

减氮配施氮肥增效剂对土壤速效氮和玉米产量的影响

蒲 玮, 吴雅薇, 张 颀, 陈谋浩, 刘佳媛, 陈 祥, 袁继超, 孔凡磊

(四川农业大学农学院, 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 成都 611130)

摘要: 过量施氮一直是玉米生产中存在的主要问题, 而配施氮肥增效剂可作为减氮条件下玉米实现高产和稳产的一种重要技术措施。2016—2017 年在四川省德阳市中江县合兴乡新建村设置田间试验, 研究不同施氮量与氮肥增效剂配施对土壤速效氮含量和玉米干物质积累及产量的影响, 为玉米减氮增产栽培技术提供科学依据。结果表明: 减氮配施增效剂能够增强土壤速效氮供应能力, 促进玉米干物质积累, 改善产量构成, 提高玉米产量, 实现玉米减氮不减产。常规氮和减氮 20% 配施增效剂增产幅度分别为 5.53%~13.97% 和 10.24%~17.05%, 减氮配施增效剂的增产效果更好。减氮 20% 条件下 A_2B_4 脲酶活性和土壤硝态氮含量较 A_2B_2 、 A_2B_3 2 年平均分别降低了 19.00%、15.65% 和 -2.97%、57.24%, 土壤铵态氮含量和产量 2 年平均提高 11.48%、248.50% 和 3.71%、6.18%。综上, 减氮 20% 条件下硝化抑制剂 (DCD) 和脲酶抑制剂 (HQ) 复配土壤速效氮的供应能力最强, 可实现玉米减氮不减产。

关键词: 减氮; 氮肥增效剂; 土壤速效氮; 干物质; 产量

中图分类号: S153.6; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)03-0276-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.03.038

Effects of Nitrogen Reduction Combined with Nitrogen Fertilizer Synergist on Soil Available Nitrogen and Corn Yield

PU Wei, WU Yawei, ZHANG Di, CHEN Mouhao, LIU Jiayuan,

CHEN Xiang, YUAN Jichao, KONG Fanlei

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Sichuan Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation, Chengdu 611130)

Abstract: Excessive nitrogen application has been a major problem in corn production, and combined application of nitrogen fertilizer synergist can be used as an important technical measure to achieve high and stable corn yield under the condition of nitrogen reduction. In 2016 and 2017, field experiments were set up in Xinjian Village, Hexing Township, Zhongjiang County, Deyang City, Sichuan Province, to study the effects of different nitrogen application rates and nitrogen fertilizer synergists on soil available nitrogen content and dry matter accumulation and yield of corn, so as to provide scientific basis for reducing nitrogen and increasing yield cultivation techniques of corn. The results showed that the nitrogen reduction combined with synergist could enhance the supply capacity of available nitrogen in soil, promote the accumulation dry matter of corn, improve the yield composition, increase corn yield, and achieve nitrogen reduction without yield reduction. The yield increase ranges of the conventional nitrogen treatment and 20% nitrogen reduction combined with synergist treatment were 5.53% ~ 13.97% and 10.24% ~ 17.05%, respectively. The yield increasing effect of nitrogen reduction combined with synergist was better. Under the condition of reducing nitrogen by 20%, compared with A_2B_2 treatment and A_2B_3 treatment, urease activity and soil nitrate nitrogen content of the A_2B_4 treatment decreased by 19.00%, 15.65% and -2.97%, 57.24%, respectively, and the soil ammonium nitrogen content and yield increased by 11.48%, 248.50% and 3.71%, 6.18% on average in the two years. In summary, under the condition of reducing nitrogen by 20%, the combination of nitrification inhibitor (DCD) and urease inhibitor (HQ) had the strongest supply capacity of soil available nitrogen, which could reduce nitrogen application without reducing corn yield.

Keywords: nitrogen reduction; nitrogen fertilizer synergist; soil available nitrogen; dry matter; yield

氮肥对玉米的增产效果显著^[1],但有研究^[2]发现,我国作物氮肥利用率仅在 30%左右,远低于欧美等发达国家(约 40%)。过量施氮不能提高作物氮肥利用效率,甚至在一定程度上造成玉米减产和环境污染^[3]。目前人们主要通过选育氮高效型玉米品种^[4]、施用缓控释肥料^[5]和氮肥增效剂^[6]等措施来减少化肥用量,提高作物氮肥利用效率。众多研究^[6-8]表明,施用氮肥增效剂可以抑制土壤氮素相关酶和菌群活性,降低氮肥释放效率,减缓铵态氮向硝态氮的转化,使氮肥肥效持久,提高氮肥利用效率,还能在一定程度上降低作物体内的硝酸盐含量。

目前,生产上主要被广泛应用的氮肥增效剂包括硝化抑制剂和脲酶抑制剂。硝化抑制剂可以抑制土壤中亚硝酸细菌的生长活动,提高土壤铵态氮含量,而将硝态氮维持在较低的水平^[7]。脲酶抑制剂通过抑制脲酶活性抑制尿素的水解^[8]。已有研究^[9]发现,硝化抑制剂和脲酶抑制剂配合施用不仅可以降低铵态氮向硝态氮的转化量,还可以降低脲酶活性,使氮肥作用持续从而不断地为玉米各个生育时期供给充足养分。王丹阳等^[10]研究表明,在华北平原地区氮肥配施氮肥增效剂能显著提高玉米产量、干物质量;杜震宇等^[11]研究发现,在北方地区施用氮肥增效剂对玉米增产效果明显;Drury 等^[12]研究发现,在加拿大中部地区尿素配施硝化抑制剂和脲酶抑制剂可使玉米增产 5%。西南丘陵地区土壤贫瘠,紫色黏土具有土层薄、保肥性差等问题,在作物种植过程中偏施氮肥,而大量施用氮肥会影响作物的产量和品质,同时造成资源浪费和环境污染。如何在减少氮肥用量的情况下保证玉米的产量是西南丘陵地区生产上急需解决的难题。氮肥增效剂对土壤速效氮及玉米产量的影响研究较多,但鲜见不同氮肥增效剂及氮肥增效剂复配对紫色黏土速效氮及玉米产量影响的研究。

因此,本研究以脲酶抑制剂(HQ)和硝化抑制剂(DCD)为材料,以探明不同施氮量与氮肥增效剂配施对西南丘陵紫色黏土速效氮含量和玉米干物质积累及产量的影响,旨在为西南地区玉米减氮增产种植和氮肥增效剂的大面积推广运用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 3 月至 2017 年 8 月在四川省德阳市中江县合兴乡新建村(104°37'E,30°35'N)进行。该地地力均匀、平整,灌排方便,属亚热带季风气候。供试土壤为紫色黏质土,试验点土壤肥力和气象资料见表 1 和图 1。

1.2 供试材料

试验材料选用当地主推玉米品种“正红 505”,选

用硝化抑制剂双氰胺(DCD)和脲酶抑制剂氢醌(HQ)为氮肥增效剂。

表 1 2016—2017 年玉米播前 0—20 cm 土层基础地力

指标	2016 年	2017 年
有机质/(g·kg ⁻¹)	14.53	20.51
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.07	1.42
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.15	0.16
全钾/(g·kg ⁻¹)	5.00	6.55
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	25.81	32.89
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	3.86	7.24
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	131.03	152.89
pH	7.55	7.60

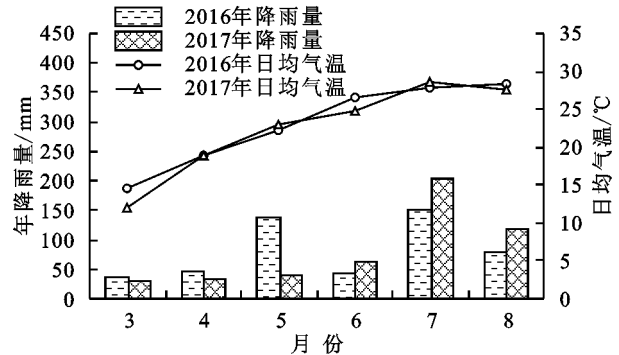


图 1 2016—2017 年玉米生长期各月份降雨量和日均气温

1.3 试验设计

试验采用施氮水平(A)和氮肥增效剂类型(B)2个因素随机区组设计。以西南地区常规施氮量为准,设置 A₁:270 kg/hm²(常规施氮)和 A₂:216 kg/hm²(常规减氮 20%)2 个施氮水平,氮肥为尿素。氮肥增效剂类型为 B₁:不施增效剂;B₂:DCD;B₃:HQ;B₄:DCD 与 HQ 复配,另设空白对照 CK:不施氮不施增效剂,DCD 和 HQ 处理均按尿素施入量的 1%施用,详见表 2。选择地势平整、排灌方便的地块,宽窄行种植 1.0 m+0.5 m,玉米种植密度 49 500 株/hm²,小区面积 21 m²,长 7 m,宽 3 m,9 个处理,重复 3 次,共 27 个小区。磷肥为过磷酸钙,施用量为 75 kg/hm²,钾肥为氯化钾,施用量为 90 kg/hm²,所有处理施肥均为一次性底施。其他管理、防治病虫害同当地玉米高产栽培。

1.4 取样与测定方法

1.4.1 土壤氮含量和脲酶活性测定 采集播种后 13,26,39 天、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、成熟期玉米 4 穴间 0—20 cm 土层土样备用,用于测定硝态氮、铵态氮和脲酶,每个处理 3 次重复。土壤样品分析方法参考《土壤农业化学分析方法》^[13]:土壤硝态氮含量测定采用紫外分光光度法;土壤铵态氮含量测定采用靛酚蓝比色法;土壤脲酶活性测定采用苯酚钠一次氯酸钠比色法^[14]。

1.4.2 玉米植株干物质积累与产量的测定 分别于

拔节期、大喇叭口期、吐丝期以及成熟期,每小区选取长势均一、有较好代表性植株 5 株,将植株地上部分在 105 ℃下杀青 30 min 后 80 ℃烘至恒重后称重。

表 2 肥料及氮肥增效剂施用量

单位:kg/hm ²						
氮肥水平	增效剂	尿素	过磷酸钙	氯化钾	双氰胺	氢醌
A ₁	CK		625.07	172.94		
	B ₁	586.96	625.07	172.94		
	B ₂	586.96	625.07	172.94	5.87	
	B ₃	586.96	625.07	172.94		5.87
	B ₄	586.96	625.07	172.94	5.87	5.87
A ₂	B ₁	469.76	625.07	172.94		
	B ₂	469.76	625.07	172.94	4.70	
	B ₃	469.76	625.07	172.94		4.70
	B ₄	469.76	625.07	172.94	4.70	4.70

注:A₁、A₂表示施氮量,分别为 270 kg/hm²(常规施氮)和 216 kg/hm²(常规减氮 20%);B₁、B₂、B₃、B₄分别表示不施氮增效剂、配施 DCD、配施 HQ、DCD 和 HQ 复配,CK 表示不施氮不施增效剂。下同。

收获前,各小区选取 20 株代表性植株考种,调查穗长、穗粗、穗粒数、秃顶长度、百粒重等,然后按各小

区实收计产。

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 软件进行分析整理,DPS 8.0 软件进行方差分析,采用最小显著差数法进行显著性水平检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 氮肥增效剂对土壤速效氮的影响

2.1.1 土壤铵态氮含量 由表 3 可知,减施氮肥显著降低了土壤铵态氮含量,而配施氮肥增效剂显著提高了土壤铵态氮含量。减氮配施增效剂处理 A₂B₂、A₂B₃、A₂B₄较常规施氮处理 A₁B₁,播种后 13 天—大口期土壤铵态氮含量 2 年平均分别提高 232.85%(DCD),6.00%(HQ),269.82%(DCD 与 HQ 复配);吐丝期—成熟期土壤铵态氮含量 2 年平均分别提高 85.62%(DCD),—26.03%(HQ),145.21%(DCD 与 HQ 复配)。配施氮肥增效剂处理土壤铵态氮含量总体表现为增效剂复配(B₄)>硝化抑制剂(B₂)>脲酶抑制剂(B₃),减氮 20%条件下 A₂B₂、A₂B₄播种后 13 天—成熟期土壤铵态氮含量 2 年平均较 A₂B₃提高 212.60%,248.50%。

表 3 氮肥增效剂对土壤铵态氮含量的影响

单位:mg/kg									
年份	氮肥水平	增效剂	13 天	26 天	39 天	拔节期	大口期	吐丝期	成熟期
2016	A1	CK	0.31B	0.26C	0.22B	0.21B	0.34C	0.15C	0.07C
		B1	15.56d	12.84d	8.73c	2.46c	1.57d	0.78d	0.16e
		B2	74.75a	56.54a	15.14a	11.30a	24.45a	2.16ab	0.57b
		B3	26.32c	17.03cd	6.74cd	1.59cd	23.68ab	0.59d	0.35c
		B4	79.49a	57.86a	15.50a	13.89a	24.97a	2.51a	0.91a
		平均	54.67A	41.81A	12.48A	8.22A	24.32A	1.70A	0.53A
	A2	B1	11.84d	6.26e	4.79d	2.52c	20.72c	1.55c	0.14e
		B2	58.51b	49.43b	11.38b	7.15b	23.12ab	1.83bc	0.36c
		B3	16.75cd	11.32d	5.93cd	0.94d	22.64abc	0.27e	0.23de
		B4	63.03b	50.47b	14.13ab	9.36b	23.34ab	1.91b	0.43c
		平均	42.21A	34.46B	9.93A	5.56A	22.66B	1.53B	0.31B
	F 值	A	9.46**	13.62*	45.33**	32.88**	49.59**	16.13**	26.05**
		B	2.15*	4.03*	6.20	5.76**	21.14**	3.47*	11.30**
		A×B	0.67	1.06	2.56	2.29*	2.18	0.09	0.42
	A1	CK	0.49B	0.38C	0.36B	0.30B	0.47C	0.27C	0.15C
		B1	16.67b	13.20b	10.58bc	4.65ab	2.76cd	1.54ab	0.44e
		B2	71.87ab	52.52cd	18.14b	12.65ab	24.76b	4.15ab	1.45b
		B3	29.13ab	15.48cd	8.28b	6.88abc	4.35b	2.47ab	0.76c
		B4	76.32a	57.77d	26.11a	16.13a	28.81a	6.87a	2.67a
		平均	53.62A	39.47A	17.27A	11.22A	17.49A	4.14A	1.51A
2017	A2	B1	15.47c	6.42b	5.97d	2.22d	2.41d	0.94c	0.25e
		B2	57.34b	47.23a	12.59cd	8.26bc	21.29c	2.72bc	0.51c
		B3	14.15b	8.68a	6.87cd	4.84c	2.24cd	1.29bc	0.37de
		B4	62.29b	51.28c	18.23bc	11.85ab	25.23c	3.88ab	0.94c
		平均	42.16A	33.40B	12.30A	7.33A	14.71B	2.44B	0.59B
	F 值	A	38.13**	27.26**	18.38**	41.63**	19.23*	34.08**	36.97**
		B	12.33**	15.72**	12.43**	59.17**	42.53**	6.19*	16.25*
		A×B	6.82*	4.24**	3.49*	16.62**	8.47*	1.61	5.76

注:同列数据不同大、小写字母表示相同年份不同处理间在 5%水平上差异显著;* 和 ** 分别表示达到 0.05 和 0.01 显著水平。下同。

2.1.2 土壤硝态氮含量 由表 4 可知,减施氮肥和配施氮肥增效剂处理均可显著降低土壤硝态氮含量。减氮配施氮肥增效剂处理 A₂B₂、A₂B₃、A₂B₄ 较常规施氮处理 A₁B₁,播种后 13 天—大口期的土壤硝态氮含量 2 年平均分别降低 73.81%(DCD),37.43%(HQ),72.64%(DCD 与 HQ 复配);吐丝期—成熟期

的土壤硝态氮含量 2 年平均分别降低 72.66%(DCD),31.99%(HQ),73.53%(DCD 与 HQ 复配)。配施硝化抑制剂(B₂)、DCD 与 HQ 复配(B₄)处理土壤硝态氮含量较配施脲酶抑制剂(B₃)低,减氮 20%条件下 A₂B₂、A₂B₄ 播种后 13 天—成熟期土壤硝态氮含量较 A₂B₃2 年平均分别下降 58.48%,57.24%。

表 4 氮肥增效剂对土壤硝态氮含量的影响 单位:mg/kg

年份	氮肥水平	增效剂	13 天	26 天	39 天	拔节期	大口期	吐丝期	成熟期
2016	A1	CK	2.44B	1.50C	2.37B	3.72B	3.34C	3.15C	2.92C
		B1	49.13a	33.42a	25.64a	18.32a	19.49a	17.57a	15.34a
		B2	16.37cd	11.34c	7.14cd	5.34c	5.45c	6.11c	5.08c
		B3	29.59b	21.96b	17.68b	14.65ab	15.23ab	15.59ab	14.16a
		B4	17.02c	13.97c	7.03cd	3.58d	3.34d	3.13d	3.27d
		平均	26.19A	19.08A	13.02A	9.34A	9.84A	9.21A	8.45A
	A2	B1	43.43a	23.98b	21.97ab	16.84a	20.72a	13.55b	14.18a
		B2	13.08d	8.84d	6.38cd	4.62d	4.75cd	4.32d	4.45cd
		B3	26.65b	22.47b	17.58b	12.33b	12.76b	11.87b	9.16b
		B4	14.22d	9.92d	5.53d	4.22d	5.16c	4.78d	4.22cd
		平均	21.98A	14.95B	11.59A	8.51A	8.53B	8.15B	7.09B
	F 值	A	7.09*	18.54*	11.42**	43.52**	23.04**	19.23**	8.31*
		B	1.13*	5.88*	2.03	9.85**	8.93**	5.28*	3.78*
		A×B	0.47	2.91*	1.20	3.27*	0.86*	1.33*	1.56*
2017	A1	CK	3.53B	2.71C	3.14B	4.26B	3.87C	3.69C	3.66B
		B1	53.76a	34.12a	23.64a	20.95a	22.47a	19.16a	17.60a
		B2	18.03c	13.21c	8.69c	7.02c	6.51d	6.33d	5.92c
		B3	32.47b	25.62b	19.34b	15.37b	17.82b	16.69bc	16.01a
		B4	17.88c	14.53c	6.24d	4.23d	3.58e	4.05e	3.85e
		平均	28.28A	20.89A	13.26A	10.63A	11.27A	10.21A	9.50A
	A2	B1	46.48a	24.65b	22.47a	17.15ab	22.25a	15.82bc	12.13b
		B2	12.16d	9.18d	8.44c	5.70cd	5.66de	5.43d	4.85d
		B3	28.73b	21.12bc	18.36b	13.71b	14.58c	13.53c	12.82b
		B4	15.17cd	10.24d	6.31d	5.14cd	6.42d	4.25e	5.19cd
		平均	24.12A	15.37B	12.66A	10.84A	10.72B	8.91B	8.11A
	F 值	A	6.30*	29.59*	22.51**	18.21**	11.01**	34.47**	4.47*
		B	52.82**	41.15**	13.46*	27.98**	6.13*	18.09**	12.86*
		A×B	9.31*	5.73*	4.07*	5.72*	0.98*	5.05*	2.28*

2.1.3 土壤脲酶活性 从表 5 可以看出,减少施氮量和配施增效剂都能显著抑制脲酶活性。与常规施氮处理 A₁B₁ 相比,减氮配施增效剂处理 A₂B₂、A₂B₃、A₂B₄,播种后 13 天—大口期脲酶活性 2 年平均分别降低29.98%(DCD),30.78%(HQ),42.66%(DCD 与 HQ 复配);吐丝期—成熟期脲酶活性 2 年平均分别降低 21.56%(DCD),30.54%(HQ),38.32%(DCD 与 HQ 复配)。配施氮肥增效剂处理土壤脲酶活性总体表现为增效剂复配(B₄)<脲酶抑制剂(B₃)<硝化抑制剂(B₂)。减氮 20%条件下 A₂B₃、A₂B₄ 播种后 13 天—成熟期脲酶活

性较 A₂B₂ 2 年平均分别降低 3.97%,19.00%。

2.2 氮肥增效剂对玉米植株干物质积累和产量的影响

2.2.1 玉米植株干物质积累 由表 6 可知,减施氮肥降低了玉米单株干物质量,而配施氮肥增效剂可显著提高玉米单株干物质量。减氮配施增效剂处理 A₂B₂、A₂B₃、A₂B₄ 玉米各个时期单株干物质量与常规施氮处理 A₁B₁ 无显著差异(P<0.05)。配施氮肥增效剂处理玉米各个时期单株干物质总体表现为增效剂复配(B₄)>硝化抑制剂(B₂)>脲酶抑制剂(B₃)。减氮 20%条件下吐丝期和成熟期玉米单株干物质量 A₂B₂、A₂B₄ 较 A₂B₃ 2

年平均分别提高3.02％,9.74％和 0.46％,1.89％。

2.2.2 玉米产量及产量构成 由表 7 可知,随施氮量减少,玉米产量降低,而配施氮肥增效剂可改善穗部性状,提高玉米产量。减氮配施增效剂处理 A₂B₂、A₂B₃、A₂B₄的产量与常规施氮处理 A₁B₁差异不显著($P<0.05$)。常规施氮条件下 A₁B₂、A₁B₃、A₁B₄较 A₁B₁产量 2 年平均分别提高 9.19％(DCD),5.53％(HQ),13.97％(DCD 与 HQ 复配);减氮 20％条件下 A₂B₂、A₂B₃、A₂B₄较 A₂B₁产量 2 年平均分别提高

12.87％(DCD),10.24％(HQ),17.05％(DCD 与 HQ 复配)。减氮 20％配施增效剂玉米增产幅度大于常规氮配施增效剂。配施氮肥增效剂玉米产量总体表现为增效剂复配(B₁)>硝化抑制剂(B₂)>脲酶抑制剂(B₃)。减氮 20％条件下 A₂B₂、A₂B₄产量较 A₂B₃2 年平均分别增加 2.38％,6.18％;穗长 2 年平均分别增加0.31％,1.35％;穗粗 2 年平均分别增加 1.56％,4.64％;穗粒数 2 年平均分别增加 0.58％,2.72％;百粒重 2 年平均分别增加 1.54％,3.22％;凸尖长 2 年平均分别减少1.45％,39.64％。

表 5 氮肥增效剂对土壤脲酶活性的影响

单位:mg/g

年份	氮肥水平	增效剂	13 天	26 天	39 天	拔节期	大口期	吐丝期	成熟期
2016	A1	CK	0.15C	0.16C	0.19C	0.25B	0.27B	0.25B	0.23B
		B1	0.73a	0.34b	0.62b	0.40a	0.45a	0.42a	0.41a
		B2	0.71a	0.42a	0.63ab	0.39a	0.44ab	0.43a	0.42a
		B3	0.58b	0.29bc	0.56c	0.33bc	0.34c	0.34c	0.32c
		B4	0.51c	0.21d	0.28e	0.29c	0.31d	0.28d	0.27d
		平均	0.65A	0.34A	0.55A	0.36A	0.39A	0.37A	0.37A
	A2	B1	0.58b	0.32bc	0.53c	0.38ab	0.41b	0.39b	0.38b
		B2	0.42d	0.25d	0.46d	0.34b	0.35c	0.33c	0.36c
		B3	0.45cd	0.29bc	0.43d	0.29c	0.33c	0.31cd	0.31cd
		B4	0.45cd	0.17e	0.27e	0.26d	0.29d	0.26e	0.27e
		平均	0.47B	0.26B	0.43B	0.33A	0.35A	0.32A	0.32A
	F 值	A	16.87**	21.48*	39.33**	27.69**	19.45**	14.82**	26.05**
		B	9.75*	4.61*	8.43*	6.37*	5.12*	2.87**	11.30**
		A×B	1.21	1.55	1.12	2.74*	1.92*	0.93	0.42
2017	A1	CK	0.18C	0.20C	0.22C	0.25B	0.27C	0.25B	0.23B
		B1	0.71a	0.46a	0.39b	0.43a	0.44a	0.42ab	0.42a
		B2	0.72a	0.47a	0.38ab	0.43a	0.45a	0.44a	0.41a
		B3	0.55bc	0.31bc	0.31c	0.33bc	0.35b	0.32c	0.31c
		B4	0.48bc	0.25d	0.27e	0.28cd	0.31cd	0.27cd	0.28d
		平均	0.64A	0.39A	0.35A	0.36A	0.40A	0.37A	0.36A
	A2	B1	0.57bc	0.38b	0.36c	0.39ab	0.40a	0.39b	0.37b
		B2	0.44d	0.27c	0.26d	0.34bc	0.35bc	0.33c	0.29cd
		B3	0.43d	0.29bc	0.29d	0.31cd	0.33bc	0.29cd	0.25d
		B4	0.41d	0.23d	0.21e	0.27d	0.29d	0.24e	0.26d
		平均	0.46B	0.29B	0.28B	0.33A	0.34B	0.32A	0.30A
	F 值	A	24.89**	14.53*	17.49**	15.97**	21.38**	32.61**	4.96
		B	6.13**	7.96*	6.02*	34.67*	12.45*	24.86**	9.33
		A×B	8.42*	5.07	2.72	0.92*	0.06*	7.09	2.45*

3 讨论

3.1 减氮配施氮肥增效剂可增强土壤速效氮供应能力

玉米需肥特点为前轻后重,生长前期土壤速效氮水平远超过玉米吸氮水平,导致大量的土壤氮素以硝态氮淋失或 NH₃挥发等方式损失^[15]。葛均筑等^[16]研究发现,生育后期植株氮素积累量对玉米产量形成具有决定作用,土壤供氮不足将导致玉米

严重减产,因此生育后期充足的土壤速效氮水平是玉米获得高产的前提。脲酶是土壤中唯一作用于尿素的酶蛋白,可将土壤有机态氮转化为土壤速效氮^[17]。尿素施入土壤后经脲酶催化水解成 NH₃,NH₃可挥发或者以 NH₄⁺—N 的形式被土壤中带负电的黏土和土壤有机物功能团吸附,但大部分 NH₄⁺—N 都在硝化细菌作用下被氧化为 NO₃⁻—N^[18]。因此抑制

脲酶活性对增长氮肥作用时间至为重要。张文学等^[19]研究表明,脲酶抑制剂可以有效抑制土壤脲酶活性,且抑制作用受水分等环境因子的综合影响;曹银珠等^[20]研究表明,硝化抑制剂的施用明显延缓了土壤硝化反应进程,显著降低土壤铵态氮向硝态氮的转化量。

本研究表明,减施氮肥显著降低了土壤铵态氮含量,而配施氮肥增效剂能显著提高土壤铵态氮含量,减施氮肥和配施氮肥增效剂均显著降低了土壤脲酶活性和硝态氮含量。与常规施氮处理 A₁B₁ 相比,减氮配施增效剂处理 A₂B₂、A₂B₃、A₂B₄ 的脲酶活性始

终处于较低水平,显著抑制 NH₄⁺—N 向 NO₃⁻—N 的转化,且抑制作用营养生长期强于生殖生长期。营养生长期对氮素较强的保蓄作用,避免了氮素的大量浪费,从而满足了生殖生长期玉米对土壤速效氮的需求。播种后 13 天一成熟期,A₂B₄ 土壤脲酶活性较 A₂B₂、A₂B₃ 2 年平均分别降低 19.00%和 15.65%;土壤铵态氮含量 2 年平均分别提高 11.48%,248.50%;土壤硝态氮含量 2 年平均分别降低-2.97%,57.24%。综上,减氮配施增效剂可改善土壤速效氮供应状况,使铵态氮成为土壤中氮素的主要存在形式,降低硝态氮淋失等损失,减氮 20%条件下 A₂B₄ 的土壤速效氮供应能力最强。

表 6 氮肥增效剂对玉米单株干物质积累的影响 单位:g/plant

年份	氮肥水平	增效剂	拔节期	大口期	吐丝期	成熟期
2016	A1	CK	3.36C	68.58C	104.18C	160.03C
		B1	7.08cd	99.85cd	160.73cd	320.19bc
		B2	8.41bc	102.65bc	170.08bc	323.98b
		B3	7.97bc	102.43bcd	162.21cd	323.14bc
		B4	12.03a	108.73a	189.93a	335.97a
		平均	9.03A	104.06A	172.58A	328.01A
	A2	B1	5.77d	91.30f	146.39e	305.10f
		B2	7.15cd	93.57ef	157.01cde	315.54de
		B3	7.14cd	92.57f	151.55de	314.37e
		B4	8.63bc	97.81de	168.22bc	319.51cd
		平均	7.36B	94.60B	157.94B	314.91B
	F 值	A	14.73**	86.97**	26.05**	48.40**
		B	9.26**	8.27**	11.30**	9.90*
		A×B	1.06*	0.07	0.42	4.52*
2017	A1	CK	6.36C	82.47C	134.37C	232.47C
		B1	7.62cd	106.13cd	165.67cd	340.15bc
		B2	9.56bc	110.94bc	178.29bc	345.51b
		B3	8.87bc	109.53bcd	169.26cd	341.24bc
		B4	12.76a	121.22a	194.88a	353.49a
		平均	9.75A	111.96A	177.03A	345.10A
	A2	B1	6.58d	96.10f	151.47e	317.51f
		B2	8.23cd	101.73e	162.87cde	329.43de
		B3	8.36cd	102.19e	158.94de	327.66e
		B4	9.77bc	105.32de	172.52bc	334.68cd
		平均	8.24B	101.34B	161.45B	327.32B
	F 值	A	24.81**	43.15**	16.84**	31.16**
		B	17.42**	13.54*	5.46*	14.03*
		A×B	5.64*	5.67*	1.29	2.77*

3.2 减氮配施增效剂可改善产量构成,提高玉米产量

玉米生育后期干物质积累是籽粒产量形成的前提,养分吸收是干物质形成和累积的物质基础^[21]。已有研究^[10,22]表明,施用氮肥增效剂的玉米干物质质量、产量较不施增效剂明显增加。对氮肥增效剂是否

能增加作物产量有不同的观点,Diego 等^[23]研究表明,氮肥增效剂的施用对作物产量的影响与环境和管理措施有关;也有研究^[24]表明,土壤质地越黏重,氮肥增效剂对作物产量影响越小。

本研究结果表明,施氮量减少,玉米单株干物质

量、产量均降低,而配施氮肥增效剂可提高玉米单株干物质量、产量。本试验还发现,配施增效剂玉米增产幅度表现为减氮 20%>常规施氮,在减氮 20%条件下施用增效剂的增产效果更好。此外,减氮配施增效剂可促进玉米干物质积累,改善产量构成,提高玉米产量,实现减氮不减产。减氮 20%条件下 A₂B₄产量最高。与 A₂B₂、A₂B₃相比,A₂B₄产量 2 年平均分别增加 3.71%,6.18%;穗粒数 2 年平均分别增加 2.12%,

2.72%;百粒重 2 年平均分别增加 1.65%,3.22%;凸尖长 2 年平均分别减少 38.75%,39.64%。增产原因可能是 DCD 与 HQ 复配土壤速效氮供应能力最强,使更多的氮素保存在土壤中供玉米后期吸收利用,从而增加干物质量,提高产量。西南地区土质类型为土壤肥力低的紫色黏土,通过配施氮肥增效剂可改善土壤速效氮供应,促进玉米干物质积累和产量的提高,同时在减施氮肥情况下保证玉米增产或稳产。

表 7 氮肥增效剂对产量及构成的影响

年份	氮肥水平	增效剂	穗长/ cm	秃尖长/ cm	穗粗/ mm	穗粒数/ 粒	百粒重/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
2016	A1	CK	13.42B	2.61C	43.76B	349.37B	21.17C	3684.81C
		B1	17.99b	1.03b	52.76bc	730.65ab	22.72cd	7928.95ab
		B2	18.35ab	0.70cd	56.59b	736.42ab	24.45b	8580.88ab
		B3	18.32ab	0.71cd	57.74b	735.17abc	23.68b	8299.32ab
		B4	18.57a	0.63d	56.50a	748.85a	24.97a	8900.23a
		平均	18.38A	0.72A	57.60A	742.27A	24.32A	8532.88A
	A2	B1	16.64c	1.10b	50.59d	684.52d	20.72d	6755.48c
		B2	17.87b	1.06a	53.88cd	704.66bc	23.12c	7745.65bc
		B3	17.81b	1.32a	51.93cd	701.08c	22.64cd	7511.34bc
		B4	18.07b	0.77c	54.99bc	720.36ab	23.34c	7979.97ab
		平均	17.86A	0.99B	53.51A	706.75A	22.66B	7615.27B
	F 值	A	9.46**	13.62	45.33**	32.88**	49.59**	66.13**
		B	2.15*	4.03*	6.20	5.76**	21.14**	23.47**
		A×B	0.67	1.06	2.56	2.29*	2.18	12.89*
2017	A1	CK	15.39B	2.26A	51.75C	412.66C	20.65C	4218.16C
		B1	20.17b	1.46b	55.08b	734.97ab	22.42cd	7611.43ab
		B2	21.77ab	0.83cd	56.97ab	732.82ab	24.78b	8388.03ab
		B3	21.53ab	0.85cd	54.23bc	729.43abc	24.04b	8099.89ab
		B4	22.33a	0.70d	57.61a	744.28a	25.63a	8811.42a
		平均	21.65A	0.90C	56.28A	736.40A	24.48A	8327.07A
	A2	B1	19.64c	1.39b	51.17d	675.56d	21.51d	6712.21c
		B2	20.87b	1.65a	52.76cd	702.94bc	22.96c	7455.06bc
		B3	20.81b	1.43b	53.07cd	698.37c	22.74cd	7335.63bc
		B4	21.07b	0.89cd	54.88bc	717.14ab	23.50c	7784.54ab
		平均	20.87A	1.27B	53.64B	702.15B	22.87B	7425.42B
	F 值	A	15.45**	7.64*	56.23**	28.49**	28.54**	34.21**
		B	24.72**	6.32*	24.71**	5.12*	10.03**	11.35*
		A×B	8.91*	1.79	8.44	1.98*	5.16*	7.86*

4 结 论

施氮量减少时,氮肥增效剂通过增强土壤速效氮供应能力,促进干物质积累,改善产量构成,提高玉米产量,实现减氮不减产。减氮条件下配施增效剂玉米产量增幅更高。减氮 20%条件下,DCD 与 HQ 复配产量分别较 DCD、HQ 2 年平均分别增产 3.71%,6.18%。DCD 与 HQ 复配土壤速效氮供应能力最强,从而拥有更高的干物质量和籽粒产量。

参考文献:

[1] 马晓君,李强,王兴龙,等.供氮水平对不同氮效率玉米物质积累及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2017(2): 63-68.

[2] 颜晓元,夏龙龙,遆超普.面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J].中国科学院院刊,2018,33(2):177-183.

[3] 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.

[4] 李强,孔凡磊,袁继超.氮肥运筹对不同氮效率玉米品种

干物质生产及产量的影响[J].华北农学报,2018,33(6):174-182.

[5] 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.

[6] 郝小雨,马星竹,陈苗苗,等.氮肥配施增效剂实现寒地水稻增产、提质与增效[J].水土保持学报,2019,33(4):175-179.

[7] 鲁艳红,聂军,廖育林,等.氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):95-104.

[8] 李玉,王茂莹,张倩,等.包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长的影响及其机理研究[J].水土保持学报,2020,34(2):283-289.

[9] 王静,王允青,张凤芝,等.脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):211-216.

[10] 王丹阳,边文范,董晓霞,等.氮肥增效剂用量对玉米产量和氮素利用率的影响[J].山东农业科学,2019,51(12):53-57.

[11] 杜震宇,童淑媛.超密植条件下施用氮肥增效剂对玉米茎秆特性和产量的影响[J].江苏农业科学,2014,42(5):108-110.

[12] Drury C F, Yang X, Reynolds W D, et al. Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia and nitrous oxide emissions and increases corn yields[J].Journal of Environmental Quality, 2017,46(5):939-949.

[13] 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,2000:128-133.

[14] 关松荫.土壤酸及研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[15] 侯云鹏,杨健,尹彩侠,等.氮肥后移对春玉米产量、氮素吸收利用及土壤氮素供应的影响[J].玉米科学,2019,27(2):146-154.

[16] 葛均筑,徐莹,袁国印,等.覆膜对长江中游春玉米氮肥利用效率及土壤速效氮素的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):296-306.

[17] 秦宇坤,李鹏程,郑苍松,等.氮肥施用量对棉花产量及土壤脲酶活性的影响[J].新疆农业大学学报,2018,41(2):86-92.

[18] 陈仙仙,王趁义,黄兆玮,等.第四类配合物型脲酶抑制剂对油菜生长及土壤氮素转化的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):180-186.

[19] 张文学,王萍,孙刚,等.脲酶抑制剂不同用量对土壤氮素供应的影响[J].中国土壤与肥料,2018(6):38-44,52.

[20] 曹银珠,赵同科,刘树庆,等.脲酶/硝化抑制剂双控过程中硝化抑制尿素分解效应[J].水土保持学报,2015,29(4):143-147.

[21] 武文明,陈洪俭,王世济,等.氮肥运筹对苗期受渍夏玉米干物质和氮素积累与转运的影响[J].作物学报,2015,41(8):1246-1256.

[22] 巩俊花,高俊岭,刘月田,等.不同类型稳定性增效剂对玉米生长发育及其产量的影响[J].安徽农业科学,2020,48(14):153-155.

[23] Diego A, Simon J, Alberto S C, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2014,189:136-144.

[24] 李香兰,徐华,蔡祖聪.氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J].土壤学报,2009,46(5):917-924.

(上接第 275 页)

[15] 鲍士旦.土壤农化分析 [M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[16] 李鑫鑫,刘洪光,龚萍,等.膜下滴灌棉花不同种植模式土壤水分分布规律研究与数值模拟[J].节水灌溉,2018(8):23-29.

[17] 陶婷,吕新,陈剑,等.不同滴灌施肥方式对棉田土壤含水率、硝态氮分布及对产量的影响[J].棉花学报,2015,27(4):329-336.

[18] 席奇亮,葛国锋,周方,等.2 种滴灌毛管灌水均匀度对铺设长度和进水压力的响应[J].灌溉排水学报,2018,37(3):78-83.

[19] 王霞,崔春亮,阿不都·沙拉木,等.不同类型滴灌毛管灌水均匀度田间试验分析[J].节水灌溉,2012(8):12-15.

[20] 郑彩霞,张富仓,贾运岗,等.不同滴灌量对土壤水氮运移规律研究[J].水土保持学报,2014,28(6):167-170,176.

[21] Min W, Guo H J, Hou Z A, et al. Root distribution and growth of cotton as affected by drip irrigation with saline water [J].Field Crops Research,2014,169:1-10.

[22] Feng S W, Gu S B, Zhang H B, et al. Root vertical distribution is important to improve water use efficiency and grain yield of wheat [J].Field Crops Research, 2017,214:131-141.

[23] 高超,李明思,蓝明菊.土壤水分空间胁迫对棉花根系构型的影响[J].棉花学报,2018,30(2):180-187.

[24] 徐新霞.行距配置对机采棉花产量形成及采收品质的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.

[25] 金可默.作物根系对土壤异质性养分和机械阻力的响应及其调控机制研究[D].北京:中国农业大学,2015.