

# 硝化抑制剂对糯玉米产量和氮肥利用率的影响

金何玉, 张明超, 陈光蕾, 周金泉, 朱毅勇

(江苏省固体有机废弃物资源化高新技术研究重点实验室, 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:**为明确大田试验条件下硝化抑制剂(2-氯-6-(三氯甲基)吡啶, CP)对江苏地区糯玉米农艺性状、产量、氮素吸收利用效率、土壤铵态氮和硝态氮的影响,以糯玉米品种苏玉糯5号为供试材料,设置不施氮对照(N0)、农民常规施氮(N,以当地高产玉米施氮量为参照)、农民常规施氮+硝化抑制剂(N+CP)、减氮25%(-25%N)、减氮25%+硝化抑制剂(-25%N+CP)5个处理。结果表明:在减氮25%的条件下,配施CP处理可显著提高糯玉米产量,-25%N+CP处理相较于-25%N处理提高了15%~17%,且-25%+CP处理后,糯玉米部分农艺性状及产量与农民常规施氮无显著差异;配施CP处理后土壤中铵态氮的含量比相应的不施CP处理高,其中N+CP处理相较于N处理高出179%~224%,硝态氮含量减少35%;-25%N+CP处理土壤中的铵态氮含量相较于-25%N处理高出202%~261%,硝态氮含量减少30%~36%;配施CP可提高糯玉米的氮积累量、氮肥偏生产力和氮肥农学效率,其中-25%N+CP处理的糯玉米利用效率最高。综合考虑在保持糯玉米产量的同时提高氮肥利用率,推荐减施25%化学氮肥并配施硝化抑制剂,可为实现糯玉米在农业生产上“减氮增效”的目标提供依据。

**关键词:**糯玉米;硝化抑制剂;产量;氮素利用率;铵态氮;硝态氮

中图分类号:S143.1;S513.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2020)05-0171-07

doi:10.7668/hbxb.20191171



## Effects of Nitrification Inhibitors on Yield and Nitrogen Use Efficiency of Waxy Corn

JIN Heyu, ZHANG Mingchao, CHEN Guanglei, ZHOU Jinquan, ZHU Yiyong

(Jiangsu Key Laboratory for Soil of Organic Waste Utilization, College of Resources and Environment Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** In order to clarify the agronomic traits, yield, nitrogen absorption and utilization efficiency of waxy maize in Jiangsu area under nitrification inhibitor (2-chloro-6-(trichloromethyl)pyridine, CP) under field test conditions, soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen effects, using waxy corn variety Suyunuo No. 5 as the test material, setting five treatments: a non-nitrogen control (N0), farmers' conventional nitrogen application (N, taking the local high-yield corn nitrogen application as a reference), farmers' conventional nitrogen inhibitor (N+CP), nitrogen reduction 25% (-25%N), nitrogen reduction 25% + nitrification inhibitor (-25%N+CP). The results showed that: under the condition of reducing nitrogen by 25%, the combined application of CP treatment could significantly increase the yield of waxy corn. Compared with -25%N treatment, the -25%N+CP treatment increases by 15% - 17%, and -25%+CP after treatment, the part of agronomic characteristics and yield of waxy corn were not significantly different from the farmers' conventional nitrogen application; the content of ammonium nitrogen in the soil after the combined CP treatment was higher than the corresponding non-CP treatment, and the N+CP treatment was higher than the N treatment 179% - 224%, the nitrate nitrogen content was reduced by 35%; the ammonium nitrogen content in the soil treated with -25%N+CP was 202% - 261% higher than -25%, and the nitrate nitrogen content was reduced by 30% - 36%; CP application could increase the nitrogen accumulation of waxy corn, nitrogen fertilizer had partial productivity and agronomic efficiency of nitrogen fertilizer, among which -25%N+CP treated waxy corn had the highest nitrogen and phosphorus utilization efficiency. Considering comprehensively improving the efficiency of nitrogen absorption and utilization while maintaining the yield of waxy corn, it was

收稿日期:2020-06-07

基金项目:国家自然科学基金项目(31172035)

作者简介:金何玉(1994-),男,山东滕州人,硕士,主要从事植物营养养分管理研究。

通讯作者:朱毅勇(1973-),男,上海人,教授,博士,博士生导师,主要从事养分高效利用机制的研究。

recommended to reduce the application of chemical nitrogen fertilizer by 25% and apply nitrification inhibitors, which can provide a basis for achieving the goal of "reducing nitrogen and increasing efficiency" of waxy corn in agricultural production.

**Key words:** Waxy corn; Nitrification inhibitor; Yield; Nitrogen use efficiency; Ammonium nitrogen; Nitrate nitrogen

氮素是玉米生长所必需的大量营养元素之一,对玉米高产、高品质起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。我国氮肥过量施用的现象严重,全国过量施氮面积已占播种面积 20%<sup>[2]</sup>。过量施氮是导致氮肥利用率低的主要原因,研究表明,当氮肥用量由 60 kg/hm<sup>2</sup> 上升至 240 kg/hm<sup>2</sup> 时,玉米的氮肥表观利用率由 32% 下降至 20%<sup>[3]</sup>。氮肥在施入土壤后由于硝化、反硝化作用而损失,又进一步降低了氮肥利用率<sup>[4-5]</sup>,且大量的氮素以硝态氮的形式通过淋洗等途径污染农业生态环境<sup>[6]</sup>。

硝化抑制剂是一类进入土壤后能够影响土壤生化环境,调节某些土壤酶活性,起到降低尿素分解速率,降低氮素损失,提高氮素利用效率的一类物质<sup>[7-8]</sup>,对粮食和蔬菜作物的生长发育、品质和产量等方面有不同程度的促进作用。研究表明,硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)的施用可普遍提高作物产量达 7%,增加根际土壤中存留的氮素达 28%,减少氮素淋失达 16%<sup>[9]</sup>。另有研究表明,CP 与其他硝化抑制剂相比,安全性能较高<sup>[10-11]</sup>;利用<sup>14</sup>C 标记 CP 研究其在水稻田中的动态变化发现,施入水稻田 5 d 后即可在水稻植株样品中检测到<sup>14</sup>C-CP 及其降解物 6-CPA,在 30 d 后植株样品中主要为其降解物 6-CPA;在水稻土中,施用 10 d 后检测到主要为 6-CPA,而 6-CPA 又可以进一步降解,因此,可以避免或者减少因长期使用而造成 CP 在土壤中的积累和对环境的污染<sup>[12]</sup>。

氮肥的过量施用会造成氮肥利用率的降低和环境污染,因此,如何协调粮食稳产和环境保护之间的关系,是促进农业可持续发展的一个重要问题。本试验基于硝化抑制剂对江苏地区糯玉米的田间应用效果鲜有报道这一事实,考察有关资料,根据糯玉米对养分的吸收规律和农民施肥习惯,在适量减少施肥的情况下添加硝化抑制剂,验证其施用的效果,为糯玉米生产上“减氮增效”的氮肥施用策略提供理论和实践依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验点土壤类型

试验于 2017,2018 年分别在江苏省宜兴市和东

台市糯玉米种植主产区开展。宜兴产区属亚热带季风气候,年平均气温 15.7 ℃,年平均无霜期 240 d,年平均降水量 1 177 mm。试验地土壤类型为黄红壤,pH 值 7.4、有机质 17.8 g/kg、全氮 1.43 g/kg、碱解氮 97.88 mg/kg、有效磷 25.8 mg/kg、速效钾 75.6 mg/kg;东台产区属暖温带季风气候,年平均气温 15 ℃,年平均无霜期 220 d,年平均降水量 1 061 mm。试验地土壤类型为黄沙土,pH 值 7.5、有机质 11.3 g/kg、全氮 0.92 g/kg、碱解氮 83.6 mg/kg、有效磷 11.67 mg/kg、速效钾 62.18 mg/kg。

### 1.2 供试肥料和作物

本试验供试作物为糯玉米,品种为苏玉糯 5 号。供试肥料氮、磷和钾肥分别为市售尿素(46% N)、过磷酸钙(14% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和氯化钾(60% K<sub>2</sub>O)。试验所用硝化抑制剂的商品名为碧晶(上海碧晶科技有限公司生产),成分为 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶。

### 1.3 试验设计

大田试验设置 5 个处理:不施氮肥对照(N0);农民常规施氮(N,以当地高产糯玉米施氮量为参照),施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup>;农民常规施氮+硝化抑制剂(N+CP),施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup>;减氮 25%(-25%N),施氮量为 135 kg/hm<sup>2</sup>。减氮 25%+硝化抑制剂(-25%N+CP),施氮量为 135 kg/hm<sup>2</sup>。所有施用硝化抑制剂处理的处理剂用量均为 2.55 L/hm<sup>2</sup>;所有处理均施磷钾肥,用量分别为(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)90 kg/hm<sup>2</sup>和(K<sub>2</sub>O)120 kg/hm<sup>2</sup>。各处理重复 3 次。小区按随机区组设计,小区面积为 4 × 8 = 32 m<sup>2</sup>,小区间分别开沟打埂防止水肥串行。种植密度为 6 × 10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>,株间距为 33 cm,行间距为 50 cm。

施肥方式:两地施肥方式均参照当地传统,播种前施入 50% 的氮肥,全部的磷肥和钾肥做基肥,在拔节期追施剩余 50% 氮肥;将硝化抑制剂与氮肥充分混匀,同基肥施入土壤。两地玉米均于 6 月 20 日左右播种,7 月 20 日左右追肥(N)一次,10 月中上旬收获。糯玉米生育期约为 105 d。

### 1.4 测定项目与方法

糯玉米成熟后每小区随机取 10 株进行考种,测定株高、穗长、行粒数和百粒质量。每小区按实收计算产量。每小区另取 5 株植株(含果穗),105 ℃ 杀

青 0.5 h 后, 80 °C 烘干至恒质量后计算籽/秆比, 用籽/秆确定秸秆产量。将烘干后的植株粉碎过筛, 采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消解后用连续流动分析仪 (Continuous Flow Analytical System AA3 型, SEAL) 测定植株氮含量, 并以此计算糯玉米氮累积量和氮素利用率。土壤常规取样后过 3 mm 筛, 称取 0.5 g 土样用 50 mL 1 mol/L KCl 溶液浸提, 振荡 1 h 后过滤, 用连续流动分析仪测定土壤  $NO_3^- -N$  和  $NH_4^+ -N$  含量<sup>[13]</sup>。

氮肥利用率相关指标<sup>[14]</sup> 计算如下:

氮肥偏生产力 (Partial factor productivity of nitrogen, PFPN, kg/kg) = 施氮区籽粒产量/氮肥投入量;

氮肥农学效率 (Agronomy efficiency of nitrogen, AEN, kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量;

氮肥利用率 (Recovery efficiency of nitrogen, REN) = (施氮处理吸氮量 - 不施氮处理吸氮量) / 施氮量 × 100%。

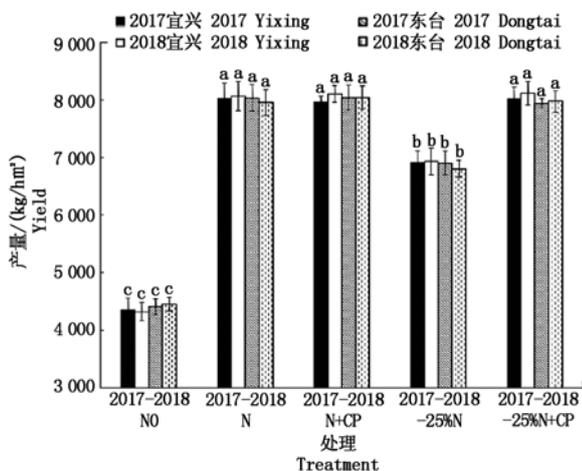
### 1.5 数据处理与计算

试验中所测量的数据, 采用 Microsoft Excel 2010、SPSS Statistics 18.0 软件对试验数据进行计算、统计与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对糯玉米产量和农艺性状的影响

由图 1 可知, 施氮对糯玉米的产量影响显著, 两种植区连续 2 a 内施氮处理均比不施氮处理增产显著, 增幅为 53% ~ 88%; 宜兴、东台两种植区 2017、2018 2 a 的 N 处理比 -25% N 处理的产量分别增加了 16%、16%、16%、17%。施用硝化抑制剂处理 (N + CP 和 -25% N + CP) 与常规施氮处理 (N) 产量



柱上不同字母表示处理间差异达 5% 的显著水平。图 2-3 同。

Different letters above the bars mean significant difference at the 5% level. The same as Fig. 2-3.

图 1 不同施肥处理对产量的影响

Fig. 1 The effect of different fertilizer treatments on yield

差异不显著, 其中, -25% N + CP 处理比 -25% N 处理的产量分别增加了 16%、17%、15%、17%, 增产显著, 说明减氮情况下配施硝化抑制剂有助于促进糯玉米增产。

由表 1 可知, 同一种植区不同年份施氮处理的糯玉米株高、穗长、行粒数和百粒质量均优于不施氮处理; 糯玉米百粒质量在常规氮处理高于减氮处理, 增幅为 3%~6%, 其中 2017 年宜兴种植区差异达显著水平, 而行粒数除在 2018 年东台地区表现为常规氮处理显著低于减氮处理外, 其他均表现为常规处理高于减氮处理 (其中 2017 年宜兴种植区差异达显著水平)。在施氮量相同的情况下, 施用硝化抑制剂可提高糯玉米的株高、穗长、行粒数和百粒质量, 其中, 2018 年宜兴种植区的糯玉米株高及东台种植区的糯玉米行粒数在 N + CP 处理比 N 处理分别增加了 5% 和 17%, 增幅达显著水平; 2018 年宜兴种植区的糯玉米株高和百粒质量及 2017、2018 年东台种植区糯玉米百粒质量在 -25% N + CP 处理比 -25% N 处理分别增加了 8%、5%、5%、6%, 增幅达显著水平; -25% N + CP 处理的糯玉米在株高、穗长、行粒数和百粒质量与 N + CP 处理均无显著差异。

### 2.2 不同施肥处理对糯玉米各生育时期土壤硝态氮、铵态氮的影响

由图 2, 3 可知, 土壤  $NO_3^- -N$  含量在各生育期的变化规律与土壤  $NH_4^+ -N$  含量基本一致, 自氮肥施入土壤后, 其释放量在苗期达到了峰值, 此时土壤中  $NO_3^- -N$  和  $NH_4^+ -N$  含量最高, 之后迅速下降, 土壤  $NO_3^- -N$  含量在玉米乳熟期而土壤  $NH_4^+ -N$  含量在糯玉米抽雄期降至与施肥前含量相当, 此后土壤  $NO_3^- -N$  含量和  $NH_4^+ -N$  含量基本维持不变。

连续 2 a 的试验均表明配施硝化抑制剂的处理, 其苗期土壤中  $NO_3^- -N$  含量较未配施硝化抑制剂处理降低, 而土壤  $NH_4^+ -N$  的含量相较于未配施硝化抑制剂的处理显著升高。在苗期, N + CP 处理土壤中  $NO_3^- -N$  含量显著低于 N 处理土壤中  $NO_3^- -N$  含量, 2017、2018 年分别降低了 35%、35%; -25% N + CP 处理土壤中  $NO_3^- -N$  含量显著低于 -25% N 处理土壤中  $NO_3^- -N$  含量, 2017、2018 年分别降低了 36%、30%。N + CP 处理土壤中  $NH_4^+ -N$  含量比 N 处理土壤中  $NH_4^+ -N$  含量提高 224%、179%; -25% N + CP 处理土壤中  $NH_4^+ -N$  含量比 -25% N 处理土壤中  $NH_4^+ -N$  含量提高 261%、202%。说明配施硝化抑制剂可显著提高糯玉米苗期土壤中的  $NH_4^+ -N$  含量而降低土壤  $NO_3^- -N$  含量。

表 1 不同施肥处理的糯玉米农艺性状及产量构成

Tab.1 Effects of different fertilizer treatments on the agronomic traits and yield composition in waxy corn

地点 Location	年份 Year	处理 Treatment	株高/cm Height	穗长/cm Ear length	行粒数 Row grains	百粒质量/g 100-grain weight
宜兴 Yixing	2017	NO	161.50 ± 6.19b	15.35 ± 1.37b	23.55 ± 0.69c	27.18 ± 1.27c
		N	180.80 ± 7.90a	16.88 ± 0.76a	31.88 ± 1.86a	31.43 ± 0.70a
		N + CP	185.65 ± 5.69a	16.98 ± 1.87a	32.10 ± 1.48a	31.95 ± 0.91a
		-25% N	176.43 ± 1.98a	16.53 ± 1.39a	28.34 ± 1.30b	29.60 ± 0.59b
		-25% N + CP	179.15 ± 9.72a	16.63 ± 0.80a	29.66 ± 1.38ab	31.28 ± 1.10ab
	2018	NO	185.75 ± 3.02c	15.75 ± 0.73b	27.56 ± 1.24b	28.29 ± 0.68c
		N	189.31 ± 5.94b	16.59 ± 1.00ab	30.35 ± 1.60ab	30.97 ± 0.89ab
		N + CP	199.64 ± 2.64a	17.31 ± 0.47a	31.26 ± 1.62a	31.74 ± 0.81a
		-25% N	188.23 ± 2.92b	16.48 ± 0.71ab	28.94 ± 1.53ab	30.03 ± 0.97b
		-25% N + CP	202.77 ± 7.13a	17.30 ± 0.62a	29.42 ± 1.20ab	31.60 ± 0.70a
东台 Dongtai	2017	NO	189.03 ± 7.98b	15.25 ± 1.20b	34.83 ± 1.83b	30.62 ± 0.85c
		N	205.45 ± 5.36a	17.20 ± 0.85a	37.95 ± 2.94a	33.45 ± 0.56ab
		N + CP	206.10 ± 9.45a	17.48 ± 0.59a	38.78 ± 1.73a	33.87 ± 1.26a
		-25% N	203.73 ± 4.27a	16.75 ± 1.58a	37.25 ± 0.52ab	32.15 ± 1.03bc
		-25% N + CP	205.53 ± 9.15a	17.05 ± 0.81a	38.65 ± 1.26a	33.82 ± 0.40a
	2018	NO	182.26 ± 5.71b	15.28 ± 0.52b	25.40 ± 1.23c	27.32 ± 1.15c
		N	184.31 ± 5.75ab	17.15 ± 0.78a	32.70 ± 1.04b	31.84 ± 0.58ab
		N + CP	196.28 ± 6.42a	17.50 ± 0.87a	38.40 ± 2.14a	32.67 ± 0.72a
		-25% N	187.83 ± 4.11ab	17.43 ± 0.56a	38.30 ± 1.44a	30.35 ± 0.63b
		-25% N + CP	205.12 ± 3.45a	17.81 ± 1.13a	39.60 ± 1.39a	32.28 ± 0.70a

注:同列数据后不同字母表示处理间 5% 的水平差异显著 ( $P < 0.05$ )。表 2 同。

Note: Values followed by different letters in the same column mean significant difference at the 5% level. The same as Tab. 2.

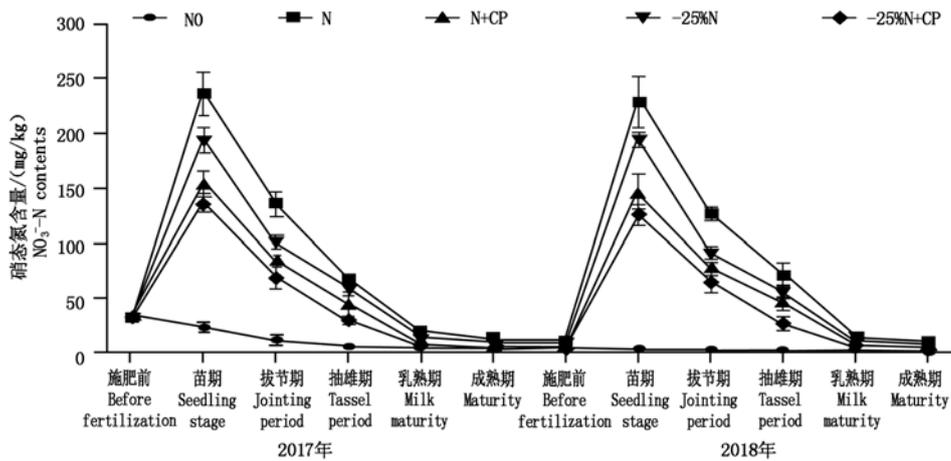


图 2 不同施肥处理对不同生育时期土壤硝态氮的影响

Fig. 2 Effect of different fertilization treatments on soil nitrate at different growth stages

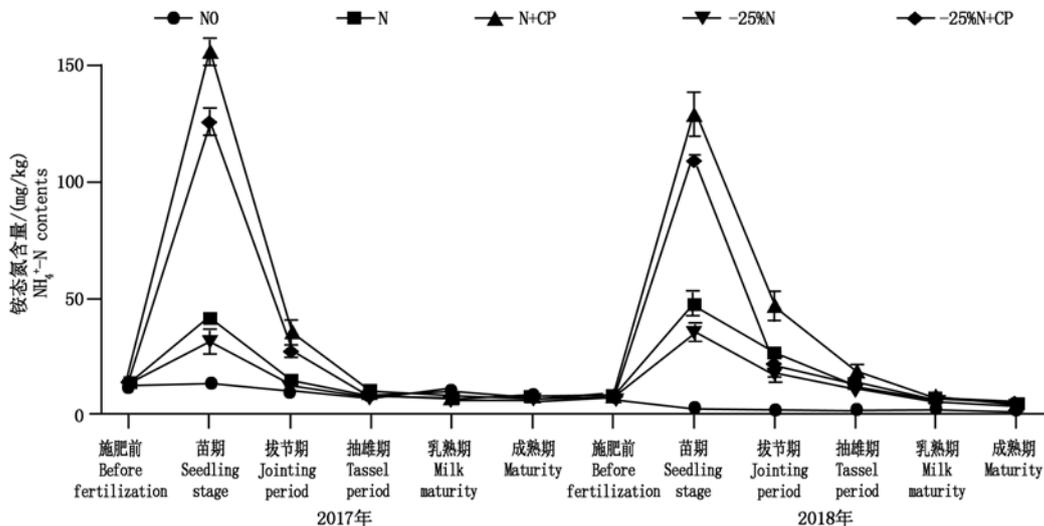


图 3 不同施肥处理对不同生育时期土壤铵态氮的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on soil ammonium nitrogen at different growth stages

### 2.3 不同施氮处理对糯玉米氮肥利用率的影响

由表 2 可知,施氮可提高糯玉米的氮累积量,在施氮量相同的情况下,两种植区连续 2 a 内配施硝化抑制剂的处理其氮累积量均大于未配施硝化抑制剂处理,N + CP 处理的氮累积量比 N 处理分别提高了 23% ,20% ,14% ,40% , -25% N + CP 处理的氮累积量比 -25% N 处理分别提高了 23% ,22% ,24% ,33%。减施化学氮肥会造成糯玉米的氮肥偏生产力下降,各种植区 N 处理的氮肥偏生产力均高于 -25% N 处理;但减施化学氮肥的同时配施硝化抑制剂可提升糯玉米的氮肥偏生产力,与 -25% N 处理相比, -25% N + CP 处理的糯玉米氮肥偏生产力分别提高了 15% ,24% ,14% ,13% ;且 -25% N +

CP 处理的氮肥偏生产力与 N 处理均无显著差异。在氮肥农学效率方面,N 处理高于 -25% N 处理但二者差异不显著,这可能是由于长期过量施用氮肥导致土壤氮素积累;各种植区施用硝化抑制剂处理均高于未施用硝化抑制剂处理,其中 -25% N + CP 处理的糯玉米氮肥农学效率均高于 N 处理,且与 N + CP 处理差异不显著,说明在适量减施氮肥的基础上配施硝化抑制剂可以提高氮肥农学效率。两种植区 2 a 中 N + CP、-25% N 和 -25% N + CP 的氮肥利用率均大于农民常规施氮处理(N),其中以减施氮肥配施硝化抑制剂处理(-25% N + CP)的糯玉米氮肥利用率最高,显著高于常规施氮处理。

表 2 不同氮肥处理对糯玉米氮肥利用率及氮肥生产率的影响

Tab.2 Effects of different treatments on nitrogen use efficiency and nitrogen fertilizer productivity of waxy corn

地点 Location	年份 Year	处理 Treatment	氮累积量 /(kg/hm <sup>2</sup> ) N accumulation	氮肥偏生产力 /(kg/kg) PFPN	氮肥农学效率 /(kg/kg) AEN	氮肥利用率/% REN
宜兴 Yixing	2017	NO	93.91 ± 6.64c	-	-	-
		N	122.50 ± 3.00bc	30.09 ± 0.79b	13.19 ± 2.18ab	30.57 ± 6.02b
		N + CP	151.11 ± 6.17a	32.50 ± 1.63a	15.60 ± 2.90a	38.27 ± 5.55ab
		-25% N	140.33 ± 7.21b	26.12 ± 1.91c	9.21 ± 2.87b	35.88 ± 4.58ab
		-25% N + CP	173.00 ± 4.10a	30.18 ± 1.09b	13.27 ± 2.64ab	44.78 ± 6.09a
	2018	NO	115.82 ± 12.40b	-	-	-
		N	125.99 ± 8.94b	40.47 ± 2.18a	8.67 ± 3.77ab	32.25 ± 9.55b
		N + CP	151.29 ± 9.95a	42.75 ± 2.43a	10.77 ± 2.82a	38.29 ± 7.63ab
		-25% N	144.10 ± 13.09ab	33.31 ± 3.20b	2.05 ± 4.20b	35.06 ± 8.58ab
		-25% N + CP	175.38 ± 9.33a	41.50 ± 2.28a	9.62 ± 3.35a	45.29 ± 6.42a
东台 Dongtai	2017	NO	112.99 ± 5.18c	-	-	-
		N	128.83 ± 9.59bc	38.86 ± 2.47a	9.50 ± 2.73b	31.20 ± 2.04b
		N + CP	146.23 ± 7.80b	40.60 ± 2.01a	11.24 ± 1.56a	37.33 ± 4.04ab
		-25% N	143.71 ± 3.77b	35.43 ± 0.97b	6.07 ± 0.95b	35.37 ± 5.90ab
		-25% N + CP	174.30 ± 6.64a	40.29 ± 1.71a	10.93 ± 1.87ab	43.37 ± 3.36a
	2018	NO	112.70 ± 16.36c	-	-	-
		N	120.15 ± 16.15c	39.80 ± 4.16ab	10.51 ± 0.68a	30.07 ± 11.30b
		N + CP	168.73 ± 27.07ab	43.43 ± 6.97a	14.14 ± 10.05a	39.96 ± 7.63ab
		-25% N	142.43 ± 4.94b	36.66 ± 2.27b	7.37 ± 5.24a	35.87 ± 1.47ab
		-25% N + CP	188.88 ± 8.87a	41.49 ± 2.28a	12.20 ± 3.53a	46.29 ± 8.70a

## 3 讨论与结论

施用硝化抑制剂能显著改善玉米的生长状况<sup>[15]</sup>。在本试验中,施氮量相同时,配施硝化抑制剂处理的糯玉米百粒质量均大于未配施硝化抑制剂的处理,且在减施氮肥 25% 的基础上配施硝化抑制剂,也能提高糯玉米的百粒质量,同时对糯玉米的株高和行粒数也有正向影响。已有研究表明,在减氮处理下施用硝化抑制剂可维持水稻产量在高水平上<sup>[16]</sup>,配施硝化抑制剂对甜玉米有较好的增产效果<sup>[17]</sup>。本试验数据表明,在相同施氮量下,减施配

施硝化抑制剂处理的糯玉米田间产量与 N 处理和 N + CP 处无显著性差异,这说明在适量减氮的情况下配施硝化抑制剂可保证玉米产量,但常规施氮量的情况下配施硝化抑制剂对糯玉米产量的提高不显著。

在旱地土壤,施用硝化抑制剂能够降低 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 转化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的速率<sup>[18-19]</sup>,各种植区配施硝化抑制剂的处理在苗期的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量均显著高于纯氮肥处理,且 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著低于纯施氮肥处理,这表明硝化抑制剂显著抑制了肥料中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 向 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的转化。有文献表明,向含铵态氮的复合肥

中加入硝化抑制剂,控制  $\text{NH}_4^+$ -N 向  $\text{NO}_3^-$ -N 的转化,减少  $\text{NO}_3^-$ -N 的淋失,提供给玉米生长的是以铵态氮为主的混合营养,可以促进玉米的生长<sup>[20-21]</sup>。这与本试验中的研究结果基本一致。

已有文章指出,氮肥利用率随施氮量的增加而降低,当氮肥过量施用,会造成作物对氮的奢侈吸收,氮累积量和氮肥利用率将有所下降;土壤背景氮越大,氮肥利用效率越低<sup>[22-23]</sup>。在本试验中,在施氮量相同的情况下,配施硝化抑制剂处理的糯玉米氮肥利用率高于未配施硝化抑制剂处理,说明配施硝化抑制剂可提高糯玉米的氮肥利用率。N 处理与 -25% N 处理氮肥利用率相比较,由于施氮量相应的减少,糯玉米进行奢侈吸收受到影响,进而使糯玉米的氮累积量有所增加;在 -25% N + CP 的条件下,氮肥利用率高于其他处理氮肥利用率,表明减少一定氮肥用量并配施硝化抑制剂能够提高糯玉米的氮肥利用率,不仅节省了尿素用量,而且有效地保持了土壤氮素供应,延长了肥效。

综上所述,在施用氮肥的同时配施硝化抑制剂,能改善糯玉米的农艺性状,从而提高糯玉米的产量,且在减少一定氮肥施用量的基础上配施硝化抑制剂,可使糯玉米的产量维持在高水平上。硝化抑制剂能显著抑制肥料中  $\text{NH}_4^+$ -N 向  $\text{NO}_3^-$ -N 的转化,提高氮肥利用率。因此,硝化抑制剂在糯玉米生产中的应用与推广,为糯玉米生产减氮增效提供了一条切实可行的途径。

#### 参考文献:

- [1] 习斌,翟丽梅,刘申,刘宏斌,杨波,任天志. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 326 - 335. doi: 10.11674/zwyf. 2015. 0206.  
Xi B, Zhai L M, Liu S, Liu H B, Yang B, Ren T Z. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 326 - 335.
- [2] 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. doi: 10.11674/zwyf. 2014. 0401.  
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 783 - 795.
- [3] 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. doi: 10.11766/trxb201501270058.  
Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1311 - 1324.
- [4] 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文奇,陈新平,江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915 - 924. doi: 10.3321/j.issn:0564-3929. 2008. 05. 018.  
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[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915 - 924.
- [5] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, Six J, van Kessel C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects [J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 85 - 156. doi: 10.1016/S0065-2113(05)87003-8.
- [6] Ju X T, Kou C L, Christie P, Dou Z X, Zhang F S. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(2): 497 - 506. doi: 10.1016/j.envpol. 2006. 04. 017.
- [7] 呼娟娟,陶瑞,褚贵新. 有机无机肥配合生化抑制剂抑制土壤有机碳的转化[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 19 - 31. doi: 10.11674/zwyf. 19031.  
Hu J J, Tao R, Chu G X. Partial replacement of inorganic N with cattle manure and combining use of biochemical inhibitors inhibit organic carbon conversion in soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1): 19 - 31.
- [8] 曾后清,朱毅勇,王火焰,沈其荣. 生物硝化抑制剂——一种控制农田氮素流失的新策略[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 382 - 388.  
Zeng H Q, Zhu Y Y, Wang H Y, Shen Q R. Biological nitrification inhibitor—one new strategy for limiting nitrogen losses from farmland [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2): 382 - 388.
- [9] 高志红,陈晓远,曾越. 局部根系水分胁迫下氮素形态对水稻幼苗生理特性和根系生长的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(2): 154 - 161. doi: 10.7668/hbxb. 201751056.  
Gao Z H, Chen X Y, Zeng Y. Effects of N forms on physiological characteristics and root growth of rice seedling in condition of partial root water stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(2): 154 - 161.
- [10] Subbarao G V, Rondon M, Ito O, Ishikawa T, Rao I M, Nakahara K, Lascano C, Berry W L. Biological nitrification inhibition (BNI)-is it a widespread phenomenon? [J]. *Plant and Soil*, 2007, 294(1-2): 5 - 18. doi: 10.1007/s11104-006-9159-3.
- [11] Owens L B. Effects of nitrapyrin on nitrate movement in soil columns [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1981, 10(3): 308 - 310. doi: 10.2134/jeq1981. 00472425001000030010x.
- [12] 陈祖义,王勋良,米春云. 2-氯-6(三氯甲基-<sup>14</sup>C)吡啉在水稻和土壤中的降解[J]. 核农学报, 1980(3): 34 - 39.  
Chen Z Y, Wang X L, Mi Y C. Degradation of 2-chloro-6-trichloromethyl pyridine in rice and soil [J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 1980(3): 34 - 39.
- [13] 孙晓,景建元,吕慎强,尚浩博,李娜,田肖肖,李嘉,王吕,王林权. 不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 848 - 855. doi: 10.13930/j.cnki.cjea. 161122.  
Sun X, Jing J Y, Lü S Q, Shang H B, Li N, Tian X X, Li

- J, Wang L, Wang L Q. Effect of different rates of slow/controlled release urea on nitrogen content in spring maize in loess highlands [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 848 - 855.
- [14] 李晓龙, 白云龙, 闫东, 林利龙, 梁淑萍, 郑海春. 不同水肥管理方式对春玉米籽粒灌浆特性、氮素利用及产量的影响 [J]. *华北农学报*, 2017, 32(3): 182 - 187. doi:10.7668/hbxb.2017.03.028.
- Li X L, Bai Y L, Yan D, Lin L L, Liang S P, Zheng H C. Effects of different water and fertilizer management on spring maize grain filling characteristics and nitrogen utilization and yield [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(3): 182 - 187.
- [15] 刘欢, 陈苗苗, 孙志梅, 刘建涛, 甄文超. 氮肥调控对小麦/玉米产量、氮素利用及农田氮素平衡的影响 [J]. *华北农学报*, 2016, 31(1): 232 - 238. doi:10.7668/hbxb.2016.01.037.
- Liu H, Chen M M, Sun Z M, Liu J T, Zhen W C. Effects of different nitrogen management practice on crop yield, N utilization and N apparent balance in wheat/maize rotation system [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(1): 232 - 238.
- [16] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 冯彦房, 李卫正, 初磊. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响 [J]. *土壤*, 2015, 47(6): 1027 - 1033. doi:10.13758/j.cnki.tr.2015.06.003.
- Sun H J, Min J, Shi W M, Feng Y F, Li W Z, Chu L. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field [J]. *Soils*, 2015, 47(6): 1027 - 1033.
- [17] 吴雪娜, 彭智平, 涂玉婷, 杨林香, 林志军, 黄继川. 2-氯-6-三氯甲基吡啶对甜玉米产量和农艺性状的影响 [J]. *广东农业科学*, 2016, 43(11): 86 - 91. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2016.11.013.
- Wu X N, Peng Z P, Tu Y P, Yang L X, Lin Z J, Huang J C. Effects of 2-chloro-6-trichloromethyl pyridine on yield and agronomic characters of sweet corn [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43(11): 86 - 91.
- [18] 董强, 吴得峰, 党廷辉, 郭胜利. 黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 856 - 863. doi:10.11674/zwyf.16484.
- Dong Q, Wu D F, Dang T H, Guo S L. Effects of different nitrogen reduction modes on yield of spring maize and nitrate-N residue in soils of the southern Loess Plateau [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 856 - 863.
- [19] 王大鹏, 郑亮, 吴小平, 罗雪华, 王文斌, 张永发, 薛欣欣. 旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1731 - 1741. doi:10.13930/j.cnki.cjea.170425.
- Wang D P, Zheng L, Wu X P, Luo X H, Wang W B, Zhang Y F, Xue X X. Review of soil nitrate formation, leaching transport and their control measures in upland farming systems [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1731 - 1741.
- [20] Yu Q G, Chen Y X, Ye X Z, Zhang Q L, Zhang Z J, Tian P. Evaluation of nitrification inhibitor 3,4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns [J]. *Chemosphere*, 2006, 67(5): 872 - 878. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.11.016.
- [21] 殷建祯, 俞巧钢, 符建荣, 马军伟, 邹平, 王欣欣, 费杰, 方晓波. 不同作用因子下有机无机配施添加DMPP对氮素转化的影响 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 574 - 583. doi:10.11766/trxb201206250252.
- Yin J Z, Yu Q G, Fu J R, Ma J W, Zou P, Wang X X, Fei J, Fang X B. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers plus DMPP on nitrogen transformation in soils as affected by different factors [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 574 - 583.
- [22] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Buresh R, Witt C. Challenge and opportunity in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2002, 1(7): 776 - 785.
- [23] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 周兴, 谢坚, 汤文光, 杨曾平. 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, 174. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2016.02.028.
- Lu Y H, Nie J, Liao Y L, Zhou X, Xie J, Tang W G, Yang Z P. Effects 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, 174.