ($n=4$), and some data points were covered by error lines due to small standard errors. Fresh panicle yield included the total weight of bracts, grains and cobs. Grain yield and aboveground biomass yield were dry matter weight. For the significant model at $\alpha=0.05$, the fitting line was represented by a solid line, or a dashed line

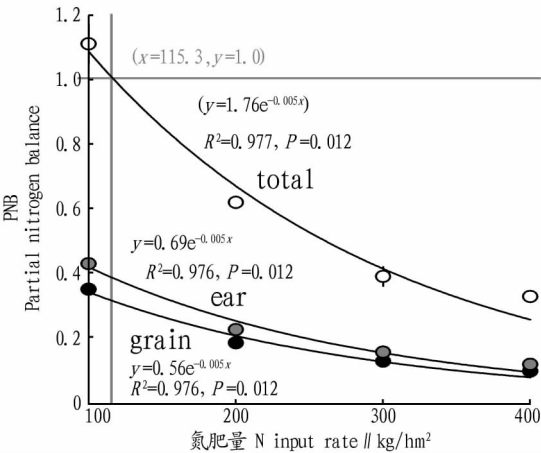
图 4 甜玉米氮利用效率对氮肥施用量的响应

Fig. 4 Response of nitrogen utilization efficiency to nitrogen fertilizer application rate

氮偏平衡在施氮量为 100 kg/hm² 时最高,此时以地上部总吸氮量、玉米穗吸氮量及籽粒吸氮量来计,氮偏平衡的值分别为 1.11、0.42 及 0.35。3 种计算方法所得到的氮偏平衡值均随施氮量的增加呈指数下降模式($P<0.05$),在施氮量为 400 kg/hm² 时降到最低,此时以地上部总吸氮量、玉米穗吸氮量及籽粒吸氮量计算所得的氮偏平衡值分别是 0.32、0.11 及 0.09。根据统计模型的计算结果,施氮量为

115 kg/hm² 时,以地上部总吸氮量计算所得的氮偏平衡值等于 1.0(图 5)。

2.5 磷利用效率对氮肥施用量的响应 未施氮肥的处理磷肥偏生产力为 24.69 kg/kg,且随氮肥施用量的增加而增加($P<0.05$),最大增加量为 4.25 kg/kg(渐近增长模型的参数 δ),增加幅度为 17.2%(图 6A)。籽粒磷利用效率和磷收获指数的变异范围分别为 30.1~34.3 kg/kg 和 20.2%~23.0%,

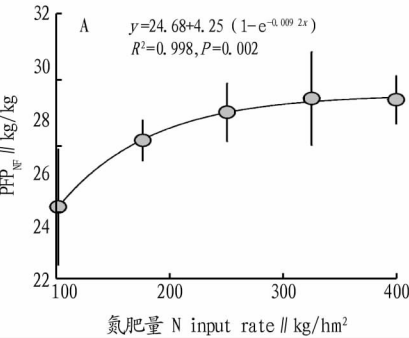


注:PNB,partial nitrogen balance,氮偏平衡。total,ear 及 grain 分别代表以地上部总吸氮量(白色圆圈)、玉米穗吸氮量(包括苞叶、籽粒及穗轴的总吸氮量,灰色圆圈)及籽粒吸氮量(黑色圆圈)计算所得的氮偏平衡。灰色参考线交叉点及坐标值代表以地上部总吸氮量来计算,氮偏平衡为 1.0 时的氮肥施用量。数据点的值为 $\pm 1s$ ($n=4$),部分数据点由于标准误差较小,导致其误差线被数据点遮盖

Note:Total, ear and grain respectively represented the partial nitrogen balance calculated by total nitrogen uptake at overground (white circle), nitrogen uptake by ear (including total nitrogen uptake by bracts, grains and cobs) (gray circle) and nitrogen uptake by grains (black circle). The intersection point and coordinate value of the gray reference line represented nitrogen application amount when the nitrogen partial equilibrium was 1.0($n=4$). And some of the data points are covered by the error lines due to small standard errors

图 5 甜玉米氮偏平衡对氮肥施用量的响应

Fig. 5 Response of partial nitrogen balance of sweet corn to nitrogen fertilizer application rate



注:数据点的值为 $\pm 1s$ ($n=4$)

Note:The value of data points was $\pm 1s$ ($n=4$)

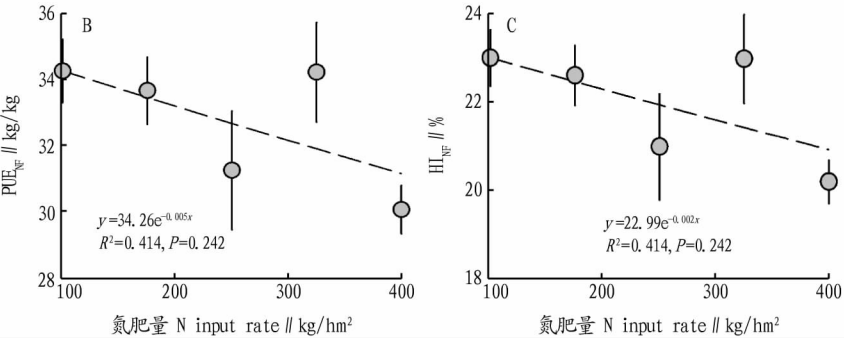


图 6 甜玉米磷利用效率对氮肥施用量的响应

Fig. 6 Response of phosphorus utilization efficiency to nitrogen fertilizer application rate

在过去 10 年间已引起广泛关注^[5,55-58]。当前,研究者普遍认为粮食作物生产达到产量潜力的 80%是未来二三十年的努力目标,实现这一目标不仅能保障全球粮食安全,而且有望通过技术手段实现农业生产的可持续发展^[55]。该研究中,根据鲜穗产量对氮肥施用量的响应模型,施用氮肥最多使甜玉米鲜穗产量达 20 525 kg/hm²,这基本能反映供试甜玉

二者均随氮肥施用量的增加呈下降趋势,下降幅度均为 12.2%,但二者与氮肥施用量关系的模型不显著(图 6B 和 C)。

3 讨论

3.1 甜玉米产量建成对氮肥的需求 该研究中,未施氮肥的处理甜玉米鲜穗产量为 17 510 kg/hm²,施用氮肥最多使产量增加 17.2%。这表明研究区域的土壤基础肥力很高(包括有机质和速效磷均处于较高水平),能够供应甜玉米所需氮素的 82.8%。一项在江苏 2 个甜玉米品种不施氮肥的处理鲜穗产量分别约为 8 000 和 9 000 kg/hm²^[53];在广东的一项研究中,不施氮肥的鲜穗产量为 8 500~10 000 kg/hm²^[54];在广东的另一项研究中,不施氮肥的鲜穗产量为 5 432 kg/hm²,氮肥施用量在 400 kg/hm² 左右时产量达到最高值,约为 18 031 kg/hm²,增产 232%^[34]。

与现有大多数研究结果相似,玉米产量随氮肥施用量的增加呈典型的渐近增长模式,表明随着施氮量的增加,单位质量氮肥的增产效果将减弱^[33,52,55]。但在不同研究中,达到最高产量所需的氮肥用量差异很大,在 112~607 kg/hm²^[21,29]。研究表明,甜玉米达到最高产量所需的氮肥施用量与该研究相近,约为 400 kg/hm²^[34-35]。但在江苏的一项研究中,氮肥施用量在 225 kg/hm² 时,2 个品种的甜玉米产量均达到最大值,分别约为 14 500 和 16 500 kg/hm²,之后进一步增施氮肥将导致产量下降^[53]。在广东的一项研究中,氮肥施用量为 300 kg/hm² 左右达到最高产量,此时的鲜穗产量约为 16 300 kg/hm²^[33]。此外,在一些追求高产的研究中,氮肥施用量最高可达 458~607 kg/hm²^[21]。在美国田纳西州(Tennessee, USA)的一项研究表明,氮肥施用量在 112 kg/hm² 时产量最高^[29]。

掌握作物的产量潜力,从而为今后提高作物产量提供管理目标,是粮食作物生产所关注的一个重要问题,这一问题

米品种在研究区域的产量潜力。因为一方面,试验期间的环境温湿度状况比较适宜,也未出现明显的病虫害害,这些外部条件不太可能成为产量形成的限制因子;另一方面,该研究的磷肥和钾肥施用量均为 100 kg/hm²(分别按 P₂O₅ 和 K₂O 计),二者的施用量及其施用方式应该能够满足玉米对磷肥和钾肥的需求,不太可能成为甜玉米产量对氮肥施用量响应的限制因

子^[52,57]。在现有研究中,玉米磷肥施用量在 45 ~ 135 kg/hm²^[22,53,59-61],钾肥施用量在 72 ~ 112 kg/hm²,仅个别研究可达 200 kg/hm²^[21-22,53,61]。

与已有的研究结果相比,该研究的产量潜力属于较高水平。如 2015 年,全国甜玉米试验区区试研究的平均产量仅为 13 392 kg/hm²^[1]。近几年报道的一些甜玉米高产新品种的产量在 14 782 ~ 19 200 kg/hm²^[19,62-65],仅个别研究中的甜玉米产量达 28 206 kg/hm²^[66]。除品种和气候条件差异外^[66],导致该研究甜玉米产量潜力较高的一个可能主要原因是种植密度较大,达 66 667 株/hm²。这一种植密度与普通玉米相比属于中等水平^[67],但在甜玉米中属于较高水平。种植密度是玉米高产研究的一项重要内容,通常情况下,在一定的范围内,增加种植密度能有效提高玉米产量^[22,68-71]。在现有的甜玉米种植研究中,种植密度大多在 45 000 ~ 60 000 株/hm²^[19,21,34,53,62-65],仅个别研究中的种植密度与该研究相近(达 67 500 株/hm²)^[72]。美国的甜玉米种植密度为 43 000 ~ 86 000 株/hm²,平均为 56 000 株/hm²^[73-74]。

3.2 甜玉米对氮的利用效率 氮肥偏生产力及氮肥农学利用效率在一定程度上能反映土壤的基础肥力及供氮水平,如果在较低施氮水平得到较高的氮肥偏生产力及较低的氮肥农学利用效率,则表明土壤基础肥力及供氮水平较高^[38]。该研究中,施氮量为 100 kg/hm² 的处理,以鲜穗产量所计的氮肥偏生产力和氮肥农学利用效率分别为 193 和 17.8 kg/kg。与相近施氮量的其他研究相比,该研究的氮肥偏生产力偏高,氮肥农学利用效率偏低。如在施氮量约为 100 kg/hm² 时,国内 4 项研究的氮肥偏生产力为 93 ~ 148 kg/kg,氮肥农学利用效率为 30 ~ 43 kg/kg^[33-34,36,66];北美 3 项研究的氮肥偏生产力为 72 ~ 100 kg/kg,氮肥农学利用效率为 22 ~ 57 kg/kg^[27,29,32]。因此,该研究氮肥偏生产力及氮肥农学利用效率的结果也表明,研究区域的土壤基础肥力及供氮能力处于较高水平。

该研究中,5 个施氮量处理的甜玉米氮肥回收率为 5.45% ~ 11.87%。在已有的文献中,其中 1 项研究的甜玉米氮肥回收率为 11.6% ~ 22.7%^[54],另 1 项研究的氮肥回收率在 15.9% ~ 31.6%^[34]。因此,氮肥回收率的结果表明,对于该研究所在的区域而言,即使施氮量为 100 kg/hm²,甜玉米也不能非常有效地吸收利用所施氮肥,同时也进一步表明研究区域的土壤供氮能力较强。

目前,对甜玉米氮收获指数的研究不仅较少,且计算方法也不统一,分别有用籽粒吸氮量和全穗(包括苞叶、籽粒、穗轴)吸氮量占地上部总吸氮量百分数 2 种方法计算。该研究的 5 个施氮量处理中,以籽粒吸氮量和全穗吸氮量计算所得的氮收获指数分别为 28.3% ~ 31.9% 和 34.8% ~ 39.2%,与其他研究相比,这一结果处于较低水平。如在广东的 1 项研究中,以籽粒吸氮量计算所得的氮收获指数高达 66% ~ 82%^[22];其他研究以全穗吸氮量计算所得的氮收获指数为 45% ~ 76%^[34,54,75]。因此,甜玉米地上部吸收的氮向籽粒及玉米穗转移的效率较低也是限制该研究氮肥利用效率提升

的一个重要因素。

与作物氮利用效率响应施氮量增长的典型模式一致,该研究的氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率、氮肥回收率、籽粒氮肥利用效率、籽粒氮利用效率及氮收获指数等各项氮利用效率指标均随施氮量的增加而降低(或呈降低趋势),表明随着氮肥施用量的增加,单位质量氮肥对甜玉米产量增加的促进作用减弱,同时有更大比例的氮不能被玉米吸收利用而存留在环境中^[27,29,32-34,36,52,54]。

与普通玉米相比,该研究中甜玉米氮利用效率的各项指标都明显偏低。如当前我国普通玉米氮肥偏生产力的平均水平为 40 kg/kg(平均施氮量为 266 kg/hm²),而该研究中以甜玉米籽粒干重计算所得的氮肥偏生产力最高为 27.20 kg/kg(施氮量为 100 kg/hm²)。在我国华北地区的一项研究表明,通过优化管理措施,河北、山东及河南(施氮量分别为 270、150 及 240 kg/hm²) 3 个省的普通玉米氮肥农学利用效率分别达 3.9、9.5 及 3.2 kg/kg,氮肥回收率分别达 18.0%、34.2% 及 20.1%^[61];而该研究中,甜玉米的氮肥农学利用效率和氮肥回收率最高分别为 2.51 kg/kg(施氮量为 100 kg/hm²) 和 11.87%(施氮量为 200 kg/hm²)。甜玉米氮利用效率严重偏低的一个重要原因是由甜玉米自身的商品特性所决定。由于甜玉米的收获期是在乳熟期,而普通玉米的收获期是在完熟期,乳熟期至完熟期是玉米籽粒干物质积累及氮元素向籽粒转移的重要时期,甜玉米在乳熟期进行收获必然降低其氮利用效率。如该研究中,甜玉米的收获指数(以籽粒干重计)和籽粒氮收获指数分别为 22.9% ~ 25.5% 和 28.3% ~ 31.9%,而普通玉米的收获指数和氮收获指数分别约为 50% 和 60%^[67,76];该研究甜玉米收获时的茎叶氮含量为 1.13%,而普通玉米收获时的茎叶氮含量仅为 0.80% 左右,后者下降到仅为前者的 71%^[67,76]。

3.3 甜玉米对磷的利用效率 该研究中,增施氮肥通过促进甜玉米生物量和籽粒产量的增加而增加对磷的吸收(图 3C 和 D),同时提升磷肥偏生产力(图 6A)。赵荣芳等^[22]在广东的 1 项研究中,甜玉米磷肥偏生产力(以籽粒干重计)为 13 ~ 15 kg/kg,籽粒磷利用效率为 99 ~ 130 kg/kg,磷收获指数为 48% ~ 54%。与其相比,该研究的磷肥偏生产力高 1 倍,籽粒磷利用效率和磷收获指数则分别仅为 25% ~ 36% 和 41% ~ 46%。与普通玉米相比,甜玉米的磷利用效率显著偏低,如 1 项在河北、河南、山东、山西 4 省的研究表明,在优化养分管理的条件下,磷肥偏生产力为 92 ~ 171 kg/kg^[61],另 1 项在华北地区的研究表明,普通玉米的磷收获指数约为 70%^[77]。

3.4 氮肥合理施用量的确定 包括氮肥管理在内的作物养分管理中,存在增施氮肥提高作物产量,但同时又必然降低氮利用效率这一矛盾,在权衡二者的过程中如何确定合适的氮肥施用量则是今后研究重点关注的问题^[52]。为实现对作物产量和养分利用效率的科学平衡,当前的普遍共识:以达到产量潜力的 80% 作为生产目标,此时有希望通过优化各种管理措施实现较高的养分利用效率^[52,57]。该研究中,如果以最高产量作为研究区域的甜玉米产量潜力,即使不施氮肥的

对照产量已经达到产量潜力的 86%。然而,这表明研究区域土壤的短期基础供氮能力高,对于集约化农业生产而言,不施氮肥是不可持续的生产方式。因此,用氮偏平衡可作为氮肥施用量的有效参考指标。在不进行秸秆还田的情况下,该研究以地上部吸氮总量计算所得的氮偏平衡值在施氮量为 115 kg/hm^2 时的氮平衡值等于 1.0,表明施氮量高于这一水平才有可能维持土壤的持续供氮能力,且此时的产量已达到产量潜力的 95%,进一步增施氮肥将显著降低产量增加对氮肥的响应及氮利用效率。因此, 115 kg/hm^2 左右是研究区域甜玉米施氮量的参考值。

4 结论

该研究结果表明,研究区域的土壤基础肥力较高,导致氮肥在较低施氮量时有较高的氮肥偏生产力,以及较低的氮肥农学利用效率、氮肥回收率、籽粒氮肥利用效率。增施氮肥能提高甜玉米对磷的利用效率。 115 kg/hm^2 左右是研究区域甜玉米施氮量的合理参考值。与普通玉米及北美地区的甜玉米相比,当前我国的甜玉米不仅施氮量偏高,且氮利用效率严重偏低。因此,亟需对甜玉米的氮肥管理进行更加广泛深入的研究。

参考文献

- [1] 史亚兴,张保民. 鲜食玉米的发展与前景——探索我国甜玉米的北方市场[J]. 蔬菜,2016(12):1-6.
- [2] 孙丽娟,赵志宏,贺娟,等. 我国鲜食玉米相关标准问题分析及对策[J]. 作物杂志,2019(2):46-50.
- [3] 中华人民共和国农业部. 全国种植业结构调整规划(2016-2020年)[Z]. 2016.
- [4] SINCLAIR T R, HORIE T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A review[J]. Crop science, 1989, 29(1): 90-98.
- [5] MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. Nature, 2012, 490(7419): 254-257.
- [6] CIAMPITTI I A, VYN T J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review[J]. Field crops research, 2012, 133: 48-67.
- [7] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [8] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [9] 蔡祖聪,颜晓元,朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 1-6.
- [10] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature, 2018, 555: 363-366.
- [11] ZHANG X, DAVIDSON E A, MAUZERALL D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. Nature, 2015, 528(7580): 51-59.
- [12] ROBERTSON G P, VITOUSEK P M. Nitrogen in agriculture: Balancing the cost of an essential resource[J]. Annual review of environment and resources, 2009, 34(1): 97-125.
- [13] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [14] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [15] MENG Q F, CUI Z L, YANG H S, et al. Establishing high-yielding maize system for sustainable intensification in China[J]. Advances in agronomy, 2018, 148: 85-109.
- [16] FAGERIA N K, BALIGAR V C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants[J]. Advances in agronomy, 2005, 88: 97-185.
- [17] CHEN X P, CUI Z L, VITOUSEK P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2011, 108(16): 6399-6404.
- [18] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.

- [19] 赵俊立,常海滨,李宁,等. 黄冈市甜玉米新品种比较试验[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(14): 15-18.
- [20] 余才良,朱晋,刘昔猛,等. 春季栽培甜玉米品种鄂甜玉 6 号的种植密度筛选试验[J]. 长江蔬菜, 2014(18): 14-16.
- [21] 王慧,潘玲玲,孙大鹏,等. 不同种植密度对超甜玉米产量及相关性状的影响[J]. 上海农业学报, 2015, 31(2): 98-101.
- [22] 赵荣芳,文天祥,陈惠阳,等. 不同种植密度下甜玉米氮磷钾养分吸收量差异研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21): 43-46.
- [23] 刘培,邵宇婷,王志国,等. 减氮对华南地区甜玉米/大豆间作系统产量稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1332-1343.
- [24] 张敏. 云南禄丰县鲜食甜玉米早熟栽培技术[J]. 长江蔬菜, 2011(17): 18-19.
- [25] 谢彦敏. 特用甜玉米制种高产栽培技术[J]. 种子世界, 2016(10): 50-51.
- [26] 李自卫,冯绍卫,肖卫华,等. 德宏州鲜食甜玉米种植技术[J]. 农业科技通讯, 2019(3): 263-264.
- [27] WOODRUFF L K, HABTESELASSIE M Y, NORTON J M, et al. Yield and nutrient dynamics in conventional and organic sweet corn production systems[J]. Agronomy journal, 2019, 111(5): 2395-2403.
- [28] VAN EERD L L. Nitrogen dynamics and yields of fresh bean and sweet corn with different cover crops and planting dates[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2018, 111(1): 33-46.
- [29] MULLINS C A, STRAW R A, PITT B, JR, et al. Response of selected sweet corn cultivars to nitrogen fertilization[J]. HortTechnology, 1999, 9(1): 32-35.
- [30] MORRIS T F, HAMILTON G, HARNEY S. Optimum plant population for fresh-market sweet corn in the Northeastern United States[J]. HortTechnology, 2000, 10(2): 331-336.
- [31] MA B L, SUBEDI K D, ZHANG T Q. Pre-sidedress nitrate test and other crop-based indicators for fresh market and processing sweet corn[J]. Agronomy journal, 2007, 99(1): 174-183.
- [32] ETEMADI F, HASHEMI M, ZANDVAKILI O, et al. Nitrogen contribution from winter-killed faba bean cover crop to spring-sown sweet corn in conventional and no-till systems[J]. Agronomy journal, 2018, 110(2): 455-462.
- [33] 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.
- [34] 高磊,李余良,李武,等. 不同施氮水平对南方甜玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1215-1224.
- [35] 张广峰,卢保红,魏荣业,等. 不同施肥量与密度对超甜玉米新品种“晋超甜 1 号”产量及农艺性状的影响[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(5): 13-15, 23.
- [36] 余小玲,刘建军,孙超,等. 不同氮肥施用量对甜玉米农艺性状与产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2017(4): 105-107.
- [37] DOBERMANN A. Nutrient use efficiency-measurement and management [M]//International Fertilizer Industry Association. Fertilizer best management practices: General principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. Paris, France: International Fertilizer Industry Association, 2007: 1-28.
- [38] FIXEN P, BRENTUP F, BRUULSEMA T W, et al. Nutrient/fertilizer use efficiency: Measurement, current situation and trends [M]//DRECHSEL P Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), International Potash Institute (IPI), 2015: 8-38.
- [39] CASSMAN K G, GINES G C, DIZON M A, et al. Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: Contributions from indigenous and applied nitrogen[J]. Field crops research, 1996, 47(1): 1-12.
- [40] SALEHI M H, BENI O H, HARCHEGANI H B, et al. Refining soil organic matter determination by loss-on-ignition[J]. Pedosphere, 2011, 21(4): 473-482.
- [41] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [42] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准 植物中氮、磷、钾的测定: NY/T 2017—2011[S]. 北京:中国农业出版社, 2011.
- [43] HÜTSCH B W, SCHUBERT S. Harvest index of maize (*Zea mays* L.): Are there possibilities for improvement? [J]. Advances in agronomy, 2017, 146: 37-82.
- [44] GAO Q, LI C L, FENG G Z, et al. Understanding yield response to nitrogen to achieve high yield and high nitrogen use efficiency in rainfed corn

- [J]. *Agronomy journal*, 2012, 104(1): 165–168.
- [45] WANG S, YANG L S, SU M M, et al. Increasing the agricultural, environmental and economic benefits of farming based on suitable crop rotations and optimum fertilizer applications[J]. *Field crops research*, 2019, 240: 78–85.
- [46] HALVORSON A D, BARTOLO M E. Nitrogen source and rate effects on irrigated corn yields and nitrogen-use efficiency[J]. *Agronomy journal*, 2014, 106(2): 681–693.
- [47] FERNANDEZ J A, DEBRUIN J, MESSINA C D, et al. Late-season nitrogen fertilization on maize yield: A meta-analysis[J/OL]. *Field crops research*, 2020, 247[2020-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107583>.
- [48] RAUN W R, JOHNSON G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. *Agronomy journal*, 1999, 91(3): 357–363.
- [49] ANDREWS J S, SANDERS Z P, CABRERA M L, et al. Nitrogen dynamics in living mulch and annual cover crop corn production systems[J]. *Agronomy journal*, 2018, 110(4): 1309–1317.
- [50] GODARD C, ROGER-ESTRADE J, JAYET P A, et al. Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU[J]. *Agricultural systems*, 2008, 97(1): 68–82.
- [51] ARCHONTOULIS S V, MIGUEZ F E. Nonlinear regression models and applications in agricultural research[J]. *Agronomy journal*, 2015, 107(2): 786–798.
- [52] CASSMAN K G, DOBERMANN A, WALTERS D T, et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality[J]. *Annual review of environment and resources*, 2003, 28(1): 315–358.
- [53] 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): 45–54.
- [54] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 等. 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 622–631.
- [55] CASSMAN K G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 1999, 96(11): 5952–5959.
- [56] CUI Z L, YUE S C, WANG G L, et al. Closing the yield gap could reduce projected greenhouse gas emissions: A case study of maize production in China[J]. *Global change biology*, 2013, 19(8): 2467–2477.
- [57] LOBELL D B, CASSMAN K G, FIELD C B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes[J]. *Annual review of environment and resources*, 2009, 34(1): 179–204.
- [58] XU X P, LIU X Y, HE P, et al. Yield gap, indigenous nutrient supply and nutrient use efficiency for maize in China[J]. *PLoS One*, 2015, 10: 1–12.
- [59] YAN P, PAN J X, ZHANG W J, et al. A high plant density reduces the ability of maize to use soil nitrogen[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): 1–12.
- [60] WANG M, WANG L C, CUI Z L, et al. Closing the yield gap and achieving high N use efficiency and low apparent N losses[J]. *Field crops research*, 2017, 209: 39–46.
- [61] HE P, LI S T, JIN J Y, et al. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China[J]. *Agronomy journal*, 2009, 101(6): 1489–1496.
- [62] 吴爱梅, 黎杰强. 甜玉米新品种‘华旺甜7号’[J]. *园艺学报*, 2018, 45(4): 809–810.
- [63] 朱运峰, 胡俊华, 朱晋, 等. 甜玉米新品种‘博宝’[J]. *园艺学报*, 2019, 46(52): 2826–2827.
- [64] 闫建宾, 邵林生, 王俊花, 等. 甜玉米新品种华耐甜玉 782 的选育[J]. *中国蔬菜*, 2019(8): 82–85.
- [65] 杨琇枫, 冯空, 和凤美, 等. 控制超甜玉米穗数对产量及主要穗部性状的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(1): 57–58.
- [66] 裴志超, 佟国香, 周继华, 等. 北京市甜玉米新品种形态产量和品质指标差异及其相关性分析[J]. *中国种业*, 2018(8): 46–51.
- [67] YAN P, YUE S C, MENG Q F, et al. An understanding of the accumulation of biomass and nitrogen is benefit for Chinese maize production[J]. *Agronomy journal*, 2016, 108: 895–904.
- [68] WILLIAMS M M, II. Reproductive sink of sweet corn in response to plant density and hybrid[J]. *HortScience*, 2018, 53(1): 28–32.
- [69] TOKATLIDIS I S, KOUTROUBAS S D. A review of maize hybrids’ dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability[J]. *Field crops research*, 2004, 88: 103–114.
- [70] 黄忠阳, 陈舜权, 胡俏强, 等. 种植密度对超甜玉米晶甜 18 主要农艺性状及产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(12): 106–107.
- [71] 张广峰, 卢保红, 魏荣业, 等. 超甜玉米新品种“晋超甜 1 号”的高效栽培技术的研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(31): 67–69.
- [72] GUAN Y J, HU J, WANG Z F, et al. Time series regression analysis between changes in kernel size and seed vigor during developmental stage of *sh₂ sweet corn (Zea mays L.)* seeds[J]. *Scientia horticulturae*, 2013, 154: 25–30.
- [73] WILLIAMS M M. Agronomics and economics of plant population density on processing sweet corn[J]. *Field crops research*, 2012, 128: 55–61.
- [74] DHALIWAL D S, WILLIAMS M M, II. Optimum plant density for crowding stress tolerant processing sweet corn[J]. *PLoS One*, 2019, 14(9): 1–14.
- [75] CONGREVES K A, VAN EERD L L. Nitrogen cycling and management in intensive horticultural systems[J]. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 2015, 102(3): 299–318.
- [76] HOU P, GAO Q, XIE R Z, et al. Grain yields in relation to N requirement: Optimizing nitrogen management for spring maize grown in China[J]. *Field crops research*, 2012, 129: 1–6.
- [77] WU L Q, CUI Z L, CHEN X P, et al. Change in phosphorus requirement with increasing grain yield for Chinese maize production[J]. *Field crops research*, 2015, 180: 216–220.

(上接第 140 页)

参考文献

- [1] 付丹妮, 赵铂锤, 陈彦, 等. 东北稻田野慈姑对吡啶磺隆抗性研究[J]. *中国植保导刊*, 2018(1): 17–23.
- [2] 陈丽丽, 何付丽, 范丹丹, 等. 黑龙江省野慈姑对吡啶磺隆的敏感性测定[J]. *植物保护*, 2013, 39(6): 120–123.
- [3] 吴明根, 吴松权, 朴仁哲, 等. 磺酰脲类除草剂对抗、感性慈姑 ALS 活性的影响[J]. *农药*, 2007, 46(10): 701–703.
- [4] 吕晓曦, 赵长山, 李庚, 等. 黑龙江省稻田野慈姑对丙嗪磺隆抗性相关研究[J]. *植物保护*, 2019, 45(2): 174–177.
- [5] 植保无人机山东“首飞”[J]. *蔬菜*, 2012(12): 67–68.
- [6] 田新湖, 陈益生, 肖灿荣, 等. 植保无人机施药对玉米草地贪夜蛾的防治效果[J]. *农药科学与管理*, 2020, 41(1): 48–53.
- [7] 刘慧强, 董雪娟, 费朝品, 等. 小型植保无人机施药防治稻飞虱的田间效果[J]. *中国植保导刊*, 2014, 34(S1): 45–56.
- [8] 荀栋, 张姚, 何可佳, 等. TH80-1 植保无人机施药对水稻主要病虫害的防治效果研究[J]. *湖南农业科学*, 2015(8): 39–42.
- [9] 顾伟, 薛新宇, 杨林. 植保无人机行业现状和发展建议[J]. *农业工程*, 2019, 9(10): 18–23.
- [10] 李运超. 无人机不同喷液量对大豆田杂草的防治效果[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(14): 137–138.
- [11] 张世强. 无人机防治高粱田杂草防效研究[J]. *农业科技通讯*, 2019(4): 176–177.
- [12] 邵国民, 骆琴, 何信富, 等. 植保无人机防除水稻直播田杂草效果评价[J]. *中国稻米*, 2019, 25(6): 89–92.
- [13] 朱德慧. 植保无人机在麦田化学除草上的应用效果试验[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(12): 74–75.