

几种吡啶类化合物对土壤硝化的抑制作用比较*

李兆君 宋阿琳 范分良 梁永超**

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业部植物营养与肥料重点实验室 北京 100081)

摘 要 为了探明吡啶类化合物对土壤硝化作用的抑制效应,采用室内微宇宙试验,研究了 2-氯-6(三氯甲基)硫酸盐、2-氯-6(三氯甲基)盐酸盐、吡啶混合物和吡啶 X 类化合物对潮土、红壤和水稻土中铵态氮硝化的抑制作用。结果表明,在 35 d 培养期内,吡啶类化合物处理土壤硝态氮含量明显低于对照(未添加吡啶类化合物),吡啶类化合物对土壤中铵态氮的硝化抑制率介于 2.91%~91.92%,抑制强度先逐渐升高后降低,在培养 21 d 时抑制强度达到峰值。不同类型吡啶类化合物对土壤中铵态氮的硝化抑制效果存在差异,吡啶盐酸盐类化合物优于其他几类化合物;吡啶类化合物对土壤中铵态氮的硝化抑制作用与土壤类型有关,对 3 种土壤中铵态氮的硝化抑制作用表现为潮土>水稻土>红壤。就同一土壤而言,硝化抑制强度随着吡啶类化合物用量的增加而增加。

关键词 吡啶类化合物 黑土 红壤 潮土 硝化抑制作用

中图分类号: S318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)05-0561-05

Comparative studies on soil nitrification inhibition by pyridine compounds

LI Zhao-Jun, SONG A-Lin, FAN Fen-Liang, LIANG Yong-Chao

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizers, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract Nitrification inhibition is a well-established fertilizer management that improves fertilizer use efficiency (FUE) in crop production aimed at enhanced profitability, crop quality and healthy environment. As a nitrification inhibitor, pyridine compound has been used for stabilization of fertilizer nitrogen (N) for more than 20 years now. However, pyridine compound represents a broad class of heterocyclic N compounds whose activity as nitrification inhibitors appears to be impacted by Cl and/or trichloromethyl substitution on C atoms immediately adjacent to the N ring. In addition, the solubility of pyridine compounds in water is very low; which decreases nitrification inhibitory activity. To prove nitrification inhibitory effects, 2-chloro-6(3-chloromethylthiazole)-sulfate, 2-chloro-6(3-chloromethylthiazole)-chloride, pyridine compounds mixture and pyridine X compounds were investigated for inhibitory effects on nitrification of fluvo-aquic soil, red soil and paddy soil using laboratory microcosm experiments. The results showed that nitrate contents in soils treated with pyridine compounds were significantly lower than those of the control. Nitrification inhibition rate range was 2.91%~91.92%. Inhibitory effect of pyridine compounds on soil nitrification increased before 21 d, after which it decreased, with peak effect on 21st d. Differences were noted among inhibitory effects of different pyridine compounds. The effects of 2-chloro-6(3-chloromethylthiazole)-chloride were much stronger than those of other pyridine compounds. Differences were also noted in inhibitory effects of pyridine compounds on nitrification in fluvo-aquic soil, red soil and paddy soil. Inhibitory effects of pyridine compounds in the different soils were in the order of: fluvo-aquic soil > paddy soil > red soil. Based on soil type, pyridine compound inhibition effect on nitrification increased with increasing application rate the compounds.

Key words Pyridine compound, Black soil, Red soil, Fluvo-aquic soil, Nitrification inhibition

(Received May 3, 2011; accepted Dec. 28, 2011)

硝化抑制剂是指能抑制铵氧化细菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)活性,从而抑制 NH_4^+ 氧化为

亚硝酸盐的有机或无机化合物^[1]。硝化抑制剂与肥料同时施入土壤,可以减少氮肥的淋溶和反硝化作

* 浙江省重大科技专项(2008C12045-2)资助

** 通讯作者: 梁永超(1961—), 男, 教授, 主要从事植物营养生理与分子生物学方面的研究。E-mail: ycliang@caas.ac.cn

李兆君(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业环境生态方面的研究。E-mail: zjli@caas.ac.cn

收稿日期: 2011-05-03 接受日期: 2011-12-28

用损失,提高氮肥利用率^[2],降低施肥对环境的污染^[3-5],调整氮肥的供应量、供应形式和供应时间^[6]。由此可知,应用硝化抑制剂既可以提高氮肥利用率,又可以减少施用氮肥对环境的污染。尽管目前发现能够起到抑制硝化作用的化合物已有数百种^[7],但能够用于农业生产实践的并不多,而且受化合物本身的物理、化学特性及土壤、环境条件影响,施用效果差异较大,因此开发高效、低毒、适应性广的新型硝化抑制剂势在必行。

硝基吡啶(nitrapyrin)是 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶的简称,是目前为止研究较多也是比较有效的硝化抑制剂之一。Goring^[8]首次报道硝基吡啶具有硝化抑制特性。但是直到 1974 年美国 DOW 化学公司才利用硝基吡啶的硝化抑制特性开发生产出一种硝化抑制剂产品 N-serve,并在农业上推广应用,但是由于受成本和生产能力的限制,美国每年仅有约 100 万 hm^2 的农田应用这个产品。由于硝基吡啶可抑制土壤的硝化反应,使土壤较长时间保持更多的 NH_4^+ ,从而改变土壤中的 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比,进一步影响作物对氮素的吸收。Rodgers 等^[9]报道,应用硝基吡啶后,冬小麦对氮素的吸收增加 9%左右。在没有硝化抑制剂时,棉花对肥料氮的回收仅有 57%,而施用硝化抑制剂硝基吡啶后,棉花对肥料氮的回收增加到 74%^[10]。硝基吡啶与尿素、硝酸铵尿素复合肥应用于玉米地,均可以提高玉米叶片的全氮含量^[11]。然而,由于受生产能力的影响,我国很难从国外进口吡啶化合物进行农田应用。为此,在过去 5 年来,我们与浙江奥复托有限公司联合对吡啶化合物生产工艺进行了革新,实现了吡啶化合物在国内的批量化生产。

为进一步探明吡啶化合物对我国土壤中硝化作用的抑制效应,本研究通过室内培养试验,分析了 2-氯-6-(三氯甲基)硫酸盐、2-氯-6-(三氯甲基)盐酸盐、吡啶混合物和吡啶 X 类化合物等 4 种吡啶类化合物对土壤硝化作用的抑制效果,旨在为吡啶类化合物在我国农业方面的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试吡啶类化合物为 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶硫酸盐(S)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶盐酸盐(H)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶混合物(M)和 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶 X(X),均由浙江上虞奥复托化工有限公司提供。试验所用到的其他试剂均为分析纯。

供试土壤为潮土、红壤和水稻土。其中,潮土取自中国农业科学院农业资源与农业区划研究所廊坊试验基地,红壤取自湖南农业科学院土壤肥料研究所试验基地,水稻土取自浙江省绍兴市水稻田。土壤取回后过 2 mm 筛,并分成两部分,一部分储存于 4 °C 冰箱,供室内培养试验用;另一部分风干后进行基本理化性状测定。3 种供试土壤基本理化性状见表 1。

1.2 试验设计与实施

试验设 13 个处理,各处理土壤中均添加硫酸铵,添加量为 $0.10 \text{ g(N)}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,另外按照质量比分别添加不同量的吡啶类化合物。处理 1:对照(CK),不添加吡啶类化合物;处理 S-1、S-2 和 S-3:添加硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶硫酸盐的量分别为添加纯 N 量的 0.125%、0.25%和 0.5%;处理 H-1、H-2 和 H-3:添加硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶盐酸盐的量分别为添加纯 N 量的 0.125%、0.25%和 0.5%;处理 M-1、M-2 和 M-3:添加硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶混合物的量分别为添加纯 N 量的 0.125%、0.25%和 0.5%;处理 X-1、X-2 和 X-3:添加硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶 X 化合物的量分别为添加纯 N 量的 0.125%、0.25%和 0.5%。每个处理重复 3 次。

将供试土壤从冰箱取出后,用蒸馏水调节土壤含水量为土壤最大持水量的 40%,置于 25 °C 培养箱中活化预培养 7 d,该土为试验用土。然后称取相当于 100.0 g 风干土的试验用土置于 250 mL 的广口玻璃瓶中,按照试验设计分别于试验用土中加入 3.0 mL(相应浓度)硫酸铵和吡啶类化合物的水溶液。用

表 1 供试土壤基本理化性状
Table 1 Basic physico-chemical properties of the tested soils

土壤 Soil	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效氮 Available N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH
潮土 Fluvo-aquic soil	8.24	0.75	1.21	28.23	31.66	50.97	8.48
红壤 Red soil	1.91	0.65	0.99	21.35	5.30	48.30	5.02
水稻土 Paddy soil	9.80	0.91	1.09	26.37	28.82	30.60	7.57

去离子水调节土壤含水量为土壤最大持水量的 50%。然后用塑料布将广口瓶封好,并用针头在塑料布上扎 5 个小孔,以利于通气,之后将封好口的广口瓶置于 25 °C 恒温生化培养箱中暗培养。培养期间,为了保持土壤湿度不变,用称重差减法,每周用去离子水补充水分,并充分通气 1 次。分别于培养的第 3 d、7 d、14 d、28 d 和 35 d 取样,进行土壤硝态氮含量测定。

采用双波长分光光度法测定土壤硝态氮含量。

1.3 数据处理

硝化抑制率=(对照土壤硝态氮含量-处理土壤硝态氮含量)/对照土壤硝态氮含量。试验数据采用 Excel 和 SPSS 统计分析软件进行处理分析,图表中数据以每个处理 3 个重复的平均数±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 吡啶类化合物对土壤硝态氮含量的影响

吡啶类化合物对潮土、红壤和水稻土中硝态氮含量的影响见图 1。由图 1 可知,随着培养时间的延长,不管是否添加吡啶类化合物,3 种土壤中硝态氮含量均逐渐增加,但添加吡啶类化合物处理的土壤硝态氮含量增加幅度低于对照,其中以吡啶盐酸盐处理土壤硝态氮含量增加的幅度最低。吡啶类化合物对土壤铵态氮的硝化抑制效应主要发生在培养的第 7~21 d,对潮土的影响大于其他 2 种土壤。

2.2 吡啶类化合物对土壤中铵态氮的硝化抑制效应

由表 2 可知,2-氯-6(三氯甲基)硫酸盐与硫酸铵混合施入土壤后,对土壤中铵态氮的硝化作用具有较强的抑制性。培养期间,吡啶硫酸盐对土壤中铵态氮的硝化抑制率为 2.91%~91.92%。在培养的前 14 d 硝化抑制强度随着培养时间的延长而逐渐升高,14 d 到 21 d 时达到最大值,21 d 后硝化抑制强度逐渐降低。就同一土壤而言,硝化抑制强度随着吡啶类化合物用量的增加而增加,如在潮土中施用 0.125% 的吡啶硫酸盐 14 d 后,硝化抑制率为 67.97%;而相同培养时间,吡啶硫酸盐的施用量为 0.5% 时,硝化抑制率则达 89.61%。表 2 还表明,吡啶硫酸盐对土壤中铵态氮的硝化抑制作用与土壤类型有关,其在 3 种土壤中的作用效果依次为潮土>水稻土>红壤。

2-氯-6(三氯甲基)盐酸盐与硫酸铵混合施入土壤后,2-氯-6(三氯甲基)盐酸盐对土壤中铵态氮的硝化抑制作用随培养时间的延长而增加。培养第 35 d 时,抑制率最高可达 90.68%。相同土壤,硝化抑制强度随吡啶硫酸盐用量的增加而增加,以潮土为例,当土壤中施用 0.125% 的吡啶盐酸盐培养 35 d 时,硝化抑制率为 71.86%,而当吡啶盐酸盐的施用量为 0.5% 时,硝化抑制率则达 90.68%。由表 2 还可知,吡

啶盐酸盐对土壤中铵态氮的硝化抑制作用与土壤类型有关,其在 3 种土壤中的作用效果依次为潮土>水稻土>红壤。这种差异在吡啶盐酸盐类化合物施入土壤的前期表现尤为明显,如当土壤中施用吡啶盐酸盐的量为 0.125%、培养第 3 d 时,其对红壤中铵态氮的硝化抑制率为-4.91%,表明对红壤铵态氮硝化具有促进作用,而同期吡啶盐酸盐类化合物对潮土中的铵态氮硝化抑制率则高达 60.56%。

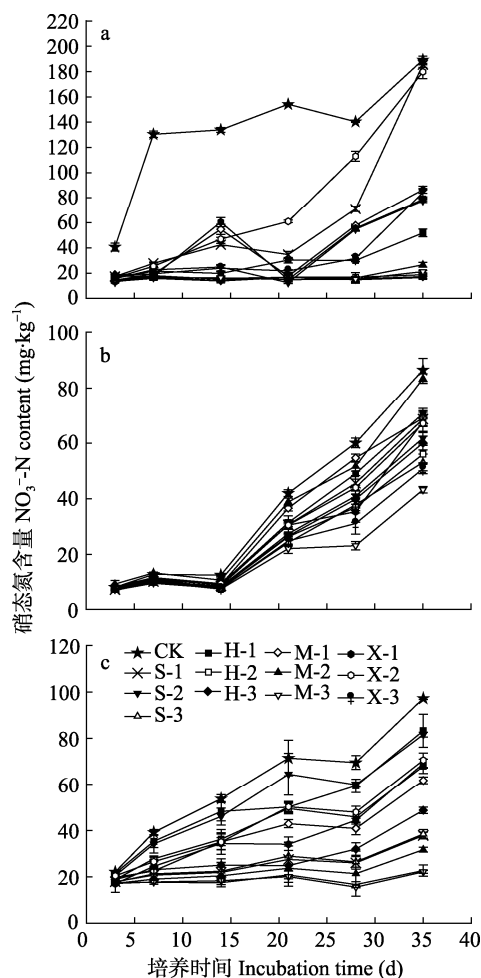


图 1 吡啶类化合物对潮土(a)、红壤(b)和水稻土(c)中硝态氮含量的影响

Fig. 1 Effects of nitrapyrin compounds on NO_3^- -N contents in fluvo-aquic soil (a), red soil (b) and paddy soil (c)

CK: 不添加吡啶类化合物 No pyridine compounds was added; S-1, S-2 和 S-3: 添加 2-氯-6(三氯甲基)吡啶硫酸盐, 添加量分别为添加纯 N 量的 0.125%、0.25% 和 0.5% 2-chloro-6(3-chloromethylthiazole)-sulfate was added with adding rate of 0.125%, 0.25% and 0.5% of applied pure nitrogen, respectively; H-1, H-2 和 H-3: 添加 2-氯-6(三氯甲基)吡啶盐酸盐, 添加量分别为添加纯 N 量的 0.125%、0.25% 和 0.5% 2-chloro-6(3-chloromethylthiazole)-chloride was added with adding rate of 0.125%, 0.25% and 0.5% of applied pure nitrogen, respectively; M-1, M-2 和 M-3: 添加 2-氯-6(三氯甲基)吡啶混合物, 添加量分别为添加纯 N 量的 0.125%、0.25% 和 0.5% Pyridine compound mixture was added with adding rate of 0.125%, 0.25% and 0.5% of applied pure nitrogen applied; X-1, X-2 和 X-3: 添加 2-氯-6(三氯甲基)吡啶 X 化合物, 添加量分别为添加纯 N 量的 0.125%、0.25% 和 0.5% Pyridine X compound was added with adding rate of 0.125%, 0.25% and 0.5% of applied pure nitrogen, respectively. 下同 The same below.

表 2 吡啶类化合物对土壤中铵态氮的硝化抑制率
Table 2 Percentages of inhibition of nitrification in different soil types by pyridine compounds

处理 Treatment	土壤 Soil	培养时间 Incubation time (d)					
		3	7	14	21	28	35
S-1	潮土 Fluvo-aquic	56.76±6.29	78.32±3.18	67.97±8.03	77.43±1.11	50.14±1.52	7.69±2.59
	红壤 Red soil	5.30±3.12	8.14±2.81	21.65±4.43	20.78±3.52	12.21±1.95	13.10±1.56
	水稻土 Paddy soil	18.05±4.58	46.91±6.49	57.78±8.00	57.48±5.57	62.63±9.09	60.32±7.06
S-2	潮土 Fluvo-aquic	60.76±6.62	82.31±4.36	81.34±0.84	91.92±0.76	61.52±0.44	61.39±0.35
	红壤 Red soil	4.37±1.79	12.10±2.39	24.72±3.40	29.13±4.12	21.08±1.20	21.78±2.56
	水稻土 Paddy soil	6.42±3.54	12.46±10.25	11.17±4.88	0.30±0.12	13.91±1.63	14.36±3.53
S-3	潮土 Fluvo-aquic	66.28±1.23	87.62±0.78	89.61±0.47	89.18±1.78	89.63±2.32	91.83±0.63
	红壤 Red soil	2.91±1.49	13.86±3.28	29.60±3.15	37.32±3.25	27.10±2.19	32.82±1.98
	水稻土 Paddy soil	19.24±3.23	45.54±7.36	56.77±7.29	55.30±9.81	62.03±7.98	59.66±6.64
H-1	潮土 Fluvo-aquic	60.56±0.91	83.31±0.84	84.65±1.44	80.72±0.54	78.59±4.55	71.86±2.70
	红壤 Red soil	-4.91±6.94	11.20±3.48	19.90±1.26	11.26±2.31	4.26±1.38	14.31±2.34
	水稻土 Paddy soil	2.71±2.93	13.65±6.41	9.64±3.77	34.07±2.27	12.57±3.18	14.07±5.28
H-2	潮土 Fluvo-aquic	64.27±0.88	86.09±0.11	88.28±0.18	89.28±0.32	88.05±0.66	89.84±0.35
	红壤 Red soil	5.99±1.92	16.63±1.06	30.12±2.04	25.55±2.69	27.93±2.20	32.07±3.78
	水稻土 Paddy soil	15.15±3.37	32.06±3.12	32.18±5.17	34.91±3.00	32.51±6.31	29.95±5.13
H-3	潮土 Fluvo-aquic	67.58±1.16	86.89±0.39	89.18±0.66	89.47±0.39	88.94±1.67	90.68±0.63
	红壤 Red soil	8.21±2.13	13.44±2.35	27.58±1.31	24.86±3.12	22.17±3.45	27.22±3.39
	水稻土 Paddy soil	14.69±5.86	43.66±10.99	53.12±10.35	67.37±5.56	52.91±2.62	49.74±6.32
M-1	潮土 Fluvo-aquic	53.40±3.21	85.89±0.62	59.05±1.19	88.23±2.97	59.04±1.53	53.64±6.51
	红壤 Red soil	7.26±1.78	18.54±2.54	32.44±4.26	17.84±2.15	18.76±2.85	23.21±3.15
	水稻土 Paddy soil	8.99±4.40	37.11±3.20	35.13±8.68	37.22±1.72	42.81±4.88	35.81±5.23
M-2	潮土 Fluvo-aquic	65.96±2.48	87.36±1.16	88.11±1.14	88.84±2.98	88.58±1.21	85.75±6.43
	红壤 Red soil	-14.37±5.78	5.20±2.14	20.26±3.59	12.84±2.36	23.23±3.14	7.25±1.87
	水稻土 Paddy soil	20.82±3.68	46.96±5.82	62.23±6.94	65.32±8.29	70.07±3.54	67.07±5.63
M-3	潮土 Fluvo-aquic	65.96±0.86	87.95±0.37	87.83±0.26	90.04±1.25	89.26±0.87	88.64±0.58
	红壤 Red soil	2.93±1.02	28.20±2.21	44.15±6.23	50.43±3.15	65.58±3.56	51.91±5.36
	水稻土 Paddy soil	20.96±1.47	50.32±0.46	66.17±0.71	70.64±3.56	78.22±4.04	76.99±3.26
X-1	潮土 Fluvo-aquic	57.31±0.35	86.59±0.49	57.01±0.28	90.50±3.23	59.70±0.51	57.55±0.12
	红壤 Red soil	10.97±3.01	19.98±0.87	36.99±0.56	37.86±2.14	49.32±5.41	28.56±1.72
	水稻土 Paddy soil	24.82±3.25	40.30±3.71	38.37±8.21	55.71±0.93	35.94±5.46	31.43±3.26
X-2	潮土 Fluvo-aquic	61.32±1.43	80.35±2.48	66.63±2.88	61.15±5.21	18.05±0.44	3.00±2.92
	红壤 Red soil	9.42±2.35	14.86±1.87	34.50±0.64	37.86±0.94	36.94±1.21	29.10±3.05
	水稻土 Paddy soil	9.87±0.32	35.33±4.82	37.28±6.07	34.62±5.33	30.86±3.82	29.98±2.35
X-3	潮土 Fluvo-aquic	65.65±0.94	84.92±1.11	83.05±1.98	86.18±1.74	77.06±0.55	54.59±3.48
	红壤 Red soil	12.52±3.25	21.96±3.21	48.15±5.13	49.43±3.29	55.41±3.78	46.37±2.75
	水稻土 Paddy soil	22.71±3.73	57.07±2.13	68.65±3.24	72.92±2.12	75.95±1.79	77.51±2.23

在 35 d 培养期间, 2-氯-6(三氯甲基)混合物对土壤中铵态氮的硝化抑制作用在施用后 7 d 达到最大值, 之后趋于平稳, 对潮土、红壤和水稻土中铵态氮的硝化抑制作用分别稳定在 80%、25%和 40%左右。相同土壤, 用量为 0.25%时, 硝化抑制强度显著高于 0.125%的用量, 而 0.5%的用量对土壤中铵态氮的硝化抑制强度与 0.25%用量之间差异不明显。结果还表明, 吡啶混合物对土壤中铵态氮的硝化抑制作用同样与土壤类型有关, 其在 3 种土壤上的作用效果依次为潮土>水稻土>红壤。

2-氯-6(三氯甲基)X 类化合物与硫酸铵混合施入土壤后, 2-氯-6(三氯甲基)X 类化合物对土壤中铵态

氮的硝化作用具有较强的抑制性。培养期间, 吡啶 X 类化合物对土壤中铵态氮的硝化抑制率为 9.42%~90.50%。总体而言, 在培养的前 7 d 硝化抑制强度随培养时间延长而逐渐升高, 7~21 d 时达到最大值, 21 d 后硝化抑制强度逐渐降低。相同土壤, 硝化抑制强度与吡啶 X 类化合物的用量关系不是很明显。表 2 还表明, 吡啶 X 类化合物对土壤中铵态氮的硝化抑制作用与土壤类型有关, 其在 3 种土壤中的作用效果依次为潮土>水稻土>红壤。

3 讨论与结论

吡啶类化合物对土壤中铵态氮的硝化均具有抑

制作用,但是不同类型的吡啶类化合物的抑制效果存在差异,吡啶盐酸盐类化合物优于其他几类化合物,土壤中施用吡啶类化合物后明显抑制土壤中铵态氮向硝态氮的转化,能使较多的氮以铵态氮的形式存在于土壤之中。这将能够极大程度地增加土壤氮素与土壤颗粒表面负电荷的作用能力,从而增加氮素在土壤中的持留能力,大幅度减少土壤氮素向水环境的迁移,从而有望较大程度地提高氮肥利用率、减少农田氮肥用量及农业生产成本和增加农民收入^[12-13]。同时,土壤中硝态氮含量的适度降低,也将能够降低作物体内如蔬菜体内硝酸盐含量,极大程度地改善蔬菜的硝酸盐污染,提高蔬菜品质,从而提高蔬菜的上市价格和经济效益。

硝基吡啶对减少农田氮肥损失,提高氮肥利用率以及提高作物产量有作用。但是,其作用机制主要是通过抑制土壤中硝化细菌的活性来抑制土壤中铵态氮向硝态氮的转化,因此,其硝化抑制作用的强弱与土壤质地、温度、水分、pH、作物种类、氮肥种类和耕作制度等因素关系密切^[14-16]。本试验结果表明,吡啶类化合物对土壤中铵态氮的硝化作用具有较强的抑制效果,这与 Jeffrey^[15]以及我们先前的研究结果^[17]一致。此外,本研究还发现吡啶类化合物对土壤中铵态氮的抑制作用还与土壤类型有关,比如对供试的3种土壤中铵态氮硝化的抑制作用表现为:潮土>水稻土>红壤,这可能是由于不同类型土壤基本理化性质、硝化作用微生物活性和硝化作用强度的差异所导致的^[15,18]。这进一步提示在评估和利用硝基吡啶时,应综合考虑这些因素。鉴于硝基吡啶在我国农业生产中推广应用较少,今后应结合我国的农业生产特点加强室内、尤其是大田试验与示范研究以加快硝基吡啶的推广应用进程。

参考文献

- [1] Hoefft R G. Current status of nitrification inhibitor use in U S agriculture[M]//Hauck R D, Madison W I. Nitrogen in Crop Production. Madison: American Society of Agronomy, 1984: 561-570
- [2] 李兆君, 马国瑞, 王申贵, 等. 腐殖酸长效尿素在土壤中转化及其对玉米增产的效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 121-123
- [3] 马红梅, 秦俊梅, 李兆君, 等. 玉米专用型腐殖酸长效尿素肥效研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 651-655
- [4] 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
- [5] 黄益宗, 冯宗炜, 张福珠. 硝化抑制剂硝基吡啶在农业和环境保护中的应用[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4): 323-326
- [6] 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, 33(4): 310-315
- [7] 武志杰, 史云峰, 陈利军. 硝化抑制作用机理研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 962-970
- [8] Goring C A I. Control of nitrification by 2-Chloro-6-(Trichloromethyl) Pyridine[J]. Soil Sci, 1962, 93(3): 211-218
- [9] Rodgers G A, Penny A, Hewitt M V. Effects of nitrification inhibitors on uptakes of mineralised nitrogen and on yields of winter cereals grown on sandy soil after ploughing old grassland[J]. J Sci Food Agric, 1985, 36(10): 915-924
- [10] 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
- [11] Malzer G L. Incorporation of nitrification inhibitors with urea and urea-NH₄⁺-nitrate for irrigated corn[J]. Fert Res, 1989, 18(2): 141-151
- [12] Yu Q G, Chen Y X, Ye X Z, et al. Evaluation of nitrification inhibitor 3,4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns[J]. Chemosphere, 2007, 67: 872-878
- [13] 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
- [14] 胡博, 樊明寿, 郝云凤. 农田土壤硝态氮淋洗影响因素及阻控对策研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(27): 32-38
- [15] Jeffrey D W. A meta-evaluation of nitrapyrin agronomic and environmental effectiveness with emphasis on corn production in the Midwestern USA[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69: 23-41
- [16] 李兆君, 马国瑞. 腐植酸尿素的制造及其增产作用机理的研究近况[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 799-801
- [17] 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
- [18] Ali R, Iqbal J, Tahir G R, et al. Effect of 3,5-dimethylpyrazole and nitrapyrin on nitrification under high soil temperature[J]. Pak J Bot, 2008, 40(3): 1053-1062