

北疆滴灌玉米施氮量估算及减氮增铵效应

夏文豪¹, 刘涛¹, 唐诚¹, 王进², 褚贵新¹

(1. 石河子大学农学院, 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003;

2. 乌兰乌苏农业气象试验站, 新疆 石河子 832003)

摘要: 根据产量与施氮量函数模型计算滴灌玉米施氮量, 并通过减氮增铵改善滴灌玉米氮素营养, 探索滴灌水氮一体化下优化施氮策略。2013—2014 年两年田间试验表明: 玉米产量、干物质量及氮素吸收量均随施氮量的增加显著升高, 当施氮量大于 $435 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 则呈下降趋势, 表现为 $N_{435} > N_{540} > N_{330} > N_{225} > N_0$; 减氮增铵处理的上述指标表现为 $N_{375} + \text{CP} > N_{375} > 75\% N_{375} + \text{CP} > N_0$, 当施氮量在 $330 \sim 435 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 不同处理的玉米氮素吸收量与氮素收获指数差异均不显著, 说明在此范围内减氮增铵对玉米干物质积累、玉米氮素营养及产量无负面影响; 根据产量与施氮量间函数关系可得天山北坡滴灌玉米经济最佳产量 $17\,049 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下的施氮量为 $402.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 施氮和增铵处理可显著增加玉米穗粒数、单穗重; 氮肥偏生产力和氮肥利用率均随施氮量增加而下降, 氮肥利用率表现为 $N_{225}(46.6\%) > N_{330}(45.8\%) > N_{435}(43.6\%) > N_{540}(34.6\%)$; 滴灌玉米氮肥偏生产力和氮肥利用率均以 $75\% N_{375} + \text{CP}$ 处理最高, 分别比施氮量在 $330 \sim 435 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间其他处理的平均值增加了 31.4%、27.9% 和 5.8%、6.4%, 说明减氮增铵可显著提高滴灌玉米氮素养分利用效率; 天山北坡滴灌玉米优化施氮量为 $402.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 通过施用硝化抑制剂与尿素水氮一体化分次施入可实现减氮 $93.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 并显著提高氮肥利用率。

关键词: 水氮一体化; 施氮量; 增铵营养; 氮肥利用率; 滴灌玉米

中图分类号: S143.1; S143.1+6 文献标志码: A

N recommendation and decreasing usage of nitrogen and enhanced ammonium for maize under drip irrigation condition

XIA Wen-hao¹, LIU Tao¹, TANG Cheng¹, WANG Jin², CHU Gui-xin¹

(1. College of Agronomy, Shihezi University/Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture of Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2. Wulanusu Agro-meteorological Experiment Station, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: In order to put forward an optimizing N fertilizer application strategy that achieves higher maize production as well as N utilization efficiency synchronously, two-year field plot experiment was carried out in crop growth season of 2013 and 2014. The amount of N was calculated according to the response curve of corn yield to N rates. Meanwhile, the influence of enhanced ammonium nutrition on maize dry weight accumulation, N uptake and maize production were also determined under fertigation condition. Results showed that maize yield, dry matter quantity and N uptake were significantly increased with nitrogen rate increasing from $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $435 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and then decreased when N fertilizer application rate beyond $540 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Generally, these traits variation order as $N_{435} > N_{540} > N_{330} > N_{225} > N_0$. Furthermore, based on the obtained reasonable N recommendation rate in 2013, nitrapyrin was added with urea to regulate the supply ratio of $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (i.e. enhanced ammonium nutrition), it was found that all above mentioned traits variation trend as $N_{375} + \text{CP} > N_{375} > 75\% N_{375} + \text{CP} > N_0$ in 2014. When nitrogen rate was at $330 \sim 435 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, there were no significant differences across all N treatments for both maize N uptake and N harvest index, indicating no negative influence either on dry mater, N uptake or maize yield even if the N recommendation rate reduced by 25% and plus nitrapyrin. According to the response curve of maize yield to N application rates, the optimizing economic yield of 17 049

收稿日期: 2016-01-10

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD42B02)

作者简介: 夏文豪(1991—), 男, 新疆阿克苏人, 硕士, 主要从事作物养分资源高效利用研究。E-mail: xiawenhaohh@163.com

通信作者: 褚贵新(1969—), 男, 新疆霍城人, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养生理生态研究。E-mail: chuguixinshzu@163.com

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ was achieved at N application rate of $402.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. Moreover, Grains per spike and single panicle weight were significantly increased by N fertilizer and nitrapyrin amendment. N fertilizer partial productivity and N using efficiency were decreased with increasing N application rates, and the order of nitrogen use efficiency in deferent treatments was $\text{N}_{225}(46.6\%) > \text{N}_{330}(45.8\%) > \text{N}_{435}(43.6\%) > \text{N}_{540}(34.6\%)$. The greatest values for N partial productivity and N using efficiency were observed for 75% N_{375} + CP treatment, and these increased by 31.4% and 27.9% for N partial productivity, increased by 5.8% and 6.4% for N using efficiency, respectively, compared with the N application rates ranges from 330 ~ 435 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, supporting that maize nitrogen use efficiency could be significantly improved by reducing N recommendation rate by 25% coupling with enhancing ammonium via nitrapyrin in drip irrigated condition. Overall, the optimizing N recommendation rate was $402.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in drip irrigation agriculture in the area of northern Tianshan mountain. Moreover, through urea in combination with nitrapyrin repeated supply, significantly higher N using efficiency could be obtained and the amount of $93.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ could be saved, and thus, this fertilization pattern could be regarded as an optimizing strategy for N management in fertigation system.

Keywords: water and nitrogen integrated management; N application rate; decreasing usage of nitrogen and enhanced ammonium; nitrogen use efficiency; maize under drip irrigation

作为最普遍应用的农业化学品,氮肥在改善作物产量与品质方面发挥重要作用^[1]。然而,近年来氮肥过量施用也是不争事实。过量施氮不仅大大增加了生产投入,降低了肥料利用效率,同时也带来了一系列环境问题^[2-3]。据 FAO 统计数据,到 2013 年中国已经成为全球化肥消费排名第一的国家。其中氮肥用量已经占全世界氮肥用量的 35% 以上^[4],这已引起各界深切关注。2015 年初农业部制订了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》将在全国范围内启动实施化肥、农药使用量零增长行动,中国农业“减肥”势在必行^[5]。

滴灌水氮一体化施肥技术可使作物水分利用率和氮肥利用率由传统灌溉施肥条件下的 $1.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 30% ~ 35% 分别提高到 $1.3 \sim 1.65 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 47.8% ~ 53.2%^[6-8]。虽然滴灌显著提高了氮肥利用率,但近 20 年以来滴灌施肥量并未因氮肥利用率的升高而减少。如 19 世纪 80 年代玉米在传统淹灌条件下施氮量为 $141.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,到了 90 年代施氮量为 $192.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而到了 21 世纪大部分滴灌条件下的施氮量高达 $238.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[9]。赵靛^[10]研究确定了北疆石河子垦区滴灌高产玉米适宜施氮量为 $300 \sim 375 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,明显高于国际上普遍认为的化肥警戒上限 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[11]。增铵营养有利于维持土壤较高的铵态氮,改善作物氮素营养和提高氮肥吸收利用效率^[12-13]。Gentry^[14]、Heberer^[15] 和 Schroder^[16] 等研究表明,在整个生长期维持 EAN (增铵营养)比单一 NO_3^- 营养可提高玉米籽粒产量 10% ~ 11%。田秀英和王正银^[17]研究发现,尿素全量配施氮肥增效剂,能显著提高氮素的农学效率和

氮素利用率。利用氮肥增效剂与减量尿素配施可视为促进作物高产与节肥增效的施肥策略。

玉米作为我国第一大粮食作物^[18],其高产潜力挖掘可为我国保障粮食安全、饲料安全等方面发挥重要作用。本研究在新疆北部绿洲干旱区高密度栽培条件下 ($\geq 105\ 000$ 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$),于 2013—2014 年进行了两年的田间试验,研究了水氮一体化条件对玉米干物质积累、氮素吸收及产量的影响,并在此基础上通过减氮增铵 (减施氮肥同时配施硝化抑制剂/CP)优化滴灌玉米施氮策略,达到滴灌玉米高产稳产和兼顾提高玉米养分利用效率的目的,为新疆滴灌玉米优化施氮策略提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013—2014 年在新疆沙湾县乌兰乌苏气象站进行 ($44^\circ 17' \text{N}$, $85^\circ 51' \text{E}$),平均海拔 450 m,年降雨量约为 187.7 mm。试验区土壤类型为灌溉灰漠土 (Calcaric Fluvisol),质地为壤土,耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤 pH 8.52,有机质 $18.73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $23.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $340.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试作物为玉米,品种为春玉米“良玉 66 号”。

1.2 田间试验设计

(1) 采用滴灌小区试验,2013 年试验设计 5 个氮肥 (N) 用量水平,分别为 N_0 ($0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、 N_{225} ($225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、 N_{330} ($330 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、 N_{435} ($435 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、 N_{540} ($540 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),共 5 个处理,3 次重复,田间随机区组排列。供试氮肥为尿素 (含 N 质量分数 46.6%),磷肥为磷酸一铵 (含 N 质量分数 12%; 含

P₂O₅ 质量分数 61%), 钾肥为硫酸钾(含 K₂O 质量分数 51%)。

4 月 27—28 日播种, 5 月 5—6 日出苗。40 + 80 cm 宽窄行覆膜种植, 膜宽 70 cm, 膜间距 60 cm, 株距 14.5 cm, 1 膜 2 行, 铺设 1 条滴灌带, 种植密度为 114 945 株·hm⁻²。每小区 4 膜, 小区面积 38.4 m²

(4.8 m × 8.0 m)。灌水量为 6 750 m³·hm⁻², 磷肥用量为 P₂O₅ 90 kg·hm⁻², 钾肥用量为 K₂O 90 kg·hm⁻², 氮肥、磷肥和钾肥全部作追肥随水滴施, 生育期内滴水 10 次, 施肥 8 次, 各生育期田间管理措施等同当地大田。玉米不同生育期具体滴水施肥分配比例如表 1 所示。

表 1 滴灌玉米不同生育时期水肥分配比例

Table 1 Proportion of water and urea distribution during different maize growth stages

序号 Serial number	生育期 Growth stage	出苗后天数 Days after seedling emergence/d	滴水量 Irrigation amount/%	施氮量 N rate /%	P ₂ O ₅ /%	K ₂ O /%
1	苗期 Seedling stage	50	13	15	10	20
2	拔节期 Jointing stage	60	13	10	15	20
3	小喇叭口期 Small bell mouth stage	68	13	15	15	20
4	大喇叭口期 Big bell mouth stage	75	12	15	15	20
5	抽雄期 Tassel emerge stage	82	12	15	12	5
6	吐丝期 Silking stage	90	10	12	13	5
7	灌浆期 Filling stage	100	10	10	10	5
8	乳熟期 Milk-ripe stage	110	8	8	10	5
9	蜡熟期 Wax ripeness stage	120	6	0	0	0
10	完熟期 Complete ripeness stage	135	3	0	0	0

(2) 2014 年的滴灌小区试验设置: N₀(CK)、N₃₇₅(当地滴灌高产玉米常规施氮量)、75% N₃₇₅ + CP(减氮增铵处理, 即减少(375 × 25%) kg·hm⁻²纯氮, 同时加入硝化抑制剂)、N₃₇₅ + CP。CP 即硝化抑制剂, 是氯甲基吡啶乳油(Nitrapyrin, 2 - 氯 - 6 - (三氯甲基)吡啶有效含量为 24%), 由浙江奥复托公司提供。氯甲基吡啶用量为纯氮用量的 1%。各处理重复 3 次, 随机区组排列。灌水量为 6 750 m³·hm⁻², 磷肥用量为 P₂O₅ 90 kg·hm⁻², 钾肥用量为 K₂O 90 kg·hm⁻²。滴水施肥方案和大田管理措施等同于 2013 年试验设计。4 月 25 日播种, 10 月 2 日收获。

1.3 样品采集与测定

分别在玉米拔节期、抽雄吐丝期、籽粒形成期、乳熟期、成熟期滴水施肥前取植株样, 每小区取 3 株, 测定植株干物质重(105℃杀青 30 min, 再以 75℃烘至恒重, 称干重), 将以上植株干物质样品粉碎后用 H₂SO₄ - H₂O₂ 消解, 用海能 K9840 半自动凯氏定氮仪测定玉米植株全氮含量。在成熟期取样进行考种, 并实收测定小区产量。

1.4 计算方法

氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹) = 施氮区籽粒产量/施氮量 (1)

氮肥利用率(%) = (施氮区氮素吸收量 - 无氮区氮素吸收量)/施氮量 × 100% (2)

1.5 数据分析

数据的统计分析和绘图运用 Excel 2013、SPSS 20.0。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)及 LSD 多重比较法分析处理间差异显著性, 均用观测值进行变量相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理玉米干物质积累动态变化

由图 1 可知, 2013 年玉米干物质随氮素水平增高而增加, 各施氮处理间差异随生育期不断增大, 其中以 N₄₃₅处理干物质积累量最大, 继续增大氮肥施用量反而不利于干物质积累。在灌浆期(DAE 80 d)各施氮处理干物质积累量较对照分别提高了 17.6%(225 kg·hm⁻²)、29.6%(330 kg·hm⁻²)、55.0%(435 kg·hm⁻²)、44.3%(540 kg·hm⁻²)。成熟期(DAE 129 d)各施氮处理干物质积累量分别比对照提高了 19.9%(225 kg·hm⁻²)、35.8%(330 kg·hm⁻²)、51.2%(435 kg·hm⁻²)、44.8%(540 kg·hm⁻²)。用 Logistic 方程拟合, 不同氮肥用量下干物质最大积累速率出现的时间为 78.3 ~ 79.8 d, 施氮量 435 kg·hm⁻²(N₄₃₅)处理的干物质最大积累速率出现时间最早(DAE 78.3 d), 较其他施氮处理提前 0.5 ~ 3.1 d。各施氮处理干物质快速增长持续期(Δt)随施氮量的增加而延长, 以 N₅₄₀处理持续时间最长。

2014 年 3 个处理 N_{375} 、75% N_{375} + CP 和 N_{375} + CP 的干物质积累量均显著 ($P < 0.05$) 高于 N_0 处理, 各施氮处理之间差异不显著。成熟期 N_{375} 、75% N_{375} + CP 和 N_{375} + CP 处理的玉米干物质积累量 (DAE 140 d) 分别比 N_0 处理增加了 8 288、7 205 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 10 372 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增幅分别为 28.0%、24.3% 和 35.0%。用

Logistic 方程拟合各个处理干物质最大积累量顺序为 N_{375} + CP > N_{375} > 75% N_{375} + CP > N_0 , 不同施氮增铵处理以 N_{375} + CP 处理的干物质积累量和最大积累速率最高, 分别为 41 845 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 785.9 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。表明增加施氮量和增铵有益于延长玉米的旺盛生长期。

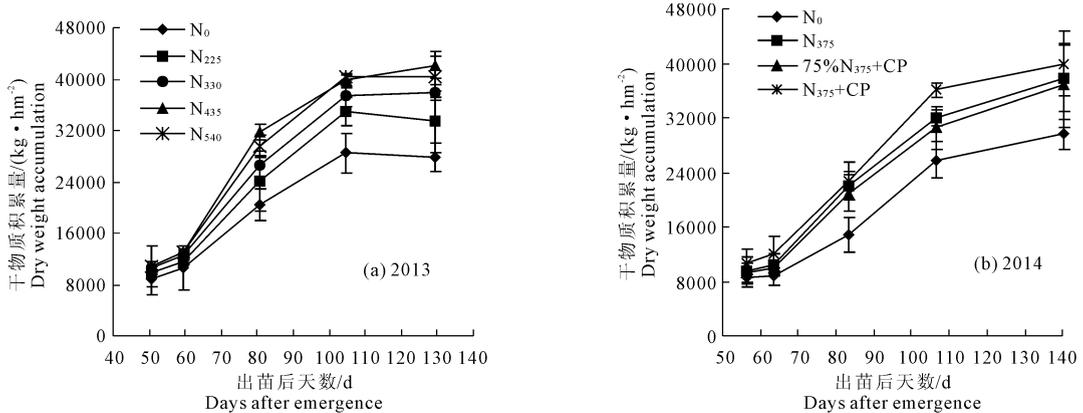


图 1 不同施氮处理下玉米干物质积累动态

Fig. 1 Dynamics of biomass production of maize in different N treatments

N_0 : 不施氮肥对照; N_{225} : 每公顷施 N 225 kg; N_{330} : 每公顷施 N 330 kg; N_{435} : 每公顷施 N 435 kg; N_{540} : 每公顷施 N 540 kg; N_{375} : 每公顷施 N 375 kg; 75% N_{375} + CP: 每公顷施 N 281.3 kg, 同时配施硝化抑制剂; N_{375} + CP: 每公顷施 N 375 kg, 同时配施硝化抑制剂。下同。

N_0 : no-fertilization (CK); N_{225} : chemical fertilization of 225 kg N per hectare; N_{330} : chemical fertilization of 330 kg N per hectare; N_{435} : chemical fertilization of 435 kg N per hectare; N_{540} : chemical fertilization of 540 kg N per hectare; N_{375} : chemical fertilization of 375 kg N per hectare; 75% N_{375} + CP: chemical fertilization of 281.3 kg N per hectare, and combined application of nitrapyrin; N_{375} + CP: chemical fertilization of 375 kg N per hectare, and combined application of nitrapyrin. The same below.

2.2 不同施氮处理对玉米氮素营养与收获指数的影响

2.2.1 不同生育时期玉米氮素积累量的变化 从图(2a)可以看出, 抽雄吐丝期和乳熟期的玉米氮素积累量均表现为 $N_{435} > N_{540} > N_{330} > N_{225} > N_0$, 两个时期均以 N_{435} 处理氮素积累量最高, 分别达到 229 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 437 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。乳熟期各施肥处理的氮素积累量较 CK 分别提高了 30.2% ($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、47.1% ($330 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、69.6% ($435 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、66.6% ($540 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N_0 、 N_{225} 、 N_{330} 、 N_{435} 处理间差异显著 ($P < 0.05$), 但 N_{435} 和 N_{540} 处理的氮素积累量差异不显著。从图(2b)可知, 玉米抽雄吐丝期和乳熟期各施氮增铵处理的氮素积累量均表现为 N_{375} + CP > N_{375} > 75% N_{375} + CP > N_0 。如抽雄吐丝期各施肥处理的氮素积累量较 CK 分别提高了 35.0% (N_{375})、21.0% (75% N_{375} + CP) 和 42.8% (N_{375} + CP), 但 75% N_{375} + CP 与 N_{375} 处理的氮素积累量并无明显差异。在 2013 年的基础上, 经过减氮增铵 (75% N_{375} + CP) 处理后植株氮素积累量比 N_{375} 处理有所下降, 但差异不显著。表明在优化施氮量 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 基础上, 减氮 25% ($93.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 不会显著影响玉米氮素营

养。

2.2.2 不同施氮处理对玉米收获指数和氮素收获指数的影响 2013 年玉米收获指数变化范围为 49.1% ~ 52.7%, 且随氮素水平表现为 $N_{330} > N_{435} > N_{540} > N_{225} > N_0$ (图 3a), N_{540} 、 N_{435} 、 N_{330} 处理间的差异不显著。2014 年各处理收获指数表现为 N_{375} + CP > N_{375} > 75% N_{375} + CP > N_0 , 变化范围为 48.8% ~ 51.9%。各施氮增铵处理的收获指数相比于对照分别提高了 2.8% (N_{375})、2.2% (75% N_{375} + CP) 和 3.1% (N_{375} + CP), 减氮增铵 (75% N_{375} + CP) 处理的收获指数低于 N_{375} 处理, 但处理间无显著性差异, 说明减氮增铵不会降低玉米的收获指数。玉米氮素收获指数随氮素水平升高先增加后降低 (图 3b)。2013 年各氮肥处理的氮素收获指数变化范围为 58.6% ~ 62.6%, 且表现为 $N_{435} > N_{330} > N_{540} > N_{225} > N_0$ 。 N_{435} 处理氮素收获指数达到最高 62.6%。2014 年玉米各施氮增铵处理下氮素收获指数大小表现为 N_{375} + CP > N_{375} ≈ 75% N_{375} + CP > N_0 (图 3b), 变化范围为 58.4% ~ 62.5%。合理增加施氮量可提高玉米收获指数和氮素收获指数, 过量施用氮肥则降低收获指数和氮素收获指数。

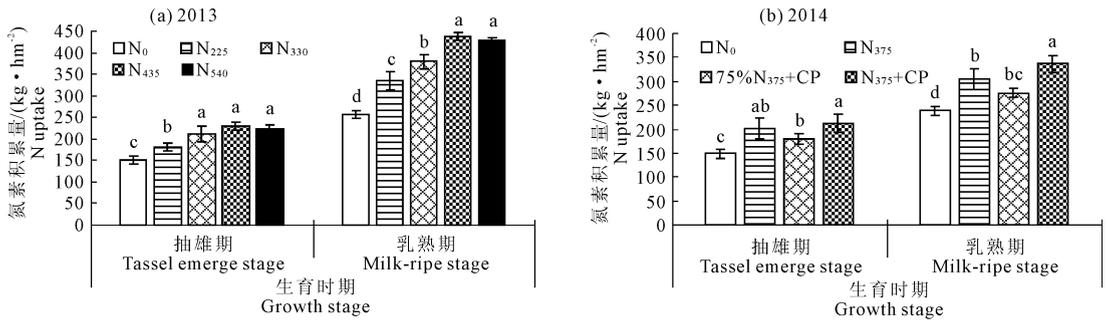


图 2 不同施氮处理对玉米氮素积累量的影响

Fig.2 The influence of different N treatments on N accumulation of maize

注:图中不同字母表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$),下同。

Note: Different letters above the columns indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same below.

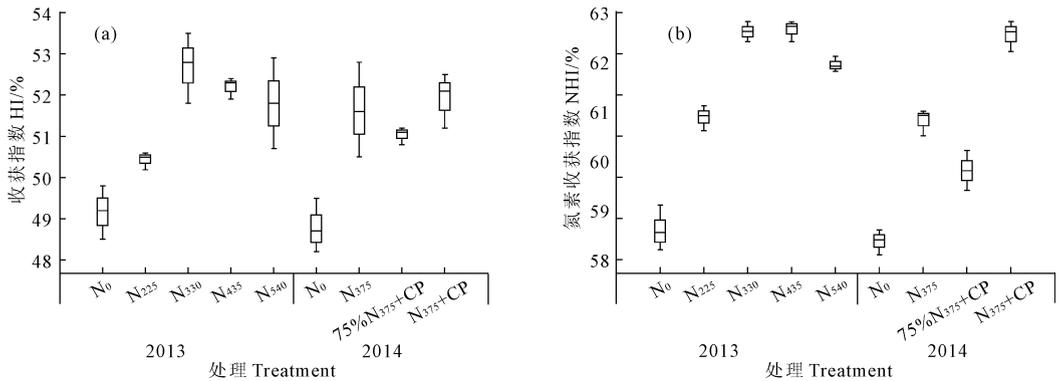


图 3 不同施氮处理对玉米收获指数 (HI) 及氮素收获指数 (NHI) 的影响

Fig.3 Effects of different N treatments on harvest index (HI) and nitrogen harvest index (NHI) of maize

2.3 施氮量和增铵营养对玉米产量的影响

2013 年玉米产量随施氮量的增加而升高,在 N_{435} 处理最高,再继续增加施氮量产量有下降的趋势(图 4a)。通过方程拟合,得到施肥量与玉米产量的回归方程为 $y = -0.0462x^2 + 39.422x + 8665.9$ ($P < 0.001, R^2 = 0.8838; n = 15$),按纯氮 $3.91 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ (尿素 $1.8 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$)、玉米 $1.75 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的市场价格,可得最高产量 ($17\,076 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和经济最佳产量 ($17\,049 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 对应的施氮量分别为 $426.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $402.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在 2013 年数据基础上,进行减氮与增铵,由图(4b)所示,各处理产量表现为 $N_{375} + \text{CP} > N_{375} > 75\% N_{375} + \text{CP} > N_0$ 。与对照 (N_0) 相比,施氮与增铵可以显著提高玉米产量。 $75\% N_{375} + \text{CP}$ 、 N_{375} 、 $N_{375} + \text{CP}$ 处理玉米产量较 N_0 处理分别增加了 $6\,352$ 、 $6\,034 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $7\,243 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增幅分别为 55.2% 、 52.4% 和 62.9% 。 $75\% N_{375} + \text{CP}$ 与其他氮肥处理 (N_{375} 、 $N_{375} + \text{CP}$) 产量的差异未达到显著水平,说明减氮增铵并不会降低滴灌玉米产量。

2.4 不同施氮处理对氮素养分利用效率的影响

由图(5a)可看出,2013 年氮肥偏生产力在 $29 \sim 61.2 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,并随氮肥水平升高而下降,具体

表现为 $N_{225} (61.2 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}) > N_{330} (52.7 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}) > N_{435} (42.3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}) > N_{540} (29 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1})$,处理间差异显著 ($P < 0.05$)。2014 年减氮增铵 ($75\% N_{375} + \text{CP}$) 处理显著高于 N_{375} 与 $N_{375} + \text{CP}$ 处理。表明减氮增铵可显著提高玉米偏生产力。施氮对滴灌玉米氮肥利用率的影响见图(5b),2013 年随着氮肥施入量的增加氮肥利用率逐渐降低,表现为 $N_{225} > N_{330} > N_{435} > N_{540}$ 。2014 年的氮肥利用率以减氮增铵 ($75\% N_{375} + \text{CP}$) 处理最高 (47.3%),显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。说明减氮增铵措施能显著提高玉米氮肥利用率。

3 讨论与结论

我国粮食生产中由于氮肥过量施用导致氮素利用效率普遍降低^[19]。本试验研究中玉米实际产量在一定范围随施氮量升高而增加,这与高亚军^[20]研究得出玉米产量随肥料投入的增加显著提高结论一致。本研究表明玉米施氮量与产量关系呈抛物线形,当施氮量超过 $435 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量反而会下降,这与游福欣^[21]研究得出呈线形关系不一致,可能因为其氮肥施用量范围 ($0 \sim 192 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 偏低。本研

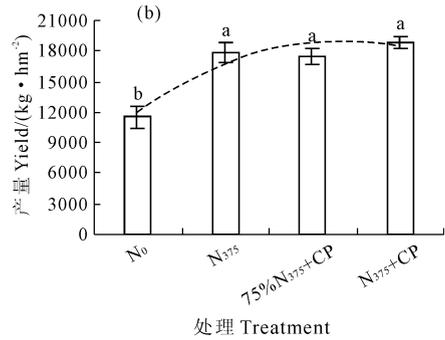
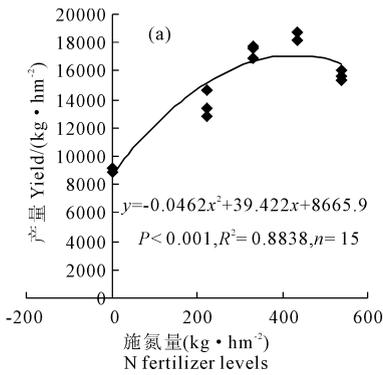


图 4 不同施氮处理对玉米产量的影响

Fig.4 The response of maize yield to different N treatments

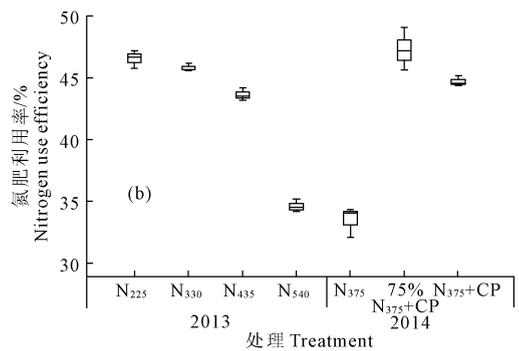
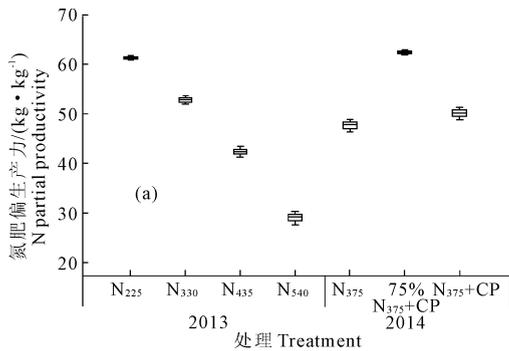


图 5 不同施氮处理对玉米氮素利用效率的影响

Fig.5 Effects of different N treatments on nitrogen use efficiency of maize

究结果表明北疆地区不同氮素水平下获得最高产量对应施氮量为 $426.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,此推荐施肥量高于中国其他地区施氮水平,其原因是在新疆干旱区玉米产量普遍单产过 $15000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的高产出下需要氮肥的高投入。较高施氮 (N_{435} 、 N_{540}) 下,氮肥利用率和偏生产力反而降低,说明过量的施氮会降低氮肥利用率,与侯云鹏等^[22] 研究相一致。曾艳等^[23] 认为在常规施肥的基础上增施肥料增效剂能有效促进玉米生长及生物量的形成。本研究在 2014 年加入 Nitrapyrin 的施氮增铵处理 ($75\% N_{375} + \text{CP}$ 、 $N_{375} + \text{CP}$) 较 N_0 处理,玉米干物质最大吸收速率时间得到提前,同时延长了快速生长期。在增铵处理下,玉米穗粒数、千粒重、单穗重、产量均以 $N_{375} + \text{CP}$ 处理最高,减氮增铵 ($75\% N_{375} + \text{CP}$) 处理与 N_{375} 处理相比,千粒重、穗粒数和单穗重均无显著性差异,表明减氮增铵不会导致玉米减产。此外本研究还发现化肥尿素配施硝化抑制剂有利于玉米植株对肥料氮素的吸收利用,并显著提高玉米的氮肥利用率,这与田秀英^[24] 及孙传范等研究结果一致^[25]。本研究在 2013 年试验中确定了滴灌玉米的经济最佳施氮量,2014 年试验表明在施氮 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 基础上加入硝化抑制剂可节约氮肥 $93.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。说明在最佳施氮量的基础上通过硝化抑制剂可实现玉

米增铵营养,达到改善植株氮素营养水平,节肥增效的目的。因此,高效硝化抑制剂的应用对今后滴灌农业生态系统中实现作物不减产的前提下降低氮肥使用量及减氮增效起到有力的技术支撑。

通过 2013—2014 年的肥效与增铵营养试验,可得出:(1) 天山北坡石河子垦区滴灌玉米最佳施氮量为 $402.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,对应经济最佳产量为 $17049 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮肥偏生产力和氮肥利用率随着施氮量的增加而下降。(2) 尿素与氯甲基吡啶配合滴施 ($75\% N_{375} + \text{CP}$) 可使施氮量比常规推荐量 ($375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 减少 25% ($93.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),减氮增铵措施可显著提高滴灌玉米氮素养分利用效率,降低氮肥施量不会导致玉米减产。

参考文献:

- [1] Elia A, Santanaria P, Serio F. Nitrogen nutrition, yield and quality of spinach[J]. J. Sci. Food Agric, 1998, 76(3):3413-46.
- [2] Ferguson R B, Hergert G W, Schepers J S, et al. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects[J]. Soil Sci. Am. J. 2002, 66(2):544-553.
- [3] Samonte S B, Wilson L T, Medley J C, et al. Nitrogen utilization efficiency: Relationships with grain yield, grain protein, and yield-relates traits in rice[J]. Agron J, 2006, 98(3):168-176.

- 土壤通报,2012,43(6):1467-1472.
- [7] 张贵龙,赵建宁,宋晓龙,等.施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):359-365.
- [8] 郭胜利,吴金水,党廷辉.轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响[J].中国农业科学,2008,41(3):744-751.
- [9] 陈云峰,韩雪梅,胡诚,等.长期施肥对黄棕壤固碳速率及有机碳组分影响[J].生态环境学报,2013,22(2):269-275.
- [10] Jenkinson D, SPowlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: A method for measuring soil biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1976,8(3):209-213.
- [11] Goyal S, Chander K, Mundra M C, et al. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999,29(2):196-200.
- [12] 沈亚婷. EDXRF 测定土壤元素含量及其在有机碳垂直分布特征研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(11): 3117-3122.
- [13] 梁贻仓,王俊,刘全全,等.地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):161-167.
- [14] 蔡立群,齐鹏,张仁陟,等.不同保护性耕作措施对麦-豆轮作土壤有机碳库的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(1):1-6.
- [15] 高扬,徐亚娟,陈维梁,等.紫色土坡耕地 C、N 与微生物 C、N 变化及其耦合特征[J].应用生态学报,2015,34(1):108-112.
- [16] 袁颖红,黄欠如,黄荣珍,等.长期施肥对红壤土有机碳和全氮含量的影响[J].南昌工程学院学报,2007,26(4):29-33.
- [17] 樊廷录,王淑英,周广业,等.长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J].中国农业科学,2013,46(2):300-309.
- [18] Martens R. Current methods for measuring microbial biomass C in soil: potentials and limitations[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995,19(2/3):87-99.
- [19] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等.长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响[J].土壤学报,2008,45(2):259-266.
- [20] 王玲莉,姜翼来,石元亮,等.长期施肥对土壤活性有机碳指标的影响[J].土壤通报,2008,39(4):752-755.
- [21] Upendra M. Sainjua, Harry H. Schomberg, Bharat P. Singhe, et al. Cover crop effect on soil carbon fractions under conservation tillage cotton[J]. Soil & Tillage Research, 2007,96:205-218.
- [22] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Long-term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994,58:1639-1645.
- [23] Lefroy R D B, G J Blair, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993,156:399-402.
- [24] 李林海,郜二虎,梦梦,等.黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J].生态学报,2013,33(1):179-187.

(上接第 84 页)

- [4] 马群,李国业,顾海水,等.我国水稻氮肥利用现状及对策[J].广东农业科学,2010,37(11):126-129.
- [5] 高远.农资转型发展必由之路:开启零增长行动[J].中国农资,2015,6:18.
- [6] 段爱旺,张寄阳.中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J].农业工程学报,2000,16(4):41-44.
- [7] 刘洪亮,曾胜河,施敏,等.棉花膜下滴灌施肥技术的研究[J].土壤肥料,2004,(2):30-34.
- [8] 吴立峰,张富仓,周罕觅,等.不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J].农业工程学报,2014,20(30):137-146.
- [9] 杨小梅,刘树伟,秦艳梅,等.中国玉米化学氮肥利用率的时空变异特征[J].中国生态农业学报,2013,21(10):1184-1192.
- [10] 赵靓,侯振安,黄婷,等.氮肥用量对玉米产量和养分吸收的影响[J].新疆农业科学,2014,51(2):275-283.
- [11] 李洁尉.我国化肥用量超世界公认警戒上限[N].中国科学报,2015-1-8(4).
- [12] 姜雯,周登博,张洪生,等.不同施肥水平下聚天冬氨酸对玉米幼苗生长的影响[J].玉米科学,2007,15(5):121-124.
- [13] 王秀斌,徐新朋,孙刚,等.氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(6):1279-1286.
- [14] Gentry L E, Below F E. Maize Productivity as influenced by form and availability of nitrogen[J]. Crop Sci, 1993,33(3):491-497.
- [15] Heberer J A, Below F E. Mixed nitrogen nutrition and productivity of wheat grown in hydroponics[J]. Ann. Bot, 1989,63(6):643-649.
- [16] Schroder J J, Neeteson J J, Withagen J C M, et al. Effects of N application on agronomic and environmental parameters in silage maize production on sandy soils[J]. Field Crops Research, 1998,58(1):55-67.
- [17] 田秀英,王正银.尿素与复合氮肥增效剂配施对水稻氮素利用的影响[J].水土保持学报,2006,20(6):120-123.
- [18] 中国农业年鉴编委会.中国农业年鉴[M].北京:中国农业出版社,2011.
- [19] 巨晓棠,张福锁.关于氮肥利用率的思考[J].生态环境,2003,12(2):192-197.
- [20] 高亚军,李生秀,田霄鸿,等.不同供肥条件下水分分配对旱地玉米产量的影响[J].作物学报,2006,32(3):415-422.
- [21] 游福欣,王向阳,王宗杰,等.夏玉米最佳施氮量研究[J].安徽农业科学,2005,33(5):765-766.
- [22] 侯云鹏,孔丽丽,秦裕波,等.吉林省中部黑土区玉米氮肥效应研究[J].玉米科学,2012,20(3):130-133,138.
- [23] 曾艳,周柳强,黄金生,等.肥料增效剂对玉米干物质积累及氮养分吸收的影响[J].南方农业学报,2014,45(10):1813-1817.
- [24] 田秀英,王正银.玉米对尿素减量与复合氮肥增效剂配施的响应[J].核农学报,2006,20(6):539-543.
- [25] 孙传范,戴廷波,曹卫星.不同施氮水平下增铍营养对小麦生长和氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):33-38.