

稳定氮肥用量对夏玉米产量和氮肥利用率的影响

李 敏^{1,2,3}, 叶舒娅^{1,3*}, 刘 枫^{1,3}, 郭熙盛^{1,3}, 黄义德²

(1.安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 安徽 合肥 230031; 2.安徽农业大学农学院, 安徽 合肥 230036; 3.安徽省养分循环与资源环境省级实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要:通过大田小区试验,研究了稳定氮肥不同用量对夏玉米产量、养分累积量、氮肥利用效率及经济效益的影响。结果表明,与不施稳定氮肥相比,稳定氮肥施氮量 90、150、210 kg·hm⁻² 和 270 kg·hm⁻² 分别增产 36.7%、62.1%、76.6%和 81.9%,地上部氮素总累积量分别增加 39.0%、60.3%、79.0%和 113.4%,经济效益分别增加 36.1%、61.2%、72.7%和 77.1%;与农民习惯施用氮肥相比,高量稳定氮肥用量 210 kg·hm⁻² 和 270 kg·hm⁻² 分别增产 7.3%和 10.5%,地上部氮素总累积量分别增加 3.2%和 23.0%,经济效益分别增加 9.7%和 11.4%。施用稳定氮肥促进夏玉米对氮素的吸收累积,高量 210 kg·hm⁻² 和 270 kg·hm⁻² 处理较习惯施氮提高总吸氮量。施用稳定氮肥各处理氮肥表观利用率和农学效率显著高于农民习惯施氮,偏生产力高于农民习惯施氮,生理效率除 270 kg·hm⁻² 处理外,高于农民习惯施氮。稳定氮肥施氮量在 210 kg·hm⁻² 时,能较好地协调玉米高产与稳定氮肥合理利用的统一。

关键词:稳定氮肥;夏玉米;产量;氮肥利用率

中图分类号:S143.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)04-0323-05

doi: 10.13254/j.jare.2014.0135

Effects of Stabilized Nitrogen Fertilizer on Grain Yield and Nitrogen Use Efficiency of Summer Maize

LI Min^{1,2,3}, YE Shu-ya^{1,3*}, LIU Feng^{1,3}, GUO Xi-sheng^{1,3}, HUANG Yi-de²

(1.Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2.College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3.Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment of Anhui, Hefei 230031, China)

Abstract: A summer maize field experiment was carried out in 2013 to investigate the effects of stabilized nitrogen fertilizer rates on yield, nitrogen accumulation, nitrogen efficiency of summer maize, and economic efficiency. Compared with no stabilized nitrogen fertilizer, the yield of stabilized nitrogen fertilizer treatments as 90, 150, 210 N kg·hm⁻² and 270 N kg·hm⁻² increased 36.7%, 62.1%, 76.6% and 81.9% respectively. Total N absorbed by above ground parts increased 39.0%, 60.3%, 79.0% and 113.4%, and economic benefits increased 36.1%, 61.2%, 72.7% and 77.1% respectively. Compared with farmer conventional nitrogen fertilizer practices, the yield of stabilized nitrogen fertilizer treatments as 210 N kg·hm⁻² and 270 N kg·hm⁻² increased 7.3% and 10.5% respectively. Total N absorbed by above ground parts increased 3.2% and 23.0%, and economic benefits increased 9.7% and 11.4% respectively. The results demonstrated that stabilized nitrogen fertilizer application significantly promoted growths yield and N accumulation. 210 N kg·hm⁻² and 270 N kg·hm⁻² increased total nitrogen absorption higher than farmer conventional nitrogen fertilizer practices. Nitrogen apparent recovery efficiency (NARE) and nitrogen agronomic efficiency (NAE) of application with stabilized nitrogen fertilizer were significant higher than those of farmer conventional nitrogen fertilizer practices. Nitrogen partial factor productivity (NFPF) of applied stabilized nitrogen fertilizer was higher than that of conventional nitrogen fertilizer practices. Nitrogen physiological efficiency (NPE) was higher than that of conventional nitrogen fertilizer practices with exception of 270 N kg·hm⁻². Based on summer corn yield and N use efficiency, the optimum stabilized nitrogen fertilizer application rate was 210 N kg·hm⁻².

Keywords: stabilized nitrogen fertilizer; summer maize; yield; nitrogen use efficiency

夏玉米是我国北方主要的粮食作物之一,具有耐肥性强、增产潜力大的特点。农民一味地以增加氮肥

投入来获得高产,氮肥超量施用现象普遍存在。北京、山东、河北小麦-玉米轮作体系氮肥平均用量高达 500~600 N kg·hm⁻²,远远超过全国氮肥平均用量^[1]。张福锁等^[2]研究表明,我国农田玉米平均氮肥利用率为 26.1%,而华北平原小麦玉米轮作体系夏玉米传统施肥条件下氮肥利用率仅为 10%^[3]。长期大量施用氮肥不仅造成氮素利用率低下,损失严重,而且加速地下

收稿日期:2014-05-19

基金项目:施可丰稳定性专用肥试验示范网络项目(企业自筹);安徽省科技厅项目(1406c085025)

作者简介:李 敏(1979—),女,安徽阜阳人,博士研究生,主要从事新型肥料研究。E-mail: limin791025@126.com

* 通信作者:叶舒娅 E-mail: yeshuya@aliyun.com

水硝酸盐含量超标,导致湖泊富营养化,给环境带来一系列负面影响。

脲酶抑制剂可以减缓土壤中尿素酰胺态氮向铵态氮的水解速度,而硝化抑制剂可以控制铵态氮向硝态氮的氧化^[4-5],二者分别对尿素的转化某一个特定过程产生作用,能够减少氮肥通过氨挥发、硝酸盐淋溶及氮氧化物气态损失^[6]。我国对脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究侧重于土壤氮素转化、生物有效性方面。董欣欣等^[7]研究脲酶抑制剂 NBPT 和硝化抑制剂 DMPP 及其配合施用 7 年后的结果表明,DMPP 可显著提高土壤 pH 值、增加微生物生物量氮的含量、降低土壤的表观硝化率,且两者配合施用的效果更明显。张文学等^[8]研究 NBPT 和 DMPP 对稻田氨挥发的影响结果表明,与单施尿素相比,脲酶抑制剂可显著增加稻谷产量,脲酶抑制剂与硝化抑制剂配合施用可更有效地提高氮肥的回收率。徐星凯等^[9]研究脲酶抑制剂、硝化抑制剂及其组合对尿素施入距根际不同位置铵态氮和硝态氮分布的影响,表明它们能始终显著降低水稻根际与近根际土中铵态氮含量直至施肥后 60 d。李莉等^[10]研究表明,白浆土施用硝化抑制剂 DMPP 就可以达到减少尿素态氮损失,提高尿素肥料利用率的效果。苏壮^[11]通过盆栽试验表明,脲酶抑制剂及脲酶和硝化抑制剂组合均能有效降低铵态氮转化速率,使铵态氮最大积累量延迟 14 d,延缓硝态氮释放高峰达 60 d 以上。傅丽等^[12]通过田间埋袋试验研究脲酶抑制剂与不同硝化抑制剂组合对土壤尿素氮转化的影响表明,各抑制剂均不同程度减缓尿素氮水解,增加土壤有效氮含量。韩宝文等^[13]在夏玉米上施用不同浓度脲酶抑制剂结果表明,较普通尿素有一定增产作用,明显提高肥料利用率和收获后土壤无机氮含量。

近年来,农田氮素合理施用、新型肥料研发与施用一直是农业环境问题的研究热点之一,尿素中添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂制成长效氮肥是一类有效提高氮素效率的新型肥料。但针对尿素中添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂复配制成稳定氮肥不同用量对夏玉米产量效应和氮素效应研究较少。本试验通过研究稳定氮肥不同用量对夏玉米产量、氮肥效率、经济效益及土壤养分含量的影响,找出稳定氮肥最佳用量,旨在为稳定氮肥合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究概况

试验于 2013 年 6 月—9 月在安徽省阜阳市颍东

区棉种场进行。研究区地处淮北平原西部,安徽省西北部,属暖温带半湿润季风气候。年均气温 15℃,无霜期 220 d,年均降水 910 mm 左右。当地习惯种植制度为小麦-玉米两熟制。供试土壤为砂姜黑土。供试土壤理化性质:全氮 1.08 g·kg⁻¹,全磷 0.60 g·kg⁻¹,有机质 19.0 g·kg⁻¹,碱解氮 97.0 g·kg⁻¹,速效磷 28.0 mg·kg⁻¹,速效钾 199.6 mg·kg⁻¹,pH 值 5.33。

1.2 供试肥料

稳定氮肥由中国科学院沈阳应用生态研究所提供,为普通尿素中加入脲酶抑制剂和硝化抑制剂复配制成;磷肥为颗粒状过磷酸钙,P₂O₅ 含量 12%,铜陵市金禾肥业责任有限公司生产;钾肥为粉末状红色氯化钾,K₂O 含量 60%,俄罗斯生产。

1.3 试验设计

试验设 7 个处理:(1)不施肥(CK);(2)农民习惯施氮 N 270 kg·hm⁻²(CF);(3)不施稳定氮肥(S0);(4)稳定氮肥 N 90 kg·hm⁻²(S90);(5)稳定氮肥 N 150 kg·hm⁻²(S150);(6)稳定氮肥 N 210 kg·hm⁻²(S210);(7)稳定氮肥 N 270 kg·hm⁻²(S270)。处理(2)为普通尿素按 6:4 基肥和大喇叭口期追肥分次施用。磷钾肥用量均为 P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 90 kg·hm⁻²,除处理(2)氮肥分次施用,其他肥料均全部基施。小区面积 5 m×8 m=40 m²,3 次重复,随机区组排列。

供试玉米品种为隆平 206,种植密度为 6.0×10⁴ 株·hm⁻²。2013 年 6 月 14 日施肥翻耕播种,9 月 27 日收获。各小区统一按照当地习惯方式进行田间管理。

1.4 测定项目及方法

玉米成熟后,按小区收获脱粒风干后测实产。同时每小区采玉米 3 株地上部植株进行室内考种。植株按籽粒和秸秆分开,烘干、称重、粉碎,分析不同部位氮含量,采用 H₂O₂-H₂SO₄ 消煮,凯氏定氮法测定。土壤基本理化性质用常规方法测定^[14]。

收获指数(HI)=经济产量/生物产量;

氮肥表观利用率(NARE,%)=(施氮区植株总吸氮量-不施氮区植株总吸氮量)/氮肥用量×100;

氮肥农学效率(NAE,kg·kg⁻¹)=(施氮区产量-不施氮区产量)/氮肥用量;

氮肥生理效率(NPE,kg·kg⁻¹)=(施氮区产量-不施氮区产量)/(施氮区植株总吸氮量-不施氮区植株总吸氮量);

氮肥偏生产力(NFP,kg·kg⁻¹)=施氮区产量/氮肥用量。

1.5 数据处理

应用 Excel 2003 和 SPSS7.0 统计分析软件进行

数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 稳定氮肥对夏玉米产量的影响

稳定氮肥施用对夏玉米产量有显著影响(表1)。各处理玉米籽粒产量表现为:S270>S210>CF>S150>S90>S0>CK。施用稳定氮肥各处理比 CK 增产 41.1%~156.7%,比 S0 增产 36.7%~81.9%,均达到显著性差异水平。且随着施用量的增加,夏玉米籽粒产量呈显著增加趋势,高用量 S210 和 S270 无显著性差异,与其他处理存在显著性差异。高量稳定氮肥 S210 和 S270 玉米产量显著高于习惯施氮,分别增产 7.3%和 10.5%。秸秆产量施用稳定氮肥处理和农民习惯施氮无显著性差异,但显著高于 CK 和 S0 处理。收获指数以 S210 最高,与 S150、S270 和 CF 无显著差异,显著高于 CK、S0 和 S90。说明稳定氮肥用量在 S210 就能较农民习惯施氮显著提高玉米产量。

2.2 稳定氮肥对夏玉米产量构成的影响

稳定氮肥对夏玉米产量构成的影响结果见表 2。施肥处理较 CK 能显著提高夏玉米穗重、穗粒重和行粒数,提高其他构成因素。施用稳定氮肥能有效提高夏玉米株高、穗位高、穗重、穗粒重、穗长和行粒数,各

处理株高、穗位高、穗长和行粒数无显著性差异。穗重以 S210 最大,与 S270、CF 无显著性差异,显著高于其他施肥处理;穗粒重以 S270 最大,与 S210、CF 无显著性差异,显著高于其他施肥处理。说明高量稳定氮肥施用通过提高夏玉米穗重及穗粒重来提高产量。

2.3 稳定氮肥对夏玉米氮素吸收的影响

表 3 结果表明,稳定氮肥处理籽粒、秸秆和总吸氮量显著高于 CK,且随着施用量增加逐渐增大,以 S270 处理最高,显著高于其他处理。高量稳定氮肥 S270 籽粒、秸秆和总吸氮量显著高于农民习惯施氮处理;S210 籽粒吸氮量显著高于习惯施氮处理,总吸氮量高于习惯施氮处理。稳定氮肥吸氮量随用量增加在籽粒中分配比例呈先升后降趋势,秸秆中分配比例呈先降后升趋势。习惯施氮 CF 在籽粒中分配比例低于施用稳定氮肥处理。

2.4 稳定氮肥对夏玉米氮肥利用效率的影响

大量研究表明,氮素在玉米生产中增产作用显著,施氮量较大时氮素表观利用率显著下降^[15]。本试验中施用稳定氮肥处理均能有效提高 NARE,为 47.05%~54.14%,并不随施用量的增加而显著下降,显著高于农民习惯施氮处理,说明施用长效氮肥能显著提高 NARE。NAE、NPFP 施用稳定氮肥处理显著高

表 1 稳定氮肥对夏玉米产量的影响

Table 1 Effect of stabilized nitrogen fertilizer on summer maize yield

处理	籽粒产量/ kg·hm ⁻²	比 CK		比 S0		比 CF		秸秆产量/ kg·hm ⁻²	收获指数
		增产量/kg·hm ⁻²	增产率/%	增产量/kg·hm ⁻²	增产率/%	增产量/kg·hm ⁻²	增产率/%		
CK	3 616.7e	—	—	-1 487.5	-29.1	-4 783.3	-56.9	6 842.9b	0.35c
CF	8 400.0b	4 783.3	132.3	3 295.8	64.6	—	—	10 512.0a	0.44ab
S0	5 104.2d	1 487.5	41.1	—	—	-3 295.8	-39.2	8 218.5b	0.39bc
S90	6 979.2c	3 362.5	93.0	1 875.0	36.7	-1 420.8	-16.9	10 255.3a	0.40b
S150	8 275.0b	4 658.3	128.8	3 170.8	62.1	-125.0	-1.5	10 434.3a	0.44ab
S210	9 012.5a	5 395.8	149.2	3 908.3	76.6	612.5	7.3	10 328.1a	0.47a
S270	9 283.3a	5 666.6	156.7	4 179.1	81.9	883.3	10.5	11 714.5a	0.44ab

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

表 2 稳定氮肥对夏玉米产量构成的影响

Table 2 Effect of stabilized nitrogen fertilizer on the yield components of summer maize

处理	株高/cm	穗位高/cm	穗重/g	穗粒重/g	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数	行粒数	百粒重/g
CK	246.5c	106.1b	101.04d	89.30c	14.1c	43.2b	13.7c	24.0d	31.87a
CF	263.1a	110.4ab	180.31a	155.34a	16.8a	47.5a	15.5ab	34.8ab	33.56a
S0	250.3bc	106.4b	147.54c	130.99b	14.8bc	46.5ab	14.4bc	30.2c	32.58a
S90	256.4ab	109.1ab	162.05b	137.96b	16.3ab	48.1a	15.4ab	32.0bc	33.05a
S150	260.9a	109.7ab	157.73bc	138.58b	15.2abc	46.5ab	14.7bc	32.8abc	33.01a
S210	261.3a	109.5ab	188.94a	157.82a	16.2ab	48.4a	15.6ab	34.7ab	34.00a
S270	261.6a	112.20a	184.01a	163.15a	16.9a	47.6a	16.56a	36.44a	33.42a

表 3 稳定氮肥对夏玉米氮素吸收量的影响

Table 3 Effect of stabilized nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation of summer maize

处理	籽粒吸氮量/ kg·hm ⁻²	秸秆吸氮量/ kg·hm ⁻²	总吸氮量/ kg·hm ⁻²	分配比例/%	
				籽粒	秸秆
CK	46.0f	44.1e	90.1f	51.1	48.9
CF	116.4c	100.5b	216.9bc	50.4	49.6
S0	62.8e	62.2d	125.0e	50.3	49.7
S90	95.4d	78.3cd	173.7d	54.9	45.1
S150	113.6c	86.7bc	200.3c	56.7	43.3
S210	126.1b	97.7bc	223.8b	56.4	43.6
S270	137.5a	129.3a	266.8a	51.6	48.4

于CF,且随着施用量的增加呈显著降低趋势;NPE除S270外,稳定氮肥处理均高于CF,但各处理无显著性差异(表4)。说明稳定氮肥较农民习惯施氮能有效提高夏玉米氮肥利用效率。

2.5 稳定氮肥对夏玉米经济效益的影响

由表5可以看出,施肥处理经济效益显著高于不施肥CK处理,施用稳定氮肥处理显著高于不施氮S0处理,且随着施用量的增加,收益呈增加趋势,收入比S0增加35.8%~76.0%。除S90外,施用稳定氮肥处理收

表 4 稳定氮肥对夏玉米氮肥利用效率的影响

Table 4 Effect of stabilized nitrogen fertilizer on N use efficiency of summer maize

处理	氮肥表观 利用率/%	氮肥农学 效率/kg·kg ⁻¹	氮肥生理 效率/kg·kg ⁻¹	氮肥偏生 产力/kg·kg ⁻¹
CF	34.14c	12.21d	36.71ab	31.33d
S0	—	—	—	—
S90	54.14a	20.83ab	44.70a	77.55a
S150	50.22a	21.14a	42.17ab	55.17b
S210	47.05b	18.61b	42.03ab	42.92c
S270	52.51ab	15.48c	30.32b	34.38d

表 5 稳定氮肥对夏玉米经济效益的影响

Table 5 Effect of stabilized nitrogen fertilizer on economic benefits

处理	产值/ 元·hm ⁻²	肥料成本/ 元·hm ⁻²	收益/ 元·hm ⁻²	收入比S0 增加/%	收入比CF 增加/%
CK	7 956.8e	0.0	7 956.8e	-21.7	-50.5
CF	18 480.0b	2 415.0	16 065.0b	58.1	—
S0	11 229.2d	1 065.0	10 164.2d	—	-36.7
S90	15 354.2c	1 554.1	13 800.1c	35.8	-14.1
S150	18 205.1b	1 880.2	16 324.9b	60.6	1.6
S210	19 827.5a	2 206.3	17 621.2a	73.4	9.7
S270	20 423.3a	2 532.4	17 890.9a	76.0	11.4

注:玉米收购价 2.2 元·kg⁻¹,过磷酸钙 700 元·t⁻¹,氯化钾 3 600 元·t⁻¹,尿素 2 300 元·t⁻¹,稳定性长效氮肥 2 500 元·t⁻¹。

入高于农民习惯施氮,随着施用量的增加而增大,增幅达 1.6%~11.4%。

3 讨论

尿素是目前农业生产上最常施用的氮素肥料,施入土壤后在脲酶作用下迅速水解成氨,造成氨挥发损失,又在硝化作用下转化成硝酸根,造成硝酸盐的淋失。因此,抑制脲酶和硝化菌活性是减少氮素损失的有效途径,而脲酶抑制剂和硝化抑制剂就有此功效。研究表明,脲酶抑制剂和硝化抑制剂两者协同施用,可以延缓尿素水解并且使水解产物 NH₄⁺在土壤中保持更长时间,从而减少 NO₃⁻-N 的淋溶^[6],此外,还能在一定程度上抑制反硝化作用,抑制 NH₃ 挥发^[7]。本研究从玉米产量结果得出,随着稳定氮肥施用量的增加,玉米产量呈显著增加趋势,S270 最高,S210 和 S270 无显著性差异,但显著高于农民习惯施氮 CF,高量稳定氮肥施用通过提高玉米产量要素中穗重和穗粒重来增加产量。

氮肥表观利用率、氮肥农学效率、氮肥生理效率和氮肥偏生产力是从不同角度描述作物对肥料养分的利用效率^[2]。施用稳定氮肥较农民习惯施氮显著提高氮肥 NARE 和 NAE,提高 NPFP,除 S270 外,提高 NPE。S150、S210 和 S270 较农民习惯施氮有效提高夏玉米经济效益,收入增加 1.6%~11.4%。这与王晓彬等^[18]研究结果尿素配施抑制剂减少尿素水解、增加氮素有效性和提高作物吸氮量结果一致。

许多试验结果表明,凡是容易发生氮肥淋溶损失和硝化-反硝化损失的地方,施用硝化抑制剂后作物产量均得到提高^[19]。本试验地处淮北平原,雨热同季,降水多集中在 7、8 月份,供试土壤类型为砂姜黑土,具有强烈干缩湿胀特征,土壤质地粘重,结构性差,土壤蓄水保水能力弱,易旱易涝,是我国面积最大的中低产土壤之一^[20]。试验地气候特点和土壤性质决定氮肥极易淋溶和硝化-反硝化损失,故施用硝化抑制剂和脲酶抑制剂复配制成的稳定氮肥能有效降低氮素损失,显著提高夏玉米产量和氮肥利用效率。

4 结论

本试验结果表明,稳定氮肥通过向尿素中添加脲酶和硝化抑制剂可有效减少氮素损失,提高玉米产量和肥料利用率,具有良好的应用前景。综合产量、氮肥利用效率及经济效益的结果,稳定氮肥用量以 210 kg·hm⁻² 处理效果最佳。

参考文献:

- [1] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo. Nutrient management theories and practices for wheat-maize rotation system[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 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.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [3] 赵荣芳. 冬小麦-夏玉米轮作中水氮资源的优化管理及可持续性评价[D]. 北京: 中国农业大学博士论文, 2006.
ZHAO Rong-fang. The sustainability evaluation of the optimized management of water and nitrogen resources for winter wheat-summer maize rotation system[D]. Beijing: PhD dissertation, China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [4] Freney J R, Chen D L, Mosier A R, et al. Use of nitrification inhibitors to increase fertilizer nitrogen recovery and lint yield in irrigated cotton[J]. *Fertilizer Research*, 1993, 34(1): 37-44.
- [5] 孙爱文, 石元亮, 张德生, 等. 硝化/脲酶抑制剂在农业中的应用[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 357-361.
SUN Ai-wen, SHI Yuan-liang, ZHANG De-sheng, et al. Application of nitrification-urease inhibitors in agriculture[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 357-361. (in Chinese)
- [6] 陈振华, 陈利军, 武志杰. 脲酶-硝化抑制剂对减缓尿素转化产物氧化及淋溶的作用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 238-242.
CHEN Zhen-hua, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie. Effects of urease and nitrification inhibitors on alleviating the oxidation and leaching of soil urea's hydrolyzed product ammonium[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2005, 16(2): 238-242. (in Chinese)
- [7] 董欣欣, 武志杰, 张丽莉, 等. 土壤微生物氮固持及氮转化过程对连续施用脲酶/硝化抑制剂的响应[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 189-192.
DONG Xin-xin, WU Zhi-jie, ZHANG Li-li, et al. Responses of soil microbial biomass nitrogen and nitrification-denitrification to continuous application of urease and nitrification inhibitors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 189-192. (in Chinese)
- [8] 张文学, 孙 刚, 何 萍, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1411-1419.
ZHANG Wen-xue, SUN Gang, HE Ping, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1411-1419. (in Chinese)
- [9] 徐星凯, 周礼恺, Oswald Van Cleemput. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对植稻土壤中尿素 N 行为的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1682-1686.
XU Xing-kai, ZHOU Li-kai, Oswald Van Cleemput. Effect of urease/nitrification inhibitors on the behavior of urea-N in the soil planted to rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1682-1686. (in Chinese)
- [10] 李 莉, 李东坡, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂对尿素氮在白浆土中转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 646-650.
LI Li, LI Dong-po, WU Zhi-jie, et al. Effect of urease/nitrification inhibitors on transformation of urea-N in albic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 646-650. (in Chinese)
- [11] 苏 壮. 脲酶/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及其生物有效性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 230-232.
SU Zhuang. Effects of urease/nitrification inhibitor on soil urea-N transformation and bio-availability of urea[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, 36(2): 230-232. (in Chinese)
- [12] 傅 丽, 苏 壮, 石元亮, 等. 脲酶抑制剂(NBPT)与不同硝化抑制剂组合对土壤尿素氮转化的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(3): 339-341.
FU Li, SU Zhuang, SHI Yuan-liang, et al. Effects of urease inhibitors (NBPT) and nitrification inhibitors on urea transformation[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(3): 339-341. (in Chinese)
- [13] 韩宝文, 贾良良, 肖焱波, 等. 脲酶抑制剂对夏玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(4): 116-120.
HAN Bao-wen, JIA Liang-liang, XIAO Yan-bo, et al. Effects of urease inhibitor on summer maize yield and N use efficiency[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(4): 116-120. (in Chinese)
- [14] 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.
LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agro chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 韩宝文, 王激清, 李春杰, 等. 氮肥用量和耕作方式对春玉米产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(2): 28-34.
HAN Bao-wen, WANG Ji-qing, LI Chun-jie, et al. Impacts of nitrogen application rates and tillage modes on yield, nitrogen use efficiency of spring maize and economic benefit[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(2): 28-34. (in Chinese)
- [16] 徐星凯, 周礼恺, Oswald Van Cleemput. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及形态分布的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 339-345.
XU Xing-kai, ZHOU Li-kai, Oswald V C. Effect of urease/nitrification inhibitors on the distribution of transformed urea-N forms in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 339-345. (in Chinese)
- [17] Freney J R, Keerthisinghe D C, Phongpan S, et al. Effect of urease, nitrification, algal inhibitors on ammonia loss and grain yield of flooded rice in Thailand[J]. *Fertilizer Research*, 1995, 40(3): 225-233.
- [18] 王小彬, 辛景峰, Grant C A, 等. 尿素与脲酶抑制剂/硝化抑制剂对春小麦植株氮吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3): 6-10.
WANG Xiao-bin, XIN Jing-feng, Grant C A, et al. Effects of urease with NBPT on N uptake of spring wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1998, 16(3): 6-10. (in Chinese)
- [19] 串丽敏. 硝化/脲酶抑制剂对土壤氮素迁移转化及油菜生长的影响[D]. 保定: 河北农业大学硕士论文, 2010.
CHUAN Li-min. Effects of nitrification/urease inhibitor on nitrogen migration transformation and rape growth[D]. Baoding: PhD dissertation, Agricultural University of Hebei, 2010. (in Chinese)
- [20] 詹其厚, 张效朴, 袁朝良. 秸秆还田改良砂姜黑土的效果及其机理研究[J]. 安徽农业大学学报, 2002, 29(1): 53-59.
ZHAN Qi-hou, ZHANG Xiao-pu, YUAN Chao-liang. Study on amelioration effect and mechanism of returning straw into vertisol[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2002, 29(1): 53-59. (in Chinese)