



尿素配施硝化/脲酶抑制剂对春季和秋季马铃薯产量及土壤矿质氮的影响

黄强¹, 郑顺林^{1,2}, 郭函¹, 龚静¹, 熊湖¹, 袁继超¹, 胡建军³

(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,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,四川新都 610500;3.四川省农业科学院作物研究所,成都 610066)

摘要 采用盆栽试验,在施入总氮一致条件下,硝化/脲酶抑制剂与不同施肥方式配施对春、秋季马铃薯生长及土壤矿质氮的影响,为制定科学的马铃薯农田氮素管理措施及节肥增效策略提供依据。结果表明,(1)追施氮肥及配施硝化/脲酶抑制剂能显著降低土壤脲酶活性、土壤表观硝化率和提高马铃薯生育中后期土壤铵态氮和硝态氮质量分数,其中在一次追肥处理下,DCD及NBPT处理的春、秋季马铃薯块茎形成期土壤铵态氮质量分数比对照分别提高124.3%、198.1%和31.0%、260.0%;硝态氮质量分数分别提高18.4%、31.6%和33.9%、31.6%。(2)追施氮肥及配施硝化/脲酶抑制剂能提高春、秋季马铃薯生育后期干物质量及产量,但春马铃薯增产效果大于秋马铃薯,一次追肥处理增产效果最好。其中与CK相比,一次追肥与DCD和NBPT配施处理的春马铃薯产量显著提高53.3%和112.0%,秋马铃薯未达到显著差异。因此,一次追肥配施氮肥效率最高,且春马铃薯应配施脲酶抑制剂NBPT,秋马铃薯应配施硝化抑制剂DCD。

关键词 马铃薯;施氮方式;硝化抑制剂;脲酶抑制剂;矿质氮;春、秋季;产量

中图分类号 S143.1⁺6

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2019)09-1499-09

氮素是马铃薯生长必需元素之一^[1],氮肥不足,马铃薯矮弱,分枝少,开花早,产量低^[2],氮肥过量,马铃薯贪青徒长,环境污染严重。长期以来,中国马铃薯氮肥利用效率为35%~50%^[3],在部分地区利用效率只有20%^[4],造成大量的浪费和环境压力。当前,减氮增效主要通过控制氮肥施用量^[5],优化施用方法^[6],新型肥替代传统肥料,配施有机和无机肥,添加氮增效剂等方法的综合利用^[7]。

马铃薯对氮素的吸收主要是铵态氮和硝态氮^[8],吸收速率的峰值只在块茎快速增长期出现^[9-11]。适量追施氮肥有利于马铃薯中后期生长及块茎产量的提高,但马铃薯对氮素的吸收受季节的影响严重。研究表明适量追肥对春马铃薯增产显著,基肥对秋马铃薯增产显著^[12]。氮增效剂中脲酶抑制剂NBPT可通过竞争性抑制脲酶活性延缓尿素水解,有效期15~20 d^[13],降低铵态氮积累和损失速率;硝化抑制剂DCD可通过抑制

土壤氨氧化微生物(主要是AOA和AOB)活性,从而抑制硝态氮的产生,使得土壤中氮主要以铵态氮形式存在,以延长供氮时间或者增加供氮强度,增加植株氮吸收量,进而提高产量和氮素利用率^[14]。同时大量研究也表明硝化/脲酶抑制剂施用效果受土壤类型、pH和温湿度等条件的影响^[15-18]。

目前,硝化/脲酶抑制剂在水稻^[19]、玉米^[20]和小麦^[21]等作物上的研究较多,在马铃薯上还鲜有报道,特别是施肥方式和季节对其的影响。因此,研究不同施肥方式下硝化/脲酶抑制剂对春、秋季马铃薯生物量、经济产量及土壤矿质氮影响,为制定春、秋马铃薯科学的农田氮素管理措施提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为‘川芋117’(四川2015年审定),

收稿日期:2018-11-14 修回日期:2019-01-09

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0200808);四川省育种攻关及配套项目(2016NY20051-5,2016NY20032);国家现代农业产业技术体系四川薯类创新团队(川财教[2019]59号)。

第一作者:黄强,男,硕士研究生,研究方向为马铃薯高产栽培。E-mail:1020136338@qq.com

通信作者:郑顺林,男,博士,教授,博士生导师,主要从事薯类栽培理论与技术研究。E-mail:248977311@qq.com

为保证材料的一致性,减少误差,试验用种薯均选用 20~25 g 生理质量均匀一致的马铃薯脱毒原种。

1.2 试验设计

于 2017 年 1 月上旬至 5 月上旬(春薯)和 2017 年 9 月上旬至 12 月下旬(秋薯)在成都温江区进行控制盆栽试验。土壤基质采用成都平原大田土壤与椰糠按 1:1.5 的体积比混匀。基质基础养分为全氮 11.33 g/kg,铵态氮 11.85 mg/kg,硝态氮 9.33 mg/kg,速效磷 20.12 mg/kg,速效钾 39.34 mg/kg,春、秋季基质相同。

试验采取施肥方式(A)与硝化/脲酶抑制剂类型(B)二因素随机区组设计,在施入总氮一致条件下,施肥方式设 3 个水平:全基肥(A1)、70%基肥+30%苗期追肥(A2,一次追肥)、50%基肥+30%苗期追肥+20%结薯肥(A3,二次追肥);脲酶/硝化抑制剂类型设 3 个水平:双氰胺(DCD)(B1)、正丁基硫代磷酰三胺(NBPT)(B2)、以不添加作为对照(B3),共 9 个处理,每处理重复 3 次(3 盆为一重复)。试验盆规格为 38 cm×38 cm×30 cm,每盆 6 kg 土壤,播种 4 苗,播深 5 cm。每盆共施 10.86 g 尿素、22.22 g 硫酸钾、12.53 g 过磷酸钙,每次施入尿素均为对应处理尿素,NBPT 和 DCD 用量均为尿素的 1.0%。齐苗 20 d 后施入发棵肥,开花期施入结薯肥。

1.3 测定指标及方法

在马铃薯块茎形成期(春马铃薯 4 月 6~8

日,秋马铃薯 11 月 4~7 日)和块茎成熟期(春马铃薯 5 月 16~18 日,秋马铃薯 12 月 18~20 日),采取马铃薯根际土风干,备用,用于测定铵态氮、硝态氮和脲酶;取马铃薯植株样本分器官制样,于 105 °C 杀青,80 °C 烘至恒量后称量,用于测定干物质质量等指标。土壤样品分析方法采用《土壤农化分析方法》^[22];土壤硝态氮采用紫外分光光度法测定;土壤铵态氮采用靛酚蓝比色法测定;土壤脲酶采用靛酚蓝比色法测定。

1.4 计算公式

$$\text{土壤表观硝化抑制率} = (\text{NO}_3^- - \text{N}) / (\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}) \times 100\% \quad [23]$$

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 IBM SPSS Statistics 22 统计分析软件对数据进行统计分析,采用 Microsoft Excel 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤铵态氮变化

由表 1、表 2 可知,硝化/脲酶抑制剂和施肥方式对马铃薯生育后期土壤矿质氮质量分数的影响有显著差异,且季节间存在一定影响。

从施肥方式上看,追施氮肥能提高马铃薯生育后期土壤铵态氮质量分数。其中在 CK 处理中,一次追肥比全基肥和二次追肥处理的秋马铃薯块茎形成期土壤铵态氮质量分数提高 14.1% 和 30.4%,但差异不显著,秋马铃薯提高 875.6%

表 1 不同施肥方式和硝化/脲酶抑制剂对春、秋马铃薯土壤铵态氮质量分数的影响($\bar{x} \pm s, n=3$)

Table 1 Effects of different fertilization methods and nitrification/urease inhibitor on ammonium nitrogen mass fraction of potato soil in spring and autumn mg/kg

处理 Treatment	春 Spring		秋 Autumn	
	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity
A1B1	127.88±8.99 b	23.01±1.97 ab	69.87±1.25 c	2.45±0.67 g
A1B2	22.03±2.12 d	16.73±3.90 bc	37.43±1.55 e	2.48±0.56 g
A1B3	29.35±0.45 d	24.05±4.53 a	3.11±0.21 g	3.98±0.49 fg
A2B1	75.03±6.90 c	16.44±1.37 bc	90.54±0.97 b	6.81±1.24 ef
A2B2	43.77±0.34 d	15.98±1.6 8 c	109.39±3.48 a	51.15±2.57 a
A2B3	33.51±1.99 d	22.38±1.40 abc	30.34±1.03 f	46.11±2.33 b
A3B1	211.42±21.0 4 a	19.95±0.22 abc	64.68±2.79 c	27.94±0.61 d
A3B2	33.71±4.59 d	16.64±2.24 bc	54.44±1.41 d	8.74±0.30 e
A3B3	25.69±0.62 d	18.95±1.00 abc	7.61±0.97 g	42.42±1.96 c

注:同列数据后的不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著; $n=3$ 。下表同。

Note: The values within a column followed by different lowercase letters show statistically significant differences at the 0.05 probability level, as determined by Fisher's least significant difference test; $n=3$. The same below.

和 295.5%，差异极显著。至块茎成熟期时，秋马铃薯施加追肥处理的土壤铵态氮显著高于全基肥处理，春马铃薯则无显著差异。其主要原因可能是由于春、秋马铃薯不同的氮肥运筹和土壤环境所致。

从硝化/脲酶抑制剂上看，脲酶/硝化抑制剂提高了春、秋马铃薯生育后期土壤铵态氮质量分数，且不同种植季节表现一定差异。其中在同种施肥方式下，一次追肥配施 DCD 和配施 NBPT 春、秋马铃薯块茎形成期土壤铵态氮质量分数分别比 CK 显著提高 124.3%、198.1%、31.0% 和 260.0%。总体表明施肥方式和脲酶/硝化抑制剂处理对秋马铃薯土壤铵态氮质量分数影响效果均高于春马铃薯。

2.2 土壤硝态氮变化

从施肥方式上看(表 2)，追施氮肥能提高马铃薯生育后期土壤硝态氮质量分数。其中在 CK 中，一次追肥比全基肥和二次追肥处理的春马铃薯块茎形成期土壤硝态氮质量分数提高 7.4% 和 52.6%，二次追肥差异显著；秋马铃薯块茎形成期土壤硝态氮质量分数提高 66.0% 和 45.6%，均差

异显著。在块茎成熟期，各施肥方式对土壤硝态氮影响不显著。

从硝化/脲酶抑制剂上看，DCD/NBPT 的施用显著提高春、秋马铃薯块茎形成期土壤硝态氮质量分数。其中在一次追肥处理下，配施 DCD 和 NBPT 比 CK 分别显著提高春、秋马铃薯土壤硝态氮质量分数 18.4% 和 31.6%，33.9% 和 31.6%。在块茎成熟期，均无显著差异。

2.3 土壤表观硝化抑制率的变化

由表 3 可知，从施肥方式上看，追肥的施入能显著提高春、秋马铃薯块茎形成期土壤表观硝化率，其中在 CK 处理中，二次追肥处理比全基肥处理提高 183.5% 和 47.6%。主要原因是由于追肥的施入，致使土壤矿质氮平衡被打破。

从硝化抑制剂上看，硝化抑制剂能有效地降低部分施肥方式下的土壤表观消化率。其中一次施肥配施硝化抑制剂 DCD 显著降低春、秋马铃薯块茎形成期土壤表观硝化抑制率，分别降低 58.6% 和 35.5%。硝化抑制剂对土壤表观硝化率的作用在秋马铃薯苗期高于同时期的春马铃薯。

表 2 不同施肥方式和硝化/脲酶抑制剂对春、秋马铃薯土壤硝态氮质量分数的影响 ($\bar{x} \pm s, n=3$)

Table 2 Effects of different fertilization methods and nitrification/urease inhibitors on nitrate nitrogen mass fraction of potato soil in spring and autumn mg/kg

处 理 Treatment	春 Spring		秋 Autumn	
	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity
A1B1	51.27±0.83 a	3.29±1.27 ab	8.21±0.36 f	6.79±0.11 ab
A1B2	5.44±1.30 f	1.89±0.86 b	8.23±0.61 f	6.70±0.62 ab
A1B3	29.66±2.57 d	2.79±0.75 ab	9.53±0.83 e	7.00±0.41 ab
A2B1	37.73±1.52 bc	2.90±0.35 ab	6.79±0.69 g	7.50±0.47 ab
A2B2	42.65±3.80 b	3.13±0.68 ab	20.82±0.38 b	7.42±0.42 ab
A2B3	31.87±4.73 cd	1.90±0.79 b	15.82±0.06 b	8.48±1.49 a
A3B1	39.59±2.66 b	1.91±0.91 b	42.97±0.76 a	6.17±0.37 b
A3B2	28.80±4.17 d	4.63±0.56 a	9.24±0.31 f	7.60±0.29 ab
A3B3	20.88±0.84 e	2.57±0.40 ab	10.86±0.08 d	6.52±0.92 b

2.4 土壤脲酶活性变化

土壤脲酶是一种重要的土壤水解酶，它能够催化尿素水解生成氨、二氧化碳和水，也是表征土壤氮素状况的酶之一。由表 4 可知，硝化/脲酶抑制剂能有效地降低土壤脲酶活性，但不同施肥方式下土壤脲酶活性也存在差异。

硝化/脲酶抑制剂能显著抑制马铃薯块茎生育后期土壤脲酶活性。其中在同种施肥方式下，一

次追肥配施 DCD 和 NBPT 比 CK 显著降低了春、秋马铃薯块茎形成期土壤脲酶活性的 49.7%、49.4% 和 56.8%、26.7%。主要原因是硝化/脲酶抑制剂对土壤脲酶产生抑制作用。

2.5 马铃薯形态及产量的变化

2.5.1 植株干物质质量 由表 5 和表 6 可知，马铃薯干物质及产量受到施肥方式和硝化/脲酶抑制剂共同影响，同时季节间还存在一定差异。

表 3 不同施肥方式和硝化/脲酶抑制剂对春、秋马铃薯土壤表观硝化率的影响($\bar{x} \pm s, n=3$)

Table 3 Effects of different fertilization methods and nitrification/urease inhibitors on apparent nitrification of potato soils in spring and autumn %

处理 Treatment	春 Spring		秋 Autumn	
	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity
A1B1	28.66±1.17 d	12.27±3.49 bcd	10.52±.034 g	73.70±4.92 a
A1B2	33.52±1.42 c	14.96±0.74 bc	6.97±0.59 h	52.71±3.22 c
A1B3	15.80±0.56 e	8.63±1.60 d	39.93±0.63 c	18.10±0.62 de
A2B1	19.36±2.29 e	9.85±2.06 cd	18.01±0.50 e	73.19±2.85 a
A2B2	49.28±2.13 ab	16.26±1.63 b	15.79±0.14 ef	12.67±0.41 e
A2B3	46.08±3.42 ab	21.77±0.28 a	24.52±0.28 f	46.52±0.16 c
A3B1	50.20±1.82 a	10.32±1.45 c	75.33±0.38 a	63.83±1.51 b
A3B2	48.58±2.58 ab	7.66±2.24 d	34.30±0.71 b	21.13±4.17 d
A3B3	44.82±0.54 b	11.89±1.23 bcd	58.90±2.88 d	13.28±1.10 e

表 4 不同施肥方式和硝化/脲酶抑制剂对春秋马铃薯土壤脲酶活性的影响($\bar{x} \pm s, n=3$)

Table 4 Effects of different fertilization methods and nitrification/urease inhibitors on soil urease activity of potato in spring and autumn mg/(g·d)

处理 Treatment	春 Spring		秋 Autumn	
	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity
A1B1	108.34±5.02 d	45.57±1.53 g	95.07±6.31 de	98.48±2.34 c
A1B2	111.53±3.06 d	57.34±1.07 f	85.00±4.96 de	96.78±9.03 c
A1B3	226.85±3.48 a	143.44±7.88 a	231.85±2.28 a	145.14±10.22 b
A2B1	109.12±8.74 d	63.44±0.73 f	88.26±8.47 de	101.46±1.30 c
A2B2	110.39±14.31 d	68.69±0.98 ef	149.54±13.20 c	140.18±6.91 b
A2B3	217.06±7.88 a	122.59±3.21 b	204.06±6.88 a	110.11±4.19 c
A3B1	146.54±13.19 c	79.75±1.30 de	100.60±6.99 d	131.95±1.70 b
A3B2	124.40±14.57 d	84.72±10.53 d	76.49±3.46 e	168.41±7.30 a
A3B3	175.64±5.80 b	109.12±6.20 c	163.64±4.43 b	163.87±13.53 a

表 5 不同施肥方式和硝化/脲酶抑制剂对马铃薯单株全干物质量的影响($\bar{x} \pm s, n=3$)

Table 5 Effects of different fertilization methods and nitrification/urease inhibitors on total dry matter quantity of potato plants g

处理 Treatment	春 Spring		秋 Autumn	
	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity	块茎形成期 Tuber formation period	块茎成熟期 Tuber maturity
A1B1	3.51±1.02 c	32.02±5.90 d	5.87±0.58 c	23.53±1.56 b
A1B2	8.02±0.97 a	29.20±7.40 d	5.53±0.57 c	22.30±2.10 b
A1B3	4.41±1.32 bc	33.46±3.18 cd	5.80±0.35 c	23.73±3.91 b
A2B1	7.99±0.39 a	50.44±6.56 abc	10.58±1.19 a	33.20±3.78 a
A2B2	8.57±0.90 a	58.87±10.29 a	7.37±1.51 bc	33.00±2.04 a
A2B3	6.90±1.47 a	41.84±2.97 abcd	7.20±1.69 bc	27.03±2.90 ab
A3B1	6.42±0.70 ab	38.50±1.82 bcd	10.41±1.54 a	21.63±4.15 b
A3B2	7.82±0.73 a	50.30±8.37 abc	7.00±0.92 bc	26.33±1.21 ab
A3B3	8.33±0.46 a	52.79±8.71 ab	9.47±1.27 ab	29.36±5.30 ab

从施肥方式上看,追施氮肥能显著提高马铃薯块茎形成期及成熟期干物质量,且对春马铃薯干物质量提高效果优于秋马铃薯。其中在 CK 处理中,二次追肥比全基肥处理的春、秋马铃薯块茎形成期、成熟期干物质量显著提高了 89.0%、57.8%、61.4%、23.7%。主要原因可能是氮肥的追加减轻了氮肥对马铃薯苗期的抑制作用和增加生育后期氮素供应水平。

从硝化/脲酶抑制剂上看,配施硝化/脲酶抑制剂在与一次追肥配施下均增加了马铃薯干物质量,在与二次追肥配施下均减少了马铃薯干物质量。其中在相同施肥方式下,一次追肥配施 DCD 与配施 NBPT 比 CK 分别提高了春、秋马铃薯块茎成熟期干物质量 20.6%和 40.7%、22.8%和 22.1%;二次追肥配施 DCD 和 NBPT 比 CK 分别降低了春、秋马铃薯块茎成熟期干物质量 27.1%和 4.7%、26.3%和 10.3%,但未达到显著差异水平。可能是硝化/脲酶抑制剂延迟了氮肥供应时间,错开了马铃薯氮素吸收高峰期所致。

表 6 不同施肥方式和硝化/脲酶抑制剂对春、秋马铃薯单株产量的影响($\bar{x} \pm s, n=3$)

Table 6 Effects of different fertilization methods and nitrification/urease inhibitors on yield of per potato plants in spring and autumn g

季节 Season	施肥方式 Fertilization mode	B1	B2	B3	平均值 Average value
春 Spring	A1	110.33±35.23 c	142.00±54.02 c	115.33±15.04 c	122.56±35.17 b
	A2	238.66±31.53 b	330.33±49.66 a	155.66±32.14 c	241.56±80.28 a
	A3	83.66±6.80 c	279.33±35.72 ab	272.33±38.07 ab	211.78±96.69 a
	平均值 Mean	144.22±73.3 8 a	185.33±114.05 a	181.11±73.01 a	
秋 Autumn	A1	101.23±11.69 b	79.60±10.07 d	88.40±13.59 cd	89.74±13.53 b
	A2	152.20±22.26 a	128.50±23.26 abc	118.53±14.35 abcd	133.09±22.44 a
	A3	97.20±7.67 bd	126.20±11.78 abc	129.83±13.11 ab	117.74±17.68 a
	平均值 Mean	116.87±29.63 a	111.44±27.68 a	112.25±22.01 a	

3 讨论

3.1 配施硝化/脲酶抑制剂对春、秋季马铃薯产量的影响

马铃薯在不同生育时期对氮的需求表现为“两头轻中间重”的规律^[1],在块茎膨大期适当提高土壤供氮能力有利于马铃薯生长与产量的增加^[24-26]。脲酶/硝化抑制剂能通过抑制土壤脲酶活性^[13]或者氨氧化等菌群活性^[14],减缓尿素分解、抑制矿质氮转化以延长或者调整氮供应时间,提高氮素利用效率^[19];合理施加追肥能有效地减少前期氮素损失,提高后期土壤供氮能力,增加马

铃薯单株产量变化 从施肥方式上看,追肥能显著提高春、秋马铃薯产量(表 6),且在 CK 中,二次追肥方式增产效果优于一次追肥方式;对春马铃薯效果优于秋马铃薯。其中在 CK 处理下,一次追肥和二次追肥比全基肥春、秋马铃薯单株产量分别提高 35.0%和 136.1%、34.1%和 46.9%,二次追肥处理达到显著差异。

从硝化/脲酶抑制剂上看,硝化/脲酶抑制剂在与一次追肥配施下增加了马铃薯产量,与二次追肥配施下降了马铃薯产量。其中在同种施肥方式下,一次追肥配施 DCD 和配施 NBPT 比 CK 春、秋马铃薯产量分别提高 53.3%、112.0%、28.4%和 8.4%;二次追肥配施 DCD 比 CK 降低的春、秋马铃薯产量分别为 69.3%、25.1%,春马铃薯均达显著差异水平,二次追肥配施 NBPT 减产差异不显著。可见,合理配施硝化/脲酶抑制剂能有效增加马铃薯产量,且不同种植季节对氮增效剂增产效果存在差异。

铃薯成熟期干物质量及产量^[27]。但土壤矿质氮供应能力受到施肥方式与添加剂的共同影响,添加剂采用合适的施肥方式才能效益最大化。本试验表明追施氮肥能有效地减少苗期氮损失,提高马铃薯块茎形成期土壤矿质氮浓度,延长马铃薯的生育期,提高产量;但硝化/脲酶抑制剂的使用虽然能提高马铃薯生育中后期土壤矿质氮的供应能力,但对马铃薯干物质及产量的增加效果却存在较大差异。一次追肥配施脲酶/硝化抑制剂提高了春、秋马铃薯干物质量及产量,但二次追肥配施则造成减产。主要原因是结薯肥的施入和氮肥作用的后移,块茎形成期马铃薯土壤氮素浓度过

高,造成二次追肥处理徒长贪青,扰乱了马铃薯物质分配,最终减产。本试验也表明,在二次追肥配施下,DCD 处理减产程度高于 NBPT 处理,主要原因是脲酶抑制剂 NBPT 可以延缓尿素水解为铵态氮^[13],在一定时期内减少土壤无机氮浓度;而硝化抑制剂 DCD 可以阻断铵态氮的硝化作用^[16],总体增加土壤铵态氮质量分数,与王小彬等^[28]的 NBPT 减少抑苗危害和贪青徒长结果一致。

土壤表观硝化率表征土壤中铵态氮的硝化作用强度和作用时间,表观硝化率越高,氨氧化强度越大^[29],本试验表明硝化抑制剂 DCD 与一次追肥配施能有效地降低土壤表观消化率,与现有结论一致^[29]。脲酶是一种专一性酶^[13],施入土壤中的尿素只能在脲酶的参与下才能水解,其活性可以用来表征土壤氮素状况^[30]。脲酶抑制剂可以竞争性抑制脲酶活性^[31]。本试验表明脲酶能显著抑制脲酶活性,延缓尿素分解,提高氮肥利用效率,与张学文等^[16]的 NBPT 可以抑制土壤脲酶活性结果一致。

3.2 季节对硝化/脲酶抑制剂的影响

硝化/脲酶抑制剂效果受到温度、湿度、土壤、pH 的影响^[15-18],春秋马铃薯氮肥运筹差异明显。由于光温等原因,春马铃薯前期生长较慢,中后期生长较快,光合能力强、光饱和点高,对氮素营养需求较大,秋马铃薯中后期生长较慢,对氮素营养需求较低,施加追肥对春马铃薯增产作用优于秋马铃薯^[27]。本试验表明,硝化/脲酶抑制剂和追肥对春马铃薯的增产效果大于秋马铃薯,与已有的研究结果一致;但氮增效剂对土壤氮素的影响却是秋马铃薯大于春马铃薯。主要原因是氮增效剂在铵态氮浓度较高的条件下,亚硝化细菌更为敏感,抑制效果最好^[28],春马铃薯中后期对氮素的快速吸收,块茎形成期至成熟期土壤铵态氮量低于秋马铃薯,导致硝化/脲酶抑制剂对秋马铃薯土壤氮素的影响程度高于春马铃薯。据报道:硝化抑制剂 DCD 作用随着施用时间的延长而逐渐减弱^[29]。本试验表明硝化抑制剂对春马铃薯苗期土壤表观消化率的抑制效果低于秋马铃薯,主要原因可能是秋马铃薯播种后发芽较快,施肥至苗期时间远短于春马铃薯。

4 结论

硝化/脲酶抑制剂与氮肥合理配施,能显著降

低土壤脲酶活性,提高马铃薯生长后期土壤矿质氮和土壤氮代谢活性,与马铃薯氮吸收特性更加匹配;从而提高马铃薯干物质质量及产量。硝化/脲酶抑制剂和施肥方式对春马铃薯的影响高于秋马铃薯,在盆栽条件下春马铃薯采用一次追肥与 NBPT 配施方式最优,秋马铃薯采用一次追肥与 DCD 配施方式最优。

参考文献 Reference:

- [1] 韦冬萍,韦剑锋,熊建文,等.马铃薯氮素营养研究进展[J].广东农业科学,2011,38(22):56-60.
WEI D P, WEI J F, XIONG J W, et al. Research progress on nitrogen nutrition of potato [J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2011, 38(22): 56-60.
- [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.
ZHENG SH L, LI G P, YANG SH M, et al. Effect of nitrogen level and top dressing proportion on growing stages and dry matter accumulation [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2009, 27(3): 270-274.
- [3] 巨晓棠,谷保静.氮素管理的指标[J].土壤学报,2017,54(2):281-296.
JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management [J]. *Journal of Soil Science*, 2017, 54(2): 281-296.
- [4] 孙海林,田丰,张永成.马铃薯光合速率与产量相关性研究[J].中国马铃薯,2005,19(1):26-28.
SUN H L, TIAN F, ZHANG Y CH. Study on the correlation between photosynthetic rate and yield of potatoes [J]. *Chinese Potatoes*, 2005, 19(1): 26-28.
- [5] 安江勇,肖厚军,秦松,等.不同施肥量对贵州高产玉米养分吸收、生物性状、产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2016,11(3):73-79.
AN J Y, XIAO H J, QIN S, et al. Effects of different fertilizer application on nutrient uptake, biological characteristics, yield and quality of maize in Guizhou [J]. *Soil and fertilizer in China*, 2016, 11(3): 73-79.
- [6] 白由路.高效施肥技术研究的现状与展望[J].中国农业科学,2018,51(11):2116-2125.
BAI Y L. The situation and prospect of research on efficient fertilization [J]. *Agricultural Science of China*, 2018, 51(11): 2116-2125.
- [7] 王伟帆,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氮挥发的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):693-702.
WAN W F, LI F, HONG M, et al. Effects of nitrogen rate

- and urease inhibitor on N_2O emission and NH_3 volatilization in drip irrigated potato fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(3): 693-702.
- [8] 苏亚拉其其格, 秦永林, 贾立国, 等. 氮素形态及供应时期对马铃薯生长发育与产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(4): 619-623.
- SUYALA QIQIGE, QIN Y L, JIA L G, *et al.* Effects of nitrogen form and its application time on plant growth and tuber yield of potato [J]. *Journal of Crops*, 2016, 42(4): 619-623.
- [9] 韦剑锋, 宋书会, 韦巧云, 等. 施氮量对冬马铃薯氮素利用和土壤氮含量的影响[J]. 作物杂志, 2015, 31(3): 93-97.
- WEI J F, SONG SH H, WEI Q Y, *et al.* Effects of nitrogen application rates on winter potato nitrogen use efficiency and soil nitrogen content [J]. *Crop Journal*, 2015, 31(3): 93-97.
- [10] 刘克礼, 高聚林, 任珂, 等. 旱作马铃薯氮素的吸收、积累和分配规律[J]. 中国马铃薯, 2003, 17(6): 321-325.
- LIU K L, GAO J L, REN K, *et al.* Nitrogen absorption, accumulation and distribution of potato under dry farming [J]. *Chinese Potatoes*, 2003, 17(6): 321-325.
- [11] 张宝林, 高聚林, 刘克礼, 等. 马铃薯氮素的吸收、积累和分配规律[J]. 中国马铃薯, 2003, 17(4): 193-198.
- ZHANG B L, GAO J L, LIU K L, *et al.* The patterns of nitrogen absorption, accumulation and distribution in potato [J]. *Chinese Potatoes*, 2003, 17(4): 193-198.
- [12] 郑顺林. 营养因素对马铃薯块茎发育生理特性影响的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2008.
- ZHENG SH L. Study on the effects of nutritional factors on physiological characteristics of potato tuber development [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2008.
- [13] 史云峰, 车志伟, 赵牧培. 脲酶抑制剂 NBPT 提前施用对尿素水解和氨挥发的影响[J]. 环境保护科学, 2016, 42(5): 107-111.
- SHI Y F, CHE ZH W, ZHAO M Q. Effects of pre-application of urease inhibitor NBPT on urea hydrolysis and ammonia volatilization [J]. *Environmental Protection Science*, 2016, 42(5): 107-111.
- [14] 戴宇, 贺纪正, 沈菊培. 双氰胺在农业生态系统中的应用效果及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 279-286.
- DAI Y, HE J ZH, SHEN J P. Effects and influence factors of dicyandiamide (DCD) application in agricultural ecosystem [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 279-286.
- [15] 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]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 54-61.
- WANG X W, LIU T, ZHU G X. Inhibition of DCD, DMPP and nitrapyrin on soil nitrification and their appropriate use dosage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 54-61.
- [16] 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.
- ZHANG W X, YANG CH CH, WANG SH X, *et al.* Effects of urease inhibitor and nitrification inhibitor on nitrogen transformation in paddy soil [J]. *China Rice Science*, 2017, 31(4): 417-424.
- [17] 白雪, 夏宗伟, 郭彦玲, 等. 硝化抑制剂对不同旱地农田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2319-2329.
- BAI X, XIA Z W, GUO Y L, *et al.* Effects of nitrification inhibitors on N_2O emission from different upland agricultural soils [J]. *Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2319-2329.
- [18] HUI W, CAI Z C, ZHANG H. Effects of long-term application of inorganic fertilizers on biochemical properties of a rice-planting red soil [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(4): 419-428.
- [19] 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.
- LU Y H, NIE J, LIAO Y L, *et al.* Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(1): 95-104.
- [20] 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.
- WU D F, JIANG J SH, GAO B, *et al.* Effects of DCD addition on grain yield, N_2O emission and residual nitrate-N of spring maize in rain-fed agriculture [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 30-39.
- [21] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂影响小麦产量、 N_2O 与 NH_3 排放的研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 876-881.
- SUN H J, MIN J, SHI W M, *et al.* Effects of nitrification inhibitor application on wheat grain yield, N_2O emission and NH_3 volatilization [J]. *Soil*, 2017, 49(5): 876-881.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 106-185.
- LU R K. Soil Agrochemical Analysis [M]. Beijing: China

- Agricultural Press, 1999: 106-185.
- [23] MCCARTY G W, BREMNER J M. Laboratory evaluation of dicyandiamide as a soil nitrification inhibitor[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, 20(19/20): 2049-2065.
- [24] 丁凡, 王季春, 唐道彬, 等. 不同营养方式下雾培马铃薯对氮、磷、钾的吸收、利用及分配规律[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2008, 33(3): 81-85.
DING F, WANG J CH, TANG D B, *et al.* The patterns of N, P, K absorption, utilization and distribution of aeroponics potato by different nutrition manner [J]. *Journal of Southwest Normal University (Natural Science Edition)*, 2008, 33(3): 81-85.
- [25] 夏锦慧. 马铃薯“大西洋”物质积累及氮、磷、钾营养特征研究[J]. 西北农业学报, 2009, 18(4): 267-271, 314.
XIA J H. Analysis on dry matter accumulation and nitrogen, phosphorus, potassium nutrition characteristics of potato atlantic [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(4): 267-271, 314.
- [26] 罗爱花, 陆立银, 王一航. 大中微量元素配施对陇薯 5 号养分吸收及品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2011, 28(6): 52-56.
LUO A H, LU L Y, WANG Y H. Effect of combined application of large and medium and trace elements on nutrient uptake and tuber quality of Longshu No.5 potato [J]. *Changjiang Vegetables*, 2011, 28(6): 52-56.
- [27] 郑顺林, 袁继超, 马均, 等. 春、秋马铃薯氮肥运筹的对比研究[J]. 西南农业学报, 2009, 22(3): 702-706.
ZHENG SH L, YUAN J CH, MA J, *et al.* Comparative study on nitrogen application of spring and autumn potato [J]. *Journal of Southwest Agriculture*, 2009, 22(3): 702-706.
- [28] 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]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 211-218.
WANG X B, BAILEY L D, GRALLT C A, *et al.* The acting conditions of some urease inhibitors in soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1998, 4(3): 211-218.
- [29] 任先顺, 谢德全, 于婷婷, 等. 3,4-二甲基吡唑磷酸盐和双氰胺在黑钙土中对尿素氮转化的作用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2017, 12(1): 126-133.
REN X SH, XIE D Q, YU T T, *et al.* Effect of dicyandiamide (DCD) and 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on transformation of urea nitrogen in chernozem [J]. *Soil and Fertilizer of China*, 2017, 12(1): 126-133.
- [30] 刘淑英. 不同施肥对西北半干旱区土壤脲酶和土壤氮素的影响及其相关性[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 219-223.
LIU SH Y. Effects of different fertilization on soil urease, nitrogen and their correlation in semiarid area of northwest China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 219-223.
- [31] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 821-830.
ZHANG W X, SUN G, HE P, *et al.* Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 821-830.

Effects of Urea Combined with Nitrification/Urease Inhibitors on Potato Yield and Soil Mineral Nitrogen in Spring and Autumn

HUANG Qiang¹, ZHENG Shunlin^{1,2}, GUO Han¹, GONG Jing¹,
XIONG Hu¹, YUAN Jichao¹ and HU Jianjun³

(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 Jiuse Agricultural Technology Co. Ltd, Xindu Sichuan 610500, China; 3. Crop Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract A pot experiment was conducted to study the effects of nitrification / urease inhibitors combined with different fertilization methods on potato growth and soil mineral nitrogen in spring and autumn under the same total nitrogen application conditions, which provided a basis for formulating scientific nitrogen management measures and fertilizer-saving and efficiency-enhancing strategies in potato farmland. The results showed that (1) topdressing nitrogen fertilizer and combined application of nitrification / urease inhibitors could significantly reduce soil urease activity, apparent nitrification rate and increase soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen mass fraction in the middle and late growth stages of potato. Under one topdressing treatment, soil ammonium nitrogen mass fraction in spring and autumn potato tuber formation stages of DCD and NBPT treatment increased 124.3%, 198.1% and control respectively. 31.0% and 260.0% respectively, and the mass fraction of nitrate nitrogen increased by 18.4%, 31.6%, 33.9% and 31.6% respectively. (2) Topdressing with nitrogen fertilizer and nitrification / urease inhibitor could improve the dry matter quality and yield of potatoes in spring and autumn, but the yield increase of spring potatoes was greater than that of autumn potatoes, and the effect of one topdressing treatment was the best. Compared with CK, the yield of spring potato increased significantly by 53.3% and 112.0% with the combination of DCD and NBPT, but there was no significant difference between autumn potato and single topdressing. Therefore, the efficiency of single topdressing combined with nitrogen fertilizer was the highest, and urease inhibitor NBPT should be applied to spring potatoes, and nitrification inhibitor DCD should be applied to autumn potatoes.

Key words Potato; Nitrogen application method; Nitrification inhibitor; Urease inhibitor; Mineral nitrogen; Spring and autumn; Yield

Received 2018-11-14

Returned 2019-01-09

Foundation item National Key R&D Program (No.2018YFD0200808); Sichuan Breeding Research and Matching Projects (No.2016NYZ0051-5, No.2016NYZ0032); National Modern Agricultural Industry Technology System Sichuan Potato Innovation Team (Sichuan Finance Education [2019] 59).

First author HUANG Qiang, male, master student. Research area: potato high-yield cultivation. E-mail: 1020136338@qq.com

Corresponding author ZHENG Shunlin, male, Ph.D, professor, doctoral supervisor. Research area: potato cultivation theory and technology. E-mail: 248977311@qq.com

(责任编辑:潘学燕 Responsible editor: PAN Xueyan)