

黄 强, 郑顺林, 郭 函, 等. 氮增效剂对马铃薯叶片及土壤氮的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1087-1094.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.05.013

## 氮增效剂对马铃薯叶片及土壤氮的影响

黄 强<sup>1</sup>, 郑顺林<sup>1,2</sup>, 郭 函<sup>1</sup>, 龚 静<sup>1</sup>, 王湖川<sup>1</sup>, 袁继超<sup>1</sup>, 何 卫<sup>3</sup>

(1. 四川农业大学农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 成都 611130; 2. 农业部薯类作物遗传育种重点实验室/成都久森农业科技有限公司, 四川 成都 610500; 3. 四川省农业科学院作物研究所, 四川 成都 610066)

**摘要:** 采用随机区组试验, 研究不同施氮水平下, 氮增效剂对土壤铵态氮含量、硝态氮含量、马铃薯叶片硝态氮含量及谷氨酰胺合成酶活性的影响, 为氮增效剂的合理使用提供理论依据。结果表明, 氮增效剂双氰胺(DCD)、2-氯-6(三氯甲基)吡啶(CP)能显著提高土壤铵态氮含量、土壤铵硝比, 将土壤硝态氮、叶片硝态氮维持在低水平状态, 延长尿素肥效, 减少马铃薯植株硝酸盐含量, 提高谷氨酰胺合成酶活性; 正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)对土壤铵硝比、叶片氮素影响不显著, 但能显著抑制马铃薯生育前期土壤脲酶活性。随着生育期的推移, 氮增效剂 DCD、CP 作用效果在低氮水平下快速下降, 并在苗期效果最优, 显著提高了低氮水平下土壤铵态氮含量及铵硝比; 在中氮水平下作用效果先升后降, 在块茎形成期作用效果最优, 显著提高了中氮水平下土壤铵态氮含量及铵硝比。说明, 氮增效剂 DCD、CP 能显著提高春马铃薯土壤铵态氮、铵硝比, 降低土壤及叶片硝态氮含量, 延长尿素供氮时间; CP 比 DCD 作用时效更长, 更稳定, NBPT 作用不显著。

**关键词:** 马铃薯; 氮增效剂; 氮素转化; 氮肥浓度

**中图分类号:** S532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)05-1087-08

## Effects of nitrogen synergist on nitrogen in potato leaves and soil

HUANG Qiang<sup>1</sup>, ZHENG Shun-lin<sup>1,2</sup>, GUO Han<sup>1</sup>, GONG Jing<sup>1</sup>, WANG Hu-chuan<sup>1</sup>, YUAN Ji-chao<sup>1</sup>, HE Wei<sup>3</sup>

(1. *Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Southwest China, Ministry of Agricultural, Chengdu 611130, China*; 2. *Key Laboratory of Potato Crop Genetics and Breeding, Ministry of Agriculture/ Chengdu Jiusen Agricultural Technology Co., Ltd., Chengdu 610500, China*; 3. *Crop Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China*)

**Abstract:** In order to provide theoretical basis for the rational use of nitrogen synergists, the effects of nitrogen synergists on soil ammonium nitrogen content, soil nitrate nitrogen content, nitrate nitrogen content in potato leaves and glutamine synthetase activity under different nitrogen application levels were studied by randomized block experiment. The results showed that nitrogen synergists DCD and CP could significantly increase soil ammonium nitrogen content and soil ammonium-nitrate ratio, keep soil nitrate nitrogen and leaf nitrate nitrogen in a low level, prolong urea fertilizer efficiency, reduce nitrate content of potato plants and increase glutamine synthetase activity. NBPT had no significant effect on soil ammonium-

nitrate ratio and leaf nitrogen, but it could significantly inhibit soil urease activity in the early growth stage of potato. The effect of nitrogen synergist DCD and CP on soil ammonium nitrogen content and ratio of ammonium to nitrate at low nitrogen application level decreased rapidly with the development of growth period, and the effect was the best at seedling stage. The effect on soil ammonium nitrogen content and ratio of ammonium to nitrate increased

收稿日期: 2018-12-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200808); 四川省育种攻关及配套项目(2016NYZ0051-5、2016NYZ0032); 四川马铃薯创新团队支持项目(2016NYZ0051-5、2016NYZ0032)

作者简介: 黄 强(1992-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向马铃薯高产栽培。(E-mail) 1020136338@qq.com

通讯作者: 郑顺林, (Tel) 13882443935

forst and then decreased at medium nitrogen application level, and the effect was the best at tuber formation stage. Furthermore, the content of soil ammonium nitrogen and ratio of ammonium to nitrate increased significantly at low and medium nitrogen application level. In conclusion, DCD and CP could significantly increase ammonium nitrogen and ammonium-nitrate ratio in spring potato soil, reduce the content of nitrate nitrogen in soil and leaves, and prolong the nitrogen supply time of urea. The effect of CP was longer and more stable than that of DCD, while NBPT had no significant effect.

**Key words:** potato; nitrogen synergist; nitrogen transformation; nitrogen fertilizer concentration

氮肥对马铃薯增产作用显著,但中国马铃薯的氮肥利用率仅在35%~50%,部分地方只有20%<sup>[1]</sup>,氮肥过量和低效率施用不仅不能增加马铃薯产量<sup>[2]</sup>,还会带来资源浪费与环境污染等问题<sup>[3-4]</sup>。当前一些学者提出了合理控制氮肥用量、优化施肥方式、改善管理方式、发展新型肥料等措施来提高作物氮肥利用效率<sup>[5-9]</sup>。针对当前中国人多地少、农村劳动力日趋减少的现状,发展一次性缓/控释氮肥是比较合理和易于推广的措施<sup>[10]</sup>。

许多研究结果表明,氮增效剂能抑制土壤氮素相关酶和菌群活性,减缓尿素分解,延长铵态氮存留时间,延长氮肥肥效,提高氮素利用效率<sup>[11-12]</sup>。脲酶抑制剂可以抑制脲酶活性而减缓尿素的水解速度以及氨的释放速率,进而减少氨挥发与硝化反应导致的氮素损失<sup>[13]</sup>。硝化抑制剂能够抑制土壤中亚硝化和硝化细菌的活性,可以调控土壤氮素的迁移转化,延长铵态氮在土壤停留的时间,降低氮素径流与淋溶损失量,从而有效减少氮素损失和提高氮素利用率<sup>[14-15]</sup>,增加作物产量。但氮增效剂作用效果不仅受到土壤类型、pH值、温度等的影响,还受到施氮量和施肥方式等的影响<sup>[16-17]</sup>。有研究表明,氮增效剂随着施用的时间推移效果逐渐减弱<sup>[18-19]</sup>,氮增效剂施用时间和尿素施用量对其作用效果影响较大。针对川渝马铃薯主产区重基肥和晚发育生长的特点,筛选时效长、性能稳定的氮增效剂尤为重要。孙海军等<sup>[20]</sup>研究表明,硝化抑制剂CP应用于水稻的效果与施氮水平显著相关。目前研究硝化抑制剂多是在同一施氮水平下对氮素转化过程的影响<sup>[21]</sup>或者比较不同氮增效剂的施用效果<sup>[22-23]</sup>,关于不同施氮水平对氮增效剂作用影响的研究不充分。

本试验设置5个氮浓度梯度,研究不同氮浓度下脲酶抑制剂NBPT、硝化抑制剂DCD以及CP对马铃薯叶片、土壤氮素形态转化的影响,探究不同氮增效剂在不同氮浓度下作用规律,为氮增效剂的合

理使用及马铃薯减氮增产种植提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

供试材料为脱毒马铃薯川芋117,为保证材料的一致性,减少试验误差,试验用种薯均选用20~25g质量均匀一致的马铃薯脱毒原种。

### 1.2 试验设计

试验在2017年1月下旬至2017年6月上旬于成都温江进行控制盆栽试验。基质采用成都平原壤土与珍珠岩按体积比1:1均匀混合。基质中全氮20.41g/kg,铵态氮28.83mg/kg,硝态氮13.64mg/kg,速效磷21.13mg/kg,速效钾8.30mg/kg。全市2017年春季平均气温17.1℃。

试验采用氮增效剂类型(A)和施氮水平(N)二因素随机区组设计,氮增效剂分别为正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)、双氰胺(DCD)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)、以不添加氮增效剂作为对照(CK),分别以A1、A2、A3、A4表示,氮增效剂NBPT、DCD、CP添加量分别为尿素质量的1.0%、1.0%、0.1%;施氮量设5个水平,换算得1hm<sup>2</sup>纯氮施用量分别为30kg、60kg、90kg、120kg、150kg,分别以N1、N2、N3、N4、N5表示;每盆施22.22g硫酸钾、12.53g过磷酸钙,氮肥及磷钾肥以基肥形式一次施入。试验共20个处理,每处理重复3次(3盆为一重复)。试验盆长宽高分别为38cm×38cm×30cm,每盆10kg风干基质,播种4苗,播深5cm。盆栽置于露天空旷通风处,按照常规马铃薯生产方法管理。

### 1.3 取样及测定方法

在马铃薯苗期(3月7日至10日)、块茎形成期(4月6日至8日)、块茎成熟期(5月16日至20日)的晴天早晨采用抖根法取马铃薯根际,置于阴凉通风处晾干备用;取马铃薯功能叶(倒4叶、倒5叶)迅速冷冻制样备用。土壤硝态氮含量测定采用紫外分光光度法,土壤铵态氮含量和土壤脲酶活性

采用靛酚蓝比色法<sup>[24]</sup>测定,叶片硝态氮含量选用水杨酸-硫酸法测定,叶片谷氨酰胺合成酶活性测定采用氨基苯磺酸比色法<sup>[25]</sup>。

#### 1.4 数据处理

数据分析采用 Microsoft Excel 2010 和 IBM SPSS Statistics 22 统计分析软件进行统计分析,采用 Origin 软件制图。

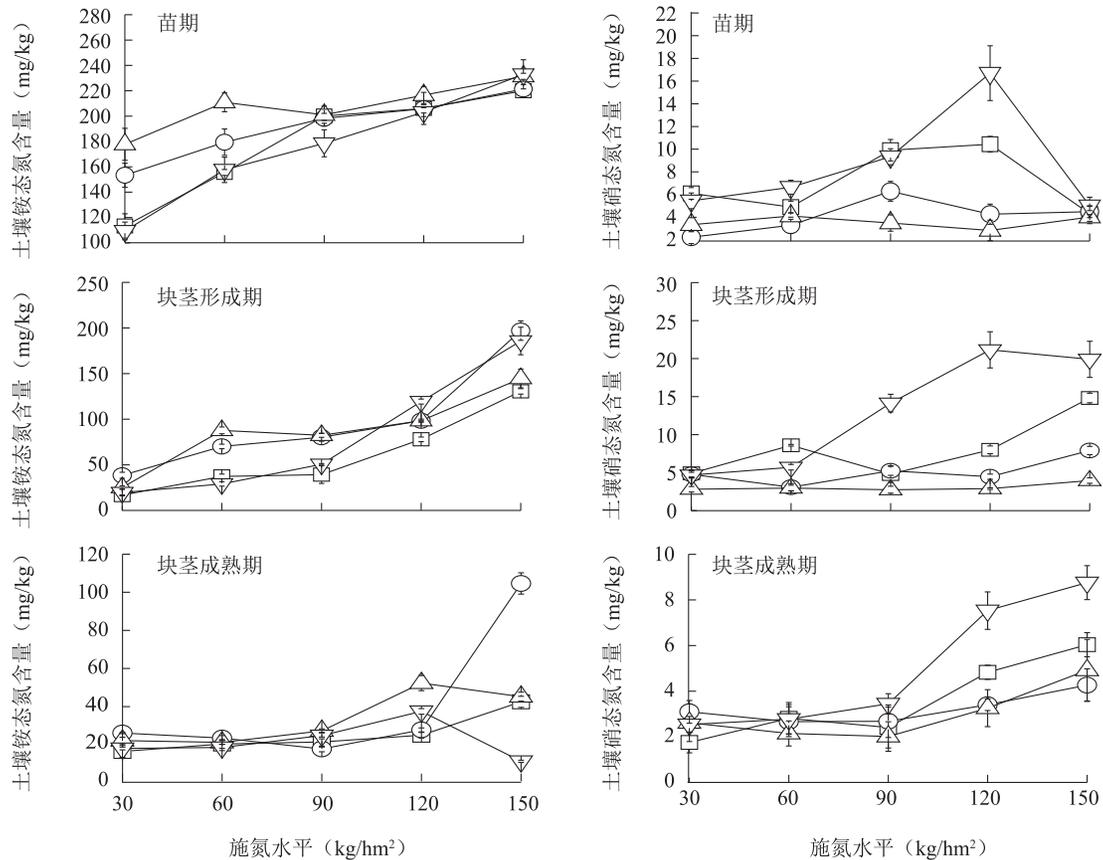
## 2 结果与分析

### 2.1 氮增效剂对土壤氮素的影响

2.1.1 对土壤中铵态氮含量的影响 氮肥增效剂能有效地提高马铃薯各时期土壤铵态氮含量,在苗期及块茎形成期作用优于块茎成熟期(图 1)。与 CK 相比,氮增效剂 DCD、CP 对土壤铵态氮的增加

效果在苗期会随着施氮水平的提高而减弱,30 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平时最强,分别提高了 40.11%、60.23%;在块茎形成期,60 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平时影响最为显著,分别提高了 146.02%、202.01%;在块茎成熟期,150 kg/hm<sup>2</sup>水平时影响效果最为显著。氮增效剂 NBPT 分别显著降低了块茎形成期 90 kg/hm<sup>2</sup>、120 kg/hm<sup>2</sup>、150 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平的土壤铵态氮含量 22.31%、34.72%、29.74%。

2.1.2 对土壤中硝态氮含量的影响 由图 1 可知,在 CK 中,马铃薯苗期和块茎形成期土壤硝态氮含量均随着施氮水平的提升呈先上升后下降的趋势,拐点均为 120 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平,分别为 16.69 mg/kg、21.15 mg/kg;马铃薯块茎成熟期土壤硝态氮含量均处于较低水平。



□-氮肥增效剂正丁基硫化磷酰三胺(NBPT);○-氮肥增效剂双氰胺(DCD);△-氮肥增效剂2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP);▽-CK

图 1 氮增效剂对马铃薯各生育时期土壤铵态氮、硝态氮含量的影响

Fig.1 Effect of nitrogen synergist on soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents at different growth stages of potato

氮增效剂 DCD、CP 处理的土壤硝态氮维持在 2.24~7.91 mg/kg 低含量,且施氮水平和马铃薯生长时期对其含量影响程度较小。表明氮增效剂 DCD、

CP 能抑制土壤铵态氮向硝态氮的转化,将土壤硝态氮含量维持在一个较低水准,减小了施氮水平和生育时期对土壤硝态氮的影响。氮增效剂 NBPT 比

CK显著降低了块茎形成期90 kg/hm<sup>2</sup>、120 kg/hm<sup>2</sup>、150 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平处理的土壤硝态氮含量,分别降低了66.02%、62.19%、25.58%。表明高氮水平下,氮增效剂NBPT处理能降低块茎形成期的土壤硝态氮含量,低氮水平和苗期无显著差异。

2.1.3 对土壤中铵硝比的影响 由图2可知,在CK中,马铃薯苗期、铵硝比平均值分别为24.39、5.62、5.58;在添加氮增效剂DCD、CP处理中,马铃薯苗期铵硝比平均值分别为51.47、60.66,块茎形成期铵硝比平均值分别为18.71、27.89,块茎成熟期铵硝比平均值分别为11.40、10.91。表明未添加氮增效剂时,土壤铵硝比随生育期的推移迅速降低,至块茎形成

期趋于平稳;氮增效剂DCD、CP能显著提高各时期马铃薯土壤铵硝比,且随着马铃薯的生长发育,对铵硝比的影响逐渐减弱;氮增效剂CP比DCD对铵硝比的影响作用时效长,效果更稳定。

由图2还可知,氮增效剂对土壤铵硝比的影响在马铃薯生育前期低氮水平下效果最优,但其影响效果随生育期的推移迅速下降;在马铃薯生育后期中高氮水平下氮增效剂作用效果最优,随生育期的推移作用效果先升后降,在块茎成熟期作用效果仍然较为明显。NBPT处理铵硝比随施氮水平的增加在各时期变化与CK处理差异较小,表明氮增效剂NBPT对土壤铵硝比影响不显著。

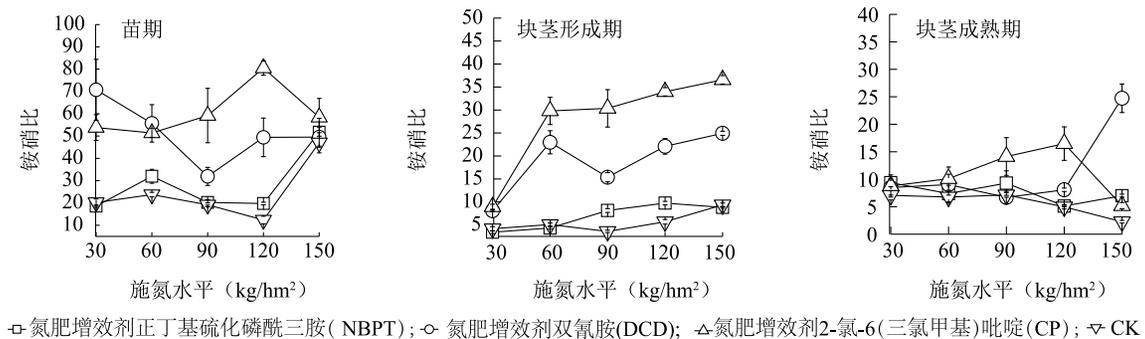


图2 氮增效剂对马铃薯各生育时期土壤铵硝比的影响

Fig.2 Effects of nitrogen synergist on soil ammonium-nitrate ratio at different growth stages of potato

2.1.4 对土壤中脲酶活性的影响 由表1可知,各氮素水平下各时期脲酶活性变化差异相对较小。与CK相比,氮增效剂NBPT处理显著降低了苗期90 kg/hm<sup>2</sup>、120 kg/hm<sup>2</sup>、150 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平下脲酶活性,分别降低了23.51%、74.10%、71.79%,块茎形成期150 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平下降低了41.63%。表明氮增效剂NBPT在苗期高氮水平下抑制了土壤脲酶活性,随着时间的推移,抑制效果逐渐减弱。氮增效剂DCD和CP对土壤脲酶活性的影响不明显。

## 2.2 氮增效剂对马铃薯氮素及转化的影响

2.2.1 对马铃薯叶片硝态氮的影响 由表2可知,氮增效剂能有效降低马铃薯叶片硝态氮含量,且随着生育时期的推移效果逐渐减弱。在CK中,叶片硝态氮含量随着施氮量的增加先增加后减少,拐点为90 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平,含量为663.52 mg/kg。氮增效剂DCD、CP处理块茎形成期叶片硝态氮含量处于较低水平,分别在61.86~341.88 mg/kg、57.51~112.76 mg/kg,比CK处理显著降低了49.50%~86.49%;氮增效剂CP处理比CK显著降

低了块茎成熟期叶片硝态氮含量12.12%~36.89%,但与氮增效剂DCD相比差异不显著。表明氮增效剂DCD和CP均能显著降低叶片硝态氮含量,且施氮水平对其影响较小;氮增效剂CP对叶片硝态氮的影响时效长于氮增效剂DCD。

2.2.2 对马铃薯叶片谷氨酰胺合成酶的影响 谷氨酰胺合成酶能参与多种氮代谢的调节,主要同化铵根离子,在氮素营养中发挥着重要的作用。由表3可知,在CK中,块茎形成期谷氨酰胺合成酶活性随着施氮水平的提高先逐渐提升,后逐渐保持稳定,拐点在90 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平,为17.81 U,块茎成熟期酶活性处于较低水平。添加氮增效剂DCD、CP处理在块茎形成期时,随着施氮水平的逐渐提升,谷氨酰胺合成酶活性先升高后降低,拐点均在120 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平,酶活性分别为22.68 U、21.44 U,块茎成熟期叶片谷氨酰胺合成酶活性也处于较低水平。表明氮增效剂DCD和CP能有效提高马铃薯块茎形成期叶片谷氨酰胺合成酶活性,但对块茎成熟期叶片谷氨酰胺合成酶活性的影响较小。

表 1 氮增效剂对马铃薯各生育时期土壤脲酶活性的影响

Table 1 Effect of nitrogen synergist on soil urease activity at different growth stages of potato

处理	土壤脲酶活性(U)		
	苗期	块茎形成期	块茎成熟期
A1N1	72.10±6.17cdef	61.74±0.85fgh	61.74±3.78gh
A2N1	72.59±2.81cd	66.00±5.72fgh	67.84±4.26efgh
A3N1	32.24±6.32i	57.06±1.47ghi	77.49±2.59defg
A4N1	70.68±3.54cdef	53.94±0.65hij	63.73±5.47fgh
A1N2	64.58±2.83defg	36.35±5.49j	58.81±5.85gh
A2N2	58.91±6.04efg	116.13±10.76c	82.59±4.19def
A3N2	82.03±2.56bc	165.43±13.99a	93.79±9.02d
A4N2	72.27±3.05cde	67.42±11.30fgh	76.78±6.44defgh
A1N3	52.10±4.24gh	60.04±6.55gh	73.09±7.73efgh
A2N3	53.09±7.82gh	39.19±3.78ij	86.28±7.05de
A3N3	44.94±5.43hi	80.04±4.06ef	78.48±6.44defg
A4N3	68.13±7.77def	65.20f±2.43gh	124.86±12.75c
A1N4	17.77±3.02j	137.21±8.09b	56.49±5.15h
A2N4	87.70±10.27b	68.41f±6.60gh	156.35±7.40a
A3N4	63.87±4.06defg	114.51±4.48c	86.28±9.85de
A4N4	68.55±7.88cdef	75.36±9.73fg	65.36±5.90fgh
A1N5	34.79±4.84i	59.05±0.89gh	121.18±14.01c
A2N5	69.69±4.14cdef	59.06±6.71gh	130.82±4.02c
A3N5	58.62±7.60fg	94.37±5.69de	138.05±3.92bc
A4N5	123.24±3.42a	101.03±10.98cd	148.84±3.62ab

A1、A2、A3 分别表示添加氮增效剂正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)、双氰胺(DCD)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP), A4 表示不添加氮增效剂(对照); N1、N2、N3、N4、N5 分别表示 1 hm<sup>2</sup>纯氮施用量为 30 kg、60 kg、90 kg、120 kg、150 kg。同一列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

表 2 氮增效剂对马铃薯块茎形成期、块茎成熟期叶片硝态氮含量的影响

Table 2 Effects of nitrogen synergist on leaf nitrate nitrogen content in potato tuber formation stage and tuber maturity stage

生育期	处理	硝态氮含量(mg/kg)			
		A1	A2	A3	A4
块茎形成期	N1	340.56±22.08c	61.86±1.08g	57.51±19.56g	202.21±18.23de
	N2	267.94±17.70d	70.48±6.43g	78.00±7.53g	482.57±36.95b
	N3	364.16±42.18c	341.88±32.69c	89.07±10.68g	663.52±58.62a
	N4	381.06±35.05c	110.89±9.31fg	85.44±15.68g	239.60±11.87de
	N5	246.21±18.09d	174.21±6.71ef	112.76±18.90fg	345.53±35.38c
	平均值	319.99±60.38a	151.87±107.41b	84.56±22.50b	386.69±177.81a
块茎成熟期	N1	411.14±36.04a	370.98±46.90abc	233.36±10.59ef	364.59±48.92abc
	N2	264.84±12.12def	356.08±19.11abcd	227.59±22.89ef	351.09±57.52abcd
	N3	416.54±40.45a	397.05±35.63ab	258.01±39.62ef	357.33±37.01abc
	N4	370.36±15.84abc	279.73±38.90cdef	212.07±25.74f	313.50±8.44bcde
	N5	372.22±16.06ab	231.32±15.58ef	318.80±38.81bcde	362.91±15.62abc
	平均值	367.02±60.84a	327.03±69.90a	249.98±46.14b	349.88±37.87a

A1、A2、A3 分别表示添加氮增效剂正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)、双氰胺(DCD)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP), A4 表示不添加氮增效剂(对照); N1、N2、N3、N4、N5 分别表示 1 hm<sup>2</sup>纯氮施用量为 30 kg、60 kg、90 kg、120 kg、150 kg。同一列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

表3 氮增效剂对马铃薯块茎形成期、块茎成熟期叶片谷氨酰胺合成酶活性的影响

Table 3 Effects of nitrogen synergist on glutamine synthetase activity in potato tuber formation stage and tuber maturity stage

生育期	处理	谷氨酰胺合成酶活性 (U)			
		A1	A2	A3	A4
块茎形成期	N1	5.50±0.60i	7.59±0.62hi	8.07±0.93ghi	9.64±1.29fgh
	N2	11.39±1.00fg	12.17±1.37f	15.92±2.32e	10.25±1.20fgh
	N3	16.50±1.34e	18.50±1.27bcde	20.13±0.75abcd	17.81±0.92cde
	N4	20.14±1.54abc	22.68±1.90a	21.44±0.90ab	16.97±1.20de
	N5	18.31±0.70bcde	17.16±1.51cde	18.68±0.88bcde	18.06±2.11cde
	平均值	14.36±5.57a	15.62±5.54a	16.85±5.04a	14.55±4.09a
块茎成熟期	N1	0.91±0.09efgh	1.17±0.09efgh	2.11±0.19bcd	1.65±0.25cdef
	N2	2.17±0.26bc	2.59±0.61ab	1.69±0.33cde	2.96±0.49a
	N3	1.39±0.17defg	1.57±0.35cdef	0.42±0.13h	0.67±0.09gh
	N4	1.52±0.20cdef	0.91±0.25efgh	1.12±0.14efgh	0.87±0.08fgh
	N5	1.16±0.16efgh	1.37±0.33defg	1.08±0.22efgh	1.41±0.22cdefg
	平均值	1.43±0.47a	1.52±0.67a	1.28±0.62a	1.51±0.86a

A1、A2、A3 分别表示添加氮增效剂正丁基硫代磷酸三胺 (NBPT)、双氰胺 (DCD)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶 (CP), A4 表示不添加氮增效剂 (对照); N1、N2、N3、N4、N5 分别表示 1 hm<sup>2</sup> 纯氮施用量为 30 kg、60 kg、90 kg、120 kg、150 kg。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

目前,大量研究结果表明氮增效剂能有效抑制土壤氮素相关酶活性和菌群活性,延长氮肥肥效,提高氮素利用效率,提高作物产量和品质<sup>[11-12,26-27]</sup>。但也有研究结果表明氮增效剂对土壤氮素转化、作物产量和品质影响不显著,甚至部分氮增效剂品种对土壤造成污染和毒害<sup>[3,11,28-29]</sup>。不同的研究结果表明氮增效剂作用效果存在较大差异,主要原因是氮增效剂作用受到土壤类型、施肥水平和方式、作物品种等综合作用的影响<sup>[26]</sup>。本试验结果表明氮增效剂 DCD 和 CP 能显著提高马铃薯苗期和块茎形成期土壤铵态氮含量,降低硝态氮含量,增加土壤铵硝比,延长铵态氮存留时间,但脲酶抑制剂 NBPT 对土壤氮素形态和含量影响较小。

在铵态氮浓度较高的条件下,亚硝化细菌更为敏感,硝化抑制剂抑制效果最好<sup>[30]</sup>,且随着施肥时间的推移,硝化抑制剂逐渐被分解流失以及铵态氮水平逐渐降低导致效果逐渐减弱<sup>[31-34]</sup>。本试验结果表明,硝化抑制剂使土壤硝态氮、叶片硝态氮含量

始终维持在较低水平,且受施氮水平的影响较小。硝化抑制剂在马铃薯生育前期随着施氮水平的提高,土壤铵态氮增加量逐渐减小,在马铃薯生育中期,低氮水平下硝化抑制剂对铵态氮的增加量迅速下降,中高氮水平下硝化抑制剂对铵态氮的增加量逐渐升高,在马铃薯生育后期,只有高氮水平下硝化抑制剂增加了土壤铵态氮含量。可能原因是生育前期土壤铵态氮含量较高,但趋近饱和状态时,硝化抑制剂在高氮水平增铵效果较弱。随着生育期的推进,土壤氮素被马铃薯吸收和损失,氮素浓度下降,在中高氮水平下铵态氮浓度较高,增铵效果逐渐显著。在生育后期,中低氮水平下随着马铃薯快速吸收和氮素损失,铵态氮处于较低水平,高氮水平下,硝化抑制剂增加了铵态氮含量。

脲酶抑制剂 NBPT 与尿素分子结构类似,与尿素竞争脲酶的结合位点,抑制尿素水解,减缓尿素向无机氮的转化,延缓铵态氮浓度出现高峰期,减少氮氧化物挥发造成的氮素损失,提高肥效,但 NBPT 作用时间往往很短,主要集中在施肥后 7 d 至 28 d<sup>[12,26]</sup>。本试验结果表明,脲酶抑制剂降低生育前

中期高氮水平下的脲酶活性和生育中期土壤铵态氮和硝态氮含量,但对前期土壤氮含量影响不显著。可能原因是生育前期高氮水平下土壤氮含量高,竞争性抑制效果较弱,生育中期土壤氮含量下降脲酶抑制剂的效果逐渐显现;低氮水平下氮素和 NBPT 含量较低,对土壤氮素影响不显著。

硝化抑制剂作用时效受其结构的影响,DCD 在土壤剖面中移动性强,分解速度较快,容易与  $\text{NH}_4^+$  在土壤空间分布上发生分离现象,然而 CP 在土壤中的移动性非常有限,在土壤中的降解速度慢<sup>[31,35]</sup>,导致 CP 比 DCD 效果更稳定。本试验结果也表明氮增效剂 CP 比 DCD 作用时间更长更稳定,与王学薇等<sup>[31]</sup>研究结果一致。

本试验结果表明,氮增效剂 DCD、CP 能显著提高土壤铵硝比,延长尿素肥效和降低马铃薯叶片硝态氮含量;但氮增效剂 NBPT 处理与对照无显著差异。随着生育期的推移,氮增效剂的作用效果在低氮水平下快速下降,在苗期作用效果最优;在中高氮水平下先升后降,在块茎形成期作用效果最优。综合土壤氮素和马铃薯叶片氮素转化,氮增效剂 CP 比 DCD 作用效果更加稳定,时效更长;NBPT 作用效果不显著。

#### 参考文献:

- [1] 李庆逵.中国农业持续发展中的肥料问题[M].南昌:江西科学技术出版社,1997:38-51.
- [2] 郑顺林,李国培,杨世民,等.施氮量及追肥比例对冬马铃薯生育期及干物质积累的影响[J].四川农业大学学报,2009,27(3):270-274.
- [3] 万伟帆,李 斐,红 梅,等.氮肥用量和脲酶抑制剂对滴灌马铃薯田氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):693-702.
- [4] 陈 浩,李 博,熊正琴.减氮及硝化抑制剂对菜地氧化亚氮排放的影响[J].土壤学报,2017,54(4):938-947.
- [5] 刘红江,郭 智,郑建初,等.不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J].江苏农业学报,2018,34(4):783-789.
- [6] 黄少辉,杨云马,刘克桐,等.不同施肥方式对河北省小麦产量及肥料贡献率的影响[J].作物杂志,2018(1):113-117.
- [7] 贝美容,雷 菲,刘海林,等.缓释氮肥在砖红壤中氮素转化研究[J].江苏农业科学,2018,46(20):300-303.
- [8] 巨晓棠.氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J].土壤学报,2014,51(5):921-933.
- [9] 李子双,谭德水,李洪杰,等.不同控释肥对冬小麦产量及氮素利用的影响[J].山东农业科学,2017,49(8):73-77.
- [10] 张文学,杨成春,王少先,等.脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响[J].中国水稻科学,2017,31(4):417-424.
- [11] 郑福丽,李 彬,李晓云,等.脲酶抑制剂的作用机理与效应[J].吉林农业科学,2006(6):25-28.
- [12] 隽英华,陈利军,武志杰,等.脲酶/硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用[J].土壤通报,2007,38(4):773-780.
- [13] 张文学,杨成春,王少先,等.脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响[J].中国水稻科学,2017,31(4):417-424.
- [14] 李兆君,宋阿琳,范分良,等.新型硝化抑制剂对外源铵态氮在土壤中迁移转化及淋溶损失的影响[J].西南农业学报,2011,24(3):995-998.
- [15] 黄益宗,冯宗炜,王效科,等.硝化抑制剂在农业上应用的研究进展[J].土壤通报,2002,1(4):310-315.
- [16] 郑福丽,李 彬,李晓云,等.脲酶抑制剂的作用机理与效应[J].吉林农业科学,2006(6):25-28.
- [17] 孙海军,闵 炬,施卫明,等.硝化抑制剂影响小麦产量、 $\text{N}_2\text{O}$  与  $\text{NH}_3$  排放的研究[J].土壤,2017,49(5):876-881.
- [18] 陈 浩,李 博,熊正琴.减氮及硝化抑制剂对菜地氧化亚氮排放的影响[J].土壤学报,2017,54(4):938-947.
- [19] 吴得峰,姜继韶,高 兵,等.添加 DCD 对雨养区春玉米产量、氧化亚氮排放及硝态氮残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):30-39.
- [20] 孙海军,闵 炬,施卫明,等.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.
- [21] 焦晓光,梁文举,陈利军,等.脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响[J].应用生态学报,2004,15(10):1903-1906.
- [22] 华建峰,蒋 倩,施春健,等.脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J].土壤通报,2008,39(1):94-99.
- [23] 潘复燕,薛利红,卢 萍,等.不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(5):928-936.
- [24] 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,2000:79.
- [25] 熊庆娥.植物生理学实验教程[M].成都:四川出版集团,2003:48.
- [26] 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.
- [27] 章淑艳,王素花,孙志梅,等.不同氮肥施用方式及硝化抑制剂对小豆生长发育及氮素利用的影响[J].河南农业科学,2016,45(10):15-18,28.
- [28] LI Q, YANG A, WANG Z, et al. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China[J]. Field Crops Research, 2015, 175:96-105.
- [29] WILSON C E J, NORMAN R J, WELLS B R. Dicyandiamide influence on uptake of preplant-applied fertilizer nitrogen by rice.[J].

- Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(4): 1157-1161.
- [30] 王小彬, BAILEY L D, GRALLT C A, 等. 关于几种土壤脲酶抑制剂的作用条件[J]. 植物营养与肥科学报, 1998, 4(3): 211-218.
- [31] 王雪薇, 刘涛, 褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(1): 54-61.
- [32] CHALK P M, VICTORIA R L, MURAOKA T, et al. Effect of a nitrification inhibitor on immobilization and mineralization of soil and fertilizer nitrogen[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1990, 22(4): 533-538.
- [33] 周旋, 戴锋, 董春华. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 399-408.
- [34] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 土壤温度和含水量互作对抑制剂抑制氮素转化效果的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 106-115.
- [35] AZAM F, BENCKISER G, MÜLLER C, et al. Release, movement and recovery of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions[J]. Biology & Fertility of Soils, 2001, 34(2): 118-125.

(责任编辑:陈海霞)